การประเมินเสถียรภาพชั่วครู่โดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับค่าได้
Transient Stabijity Estimation Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

ชนัฏพล ทองดิน

ก้านตอง ดูปนวล

ทนึ่งฤทัย วีระวัฒนะ

ดาทิตย์ คุ้มครองทรัพย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การประเมินเสถียรภาพชั่วครู่โดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้
Transient Stability Estimation Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

โดย

ชนัฏพล ทองสิน
ก้านตอง อูปนวล
หนึ่งฤทัย วีระวัฒนะ
อาทิตย์ คุ้มครองทรัพย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

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

Chanutphon Thongsin
Karntong Ouppanual
Nuengruthai Weerawattana
Arthit Khumkhrongsup

THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONKUT'S INSTITUDE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2013

ปีการศึกษา 2556

การประเมินเสถียรภาพชั่วครู่โดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้
Transient Stability Estimation Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

โดย

ชนัฏพล ทองสิน
ก้านตอง อูปนวล
หนึ่งฤทัย วีระวัฒนะ
อาทิตย์ คุ้มครองทรัพย์

อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร.สมชาติ จิริวิภากร

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การประเมินเสถียรภาพชั่วครู่โดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้

ผู้จัดทำ

1. นาย ชนัฏพล ทองสิน
2. นางสาว ก้านตอง อูปนวล
3. นางสาว หนึ่งฤทัย วีระวัฒนะ
4. นาย อาทิตย์ คุ้มครองทรัพย์

ดร. สมชาติ/..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.สมชาติ จิริวิภากร)

การประเมินเสถียรภาพชั่วครู่โดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้

นาย ชนัฏพล ทองสิน
นางสาว ก้านตอง อูปนวล
นางสาว หนึ่งฤทัย วีระวัฒนะ
นาย อาทิตย์ คุ้มครองทรัพย์
รศ.ดร. สมชาติ จิริวิภากร อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เสนอการประเมินเสถียรภาพชั่วครู่โดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้ ANFIS โดยเป็นการหาค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรที่เกิดจากการลัดวงจรภายในระบบทดสอบ โดยใช้โปรแกรม Power World จำลองระบบทดสอบ New England และระบบทดสอบ WSCC และบันทึกค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรได้จากการจำลอง ในกาดทดสอบนี้ได้นำค่ากำลังไฟฟ้าจริง ค่าตำแหน่งการเกิดการลัดวงจร และค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรมาใช้ในการฝึกสอนและทดสอบโดย ANFIS และทำการหารูปแบบโครงสร้างของแบบจำลองของระบบทดสอบทั้ง 2 ระบบ เพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละระบบโดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่น้อยที่สุด จากนั้นออกแบบการนำเสนอโดยใช้ Graphical User Interface ซึ่งจะได้โปรแกรมที่สามารถทำนายค่าเวลาวิกฤตที่ใช้ในการกำจัดกระแสลัดวงจรของระบบ New England และ WSCC

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

Mr. Chanutphon Thongsin
Ms. Karntong Ouppanual
Ms. Nuengruthai Weerwattana
Mr. Arthit Khumkhrongsup
Assoc.Prof. Dr.Somchat Jiriwibhakorn Supervisor
Year 2013

ABSTRACT

This Project represents Transient Stability Estimation Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS). The method is about finding critical clearing time to clear fault in the testing electrical system by using Power World Program. Start from stimulate New England System and WSCC system as a practical model then records Critical Clearing time (CCT) at various load setting and location from each bus. Then use the data that previously record from the first step such as real power data from each load, fault location from each bus and CCT to train ANFIS. After that choose the best structure by considering the error of each structure – the appropriate one is the structure that has least error. The last step is using all the data to design Graphical User Interface which can predict CCT of New England system and WSCC system.

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ รศ.ดร. สมชาติ จิริวิภากร อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้ข้อแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงานมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไขโครงงานจนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณคุณสิริวุฒิ คลอวุฒิเสถียร พี่ป.โท ที่ช่วยดูแลให้คำแนะนำจนโครงงานสำเร็จได้ด้วยดี ขอบคุณเพื่อนๆร่วมอาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดเวลา

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงงานครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VIII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงงาน	2
1.5 แผนการดำเนินโครงงาน	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 เสียรภาพของระบบไฟฟ้าชั่วครู่ (Transient Stability)	5
2.1.1 การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง	6
2.1.1.1 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง	7
2.1.1.2 องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง	9
2.1.2 สมการสวิง (Swing Equation)	9
2.2 ทฤษฎีฟัซซีเซตและระบบฟัซซี	13
2.2.1 ฟัซซีเซต (Fuzzy set)	13
2.2.2 ฟัซซีลอจิก	15
2.2.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก	16
2.2.3.1 trimf (Triangular-shaped membership function)	16
2.2.3.2 Trapmf (Trapezoidal-shaped membership function)	16
2.2.3.3 gbellmf (Generalized bell-shaped membership function)	17
2.2.3.4 gaussmf (Gaussian curve membership function)	17
2.2.3.5 gauss2mf (Gaussian combination membership function)	18
2.2.3.6 pimf (π -shaped membership function)	18
2.2.3.7 dsigmf (Difference between two sigmoidal functions membership function)	19
2.2.3.8 psigmf (Product of two sigmoidal membership functions)	20

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.2.4 การดำเนินการในฟัซซีเซต (Operation of fuzzy sets)	21
2.2.4.1 Union หรือ OR	21
2.2.4.2 Intersection หรือ AND	22
2.2.4.3 Complement หรือ NOT	22
2.3 ทฤษฎีระบบอนุมานฟัซซีบนฐานโครงข่ายที่ปรับตัวได้	23
2.4 ระบบอนุมานนิวโรฟัซซี	24
2.4.1 ระบบอุมานฟัซซี (Fuzzy Inference Systems; FIS)	24
2.4.1.1 ตัวฟัซซีฟายเยอร์ (Fuzzification Interface)	24
2.4.1.2 กฎเงื่อนไขพื้นฐาน (Knowledge Based)	24
2.4.1.3 Decision–Making Unit	25
2.4.1.4 ตัวดีฟัซซีฟายเออร์ (Defuzzification Interface)	25
2.4.2 ระบบอนุมานนิวโรฟัซซี	25
2.4.2.1 Layer 1: Antecedent Parameters	26
2.4.2.2 Layer 2: T-norm Operator	26
2.4.2.3 Layer 3: Normalize Firing Strength	27
2.4.2.4 Layer 4: Consequent Parameters	27
2.4.2.5 Layer 5: Overall Output	27
2.4.3 การเรียนรู้ของ ANFIS	28
บทที่ 3 การประเมินหาเสถียรภาพชั่วครู่โดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้	29
3.1 การประเมินหาเสถียรภาพชั่วครูโดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้	29
3.2 การออกแบบแบบจำลองระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (ANFIS)	29
3.2.1 การจำลองระบบ New England ในโปรแกรม Power World	29
3.2.2 การจำลองระบบ WSCC ในโปรแกรม Power World	33
3.3 การใช้ระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้	37
3.3.1 โครงสร้างของระบบจำลองระบบ New England	37
3.3.2 โครงสร้างของระบบจำลองระบบ WSCC	39
3.4 การฝึกสอนแบบจำลองระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้	42
3.4.1 การหารูปแบบการป้อนข้อมูลเข้าสู่แบบจำลอง	42
3.4.2 จำนวนฟังก์ชันสมาชิก และชนิดของฟังก์ชัน	42
3.4.3 การเปรียบเทียบผลเพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมกับแบบจำลอง	42
3.5 สรุปขั้นตอนการทดลอง	43

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	44
4.1 การทดลองหาจำนวนสมาชิกของระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายที่ดีที่สุด	44
4.2 การทดลองหาชนิดของสมาชิกของระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายที่ดีที่สุด	47
บทที่ 5 การประยุกต์ใช้ Graphical User Interface	53
5.1 การสร้าง GUI	53
5.2 ส่วนประกอบของ GUI ใน MATLAB	54
5.3 เครื่องมือต่างๆ ของ GUI	55
5.4 ส่วนประกอบสำคัญของ M-file ที่สร้างโดย GUIDE	57
5.5 การสร้างโครงร่าง GUI	58
5.5.1 การเปิด GUI ใน Layout Editor	58
5.5.2 การตั้งขนาดของพื้นที่ใช้งานในการออกแบบ	59
5.5.3 การสร้างองค์ประกอบ	61
5.5.4 การทำโปรแกรม GUI	61
5.5.5 การ Save และการ Run โปรแกรม	61
5.6 GUI สำหรับการทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร	62
5.6.1 ขอบเขตและเงื่อนไขสำหรับการออกแบบโปรแกรม สำหรับการทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร	62
5.6.2 ส่วนประกอบของโปรแกรมสำหรับการทำนายค่าเวลาวิกฤต ในการกำจัดกระแสลัดวงจร	62
5.6.2.1 หน้าต่างการทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัด กระแสลัดวงจรของระบบ New England	64
5.6.2.2 หน้าต่างการทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัด กระแสลัดวงจรของระบบ WSCC	65
5.6.2.3 ข้อมูลของระบบทดสอบ New England	66
5.6.2.4 ข้อมูลของระบบทดสอบ WSCC	67
5.6.2.5 คู่มือการใช้โปรแกรม	68
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	69
6.1 สรุปผลการทดลอง	69
6.2 ปัญหา	70
6.3 ข้อเสนอแนะ	70

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
เอกสารอ้างอิง	71
ภาคผนวก	73
ภาคผนวก ก โค้ดโปรแกรม	74
ภาคผนวก ข ข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง	80
ภาคผนวก ค ค่าพารามิเตอร์ของระบบ New England	111
ภาคผนวก ง ค่าพารามิเตอร์ของระบบ WSCC	115
ภาคผนวก จ บทความทางวิชาการ	117
ประวัติผู้เขียน	119

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของมุมโรเตอร์ต่อเวลา	8
2.2 เซตปรกติที่แสดงลักษณะอุณหภูมิของห้อง	13
2.3 ฟัซซีเซตที่แสดงให้เห็นลักษณะอุณหภูมิของห้อง	14
2.4 กราฟของฟัซซีเซต young	15
2.5 ตัวอย่างของ Triangular-shaped membership function	16
2.6 ตัวอย่างของTrapezoidal-shaped membership function	17
2.7 ตัวอย่างของ Generalized bell-shaped membership function	17
2.8 ตัวอย่างของ Gaussian curve membership function	18
2.9 ตัวอย่างของ Gaussian combination membership function	18
2.10 ตัวอย่างของ π-shaped membership function	19
2.11 ตัวอย่างของ Difference between two sigmoidal membership function	20
2.12 ตัวอย่างของProduct of two sigmoidal membership functions	20
2.13 ฟัซซีเซต A และ ฟัซซีเซต B	21
2.14 ฟัซซีเซต A OR B	21
2.15 ฟัซซีเซต A AND B	22
2.16 NOT ฟัซซีเซต A	22
2.17 โครงสร้างพื้นฐานการประมวลผลของฟัซซี่ลอจิก	24
2.18 สถาปัตยกรรมของระบบอนุมานฟัซซีบนฐานโครงข่ายที่ปรับตัวได้	25
3.1 วันไลน์ไดอะแกรมของระบบ New England	29
3.2 ขอบเขตการศึกษาของระบบทดสอบ New England	30
3.3 กราฟแสดงมุมโรเตอร์กับเวลา	32
3.3ก. เมื่อระบบมีเสถียรภาพ	32
3.3ข. เมื่อระบบสูญเสียเสถียรภาพ	32
3.4 วันไลน์ไดอะแกรมของระบบ WSCC	33
3.5 กราฟแสดงมุมโรเตอร์กับเวลา	36
3.5ก. เมื่อระบบมีเสถียรภาพ	36
3.5ข. เมื่อระบบสูญเสียเสถียรภาพ	36
3.6 ตัวอย่างโครงสร้างของแบบจำลองที่ใช้	37
3.7 ตัวอย่างโครงสร้างของแบบจำลองที่ใช้	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.1 ค่าความผิดพลาด 44
4.1ก. ค่าความผิดพลาดข้อมูลชุดฝึกสอน 44
4.1ข. ค่าความผิดพลาดข้อมูลชุดทดสอบ 44
4.2 โครงสร้างระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ที่ดีที่สุดในการทดลอง 46
4.2ก. ระบบ New England 46
4.2ข. ระบบ WSCC 46
4.3 กราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของโครงสร้างที่ดีที่สุด 48
4.3ก. ระบบ New England 48
4.3ข. ระบบ WSCC 48
5.1 หน้าต่างรูปภาพ GUI 53
5.2 การเรียก Callback เพื่อบรรจุคำสั่งหรือโปรแกรมลงในเครื่องมือ 54
5.3 เครื่องมือต่างๆของ GUI 55
5.4 หน้าต่างสำหรับแสดงผลการคำนวณค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร ของระบบ New England 57
5.5 การสร้างไฟล์ GUI 58
5.6 หน้าต่าง GUI Quick Start 59
5.7 แสดงวิธีการเพิ่ม-ลด ขนาดของพื้นที่ใช้งาน 59
5.8 หน้าต่าง Property Inspector เพื่อการตั้งค่าของ Figure สำหรับ GUI 60
5.9 หน้าจอหลักของ GUI 62
5.10 Object สำหรับหน้าจอหลัก 63
5.11 หน้าต่างสำหรับการคำนวณค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร ของระบบ New England 64
5.12 หน้าต่างสำหรับแสดงผลการคำนวณค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร ของระบบ WSCC 65
5.13 Object ที่ใช้สำหรับการคำนวณค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร ของระบบ New England และระบบ WSCC 66
5.14 หน้าต่างแสดงข้อมูลของระบบ New England 66
5.15 หน้าต่างแสดงข้อมูลของระบบ WSCC 67
5.16 Object ที่ใช้สำหรับหน้าต่างแสดงข้อมูลของระบบ New England และระบบ WSCC 67
5.17 คู่มือการใช้โปรแกรม 68

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต young ของแต่ละคน	15
2.2 สรุปวิธีการเรียนรู้แบบผสมผสานใน ANFIS	28
3.1 พารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้ากำลังในระบบทดสอบ New England	30
3.2 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	30
3.3 ตัวอย่างการปรับค่าในการจำลองระบบ New England	31
3.4 พารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้ากำลังในระบบทดสอบ WSCC	34
3.5 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	34
3.6 ตัวอย่างการปรับค่าในการจำลองระบบ WSCC	35
3.7 ตัวอย่างค่าอินพุตและเอาท์พุตที่นำมาเป็นข้อมูลชุดทดสอบและข้อมูลชุดฝึกสอน ของระบบทดสอบ New England	38
3.8 ตัวอย่างค่าอินพุตและเอาท์พุตที่นำมาเป็นข้อมูลชุดทดสอบและข้อมูลชุดฝึกสอน ของระบบทดสอบ WSCC	40
4.1 ค่าความผิดพลาด RMSE ในจำนวนรอบการฝึกต่างๆ ระบบ New England และ ระบบ WSCC	45
4.2 ค่าความผิดพลาดที่ฟังก์ชั่นสมาชิกชนิดต่างๆของระบบ New England และระบบ WSCC	47
4.3 ผลของจำนวนข้อมูลอินพุตเมื่อเพิ่มข้อมูลชุดฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลชุดทดสอบ ชุดเดิมของระบบทดสอบ New England	49
4.4 ผลของจำนวนข้อมูลอินพุตเมื่อเพิ่มข้อมูลชุดฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลชุดทดสอบ ชุดเดิมของระบบทดสอบ WSCC	49
4.5 ตัวอย่างเมื่อเปรียบเทียบค่า CCT จริงที่ได้จากโปรแกรม Power world กับค่า CCT ที่คำนวณได้จากระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้ของระบบ New England	50
4.6 ตัวอย่างเมื่อเปรียบเทียบค่า CCT จริงที่ได้จากโปรแกรม Power world กับค่า CCT ที่คำนวณได้จากระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้ของระบบ New England	51
ข.1 ข้อมูลที่ใช้ในการหาโครงสร้างระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายของระบบ New England	80
ข.2 ข้อมูลที่ใช้ในการหาโครงสร้างระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายของระบบ WSCC	94
ค.1 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	111
ค.2 ค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง	111
ค.3 ค่ากำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่บัส	113
ง.1 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	115
ง.2 ค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง	115
ง.3 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัส	116

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น การศึกษาถึงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นอย่างมาก เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในระบบ เช่น การเปิดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การเพิ่มหรือลดโหลดจำนวนมาก หรือการเกิดลัดวงจรในระบบ การศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสิ่งเหล่านี้เรียกว่า การศึกษาเสถียรภาพชั่วครู่ (Transient Stability) โดยปัญหาในระบบที่พบบ่อยครั้ง คือ การเกิดลัดวงจรขึ้นภายในระบบ ซึ่งส่งผลต่อระบบไฟฟ้าอย่างมาก ระบบป้องกันระบบไฟฟ้านั้นต้องกำจัดกระแสลัดวงจรออกจากระบบภายในช่วงเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร (Critical Clearing Time) เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพ

เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่และมีการเชื่อมโยงเป็นจำนวนมาก การหาค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร (Critical Clearing Time) และนำแบบจำลองระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (ANFIS) มาช่วยในทางด้านการประเมินหาเสถียรภาพชั่วครู่ จึงทำให้เกิดโครงงานนี้ขึ้นมาในชื่อ การประเมินหาเสถียรภาพชั่วครู่โดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อศึกษาเสถียรภาพชั่วครู่โดยใช้โปรแกรม Power World เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆภายในระบบไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (ANFIS)
3. เพื่อศึกษาถึงศักยภาพในการประเมินหาเสถียรภาพชั่วครู่โดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (ANFIS)
4. เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้ Graphical User Interface

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน

1. ศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆจากโปรแกรม Power World โดยใช้ระบบทดสอบ New England และระบบ Western System Coordinating Council (WSCC)

2. ศึกษาการทำงานของระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (ANFIS)

3. ศึกษาวิธีการการหาค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร (Critical Clearing Time) จากโปรแกรม Power World และนำมาเปรียบเทียบกับค่าเวลาวิกฤตที่ได้จากระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (ANFIS)

4. ศึกษาการนำเสนอโดยใช้ Graphical User Interface

5. วิเคราะห์ผลที่ได้จากระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (ANFIS) และสรุปผลการทดลอง

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงงาน

วิธีการที่ใช้ในโครงงานนี้ คือการนำระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (ANFIS) มาสร้างโมเดลในการทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร (Critical Clearing Time) ของระบบทดสอบ 2 ระบบคือ ระบบ New England และระบบทดสอบ Western System Coordinating Council (WSCC) โดยใช้ข้อมูลจากการจำลองระบบทดสอบทั้ง 2 ระบบด้วยโปรแกรม Power World ทำการฝึกสอนและทดสอบกับระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (ANFIS) และทำการหารูปแบบที่เหมาะสมกับระบบทดสอบทั้ง 2 ระบบ โดยทั้ง 2 ระบบจะมีรูปแบบจำนวนอินพุตที่ต่างกัน และแต่ละรูปแบบจะเลือกใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ชนิดต่างๆ และจำนวนฟัซซีเซทค่าต่างๆเพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร จากนั้นนำรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบทั้ง 2 ระบบมาออกแบบการนำเสนอโดยใช้ Graphic User Interface (GUI) เพื่อใช้ในการพยากรณ์

1.5 แผนการดำเนินโครงงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ปี/เดือน									
	พ.ศ. 2556							พ.ศ. 2557		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาหาข้อมูลและทฤษฎีการศึกษาเสถียรภาพชั่วครู่	↔									
2. ศึกษาการหาค่าเวลาวิกฤตโดยใช้โปรแกรม Power World		↔								
3. ศึกษาข้อมูลของระบบ ANFIS		↔								
4. จำลองระบบทดสอบ New England ด้วยโปรแกรม Power World			↔							
5. ออกแบบ ANFIS สำหรับระบบ New England ให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด				↔						
6. จำลองระบบทดสอบ Western System Coordinating Council (WSCC) ด้วยโปรแกรม Power World					↔					
7. ออกแบบ ANFIS สำหรับระบบ Western System Coordinating Council (WSCC) ให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด						↔				
8. ทำการทดลองและทดสอบรูปแบบที่ได้จาก ANFIS							↔			
9. ออกแบบ GUI								↔		
10. ทำการทดลองและตรวจสอบการทำงาน GUI								↔		
11. แก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับ GUI									↔	
12. วิเคราะห์และสรุปผล									↔	
13. เตรียมการนำเสนอโครงงาน										↔

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำเรียนรู้ผลจากการเปลี่ยนแปลงใดๆภายในระบบไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม Power World

2. ได้รับความรู้และเกิดความเข้าใจเกี่ยวกับระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (ANFIS) และการใช้งาน ANFIS Tool box บนโปรแกรม MATLAB

3. เรียนรู้ถึงศักยภาพในการประเมินหาเสถียรภาพชั่วครู่โดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (ANFIS)

4. สามารถนำความรู้เกี่ยวกับระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (ANFIS) ไปประยุกต์เพื่อการประเมินข้อมูลชุดอื่นๆ

5. ได้รับความรู้และเกิดความเข้าใจเกี่ยวกับ Graphical User Interface บนโปรแกรม MATLAB

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าชั่วครู่ (Transient Stability)

การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังมีประโยชน์คือ ทำให้ทราบถึงขีดความสามารถของระบบว่าสามารถรับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในระบบได้มากน้อยเพียงใด ทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในระบบ เช่น การเพิ่มโหลดเป็นจำนวนมากอย่างทันทีทันใดจะทำให้เกิดความไม่สมดุลระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ต้องการเพิ่มมากขึ้นกับกำลังทางกลที่ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ถ้าหากกระแสระบบสามารถปรับตัวให้เพิ่มกำลังทางกลจนสมดุลกับกำลังไฟฟ้าที่ต้องเพิ่มได้ในระยะเวลาหนึ่ง ก็ถือว่าระบบมีเสถียรภาพสำหรับการเปลี่ยนแปลงโหลดนั้นๆ แต่ถ้าหากการเปลี่ยนแปลงของโหลดเกิดขึ้นอย่างกระทันหันและระบบไม่สามารถปรับตัวให้กำลังทางกลสมดุลกับกำลังไฟฟ้าที่ต้องการได้ ระบบนั้นจะเกิดการแกว่ง (Oscillate) ซึ่งมีความถี่เปลี่ยนไปโดยไม่สามารถกลับมาถี่ความถี่ปกติได้ จนอุปกรณ์ป้องกันต่างๆปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกเมื่อเครื่องกำเนิดเครื่องหนึ่งถูกปลดออกก็ทำให้เครื่องที่เหลือรับภาระมากขึ้นและเกิดเหตุการณ์อย่างเดิมซ้ำ เครื่องกำเนิดถูกปลดทีละเครื่องจนเกิดไฟดับ แบบนี้เรียกว่าระบบสูญเสียเสถียรภาพ

การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง แบ่งออกได้เป็นสองกรณีใหญ่ๆ คือ การเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ และการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยการศึกษาเสถียรภาพของการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจะต้องเป็นแบบทรานเซี้ยนท์ (Transient Stability) ซึ่งมักเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริงในระบบไฟฟ้ากำลัง

2.1.1 การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังทำให้ทราบถึงขีดความสามารถของระบบว่าหลังจากเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในของระบบอย่างทันทีทันใด จะสามารถอยู่ในซิงโครนัสซึม (Synchronism) ได้หรือไม่ ซึ่งอาจเกิดจากการเปิดวงจรออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางเครื่อง การปลดสายส่งบางวงจร การเพิ่มโหลดหรือลดโหลดจำนวนมากอย่างทันทีทันใด หรือการเกิดฟอลต์ภายในระบบ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในระบบดังกล่าวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า กระแส กำลังไฟฟ้า ความเร็ว และแรงบิดของเครื่องจักรภายในระบบ ในระบบที่มีเสถียรภาพมากนั้นไม่ว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงใดขึ้นมาก็ไม่อาจทำให้เกิดไฟฟ้าดับได้ ดังนั้นการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าก็เพื่อการจ่ายไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความมั่นคงของระบบโดยไม่มีการขัดข้องในการส่งจ่ายไฟฟ้าบ่อยครั้งนั่นเอง

การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังจำเป็นต้องอาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ เพราะระบบไฟฟ้ากำลังเป็นระบบใหญ่ที่มีการเชื่อมโยงกันมากมาย ตั้งแต่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปจนถึงผู้ใช้ไฟฟ้า การจำลองอุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบไฟฟ้ากำลังตั้งแต่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง สายส่ง และอื่นๆ ในรูปของวงจรสมมูลและการแทนด้วยสมการ จึงมีความจำเป็นเพื่อป้อนข้อมูลให้คอมพิวเตอร์รับทราบข้อมูลและทำการคำนวณได้ วงจรสมมูลที่จำลองขึ้นนี้เหมือนกับวงจรสมมูลในการศึกษาโหลดโฟลทุกประการ แต่ต่างกันที่ว่าการศึกษาโหลดโฟลเป็นการศึกษาในสภาพการทำงานปกติ แต่การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเป็นการศึกษาระบบกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดในระบบ เช่น การเกิดการลัดวงจร การเพิ่มโหลดอย่างทันทีทันใด เป็นต้น

ระบบไฟฟ้ากำลังที่ดีจำเป็นต้องมีการวางแผนศึกษาและวิเคราะห์ตั้งแต่การจ่ายไฟปกติ ระบบป้องกันการจ่ายไฟอย่างประหยัด รวมทั้งเสถียรภาพของระบบด้วย เสถียรภาพของระบบขึ้นอยู่กับสภาพก่อนการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ถ้าก่อนการเปลี่ยนแปลงมีการจ่ายโหลดอยู่น้อยระบบก็จะมีสามารถรับการเปลี่ยนแปลงได้มาก นั่นก็คือระบบมีเสถียรภาพมาก แต่ถ้าก่อนการเปลี่ยนแปลงมีการจ่ายโหลดอยู่เป็นจำนวนมาก ระบบก็จะรับการเปลี่ยนแปลงได้น้อย นั่นก็คือระบบมีเสถียรภาพน้อย

ดังนั้นก่อนศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังจึงจำเป็นต้องทราบสถานะการจ่ายไฟฟ้าปกติของระบบก่อน ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถหาได้จากการศึกษาโหลดโฟล เพราะการศึกษาโหลดโฟลทำให้เราทราบแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่บัสต่างๆของระบบก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อทราบสถานะของระบบก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงแล้วจึงนำวงจรสมมูลของอุปกรณ์ต่างๆภายในระบบ มาจำลองสภาพการเปลี่ยนแปลงของโหลด ซึ่งจากวงจรจำลองดังกล่าวทำให้เราทราบสภาวะการไหลของกำลังไฟฟ้าในระหว่างมีการเปลี่ยนแปลงของระบบ การเปลี่ยนแปลงของขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส เป็นต้น คุณสมบัติการทำงานของเครื่องจักรต่างๆ ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในระบบไฟฟ้าฟ้ากำลังก็จเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาด้วย คุณสมบัติค่างๆที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลานี้สามารถแทนได้ด้วยสมการดิฟเฟอเรนเชียลกำลังสอง (Second Order Differential Equation) ซึ่งการศึกษาสมการดังกล่าวทำให้เราทราบได้ว่าระบบมีเสถียรภาพหรือไม่

ขั้นตอนต่อไปขอจำแนกลำดับการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังออกเป็น 2 หัวข้อ ดังนี้

ก. ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

ข. องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

2.1.1.1 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ประกอบด้วย

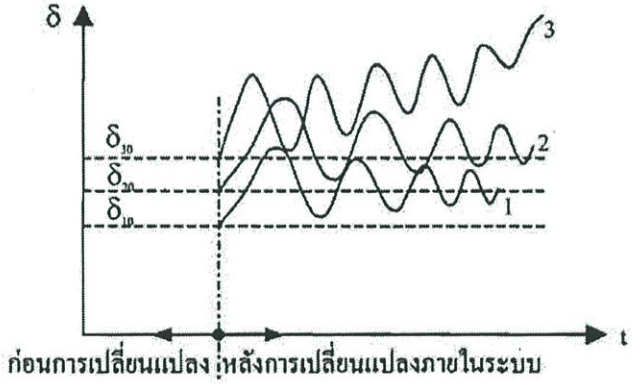
- <u>ผลที่ได้จากการศึกษาโหลดโฟล</u> เพื่อให้ทราบสถานะของระบบก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ภายในระบบ ข้อมูลดังกล่าวเป็นค่าเริ่มต้นเพื่อนำไปใช้ในสมการดิฟเฟอเรนเชียลที่กล่าวมา

- <u>วงจรสมมูลของอุปกรณ์ต่างๆภายในระบบ</u> เพื่อนำไปประกอบเข้าด้วยกัน แทนระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณา โดยจำลองเป็นโมเดลแทนการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดภายในระบบ

- <u>สมการดิฟเฟอเรนเชียล</u> แสดงการเปลี่ยนแปลงของมุมโรเตอร์ต่อเวลา

เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง พิจารณาได้จากสมการดิฟเฟอเรนเชียลโดยหาค่ามุมของโรเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาหลังจากมีการเปลี่ยนแปลงภายในระบบอย่างทันทีทันใด แล้วพิจารณาว่าระบบกลับคืนสู่สภาพการจ่ายไฟปกติหรือไม่หลังการเปลี่ยนแปลงนั้นโดยพิจารณาจากมุมของโรเตอร์และเวลา พิจารณาที่รูป 2.1 แสดงกราฟของมุมของโรเตอร์เครื่องจักรกล(เครื่องกำเนิดไฟฟ้า)ภายในระบบไฟฟ้ากำลังก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในระบบและหลังจากมีการเปลี่ยนแปลงระบบ ถ้าเครื่องจักรใดเครื่องจักรหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของมุมโรเตอร์เพิ่มขึ้นตามเวลาโดยไม่สามารถกลับมาหาค่าที่ที่จุดใดได้ ก็แสดงว่าเครื่องจักรนั้นสูญเสียซิงโครนิสซึม ในรูปที่ 2.1 เครื่องจักร 3 มีมุมเพิ่มมากขึ้นตามเวลาและไม่กลับมาหาค่าคงที่ใดๆ นั่นคือ สูญเสียซิงโครนิสซึม โดยเครื่องจักร 1 และ 2 ยังอยู่ในซิงโครนิสซึม จึงกล่าวรวมได้ว่าระบบไม่เสถียรภาพหลังมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดภายในระบบ ถึงแม้ว่าจะมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางเครื่องยังอยู่ในซิงโครนิสซึมก็ตาม แต่เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีปัญหาถูกเอาออกจากระบบ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหลือก็ต้องรับโหลดที่เหลือ และอาจทำให้มุมโรเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงไปจนไม่อยู่ในซิงโครนิสซึมได้

สมการดิฟเฟอเรนเชียลแสดงความสัมพันธ์ของมุมโรเตอร์และเวลาตามรูปที่ 2.1 เรียกว่า สมการสวิง (Swing Equation) และกราฟของสมการดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 2.1 เรียกว่า กราฟสวิง (Swing Curve)



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของมุมโรเตอร์ต่อเวลา

ในรูปที่ 2.1 ก่อนที่จะมีการเปลี่ยนแปลงแต่ละโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือเครื่องจักรกล มีมุมของโรเตอร์หรือมุมระหว่างแกนของโรเตอร์และสนามแม่เหล็กหมุน และในรูปแสดงค่ามุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ล่ะเครื่อง

2.1.1.2 องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

การพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ข้อมูลที่ต้องชดใช้ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ได้แก่ ข้อมูลกำลังไฟฟ้าและแรงดันที่บัสต่างๆ ที่ได้จากโหลดโฟล เพื่อเป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณ วงจรสมมูลของอุปกรณ์ต่างๆในระบบ และสมการที่ต้องใช้ในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง นอกเหนือจากข้อมูลดังกล่าวแล้วก็ยังมีองค์ประกอบอื่นๆที่ต้องนำมาพิจารณาด้วย ได้แก่ ความเร็วของเบรกเกอร์ที่มีอยู่ในระบบ และจำลองเหตุการณ์ผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบเพื่อทดสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

การทดสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไปจะทำหลังจากที่เกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบ เพราะการเกิดการลัดวงจรทำให้เกิดผลกระทบกับระบบอย่างรุนแรง เมื่อเกิดลัดวงจรแล้วเบรกเกอร์ทำงานเพื่อตัดจุดลัดวงจรออกจากระบบและระบบยังสามารถกลับคืนสู่สถาพของการจ่ายไฟฟ้าตามปกติได้ การเกิดเหตุการณ์ผิดปกติกับระบบอย่างอื่น เช่น การปลดโหลดของระบบ เป็นต้น มีผลน้อยกับระบบเมื่อเทียบกับการเกิดลัดวงจร และการลัดวงจรที่มีผลกระทบกับระบบมากที่สุด ได้แก่ การเกิดการลัดวงจรแบบสามเฟส

การทดสอบเสภียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังจำลองโดยสมมติว่าเกิดลัดลงจรสามเฟส ที่บัสต่างๆ โดยทดสอบการเกิดการลัดวงจรทีละบัส และพิจารณาว่าเมื่อมีการเปิดวงจรของเบรกเกอร์เพื่อแยกจุดลัดวงจรออกจากระบบแล้วระบบยังมีเสถียรภาพ หรือไม่ด้วยความเร็วของเบรกเกอร์ที่มีใช้ในระบบ ถ้าระบบมีเสถียรถาพไม่ว่าจะเกิดลัดวงจรที่บัสใดก็ตามถือว่าระบบมีเสถียรภาพมากและสามารถรองรับการเกิดลัดลงจรที่บัสใดก็ได้ สำหรับระบบไฟฟ้าที่จะติดตั้งใหม่การคำนวณทางด้านเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเพื่อหาความเร็วเบรกเกอร์ต่ำสุดที่จะนำมาใช้ในระบบนั้นๆ เบรกเกอร์ยิ่งมีความเร็วในการตัดมากก็จะมีราคาแพงมากด้วย ดังนั้นการออกแบบโดยใช้การศึกษาทางด้านเสถียรภาพของระบบก็เพื่อหาความเร็วเบรกเกอร์ต่ำสุดที่ยังสามารถรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

2.1.2 สมการสวิง (Swing Equation)

การพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังสามารถทำได้โดนการดูผลของกราฟสวิงเป็นเกณฑ์ ดังนั้นจึงต้องหาว่าสมการสวิงของเครื่องจักรเป็นอย่างไร และสมการดังกล่าวสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟสวิงได้อย่างไร เมื่อได้สมการสวิงดังกล่าวแล้ว ก็สามารถพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังได้

เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังจำเป็นต้องพิจารณาจากความสัมพันธ์ของกำลังทางกลทางเครื่องจักรและกำลังกลทางไฟฟ้า ดังนั้นสมการสวิงจึงได้มาจากการพิจารณาการตอบสนองทางกลของเครื่องจักรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดภายในระบบ

แรงบิดที่กระทำต่อโรเตอร์ของเครื่องจักรตามความเร่งเชิงมุมสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.1)

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

เมื่อ T ผลรวมของแรงบิด

WR โมเมนต์ของความเฉื่อย

g อัตราความเร่งของโลก

α ความเร่งเชิงมุม

มุมทางไฟฟ้า θ_e สัมพันธ์กับมุมทางเครื่องกล θ_m ตามจำนวนขั้ว P ของเครื่องจักรตามสมการที่ (2.2)

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

ความถี่ของระบบสัมพันธ์กับจำนวนขั้ว P และความเร็วของเครื่องจักร N ตามสมการที่ (2.3)

$$f=\frac{N\,P}{120} \qquad (2.3)$$

จากสมการที่ (2.2) โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.3) เขียนได้ดังนี้

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

มุมทางไฟฟ้า δ ของโรเตอร์ของเครื่องจักรกลสัมพันธ์กับแกนหมุนซิงโครนัสตามสมการที่ (2.5)

$$\delta=\theta_e-\omega_o t \tag{2.5}$$

เมื่อ ω_o ความเร็วซิงโครนัส

t เวลา

เมื่อทำการดิฟเฟอร์เรนเชียลสมการที่ (2.5) และแทนค่าในสมการที่ (2.1) จะได้

$$T=\frac{WR^2}{g}\ \frac{N}{60}\ \frac{d^2\delta}{dt^2} \tag{2.6}$$

สมการ (2.6) สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปเปอร์ยูนิตได้ โดยแรงบิดฐาน (Base Torque) หมายถึง แรงบิดที่ใช้กำเนิดกำลังไฟฟ้าที่ความเร็วพิกัด (Rated Speed)

$$T=\frac{\text{kVA base}\ (\frac{550}{0.746})}{2\pi\ (\frac{N}{60})} \tag{2.7}$$

จะได้

$$T=\frac{\frac{WR^2}{g}\frac{2\pi}{f}(\frac{N^2}{60})\frac{0.746d^2\delta}{550\ dt^2}}{\text{kVA base}} \tag{2.8}$$

ค่าคงที่ความเฉื่อย (Inertia Constant) H ของเครื่องจักรถูกนิยามเป็นพลังงานจลน์ที่ความเร็วพิกัด หน่วยเป็น kW-sec/kVA โดยพลังงานจลน์เขียนได้ดังสมการที่ (2.9)

$$\text{พลังงานจลน์}=\frac{\frac{1}{2}\frac{WR^2}{g}(2\pi^2)(\frac{N}{60}^2)\frac{0.746}{550}}{\text{kVA base}} \tag{2.9}$$

เมื่อแทนค่าของ H เข้าไปในสมการที่ (2.8) ได้

$$T=\frac{H}{\pi f}\frac{d^2\delta}{dt^2} \qquad (2.10)$$

กรณีไม่คิดแดมปิ้ง (Damping) และความสูญเสียของเครื่องจักรกล แรงบิดเร่ง T_a (Accelerating Torque) เขียนได้ดังสมการ

$$T_0=T_m-T_e \qquad (2.11)$$

เมื่อ T_m แรงบิดทางกล

T_e แรงบิดทางไฟฟ้า

สมการที่ (2.11) แรงบิดเร่ง $T_a = T_m-T_e$ ใช้ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ถ้าเป็นมอเตอร์ $T_o = T_e-T_m$

แทนค่าสมการที่ (2.11) เข้าไปในสมการที่ (2.10)

$$T_m-T_e=\frac{H}{\pi f}\frac{d^2\delta}{dt^2} \qquad (2.12)$$

เนื่องจากแรงบิดในสมการที่ (2.12) อยู่ในรูปของเปอร์ยูนิต ดังนั้นแรงบิดและกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากัน สำหรับความเร็วที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

$$\frac{H}{\pi f}\frac{d^2\delta}{dt^2}=P_m-P_e \qquad (2.13)$$

$$M\frac{d^2\delta}{dt^2}=P_m-P_e \qquad (2.14)$$

เมื่อ P_m กำลังทางกล

P_e กำลังทางไฟฟ้า

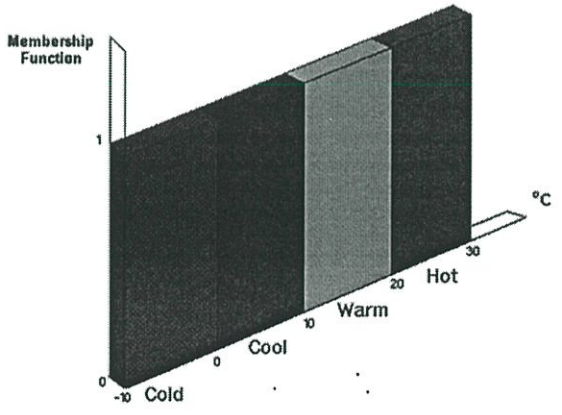
สมการที่ (2.14) เป็นสมการดิฟเฟอร์เรียนเชียลของมุม δ และเวลาซึ่งเรียกว่าสมการสวิง และถ้านำค่าของ δ ไปเขียนตามเวลาก็จะได้กราฟสวิงทำให้พิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังได้

โดยความเป็นจริงค่า M ในสมการที่ (2.14) มีค่าไม่คงที่ เพราะสมการ (2.13) ได้มาจากสมการที่ (2.12) โดยสมมติว่าความเร็วคงที่ ในทางปฏิบัติการพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังพิจารณาได้จากการสวิงของกราฟในช่วงสั้นๆเท่านั้นก็พอ ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวความเร็วของโรเตอร์ไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก

2.2 ทฤษฎีฟัซซีเซตและระบบฟัซซี

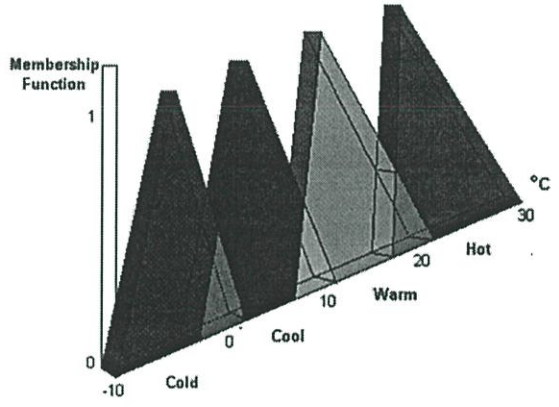
2.2.1 ฟัซซีเซต (Fuzzy set)

ฟัซซีเซตเป็นส่วนขยายของเซตปรกติ (Crisp set) โดยฟัซซีเซตจะมีลักษณะตามฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) ซึ่งจะใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในการแปลงค่าสมาชิกของเอกภพสัมพันธ์ให้อยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 1 [0,1] โดยค่า 0 หมายถึง ไม่ได้มีส่วนร่วมอยู่ในสมาชิกของเซตเลย และ 1 หมายถึง มีส่วนที่เป็นสมาชิกของเซตอย่างสมบูรณ์ ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นตัวอย่างของเซตปรกติที่แสดงลักษณะอุณหภูมิของห้อง



รูปที่ 2.2 เซตปรกติที่แสดงลักษณะอุณหภูมิของห้อง

โดยลักษณะของเซตปรกติมีข้อจำกัดที่ว่าเซตปรกติมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกได้เพียงเซตเดียว ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิ 50 องศาฟาเรนไฮต์ มีค่าความเป็นสมาชิกในเซต 'cool' เป็น 1 และมีค่าความเป็นสมาชิกในเซตอื่นๆ เป็น 0 มีความหมายว่า ที่อุณหภูมิ 50 องศาฟาเรนไฮต์ เป็นสมาชิกของเซต 'cool' เพียงเซตเดียว (ซึ่งในความหมายเป็นจริงที่อุณหภูมิ 50 องศาฟาเรนไฮต์ อาจจะเป็น 'cold' หรือ 'cool' ก็ได้ ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องนิยามระบบของเราด้วยฟัซซีเซต) ซึ่งเราไม่สามารถนิยามได้อย่างชัดเจนว่าจาก 'warm' ไปเป็น 'hot' องศาฟาเรนไฮต์ใดเป็นองศาที่ใช้แบ่ง เนื่องจากในความเป็นจริงแล้วอุณหภูมิที่สูงขึ้นเรื่อยๆ จะค่อยๆ เปลี่ยนจาก 'warm' ไปเป็น 'hot' โดยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ถูกอธิบายได้อย่างชัดเจนกว่าโดยใช้ทฤษฎีฟัซซีเซต ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟัซซีเซตสามารถอธิบายข้อมูลเดียวกันนี้และสิ่งที่เกิดขึ้นได้อย่างไร

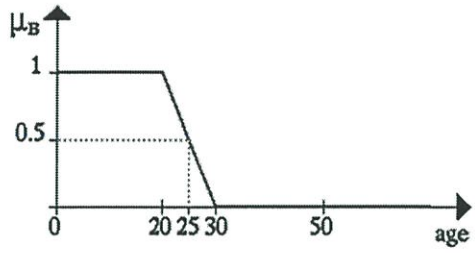


รูปที่ 2.3 ฟัซซีเซตที่แสดงให้เห็นลักษณะอุณหภูมิของห้อง

โดยหลักการทั้งหมดนี้สามารถแสดงให้เห็นเป็นตัวอย่างได้ เช่น เมื่อพูดถึงความอ่อนเยาว์ของคน ในกรณีนี้ให้เซต S (เป็นเอกภพสัมพัทธ์) เป็นเซตของคนทั้งหมด โดยฟัซซีเซต young ถูกนิยามขึ้น เพื่อตอบคำถามที่ว่า x มีค่าความอ่อนเยาว์เป็นเท่าไหร่ โดยเราต้องคิดค่าความเป็นสมาชิกที่อยู่ในฟัซซีเซต young ของแต่ละคนที่อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ วิธีที่ง่ายที่สุดก็คือใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกซึ่งขึ้นอยู่กับอายุของคนคนนั้น

$$\text{young}(x)=\begin{cases}1 & \text{if age}(x)\leq 20\\ (30\text{-age}(x))/10 & \text{if } 20<\text{age}(x)\leq 30\\ 0 & \text{if age}(x)>30\end{cases} \qquad (2.15)$$

จากสมการที่ (2.15) จะได้กราฟดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟของฟัซซีเซต young

จากสมการที่ (2.15) จะได้ตัวอย่างดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต young ของแต่ละคน

Person	Age	Degree of young
Johan	10	1.00
Edwin	21	0.90
Parthiban	25	0.50
Arosha	26	0.40
Chin Wei	28	0.20
Rajkumer	83	0.00

จากสมการที่ (2.15) จะได้ค่าฟัซซีเซต young ของ Parthibanเป็น 0.50

2.2.2 ฟัซซีลอจิก

ในตรรกศาสตร์แบบเดิม (Classical logic) นั้นถือว่าทุกสิ่งสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของ Binary term (เช่น 0 หรือ 1,ดำหรือ ขาว,ใช่หรือไม่ใช่) ได้ ส่วนฟัซซีลอจิกแทนค่าความจริงของตรรกศาสตร์แบบเดิมด้วยค่าความเป็นจริง (Degree of truth) ที่คล้ายกับค่าความน่าจะเป็น โดยค่าความเป็นจริงของฟัซซีลอจิกไม่จำเป็นต้องเพิ่มขึ้นถึงร้อยเปอร์เซ็นต์ แต่จะยอมให้เพิ่มค่าได้ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งฟัซซีลอจิกจะมีลักษณะเป็นเหมือนสีเทาและอาศัยหลักการของ อาจจะ, บางที, ค่อนข้าง ซึ่งเป็นลักษณะที่ทำให้ฟัซซีลอจิกยอมให้สมาชิกบางส่วนอยู่ในเซตได้ โดยฟัซซีเซตและฟัซซีลอจิกนี้ถูกคิดขึ้นในปี 1965 โดย Dr. Lotfi Zadeh ของ Berkeley

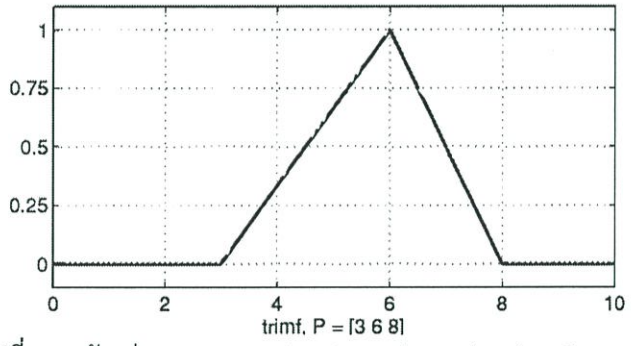
2.2.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function)

เป็นฟังก์ชันที่มีการกำหนดระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่ต้องการใช้งานโดยแทนที่กับตัวแทนที่มีความคลุมเครือ เป็นส่วนที่สำคัญของฟัซซี รูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีความสำคัญต่อกระบวนการคิดและแก้ไขปัญหา มีทั้งแบบสมมาตรกันและไม่สมมาตร การเลือกฟังก์ชันของความเป็นสมาชิกจะต้องเลือกตามความเหมาะสมของข้อมูลที่จะรับเข้ามา งานที่กำลังปฏิบัติหรือความต้องการ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ใช้ใน ANFIS มีอยู่ 8 ชนิด ได้แก่

2.2.3.1 trimf (Triangular-shaped membership function)

ฟังก์ชันสามเหลี่ยมเป็นฟังก์ชันของเวกเตอร์ x ซึ่งขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ 3 ค่า คือ a, b และ c โดยค่า a และ c จะเป็นตัวกำหนดตำแหน่งหรือความกว้างของฐานสามเหลี่ยม ส่วนค่า b จะเป็นตัวกำหนดตำแหน่งของยอด

$$f(x;a,b,c)=\begin{cases} 0 & \text{for } x\le a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{for } a\le x\le b \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{for } b\le x\le c \\ 0 & \text{for } x>c \end{cases} \qquad (2.16)$$

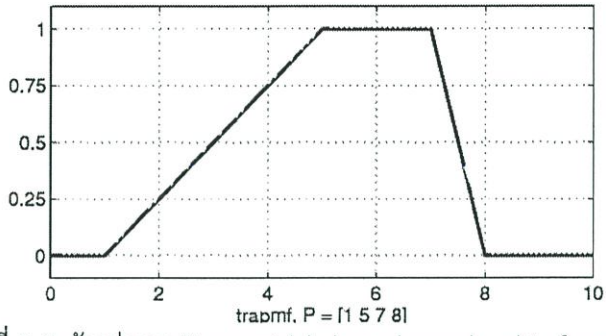


รูปที่ 2.5 ตัวอย่างของ Triangular-shaped membership function

2.2.3.2 Trapmf (Trapezoidal-shaped membership function)

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมูเป็นฟังก์ชันของเวกเตอร์ x ซึ่งขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ 4 ค่า คือ a, b, c และ d โดยค่า a และ d จะเป็นตัวกำหนดตำแหน่งหรือความกว้างของฐานสี่เหลี่ยมคางหมู ส่วนค่า b จะเป็นตัวกำหนดตำแหน่งหรือความกว้างของด้านคู่ขนาน

$$f(x;a,b,c,d)=\begin{cases} 0 & \text{for } x\le a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{for } a\le x\le b \\ 1 & \text{for } b\le x\le c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{for } c\le x\le d \\ 0 & \text{for } x>d \end{cases} \qquad (2.17)$$

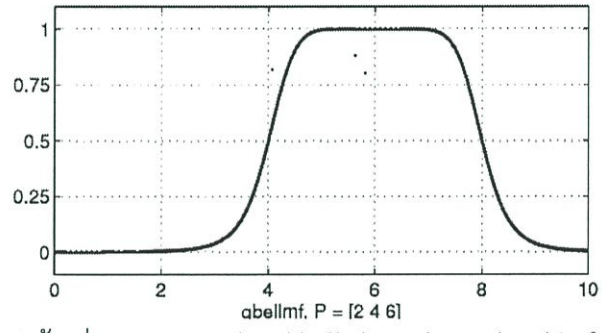


รูปที่ 2.6 ตัวอย่างของTrapezoidal-shaped membership function

2.2.3.3 gbellmf (Generalized bell-shaped membership function)

ฟังก์ชันระฆังคว่ำเป็นฟังก์ชันของเวกเตอร์ x ซึ่งขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ 3 ค่า คือ a, b และ c โดยค่า c จะกำหนดตำแหน่งกลางของรูประฆังและค่า b มักจะมีค่าเป็นบวก

$$f(x;a,b,c)=\frac{1}{1+\left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}} \tag{2.18}$$

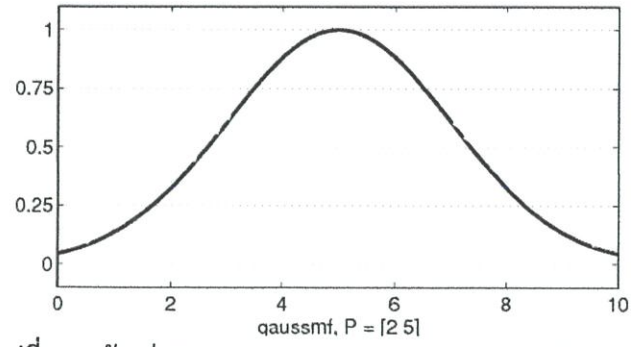


รูปที่ 2.7 ตัวอย่างของ Generalized bell-shaped membership function

2.2.3.4 gaussmf (Gaussian curve membership function)

ฟังก์ชันเกาส์เซียนเป็นฟังก์ชันของเวกเตอร์ x ซึ่งขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ 2 ค่า คือ σ และ c โดยค่าคือ σ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่า c คือค่าเฉลี่ยจะเป็นตัวกำหนดตำแหน่งจุดยอดของรูปกราฟ

$$f(x;\sigma,c)=e^{\frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}} \tag{2.19}$$

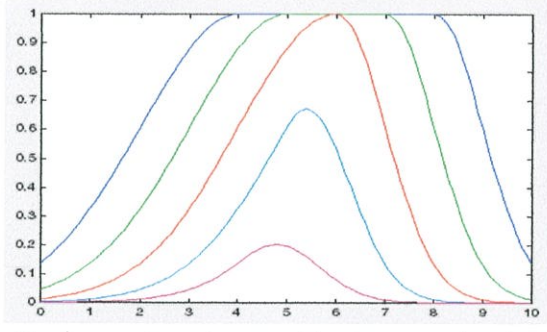


รูปที่ 2.8 ตัวอย่างของ Gaussian curve membership function

2.2.3.5 gauss2mf (Gaussian combination membership function)

เป็นการรวมฟังก์ชันเกาส์เซียน 2 ฟังก์ชันซึ่งขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ 4 ค่า คือ σ_1, $c_1\sigma_2$ และ c_2 ค่า σ_1,c_1 จะเป็นตัวกำหมดกราฟฝั่งซ้าย และค่า σ_2,c_2 จะเป็นตัวกำหมดกราฟฝั่งขวา โดยที่ $c_1 < c_2$

$$f(x;\sigma, c) = e^{\frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.20)$$

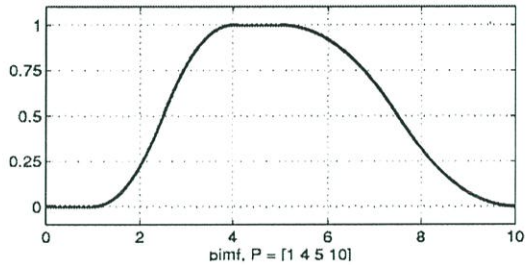


รูปที่ 2.9 ตัวอย่างของ Gaussian combination membership function

2.2.3.6 pimf (π -shaped membership function)

ฟังก์ชันพาย เป็นผลคูณของ ฟังก์ชันรูปตัวเอส และ ฟังก์ชันรูปตัวแซดขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ 3 ค่า คือ a, b และ c โดยค่า a และ d จะเป็นตัวกำหนดตำแหน่งหรือความกว้างของรูปกราฟ ส่วนค่า b และ c จะเป็นตัวกำหนดตำแหน่งของส่วนบนของกราฟ

$$f(x;a,b,c,d)=\begin{cases} 0 & \text{for } x\le a \\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 & \text{for } a\le x\le \frac{a+b}{2} \\ 1-2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & \text{for } \frac{a+b}{2}\le x\le b \\ 1 & \text{for } b\le x\le c \\ 1-2\left(\frac{x-c}{d-c}\right)^2 & \text{for } c\le x\le \frac{c+d}{2} \\ 2\left(\frac{x-d}{d-c}\right)^2 & \text{for } \frac{c+d}{2}\le x\le d \\ c & \text{for } x\ge d \end{cases} \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างของ π-shaped membership function

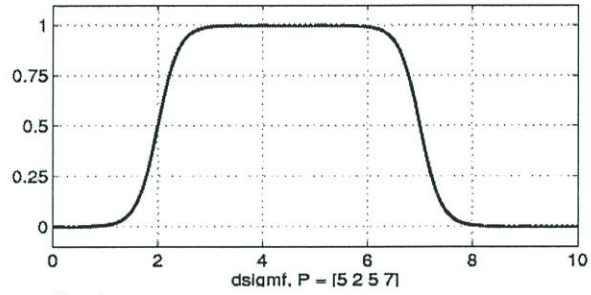
2.2.3.7 dsigmf (Difference between two sigmoidal functions membership function)

ฟังก์ชันผลต่างของฟังก์ชันซิกมอยด์ 2 ฟังก์ชัน โดยที่ฟังก์ชันซิกมอยด์ที่ใช้จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ 2 ค่า คือ a และ c

$$f(x;a,c)=\frac{1}{1+e^{-a(x-c)}} \quad (2.22)$$

ดังนั้น ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก dsig จะขึ้นกับ กับพารามิเตอร์ 4 ค่า คือ a1, c1, a2, และ c2

$$f_1(x;a_1,c_1)-f_2(x;a_2,c_2) \quad (2.23)$$



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างของ Difference between two sigmoidal functions membership function

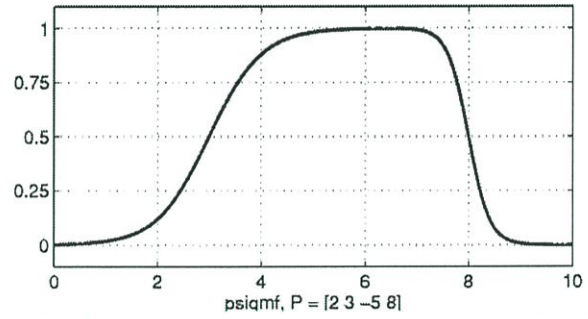
2.2.3.8 psigmf (Product of two sigmoidal membership functions)

ฟังก์ชันผลคูณของฟังก์ชันซิกมอยด์ 2 ฟังก์ชัน โดยที่ฟังก์ชันซิกมอยด์ที่ใช้จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ 2 ค่า คือ a และ c

$$f(x;a,c)= \frac{1}{1+e^{-a(x-c)}} \tag{2.24}$$

ดังนั้น ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก psig ก็จะขึ้นกับ กับพารามิเตอร์ 4 ค่า คือ a1, c1, a2, และ c2

$$f_1(x;a_1,c_1)\times f_2(x;a_2,c_2) \tag{2.25}$$



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างของProduct of two sigmoidal membership functions

2.2.4 การดำเนินการในฟัซซีเซต (Operation of fuzzy sets)

ให้ A และ B เป็นฟัซซีเซตใน U ที่มีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ μ_Aและ μ_Bตามลำดับ



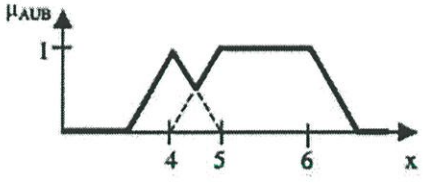
รูปที่ 2.13 ฟัซซีเซต A และ ฟัซซีเซต B

การดำเนินการพื้นฐานของฟัซซีดังนี้

2.2.4.1 Union หรือ OR

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของสองฟัซซีเซต A และ B ที่ Union กัน ซึ่งมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็น μ_A และ μ_Bตามลำดับ โดยถูกนิยามให้เป็นค่าที่มากที่สุดของทั้งสองฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

$$\mu_{AUB}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \tag{2.26}$$



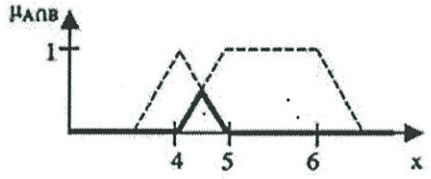
รูปที่ 2.14 ฟัซซีเซต A OR B

การดำเนินการ Union ในทฤษฎีฟัซซีเซตเปรียบเทียบได้กับการดำเนินการ OR ใน Boolean algebra

2.2.4.2 Intersection หรือ AND

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของสองฟัซซีเซต A และ B ที่ Intersection กัน ซึ่งมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็น μ_Aและ μ_B ตามลำดับ โดยถูกนิยามให้เป็นค่าที่น้อยที่สุดของทั้งสองฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

$$\mu_{A\cap B}(x) = min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \tag{2.27}$$



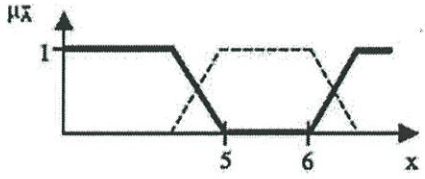
รูปที่ 2.15 ฟัซซีเซต A AND B

การดำเนินการ Intersection ในทฤษฎีฟัซซีเซตเปรียบเทียบได้กับการดำเนินการ AND ใน Boolean algebra

2.2.4.3 Complement หรือ NOT

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ Complement ของฟัซซีเซต A ซึ่งมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็น μ_A โดยถูกนิยามให้เป็นนิเสธของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ระบุไว้

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \tag{2.28}$$



รูปที่ 2.16 NOT ฟัซซีเซต A

ดำเนินการ Complement ในทฤษฎีฟัซซีเซตเปรียบเทียบได้กับการดำเนินการ NOT ใน Boolean algebra

2.3 ทฤษฎีระบบอนุมานฟัซซีบนฐานโครงข่ายที่ปรับตัวได้ด้วยวิธีการเรียนรู้แบบโครงข่ายประสาทเทียม

ระบบอนุมานฟัซซีบนฐานโครงข่ายที่ปรับตัวได้ด้วยวิธีการเรียนรู้แบบโครงข่ายประสาทเทียม (Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System ; ANFIS) ได้ถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อลบข้อจำกัดของโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network)

โครงข่ายประสาทเทียมนั้นมีความสามารถในการเรียนรู้ได้ มีโครงสร้างและการคำนวณระดับต่ำ ใช้เวลาในการประมวลผลต่ำ ซึ่งเหมาะกับการจัดการกับข้อมูลดิบ แต่ก็ยังมีข้อเสียก็คือ ในการเรียนรู้นั้นมีความคลุมเครือ ไม่สามารถให้เหตุผลได้ว่าเพราะเหตุใดจึงมีข้อสรุปออกมาดังที่ปรากฏที่เอาต์พุตของโครงข่าย

เพื่อที่จะแก้ลักษณะความคลุมเครือนี้ จึงได้นำฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic) เข้ามาช่วยโดยทฤษฎีฟัซซี (Fuzzy Set Theory) ซึ่งมีค่าความเป็นสมาชิกของเซ็ตระหว่าง 0 ถึง 1 ในการอธิบายลักษณะของข้อมูลที่คลุมเครือได้ ใช้หลักการของเหตุผลเข้ามาเกี่ยวข้องในระดับสูงโดยใช้ตัวแปรทางภาษาที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญ โดยจะบอกค่าระดับความชัดเจนในรูปของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) เพียงแต่ฟัซซีลอจิกไม่สามารถเรียนรู้ในการปรับแต่งโครงสร้างได้ด้วยตัวของมันเอง และยังต้องพึ่งการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญหรือผู้ที่มานั่งควบคุมในการคัดเลือกกฎที่จะนำมาใช้คำนวณ

จากข้อจำกัดของโครงข่ายประสาทเทียมและฟัซซีลอจิก จึงได้มีนักวิจัยคิดค้นวิธีการผสมระบบและประยุกต์ระบบทั้งสองเข้าด้วยกันเพื่อจะแก้ปัญหาข้อด้อยของแต่ละวิธี กล่าวคือ เป็นการรวมความสามารถในการเรียนรู้และปรับตัวเองของโครงข่ายประสาทเทียม กับความรู้ของผู้เชี่ยวชาญและความสามารถการให้เหตุผลของฟัซซีลอจิก กลายเป็นระบบประสานแบบอัจฉริยะ (Hybrid Intelligent System, HIS) มีชื่อว่าระบบฟัซซีนิวรอลเน็ตเวิร์ค (Fuzzy Neural Network) หรือที่เป็นที่รู้จักกันมากคือ ANFIS หรือ Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System เป็นระบบอนุมานฟัซซีบนฐานโครงข่ายที่ปรับตัวได้ด้วยวิธีการเรียนรู้แบบโครงข่ายประสาทเทียม

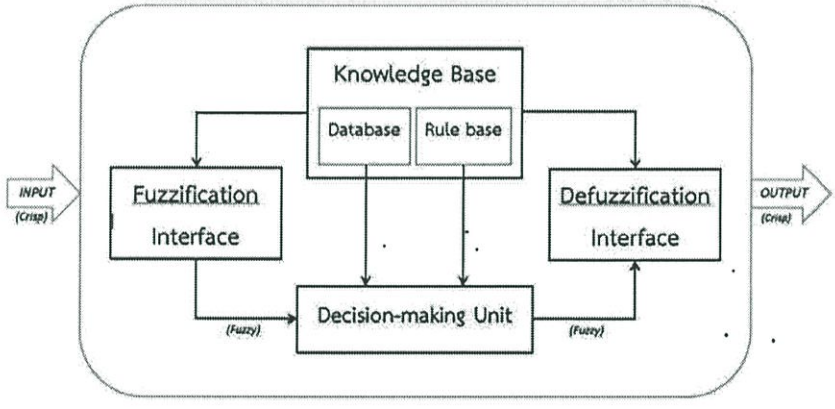
โดยส่วนประกอบหลักจะเป็นส่วนของฟัซซี คือ Fuzzification, Fuzzyinference และ Defuzzification และส่วนของโครงข่ายประสาทเทียมคือในส่วนวิธีการ Back-Propagation เพื่อใช้ในการปรับปรุงพารามิเตอร์ข้อตั้ง (Antecedent Parameter) และพารามิเตอร์ข้อตาม (Consequent Parameter) ซึ่งใช้ Sugeno fuzzy model เป็นระบบอนุมาน (Inference System)

2.4 ระบบอนุมานนิวโรฟัซซี

2.4.1 ระบบอุมานฟัซซี (Fuzzy Inference Systems; FIS)

ระบบอนุมานฟัซซี (Fuzzy Inference Systems; FIS) หรือที่รู้จักในรูปของ Fuzzy rule based system โดยบล็อกไดอะแกรมจะประกอบด้วย 4 ส่วนสำคัญ คือ

- Fuzzification Interface
- Knowledge Based (KB)
- Decision – Making Unit
- Defuzzication Interface



รูปที่ 2.17 โครงสร้างพื้นฐานการประมวลผลของฟัซซี่ลอจิก

2.4.1.1 ตัวฟัซซีฟายเยอร์ (Fuzzification Interface)

ส่วนนี้มีหน้าที่ คือวัดค่าที่ได้จริงของตัวแปรอินพุท (Input Variable) จากนั้นจะทำการปรับอัตราส่วน (Scale Mapping) ให้กับค่าที่ได้ ซึ่งจะทำให้ช่วงค่าของตัวแปรอินพุทอยู่ในช่วงที่เป็นไปได้ทั้งหมด (Universe of discourse; U) ที่ต้องการ แล้วจึงเปลี่ยนข้อมูลทางอินพุทเหล่านั้นไปเป็นตัวแปรทางภาษาที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้เราสามารถเข้าใจข้อมูลนั้นเป็นแบบฟัซซีเซทได้

2.4.1.2 กฎเงื่อนไขพื้นฐาน (Knowledge Based)

เป็นส่วนของฐานความรู้ ซึ่งประกอบด้วย

ก. Database หรือ ฐานข้อมูล ซึ่งภายในตัวมันจะมีฟังก์ชันต่างๆที่จำเป็นสำหรับการกำหนดกฎที่ใช้ในการควบคุมและจัดการfuzzy data ใน Fuzzy Inference System (FIS)

ข. Rule Base เป็นตัวกำหนดเป้าหมายและวิธีดำเนินการในการควบคุม

2.4.1.3 Decision–Making Unit

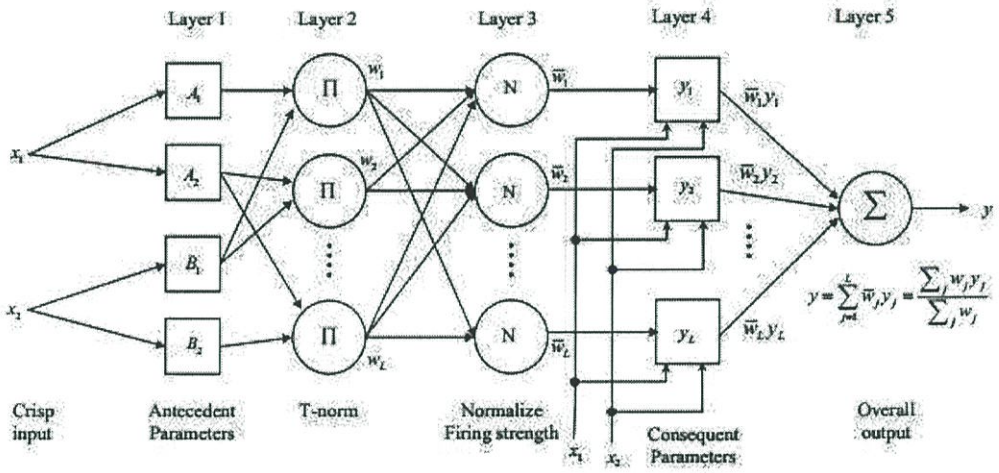
ส่วนนี้นับว่าเป็นส่วนที่สำคัญของ FIS ซึ่งมีความสามารถที่จะจำลองการคิด และการตัดสินใจได้ใกล้เคียงกับมนุษย์ โดยอาศัยกฎต่างๆที่อยู่ใน Knowledge Based

2.4.1.4 ตัวดีฟัซซีฟายเออร์ (Defuzzification Interface)

ส่วนนี้จะทำหน้าที่กลับกันกับ Fuzzification Interface คือจะทำการปรับอัตราส่วนค่าตัวแปรเอาท์พุท ให้อยู่ในช่วง crisp set ใน Universe of discourse (U) ที่ต้องการจากนั้นจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณซึ่งเป็นแบบ Fuzzy ไปเป็น Non-fuzzy output แล้วส่งออกไปควบคุมระบบตามที่ได้ทำการออกแบบไว้

2.4.2 ระบบอนุมานนิวโรฟัซซี (Adaptive neuro fuzzy inference system; ANFIS)

เป็นระบบที่สามารถสร้างกฎของฟัซซีด้วยการใช้เพียงแค่อินพุทและเอาท์พุท มีโครงสร้างในการทำงานแบ่งเป็น 5 ชั้น (layer)



รูปที่ 2.18 สถาปัตยกรรมของระบบอนุมานฟัซซีบนฐานโครงข่ายที่ปรับตัวได้

โดยโนดที่เป็นสี่เหลี่ยมหมายถึงโนดที่มีพารามิเตอร์ปรับได้ ส่วนโนดที่เป็นวงกลมจะไม่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้

โดยจะนำกฎ แบบถ้า-ดังนั้น (If-Then Rule) ซึ่งจะตีความออกมาในรูปแบบภาษาของมนุษย์ คือ ถ้าข้อตั้ง ดังนั้นข้อตาม จากรูปที่ 2.14 แสดงตัวอย่างโครงสร้างอย่างง่ายของ ANFIS

ซึ่งมี 2 อินพุท แต่ละอินพุทแบ่งเป็น 2 ฟัซซีเซต เป็นข้อตั้ง คือฟัซซีเซตที่ 1 มีพารามิเตอร์เป็น A_1 และ A_2 และฟัซซีที่ 2 มีพารามิเตอร์เป็น B_1 และ B_2 ส่วนข้อตามมีพารามิเตอร์เป็น r_{j0}, r_{j1} และ r_{j2} มีตัวเชื่อมตรรกะคือ AND ตัวอนุมานคือ THEN และมีกฎ (Rule) จำนวน L กฎ ดังนี้

Rule_1: IF x_1 is A_1 AND x_2 is B_1 THEN $y_1 = r_{10} + r_{11}x_1 + r_{12}x_2$

Rule_2: IF x_1 is A_2 AND x_2 is B_1 THEN $y_2 = r_{20} + r_{21}x_1 + r_{22}x_2$

:

Rule_L: IF x_1 is A_1 AND x_2 is B_2 THEN $y_2 = r_{L0} + r_{L1}x_1 + r_{L2}x_2$

โครงสร้างหลักของ ANFIS แบ่งเป็น 5 ชั้นได้แก่

2.4.2.1 Layer 1: Antecedent Parameters

ชั้นพารามิเตอร์ข้อตั้ง พารามิเตอร์ของชั้นนี้สามารถปรับได้ ทุกโนด j ของชั้นนี้จะเป็นสี่เหลี่ยม โดยมีฟังก์ชันโนด เป็นที่ทำการหาค่าฟัซซีจาก Crisp input(x) ผ่านทางฟังก์ชันความเป็นสมาชิก $\mu_{A_i}(x)$

$$O_j^1 = \mu_{A_i}(x) \tag{2.29}$$

เมื่อ O_j^1 เป็นค่าความเป็นสมาชิกของพจน์ภาษา A_i โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิก $\mu_{A_i}(x)$ เช่น ลักษณะฟังก์ชันรูประฆังคว่ำ

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1+\left(\frac{x-c_i}{a_i}\right)^{2b_i}} \tag{2.30}$$

2.4.2.2 Layer 2: T-norm Operator

ชั้นการเชื่อมโยงค่าฟัซซีจากแต่ละมิติ ฟังก์ชันของโนดนี้เป็นแบบวงกลม หมายถึงไม่สามารถปรับพารามิเตอร์ โดยมีสัญลักษณ์เป็นเครื่องหมาย π เป็นชั้นที่ทำการเชื่อมโยงค่าฟัซซีจากแต่ละมิติหรือฟัซซีเซ็ท โดยคูณสัญญาณที่เป็นฟัซซีเข้าด้วยกันและส่งค่าฟัซซีผลคูณเป็นสัญญาณออก

$$w_j = \mu_{j1}(x_1) \times \mu_{j2}(x_2), \quad j = 1 \ldots L \tag{2.31}$$

เมื่อ w_j เป็นค่า firing strength จากกฎแต่ละข้อ และ $\mu_{ji}(x_i)$ เป็นค่าฟัซซีจากเซ็ทที่ i ของกฎข้อที่ j

2.4.2.3 Layer 3: Normalize Firing Strength

ฟังก์ชันของโนดนี้เป็นแบบวงกลม สัญลักษณ์ของโนดเป็นเครื่องหมาย N หมายถึงการทำ Normalize firing strength เป็นขั้นทำค่าฟัซซีผลรวมจากข้อตั้งทุกกฎให้เป็นหนึ่ง โดยค่าฟัซซี j จากกฎแต่ละข้อจะถูกหารด้วยผลรวมของค่าฟัซซีจากทุกกฎ

$$\overline{w_j} = \frac{w_j}{w_1+w_2+\cdots+w_L} \quad , \quad j = 1 \ldots L \tag{2.32}$$

2.4.2.4 Layer 4: Consequent Parameters

เป็นชั้นของพารามิเตอร์ข้อตาม ฟังก์ชันของโนดนี้เป็นแบบสี่เหลี่ยม มีพารามิเตอร์ r_{j0}, r_{j1} และ r_{j2} สามารถปรับค่าได้ สำหรับค่าเอาต์พุตจากชั้นนี้หาได้จาก

$$O_j^4 = \overline{w}_j y_j = \overline{w}_j (r_{j0} + r_{j1}x_1 + r_{j2}x_2) \tag{2.33}$$

2.4.2.5 Layer 5: Overall Output

เป็นชั้นเอาต์พุตของโครงข่าย มีสัญลักษณ์ของโนดเป็นเครื่องหมาย Σ ฟังก์ชันของโนดนี้เป็นแบบวงกลม พารามิเตอร์ของโนดนี้จะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ทำหน้าที่รวมสัญญาณเข้าด้วยกันเพื่อออกเป็นเอาต์พุตซึ่งหาได้จาก

$$O_1^5 = \overline{w}^T y = \sum_{j=1}^{L} \overline{w}_j y_j = \frac{\sum_j w_j y_j}{\sum_j w_j} \tag{2.34}$$

เมื่อ $\overline{w}^T = [\overline{w}_1 \overline{w}_2 \ldots \overline{w}_L]$ เป็นค่าฟัซซีที่ผ่านวิธีนอมอลไลซ์จากกฎข้อ 1 ถึง L และ $y^T = [y_1 y_2 \ldots y_L]$ เป็นส่วนข้อตามของกฎข้อ 1 ถึง L

2.4.3 การเรียนรู้ของ ANFIS

การเรียนรู้แบบผสมผสาน (Hybrid Learning) เป็นการผสมผสานก่ารเรียนรู้ระหว่างวิธีปรับตามความลาดชัน (Gradient Method) คือการปรับด้วยวิธีความลาดชันสูงสุดของค่าที่ผิดพลาดในส่วนของการปรับพารามิเตอร์ข้อตั้ง และวิธีประเมินกำลังสองต่ำสุด (Least Squares Estimate) วิธีปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยการประเมินค่ากำลังสองต่ำสุดในส่วนการปรับพารามิเตอร์ข้อตามในแต่ละรอบของการเรียนรู้แบบผสมผสานนี้แยกเป็นการคำนวณไปข้างหน้า (Forward Pass) และการคำนวณย้อนหลัง (Backward Pass)

ตารางที่ 2.2 สรุปวิธีการเรียนรู้แบบผสมผสานใน ANFIS

	การคำนวณไปข้างหน้า	**การคำนวณย้อนกลับ**
พารามิเตอร์ของข้อตั้ง	ถูกทำให้คงที่	ปรับด้วยวิธีความลาดชันที่สุด
พารามิเตอร์ของข้อตาม	ปรับด้วยวิธีประเมินกำลังสองต่ำสุด	ถูกทำให้คงที่
สัญญาณ	เอาท์พุทของโนด	อัตราผิดพลาด

บทที่ 3
การประเมินหาเสถียรภาพชั่วครู่โดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (ANFIS)

3.1 การประเมินหาเสถียรภาพชั่วครู่โดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (ANFIS)

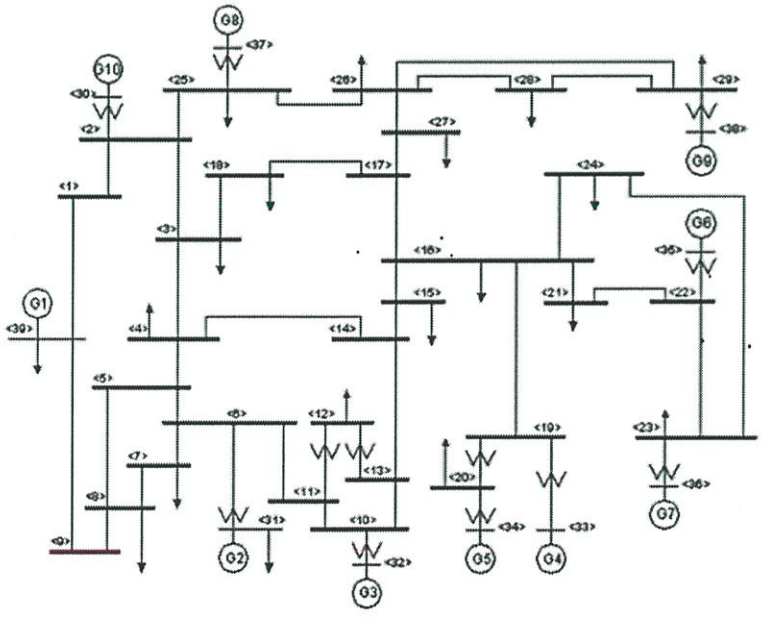
เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังเป็นระบบที่มีการเชื่อมโยงและมีขนาดใหญ่มาก การหาค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร (Critical Clearing Time) จึงทำโดยการจำลองในโปรแกรมและนำแบบจำลองระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (ANFIS) มาช่วยในทางด้านการประเมินหาเสถียรภาพชั่วครู่ ซึ่งแบบจำลองระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (ANFIS) จะสามารถหาความสัมพันธ์ของค่าอินพุตที่ป้อนเข้าไปและค่าเอาท์พุตที่ออกมา ซึ่งจะมีประโยชน์มากต่อการประเมินหาค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบ

3.2 การออกแบบแบบจำลองระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (ANFIS)

ในการออกแบบการจำลองแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือการจำลองระบบ New England และระบบ WSCC ในโปรแกรม Power World เพื่อหาค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร และในส่วนที่สองคือการนำผลที่ได้จากการจำลองในโปรแกรมมาเปรียบเทียบ โดยโปรแกรม MatLab โดยใช้ระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System หรือ ANFIS)

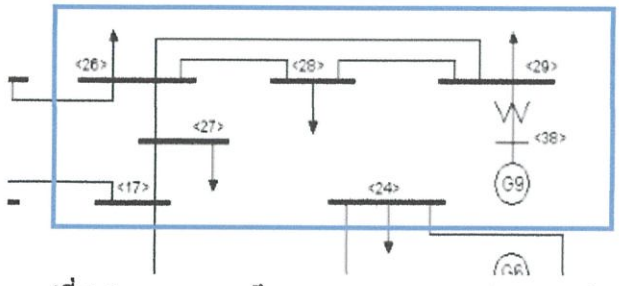
3.2.1 การจำลองระบบ New England ในโปรแกรม Power World

ระบบ New England เป็นระบบไฟฟ้ากำลัง 39บัส และมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า10 เครื่อง



รูปที่ 3.1 วันไลน์ไดอะแกรมของระบบ New England

สำหรับโครงงานนี้ทำการทดสอบในช่วงบัสที่ 17, 26, 27, 28, 29, 38 และไลน์ 17-27, 26-27, 26-28, 26-29, 28-29 โดยทำการปรับโหลดที่ bus 26, 27, 28, 29 โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้เป็นแบบ Classical Model



รูปที่ 3.2 ขอบเขตการศึกษาของระบบทดสอบ New England

โดยมีพารามิเตอร์ของสายส่งและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังนี้

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้ากำลังในระบบทดสอบ New England

สายส่งไฟฟ้า	พารามิเตอร์ (P.U. base of 100MVA)	
	R	X
Line 17 – 27	0.0013	j0.0173
Line 26 – 27	0.0014	j0.0147
Line 26 – 28	0.0043	j0.0474
Line 26 - 29	0.0057	j0.0625
Line 28 – 29	0.0014	j0.0151

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

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

การจำลองทำโดยปรับค่า กำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ของบัส 26, 27, 28 และ 29 โดยมีเงื่อนไขให้มีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ไม่เปลี่ยนแปลง จากนั้นหาค่าเวลาวิกฤต ในการกำจัดกระแสลัดวงจรที่บัสและที่ความยาวต่างๆของสายส่ง โดยประเภทของการลัดวงจร กำหนดให้เป็นการลัดวงจรแบบ Balanced 3 Phase

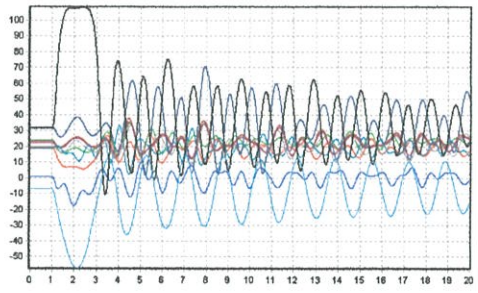
ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างการปรับค่าในการจำลองระบบ New England

ที่	W 26 (MW)	Q 26 (MVAR)	W 27 (MW)	Q 27 (MVAR)	W 28 (MW)	Q 28 (MVAR)	W 29 (MW)	Q 29 (MVAR)	Location	CCT (Second)
1	145.1978	17.7580	314.8204	84.5869	200.4111	26.8511	290.0051	27.5172	Bus 17	0.1855
									Line 28 - 29 (75%)	0.1432
									Line 26 - 28 (75%)	0.1722
									Line 28 - 29 (25%)	0.1547
2	153.6916	18.7968	324.7581	87.2570	216.8926	29.0594	317.6298	30.1384	Bus 28	0.1630
									Line 26 - 27 (75%)	0.2086
									Line 26 - 28 (75%)	0.1760
									Line 26 - 29 (75%)	0.1650
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
80	148.7320	18.1902	224.9202	60.4322	166.3933	22.2934	269.2676	25.5495	bus28	0.1548
									Line 26 - 27 (50%)	0.1780
									Line 17 - 27 (50%)	0.2000
									Line 26 - 28 (50%)	0.1726

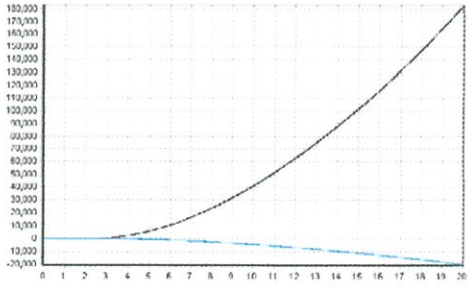
โดย

- W 26, W 27, W 28 และ W 29 คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 26, 27, 28 และ 29 ตามลำดับ
- Q 26, Q 27, Q 28 และ Q 29 คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัส 26, 27, 28 และ 29 ตามลำดับ
- Location คือ ตำแหน่งเกิดการลัดวงจร
- CCT คือ ค่าเวลาวิกฤตกำกำจัดกระแสลัดวงจร

การจำลองในโปรแกรมนั้นจะพิจารณาถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมโรเตอร์กับเวลา ถ้าระบบยังมีเสถียรภาพดังรูปที่ 3.3ก ให้เพิ่มเวลาการกำจัดกระแสลัดวงจร จนกว่าระบบสูญเสียเสถียรภาพดังรูปที่ 3.3ข ค่าเวลาก่อนเกิดการสูญเสียเสถียรภาพคือค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร



ก.

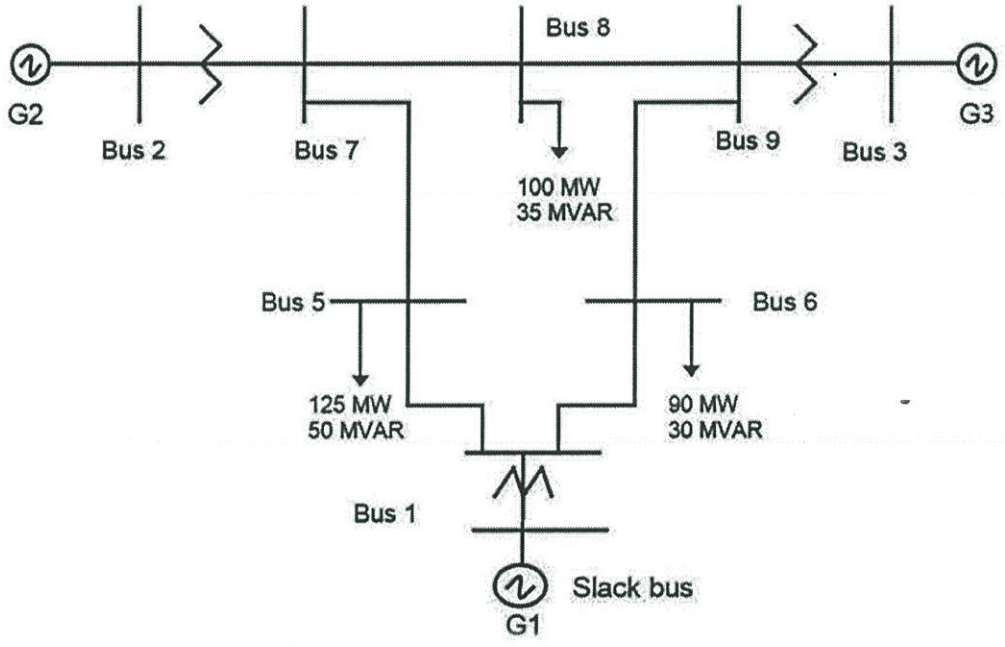


ข.

รูปที่ 3.3 กราฟแสดงมุมโรเตอร์กับเวลา ก. เมื่อระบบมีเสถียรภาพ ข. เมื่อระบบสูญเสียเสถียรภาพ

3.2.2 การจำลองระบบ WSCC ในโปรแกรม Power World

เป็นระบบไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เครื่อง โดยต่อกับบัสที่ 1, 2 และ 3 ส่วนโหลดต่อกับบัสที่ 5, 6 และ 8 โดยมีทั้งหมด 9 บัสในระบบ ในการทดสองจะทดสอบทั้งระบบ โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบ Detail Model



รูปที่ 3.4 วันไลน์ไดอะแกรมของระบบ WSCC

โดยมีพารามิเตอร์ของสายส่งและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังนี้

ตาราง 3.4 พารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้ากำลังในระบบทดสอบ WSCC

Line	Shunt Charging (B)	Reactance (X)	Resistance (R)
line 4 - 5	0.176	0.085	0.01
line 4 - 6	0.158	0.092	0.017
line 6 - 9	0.358	0.17	0.039
line 5 - 7	0.306	0.161	0.032
line 7 - 8	0.149	0.072	0.0085
line 8 - 9	0.209	0.1008	0.0119
line 1 - 4	0	0.0576	0
line 3 - 9	0	0.0586	0
line 2 - 7	0	0.0625	0

ตาราง 3.5 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	พารามิเตอร์										
	H	Ra	x'd	x'q	xd	xq	T'do	T'qo	xl	T''do	T''qo
1	4.7280	0	0.3040	0.4845	0.7300	0.4845	8.9600	0.3100	0.1500	0.030	0.050
2	2.5600	0	0.2995	0.4922	2.2395	2.1610	6.000	0.5350	0.1500	0.030	0.050
3	3.0100	0	0.1813	0.2500	1.3125	1.2578	5.8900	0.6000	0.1200	0.030	0.050

การจำลองทำโดยปรับค่า กำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ของทุกบัส โดยมีเงื่อนไขให้มีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ไม่เปลี่ยนแปลง จากนั้นหาค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรที่บัสและที่ความยาวต่างๆของสายส่ง โดยประเภทของการลัดวงจรกำหนดให้เป็นการลัดวงจรแบบ Balanced 3 Phase

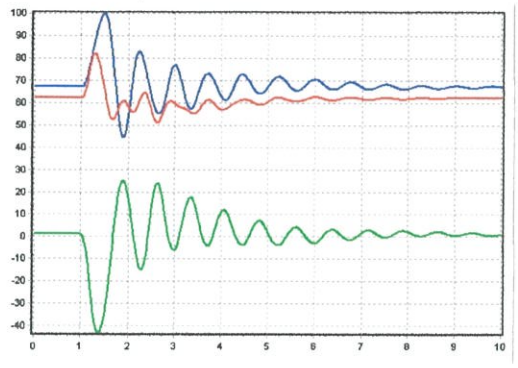
ตารางที่ 3.6 ตัวอย่างการปรับค่าในการจำลองระบบ WSCC

ที่	W 5 (MW)	Q 5 (MVAR)	W 6 (MW)	Q 6 (MVAR)	W 8 (MW)	Q 8 (MVAR)	Location	CCT (Second)
1	100.5542	40.9923	72.0093	24.0672	80.0020	19.4699	Bus 1	0.1997
							Line 5 - 7 (75%)	0.1841
							Line 7 - 8 (25%)	0.1631
							Line 4 - 5 (50%)	0.2218
2	111.4469	45.4329	96.6922	32.3169	100.2864	24.4065	Bus 7	0.1703
							Line 6 - 9 (25%)	0.3121
							Line 7 - 8 (75%)	0.2200
							Line 4 - 6 (50%)	0.2885
...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...
100	110.3764	44.9965	73.0284	24.4079	81.9283	19.9387	Bus 5	0.2445
							Line 9 - 8 (75%)	0.1958
							Line 5 - 7 (50%)	0.2193
							Line 4 - 5 (50%)	0.2321

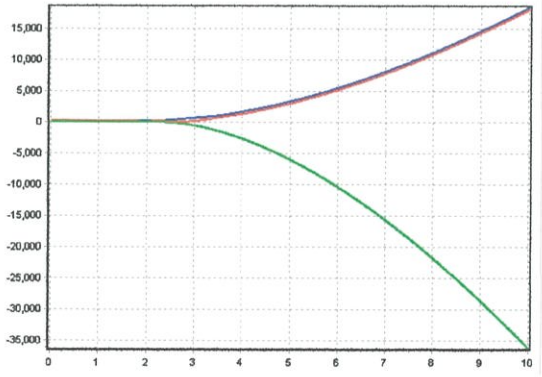
โดย

- W 5, W 6 และ W 8 คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 5,6 และ 8 ตามลำดับ
- Q 5, Q 6 และ Q 8 คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัส 5, 6, และ 8 ตามลำดับ
- Location คือ ตำแหน่งเกิดการลัดวงจร
- CCT คือ ค่าเวลาวิกฤตกำกำจัดกระแสลัดวงจร

การจำลองในโปรแกรมนั้นจะพิจารณาถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมโรเตอร์กับเวลา ถ้าระบบยังมีเสถียรภาพดังรูปที่ 3.5ก ให้เพิ่มเวลาการกำจัดกระแสลัดวงจร จนกว่าระบบสูญเสียเสถียรภาพดังรูปที่ 3.5ข ค่าเวลาก่อนเกิดการสูญเสียเสถียรภาพคือค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร



ก.



ข.

รูปที่ 3.5 กราฟแสดงมุมโรเตอร์กับเวลา ก. เมื่อระบบมีเสถียรภาพ ข. เมื่อระบบสูญเสียเสถียรภาพ

3.3 การใช้ระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System หรือ ANFIS)

หลังจากได้ค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Power World จะทำการทดสอบแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการโปรแกรม Power World โดยมีเงื่อนไขคือการกำหนดให้ค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์คงที่ จึงสามารถเลือกค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) หรือค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) มาเป็นอินพุตได้ โดยในโครงงานนี้เลือกเป็นกำลังไฟฟ้าจริง จากนั้นปรับจำนวนและชนิดของฟังก์ชันสมาชิกจนกว่าจะได้ค่า Root Mean Square Error เป็นที่พอใจ

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-F_i)^2}{n}} \qquad (3)$$

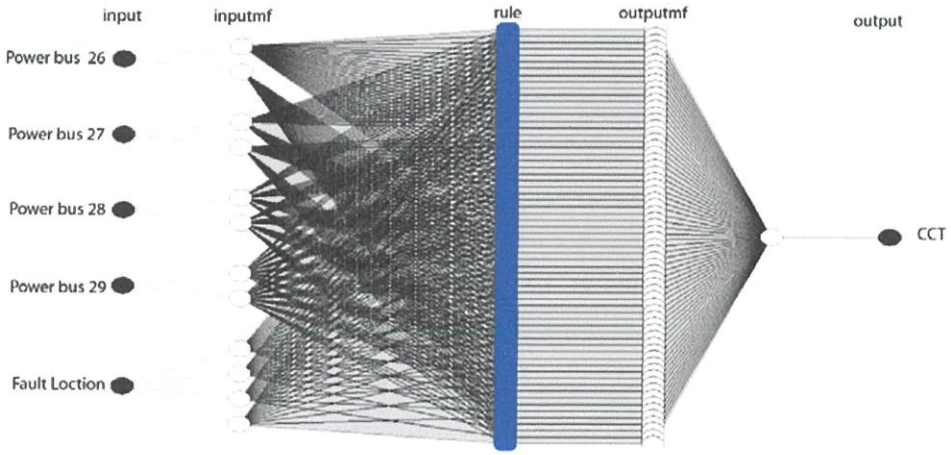
เมื่อ O_i คือ ค่าจริงที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม PowerWorld

F_i คือค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้ระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายปรับตัว

n คือจำนวนข้อมูล

3.3.1 โครงสร้างของระบบจำลองระบบ New England

โดยโครงสร้างของแบบจำลองเป็นดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างโครงสร้างของแบบจำลองที่ใช้

ข้อมูลที่ใช้มีทั้งสิ้น 375 ชุด โดยแบ่งออกเป็นชุดฝึกสอนและชุดทดสอบ ในอัตราส่วน 80:20 แบ่งเป็นชุดฝึกสอน 300 ชุด และชุดทดสอบ 75 ชุด โดยจะทำการทดสอบปรับเปลี่ยนจำนวนและชนิดของฟังก์ชันสมาชิก เพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสมกับข้อมูลที่ทดสอบ โดยกำหนดข้อมูลอินพุตและเอาท์พุต

ตารางที่ 3.7 ตัวอย่างค่าอินพุตและเอาท์พุตที่นำมาเป็นข้อมูลชุดทดสอบและข้อมูลชุดฝึกสอนของระบบทดสอบ New England

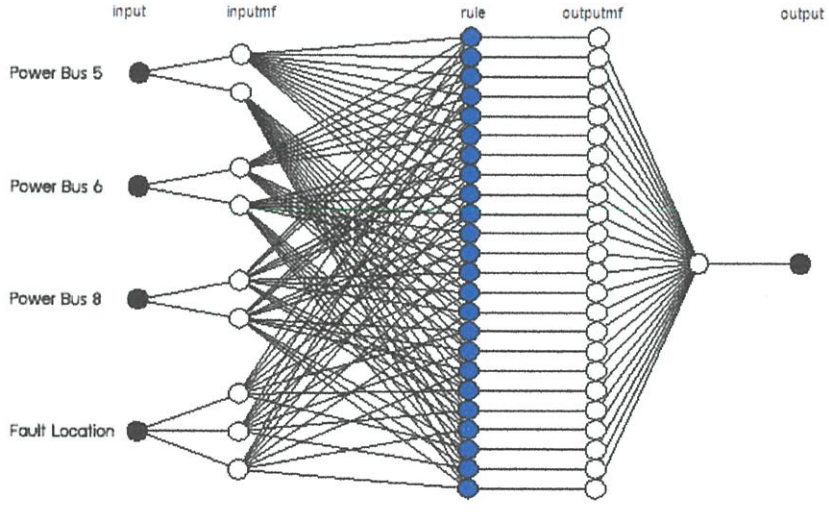
ที่	ชุดข้อมูล	อินพุต					เอาท์พุต
		กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 26 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 27 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 28 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 29 (MW)	ตำแหน่งเกิดการลัดวงจร	เวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร (Second)
1	ฝึกสอน	153.5337	317.6185	173.1783	311.1233	282975	0.1433
2		152.1932	268.1402	214.3084	262.6349	262600	0.1560
3		124.9082	288.9127	200.1864	272.5846	272700	0.2120
4		148.7320	224.9202	166.3933	269.2676	262850	0.1726
5		161.5916	226.2368	180.0765	258.6477	292900	0.1326
6		141.2994	272.6199	173.8012	233.5409	282925	0.1486
...		...	...	...	...	...	...
...		...	...	...	...	...	...
...		...	...	...	...	...	...
...		...	...	...	...	...	...
...		...	...	...	...	...	...
295		147.1584	248.2882	229.3117	233.0781	282950	0.1459
296		133.1374	303.9111	202.9089	243.4490	282800	0.1562
297		139.5712	273.4237	229.1606	241.2898	262775	0.1962
298		149.8659	267.9907	184.4603	227.7501	262975	0.1550
299		126.3045	271.9372	183.2034	250.5373	262750	0.1780
300		158.5580	244.2063	245.5595	282.6754	172750	0.2158
1	ทดสอบ	157.7331	259.8896	238.6367	326.6485	282800	0.1638
2		125.3813	306.6275	183.1708	331.0450	383800	0.1510
3		162.4319	239.1348	192.5753	314.8297	292900	0.1371
4		162.9217	246.9042	223.4976	295.5924	262775	0.2034
5		111.2012	291.7684	244.5407	247.8507	172725	0.2018
6		160.1777	261.5845	183.3421	297.5278	262850	0.1770
...		...	...	...	...	...	...
...		...	...	...	...	...	...
...		...	...	...	...	...	...
...		...	...	...	...	...	...
...		...	...	...	...	...	...
70		148.7320	224.9202	166.3933	269.2676	282800	0.1548
71		162.4319	239.1348	192.5753	314.8297	262925	0.1802
72		114.9647	323.3359	238.3628	332.8155	282925	0.1590
73		139.0508	250.3208	220.5157	245.7445	282950	0.1461
74		153.6916	324.7581	216.8926	317.6298	262875	0.1760
75		152.5308	263.4504	183.0716	257.1676	172725	0.1995

โดยค่าตำแหน่งเกิดการลัดวงจรคือดังนี้

262600 คือ บัสที่ 26
272700 คือ บัสที่ 27
282800 คือ บัสที่ 28
292900 คือ บัสที่ 29
262725 คือ Line 26 – Line 27 ที่ความยาว 25%
262750 คือ Line 26 – Line 27 ที่ความยาว 50%
262775 คือ Line 26 – Line 27 ที่ความยาว 75%
262825 คือ Line 26 – Line 28 ที่ความยาว 25%
262850 คือ Line 26 – Line 28 ที่ความยาว 50%
262875 คือ Line 26 – Line 28 ที่ความยาว 75%
282925 คือ Line 28 – Line 29 ที่ความยาว 25%
282950 คือ Line 28 – Line 29 ที่ความยาว 50%
282975 คือ Line 28 – Line 29 ที่ความยาว 75%
172725 คือ Line 17 – Line 27 ที่ความยาว 25%
172750 คือ Line 17 – Line 27 ที่ความยาว 50%
172775 คือ Line 17 – Line 27 ที่ความยาว 75%

3.3.2 โครงสร้างของระบบจำลองระบบ WSCC

โดยโครงสร้างของแบบจำลองเป็นดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างโครงสร้างของแบบจำลองที่ใช้

ข้อมูลที่ใช้มีทั้งสิ้น 400 ชุด โดยแบ่งออกเป็นชุดฝึกสอนและชุดทดสอบ ในอัตราส่วน 80:20 แบ่งเป็นชุดฝึกสอน 320 ชุด และชุดทดสอบ 80 ชุด โดยจะทำการทดสอบปรับเปลี่ยนจำนวนและชนิดของฟังก์ชันสมาชิก เพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสมกับข้อมูลที่ทดสอบ โดยกำหนดข้อมูลอินพุตและเอาท์พุต

ตารางที่ 3.8 ตัวอย่างค่าอินพุตและเอาท์พุตที่นำมาเป็นข้อมูลชุดทดสอบและข้อมูลชุดฝึกสอนของระบบทดสอบ WSCC

ที่	ชุดข้อมูล	อินพุต				เอาท์พุต
		กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 5 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 6 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 8 (MW)	ตำแหน่งเกิดการลัดวงจร	เวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร (Second)
1	ฝึกสอน	146.3095	91.3903	119.9843	3925	0.2224
2		109.4446	106.3084	90.0023	4650	0.2818
3		130.0093	108.0000	92.0192	5750	0.2650
4		130.0093	108.0000	92.0192	4625	0.2850
5		147.5982	89.3645	94.9283	5775	0.2301
6		115.3982	76.2843	83.0405	8950	0.2118
...		...	...	...	...	...
...		...	...	...	...	...
...		...	...	...	...	...
...		...	...	...	...	...
315		159.0000	101.9293	103.0202	6600	0.3869
316		121.0384	104.0294	96.0231	8950	0.2417
317		114.2734	95.2974	84.9202	8925	0.2261
318		149.3984	100.3094	99.2023	8950	0.2603
319		146.0034	103.0582	82.0172	4650	0.3049
320		124.0002	87.9238	84.2093	6600	0.2947
1	ทดสอบ	117.4058	78.2943	83.2183	4575	0.2511
2		126.2093	97.3874	94.2923	1450	0.2619
3		142.3993	72.9909	93.0293	4625	0.2656
4		138.2093	90.7474	119.0308	5725	0.3198
5		136.9942	96.8365	103.0293	6600	0.3489
6		140.7654	93.9304	107.1823	8800	0.2529
...		...	...	...	...	...
...		...	...	...	...	...
...		...	...	...	...	...
...		...	...	...	...	...
75		122.4994	104.3994	101.0736	3300	0.2107
76		100.5542	72.0093	80.0020	7825	0.1631
77		130.9934	99.4653	99.0012	6950	0.3090
78		139.9822	84.2911	107.2023	3300	0.2115
79		119.2094	107.9374	91.0832	4525	0.2657
80		113.7465	85.0923	102.0193	5775	0.2128

โดยค่าตำแหน่งเกิดการลัดวงจรคือดังนี้

3300 คือ บัสที่ 3
6600 คือ บัสที่ 6
8800 คือ บัสที่ 8
1450 คือ Line 1 – Line 4 ที่ความยาว 50%
3925 คือ Line 3 – Line 9 ที่ความยาว 25%
4525 คือ Line 4 – Line 5 ที่ความยาว 25%
4575 คือ Line 4 – Line 5 ที่ความยาว 75%
4650 คือ Line 4 – Line 6 ที่ความยาว 50%
5725 คือ Line 5 – Line 7 ที่ความยาว 25%
5750 คือ Line 5 – Line 7 ที่ความยาว 50%
5775 คือ Line 5 – Line 7 ที่ความยาว 75%
6950 คือ Line 6 – Line 9 ที่ความยาว 50%
7825 คือ Line 7 – Line 8 ที่ความยาว 25%
8925 คือ Line 8 – Line 9 ที่ความยาว 25%
8950 คือ Line 8 – Line 9 ที่ความยาว 50%

3.4 การฝึกสอนแบบจำลองระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System หรือ ANFIS)

3.4.1 การหารูปแบบการป้อนข้อมูลเข้าสู่แบบจำลอง

การหารูปแบบที่เหมาะสมในการป้อนข้อมูลเข้าสู่แบบจำลองนั้น จะพิจารณาจากค่า Root Mean Square Error ว่ารูปแบบไหนให้ค่า Root Mean Square Error ต่ำสุดในจำนวนและชนิดของฟังก์ชันสมาชิกเดียวกัน

3.4.2 จำนวนฟังก์ชันสมาชิก (Number of Membership Function) และชนิดของฟังก์ชัน (Membership Function Type)

จำนวนฟังก์ชันสมาชิก (Membership function) และชนิดของฟังก์ชัน (Membership Function Type) ยิ่งขึ้น โดยจำนวนของฟังก์ชันสมาชิกที่เหมาะสมจะช่วยผลการพยากรณ์ที่น่าพอใจ แต่สำหรับการศึกษาครั้งนี้ ได้เลือกใช้จำนวนของฟังก์ชันสมาชิกตั้งแต่ 2-3 และชนิดของฟังก์ชัน 8 ชนิดดังนี้

1. ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม (Triangular membership function)
2. ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal membership function)
3. ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบเกาส์ (Gaussian membership function)
4. ฟังก์ชั้นความเป็นสมาชิกแบบเกาส์ 2 (Gussian Combination membership function)
5. ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบระฆังคว่ำ (Generalized membership function)
6. ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบพาย (Pi membership function)
7. ฟังก์ชั้นความเป็นสมาชิกแบบแบบผลต่างของซิกมอยด์ (Difference between two Sigmoidal membership function)
8. ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบผลคูณของฟังก์ชันซิกมอยด์ (Product of two sigmoidal membership function)

3.4.3 การเปรียบเทียบผลเพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมกับแบบจำลอง

เมื่อได้ทำการฝึกสอนแบบจำลองตามวิธีการดังกล่าวข้างต้น และสิ้นสุดการฝึกสอนในแต่ละโครงสร้างก็จะทำการบันทึกค่า Root Mean Square Error นำไปเปรียบเทียบกันแต่ละโครงสร้างของแบบจำลอง เพื่อพิจารณาเลือกโครงสร้างของแบบจำลองที่เหมาะสม โดยดูจากค่า Root Mean Square Error ของชุดทดสอบที่ให้ค่าต่ำที่สุด เพื่อนำโครงสร้างที่มีความเหมาะสมนั้นไปใช้ในประเมินค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรต่อไป

3.5 สรุปขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการฝึกสอนและทดสอบของระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (ANFIS) สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จำลองระบบ New England และ WSCC ในโปรแกรม Power World เพื่อทำการหาค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร

2. ออกแบบชุดข้อมูลที่จะใช้เป็นชุดฝึกสอนและชุดทดสอบ

3. เลือกจำนวนฟังก์ชันสมาชิกและชนิดของฟังก์ชันสมาชิก

4. ทดสอบข้อมูล โดยจะทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบของการนำข้อมูลเข้า, จำนวนฟังก์ชันสมาชิก และชนิดของฟังก์ชันสมาชิก

5. กำหนดรอบการฝึกสอน โดยให้แต่ละโครงสร้างทำการฝึกสอนจำนวน 100 รอบต่อโครงสร้าง เพื่อเปรียบเทียบค่า Root Mean Square Error ของชุดทดสอบที่ใช้ในแต่ละโครงสร้าง

6. เก็บบันทึกค่าต่างๆ ดังนี้

- ค่า Root Mean Square Error ของชุดฝึกสอนและชุดทดสอบ
- จำนวนของฟังก์ชันสมาชิก (Numbers of Membership Function) และชนิดของฟังก์ชันสมาชิก (Type of Membership Function)

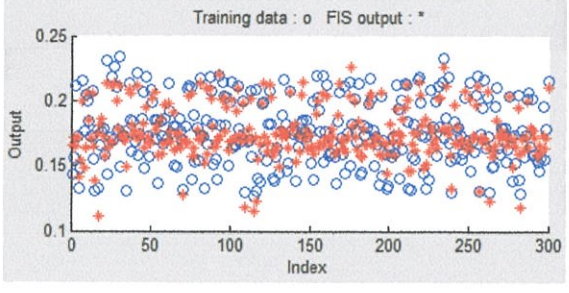
7. ทำการทดลองและเก็บข้อมูล

8. ทำการออกแบบ Graphical User Interface (GUI) เพื่อสร้างโมเดลในการแสดงผล

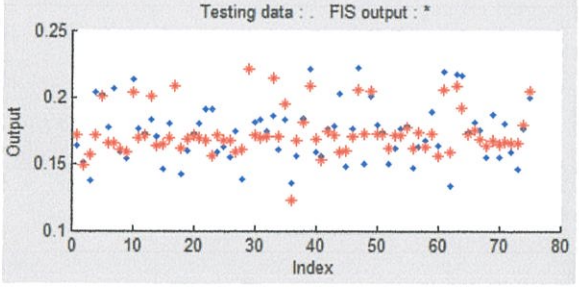
9. สรุปผล

บทที่ 4
ผลการทดลอง

ในที่นี้ได้แบ่งการทดสองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการหาฟังก์ชั่นจำนวนสมาชิกของระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายที่ดีที่สุดโดยใช้รูปแบบฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม (trimf) และส่วนที่สองเป็นการหาฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิกที่ดีที่สุด โดยใช้จำนวนสมาชิกที่ได้ส่วนแรก ทำการทดลองทั้งระบบ New England และ ระบบ WSCC ด้วยกระบวนการทั้งสองเหมือนกัน



ก.



ข.

รูปที่ 4.1 ค่าความผิดพลาด ก. ค่าความผิดพลาดข้อมูลชุดฝึกสอน ข. ค่าความผิดพลาดข้อมูลชุดทดสอบ

4.1 การทดลองหาจำนวนสมาชิกของระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายที่ดีที่สุด

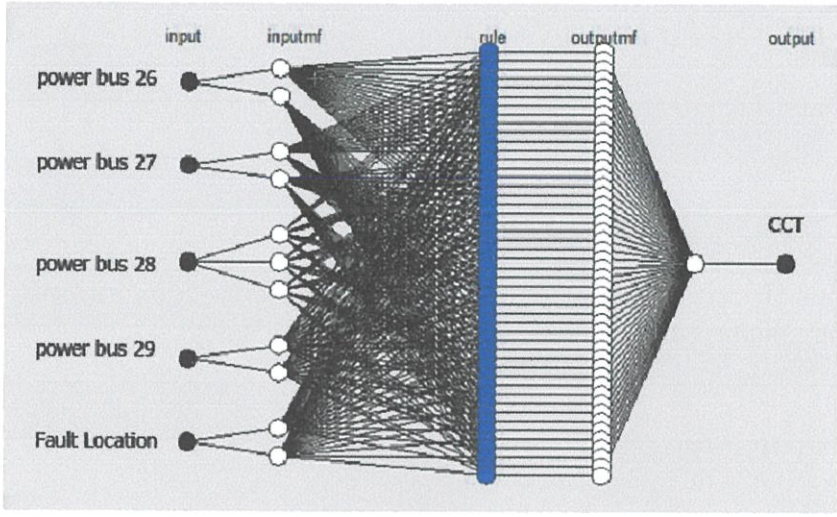
ในการหาจำนวนสมาชิกของระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายที่ดีที่สุดนั้น ระบบ New England ใช้จำนวนข้อมูลค่าเวลาวิกฤตการกำจัดกระแสลัดวงจร (Critical clearing time : CCT) ทั้งสิ้น 375 ข้อมูล ส่วนระบบ WSCC ใช้ข้อมูลทั้งหมด 400 ข้อมูล โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุดคือ ชุดฝึกสอนและชุดทดสอบ ใช้ข้อมูลทดสอบ 20% ของจำนวนข้อมูลทั้งหมด ในระบบ New England มีตำแหน่งที่ลัดวงจร คือ การลัดวงจรที่บัสที่มีที่มีค่าเวลาวิกฤตการกำจัดกระแสลัดวงจรสูงสุด 4 บัส และการลัดวงจรที่ความยาว 25 50 และ75 เปอร์เซ็นต์ของสายส่งกับหม้อแปลง และในระบบ WSCC มีตำแหน่งลัดวงจรคือ ที่บัสทั้งหมด 9 บัส และการลัดวงจรที่ความยาว 25 50 และ75 เปอร์เซ็นต์ของสายส่งกับหม้อแปลง ซึ่งการพิจาณาถึงโครงสร้างที่ดีที่สุดนี้ สามารถพิจารณาได้จากค่าความผิดพลาด โดยในการทดลองนี้จะใช้ค่าความผิดพลาดแบบ RMSE (Root Mean Square Error)

ค่าความผิดพลาดแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งโครงสร้าง ANFIS ที่แสดงในตารางเป็นจำนวนโนดในชั้นที่ 1 โดยมีการเรียงลำดับข้อมูลดังนี้ กำลังไฟฟ้าจริง ตำแหน่งโหลดและตำแหน่งลัดวงจร

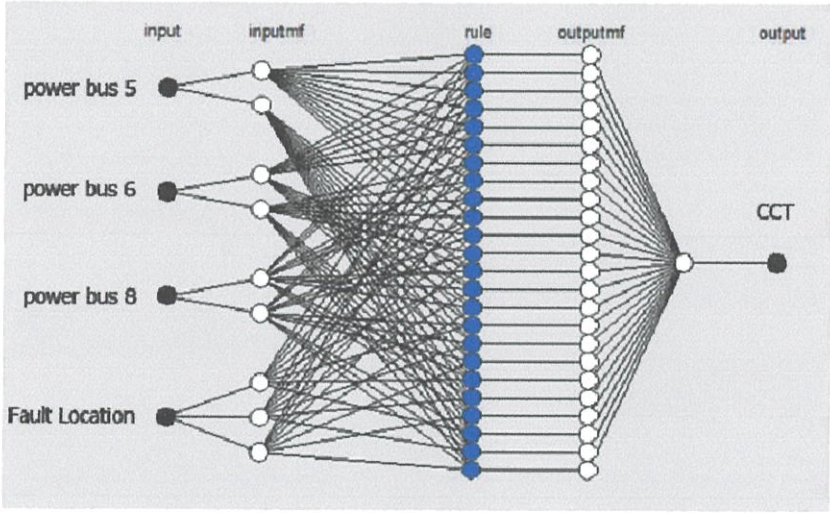
ตารางที่ 4.1 ค่าความผิดพลาด RMSE ในจำนวนรอบการฝึกต่างๆ ระบบ New England และระบบ WSCC

ระบบ New England		ระบบ WSCC	
จำนวนสมาชิกของระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายที่ดีที่สุด	error test (RMSE)	จำนวนสมาชิกของระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายที่ดีที่สุด	error test (RMSE)
2 2 2 2 2	1.4883	2 2 2 2	4.3942
3 2 2 2 2	1.4998	3 3 3 3	4.9602
2 3 2 2 2	1.4927	3 2 3 3	3.7748
2 2 3 2 2	1.4759	3 2 2 2	4.7350
2 2 2 3 2	1.8955	2 3 2 2	4.9565
2 2 2 2 3	6.5620	2 2 3 2	4.816
3 3 2 2 2	2.6030	2 2 2 3	3.5235
3 2 3 2 2	2.5431	3 3 2 2	5.4379
3 3 3 2 2	7.7827	2 3 3 2	5.2296
3 3 2 3 2	8.1245	2 3 2 3	3.9125
3 3 2 2 3	12.8520	2 2 3 3	3.8355
3 3 3 3 3	8.5237	3 2 3 3	3.7752
4 2 2 2 2	2.6788	2 3 3 3	4.3928
2 4 2 2 2	1.7392	4 2 2 2	4.8621
2 2 4 2 2	1.6391	2 4 2 2	5.4024
2 2 2 4 2	2.7885	2 2 2 4	3.5053
2 2 2 2 4	6.5748	4 4 2 2	6.0371
4 4 2 2 2	7.6382	4 2 4 2	5.9376
4 2 4 2 2	7.8306	4 2 2 4	5.8920
4 4 4 2 2	8.6591	4 4 2 4	10.842

จากตาราง โครงสร้าง 2 2 3 2 2 ของระบบ New England เป็นโครงสร้างที่มีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด ส่วนโครงสร้าง 2 2 2 3 และ 3 2 3 3 ของระบบ WSCC มีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดและมีใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาถึงขนาดโครงสร้างแล้ว จะได้ว่าโครงสร้าง 2 2 2 3 เป็นโครงสร้างที่ดีที่สุดของระบบ WSCC โดยมีลักษณะดังรูป



ก.



ข.

รูปที่ 4.2 โครงสร้างระบบอนุมานนิวโรฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้ที่ดีที่สุดในการทดลอง
ก. ระบบ New England ข. ระบบ WSCC

4.2 การทดลองหาชนิดของสมาชิกของระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายที่ดีที่สุด

จากการทดลองหาจำนวนสมาชิกของระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายที่ดีที่สุด ได้โครงสร้างของระบบ New England เป็น 2 2 3 2 2 และ โครงสร้างของระบบ WSCC เป็น 2 2 2 3 นำมาหาชนิดของฟังก์ชั่น สมาชิกที่ดีที่สุด โดยระบบ New England และ WSCC ใช้จำนวนรอบในการทดสอบ 100 และ 400 รอบตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ค่าความผิดพลาดที่ฟังก์ชั่นสมาชิกชนิดต่างๆของระบบ New England และระบบ WSCC

ชนิดฟังก์ชั่นสมาชิก	RMSE(%) ของระบบ New England	RMSE(%) ของระบบ WSCC
trimf	1.4759	3.5256
trapmf	1.6224	3.2728
gbellmf	1.5241	2.9495
guassmf	1.5144	3.3701
guass2mf	1.6833	3.2851
gimf	1.7377	3.2222
dsigmf	1.7609	3.0593
psigmf	1.7609	3.0593

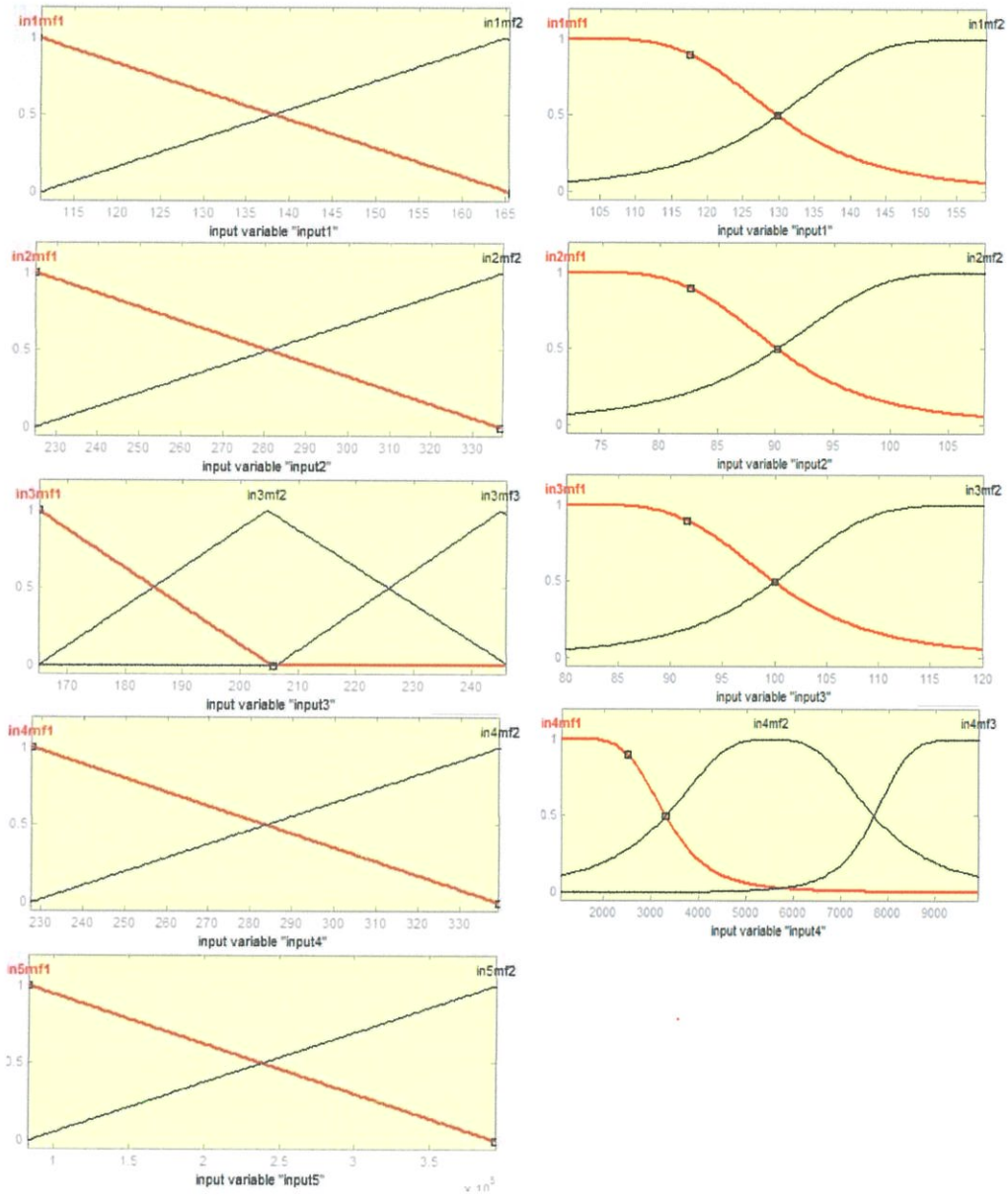
จะเห็นได้ว่าในชนิดฟังก์ชั่นสมาชิกที่ดีที่สุดของระบบ New England คือ ฟังก์ชั่นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม (Triangular membership function : trimf) ดังรูปที่ 4.3(ก.) มีรูปแบบสมการดังนี้

$$f(x;a,b,c)=\begin{cases} 0 & \text{for } x\le a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{for } a\le x\le b \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{for } b\le x\le c \\ 0 & \text{for } x>c \end{cases} \qquad (4.1)$$

และของระบบ WSCC คือฟังก์ชั่นสมาชิกแบบระฆังคว่ำ (Generalized bell curve membership function : gbell) ดังรูปที่ 4.3(ข.) มีรูปแบบสมการดังนี้

$$f(x;a,b,c)=\frac{1}{1+\left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}} \qquad (4.2)$$

ได้ค่า Root Mean Square Error (RMSE) เท่ากับ 1.4759% และ 2.9495% ตามลำดับ



ก. ข.

รูปที่ 4.3 กราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของโครงสร้างที่ดีที่สุด
ก. ระบบ New England ข. ระบบ WSCC

ตารางที่ 4.3 ผลของจำนวนข้อมูลอินพุตเมื่อเพิ่มข้อมูลชุดฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลชุดทดสอบชุดเดิมของระบบ ทดสอบ New England

จำนวนข้อมูลฝึกสอน		โครงสร้าง	จำนวนรอบของการฝึก	error train RMSE	error test RMSE
N	%				
150	40%	2 2 3 2 2 trimf	100	1.3389	2.1434
225	60%	2 2 3 2 2 trimf	100	1.5884	1.5305
300	80%	2 2 3 2 2 trimf	100	1.5979	1.4759
การเปลี่ยนคอลัมน์อินพุต		2 2 3 2 2 trimf	100	1.5978	1.476

ตารางที่ 4.4 ผลของจำนวนข้อมูลอินพุตเมื่อเพิ่มข้อมูลชุดฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลชุดทดสอบชุดเดิมของระบบทดสอบ WSCC

จำนวนข้อมูลฝึกสอน		โครงสร้าง	จำนวนรอบของการฝึก	error train RMSE	error test RMSE
n	%				
160	40%	2 2 2 3 gbell	400	3.5231	3.5222
240	60%	2 2 2 3 gbell	400	3.2457	3.2448
320	80%	2 2 2 3 gbell	400	3.31393	2.9495
การเปลี่ยนคอลัมน์อินพุต		2 2 2 3 gbell	400	3.314337	2.9642

จากตารางที่ 4.3 และ ตารางที่ 4.4 เมื่อจำนวนข้อมูลในการฝึกสอนเพิ่มมากขึ้นและใช้ข้อมูลชุดทดสอบชุดเดิม พบว่าค่าความผิดพลาดของชุดทดสอบนั้นมีค่าลดลง เนื่องจากข้อมูลที่ฝึกสอนนั้นมีความครอบคลุมของข้อมูลในพื้นที่ทดสอบเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.5 ตัวอย่างเมื่อเปรียบเทียบค่า CCT จริงที่ได้จากโปรแกรม Power world กับค่า CCT ที่คำนวณได้จากระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้ของระบบ New England

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 26	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 27	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 28	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 29	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT จาก Power World	CCT จาก MATLAB
157.7331	259.8896	238.6367	326.6485	บัสที่28	0.1638	0.1719
125.3813	306.6275	183.1708	331.045	บัสที่38	0.151	0.1494
162.4319	239.1348	192.5753	314.8297	บัสที่29	0.1371	0.1574
162.9217	246.9042	223.4976	295.5924	75%ของ Line26และ27	0.2034	0.172
111.2012	291.7684	244.5407	247.8507	25%ของ Line17และ27	0.2018	0.2009
160.1777	261.5844	183.3421	297.5278	50%ของ Line26และ28	0.177	0.1662
144.158	266.9645	202.6276	237.028	บัสที่27	0.207	0.1653
128.557	299.1754	202.685	288.9931	บัสที่28	0.159	0.161
122.1893	313.9669	165.4984	272.1502	บัสที่26	0.1537	0.1594
156.0682	305.1135	179.802	290.4098	50%ของ Line17และ27	0.213	0.2037
117.3791	312.4948	216.795	317.367	25%ของ Line26และ27	0.1761	0.1698
126.3045	271.9372	183.2034	250.5373	25%ของ Line26และ28	0.1724	0.1718
159.3064	263.5049	245.3905	254.8772	บัสที่17	0.183	0.2011
164.624	317.0289	237.5444	240.3656	75%ของ Line26และ28	0.171	0.1639
152.883	328.4476	208.3815	324.4985	75%ของ Line28และ29	0.1462	0.1649
117.3791	312.4948	216.795	317.367	50%ของ Line26และ29	0.1802	0.1698
160.0318	231.9988	197.066	243.2889	50%ของ Line17และ27	0.209	0.2084
156.0682	305.1135	179.802	290.4098	75%ของ Line28และ29	0.142	0.1615
123.3476	321.6285	245.0001	246.123	75%ของ Line26และ29	0.16	0.1683
123.1198	285.3075	197.424	308.9287	25%ของ Line26และ27	0.1728	0.1712
164.1732	238.4847	242.541	299.7611	50%ของ Line26และ29	0.1803	0.1693
160.0318	231.9988	197.066	243.288	75%ของ Line26และ27	0.191	0.168
152.3406	320.2677	177.6634	229.4522	75%ของ Line26และ27	0.191	0.1557
123.1198	285.3075	197.424	308.9287	บัสที่26	0.1592	0.1713

ตารางที่ 4.6 ตัวอย่างเมื่อเปรียบเทียบค่า CCT จริงที่ได้จากโปรแกรม Power world กับค่า CCT ที่คำนวณได้จากระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้ของระบบ WSCC

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 5	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 6	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 8	ตำแหน่งที่เกิด Fault ในสายส่ง	CCT จาก Power World	CCT จาก MATLAB
117.4058	78.2943	83.2183	75%ของ Line4และ5	0.2511	0.2289
126.2093	97.3874	94.2923	50%ของ Line1และ4	0.2619	0.2025
142.3993	72.9909	93.0293	25%ของ Line4และ6	0.2656	0.272
138.2093	90.7474	119.0308	25%ของ Line5และ7	0.3198	0.3149
136.9942	96.8365	103.0293	บัสที่6	0.3489	0.3076
140.7654	93.9304	107.1823	บัสที่8	0.2529	0.2324
146.3095	91.3903	119.9843	บัสที่1	0.323	0.2421
115.3982	76.2843	83.0405	25%ของ Line6และ9	0.2735	0.228
139.3093	94.8386	109.0342	50%ของ Line4และ5	0.3131	0.3098
119.2094	107.9374	91.0832	50%ของ Line8และ9	0.2391	0.2036
107.5559	81.2023	120	25%ของ Line4และ6	0.2757	0.2842
126.3094	104.3934	109.2093	25%ของ Line2และ7	0.1722	0.1946
139.3093	94.8386	109.0342	75%ของ Line8และ9	0.242	0.2342
120.3974	89.9932	113.2982	25%ของ Line8และ9	0.2494	0.2218
119.9934	91.8493	85.5932	บัสที่9	0.1921	0.1978
114.7776	90.0354	111.2642	25%ของ Line5และ7	0.2855	0.292
131.2992	81.2232	108.1783	25%ของ Line7และ8	0.1975	0.2315
139.3093	94.8386	109.0342	บัสที่5	0.327	0.3152
135.3033	76.0384	85.2983	50%ของ Line6และ9	0.2751	0.2596
136.9942	96.8365	103.0293	25%ของ Line6และ9	0.3445	0.3003
130.0093	108	92.0192	บัสที่8	0.2422	0.2106
128.2093	84.2282	103.0293	75%ของ Line5และ7	0.2216	0.2845
140.7654	93.9304	107.1823	50%ของ Line4และ5	0.3109	0.3073
118.2732	79.722	100.2873	75%ของ Line4และ5	0.2732	0.2584

จากการทดลองพบว่าโครงสร้างที่เหมาะสมของแต่ละระบบเป็นดังนี้

ระบบ New England โครงสร้างที่ใช้ชนิดของฟังก์ชันสมาชิกคือ Triangular-shaped built-in membership function 2 2 3 2 2 โดยค่า Root Mean Square Error ของชุดฝึกสอนคือ 1.5979% และค่า Root Mean Square Error ของชุดทดสอบคือ 1.4759%

ระบบ Western System Coordinating Council โครงสร้างที่ใช้ชนิดของฟังก์ชันสมาชิกคือ Generalized bell –shaped built-in membership function 2 2 2 3 โดยค่า Root Mean Square Error ของชุดฝึกสอนคือ 3.31393% และค่า Root Mean Square Error ของชุดทดสอบคือ 2.9495%

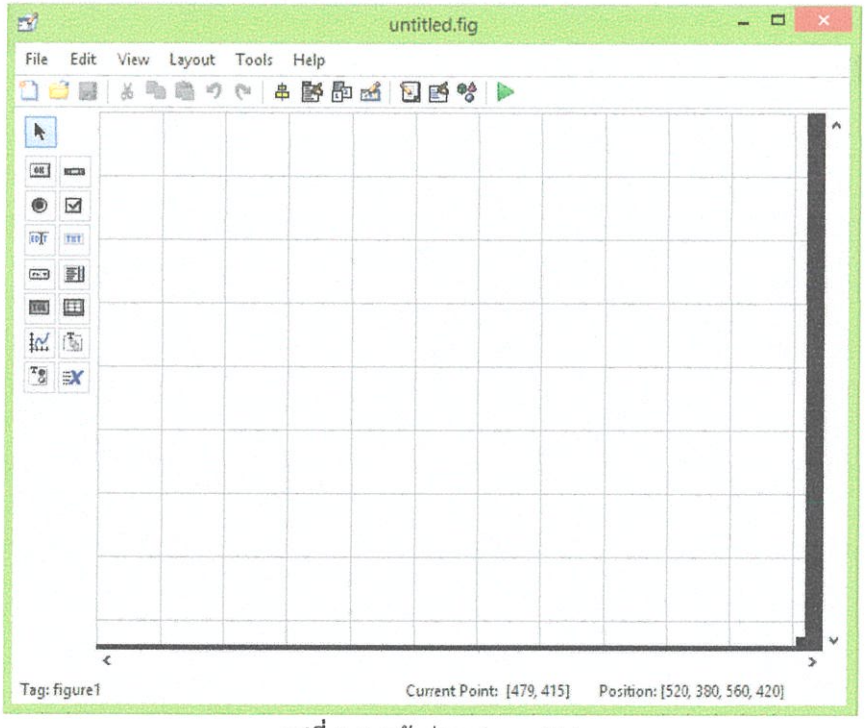
บทที่ 5
การประยุกต์ใช้ Graphical User Interface

จากการทดลอง เมื่อได้โครงสร้างแบบจำลองจากระบบอนุมานนิวโรฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้ สามารถนำมาพัฒนาร่วมกับ Graphic User Interface (GUI) เพื่อให้เกิดเป็นแบบจำลองที่แสดงผลลัพธ์ได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

5.1 การสร้าง GUI

MATLAB จะสร้าง GUI อยู่บนหน้าต่างรูปภาพ (figure window) ซึ่งภายใต้หน้าต่างนี้จะมีส่วนประกอบต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ เช่น Push Button, Edit Text, Radio Button และอื่นๆ โดยการสร้าง GUI จะประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆ 2 ขั้นตอน ดังนี้

1. ออกแบบและจัดวางส่วนประกอบต่างๆ บนหน้าต่างรูปภาพ
2. เขียนโปรแกรมเพื่อกำหนดการทำงานของส่วนประกอบต่างๆ



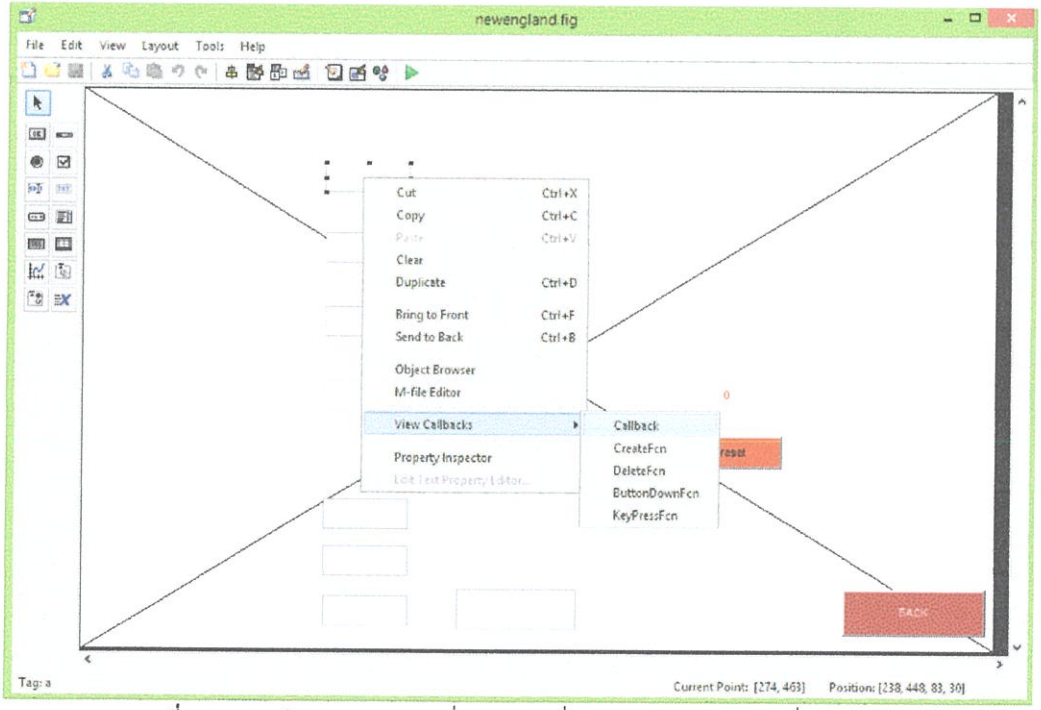
รูปที่ 5.1 หน้าต่างรูปภาพ GUI

5.2 ส่วนประกอบของ GUI ใน MATLAB

การสร้าง GUI โดยใช้ M-file ประกอบกับ GUIDE จะทำให้การทำงานง่ายขึ้น เพราะจะช่วยกำหนดตำแหน่งต่างของวัตถุต่างๆ ได้โดยง่าย หลังจากนั้น GUIDE จะสร้างไฟล์ขึ้นมา 2 ไฟล์เพื่อเก็บและนำ GUI มาใช้ต่อไป ซึ่งประกอบด้วย

1. FIG-file ซึ่งจะบรรจุรายละเอียดต่างๆที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในหน้าต่าง รูปภาพเป็น GUI
2. M-file ที่จะบรรจุฟังก์ชันที่กำหนดการทำงานของ GUI รวมถึง callback ทั้งหมดซึ่ง ควบคุมการทำงานของ GUI

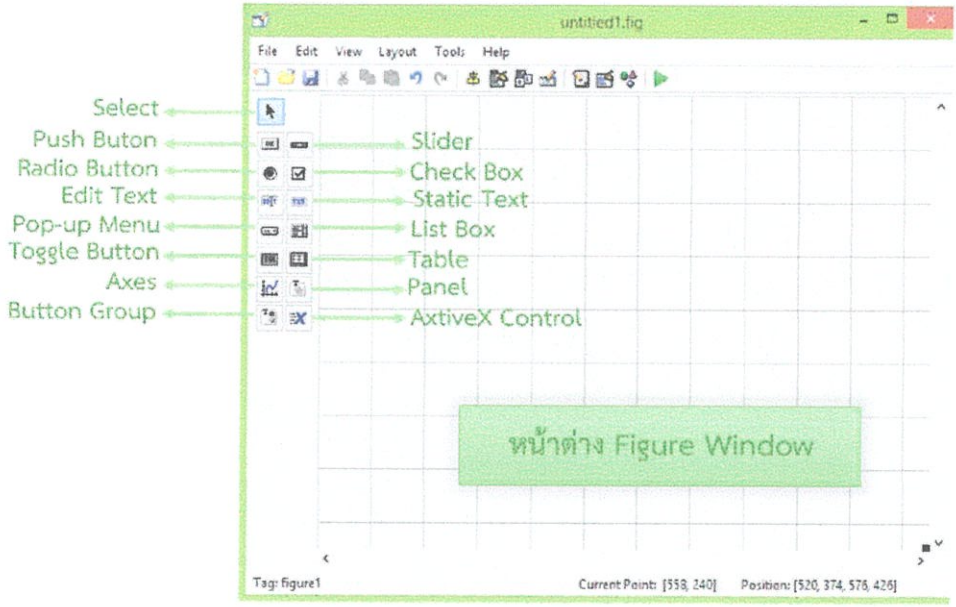
หน้าต่าง GUI นั้นโดยหลักใหญ่แล้วจะมีหน้าที่ในการวางส่วนประกอบหรือเครื่องมือที่ต้องการ จากนั้นจะสร้าง M-file ที่บรรจุ handle ของวัตถุหรือ object ทั้งหมดที่สร้างขึ้น รวมทั้งคำสั่งให้ GUI ทำงาน และโปรแกรมการคำนวณที่เราได้เขียนหลังจากได้รูปแบบที่เหมาะสมจาก ANFIS นอกเหนือจากนั้น M-file จะให้แนวทางในการเขียนฟังก์ชันเพื่อปรับเปลี่ยนค่าหรือบรรจุคำสั่งและโปรแกรมของวัตถุนั้นซึ่งเรียกว่า callback ของวัตถุนั้น



รูปที่ 5.2 การเรียก Callback เพื่อบรรจุคำสั่งหรือโปรแกรมลงในเครื่องมือ

5.3 เครื่องมือต่างๆ ของ GUI

ในการออกแบบ GUI จำเป็นต้องรียนรู้ ทราบหน้าที่ของเครื่องมือต่างๆ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 5.3 ดังนี้



รูปที่ 5.3 เครื่องมือต่างๆของ GUI

Select เลือกวัตถุ หรือเคลื่อนย้ายวัตถุ

Push Button มีลักษณะเป็นปุ่มกด จะทำให้เกิดมีคำสั่งอื่นๆตามมาหลังจากที่ผู้ใช้เลือกกดปุ่มนี้ โดยทั่วไปผู้ใช้จะใช้เมาส์ ในการกดปุ่ม Push button

Slider เป็นการป้อนค่าตัวเลขโดยอาศัยแถบเลื่อนนี้ ค่าที่ป้อนจะถูกกำหนดโดยผู้เขียน โปรแกรมและผู้ใช้จะทำการกำหนดค่าโดยการใช้เมาส์กดแล้วเลื่อนแถบบน slider หรือใช้เมาส์กดบริเวณลูกศรเพื่อให้แถบค่อยๆเลื่อนไปเป็นลำดับ ตำแหน่งของตัวเลื่อนบนแท่งจะเป็นค่า ตัวเลขตามสัดส่วนของระยะบนแท่งเลื่อนนี้ และค่าจะได้รับการคำนวณหลังจากที่เราปล่อยปุ่ม เมาส์ เราสามารถที่จะตั้งค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าปัจจุบันของ slider ได้

Radio Button จะมีลักษณะการทำงานคล้ายกับ check boxes แต่ข้อแตกต่างสำคัญก็คือโดยทั่วไปแล้วการใช้ Radio button นี้เราจะจัดให้เป็นกลุ่มของตัวเลือก และในกลุ่มของ Radio button นั้นจะมี ตัวเลือกที่สามารถถูกเลือกได้เพียงครั้งละตัวเดียวในกลุ่มนั้น ในการที่จะให้ radio button ทำงาน เราจะใช้เมาส์กดไปที่วัตถุนั้น จากนั้นสภาพของอุปกรณ์จะเปลี่ยนไปตามสภาพที่เราเลือก ผู้เขียนโปรแกรมจะต้องเป็นผู้กำหนดพฤติกรรมหลังจากที่มีการกดเมาสล์งไปในวัตถุนี้

Check Box จะมีการกำหนดค่าให้มีการทำงานเมื่อเราเลือกให้ค่าในกล่อง อุปกรณ์นี้มีประโยชน์ เพื่อให้ผู้ใช้เลือกหัวข้อการทำงานของโปรแกรมแบบต่างๆได้อย่างอิสระ การที่จะให้ check box ทำงานเราจะใช้เมาส์กดไปที่บริเวณกล่องนั้น สภาวะการเลือกหรือไม่เลือกค่าตามที่กำหนดจะแสดงขึ้น

Edit Text เป็นกล่องข้อความที่ผู้ใช้สามารถที่จะแก้ไขตัวอักษรที่บรรจุอยู่ภายในกล่องได้ สามารถให้ผู้ใช้กำหนดค่าเป็น input ได้

Static Text หมายถึงตัวหนังสือที่ผู้ใช้ไม่สามารถที่จะแก้ไขได้ แต่เราซึ่งเป็นผู้เขียนโปรแกรมแก้ไขได้ อาจใช้เป็นการบอกค่าผลลัพธ์ หรือบอกถึงสภาวะการทำงานของโปรแกรม และเมื่อผู้ใช้ไม่สามารถเปลี่ยนตัวอักษรใน static text ได้ ดังนั้นเราจึงไม่สามารถที่จะเรียก callback ของ static text มาใช้ได้

Pop-Up Menu เป็นการเปิดรายการของตัวเลือกขึ้นหลังจากที่มีการกดเมาส์บริเวณเมนู เพื่อให้ผู้ใช้ได้เลือกรายการใดรายการหนึ่ง ซึ่งรายการของตัวเลือกจะกำหนดด้วยคุณสมบัติ String ถ้าหากเมนูนี้ไม่ได้เปิดขึ้น ค่าในเมนูจะแสดงค่าคุณสมบัติปัจจุบัน Pop-up menu มีประโยชน์ในการที่จะให้ผู้ใช้ได้เลือกตัวเลือกตามที่ต้องการแต่ไม่ต้องการให้เปลืองเนื้อที่บนหน้าต่างรูปภาพ

List Box เป็นการแสดงรายการที่ผู้เขียนโปรแกรมกำหนดขึ้น ซึ่งจะกำหนดโดยคุณสมบัติ String และยอมให้ผู้ใช้สามารถที่จะเลือกรายการนั้นได้ที่ละหนึ่งรายการหรือมากกว่า

Toggle Button เป็นปุ่มที่ทำหน้าที่เหมือนสวิชส์ไฟนั้นคือจะมีค่าเป็น on หรือ off และเมื่อผู้ใช้เปลี่ยนค่า มันโดยการกดเมาส์ลงไปในบริเวณของวัตถุนี้

Table ใช้สร้างตารางเพื่อแสดงผลแบบตาราง

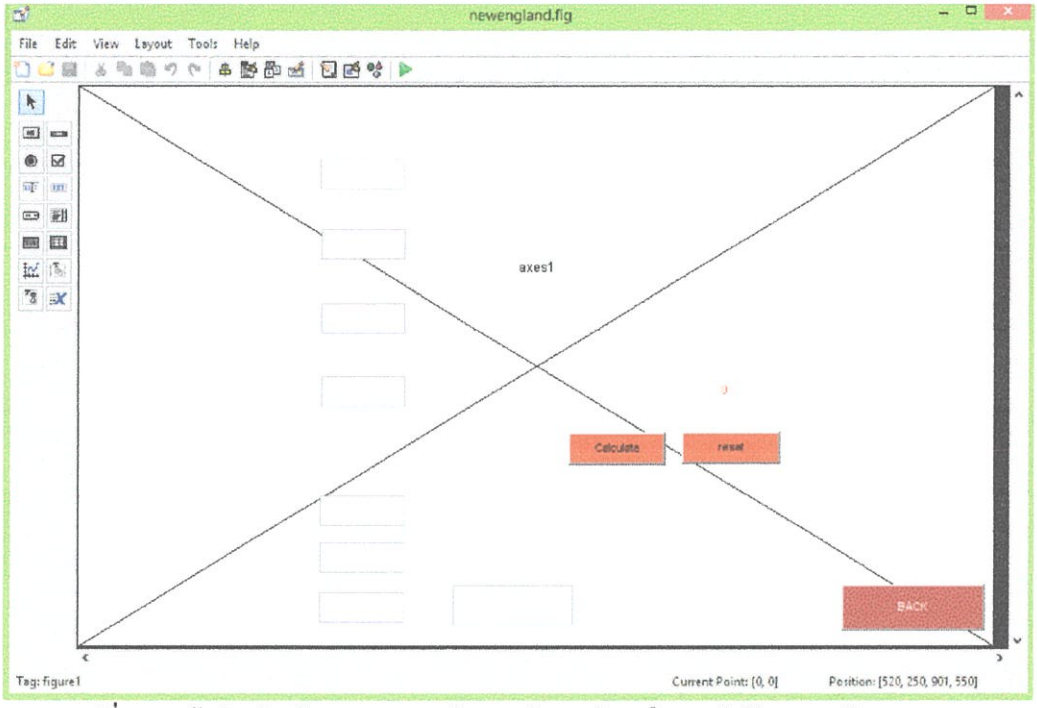
Axes ใช้สร้างวัตถุที่เป็นระบบแกน ความหมายของแกนในที่นี้หมายถึงพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ปรากฏบนหน้าต่าง figure ซึ่งใช้ในการเขียนรูปกราฟ หรือจุดลักษณะต่างๆ ลงไป หรือกล่าวง่ายๆคือพื้นที่ที่ใช้แสดงผล

Panel เป็นรูปแบบของพื้นที่สี่เหลี่ยม สามารถวาง axes, panel, button group ได้ แต่ไม่สามารถวาง ActiveX control

Button Group เป็นรูปแบบของพื้นที่สี่เหลี่ยม ซึ่งจะแบ่งหน้าต่างรูปภาพออกเป็นกรอบจะทำให้ผู้ใช้สามารถแบ่งส่วนต่างๆของหน้าต่างออกได้ง่ายขึ้น ทำให้ผู้ใช้ไม่เกิดความ สับสนในกรณีที่ต้องมีการกำหนดค่าหลายๆ อันบนหน้าต่างเดียว เพราะเราสามารถนำส่วนที่มีหน้าที่การทำงานในส่วนเดียวกันรวมกลุ่มไว้ด้วยกัน

ActiveX Control อุปกรณ์ชนิดหนึ่งสำหรับใช้งานในการติดต่อระหว่างผู้ใช้เครื่องกับโปรแกรมนอกเหนือไปจากอุปกรณ์มาตรฐานที่มีอยู่ในแต่ละภาษาเช่น Push Button, Check Box เป็นต้น

สำหรับโครงงานนี้ได้มีการออกแบบ GUI โดยใช้เครื่องมือ Pushbutton, Edit Text, Static Text, Pop-up Menu และ Axes ดังนี้



รูปที่ 5.4 หน้าต่างสำหรับแสดงผลการคำนวณค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรของระบบ New England

5.4 ส่วนประกอบสำคัญของ M-file ที่สร้างโดย GUIDE

GUIDE จะรวบรวมองค์ประกอบต่างๆ ภายใน GUI แล้วสร้าง M-file โดยอัตโนมัติ โดย จากนั้นนำโครงสร้างที่สร้างนั้นมาปรับแก้ เพื่อให้เกิดการควบคุม GUI ตามที่ต้องการการกระทำดังกล่าวทำให้เกิดข้อได้เปรียบหลายประการ

1. M-file จะประกอบด้วยคำสั่งที่จำเป็นในการควบคุม GUI ครบถ้วน
2. M-file จะทำให้ส่งข้อมูลที่ส่วนต่างๆได้ง่าย สะดวก รวดเร็ว
3. การใช้ M-file จะทำให้ส่งข้อมูลไปที่ส่วนต่างๆ ภายใต้ MATLAB ได้ง่ายขึ้น
4. Application M-file จะสร้าง Sub function สำหรับวัตถุต่างๆใน GUI เพื่อทำให้

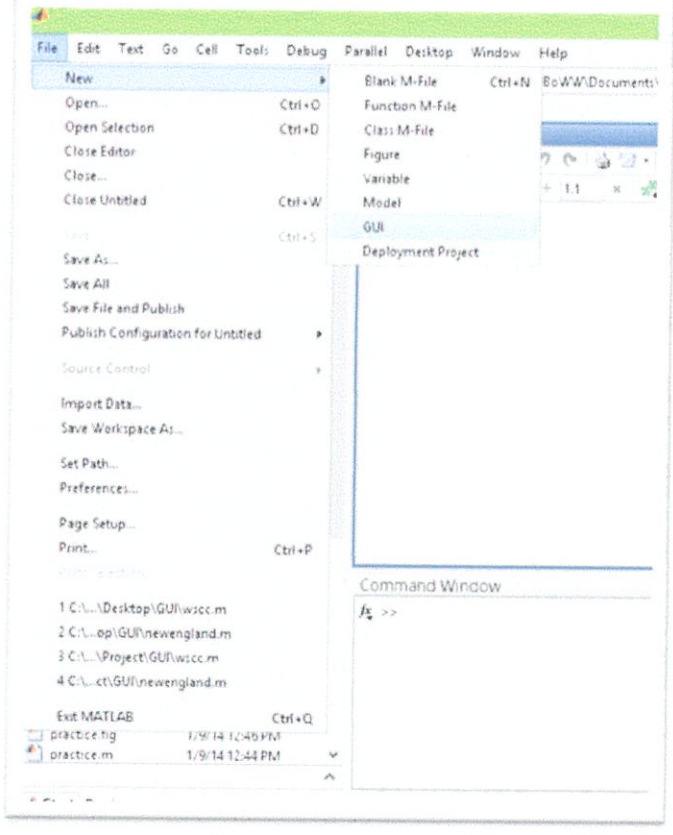
เขียน callback สะดวกขึ้น

5.5 การสร้างโครงร่าง GUI

ในหัวข้อการสร้างโครงร่าง GUI นี้จะแสดงให้เห็นว่า การสร้างส่วนประกอบของ GUI เช่น การควบคุมการปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ (User Interface Control) ได้แก่ ปุ่มกด (Push Button), Pop-up Menu, ข้อความ (Static Text) และอื่นๆ ว่าสามารถสร้างได้อย่างไร ซึ่งโดยภาพรวมสามารถอธิบายได้ดังนี้

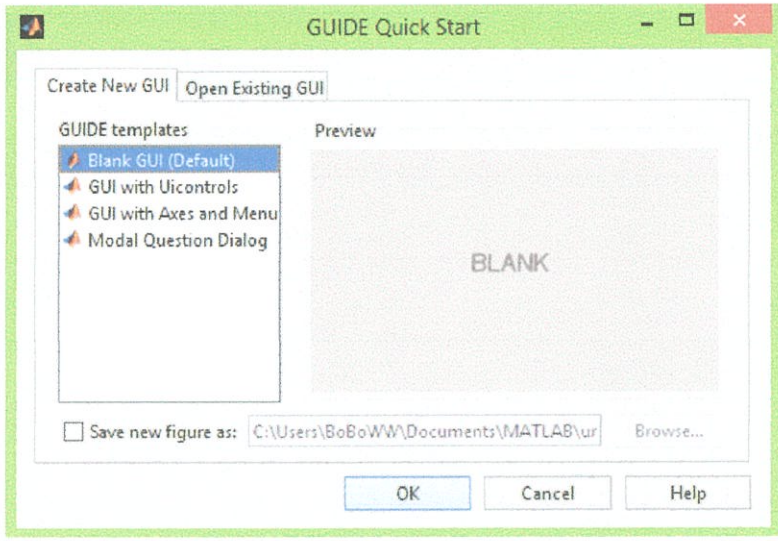
5.5.1 การเปิด GUI ใน Layout Editor

เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการเปิด GUIDE โดยการคลิ้กที่ File > New > GUI ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 การสร้างไฟล์ GUI

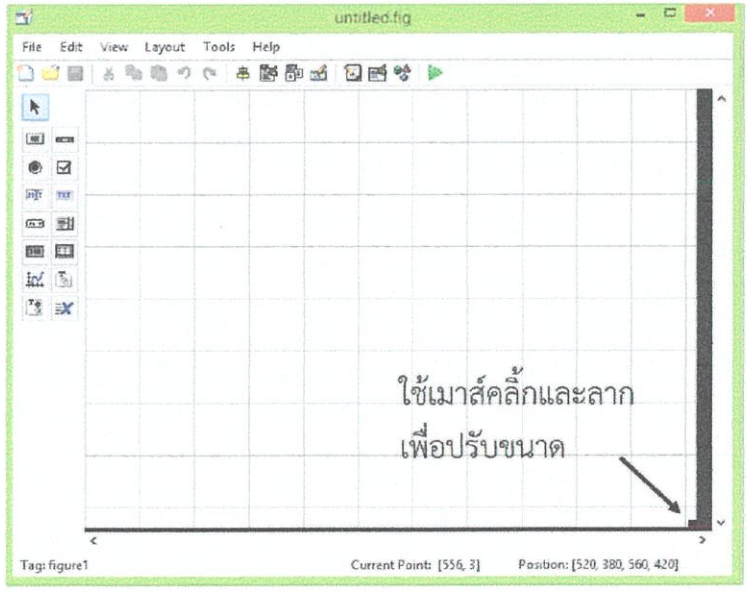
เมื่อวินโดว์ GUIDE ได้ถูกเปิดขึ้นให้สร้าง GUI ไฟล์ใหม่ โดยการเลือก Blank GUI (Default) จาก Tab ที่ชื่อว่า Create New GUI แล้วคลิกปุ่ม OK



รูปที่ 5.6 หน้าต่าง GUI Quick Start

5.5.2 การตั้งขนาดของพื้นที่ใช้งานในการออกแบบ

เมื่อ Layout Editor เปิดขึ้นมา สามารถกำหนดขนาดพื้นที่ใช้งานได้ โดยการคลิกซ้ายที่มุมขวาล่างและย่อขยายโดยการลากเมาส์ไปมา ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 แสดงวิธีการเพิ่ม-ลด ขนาดของพื้นที่ใช้งาน

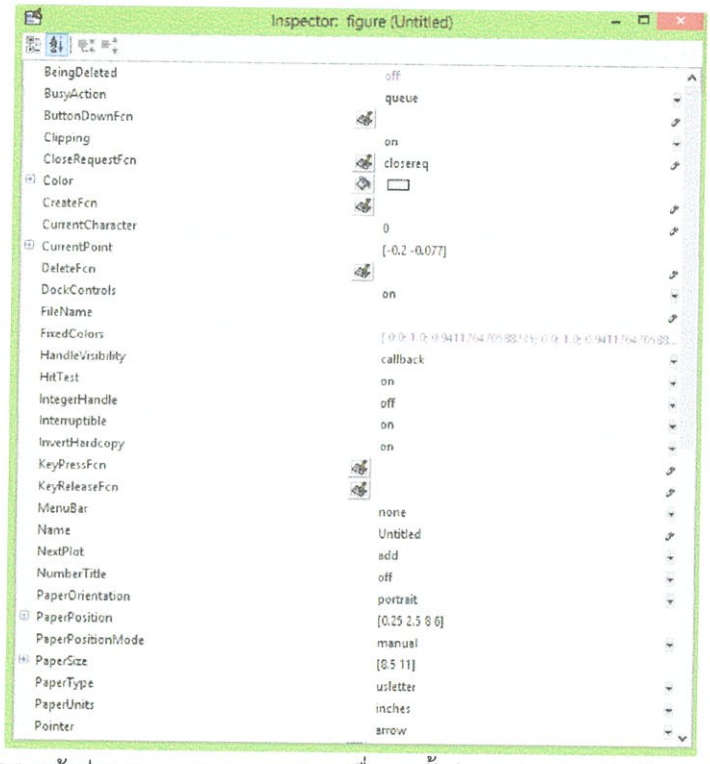
ถ้าต้องการตั้งค่าตำแหน่งของGUI ให้มีตำแหน่งที่แน่นอน สามารถทำได้ดังนี้

1. เลือก Property Inspector จากเมนู View หรือดับเบิ้ลคลิกบนพื้นที่ของ GUI

2. เลือกปุ่มบน Pop-up Menu ที่ชื่อว่า Unit ภายในหน้าต่าง Property Inspector เพื่อเปลี่ยนหน่วยการวัดเป็น นิ้ว (Inch) ดังรูปที่ 5.8

3. เลือกเครื่องหมายบวกบนหัวข้อชื่อ Position เพื่อขยายหัวข้อย่อยตามรูปที่ 5.8 เมื่อขยายแล้วจะพบ x y width และ height

4. จากนั้นใส่ค่าที่ต้องการทางด้านขวาดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 หน้าต่าง Property Inspector เพื่อการตั้งค่าของ Figure สำหรับ GUI

5.5.3 การสร้างองค์ประกอบ

เลือก Object ต่างๆจาก และทำการ Drag มาวางยังพื้นที่ๆเป็น Layout นอกจากนั้น ยังสามารถที่จะเพิ่มหรือลดขนาดของ Object ต่างๆ ด้วยการคลิกที่มุมของ Object ต่างๆเหล่านั้น ซึ่งในที่นี้จะดึง Object ต่างๆ ให้ออกมาตามต้องการ โดย Object ที่สำคัญที่ใช้บ่อย เช่น

Edit Text, Pop-up Menu, List box และ Push Button เป็นต้น โดยหน้าที่ของแต่ละ Object ได้กล่าวไว้ก่อนหน้า

5.5.4 การทำโปรแกรม GUI (Programming the GUI)

การทำโปรแกรมนั้น โดยรวมแล้วจะต้องทำการกำหนดชื่อ Tag ให้แก่ Object ต่างๆ ในหน้าต่าง Properties Inspector ซึ่งเปิดโดยการ ดับเบิ้ลคลิกที่ Object นั้นๆ จากนั้นก็ไปเขียน Code ให้สัมพันธ์กับ Object ต่างๆโดยการกดไปที่ปุ่ม M-file Editor เมื่อเสร็จสิ้นการเขียน Code เป็นที่เรียบร้อยแล้วก็จะเป็นการ Run Program เพื่อดูความสมบูรณ์ของ Code ที่ได้เขียนขึ้นมา ว่าสามารถใช้งานได้ตามความต้องการหรือไม่

5.5.5 การ Save และการ Run โปรแกรม (Saving and Running the GUI)

ภายหลังจากการเขียนฟังก์ชัน Callback ก็สามารถที่จะ Run GUI ได้ โดยการเลือก Run จาก Tool Menu หรือคลิกปุ่ม Run บน GUIDE Toolbar

5.6 GUI สำหรับการทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร

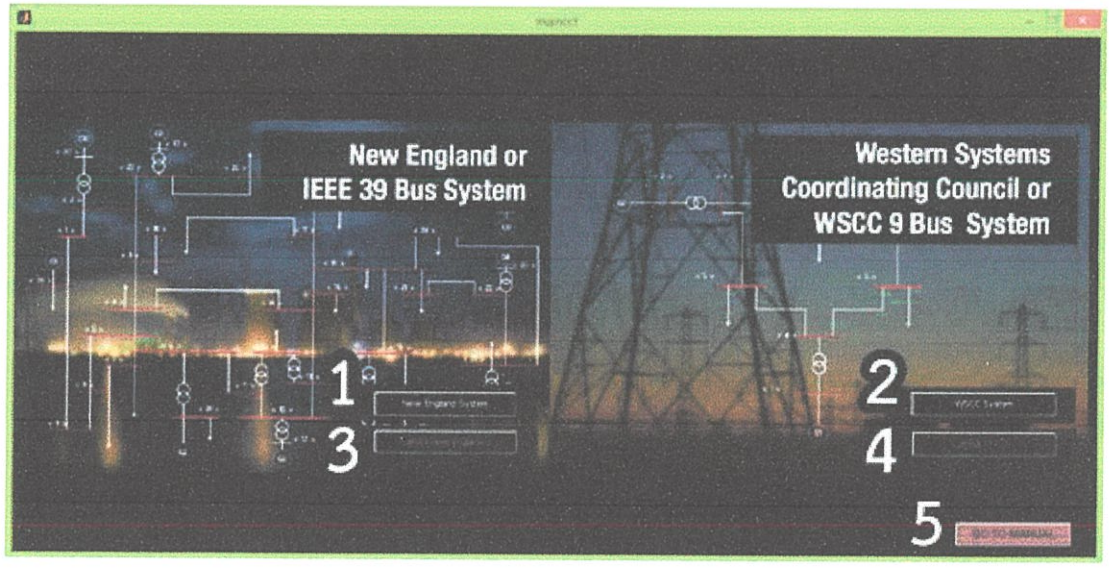
5.6.1 ขอบเขตและเงื่อนไขสำหรับการออกแบบโปรแกรมสำหรับการทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร

1. โปรแกรมทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ New England สามารถทำนายค่าได้โดยโดยอาศัย 5 อินพุต ได้แก่ Real Power at Bus 26, Real Power at Bus 27, Real Power at Bus 28, Real Power at Bus 29 และ Location
2. โปรแกรมทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรของระบบทดสอบ WSCC สามารถทำนายค่าได้โดยโดยอาศัย 4 อินพุต ได้แก่ Real Power at Bus 5, Real Power at Bus 6, Real Power at Bus 8 และ Location
3. ค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร ได้ค่าออกมาในหน่วย วินาที
4. สามารถดูรายละเอียดของระบบทดสอบ 2 ระบบได้ รวมถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

5.6.2 ส่วนประกอบของโปรแกรมสำหรับการทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร

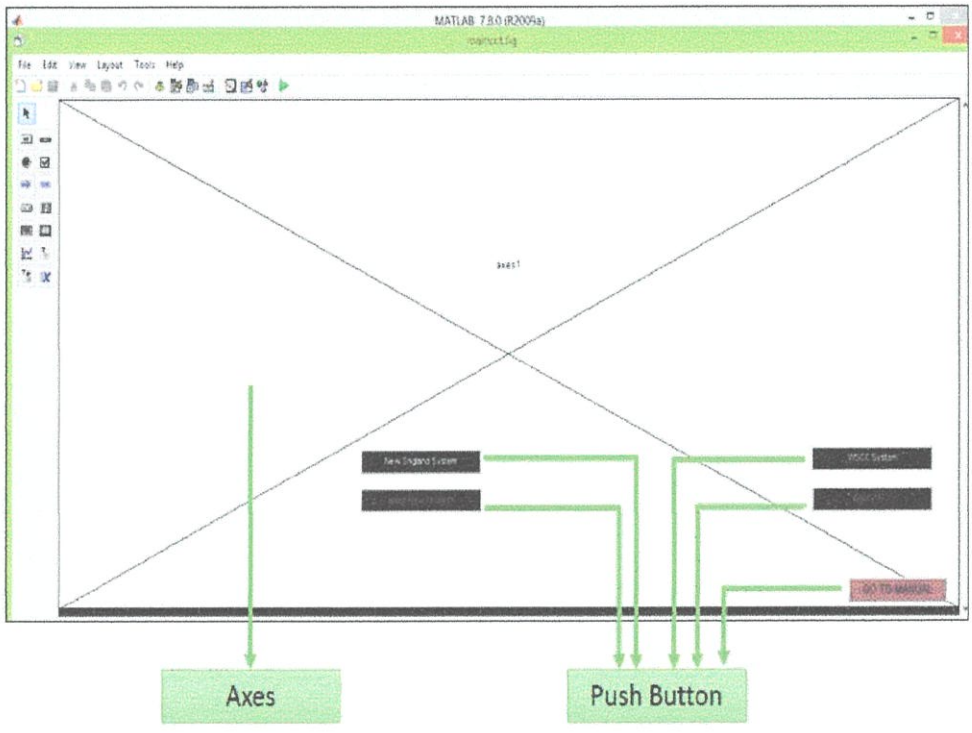
สำหรับโครงงานนี้ได้ออกแบบ GUI โดยหน้าจอหลัก จะแสดงไว้ในรูปที่ 5.9 ซึ่งจะเป็นหน้าจอหลักก่อนจะเข้าไปสู่การทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร โดยจะแบ่งเป็น

1. การทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรของระบบ New England
2. การทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรของระบบ WSCC
3. ข้อมูลของระบบทดสอบ New England
4. ข้อมูลของระบบทดสอบ WSCC
5. คู่มือการใช้โปรแกรม



รูปที่ 5.9 หน้าจอหลักของ GUI

โดยหน้าจอหลักจะสร้างโดยใช้ Object ดังนี้

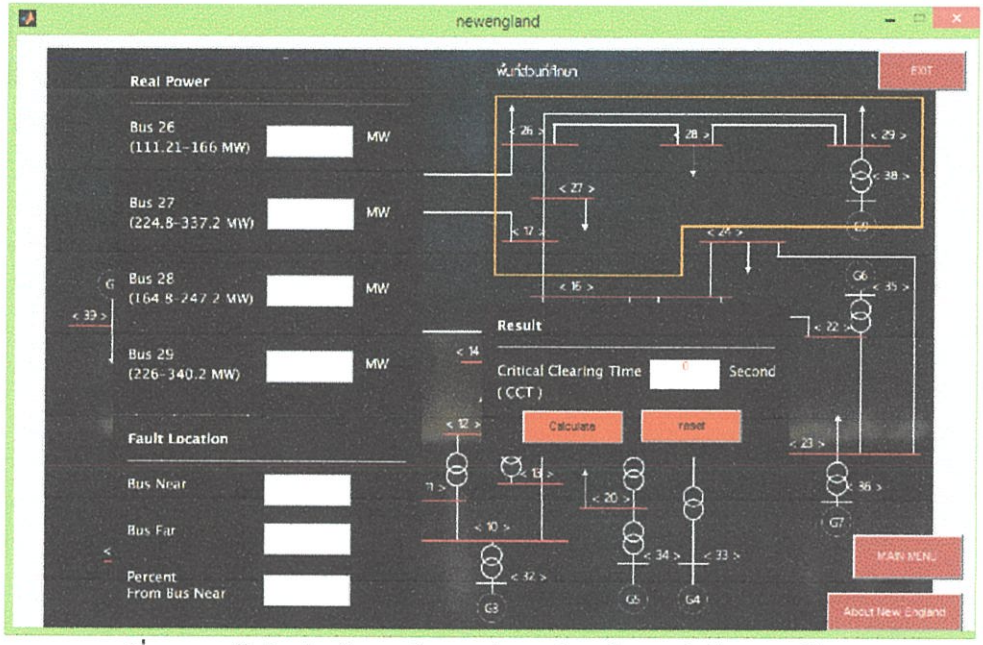


รูปที่ 5.10 Object สำหรับหน้าจอหลัก

โดยใช้ Push Button สำหรับการเข้าสู่หน้าต่างที่ต้องการ สำหรับในโครงงานนี้คือ การเข้าสู่หน้าต่างการทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรของระบบ New England, หน้าต่างการทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรของระบบ WSCC, ข้อมูลของระบบทดสอบ New England ,ข้อมูลของระบบทดสอบ WSCC และ คู่มือการใช้โปรแกรม

สำหรับ Axes ใช้ในการแสดงผลเป็นภาพ โดยใช้ทำเป็นภาพพื้นหลังของโปรแกรม

5.6.2.1 หน้าต่างการทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรของระบบ New England

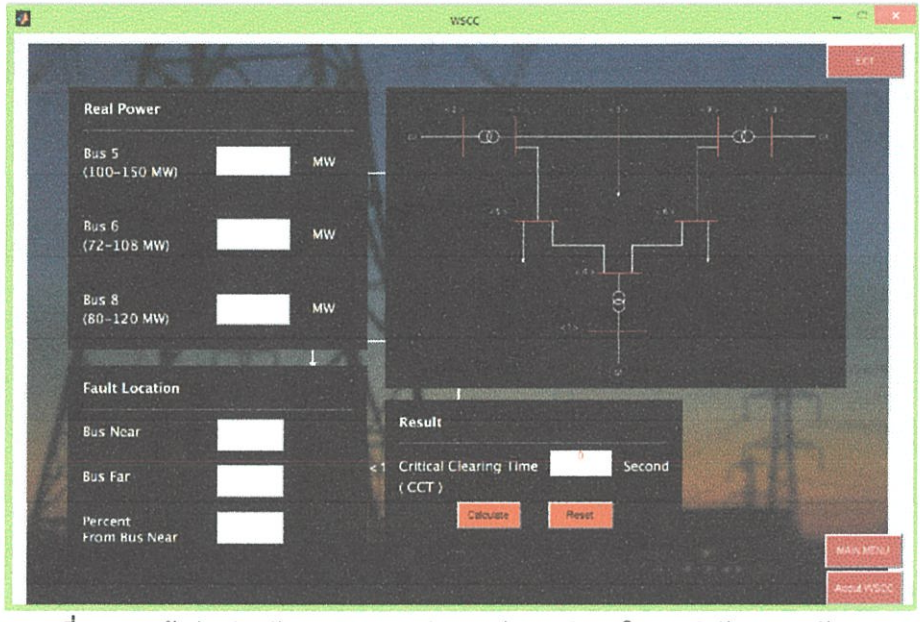


รูปที่ 5.11 หน้าต่างสำหรับการคำนวณค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรของระบบ New England

เป็นส่วนที่ผู้ใช้งานโปรแกรมการคำนวณค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรของระบบ New England โดยมีส่วนประกอบดังนี้

1. การใส่อินพุต ได้แก่ Real Power at Bus 26, Real Power at Bus 27, Real Power at Bus 28, Real Power at Bus 29
2. การใส่ตำแหน่งการลัดวงจร โดยวิธีการใส่ตำแหน่งสามารถดูได้จากคู่มือการใช้โปรแกรม
3. ปุ่ม Calculate กดเมื่อใส่อินพุตครบ จะได้ค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรแสดงออกมา
4. ปุ่ม Reset ถ้าผู้ใช้งานต้องการที่จะกลับสู่สภาวะแรกเริ่มของโปรแกรม
5. ปุ่ม Back เมื่อผู้ใช้งานต้องการที่จะกลับสู่หน้าจอหลักของโปรแกรม

5.6.2.2 หน้าต่างการทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรของระบบ WSCC

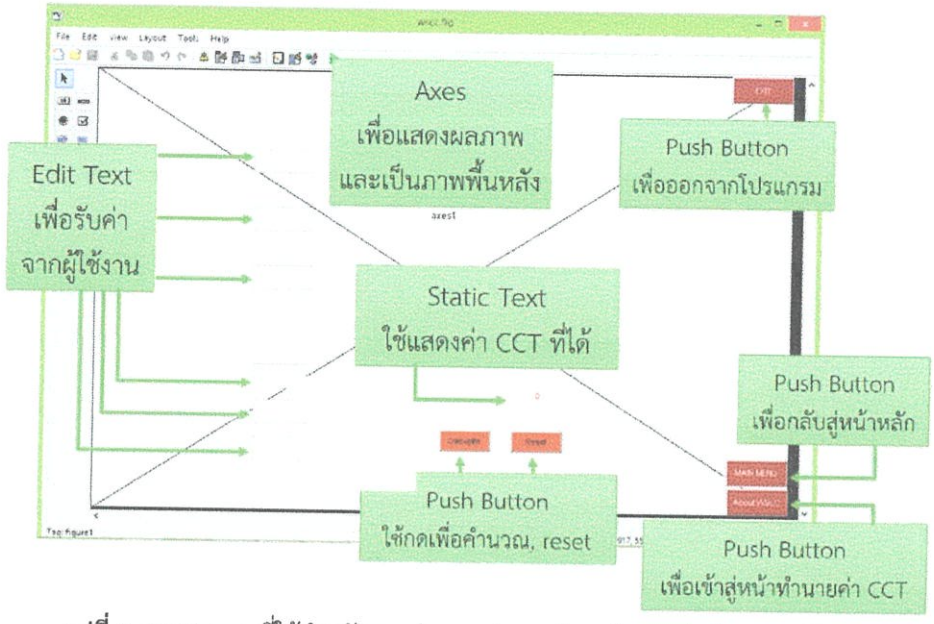


รูปที่ 5.12 หน้าต่างสำหรับแสดงผลการคำนวณค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรของระบบ WSCC

เป็นส่วนที่ผู้ใช้งานโปรแกรมการคำนวณค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรของระบบ WSCC โดยมีส่วนประกอบดังนี้

1. การใส่อินพุต ได้แก่ Real Power at Bus 5, Real Power at Bus 5 และ Real Power at Bus 8
2. การใส่ตำแหน่งการลัดวงจร โดยวิธีการใส่ตำแหน่งสามารถดูได้จากคู่มือการใช้โปรแกรม
3. ปุ่ม Calculate กดเมื่อใส่อินพุตครบ จะได้ค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรแสดงออกมา
4. ปุ่ม Reset ถ้าผู้ใช้งานต้องการที่จะกลับสู่สภาวะแรกเริ่มของโปรแกรม
5. ปุ่ม Back เมื่อผู้ใช้งานต้องการที่จะกลับสู่หน้าจอหลักของโปรแกรม

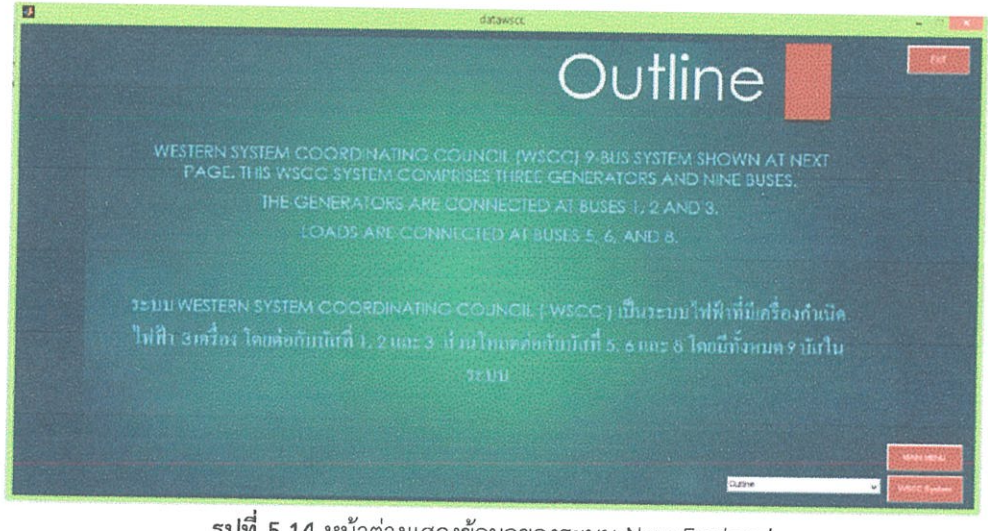
โดยในหน้าต่างการทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร ทั้ง 2 ระบบ จะใช้ Object ดังนี้



รูปที่ 5.13 Object ที่ใช้สำหรับการคำนวณค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรของระบบ New England และระบบ WSCC

5.6.2.3 ข้อมูลของระบบทดสอบ New England

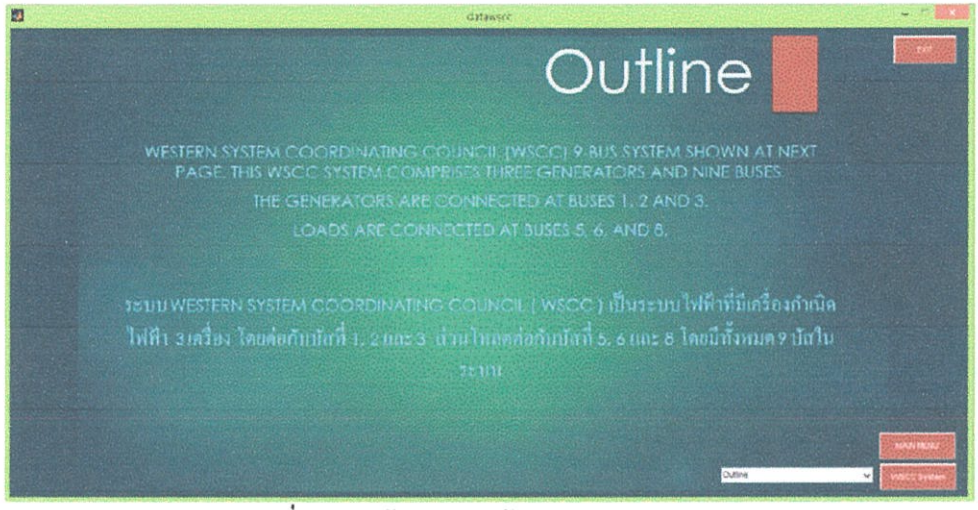
ในส่วนของข้อมูลของระบบทดสอบจะประกอบด้วย รายละเอียดของระบบ, one-line diagram ตลอดจนพารามิเตอร์ต่างๆ



รูปที่ 5.14 หน้าต่างแสดงข้อมูลของระบบ New England

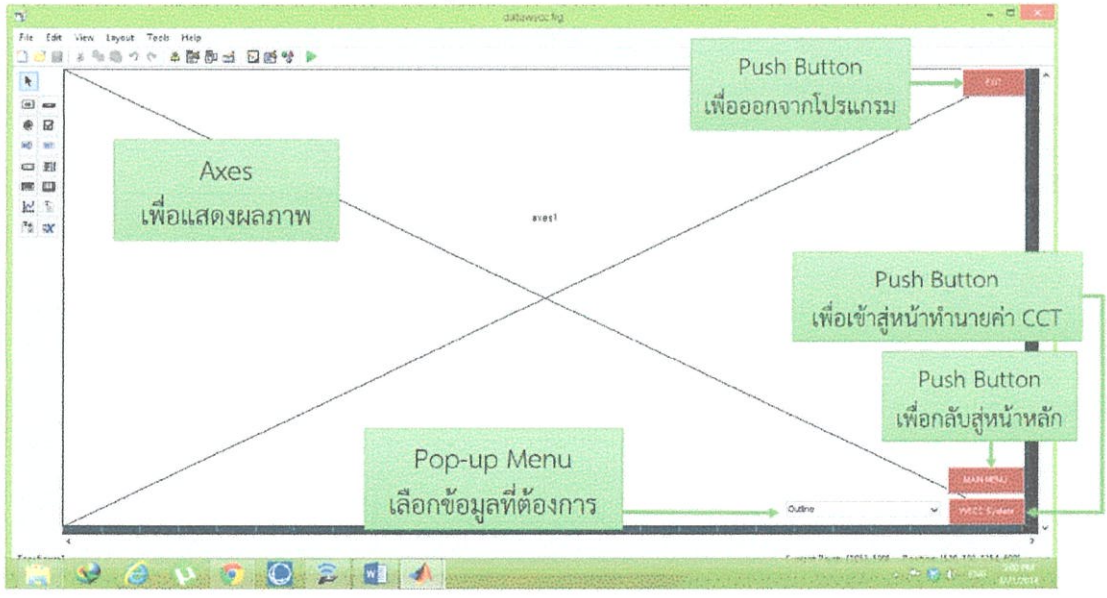
5.6.2.4 ข้อมูลของระบบทดสอบ WSCC

ในส่วนของข้อมูลของระบบทดสอบจะประกอบด้วย รายละเอียดของระบบ, one-line diagram ตลอดจนพารามิเตอร์ต่างๆ



รูปที่ 5.15 หน้าต่างแสดงข้อมูลของระบบ WSCC

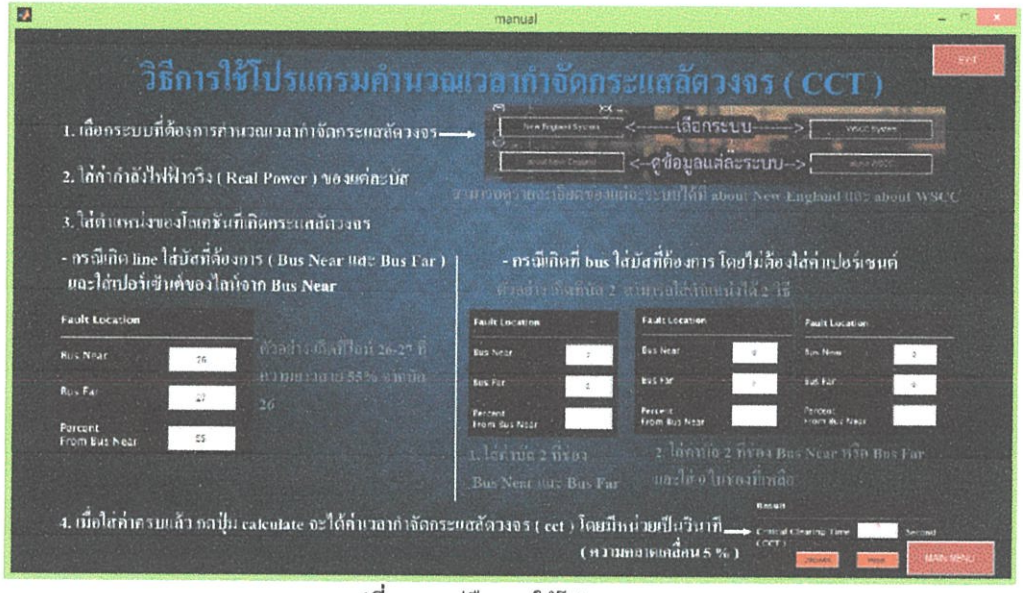
โดยในหน้าต่างการแสดงข้อมูลของทั้ง 2 ระบบ จะใช้ Object ดังนี้



รูปที่ 5.16 Object ที่ใช้สำหรับหน้าต่างแสดงข้อมูลของระบบ New England และระบบ WSCC

5.6.2.5 คู่มือการใช้โปรแกรม

ในส่วนของคู่มือการใช้โปรแกรมจะเป็นส่วนที่อธิบายวิธีการใส่ค่าอินพุตต่างๆ โดยที่สำคัญคือ Location หรือตำแหน่งการลัดวงจร ซึ่งมีทั้งที่ Bus และ Line ซึ่งได้มีการอธิบายไว้ในส่วนนี้



รูปที่ 5.17 คู่มือการใช้โปรแกรม

บทที่ 6
สรุปผลการทดลอง

6.1 สรุปผลการทดลอง

การประเมินเสถียรภาพชั่วครู่โดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ เป็นการนำระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (ANFIS) มาทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร โดยที่ผลของการทำนายมีความถูกต้องแม่นยำเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับการออกแบบโครงสร้างของระบบ การจัดการข้อมูลฝึกสอนหรือข้อมูลทดสอบ ซึ่งผลการทำนายที่ได้ สามารถทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรได้ดี แต่ยังพบปัญหาที่ไม่สามารถทำนายให้ใกล้เคียงได้ เมื่อเป็นการทำนายข้อมูลที่โครงสร้างดังกล่าวไม่ได้มีการฝึกสอนไว้ก่อน

จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรคือการจัดรูปแบบข้อมูล โดยจำนวนข้อมูลที่ใช้ฝึกสอนจะส่งผลต่อค่า Root Mean Square Error โดยเมื่อลดจำนวนข้อมูลฝึกสอนจะทำให้ค่า Root Mean Square Error จากการทดลองกับระบบทดสอบ New England จะมีค่า Root Mean Square Error น้อยกว่าระบบทดสอบ Western System Coordinating Council (WSCC) เนื่องจากในการศึกษาระบบ New England ได้ทำการศึกษาโดยขอบเขตในการศึกษาจะแคบกว่าระบบ Western System Coordinating Council คือทดสอบเพียงช่วงบัสที่ 17, 26, 27, 28, 29 และ 38 และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบ Classical Model

สำหรับระบบ Western System Coordinating Council มีค่า Root Mean Square Error สูงกว่าเนื่องจากขอบเขตการศึกษากว้างกว่าระบบแรก คือทดสอบกับทุกบัสในระบบทำให้จำนวนข้อมูลฝึกสอนนั้นกระจายมากกว่าระบบแรก รวมถึงระบบนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบ Detail model ซึ่งจะซับซ้อนมากกว่า

ในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร ได้สร้างแบบจำลองสำหรับระบบทั้ง 2 ระบบ คือ New England และระบบ Western System Coordinating Council โดยแต่ละระบบจะมีรูปแบบต่างกัน รวมถึงจำนวนอินพุต เพื่อหารูปแบบและโครงสร้างที่เหมาะสมโดยจะพิจารณาจาก Root Mean Square Error ที่ต่ำที่สุด ดังนี้

<u>ระบบ New England</u> โครงสร้างที่ใช้ชนิดของฟังก์ชันสมาชิกคือ Triangular-shaped built-in membership function 2 2 3 2 2 โดยค่า Root Mean Square Error ของชุดฝึกสอนคือ 1.5979% และค่า Root Mean Square Error ของชุดทดสอบคือ 1.4759%

<u>ระบบ Western System Coordinating Council</u> โครงสร้างที่ใช้ชนิดของฟังก์ชันสมาชิกคือ Generalized bell –shaped built-in membership function 2 2 2 3 โดยค่า Root Mean Square Error ของชุดฝึกสอนคือ 3.31393% และค่า Root Mean Square Error ของชุดทดสอบคือ 2.9495%

6.2 ปัญหา

6.2.1 ในการจัดเรียงข้อมูลสำหรับเป็นอินพุตในการฝึกสอนและทดสอบ ANFIS มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถใช้ตัวอักษรได้ จึงแก้ปัญหาโดยการใช้ตัวเลขแทน โดยอาจคิดเป็นรหัสที่เข้าใจได้ง่ายและไม่ซับซ้อนเกินไป

6.2.2 ในการออกแบบ GUI มีปัญหาเรื่องขนาดของไฟล์ภาพ ไม่ควรใหญ่เกินไป เพราะการประมวลผลจะใช้เวลามากขึ้น

6.3 ข้อเสนอแนะ

6.3.1 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการประเมินค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรอาจเพิ่มจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้ของระบบให้มากขึ้น เช่น การเพิ่มจำนวนข้อมูลชุดฝึกสอนให้มากขึ้น และทำการปรับชนิดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของแต่ละอินพุต รวมถึงศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรเพิ่มเติม

6.3.2 เพื่อปรับปรุงโปรแกรมประยุกต์ในอนาคต อาจทำการทำนายระบบทดสอบ New England ทั้งระบบเพื่อความหลากหลายยิ่งขึ้น หรืออาจเพิ่มระบบทดสอบหลายๆระบบ ในโปรแกรมเดียวกัน

เอกสารอ้างอิง

[1] ชำนาญ ห่อเกียรติ, **การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง,**.พิมพ์ครั้งที่ 2.กรุงเทพฯ:จรัลสนิทวงศ์การพิมพ์,2550.

[2] ยุพา ชิดทองและ สรี ศุภราทิตย์ "การพัฒนาแบบจำลอง Hybrid เพื่อการพยากรณ์ยอดน้ำ" **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12** ,พิษณุโลก, พฤษภาคม 2550.

[3] ชายชาญ โพธิสาร สมชาติ จิริวิภากร และ ศุลี บรรจงจิตร, "การหาช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตในระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม," **วิศวสารลาดกระบัง,** ปีที่ 19, มีนาคม 2545.

[4] พัฒนพงศ์ เฉลิมเมืองและคณะ, "การประยุกต์ใช้ทฤษฎี ANFIS ในการวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญสู่ความสำเร็จของ กระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์" **การประชุมวิชาการด้านการวิจัยดำเนินงานแห่งชาติ,** กรกฎาคม 2551.

[5] หทัยเทพ วงศส์วุรรณ, "การทำนายค่าอุณหภูมิล่วงหน้าโดยใช้ระบบนิวโรฟัซซี," **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย,** ครั้งที่ 25, กระบี่, ตุลาคม 2554.

[6] Xiaodong Chu and Yutian Liu, "On-Line Learning Applied to Power System Transient Stability Prediction," **Circuits and Systems**, 2005. ISCAS 2005. IEEE International Symposium, Vol. 4, May 2005, pp.3906 – 3909.

[7] Takagi, T. and Sugeno, M., "Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control," **Proc. IEEE Transaction on SMC,** pp. 116-132, 1985.

[8] Stinchcombe, H. K. M., "Multi - Layer Feedforward Networks are universal Approximators," **Neural Network**, Vol. 2, , pp. 359 – 366, 1989.

[9] U. Gabrjie and R. Mihalic, "Direct Methods for Transient Stability Assessment in Power Systems Comprising Controllable Series Devices,", **IEEE Trans. on Power System**, Vol. 17, No. 4, 2002, pp. 689-694.

[10] Borkowska B, "Probabilistic Load Flow,"; **IEEE Trans. Power Apparatus and Systems**, vol. PAS-93, no.3, pp 752-755, 1974.

เอกสารอ้างอิง

[11] Rıfkı Terzioğlu, T. Fedai Çavuş "Probabilistic Load Flow Analysis of the 9 Bus WSCC System," **International Journal of Scientific and Research Publications,** Volume 3, Issue 9, 2013.

[12] Swaroop Kumar.Nallagalva, Mukesh Kumar Kirar, Dr.Ganga Agnihotri , "Transient Stability Analysis of the IEEE 9-Bus Electric Power System," **International Journal of Scientific Engineering and Technology,** Volume No.1, Issue No.3, pp. 161-166, 2012.

[13] Allan R N, Grigg C H, Newey D A and Simmons R F, "Probabilistic Power-Flow Techniques Extended and Applied to Oğerational Decision Making," **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers,** vol. 123, no. 12, pp. 1317-1324, 1976.

[14] Allan R N, Al-Shakarchi M R G, "Probabilistic AC Load Flow," **Proc. IEE,** 1976, 123, pp. 531-536.

[15] Chang F.J., and Chang Y.T. "Adaptive neuro-fuzzy inference system for prediction of water level in reservoir," **Advances in Water Resources,** 2006, pp. 1–10.

[16] Lo S.P., "An adaptive-network based fuzzy inference system for prediction of workpiece surface roughness in end milling," **Materials Processing Technology,** 2003 pp. 665–675.

[17] C. K. Babulal, P. S. Kannan, "A Novel Approach for ATC Computation in Deregulated Environment," **J. Electrical Systems 2-3,** pp. 146-161,2006.

[18] ปริญญา สงวนสัตย์. **คู่มือ MATLAB ฉบับสมบูรณ์,**. นนทบุรี : ไอดี ซี พรีเมียมร์. 2553.

[19] ฉัททวุฒิ พีชผล และคณะ, **คู่มือเรียน Visual Basic 6.0,**. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ : บริษัท โปรวิชั่น จำกัด. 2544.

[20] บุญสืบ โพธิ์ศรี และคณะ, **การเขียนโปรแกรมบนระบบปฏิบัติการ GUI,**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมอาชีวะ. 2547.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

โค้ดโปรแกรม

ก-1 โค้ด m.file ของตัวประมวลผลโครงสร้างระบบ New England

```
x=[A B C D E];

mfin=[57.01 111 165.6 0
111.2 165.2 219.6 0
113 225 336.8 0
224.9 336.9 448.8 0
124.5 165 205.6 0
165 205 246.4 0
205.8 245.5 286.5 0
116.1 227.8 339.4 0
227.7 339.5 451.1 0
-2.28e+005 8.295e+004 3.939e+005 0
8.295e+004 3.939e+005 7.049e+005 0
];

mfout=[0.1669 0 0 0
0.2477 0 0 0
0.1825 0 0 0
0.3238 0 0 0
0.1984 0 0 0
0.1147 0 0 0
0.3094 0 0 0
0.06307 0 0 0
0.2329 0 0 0
0.236 0 0 0
0.1867 0 0 0
0.185 0 0 0
0.2199 0 0 0
0.06606 0 0 0
0.2024 0 0 0
0.115 0 0 0
0.3912 0 0 0
```

```
0.02484 0 0 0
0.125 0 0 0
0.1898 0 0 0
0.1838 0 0 0
0.1389 0 0 0
0.2935 0 0 0
0.08622 0 0 0
0.375 0 0 0
-0.01905 0 0 0
0.08748 0 0 0
0.1821 0 0 0
0.2377 0 0 0
0.1273 0 0 0
0.2385 0 0 0
0.1235 0 0 0
0.2347 0 0 0
0.08845 0 0 0
0.3022 0 0 0
0.07851 0 0 0
0.2213 0 0 0
0.09307 0 0 0
0.269 0 0 0
0.1399 0 0 0
0.1352 0 0 0
0.2047 0 0 0
0.3463 0 0 0
0.05602 0 0 0
0.223 0 0 0
0.1068 0 0 0
0.187 0 0 0
0.2328 0 0 0
];

z=1;

for i=1:5
    if (i==3)
      for j=1:3
```

```
            o1(j,i)=trimf(x(i),mfin(z,:));
    z=z+1 ;
       end
     else
       for j=1:2
           o1(j,i)=trimf(x(i),mfin(z,:));
    z=z+1 ;
       end
     end
  end

   z=1;
 for i=1:2
    for j=1:2
       for k=1:3
          for m=1:2
             for n=1:2

 o2(z,1)=o1(i,1)*o1(j,2)*o1(k,3)*o1(m,4)*o1(n,5);
 z=z+1;
             end
          end
       end
    end
 end

 a=size(o2);
 az=a(1);
  for i=1:az
 o3(i,1)=o2(i)/sum(o2);
  end

  for i=1:az
 o4(i,1)=o3(i)*mfout(i,1);
  end


 result=sum(o4);
```

ก-2 โค้ด m.file ของตัวประมวลผลโครงสร้างระบบ WSCC

```
x=[A B C D]

mfin=[29.2807584081928 1.99348914734247 100.608867793033
29.2081447061942 1.77372428290835 159.028842903439
18.2404353968883 2.09121756922977 72.2488293859593
17.9083581542964 1.33277686760511 108.141937207585
19.964462581648 1.99385976755069 79.9691989279193
19.9918698613878 2.15866539226728 119.992581193916
2200.00299483679 3.26258048790827 1100.00434353559
2199.9957872365 -0.0694019337306878 5499.85509119197
2200.00805478171 4.71363948115071 9899.9882518519];

mfout=[0.120572251641324 0 0 0
0.208004929804706 0 0 0
0.168687546349308 0 0 0
0.239960964745355 0 0 0
0.295503227326155 0 0 0
0.209155643174046 0 0 0
0.241585933186757 0 0 0
0.272464398089641 0 0 0
0.159457247161759 0 0 0
-0.0152119553362134 0 0 0
0.300086402326529 0 0 0
0.153664792977517 0 0 0
0.120422134976833 0 0 0
0.297051991028189 0 0 0
0.148415332327012 0 0 0
0.119874585085627 0 0 0
0.29582531112427 0 0 0
0.164545590899083 0 0 0
0.0974975980068643 0 0 0
0.288017738188636 0 0 0
0.177349785031586 0 0 0
0.302589873669093 0 0 0
0.358952214586934 0 0 0
0.214969831513995 0 0 0];
```

```
z=1;

for i=1:4
    if (i==4)
      for j=1:3
          o1(j,i)=gbellmf(x(i),mfin(z,:))
    z=z+1 ;
      end
    else
      for j=1:2
          o1(j,i)=gbellmf(x(i),mfin(z,:))
    z=z+1 ;
      end
    end
end

z=1;
for i=1:2
   for j=1:2
      for k=1:2
         for m=1:3


o2(z,1)=o1(i,1)*o1(j,2)*o1(k,3)*o1(m,4)
z=z+1;

         end
      end
   end
end


a=size(o2);
az=a(1);
for i=1:az
o3(i,1)=o2(i)/sum(o2)
end
```

```
b=size(x);
 bz=b(2)+1;

  for i=1:az
o4(i,1)=o3(i)*mfout(i,1)


  end
y=sum(o4)
```

ภาคผนวก ข
ข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลที่ใช้ในการหาโครงสร้างระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายของระบบ New England

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 26 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 27 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 28 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 29 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
111.2012	291.7684	244.5407	247.8507	262825	0.1764
111.2012	291.7684	244.5407	247.8507	262750	0.1838
111.2012	291.7684	244.5407	247.8507	272700	0.2137
111.2012	291.7684	244.5407	247.8507	172725	0.2018
114.9647	323.3359	238.3628	332.8155	262725	0.18
114.9647	323.3359	238.3628	332.8155	262925	0.186
114.9647	323.3359	238.3628	332.8155	383800	0.136
114.9647	323.3359	238.3628	332.8155	282925	0.159
117.0224	265.9986	172.3539	315.5184	172775	0.2159
117.0224	265.9986	172.3539	315.5184	272700	0.2142
117.0224	265.9986	172.3539	315.5184	172725	0.2021
117.0224	265.9986	172.3539	315.5184	262750	0.1844
117.3791	312.4948	216.795	317.367	171700	0.1858
117.3791	312.4948	216.795	317.367	262725	0.1761
117.3791	312.4948	216.795	317.367	262950	0.1802
117.3791	312.4948	216.795	317.367	262925	0.1829
117.3958416	272.085556	204.355296	314.0617536	282975	0.143
117.3958416	272.085556	204.355296	314.0617536	282800	0.16
117.3958416	272.085556	204.355296	314.0617536	262925	0.18
121.1634088	335.3175248	244.4002128	313.333839	172725	0.217
121.1634088	335.3175248	244.4002128	313.333839	262950	0.182
121.1634088	335.3175248	244.4002128	313.333839	171700	0.186
122.145694	322.7524412	168.5117904	330.835428	282950	0.149
122.145694	322.7524412	168.5117904	330.835428	262925	0.18
122.145694	322.7524412	168.5117904	330.835428	171700	0.184

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่ บัส 26 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่ บัส 27 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่ บัส 28 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่ บัส 29 (MW)	ตำแหน่งที่ เกิด Fault	CCT (วินาที)
122.1893	313.9669	165.4984	272.1502	262725	0.1666
122.1893	313.9669	165.4984	272.1502	262600	0.1537
122.1893	313.9669	165.4984	272.1502	262950	0.1744
122.3459	319.3911	234.6171	253.3336	172725	0.2041
122.3459	319.3911	234.6171	253.3336	282800	0.1585
122.3459	319.3911	234.6171	253.3336	262775	0.1995
122.3459	319.3911	234.6171	253.3336	262975	0.1605
123.0153	253.3797	190.0797	259.3214	172725	0.199
123.0153	253.3797	190.0797	259.3214	262975	0.157
123.0153	253.3797	190.0797	259.3214	172775	0.212
123.0153	253.3797	190.0797	259.3214	282800	0.155
123.1198	285.3075	197.424	308.9287	172750	0.2148
123.1198	285.3075	197.424	308.9287	262725	0.1728
123.1198	285.3075	197.424	308.9287	262600	0.1592
123.1198	285.3075	197.424	308.9287	262975	0.1616
123.34765	321.62855	245.00017	246.12302	282950	0.148
123.34765	321.62855	245.00017	246.12302	262600	0.157
123.34765	321.62855	245.00017	246.12302	262975	0.16
123.6626	257.4696	201.8169	284.7609	262850	0.1701
123.6626	257.4696	201.8169	284.7609	262825	0.1736
123.6626	257.4696	201.8169	284.7609	262725	0.1697
123.6626	257.4696	201.8169	284.7609	262600	0.1564
124.4386	267.8366	232.3894	265.0235	262825	0.174
124.4386	267.8366	232.3894	265.0235	272700	0.214
124.4386	267.8366	232.3894	265.0235	172725	0.203
124.4386	267.8366	232.3894	265.0235	262750	0.184

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 26 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 27 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 28 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 29 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
124.9082	288.9127	200.1864	272.5846	272700	0.212
124.9082	288.9127	200.1864	272.5846	172750	0.212
124.9082	288.9127	200.1864	272.5846	262875	0.169
124.9082	288.9127	200.1864	272.5846	262975	0.159
125.2834	318.5065	186.3834	228.6008	282950	0.144
125.2834	318.5065	186.3834	228.6008	262925	0.1721
125.2834	318.5065	186.3834	228.6008	282975	0.1381
125.3813	306.6275	183.1708	331.045	262875	0.173
125.3813	306.6275	183.1708	331.045	383800	0.151
125.3813	306.6275	183.1708	331.045	172750	0.216
125.7102	244.4984	243.1411	337.4972	262975	0.1659
125.7102	244.4984	243.1411	337.4972	262925	0.1857
125.7102	244.4984	243.1411	337.4972	272700	0.2184
125.7102	244.4984	243.1411	337.4972	172775	0.2226
126.3045	271.9372	183.2034	250.5373	262825	0.1724
126.3045	271.9372	183.2034	250.5373	171700	0.1804
126.3045	271.9372	183.2034	250.5373	262750	0.178
126.3045	271.9372	183.2034	250.5373	262825	0.1724
128.557	299.1754	202.685	288.9931	262950	0.1767
128.557	299.1754	202.685	288.9931	262725	0.1716
128.557	299.1754	202.685	288.9931	172725	0.2028
128.557	299.1754	202.685	288.9931	282800	0.159
130.1037	245.9937	207.3463	289.4269	282800	0.1584
130.1037	245.9937	207.3463	289.4269	172750	0.2131
130.1037	245.9937	207.3463	289.4269	282925	0.1534
130.1037	245.9937	207.3463	289.4269	282925	0.1534

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 26 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 27 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 28 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 29 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
130.135	306.0571	217.2288	306.113	292900	0.1382
130.135	306.0571	217.2288	306.113	172775	0.2194
130.135	306.0571	217.2288	306.113	262750	0.1896
130.135	306.0571	217.2288	306.113	172775	0.2194
130.3570912	249.6056684	245.9820456	299.0270682	282800	0.161
130.3570912	249.6056684	245.9820456	299.0270682	262975	0.163
130.3570912	249.6056684	245.9820456	299.0270682	262875	0.173
131.1048	239.3483	207.2493	314.7444	262825	0.1768
131.1048	239.3483	207.2493	314.7444	172775	0.2181
131.1048	239.3483	207.2493	314.7444	262600	0.1596
131.1048	239.3483	207.2493	314.7444	262750	0.1875
131.2656	239.9967	185.7509	233.7401	172750	0.2078
131.2656	239.9967	185.7509	233.7401	262775	0.1888
131.2656	239.9967	185.7509	233.7401	262600	0.15
131.3506	252.2448	191.6358	304.1364	262725	0.171
131.3506	252.2448	191.6358	304.1364	171700	0.1835
131.3506	252.2448	191.6358	304.1364	172725	0.2022
131.3506	252.2448	191.6358	304.1364	262875	0.1712
131.5165	294.19	179.3139	319.2644	282950	0.1493
131.5165	294.19	179.3139	319.2644	171700	0.1841
131.5165	294.19	179.3139	319.2644	172725	0.2051
131.5165	294.19	179.3139	319.2644	262775	0.2019
132.9285	315.3043	212.7024	259.4962	262725	0.1698
132.9285	315.3043	212.7024	259.4962	292900	0.1352
132.9285	315.3043	212.7024	259.4962	172750	0.2127
132.9285	315.3043	212.7024	259.4962	262875	0.1701

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 26 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 27 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 28 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 29 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
133.1374	303.9111	202.9089	243.449	262950	0.173
133.1374	303.9111	202.9089	243.449	262975	0.1578
133.1374	303.9111	202.9089	243.449	282975	0.1399
133.1374	303.9111	202.9089	243.449	282800	0.1562
133.916214	243.72535	221.589668	248.7280446	272700	0.209
133.916214	243.72535	221.589668	248.7280446	282975	0.14
133.916214	243.72535	221.589668	248.7280446	262875	0.168
134.4827	314.1295	235.8717	311.2526	292900	0.1397
134.4827	314.1295	235.8717	311.2526	282975	0.1462
134.4827	314.1295	235.8717	311.2526	262725	0.1779
134.4827	314.1295	235.8717	311.2526	172775	0.2215
136.2816	241.8319	194.1796	240.9909	172750	0.208
136.2816	241.8319	194.1796	240.9909	282800	0.154
136.2816	241.8319	194.1796	240.9909	282950	0.144
136.2816	241.8319	194.1796	240.9909	282975	0.138
136.6303	246.6509	190.782	324.4252	262825	0.1769
136.6303	246.6509	190.782	324.4252	262600	0.1596
136.6303	246.6509	190.782	324.4252	172750	0.2149
136.6303	246.6509	190.782	324.4252	172725	0.2035
136.9246	254.4073	238.8709	317.2348	172775	0.2209
136.9246	254.4073	238.8709	317.2348	262850	0.1824
136.9246	254.4073	238.8709	317.2348	262725	0.1771
136.9246	254.4073	238.8709	317.2348	282800	0.1625
137.042324	298.2874572	180.2840312	263.3268204	262725	0.167
137.042324	298.2874572	180.2840312	263.3268204	282975	0.139
137.042324	298.2874572	180.2840312	263.3268204	282800	0.155

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 26 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 27 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 28 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 29 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
137.4361	307.888	238.6531	230.0733	262750	0.1826
137.4361	307.888	238.6531	230.0733	262875	0.1693
137.4361	307.888	238.6531	230.0733	172750	0.2121
137.4361	307.888	238.6531	230.0733	262600	0.1557
137.5288796	275.662124	207.3154336	237.9751164	262825	0.17
137.5288796	275.662124	207.3154336	237.9751164	172725	0.199
137.5288796	275.662124	207.3154336	237.9751164	282950	0.15
137.5288796	275.662124	207.3154336	237.9751164	272700	0.207
137.6976812	336.855494	201.2139608	246.379077	262750	0.181
137.6976812	336.855494	201.2139608	246.379077	282950	0.146
137.6976812	336.855494	201.2139608	246.379077	292900	0.134
138.7169	252.7831	184.9125	304.5768	383800	0.176
138.7169	252.7831	184.9125	304.5768	262725	0.17
138.7169	252.7831	184.9125	304.5768	172725	0.203
138.7169	252.7831	184.9125	304.5768	262925	0.178
138.7576	282.23	213.0429	308.778	262825	0.178
138.7576	282.23	213.0429	308.778	262600	0.1609
138.7576	282.23	213.0429	308.778	262950	0.1791
138.7576	282.23	213.0429	308.778	262875	0.1737
139.0508	250.3208	220.5157	245.7445	171700	0.182
139.0508	250.3208	220.5157	245.7445	262925	0.1752
139.0508	250.3208	220.5157	245.7445	262950	0.1735
139.0508	250.3208	220.5157	245.7445	282950	0.1461
139.4244	315.6486	191.8041	278.0137	262725	0.1703
139.4244	315.6486	191.8041	278.0137	262950	0.1756
139.4244	315.6486	191.8041	278.0137	262775	0.1986

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 26 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 27 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 28 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 29 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
139.5712	273.4237	229.1606	241.2898	262950	0.1743
139.5712	273.4237	229.1606	241.2898	262750	0.182
139.5712	273.4237	229.1606	241.2898	393900	0.1298
139.5712	273.4237	229.1606	241.2898	262775	0.1962
139.731	294.4343	193.6588	307.5774	282925	0.155
139.731	294.4343	193.6588	307.5774	282925	0.155
139.731	294.4343	193.6588	307.5774	292900	0.137
139.731	294.4343	193.6588	307.5774	262950	0.1779
140.2822472	305.4513836	216.148796	339.4117566	172725	0.208
140.2822472	305.4513836	216.148796	339.4117566	262750	0.194
140.2822472	305.4513836	216.148796	339.4117566	282800	0.163
140.4304	320.7436	176.9191	292.5062	262825	0.174
140.4304	320.7436	176.9191	292.5062	383800	0.13
140.4304	320.7436	176.9191	292.5062	172725	0.202
140.4304	320.7436	176.9191	292.5062	282950	0.148
140.6054	257.8298	233.7834	247.8715	262725	0.1691
140.6054	257.8298	233.7834	247.8715	282800	0.1574
140.6054	257.8298	233.7834	247.8715	172750	0.2121
140.6054	257.8298	233.7834	247.8715	262825	0.173
141.2994	272.6199	173.8012	233.5409	282925	0.1486
141.2994	272.6199	173.8012	233.5409	172750	0.2079
141.2994	272.6199	173.8012	233.5409	172775	0.2104
141.2994	272.6199	173.8012	233.5409	272700	0.2029
142.7309	234.3185	186.4614	315.0416	262925	0.179
142.7309	234.3185	186.4614	315.0416	262750	0.185
142.7309	234.3185	186.4614	315.0416	262925	0.179
142.7309	234.3185	186.4614	315.0416	262600	0.158

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 26 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 27 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 28 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 29 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
143.9951	300.5165	217.7525	232.5793	272700	0.209
143.9951	300.5165	217.7525	232.5793	282925	0.151
143.9951	300.5165	217.7525	232.5793	262950	0.173
143.9951	300.5165	217.7525	232.5793	262850	0.174
144.158	266.9645	202.6276	237.028	262975	0.1569
144.158	266.9645	202.6276	237.028	282925	0.1503
144.158	266.9645	202.6276	237.028	272700	0.207
144.158	266.9645	202.6276	237.028	282925	0.1503
145.1169452	330.0785608	204.6411416	280.3567788	262750	0.186
145.1169452	330.0785608	204.6411416	280.3567788	172775	0.218
145.1169452	330.0785608	204.6411416	280.3567788	272700	0.212
145.1978	314.8204	200.4111	290.0051	282975	0.1432
145.1978	314.8204	200.4111	290.0051	171700	0.1855
145.1978	314.8204	200.4111	290.0051	262875	0.1722
145.1978	314.8204	200.4111	290.0051	282925	0.1547
146.0573	300.8115	171.6156	276.3871	172775	0.2139
146.0573	300.8115	171.6156	276.3871	393900	0.1295
146.0573	300.8115	171.6156	276.3871	282975	0.1405
146.0573	300.8115	171.6156	276.3871	262775	0.1958
147.1525	255.3437	226.8852	287.3346	282800	0.159
147.1525	255.3437	226.8852	287.3346	262850	0.179
147.1525	255.3437	226.8852	287.3346	262825	0.176
147.1525	255.3437	226.8852	287.3346	172775	0.217
147.1584	248.2882	229.3117	233.0781	272700	0.2093
147.1584	248.2882	229.3117	233.0781	262975	0.158
147.1584	248.2882	229.3117	233.0781	262725	0.167
147.1584	248.2882	229.3117	233.0781	282950	0.1459

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 26 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 27 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 28 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 29 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
147.6866	270.8811	183.7141	266.9803	262825	0.1716
147.6866	270.8811	183.7141	266.9803	262775	0.1949
147.6866	270.8811	183.7141	266.9803	393900	0.1292
147.6866	270.8811	183.7141	266.9803	262925	0.1751
147.8519092	309.7259556	165.0116856	276.1203816	282975	0.14
147.8519092	309.7259556	165.0116856	276.1203816	292900	0.133
147.8519092	309.7259556	165.0116856	276.1203816	262875	0.168
148.732	224.9202	166.3933	269.2676	262850	0.1726
148.732	224.9202	166.3933	269.2676	172750	0.2
148.732	224.9202	166.3933	269.2676	262750	0.178
148.732	224.9202	166.3933	269.2676	282800	0.1548
149.8659	267.9907	184.4603	227.7501	292900	0.131
149.8659	267.9907	184.4603	227.7501	262775	0.189
149.8659	267.9907	184.4603	227.7501	172750	0.208
149.8659	267.9907	184.4603	227.7501	262975	0.155
149.8790296	302.339702	227.1668296	309.907458	272700	0.216
149.8790296	302.339702	227.1668296	309.907458	262875	0.175
149.8790296	302.339702	227.1668296	309.907458	172750	0.219
150.425	315.8587	232.872	273.8009	262825	0.1772
150.425	315.8587	232.872	273.8009	292900	0.1376
150.425	315.8587	232.872	273.8009	82950	0.15
150.425	315.8587	232.872	273.8009	262875	0.173
151.0999	258.872	181.1487	306.6152	282925	0.153
151.0999	258.872	181.1487	306.6152	262925	0.178
151.0999	258.872	181.1487	306.6152	171700	0.183
151.0999	258.872	181.1487	306.6152	262950	0.176

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 26 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 27 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 28 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 29 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
152.134944	306.1713056	183.0703048	249.1096356	292900	0.133
152.134944	306.1713056	183.0703048	249.1096356	262775	0.193
152.134944	306.1713056	183.0703048	249.1096356	262850	0.173
152.1932	268.1402	214.3084	262.6349	262600	0.156
152.1932	268.1402	214.3084	262.6349	262850	0.176
152.1932	268.1402	214.3084	262.6349	262950	0.175
152.1932	268.1402	214.3084	262.6349	282925	0.152
152.3406	320.2677	177.6634	229.4522	171700	0.18
152.3406	320.2677	177.6634	229.4522	282950	0.144
152.3406	320.2677	177.6634	229.4522	262775	0.191
152.3406	320.2677	177.6634	229.4522	262725	0.164
152.5308	263.4504	183.0716	257.1676	282975	0.1395
152.5308	263.4504	183.0716	257.1676	282950	0.1454
152.5308	263.4504	183.0716	257.1676	262600	0.1533
152.5308	263.4504	183.0716	257.1676	172725	0.1995
152.883	328.4476	208.3815	324.4985	282950	0.1523
152.883	328.4476	208.3815	324.4985	172775	0.2331
152.883	328.4476	208.3815	324.4985	292900	0.1397
152.883	328.4476	208.3815	324.4985	282975	0.1462
152.9646	236.3197	226.1823	257.4562	262825	0.176
152.9646	236.3197	226.1823	257.4562	292900	0.135
152.9646	236.3197	226.1823	257.4562	262925	0.1769
152.9646	236.3197	226.1823	257.4562	172725	0.2012
153.1132	308.9956	234.832	316.6481	262850	0.1838
153.1132	308.9956	234.832	316.6481	172775	0.2339
153.1132	308.9956	234.832	316.6481	171700	0.1868
153.1132	308.9956	234.832	316.6481	262775	0.2101

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 26 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 27 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 28 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 29 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
153.5337	317.6185	173.1783	311.1233	282975	0.1433
153.5337	317.6185	173.1783	311.1233	171700	0.1856
153.5337	317.6185	173.1783	311.1233	262875	0.1726
153.5337	317.6185	173.1783	311.1233	172725	0.2038
153.6916	324.7581	216.8926	317.6298	262775	0.2086
153.6916	324.7581	216.8926	317.6298	282800	0.163
153.6916	324.7581	216.8926	317.6298	262975	0.165
153.6916	324.7581	216.8926	317.6298	262875	0.176
154.5722	243.897	177.0861	249.4537	262925	0.1724
154.5722	243.897	177.0861	249.4537	262825	0.1689
154.5722	243.897	177.0861	249.4537	292900	0.132
154.5722	243.897	177.0861	249.4537	262875	0.1663
154.8098044	318.2981416	168.2876624	309.8004084	172775	0.217
154.8098044	318.2981416	168.2876624	309.8004084	262775	0.201
154.8098044	318.2981416	168.2876624	309.8004084	383800	0.131
156.0682548	305.1135092	179.8020736	290.4098022	383800	0.131
156.0682548	305.1135092	179.8020736	290.4098022	172750	0.213
156.0682548	305.1135092	179.8020736	290.4098022	282975	0.142
156.3594	252.5543	209.4063	240.0759	262950	0.1728
156.3594	252.5543	209.4063	240.0759	262600	0.1536
156.3594	252.5543	209.4063	240.0759	262725	0.1665
156.3594	252.5543	209.4063	240.0759	172725	0.1996
157.7331	259.8896	238.6367	326.6485	262950	0.1827
157.7331	259.8896	238.6367	326.6485	282925	0.1587
157.7331	259.8896	238.6367	326.6485	282925	0.1587
157.7331	259.8896	238.6367	326.6485	282800	0.1638

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 26 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 27 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 28 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 29 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
158.188672	319.195206	235.5090056	272.7095364	282975	0.15
158.188672	319.195206	235.5090056	272.7095364	383800	0.133
158.188672	319.195206	235.5090056	272.7095364	262925	0.181
158.1911	276.3083	199.6824	317.3564	172775	0.2314
158.1911	276.3083	199.6824	317.3564	171700	0.1851
158.1911	276.3083	199.6824	317.3564	172725	0.2064
158.1911	276.3083	199.6824	317.3564	262875	0.174
158.1928	321.5155	197.355	279.6453	171700	0.185
158.1928	321.5155	197.355	279.6453	262850	0.178
158.1928	321.5155	197.355	279.6453	262825	0.175
158.1928	321.5155	197.355	279.6453	262850	0.178
158.558	244.2063	245.5595	282.6754	393900	0.1331
158.558	244.2063	245.5595	282.6754	262875	0.1733
158.558	244.2063	245.5595	282.6754	172750	0.2158
158.558	244.2063	245.5595	282.6754	262725	0.1743
159.2362	260.6471	196.0535	272.9463	172750	0.212
159.2362	260.6471	196.0535	272.9463	262875	0.169
159.2362	260.6471	196.0535	272.9463	282800	0.157
159.2362	260.6471	196.0535	272.9463	282950	0.147
159.3064	263.5049	245.3905	254.8772	172750	0.214
159.3064	263.5049	245.3905	254.8772	262850	0.177
159.3064	263.5049	245.3905	254.8772	282975	0.142
159.3064	263.5049	245.3905	254.8772	171700	0.183
159.8075	266.5212	217.5499	328.1003	262750	0.1924
159.8075	266.5212	217.5499	328.1003	172750	0.2193
159.8075	266.5212	217.5499	328.1003	262950	0.1814
159.8075	266.5212	217.5499	328.1003	272700	0.2168

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 26 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 27 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 28 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 29 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
162.9217	246.9042	223.4976	295.5924	172775	0.2184
162.9217	246.9042	223.4976	295.5924	262775	0.2034
162.9217	246.9042	223.4976	295.5924	262925	0.1811
163.4417	310.3435	171.1919	233.6777	292900	0.131
163.4417	310.3435	171.1919	233.6777	172725	0.198
163.4417	310.3435	171.1919	233.6777	172725	0.198
163.4417	310.3435	171.1919	233.6777	262975	0.156
163.5304	320.2548	177.1433	266.4766	172775	0.2107
163.5304	320.2548	177.1433	266.4766	393900	0.127
163.5304	320.2548	177.1433	266.4766	262725	0.1637
163.5304	320.2548	177.1433	266.4766	282925	0.1493
164.1732	238.4847	242.541	299.7611	262975	0.1639
164.1732	238.4847	242.541	299.7611	292900	0.1388
164.1732	238.4847	242.541	299.7611	262975	0.1639
164.1732	238.4847	242.541	299.7611	262950	0.1803
164.4857	304.1037	239.2967	326.1277	172775	0.226
164.4857	304.1037	239.2967	326.1277	262975	0.166
164.4857	304.1037	239.2967	326.1277	272700	0.219
164.624	317.0289	237.5444	240.3656	393900	0.1313
164.624	317.0289	237.5444	240.3656	262775	0.1998
164.624	317.0289	237.5444	240.3656	282925	0.1539
164.624	317.0289	237.5444	240.3656	262875	0.171
164.7239	273.4782	177.0914	300.4568	262950	0.1763
164.7239	273.4782	177.0914	300.4568	172725	0.2024
164.7239	273.4782	177.0914	300.4568	172750	0.2136
164.7239	273.4782	177.0914	300.4568	262600	0.1577

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 26 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 27 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 28 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 29 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
164.8286	261.5252	196.0411	315.6175	292900	0.137
164.8286	261.5252	196.0411	315.6175	282950	0.15
164.8286	261.5252	196.0411	315.6175	282925	0.155
164.8286	261.5252	196.0411	315.6175	262825	0.177
165.3966	252.4667	207.2848	338.3684	262925	0.1843
165.3966	252.4667	207.2848	338.3684	282950	0.1522
165.3966	252.4667	207.2848	338.3684	262975	0.1648
165.3966	252.4667	207.2848	338.3684	262600	0.1635

หมายเหตุ - ตำแหน่งที่เกิด Fault เป็นรหัสตามตัวอย่างต่อไปนี้

ที่ 25% ของสายส่งจากบัส 28 ไปที่บัส 29 จะแสดงว่า 282925

ที่ 50% ของสายส่งจากบัส 26 ไปที่บัส 29 จะแสดงว่า 262950

ที่บัส 26 จะแสดงว่า 262600

ที่บัส 29 จะแสดงว่า 292900

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลที่ใช้ในการหาโครงสร้างระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายของระบบ WSCC

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 5 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 6 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 8 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
100.5542	72.0093	80.0020	1100	0.1997
100.5542	72.0093	80.0020	5775	0.1841
100.5542	72.0093	80.0020	7825	0.1631
100.5542	72.0093	80.0020	4550	0.2218
111.4469	96.6922	100.2864	7700	0.1703
111.4469	96.6922	100.2864	6925	0.3121
111.4469	96.6922	100.2864	7875	0.2200
111.4469	96.6922	100.2864	4650	0.2885
132.2202	105.3943	114.9202	4400	0.2863
132.2202	105.3943	114.9202	8950	0.2658
132.2202	105.3943	114.9202	4575	0.3354
132.2202	105.3943	114.9202	7850	0.2323
135.0293	83.9261	98.2619	6600	0.3229
135.0293	83.9261	98.2619	5750	0.2584
135.0293	83.9261	98.2619	8975	0.2255
135.0293	83.9261	98.2619	4525	0.2678
120.0223	100.0032	97.1092	2200	0.1630
120.0223	100.0032	97.1092	4650	0.2961
120.0223	100.0032	97.1092	5725	0.2819
120.0223	100.0032	97.1092	6925	0.3200
145.2090	82.1183	85.2093	9900	0.1981
145.2090	82.1183	85.2093	4675	0.3023
145.2090	82.1183	85.2093	4550	0.2731
145.2090	82.1183	85.2093	4625	0.2663
122.4994	104.3994	101.0736	3300	0.2107
122.4994	104.3994	101.0736	8925	0.2500
122.4994	104.3994	101.0736	6975	0.2661
122.4994	104.3994	101.0736	7825	0.1987

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 5 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 6 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 8 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
103.4095	82.3904	81.2923	5500	0.2451
103.4095	82.3904	81.2923	5725	0.2378
103.4095	82.3904	81.2923	8950	0.2071
103.4095	82.3904	81.2923	4675	0.2574
134.4583	97.3934	115.2023	8800	0.2575
134.4583	97.3934	115.2023	8975	0.2454
134.4583	97.3934	115.2023	4550	0.3200
134.4583	97.3934	115.2023	7850	0.2297
101.3974	73.0023	99.2761	6600	0.2788
101.3974	73.0023	99.2761	7875	0.2015
101.3974	73.0023	99.2761	6950	0.2613
101.3974	73.0023	99.2761	5750	0.2279
112.9372	84.1039	113.0021	2200	0.1633
112.9372	84.1039	113.0021	4525	0.2664
112.9372	84.1039	113.0021	4625	0.2741
112.9372	84.1039	113.0021	5725	0.2810
121.0384	104.0294	96.0231	5500	0.2974
121.0384	104.0294	96.0231	7825	0.1947
121.0384	104.0294	96.0231	8950	0.2417
121.0384	104.0294	96.0231	5775	0.2224
146.0034	103.0582	82.0172	8800	0.2418
146.0034	103.0582	82.0172	4650	0.3049
146.0034	103.0582	82.0172	6975	0.2635
146.0034	103.0582	82.0172	8925	0.2493
133.0934	83.0934	102.0384	3300	0.2061
133.0934	83.0934	102.0384	5750	0.2600
133.0934	83.0934	102.0384	4675	0.3154
133.0934	83.0934	102.0384	8975	0.2267

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 5 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 6 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 8 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
148.0294	81.3341	83.9923	3300	0.2017
148.0294	81.3341	83.9923	4525	0.2596
148.0294	81.3341	83.9923	7825	0.1910
148.0294	81.3341	83.9923	6975	0.2514
131.9347	97.2984	112.9361	9900	0.2162
131.9347	97.2984	112.9361	8975	0.2423
131.9347	97.2984	112.9361	4575	0.3226
131.9347	97.2984	112.9361	7875	0.2423
123.0484	74.2094	95.0231	8800	0.2203
123.0484	74.2094	95.0231	8925	0.2265
123.0484	74.2094	95.0231	6925	0.2935
123.0484	74.2094	95.0231	4650	0.2714
130.9934	99.4653	99.0012	1100	0.2765
130.9934	99.4653	99.0012	7850	0.2174
130.9934	99.4653	99.0012	6950	0.3090
130.9934	99.4653	99.0012	6975	0.2663
132.9942	98.2828	87.2833	7700	0.1730
132.9942	98.2828	87.2833	7825	0.1928
132.9942	98.2828	87.2833	8950	0.2386
132.9942	98.2828	87.2833	4525	0.2648
134.2982	80.1183	116.0232	4400	0.2653
134.2982	80.1183	116.0232	4550	0.3024
134.2982	80.1183	116.0232	6950	0.3155
134.2982	80.1183	116.0232	8925	0.2547
148.3908	101.3742	84.2983	2200	0.1678
148.3908	101.3742	84.2983	4650	0.3092
148.3908	101.3742	84.2983	5775	0.2290
148.3908	101.3742	84.2983	7825	0.1999

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 5 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 6 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 8 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
129.0934	96.2168	100.0209	4400	0.2542
129.0934	96.2168	100.0209	8925	0.2482
129.0934	96.2168	100.0209	5725	0.2908
129.0934	96.2168	100.0209	6950	0.3054
103.5668	75.2732	96.0023	8800	0.2102
103.5668	75.2732	96.0023	4575	0.2515
103.5668	75.2732	96.0023	6925	0.2780
103.5668	75.2732	96.0023	5775	0.1980
114.2734	95.2974	84.9202	9900	0.1908
114.2734	95.2974	84.9202	8925	0.2261
114.2734	95.2974	84.9202	6950	0.2740
114.2734	95.2974	84.9202	7825	0.1813
128.2093	84.2282	103.0293	3300	0.2054
128.2093	84.2282	103.0293	4525	0.2678
128.2093	84.2282	103.0293	6950	0.2971
128.2093	84.2282	103.0293	5775	0.2216
149.3984	100.3094	99.2023	7700	0.1873
149.3984	100.3094	99.2023	8950	0.2603
149.3984	100.3094	99.2023	7825	0.2092
149.3984	100.3094	99.2023	4575	0.3249
118.2732	79.7220	100.2873	4400	0.2318
118.2732	79.7220	100.2873	6925	0.3013
118.2732	79.7220	100.2873	5750	0.2448
118.2732	79.7220	100.2873	4575	0.2732
124.0002	87.9238	84.2093	6600	0.2947
124.0002	87.9238	84.2093	7825	0.1824
124.0002	87.9238	84.2093	8950	0.2244
124.0002	87.9238	84.2093	4575	0.2659

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 5 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 6 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 8 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
127.0055	100.3374	117.2093	2200	0.1751
127.0055	100.3374	117.2093	5725	0.3144
127.0055	100.3374	117.2093	7850	0.2284
127.0055	100.3374	117.2093	8975	0.2445
135.3033	76.0384	85.2983	7700	0.1649
135.3033	76.0384	85.2983	7825	0.1834
135.3033	76.0384	85.2983	6950	0.2751
135.3033	76.0384	85.2983	4675	0.2861
159.0000	101.9293	103.0202	6600	0.3869
159.0000	101.9293	103.0202	6925	0.3796
159.0000	101.9293	103.0202	8975	0.2529
159.0000	101.9293	103.0202	7850	0.2376
148.0909	93.3392	111.0027	8800	0.2608
148.0909	93.3392	111.0027	5775	0.2453
148.0909	93.3392	111.0027	4550	0.3249
148.0909	93.3392	111.0027	6975	0.2855
104.2674	99.3870	95.2983	1100	0.2433
104.2674	99.3870	95.2983	7825	0.1844
104.2674	99.3870	95.2983	6975	0.2454
104.2674	99.3870	95.2983	5725	0.2654
115.3982	76.2843	83.0405	5500	0.2524
115.3982	76.2843	83.0405	8950	0.2118
115.3982	76.2843	83.0405	7850	0.1878
115.3982	76.2843	83.0405	6925	0.2735
136.0825	94.8763	93.4957	3300	0.2077
136.0825	94.8763	93.4957	5750	0.2622
136.0825	94.8763	93.4957	7825	0.1967
136.0825	94.8763	93.4957	4550	0.2871

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 5 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 6 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 8 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
113.9934	102.0495	86.0231	7700	0.1658
113.9934	102.0495	86.0231	7825	0.1846
113.9934	102.0495	86.0231	8950	0.2284
113.9934	102.0495	86.0231	4550	0.2630
125.9364	86.2823	101.9374	6600	0.3210
125.9364	86.2823	101.9374	4525	0.2661
125.9364	86.2823	101.9374	6975	0.2563
125.9364	86.2823	101.9374	5750	0.2565
136.6069	103.9576	104.0021	2200	0.1734
136.6069	103.9576	104.0021	4575	0.3214
136.6069	103.9576	104.0021	4650	0.3301
136.6069	103.9576	104.0021	8975	0.2422
124.9734	98.9932	118.0231	3300	0.2177
124.9734	98.9932	118.0231	5775	0.2391
124.9734	98.9932	118.0231	6950	0.3284
124.9734	98.9932	118.0231	4550	0.3153
147.5982	89.3645	94.9283	5500	0.3098
147.5982	89.3645	94.9283	4525	0.2807
147.5982	89.3645	94.9283	5775	0.2301
147.5982	89.3645	94.9283	6925	0.3349
119.9293	77.7026	80.9921	9900	0.1830
119.9293	77.7026	80.9921	4650	0.2542
119.9293	77.7026	80.9921	4525	0.2296
119.9293	77.7026	80.9921	5775	0.1978
125.2093	78.4511	88.2983	5500	0.2687
125.2093	78.4511	88.2983	7825	0.1815
125.2093	78.4511	88.2983	4650	0.2686
125.2093	78.4511	88.2983	5775	0.2062

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 5 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 6 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 8 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
113.9934	102.0495	86.0231	7700	0.1658
113.9934	102.0495	86.0231	7825	0.1846
113.9934	102.0495	86.0231	8950	0.2284
113.9934	102.0495	86.0231	4550	0.2630
125.9364	86.2823	101.9374	6600	0.3210
125.9364	86.2823	101.9374	4525	0.2661
125.9364	86.2823	101.9374	6975	0.2563
125.9364	86.2823	101.9374	5750	0.2565
136.6069	103.9576	104.0021	2200	0.1734
136.6069	103.9576	104.0021	4575	0.3214
136.6069	103.9576	104.0021	4650	0.3301
136.6069	103.9576	104.0021	8975	0.2422
124.9734	98.9932	118.0231	3300	0.2177
124.9734	98.9932	118.0231	5775	0.2391
124.9734	98.9932	118.0231	6950	0.3284
124.9734	98.9932	118.0231	4550	0.3153
147.5982	89.3645	94.9283	5500	0.3098
147.5982	89.3645	94.9283	4525	0.2807
147.5982	89.3645	94.9283	5775	0.2301
147.5982	89.3645	94.9283	6925	0.3349
119.9293	77.7026	80.9921	9900	0.1830
119.9293	77.7026	80.9921	4650	0.2542
119.9293	77.7026	80.9921	4525	0.2296
119.9293	77.7026	80.9921	5775	0.1978
125.2093	78.4511	88.2983	5500	0.2687
125.2093	78.4511	88.2983	7825	0.1815
125.2093	78.4511	88.2983	4650	0.2686
125.2093	78.4511	88.2983	5775	0.2062

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 5 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 6 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 8 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
113.9934	102.0495	86.0231	7700	0.1658
113.9934	102.0495	86.0231	7825	0.1846
113.9934	102.0495	86.0231	8950	0.2284
113.9934	102.0495	86.0231	4550	0.2630
125.9364	86.2823	101.9374	6600	0.3210
125.9364	86.2823	101.9374	4525	0.2661
125.9364	86.2823	101.9374	6975	0.2563
125.9364	86.2823	101.9374	5750	0.2565
136.6069	103.9576	104.0021	2200	0.1734
136.6069	103.9576	104.0021	4575	0.3214
136.6069	103.9576	104.0021	4650	0.3301
136.6069	103.9576	104.0021	8975	0.2422
124.9734	98.9932	118.0231	3300	0.2177
124.9734	98.9932	118.0231	5775	0.2391
124.9734	98.9932	118.0231	6950	0.3284
124.9734	98.9932	118.0231	4550	0.3153
147.5982	89.3645	94.9283	5500	0.3098
147.5982	89.3645	94.9283	4525	0.2807
147.5982	89.3645	94.9283	5775	0.2301
147.5982	89.3645	94.9283	6925	0.3349
119.9293	77.7026	80.9921	9900	0.1830
119.9293	77.7026	80.9921	4650	0.2542
119.9293	77.7026	80.9921	4525	0.2296
119.9293	77.7026	80.9921	5775	0.1978
125.2093	78.4511	88.2983	5500	0.2687
125.2093	78.4511	88.2983	7825	0.1815
125.2093	78.4511	88.2983	4650	0.2686
125.2093	78.4511	88.2983	5775	0.2062

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 5 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 6 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 8 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
113.9934	102.0495	86.0231	7700	0.1658
113.9934	102.0495	86.0231	7825	0.1846
113.9934	102.0495	86.0231	8950	0.2284
113.9934	102.0495	86.0231	4550	0.2630
125.9364	86.2823	101.9374	6600	0.3210
125.9364	86.2823	101.9374	4525	0.2661
125.9364	86.2823	101.9374	6975	0.2563
125.9364	86.2823	101.9374	5750	0.2565
136.6069	103.9576	104.0021	2200	0.1734
136.6069	103.9576	104.0021	4575	0.3214
136.6069	103.9576	104.0021	4650	0.3301
136.6069	103.9576	104.0021	8975	0.2422
124.9734	98.9932	118.0231	3300	0.2177
124.9734	98.9932	118.0231	5775	0.2391
124.9734	98.9932	118.0231	6950	0.3284
124.9734	98.9932	118.0231	4550	0.3153
147.5982	89.3645	94.9283	5500	0.3098
147.5982	89.3645	94.9283	4525	0.2807
147.5982	89.3645	94.9283	5775	0.2301
147.5982	89.3645	94.9283	6925	0.3349
119.9293	77.7026	80.9921	9900	0.1830
119.9293	77.7026	80.9921	4650	0.2542
119.9293	77.7026	80.9921	4525	0.2296
119.9293	77.7026	80.9921	5775	0.1978
125.2093	78.4511	88.2983	5500	0.2687
125.2093	78.4511	88.2983	7825	0.1815
125.2093	78.4511	88.2983	4650	0.2686
125.2093	78.4511	88.2983	5775	0.2062

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 5 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 6 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 8 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
105.0037	77.2864	87.0928	4400	0.2066
105.0037	77.2864	87.0928	4525	0.2244
105.0037	77.2864	87.0928	6975	0.2246
105.0037	77.2864	87.0928	8975	0.1987
116.3094	91.3038	93.0283	2200	0.1572
116.3094	91.3038	93.0283	4550	0.2642
116.3094	91.3038	93.0283	2725	0.1573
116.3094	91.3038	93.0283	3925	0.1949
118.2094	100.0364	102.9462	6600	0.3298
118.2094	100.0364	102.9462	5750	0.2608
118.2094	100.0364	102.9462	4625	0.2806
118.2094	100.0364	102.9462	4550	0.2870
126.2093	97.3874	94.2923	9900	0.2024
126.2093	97.3874	94.2923	8950	0.2393
126.2093	97.3874	94.2923	6950	0.2968
126.2093	97.3874	94.2923	1450	0.2619
121.6485	78.1621	103.9393	1100	0.2516
121.6485	78.1621	103.9393	3950	0.2013
121.6485	78.1621	103.9393	7875	0.2187
121.6485	78.1621	103.9393	2775	0.1699
137.3987	88.2536	89.0203	8800	0.2327
137.3987	88.2536	89.0203	3925	0.2033
137.3987	88.2536	89.0203	4650	0.2906
137.3987	88.2536	89.0203	4625	0.2694
126.3094	104.3934	109.2093	3300	0.2155
126.3094	104.3934	109.2093	2725	0.1722
126.3094	104.3934	109.2093	6975	0.2765
126.3094	104.3934	109.2093	2750	0.1842

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 5 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 6 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 8 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
146.3095	91.3903	119.9843	1100	0.3230
146.3095	91.3903	119.9843	6950	0.3453
146.3095	91.3903	119.9843	3925	0.2224
146.3095	91.3903	119.9843	6975	0.2918
136.9942	96.8365	103.0293	6600	0.3489
136.9942	96.8365	103.0293	7850	0.2222
136.9942	96.8365	103.0293	6925	0.3445
136.9942	96.8365	103.0293	3925	0.2134
132.0934	90.2983	105.2983	4400	0.2584
132.0934	90.2983	105.2983	2775	0.1794
132.0934	90.2983	105.2983	1475	0.2584
132.0934	90.2983	105.2983	4575	0.2802
106.3974	77.1993	88.2712	7700	0.1551
106.3974	77.1993	88.2712	7825	0.1723
106.3974	77.1993	88.2712	7825	0.1723
106.3974	77.1993	88.2712	3975	0.1813
117.4058	78.2943	83.2183	4400	0.2122
117.4058	78.2943	83.2183	4650	0.2552
117.4058	78.2943	83.2183	4575	0.2511
117.4058	78.2943	83.2183	1425	0.2216
138.2093	90.7474	119.0308	3300	0.2191
138.2093	90.7474	119.0308	1425	0.309
138.2093	90.7474	119.0308	5725	0.3198
138.2093	90.7474	119.0308	5775	0.2439
113.0485	95.3834	118.0341	9900	0.2102
113.0485	95.3834	118.0341	2750	0.1801
113.0485	95.3834	118.0341	7850	0.2187
113.0485	95.3834	118.0341	9350	0.2123

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 5 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 6 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 8 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
145.0003	105.0954	110.8832	5500	0.3489
145.0003	105.0954	110.8832	6975	0.2923
145.0003	105.0954	110.8832	1475	0.2936
145.0003	105.0954	110.8832	6925	0.3787
132.2923	80.1012	104.9921	2200	0.1653
132.2923	80.1012	104.9921	1475	0.2494
132.2923	80.1012	104.9921	4550	0.2847
132.2923	80.1012	104.9921	4525	0.2705
119.9934	91.8493	85.5932	9900	0.1921
119.9934	91.8493	85.5932	8950	0.2254
119.9934	91.8493	85.5932	3950	0.1970
119.9934	91.8493	85.5932	4650	0.2724
128.3942	89.8522	93.2931	4400	0.2401
128.3942	89.8522	93.2931	4575	0.2831
128.3942	89.8522	93.2931	2750	0.1712
128.3942	89.8522	93.2931	5775	0.2174
144.0935	76.3418	89.2909	2200	0.1612
144.0935	76.3418	89.2909	5775	0.2170
144.0935	76.3418	89.2909	4575	0.2809
144.0935	76.3418	89.2909	2725	0.1612
139.3093	94.8386	109.0342	5500	0.3270
139.3093	94.8386	109.0342	4550	0.3131
139.3093	94.8386	109.0342	8975	0.2420
139.3093	94.8386	109.0342	6950	0.3258
107.5559	81.2023	120.0000	1100	0.2631
107.5559	81.2023	120.0000	4625	0.2757
107.5559	81.2023	120.0000	3975	0.2024
107.5559	81.2023	120.0000	7875	0.2239

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 5 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 6 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 8 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
118.4095	79.3934	90.0823	3300	0.1936
118.4095	79.3934	90.0823	4575	0.2607
118.4095	79.3934	90.0823	5775	0.2041
118.4095	79.3934	90.0823	8975	0.2085
135.5059	82.1273	116.2928	6600	0.3519
135.5059	82.1273	116.2928	4675	0.3409
135.5059	82.1273	116.2928	8950	0.2536
135.5059	82.1273	116.2928	4675	0.3409
143.0923	92.9945	106.0923	5500	0.3250
143.0923	92.9945	106.0923	8975	0.2408
143.0923	92.9945	106.0923	2725	0.1737
143.0923	92.9945	106.0923	7825	0.2071
116.0034	106.9494	82.3942	8800	0.2254
116.0034	106.9494	82.3942	1450	0.2446
116.0034	106.9494	82.3942	4675	0.2934
116.0034	106.9494	82.3942	8925	0.2324
142.0934	88.8201	117.2094	7700	0.1899
142.0934	88.8201	117.2094	5775	0.2339
142.0934	88.8201	117.2094	2775	0.1899
142.0934	88.8201	117.2094	7850	0.2312
129.3984	75.1622	89.2983	3300	0.1954
129.3984	75.1622	89.2983	5725	0.2618
129.3984	75.1622	89.2983	4525	0.2444
129.3984	75.1622	89.2983	6975	0.2399
103.4457	83.7723	105.0231	2200	0.1560
103.4457	83.7723	105.0231	7850	0.1992
103.4457	83.7723	105.0231	8925	0.2135
103.4457	83.7723	105.0231	4550	0.2610

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 5 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 6 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 8 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
140.3323	93.6642	92.1722	9900	0.2055
140.3323	93.6642	92.1722	4650	0.3039
140.3323	93.6642	92.1722	8925	0.2476
140.3323	93.6642	92.1722	5750	0.2634
141.0023	87.1084	108.2930	1100	0.2892
141.0023	87.1084	108.2930	4575	0.3147
141.0023	87.1084	108.2930	7875	0.2385
141.0023	87.1084	108.2930	8975	0.2379
108.2873	92.6645	115.0384	4400	0.2514
108.2873	92.6645	115.0384	6925	0.3262
108.2873	92.6645	115.0384	4650	0.3027
108.2873	92.6645	115.0384	5725	0.2862
119.2094	107.9374	91.0832	9900	0.2024
119.2094	107.9374	91.0832	4525	0.2657
119.2094	107.9374	91.0832	5750	0.2556
119.2094	107.9374	91.0832	8950	0.2391
133.0023	74.2982	110.0261	3300	0.2066
133.0023	74.2982	110.0261	7850	0.2138
133.0023	74.2982	110.0261	6925	0.3248
133.0023	74.2982	110.0261	4625	0.2804
140.7654	93.9304	107.1823	8800	0.2529
140.7654	93.9304	107.1823	5775	0.2378
140.7654	93.9304	107.1823	4550	0.3109
140.7654	93.9304	107.1823	4675	0.3462
141.1451	80.2934	94.9291	4400	0.2451
141.1451	80.2934	94.9291	7850	0.2109
141.1451	80.2934	94.9291	6950	0.2951
141.1451	80.2934	94.9291	8925	0.2418

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 5 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 6 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 8 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
150.0000	86.1922	82.0484	5500	0.2917
150.0000	86.1922	82.0484	8975	0.2234
150.0000	86.1922	82.0484	6925	0.3148
150.0000	86.1922	82.0484	4650	0.2918
121.9394	91.3877	114.0281	2200	0.1691
121.9394	91.3877	114.0281	5750	0.2688
121.9394	91.3877	114.0281	7875	0.2336
121.9394	91.3877	114.0281	8925	0.2520
130.0093	108.0000	92.0192	8800	0.2422
130.0093	108.0000	92.0192	4625	0.2850
130.0093	108.0000	92.0192	4525	0.2772
130.0093	108.0000	92.0192	5750	0.2650
139.9822	84.2911	107.2023	3300	0.2115
139.9822	84.2911	107.2023	7825	0.2025
139.9822	84.2911	107.2023	6925	0.3397
139.9822	84.2911	107.2023	4650	0.3166
114.7776	90.0354	111.2642	1100	0.2670
114.7776	90.0354	111.2642	6950	0.3008
114.7776	90.0354	111.2642	4625	0.2790
114.7776	90.0354	111.2642	5725	0.2855
109.4446	106.3084	90.0023	9900	0.1969
109.4446	106.3084	90.0023	7525	0.2695
109.4446	106.3084	90.0023	4575	0.2758
109.4446	106.3084	90.0023	4650	0.2818
120.3974	89.9932	113.2982	6600	0.3376
120.3974	89.9932	113.2982	7850	0.2168
120.3974	89.9932	113.2982	6975	0.2658
120.3974	89.9932	113.2982	8925	0.2494

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 5 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 6 (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส 8 (MW)	ตำแหน่งที่เกิด Fault	CCT (วินาที)
138.0934	94.3934	106.2931	2200	0.1723
138.0934	94.3934	106.2931	4550	0.3070
138.0934	94.3934	106.2931	7825	0.2053
138.0934	94.3934	106.2931	5750	0.2763
142.3993	72.9909	93.0293	9900	0.1974
142.3993	72.9909	93.0293	5750	0.2518
142.3993	72.9909	93.0293	8975	0.2197
142.3993	72.9909	93.0293	4625	0.2656
137.0342	88.6583	112.2842	7700	0.1848
137.0342	88.6583	112.2842	6925	0.3499
137.0342	88.6583	112.2842	8975	0.2395
137.0342	88.6583	112.2842	4525	0.2936
131.2992	81.2232	108.1783	4400	0.2534
131.2992	81.2232	108.1783	4525	0.2748
131.2992	81.2232	108.1783	7825	0.1975
131.2992	81.2232	108.1783	6975	0.2621
144.0034	95.2834	102.0842	2200	0.1728
144.0034	95.2834	102.0842	4675	0.3429
144.0034	95.2834	102.0842	7825	0.2061
144.0034	95.2834	102.0842	6925	0.3494
136.0034	87.2881	91.2643	1100	0.2575
136.0034	87.2881	91.2643	8950	0.2367
136.0034	87.2881	91.2643	5725	0.2794
136.0034	87.2881	91.2643	4575	0.2856
128.0342	107.3433	95.9203	9900	0.2088
128.0342	107.3433	95.9203	5750	0.2668
128.0342	107.3433	95.9203	7825	0.1995
128.0342	107.3433	95.9203	6975	0.2672

หมายเหตุ - ตำแหน่งที่เกิด Fault เป็นรหัสตามตัวอย่างต่อไปนี้

ที่ 25% ของสายส่งจากบัส 5 ไปที่บัส 7 จะแสดงว่า 5725

ที่ 75% ของสายส่งจากบัส 6 ไปที่บัส 9 จะแสดงว่า 6975

ที่บัส 3 จะแสดงว่า 3300

ที่บัส 4 จะแสดงว่า 4400

ภาคผนวก ค
ค่าพารามิเตอร์ของระบบ New England

ตารางที่ ค.1 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Unit No.	H (pu.s)	R_a (Ω)	x'_d (Ω)	x'_q (Ω)	x_d (Ω)	x_q (Ω)	T'_{do} (s)	T'_{qo} (s)	x_l (Ω)
1	500	0	0.006	0.008	0.02	0.019	7	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	0.29	0.28	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	0.0125

ตารางที่ ค.2 ค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง

Line Data					Transformer Tap	
จากบัส	ไปที่บัส	R (Ω)	X (Ω)	B (Var)	Magnitude	Angle
1	2	0.0035	0.0411	0.6987	0	0
1	39	0.001	0.025	0.75	0	0
2	3	0.0013	0.0151	0.2572	0	0
2	25	0.007	0.0086	0.146	0	0
3	4	0.0013	0.0213	0.2214	0	0
3	18	0.0011	0.0133	0.2138	0	0
4	5	0.0008	0.0128	0.1342	0	0
4	14	0.0008	0.0129	0.1382	0	0
5	6	0.0002	0.0026	0.0434	0	0
5	8	0.0008	0.0112	0.1476	0	0

ตารางที่ ค.2 (ต่อ)

Line Data					Transformer Tap	
จากบัส	ไปที่บัส	R (Ω)	X (Ω)	B (Var)	Magnitude	Angle
6	7	0.0006	0.0092	0.113	0	0
6	11	0.0007	0.0082	0.1389	0	0
7	8	0.0004	0.0046	0.078	0	0
8	9	0.0023	0.0363	0.3804	0	0
9	39	0.001	0.025	1.2	0	0
10	11	0.0004	0.0043	0.0729	0	0
10	13	0.0004	0.0043	0.0729	0	0
13	14	0.0009	0.0101	0.1723	0	0
14	15	0.0018	0.0217	0.366	0	0
15	16	0.0009	0.0094	0.171	0	0
16	17	0.0007	0.0089	0.1342	0	0
16	19	0.0016	0.0195	0.304	0	0
16	21	0.0008	0.0135	0.2548	0	0
16	24	0.0003	0.0059	0.068	0	0
17	18	0.0007	0.0082	0.1319	0	0
17	27	0.0013	0.0173	0.3216	0	0
21	22	0.0008	0.014	0.2565	0	0
22	23	0.0006	0.0096	0.1846	0	0
23	24	0.0022	0.035	0.361	0	0
25	26	0.0032	0.0323	0.513	0	0
26	27	0.0014	0.0147	0.2396	0	0
26	28	0.0043	0.0474	0.7802	0	0
26	29	0.0057	0.0625	1.029	0	0
28	29	0.0014	0.0151	0.249	0	0
12	11	0.0016	0.0435	0	1.006	0
12	13	0.0016	0.0435	0	1.006	0

ตารางที่ ค.2 (ต่อ)

Line Data					Transformer Tap	
จากบัส	ไปที่บัส	R (Ω)	X (Ω)	B (Var)	Magnitude	Angle
6	31	0	0.025	0	1.07	0
10	32	0	0.02	0	1.07	0
19	33	0.0007	0.0142	0	1.07	0
20	34	0.0009	0.018	0	1.009	0
22	35	0	0.0143	0	1.025	0
23	36	0.0005	0.0272	0	1	0
25	37	0.0006	0.0232	0	1.025	0
2	30	0	0.0181	0	1.025	0
29	38	0.0008	0.0156	0	1.025	0
19	20	0.0007	0.0138	0	1.06	0

ตารางที่ ค.3 ค่ากำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่บัส

Bus	Type	Voltage (PU)	Load		Generator		
			P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)	Unit No.
1	PQ	-	0	0	0	0	
2	PQ	-	0	0	0	0	
3	PQ	-	322	2.4	0	0	
4	PQ	-	500	184	0	0	
5	PQ	-	0	0	0	0	
6	PQ	-	0	0	0	0	
7	PQ	-	233.8	84	0	0	
8	PQ	-	522	176	0	0	
9	PQ	-	0	0	0	0	
10	PQ	-	0	0	0	0	
11	PQ	-	0	0	0	0	
12	PQ	-	7.5	88	0	0	

ตารางที่ ค.3 (ต่อ)

Bus	Type	Voltage (PU)	Load		Generator		
			P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)	Unit No.
13	PQ	-	0	0	0	0	
14	PQ	-	0	0	0	0	
15	PQ	-	320	153	0	0	
16	PQ	-	329	32.3	0	0	
17	PQ	-	0	0	0	0	
18	PQ	-	158	30	0	0	
19	PQ	-	0	0	0	0	
20	PQ	-	628	103	0	0	
21	PQ	-	274	115	0	0	
22	PQ	-	0	0	0	0	
23	PQ	-	247.5	84.6	0	0	
24	PQ	-	308.6	-92	0	0	
25	PQ	-	224	47.2	0	0	
26	PQ	-	139	17	0	0	
27	PQ	-	281	75.5	0	0	
28	PQ	-	206	27.6	0	0	
29	PQ	-	283.5	26.9	0	0	
30	PV	1.0475	0	0	250	-	Gen10
31	PV	0.982	9.2	4.6	-	-	Gen2
32	PV	0.9831	0	0	650	-	Gen3
33	PV	0.9972	0	0	632	-	Gen4
34	PV	1.0123	0	0	508	-	Gen5
35	PV	1.0493	0	0	650	-	Gen6
36	PV	1.0635	0	0	560	-	Gen7
37	PV	1.0278	0	0	540	-	Gen8
38	PV	1.0265	0	0	830	-	Gen9
39	PV	1.03	1104	250	1000	-	Gen1

ภาคผนวก ง
ค่าพารามิเตอร์ของระบบ WSCC

ตารางที่ ง.1 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Unit No.	H	R (Ω)	X (Ω)	B (Var)	X_d (Ω)	X_q (Ω)	T'_{do} (s)	T'_{qo} (s)	X_l (Ω)	T''_{do} (Ω)	T''_{qo} (Ω)
1	4.73	0	0.304	0.485	0.73	0.485	8.96	0.31	0.2	0.03	0.05
2	2.56	0	0.3	0.492	2.24	2.161	6	0.54	0.2	0.03	0.05
3	3.01	0	0.181	0.25	1.313	1.258	5.89	0.6	0.1	0.03	0.05

ตารางที่ ง.2 ค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง

From Bus	To Bus	Shunt Charging	Reactance	Resistance
		B (Var)	X (Ω)	R (Ω)
4	5	0.176	0.085	0.01
4	6	0.158	0.092	0.017
6	9	0.358	0.17	0.039
5	7	0.306	0.161	0.032
7	8	0.149	0.072	0.0085
8	9	0.209	0.1008	0.0119
1	4	0	0.0576	0
3	9	0	0.0586	0
2	7	0	0.0625	0

ตารางที่ ง.3 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัส

Bus No.	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	P_L (MW)	Q_L (MVar)
1	72	27	0	0
2	163	0	0	0
3	85	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	125	50
6	0	0	90	30
7	0	0	0	0
8	0	0	100	35
9	0	0	0	0

ภาคผนวก จ

บทความทางวิชาการ

การประเมินเสถียรภาพชั่วครู่โดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้

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

ชนัฏพล ทองสิน, ก้านตอง อูปนวล, หนึ่งฤทัย วีระวัฒนะ, อาทิตย์ คุ้มครองทรัพย์
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เสนอการประเมินเสถียรภาพชั่วครู่โดยใช้ระบบอนุมานนิวโรฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้ ANFIS โดยเป็นการหาค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรที่เกิดจากการลัดวงจรภายในระบบทดสอบ โดยใช้โปรแกรม Power World จำลองระบบทดสอบ New England และระบบทดสอบ WSCC และบันทึกค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรได้จากการจำลอง ในกาดทดสอบนี้ได้นำค่ากำลังไฟฟ้าจริง ค่าตำแหน่งการเกิดการลัดวงจร และค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรมาใช้ในการฝึกสอนและทดสอบโดย ANFIS และทำการหารูปแบบโครงสร้างของแบบจำลองของระบบทดสอบทั้ง 2 ระบบ เพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละระบบโดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่น้อยที่สุด จากนั้นออกแบบการนำเสนอโดยใช้ Graphical User Interface ซึ่งจะได้โปรแกรมที่สามารถทำนายค่าเวลาวิกฤตที่ใช้ในการกำจัดกระแสลัดวงจรของระบบ New England และ WSCC

คำสำคัญ : เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าชั่วครู่, ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (ANFIS) ,จียูไอ

Abstract

This Project represents Transient Stability Estimation Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS). The method is about finding critical clearing time to clear fault in the testing electrical system by using Power World Program. Start from stimulate New England System and WSCC system as a practical model then records Critical Clearing time (CCT) at various load setting and location from each bus. Then use the data that previously record from the first step such as real power data from each load, fault location from each bus and CCT to train ANFIS. After that choose the best structure by considering the error of each structure – the appropriate one is the structure that has least error. The last step is using all the data to design Graphical User Interface which can predict CCT of New England system and WSCC system..

Keyword: Transient stability, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS), Graphic User Interface (GUI)

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น การศึกษาถึงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นอย่างมาก เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในระบบ หรือการเกิดลัดวงจรในระบบ การศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสิ่งเหล่านี้เรียกว่า การศึกษาเสถียรภาพชั่วครู่ (Transient Stability) ปัญหาที่พบบ่อยคือ การเกิดลัดวงจรขึ้นภายในระบบ ระบบป้องกันต้องกำจัดกระแสลัดวงจรออกจากระบบภายในช่วงเวลาวิกฤต (Critical Clearing Time) เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพ โดยนำแบบจำลอง ANFIS มาช่วยในทางด้านการประเมินหาเสถียรภาพชั่วครู่ จากนั้นนำรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบทั้ง 2 ระบบมาออกแบบการนำเสนอโดยใช้ Graphic User Interface (GUI) เพื่อใช้ในการพยากรณ์

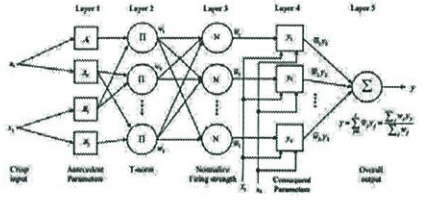
2. หลักการและทฤษฎี

2.1 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าชั่วครู่ (Transient Stability)

การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังทำให้ทราบถึงขีดความสามารถของระบบว่าสามารถรับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในระบบได้มากน้อยเพียงใด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภายในระบบ ถ้าหากระแสระบบสามารถปรับตัวให้เพิ่มกำลังทางกลจนสำดุลกับกำลังไฟฟ้าที่ต้องเพิ่มได้ในระยะเวลาหนึ่ง ก็ถือว่าระบบมีเสถียรภาพสำหรับการเปลี่ยนแปลงโหลดนั้นๆ แต่ถ้าหากระบบไม่สามารถปรับตัวให้กำลังทางกลสมดุลกับกำลังไฟฟ้าที่ต้องการได้จะเกิดการแกว่ง (Oscillate) ซึ่งมีความถี่เปลี่ยนไปโดยไม่สามารถกลับมาถี่ความถี่ปกติได้ จนอุปกรณ์ป้องกันต่างๆปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออก เมื่อเครื่องกำเนิดเครื่องหนึ่งถูกปลดออกก็ทำให้เครื่องที่เหลือรับภาระมากขึ้นและเกิดเหตุการณ์อย่างเดิมซ้ำ เรียกว่า ระบบสูญเสียเสถียรภาพ ซึ่งจะแบ่งออกได้เป็นสองกรณีใหญ่ๆคือ การเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ และการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วแบบทรานเซียนท์ (Transient Stability) มักจะเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริงในระบบไฟฟ้ากำลัง

2.2 ระบบอนุมานนิวโรฟัซซี (ANFIS)

เป็นระบบที่สามารถสร้างกฎของฟัซซีด้วยการใช้เพียงแค่อินพุทและเอาท์พุท มีโครงสร้างในการทำงานแบ่งเป็น 5 ชั้น (layer)



Layer 1: Antecedent Parameters ชั้นพารามิเตอร์ข้อตั้ง พารามิเตอร์ของชั้นนี้สามารถปรับได้ ทุกโนด j ของชั้นนี้จะเป็นสี่เหลี่ยม โดยมีฟังก์ชันโนด เป็นที่ทำการหาค่าฟัซซีจาก Crisp input(x) ผ่านทางฟังก์ชันความเป็นสมาชิก $\mu_{A_i}(x)$

Layer 2: T-norm Operator ชั้นการเชื่อมโยงค่าฟัซซีจากแต่ละมิติ ฟังก์ชันของโนดนี้เป็นแบบวงกลม หมายถึงไม่สามารถปรับพารามิเตอร์ โดยมีสัญลักษณ์เป็นเครื่องหมาย π เป็นชั้นที่ทำการเชื่อมโยงค่าฟัซซีจากแต่ละมิติหรือฟัซซีเซ็ท โดยคูณสัญญาณที่เป็นฟัซซีเข้าด้วยกันและส่งค่าฟัซซีผลคูณเป็นสัญญาณออก

Layer 3: Normalize Firing Strength ฟังก์ชันของโนดนี้เป็นแบบวงกลม สัญลักษณ์ของโนดเป็นเครื่องหมาย N หมายถึงการทำ Normalize firing strength เป็นชั้นทำค่าฟัซซีผลรวมจากข้อตั้งทุกกฎให้เป็นหนึ่ง โดยค่าฟัซซี j จากกฎแต่ละข้อจะถูกหารด้วยผลรวมของค่าฟัซซีจากทุกกฎ

Layer 4: Consequent Parameters เป็นชั้นของพารามิเตอร์ข้อตาม ฟังก์ชันของโนดนี้เป็นแบบสี่เหลี่ยม มีพารามิเตอร์ r_{j0}, r_{j1} และ r_{j2} สามารถปรับค่าได้

Layer 5: Overall Output เป็นชั้นเอาต์พุตของโครงข่าย มีสัญลักษณ์ของโนดเป็นเครื่องหมาย Σ ฟังก์ชันของโนดนี้เป็นแบบวงกลม พารามิเตอร์ของโนดนี้จะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ทำหน้าที่รวมสัญญาณเข้าด้วยกันเพื่อออกเป็นเอาต์พุต

3.การประเมินหาเสถียรภาพชั่วครู่โดยใช้ ANFIS

เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังเป็นระบบที่มีการเชื่อมโยงและมีขนาดใหญ่มาก การหาค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร (Critical Clearing Time) จึงทำโดยการจำลองในโปรแกรม และนำแบบจำลองระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (ANFIS) มาช่วยในทางด้านการประเมินหาเสถียรภาพชั่วครู่ ซึ่งแบบจำลองระบบอนุมานนิวโรฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (ANFIS) จะสามารถหาความสัมพันธ์ของค่าอินพุทที่ป้อนเข้าไปและค่าเอาท์พุทที่ออกมา ซึ่งจะมีประโยชน์มากต่อการประเมินหาค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบ

4.ผลการทดลอง

จากการพิจารณาการเรียนรู้ของ ANFIS พบว่ามีการปรับปรุง RMSE ให้มีค่าลดลงเรื่อยๆในแต่ละรอบการเรียนรู้จนถึงค่าๆหนึ่ง จะไม่มีการลดลงของค่า RMSE อีกแม้ว่าจะเพิ่มรอบการเรียนรู้ จากการทดลองได้โครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดของระบบทดสอบ 2 ระบบดังนี้

ระบบ New England โครงสร้างที่ใช้ชนิดของฟังก์ชันสมาชิกคือ Triangular-shaped built-in membership function 2 2 3 2 2 โดยค่า Root Mean Square Error ของชุดฝึกสอนคือ 1.5979% และค่า Root Mean Square Error ของชุดทดสอบคือ 1.4759%

ระบบ Western System Coordinating Council โครงสร้างที่ใช้ชนิดของฟังก์ชันสมาชิกคือ Generalized bell –shaped built-in membership function 2 2 2 3 โดยค่า Root Mean Square Error ของชุดฝึกสอนคือ 3.31393% และค่า Root Mean Square Error ของชุดทดสอบคือ 2.9495%

5.สรุปผลการทดลอง

โครงงานนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ ANFIS เพื่อสร้างแบบจำลองการเพื่อทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจร โดยใช้ข้อมูลฝึกสอนและทดสอบจากการจำลองระบบด้วยโปรแกรม Power World โดยพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรคือ จำนวนข้อมูล รอบการฝึกสอน รวมถึงจำนวนและชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ซึ่งผลการทำนายที่ได้สามารถทำนายค่าเวลาวิกฤตในการกำจัดกระแสลัดวงจรได้ดี แต่ยังพบปัญหาที่ไม่สามารถทำนายให้ใกล้เคียงได้ เมื่อเป็นการทำนายข้อมูลที่โครงสร้างดังกล่าวไม่ได้มีการฝึกสอนไว้ ควรมีการปรับปรุงและพัฒนาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] ชำนาญ ห่อเกียรติ.การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง.พิมพ์ครั้งที่ 2.กรุงเทพฯ:จรัลสนิทวงศ์การพิมพ์,2550.

[2] ยุพา ชิดทองและ สรี ศุภราทิตย์ "การพัฒนาแบบจำลอง Hybrid เพื่อการพยากรณ์ยอดน้ำ" **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12** ,พิษณุโลก, พฤษภาคม 2550.

[3] พัฒนพงศ์ เฉลิมเมืองและคณะ "การประยุกต์ใช้ทฤษฎี ANFIS ในการวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญสู่ความสำเร็จของกระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์" **การประชุมวิชาการด้านการวิจัยดำเนินงานแห่งชาติ** ,กรกฎาคม 2551.

[4] U. Gabrjie and R. Mihalic, "Direct Methods for Transient Stability Assessment in Power Systems Comprising Controllable Series Devices", **IEEE Trans. on Power System**, Vol. 17, No. 4, 2002, pp. 689-694.

[5] บุญสืบ โพธิ์ศรี และคณะ, การเขียนโปรแกรมบนระบบปฏิบัติการ GUI,. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมอาชีวะ. 2547.

ประวัติผู้เขียน



นาย ชนัฏพล ทองสิน

11/7 ถนนเลียบคลองสอง4 เขตคลองสามวา แขวงบางชัน กรุงเทพ 10510

E mail: n.chanutphon@gmail.com



นางสาว ก้านตอง อูปนวล

43/1 ถนนบ้านดงพัฒนา ตำบลบ่อแฮ้ว อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง 52100

E mail: hukorn_kp@hotmail.com



นางสาว หนึ่งฤทัย วีระวัฒนะ

34/5 หมู่ 2 ตำบลพืชอุดม อำเภอลำลูกกา ปทุมธานี 12150

E mail: 1812bobo@gmail.com



นาย อาทิตย์ คุ้มครองทรัพย์

82 หมู่ 13 ตำบลคลองตะเกรา อำเภอท่าตะเกียบ จังหวัดฉะเชิงเทรา 24160

E mail: isakarm@hotmail.com