

การหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซี  
โครงข่ายปรับตัวได้

CRITICAL CLEARING TIME DETERMINATION USING ADAPTIVE  
NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM (ANFIS)



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-020-019

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้ระบบอนุมานนิเวโรฟซซี่  
โครงข่ายปรับตัวได้

CRITICAL CLEARING TIME DETERMINATION USING ADAPTIVE  
NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM (ANFIS)



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 144077  
วันเดือนปี 25 มี.ค. 2559

b. 00267040  
i. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CRITICAL CLEARING TIME DETERMINATION USING ADAPTIVE NEURO-  
FUZZY INFERENCE SYSTEM (ANFIS)



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

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ KMITL-2016-EN-M-020-019 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

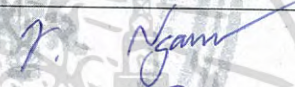




FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การหาค่าเวลาวิกฤตของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้อนุกรมานิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้  
Thesis Title Critical Clearing Time Determination Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)  
นักศึกษา นายสิริวุฒิ คลอวุฒิเสถียร  
รหัสประจำตัว 55610717  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมชาติ จิริวิภากร  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-020-019

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ศ.ดร.อิสระชัย	งามหรุ	
ผศ.ดร.นิรุช	จิรสวรรณกุล	
ผศ.ดร.ปานจิต	ดำรงกุลกำจร	
ผศ.ดร.ชาย	ชมภูอินไหว	
รศ.ดร.สมชาติ	จิริวิภากร	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 16 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 เวลา 13.00-15.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของสถาบันที่มีการนำไปใช้  
ณ วันที่ 16 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้ระบบอนุমানนิวโรฟuzzy โครงข่ายปรับตัวได้
นักศึกษา	นายสิริวุฒิ คลอวุฒิสถียร
รหัสประจำตัว	55610717
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สมชาติ จิริวิภากร

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอวิธีการหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้ระบบอนุमानนิวโรฟuzzy โครงข่ายปรับตัวได้ ซึ่งเป็นระบบอัจฉริยะแบบผสมที่รวมเอาข้อดีระหว่างโครงข่ายประสาทเทียมเข้ากับ ตรรกศาสตร์คลุมเครือ ระบบไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบเป็นระบบมาตรฐานสองระบบ คือระบบ New England 39 บัส และระบบ Western System Coordinating Council 9 บัส ผลที่ได้จากระบบดังกล่าวจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง ที่ได้มาจากการคำนวณเขียนกราฟทีละขั้นตอน ด้วยโปรแกรม Power world version 17 ซึ่งผลที่ได้นั้นสามารถสร้างระบบอนุमानนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้สำหรับระบบไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบและทำนายหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังได้ใกล้เคียงกับวิธีการคำนวณเขียนกราฟทีละขั้นตอน

Thesis Title	Critical Clearing Time Determination Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)
Student	Mr.Siriwut klowutthisatearn
Student ID.	55610717
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Somchat Jiriwibhakorn

## ABSTRACT

This thesis presents Critical Clearing Time Determination Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS). It is a hybrid intelligent system. ANFIS is completed with core competency of neural network and fuzzy logic in order to predict the critical clearing time by using two test systems named New England 39 bus test system and Western System Coordinating Council 9 bus. From the results, it shows the structure of ANFIS for these electrical power systems. Prediction results compared with the critical clearing times obtained from simulations using step-by-step method of Power world program version 17 are accurate

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สมชาติ จิรวินากร ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ซึ่งผู้วิจัยต้องขอกราบพระคุณเป็นอย่างสูง

สุดท้ายผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ นายชนัญพล ทองสิน นางสาวก้านตอง อุปนวล นางสาวหนึ่งฤทัย วีระวัฒน์และนายอาทิตย์ คุ่มครองทรัพย์ น้องๆ นักศึกษาระดับปริญญาตรี ที่ช่วยเหลือในการจัดเก็บข้อมูลเพื่อการทำวิจัยนี้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า



สิริวุฒิ คลอวุฒิเสถียร

# สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VIII
สารบัญรูป .....	IX
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	3
1.3 ขอบเขตการดำเนินการ .....	4
1.4 ขั้นตอนการศึกษา .....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	5
1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ .....	5
บทที่ 2 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า.....	6
2.1 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า.....	6
2.1.1 เสถียรภาพทางมุม.....	6
2.1.1.1 เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก.....	7
2.1.1.2 เสถียรภาพชั่วคราว .....	7
2.1.2 เสถียรภาพทางแรงดัน .....	7
2.2 สมการสวิง.....	7
2.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้าโดยใช้สมการสวิง .....	11
2.3.1 วิธีการเขียนกราฟทีละขั้นตอน (step by step) .....	11
2.3.2 วิธีหลักการพื้นที่เท่ากัน .....	13
2.4 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ .....	16
2.4.1 กรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบพื้นฐาน .....	17
2.4.2 กรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบขั้วแม่เหล็กยื่น (Salient) .....	21

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
บทที่ 3 ระบบอนุมานนิเวโรฟซซีโครงข่ายปรับตัวได้ .....	24
3.1 ปัญญาประดิษฐ์ .....	24
3.1.1 คำนิยามของปัญญาประดิษฐ์ .....	24
3.1.2 วิวัฒนาการของปัญญาประดิษฐ์ .....	26
3.1.3 การประยุกต์ใช้งานปัญญาประดิษฐ์ .....	26
3.1.3.1 Cognitive Science .....	26
3.1.3.2 Robotics .....	27
3.1.3.3 Natural Interface .....	27
3.1.4 ประโยชน์ของปัญญาประดิษฐ์ .....	28
3.2 ระบบอนุมานนิเวโรฟซซีโครงข่ายปรับตัวได้ .....	28
3.3 ฟัซซีลอจิก .....	29
3.3.1 Fuzzy sets .....	31
3.3.2 การดำเนินการพื้นฐานของฟัซซี (operation) .....	35
3.3.3 กฎของฟัซซี .....	37
3.3.4 การอนุมานฟัซซี (Fuzzy Inference) .....	38
3.3.4.1 การอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani (Mamdani-style inference) .....	38
3.3.4.2 การอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno (Sugeno-style Inference) .....	40
3.4 โครงข่ายประสาทเทียม .....	42
3.4.1 แนวคิดพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียม .....	43
3.4.2 องค์ประกอบของโครงข่ายประสาทเทียม .....	44
3.4.3 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม .....	46
3.4.3.1 โครงข่ายแบบชั้นเดียว (single layer) .....	46
3.4.3.2 โครงข่ายแบบหลายชั้น (multi layer) .....	47
3.4.4 ลักษณะการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม .....	47
3.4.4.1 การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised Learning) .....	47
3.4.4.2 การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning) .....	48
3.4.5 อัลกอริทึมที่ใช้ในโครงข่ายประสาทเทียม .....	48
3.5 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียระหว่างตรรกศาสตร์คลุมเครือกับโครงข่ายประสาทเทียม .....	49
3.6 โครงสร้างระบบอนุมานนิเวโรฟซซีโครงข่ายปรับตัวได้ .....	50

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
3.7 การฝึกฝนระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้ .....	52
3.7.1 การฝึกฝนระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้ด้วยวิธี Steepest Descent .....	52
3.7.2 การเรียนรู้แบบผสมผสาน (hybrid learning rule) .....	53
บทที่ 4 การหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้ระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้ .....	57
4.1 ระบบที่ใช้ในการทดสอบ .....	57
4.1.1 ระบบ New England .....	57
4.1.2 ระบบ Western System Coordinating Council .....	62
4.2 ขั้นตอนการจำลองการหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้ระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้ .....	65
4.2.1 การเก็บข้อมูลค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยโปรแกรม Power world .....	65
4.2.2 การสร้างระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้สำหรับค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง .....	67
บทที่ 5 ผลของการจำลอง .....	69
5.1 ผลการจำลองในระบบ New England .....	69
5.1.1 การสร้างโครงสร้างระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้ .....	69
5.1.2 การทดสอบระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้ .....	73
5.2 ผลการจำลองในระบบ Western System Coordinating Council .....	77
5.2.1 การสร้างโครงสร้างระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้ .....	77
5.2.2 การทดสอบระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้ .....	79
บทที่ 6 บทสรุป .....	84
6.1 บทสรุป .....	84
6.2 ปัญหาอุปสรรคและวิธีการแก้ไข .....	84
6.3 ข้อเสนอแนะ .....	85
เอกสารอ้างอิง .....	86
ภาคผนวก ก ค่าเวลาวิกฤติของระบบ New England ที่ใช้ในการศึกษา .....	89

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
ภาคผนวก ข ค่าเวลาวิกฤติของระบบ Western System Coordinating Council (WSCC) ที่ใช้ในการศึกษา .....	109
ภาคผนวก ค บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ .....	123
ประวัติผู้เขียน .....	131



# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ระดับความเป็นสมาชิกของ fuzzy set ของผู้ชายที่สูง .....	32
3.2 เปรียบเทียบข้อดีของการทำการอนุมานฟัซซีทั้งสองแบบ .....	41
3.3 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียระหว่างตรรกศาสตร์คลุมเครือกับโครงข่ายประสาทเทียม .....	49
3.4 สรุปวิธีการเรียนรู้แบบผสมผสานใน ANFIS .....	56
4.1 พารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้ากำลังและหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง .....	58
4.2 พารามิเตอร์ของบัส .....	60
4.3 พารามิเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	62
4.4 พารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้ากำลังและหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง .....	64
4.5 พารามิเตอร์ของบัส .....	64
4.6 พารามิเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	64
5.1 ค่าความผิดพลาด RMSE ในโครงสร้างต่างๆ ของระบบ New England .....	71
5.2 ผลการจำลองของข้อมูลทดสอบเพิ่มเติมของระบบ New England .....	73
5.3 ค่าความผิดพลาดของข้อมูลทดสอบเพิ่มเติมของระบบ New England .....	76
5.4 ค่าความผิดพลาด RMSE ในโครงสร้างต่างๆ ของระบบ WSCC .....	78
5.5 ผลการจำลองของข้อมูลทดสอบเพิ่มเติมของระบบ WSCC .....	80
5.6 ค่าความผิดพลาดของข้อมูลทดสอบเพิ่มเติมของระบบ WSCC .....	82
ก.1 ค่าเวลาวิกฤติของระบบ New England สำหรับการฝึกสอนระบบอนุมานนิวโรฟัซซี โครงข่ายปรับตัวได้ .....	90
ก.2 ค่าเวลาวิกฤติของระบบ New England สำหรับการทดสอบระบบอนุมานนิวโรฟัซซี โครงข่ายปรับตัวได้ .....	105
ข.1 ค่าเวลาวิกฤติของระบบ WSCC สำหรับการฝึกสอนระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ .....	110
ข.2 ค่าเวลาวิกฤติของระบบ WSCC สำหรับการทดสอบระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ .....	120

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมโรเตอร์ต่อเวลา .....	8
2.2 สมมุติฐานที่ใช้ในการเขียนกราฟทีละขั้นตอน .....	12
2.3 ค่า $P_a$ ที่เกิดขึ้นจริงและที่ใช้ในการคำนวณ .....	13
2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมโรเตอร์กับเวลา.....	14
2.5 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและมุมโรเตอร์ .....	15
2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับมุมโรเตอร์ แสดงเสถียรภาพของระบบ .....	16
2.7 โครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	17
2.8 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ก. วงจรสมมูล ข. แผนภาพเฟเซอร์ .....	17
2.9 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกับระบบภายนอกขนาดใหญ่ .....	18
2.10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกับระบบภายนอกขนาดใหญ่ ก. วงจรที่มีการเชื่อมต่อแบบวาย ข. วงจรที่มีการเชื่อมต่อแบบเดดตัว .....	18
2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $P_e$ กับ $\delta$ .....	20
2.12 แผนภาพเฟเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วแม่เหล็กยื่น .....	21
2.13 แผนภาพเฟเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วแม่เหล็กยื่นในสภาวะขั้วครู่ .....	23
3.1 แสดงค่า ก. Boolean logic ข. Multi-valued logic .....	31
3.2 ตัวอย่างการกำหนดขอบเขตของความเป็นสมาชิกของเซตแบบดั้งเดิมและ fuzzy set .....	32
3.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม .....	34
3.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมู .....	34
3.5 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบเกาส์ .....	34
3.6 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบซิงเกิลตัน .....	35
3.7 ฟัชซีเซต A และ ฟัชซีเซต B .....	35
3.8 ฟัชซีเซต A OR B .....	35
3.9 ฟัชซีเซต A AND B .....	36
3.10 NOT ฟัชซีเซต A .....	36
3.11 โครงสร้างการอนุมานฟัชซีแบบของ Sugeno อันดับศูนย์ .....	41
3.12 ตัวอย่างฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตแบบ Sugeno .....	41

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ hard-limit .....	45
3.14 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้น .....	45
3.15 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลอกซิกมอยด์ .....	45
3.16 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบแทนซิกมอยด์ .....	46
3.17 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นที่มีชั้นซ่อน 1 ชั้น .....	47
3.18 โครงสร้างระบบอนุมานฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ .....	50
4.1 วันไลน์ไดอะแกรมของระบบทดสอบ New England.....	57
4.2 โมเดลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบพื้นฐาน (Classical models) .....	58
4.3 วันไลน์ไดอะแกรมของระบบทดสอบ WSCC 9 bus .....	63
4.4 โมเดลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบละเอียด (Detail models) .....	63
4.5 แผนภาพไดอะแกรมกระบวนการจำลอง .....	65
4.6 กราฟแสดงมุมโรเตอร์กับเวลา .....	66
4.7 แสดงค่าความผิดพลาดจากการฝึกสอน 100 รอบการฝึกสอน .....	68
4.8 ค่าความผิดพลาด .....	68
5.1 กราฟ pimf เมื่อ $a=1, b=4, c=5$ และ $d=10$ .....	70
5.2 โครงสร้างระบบอนุมานนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวที่ดีที่สุดในการทดสอบ ของระบบ New England .....	72
5.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของระบบอนุมานนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ ของระบบ New England .....	73
5.4 กราฟเปรียบเทียบค่าเวลาวิกฤติของระบบ New England .....	76
5.5 กราฟ trimf เมื่อ $a=3, b=6$ และ $c=8$ .....	77
5.6 โครงสร้างระบบอนุมานนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวที่ดีที่สุดในการทดสอบ ของระบบ WSCC .....	79
5.7 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของระบบอนุมานนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ ของระบบ WSCC .....	79
5.8 กราฟเปรียบเทียบค่าเวลาวิกฤติของระบบ WSCC .....	82

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันนี้ได้มีจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ในทุกปีมีความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ระบบไฟฟ้ากำลังจึงมีความสลับซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้การใช้ไฟฟ้าเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและมีความมั่นคงสูง เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อการส่งไฟฟ้าไปตามระบบไฟฟ้ากำลัง

เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เนื่องจาก เมื่อเกิดการรบกวนขึ้นภายในระบบจะทำให้เกิดความไม่สมดุลของกำลังไฟฟ้ากับกำลังกลที่ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และส่งผลให้เกิดการแกว่งภายในระบบ โดยการแกว่งนั้นไม่สามารถกลับสู่สภาวะปกติได้ ทำให้อุปกรณ์ป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำเป็นต้องปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบก่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเกิดความเสียหาย ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องอื่นที่เหลืออยู่ภายในระบบต้องรับภาระเพิ่มมากขึ้นเพื่อชดเชยส่วนที่หายไป จึงอาจถูกปลดออกด้วยเช่นกัน ถ้าผลกระทบต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เกิดขึ้นส่งผลต่อกันไปเรื่อยๆ จะทำให้เกิดการล่มของระบบได้ ระบบจึงสูญเสียเสถียรภาพ[1]

ปัญหาการรบกวนของระบบไฟฟ้ากำลังที่พบมากที่สุดคือ การเกิดการลัดวงจรภายในระบบไฟฟ้ากำลัง เมื่อเกิดการลัดวงจรภายในระบบไฟฟ้ากำลัง จะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังอย่างรุนแรง โดยระบบป้องกันของระบบไฟฟ้ากำลังนั้น ต้องกำจัดกระแสลัดวงจรออกจากระบบภายในค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง (Critical Clearing Time ,CCT) หากระบบป้องกันของระบบไฟฟ้ากำลังไม่สามารถกำจัดกระแสลัดวงจรออกจากระบบได้ภายในค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง จะส่งผลให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง เป็นเหตุให้ระบบล่มหรือเกิดเหตุการณ์ไฟดับเป็นวงกว้าง (Black out) ได้

ซึ่งการคำนวณค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันนั้น จำเป็นต้องอาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ เพราะระบบไฟฟ้ากำลังเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่และมีการเชื่อมโยงภายในระบบกันมาก ตั้งแต่ส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือระบบการผลิตไฟฟ้า ส่งผ่านระบบสายส่งไฟฟ้ากำลังจนถึงส่วนผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบจำหน่าย ซึ่งการหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากการจำลองในโปรแกรมต่างๆ ส่วนใหญ่มักใช้วิธีการคำนวณเขียนกราฟทีละขั้นตอน โดยอาศัยสมการสวิงในการหา นั้นมีความยุ่งยากและสิ้นเปลืองเวลาในการหา จึงเป็นสาเหตุให้นักวิจัยหลายท่านได้ทำการวิจัยเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว

ตัวอย่างของนักวิจัยเกี่ยวกับคำนวณค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังเช่น Warut Suampun ได้เสนอวิธีการที่อาศัยขอบเขตของเสถียรภาพ โดยนำวิธีการคำนวณค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง 4 วิธีมาเปรียบเทียบผลที่ได้กับ ซึ่งประกอบด้วย วิธีการทาง Time-domain, The Controlling UEP Method, Hyperplane Method และ Quadratic Approximation Approach ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพที่แตกต่างกันค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังในระบบไฟฟ้ากำลังที่แตกต่างกัน โดยในวิธีการในแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน [2]

Naoto Yorino, Ardyono Priyadi Hironori Kakui และ Mitsuhiro Takeshita นำเสนอกระบวนการหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังโดยอาศัย critical trajectory ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่อาศัยการหาค่าเริ่มต้น แต่อาศัยเรื่องค่าปัญหาของขอบเขต ซึ่งสามารถหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังได้รวดเร็วและถูกต้อง แต่วิธีการนี้ไม่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก รวมทั้งเมื่อมีการวิเคราะห์โหมดลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบละเอียด [3]

H. H. Al Marhoon ใช้วิธีการ A Practical Method ในการประเมินค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยอาศัยสมการพลังงานของเครื่องจักร ซึ่งทำให้ประเมินหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังได้รวดเร็ว จึงเหมาะสมสำหรับการคำนวณเบื้องต้นก่อนทำการคำนวณอย่างละเอียดต่อไป [4]

N.Ranganathan และ K.Senthil ได้นำเสนอการหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังโดยอาศัยวิธีการทาง Time-domain โดยนำ 4<sup>th</sup> order Runge- kutta method เข้ามาใช้ในการแก้สมการ ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการหาคำตอบ [5]

Ling-Yu Ren, Fang Tian, Jian-Feng Yan, Zhi-Hong Yu, Feng Su และ Tao Wu ได้เสนอวิธีการแบบผสมผสานระหว่าง วิธีการทาง Time-domain ซึ่งมีความถูกต้องแม่นยำสูงแต่ต้องใช้เวลาในการหาเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังที่นาน และ The PEBS method ซึ่งอาศัย transient energy function โดยมีข้อดีในเรื่องของความเร็วในการคำนวณแต่มีจุดด้อยในเรื่องของความถูกต้อง ซึ่งทำให้ได้วิธีการคำนวณหาเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความถูกต้องแม่นยำและใช้เวลารวดเร็ว โดยใช้ The PEBS method คำนวณค่าเริ่มต้นของวิธีการทาง Time-domain [6]

A. Karami และ S.Z. Esmaili ได้นำโครงข่ายประสาทเทียมเข้ามาประมาณค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเป็นวิธีที่คำนวณค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังได้รวดเร็ว แต่ความ

ถูกต้องของค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังจะขึ้นอยู่กับการศึกษาอินพุตของโครงข่ายประสาทยุติวมรวมทั้งกระบวนการฝึกสอนของโครงข่ายประสาทยุติวม[7]

Witsawa Phootrakornchai และ Somchat Jiriwibhakorn ได้เสนอการนำ Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System คำนวณค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถคำนวณค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังได้รวดเร็ว และมีการเปรียบเทียบผลที่ได้กับการคำนวณด้วยโครงข่ายประสาทยุติวม ซึ่งวิธีการคำนวณค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้าด้วย Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการคำนวณด้วยวิธีการโครงข่ายประสาทยุติวม[8]

Avishek Paul และ Nilanjan Senroy ได้นำเสนอวิธีการ ที่เรียกว่า linear curve fitting technique โดยอยู่บนพื้นฐานของ transient energy function ซึ่งเหมาะสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมโยงกันในลักษณะ inter-area และมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าผ่านทาง tie line ในปริมาณมาก แต่มีปัญหาในการหาเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังในระบบที่มีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าผ่านทาง tie line ในปริมาณที่ต่ำ[9]

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS) โดยเปรียบเทียบผลที่ได้กับวิธีการเขียนกราฟทีละขั้นตอน (step-by-step method) ซึ่งได้มาจากการจำลองด้วย Transient Stability (TS) ในโปรแกรม Power world Version 17

## 1.2 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อเป็นการศึกษา หาวิธีการหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง ที่มีประสิทธิภาพ โดยการนำระบบอนุมานนิวโรฟซซีโครงข่ายปรับตัวได้ ซึ่งระบบอนุมานนิวโรฟซซีโครงข่ายปรับตัวได้มีจุดเด่นในเรื่องของความสามารถเรียนรู้และจดจำรูปแบบของข้อมูลในลักษณะต่างๆ ได้ ดังนั้นถ้ามีข้อมูลรูปแบบใหม่ ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับข้อมูลรูปแบบเดิม ระบบอนุมานนิวโรฟซซีโครงข่ายปรับตัวได้จะสามารถในประมาณค่าหาคำตอบได้และใกล้เคียงกับความจริง ดังนั้น ระบบอนุมานนิวโรฟซซีโครงข่ายปรับตัวได้จึงเหมาะสมสำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อน และมีจำนวนข้อมูลมาก ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการเรียนรู้ที่เหมาะสม จะทำให้ได้โครงสร้างระบบอนุมานนิวโรฟซซีโครงข่ายปรับตัวได้ที่สามารถนำไปประมาณเสถียรภาพชั่วคราวได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

### 1.3 ขอบเขตการดำเนินการ

1. หาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง (Critical Clearing Time ,CCT) ที่เกิดจากลัดวงจรแบบสามเฟสสมมาตร ในตำแหน่งใดๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้ระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้ ในโมเดลฟซี Sugeno อันดับที่ 1 กระบวนการเรียนรู้แบบผสมผสาน ผลที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการเขียนกราฟทีละขั้นตอน ซึ่งมาจากการจำลองด้วย Transient Stability (TS) ในโปรแกรม Power world Version 17

2. ระบบที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย 2 ระบบ คือ 1. ระบบทดสอบ New England 39 บัส มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 เครื่อง โดยให้แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบควบคุมเป็นแบบพื้นฐาน ไม่มีการพิจารณาถึงการชดเชยต่างๆ ในระบบ มีการกำหนดขอบเขตที่สนใจในการศึกษา โดยให้มีเกิดการลัดวงจรเฉพาะขอบเขตการศึกษา และให้มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณภาระไฟฟ้าในตำแหน่งที่ทำการศึกษา 2. ระบบทดสอบ Western System Coordinating Council (WSCC) 9 บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เครื่อง โดยให้แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบละเอียด ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณภาระไฟฟ้า

### 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีเสถียรภาพชั่วคราว และ วิธีการหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง
2. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่ต้องใช้ในการคำนวณวิธีหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังของระบบ New England และระบบ Western System Coordinating Council (WSCC)
3. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม power world Version 17 สำหรับการหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง ด้วยฟังก์ชัน Transient Stability (TS)
4. ทำการจำลองเพื่อหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง ด้วยฟังก์ชัน Transient Stability (TS) ในโปรแกรม power world Version 17 โดยกำหนดให้ใช้การลัดวงจรแบบสามเฟสสมมาตร โดยใช้เหตุการณ์โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณภาระไฟฟ้า รวมทั้งตำแหน่งการลัดวงจร ในบริเวณที่ทำการศึกษา
5. ศึกษาสถาปัตยกรรมของระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้
6. ออกแบบข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต และนำข้อมูลค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม power world Version 17 มาแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือชุดฝึกสอน และชุดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทำการฝึกสอนและทดสอบประสิทธิภาพของระบบอนุมานนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้
8. หาโครงสร้างระบบอนุมานนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้ที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหา

สูงสุด

9. วิเคราะห์และสรุปผล

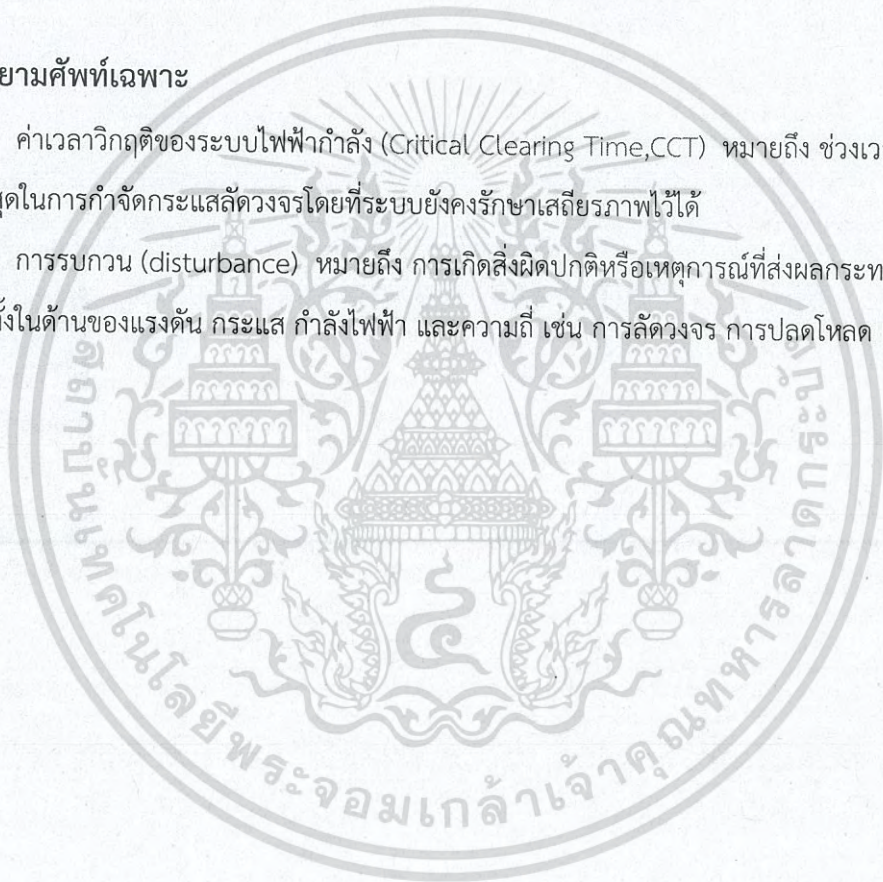
### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถสร้างระบบอนุมานนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้ เพื่อคำนวณค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังได้

### 1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

ค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง (Critical Clearing Time, CCT) หมายถึง ช่วงเวลาที่นานที่สุดในการกำจัดกระแสลัดวงจรโดยที่ระบบยังคงรักษาเสถียรภาพไว้ได้

การรบกวน (disturbance) หมายถึง การเกิดสิ่งผิดปกติหรือเหตุการณ์ที่ส่งผลกระทบต่อระบบทั้งในด้านของแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า และความถี่ เช่น การลัดวงจร การปลดโหลด เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

### 2.1 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเป็นความสามารถของระบบในการรักษาสภาพสมดุลของการทำงานภายใต้สภาพการทำงานปกติ และสามารถที่จะนำระบบกลับสู่สภาพสมดุลที่ยอมรับได้ ภายหลังจากการเกิดการรบกวนหรือการเปลี่ยนแปลงภายในระบบ ซึ่งลักษณะของการรบกวนนี้จะเป็นการรบกวนขนาดเล็ก (Small disturbance) หรือการรบกวนขนาดใหญ่ (Large disturbance) ก็ได้ ซึ่งเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าสามารถแบ่งได้ดังนี้[10]

#### 2.1.1 เสถียรภาพทางมุม

เสถียรภาพทางมุม (Angular Stability) คือความสามารถของระบบในการรักษาสภาพซิงโครนิซึม (Synchronism) ภายใต้อาการสภาวะคงที่ซึ่งเป็นจุดสมดุลระหว่างกำลังบิดทางกล (Mechanical torque) และกำลังบิดทางไฟฟ้า (Electrical torque) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีความเร็วคงที่ ถ้าสภาพของระบบเปลี่ยนแปลงไปเมื่อถูกรบกวน จุดสมดุลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไป เป็นผลทำให้อัตราเร่งของมุมโรเตอร์ (Rotor Angle) เพิ่มขึ้นหรือลดลง และถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องหนึ่งหมุนเร็วกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกเครื่องหนึ่ง มุมโรเตอร์เทียบกับแกนโรเตอร์ของเครื่องนั้น จะมากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หมุนช้ากว่า ความแตกต่างของมุมนี้เป็นผลให้ภาระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ช้าจะย้ายไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เร็ว ส่งผลให้ลดความแตกต่างของความเร็วและมุมที่แยกออกจากกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและมุมโรเตอร์ซึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น

การเพิ่มของขนาดมุมโรเตอร์ที่แยกออกจากกัน เกิดขึ้นจากความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าลดลง ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและมุมโรเตอร์ และยิ่งความแตกต่างของมุมโรเตอร์ที่แยกออกจากกันเพิ่มขึ้น เสถียรภาพของระบบจะยิ่งลดลง จึงกล่าวได้ว่าเสถียรภาพของระบบจึงขึ้นอยู่กับความแตกต่างของมุมโรเตอร์ที่แยกกันของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพการทำงานจากระบบไฟฟ้า และอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ

ถ้ามุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงมากเกินไป จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นสูญเสียสภาพซิงโครนิซึมและทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจากจากระบบไฟฟ้า การสูญเสียสภาพซิงโครนิซึมในระบบไฟฟ้าสามารถเกิดได้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องเดียวหรือหลายเครื่องก็ได้ ซึ่งก็อาจจะกลับมาสู่สภาพซิงโครนิซึมใหม่ได้ด้วยการขนานเข้าสู่ระบบอีกครั้ง

เสถียรภาพทางมุมนี้ สามารถแบ่งได้ 2 ชนิดด้วยกันคือ

### 2.1.1.1 เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก

เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก (small signal-disturbance) เป็นความสามารถของระบบไฟฟ้าที่รักษาสภาพเชิงโครนัสได้เมื่อถูกรบกวนปริมาณเล็กน้อยที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในระบบซึ่งมักมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดหรือกำลังการผลิตเพียงเล็กน้อย

### 2.1.1.2 เสถียรภาพชั่วคราว

เสถียรภาพชั่วคราว (Transient stability) เป็นความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลังที่สามารถรักษาสภาพเชิงโครนัสเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในระบบอย่างรวดเร็ว หรือเกิดการรบกวนชั่วคราวอย่างรุนแรง (Large disturbance) ในระบบได้ เช่น การเกิดการลัดวงจรในระบบสายส่ง, การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของโหลดขนาดใหญ่ การหลุดออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งผลตอบสนองของระบบดังกล่าวจะสามารถวิเคราะห์ได้ในลักษณะไม่เชิงเส้น โดยใช้ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและมุมโรเตอร์ ซึ่งเสถียรภาพแบบนี้จะขึ้นอยู่กับสภาพการทำงานเริ่มต้นของระบบและความรุนแรงของการรบกวนที่เกิดขึ้น

### 2.1.2 เสถียรภาพทางแรงดัน

เสถียรภาพทางแรงดัน (Voltage Stability) เป็นความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลังในการรักษาแรงดันให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ภายใต้สภาวะการทำงานปกติและภายหลังจากการถูกรบกวน

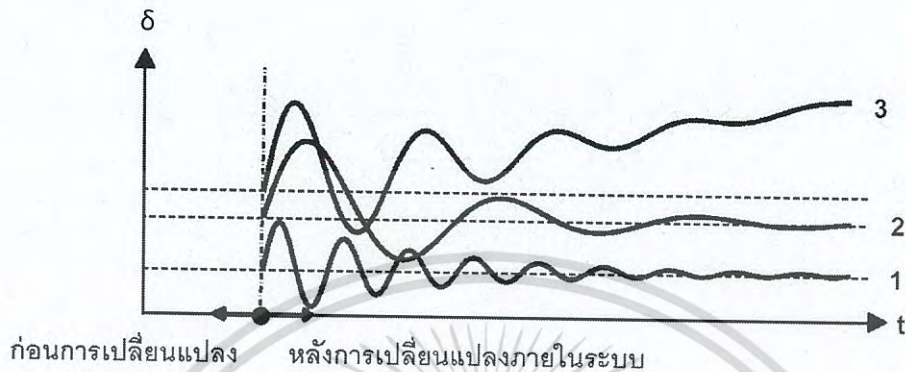
## 2.2 สมการสวิง

ระบบไฟฟ้ากำลัง การพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง สามารถพิจารณาได้จากมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในระบบไฟฟ้า มุมโรเตอร์จะมีเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยเช่นเดียวกัน ซึ่งสามารถเขียนการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลานี้ได้ด้วยสมการดิฟเฟอเรนเชียล [1]

เมื่อพิจารณารูปของความสัมพันธ์ระหว่าง มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับเวลาสามารถพิจารณาเสถียรภาพได้จาก ถ้าเกิดการรบกวนขนาดใหญ่ขึ้นภายในระบบ จะส่งผลให้มุมโรเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลง ถ้ามุมโรเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถกลับเข้าสู่สภาวะปกติหรือเข้าสู่ค่าคงที่ใดๆได้ แสดงว่า ระบบมีเสถียรภาพ แต่ถ้าไม่สามารถกลับเข้าสู่สภาวะปกติได้ มุมโรเตอร์มีขนาดเพิ่มขึ้นจนมากกว่า 180 องศา แสดงว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องนั้นสูญเสียเชิงโครนัสซึม ระบบจึงไม่มีเสถียรภาพ

จากรูปที่ 2.1 เห็นได้ว่า หลังเกิดการรบกวนขนาดใหญ่กับระบบ จะทำให้เกิดเปลี่ยนแปลงภายในระบบ ซึ่งเครื่องจักรหมายเลข 1 และ 2 มีการแกว่งของมุมโรเตอร์เล็กน้อยก่อนกลับเข้าสู่

ค่าคงที่ใดๆ ดังนั้น เครื่องจักรหมายเลข 1 และ 2 สามารถรักษาสภาพซิงโครนิสซึมไว้ได้ แต่เครื่องจักรหมายเลข 3 มีมุมโรเตอร์เพิ่มมากขึ้นตามเวลาและไม่กลับเข้าสู่ค่าคงที่ใดๆ แสดงว่าเครื่องจักรหมายเลข 3 สูญเสียซิงโครนิสซึม จึงกล่าวรวมได้ว่า ระบบไม่มีเสถียรภาพหลังจากเกิดการรบกวนขนาดใหญ่กับระบบ



รูปที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมโรเตอร์ต่อเวลา

สิ่งสำคัญในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้านั้นจำเป็นต้องมี ข้อมูลของระบบไฟฟ้า ได้แก่ ผลของการทำโหลดโพล จะทำให้ทราบถึง กำลังไฟฟ้าและแรงดันที่บัสต่างๆ รวมทั้งสถานะของระบบไฟฟ้าก่อนที่จะเกิดการรบกวนภายในระบบ ซึ่งจะเป็นค่าเริ่มต้นในการพิจารณาหาเสถียรภาพระบบไฟฟ้า วงจรสมมูลของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ ซึ่งจะนำไปใช้ประกอบเข้าด้วยกันแทนระบบไฟฟ้ากำลัง โดยจำลองเป็นโมเดลแทนการรบกวนภายในระบบ และสมการดิฟเฟอเรนเชียลแสดงการเปลี่ยนแปลงมุมโรเตอร์ต่อเวลา นอกจากนี้ยังต้องนำองค์ประกอบอื่นๆ มาพิจารณาด้วย ได้แก่ ความเร็วของเบรกเกอร์ที่มีอยู่ในระบบ และการจำลองเหตุการณ์ผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบเพื่อทดสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

โดยทั่วไปแล้วการทดสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังจะทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบ เพราะการลัดวงจรเป็นการรบกวนระบบที่ส่งผลกระทบต่อระบบอย่างรุนแรง โดยที่การลัดวงจรแบบสามเฟสจะส่งผลกระทบต่อระบบมากที่สุด ในขณะที่การเกิดเหตุการณ์ผิดปกติกับระบบอย่างอื่น เช่น การปลดโหลดของระบบ การปลดสายส่ง มีผลกระทบต่อระบบน้อยกว่าการเกิดการลัดวงจร

การพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังสามารถทำได้โดยการดูผลของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมโรเตอร์กับเวลา จึงสามารถหาความสัมพันธ์ได้จาก ความสัมพันธ์

ทางกลของเครื่องจักรและกำลังกลทางไฟฟ้า ซึ่งสมการดิฟเฟอเรนเชียลที่ได้มาจากการตอบสนองทางกลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดภายในระบบแรงบิดที่กระทำต่อโรเตอร์ของเครื่องจักรตามความเร่งเชิงมุมสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.1

$$T = \frac{WR^2}{g} \alpha \quad (2.1)$$

เมื่อ  $T$  ผลรวมของแรงบิด  $WR$  โมเมนต์ความเฉื่อย  $g$  อัตราความเร่งของโลก  $\alpha$  ความเร่งเชิงมุม มุมทางไฟฟ้า  $\theta_e$  สัมพันธ์กับมุมทางเครื่องกล  $\theta_m$  ตามจำนวนขั้ว  $P$  ของเครื่องจักรดังสมการที่ 2.2

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m \quad (2.2)$$

ความถี่ของระบบสัมพันธ์กับจำนวนขั้ว และความเร็วเครื่องจักร  $N$  ตามสมการที่ 3

$$f = \frac{N \cdot P}{120} \quad (2.3)$$

ดังนั้น

$$\theta_e = \frac{60f}{N} \theta_m \quad (2.4)$$

มุมทางไฟฟ้า  $\delta$  ของโรเตอร์ของเครื่องจักรกลสัมพันธ์กับแกนหมุนเชิงโครนัสตามสมการ

$$\delta = \theta_e - \omega_o t \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\omega_o$  เป็นความเร็วเชิงโครนัสและ  $t$  คือเวลา

จากสมการที่ 2.5 ทำการอนุพันธ์ได้

$$\omega = \frac{d\delta}{dt} = \frac{d\theta_e}{dt} - \omega_o \quad (2.6)$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d^2\theta_e}{dt^2} \quad (2.7)$$

ดังนั้น

$$T = \frac{WR^2}{g} \cdot \frac{N}{60f} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (2.8)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ 2.8 ในรูปของเปอร์ยูนิต โดยให้แรงบิดฐาน  $T_b$  คือแรงบิดที่ใช้กำเนิดกำลังไฟฟ้าที่ความเร็วพิกัด

$$T_b = \frac{S_b \times \left(\frac{550}{0.746}\right)}{2\pi \cdot \left(\frac{N}{60}\right)} \quad (2.9)$$

$$T = \frac{\frac{WR^2}{g} \cdot \frac{2\pi}{f} \cdot \left(\frac{N}{60}\right)^2 \cdot \frac{0.746}{550} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2}}{S_b} \quad (2.10)$$

ค่าคงที่ความเฉื่อย (Inertia Constant)  $H$  ของเครื่องจักรถูกนิยามให้เป็นพลังงานจลน์ที่ความเร็วพิกัด ดังสมการที่ 2.11

$$H = \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{WR^2}{g} \cdot \left(\frac{N}{60}\right)^2 \cdot \frac{0.746}{550} \cdot (2\pi)^2}{S_b} \quad (2.11)$$

โดยมีหน่วยเป็น kW-sec/kVA

ดังนั้น

$$T = \frac{H}{\pi f} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (2.12)$$

กรณีที่โมเมนต์แดมปีง (Damping) และความสูญเสียของเครื่องจักรกล แรงบิดเร่ง  $T_\alpha$  (Accelerating Torque) เขียนได้ดังสมการที่ 2.13

$$T_\alpha = T_m - T_e \quad (2.13)$$

จะได้ว่า

$$T_m - T_e = \frac{H}{\pi f} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (2.14)$$

เนื่องจากแรงบิดในสมการที่อยู่ในรูปของเปอร์ยูนิต ดังนั้นแรงบิดและกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากันสำหรับความเร็วที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

$$P_m - P_e = \frac{H}{\pi f} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (2.15)$$

$$P_m - P_e = P_a = M \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ 2.16 เป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลของมุม  $\delta$  หรือมุมโรเตอร์กับเวลา ถูกเรียกว่า สมการสวิง ซึ่งการพิจารณาหาเสถียรภาพนั้นจะนำสมการสวิงไปทำการเขียนกราฟระหว่าง มุม  $\delta$  กับเวลา โดยจะเรียกกราฟที่ได้ว่า กราฟสวิง

ในความเป็นจริงนั้น ค่า  $M$  ในสมการที่ 2.16 มีค่าไม่คงที่ ในทางปฏิบัติการพิจารณา เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง จะพิจารณาได้จากการสวิงของกราฟในช่วงเวลาสั้นๆ เท่านั้น ซึ่ง ในช่วงเวลาดังกล่าวความเร็วของโรเตอร์มีเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

### 2.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้าโดยใช้สมการสวิง

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังสามารถพิจารณาได้จากการหากราฟสวิงซึ่ง ได้มาจากสมการสวิง ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถนำสมการสวิงมาแก้สมการทางคณิตศาสตร์ได้โดยตรง เนื่องจากค่า  $P_m - P_e$  มีเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาตลอดเวลา ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ดังนี้

#### 2.3.1 วิธีการเขียนกราฟทีละขั้นตอน (step-by-step method)

การเขียนกราฟทีละขั้นตอน เป็นวิธีการหนึ่งสำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดย มีการแบ่งช่วงเวลาคำนวณออกเป็นช่วงๆ และหาค่ามุม  $\delta$  ที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา เพื่อให้ง่ายต่อ การคำนวณ จึงต้องอาศัยสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. กำลังไฟฟ้าแรง มีค่าคงที่จากกึ่งกลางของช่วงเวลาหนึ่งไปยังกึ่งกลางของอีกช่วงเวลาหนึ่ง ดังภาพ 2.2ก

2. ความเร็วเชิงมุมมีค่าคงที่ตลอดในแต่ละช่วงเวลา ดังภาพ 2.2ข

จากสมการสวิงและสมมติฐานดังกล่าว สามารถพิจารณาความสัมพันธ์เพื่อหาการเขียนกราฟ ทีละขั้นตอนได้ดังนี้

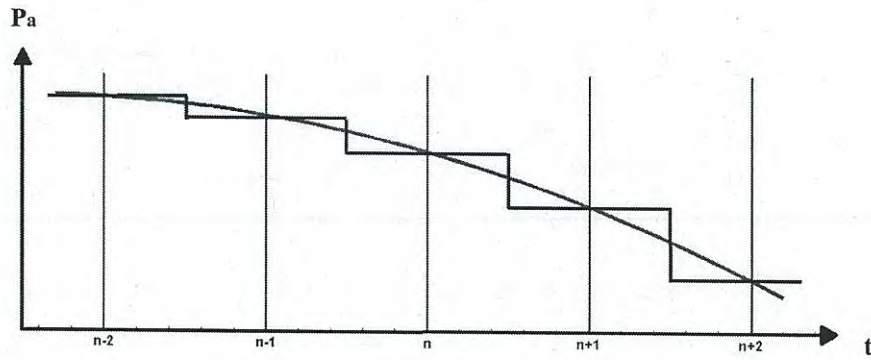
$$\omega_{n-1/2} - \omega_{n-3/2} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \cdot \Delta t = \frac{d^2\delta}{dt^2} \cdot \Delta t \quad (2.17)$$

จากสมการสวิง ได้ว่า

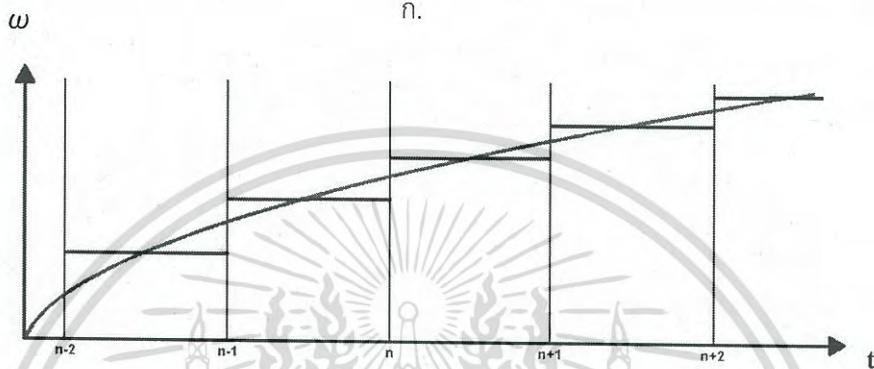
$$\omega_{n-1/2} - \omega_{n-3/2} = \frac{Pa(n-1)}{M} \cdot \Delta t \quad (2.18)$$

การเปลี่ยนแปลงของความเร็วเชิงมุมมีความสัมพันธ์กับมุมในช่วงเวลาต่างๆ ดังนี้

$$\Delta\delta_{n-1} = \delta_{n-1} - \delta_{n-2} = \Delta t \cdot \omega_{n-3/2} \quad (2.19)$$



ก.



ข.

รูปที่ 2.2 สมมติฐานที่ใช้ในการเขียนกราฟที่ละขั้นตอน

ก. กำลังไฟฟ้าแรงคงที่ระหว่างกึ่งกลางช่วงเวลา

ข. ความเร็วเชิงมุมมีค่าคงที่ระหว่างช่วงเวลา

$$\Delta\delta_n = \delta_n - \delta_{n-1} = \Delta t \cdot \omega_{n-1/2} \quad (2.20)$$

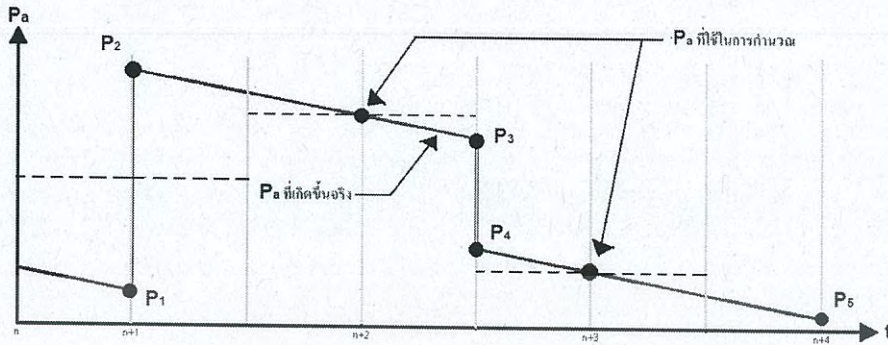
$$\delta_n - \delta_{n-1} = \Delta t \cdot (\omega_{n-1/2} - \omega_{n-3/2}) \quad (2.21)$$

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + \frac{P_{a(n-1)}}{M} (\Delta t)^2 \quad (2.22)$$

สมการที่ 2.22 ได้จากสมมติฐานที่ค่า  $P_a$  มีค่าคงที่จากกึ่งกลางช่วงเวลาหนึ่งไปยังอีกกึ่งกลางช่วงเวลาหนึ่งและค่าความเร็วเชิงมุมมีค่าคงที่ภายในช่วงเวลาหนึ่ง ดังนั้น การพิจารณาระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ถ้าการเปลี่ยนแปลงนั้นเกิดขึ้นในเวลาใดเวลาหนึ่ง ที่ไม่ใช่กึ่งกลางของช่วงเวลา จะต้องมีการเฉลี่ยเพื่อหาค่า  $P_a$  มาใช้ในการคำนวณ

จากสมมติฐานดังกล่าว สามารถเขียนค่า  $P_a$  ที่ใช้คำนวณได้กราฟดังรูปที่ 2.3 ซึ่งเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงภายในระบบที่เวลา  $n+1$  มีค่า  $P_a$  เกิดขึ้นสองค่าคือ  $P_1$  และ  $P_2$  ซึ่งมีค่าไม่เท่ากัน แต่จาก

สมมติฐานค่า  $P_a$  ในช่วงกึ่งกลางช่วงเวลา ที่  $n+1/2$  และ  $n+3/2$  ต้องมีค่าคงที่ ดังนั้น  $P_a$  ที่ใช้ในการคำนวณจึงต้องมีการเฉลี่ยค่าของ  $P_1$  และ  $P_2$



รูปที่ 2.3 ค่า  $P_a$  ที่เกิดขึ้นจริงและที่ใช้ในการคำนวณ

ซึ่งความถูกต้องและแม่นยำของวิธีการนี้จะขึ้นอยู่กับ การแบ่งช่วงเวลาคำนวณ เพราะถ้าแบ่งช่วงเวลากว้างเกินไป ส่งผลให้กราฟที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไปจากกราฟจริงที่ได้จากสมการสวิง โดยทั่วไปแล้วการแบ่งช่วงเวลาคำนวณมักแบ่งที่เวลา 0.1 หรือ 0.01 วินาที

### 2.3.2 วิธีหลักการพื้นที่เท่ากัน

วิธีหลักการพื้นที่เท่ากันเป็นวิธีการหาเสถียรรูปที่ง่าย มีรวดเร็ว สามารถวิเคราะห์ถึงผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบเนื่องจากเหตุการณ์ต่างๆ ได้ง่าย จึงเหมาะสมกับสำหรับการวิเคราะห์ระบบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแบบต่างๆ กันภายในระบบ แต่วิธีการนี้สามารถใช้ได้เฉพาะระบบขนาดเล็ก ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งถึงสองเครื่องเท่านั้น

จากสมการสวิง

$$M \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = p_a = P_m - P_e \quad (2.23)$$

คูณด้วย  $\frac{d\delta}{dt}$

$$M \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} \cdot \frac{d\delta}{dt} = (P_m - P_e) \cdot \frac{d\delta}{dt} \quad (2.24)$$

$$\frac{1}{2} \cdot M \cdot \frac{d(d\delta/dt)^2}{dt} = (P_m - P_e) \cdot \frac{d\delta}{dt} \quad (2.25)$$

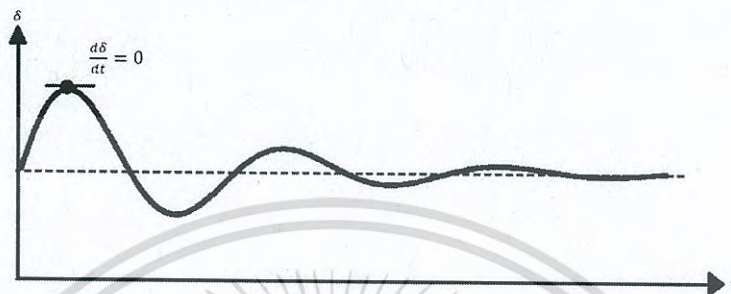
$$\left(\frac{d\delta}{dt}\right)^2 = \int_{\delta_0}^{\delta} \frac{2(P_m - P_e)}{M} \cdot d\delta \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{\int_{\delta_0}^{\delta} \frac{2(P_m - P_e)}{M} \cdot d\delta} \quad (2.27)$$

เมื่อ  $\delta_0$  คือ มุมของโรเตอร์ในสภาพก่อนมีการเปลี่ยนแปลงภายในระบบ

$\delta$  คือ มุมของโรเตอร์ในขณะใด ๆ



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมโรเตอร์กับเวลา

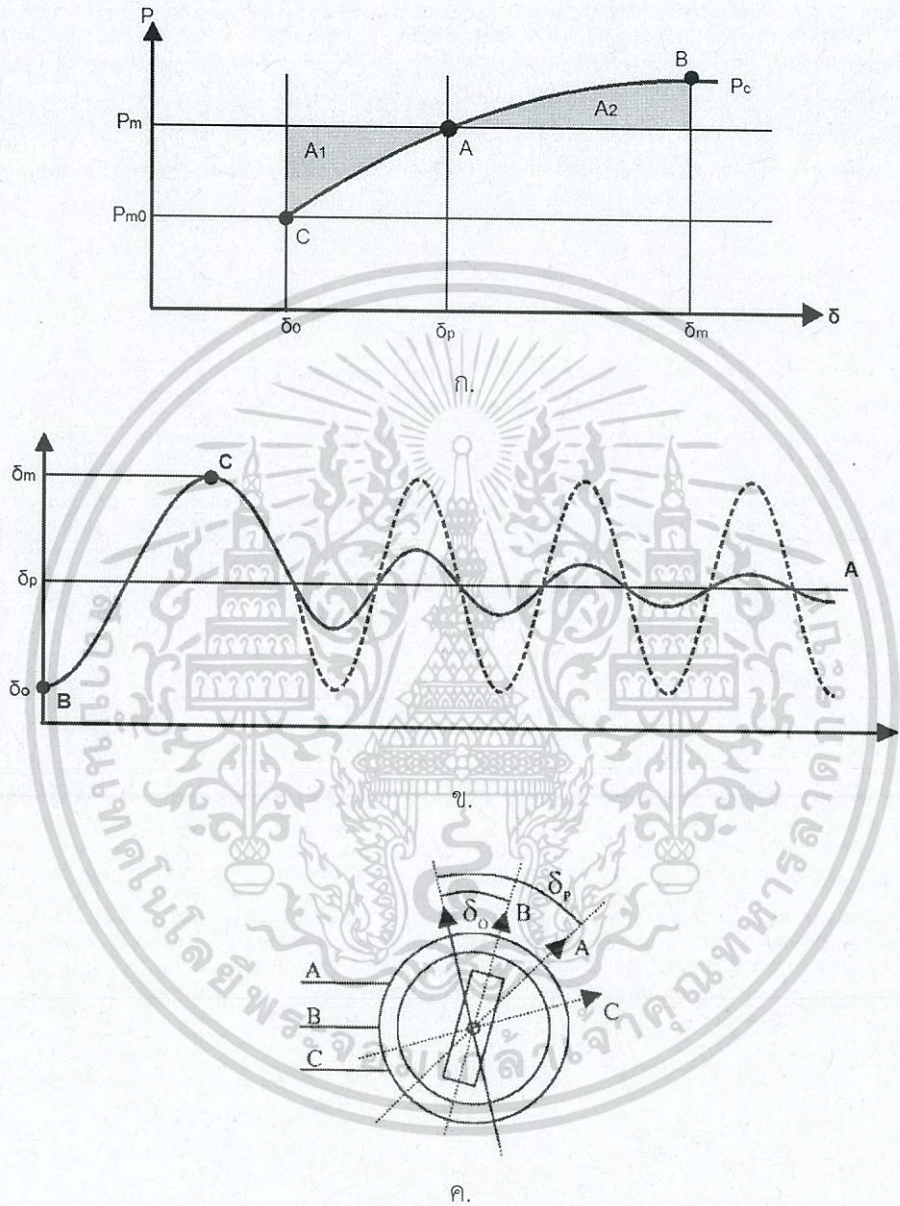
เมื่อพิจารณารูปที่ 2.4 ประกอบสมการที่ 2.27 ระบบมีเสถียรภาพได้ก็ต่อเมื่อมุม มีการหัก  
โค้งลง หรือ  $\frac{d\delta}{dt} = 0$  ดังนั้น เมื่อระบบมีเสถียรภาพ สมการที่ 2.27 จึงเขียนได้ใหม่

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) \cdot d\delta = 0 \quad (2.28)$$

สมการที่ 2.28 หมายถึง พื้นที่ใต้กราฟของ  $P_m - P_e$  มีค่าเป็นศูนย์จาก  $\delta_0$  ถึง  $\delta$  ดังแสดง  
ในรูปที่ 2.5 เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้นสมมติโหลดของระบบอยู่ที่จุด B ในรูปที่ 2.5 ที่จุด B นี้ค่า  
 $P_{m0} = P_e(\delta_0)$  และ เกิดความสมดุลระหว่างกำลังกลและกำลังไฟฟ้า เมื่อเพิ่มโหลดทางกลให้กับ  
มอเตอร์อย่างทันทีทันใดไปเป็นจุด A ก็มีการเปลี่ยนแปลงของมุมโรเตอร์จาก  $\delta_0$  ไป คือมุมเพิ่มขึ้น  
ไปถึงจุด C ตามรูปที่ 2.5 (ก)(ข) และ (ค) แล้วหลังจากนั้นก็แกว่งกลับมาที่จุด B และกลับไป C  
เช่นกัน ถ้าพิจารณารูปที่ 2.5 (ค) โรเตอร์ก็จะแกว่งจากแกน B เพื่อมายังแกน A แต่เนื่องจากโรเตอร์มี  
ความเฉื่อยก็แกว่งเลยมายังแกน C ก่อนที่จะแกว่งกลับไปมาระหว่าง B และ C ซึ่งก็ได้กราฟเส้นประ  
ในรูปที่ 2.5 (ข)

แต่เนื่องจากระบบมีแดมปีง สุดท้ายของโรเตอร์มาหยุดที่จุด A ซึ่งเป็นจุดที่มีสมดุล  
ระหว่างกำลังกลและไฟฟ้า โดยมุมของโรเตอร์ที่แกว่งขึ้นไปอยู่ที่จุด C ซึ่งทำให้พื้นที่  $A_1$  เท่ากับ  $A_2$   
ดังสมการที่ 2.8 ถ้าหากการแกว่งของโรเตอร์สามารถหาพื้นที่  $A_2$  มาให้เท่ากับ  $A_1$  ได้ก็แสดงว่าระบบมี  
เสถียรภาพ

พิจารณารูปที่ 2.6 กรณีเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์แล้วระบบมีเสถียรภาพ ตามรูปที่ 2.6 (ก) ระบบมีเสถียรภาพพอดี ตามรูปที่ 6.5.3 (ข) และระบบไม่มีเสถียรภาพ ตามรูปที่ 2.6 (ค) 2.6 (ค) ระบบไม่มีเสถียรภาพเนื่องจาก  $\delta$  เพิ่มขึ้นไปจนถึงจุด C ก็ไม่สามารถทำให้  $A_1 = A_2$  ได้

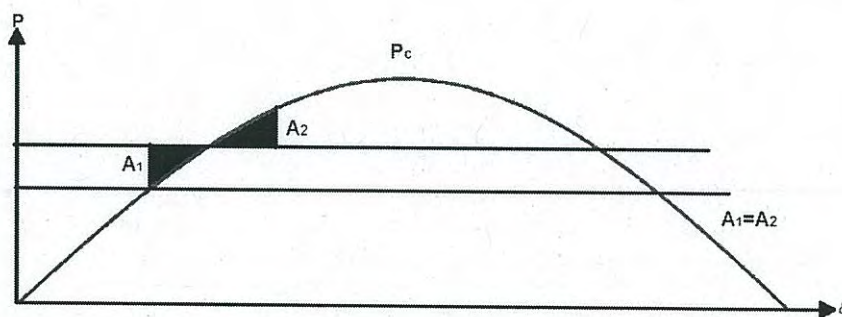


รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและมุมโรเตอร์

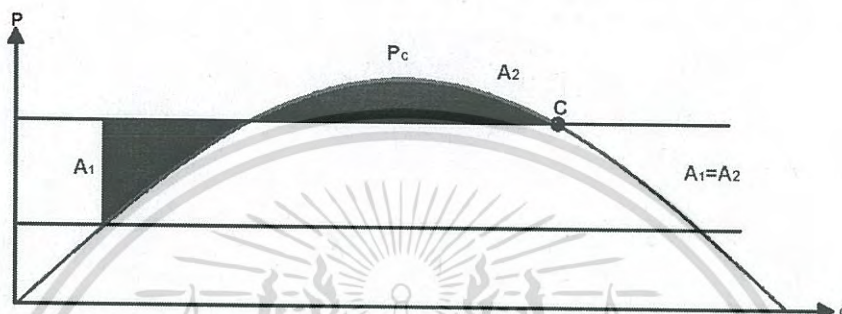
ก.กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า-มุมมอเตอร์ ข.กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมโรเตอร์กับเวลา

ค. การแกว่งของโรเตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนโหลดมอเตอร์

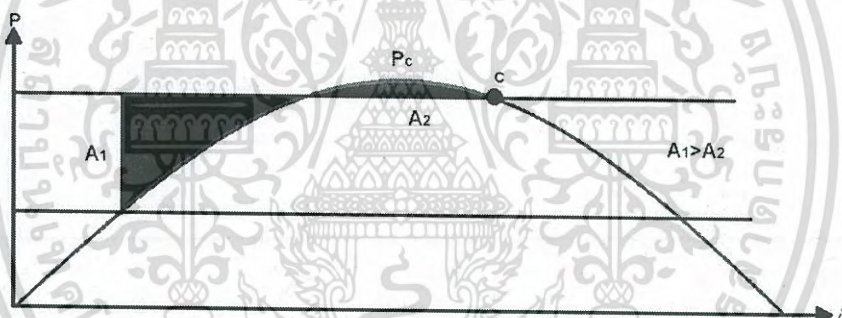
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.



ข.



ค.

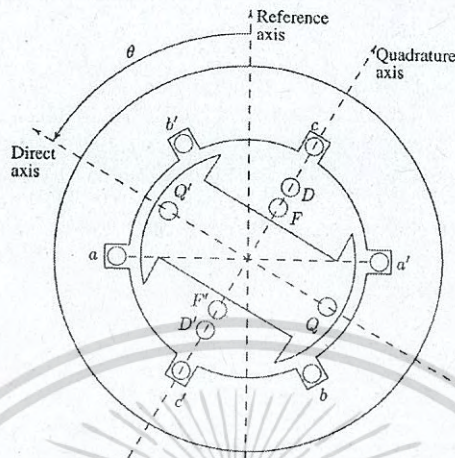
รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับมุมโรเตอร์ แสดงเสถียรภาพของระบบ  
 ก. ระบบมีเสถียรภาพ ข. ระบบมีเสถียรภาพพอดี ค. ระบบไม่มีเสถียรภาพ

## 2.4 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ

ในการศึกษาเสถียรภาพจะใช้โครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยจะประกอบไปด้วยขดลวดสเตเตอร์  $aa'$   $bb'$  และ  $cc'$  ที่พันทำมุมระหว่างกัน  $120^\circ$  และจากหลักการแปลงของปาร์ก (Park's transformation) ซึ่งเป็นการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

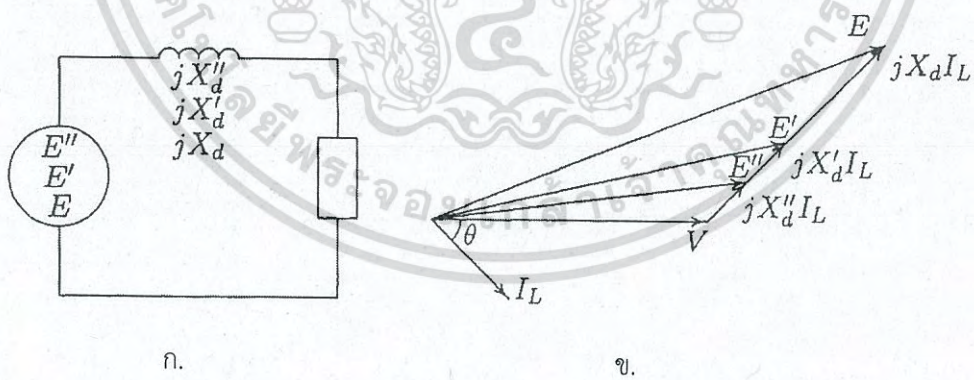
อ้างอิงจากทางด้านสเตเตอร์เป็นการอ้างอิงทางด้านโรเตอร์ จะทำให้ได้แกน Direct axis (d) และ Quadrature axis (q) [11]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.4.1 กรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบพื้นฐาน

โดยในแบบจำลองแบบพื้นฐาน จะกำหนดให้แรงดันภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( $E'$ ) หลังจากกริแอกแตนท์ชั่วคราว ( $X_d'$ ) มีค่าคงที่ ซึ่งจะมีแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าง่ายรูปที่ 2.8

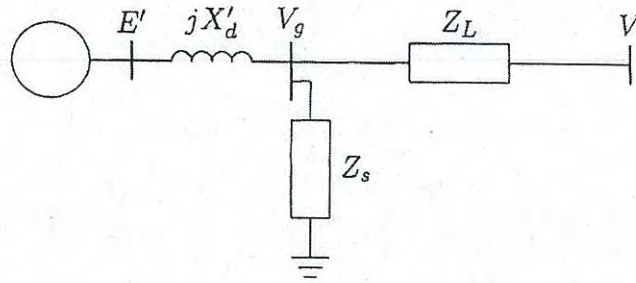


รูปที่ 2.8 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ก. วงจรสมมูล ข. แผนภาพเฟเซอร์

144077

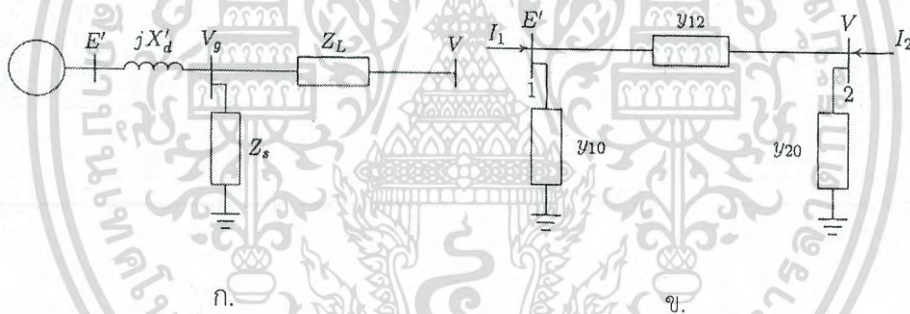
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเขียนแบบจำลองระบบที่มีการเชื่อมต่อกับระบบภายนอกขนาดใหญ่ผ่านสายส่ง  
ได้ดังรูป 2.9



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกับระบบภายนอกขนาดใหญ่

เมื่อบัส  $V$  เรียกว่า บัสอนันต์ (Infinite Bus) โดยมี ขนาดแรงดัน และ ความถี่คงที่ ซึ่งบัส  $V$  อาจเป็นบัสที่เชื่อมต่อกับระบบภายนอกที่มีขนาดใหญ่ (very large system) ซึ่งในการวิเคราะห์ระบบ นั้น สามารถวิเคราะห์ได้จากการเปลี่ยนวงจรแบบวงายให้เป็นวงจรแบบเดดตัวดังรูปที่ 2.10 และ สมการที่ 2.29 ถึง 2.31



รูปที่ 2.10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกับระบบภายนอกขนาดใหญ่

ก. วงจรที่มีการเชื่อมต่อแบบวงาย ข. วงจรที่มีการเชื่อมต่อแบบเดดตัว

$$y_{10} = \frac{Z_L}{jX'_d Z_s + jX'_d Z_L + jZ_L Z_s} \quad (2.29)$$

$$y_{20} = \frac{X'_d}{jX'_d Z_s + jX'_d Z_L + jZ_L Z_s} \quad (2.30)$$

$$y_{12} = \frac{Z_s}{jX'_d Z_s + jX'_d Z_L + jZ_L Z_s} \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.10 (ข) สามารถวิเคราะห์ห้วงจรได้โดยอาศัยกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's current Law) จะได้ว่า

$$I_1 = (y_{10} + y_{20})E' - y_{12}V \quad (2.32)$$

$$I_2 = y_{12}E' - (y_{20} + y_{12})V \quad (2.33)$$

เขียนสมการโหนด ให้อยู่ในรูปเมตริก เป็น

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E' \\ V \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

เมื่อ  $Y_{11} = y_{10} + y_{12}$   $Y_{22} = y_{20} + y_{12}$  และ  $Y_{12} = -Y_{21} = -y_{12}$

จากสมการที่ 2.34 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของมุม

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |Y_{11}| \angle \theta_{11} & |Y_{12}| \angle \theta_{12} \\ |Y_{21}| \angle \theta_{11} & |Y_{22}| \angle \theta_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |E'| \angle \delta \\ |V| \angle 0^\circ \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่โหนด 1 จาก

$$P_e = \text{Re}[E' I_1^*] \quad (2.36)$$

$$P_e = \text{Re}[|E'| \angle \delta (|Y_{11}| \angle -\theta_{11} |E'| \angle -\delta + |Y_{12}| \angle -\theta_{12} |V| \angle 0^\circ)] \quad (2.37)$$

หรือ

$$P_e = |E'|^2 |Y_{11}| \cos \theta_{11} + |E'| |V| |Y_{12}| \cos(\delta - \theta_{12}) \quad (2.38)$$

เมื่อพิจารณา ถึงค่า  $Z_L$  และ  $Z_S$  พบว่าในระบบส่วนใหญ่ นั้น ค่ารีแอกแตนซ์ที่มีค่าสูงกว่า ค่ารีซินแตนซ์มาก จึงไม่จำเป็นต้องมีการพิจารณาถึงค่ารีซินแตนซ์

พบว่า

$$\theta_{11} = \theta_{12} = 90^\circ \quad (2.39)$$

และ

$$Y_{12} = B_{12} = \frac{1}{X_{12}} \quad (2.40)$$

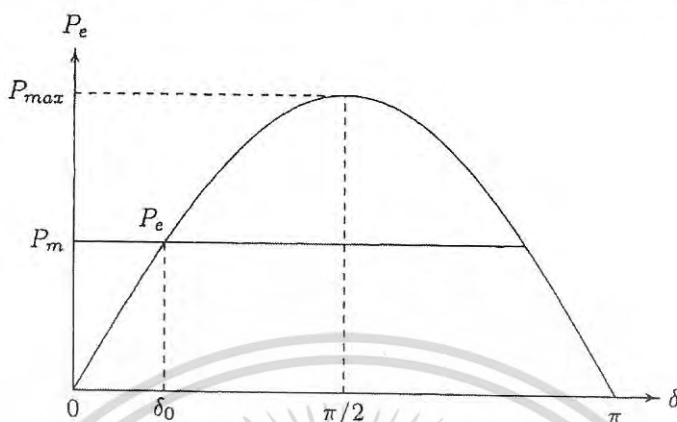
จะได้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า เป็น

$$P_e = |E'|^2 |Y_{11}| \cos 90^\circ + |E'| |V| \left| \frac{1}{X_{12}} \right| \cos(\delta - 90^\circ) \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_e = |E'| |V| \left| \frac{1}{X_{12}} \right| \sin(\delta) \quad (2.42)$$

จากสมการที่ 2.42 สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $P_e$  กับ  $\delta$  ได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $P_e$  กับ  $\delta$

กราฟในรูปที่ 2.11 จะถูกเรียกว่า Power Angle Curve ซึ่งจะแสดงถึงขีดความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดจนถึงค่า  $P_{max}$  (maximum power transferred) โดยค่า  $P_{max}$  ถือเป็น ขีดจำกัดของเสถียรภาพในสภาวะคงตัว (Steady State Stability Limit) ค่า  $P_{max}$  เกิดขึ้นที่มุม  $\delta$  จะมีขนาดเป็น 90 ดังนั้น

$$P_e = \frac{|E'| |V|}{X_{12}} \quad (2.43)$$

และสามารถเขียนสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า ได้เป็น

$$P_e = P_{max} \sin(\delta) \quad (2.44)$$

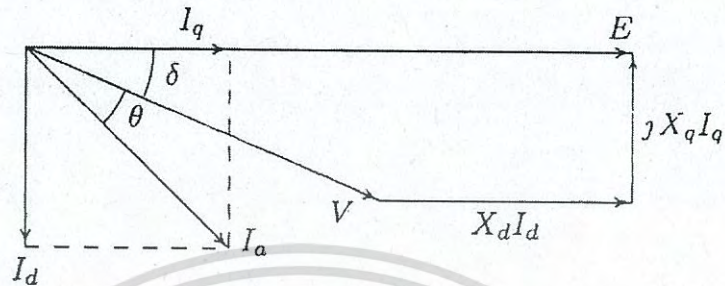
เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น กระแสในช่วงทรานเซียนต์จะถูกจำกัดโดยค่า  $X'_d$  ซึ่งสามารถหาสภาวะก่อนเกิดการลัดวงจร (pre - fault) ในสภาวะคงตัว เพื่อการวิเคราะห์ช่วงทรานเซียนต์ ได้จาก

$$E' = V_g + jX'_d I_a \quad (2.45)$$

ซึ่งสามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้าภายใน ( $E'$ ) ในสภาวะเริ่มต้น (initial condition) เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ในช่วงชั่วคราวต่อไป และเมื่อที่ขดลวดสนามมีค่าแอมแปร์ตันที่น้อย ค่าสนามแม่เหล็กเกี่ยวโยงมีค่าคงที่ระหว่างการเกิดการรบกวน และ แรงดันไฟฟ้าภายในมีค่าคงที่ จะส่งผลให้กราฟ power angle ในสภาวะชั่วคราวจะมีลักษณะเช่นเดียวกับในสภาวะคงตัว

### 2.4.2 กรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบขั้วแม่เหล็กยื่น (Salient)

เนื่องจากการที่สนามแม่เหล็กที่อยู่ในช่องว่างอากาศของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีขนาดที่ไม่เท่ากัน ตลอดช่องว่างอากาศ จึงทำให้มีการพิจารณาถึงผลที่เกิดจากแกน Direct axis (d) และ Quadrature axis (q) ซึ่งสามารถเขียนแผนภาพเฟเซอร์ได้รูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แผนภาพเฟเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วแม่เหล็กยื่น

จากแผนภาพเฟเซอร์จะได้ว่า

$$|E| = |V| \cos \delta + X_d I_d \quad (2.46)$$

โดยที่กำลังไฟฟ้าจริงต่อเฟสที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็น

$$P = |V| |I| \cos \theta \quad (2.47)$$

ซึ่งสามารถเขียน  $I_d$  ในเทอมของ  $I_d$  และ  $I_q$  ได้เป็น

$$|I_a| \cos \theta = I_q \cos \delta + I_d \sin \delta \quad (2.48)$$

ดังนั้น

$$P = |V| (I_q \cos \delta + I_d \sin \delta) \quad (2.49)$$

จากแผนภาพเฟเซอร์

$$|V| \sin \delta = X_q I_q \quad (2.50)$$

หรือ

$$I_q = \frac{|V| \sin \delta}{X_q} \quad (2.51)$$

และจากสมการที่ 2.46

$$I_d = \frac{|E| - |V|\cos\delta}{X_d} \quad (2.52)$$

จากสมการที่ 2.51 และ 2.52 สามารถเขียนสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า ได้ดังเป็น

$$P_e = \frac{|E||V|}{X_d} \sin(\delta) + |V|^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin(2\delta) \quad (2.53)$$

ขนาดแรงดันไฟฟ้าภายในขณะไม่มีโหลด เท่ากับ

$$|E| = |V|\cos\delta + X_d I_d \quad (2.54)$$

หรือ

$$|E| = |V|\cos\delta + X_d |I_a| \sin(\delta - \theta) \quad (2.55)$$

เมื่อ E คือ emf ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด และ V คือแรงดันที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ขนาดมุมโรเตอร์สามารถหาได้จาก

$$|V|\sin\delta = X_q I_q \quad (2.56)$$

$$|V|\sin\delta = X_q |I_a| \cos(\delta + \theta) \quad (2.57)$$

$$|V|\sin\delta = X_q |I_a| (\cos\delta \cos\theta - \sin\delta \sin\theta) \quad (2.58)$$

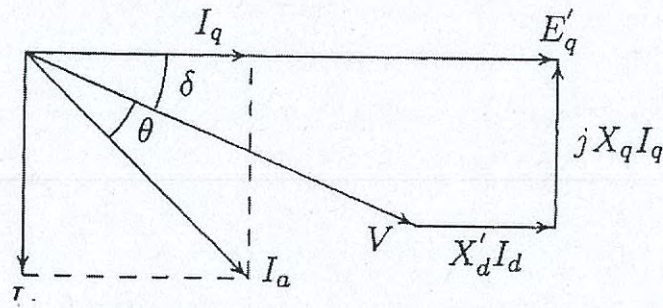
ดังนั้นมุมโรเตอร์เท่ากับ

$$\delta = \tan^{-1} \frac{X_q |I_a| \cos\theta}{|V| + X_q |I_a| \sin\theta} \quad (2.59)$$

การวิเคราะห์ช่วงชั่วคราว สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วยื่น เนื่องจากวงจรแม่เหล็กเหนี่ยวนำนั้นมีขนาดใหญ่ เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น ส่งผลให้ฟลักซ์เกี่ยวค้ำในสภาวะชั่วคราวมีค่าคงที่ ซึ่งในสภาวะชั่วคราวค่ารีแอกแตนซ์แกน Direct axis จะเท่ากับ  $X_d'$  และในแกน Quadrature axis พบว่า  $X_q$  มีค่าเท่ากับ  $X_q'$  ดังนั้นจึงสามารถเขียนแผนภาพเฟเซอร์ได้ดังรูปที่ 2.13

โดยสามารถเขียนสมการสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะชั่วคราว ได้ดังเป็น

$$P_e = \frac{|E_q'| |V|}{X_d'} \sin(\delta) + |V|^2 \frac{X_d' - X_q}{2X_d' X_q} \sin(2\delta) \quad (2.60)$$



รูปที่ 2.13 แผนภาพเฟเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วแม่เหล็กยื่นในสภาวะชั่วคราว

และขนาดแรงดันไฟฟ้าภายในช่วงชั่วคราว เท่ากับ

$$|E'_q| = |V| \cos \delta + X'_d I_d \quad (2.61)$$

$$|E'_q| = |V| \cos \delta + X'_d |I_a| \sin(\delta + \theta) \quad (2.62)$$

จากสมการคงตัว

$$|E| = |V| \cos \delta + X_d |I_a| \sin(\delta + \theta) \quad (2.63)$$

$$|I_a| \sin(\delta + \theta) = \frac{|E| - |V| \cos \delta}{X_d} \quad (2.64)$$

จากสมการที่ 2.62 และ 2.64 เขียนสมการแรงดันไฟฟ้าภายในช่วงชั่วคราวได้เป็น

$$|E'_q| = \frac{X'_d |E| + (X_d - X'_d) |V| \cos \delta}{X_d} \quad (2.65)$$

โดยที่ค่า E และ มุมโรเตอร์หาได้จากสมการในสภาวะคงตัว ช่วงก่อนเกิดการลัดวงจร

จากสมการที่ 2.42 กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสภาวะชั่วคราวในแบบจำลองแบบพื้นฐาน มีความแตกต่างจากกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสภาวะชั่วคราวเมื่อมีการพิจารณาผลของขั้วยื่นตามสมการที่ 2.60 โดยมีผลของเทอม  $|V|^2 \frac{X'_d - X_q}{2X'_d X_q} \sin(2\delta)$  เข้ามา จึงส่งผลให้ ค่า  $P_a$  สำหรับการคำนวณหา มุมโรเตอร์ ที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงเวลาตามวิธีการเขียนกราฟที่ละขั้นตอนตามสมการที่ 2.22 เกิดความแตกต่างกันขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังที่เกิดขึ้น มีค่าแตกต่างกันในระหว่างแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบพื้นฐานกับเมื่อมีการพิจารณาผลของขั้วยื่นหรือแบบจำลองแบบละเอียด

## ระบบอนุมานนิวโรฟัชซีโครงข่ายปรับตัวได้

### 3.1 ปัญญาประดิษฐ์

ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) หรือ เอไอ (AI) หมายถึงความฉลาดเทียมที่สร้างขึ้นให้กับสิ่งที่ไม่มีชีวิต ซึ่งรวมถึงอุปกรณ์ที่ต้องอาศัยการรับคำสั่ง เพื่อสามารถทำงานให้ได้อย่างรวดเร็ว ภายใต้หน่วยความจำที่มีขนาดใหญ่ หรือหมายถึง การทำให้คอมพิวเตอร์สามารถคิดหาเหตุผลได้ เรียนรู้ได้ ทำงานได้เหมือนสมองมนุษย์ ซึ่งการทำงานมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการประมวลผลของสมองมนุษย์ ฉะนั้นความสามารถของคอมพิวเตอร์ทางด้านสติปัญญา และด้านพฤติกรรมจึงมีลักษณะคล้ายกับมนุษย์

สิ่งที่สำคัญทางด้านปัญญาประดิษฐ์ มี 2 ประการ คือ ความสามารถที่จะเข้าใจภาษาธรรมชาติ และความสามารถที่จะให้เหตุผล ดังนั้น ความหมายของปัญญาประดิษฐ์ จึงหมายถึงความสามารถของระบบคอมพิวเตอร์ที่มีระบบการทำงานคล้ายคลึงกับสติปัญญาของมนุษย์ จึงถูกเรียกว่าปัญญาประดิษฐ์ [Artificial Intelligence (AI)] [12]

#### 3.1.1 คำนิยามของปัญญาประดิษฐ์

มุมมองต่อปัญญาประดิษฐ์ที่ของนักวิจัยแต่ละท่านนั้นอาจไม่เหมือนกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการความฉลาดของปัญญาประดิษฐ์ โดยคำนึงถึงพฤติกรรมที่มีต่อสิ่งแวดล้อมหรือคำนึงการคิดได้ของผลผลิตของปัญญาประดิษฐ์ ดังนั้นจึงมีค่านิยามของปัญญาประดิษฐ์ตามความสามารถที่มนุษย์ต้องการ ออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

1. ระบบที่คิดเหมือนมนุษย์ (Systems that think like humans, Thinking Humanly) ได้มีผู้ให้นิยามไว้ว่าปัญญาประดิษฐ์ คือ ความพยายามใหม่อันน่าตื่นตะลึงที่จะทำให้คอมพิวเตอร์คิดได้ ... เครื่องจักรที่มีสติปัญญาอย่างครบถ้วนและแท้จริง ("The exciting new effort to make computers think ... machines with minds, in the full and literal sense." หรือปัญญาประดิษฐ์ คือ กลไกของกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับความคิดมนุษย์ เช่น การตัดสินใจ การแก้ปัญหา การเรียนรู้ ("[The automation of] activities that we associate with human thinking, activities such as decision-making, problem solving, learning."

จากนิยามของนักวิจัยดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าระบบนี้หมายถึงระบบที่มีการคิดคล้ายมนุษย์ ซึ่งก่อนที่จะทำให้เครื่องจักรหรือคอมพิวเตอร์สามารถ คิดอย่างมนุษย์ได้ ต้องศึกษาให้รู้ก่อนว่ามนุษย์มีกระบวนการคิดอย่างไร ซึ่งการวิเคราะห์ลักษณะการคิดของมนุษย์เป็นศาสตร์ด้าน cognitive science เช่น ศึกษาโครงสร้างสามมิติของเซลล์สมอง การแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าระหว่างเซลล์สมอง วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางเคมีไฟฟ้าในร่างกายระหว่างการคิด

2. ระบบที่กระทำเหมือนมนุษย์ (Systems that act like humans) Kurzweil ได้กล่าวไว้ว่า ปัญหาประดิษฐ์ คือ วิชาของการสร้างเครื่องจักรที่ทำงานในสิ่งซึ่งอาศัยปัญญาเมื่อกระทำโดยมนุษย์ (*"The art of creating machines that perform functions that requires intelligence when performed by people."*) และ Rich กับ Knight ได้กล่าวไว้ว่า ปัญหาประดิษฐ์คือ การศึกษาวิธีทำให้คอมพิวเตอร์กระทำในสิ่งที่มีมนุษย์ทำได้ดีกว่าในขณะนั้น (*"The study of how to make computers do things at which, at the moment, people are better."*)

ซึ่งการกระทำที่เหมือนมนุษย์ ได้แก่ สื่อสารได้ด้วยภาษาที่มนุษย์ใช้ เช่น ภาษาไทย ตัวอย่าง คือ การแปลงข้อความเป็นคำพูด และ การแปลงคำพูดเป็นข้อความ การมีประสาทสัมผัสคล้ายมนุษย์ เช่น คอมพิวเตอร์รับภาพได้โดยอุปกรณ์รับสัมผัส แล้วนำภาพไปประมวลผล การเคลื่อนไหวได้คล้ายมนุษย์ เช่น หุ่นยนต์ช่วยงานต่าง ๆ เช่น การเคลื่อนย้ายสิ่งของ ดูดฝุ่น รวมทั้งการเรียนรู้ได้ โดยสามารถตรวจจับรูปแบบการเกิดของเหตุการณ์ใด ๆ แล้วปรับตัวสู่สิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปได้

3. ระบบที่คิดอย่างมีเหตุผล (Systems that think rationally Thinking rationally) ซึ่งกล่าวได้ว่า ปัญหาประดิษฐ์ คือ การศึกษาความสามารถในด้านสติปัญญาโดยการใช้โมเดลการคำนวณ (*"The study of mental faculties through the use of computational model."*) หรือ ปัญหาประดิษฐ์ คือ การศึกษาวิธีการคำนวณที่สามารถรับรู้ ใช้เหตุผล และกระทำ (*"The study of the computations that make it possible to perceive, reason, and act"*) ซึ่งปัญหาประดิษฐ์ในนิยามนี้เป็นการคิดอย่างมีเหตุผล หรือคิดถูกต้อง อาจใช้หลักตรรกศาสตร์ในการคิดหาคำตอบอย่างมีเหตุผล เช่น ระบบผู้เชี่ยวชาญ

4. ระบบที่กระทำอย่างมีเหตุผล (Systems that act rationally, Acting rationally) ได้มีนิยามไว้ว่า ปัญหาประดิษฐ์คือการศึกษาเพื่อออกแบบเอเจนต์ที่มีปัญญา (*"Computational Intelligence is the study of the design of intelligent agents"*) หรือปัญหาประดิษฐ์เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมที่แสดงปัญญาในสิ่งที่มีมนุษย์สร้างขึ้น (*"AI ... is concerned with intelligent behavior in artifacts"*)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างปัญญาประดิษฐ์ตามนิยามนี้ ได้แก่ เอเจนต์ (โปรแกรมที่มีความสามารถในการกระทำ หรือเป็นตัวแทนในระบบอัตโนมัติต่าง ๆ) สามารถกระทำอย่างมีเหตุผลเพื่อบรรลุเป้าหมายที่ตั้งไว้ เช่น เอเจนต์ในระบบขับรถอัตโนมัติ ที่มีเป้าหมายว่าต้องไปถึงเป้าหมายในระยะทางที่สั้นที่สุด ต้องเลือกเส้นทางที่ไปยังเป้าหมายที่สั้นที่สุดที่เป็นไปได้ จึงจะเรียกได้ว่า เอเจนต์กระทำอย่างมีเหตุผล

### 3.1.2 วิวัฒนาการของปัญญาประดิษฐ์

ปัญญาประดิษฐ์ ได้มีการนำมาใช้เป็นครั้งแรกในช่วงกลางทศวรรษที่ 1950 โดย John McCarthy นักวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ชาวอเมริกัน ได้พัฒนาตัวประมวลโปรแกรมการใช้งาน (Software Processor) ซึ่งทำงานภายใต้สัญลักษณ์ และเครื่องหมายมากกว่าเรื่องของตัวเอง

ปัญญาประดิษฐ์พัฒนามาจากหลายสาขาวิชา ประกอบด้วย 1. สาขาวิชาคณิตศาสตร์จะเกี่ยวข้องกับเรื่องการพิสูจน์ทฤษฎีต่าง ๆ และในการแก้ไขปัญหาที่ซับซ้อนด้านเกมต่าง ๆ เช่น การเล่นโอเอกซ์ (O,X) หมากรุกฝรั่ง 2. สาขาจิตวิทยาในเรื่องการฟังและการวิเคราะห์ปัญหาทางจิต ซึ่งการพัฒนาสิ่งดังกล่าวเกิดขึ้นโดยผ่านผู้เชี่ยวชาญ (Experts)

โปรแกรมหมากรุกฝรั่งในช่วงแรก ๆ เป็นโปรแกรมที่ได้มาจากการใช้กำลังของเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นการทำงานโดยการคำนวณผลกระทบของการเดินแต่ละครั้ง เพื่อจะรู้ว่าวิธีการเดินแบบไหนจึงจะดีที่สุด ซึ่งจริง ๆ แล้วไม่ใช่เป็นวิธีการเล่นของมนุษย์ เพราะวิธีการเดินแต่ละก้าวของมนุษย์ ล้วนมาจากประสบการณ์และกฎเกณฑ์ด้านการปฏิบัติ (Heuristic) ฉะนั้นถ้าโปรแกรมหมากรุกอาศัยการทำงานแบบกฎเกณฑ์ด้านการปฏิบัติ (Heuristic) ก็จะหมายถึงเทคนิคด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence techniques)

### 3.1.3 การประยุกต์ใช้งานปัญญาประดิษฐ์

ลักษณะงานของปัญญาประดิษฐ์ แบ่งได้ 3 ประเภท คือ

#### 3.1.3.1 Cognitive Science

งานด้านนี้เน้นงานวิจัยเพื่อศึกษาว่าสมองของมนุษย์ทำงานอย่างไร และมนุษย์คิดและเรียนรู้ได้อย่างไร จึงมีพื้นฐานที่การประมวลผลสารสนเทศในรูปแบบของมนุษย์ประกอบด้วยระบบต่างๆ ซึ่งสามารถแยกย่อยออกเป็นหลายระบบ ได้แก่

ระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert Systems) เป็นระบบที่จะพยายามลอกเลียนแบบความสามารถของ ผู้เชี่ยวชาญที่เป็นมนุษย์ในการแก้ปัญหาต่างๆ

ระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) เป็นระบบปัญญาประดิษฐ์ที่มีความสามารถในการเรียนรู้ เพราะถูกออกแบบมาเหมือนสมองมนุษย์ โครงข่ายประสาทเทียม จะมีการเรียนรู้แบบแพทเทิร์น (pattern) และความสัมพันธ์ของข้อมูลต่างๆ ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมมีความสามารถในการประมวลผล แม้ว่าตัวระบบมีปัญหาขัดข้อง รวมทั้งปรับปรุงข้อมูลที่มีอยู่ เพื่อให้ได้ระบบสำหรับการประมวลผลใหม่อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการค้นหาความสัมพันธ์ และแนวโน้มต่างๆ จากฐานข้อมูลขนาดใหญ่ได้

ระบบแบ็บเน็ต (Papnet) เป็นระบบที่ใช้ในการแยกความแตกต่าง เช่น แยกความแตกต่างของเซลล์มนุษย์

ฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic) เป็นระบบที่เกี่ยวข้องกับการใช้กฎพื้นฐาน และสามารถทำงานกับข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์ กำกวม ค่าไม่เที่ยงตรง หรือไม่แน่นอนได้

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) ใช้หลักการด้านพันธุกรรมของชาร์ล ดาร์วิน การสุ่ม และฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ในการสร้างกระบวนการวิวัฒนาการด้วยตนเองของระบบในการหาคำตอบที่ดียิ่งขึ้นโดยใช้แนวทางการแก้ปัญหาแนวเดียวกับที่สิ่งมีชีวิตปรับตัวเองให้เข้ากับสภาพแวดล้อมเป็นซอฟต์แวร์ของระบบปัญญาประดิษฐ์ที่เลียนแบบกระบวนการวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตที่ปรับตัวให้เข้ากับสิ่งแวดล้อม เพื่อช่วยในการหาคำแนะนำที่ดีกว่า ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะเหมาะสมในการใช้กับการตัดสินใจซึ่งมีคำตอบได้หลายพันล้านคำตอบ และแต่ละคำตอบจำเป็นจะต้องมีการพิจารณาอย่างรอบคอบ

เอเจนต์ชาญฉลาด (Intelligent Agents) ใช้ระบบผู้เชี่ยวชาญหรือเทคนิคของปัญญาประดิษฐ์อื่นๆ เพื่อพัฒนาเป็นโปรแกรมประยุกต์ให้กับผู้ใช้ปลายทาง

ระบบการเรียนรู้ (Learning Systems) เป็นระบบที่สามารถพัฒนาพฤติกรรมของระบบเองด้วยการพัฒนาจากข้อมูลที่ระบบได้รับในระหว่างการประมวลผล

### 3.1.3.2 Robotics

เป็นงานซึ่งพัฒนามนพื้นฐานของวิศวกรรมและสรีรศาสตร์ และเป็นการพยายามสร้างหุ่นยนต์ให้มีความฉลาดและถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์แต่สามารถเคลื่อนไหวได้เหมือนกับมนุษย์ โดยพยายามทำให้หุ่นยนต์มีทักษะให้ด้านต่างๆ ดังต่อไปนี้คือ ทักษะในการมองเห็น ทักษะในการสัมผัส ทักษะในการหยิบจับสิ่งของ ทักษะในการเคลื่อนไหว และทักษะในการนำทางเพื่อไปยังที่หมาย

### 3.1.3.3 Natural Interface

เป็นงานซึ่งเน้นการพัฒนาเพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถเข้าใจในสิ่งที่ป็นธรรมชาติของมนุษย์ เพื่อให้มนุษย์สามารถสื่อสารกับคอมพิวเตอร์หรือเครื่องจักรกลได้อย่างสะดวก ประกอบด้วยงานด้านต่างๆ ดังนี้

1. ระบบที่มีความสามารถในการเข้าใจภาษามนุษย์ (Natural Language) ซึ่งมีความสามารถในการจดจำคำพูดและเสียงของผู้ใช้งาน ทำให้มนุษย์สามารถพูดหรือสั่งงานกับคอมพิวเตอร์หรือหุ่นยนต์ได้ด้วยภาษามนุษย์
2. ระบบภาพเสมือนจริง (Virtual Reality) เป็นการสร้างภาพเสมือนจริงหรือภาพจำลองของเหตุการณ์โดยระบบคอมพิวเตอร์ มีการติดตั้งตัวเซ็นเซอร์ต่างๆไว้กับอุปกรณ์ที่ใช้เป็นอินพุตและเอาต์พุต เพื่อใช้ตรวจจับความเคลื่อนไหวของผู้ใช้งาน ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้งานได้เข้าถึงโลกของภาพเสมือนจริงแบบ 3 มิติ

### 3.1.4 ประโยชน์ของปัญญาประดิษฐ์

1. การจัดการข้อมูลมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยข้อมูลจะถูกเก็บในลักษณะที่เป็นฐานความรู้ขององค์กร พนักงานสามารถเข้าไป สืบค้นและหาคำตอบหรือหาคำปรึกษาได้ทุกเวลา
2. เพิ่มความสามารถให้กับฐานความรู้ขององค์กรด้วยการเสนอวิธีการแก้ปัญหาสำหรับงานเฉพาะด้านซึ่งมีปริมาณมากและมีความซับซ้อนมากเกินไปสำหรับมนุษย์
3. ระบบจะถูกนำมาช่วยทำงานในส่วนที่เป็นงานประจำหรืองานที่น่าเบื่อหน่ายสำหรับมนุษย์
4. ระบบจะช่วยสร้างกลไกที่ไม่นำความรู้สึกส่วนตัวของมนุษย์ เช่น ความลำเอียง ความเหนียวลำ ความเบื่อหน่าย ความกังวล เข้ามาเป็นองค์ประกอบในการตัดสินใจ

## 3.2 ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้

ระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS) เป็นปัญญาประดิษฐ์ในรูปแบบของระบบประสานแบบอัจฉริยะ (hybrid intelligent system, HIS) โดยนำข้อดีของระบบอัจฉริยะหรือปัญญาประดิษฐ์ 2 ระบบเข้าด้วยกันคือ [13-14]

ระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) ซึ่งมีจุดเด่นด้านการเรียนรู้จากข้อมูล ซึ่งจะมีการปรับแต่งโครงสร้างที่อยู่ภายในเครือข่ายที่มีการต่อเชื่อมโยงกันอย่างหนาแน่น มีการส่งผ่านข้อมูลที่จะประมวลผลจากอินพุตไปยังเอาต์พุตแบบขนาน การประมวลผลของโครงข่ายประสาท

เทียมจึงเป็นไปอย่างรวดเร็ว แต่มีจุดด้อยในด้านการตีความหาเหตุผล เพราะโครงข่ายประสาทเทียมไม่สามารถให้เหตุผลได้ว่าเพราะเหตุใดจึงมีข้อสรุปออกมาดังที่ปรากฏที่เอาต์พุตของโครงข่าย

และตรรกศาสตร์คลุมเครือหรือฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic) ซึ่งมีคุณสมบัติในการมีเหตุผลเชิงตรรกะ โดยโครงสร้างของฟัซซีลอจิก สามารถเข้าใจได้เนื่องจากสามารถตีความได้ด้วยกฎของฟัซซี ซึ่งสอดคล้องกับตรรกะความคิดของมนุษย์ แต่จุดอ่อนฟัซซีลอจิก ก็คือ ไม่มีกระบวนการเรียนรู้ในการปรับแต่งโครงสร้างด้วยตัวของระบบเอง หรือไม่สามารถเรียนรู้ได้โดยอัตโนมัติได้ ดังนั้นโครงสร้างของระบบจึงต้องถูกกำหนดโดยอาศัยผู้เชี่ยวชาญในศาสตร์นั้น ร่วมกับนักคอมพิวเตอร์

โดยระบบแบ่งออกเป็นสอง ประกอบด้วย ส่วนของฟัซซีลอจิก เป็นการนำอนุมานฟัซซี (Fuzzy Inference) ซึ่งประกอบด้วยฟัซซิฟิเคชัน (Fuzzification) การประเมินค่ากฎของฟัซซี (fuzzy rule evaluation) การรวมกฎ (aggregation) และ ดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification) เข้ารวมกับกระบวนการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับหรือแบ็คพรอพเกชัน (Back Propagation) ของโครงข่ายประสาทเทียม

การประยุกต์ใช้งานระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ สามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งงานทั่วไป เช่น การวิเคราะห์หาปัจจัยสำคัญสู่ความสำเร็จของกระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์[15] เป็นต้น และสามารถนำไปใช้ได้ในงานวิศวกรรม ได้แก่ การนำไปใช้ร่วมกับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์[16-17]

### 3.3 ฟัซซีลอจิก

ฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic) หรือ ตรรกศาสตร์คลุมเครือ เป็นทฤษฎีที่นำมาใช้ในการอธิบายข้อมูลที่มีความคลุมเครือไม่ชัดเจน โดยมีแนวความคิดพื้นฐานที่ว่าความคลุมเครือดังกล่าวสามารถแสดงได้ออกมาในรูปของระดับต่างๆได้ เช่น ระยะทาง ความสูง ความเร็ว ความสวยงาม หรืออุณหภูมิ สิ่งเหล่านี้จะกำหนดปริมาณอยู่ในรูปของหน่วยย่อยๆ ได้ ตัวอย่างเช่น สมชายเป็นคนที่สูงมาก ไซบีเรียเป็นพื้นที่ที่หนาวมาก เป็นต้น ซึ่งเป็นเรื่องยากที่จะแยกแยะความแตกต่างระหว่างการเป็นสมาชิกหรือไม่เป็นสมาชิกโดยใช้ตัวบ่งปริมาณย่อยๆเหล่านี้ [18-19]

ในทางตรรกศาสตร์แบบบูลีน (Boolean) หรือตรรกศาสตร์ทั่วไปนั้นจะมีการแบ่งขอบเขตที่ใช้ในการแบ่งแยกระหว่างการเป็นสมาชิกและไม่เป็นสมาชิกอย่างชัดเจน ตัวอย่างเช่น น้ำหนักของคน ถ้าขีดเส้นน้ำหนักของคนทีถือว่าเป็นคนอ้วนที่ 80 กก. ถ้านาย ก น้ำหนัก 79 กก. จะสามารถเรียกนาย ก ว่าผอมได้ ขณะเดียวกัน นาย ข น้ำหนัก 81 กก. ก็จะถือว่่านาย ข เป็นคนอ้วน จึงทำให้เกิดคำถามที่ว่า นาย ข อ้วนจริงหรือไม่

ฟัซซีลอจิกเป็นแนวทางหนึ่งที่จะมาช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้ได้ โดยฟัซซีลอจิกจะสะท้อนความคิดของมนุษย์ ซึ่งพยายามที่จะกำหนดรูปแบบให้กับคำพูดที่เกิดจากความรู้สึกของมนุษย์หรือการตัดสินใจที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานความรู้สึกของมนุษย์ โดยผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปสู่การพัฒนาระบบที่ชาญฉลาดเทียมมนุษย์ได้

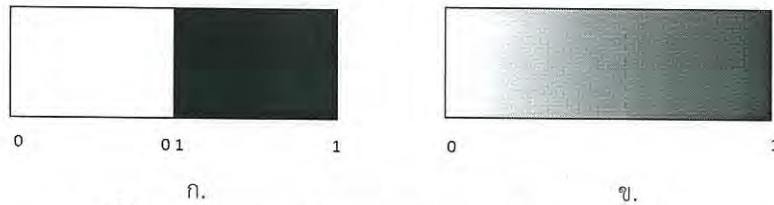
จุดเริ่มต้นของฟัซซีลอจิก มาจาก ค.ศ. 1930 โดย Jan Lukasiewicz นักตรรกศาสตร์และปรัชญา ชาวโปแลนด์ ได้นำเสนอแนวคิด Fuzzy หรือ multi-valued logic ครั้งแรก โดยศึกษาถึงการที่คณิตศาสตร์มาแสดงความคลุมเครือของคำว่า สูง แก่ และร้อน ซึ่งค่าในทางตรรกศาสตร์ที่ใช้อยู่ทั่วไปมีเพียงสองค่าคือ 0 กับ 1 หรือจริง กับ เท็จ ซึ่ง Lukasiewicz ได้นำเสนอการเพิ่มเติมค่าทางตรรกศาสตร์ที่แต่เดิมมีค่าเป็นจำนวนเต็ม 2 ค่า ให้เป็นค่าจำนวนจริงอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 เขาใช้ค่าในช่วงที่กำหนดสำหรับแสดงความเป็นไปได้ที่จะเป็นจริงหรือเท็จ ตัวอย่างเช่น ค่าความเป็นไปได้ที่ผู้ชายที่มีส่วนสูง 181 ซม. จะถูกระบุว่าเป็นคนที่สูงด้วยค่า 0.82 งานที่นำเสนอนี้ถูกเรียกว่า possibility theory

ต่อมาในปี ค.ศ. 1937 Max Black นักปรัชญาชาวบริติช-อเมริกา ได้นำเสนองานวิจัย ซึ่งได้ให้แง่คิดเกี่ยวกับการใช้ระดับต่อเนื่องในการแสดงความคลุมเครือ โดยใช้ตัวอย่างปัญหาในการแยกแยะได้อย่างไรว่าเมื่อไหร่ท่อนไม้จะกลายเป็นเก้าอี้สำหรับนั่ง เขากล่าวว่าถ้าระดับต่อเนื่องนั้นเป็นค่าที่ไม่ต่อเนื่อง ตัวเลขแต่ละตัวจะเป็นตัวบอกระดับ แต่ก็มีความหมายอยู่ว่าเป็นระดับของอะไร เขาได้แสดงการใช้เปอร์เซ็นต์ของคนที่ยอมรับการเป็นเก้าอี้ในระดับต่างๆ แนวความคิดของเขาเกี่ยวกับความคลุมเครือน่าจะเป็นเรื่องของความน่าจะเป็น

ในปี ค.ศ. 1965 Lotfi Zadeh ศาสตราจารย์จากมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย ได้ตีพิมพ์ผลงานชื่อ 'Fuzzy set' โดย Zadeh ได้นำ possibility theory ของ Jan Lukasiewicz มาพัฒนาต่อยอดให้อยู่ในรูปแบบของระบบของตรรกคณิตศาสตร์ และได้นำเสนอแนวคิดใหม่ในการประยุกต์ใช้กับภาษาธรรมชาติ ซึ่งตรรกรูปแบบใหม่ที่ใช้แสดงความคลุมเครือนี้เรียกว่า fuzzy logic และ Zadeh ได้กลายมาเป็นผู้เชี่ยวชาญที่เป็นต้นแบบทางด้าน fuzzy logic ในเวลาต่อมา

ตรรกศาสตร์แบบบูลีน มีค่าที่เป็นไปได้เพียง 2 ค่า แต่ ฟัซซีลอจิกสามารถกำหนดค่าได้มากกว่านั้น ในลักษณะที่เรียกว่า multi-valued โดยจะมีการกำหนดค่าระดับความเป็นสมาชิก (degree of membership) และค่าระดับความจริง (degree of truth) ซึ่งระดับดังกล่าวจะมีค่าต่อเนื่องอยู่ระหว่าง 0 (เป็นเท็จโดยสมบูรณ์) ถึง 1 (เป็นจริงโดยสมบูรณ์) ดังในรูปที่ 3.1 ซึ่งแสดงการกำหนดค่าของตรรกศาสตร์แบบบูลีน และฟัซซีลอจิกโดยใช้การกำหนดค่าสีขาวกับดำเป็นตัวอธิบายจะเห็นได้ว่า

ในตรรกศาสตร์แบบบูลีน ค่าระดับสีแสดงความเป็นสมาชิกมีค่าเป็นไปได้เพียงสองค่าคือขาวกับดำซึ่งเป็นตัวแทนของ จริงกับเท็จเท่านั้น แต่สำหรับพีชคณิตลอจิกแล้วจะแสดงค่าระดับสีในรูปของสเปกตรัมไล่เฉดสีจากสีขาวไปสีดำ กล่าวคือสามารถจัดการกับข้อมูลที่มีส่วนหนึ่งเป็นจริงและอีกส่วนหนึ่งเป็นเท็จได้ในเวลาเดียวกัน



รูปที่ 3.1 แสดงค่า ก. Boolean logic ข. Multi-valued logic

### 3.3.1 Fuzzy sets

เซตเป็นทฤษฎีพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ และภาษาที่ใช้กันอยู่ทั่วไปก็สามารถนำมาใช้แสดงข้อมูลในรูปของเซตได้ เช่น คำว่า รถ จะหมายถึงเซตของ รถ และถ้าระบุรถคันหนึ่งจะหมายถึงสมาชิกคันหนึ่งที่อยู่ในเซตของรถ

กำหนด  $X$  เป็นเซตแบบดั้งเดิมทั่วไป (crisp set) และ  $x$  คือค่าใดๆ ซึ่งค่า  $x$  อาจเป็นได้ทั้งเป็นสมาชิกของ  $X (x \in X)$  หรือไม่เป็นสมาชิกของ  $X (x \notin X)$  ตามทฤษฎีของเซตแบบดั้งเดิมจะกำหนดขอบเขตของการเป็นสมาชิกหรือไม่เป็นสมาชิกอย่างชัดเจน คือถ้าเป็นสมาชิกจะกำหนดให้มีค่าเป็น 1 และถ้าไม่เป็นสมาชิกจะกำหนดให้มีค่าเป็น 0 เรียกว่าเป็น principle of dichotomy

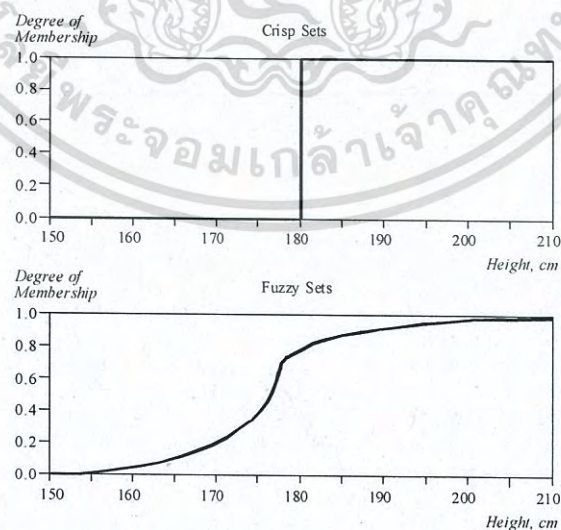
ในตรรกศาสตร์จะมีการพิจารณาเฉพาะค่าสองค่าเท่านั้นคือจริงกับเท็จ ซึ่งไม่สามารถใช้แสดงสิ่งที่คลุมเครือระหว่างจริงกับเท็จได้ แนวความคิดพื้นฐานของทฤษฎี fuzzy set คือหน่วยใดๆที่เป็นสมาชิกของ fuzzy set จะสามารถกำหนดค่าระดับความเป็นสมาชิกได้ในระดับต่างๆกัน ดังนั้นการแสดงความความเป็นสมาชิกจะไม่ใช่แค่จริงกับเท็จ แต่อาจจะมีบางส่วนจริงหรือบางส่วนเท็จด้วยค่าระดับต่างๆ ซึ่งเป็นจำนวนจริงระหว่าง 0 ถึง 1

จากตารางที่ 3.1 เป็นตัวอย่างข้อมูลความสูงของผู้ชาย 10 คน เมื่อมีการพิจารณาถึงความสูง ถ้าเป็นเซตแบบดั้งเดิม จะมีการกำหนดขอบเขตความสูงอย่างชัดเจน เช่น ที่ 180 ซม. ดังนั้น ถ้าผู้ชายมีความสูงเกินขอบเขตที่กำหนดก็จะถือว่าเป็นคนที่สูง และผู้ชายที่มีความสูงต่ำกว่าขอบเขตที่กำหนดก็จะถือว่าเป็นคนที่เตี้ย ในขณะที่ fuzzy set คำตอบจะอยู่ในรูปของสัดส่วนการเป็นสมาชิกของเซตที่ถือว่าเป็นคนที่สูง

นอกจากนี้ ยังอาจพิจารณาเซตอื่นๆที่อยู่ในรูปของ fuzzy set ได้อีก เซตของคนที่เตี้ย เซตของคนที่สูงมาก หรือเซตของคนที่มีความสูงโดยเฉลี่ย เป็นต้น จากรูปที่ 3.2 แขนงอนแสดงค่าที่เป็นไปได้ของหน่วยข้อมูล ในกรณีนี้ก็คือความสูงของคน แขนงตั้งแสดงค่าระดับความเป็นสมาชิกของ fuzzy set ผู้ชายที่สูง ที่จะเทียบค่าความสูงกับค่าระดับความเป็นสมาชิกที่ตรงกัน

ตารางที่ 3.1 ระดับความเป็นสมาชิกของ fuzzy set ของผู้ชายที่สูง

Name	Height (cm)	Degree of Membership	
		Crisp	Fuzzy
Chris	208	1	1.00
Mark	205	1	1.00
John	198	1	0.98
Tom	181	1	0.82
David	179	0	0.78
Mike	172	0	0.24
Bob	167	0	0.15
Steven	158	0	0.06
Bill	155	0	0.01
Peter	152	0	0.00



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการกำหนดขอบเขตของความเป็นสมาชิกของเซตแบบดั้งเดิมและ fuzzy set

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

fuzzy set สามารถกำหนดได้โดยเซตที่มีขอบเขตคลุมเครือไม่ชัดเจน

ถ้ากำหนดให้  $X$  เป็นค่าใดๆ ที่สามารถกำหนดได้ โดยค่า  $x$  ในทฤษฎีเซตแบบดั้งเดิม เซต  $A$  ของ  $X$  กำหนดได้โดยฟังก์ชัน  $f_A(x)$  เรียกว่าเป็น characteristic function ของ  $A$

$$f_A(x): X \rightarrow 0,1$$

โดยที่

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

ซึ่งเซตนี้จะแปลงค่าจาก  $X$  ไปเป็นเซตที่ประกอบด้วยค่าสองค่า คือ 0 และ 1 โดยการใช้การเป็นสมาชิกของ  $A$  มาเป็นตัวกำหนด

สำหรับใน fuzzy set แล้ว เซต  $A$  ของ  $X$  กำหนดได้โดยฟังก์ชัน  $\mu_A(x)$  เรียกว่าเป็น membership function ของ  $A$

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0,1] \quad (3.2)$$

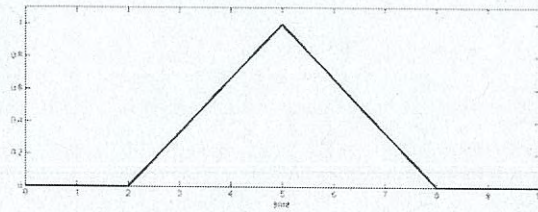
โดยที่

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x \text{ is totally in } A \\ 0, & \text{if } x \text{ is not in } A \\ 0 < \mu_A(x) < 1 & \text{if } x \text{ is partly in } A \end{cases} \quad (3.3)$$

จากสมการที่ 3.3 จะเห็นได้ว่า  $\mu_A(x)$  เป็นค่าที่ต่อเนื่อง สำหรับค่า  $x$  ใดๆ แล้วฟังก์ชัน  $\mu_A(x)$  จะมีค่าเท่ากับระดับที่  $x$  เป็นค่าที่อยู่ภายในเซต  $A$  ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 แสดงระดับของความ เป็นสมาชิก (degree of membership) ซึ่งจะเรียกว่าค่าความเป็นสมาชิก (membership valued) โดยที่ค่าความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซตจะถูกกำหนดโดยฟังก์ชันใดๆ  $\mu_A(x)$  ซึ่งเรียกว่าฟังก์ชันความ เป็นสมาชิก (membership function) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ใช้ในฟัซซีลอจิกมีอยู่ด้วยกันหลาย แบบ เช่น

-ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม (Triangular membership

$$\text{function}) f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal membership function)

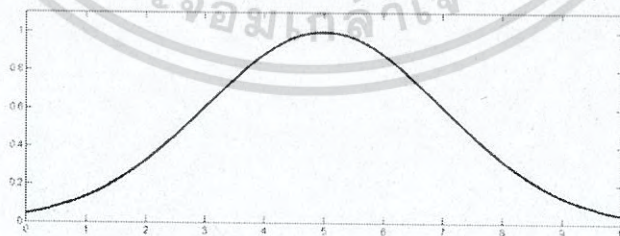
$$f(x, a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (3.5)$$



รูปที่ 3.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมู

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบเกาส์ (Gaussian membership function)

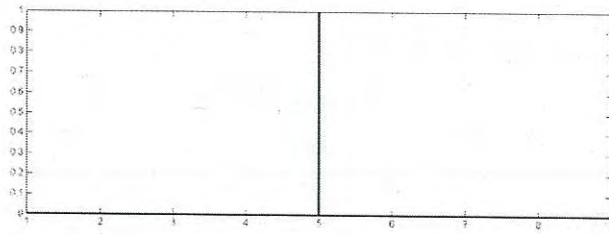
$$f(x, \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.5 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบเกาส์

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบซิงเกิลตัน (Singleton membership function)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

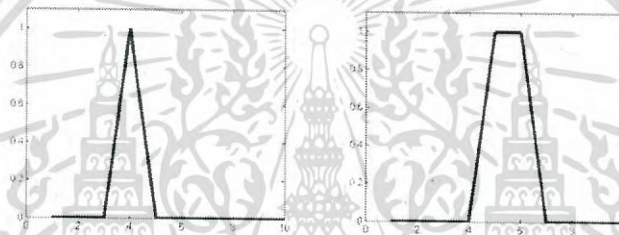


รูปที่ 3.6 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบซิงเกิลตัน

### 3.3.2 การดำเนินการพื้นฐานของฟัซซี (operation)

การดำเนินการของฟัซซีเซตมีคุณสมบัติเหมือนกับเซตโดยทั่วไป มีการดำเนินการคือ Union Intersection และ Complement

ให้ A และ B เป็นฟัซซีเซตใน U ที่มีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ  $\mu_A$  และ  $\mu_B$  ตามลำดับ

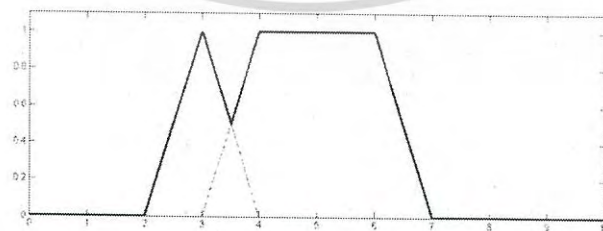


รูปที่ 3.7 ฟัซซีเซต A และ ฟัซซีเซต B

การดำเนินการพื้นฐานของฟัซซีเซตดังนี้

1. Union หรือ OR ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของสองฟัซซีเซต A และ B ที่ Union กัน ซึ่งมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็น  $\mu_A$  และ  $\mu_B$  ตามลำดับ โดยถูกนิยามให้เป็นค่าที่มากที่สุดของทั้งสองฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3.7)$$



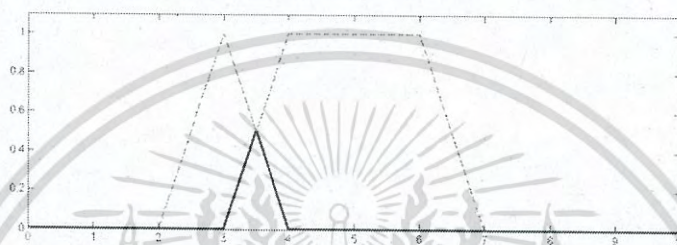
รูปที่ 3.8 ฟัซซีเซต A OR B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดำเนินการ Union ในทฤษฎีฟัซซีเซตเปรียบเทียบกับดำเนินการ OR ในตรรกศาสตร์แบบบูลีน

2. Intersection ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของสองฟัซซีเซต A และ B ที่ Intersection กัน ซึ่งมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็น  $\mu_A$  และ  $\mu_B$  ตามลำดับ โดยถูกนิยามให้เป็นค่าที่น้อยที่สุดของทั้งสองฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3.8)$$

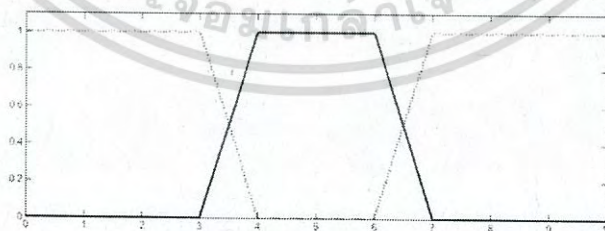


รูปที่ 3.9 ฟัซซีเซต A AND B

การดำเนินการ Intersection ในทฤษฎีฟัซซีเซตเปรียบเทียบกับดำเนินการ AND ในตรรกศาสตร์แบบบูลีน

3. Complement ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ Complement ของฟัซซีเซต A ซึ่งมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็น  $\mu_A$  โดยถูกนิยามให้เป็นนิเสธของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ระบุไว้

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (3.9)$$



รูปที่ 3.10 NOT ฟัซซีเซต A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดำเนินการ Complement ในทฤษฎีพีชคณิตเปรียบเทียบได้กับการดำเนินการ NOT ในตรรกศาสตร์แบบบูลีน

### 3.3.3 กฎของพีชคณิต

กฎของพีชคณิตเป็นวิธีการนำเอาความรู้ของมนุษย์มาใส่ในระบบพีชคณิตจิก กฎของพีชคณิตคือกลุ่มของประโยคเงื่อนไข IF-THEN (ถ้า-แล้ว) ในรูปแบบต่อไปนี้

IF  $x$  is A

THEN  $y$  is B

หรือ

ถ้า  $x$  เท่ากับ A

แล้ว  $y$  เท่ากับ B

โดยที่  $x$  และ  $y$  เป็นตัวแปรภาษาและ A และ B เป็นค่าเชิงภาษา โดยปกติแล้วกฎของพีชคณิตจะครอบคลุมค่าของตัวแปรที่อยู่ในส่วนเงื่อนไข IF ตัวอย่างเช่นระบบควบคุมอุณหภูมิที่ซึ่งมีค่าของตัวแปรอุณหภูมิที่เป็นไปได้คือ {'เย็น' 'กำลังดี' 'ร้อน'} ดังนั้นส่วนเงื่อนไขในกฎของพีชคณิตจะครอบคลุมค่าดังกล่าวเช่น

กฎ 1:

ถ้า อุณหภูมิเท่ากับ เย็น

แล้ว เอาต์พุต เป็น ให้ความร้อน

กฎ 2:

ถ้า อุณหภูมิเท่ากับ ร้อน

แล้ว เอาต์พุต เป็น ให้ความเย็น

กฎ 3:

ถ้า อุณหภูมิเท่ากับ กำลังดี

แล้ว เอาต์พุต เป็น ไม่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กฎของฟัซซีประกอบไปด้วยสองส่วนหลักคือส่วน IF และส่วน THEN ในทฤษฎีดั้งเดิม เมื่อค่าเงื่อนไขใน IF เป็นจริง ส่วน THEN จะถูกประเมิน แต่ในทฤษฎีฟัซซี ค่าเงื่อนไขใน IF จะมีความเป็นฟัซซีในระดับหนึ่ง ส่วน THEN จะถูกประเมินค่าด้วยค่าระดับความเป็นสมาชิก ซึ่งจะให้ค่าที่สัมพันธ์ในระดับนั้นๆ ด้วย ค่าเงื่อนไขในส่วนของ IF และ THEN ยังสามารถมีได้หลายค่า ดังรูปแบบต่อไปนี้

IF x is A

AND y is B

OR z is C

THEN p is D

q is E

ทุกเงื่อนไขในส่วน IF จะถูกประเมินพร้อมๆ กันและรวมกันด้วยปฏิบัติการทางเซต (เช่น AND หรือ OR) โดยปกติแล้วมักจะจำกัดจำนวนค่าเงื่อนไขในระบบไม่ให้มีมากเกินไป โดยการเลือกใช้กฎที่จำเป็นเท่านั้น (บางกฎอาจจะไม่สามารถมีโอกาสเกิดขึ้น) เพราะจะทำให้เพิ่มความยุ่งยากในการออกแบบกฎของฟัซซีต่อไปภายหลัง สังเกตว่าจำนวนเงื่อนไขดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่าของตัวแปรภาษาภายในระบบนั่นเอง เช่น ระบบควบคุมอุณหภูมิที่ซึ่งค่าของอุณหภูมิเป็นไปได้ 3 แบบคือ {'ร้อน', 'กำลังดี', 'เย็น'} จะสามารถมีเงื่อนไขต่างๆ

### 3.3.4 การอนุมานฟัซซี (Fuzzy Inference)

การอนุมานฟัซซีสามารถนิยามว่าเป็นการส่งค่า (mapping) จากค่าอินพุตของระบบไปยังเอาต์พุต โดยใช้หลักการของทฤษฎีเซต การอนุมานฟัซซีที่นิยมใช้มี 2 แบบด้วยกัน คือการอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani และการอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno

#### 3.3.4.1 การอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani (Mamdani-style inference)

เป็นวิธีการที่ใช้กันแพร่หลายมากที่สุด ในปี ค.ศ. 1975 Professor Ebrahim Mamdani จากมหาวิทยาลัยลอนดอน ได้สร้าง fuzzy system สำหรับควบคุมเครื่องจักรไอน้ำและส่วนประกอบของเครื่องต้มน้ำ โดยได้สร้างเซตของ fuzzy rules ขึ้นมาจากประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน

รูปแบบการทำงานของ Mamdani-style inference แบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนด้วยกัน คือ การทำฟัซซี การประเมินกฎของฟัซซี การรวมกฎและการทำดีฟัซซี (Fuzzification, Rule evaluation, Aggregation, Defuzzification)

1. การทำฟัซซี (fuzzification) การทำฟัซซีคือการคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของเซตค่าตัวแปรเชิงภาษาของตัวแปรในระบบ ในขั้นตอนแรกของการอนุมานฟัซซีจะต้องทำการหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของเซตตัวแปรอินพุต ซึ่งค่าของตัวแปรอินพุตที่เข้ามาสู่ในระบบ จะอยู่ในรูปของค่าเชิงตัวเลข โดยค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตค่านั้นๆ สามารถหาได้จากฟังก์ชันความเป็นสมาชิก การทำฟัซซีของตัวแปรอินพุตจะขึ้นอยู่กับกฎของฟัซซีด้วยเช่นกัน เนื่องจากสำหรับอินพุตค่าหนึ่งๆ จะมีผลต่อกฎของฟัซซีบางข้อเท่านั้น

2. การประเมินค่ากฎของฟัซซี (fuzzy rule evaluation) หลังจากคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตทั้งหมดได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการประเมินค่าของตัวแปรที่ได้ในกฎของฟัซซี การประเมินค่ากฎดังกล่าวจะเป็นส่วน IF จุดประสงค์เพื่อทำการประเมินว่าค่าเงื่อนไขจากอินพุตนั้น จะทำให้กฎใดต้องกระทำในส่วน THEN ต่อไป ซึ่งอาจจะมีการประเมินเงื่อนไขดังกล่าวมากกว่าหนึ่งกฎพร้อมๆ กัน เนื่องมาจากระบบมีอินพุตมากกว่าหนึ่ง เงื่อนไขของแต่ละอินพุตจะถูกประเมินค่าด้วยตัวกระทำของฟัซซีเซตเช่น AND หรือ OR เพื่อให้ได้ผลลัพธ์สุดท้ายเป็นค่าตัวเลขที่สามารถนำไปประเมินค่าส่วน THEN ที่ซึ่งภายหลังจะถูกนำไปประเมินเพื่อหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุตในขั้นตอนต่อไป

3. การรวมกฎ (aggregation) หลังจากกฎต่างๆ ถูกประเมินค่าแล้ว กฎที่มีผลไม่เท่ากับศูนย์จะถูกรวมเข้าด้วยกัน โดยการรวมผลลัพธ์ของฟังก์ชันสมาชิกที่ผ่านการประเมินค่า (ถูกตัดยอดหรือปรับขนาด) ทั้งหมดเข้าด้วยกันเป็นเซตเดียวสำหรับแต่ละตัวแปรเอาต์พุต การรวมกฎจะใช้ตัวกระทำยูเนียน ค่าที่ได้จากการรวมกฎนี้จะถูกแปลงเป็นค่าตัวเลขเดี่ยวเพื่อนำเอาไปใช้ในการประมวลผลต่อไป

4. การทำดีฟัซซี (defuzzification) จากขั้นตอนแรกมาจนถึงขั้นตอนนี้ ค่าต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบไม่ว่าจะเป็นค่าอินพุต กฎต่างๆ หรือเอาต์พุต เป็นค่าฟัซซี แต่สำหรับทุกระบบ ค่าของเอาต์พุตจะต้องถูกแปลงให้อยู่ในรูปที่สามารถใช้งานได้จริงเช่นค่าสัญญาณแรงดัน ค่าสัญญาณควบคุม ฯลฯ ซึ่งค่าเหล่านี้ไม่สามารถเป็นค่าฟัซซีได้ เพราะค่าฟัซซีจะเป็นที่เข้าใจภายในระบบฟัซซีเท่านั้น ดังนั้นค่าสุดท้ายจากเอาต์พุตของระบบจะต้องเป็นค่าชัดเจน (crisp value) การทำดีฟัซซีคือขั้นตอนในการแปลงค่าจากผลการรวมกฎให้อยู่ในรูปของค่าชัดเจน

ซึ่งการดำเนินงานดีฟัซซีได้มีผู้เสนอวิธีหลายวิธีด้วยกัน แต่วิธีที่นิยมใช้มากที่สุดคือ centroid technique ซึ่งวิธีนี้จะหาดำแหน่งในแนวแกนอนที่ทำให้เส้นตรงในแนวตั้ง ณ ตำแหน่งนั้นแบ่ง

aggregate set ออกเป็นสองส่วนเท่าๆ กัน ซึ่งในทางคณิตศาสตร์เรียกว่า center of gravity (COG) ดังสมการที่ 2.28

$$COG = \frac{\int_a^b \mu_A(x) x dx}{\int_a^b \mu_A(x) dx} \quad (3.10)$$

### 3.3.4.2 การอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno (Sugeno-style Inference)

ในปี ค.ศ. 1985 Michio Sugeno ได้นำเสนอวิธีการอนุมาน ที่แตกต่างไปจากวิธีของ Mamdani โดยต้องการลดขั้นตอนการคำนวณหาจุดศูนย์กลางในการทำดีฟัซซี Sugeno ได้ใช้เส้นตรงโทนในการแทนฟังก์ชันสมาชิกของส่วน THEN ในกฎของฟัซซี ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

IF x is A  
AND y is B  
THEN z is f(x, y)

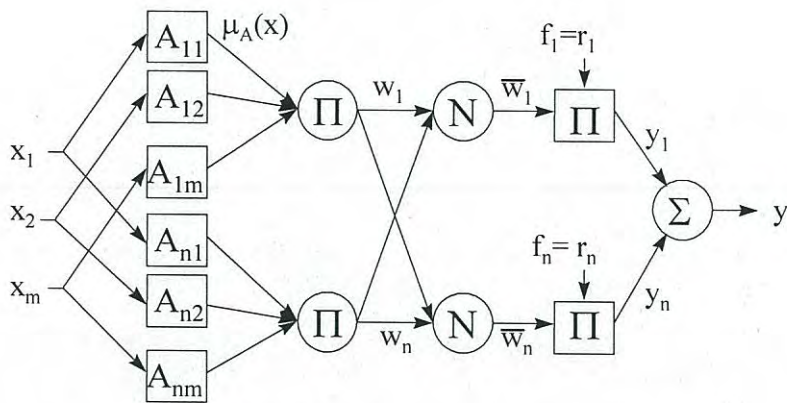
โดยที่ x y และ z เป็นตัวแปรภาษา A และ B เป็นค่าเชิงภาษา (หรือฟัซซีเซต) f(x, y) คือฟังก์ชันของตัวแปร x และ y ตัวอย่างของฟังก์ชัน f(x, y) ที่นิยมใช้ในแบบจำลองฟัซซีของ Sugeno อันดับศูนย์ (zero-order Sugeno fuzzy model) คือ

IF x is A  
AND y is B  
THEN z is k

โดยที่ k เป็นค่าคงที่

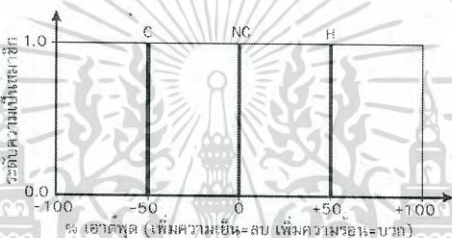
ซึ่งค่าเอาต์พุตของแต่ละกฎจะเป็นเส้นตรง จึงทำให้ค่อนข้างสะดวกสำหรับขั้นตอนการรวมกฎ โดยค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำดีฟัซซีนี้เรียกว่าค่าน้ำหนักเฉลี่ย (weighted average หรือ WA) ดังสมการที่ 3.11

$$WA = \frac{\sum_{m=1}^L \mu(k_m) \times k_m}{\sum_{m=1}^L \mu(k_m)} \quad (3.11)$$



รูปที่ 3.11 โครงสร้างการอนุมานฟัซซีแบบของ Sugeno อันดับศูนย์

โดยที่  $\mu(k_m)$  คือค่าระดับความเป็นสมาชิกของเส้นตรงโทน  $k_m$



รูปที่ 3.12 ตัวอย่างฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตแบบ Sugeno

ซึ่งข้อดีของการอนุมานฟัซซีทั้งสองแบบนั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบข้อดีของการทำการอนุมานฟัซซีทั้งสองแบบ

Mamdani-style inference	Sugeno-style Inference
-ตรงไปตรงมา ง่ายต่อความเข้าใจ	-ประสิทธิภาพเชิงการคำนวณ
-เป็นที่ยอมรับนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง	-ใช้งานได้ดีกับระบบเชิงเส้น
-สะดวกต่อระบบที่มีการป้อนอินพุตโดยตรงจากมนุษย์	-ใช้งานได้ดีกับระบบหาค่าเหมาะที่สุดและระบบเชิงปรับตัวได้
	-มีค่าเอาต์พุตที่ต่อเนื่อง
	-เหมาะสมในการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมเป็นการจำลองการทำงานของสมองมนุษย์ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นแนวความคิดที่ต้องการให้คอมพิวเตอร์มีความชาญฉลาดในการเรียนรู้เหมือนมนุษย์ที่มีการเรียนรู้ สามารถฝึกฝนได้ และสามารถนำความรู้และทักษะไปแก้ปัญหาต่าง ๆ โดยโครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วยกลุ่มนิวรอน (Neuron) ที่มีหน้าที่ในการประมวลผลข้อมูล โดยแต่ละนิวรอนจะเชื่อมต่อกันด้วย weight เพื่อทำการรับและส่งข้อมูลเหมือนกับโครงข่ายประสาทสมองของมนุษย์[20-21]

ในปี ค.ศ. 1943 ถือได้ว่าเป็นปีแห่งการกำเนิดของสาขาโครงข่ายประสาทเทียมในวงการวิทยาศาสตร์ โดยแม็คคัลลอค (Mc Culloch) และพิตส์ (Pitts) ได้เสนอแบบจำลองของเซลล์ประสาท และได้แสดงให้เห็นว่าในทางทฤษฎีนั้น โครงข่ายของแบบจำลองเซลล์ประสาทสามารถทำงานร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ ต่อมาปี ค.ศ. 1949 โดแนลด์ เฮบบ์ (Donald Hebb) ได้เสนอผลงานวิจัยว่าการเรียนรู้ของสมอง สามารถอธิบายได้ด้วยรูปแบบของการประกอบ เซลล์ประสาทเข้าด้วยกันเป็นโครงข่าย และได้เสนอกฎการเรียนรู้ของเฮบบ์ (Hebb's rule) ที่ทำให้โครงข่ายของเซลล์ประสาทเทียมที่แม็คคัลลอคและพิตส์เสนอไว้ สามารถเรียนรู้ปัญหาต่าง ๆ ได้สำเร็จ การเรียนรู้ในรูปแบบของเฮบบ์บนเซลล์ประสาทเทียมของแม็คคัลลอคและพิตส์นั้น เป็นการเรียนรู้แบบ “ไม่มีผู้สอน” ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วโครงข่ายประสาทเทียมที่เรียนรู้ จะพยายามจัดกลุ่มข้อมูลที่โครงข่ายมองว่าคล้ายคลึงกันไปในกลุ่มเดียวกัน ซึ่งไม่เหมาะสมกับปัญหาประเภทที่ต้องมีการควบคุมกระบวนการเรียนรู้

ขณะที่ในช่วงปี ค.ศ. 1947 คอมพิวเตอร์ที่ทำงานเลียนแบบสมองเครื่องแรกของโลกถูกสร้างและทดสอบโดยมินสกี (Minsky) ซึ่งได้เสนอผลงานดังกล่าวในปี ค.ศ. 1968 ว่าเมื่อคอมพิวเตอร์ดังกล่าวได้รับการป้อนตัวอย่างสำหรับการเรียนรู้เข้าไป ก็จะสามารถปรับอัตราการขยายสัญญาณในการเชื่อมโยงหรือ “ความแข็งแรงของการเชื่อมโยง” ระหว่างเซลล์ประสาทเทียมได้เองโดยอัตโนมัติ ซึ่งเป็นการแสดงการเรียนรู้ตัวอย่างที่ถูกป้อนเข้าไป

ในปี ค.ศ. 1958 แฟรงค์ โรเซนแบลทท์ (Frank Rosenblatt) ได้พัฒนาลักษณะโครงข่ายประสาทเทียมขึ้นโดยใช้แบบจำลองของแม็คคัลลอคและพิตส์เป็นแนวทางรวมทั้งเสนอวิธีการเรียนรู้แบบใหม่สำหรับลักษณะโครงข่ายประสาทเทียมด้วย โครงข่ายประสาทเทียมดังกล่าวเรียกว่า เพอร์เซพตรอน (Perceptron) ซึ่งมีการเรียนรู้แบบ “มีผู้สอน” (supervised learning) โดยเป็นการปรับความแข็งแรงของการเชื่อมโยง ซึ่งจะพิจารณาได้จากการเปรียบเทียบความรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมกับความรู้ของ “ผู้สอน” (teacher) เพอร์เซพตรอนมีความเหมาะสมกับงานประเภท “การระบุ

ชนิด” ซึ่งในระหว่างการเรียนรู้ นั้น เพอร์เซพตรอนจะถูกสอนว่าข้อมูลตัวอย่างที่สอนเข้าไปแต่ละแบบ นั้นจัดเป็นชนิดใดบ้างหากปัญหาและข้อมูลตัวอย่างมีความเหมาะสมเพอร์เซพตรอนจะสามารถระบุ ชนิดของข้อมูลที่ไม่เคยเห็นมาก่อนได้ถูกต้อง

ในช่วงปี ค.ศ. 1957 เบอร์นาร์ด วิโดรว (Bernard Widrow) และมาร์เซียน ฮอฟฟ์ (Marcian Hoff) ได้พัฒนาอุปกรณ์ที่เรียกว่า อดาไลน์ (ADALINE; Adaptive Linear combiner) และกฎการเรียนรู้แบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง เรียกว่ากฎการเรียนรู้ของวินโดรว-ฮอฟฟ์ (Windrow-Hoff learning rule) ที่เป็นการเรียนรู้แบบ “มีผู้สอน” ซึ่งในเวลาต่อมา อุปกรณ์ดังกล่าวได้รับการขยายแนวคิดไปเป็นมาดาไลน์ (MADALINE ; Many ADALINEs) และได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการรู้จำรูปแบบ (pattern recognition) การพยากรณ์อากาศ และระบบควบคุมที่จำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนระบบไปตามสภาพแวดล้อมต่าง ๆ

#### 3.4.1 แนวคิดพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อจำลองการทำงานของโครงข่ายประสาทในสมองมนุษย์ โดยที่โครงข่ายประสาทของมนุษย์ประกอบด้วยเซลล์ประสาท (Neuron) และจุดประสานประสาทหรือไซแนปส์ (Synapses) โดยโครงสร้างของการส่งสัญญาณประสาทประกอบจากการเชื่อมต่อระหว่างเซลล์ประสาทหลายพันล้านเซลล์ เซลล์ประสาทแต่ละเซลล์ประกอบด้วยแขนงรับสัญญาณประสาทซึ่งเป็นเสมือนหน่วยรับข้อมูลป้อนเข้า เรียกว่า “เดนไดรท์” (dendrites) และส่วนปลายของเซลล์ประสาทในการส่งสัญญาณประสาทซึ่งเป็นเสมือนหน่วยส่งข้อมูลออกของเซลล์ เรียกว่า “แอกซอน” (axon) โดยการส่งสัญญาณประสาทดังกล่าว อาจทำให้เกิดได้ทั้งการกระตุ้นและยับยั้ง ทั้งนี้นอกจากลักษณะดังกล่าวแล้ว วิธีการประมวลผลภายในเซลล์ประสาทแต่ละเซลล์ยังมีการขยายหรือลดขนาดของสัญญาณอีกด้วย โดยสัญญาณจากเดนไดรท์ต่าง ๆ จะรวมกันเข้าสู่เซลล์ประสาท และหากสัญญาณรวมมีความแรงเกินค่าระดับ (threshold) ของเซลล์ประสาทนั้น ๆ เซลล์ประสาทก็จะส่งสัญญาณออกทางแอกซอนต่อไป

กระบวนการเรียนรู้ในสิ่งมีชีวิตจะมีผลให้เกิดการสร้างไซแนปส์ระหว่างเซลล์ประสาทขึ้นมาใหม่ หรือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของไซแนปส์ต่าง ๆ ในโครงข่ายของเซลล์ประสาท โครงข่ายประสาทของสิ่งมีชีวิตจึงไม่ได้ทำงานแบบเป็นลำดับขั้นตอน (sequential) แต่เพียงอย่างเดียว โครงข่ายประสาทเทียมมีคุณลักษณะคล้ายกับการส่งผ่านสัญญาณประสาทในสมองของมนุษย์ กล่าวคือ มีความสามารถในการรวบรวมความรู้ (knowledge) โดยผ่านกระบวนการเรียนรู้ (learning

process) และความรู้เหล่านี้จะจัดเก็บอยู่ในโครงข่ายในรูปแบบค่าน้ำหนัก (weight) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้เมื่อมีการเรียนรู้สิ่งใหม่ ๆ เข้าไปค่าน้ำหนักทำหน้าที่เปรียบเสมือนความรู้ที่รวบรวมไว้เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาเฉพาะอย่างของมนุษย์

การประมวลผลต่าง ๆ เกิดขึ้นในหน่วยประมวลผลย่อย เรียกว่า โหนด (node) ซึ่งโหนดเป็นการจำลองลักษณะการทำงานมาจากเซลล์การส่งสัญญาณ (signal) ระหว่างโหนดที่เชื่อมต่อกัน (connection) จำลองมาจากการเชื่อมต่อของเดนไดรท์และแอกซอนในระบบประสาทของมนุษย์ ภายในโหนดจะมีฟังก์ชันกำหนดสัญญาณส่งออกที่เรียกว่า ฟังก์ชันกระตุ้น (activation function) หรือฟังก์ชันการแปลง (transfer function) ซึ่งทำหน้าที่เปรียบเสมือนกระบวนการทำงานในเซลล์

### 3.4.2 องค์ประกอบของโครงข่ายประสาทเทียม

องค์ประกอบของโครงข่ายประสาทเทียม ประกอบด้วย

#### 1. หน่วยประมวลผลข้อมูล (Processing units) หรือ โหนด

โดยแต่ละโหนดสามารถมีอินพุตได้หลายค่าแต่มีเอาต์พุตได้เพียงค่าเดียว ซึ่งสามารถแบ่งกลุ่มโหนดได้ดังนี้

-ชั้นอินพุต (Input unit : X) ทำหน้าที่รับข้อมูลจากภายนอกเข้ามา โดยจำนวนของโหนดเท่ากับอินพุตที่รับเข้ามา ซึ่งอินพุตอาจเป็นค่าปรกติหรืออาจเป็นที่ค่าที่ถูกปรับให้อยู่ระหว่างช่วง  $[0,1]$  หรือ  $[-1,1]$  ขึ้นอยู่กับรูปแบบของโครงข่าย

-ชั้นซ่อน (Hidden unit) เป็นชั้นกลางระหว่างชั้นอินพุตและชั้นเอาต์พุต ทำหน้าที่ทั้งรับและส่งข้อมูลภายในโครงข่าย สามารถมีได้มากกว่า 1 ชั้น

-ชั้นเอาต์พุต (Output unit : Y) ทำหน้าที่ส่งค่าที่คำนวณได้ออกนอกโครงข่าย ซึ่งก็คือคำตอบที่ได้จากการทำงานของโครงข่าย

#### 2. ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight)

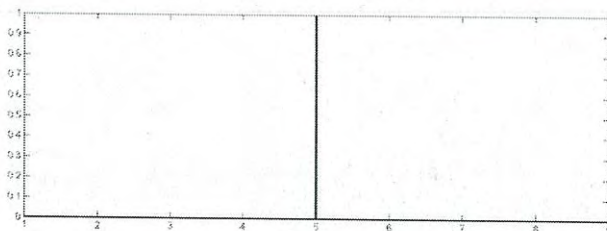
เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกว่าอินพุตที่เข้ามามีความสำคัญมากน้อยเพียงใด ถ้าการเชื่อมต้อมีค่าถ่วงน้ำหนักมาก อินพุตที่เข้ามาก็มีความสำคัญมาก แต่ถ้าการเชื่อมต้อมีค่าถ่วงน้ำหนักน้อย อินพุตที่เข้ามาก็มีความสำคัญน้อย โดยค่าถ่วงน้ำหนักอาจจะมีค่าเป็นบวก (กระตุ้น) หรืออาจจะมีค่าเป็นลบ (ยับยั้ง) ได้

#### 3. ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function)

ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในโครงข่ายประสาทเทียมมีหลายชนิดด้วยกัน ได้แก่

-ฟังก์ชันแบบ hard-limit

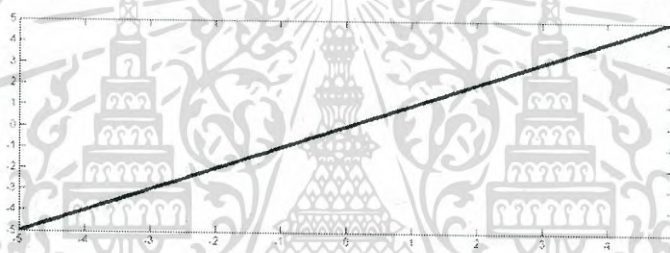
$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases} \quad (3.12)$$



รูปที่ 3.13 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ hard-limit

-ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้น (linear)

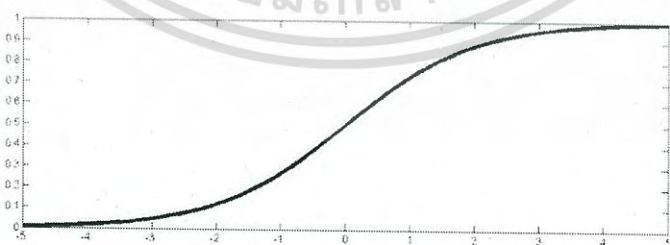
$$f(x) = x \quad (3.13)$$



รูปที่ 3.14 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้น

-ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลอคซิกมอยด์ (Logarithmic sigmoid)

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (3.14)$$

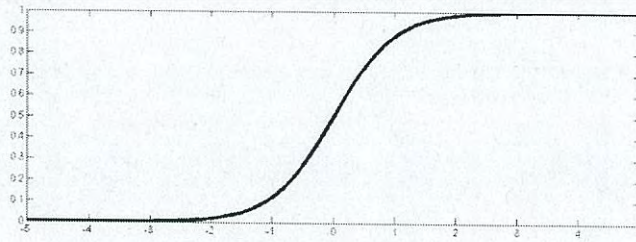


รูปที่ 3.15 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลอคซิกมอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบแทนซิกมอยด์ (tangent sigmoid)

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-2x}} \quad (3.15)$$



รูปที่ 3.16 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบแทนซิกมอยด์

โดยค่าที่ได้จากการผ่าน sigmoid function มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 จากนั้น แต่ละโหนดจะส่งค่าที่ได้ไปยังชั้นถัดไป จนกว่าจะถึงชั้นเอาต์พุตซึ่งถือว่าเป็นสิ้นสุดการคำนวณ

4. คำนวณหาค่าเอาต์พุตของแต่ละโหนดในโครงข่าย โดยแบ่งออกเป็น

- ในชั้นอินพุต ค่าอินพุตและค่าเอาต์พุตเป็นค่าเดียวกัน คือเป็นค่าที่ได้รับจากภายนอก
- ในชั้นซ่อนและชั้นเอาต์พุต ค่าอินพุต ได้จากการรวมผลคูณของค่า weight กับเอาต์พุตของชั้นก่อนหน้า

$$A_j = \sum_{i=1}^n w_{ji} x_i \quad (3.16)$$

จากนั้นให้นำ  $A_j$  ที่ได้ไปผ่านฟังก์ชันถ่ายโอน

### 3.4.3 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

จากองค์ประกอบของโครงข่ายประสาทเทียม สามารถแบ่งโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมตามจำนวนชั้นของโครงข่ายแบบกว้าง ๆ ได้ 2 แบบ ดังนี้

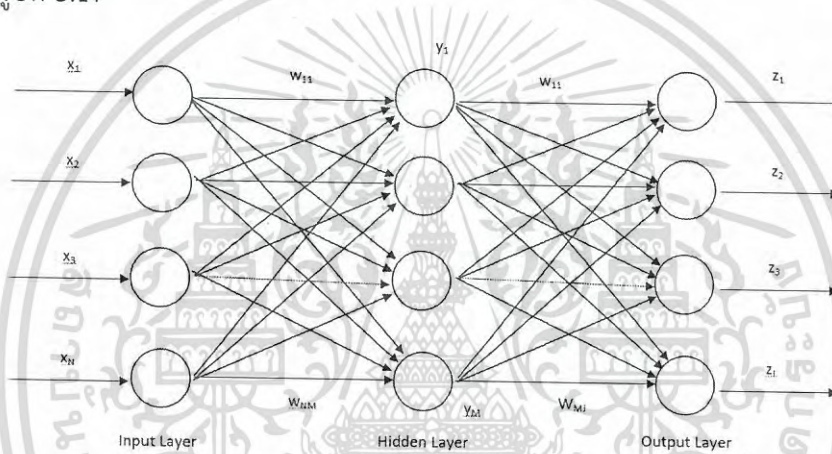
#### 3.4.3.1 โครงข่ายแบบชั้นเดียว (single layer)

โครงข่ายแบบชั้นเดียว เป็นโครงข่ายประสาทเทียมอย่างง่ายที่มีเพียงชั้นรับข้อมูลป้อนเข้า และชั้นส่งข้อมูลออกเท่านั้น โหนดในชั้นรับข้อมูลป้อนเข้าทำหน้าที่รับข้อมูลเข้า แล้วส่งข้อมูลผ่านเส้นเชื่อมโยงต่าง ๆ ไปให้โหนดในชั้นส่งข้อมูลออก ความเข้มของสัญญาณ หรือปริมาณข้อมูลที่นำเข้าสู่โหนดในชั้นส่งข้อมูลออกจะขึ้นอยู่กับค่าน้ำหนักที่อยู่บนเส้นเชื่อมโยงโหนดในชั้นส่งข้อมูลออกจะนำข้อมูลที่รับมาคำนวณโดยใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า ฟังก์ชันถ่ายโอน ที่เหมาะสมกับ

ปัญหา แล้วส่งผลลัพธ์ที่ได้ออกมาเป็นข้อมูลส่งออก ตัวอย่างโครงข่ายประเภทนี้ ได้แก่ โครงข่ายแบบชั้นเดียวแบบเพอเซปตรอนอย่างง่าย (simple perceptron) และโครงข่ายโฮปฟิลด์ (hopfield networks)

### 3.4.3.2. โครงข่ายแบบหลายชั้น (multi layer)

โครงข่ายแบบหลายชั้น เป็นโครงข่ายที่มีชั้นซ่อนตั้งแต่ 1 ชั้นขึ้นไป โครงข่ายแบบหลายชั้นจะใช้ในกรณีที่ปัญหามีความซับซ้อน ซึ่งโครงข่ายแบบชั้นเดียวไม่สามารถแก้ปัญหาได้ จึงเพิ่มจำนวนโหนดที่มีการคำนวณ หรือชั้นซ่อนให้กับโครงข่าย ตัวอย่างของโครงข่ายแบบหลายชั้นเช่น การแพร่ย้อนกลับ (back propagation) เซลฟออร์แกนไนซิงแมปส์ (self organizing maps) และเคาน์เตอร์พรอพเกชัน (counter propagation) เป็นต้น ลักษณะโครงสร้างโครงข่ายแบบหลายชั้นแสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นที่มีชั้นซ่อน 1 ชั้น

## 3.4.4 ลักษณะการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม

สามารถแบ่งการเรียนรู้ได้ 2 แบบ คือ การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised Learning) และการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning)

### 3.4.4.1 การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised Learning)

เป็นการเรียนแบบที่มีการตรวจคำตอบเพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมปรับตัว ชุดข้อมูลที่ใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียมจะมีคำตอบไว้คอยตรวจสอบว่าโครงข่ายประสาทเทียมให้คำตอบที่ถูกหรือไม่ ถ้าตอบไม่ถูก โครงข่ายประสาทเทียมก็จะปรับตัวเองเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น (เปรียบเทียบกับคน

เหมือนกับการสอนนักเรียนโดยมีครูผู้สอนคอยแนะนำ) ซึ่งมักจะประยุกต์ใช้ในงานประมาณหาค่าข้อมูล

#### 3.4.4.2 การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning)

เป็นการเรียนแบบไม่มีผู้แนะนำ ไม่มีการตรวจคำตอบว่าถูกหรือผิด โครงข่ายประสาทเทียมจะจัดเรียงโครงสร้างด้วยตัวเองตามลักษณะของข้อมูล ผลลัพธ์ที่ได้ โครงข่ายประสาทเทียมจะสามารถจัดหมวดหมู่ของข้อมูลได้ ซึ่งมักจะประยุกต์ใช้ในงานแยกแยะ จัดกลุ่มข้อมูล เช่น การแยกแยะพันธุ์พืช พันธุ์สัตว์ตามลักษณะรูปร่าง

#### 3.4.5 อัลกอริทึมที่ใช้ในโครงข่ายประสาทเทียม

อัลกอริทึมที่ใช้ในโครงข่ายประสาทเทียมในกระบวนการเรียนรู้มี 2 รูปแบบ คือ การเรียนรู้แบบไปข้างหน้า กับการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ ซึ่งที่นิยมใช้คือ การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (Back-propagation Algorithm) ถือเป็นหนึ่งในวิธีการเรียนรู้บนโครงข่ายประสาทเทียม โดยมีการเชื่อมโยงในแต่ละชั้นแบบ fully ซึ่งมีลักษณะที่ทุกโหนดที่อยู่ในชั้นอินพุตเชื่อมต่อกับทุกโหนดในชั้นถัดไป เป็นเช่นนี้ในทุกชั้น โดยเอาต์พุตที่ป้อนให้กับโครงข่ายจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับเอาต์พุตที่เกิดขึ้นจริง เพื่อหาค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้ง แล้วนำค่าความผิดพลาดที่ได้มาใช้ปรับค่า weight ระหว่างแต่ละโหนดในโครงข่าย โดยจะทำการปรับย้อนกลับมาจากชั้นเอาต์พุตไปยังชั้นแรกที่อยู่ก่อนชั้นอินพุตหลังจากนั้นป้อนอินพุตตัวใหม่ให้กับโครงข่ายอีกครั้งแล้วทำการเปรียบเทียบหาค่าความผิดพลาดใหม่ โดยการเรียนรู้จะทำเช่นนี้เรื่อยไปจนกว่าค่าความผิดพลาดที่ได้จะมีค่าที่เข้าใกล้ 0 หรือได้ค่าความผิดพลาดที่สามารถยอมรับได้ ซึ่งขั้นตอนในการฝึกหัดโครงข่ายมีดังนี้

1. กำหนด weight เริ่มต้นจากการสุ่มตัวเลขให้มีค่าน้อยๆ
2. ใส่ตัวอย่างที่ต้องการฝึกหัดเข้าสู่ชั้นอินพุต นำค่าเอาต์พุตของชั้นอินพุตมาเป็นค่าอินพุตให้กับชั้นถัดไป ดังนี้

$$I_j = \sum_i w_{ij} O_i \quad (3.17)$$

$w_{ij}$  เป็น weight ของการเชื่อมต่อจาก Unit  $i$  ไป Unit  $j$

$O_i$  เป็น เอาต์พุตของ Unit  $i$

หลังจากนั้นนำไปผ่านฟังก์ชันถ่ายโอนเพื่อคำนวณหาค่าเอาต์พุตของ Unit  $j$

$$O_j = f(I_j) \quad (3.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำค่าเอาต์พุตที่ได้และเอาต์พุตที่ต้องการ ไปหาค่าความผิดพลาด

- คำนวณหาค่าความผิดพลาดของแต่ละโหนดที่อยู่ในชั้นเอาต์พุต

$$Err_k = O_k(1 - O_k)(T_k - O_k) \quad (3.19)$$

- คำนวณหาค่าความผิดพลาดที่เกิดบนชั้นซ่อน

$$Err_j = O_j(1 - O_j) \sum_{k=1}^n Err_k w_{jk} \quad (3.20)$$

4. ปรับค่า weight ตามค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

- คำนวณหาค่า weight ที่เปลี่ยนไปของชั้นเอาต์พุต

$$\Delta w_{jk} = \alpha Err_k O_j \quad (3.21)$$

$$w_{jk} = w_{jk} + \Delta w_{jk} \quad (3.22)$$

- คำนวณหาค่า weight ที่เปลี่ยนไปของชั้นซ่อน

$$\Delta w_{ij} = \alpha Err_j O_i \quad (3.23)$$

$$w_{ij} = w_{ij} + \Delta w_{ij} \quad (3.24)$$

$\alpha$  คือ อัตราการเรียนรู้ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

5. ให้ทำซ้ำจนกระทั่งได้ค่าความผิดพลาดที่เข้าใกล้ 0 หรือได้ค่าความผิดพลาดที่สามารถยอมรับได้

### 3.5 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียระหว่างตรรกศาสตร์คลุมเครือกับโครงข่ายประสาทเทียม

ข้อดีข้อเสียของตรรกศาสตร์คลุมเครือกับโครงข่ายประสาทเทียมถูกแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียระหว่างตรรกศาสตร์คลุมเครือกับโครงข่ายประสาทเทียม

	ตรรกศาสตร์คลุมเครือ	โครงข่ายประสาทเทียม
ข้อดี	1. มีเหตุผลเชิงตรรกะ 2. สามารถใช้ในการตัดสินใจที่คลุมเครือได้	1. มีความสามารถในการเรียนรู้ 2. ใช้การกับพยากรณ์ที่ความสัมพันธ์เป็นแบบไม่เชิงเส้นได้

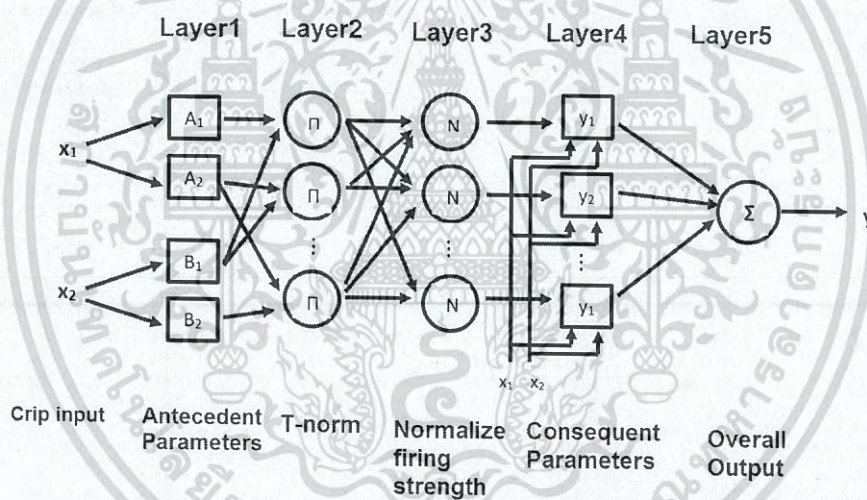
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

	ตรรกศาสตร์คลุมเครือ	โครงข่ายประสาทเทียม
ข้อเสีย	1. ไม่มีกระบวนการเรียนรู้ด้วยตัวเองเพื่อปรับแต่งกฎและตัวแปร 2. ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการตั้งกฎและตัวแปรต่างๆ รวมถึงการประเมินความถูกต้องของระบบ	1. ไม่สามารถอธิบายและให้เหตุผลเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของตัวแปรและผลลัพธ์ที่ได้ 2. ไม่มีหลักการที่ชัดเจนในการกำหนดโครงสร้างของ ANN เช่น จำนวนชั้นซ่อน จำนวนโหนดในแต่ละชั้นซ่อน รูปแบบการเรียนรู้ ฟังก์ชันกระตุ้นที่เหมาะสม

### 3.6 โครงสร้างระบบอนุมานนิเวศวิทยาโครงข่ายปรับตัวได้

โครงสร้างระบบอนุมานนิเวศวิทยาโครงข่ายปรับตัวได้ ที่นิยมใช้นั้นเป็นการอนุมานฟuzzyแบบ Sugeno (Sugeno-style Inference) โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 3.18 [13,22]



รูปที่ 3.18 โครงสร้างระบบอนุมานฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้

จากรูปที่ 3.18 เป็นระบบที่มีโครงสร้าง 2 อินพุต 1 เอาต์พุต แต่ละอินพุตแบ่งเป็นสองฟuzzyเซต มิติที่ 1 แบ่งฟuzzyเซตเป็น  $A_1$  และ  $A_2$  มิติที่ 2 แบ่งเป็น  $B_1$  และ  $B_2$  ส่วนเอาต์พุตมีพารามิเตอร์เป็น  $r_{j0}$ ,  $r_{j1}$  และ  $r_{j2}$  โดยมีกฎจำนวน  $L$  กฎ ดังนี้

$$\text{Rule1: IF } x_1 \text{ is } A_1 \text{ and } x_2 \text{ is } B_1 \text{ THEN } y_1 = r_{10} + r_{11}x_1 + r_{12}x_2$$

$$\text{Rule2: IF } x_1 \text{ is } A_2 \text{ and } x_2 \text{ is } B_1 \text{ THEN } y_2 = r_{20} + r_{21}x_1 + r_{22}x_2$$

$$\vdots$$

$$\text{RuleL: IF } x_1 \text{ is } A_2 \text{ and } x_2 \text{ is } B_2 \text{ THEN } y_L = r_{L0} + r_{L1}x_1 + r_{L2}x_2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยโครงสร้างประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1: Antecedent Parameters เป็นขั้นของการทำฟัซซิฟิเคชัน (Fuzzification) หรือ input membership ซึ่งเป็นการกระทำในส่วนของเงื่อนไข if ในกฎของฟัซซี โดยเป็นการหาค่าฟัซซีจากอินพุตในรูปแบบปกติ (Crip input,  $x$ ) ให้เป็นค่าความเป็นสมาชิก ผ่านฟังก์ชันความเป็นสมาชิก  $\mu_{A_i}(x)$  โดยที่

$$O_j^1 = \mu_{A_i}(x) \quad (3.25)$$

เมื่อ  $O_j^1$  เป็นค่าความเป็นสมาชิกของพจน์ภาษา  $A_i$  โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

ขั้นที่ 2: T-norm เป็นขั้นทำการเชื่อมโยงค่าฟัซซีจากแต่ละมิติโดยคูณสัญญาณเข้าที่เป็นฟัซซีเข้าด้วยกัน และส่งค่าฟัซซีผลคูณเป็นสัญญาณออก

$$w_j = \mu_{j1}(x_1) \times \mu_{j2}(x_2) \quad (3.26)$$

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

ขั้นที่ 3: Normalize firing strength หรือขั้นค่าถ่วงน้ำหนัก เป็นขั้นหาค่าฟัซซีผลรวมทุกกฎให้เป็นหนึ่ง โดยค่าฟัซซี จากกฎแต่ละข้อจะถูกหารด้วยผลรวมของค่าฟัซซีจากทุกกฎข้อ

$$\bar{w}_j = \frac{w_j}{w_1 + w_2 + \dots + w_L}, j = 1, 2 \dots L \quad (3.27)$$

ขั้นที่ 4: Consequent Parameters เป็นขั้นของ output membership ซึ่งเป็นการกระทำในส่วนของเงื่อนไข then ในกฎของฟัซซี โดยนำค่าฟัซซีจากกฎแต่ละข้อที่ผ่านการถ่วงน้ำหนักแล้วคูณเข้ากับสมการเส้นตรง ดังนั้นค่าเอาต์พุตจากขั้นนี้หาได้จาก ดังนั้นค่าเอาต์พุตจากขั้นนี้หาได้จาก

$$O_j^4 = \bar{w}_j y_j = \bar{w}_j (r_{j0} + r_{j1} x_1 + r_{j2} x_2) \quad (3.28)$$

โดย  $r_{j0}, r_{j1}$  และ  $r_{j2}$  เป็นค่าคงที่ใดๆ ที่สามารถปรับค่าได้

ขั้นที่ 5: Overall Output เป็นขั้นตอนการทำให้ฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification) เพื่อหาเอาต์พุตของโครงข่าย โดยทำการรวมสัญญาณเข้า เอาต์พุตหาได้จาก

$$O_j^5 = \bar{w}^T y = \sum_{j=1}^L \bar{w}_j y_j \quad (3.29)$$

เมื่อ  $\bar{w}^T = [\bar{w}_1 \ \bar{w}_2 \dots \ \bar{w}_L]$  เป็นค่าฟัซซีที่ผ่านวิธีนอมอลไลซ์จากกฎข้อ 1 ถึง  $L$

$y^T = [y_1 \ y_2 \dots \ y_L]$  เป็นส่วนข้อตามของกฎข้อ 1 ถึง  $L$

### 3.7 การฝึกฝนระบบอนุมานนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้

#### 3.7.1 การฝึกฝนระบบอนุมานนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ด้วยวิธี Steepest Descent

ประสิทธิภาพของระบบอนุมานนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อินพุตและเอาต์พุตที่มีลักษณะเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น ขึ้นอยู่กับการแบ่งส่วนฟuzzyเซตของอินพุตและ เอาต์พุต ดังนั้นการปรับแต่งฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจึงเป็นสิ่งสำคัญในการสร้างระบบอนุมานนิวโร ฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ เนื่องจากงานการปรับแต่งสามารถมองได้เป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด รูปแบบการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมและขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถประยุกต์ใช้ได้ [13]

กำหนดให้ข้อมูลชุดฝึกสอนคู่อินพุตเอาต์พุตเป็น  $(x_1, t_1), \dots, (x_K, t_K)$  เมื่อ  $x_k = [x_{k1}, \dots, x_{kM}]^T$ ,  $t_k = [t_{k1}, \dots, t_{kM}]$ ,  $k = 1, \dots, K$ , และ  $K$  เป็นจำนวนข้อมูลทั้งหมดในชุดฝึกสอน

จากอนุมานนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ ANFIS มี 5 ชั้น สมมติให้ในชั้น  $q^{th}$  มีจำนวน  $S^{(q)}$  โหนด ให้เอาต์พุตของโหนดในตำแหน่ง  $j$  เป็น  $o_j^q$  โหนดฟังก์ชันมีค่าเอาต์พุตขึ้นอยู่กับสัญญาณ เข้าและเซตพารามิเตอร์

$$O_j^q = f_j^q (O_1^{q-1}, O_2^{q-1}, \dots, O_{S^{(q-1)}}^{q-1}, a, b, c, \dots) \quad (3.30)$$

เมื่อ  $a, b, c, \dots$  เป็นพารามิเตอร์ที่อยู่ที่โหนด  $q$

ค่าผิดพลาดของโครงข่ายเปรียบเทียบกับค่าเอาต์พุตของโครงข่าย  $a_k$  และค่าเป้าหมาย  $t_k$   $e_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$  สามารถคำนวณได้จาก

$$E_k = \sum_{j=1}^j (t_{j,k} - O_{j,k}^q)^2 \quad (3.31)$$

$$E = \sum_{k=1}^k E_k \quad (3.32)$$

จากกฎการเรียนรู้เดลต้าหรือกฎการเรียนรู้ของ Widrow-Hoff สูตรในการปรับค่าของ พารามิเตอร์  $w$  โดยหลักการ Steepest Descent Method อยู่ในรูป

$$w(m+1) = w(m) - \eta \frac{\partial E_k}{\partial w} \quad (3.33)$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial w} = \sum_{O^* \in S} \frac{\partial E_k}{\partial O^*} \cdot \frac{\partial O^*}{\partial w} \quad (3.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $S$  เป็นเซตของโหนดที่เอาต์พุตขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์  $w$  ค่าอนุพันธ์ของค่าผิดพลาดทั้งหมด

$$\frac{\partial E}{\partial w} = \sum_{k=1}^k \frac{\partial E_k}{\partial w} \quad (3.35)$$

$$\Delta w = -\eta \frac{\partial E}{\partial w} \quad (3.36)$$

$$\eta = \frac{\text{step size}}{\sqrt{\sum_w \left(\frac{\partial E}{\partial w}\right)^2}} \quad (3.37)$$

เมื่อ  $\eta$  เป็นอัตราการเรียนรู้ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้จากการเปลี่ยนค่า step size รูปแบบการเรียนรู้ในโครงข่ายประสาทเทียมหรือโครงข่ายที่ปรับตัวได้มีสองแบบด้วยกัน ประกอบด้วย การเรียนรู้แบบกลุ่ม (batch learning) หรือแบบออฟไลน์ (off-line learning) และการเรียนรู้แบบแพทเทิร์น (pattern learning) หรือการเรียนรู้แบบออนไลน์ (online learning)

การเรียนรู้แบบกลุ่มจะมีสูตรในการปรับพารามิเตอร์บนฐานจากสมการ  $\partial E / \partial w$  โดยการปรับค่าตัวแปรจะทำหลังที่ข้อมูลทุกชุดข้อมูลถูกนำเข้าสู่ระบบโครงข่ายเพื่อหาค่าผิดพลาดแล้ว ดังนั้น การปรับค่าตัวแปรจะปรับค่าเพียงครั้งเดียวในแต่ละรอบการเรียนรู้ (epoch)

การเรียนรู้แบบแพทเทิร์นมีสูตรในการปรับพารามิเตอร์บนฐานจากสมการ  $\partial E_k / \partial w$  เป็นการปรับพารามิเตอร์ทันทีที่ข้อมูลฝึกสอนในแต่ละชุดข้อมูล ถูกนำเข้าไปคำนวณค่าผิดพลาด ดังนั้น จำนวนครั้งของการปรับค่าตัวแปรในแต่ละรอบการเรียนรู้จะเท่ากับจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน

การเรียนรู้แบบ steepest descent method จะโน้มเข้าสู่คำตอบซ้ำ เนื่องจากการปรับพารามิเตอร์จะค่อย ๆ ปรับไปตามทางลงของความชันของค่าผิดพลาดด้วยอัตราการเรียนรู้  $\eta$

### 3.7.2 การเรียนรู้แบบผสมผสาน (hybrid learning rule)

จากการเรียนรู้แบบ steepest descent method พบปัญหาเรื่องการโน้มเข้าคำตอบได้ซ้ำ อีกทั้งการติดอยู่ที่จุดต่ำแบบเฉพาะที่ จึงได้มีการนำเสนอ hybrid learning rule เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว เป็นการผสมผสานระหว่างการเรียนรู้บนแบบ steepest descent method และ least squares estimate (LSE) เข้าด้วยกัน

การเรียนรู้ผสมผสานแบบกลุ่ม (batch or offline learning)

สมมติให้โครงข่ายมีเพียงหนึ่งเอาต์พุต  $y$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y = f(v, S)$$

เมื่อ  $v$  เป็นเซตของตัวแปรอินพุต และ  $S$  เป็นเซตของพารามิเตอร์ของโครงข่าย

ถ้ามีฟังก์ชัน  $h$  ซึ่งการคอมโพสิชันกันกับฟังก์ชัน  $f$  หรือ  $h \circ f$  เป็นเชิงเส้นของตัวประกอบบางส่วนของ  $S$  แล้ว ตัวประกอบเหล่านั้นสามารถหาได้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least squares: LS) โดยพารามิเตอร์  $S$  สามารถแตกออกเป็นสองเซต

$$S = S_1 \oplus S_2 \quad (3.38)$$

เมื่อ  $\oplus$  เป็นเครื่องหมาย direct sum โดย  $h \circ f$  เป็นเชิงเส้นของตัวประกอบของ  $S_2$  จะได้

$$h(y) = h \circ f(v, S) \quad (3.39)$$

ซึ่งเป็นเชิงเส้นในตัวประกอบของ  $S_2$

เมื่อทราบค่าตัวประกอบของ  $S_1$  สามารถใส่ข้อมูลชุดฝึกสอนจำนวน  $K$  เรคคอร์ด เพื่อหาตัวประกอบซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ใน  $S_2$  จะได้สมการเมทริกซ์

$$Pb = y \quad (3.40)$$

เมื่อ  $P$  เป็นเมทริกซ์ของข้อมูลสอนมีขนาดเมทริกซ์เป็น  $K \times R$  โดย  $K$  คือจำนวนข้อมูล  $R$  คือจำนวนตัวแปรอินพุต  $b$  เป็นเวกเตอร์ขนาด  $R \times 1$  ที่มีตัวประกอบเป็นพารามิเตอร์ซึ่งไม่ทราบค่า  $y$  เป็นเวกเตอร์ขนาด  $K \times 1$  มีตัวประกอบที่ทราบค่าล่วงหน้าเป็นค่าเป้าหมายของ  $P$

พารามิเตอร์  $b$  ที่ไม่ทราบค่าเป็นปัญหา least square estimate (LSE) ซึ่งต้องการลดค่าผิดพลาดกำลังสองให้ได้ต่ำที่สุด  $\|Pb - y\|^2 \rightarrow 0$  สามารถหาได้จากวิธี Pseudo inverse matrix

$$(P^T P)^{-1} P^T P b = (P^T P)^{-1} P^T y \quad (3.41)$$

$$I b = (P^T P)^{-1} P^T y \quad (3.42)$$

$$b = (P^T P)^{-1} P^T y \quad (3.43)$$

แต่ในการหาค่า  $b$  โดยวิธีการ Pseudo inverse matrix จะใช้เวลานานและมีปัญหากรณี  $P^T P$  มีค่าดีเทอร์มิแนนต์เป็นศูนย์หรือที่เรียกว่า Singular matrix ดังนั้นการหาค่าพารามิเตอร์  $b$  สามารถทำได้โดยวิธีการ recursive least squares (RLS)

จากปัญหาค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุด (least squares method) ต้องการลดฟังก์ชันค่าผิดพลาด

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k (y_i - x_i^T b)^2 \quad (3.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้  $P$  เป็นเมทริกซ์ถดถอย (regression matrix) บนฐานข้อมูลจำนวน  $K$  เรคคอร์ด โดย  $P$  มีจำนวน  $K$  แถว แต่ละแถวเป็นอินพุตเวกเตอร์  $x_i^T$  ให้  $R$  เป็นเมทริกซ์ขนาด  $K \times K$  ของผลรวมของค่ากำลังสองของข้อมูล

$$R = P^T P \quad (3.45)$$

วิธีการ Recursive least squares ถูกแยกเป็นสองสมการ สมการแรกเป็นการปรับพารามิเตอร์เวกเตอร์  $\hat{b}$  ซึ่งเป็นเวกเตอร์ของค่าพารามิเตอร์โดยประมาณ (estimated parameter vector) ณ เวลา  $k^{th}$  นั่นคือหลังจากข้อมูลลำดับที่  $k^{th}$  เข้ามาถึง สมการปรับค่าแบบวน

$$\hat{b}_k = \hat{b}_{k-1} + R_k^{-1} x_k (y_k - x_k^T \hat{b}_{k-1}) \quad (3.46)$$

อีกสมการหนึ่งเป็นการปรับค่า covariance matrix  $R_k^{-1}$  ซึ่งปรับแบบวนดังสมการ

$$R_k^{-1} = R_{k-1}^{-1} - R_{k-1}^{-1} x_k (1 + x_k^T R_{k-1}^{-1} x_k)^{-1} x_k^T R_{k-1}^{-1} \quad (3.47)$$

ในเทอม  $(1 + x_k^T R_{k-1}^{-1} x_k)^{-1}$  เป็นค่าสเกลาร์ ดังนั้นสมการข้างบน จึงไม่ทำการหาค่าเมทริกซ์ผกผันโดยค่าเริ่ม  $\hat{b}_k = 0$  และ  $R_0^{-1} = \gamma I$  กำหนดให้  $\gamma$  เป็นค่าบวกมาก ๆ เพื่อแสดงความไม่แน่นอนในการกำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ และ  $I$  เป็นเมทริกซ์ที่มีค่าเป็นหนึ่งในแถวทะแยง

การเรียนรู้ผสมแบบแพทเทิร์น (pattern or online learning)

$$\hat{b}_k = \hat{b}_{k-1} + R_k^{-1} x_k (y_k - x_k^T \hat{b}_{k-1}) \quad (3.48)$$

$$R_k^{-1} = \frac{1}{\lambda} [R_{k-1}^{-1} - R_{k-1}^{-1} x_k (1 + x_k^T R_{k-1}^{-1} x_k)^{-1} x_k^T R_{k-1}^{-1}] \quad (3.49)$$

เมื่อค่า  $\lambda$  มีค่าระหว่าง 0 และ 1 ค่า  $\lambda$  ที่น้อย ๆ จะทำให้ค่าเก่าลดลงเร็วแต่ จะทำให้เกิดการไม่เสถียร ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยง

ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัว (ANFIS) เป็นการผสมผสานการเรียนรู้ระหว่างวิธีปรับตามความลาดชัน (gradient method) และวิธีประเมินกำลังสองน้อยสุด (least squares estimate) เพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ ในแต่ละรอบของการเรียนรู้แบบผสมผสานนี้แยกเป็นการคำนวณไปข้างหน้า (forward pass) และการคำนวณย้อนหลัง (backward pass)

ในการคำนวณไปข้างหน้าเป็นการป้อนข้อมูลเข้า และส่งสัญญาณผ่านไปข้างหน้าโดยคำนวณเอาต์พุตของแต่ละโหนดจนได้เมทริกซ์  $P$  และหาค่าพารามิเตอร์ใน  $S_2$  ได้แก่  $b$  และ  $R$  โดยวิธี recursive least squares estimate หลังการหาค่าพารามิเตอร์ใน  $S_2$  คำนวณแบบไปข้างหน้าต่อไปจนถึงค่าเอาต์พุตและหาค่าผิดพลาด

ในการคำนวณย้อนกลับ อัตราส่วนค่าผิดพลาดหรือค่าอนุพันธ์ของค่าผิดพลาดวัดเทียบกับตัวแปรที่โหนดเอาต์พุต จะแพร่กระจายย้อนกลับจากเอาต์พุตไปยังอินพุตโดยค่าพารามิเตอร์ใน  $S_1$  จะถูกปรับด้วยวิธีความลาดชันที่สุด (steepest descent method)

สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่ให้เป็นค่าคงที่ไว้ใน  $S_1$  เป็นการยืนยันว่าค่าพารามิเตอร์ใน  $S_2$  ที่ได้เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงกว้าง (global optimum) ในปริภูมิพารามิเตอร์ของ  $S_2$  เป็นผลจากการใช้วิธีวัดค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยสุด การใช้วิธีแบบผสมผสานจะเป็นการลดมิติในการค้นหาคำตอบที่ปกติใช้วิธีความลาดชันที่สุด และเป็นผลทำให้เวลาในการโน้มเข้าสู่คำตอบเร็วขึ้นมาก

ตารางที่ 3.4 สรุปวิธีการเรียนรู้แบบผสมผสานใน ANFIS

	การคำนวณไปข้างหน้า	การคำนวณย้อนกลับ
พารามิเตอร์ของฟัซซีฟิเคชัน	ถูกทำให้คงที่	ปรับด้วยวิธีความลาดชันที่สุด
พารามิเตอร์ของ output membership	ปรับด้วยวิธีประเมินค่ากำลังสองน้อยสุด	ถูกทำให้คงที่
สัญญาณ	เอาต์พุตของโหนด	ค่าความผิดพลาด

## บทที่ 4

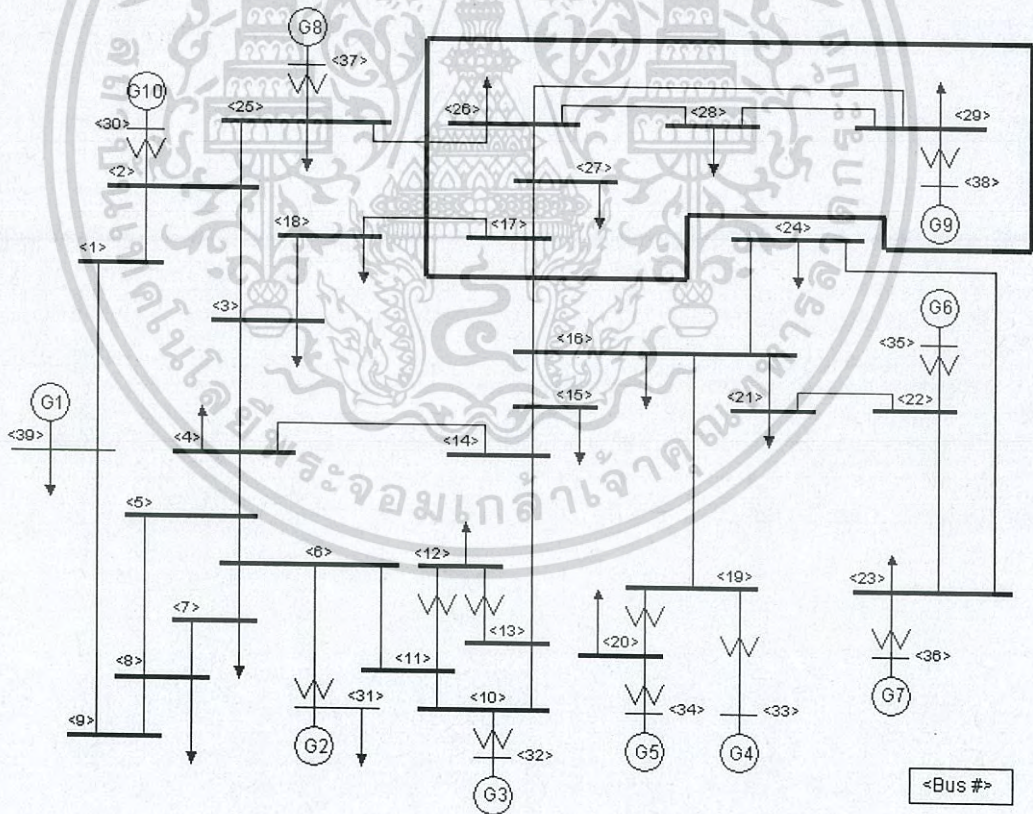
# การหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้ระบบอนุमान นิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้

### 4.1 ระบบที่ใช้ในการทดสอบ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้เลือกใช้ระบบไฟฟ้ากำลัง ที่เป็นระบบมาตรฐานเพื่อใช้ในการศึกษา ประเมินค่าเสถียรภาพชั่วคราวโดยใช้ระบบอนุमानนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้จำนวน 2 ระบบด้วยกัน ได้แก่ ระบบ New England และระบบ Western System Coordinating Council (WSCC)

#### 4.1.1 ระบบ New England

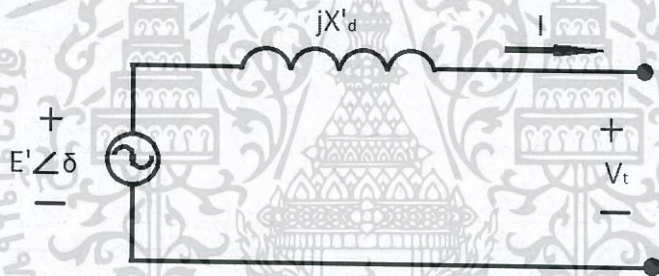
โครงสร้างระบบ New England ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด 10 เครื่อง โดยมี บัสจำนวน 39 บัส ซึ่งเชื่อมโยงโดยสายส่งระหว่างบัส 47 เส้น ซึ่งมีวิไลไลนไดอะแกรมดังรูปที่ 4.1[23]



รูปที่ 4.1 วิไลไลนไดอะแกรมของระบบทดสอบ New England

ซึ่งในการจำลองนี้ได้กำหนดเงื่อนไขต่างๆ ดังนี้

1. พารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้ากำลังและหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังตามตารางที่ 4.1 และมีค่าเริ่มต้นก่อนทำการจำลองโหลดโพล์ของระบบหรือพารามิเตอร์ของบัสเป็นไปตามตารางที่ 4.2
2. กำหนดใช้โมเดลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบพื้นฐาน (Classical models) ตามไดอะแกรมรูปที่ 4.2 ซึ่งมีพารามิเตอร์เป็นไปตามตารางที่ 4.3 และไม่พิจารณาถึงการชดเชยใดๆ ทั้งสิ้น
3. จำลองสภาวะการเกิดการลัดวงจรแบบสามเฟสสมมาตร
4. เนื่องจากเป็นระบบที่มีการเชื่อมกันมาก จึงกำหนดขอบเขตการศึกษา ให้มีการจำลองสภาวะการเกิดการลัดวงจรเฉพาะในพื้นที่กรอบสถานีในวัลไลน์ไดอะแกรมในรูปที่ 4.1
5. กำหนดใช้ภาระไฟฟ้าชนิด constant power โดยทำการปรับขนาดภาระไฟฟ้าในบัสที่ 26,27,28 และ 29 ตั้งแต่ 0.8 ถึง 1.2 เท่าของสภาวะปกติ ด้วยกระบวนการสุ่ม (Random) โดยให้ตัวประกอบกำลังคงที่



รูปที่ 4.2 โมเดลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบพื้นฐาน (Classical models)

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้ากำลังและหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

Line Data					Transformer Tap	
From Bus	To Bus	R	X	B	Magnitude	Angle
1	2	0.0035	0.0411	0.6987	0.000	0.00
1	39	0.0010	0.0250	0.7500	0.000	0.00
2	3	0.0013	0.0151	0.2572	0.000	0.00
2	25	0.0070	0.0086	0.1460	0.000	0.00
3	4	0.0013	0.0213	0.2214	0.000	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

Line Data					Transformer Tap	
From Bus	To Bus	R	X	B	Magnitude	Angle
3	18	0.0011	0.0133	0.2138	0.000	0.00
4	5	0.0008	0.0128	0.1342	0.000	0.00
4	14	0.0008	0.0129	0.1382	0.000	0.00
5	6	0.0002	0.0026	0.0434	0.000	0.00
5	8	0.0008	0.0112	0.1476	0.000	0.00
6	7	0.0006	0.0092	0.1130	0.000	0.00
6	11	0.0007	0.0082	0.1389	0.000	0.00
7	8	0.0004	0.0046	0.0780	0.000	0.00
8	9	0.0023	0.0363	0.3804	0.000	0.00
9	39	0.0010	0.0250	1.2000	0.000	0.00
10	11	0.0004	0.0043	0.0729	0.000	0.00
10	13	0.0004	0.0043	0.0729	0.000	0.00
13	14	0.0009	0.0101	0.1723	0.000	0.00
14	15	0.0018	0.0217	0.3660	0.000	0.00
15	16	0.0009	0.0094	0.1710	0.000	0.00
16	17	0.0007	0.0089	0.1342	0.000	0.00
16	19	0.0016	0.0195	0.3040	0.000	0.00
16	21	0.0008	0.0135	0.2548	0.000	0.00
16	24	0.0003	0.0059	0.0680	0.000	0.00
17	18	0.0007	0.0082	0.1319	0.000	0.00
17	27	0.0013	0.0173	0.3216	0.000	0.00
21	22	0.0008	0.0140	0.2565	0.000	0.00
22	23	0.0006	0.0096	0.1846	0.000	0.00
23	24	0.0022	0.0350	0.3610	0.000	0.00
25	26	0.0032	0.0323	0.5130	0.000	0.00
26	27	0.0014	0.0147	0.2396	0.000	0.00
26	28	0.0043	0.0474	0.7802	0.000	0.00
26	29	0.0057	0.0625	1.0290	0.000	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

Line Data					Transformer Tap	
From Bus	To Bus	R	X	B	Magnitude	Angle
28	29	0.0014	0.0151	0.2490	0.000	0.00
12	11	0.0016	0.0435	0.0000	1.006	0.00
12	13	0.0016	0.0435	0.0000	1.006	0.00
6	31	0.0000	0.0250	0.0000	1.070	0.00
10	32	0.0000	0.0200	0.0000	1.070	0.00
19	33	0.0007	0.0142	0.0000	1.070	0.00
20	34	0.0009	0.0180	0.0000	1.009	0.00
22	35	0.0000	0.0143	0.0000	1.025	0.00
23	36	0.0005	0.0272	0.0000	1.000	0.00
25	37	0.0006	0.0232	0.0000	1.025	0.00
2	30	0.0000	0.0181	0.0000	1.025	0.00
29	38	0.0008	0.0156	0.0000	1.025	0.00
19	20	0.0007	0.0138	0.0000	1.060	0.00

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของบัส

Bus	Type	Voltage [PU]	Load		Generator		Unit No.
			MW	MVar	MW	MVar	
1	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	PQ	-	322.0	2.4	0.0	0.0	
4	PQ	-	500.0	184.0	0.0	0.0	
5	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	PQ	-	233.8	84.0	0.0	0.0	
8	PQ	-	522.0	176.0	0.0	0.0	
9	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	
10	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

Bus	Type	Voltage [PU]	Load		Generator		Unit No.
			MW	MVar	MW	MVar	
11	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	
12	PQ	-	7.5	88.0	0.0	0.0	
13	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	
14	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	
15	PQ	-	320.0	153.0	0.0	0.0	
16	PQ	-	329.0	32.3	0.0	0.0	
17	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	
18	PQ	-	158.0	30.0	0.0	0.0	
19	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	
20	PQ	-	628.0	103.0	0.0	0.0	
21	PQ	-	274.0	115.0	0.0	0.0	
22	PQ	-	0.0	0.0	0.0	0.0	
23	PQ	-	247.5	84.6	0.0	0.0	
24	PQ	-	308.6	-92.0	0.0	0.0	
25	PQ	-	224.0	47.2	0.0	0.0	
26	PQ	-	139.0	17.0	0.0	0.0	
27	PQ	-	281.0	75.5	0.0	0.0	
28	PQ	-	206.0	27.6	0.0	0.0	
29	PQ	-	283.5	26.9	0.0	0.0	
30	PV	1.0475	0.0	0.0	250.0	-	Gen10
31	PV	0.9820	9.2	4.6	-	-	Gen2
32	PV	0.9831	0.0	0.0	650.0	-	Gen3
33	PV	0.9972	0.0	0.0	632.0	-	Gen4
34	PV	1.0123	0.0	0.0	508.0	-	Gen5
35	PV	1.0493	0.0	0.0	650.0	-	Gen6
36	PV	1.0635	0.0	0.0	560.0	-	Gen7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

Bus	Type	Voltage [PU]	Load		Generator		
			MW	MVar	MW	MVar	Unit No.
37	PV	1.0278	0.0	0.0	540.0	-	Gen8
38	PV	1.0265	0.0	0.0	830.0	-	Gen9
39	PV	1.0300	1104.0	250.0	1000.0	-	Gen1

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

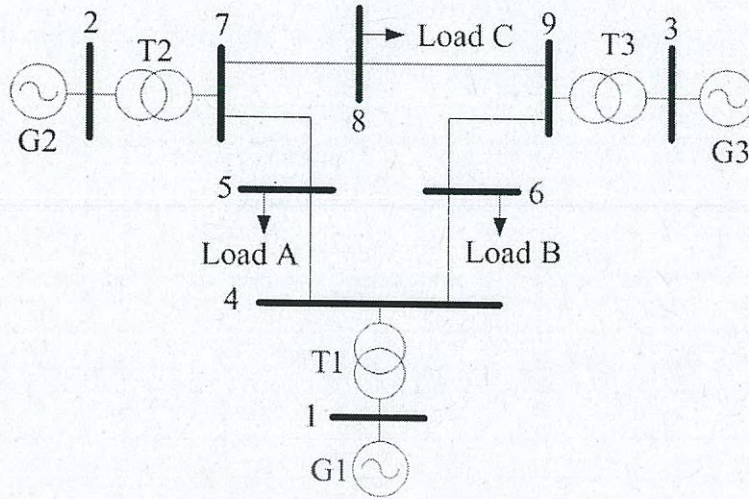
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	พารามิเตอร์								
	H	Ra	x'd	x'q	xd	xq	T'do	T'qo	xl
1	500	0	0.006	0.008	0.02	0.019	7.0	0.7	0.003
2	30.3	0	0.0697	0.17	0.295	0.282	6.56	1.5	0.035
3	35.8	0	0.0531	0.0876	0.2495	0.237	5.7	1.5	0.0304
4	28.6	0	0.0436	0.166	0.262	0.258	5.69	1.5	0.0295
5	26	0	0.132	0.166	0.67	0.62	5.4	0.44	0.054
6	34.8	0	0.05	0.0814	0.254	0.241	7.3	0.4	0.0224
7	26.4	0	0.049	0.186	0.295	0.292	5.66	1.5	0.0322
8	24.3	0	0.057	0.0911	0.290	0.280	6.7	0.41	0.028
9	34.5	0	0.057	0.0587	0.2106	0.205	4.79	1.96	0.0298
10	42	0	0.031	0.008	0.1	0.069	10.2	0.0	0.0125

#### 4.1.2 ระบบ Western System Coordinating Council

ระบบ Western System Coordinating Council (WSCC) ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด 3 เครื่อง โดยมี บัสจำนวน 9 บัส ซึ่งเชื่อมโยงโดยสายส่งระหว่างบัส 9 เส้น ซึ่งมีวัฏไลน์ไดอะแกรมดังรูปที่ 4.3[24]

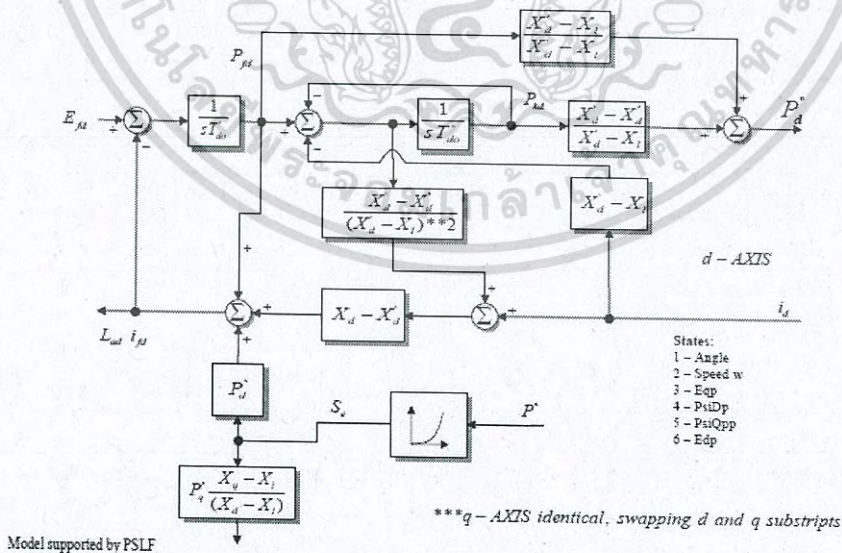
ซึ่งในการจำลองนี้ได้กำหนดเงื่อนไขต่างๆ ดังนี้

1. พารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้ากำลังและหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังตามตารางที่ 4.4 และมีค่าเริ่มต้นก่อนทำการจำลองโพลีโพลของระบบเป็นไปตามตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.3 วันไลน์ไดอะแกรมของระบบทดสอบ WSCC 9 bus

2. กำหนดใช้โมเดลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบละเอียด (Detail models) ตามไดอะแกรมรูปที่ 4.4 [25-26] ซึ่งมีพารามิเตอร์เป็นไปตามตารางที่ 4.6 และไม่พิจารณาถึงการชดเชยใดๆ ทั้งสิ้น
3. จำลองสถานะการเกิดการลัดวงจรแบบสามเฟสสมมาตร
4. กำหนดใช้ภาระไฟฟ้าชนิด constant power ทำการปรับขนาดภาระไฟฟ้า ในบัสที่ 5,6 และ 8 ตั้งแต่ 0.8 ถึง 1.2 เท่าของสถานะปกติ ด้วยกระบวนการสุ่ม (Random) โดยให้ตัวประกอบกำลังคงที่



รูปที่ 4.4 โมเดลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบละเอียด (Detail models)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้ากำลังและหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

Line Data				
From Bus	To Bus	R	X	B
4	6	0.017	0.092	0.158
4	5	0.010	0.085	0.176
5	7	0.032	0.161	0.306
6	9	0.039	0.17	0.358
7	8	0.0085	0.072	0.149
8	9	0.0119	0.1008	0.209
1	4	0	0.0576	0
2	7	0	0.0625	0
3	9	0	0.0586	0

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ของบัส

Bus	Load		Generator		
	MW	MVar	MW	MVar	Unit No.
1	0	0	72	27	Gen1
2	0	0	163	0	Gen2
3	0	0	85	0	Gen3
4	0	0	0	0	-
5	125	50	0	0	-
6	90	30	0	0	-
7	0	0	0	0	-
8	100	35	0	0	-
9	0	0	0	0	-

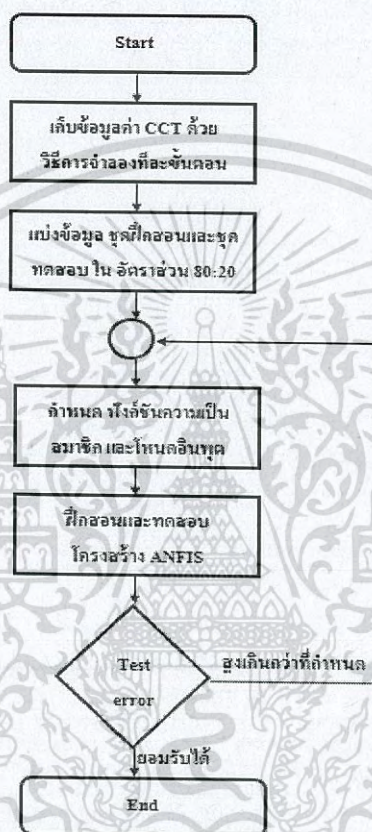
ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	พารามิเตอร์								
	H	Ra	x'd	x'q	xd	xq	T'do	T'qo	xl
1	4.72	0	0.304	0.484	0.730	4.484	8.96	0.31	0.15
2	2.56	0	0.299	0.492	2.23	2.16	6.00	0.53	0.15
3	3.01	0	0.181	0.25	1.31	1.25	5.89	0.60	0.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ขั้นตอนการจำลองการหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้

ในวิทยานิพนธ์นี้ ขั้นตอนการหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ มีกระบวนการจำลองดังไดอะแกรมรูปที่ 4.5 ซึ่งจะแบ่งการจำลองออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน



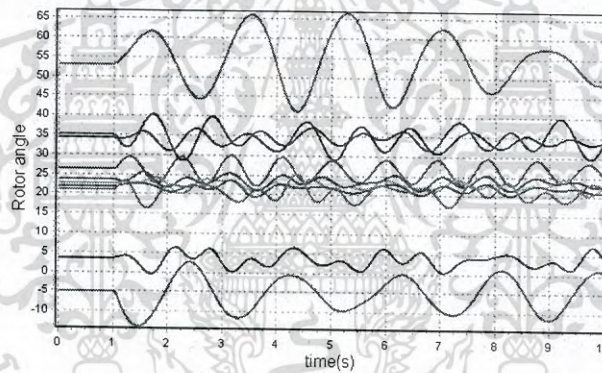
รูปที่ 4.5 แผนภาพไดอะแกรมกระบวนการจำลอง

### 4.2.1 การเก็บข้อมูลค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยโปรแกรม Power world

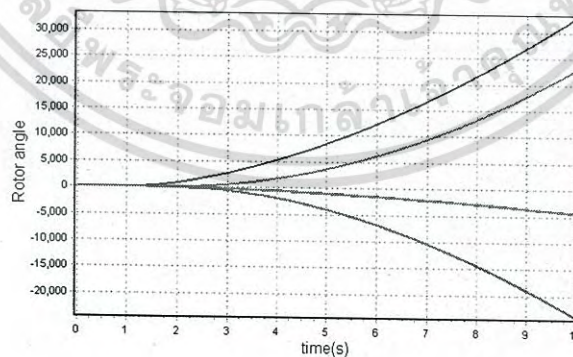
การเก็บข้อมูลค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง เป็นขั้นตอนแรกในการหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ ซึ่งข้อมูลที่ได้ในขั้นตอนนี้จะถูกใช้เพื่อเป็นของข้อมูลสำหรับฝึกสอนและทดสอบระบบอนุมานนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ โดยค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังนั้นได้มาจากการจำลองด้วย Transient Stability (TS) ในโปรแกรม Power world Version 17 ซึ่งมีขั้นตอนการจำลองดังนี้

1. สร้างแบบจำลองวันไลน์ไดอะแกรมระบบที่ต้องการลงในโปรแกรม Power world Version 17 พร้อมทั้งกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ พารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้ากำลังและหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง พารามิเตอร์ของบัส โมเดลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพร้อมทั้งพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2. กำหนดขอบเขตที่ต้องการศึกษา
3. ทำการรันโหลดโพลด์
3. ทำการทดสอบหาเสถียรภาพ ด้วย Transient Stability(TS) ในพื้นที่สนใจศึกษา
4. กำหนดการทดสอบให้เป็นการลัดวงจรแบบสามเฟสสมมาตรที่บัสในบริเวณที่สนใจศึกษา
5. ตั้งเวลาการเกิดการลัดวงจรที่วินาทีที่ 1 และเวลากำจัดกระแสลัดวงจร ในวินาทีที่ 1.1
6. เริ่มการจำลองในโปรแกรม โดยพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมโรเตอร์กับเวลา ถ้าระบบยังมีเสถียรภาพ ผลที่ได้เป็นดังรูปที่ 4.6 (ก) ให้เพิ่มเวลากำจัดกระแสลัดวงจร จนกว่าระบบสูญเสียเสถียรภาพดังรูปที่ 4.6 (ข)



ก.



ข.

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงมุมโรเตอร์กับเวลา ก. เมื่อระบบมีเสถียรภาพ ข. เมื่อระบบสูญเสียเสถียรภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. บันทึกผลต่างของเวลาทั้งสอง ตอนที่ระบบก่อนสูญเสียเสถียรภาพเพียงเล็กน้อย โดยผลต่างที่ได้เป็นค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง

8. เปลี่ยนตำแหน่งการลัดวงจรเป็นที่สายส่งไฟฟ้ากำลัง ในบริเวณที่ทำการศึกษา โดยกำหนดให้มีการลัดวงจรที่ความยาว 25% 50% หรือ 75% ของสายส่งไฟฟ้ากำลัง โดยการทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5-7

9. ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดกำลังไฟฟ้าของภาระไฟฟ้าที่บัส แล้วทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5-8

#### 4.2.2 การสร้างระบบอนุมานนิเวศวิทยาโครงข่ายปรับตัวได้สำหรับการหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง

ส่วนนี้เป็นการนำข้อมูลค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง ที่ได้จากการจำลองในโปรแกรมด้วย Power world Version 17 มาสร้างเป็นโครงสร้างของระบบอนุมานนิเวศวิทยาโครงข่ายปรับตัวได้ และทำการทดสอบโครงสร้างที่ได้ โดยใช้ ANFIS Toolbox ในโปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการสร้างโครงสร้างระบบอนุมานนิเวศวิทยาโครงข่ายปรับตัวได้ ซึ่งการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและขนาดโครงสร้างระบบอนุมานนิเวศวิทยาโครงข่ายปรับตัวได้ จะใช้กระบวนการลองผิดลองถูก (Trial and error) โดยขั้นตอนการหาโครงสร้างและจำลองดังนี้

1. ทำการแบ่งข้อมูลค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมด้วย Power world Version 17 ออกเป็น 2 ส่วน ในอัตราส่วน 80:20 ด้วยวิธีการการสุ่ม โดยใช้ข้อมูล 80% สำหรับทำการฝึกสอนระบบอนุมานนิเวศวิทยาโครงข่ายปรับตัวได้ และใช้ข้อมูล 20% ที่เหลือใช้สำหรับการทดสอบระบบอนุมานนิเวศวิทยาโครงข่ายปรับตัวได้

2. นำข้อมูลค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง ที่แบ่งออกเป็น 2 ชุดแล้วเข้าสู่โปรแกรม MATLAB และเรียกใช้ ANFIS Toolbox

3. โหลดข้อมูลทั้งสองชุดลงใน ANFIS Toolbox

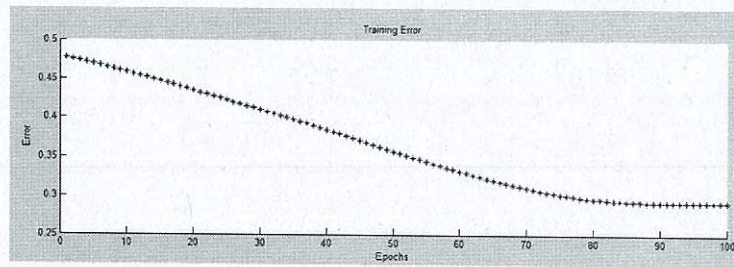
4. กำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและขนาดโครงสร้างของระบบอนุมานนิเวศวิทยาโครงข่ายปรับตัวได้

5. กำหนดรอบการฝึกสอน (epoch) ประมาณ 100-500 รอบฝึกสอน

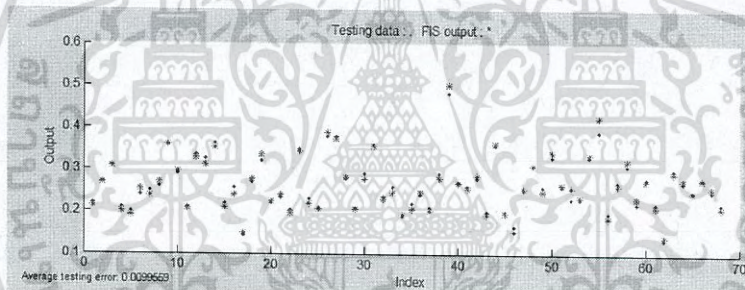
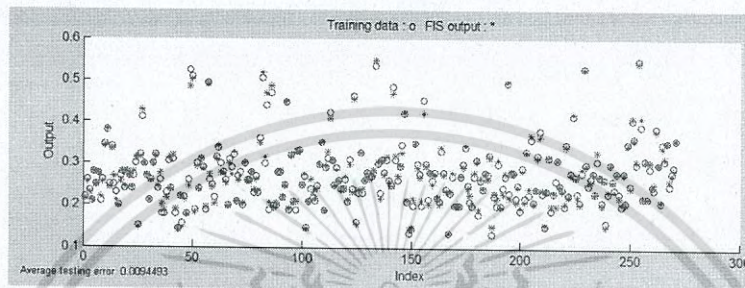
6. เริ่มทำการฝึกสอนระบบอนุมานนิเวศวิทยาโครงข่ายปรับตัวได้ ดังรูปที่ 4.7

7. ทดสอบโครงสร้างระบบอนุมานนิเวศวิทยาโครงข่ายปรับตัวได้ที่ได้โดยใช้ข้อมูลในชุดทดสอบ

8. บันทึกค่าความผิดพลาดของข้อมูลทั้งสองชุดดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 แสดงค่าความผิดพลาดจากการฝึกสอน 100 รอบการฝึกสอน



รูปที่ 4.8 ค่าความผิดพลาด ก. ค่าความผิดพลาดข้อมูลชุดฝึกสอน  
ข. ค่าความผิดพลาดข้อมูลชุดทดสอบ

9. เปลี่ยนขนาดโครงสร้างของระบบอนุมานนิเวศวิทยาโครงข่ายปรับตัวได้หรือเปลี่ยนฟังก์ชันความเป็นสมาชิก และทำการทดสอบซ้ำในขั้นตอนที่ 6-8

10. เลือกโครงสร้างของระบบอนุมานนิเวศวิทยาโครงข่ายปรับตัวได้ ที่ให้ค่าความผิดพลาดของข้อมูลชุดทดสอบที่สามารถยอมรับได้ และมีขนาดเล็กที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ผลของการจำลอง

การจำลองเพื่อหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้ระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยในส่วนแรกการสร้างโครงสร้างระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้เพื่อหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังของระบบต่างๆ ซึ่งการพิจารณาถึงโครงสร้างสามารถพิจารณาได้จากค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น โดยในที่นี้จะใช้ค่าความผิดพลาดแบบ RMSE (Root Mean Square Error) สามารถหาได้จากสมการที่ 5.1

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - F_i)^2}{n}} \times 100\% \quad (5.1)$$

เมื่อ  $O_i$  คือ ค่าจริงที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม Power world Version 17,  $F_i$  คือค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้ระบบอนุमानฟซีโครงข่ายปรับตัว และ  $n$  คือจำนวนข้อมูล

เนื่องจากค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังเป็นค่าที่มีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้ากำลังสูง ดังนั้นค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้จึงควรเป็นค่าที่ต่ำที่สุด ที่ได้มาจากโครงสร้างระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้ที่ขนาดไม่ใหญ่จนเกินไป

และในส่วนที่สองเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้โดยจะพิจารณาความสามารถในการหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังจาก MAPE (Mean Absolute Percentage Error) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 5.2

$$MAPE = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - F_i}{O_i} \right| \times 100\% \quad (5.2)$$

#### 5.1 ผลการจำลองในระบบ New England

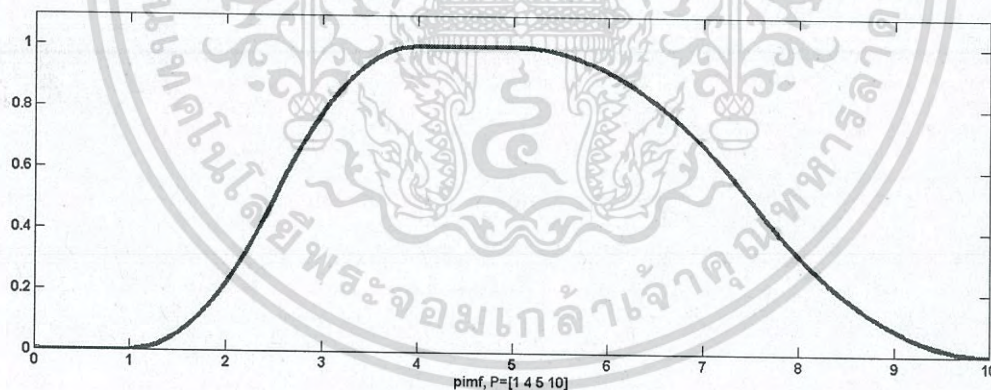
##### 5.1.1 การสร้างโครงสร้างระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้

การจำลองเพื่อสร้างโครงสร้างของระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้ในระบบ New England มีจำนวนข้อมูลค่าเวลาวิกฤติของระบบ New England ที่ได้มาจากการจำลองในโปรแกรม Power world Version 17 ทั้งสิ้น 400 ข้อมูล ซึ่งการแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุดคือชุดฝึกสอนและชุดทดสอบ ในอัตราส่วน 80:20 ในข้อมูลชุดนี้มีตำแหน่งการลัดวงจรทั้งสิ้น 21 ตำแหน่งประกอบด้วย

การลัดวงจรที่บัส 17, 26, 27, 28, 29 และ 38 รวม 6 บัส และการลัดวงจรที่ความยาว 25 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์สายส่งระหว่างบัส 17-27, 26-27, 26-28, 26-29 และ 28-29

ในการออกแบบระบบอนุমানนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้ มีอินพุตของระบบ ประกอบด้วย กำลังไฟฟ้าจริงของภาระไฟฟ้าที่บัส 26,27,28 และ 29 ซึ่งบัสดังกล่าวอยู่ในบริเวณที่ทำการการศึกษา และ ตำแหน่งการลัดวงจร รวมเป็น 5 อินพุต ส่วนเอาต์พุตคือ ค่าเวลาวิกฤติของระบบ New England ใช้ กระบวนการเรียนรู้แบบผสมผสาน มีรอบการฝึกสอน 300 รอบ (epochs) โดยเลือกใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบ pimf ( $\Pi$ -shaped membership function) โดยมีสมการตามสมการที่ 5.3

$$f(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ 2 \left( \frac{x-a}{b-a} \right)^2, & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1 - 2 \left( \frac{x-b}{b-a} \right)^2, & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 1, & a \leq x \leq c \\ 1 - 2 \left( \frac{x-c}{d-c} \right)^2, & c \leq x \leq \frac{c+d}{2} \\ 2 \left( \frac{x-d}{d-c} \right)^2, & \frac{c+d}{2} \leq x \leq d \\ 0, & x \geq d \end{cases} \quad (5.3)$$



รูปที่ 5.1 กราฟ pimf เมื่อ  $a=1, b=4, c=5$  และ  $d=10$

โดยข้อมูลอินพุตที่ใช้แสดงใน ตารางที่ 1 ภาคผนวก ก

ค่าความผิดพลาดของโครงสร้างต่างๆ ที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าความผิดพลาด RMSE ในโครงสร้างต่างๆ ของระบบ New England

จำนวนโหนด							Training error (%RMSE)	Test error (%RMSE)
กำลังไฟ ฟ้ายัส	กำลังไฟ ฟ้ายัส	กำลังไฟ ฟ้ายัส	กำลังไฟ ฟ้ายัส	ตำแหน่ง ลัดวงจร	rule	รวม		
26	27	28	29	2	32	107	1.34	1.69
2	2	2	2	2	48	156	1.29	1.68
2	3	2	2	2	48	156	1.38	1.88
2	2	3	2	2	48	156	1.27	1.95
2	2	2	3	2	48	156	1.34	1.85
2	2	2	2	3	48	156	1.23	1.75
4	2	2	2	2	64	205	1.27	3.87
2	4	2	2	2	64	205	1.33	1.97
2	2	4	2	2	64	205	1.26	1.43
2	2	2	4	2	64	205	1.30	1.91
2	2	2	2	4	64	205	0.80	1.13
2	2	2	2	6	96	303	0.66	1.12
3	3	3	3	3	243	745	0.83	27.51
3	3	3	3	4	324	989	0.51	62.3

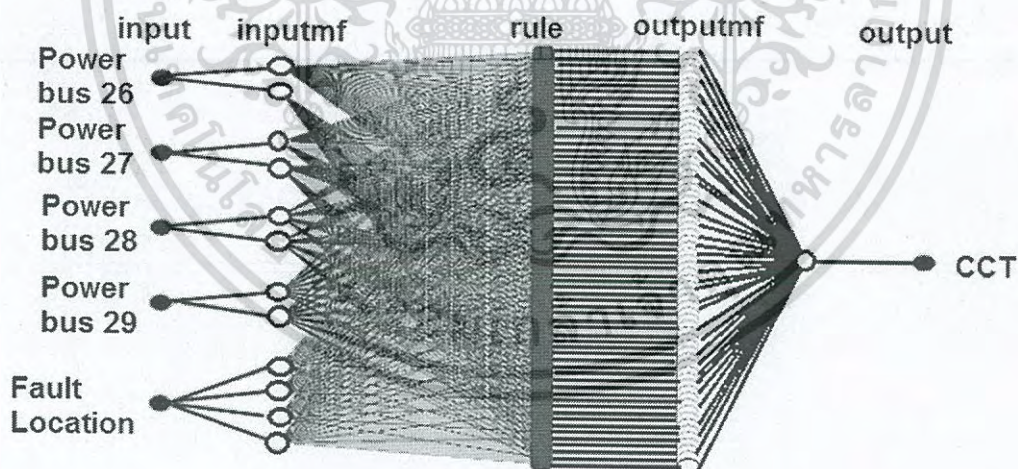
จากตารางเห็นได้ว่า เมื่อโครงสร้างของระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้มีขนาดใหญ่ขึ้น จะส่งผลให้กระบวนการเรียนรู้ของระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้ดีขึ้น ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าความผิดพลาดของชุดฝึกสอนที่ต่ำลง

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้ ที่มีจำนวนโหนดในชั้นที่ 1 เป็น แบบ 3 3 3 3 4 จำนวนกฎฟuzzy 324 กฎ มีค่าความผิดพลาดของชุดฝึกสอนต่ำที่สุด แต่มีค่าความผิดพลาดของชุดทดสอบที่สูงมาก ในบางครั้งนั้น ระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้มีการเรียนรู้ที่ดี แต่เมื่อนำมาใช้งานจะไม่สามารถคำนวณค่าหรือตอบปัญหาที่ต้องการได้ อาจเป็นเพราะจำนวนโครงสร้างของระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้มีขนาดใหญ่เกินไป โครงสร้างแบบ 3 3 3 3 4 จึงยังไม่เป็นโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับการหาค่าเวลาวิกฤติของระบบ New England

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

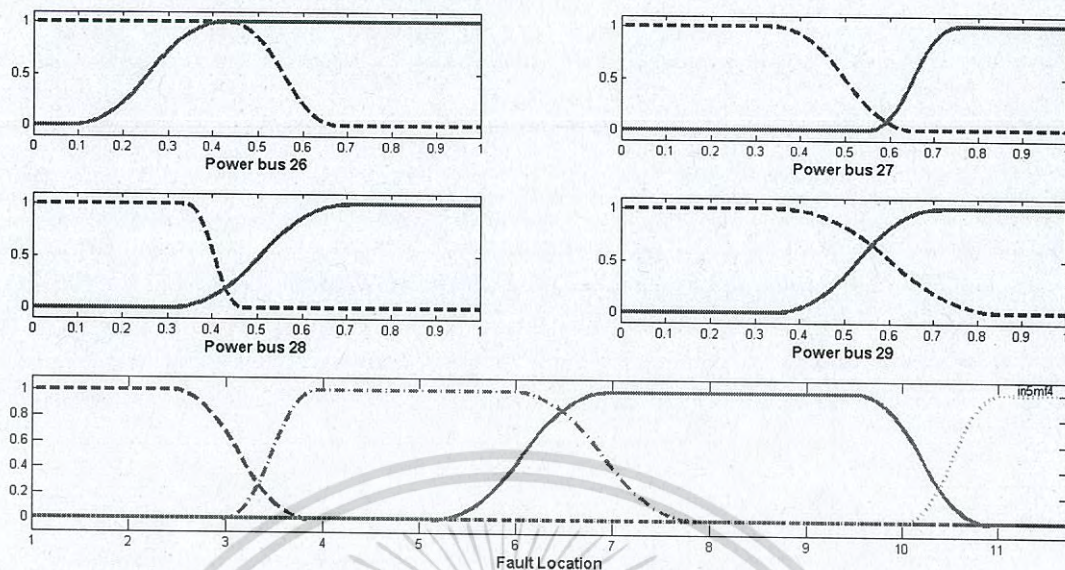
โครงสร้างของระบบอนุมานนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ ที่มีจำนวนโหนดในชั้นที่ 1 เป็นแบบ 2 2 2 2 6 และมีจำนวนกฎฟuzzy 96 กฎ เป็นโครงสร้างที่ให้ค่าความผิดพลาดของข้อมูลในชุดฝึกสอนต่ำ และยังมีค่าความผิดพลาดของชุดทดสอบต่ำที่สุด คือ 1.12% ในขณะที่โครงสร้างของระบบอนุมานนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ ที่มีจำนวนโหนดในชั้นที่ 1 เป็นแบบ 2 2 2 2 4 และมีจำนวนกฎฟuzzy 64 กฎ เป็นโครงสร้างที่ให้ค่าความผิดพลาดของข้อมูลในชุดฝึกสอนต่ำ และยังมีค่าความผิดพลาดของชุดทดสอบต่ำเช่นเดียวกัน คือ 1.13% ซึ่งเมื่อพิจารณาขนาดโครงสร้างแล้วจะเห็นได้ว่า โครงสร้างอนุมานนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ ที่มีจำนวนโหนดในชั้นที่ 1 เป็นแบบ 2 2 2 2 6 นั้น มีขนาดใหญ่กว่าโครงสร้างของระบบอนุมานนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ ที่มีจำนวนโหนดในชั้นที่ 1 เป็นแบบ 2 2 2 2 4 โดยมีจำนวนโหนดมากกว่า 98 โหนด แต่สามารถให้ความผิดพลาดของชุดทดสอบต่ำกว่าเพียง 0.01% จึงกล่าวได้ว่า โครงสร้างของระบบอนุมานนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ ที่มีจำนวนโหนดในชั้นที่ 1 เป็นแบบ 2 2 2 2 6 และมีจำนวนกฎฟuzzy 96 กฎ มีขนาดใหญ่เกินไปสำหรับการหาค่าเวลาวิกฤติของระบบ New England

ดังนั้นโครงสร้างของระบบอนุมานนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการหาค่าเวลาวิกฤติของระบบ New England คือ โครงสร้างของระบบอนุมานนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ ที่มีจำนวนโหนดในชั้นที่ 1 เป็นแบบ 2 2 2 2 4 และมีจำนวนกฎฟuzzy 64 กฎ โดยจะมีโครงสร้างเป็นไปตามรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 โครงสร้างระบบอนุมานนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ที่ดีที่สุดในการทดสอบของระบบ New England

โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของระบบอนุमानิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้  
ของระบบ New England

### 5.1.2 การทดสอบระบบอนุमानิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้

เป็นการนำโครงสร้างระบบอนุमानิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ ที่ได้มาทำการทดสอบเพิ่มเติมกับชุดข้อมูลที่ไม่มีการฝึกสอนหรือทดสอบมาก่อน เช่น การเปลี่ยนตำแหน่งของการลัดวงจร ในตำแหน่งอื่นของสายส่ง หรือการปรับเปลี่ยนขนาดภาระไฟฟ้า มีข้อมูลทดสอบทั้งสิ้น 63 ข้อมูล โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย การเปลี่ยนตำแหน่งการลัดวงจรอย่างเดียวกจำนวน 38 ข้อมูล โดยให้มีการลัดวงจรในตำแหน่งใดก็ได้ในพื้นที่ที่ทำการศึกษา และการเปลี่ยนขนาดกำลังไฟฟ้าของภาระไฟฟ้าพร้อมกับเปลี่ยนตำแหน่งการลัดวงจร จำนวน 25 ข้อมูล โดยข้อมูลที่ใช้แสดงในตารางที่ 2 ภาคผนวก ก โดยข้อมูลที่แสดงในลำดับที่ 1-38 เป็นข้อมูลที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งการลัดวงจรอย่างเดียวและข้อมูลในลำดับที่ 39-63 เป็นข้อมูลที่มีการเปลี่ยนขนาดกำลังไฟฟ้าของภาระไฟฟ้าพร้อมกับเปลี่ยนตำแหน่งการลัดวงจร ซึ่งผลการจำลองเป็นไปตามตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการจำลองของข้อมูลทดสอบเพิ่มเติมของระบบ New England

ลำดับที่	CCT จาก Power world (s)	CCT จาก ANFIS (s)	APE (%)
1	0.2184	0.2077	4.90
2	0.2194	0.2166	1.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

ลำดับที่	CCT จาก Power world (s)	CCT จาก ANFIS (s)	APE (%)
3	0.2140	0.1976	7.66
4	0.1840	0.203	10.33
5	0.1906	0.1981	3.93
6	0.2150	0.2194	2.05
7	0.2134	0.2038	4.50
8	0.1850	0.1881	1.68
9	0.2089	0.1888	9.62
10	0.2070	0.1743	15.8
11	0.1980	0.1803	8.94
12	0.1688	0.1852	9.72
13	0.1598	0.1806	13.02
14	0.1678	0.1764	5.13
15	0.1965	0.1910	2.80
16	0.1736	0.1574	9.33
17	0.1732	0.1734	0.12
18	0.1760	0.1564	11.14
19	0.1760	0.1728	1.82
20	0.1818	0.166	8.69
21	0.1720	0.1623	5.64
22	0.1558	0.1573	0.96
23	0.1669	0.1556	6.77
24	0.1527	0.1673	9.56
25	0.1703	0.1847	8.46
26	0.1510	0.1808	19.74
27	0.1620	0.1710	5.56
28	0.1710	0.1656	3.16
29	0.1628	0.1696	4.18
30	0.1785	0.1708	4.31
31	0.1366	0.1670	22.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

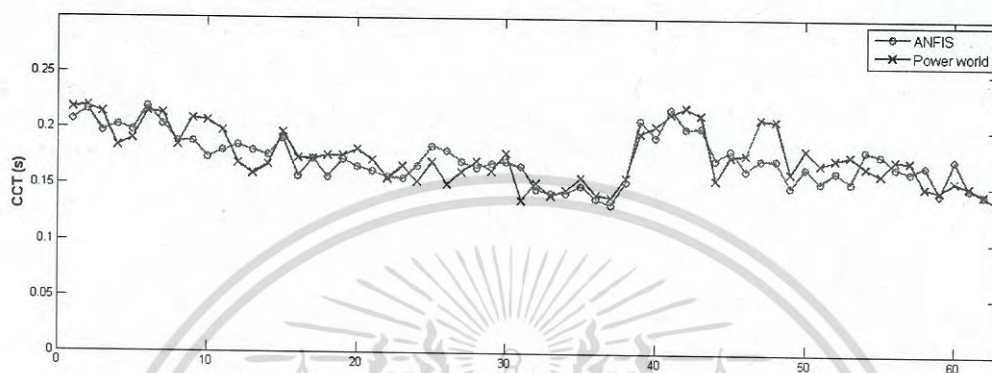
ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

ลำดับที่	CCT จาก Power world (s)	CCT จาก ANFIS (s)	APE (%)
32	0.1525	0.1467	3.80
33	0.1412	0.1430	1.27
34	0.1460	0.1433	1.85
35	0.1570	0.1500	4.46
36	0.1421	0.1384	2.60
37	0.1396	0.1333	4.51
38	0.1573	0.1533	2.54
39	0.197	0.2082	5.69
40	0.2033	0.1929	5.12
41	0.2143	0.2190	2.19
42	0.2201	0.2010	8.68
43	0.2131	0.2023	5.07
44	0.1551	0.1735	11.86
45	0.1764	0.1818	3.06
46	0.1778	0.1642	7.65
47	0.2099	0.1737	17.25
48	0.2083	0.1731	16.90
49	0.1619	0.1494	7.72
50	0.1826	0.1665	8.82
51	0.1695	0.1534	9.50
52	0.1742	0.1632	6.31
53	0.1773	0.1538	13.25
54	0.1672	0.182	8.85
55	0.1607	0.1785	11.08
56	0.1738	0.1671	3.86
57	0.1728	0.1631	5.61
58	0.1496	0.1689	12.90
59	0.1467	0.1443	1.64
60	0.1549	0.1744	12.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

ลำดับที่	CCT จาก Power world (s)	CCT จาก ANFIS (s)	APE (%)
61	0.1505	0.1486	1.26
62	0.1435	0.1435	0
63	0.1338	0.1349	0.82



รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบค่าเวลาวิกฤติของระบบ New England

โดยค่าความผิดพลาดรวมที่เกิดขึ้นเป็นไปตามตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าความผิดพลาดของข้อมูลทดสอบเพิ่มเติมของระบบ New England

การทดสอบ	จำนวนข้อมูล	Error RMSE%	Error MAPE%
เปลี่ยนตำแหน่งการลัดวงจร	38	1.48	6.52
เปลี่ยนขนาดภาระไฟฟ้า	25	1.64	7.50
รวม	63	1.50	6.85

จากตารางที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดที่ได้จากข้อมูลเพิ่มเติมทั้งสองชุดมีค่ามากกว่าข้อมูลชุดทดสอบเดิม เนื่องจากข้อมูลเพิ่มเติมทั้งสองชุดเป็นลักษณะข้อมูลแบบใหม่ที่ไม่เคยผ่านการฝึกสอนมาก่อน จึงส่งผลให้ระบบนิวโรฟซีโครงข่ายตัวได้ทำนายค่าคลาดเคลื่อนมากกว่าเดิม แต่ค่าความผิดพลาดที่ได้ยังอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้

ข้อมูลทดสอบในชุดการเปลี่ยนตำแหน่งการลัดวงจร มีค่าความผิดพลาดที่น้อยกว่าเป็นเพราะข้อมูลในชุดดังกล่าว มีลักษณะเป็นข้อมูลอินพุตใหม่ เพียงตัวแปรเดียว คือตำแหน่งการลัดวงจร

จากห้าตัวแปร ซึ่งส่งผลให้อินพุตมีความคล้ายคลึงกับข้อมูลฝึกสอนเดิมมากกว่าข้อมูลในชุดเปลี่ยนขนาดภาระไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนตัวแปรอินพุตทั้งห้าตัวแปร คือ กำลังไฟฟ้าจริงของภาระไฟฟ้าทั้ง 4 บัส และ ตำแหน่งการลัดวงจร

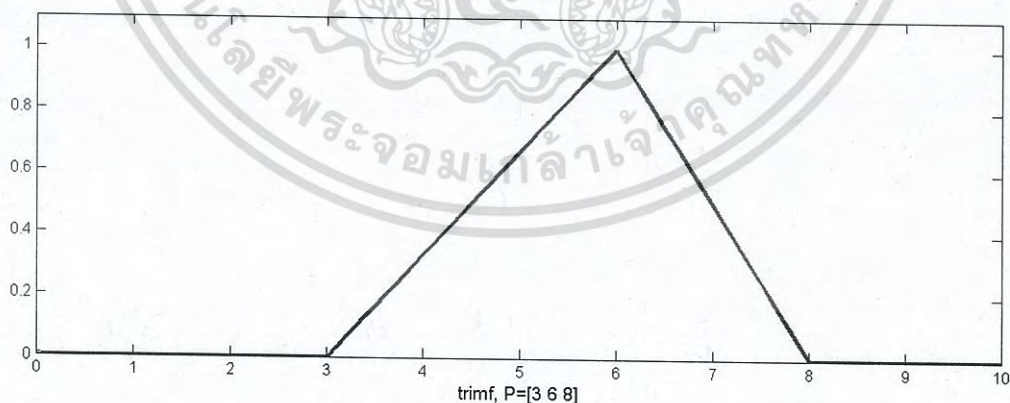
## 5.2 ผลการจำลองในระบบ Western System Coordinating Council

### 5.2.1 การสร้างโครงสร้างระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้

ในการจำลองเพื่อสร้างโครงสร้างของระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้ นั้นมีจำนวนข้อมูลค่าเวลาวิกฤติของระบบ WSCC ทั้งสิ้น 400 ข้อมูล โดยตำแหน่งการลัดวงจรทั้งสิ้น 30 ตำแหน่ง ประกอบด้วย การลัดวงจรที่บัสทั้ง 9 บัส และการลัดวงจรที่ความยาว 25 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ของสายส่ง ทั้ง 6 เส้น

ในการออกแบบระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้ มีอินพุตของระบบประกอบด้วย กำลังไฟฟ้าจริงของภาระไฟฟ้าทั้ง 3 บัส ประกอบด้วย บัสที่ 5, 6 และ 8 และตำแหน่งการลัดวงจรรวมเป็น 4 อินพุต ส่วนเอาต์พุตคือ ค่าเวลาวิกฤติของระบบ WSCC โดยเลือกใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบ trimf (Triangular-shaped membership function) มีสมการคือ

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (5.4)$$



รูปที่ 5.5 กราฟ trimf เมื่อ  $a=3, b=6$  และ  $c=8$

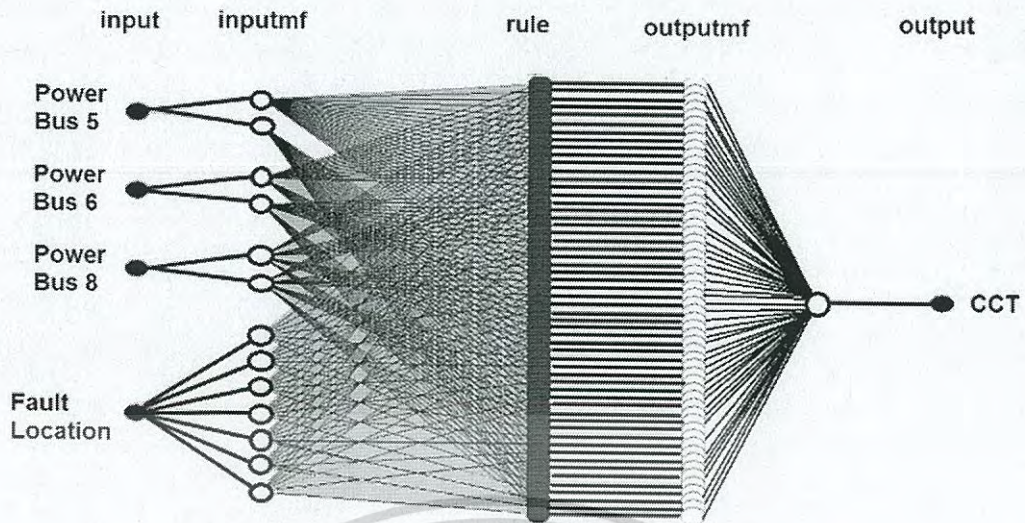
โดยข้อมูลอินพุตที่ใช้แสดงใน ตารางที่ 1 ภาคผนวก ข

ค่าความผิดพลาดของโครงสร้างต่างๆ เป็นไปตามตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ค่าความผิดพลาด RMSE ในโครงสร้างต่างๆ ของระบบ WSCC

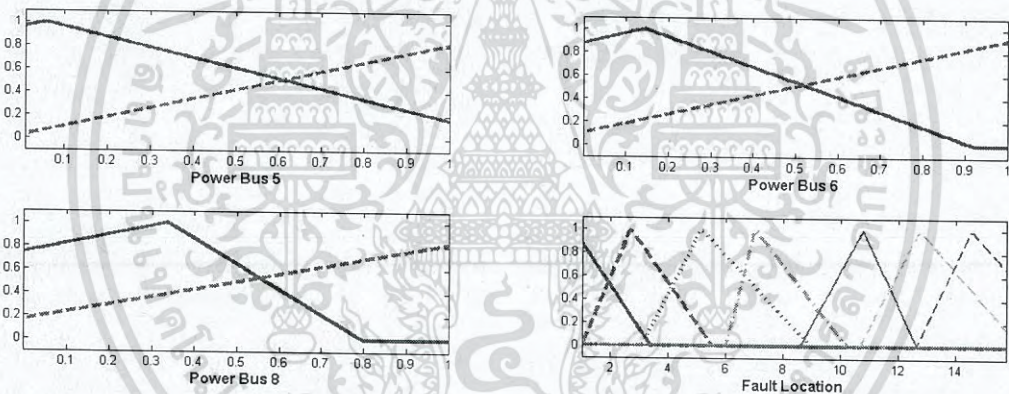
กำลังไฟฟ้า บัส 5	จำนวนโหนด					Training error (%RMSE)	Test error (%RMSE)
	กำลังไฟฟ้า บัส 6	กำลังไฟฟ้า บัส 8	ตำแหน่ง ลัดวงจร	rule	รวม		
2	2	2	2	16	57	3.94	4.00
3	2	2	2	24	82	3.9	4.16
2	3	2	2	24	82	3.8	4.15
2	2	3	2	24	82	3.9	4.04
2	2	2	3	24	82	3.7	3.95
3	3	3	3	81	256	3.33	5.31
7	2	2	2	56	182	3.6	4.80
2	2	2	5	40	132	3.1	3.60
2	2	2	6	48	157	2.63	3.00
2	2	2	7	56	182	1.95	1.80
2	2	2	8	64	207	1.83	2.48
2	2	5	7	140	436	1.51	18.05
2	2	7	7	196	607	1.28	16.77

โครงสร้างของระบบอนุमानนิวโรฟฟิซซึโครงข่ายปรับตัวได้ ที่มีจำนวนโหนดในชั้นที่ 1 เป็นแบบ 2 2 2 7 และมีจำนวนกฎฟิซซึ 56 กฎ เป็นโครงสร้างที่ให้ค่าความผิดพลาดของข้อมูลในชุดทดสอบต่ำที่สุด จึงกล่าวได้ว่า โครงสร้างดังกล่าวเหมาะสมสำหรับใช้ในการหาค่าเวลาวิกฤติของระบบ WSCC 9 bus โดยจะมีโครงสร้างเป็นไปตามรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 โครงสร้างระบบอนุมานนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ดีที่สุดในการทดสอบของระบบ WSCC

โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของระบบอนุมานนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ของระบบ WSCC

### 5.2.2 การทดสอบระบบอนุมานนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้

เป็นการนำโครงสร้างระบบอนุมานนิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ ที่ได้มาทำการทดสอบเพิ่มเติมกับชุดข้อมูลที่ไม่มีการฝึกสอนหรือทดสอบมาก่อน โดยมีข้อมูลทดสอบทั้งสิ้น 60 ข้อมูล โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย การเปลี่ยนตำแหน่งการลัดวงจรอย่างเดียวกจำนวน 32 ข้อมูล และการเปลี่ยนขนาดกำลังไฟฟ้าของภาระไฟฟ้า จำนวน 28 ข้อมูล

โดยข้อมูลที่ใช้แสดงในตารางที่ 2 ภาคผนวก ข โดยข้อมูลที่แสดงในลำดับที่ 1-32 เป็นข้อมูลที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งการลัดวงจรอย่างเดียวและข้อมูลในลำดับที่ 33-60 เป็นข้อมูลที่มีการเปลี่ยน

ขนาดกำลังไฟฟ้าของภาระไฟฟ้าพร้อมกับเปลี่ยนตำแหน่งการลัดวงจร โดยค่าความผิดพลาดเป็นไปตามตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ผลการจำลองของข้อมูลทดสอบเพิ่มเติมของระบบ WSCC

ลำดับที่	CCT จาก Power world (s)	CCT จาก ANFIS (s)	APE (%)
1	0.2721	0.2555	6.1
2	0.2360	0.2162	8.39
3	0.1955	0.2103	7.57
4	0.2522	0.2418	4.12
5	0.2649	0.281	6.08
6	0.3476	0.3536	1.73
7	0.3372	0.3258	3.38
8	0.2915	0.2954	1.34
9	0.1683	0.2000	18.84
10	0.2546	0.2479	2.63
11	0.3070	0.2758	10.16
12	0.3154	0.3174	0.63
13	0.2906	0.2994	3.03
14	0.2229	0.2521	13.10
15	0.2211	0.2118	4.21
16	0.2426	0.2443	0.70
17	0.3831	0.3312	13.55
18	0.3211	0.3176	1.09
19	0.2701	0.2421	10.37
20	0.1837	0.2113	15.02
21	0.2146	0.2254	5.03
23	0.2462	0.2682	8.94
24	0.2774	0.3135	13.01
25	0.3063	0.3065	0.07
26	0.2320	0.2306	0.60
27	0.2121	0.208	1.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

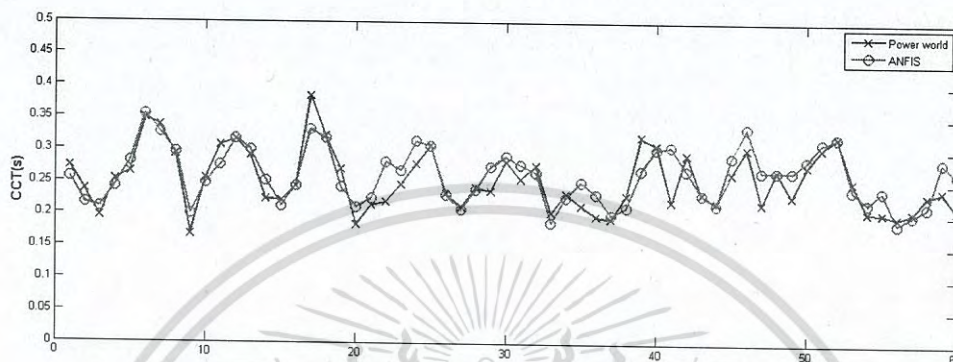
ตารางที่ 5.5 (ต่อ)

ลำดับที่	CCT จาก Power world (s)	CCT จาก ANFIS (s)	APE (%)
28	0.2421	0.2389	1.32
29	0.2368	0.2742	15.79
30	0.2820	0.29	2.84
31	0.2546	0.2771	8.84
32	0.2760	0.2653	3.88
33	0.2031	0.1882	7.34
34	0.233	0.2272	2.49
35	0.2146	0.2507	16.82
36	0.1977	0.2321	17.4
37	0.1936	0.2001	3.36
38	0.2301	0.2123	7.74
39	0.3206	0.2698	15.85
40	0.3078	0.3023	1.79
41	0.2208	0.306	38.59
42	0.2939	0.269	8.47
43	0.2327	0.2327	0.00
44	0.22	0.2169	1.41
45	0.2637	0.2897	9.86
46	0.3028	0.3352	10.70
47	0.2181	0.2673	22.56
48	0.2688	0.2673	0.56
49	0.23	0.2673	16.22
50	0.2768	0.2853	3.07
51	0.3038	0.3124	2.83
52	0.321	0.3207	0.09
53	0.2522	0.2405	4.64
54	0.2058	0.22	6.90
55	0.2046	0.2389	16.76
56	0.1981	0.1891	4.54
57	0.2056	0.2018	1.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 (ต่อ)

ลำดับที่	CCT จาก Power world (s)	CCT จาก ANFIS (s)	APE (%)
58	0.2311	0.2144	7.23
59	0.2393	0.2839	18.64
60	0.209	0.2635	25.78



รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบค่าเวลาวิกฤติของระบบ WSCC

โดยค่าความผิดพลาดรวมที่เกิดขึ้นเป็นไปตามตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ค่าความผิดพลาดของข้อมูลทดสอบเพิ่มเติมของระบบ WSCC

	จำนวนข้อมูล	Error RMSE%	Error MAPE%
เปลี่ยนตำแหน่งการลัดวงจร	32	2.52	6.95
เปลี่ยนขนาดภาระไฟฟ้า	28	3.10	10.00
รวม	60	2.79	8.26

จากตารางที่ 5.6 ผลที่ได้มีลักษณะเดียวกับระบบ New England กล่าวคือ ค่าความผิดพลาดที่ได้จากข้อมูลเพิ่มเติมทั้งสองชุดมีค่ามากกว่าข้อมูลชุดทดสอบเดิม เนื่องจากข้อมูลเพิ่มเติมทั้งสองชุดเป็นลักษณะข้อมูลแบบใหม่ที่ไม่เคยผ่านการฝึกสอนมาก่อน จึงส่งผลให้ระบบนิวโรฟuzzyโครงข่ายตัวได้ทำนายค่าคลาดเคลื่อนมากกว่าเดิม

ข้อมูลทดสอบในชุดการเปลี่ยนตำแหน่งการลัดวงจร มีค่าความผิดพลาดที่น้อยกว่าเป็นเพราะข้อมูลในชุดดังกล่าว มีลักษณะเป็นข้อมูลอินพุตใหม่ เพียงตัวแปรเดียว คือตำแหน่งการลัดวงจร จากสั

ตัวแปร ซึ่งส่งผลให้อินพุตมีความคล้ายคลึงกับข้อมูลฝึกสอนเดิมมากกว่าข้อมูลในชุดเปลี่ยนขนาด  
ภาระไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนตัวแปรอินพุตทั้งสี่ตัว คือ กำลังไฟฟ้าจริงของภาระไฟฟ้าทั้ง 3 บัส และ  
ตำแหน่งการลัดวงจร

ค่าความผิดพลาดที่ได้จากระบบ WSCC มีค่าสูงกว่าในระบบ New England เนื่องจาก  
ขอบเขตการศึกษา ถึงแม้ว่าระบบ New England มีขนาดใหญ่กว่า ระบบ WSCC แต่ในการวิจัยครั้งนี้  
ได้มีการกำหนดขอบเขตการศึกษาในระบบ New England เพียง 6 บัส โดยสายส่งเชื่อมต่อ 5 เส้น  
ในขณะที่ระบบ WSCC ได้กำหนดขอบเขตทำการศึกษาระบบ คือ 9 บัส และสายส่ง 6 เส้น จะเห็น  
ได้ว่าขอบเขตการศึกษาในระบบ WSCC มีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งทำให้การออกแบบตัวแปรอินพุตของ  
ตำแหน่งการลัดวงจรมีความซับซ้อนยุ่งยาก ส่งผลให้ระบบอนุमानนิวโรฟซีโครงข่ายปรับตัวได้  
ทำนายค่าได้คลาดเคลื่อนมากกว่าในระบบ New England



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### บทสรุป

#### 6.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการหาค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้ระบบอนุमान นิวโรฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้ ซึ่งระบบอนุमानฟuzzyโครงข่ายปรับตัวเป็นปัญญาประดิษฐ์รูปแบบหนึ่งในลักษณะของระบบประสานแบบอัจฉริยะ โดยระบบดังกล่าวได้นำข้อดีของตรรกศาสตร์คลุมเครือ ร่วมเข้ากับโครงข่ายประสาทเทียม

โดยที่ประสิทธิภาพของการจำลองค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง ขึ้นอยู่กับการออกแบบ โครงสร้างของระบบอนุमानฟuzzyโครงข่ายปรับตัว การออกแบบตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต รวมทั้ง การจัดการข้อมูลไม่ว่าข้อมูลฝึกสอนหรือข้อมูลทดสอบ ซึ่งผลการทำนายที่ได้ในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถทำนายค่าเวลาวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง ได้ดีในระดับหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบค่าเวลาวิกฤติของระบบ ไฟฟ้ากำลัง ที่ได้จากการทำนายโดยใช้ระบบอนุमानฟuzzyโครงข่ายปรับตัวนั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้ จากวิธีเขียนกราฟทีละขั้นตอน แต่ยังพบปัญหาที่ไม่สามารถทำนายให้ใกล้เคียงได้ เมื่อเป็นการทำนาย ข้อมูลที่โครงสร้างดังกล่าวไม่ได้มีการฝึกสอนไว้ หรือพื้นที่การทำนายอยู่นอกขอบเขตการศึกษา นอกจากนี้ค่าที่ได้จากวิธีการดังกล่าว มีทั้งค่าต่ำกว่าค่าจริงและสูงกว่าค่าจริงปนกันไป ซึ่งทำให้เกิด ปัญหาในการนำค่าที่ได้ไปใช้ต่อไปได้ ดังนั้นการทำนายที่ได้นี้เหมาะสำหรับซึ่งทำนายที่ได้นี้เหมาะ สำหรับการใช้วิเคราะห์ในเบื้องต้นก่อนทำการประเมินเสถียรภาพอย่างละเอียดต่อไป

#### 6.2 ปัญหาอุปสรรคและวิธีการแก้ไข

1. ในการสร้างระบบอนุमानฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้บางครั้ง นั้นได้สร้างระบบที่มีขนาดใหญ่เกินไป จนทำให้คอมพิวเตอร์ไม่สามารถประมวลผลได้ หรือ ประมวลผลผิดพลาด จนทำให้ระบบมีความผิดพลาดที่มาก จึงต้องเลือกขนาดโครงสร้างระบบให้เหมาะสมกับการทำนาย

2. ในการฝึกสอนระบบอนุमानฟuzzyโครงข่ายปรับตัวได้บางครั้ง เมื่อรอบฝึกสอนมากขึ้น จะทำให้เกิดการแกว่งของค่าความผิดพลาดในข้อมูลทดสอบ จนเกิดจุด local error และ global error ซึ่งส่งผลเกิดการเก็บข้อมูลที่ผิดพลาด จึงต้องหารอบการฝึกสอนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าความผิดพลาด ที่ดีที่สุด

### 6.3 ข้อเสนอแนะ

1. การจำลองในระบบ New England ควรกำหนดขอบเขตการศึกษาให้กว้างกว่านี้ หรือทำการจำลองทั้งระบบ และควรใช้โมเดลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบละเอียด
2. ในการจำลองอาจมีการเพิ่มเงื่อนไขให้กับระบบ เช่น เพิ่มจำนวนสายส่งระหว่างบัส ปลดสายส่งออก หรือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจากระบบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ชำนาญ ห่อเกียรติ. การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : จรัลสนิทวงศ์ การพิมพ์. 2550.
- [2] Warut Suampun and Hsiao-Dong Chiang “Critical Evaluation of Methods for Estimating Stability Boundary for Transient Stability Analysis in Power Systems” *Power and Energy Society General Meeting*. July. 2010. pp.1–10.
- [3] Naoto Yorino, Ardyono Priyadi Hironori Kaku and Mitsuhiro Takeshita “A New Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 25, No 3, Aug. 2010, pp. 1620-1626
- [4] H. H. Al Marhoon. “A Practical Method for Power Systems Transient Stability and Security Analysis” *Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES*. May 2012 pp.1-6.
- [5] N.Ranganathan and K.Senthil “Determination of Accurate Critical Clearing Time for Transient Stability Assessment” *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*. Vol.2 , No.2 Apr. 2013 pp, 193-196.
- [6] Ling-Yu Ren, Fang Tian, Jian-Feng Yan, Zhi-Hong Yu, Feng Su and Tao Wu “Online Application and Fast Solving Method for Critical Clearing Time of Three-Phase Short Circuit in Power System” *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*. Vol. 2, No 1 Jan. 2013, pp. 93–99.
- [7] A. Karami and S.Z. Esmaili “Transient stability assessment of power systems described with detailed models using neural networks” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. Vol 45, Feb. 2013, pp. 279-292.
- [8] Witsawa Phootrakornchai and Somchat Jiriwibhakorn. “Online critical clearing time estimation using an adaptive neuro-fuzzy inference system” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. Vol 73, Dec. 2015 pp. 170-181.
- [9] Avishek Paul and Nilanjan Senroy “Critical clearing time estimation using synchrophasor data-based equivalent dynamic model” *IET Generation, Transmission & Distribution*. Vol.9, No.7 Apr 2015, pp. 609-614.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [10] ญัฐฐากร มณีรัตน์. “การออกแบบตัวควบคุมเอชวีดีซีเพื่อเพิ่มเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2548.
- [11] Hadi Saadat. *Power System Analysis*. 2nd ED. New York : McGraw-Hill Primis Custom Publishing, 2002
- [12] Alaska. *Artificial Intelligence*. [Online]. Available : alaska.reru.ac.th/text/ai.pdf. 2558.
- [13] พยุง มีสัจ. ระบบฟuzzyและโครงข่ายประสาทเทียม. กรุงเทพฯ : ศูนย์ผลิตตำราเรียน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2553.
- [14] อาทิตย์ ศรีแก้ว. ปัญญาเชิงคำนวณ Computational Intelligence. นครราชสีมา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2552
- [15] พัฒนพงศ์ เฉลิมเมือง, มณฑลลี ศาสนันทน์และเสฏฐรา ศาสนันทน์. “การประยุกต์ใช้ทฤษฎี ANFIS ในการวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญสู่ความสำเร็จของ กระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์” การประชุมวิชาการด้านการวิจัยดำเนินงานแห่งชาติ ประจำปี 2551, กรกฎาคม 2551, หน้า 86-92. กรุงเทพฯ
- [16] Manu Jain. “Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor using ANFIS Based MRAS” *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International*. May 2011. pp.599-606.
- [17] Chitra Venugopal. “ANFIS Based Field Oriented Control for Matrix Converter fed Induction Motor” *2010 IEEE International Conference Power and Energy (PECon)*. Nov. 2010. pp 74-48.
- [18] ชัยโย ตระกูลไทยรักษ์. “การหาค่าตอบการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมโดยใช้อนุกรมานฟuzzy โครงข่ายปรับตัวได้” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2555.
- [19] J. Wesley Hines. *Fuzzy and Neural Approaches in Engineering MATLAB Supplement*. New York : John Wiley and Sons. 1997.
- [20] สมชาติ จิริวิภากร. การประยุกต์ใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมในระบบไฟฟ้ากำลัง. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [21] สุรินทร์ คำฝอย. โครงข่ายประสาทเทียมเชิงปฏิบัติสำหรับงานวิศวกรรมไฟฟ้า. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.
- [22] Jyh-Shing Roger Jang. "ANFIS : Adaptive-Network-Based FuzzyInference System" IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Vol 23, No 3. May 1993. pp.665-685.
- [23] M.A. Pai. Energy function analysis for power system stability. London : Kluwer Academic Publisers. 1989.
- [24] Swaroop Kumar. Nallagalva, Mukesh Kumar Kirar and Dr.Ganga Agnihotri. "TransientStability Analysis of the IEEE 9-Bus Electric Power System" International Journal of Scientific Engineering and Technology. Vol 1, No 3. Jul. 2012. pp.161-166.
- [25] Peter W.Sauer and M. A. Pai. Power system dynamics and stability. New Jersey : Prentice Hall. 1997.
- [26] "Block Diagrams." [Online]. Available : [www.powerworld.com/files/Block-Diagrams-16.pdf](http://www.powerworld.com/files/Block-Diagrams-16.pdf). 2558.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ค่าเวลาวิกฤติของระบบ New England สำหรับการฝึกสอนระบบอนุमानนิวโรฟซ์ซี่  
โครงข่ายปรับตัวได้

Real Power bus 26 (MW)	Real Power bus 27 (MW)	Real Power bus 28 (MW)	Real Power bus 29 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
145.2	314.82	200.41	290.01	bus17	0.1855
130.1	245.99	207.35	289.43	bus28	0.1584
153.69	324.76	216.89	317.63	bus28	0.163
150.42	315.86	232.87	273.8	bus29	0.1376
123.12	285.31	197.42	308.93	bus26	0.1592
137.44	307.89	238.65	230.07	bus26	0.1557
122.35	319.39	234.62	253.33	bus28	0.1585
131.35	252.24	191.64	304.14	bus17	0.1835
157.73	259.89	238.64	326.65	bus28	0.1638
132.93	315.3	212.7	259.5	bus29	0.1352
130.14	306.06	217.23	306.11	bus29	0.1382
153.53	317.62	173.18	311.12	bus17	0.1856
136.63	246.65	190.78	324.43	bus26	0.1596
164.62	317.03	237.54	240.37	bus39	0.1313
165.4	252.47	207.28	338.37	bus26	0.1635
158.56	244.21	245.56	282.68	bus39	0.1331
125.71	244.5	243.14	337.5	bus27	0.2184
147.69	270.88	183.71	266.98	bus39	0.1292
146.06	300.81	171.62	276.39	bus39	0.1295
160.9	332.02	178.6	329.51	bus28	0.162
152.34	320.27	177.66	229.45	bus17	0.18
159.31	263.5	245.39	254.88	bus17	0.183
123.02	253.38	190.08	259.32	bus28	0.155
159.24	260.65	196.05	272.95	bus28	0.157

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

Real Power bus 26 (MW)	Real Power bus 27 (MW)	Real Power bus 28 (MW)	Real Power bus 29 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
124.91	288.91	200.19	272.58	bus27	0.212
158.19	321.52	197.36	279.65	bus17	0.185
114.96	323.34	238.36	332.82	bus39	0.136
140.43	320.74	176.92	292.51	bus39	0.13
151.1	258.87	181.15	306.62	bus17	0.183
163.44	310.34	171.19	233.68	bus29	0.131
124.44	267.84	232.39	265.02	bus27	0.214
136.28	241.83	194.18	240.99	bus28	0.154
149.87	267.99	184.46	227.75	bus29	0.131
144	300.52	217.75	232.58	bus27	0.209
138.72	252.78	184.91	304.58	bus39	0.176
125.38	306.63	183.17	331.04	bus39	0.151
152.19	268.14	214.31	262.63	bus26	0.156
142.73	234.32	186.46	315.04	bus26	0.158
164.83	261.53	196.04	315.62	bus29	0.137
147.15	255.34	226.89	287.33	bus28	0.159
158.19	276.31	199.68	317.36	bus17	0.1851
139.42	315.65	191.8	278.01	bus29	0.1354
138.76	282.23	213.04	308.78	bus26	0.1609
117.02	266	172.35	315.52	bus27	0.2142
134.48	314.13	235.87	311.25	bus29	0.1397
164.17	238.48	242.54	299.76	bus29	0.1388
152.96	236.32	226.18	257.46	bus29	0.135
152.53	263.45	183.07	257.17	bus26	0.1533
117.38	312.49	216.79	317.37	bus17	0.1858

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

Real Power bus 26 (MW)	Real Power bus 27 (MW)	Real Power bus 28 (MW)	Real Power bus 29 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
162.92	246.9	223.5	295.59	bus39	0.556
125.28	318.51	186.38	228.6	bus39	0.5643
159.81	266.52	217.55	328.1	bus27	0.2168
144.16	266.96	202.63	237.03	bus27	0.207
161.59	226.24	180.08	258.65	bus29	0.1326
131.52	294.19	179.31	319.26	bus17	0.1841
111.2	291.77	244.54	247.85	bus27	0.2137
162.43	239.13	192.58	314.83	bus29	0.1371
123.66	257.47	201.82	284.76	bus26	0.1564
126.3	271.94	183.2	250.54	bus17	0.1804
131.1	239.35	207.25	314.74	bus26	0.1596
156.36	252.55	209.41	240.08	bus26	0.1536
141.3	272.62	173.8	233.54	bus27	0.2029
133.14	303.91	202.91	243.45	bus28	0.1562
131.27	240	185.75	233.74	bus26	0.15
139.73	294.43	193.66	307.58	bus29	0.137
152.88	328.45	208.38	324.5	bus29	0.1397
163.53	320.25	177.14	266.48	bus38	0.127
122.19	313.97	165.5	272.15	bus26	0.1537
136.92	254.41	238.87	317.23	bus28	0.1625
164.72	273.48	177.09	300.46	bus26	0.1577
128.56	299.18	202.68	288.99	bus28	0.159
154.57	243.9	177.09	249.45	bus29	0.132
160.75	332.25	226.05	264.95	bus38	0.1324
139.57	273.42	229.16	241.29	bus38	0.1298

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

Real Power bus 26 (MW)	Real Power bus 27 (MW)	Real Power bus 28 (MW)	Real Power bus 29 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
139.05	250.32	220.52	245.74	bus17	0.182
140.61	257.83	233.78	247.87	bus28	0.1574
160.13	292.28	217.09	321.19	bus27	0.2164
153.11	309	234.83	316.65	bus17	0.1868
147.16	248.29	229.31	233.08	bus27	0.2093
148.73	224.92	166.39	269.27	bus28	0.1548
137.53	275.66	207.32	237.98	bus27	0.207
130.36	249.61	245.98	299.03	bus28	0.161
156.07	305.11	179.8	290.41	bus38	0.131
160.03	232	197.07	243.29	bus27	0.205
137.04	298.29	180.28	263.33	bus28	0.155
160.18	261.58	183.34	297.53	bus26	0.157
145.12	330.08	204.64	280.36	bus27	0.212
158.19	319.2	235.51	272.71	bus38	0.133
140.28	305.45	216.15	339.41	bus28	0.163
149.88	302.34	227.17	309.91	bus27	0.216
147.85	309.73	165.01	276.12	bus29	0.133
164.49	304.1	239.3	326.13	bus27	0.219
122.15	322.75	168.51	330.84	bus17	0.184
152.13	306.17	183.07	249.11	bus29	0.133
117.4	272.09	204.36	314.06	bus28	0.16
123.35	321.63	245	246.12	bus26	0.157
137.7	336.86	201.21	246.38	bus29	0.134
154.81	318.3	168.29	309.8	bus38	0.131
133.92	243.73	221.59	248.73	bus27	0.209

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

Real Power bus 26 (MW)	Real Power bus 27 (MW)	Real Power bus 28 (MW)	Real Power bus 29 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
121.16	335.32	244.4	313.33	bus17	0.186
145.2	314.82	200.41	290.01	L28-29 @75%	0.1432
130.1	245.99	207.35	289.43	l17-27 @50%	0.2131
153.69	324.76	216.89	317.63	l26-27 @75%	0.2086
150.42	315.86	232.87	273.8	l26-28 @75%	0.173
123.12	285.31	197.42	308.93	l17-27 @50%	0.2148
137.44	307.89	238.65	230.07	l26-28 @75%	0.1693
122.35	319.39	234.62	253.33	l26-29 @75%	0.1605
131.35	252.24	191.64	304.14	l26-28 @75%	0.1712
157.73	259.89	238.64	326.65	l26-29 @50%	0.1827
132.93	315.3	212.7	259.5	l26-27 @25%	0.1698
130.14	306.06	217.23	306.11	l17-27 @75%	0.2194
153.53	317.62	173.18	311.12	l17-27 @25%	0.2038
136.63	246.65	190.78	324.43	l17-27 @25%	0.2035
164.62	317.03	237.54	240.37	l26-28 @75%	0.171
165.4	252.47	207.28	338.37	l28-29 @50%	0.1522
158.56	244.21	245.56	282.68	l17-27 @50%	0.2158
125.71	244.5	243.14	337.5	l26-29 @25%	0.1857
147.69	270.88	183.71	266.98	l26-28 @25%	0.1716
146.06	300.81	171.62	276.39	l26-27 @75%	0.1958
160.9	332.02	178.6	329.51	l26-27 @75%	0.2063
152.34	320.27	177.66	229.45	l26-27 @25%	0.164
159.31	263.5	245.39	254.88	l17-27 @50%	0.214
123.02	253.38	190.08	259.32	l17-27 @75%	0.212
159.24	260.65	196.05	272.95	l28-29 @50%	0.147

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

Real Power bus 26 (MW)	Real Power bus 27 (MW)	Real Power bus 28 (MW)	Real Power bus 29 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
124.91	288.91	200.19	272.58	l26-28 @75%	0.169
158.19	321.52	197.36	279.65	l26-28 @50%	0.178
114.96	323.34	238.36	332.82	l28-29 @25%	0.159
140.43	320.74	176.92	292.51	l26-28 @25%	0.174
151.1	258.87	181.15	306.62	l28-29 @25%	0.153
163.44	310.34	171.19	233.68	l26-29 @75%	0.156
124.44	267.84	232.39	265.02	l17-27 @25%	0.203
136.28	241.83	194.18	240.99	L28-29 @75%	0.138
149.87	267.99	184.46	227.75	l26-29 @75%	0.155
144	300.52	217.75	232.58	l26-29 @50%	0.173
138.72	252.78	184.91	304.58	l17-27 @25%	0.203
125.38	306.63	183.17	331.04	l26-28 @75%	0.173
152.19	268.14	214.31	262.63	l26-28 @50%	0.176
142.73	234.32	186.46	315.04	l26-29 @25%	0.179
164.83	261.53	196.04	315.62	l28-29 @25%	0.155
147.15	255.34	226.89	287.33	l17-27 @75%	0.217
158.19	276.31	199.68	317.36	l17-27 @75%	0.2314
139.42	315.65	191.8	278.01	l26-27 @75%	0.1986
138.76	282.23	213.04	308.78	l26-28 @75%	0.1737
117.02	266	172.35	315.52	l17-27 @25%	0.2021
134.48	314.13	235.87	311.25	l26-27 @25%	0.1779
164.17	238.48	242.54	299.76	l26-29 @75%	0.1639
152.96	236.32	226.18	257.46	l26-29 @25%	0.1769
152.53	263.45	183.07	257.17	L28-29 @75%	0.1395
117.38	312.49	216.79	317.37	l26-29 @50%	0.1802

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

Real Power bus 26 (MW)	Real Power bus 27 (MW)	Real Power bus 28 (MW)	Real Power bus 29 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
162.92	246.9	223.5	295.59	l17-27 @75%	0.2184
125.28	318.51	186.38	228.6	L28-29 @75%	0.1381
159.81	266.52	217.55	328.1	l26-29 @50%	0.1814
144.16	266.96	202.63	237.03	l28-29 @25%	0.1503
161.59	226.24	180.08	258.65	l17-27 @25%	0.1989
131.52	294.19	179.31	319.26	l17-27 @25%	0.2051
111.2	291.77	244.54	247.85	l17-27 @25%	0.2018
162.43	239.13	192.58	314.83	l26-28 @50%	0.1793
123.66	257.47	201.82	284.76	l26-28 @75%	0.1701
126.3	271.94	183.2	250.54	l26-27 @50%	0.178
131.1	239.35	207.25	314.74	l26-28 @25%	0.1768
156.36	252.55	209.41	240.08	l26-29 @50%	0.1728
141.3	272.62	173.8	233.54	l28-29 @25%	0.1486
133.14	303.91	202.91	243.45	l26-29 @75%	0.1578
131.27	240	185.75	233.74	l17-27 @50%	0.2078
139.73	294.43	193.66	307.58	l28-29 @25%	0.155
152.88	328.45	208.38	324.5	l28-29 @75%	0.1462
163.53	320.25	177.14	266.48	l17-27 @75%	0.2107
122.19	313.97	165.5	272.15	l26-27 @75%	1.1939
136.92	254.41	238.87	317.23	l26-28 @50%	0.1824
164.72	273.48	177.09	300.46	l17-27 @25%	0.2024
128.56	299.18	202.68	288.99	l26-29 @50%	0.1767
154.57	243.9	177.09	249.45	l26-28 @25%	0.1689
160.75	332.25	226.05	264.95	l28-29 @25%	0.1551
139.57	273.42	229.16	241.29	l26-27 @75%	0.1962

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

Real Power bus 26 (MW)	Real Power bus 27 (MW)	Real Power bus 28 (MW)	Real Power bus 29 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
139.05	250.32	220.52	245.74	l26-29 @25%	0.1752
140.61	257.83	233.78	247.87	l17-27 @50%	0.2121
160.13	292.28	217.09	321.19	l26-29 @50%	0.1814
153.11	309	234.83	316.65	l17-27 @75%	0.2339
147.16	248.29	229.31	233.08	l26-29 @75%	0.158
148.73	224.92	166.39	269.27	l26-27 @50%	0.178
137.53	275.66	207.32	237.98	l26-28 @25%	0.17
130.36	249.61	245.98	299.03	l26-28 @75%	0.173
156.07	305.11	179.8	290.41	L28-29 @75%	0.142
160.03	232	197.07	243.29	l17-27 @50%	0.209
137.04	298.29	180.28	263.33	l26-27 @25%	0.167
160.18	261.58	183.34	297.53	l26-28 @50%	0.177
145.12	330.08	204.64	280.36	l26-27 @50%	0.186
158.19	319.2	235.51	272.71	l26-29 @25%	0.181
140.28	305.45	216.15	339.41	l17-27 @25%	0.208
149.88	302.34	227.17	309.91	l26-28 @75%	0.175
147.85	309.73	165.01	276.12	L28-29 @75%	0.14
164.49	304.1	239.3	326.13	l17-27 @75%	0.226
122.15	322.75	168.51	330.84	l26-29 @25%	0.18
152.13	306.17	183.07	249.11	l26-28 @50%	0.173
117.4	272.09	204.36	314.06	l26-29 @25%	0.18
123.35	321.63	245	246.12	l26-29 @75%	0.16
137.7	336.86	201.21	246.38	l28-29 @50%	0.146
154.81	318.3	168.29	309.8	l17-27 @75%	0.217
133.92	243.73	221.59	248.73	L28-29 @75%	0.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

Real Power bus 26 (MW)	Real Power bus 27 (MW)	Real Power bus 28 (MW)	Real Power bus 29 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
121.16	335.32	244.4	313.33	l26-29 @50%	0.182
145.2	314.82	200.41	290.01	l26-28 @75%	0.1722
130.1	245.99	207.35	289.43	l28-29 @25%	0.1534
153.69	324.76	216.89	317.63	l26-28 @75%	0.176
150.42	315.86	232.87	273.8	l26-28 @25%	0.1772
123.12	285.31	197.42	308.93	l26-27 @25%	0.1728
137.44	307.89	238.65	230.07	l17-27 @50%	0.2121
122.35	319.39	234.62	253.33	l17-27 @25%	0.2041
131.35	252.24	191.64	304.14	l26-27 @25%	0.171
157.73	259.89	238.64	326.65	l28-29 @25%	0.1587
132.93	315.3	212.7	259.5	l26-28 @75%	0.1701
130.14	306.06	217.23	306.11	l26-27 @50%	0.1896
153.53	317.62	173.18	311.12	l26-28 @75%	0.1726
136.63	246.65	190.78	324.43	l26-28 @25%	0.1769
164.62	317.03	237.54	240.37	l26-27 @75%	0.1998
165.4	252.47	207.28	338.37	l26-29 @25%	0.1843
158.56	244.21	245.56	282.68	l26-27 @25%	0.1743
125.71	244.5	243.14	337.5	l26-29 @75%	0.1659
147.69	270.88	183.71	266.98	l26-29 @25%	0.1751
146.06	300.81	171.62	276.39	l17-27 @75%	0.2139
160.9	332.02	178.6	329.51	l26-29 @75%	0.1637
152.34	320.27	177.66	229.45	l28-29 @50%	0.144
159.31	263.5	245.39	254.88	l26-28 @50%	0.177
123.02	253.38	190.08	259.32	l17-27 @25%	0.199
159.24	260.65	196.05	272.95	l17-27 @50%	0.212

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

Real Power bus 26 (MW)	Real Power bus 27 (MW)	Real Power bus 28 (MW)	Real Power bus 29 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
124.91	288.91	200.19	272.58	l26-29 @75%	0.159
158.19	321.52	197.36	279.65	l26-28 @25%	0.175
114.96	323.34	238.36	332.82	l26-29 @25%	0.186
140.43	320.74	176.92	292.51	l28-29 @50%	0.148
151.1	258.87	181.15	306.62	l26-29 @50%	0.176
163.44	310.34	171.19	233.68	l17-27 @25%	0.198
124.44	267.84	232.39	265.02	l26-27 @50%	0.184
136.28	241.83	194.18	240.99	l28-29 @50%	0.144
149.87	267.99	184.46	227.75	l17-27 @50%	0.208
144	300.52	217.75	232.58	l28-29 @25%	0.151
138.72	252.78	184.91	304.58	l26-27 @25%	0.17
125.38	306.63	183.17	331.04	l26-28 @75%	0.150
152.19	268.14	214.31	262.63	l28-29 @25%	0.152
142.73	234.32	186.46	315.04	l26-27 @50%	0.185
164.83	261.53	196.04	315.62	l28-29 @50%	0.15
147.15	255.34	226.89	287.33	l26-28 @50%	0.179
158.19	276.31	199.68	317.36	l17-27 @25%	0.2064
139.42	315.65	191.8	278.01	l26-27 @25%	0.1703
138.76	282.23	213.04	308.78	l26-29 @50%	0.1791
117.02	266	172.35	315.52	l17-27 @75%	0.2159
134.48	314.13	235.87	311.25	l17-27 @75%	0.2215
164.17	238.48	242.54	299.76	l26-29 @50%	0.1803
152.96	236.32	226.18	257.46	l26-28 @50%	0.176
152.53	263.45	183.07	257.17	l17-27 @25%	0.1995
117.38	312.49	216.79	317.37	l26-27 @25%	0.1761

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

Real Power bus 26 (MW)	Real Power bus 27 (MW)	Real Power bus 28 (MW)	Real Power bus 29 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
162.92	246.9	223.5	295.59	l26-27 @75%	0.2034
125.28	318.51	186.38	228.6	l28-29 @50%	0.144
159.81	266.52	217.55	328.1	l26-27 @50%	0.1924
144.16	266.96	202.63	237.03	l26-29 @75%	0.1569
161.59	226.24	180.08	258.65	l26-28 @50%	0.173
131.52	294.19	179.31	319.26	l28-29 @50%	0.1493
111.2	291.77	244.54	247.85	l26-27 @50%	0.1838
162.43	239.13	192.58	314.83	l26-28 @50%	0.1782
123.66	257.47	201.82	284.76	l26-27 @25%	0.1697
126.3	271.94	183.2	250.54	l26-28 @50%	0.1724
131.1	239.35	207.25	314.74	l26-27 @50%	0.1875
156.36	252.55	209.41	240.08	l26-27 @25%	0.1665
141.3	272.62	173.8	233.54	l17-27 @75%	0.2104
133.14	303.91	202.91	243.45	l28-29 @75%	0.1399
131.27	240	185.75	233.74	l17-27 @75%	1.2105
139.73	294.43	193.66	307.58	l26-29 @50%	0.1779
152.88	328.45	208.38	324.5	l28-29 @50%	0.1523
163.53	320.25	177.14	266.48	l26-27 @25%	0.1637
122.19	313.97	165.5	272.15	l26-27 @25%	0.1666
136.92	254.41	238.87	317.23	l17-27 @75%	0.2209
164.72	273.48	177.09	300.46	l17-27 @50%	0.2136
128.56	299.18	202.68	288.99	l17-27 @25%	0.2028
154.57	243.9	177.09	249.45	l26-28 @75%	0.1663
160.75	332.25	226.05	264.95	l17-27 @75%	0.2186
139.57	273.42	229.16	241.29	l26-29 @50%	0.1743

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

Real Power bus 26 (MW)	Real Power bus 27 (MW)	Real Power bus 28 (MW)	Real Power bus 29 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
139.05	250.32	220.52	245.74	l28-29 @50%	0.1461
140.61	257.83	233.78	247.87	l26-28 @25%	0.173
160.13	292.28	217.09	321.19	l26-27 @25%	0.1776
153.11	309	234.83	316.65	l26-27 @75%	0.2101
147.16	248.29	229.31	233.08	l26-27 @25%	0.167
148.73	224.92	166.39	269.27	l17-27 @25%	0.2
137.53	275.66	207.32	237.98	l17-27 @25%	0.199
130.36	249.61	245.98	299.03	l26-29 @75%	0.163
156.07	305.11	179.8	290.41	l17-27 @50%	0.213
160.03	232	197.07	243.29	l26-27 @75%	0.191
137.04	298.29	180.28	263.33	L28-29 @75%	0.139
160.18	261.58	183.34	297.53	l26-29 @75%	0.16
145.12	330.08	204.64	280.36	l17-27 @75%	0.218
158.19	319.2	235.51	272.71	l28-29 @50%	0.15
140.28	305.45	216.15	339.41	l26-27 @50%	0.194
149.88	302.34	227.17	309.91	l17-27 @50%	0.219
147.85	309.73	165.01	276.12	l26-28 @75%	0.168
164.49	304.1	239.3	326.13	l26-29 @75%	0.166
122.15	322.75	168.51	330.84	l28-29 @50%	0.149
152.13	306.17	183.07	249.11	l26-27 @75%	0.193
117.4	272.09	204.36	314.06	L28-29 @75%	0.143
123.35	321.63	245	246.12	l28-29 @50%	0.148
137.7	336.86	201.21	246.38	l26-27 @50%	0.181
154.81	318.3	168.29	309.8	l26-27 @75%	0.201
133.92	243.73	221.59	248.73	l26-28 @75%	0.168

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

Real Power bus 26 (MW)	Real Power bus 27 (MW)	Real Power bus 28 (MW)	Real Power bus 29 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
121.16	335.32	244.4	313.33	l17-27 @25%	0.217
145.2	314.82	200.41	290.01	l28-29 @25%	0.1547
130.1	245.99	207.35	289.43	l28-29 @25%	0.1534
153.69	324.76	216.89	317.63	l26-29 @75%	0.165
150.42	315.86	232.87	273.8	l28-29 @50%	0.15
123.12	285.31	197.42	308.93	l26-29 @75%	0.1616
137.44	307.89	238.65	230.07	l26-27 @50%	0.1826
122.35	319.39	234.62	253.33	l26-27 @75%	0.1995
131.35	252.24	191.64	304.14	l17-27 @25%	0.2022
157.73	259.89	238.64	326.65	l28-29 @25%	0.1587
132.93	315.3	212.7	259.5	l17-27 @50%	0.2127
130.14	306.06	217.23	306.11	l17-27 @75%	0.2194
153.53	317.62	173.18	311.12	l28-29 @75%	0.1433
136.63	246.65	190.78	324.43	l17-27 @50%	0.2149
164.62	317.03	237.54	240.37	l28-29 @25%	0.1539
165.4	252.47	207.28	338.37	l26-29 @75%	0.1648
158.56	244.21	245.56	282.68	l26-28 @75%	0.1733
125.71	244.5	243.14	337.5	l17-27 @75%	0.2226
147.69	270.88	183.71	266.98	l26-27 @75%	0.1949
146.06	300.81	171.62	276.39	l28-29 @75%	0.1405
160.9	332.02	178.6	329.51	l26-27 @25%	0.1762
152.34	320.27	177.66	229.45	l26-27 @75%	0.1910
159.31	263.5	245.39	254.88	l28-29 @75%	0.1420
123.02	253.38	190.08	259.32	l26-29 @75%	0.1570
159.24	260.65	196.05	272.95	l26-28 @75%	0.1690

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

Real Power bus 26 (MW)	Real Power bus 27 (MW)	Real Power bus 28 (MW)	Real Power bus 29 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
124.91	288.91	200.19	272.58	l17-27 @50%	0.2120
158.19	321.52	197.36	279.65	l26-28 @50%	0.1724
114.96	323.34	238.36	332.82	l26-27 @25%	0.1800
140.43	320.74	176.92	292.51	l17-27 @25%	0.2020
151.1	258.87	181.15	306.62	l26-29 @25%	0.1780
163.44	310.34	171.19	233.68	l17-27 @25%	0.2100
124.44	267.84	232.39	265.02	l26-28 @25%	0.1740
136.28	241.83	194.18	240.99	l17-27 @50%	0.2080
149.87	267.99	184.46	227.75	l26-27 @75%	0.1890
144	300.52	217.75	232.58	l26-28 @50%	0.1740
138.72	252.78	184.91	304.58	l26-29 @25%	0.1780
125.38	306.63	183.17	331.04	l17-27 @50%	0.216
152.19	268.14	214.31	262.63	l26-29 @50%	0.175
142.73	234.32	186.46	315.04	l26-29 @25%	0.1750
164.83	261.53	196.04	315.62	l26-28 @25%	0.177
147.15	255.34	226.89	287.33	l26-28 @25%	0.176
158.19	276.31	199.68	317.36	l26-28 @75%	0.174
139.42	315.65	191.8	278.01	l26-29 @50%	0.1756
138.76	282.23	213.04	308.78	l26-28 @25%	0.178
117.02	266	172.35	315.52	l26-27 @50%	0.1844
134.48	314.13	235.87	311.25	L28-29 @75%	0.1462
164.17	238.48	242.54	299.76	l26-29 @75%	0.1639
152.96	236.32	226.18	257.46	l17-27 @25%	0.2012
152.53	263.45	183.07	257.17	l28-29 @50%	0.1454
117.38	312.49	216.79	317.37	l26-29 @25%	0.1829

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

Real Power bus 26 (MW)	Real Power bus 27 (MW)	Real Power bus 28 (MW)	Real Power bus 29 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
162.92	246.9	223.5	295.59	l26-29 @25%	0.1811
125.28	318.51	186.38	228.6	l26-29 @25%	0.1721
159.81	266.52	217.55	328.1	l17-27 @50%	0.2193
144.16	266.96	202.63	237.03	l28-29 @25%	0.1503
161.59	226.24	180.08	258.65	l26-29 @75%	0.1568
131.52	294.19	179.31	319.26	l26-27 @75%	0.2019
111.2	291.77	244.54	247.85	l26-28 @50%	0.1764
162.43	239.13	192.58	314.83	l26-29 @25%	0.1802
123.66	257.47	201.82	284.76	l26-28 @25%	0.1736
126.3	271.94	183.2	250.54	l26-28 @50%	0.1740
131.1	239.35	207.25	314.74	l17-27 @75%	0.2181
156.36	252.55	209.41	240.08	l17-27 @25%	0.1996
141.3	272.62	173.8	233.54	l17-27 @50%	0.2079
133.14	303.91	202.91	243.45	l26-29 @50%	0.173
131.27	240	185.75	233.74	l26-27 @75%	0.1888
139.73	294.43	193.66	307.58	l28-29 @25%	0.155
152.88	328.45	208.38	324.5	l17-27 @75%	0.2331
163.53	320.25	177.14	266.48	l28-29 @25%	0.1493
122.19	313.97	165.5	272.15	l26-29 @25%	0.1744
136.92	254.41	238.87	317.23	l26-27 @25%	0.1771
164.72	273.48	177.09	300.46	l26-29 @50%	0.1763
128.56	299.18	202.68	288.99	l26-27 @25%	0.1716
154.57	243.9	177.09	249.45	l26-29 @25%	0.1724
160.75	332.25	226.05	264.95	l17-27 @25%	0.2048
139.57	273.42	229.16	241.29	l26-27 @50%	0.182

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

Real Power bus 26 (MW)	Real Power bus 27 (MW)	Real Power bus 28 (MW)	Real Power bus 29 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
139.05	250.32	220.52	245.74	l26-29 @50%	0.1735
140.61	257.83	233.78	247.87	l26-27 @25%	0.1691
160.13	292.28	217.09	321.19	l17-27 @75%	0.2212
153.11	309	234.83	316.65	l26-28 @50%	0.1838
147.16	248.29	229.31	233.08	l28-29 @50%	0.1459
148.73	224.92	166.39	269.27	l26-28 @50%	0.1726

ตารางที่ ก.2 ค่าเวลาวิกฤติของระบบ New England สำหรับการทดสอบระบบอนุमानนิวโรฟซ์ซี่  
โครงข่ายปรับตัวได้

ลำดับที่	Real Power bus 26 (MW)	Real Power bus 27 (MW)	Real Power bus 28 (MW)	Real Power bus 29 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
1	123.1198	285.3075	197.424	308.9287	l17-27 @72%	0.2184
2	158.558	244.2063	245.5595	282.6754	l17-27 @75%	0.2194
3	114.9647	323.3359	238.3628	332.8155	l17-27 @27%	0.2140
4	142.7309	234.3185	186.4614	315.0416	l17-27 @51%	0.1840
5	117.3791	312.4948	216.795	317.367	l17-27 @4%	0.1906
6	131.1048	239.3483	207.2493	314.7444	l17-27 @45%	0.2150
7	128.557	299.1754	202.685	288.9931	l17-27 @96%	0.2134
8	145.1978	314.8204	200.4111	290.0051	l26-27 @47%	0.1850
9	153.5337	317.6185	173.1783	311.1233	l26-27 @86%	0.2089
10	123.0153	253.3797	190.0797	259.3214	l26-27 @98%	0.2070
11	143.9951	300.5165	217.7525	232.5793	l26-27 @82%	0.1980
12	134.4827	314.1295	235.8717	311.2526	l26-27 @9%	0.1688

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

ลำดับ ที่	Real Power bus 26 (MW)	Real Power bus 27 (MW)	Real Power bus 28 (MW)	Real Power bus 29 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
13	111.2012	291.7684	244.5407	247.8507	l26-27 @6%	0.1598
14	163.5304	320.2548	177.1433	266.4766	l26-27 @33%	0.1678
15	153.1132	308.9956	234.832	316.6481	l26-27 @54%	0.1965
16	130.1037	245.9937	207.3463	289.4269	l26-28 @67%	0.1736
17	136.6303	246.6509	190.782	324.4252	l26-28 @74%	0.1732
18	159.2362	260.6471	196.0535	272.9463	l26-28 @45%	0.1760
19	138.7169	252.7831	184.9125	304.5768	l26-28 @58%	0.1760
20	164.1732	238.4847	242.541	299.7611	l26-28 @45%	0.1818
21	162.4319	239.1348	192.5753	314.8297	l26-28 @15%	0.1720
22	122.1893	313.9669	165.4984	272.1502	l26-28 @2%	0.1558
23	147.1584	248.2882	229.3117	233.0781	l26-28 @78%	0.1669
24	153.6916	324.7581	216.8926	317.6298	l26-29 @88%	0.1527
25	164.624	317.0289	237.5444	240.3656	l26-29 @62%	0.1703
26	125.3813	306.6275	183.1708	331.045	l26-29 @87%	0.1510
27	123.6626	257.4696	201.8169	284.7609	l26-29 @72%	0.1620
28	124.9082	288.9127	200.1864	272.5846	l26-29 @57%	0.1710
29	152.9646	236.3197	226.1823	257.4562	l26-29 @5%	0.1628
30	136.9246	254.4073	238.8709	317.2348	l26-29 @14%	0.1785
31	148.732	224.9202	166.3933	269.2676	l26-29 @96%	0.1366
32	150.425	315.8587	232.872	273.8009	L28-29 @39%	0.1525
33	165.3966	252.4667	207.2848	338.3684	L28-29 @94%	0.1412
34	158.1928	321.5155	197.355	279.6453	L28-29 @46%	0.1460
35	152.1932	268.1402	214.3084	262.6349	L28-29 @3%	0.1570
36	152.5308	263.4504	183.0716	257.1676	L28-29 @64%	0.1421

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

ลำดับ ที่	Real Power bus 26 (MW)	Real Power bus 27 (MW)	Real Power bus 28 (MW)	Real Power bus 29 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
37	126.3045	271.9372	183.2034	250.5373	L28-29 @71%	0.1396
38	164.7239	273.4782	177.0914	300.4568	L28-29 @8%	0.1573
39	130.135	306.0571	217.2288	306.113	l17-27 @12%	0.1970
40	120.0045	230.9739	188.2843	251.2973	l17-28 @35%	0.2033
41	163.0935	313.2084	231.8364	235.3874	l17-29 @58%	0.2143
42	158.8763	265.3372	196.4657	334.2934	l17-30 @72%	0.2201
43	147.0028	335.8334	167.3092	280.3853	l17-31 @86%	0.2131
44	150.5769	293.4775	194.3752	234.4442	l26-27 @5%	0.1551
45	146.2834	236.4927	226.0283	314.2085	l26-28 @27%	0.1764
46	135.3958	329.4095	179.3645	253.4875	l26-29 @46%	0.1778
47	128.3945	278.3947	216.2094	336.3985	l26-30 @78%	0.2099
48	117.4009	306.3085	202.9475	275.3095	l26-31 @92%	0.2083
49	111.8304	330.2727	184.2474	227.3094	l26-28 @13%	0.1619
50	153.0294	283.2946	237.3084	309.2985	l26-29 @35%	0.1826
51	148.2038	249.4658	168.2864	261.3095	l26-30 @66%	0.1695
52	165.2048	321.0034	198.4752	336.3003	l26-31 @80%	0.1742
53	118.3947	281.0465	211.4453	281.1734	l26-32 @42%	0.1773
54	165.0264	324.3957	240.3958	229.3985	l26-29 @8%	0.1672
55	114.2974	291.0034	203.1984	316.3304	l26-30 @77%	0.1607
56	150.2732	257.8745	199.2204	259.2843	l26-31 @21%	0.1738
57	120.3779	293.4003	184.2084	232.0934	l26-32 @36%	0.1728
58	149.0537	303.2038	221.0275	339.2202	l26-33 @92%	0.1496
59	126.1832	336.0222	234.5622	244.3923	l28-29 @55%	0.1467
60	137.0255	251.2743	185.2094	318.2042	l28-30 @22%	0.1549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

ลำดับ ที่	Real Power bus 26 (MW)	Real Power bus 27 (MW)	Real Power bus 28 (MW)	Real Power bus 29 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
61	155.8766	263.2948	208.3874	297.9934	l28-31 @45%	0.1505
62	119.3664	307.2834	246.3394	261.0834	l28-32 @73%	0.1435
63	128.3664	289.3843	169.2744	238.4085	l28-33 @89%	0.1338



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข  
ค่าเวลาวิกฤติของของระบบ Western System Coordinating Council  
(WSCC) ที่ใช้ในการศึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ค่าเวลาวิกฤติของระบบ WSCC สำหรับการฝึกสอนระบบอนุमानนิวโรฟซี  
 โครงข่ายปรับตัวได้

Real Power bus 5 (MW)	Real Power bus 6 (MW)	Real Power bus 8 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
148.3908	101.3742	84.2983	l5-7 @75%	0.2290
135.0293	83.9261	98.2619	bus6	0.3229
135.5059	82.1273	116.2928	bus6	0.3519
130.0093	108.0000	92.0192	bus8	0.2422
111.4469	96.6922	100.2864	l6-9 @25%	0.3121
137.0342	88.6583	112.2842	bus7	0.1848
114.7776	90.0354	111.2642	l7-5 @75%	0.2855
119.9293	77.7026	80.9921	l4-6 @50%	0.2542
136.9942	96.8365	103.0293	l7-8 @50%	0.2222
128.0342	107.3433	95.9203	l6-9 @75%	0.2672
147.0303	98.4655	104.0293	l9-8 @25%	0.2447
108.2873	92.6645	115.0384	l6-9 @25%	0.3262
117.4058	78.2943	83.2183	l4-6 @50%	0.2552
119.9293	77.7026	80.9921	bus9	0.1830
119.9934	91.8493	85.5932	l9-3 @50%	0.197
120.3974	89.9932	113.2982	l6-9 @75%	0.2658
143.0930	85.1144	105.0020	l6-9 @50%	0.3142
143.0930	85.1144	105.0020	l4-6 @50%	0.2961
143.0930	85.1144	105.0020	bus3	0.2117
137.0342	88.6583	112.2842	l4-5 @75%	0.2936
103.5668	75.2732	96.0023	bus8	0.2102
121.6485	78.1621	103.9393	l2-7 @75%	0.1699
133.2002	102.9494	97.2832	l7-8 @25%	0.2010
113.0485	95.3834	118.0341	l2-7 @50%	0.1801
103.5668	75.2732	96.0023	l4-5 @75%	0.2515
104.2674	99.3870	95.2983	bus1	0.2433
143.0923	92.9945	106.0923	bus5	0.325

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Real Power bus 5 (MW)	Real Power bus 6 (MW)	Real Power bus 8 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
142.0934	88.8201	117.2094	l2-7 @75%	0.1899
119.2094	107.9374	91.0832	bus9	0.2024
133.0934	83.0934	102.0384	l4-6 @75%	0.3154
146.3095	91.3903	119.9843	bus1	0.323
126.3094	104.3934	109.2093	l2-7 @50%	0.1842
133.0934	83.0934	102.0384	bus3	0.2061
125.2093	78.4511	88.2983	bus5	0.2687
135.3033	76.0384	85.2983	l7-8 @25%	0.1834
132.2202	105.3943	114.9202	l7-8 @50%	0.2323
130.9934	99.4653	99.0012	l6-9 @75%	0.2663
129.0934	96.2168	100.0209	l8-9 @25%	0.2482
149.3984	100.3094	99.2023	l4-5 @75%	0.3249
103.4457	83.7723	105.0231	l9-8 @25%	0.2135
137.3987	88.2536	89.0203	l4-6 @50%	0.2906
132.9942	98.2828	87.2833	l7-8 @25%	0.1928
148.0909	93.3392	111.0027	bus80	0.2608
116.0034	106.9494	82.3942	bus8	0.2254
134.2982	80.1183	116.0232	l6-9 @50%	0.3155
142.3993	72.9909	93.0293	l7-5 @50%	0.2518
108.2873	92.6645	115.0384	l4-6 @50%	0.3027
107.5559	81.2023	120.0000	bus1	0.2631
159.0000	101.9293	103.0202	l8-9 @75%	0.2529
132.2923	80.1012	104.9921	l4-5 @50%	0.2847
146.0034	103.0582	82.0172	l9-8 @75%	0.2493
129.9923	99.5462	86.0023	l6-9 @25%	0.3138
108.2873	92.6645	115.0384	bus4	0.2514
126.2093	97.3874	94.2923	l8-9 @50%	0.2393
118.2094	100.0364	102.9462	bus6	0.3298
134.4583	97.3934	115.2023	l9-8 @25%	0.2454

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Real Power bus 5 (MW)	Real Power bus 6 (MW)	Real Power bus 8 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
124.0002	87.9238	84.2093	bus6	0.2947
113.7465	85.0923	102.0193	l7-8 @75%	0.2164
114.7776	90.0354	111.2642	l6-9 @50%	0.3008
135.3033	76.0384	85.2983	l6-9 @50%	0.2751
135.0293	83.9261	98.2619	l4-5 @75%	0.2678
122.4994	104.3994	101.0736	l9-8 @75%	0.2500
122.4994	104.3994	101.0736	l4-6 @25%	0.2663
100.5542	72.0093	80.0020	bus1	0.1997
107.5559	81.2023	120.0000	l9-3 @75%	0.2058
133.2002	102.9494	97.2832	l4-5 @25%	0.3064
141.1451	80.2934	94.9291	l6-9 @50%	0.2951
129.0934	96.2168	100.0209	l6-9 @50%	0.3054
132.2923	80.1012	104.9921	l4-5 @25%	0.2935
109.4446	106.3084	90.0023	l4-6 @50%	0.2818
119.9293	77.7026	80.9921	l4-5 @25%	0.2296
106.3974	77.1993	88.2712	bus7	0.1551
125.2093	78.4511	88.2983	l4-6 @50%	0.2686
121.0384	104.0294	96.0231	l7-8 @25%	0.1947
131.2992	81.2232	108.1783	l4-5 @75%	0.2748
118.2732	79.7220	100.2873	bus4	0.2318
136.0034	87.2881	91.2643	l4-5 @25%	0.2856
132.2202	105.3943	114.9202	l4-5 @25%	0.3354
133.0934	83.0934	102.0384	l7-5 @50%	0.2600
133.0934	83.0934	102.0384	l4-6 @75%	0.3023
116.0034	106.9494	82.3942	l4-6 @75%	0.2934
132.0092	85.2014	98.0231	bus4	0.2450
104.2674	99.3870	95.2983	l7-8 @25%	0.1844
146.3095	91.3903	119.9843	l6-9 @75%	0.2918
146.3095	91.3903	119.9843	l6-9 @50%	0.3453

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Real Power bus 5 (MW)	Real Power bus 6 (MW)	Real Power bus 8 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
118.2732	79.7220	100.2873	l6-9 @25%	0.3013
140.7654	93.9304	107.1823	l7-5 @25%	0.2378
136.6069	103.9576	104.0021	l4-5 @75%	0.3214
113.7465	85.0923	102.0193	bus5	0.2805
146.0034	103.0582	82.0172	bus8	0.2418
129.3984	75.1622	89.2983	l7-5 @25%	0.2077
150.0000	86.1922	82.0484	bus5	0.2917
103.4095	82.3904	81.2923	l4-6 @75%	0.2574
120.3974	89.9932	113.2982	l9-8 @75%	0.2494
101.3974	73.0023	99.2761	l7-8 @75%	0.2015
106.3974	77.1993	88.2712	l7-8 @25%	0.1723
130.9934	99.4653	99.0012	bus1	0.2765
136.9942	96.8365	103.0293	bus6	0.3489
141.1451	80.2934	94.9291	l7-8 @50%	0.2109
136.0034	87.2881	91.2643	bus1	0.2575
104.2674	99.3870	95.2983	l5-7 @25%	0.2654
132.2202	105.3943	114.9202	l9-8 @50%	0.2658
106.3974	77.1993	88.2712	l7-8 @25%	0.1723
125.2093	78.4511	88.2983	l7-8 @25%	0.1815
118.4095	79.3934	90.0823	l8-9 @75%	0.2085
108.2873	92.6645	115.0384	l7-5 @75%	0.2862
148.0294	81.3341	83.9923	l7-8 @25%	0.1910
136.9942	96.8365	103.0293	l9-3 @25%	0.212
103.4095	82.3904	81.2923	bus5	0.2451
135.3033	76.0384	85.2983	bus7	0.1649
136.6069	103.9576	104.0021	l8-9 @75%	0.2422
112.9372	84.1039	113.0021	l7-5 @75%	0.2810
118.2732	79.7220	100.2873	l4-5 @75%	0.2732
119.2094	107.9374	91.0832	l7-5 @50%	0.2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Real Power bus 5 (MW)	Real Power bus 6 (MW)	Real Power bus 8 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
139.9822	84.2911	107.2023	bus3	0.2115
121.9394	91.3877	114.0281	bus2	0.1691
114.2734	95.2974	84.9202	l7-8 @25%	0.1813
140.7654	93.9304	107.1823	l4-5 @50%	0.3109
102.8505	74.0052	83.0283	bus3	0.1824
109.4446	106.3084	90.0023	l7-5 @25%	0.2123
129.9923	99.5462	86.0023	l7-8 @50%	0.2081
143.0923	92.9945	106.0923	l2-7 @25%	0.1737
147.5982	89.3645	94.9283	l6-9 @25%	0.3349
120.3974	89.9932	113.2982	bus6	0.3376
102.8505	74.0052	83.0283	l4-6 @50%	0.2395
128.0342	107.3433	95.9203	bus9	0.2088
145.0003	105.0954	110.8832	l6-9 @75%	0.2923
110.3764	73.0284	81.9283	l9-8 @25%	0.1958
137.0342	88.6583	112.2842	l6-9 @25%	0.3499
117.4058	78.2943	83.2183	bus4	0.2122
105.0037	77.2864	87.0928	l8-9 @75%	0.1987
136.0825	94.8763	93.4957	l4-5 @50%	0.2871
148.0294	81.3341	83.9923	bus3	0.2017
143.0930	85.1144	105.0020	l4-5 @25%	0.3101
137.0342	88.6583	112.2842	l9-8 @25%	0.2395
130.0093	108.0000	92.0192	l4-5 @75%	0.2772
135.5059	82.1273	116.2928	l4-6 @75%	0.3409
100.5542	72.0093	80.0020	l7-8 @25%	0.1631
139.9822	84.2911	107.2023	l4-6 @50%	0.3166
135.3033	76.0384	85.2983	l4-6 @75%	0.2861
138.2093	90.7474	119.0308	bus3	0.2191
132.2923	80.1012	104.9921	l4-1 @75%	0.2562
136.0825	94.8763	93.4957	l5-7 @50%	0.2622

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Real Power bus 5 (MW)	Real Power bus 6 (MW)	Real Power bus 8 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
129.0934	96.2168	100.0209	l5-7 @25%	0.2908
130.0093	108.0000	92.0192	l7-5 @50%	0.2650
116.3094	91.3038	93.0283	bus2	0.1572
131.2992	81.2232	108.1783	l7-8 @25%	0.1975
112.9372	84.1039	113.0021	bus2	0.1633
112.9372	84.1039	113.0021	l7-5 @75%	0.2819
119.9934	91.8493	85.5932	l4-6 @50%	0.2724
113.9934	102.0495	86.0231	l8-9 @50%	0.2284
140.3323	93.6642	92.1722	l9-8 @75%	0.2476
141.0023	87.1084	108.2930	bus1	0.2892
139.3093	94.8386	109.0342	l8-9 @75%	0.242
119.9934	91.8493	85.5932	l8-9 @50%	0.2254
103.5668	75.2732	96.0023	l6-9 @25%	0.2780
137.3987	88.2536	89.0203	l4-6 @25%	0.2694
148.0294	81.3341	83.9923	l4-5 @75%	0.2596
115.3982	76.2843	83.0405	l7-8 @50%	0.1878
142.3993	72.9909	93.0293	l9-8 @25%	0.2197
126.2093	97.3874	94.2923	l6-9 @50%	0.2968
136.0034	87.2881	91.2643	l9-8 @50%	0.2367
110.3764	73.0284	81.9283	l4-5 @50%	0.2321
131.2992	81.2232	108.1783	l6-9 @75%	0.2621
116.3094	91.3038	93.0283	l2-7 @25%	0.1573
132.0934	90.2983	105.2983	bus4	0.2584
133.0023	74.2982	110.0261	bus3	0.2066
132.2202	105.3943	114.9202	bus4	0.2863
135.0293	83.9261	98.2619	l7-5 @50%	0.2584
105.0037	77.2864	87.0928	bus4	0.2066
122.4994	104.3994	101.0736	bus3	0.2107
114.7776	90.0354	111.2642	l4-6 @25%	0.2790

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Real Power bus 5 (MW)	Real Power bus 6 (MW)	Real Power bus 8 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
124.0002	87.9238	84.2093	l8-9 @50%	0.2244
146.3095	91.3903	119.9843	l9-3 @25%	0.2238
131.9347	97.2984	112.9361	bus9	0.2162
117.4058	78.2943	83.2183	l4-1 @75%	0.2216
125.2093	78.4511	88.2983	l5-7 @75%	0.2062
113.9934	102.0495	86.0231	bus7	0.1658
122.4994	104.3994	101.0736	l6-9 @75%	0.2661
113.0485	95.3834	118.0341	l7-8 @50%	0.2187
137.3987	88.2536	89.0203	bus8	0.2327
132.9942	98.2828	87.2833	bus7	0.1730
125.9364	86.2823	101.9374	l4-5 @25%	0.2661
149.3984	100.3094	99.2023	l8-9 @50%	0.2603
150.0000	86.1922	82.0484	l4-6 @50%	0.2918
113.7465	85.0923	102.0193	l9-8 @50%	0.2302
138.2093	90.7474	119.0308	l7-5 @75%	0.3198
147.0303	98.4655	104.0293	l4-6 @75%	0.3546
146.0034	103.0582	82.0172	l6-9 @75%	0.2635
114.2734	95.2974	84.9202	l8-9 @25%	0.2261
118.4095	79.3934	90.0823	bus3	0.1936
139.9822	84.2911	107.2023	l6-9 @25%	0.3397
106.3974	77.1993	88.2712	l9-3 @75%	0.1876
140.3323	93.6642	92.1722	l7-5 @50%	0.2634
139.3093	94.8386	109.0342	l6-9 @50%	0.3258
144.0935	76.3418	89.2909	l4-5 @25%	0.2809
101.3974	73.0023	99.2761	bus6	0.2788
111.4469	96.6922	100.2864	l4-6 @50%	0.2885
148.0909	93.3392	111.0027	l5-7 @75%	0.2453
113.0485	95.3834	118.0341	bus9	0.2102
105.0037	77.2864	87.0928	l6-9 @75%	0.2246

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Real Power bus 5 (MW)	Real Power bus 6 (MW)	Real Power bus 8 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
133.2002	102.9494	97.2832	bus2	0.1687
105.0037	77.2864	87.0928	l4-5 @25%	0.2244
130.9934	99.4653	99.0012	l6-9 @50%	0.3090
125.9364	86.2823	101.9374	l6-9 @75%	0.2563
112.9372	84.1039	113.0021	l4-6 @25%	0.2741
142.0934	88.8201	117.2094	l7-8 @50%	0.2312
145.0003	105.0954	110.8832	l6-9 @25%	0.3787
137.3987	88.2536	89.0203	l9-3 @25%	0.1998
126.3094	104.3934	109.2093	bus3	0.2155
159.0000	101.9293	103.0202	l7-8 @50%	0.2376
140.7654	93.9304	107.1823	l4-6 @75%	0.3462
110.3764	73.0284	81.9283	bus5	0.2445
142.3993	72.9909	93.0293	l4-6 @25%	0.2656
147.0303	98.4655	104.0293	l7-5 @25%	0.2418
139.3093	94.8386	109.0342	bus5	0.327
150.0000	86.1922	82.0484	l6-9 @25%	0.3148
101.3974	73.0023	99.2761	l7-5 @50%	0.2279
120.3974	89.9932	113.2982	l7-8 @50%	0.2168
141.0023	87.1084	108.2930	l9-8 @25%	0.2379
102.8505	74.0052	83.0283	l4-5 @25%	0.2358
128.0342	107.3433	95.9203	l7-5 @50%	0.2668
142.0934	88.8201	117.2094	l7-5 @75%	0.3197
110.3764	73.0284	81.9283	l7-5 @50%	0.2193
124.9734	98.9932	118.0231	bus3	0.2177
124.9734	98.9932	118.0231	l6-9 @50%	0.3284
107.5559	81.2023	120.0000	l7-8 @75%	0.2239
138.0934	94.3934	106.2931	bus2	0.1723
147.5982	89.3645	94.9283	l5-7 @75%	0.2301
146.0034	103.0582	82.0172	l4-6 @50%	0.3049

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Real Power bus 5 (MW)	Real Power bus 6 (MW)	Real Power bus 8 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
114.7776	90.0354	111.2642	bus1	0.2670
130.0093	108.0000	92.0192	l4-6 @25%	0.2850
149.3984	100.3094	99.2023	l7-8 @25%	0.2092
123.0484	74.2094	95.0231	bus8	0.2203
114.2734	95.2974	84.9202	bus9	0.1908
140.7654	93.9304	107.1823	bus8	0.2529
125.0234	73.0962	94.2932	bus8	0.2203
120.0223	100.0032	97.1092	bus2	0.1630
119.2094	107.9374	91.0832	l4-5 @75%	0.2657
119.9934	91.8493	85.5932	bus9	0.1921
145.2090	82.1183	85.2093	bus9	0.1981
147.5982	89.3645	94.9283	l4-5 @25%	0.2807
135.0293	83.9261	98.2619	l9-8 @25%	0.2255
128.3942	89.8522	93.2931	l2-7 @50%	0.1712
148.0909	93.3392	111.0027	l4-5 @50%	0.3249
138.2093	90.7474	119.0308	l7-5 @25%	0.2439
132.0934	90.2983	105.2983	l4-5 @75%	0.2802
139.3093	94.8386	109.0342	l4-5 @50%	0.3131
128.2093	84.2282	103.0293	l6-9 @50%	0.2971
125.0234	73.0962	94.2932	l7-8 @75%	0.2110
127.0055	100.3374	117.2093	l8-9 @75%	0.2445
111.4469	96.6922	100.2864	bus7	0.1703
126.2093	97.3874	94.2923	l4-1 @50%	0.2619
132.0092	85.2014	98.0231	l9-8 @75%	0.2414
124.0002	87.9238	84.2093	l7-8 @25%	0.1824
159.0000	101.9293	103.0202	bus6	0.3869
143.0923	92.9945	106.0923	l7-8 @25%	0.2071
135.5059	82.1273	116.2928	l8-9 @50%	0.2536
129.3984	75.1622	89.2983	l6-9 @75%	0.2399

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Real Power bus 5 (MW)	Real Power bus 6 (MW)	Real Power bus 8 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
127.0055	100.3374	117.2093	l5-7 @25%	0.3144
102.8505	74.0052	83.0283	l7-5 @50%	0.2158
115.3982	76.2843	83.0405	bus5	0.2524
128.3942	89.8522	93.2931	l4-5 @25%	0.2831
148.3908	101.3742	84.2983	bus2	0.1678
118.4095	79.3934	90.0823	l4-5 @75%	0.2395
116.3094	91.3038	93.0283	l4-5 @50%	0.2642
134.2982	80.1183	116.0232	l8-9 @25%	0.2547
128.0342	107.3433	95.9203	l7-8 @25%	0.1995
100.5542	72.0093	80.0020	l7-5 @25%	0.1841
126.3094	104.3934	109.2093	l6-9 @75%	0.2765
117.4058	78.2943	83.2183	l4-5 @75%	0.2305
128.2093	84.2282	103.0293	l4-5 @25%	0.2678
129.0934	96.2168	100.0209	bus4	0.2542
129.9923	99.5462	86.0023	l4-6 @25%	0.2688
148.3908	101.3742	84.2983	l4-6 @50%	0.3092
150.0000	86.1922	82.0484	l9-8 @25%	0.2234
111.4469	96.6922	100.2864	l7-8 @75%	0.2200
111.4469	96.6922	100.2864	l4-5 @50%	0.2731
143.0923	92.9945	106.0923	l8-9 @75%	0.2408
133.0023	74.2982	110.0261	l7-8 @50%	0.2138
129.3984	75.1622	89.2983	l4-5 @25%	0.2660
124.9734	98.9932	118.0231	l5-7 @75%	0.2391
140.3323	93.6642	92.1722	bus9	0.2055
144.0034	95.2834	102.0842	bus2	0.1728
121.9394	91.3877	114.0281	l7-5 @50%	0.2688
140.3323	93.6642	92.1722	l4-6 @50%	0.3039
142.0934	88.8201	117.2094	bus7	0.1899
112.9372	84.1039	113.0021	l4-5 @75%	0.2664

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Real Power bus 5 (MW)	Real Power bus 6 (MW)	Real Power bus 8 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
136.0825	94.8763	93.4957	bus3	0.2077
144.0935	76.3418	89.2909	l7-5 @25%	0.217
136.6069	103.9576	104.0021	l4-6 @50%	0.3301
135.5059	82.1273	116.2928	l4-6 @75%	0.3409
103.4457	83.7723	105.0231	bus2	0.1560
136.0034	87.2881	91.2643	l7-5 @75%	0.2794
118.2094	100.0364	102.9462	l7-5 @50%	0.2608
121.9394	91.3877	114.0281	l8-9 @25%	0.2520
128.3942	89.8522	93.2931	l7-5 @25%	0.2174
122.4994	104.3994	101.0736	l7-8 @25%	0.1987
118.2094	100.0364	102.9462	l4-5 @50%	0.287
116.0034	106.9494	82.3942	l4-1 @50%	0.2446

ตารางที่ ข.2 ค่าเวลาวิกฤติของระบบ WSCC สำหรับการทดสอบระบบอนุमानนิโรฟซีทีโครงข่าย  
ปรับตัวได้

ลำดับที่	Real Power bus 5 (MW)	Real Power bus 6 (MW)	Real Power bus 8 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
1	104.2674	99.3870	95.2983	l4-5 @89%	0.2721
2	115.3982	76.2843	83.0405	l5-7 @33%	0.2360
3	125.9364	86.2823	101.9374	l7-8 @29%	0.1955
4	147.5982	89.3645	94.9283	l8-9 @32%	0.2522
5	137.3987	88.2536	89.0203	l6-9 @69%	0.2649
6	146.3095	91.3903	119.9843	l4-6 @42%	0.3476
7	145.0003	105.0954	110.8832	l4-5 @60%	0.3372
8	107.5559	81.2023	120.0000	l5-7 @5%	0.2915
9	118.4095	79.3934	90.0823	l7-8 @8%	0.1683
10	135.5059	82.1273	116.2928	l8-9 @11%	0.2546
11	150.0000	86.1922	82.0484	l6-9 @35%	0.3070

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

ลำดับที่	Real Power bus 5 (MW)	Real Power bus 6 (MW)	Real Power bus 8 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
12	130.0093	108.0000	92.0192	l4-6 @61%	0.3154
13	139.9822	84.2911	107.2023	l4-5 @33%	0.2906
14	114.7776	90.0354	111.2642	l5-7 @74%	0.2229
15	109.4446	106.3084	90.0023	l7-8 @88%	0.2211
16	125.0000	90.0000	100.0000	l8-9 @56%	0.2426
17	145.0003	105.0954	110.8832	l6-9 @11%	0.3831
18	132.2923	80.1012	104.9921	l4-6 @93%	0.3211
19	129.3984	75.1622	89.2983	l4-5 @96%	0.2701
20	103.4457	83.7723	105.0231	l5-7 @90%	0.1837
21	141.0023	87.1084	108.2930	l7-8 @81%	0.2146
22	139.9822	84.2911	107.2023	l8-9 @91%	0.2196
23	109.4446	106.3084	90.0023	l6-9 @76%	0.2462
24	137.0342	88.6583	112.2842	l4-6 @5%	0.2774
25	144.0034	95.2834	102.0842	l4-5 @47%	0.3063
26	136.0034	87.2881	91.2643	l5-7 @66%	0.2320
27	111.4469	96.6922	100.2864	l7-8 @60%	0.2121
28	135.0293	83.9261	98.2619	l8-9 @36%	0.2421
29	122.4994	104.3994	101.0736	l6-9 @89%	0.2368
30	145.2090	82.1183	85.2093	l4-6 @42%	0.2820
31	129.9923	99.5462	86.0023	l4-5 @16%	0.2546
32	147.0303	98.4655	104.0293	l5-7 @54%	0.2760
33	102.8505	74.0052	83.0283	l8-9 @10%	0.2301
34	113.7465	85.0923	102.0193	l8-9 @28%	0.233
35	148.0294	81.3341	83.9923	l8-9 @83%	0.2146
36	131.9347	97.2984	112.9361	l7-8 @13%	0.1977
37	123.0484	74.2094	95.0231	l7-8 @42%	0.1936
38	130.9934	99.4653	99.0012	l7-8 @71%	0.2301
39	132.9942	98.2828	87.2833	l6-9 @3%	0.3206
40	134.2982	80.1183	116.0232	l6-9 @55%	0.3078

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

ลำดับที่	Real Power bus 5 (MW)	Real Power bus 6 (MW)	Real Power bus 8 (MW)	Fault location	Critical Clearing Time (s)
41	148.3908	101.3742	84.2983	l6-9 @95%	0.2208
42	129.0934	96.2168	100.0209	l5-7 @21%	0.2939
43	103.5668	75.2732	96.0023	l5-7 @45%	0.2327
44	114.2734	95.2974	84.9202	l5-7 @65%	0.22
45	128.2093	84.2282	103.0293	l4-6 @14%	0.2637
46	149.3984	100.3094	99.2023	l4-6 @20%	0.3028
47	115.3982	76.2843	83.0405	l1-4 @20%	0.2181
48	136.0825	94.8763	93.4957	l1-4 @44%	0.2688
49	113.9934	102.0495	86.0231	l1-4 @84%	0.23
50	125.9364	86.2823	101.9374	l4-5 @43%	0.2768
51	136.6069	103.9576	104.0021	l4-5 @35%	0.3038
52	124.9734	98.9932	118.0231	l4-5 @64%	0.321
53	147.5982	89.3645	94.9283	l8-9 @30%	0.2522
54	119.9293	77.7026	80.9921	l8-9 @69%	0.2058
55	125.2093	78.4511	88.2983	l8-9 @83%	0.2046
56	105.0037	77.2864	87.0928	l7-8 @77%	0.1981
57	116.3094	91.3038	93.0283	l7-8 @57%	0.2056
58	118.2094	100.0364	102.9462	l7-8 @82%	0.2311
59	126.2093	97.3874	94.2923	l6-9 @84%	0.2393
60	121.6485	78.1621	103.9393	l6-9 @95%	0.209

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค  
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# วิศวกรรมลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## บทความวิจัย

1. การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นเพื่อค่าสภาพเจาะจงทิศทางมากที่สุด โดย  
ระเบียบวิธีขั้นตอนแบบแมลงหวี่  
ณัฐเศรษฐ์ หมวดทองอ่อน ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ศุภกิต แก้วดวงตา 1
2. วงจรจำลองอุปกรณ์ Memristor โดยใช้วงจร OTA  
ณัฐกร บุญตัน มนตรี คำเงิน 7
3. การประเมินค่าเสถียรภาพชั่วคราว โดยใช้ระบบอนุमानนิเวโรพีซซีโครงข่ายปรับตัวได้  
สิริวุฒิ คลอวุฒิสถียร สมชาติ จิรวิภากร 13
4. การพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันบนพื้นฐานของไดอะแฟรมด้วยสารไวแสงชนิด SU-8  
กมลรัตน์ บุญประคอง พิทยา ตีกล้า นิमित ชมนาวัง 19
5. การวิเคราะห์ค่าบูลวิเปอฟเฟคสำหรับระบบคลังสินค้าแบบกระจายในโซ่อุปทาน  
สุพรรณษา พองเอน กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข 25
6. การวิเคราะห์ผลประโยชน์ต่อต้นทุนในการสร้างท่อขนส่งน้ำมันของประเทศไทย  
ณัฐชัย กอเน่าพาณิชย์ 31
7. การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตยาเทียมโดยใช้ระบบต้นทุนฐานกิจกรรม  
ชาญศักดิ์ ตั้งสันติกุลานนท์ 37
8. การจัดกลุ่มปัจจัยเสี่ยงสุขภาพหลายแขนงธุรกิจพยาบาลโดยวิธี Q-Sort  
ภูมิพร ธรรมสถิตย์เดช ตรีทศ เหล่าศิริพงษ์ทอง 43
9. CFD Simulation of Disc Radius and Blade Height Effects on Mixing Performance in  
The Unbaffled Tank Covered by A Lid  
Awanee Wongnui Charkom Akavipat Eakarach Bumrunghthaichaichan 49
10. การปรับสภาพผิวโลหะอะลูมิเนียมผสมรีไซเคิลเพื่อเพิ่มการยึดติดสี  
วสุนันท์ ครองทรัพย์ อภิชาติ อางนาเสียว 55
11. การดูดซับไอออนเงินโดยโคโตซานเรซิน : ผลของอุณหภูมิ  
อุษณีย์ รักษาไชยวรรณ ยุพดี กุลรัตน์กิตติวงศ์ โกวิทย์ ปิยะมังคลา 61
12. การทรุดตัวของชั้นดินเหนียวอ่อนด้วยวิธี Inflection Point กรณีมีและไม่มีระบบระบายน้ำตามแนวตึง  
กนกอร กันณรงค์ วีรยา ฉิมอ้อย 67
13. การพัฒนาโลหะแม่ AL-4%B-2%Sr สำหรับการปรับสภาพเกรนละเอียดและปรับสภาพเฟสยูเทคติก  
ซิลิคอนในโลหะผสมหล่ออลูมิเนียม-ซิลิคอน-แมกนีเซียม  
พิสิทธิ์ เมืองน้อย จินกมล ลุยจันทร์ เถลิ้มพล คล้ายนิล 73
14. การผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์อย่างต่อเนื่อง  
วรรณนา ภาณุวัฒน์สุข 79
15. Hydrodynamic Computational Analysis for Propeller  
Yodchai Tiaple Pongsan Twinprawate 85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งผู้จัดทำเอกสารนี้จะไม่รับผิดชอบต่อข้อผิดพลาด และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การประเมินค่าเสถียรภาพชั่วคราว โดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซี

## โครงข่ายปรับตัวได้

### Transient Stability Assessment Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

ศิริวุฒิ กลอวุฒิสถียร สมชาติ จิรวินิจการ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการการประเมินค่าเสถียรภาพชั่วคราว โดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ ซึ่งเป็นระบบอัจฉริยะแบบผสมที่นำข้อดีระหว่างโครงข่ายประสาทเทียมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือเข้าด้วยกัน มาทำนายค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติ ระบบไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบเป็นระบบมาตรฐานสองระบบ คือระบบ New England 39 บัส และระบบ Western System Coordinating Council 9 บัส ผลที่ได้จากระบบดังกล่าวถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติ ที่ได้มาจากการคำนวณแบบทีละขั้นตอนจากโปรแกรม Power world Version 17 ซึ่งผลที่ได้นั้นสามารถสร้างระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้สำหรับระบบไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบและทำนายค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติ ได้ใกล้เคียงกับวิธีการคำนวณแบบทีละขั้นตอน

คำสำคัญ : เสถียรภาพชั่วคราว, ระบบอนุมานนิวโรฟัซซี, โครงข่ายปรับตัวได้, ช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติ, วิธีทีละขั้นตอน

#### Abstract

This paper presents transient stability assessment using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). It is a hybrid intelligent system. ANFIS is completed with core competency of neural network and fuzzy logic in order to predict the critical clearing time by using two test systems named New England 39 bus test system and Western System Coordinating Council 9 bus. From the results, it shows the structure of ANFIS for these electrical power systems. Prediction results compared with the critical clearing times obtained from simulations using step-by-step method of Power world program version 17 are accurate.

**Keywords :** transient stability, adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS), critical clearing time, step-by-step method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. บทนำ

ในปัจจุบัน เพื่อรองรับกับปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความสลับซับซ้อนที่เพิ่มขึ้น และเพื่อให้มีการจ่ายไฟอย่างต่อเนื่อง ระบบไฟฟ้ากำลังจำเป็นต้องมีเสถียรภาพที่ดี

เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในระบบอย่างทันทีทันใด เช่น การเปิดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การปลดสายส่ง หรือเกิดการลัดวงจร ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า รวมทั้งความเร็วและแรงบิดของเครื่องจักรภายในระบบ ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของการเปลี่ยนแปลง ถูกเรียกว่า เสถียรภาพชั่วคราว (Transient Stability) โดยปัญหาของการเปลี่ยนแปลงภายในระบบที่เกิดขึ้นมากที่สุด คือ เกิดการลัดวงจร ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าอย่างรุนแรง เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบ จึงต้องกำจัดกระแสลัดวงจรภายในช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติ (Critical Clearing Time, CCT) มิเช่นนั้นแล้วจะเกิดการสูญเสียเสถียรภาพของระบบ จึงจำเป็นต้องนำช่วงเวลาดังกล่าวมาพิจารณาในการปลดวงจรของอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า เพื่อป้องกันการล่มระบบไฟฟ้า [1]

การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในปัจจุบันนั้น จำเป็นต้องอาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ เพราะระบบไฟฟ้ากำลังเป็นระบบขนาดใหญ่ที่มีการเชื่อมโยงกันมาก ตั้งแต่ ส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจนถึงผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งการประเมินเสถียรภาพนั้น ส่วนใหญ่ใช้วิธีการคำนวณทีละขั้นตอน โดยอาศัยสมการสวิง ซึ่งมีความยุ่งยากและสิ้นเปลืองเวลา จึงได้มีการวิจัยเพื่อหาวิธีในการประเมินเสถียรภาพที่มีความยุ่งยากน้อยกว่าและรวดเร็วกว่า ตัวอย่างเช่น A. W. Noor Izzi ได้เสนอวิธีการที่เรียกว่า least squares support vectormachine (LS-SVM)[2], H. H. Al Marhoon ใช้ A Practical Method ในการประเมินค่าเวลาวิกฤติ[3], A. Karami ได้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมมาประเมินเสถียรภาพชั่วคราว[4]

ในบทความนี้ได้นำระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) มาประเมินหาช่วงเวลาดังกล่าวโดยเปรียบเทียบกับผลที่ได้กับวิธีทีละขั้นตอน (step by step) ซึ่งได้มาจากการ

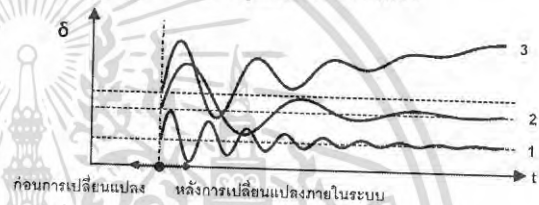
จำลอง Transient Stability (TS) ในโปรแกรม Power world Version17 [5]

## 2. เสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้า

การพิจารณาเสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลัง สามารถพิจารณาได้จากมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในระบบไฟฟ้า มุมโรเตอร์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ตามสมการที่ 1

$$\frac{H}{2\pi} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (1)$$

เมื่อ  $\delta$  คือมุมโรเตอร์,  $H$  คือค่าคงที่ความเฉื่อย (Inertia Constant) ของเครื่องจักร  $P_m$  คือกำลังกลของเครื่องจักรและ  $P_e$  คือกำลังทางไฟฟ้า โดยเรียกสมการที่ (1) ว่าสมการสวิง และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับเวลา ถูกเรียกว่า กราฟสวิง



รูปที่ 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมโรเตอร์ต่อเวลา

จากรูปที่ 1 เป็นกราฟสวิงของระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เครื่อง เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นภายในระบบ มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมายเลข 1 และ 2 มีการแกว่งเล็กน้อยก่อนกลับเข้าสู่ค่าคงที่ใดๆ ในขณะที่ มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมายเลข 3 เพิ่มขึ้นตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปและไม่กลับเข้าสู่ค่าคงที่ใดๆ แสดงว่า เครื่องจักร 3 สูญเสียเชิงโคโรนิสซิม จึงกล่าวได้ว่า ระบบไม่มีเสถียรภาพหลังจากการลัดวงจรขึ้นภายในระบบ โดยเรียกการหาเสถียรภาพด้วยวิธีนี้ว่า การคำนวณทีละขั้นตอน (step by step)

การคำนวณทีละขั้นตอน จะทำการแบ่งช่วงเวลาคำนวณออกเป็นช่วงๆ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ จึงต้องอาศัยสมมติฐานดังต่อไปนี้ 1. กำลังไฟฟ้าแรง มีค่าคงที่จากกึ่งกลางของช่วงเวลานึงไปยังกึ่งกลางของอีกช่วงเวลานึง 2. ความเร็วเชิงมุมมีค่าคงที่ตลอดในแต่ละช่วงเวลา

จากสมการสวิงและสมมติฐานดังกล่าว สามารถหาการเปลี่ยนแปลงของมุมโรเตอร์ได้จากสมการที่ (2)

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + \frac{P_{a(n-1)}}{M} (\Delta t)^2 \quad (2)$$

ช่วงเวลาตัดกระแสวิตติเป็นเวลาดูดท้ายในการกำจัดกระแสลัดวงจรก่อนที่จะทำให้ระบบสูญเสียเสถียรสามารถหาได้จากกราฟสวิง ซึ่งความถูกต้องและแม่นยำของวิธีการนี้จะขึ้นอยู่กับ การแบ่งช่วงเวลาคำนวณ เพราะถ้าแบ่งช่วงเวลากว้างเกินไป ส่งผลให้กราฟที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไปจากกราฟจริงที่ได้จากสมการสวิง โดยทั่วไปแล้วการแบ่งช่วงเวลาคำนวณมักแบ่งที่เวลา 0.1 หรือ 0.01 วินาที [6]

**3. ระบบอนุมานนิเวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้**

ระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้(Adaptive Neuro-Fuzzy Inference system, ANFIS) เป็นการประยุกต์ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) ซึ่งมีข้อดีในเรื่องของการเรียนรู้แต่ไม่สามารถอธิบายถึงการได้มาของการตัดสินใจได้ ร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือหรือฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic) ซึ่งมีคุณสมบัติในการให้เหตุผลเชิงมนุษย์ แต่ไม่สามารถเรียนรู้ได้โดยอัตโนมัติ จึงเหมาะสมที่นำระบบทั้งสอง ทำเป็นระบบประสานแบบอัจฉริยะ (hybrid intelligent system, HIS) ที่สามารถเรียนรู้ได้ด้วยตัวเองและอธิบายถึงที่มาของเอาต์พุตได้ โดยระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนของอนุมานฟัซซี (Fuzzy Inference) ของฟัซซีลอจิก และวิธีการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (Back Propagation) ของโครงข่ายประสาทเทียม [7]

จากรูปที่ 2 เป็นระบบที่มีโครงสร้าง 2 อินพุต 1 เอาต์พุต แต่ละอินพุตแบ่งเป็นสองฟัซซีเซต มิติที่ 1 แบ่งฟัซซีเซตเป็น  $A_1$  และ  $A_2$  มิติที่ 2 แบ่งเป็น  $B_1$  และ  $B_2$  เอาต์พุตมีพารามิเตอร์เป็น  $p, q$  และ  $r$  โดยมีกฎจำนวน  $L$  กฎ ดังนี้

Rule1: IF  $x_1$  is  $A_1$  and  $x_2$  is  $B_1$  THEN  $y_1 = p_1x_1 + q_1x_2 + r_1$

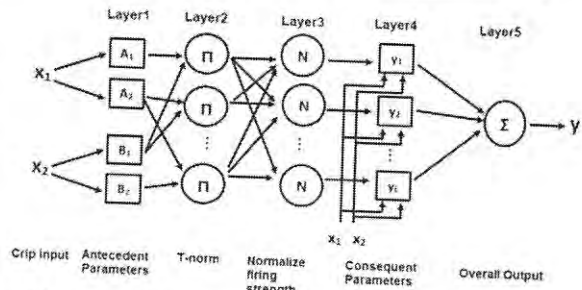
Rule2: IF  $x_1$  is  $A_2$  and  $x_2$  is  $B_1$  THEN  $y_2 = p_2x_1 + q_2x_2 + r_2$

⋮

RuleL: IF  $x_1$  is  $A_2$  and  $x_2$  is  $B_2$  THEN  $y_L = p_Lx_1 + q_Lx_2 + r_L$

โดยโครงสร้างประกอบไปด้วย 5 ชั้นดังนี้

ชั้นที่ 1: Antecedent Parameters เป็นการหาค่าฟัซซีจากอินพุตในรูปแบบกติ (Crip input,  $x$ ) ให้เป็นค่าความเป็นสมาชิก



รูปที่ 2 โครงสร้างระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ผ่านฟังก์ชันความเป็นสมาชิก  $\mu_{A_i}$  หรือ  $\mu_{B_i}$  โดยที่

$$O_j^1 = \mu_{A_i}(x) \quad (3)$$

เมื่อ  $A_i$  คือพจน์ทางภาษา และ  $O_j^1$  เป็นค่าความเป็นสมาชิกของพจน์ภาษา  $A_i$  ที่เกิดจากค่า  $x$  โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิก อาจฟังก์ชันแบบสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมคางหมู รูปประฆังคว่ำหรือแบบอื่นก็ได้

ชั้นที่ 2: T-norm หรือชั้นกฎของฟัซซี (fuzzy rule base) เป็นชั้นทำการเชื่อมโยงค่าฟัซซีจากแต่ละมิติโดยคูณสัญญาณเข้าที่เป็นฟัซซี เข้าด้วยกัน และส่งค่าฟัซซีผลคูณเป็นสัญญาณออก

$$w_j = \mu_{j1}(x_1) \times \mu_{j2}(x_2) \quad (4)$$

เมื่อ  $w_j$  เป็นค่า firing strength จากกฎแต่ละข้อ และ  $\mu_{j1}(x_1)$  เป็นค่าฟัซซีจากมิติที่ 1 ของกฎข้อที่  $j$

ชั้นที่ 3: Normalize firing strength หรือชั้นค่าถ่วงน้ำหนัก เป็นชั้นทำค่าฟัซซีผลรวมทุกกฎให้เป็นหนึ่ง

$$\bar{w}_j = \frac{w_j}{w_1 + w_2 + \dots + w_L}, j = 1, 2, \dots, L \quad (5)$$

ชั้นที่ 4: Consequent Parameters เป็นชั้นของ output membership ซึ่งค่าเอาต์พุตหาได้จาก

$$O_j^4 = \bar{w}_j y_j = \bar{w}_j (p_j x_1 + q_j x_2 + r_j) \quad (6)$$

ชั้นที่ 5: Overall Output เป็นขั้นตอนการทำดีฟัซซีซิฟิเคชัน (Defuzzification) เพื่อหาเอาต์พุตของโครงข่าย โดยทำการรวมสัญญาณเข้า เอาต์พุตหาได้จาก

$$O_j^5 = \bar{w}^T y = \sum_{j=1}^L \bar{w}_j y_j \quad (7)$$

เมื่อ  $\bar{w}^T = [\bar{w}_1 \ \bar{w}_2 \ \dots \ \bar{w}_L]$  เป็นค่าฟัซซีที่ผ่านวิธีอนุมอลไลซ์จากกฎข้อ 1 ถึง  $L$  และ  $y^T = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_L]$  เป็นส่วนเอาต์พุตของกฎข้อ 1 ถึง  $L$  [8]-[9]

ซึ่งการประยุกต์ใช้งานระบบอนุมาน ฟัซซีโครงข่ายปรับตัวในด้านงานวิศวกรรม ได้แก่ การนำไปใช้

ร่วมกับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ การพยากรณ์โหลด การคำนวณกระแสลัดวงจร เป็นต้น

4. ระบบที่ใช้ในการจำลอง

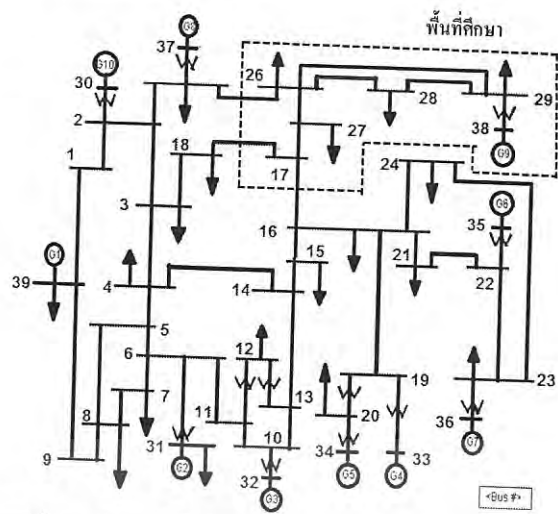
ระบบที่ใช้ในการจำลองในบทความนี้ ได้เลือกใช้ระบบมาตรฐาน 2 ระบบด้วยกัน ได้แก่

1. ระบบ New England ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าขนาดกลาง โดยประกอบไปด้วย บัสทั้งสิ้น 39 บัส มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด 10 เครื่อง มีแผนภูมิเส้นเคี้ยวคังรูปที่ 3 โดยมีพารามิเตอร์ของ สายส่ง หม้อแปลง รวมทั้งค่าเริ่มต้นของระบบเป็นไปตาม เอกสารอ้างอิง [10] โดยใช้โมเดลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบพื้นฐาน (Classical Model) ไม่มีการพิจารณาผลของตัวควบคุมใดๆ เนื่องจากระบบ New England เป็นระบบที่มีการเชื่อมโยงกันมาก และเมื่อคำนวณช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติของบัสต่างๆ พบว่าบริเวณบัส 26,28 และ 29 มีช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติต่ำที่สุดในบทความนี้จึงได้กำหนดขอบเขตการจำลองตามกรอบในรูปที่ 3 โดยมีการเปลี่ยนขนาดกำลังไฟฟ้าในบัสที่ 26,27,28 และ 29 ในช่วง 80 % ถึง 120 % ของกำลังไฟฟ้าเริ่มต้น และให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าคงที่

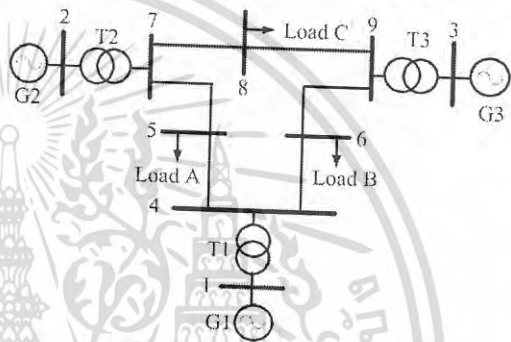
2. ระบบ Western System Coordinating Council (WSCC) ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าที่มีขนาดเล็ก ประกอบด้วยบัส 9 บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เครื่อง มีแผนภูมิเส้นเคี้ยวคังรูปที่ 4 โดยมีพารามิเตอร์ของสายส่ง หม้อแปลง รวมทั้งค่าเริ่มต้นของระบบเป็นไปตาม เอกสารอ้างอิง [11] โดยใช้โมเดลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบมีรายละเอียด (Detailed Model) ใช้ตัวควบคุมตามมาตรฐาน IEEE Type 1 ในการจำลองมีการเปลี่ยนขนาดกำลังไฟฟ้าของโหลดในบัสที่ 5, 6 และ 8 ในช่วง 80 % ถึง 120 % ของกำลังไฟฟ้าเริ่มต้น และให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าคงที่

5. ผลการจำลอง

การจำลองในทั้งสองระบบ ใช้โครงสร้างของระบบอนุमानนิวโรฟฟิซซึโครงข่ายปรับตัวได้แบบ Sugeno อันดับที่ 1 (first order - Sugeno) มีอินพุตคือ กำลังไฟฟ้าจริงในแต่ละบัส ในขอบเขตการจำลองและตำแหน่งการเกิดการลัดวงจร และมีเอาท์พุตคือ ช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติ โดยจำนวนข้อมูลที่ใช้ต้องเพียงพอต่อการฝึกสอน



รูปที่ 3 แผนภูมิเส้นเคี้ยวคังของระบบทดสอบ New England



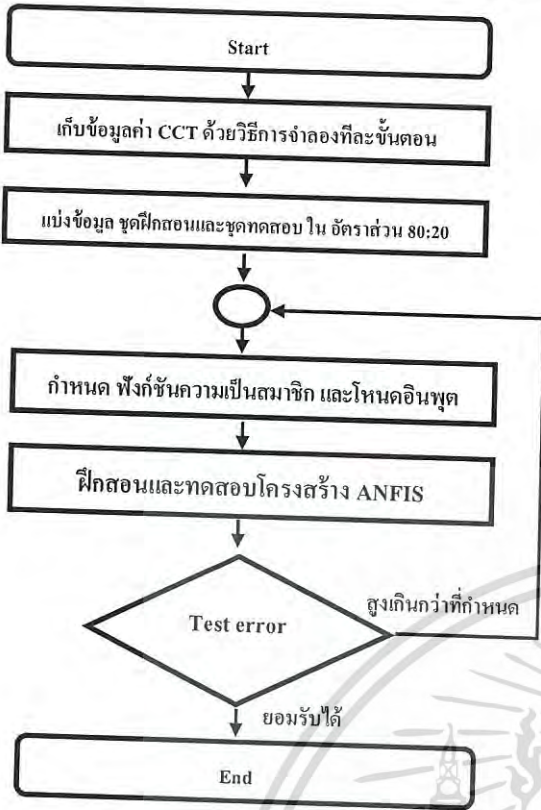
รูปที่ 4 แผนภูมิเส้นเคี้ยวคังของระบบทดสอบ WSCC 9 bus

ระบบอนุमानนิวโรฟฟิซซึโครงข่ายปรับตัวได้ และครอบคลุมพื้นที่การจำลอง ใช้กระบวนการเรียนรู้แบบผสม มีรอบการฝึกสอน 300 รอบ (epochs) โดยข้อมูลได้มาจากการจำลองในโปรแกรม Power world ในแต่ละระบบจะทำการแบ่งข้อมูลเป็น ชุดฝึกสอนและชุดทดสอบ ในอัตราส่วน 80:20 โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ใช้ในการจำลองเป็นการเลือกมาจากระบวนการลองผิดลองถูก (Trial and error) และมีกระบวนการจำลองตามรูปที่ 5

การพิจารณาถึงความสามารถในการหาค่าตอบสามารถพิจารณาได้จากค่าความผิดพลาด โดยในที่นี้จะใช้ค่าความผิดพลาดแบบ RMSE (Root Mean Square Error) ดังสมการที่ 8

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - F_i)^2}{n}} \times 100\% \quad (8)$$

เมื่อ  $O_i$  คือ ค่าที่ได้จากการจำลองด้วย Transient Stability (TS) ในโปรแกรม Power world Version17,  $F_i$  คือค่าที่



ตารางที่ 1 ค่าความผิดพลาด RMSE ในโครงสร้างต่างๆ ของระบบ New England

จำนวนโหนด อินพุต	Training error (%RMSE)	Test error (%RMSE)
2 2 2 2 2	1.39	1.65
2 2 2 2 3	1.23	1.60
2 2 2 2 4	0.90	1.28
3 3 3 3 4	0.38	79.0

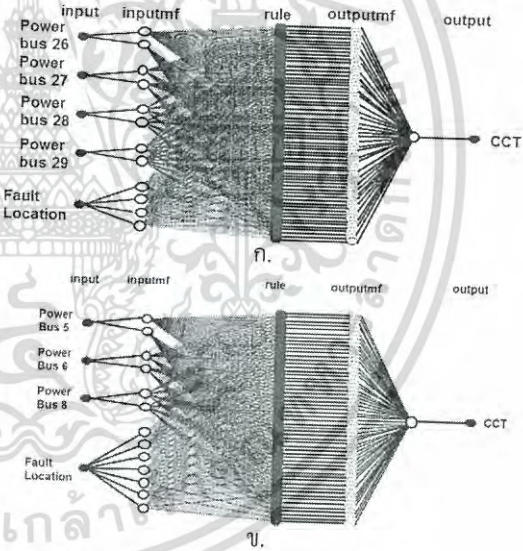
ตารางที่ 2 ค่าความผิดพลาด RMSE ในโครงสร้างต่างๆ ของระบบ WSCC

จำนวนโหนด อินพุต	Training error (%RMSE)	Test error (%RMSE)
2 2 2 2	3.94	4.00
3 3 3 3	3.33	5.31
2 2 2 7	1.95	1.83
2 2 5 7	1.51	18.00

รูปที่ 5 แผนภาพสื่อกระบวนการจำลอง ได้จากการทำนายโดยใช้ระบบอนุमानพีชซี โครงข่ายปรับตัวได้ และ n คือจำนวนข้อมูลฝึกสอนหรือทดสอบ

ในระบบ New England มีข้อมูล 400 ชุด มี 5 อินพุต คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 26,27,28 และ 29 และตำแหน่งการลัดวงจร โดยมีตำแหน่งการลัดวงจรทั้งสิ้น 21 ตำแหน่งประกอบด้วย การลัดวงจรที่บัส 17,26,27,28,29 และ 38 และการลัดวงจรที่ความยาว 25, 50 และ 75 เปอร์เซนต์ของสายระหว่างบัส 17-27, 26-27, 26-28, 26-29 และ 28-29 เลือกใช้ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบ pimf ( $\Pi$ -shaped membership function) [12] ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 1

ในระบบ WSCC มีข้อมูล 300 ชุดมี 4 อินพุต คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 5,6 และ 8 และตำแหน่งการลัดวงจร โดยมีตำแหน่งการลัดวงจรทั้งสิ้น 27 ตำแหน่งประกอบด้วย การลัดวงจรที่บัสทั้ง 9 บัส และการลัดวงจรที่ความยาว 25, 50 และ 75 เปอร์เซนต์ของสายส่งระหว่างบัส 1-5, 1-6, 5-7, 6-9, 7-8 และ 8-9 เลือกใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบ trimf



รูปที่ 5 โครงสร้างระบบอนุमानนิวโรพีชซีโครงข่ายปรับตัวได้ที่ดีที่สุดในการทดสอบของระบบ

ก. New England ข. WSCC

(Triangular-shaped membership function) [12] ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 2

จากตารางที่ 1 ในระบบ New England โครงสร้างของระบบอนุमानนิวโรพีชซีโครงข่ายปรับตัว

ได้ที่มีจำนวนโหนดในชั้นที่ 1 เป็นแบบ 2 2 2 2 4 เป็นโครงสร้างที่ให้ค่าความผิดพลาดของข้อมูลในชุดฝึกสอนต่ำ โดยมีค่าความผิดพลาดของชุดทดสอบต่ำที่สุดและสามารถยอมรับได้ จึงกล่าวได้ว่า โครงสร้างดังกล่าวเหมาะสมสำหรับใช้ในการหาค่าช่วงเวลาตัด กระแสวิกฤติในระบบ New England โดยจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 5ก

จากตารางที่ 2 ในระบบ Western System Coordinating Council (WSCC) โครงสร้างของระบบอนุমানนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ ที่มีจำนวนโหนดในชั้นที่ 1 เป็นแบบ 2 2 2 7 เป็นโครงสร้างที่ให้ค่าความผิดพลาดของข้อมูลในชุดทดสอบต่ำที่สุดและสามารถยอมรับได้ จึงกล่าวได้ว่า โครงสร้างดังกล่าวเหมาะสมสำหรับใช้ในการหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติในระบบ WSCC โดยจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 5ข

บทความนี้ ได้กำหนดขอบเขตการจำลองในระบบ New England เพียง 6 บัส โดยสายส่งเชื่อมต่อ 5 เส้น ในขณะที่ระบบ WSCC ได้กำหนดขอบเขตทำการจำลองทั้งระบบ คือ 9 บัส และสายส่ง 6 เส้น จึงทำให้ขอบเขตของการศึกษาในระบบ New England มีขนาดเล็กกว่าระบบ WSCC ซึ่งทำให้การออกแบบตัวแปรอินพุตของตำแหน่งการลัดวงจรมีความซับซ้อนยุ่งยาก รวมทั้งโมเดลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบมีรายละเอียด ส่งผลให้ระบบอนุমানนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ทำนายค่า CCT ได้คลาดเคลื่อนมากกว่าในระบบ New England

## 6. บทสรุป

การประเมินค่าเสถียรภาพชั่วคราวของระบบไฟฟ้า โดยใช้ระบบอนุমানฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ในบทความนี้ เป็นการนำระบบดังกล่าวมาทำนายค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติของระบบไฟฟ้า โดยความถูกต้องของผลการทำนายขึ้นอยู่กับ การออกแบบ โครงสร้างของระบบอนุমানฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ซึ่งผลการทำนายที่ได้ในบทความนี้ สามารถทำนายช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤติได้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากวิธีทีละขั้นตอน โดยใช้เวลาในการประเมินค่าเสถียรภาพชั่วคราวเร็วกว่าวิธีทีละขั้นตอน แต่ประสบปัญหาผลที่ได้นั้นมีค่าต่ำกว่าค่าจริงและสูงกว่าค่าจริงปนกันไป ซึ่งทำให้เกิดปัญหาในการนำค่าที่ได้ไปใช้

ต่อไปได้ ดังนั้นการทำนายที่ได้นี้เหมาะสำหรับการใช้วิเคราะห์ในเบื้องต้นก่อนทำการประเมินเสถียรภาพอย่างละเอียดต่อไป

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Saadat, Power System Analysis, The McGraw-Hill, New York, 2010.
- [2] A. W. N. Izzri "A New Method of Transient Stability Assessment in Power Systems Using LS-SVM" 5th Student Conference on Research and Development, pp.1-6, Dec., 2007,
- [3] H. H. A. Marhoon "A Practical Method for Power Systems Transient Stability and Security Analysis" Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), pp.1-6., May, 2012
- [4] A. Karami and S.Z. Esmaili "Transient stability assessment of power systems described with detailed models using neural networks" International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol.45, pp. 279-292, Feb., 2013
- [5] online <http://www.powerworld.com>
- [6] C. Hokeyrit, Electrical Power System Analysis, Charan Sanit Wong Pu publishing, Bangkok, 2007.
- [7] P. Meesad, Fuzzy logic and Neural network, King Mongkut's University of Technology North Bangkok Publishers, Bangkok, 2010.
- [8] J. W. Hines, Fuzzy and Neural Approaches in Engineering MATLAB Supplement, John Wiley and Sons, New York, 1997.
- [9] J. R. Jang "ANFIS : Adaptive-Neural-Based Fuzzy Inference System," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 23, pp.665-685, May/June, 1993.
- [10] M.A. Pai, Energy Function Analysis for Power System Stability, Kluwer Academic Publishers, London, 1989.
- [11] S. K. Nallagalva, M. K. Kirar and G. Agnihotri "Transient Stability Analysis of the IEEE 9-Bus Electric Power System," International Journal of Scientific Engineering and Technology, Vol.1, pp.161-166, July, 2012.
- [12] online <http://www.mathworks.com/help/fuzzy/anfis.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายสิริวุฒิ คลอวุฒิเสถียร  
 วัน เดือน ปีเกิด 25 เมษายน 2533 ที่กรุงเทพมหานคร  
 ที่อยู่ 211 เฉลิมพระเกียรติร.9 ซอย 22 ถนนเฉลิมพระเกียรติร.9  
 แขวงหนองบอน เขตประเวศ กรุงเทพฯ 10250 โทร.0-2398-3520  
 ประวัติการศึกษา 2555 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยมอันดับ2)  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ประสบการณ์การทำงาน  
 พ.ศ.2556-ปัจจุบัน พนักงานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้