

๕๓

ตำราอิเล็กทรอนิกส์กลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การคำนวณหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤต
ของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

CRITICAL CLEARING TIME CALCULATION OF ELECTRICAL
POWER SYSTEMS USING NEURAL NETWORKS



ชายชาญ โพธิสาร
CHAICHAN POTHISARN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

วพ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

๕๕๓๓๗

พ.ศ. ๒๕๔๖

๕๕๔๖

ISBN 974-324-737-8

เลขหมู่
เลขทะเบียน... 48389
วัน, เดือน, ปี... 24 ต.ค. 2546

.b... 1133258X
i... 12225447

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง
b1133258X

**CRITICAL CLEARING TIME CALCULATION OF ELECTRICAL
POWER SYSTEMS USING NEURAL NETWORKS**

CHAICHAN POTHISARN



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2003
ISBN 974-324-737-8**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การคำนวณหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้โครงข่ายประสาทดัดเทียม
นักศึกษา	นาย ชชายชาญ โพธิสาร
รหัสนักศึกษา	44611018
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. สมชาติ จิรวิภากร

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันระบบไฟฟ้ากำลังได้มีการเชื่อมต่อกัน และขยายขนาดของระบบอย่างต่อเนื่อง รวมทั้งได้มีการนำเอาอุปกรณ์ควบคุมและปรับปรุงเสถียรภาพมาติดตั้งในระบบเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนมากขึ้น การศึกษาเสถียรภาพในสภาวะชั่วคราวของระบบไฟฟ้าเพื่อออกแบบและวางแผนระบบป้องกันจึงมีความยุ่งยาก และใช้เวลาในการหาคำตอบมากขึ้น (เนื่องมาจากขนาดของระบบ และความซับซ้อนของแบบจำลอง) วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทดัดเทียมในการศึกษาเสถียรภาพในสภาวะชั่วคราวของระบบไฟฟ้า ซึ่งสามารถหาคำตอบของระบบไฟฟ้าที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว โดยนำมาใช้ในการหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะต่างๆของระบบ อาทิ ระดับกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, โครงสร้างของระบบไฟฟ้า, ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และการเคลียร์ฟอลต์ ในรูปแบบต่างๆ โดยระบบไฟฟ้านำมาศึกษาเป็นระบบทดสอบ 1 ระบบ และระบบที่ใช้งานจริง 1 ระบบ

Thesis Title	Critical Clearing Time Calculation of Electrical Power Systems Using Neural Networks
Student	Mr. Chaichan Pothisarn
Student ID.	44611018
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2003
Thesis Advisor	Asst.Prof. Dr. Somchat Jiriwibhakorn

ABSTRACT

Currently, with the continuous interconnection and size increasing of power system and the stability control and improve equipment installation, the power system become larger and more complex. Therefore, the study of transient stability for protection system design and planning are more difficult and take more time (due to system size and complex). This thesis presents an application of Artificial Neural Networks (ANN) in transient stability study ,with fast access to the answer of the power system. ANN used to calculate the critical clearing time (CCT) of large power system with various the system condition ,such generation power level, system topology, fault location and fault clearing. There are two systems used in this study, a test system and a practical system.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยได้รับคำแนะนำ, คำปรึกษา และความเอาใจใส่ เป็นอย่างดี จาก ผศ.ดร.สมชาติ จิรวินาทร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้ง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงสำหรับ รศ. ศุภี บรรจงจิตร, รศ. มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ และ ผศ.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าให้คำปรึกษา และแนะนำแนวทางที่เหมาะสมในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ คุณ พุทธิขจร บุญมี จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ได้เอื้อเฟื้อ ข้อมูลและความช่วยเหลือต่างๆที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ คุณ วัชรพงษ์ วัชรโกมลพันธ์ เพื่อนสนิทที่ได้สนับสนุนด้านอุปกรณ์ที่ใช้ ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณ สิทธิโชค กิตติรักษ์ตระกูล เพื่อนนักศึกษาร่วมรุ่นปริญญาโทสำหรับความช่วยเหลือต่างๆในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของข้าพเจ้า ผู้ที่มอบชีวิต, การศึกษา และ อนาคตที่ดี ให้กับผู้วิจัย รวมถึงสมาชิกในครอบครัวทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจกับผู้วิจัย ตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ชายชาญ โพธิสาร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	1
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา	2
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการศึกษา	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะชั่วคราว	4
2.1 วิธีการทางเวลา	5
2.2 สมการสวิง	6
2.3 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและวงจรสมมูลย์ของระบบไฟฟ้า	9
2.4 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายเครื่อง	11
2.5 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการศึกษาเสถียรภาพในสถานะชั่วคราว	14
บทที่ 3 โครงข่ายประสาทเทียม	15
3.1 ความเป็นมาของโครงข่ายประสาท	15
3.2 การทำงานของโครงข่ายประสาท	18
3.2.1 นิเวรอน	18
3.2.2 โครงสร้างของนิเวรอนและ ไฮแนปส์	18
3.2.3 การส่งผ่านกระแสประสาท	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 ชนิดของการเรียนรู้โครงข่ายประสาทเทียม	20
3.3.1 Supervised Artificial Neural Networks	20
3.3.2 Unsupervised Artificial Neural Networks	20
3.4 Feed-forward Neural Networks	21
3.4.1 แบบจำลองของนิวรอน	21
3.4.2 ฟังก์ชันถ่ายโอน	21
3.4.3 นิวรอนที่มีหลายอินพุต	23
3.4.4 สถาปัตยกรรมของโครงข่าย.....	23
3.5 งานวิจัยในอดีตที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการแก้ปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลัง ...	26
บทที่ 4 ระบบไฟฟ้าที่ทำการศึกษา	33
4.1 ระบบ IEEE 50 generators test system	33
4.1.1 โครงสร้างของระบบ	33
4.1.2 เงื่อนไขของระบบที่พิจารณา	33
4.1.3 การจำลองเหตุการณ์	34
4.2 ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย	39
4.2.1 โครงสร้างของระบบ	39
4.2.2 เงื่อนไขของระบบที่พิจารณา	39
4.2.3 การจำลองเหตุการณ์	39
4.3 การคำนวณหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	44
บทที่ 5 การคำนวณหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม	46
5.1 การเลือกตัวแปรในการฝึกสอน	46
5.1.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system	47
5.1.2 ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT)	47
5.2 การกระจายของข้อมูลฝึกสอน	47
5.3 ปริมาณของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบ	49
5.4 เงื่อนไขของการฝึกสอน	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4.1 ค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส	50
5.4.2 ลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส	51
5.4.3 จำนวนครั้งของการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส	52
5.4.4 จำนวนรอบของการฝึกสอน	53
5.4.5 จำนวนโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม	53
5.4.6 ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน	54
5.4.7 ความชันของฟังก์ชันถ่ายโอน	55
5.4.8 เงื่อนไขที่เป็นค่าพื้นฐานของ Neural Network Toolbox	55
5.4.8.1 ค่า Gradient factor	56
5.4.8.2 ค่า Learning factor	56
5.5 ขั้นตอนการฝึกสอน	57
บทที่ 6 ผลการทดลอง	62
6.1 รูปแบบการนำเสนอ	62
6.1.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการทดลอง	62
6.1.1.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system	62
6.1.1.2 ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT)	62
6.1.2 รูปแบบการนำเสนอผลการทดลองของระบบไฟฟ้ากำลังแต่ละระบบ	62
6.2 ผลการทดลองของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system	63
6.2.1 ผลการทดลองกรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 0.50	63
6.2.2 ผลการทดลองกรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.00	68
6.2.3 ผลการทดลองกรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.50	73
6.2.4 เปรียบเทียบผลการทดลองทุกกรณี	78
6.3 ผลการทดลองของระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.3.1 ผลการทดลองกรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 0.50	80
6.3.2 ผลการทดลองกรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.00	85
6.3.3 ผลการทดลองกรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.50	90
6.2.4 เปรียบเทียบผลการทดลองทุกกรณี	95
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	97
เอกสารอ้างอิง	101
ภาคผนวก ก.	106
ภาคผนวก ข.	114
ประวัติผู้เขียน	145

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 โครงข่ายประสาทที่เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวาง	17
3.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการแก้ปัญหาระบบไฟฟ้ากำลัง	26
4.1 ตำแหน่งเกิดฟอลต์ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system ที่พิจารณา ...	34
4.2 โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system ที่พิจารณา	34
4.3 ตำแหน่งเกิดฟอลต์ของระบบไฟฟ้ากำลังของ EGAT ที่พิจารณา	44
4.4 โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังของ EGAT ที่พิจารณา	44
5.1 วิธีการแปลงข้อมูลที่ได้เป็นตัวแปรฝึกสอนสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system	49
5.2 วิธีการแปลงข้อมูลที่ได้เป็นตัวแปรฝึกสอนสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังของ EGAT	49
5.3 จำนวนข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ...	50
5.4 เงื่อนไขการฝึกสอนที่ควบคุม	56
5.5 เงื่อนไขการฝึกสอนที่เป็นค่าพื้นฐานของ Neural Network Tool Box	57
6.1 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 0.50 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 50 ชุด	63
6.2 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 0.50 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 100 ชุด	64
6.3 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 0.50 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด	65
6.4 เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 0.50	66
6.5 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.00 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 50 ชุด	68
6.6 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.00 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 100 ชุด	69
6.7 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.00 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด	70
6.8 เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.00	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.9 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี ความชัน (k) เท่ากับ 1.50 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 50 ชุด	73
6.10 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี ความชัน (k) เท่ากับ 1.50 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 100 ชุด	74
6.11 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี ความชัน (k) เท่ากับ 1.50 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด	75
6.12 เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี ความชัน (k) เท่ากับ 1.50	76
6.13 ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วในเงื่อนไขต่างๆ	78
6.14 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี ความชัน (k) เท่ากับ 0.50 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด	80
6.15 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี ความชัน (k) เท่ากับ 0.50 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 200 ชุด	81
6.16 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี ความชัน (k) เท่ากับ 0.50 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด	82
6.17 เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี ความชัน (k) เท่ากับ 0.50	83
6.18 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี ความชัน (k) เท่ากับ 1.00 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด	85
6.19 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี ความชัน (k) เท่ากับ 1.00 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 200 ชุด	86
6.20 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี ความชัน (k) เท่ากับ 1.00 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด	87
6.21 เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี ความชัน (k) เท่ากับ 1.00	88
6.22 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี ความชัน (k) เท่ากับ 1.50 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.23 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี ความชัน (k) เท่ากับ 1.50 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 200 ชุด	91
6.24 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี ความชัน (k) เท่ากับ 1.50 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด	92
6.25 เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี ความชัน (k) เท่ากับ 1.50	93
6.26 ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วในเงื่อนไขต่างๆ	95



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กราฟสวิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้า IEEE 50 generators test system ที่เกิดฟอลต์ที่บัส 105 และเคลียร์ฟอลต์ที่เวลา 120 msec	7
2.2 กราฟสวิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้า IEEE 50 generators test system ที่เกิดฟอลต์ที่บัส 105 และเคลียร์ฟอลต์ที่เวลา 121 msec	8
2.3 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบธรรมดา	10
2.4 การเชื่อมต่อของแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบธรรมดากับวงจรสมมูลของ ระบบไฟฟ้ากำลัง	10
2.5 โครงข่ายที่ถูกพิจารณาเป็นเมตริกซ์ของบัสแอดมิตแตนซ์	13
3.1 ตัวอย่างของนิเวรอนชนิดที่มีสองขั้ว	19
3.2 โครงสร้างของประสาท	19
3.3 แบบจำลองของนิเวรอน	21
3.4 ฟังก์ชันถ่ายโอน	22
3.5 แบบจำลองของนิเวรอนที่มีหลายอินพุต	23
3.6 แบบจำลองชั้นของนิเวรอน	23
3.7 แบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ชั้นซ่อน	24
4.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generator test system บริเวณที่ศึกษา	35
4.2 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generator test system: ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์	36
4.3 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generator test system : โครงสร้างของระบบที่พิจารณา ...	37
4.4 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generator test system : เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เพิ่มกำลังผลิต ...	38
4.5 ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยบริเวณภาคกลางตะวันตก และภาคใต้	40
4.6 ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยบริเวณภาคกลางตะวันตก และภาคใต้ : ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์	41
4.7 ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยบริเวณภาคกลางตะวันตก และภาคใต้ : โครงสร้างของระบบที่พิจารณา	42
4.8 ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยบริเวณภาคกลางตะวันตก และภาคใต้ : เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เพิ่มกำลังผลิต	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม Load flow and step by step time simulation ในการคำนวณค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤต	45
5.1 การกระจายของข้อมูลที่ได้จาก Pseudo random sequences	48
5.2 การเลือกค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสในแต่ละรอบการฝึกสอน	53
5.3 การเลือกโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม	54
5.4 ความชันของฟังก์ชันถ่ายโอน Tan-sigmoid ที่ใช้ในการฝึกสอน	55
5.5 โพลีชาร์ตของขั้นตอน Back-propagation calculation	59
5.6 โพลีชาร์ตของขั้นตอน Best round selection	60
5.7 โพลีชาร์ตของขั้นตอน Best structure and best round selection	61
6.1 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสำหรับข้อมูลทดสอบแต่ละชุด กรณีฝึกสอนด้วย ฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 0.50	66
6.2 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสำหรับข้อมูลทดสอบแต่ละชุด กรณีฝึกสอนด้วย ฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.00	71
6.3 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสำหรับข้อมูลทดสอบแต่ละชุด กรณีฝึกสอนด้วย ฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.50	76
6.4 การเปรียบเทียบค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ในทุกกรณี	78
6.5 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสำหรับข้อมูลทดสอบแต่ละชุด กรณีฝึกสอนด้วย ฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 0.50	83
6.6 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสำหรับข้อมูลทดสอบแต่ละชุด กรณีฝึกสอนด้วย ฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.00	88
6.7 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสำหรับข้อมูลทดสอบแต่ละชุด กรณีฝึกสอนด้วย ฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.50	93
6.8 การเปรียบเทียบค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ในทุกกรณี	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

การศึกษาเสถียรภาพในสภาวะชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลัง (Transient stability) องค์ประกอบหนึ่งที่มีความสำคัญและถูกนำมาพิจารณาในการรักษาเสถียรภาพของระบบ ทั้งในการออกแบบและวางแผนระบบป้องกัน ก็คือ ช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤต (CCT) การคำนวณหาค่า CCT ของระบบไฟฟ้านั้นสามารถทำได้หลายวิธี อาทิเช่น วิธีการทางเวลา (Time domain) , Direct method [1] และ Transient energy function [2] ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีควมน่าเชื่อถือ, ความแม่นยำ, ความรวดเร็วในการหาคำตอบ และ ข้อจำกัดในการเลือกใช้แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแตกต่างกัน ในปัจจุบันระบบไฟฟ้ากำลังในทางปฏิบัติได้มีการเชื่อมต่อกัน และขยายขนาดของระบบอย่างต่อเนื่อง รวมทั้งได้มีการนำเอาอุปกรณ์ควบคุมและปรับปรุงเสถียรภาพมาติดตั้งในระบบเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนมากขึ้น การหาค่า CCT ของระบบไฟฟ้าโดยที่กล่าวถึงข้างต้น ก็จะมีควมยุ่งยากและใช้เวลาในการหาคำตอบมากขึ้น

1.2 ความมุ่งหมายของปัญหา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเอาโครงข่ายประสาทเทียม มาประยุกต์ใช้ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะชั่วคราว โดยพิจารณาค่า CCT เป็นคำตอบ เพื่อให้สามารถคำนวณหาคำตอบได้อย่างถูกต้องและมีความรวดเร็วในการหาคำตอบมากขึ้น

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ได้ตั้งสมมติฐานของการศึกษาโดยพิจารณาจากการที่โครงข่ายประสาทเทียมมีความสามารถในการเรียนรู้ฟังก์ชันต่อเนื่องแบบไม่เชิงเส้นหลายชนิดได้อย่างแม่นยำในขอบเขตที่เรียนรู้ โดยโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วจะใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยมาก และในปัจจุบันระบบไฟฟ้ากำลังได้มีการขยายขนาดและการเชื่อมโยงของระบบขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะชั่วคราวจึงเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนและใช้เวลาในการหาคำตอบเพิ่มขึ้นตามขนาดของระบบไฟฟ้ากำลัง การนำเอาโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการเรียนรู้สถานะต่างๆของระบบไฟฟ้ากำลังและหาคำตอบจากระบบที่ได้เรียนรู้ โดยมีคำตอบที่พิจารณาคือค่า CCT ซึ่งคำตอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมจะมีความถูกต้องและแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ดี ถึงดีมาก หากข้อมูลของระบบไฟฟ้าที่นำมาให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้มีปริมาณและคุณภาพเพียงพอ

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะชั่วคราวที่อยู่ในสภาวะ stressed (สภาวะที่มีการปรับกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวนหนึ่งให้เพิ่มขึ้นจากการทำงานปกติ, มีการปลดสายส่งบางชุดที่รับภาระจำนวนมากออกเพื่อซ่อมบำรุง และพิจารณาตำแหน่งเกิดฟอลต์ที่มีความรุนแรงของฟอลต์มาก)
2. ศึกษาองค์ประกอบของระบบไฟฟ้ากำลังทดสอบ (IEEE 50 generators test system) ที่มีผลต่อค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤต และกำหนดเงื่อนไขการทำงานจากระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณา
3. ทำการจำลองให้เกิดฟอลต์ชนิด 3 เฟส ขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังตามตำแหน่งที่ได้จากขั้นตอนในข้อที่ 1 โดยใช้โปรแกรม Load flow and step by step time simulation [3]
4. ทำการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมด้วยข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนในข้อ 3 โดยใช้ Neural Network Toolbox [4] ของโปรแกรม MATLAB เพื่อหาเงื่อนไขการฝึกสอนที่ทำให้โครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพสูงสุด
5. ทำการศึกษาซ้ำในข้อที่ 2 - 4 โดยใช้ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้งานจริงในทางปฏิบัติ (ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย)

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆดังต่อไปนี้

1. ศึกษาคุณสมบัติของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดต่างๆ
2. ศึกษาการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ซึ่งได้แก่โครงข่ายประสาทเทียมชนิด Feed-forward with Back-propagation algorithm
3. รวบรวมข้อมูลของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system และ EGAT system บริเวณภาคกลางตะวันตก และภาคใต้
4. ศึกษาการใช้งาน โปรแกรม Load flow and step by step time simulation
5. ศึกษาการใช้งาน Neural Network Toolbox ของโปรแกรม MATLAB
6. ทำการจำลองเหตุการณ์โดยใช้ IEEE 50 generators test system
7. นำข้อมูลที่ได้ไปฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม
8. พิจารณาหาเงื่อนไขการฝึกสอนที่ทำให้โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วมีประสิทธิภาพสูงสุด
9. ทำการจำลองเหตุการณ์โดยใช้ EGAT system บริเวณภาคกลางตะวันตก และภาคใต้

10. นำข้อมูลที่ได้ไปฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมโดยพิจารณาเงื่อนไขที่ได้จากขั้นตอนที่ 8 ประกอบ
11. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองและเสนอแนะแนวทางการพัฒนาการศึกษาต่อไป

1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการศึกษา

ในการศึกษานี้เป็นการศึกษาความสามารถของโครงข่ายประสาทเทียมในการเรียนรู้พฤติกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ซึ่งมีความซับซ้อนมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการลดขั้นตอนและระยะเวลาในการศึกษาโดยไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อความถูกต้องของผลการศึกษาที่ได้มากนัก ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้ใช้แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบควบคุมแบบธรรมดา (Classical models) และไม่พิจารณาถึงการชดเชย (Compensation) ต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลัง

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะชั่วคราวได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. สามารถนำผลการศึกษาที่ได้มาเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการหาคำตอบของการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังให้รวดเร็วมากขึ้น

บทที่ 2

เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะชั่วคราว

การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังคือการศึกษาขีดความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลังต่อการเปลี่ยนแปลงภายในของระบบซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นสามประเภทตามธรรมชาติ และลำดับความรุนแรงของการรบกวน (Disturbance) คือ การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสถานะชั่วคราว, สถานะไดนามิก และสถานะอยู่ตัว

การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะชั่วคราว มีจุดมุ่งหมายเพื่อบ่งบอกถึงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังภายหลังจากที่เกิดการรบกวนขนาดใหญ่ อาทิเช่น การเกิดฟอลต์ในระบบ, การเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างทันทีทันใด หรือการสูญเสียกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบเป็นต้น ส่วนการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสถานะไดนามิก (Dynamic stability) และสถานะอยู่ตัว (Steady-state stability) นั้นเป็นการศึกษาในขอบเขตน้อยกว่าในสถานะชั่วคราว และพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียง 1 หรือ 2 เครื่อง ในสถานะการทำงานที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ โดยเป็นการพิจารณาถึงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังภายใต้การเปลี่ยนแปลงรอบๆจุดสมดุล

ข้อแตกต่างของการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสถานะไดนามิก และสถานะอยู่ตัว นั้นคือ การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะไดนามิกจะพิจารณาแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบละเอียด (Detailed models) ,ระบบการกระตุ้น (Excitation systems) และระบบบังคับกังหัน (Turbine-governing systems) ส่วนการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะอยู่ตัวนั้น จะพิจารณาแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบธรรมดา (Classical models) โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ ในปัจจุบันการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะชั่วคราวได้รับความสนใจและให้ความสำคัญมากกว่าการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสถานะไดนามิก และสถานะอยู่ตัว

ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะชั่วคราวนั้น ช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤต (Critical clearing time, CCT) เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ถูกนำมาพิจารณาในการรักษาเสถียรภาพของระบบ วิธีการหาค่า CCT นั้นมีอยู่หลายวิธีเวลา อาทิเช่น วิธีการทางเวลา (Time domain simulation method), Direct method [1] และ Transient energy function (TEF) [2] เป็นต้นแต่ละวิธีก็จะมี ความรวดเร็วในการหาคำตอบและข้อจำกัดแตกต่างกันออกไป วิธีการทางเวลาเป็นวิธีที่มีความแม่นยำ และเชื่อถือได้มากที่สุด แต่วิธีการทางเวลาก็มีข้อด้อยคือใช้เวลาในการหาคำตอบมากกว่าวิธีอื่นๆ วิธีนี้จึงเหมาะสำหรับใช้ในการออกแบบระบบ (Planning) มากกว่าที่จะนำมาใช้งานแบบทันทีทันใด (On-line operation) ส่วนวิธี Direct method และ Transient energy function นั้นแม้จะมีความเร็วในการหาคำตอบมากกว่าวิธีการทางเวลาแต่วิธีทั้งสองนี้ก็มีข้อจำกัดในการใช้งานจึงเหมาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่จะใช้กับแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบควบคุมแบบธรรมดา มากกว่าที่จะใช้กับแบบจำลองอย่างละเอียด และในกรณีที่ระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบก็ยังไม่รวดเร็วพอที่จะนำมาใช้งานแบบทันทีทันใดได้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะขอกล่าวถึงรายละเอียดเฉพาะวิธีการทางเวลา ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตเพื่อใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

2.1 วิธีการทางเวลา

วิธีการทางเวลา (Time domain simulation method, TDM) เป็นวิธีการหาคำตอบในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความแม่นยำและเชื่อถือได้มากที่สุด ไม่มีข้อจำกัดในการเลือกใช้แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบควบคุม นอกจากนี้วิธีการทางเวลายังถูกใช้เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบความถูกต้องของคำตอบที่ได้จากวิธีการอื่นๆ ซึ่งรวมถึงการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อีกด้วย

ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะชั่วคราวโดยวิธีการทางเวลานั้น คุณสมบัติการทำงานของกังหัน (Turbine), เครื่องกำเนิดไฟฟ้า รวมถึงระบบควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ ไดนามิกโหลด จะถูกแทนด้วยสมการอนุพันธ์ ในขณะที่ระบบส่ง และสแตตคิกโหลดจะถูกแทนด้วยสมการพีชคณิต การแก้สมการทั้งสองชุดดังกล่าวนี้จะใช้วิธีการเชิงตัวเลข แต่เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังมีการเชื่อมโยงกันระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดจำนวนมาก การคำนวณด้วยวิธีการเชิงตัวเลขจึงต้องอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ โดยคำตอบที่ได้จะเป็นชุดของค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบไฟฟ้ากำลังที่ลำดับเวลาต่างๆ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังนั้นมีอยู่มากมาย ทั้งในรูปแบบเชิงพาณิชย์ และรูปแบบการศึกษาซึ่งมีขีดความสามารถแตกต่างกัน อาทิเช่นการเลือกใช้แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบควบคุม จำนวนบัส และสายส่งที่สามารถใช้งานได้ เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้โปรแกรมในรูปแบบการศึกษา และใช้แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบควบคุมแบบธรรมดา ซึ่งกำหนดให้แรงดันภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Internal voltage, E') หลังจากรีแอกแตนซ์ชั่วคราว (Transient reactance, X_d') มีค่าคงที่ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป เนื่องจากใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าแบบจำลองแบบละเอียด และมีความถูกต้องของคำตอบอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

2.2 สมการสวิง

สมการสวิง (Swing equation) [5] คือ สมการอนุพันธ์ที่แสดงความสัมพันธ์ของมุมโรเตอร์และเวลา ดังแสดงในสมการที่ (2.1) ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์อันดับที่สอง และสามารถแทนด้วยสมการอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง สองสมการ ดังสมการที่ (2.2) และ (2.3)

$$\frac{2H}{\omega_s} * \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (\text{p.u.}) \quad (2.1)$$

$$\frac{2H}{\omega_s} * \frac{d\omega}{dt} = P_a = P_m - P_e \quad (\text{p.u.}) \quad (2.2)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (2.3)$$

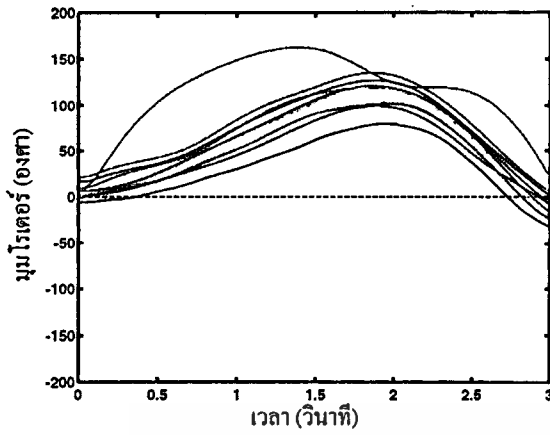
โดยที่	H	คือ ค่าคงที่ความเฉื่อย (Inertia constant)
	ω_s	คือ ความเร็วซิงโครนัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งเป็นมุมทางไฟฟ้า
	ω	คือ ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งเป็นมุมทางไฟฟ้า
	δ	คือ มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งเป็นมุมทางไฟฟ้า
	P_a	คือ กำลังเร่ง (Acceleration power)
	P_m	คือ กำลังทางกล (Mechanical power)
	P_e	คือ กำลังทางไฟฟ้า (Electrical power)
	t	คือ เวลา

ค่าคงที่ความเฉื่อย (H), เวลา (t) มีหน่วยเป็นวินาที และ P_a , P_m และ P_e เป็นค่าเปอร์ยูนิตในฐานเดียวกับ H

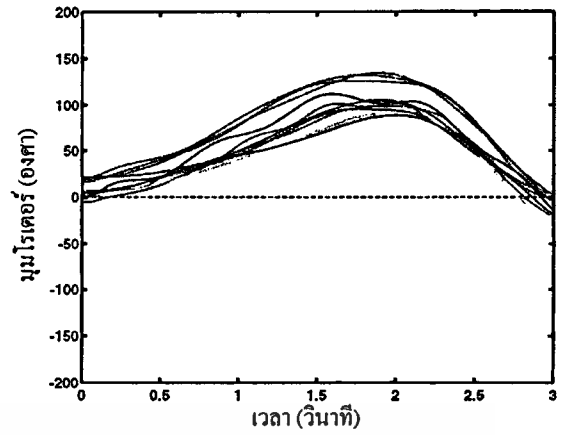
เมื่อทำการแก้สมการสวิง จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง มุมโรเตอร์ δ และเวลา t เมื่อนำไปเขียนกราฟ กราฟที่ได้จะเรียกว่ากราฟสวิง (Swing curve) ซึ่งนำมาใช้ในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง เมื่อเกิดฟลัดด์ขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และหลังจากทำการเคลียร์ฟลัดด์ออกจากระบบ หากมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องที่เปรียบเทียบกับมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอ้างอิงมีความแตกต่างกันไม่เกิน 180 องศา [6] และมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างช้าๆจนถึงจุดคงที่จุดใหม่ (ซึ่งมีความสมดุลของกำลังไฟฟ้า และกำลังทางกล) จะถือว่าระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพในทางตรงข้าม หากมีมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องใดเครื่องหนึ่งยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อเปรียบเทียบกับมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอ้างอิง ก็ถือว่าระบบสูญเสียเสถียรภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

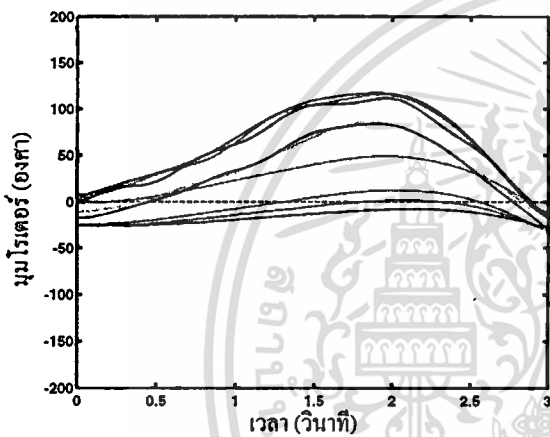
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



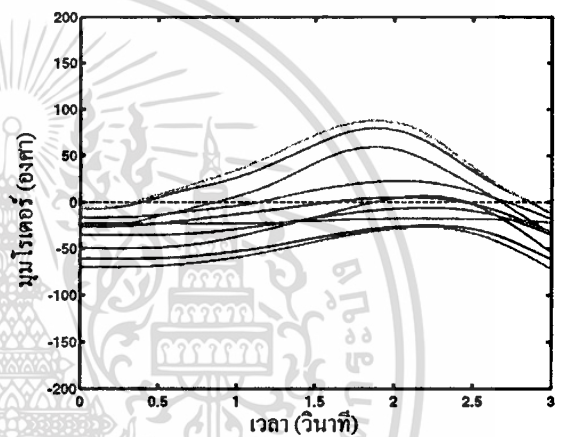
(ก)



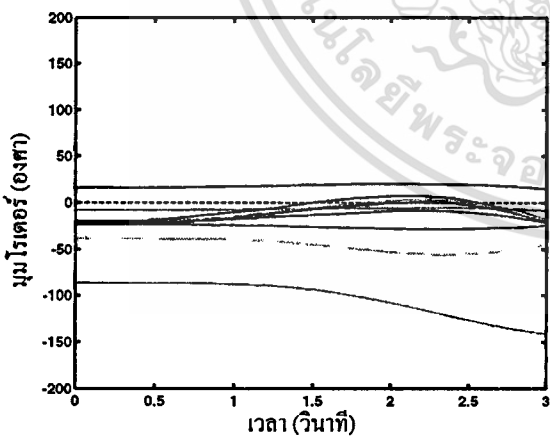
(ข)



(ค)



(ง)



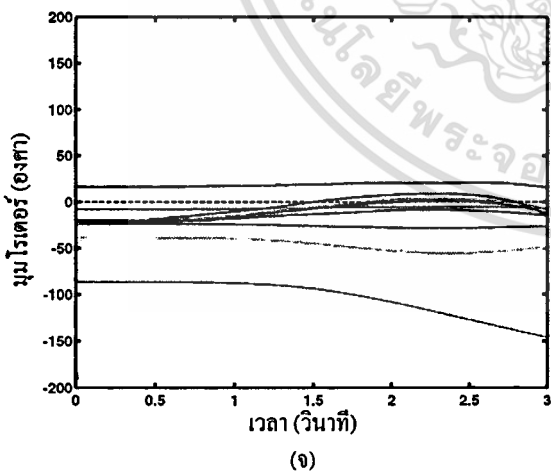
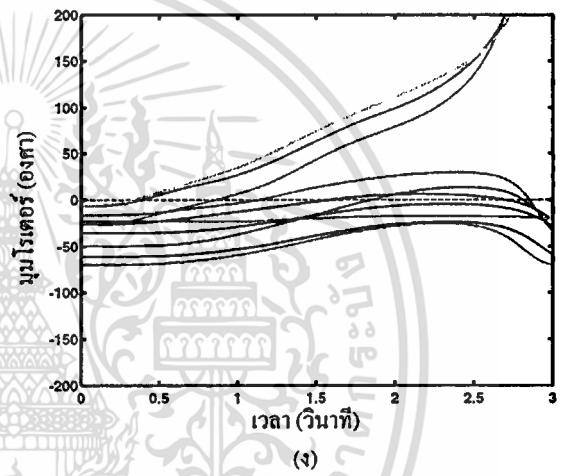
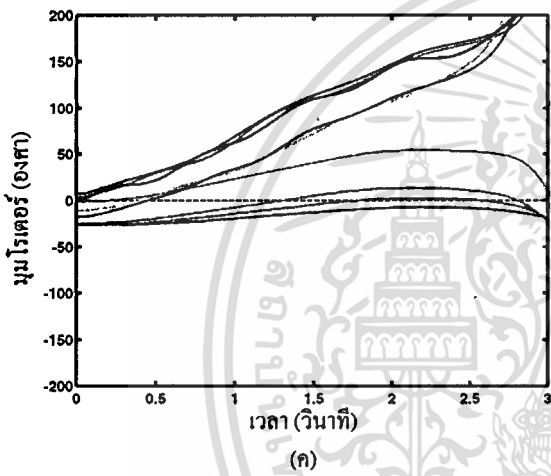
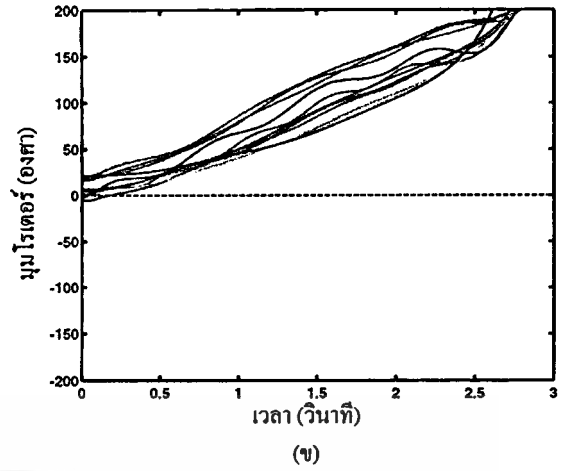
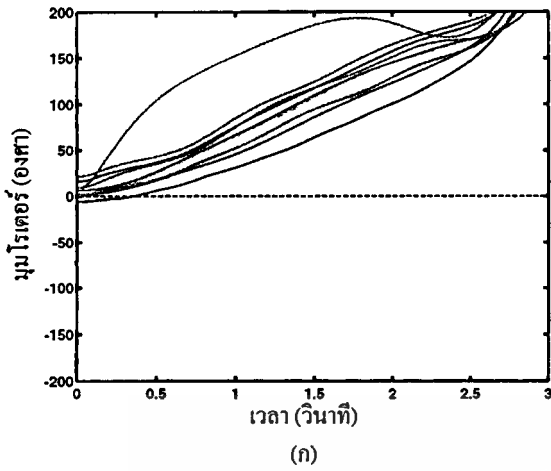
(จ)

- ก) กราฟสวิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1-10
 ข) กราฟสวิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 11-20
 ค) กราฟสวิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 21-30
 ง) กราฟสวิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 31-40
 จ) กราฟสวิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 41-50

หมายเหตุ : เส้นประคือกราฟสวิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอ้างอิง

รูปที่ 2.1 กราฟสวิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้า IEEE 50 generators test system ที่เกิดฟอลต์ที่บัส 105 และเคลียร์ฟอลต์ที่เวลา 120 msec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- ก) กราฟสวิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1 –10
 ข) กราฟสวิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 11 –20
 ค) กราฟสวิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 21 –30
 ง) กราฟสวิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 31 –40
 จ) กราฟสวิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 41 –50

หมายเหตุ : เส้นประคือกราฟสวิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอ้างอิง

รูปที่ 2.2 กราฟสวิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้า IEEE 50 generators test system ที่เกิดฟอลต์ที่บัส 105 และเคลียร์ฟอลต์ที่เวลา 121 msec

การคำนวณหากราฟสวิงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อยู่บนสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. กำลังทางกลที่ป้อนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องระหว่างช่วงเวลาทั้งหมดที่คำนวณหากราฟสวิงมีค่าคงที่
2. ไม่พิจารณาถึงกำลังหน่วง (Damping power)
3. แรงดันภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องหลังจากรีแอกแตนซ์ชั่วคราวมีค่าคงที่
4. มุมโรเตอร์ทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องตรงกับ δ มุมทางไฟฟ้าของแรงดันในข้อ 3
5. พิจารณาโหลดทั้งหมดเป็นรีแอกแตนซ์ขนานที่ต่อลงดินและมีขนาดเท่ากับกับสภาวะก่อนที่จะเกิดสภาวะชั่วคราว

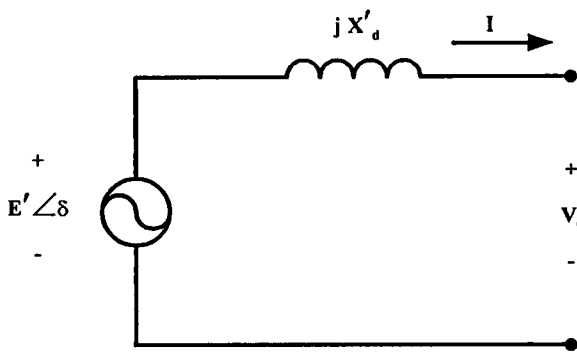
ตัวอย่างกราฟสวิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 50 เครื่องจากระบบไฟฟ้า IEEE 50 generators test system ที่เกิดฟอลต์ที่บัส 105 และเคลียร์ฟอลต์โดยการปลดสายส่งระหว่างบัส 105 และ บัส 73 ชุดที่ 1 และ 2 ที่เวลา 120 msec และ 121 msec หลังจากเกิดฟอลต์ แสดงอยู่ในรูปที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากรูปทั้งสองจะพบว่าเมื่อทำการเคลียร์ฟอลต์ที่เวลา 120 msec มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องเมื่อเปรียบเทียบกับมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอ้างอิงมีความแตกต่างกันไม่เกิน 180 องศา และมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างช้าๆ ซึ่งแสดงว่าระบบยังคงมีเสถียรภาพ และเมื่อทำการเคลียร์ฟอลต์ที่เวลา 121 msec มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวนหลายเครื่องเมื่อเปรียบเทียบกับมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอ้างอิงมีความแตกต่างกันมากกว่า 180 องศา และมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แสดงให้เห็นว่าระบบสูญเสียเสถียรภาพ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤต (CCT) สำหรับการเกิดฟอลต์ในกรณีนี้มีค่าเท่ากับ 120 msec

2.3 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและวงจรมุมมูลย์ของระบบไฟฟ้า

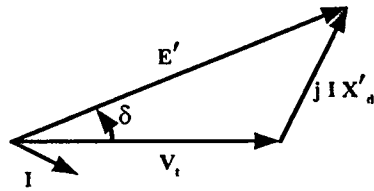
แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบธรรมดา (Classical model) ที่ใช้ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะชั่วคราวแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งกำหนดให้แรงดันภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หลังจากรีแอกแตนซ์ชั่วคราวมีค่าคงที่ และ V_t คือ แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Terminal voltage) โดยแบบจำลองนี้อยู่บนสมมติฐานดังนี้

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานในสภาวะสามเฟสสมดุลลำดับบวก (Balanced 3 phase positive sequence condition)
2. ไม่พิจารณาถึง กำลังสูญเสียและการอิมตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
3. กระแสกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator excitation) มีค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



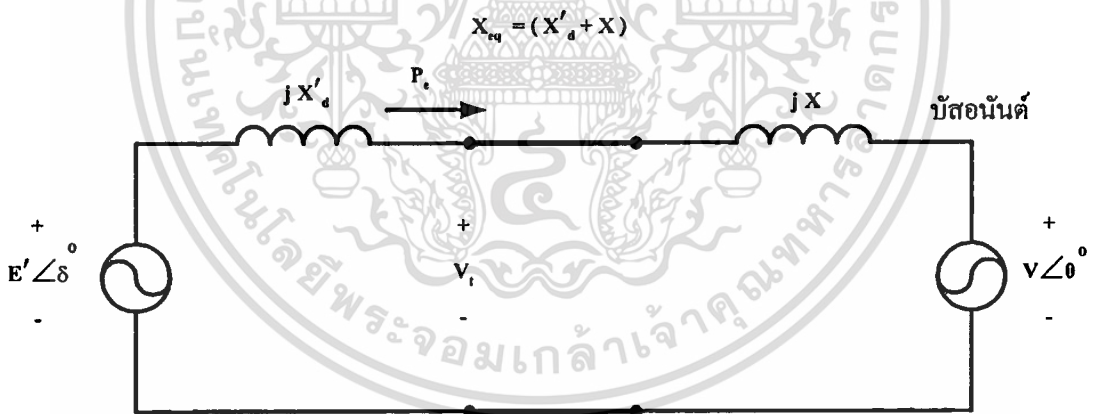
ก) วงจรสมมูล



ข) แผนภาพเฟสเซอร์

รูปที่ 2.3 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนา

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องในระบบไฟฟ้ากำลังจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับระบบซึ่งประกอบไปด้วย สายส่ง, หม้อแปลงไฟฟ้า, โหลด และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องอื่นๆ ในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไประบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาจะถูกแทนที่ด้วยบัสอนันต์ (Infinite bus) ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่มีขนาดของแรงดัน, มุมเฟสของแรงดัน และความถี่ที่เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยรีแอกแตนซ์ของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนา

วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้ากำลัง

รูปที่ 2.4 การเชื่อมต่อของแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนากับวงจรสมมูลของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากรูปที่ 2.4 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนาถูกเชื่อมต่อเข้ากับวงจรสมมูลของระบบไฟฟ้า (บัสอนันต์ และรีแอกแตนซ์ของระบบ) โดยมุมของแรงดันภายในของเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำเนิดไฟฟ้า δ จะถูกพิจารณาเป็นมุมกำลังและอ้างอิงกับบัสอนันต์ซึ่งกำหนดให้มีมุมเฟสคงที่เท่ากับ 0° และรีแอกแตนซ์ชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและรีแอกแตนซ์ของระบบ สามารถพิจารณาให้อยู่ในรูปรีแอกแตนซ์สมมูล X_{∞} โดยที่

$$X_{\infty} = X_d' + X \quad (2.4)$$

โดยที่ X_d' คือ และรีแอกแตนซ์ชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
 X คือ และรีแอกแตนซ์ของระบบ

2.4 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายเครื่อง

กรณีที่ระบบไฟฟ้ากำลังประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายเครื่อง ความซับซ้อนในการคำนวณจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาพิจารณาในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะชั่วคราว ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น เราสามารถแบ่งชนิดของบัสในระบบได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. เจนบัส (Generator bus) หรืออาจเรียกว่า P-V บัส เป็นบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่หรือเป็นบัสที่มีทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดต่ออยู่ เป็นบัสที่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้มีขนาดคงที่ได้โดยอาศัย AVR (automatic voltage regulation) บัสชนิดนี้จะมีพารามิเตอร์ที่คงที่ได้แก่อำกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (P) และแรงดันไฟฟ้าที่บัส (V) ส่วนพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงค่าได้คือ แก้อำกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q) และมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส (δ)

2. โหลดบัส (Load bus) หรืออาจเรียกว่า P-Q บัส เป็นบัสที่มีโหลดต่ออยู่ ดังนั้น พารามิเตอร์ที่คงที่ได้แก่อำกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (P) และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q) ซึ่งเป็นค่าของโหลดที่ต่ออยู่กับบัส ส่วนพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงค่าได้คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส (V) และมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส (δ)

3. สวิงบัส (Swing bus) หรือ สแลคบัส (Slack bus) บัสชนิดนี้เป็นบัสที่ขนาดของแรงดันไฟฟ้าและมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสมีค่าคงที่ และโดยทั่วไปจะกำหนดให้มีมุมเท่ากับ 0° และใช้เป็นบัสอ้างอิงที่จะนำไปเปรียบเทียบกับมุมของแรงดันที่บัสอื่น Swing bus ถือว่าเป็นแหล่งกำเนิด (Source) ขนาดใหญ่ที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาได้ตามต้องการ โดยขนาดของแรงดันไฟฟ้า, มุมของแรงดันไฟฟ้า และค่าที่ไม่เปลี่ยนแปลง ในทางปฏิบัติ บัสอ้างอิงนี้หมายถึงบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่สุดเชื่อมต่ออยู่ หรือเป็นระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาอยู่ ดังนั้น พารามิเตอร์ที่คงที่คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส (V) และมุมของแรง

ค้นไฟฟ้าที่บัส (δ) ส่วนพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงค่าได้คือกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (P) และกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟ (Q)

ในขั้นตอนการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายเครื่องจะต้องมีการเตรียมข้อมูลต่างๆของระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะอยู่ตัว ซึ่งได้มาจากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมโหลดโฟลว์ และโครงสร้าง (Topology) ของระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะก่อนเกิดฟอลต์, ขณะเกิดฟอลต์ และหลังจากเคลียร์ฟอลต์ไปแล้ว

จากการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ เราจะทราบค่าของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (P), กำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟ (Q), แรงดัน และมุมของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง และที่โหลดบัสซึ่งค่าต่างๆจะอ้างอิงกับสวิงบัส โดยแรงดันภายในชั่วคราว (Internal transient voltage) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องสามารถคำนวณได้จาก

$$E' = V_i + jX_d' * I \quad (2.5)$$

โดยที่ V_i คือ แรงดันที่ขั้ว
 I คือ กระแสเอาร์ทพุท

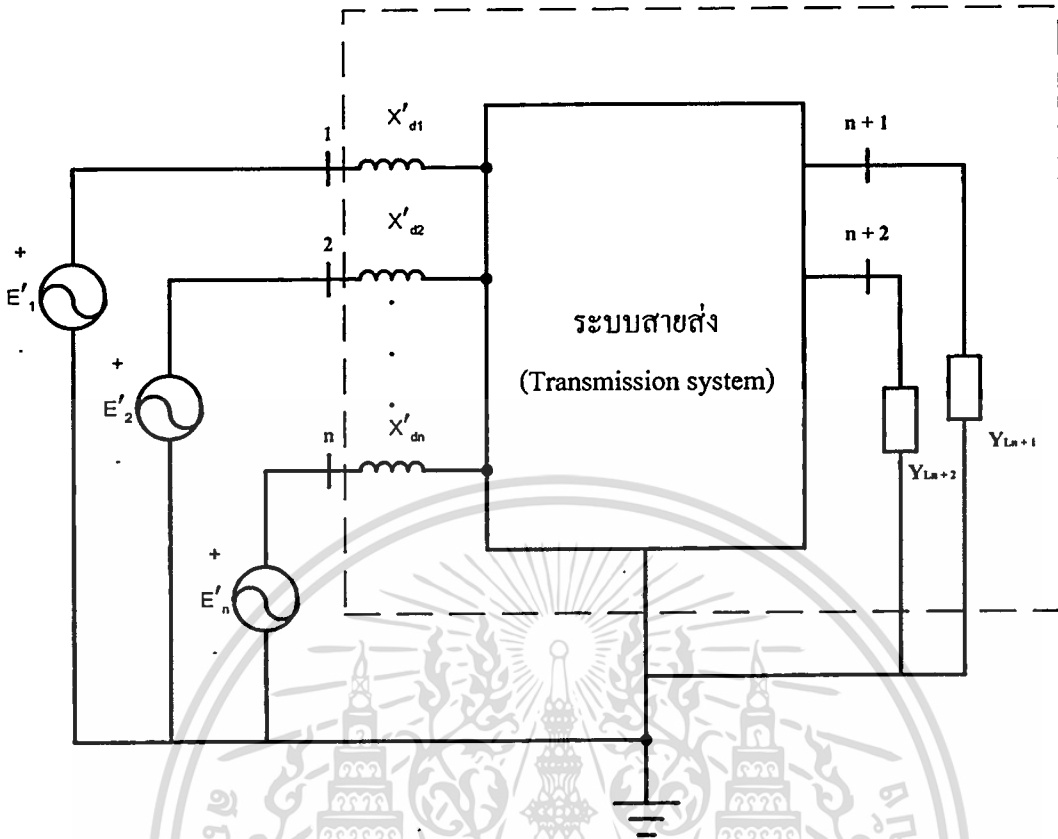
และโหลดแต่ละชุดจะถูกแปลงเป็นแอดมิตแตนซ์ (Admittance) ที่ต่อลงดิน โดยใช้สมการ

$$Y_L = \frac{P_L + jQ_L}{|V_L|^2} \quad (2.6)$$

โดยที่ $P_L + jQ_L$ คือ ขนาดของโหลด
 V_L คือ ขนาดแรงดันที่โหลดบัส

เมตริกซ์ของบัสแอดมิตแตนซ์ ซึ่งครอบคลุมค่าของรีแอกแตนซ์ชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง และแอดมิตแตนซ์ขนาดของโหลด (ดังแสดงในรูปที่ 2.5) จะใช้ในการคำนวณโหลดโฟลว์ในสภาวะก่อนเกิดฟอลต์ โดยถือว่ากระแสที่จ่ายเข้าไปในบัสทุกบัส ยกเว้นบัสภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องจะมีค่าเท่ากับศูนย์

ขอบเขตของ โคร่งข่ายที่ถูกพิจารณาเป็นเมตริกซ์ของบัสแอดมิตแตนซ์



รูปที่ 2.5 โคร่งข่ายที่ถูกพิจารณาเป็นเมตริกซ์ของบัสแอดมิตแตนซ์

ในขั้นตอนนี้ต่อไปจะต้องหามเมตริกซ์ของบัสแอดมิตแตนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปในสภาวะที่เกิดฟอลต์ และหลังจากเคลียร์ฟอลต์ไปแล้ว เนื่องจากบัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลจะมีเพียงบัสภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องเท่านั้น บัสอื่นๆจึงถูกลดรูปจนกลายเป็นเมตริกซ์ที่มีขนาดเท่ากับจำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เราจึงสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องที่ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังในระหว่างเกิดฟอลต์และหลังจากเคลียร์ฟอลต์ไปแล้วได้จากสมการ

$$P_{ei} = |E'_i|^2 G_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \left[|E'_i| |E'_j| Y_{ij} \cos(\delta_{ij} - \theta_{ij}) \right] \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } i &= 1, 2, \dots, n \\ n &= \text{จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด} \\ \delta_{ij} &= \delta_i - \delta_j \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการเปลี่ยนแปลงของมุม โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องในสภาวะขณะเกิดฟอลต์ และหลังจากเคลียร์ฟอลต์ไปแล้วนั้น สามารถหาได้จากสมการของมุมกำลัง

$$\frac{2H_i}{\omega_s} * \frac{d^2\delta_i}{dt^2} = P_{mi} - P_{ei} \quad (2.9)$$

โดยที่ $i = 1, 2, \dots, n$
 $n =$ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด

ผลลัพธ์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และค่าของบัสแอดมิตแตนซ์ Y_{bus} หลังจากทำการเคลียร์ฟอลต์ไปแล้ว

2.5 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการศึกษาเสถียรภาพในสภาวะชั่วคราว

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Load flow and step by step time simulation ที่ใช้ในการศึกษาเสถียรภาพในสภาวะชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลังในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดย Jorge Luiz De A. Jardim [3] ซึ่งเขียนโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษา Fortran และทำงานบน Microsoft Developer Studio 97 [7] โดยขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจะแสดงไว้อย่างละเอียดในบทที่ 4 ส่วนรายละเอียดและข้อกำหนดของโปรแกรมจะแสดงไว้ในภาคผนวก ก.

บทที่ 3

โครงข่ายประสาทเทียม

3.1 ความเป็นมาของโครงข่ายประสาทเทียม

ความพยายามที่จะทำความเข้าใจการทำงานของสมองของมนุษย์ได้มีมานานนับศตวรรษแล้ว เริ่มต้นในปี ค.ศ. 1890 William James นักสรีรศาสตร์ชาวอเมริกันได้แต่งหนังสือชื่อ Psychology (Briefer Course) ซึ่งอธิบายถึงการทำงานของสมอง และยังคงกล่าวถึงทฤษฎีที่มีอยู่ในปัจจุบันไว้ล่วงหน้าอีกด้วย ในปี ค.ศ. 1936 Alan Turing ได้นำเอาสมองไปใช้เป็นแบบอย่างของการคำนวณใน A way of looking at the world of computing ปี ค.ศ. 1943 Warren McCulloch นักประสาทวิทยา และ Walter Pitts นักคณิตศาสตร์ ซึ่งมีอายุเพียง 18 ปีในขณะนั้น ได้เขียนบทความเกี่ยวกับการทำงานของเซลล์ประสาท และจำลองการทำงานของเซลล์ประสาทเซลล์หนึ่งด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ หนังสือชื่อ The organization of behavior ซึ่งกล่าวถึงการเชื่อมโยงกันของจิตวิทยาและ สรีรศาสตร์ถูกแต่งขึ้นในปี ค.ศ. 1949 โดย Donald Habb

การพัฒนาด้านฮาร์ดแวร์และ ซอฟต์แวร์ ในช่วงทศวรรษที่ 1950 ทำให้งานวิจัยด้านต่างๆเข้าสู่ยุคของการสร้างแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ เป็นผลให้การทดสอบทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายประสาทมีความเป็นไปได้มากยิ่งขึ้น ในปี ค.ศ. 1956 Dartmouth Summer ได้เริ่มทำงานวิจัยด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence, AI) ซึ่งเป็นแรงผลักดันให้เกิดการศึกษาทั้งในด้านปัญญาประดิษฐ์และ โครงข่ายประสาทมากขึ้น ปี ค.ศ. 1957 Frank Rosenblatt เริ่มศึกษาเกี่ยวกับเปอร์เซ็ปตรอน (Perceptron) ซึ่งเป็นแบบจำลองพื้นฐานของโครงข่ายประสาทและ สร้างเป็นฮาร์ดแวร์ขึ้นมา ซึ่งถือว่าเป็นโครงข่ายประสาทที่เก่าแก่ที่สุด John von Neumann เขียนหนังสือเรื่อง The Computer and the Brain ในปี ค.ศ. 1958 ซึ่งได้นำเสนอฟังก์ชันการทำงานของเซลล์ประสาทโดยใช้รีเลย์ที่ใช้สำหรับส่งโทรเลขและ หลอดสุญญากาศ (Vacuum tube)

ในปี ค.ศ. 1959 Bernard Widrow และ Marcian Hoff ได้สร้างแบบจำลองของ MADALINE (Multiple ADaptive LINear Element) ซึ่งพัฒนามาจาก ADALINE และเป็นการนำเอาโครงข่ายประสาทมาใช้งานในทางปฏิบัติเป็นครั้งแรก โดยนำมาใช้ในการลดเสียงก้องในสายโทรศัพท์ Stephen Grossberg ได้พัฒนา Avalanche ซึ่งเป็นโครงข่ายประสาทชนิดหนึ่งขึ้นมาในปี ค.ศ. 1967 และนำมาใช้ในการจดจำคำพูดและ สิ่งงานแขนกล ปี ค.ศ. 1969 Marvin Minsky และ Seymour Papert ได้ตีพิมพ์หนังสือ Perceptron ซึ่งกล่าวถึงข้อจำกัดของเปอร์เซ็ปตรอน ว่าไม่สามารถนำไปใช้ในการแก้ปัญหาหลายๆปัญหาที่มีความน่าสนใจได้ ซึ่งจุดนี้เองที่ทำให้นักวิจัยหลายคนกลับไปให้ความสนใจด้านปัญญาประดิษฐ์ (AI) มากขึ้น แต่ยังมีนักวิจัยบางกลุ่มที่ไม่ย่อ

ย่อและยังคงทำงานวิจัยด้านโครงข่ายประสาทต่อไป John Anderson ก็เป็นคนหนึ่งในกลุ่มนี้ เขา

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้พัฒนาแบบจำลองของโครงข่ายประสาทขึ้นมาในปี ค.ศ. 1977 และให้ชื่อว่า Brain-State-in-a-Box (BSB) Kunihiko Fukushima ได้พัฒนา Neocognitron ขึ้นมาในปีค.ศ. 1978 ซึ่งเป็นแบบจำลองโครงข่ายประสาทที่ใช้สำหรับจดจำรูปแบบ (Pattern recognition)

Teuvo Kohonen วิศวกรไฟฟ้าชาวฟินแลนด์ได้คิดค้น Self organizing map ขึ้นมาในปี ค.ศ. 1980 ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับแบบจำลอง BSB ของ Anderson ใช้ในการจำลองพื้นผิวของวัตถุ ปี ค.ศ. 1982 John Hopfield ได้นำเสนอบทความของเขาต่อ National academy of sciences ซึ่งมีเนื้อหาเกี่ยวกับการใช้โครงข่ายประสาทในการทำนายส่วนที่ขาดหายไปของข้อมูลหรือรูปภาพ ซึ่งบทความของ Hopfield ได้กระตุ้นให้เกิดความสนใจในด้านโครงข่ายประสาทเพิ่มมากขึ้นอีกครั้งหนึ่งในช่วงทศวรรษ 1980 รวมไปถึงทำให้เกิดแนวความคิดที่จะนำแนวคิดของ Hopfield ไปใช้ในด้านการปัญญาประดิษฐ์ (AI) ยังไม่ประสบความสำเร็จ ตัวอย่างเช่น ระบบนำทางอัตโนมัติสำหรับยานพาหนะ (automatic guided vehicles)

ในปี ค.ศ. 1982 สหรัฐอเมริกาและ ญี่ปุ่นได้ร่วมมือกันจัด Conference on cooperative/competitive neural network ขึ้นที่ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการประชุมสัมมนาทางด้านโครงข่ายประสาท ปี ค.ศ. 1985 American institute of physics ได้จัดงาน Neural networks for computing meeting และในปี ค.ศ. 1987 Institute of electrical and electronics engineers (IEEE) ได้จัดการประชุมนานาชาติเกี่ยวกับโครงข่ายประสาทเพิ่มขึ้นเป็นครั้งแรก โดยมีผู้เข้าร่วมงานมากกว่า 1,800 คน ในปีเดียวกัน International neural network society (INNS) ถูกก่อตั้งขึ้นโดยมี Grossberg จากสหรัฐอเมริกา Kohonen จากฟินแลนด์ และ Amari จากญี่ปุ่นเป็นผู้นำในการก่อตั้ง โดยหลังจากที่ INNS ก่อตั้งได้ 2 ปี ก็มีสมาชิกเข้าร่วมมากกว่า 3,000 คนจากทั่วโลก

จวบจนถึงปัจจุบันโครงข่ายประสาทได้ถูกพัฒนา ค้นคว้า วิจัยและนำไปใช้ในด้านต่างๆ มากขึ้นอาทิ การเงินการธนาคาร อวกาศ ระบบป้องกันประเทศ ระบบรักษาความปลอดภัย อุตสาหกรรม การแพทย์ ระบบสื่อสาร ระบบขนส่ง รวมไปถึงงานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าอีกด้วย โดยจะเห็นได้จากบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารทั้งใน และต่างประเทศ จึงถือได้ว่าโครงข่ายประสาทเป็นศาสตร์แขนงหนึ่งที่ได้รับคามสนใจเป็นอย่างมากในช่วงเวลานี้ โดยโครงข่ายประสาทที่เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 โครงข่ายประสาทที่เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวาง [8]

Network	Inventor/Developer	Years	Application	Limitations	Comments
Adaptive resonance theory	Gail Carpenter, Stephen Grossberg	1978 - 86	Pattern recognition, (radar/sonar, voiceprints)	Sensitive to translation, distortion, scale	Sophisticated; not applied much yet
Avalanche	Stephen Grossberg	1967	Continuous-speech recognition; commands to robot arms	No easy way to alter speed or interpolate movement	Class of networks; no single net can do all this
Back-propagation	Paul Werbos, David Parker, David Rumelhart	1974 - 85	Speech synthesis from text; robot arms; bank loans	Supervised training only- need lots of I/O examples	Most popular net; work well, easy to learn, powerful
Bidirectional associative memory	Bart Kosko	1985	Content-addressable associative memory	Low storage density; data must be coded	Easiest to learn; associate fragment pairs with complete pairs
Boltzmann & Cauchy machines	Jeffrey Hinton, Terry Sejnowsky, Harold Szu	1985 - 86	Pattern recognition for images, sonar, radar	Long training time, gen. Noise in statistic distribution	Simple nets; noise function used to find global min.
Brain state in a box	James Anderson	1977	Extraction of knowledge from data bases	One-shot decisions – no iteration	Similar to bidirectional in completing fragmented inputs
Cerebellatron	David Marr, James Albus, Andres Pellionez	1969 - 82	Control motor action of robotic arms	Requires complicated control input	Like Avalanche; can blend commands with difference weights for smoothness
Counter-propagation	Robert Hecht-Nielsen	1986	Image compress; stat analysis; loan apply score	Many PEs and connections for high accuracy	Self-programming look-up table; similar to back-propagation
Hopfield	John Hopfield	1982	Retrieval of complete data from fragments	Does not learn; weights must be set in advance	Can implement on a large scale

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

Network	Inventor/Developer	Years	Application	Limitations	Comments
MADALINE	Bernard Widrow	1960 - 62	Nulling of radar jammers; modems; phone equalizers	Assumes linear relationship between I&O	Can Implement on a large scale
Neocognitron	Kunihiko Fukushima	1978 - 84	Handprinted char recognition	Requires many PEs and connects	Most complicated; insensitive to scale translation, rotation
Perceptron	Frank Rosenblatt	1957	Typed-character recognition	Cannot recognize complex characters; sensitive to scale, distortion	Oldest net; was built in hardware, rarely used today
Self-organizing map	Teuvo Kohonen	1980	Maps 1 geometric region (grid) to another (aircraft)	Require much training	More effective than many algorithms for aerodyn flow calculations

3.2 การทำงานของโครงข่ายประสาท

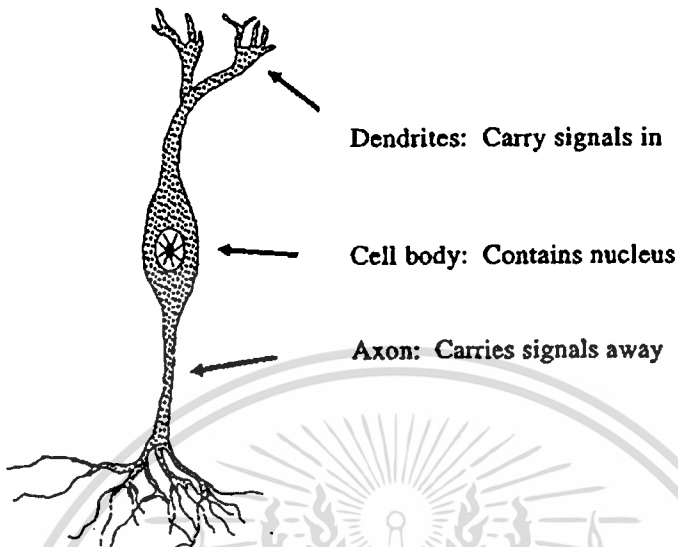
3.2.1 นิวรอน

นิวรอน หมายความถึง เซลล์ประสาทและกระบวนการทั้งหมดของเซลล์ประสาท ในรูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างของนิวรอน ที่สามารถพบได้ใน เรตินา เป็นนิวรอนที่มีสองขั้ว (Bipolar neuron) ในตัวเซลล์ (Cell body) ของนิวรอนจะมีนิวเคลียส (Nucleus) อยู่ตรงกลางเซลล์ และมีแขนงอย่างน้อย 1 เส้นเชื่อมต่ออยู่กับตัวเซลล์ แขนงที่ทำหน้าที่นำกระแสประสาท ซึ่งมีลักษณะเป็นสัญญาณอิมพัลส์ (Impulse signal) เข้ามายังตัวเซลล์นั้นเรียกว่า เดนไดรต์ (Dendrite) ส่วนแขนงที่ทำหน้าที่นำกระแสประสาทออกจากตัวเซลล์เรียกว่า แอกซอน (Axon)

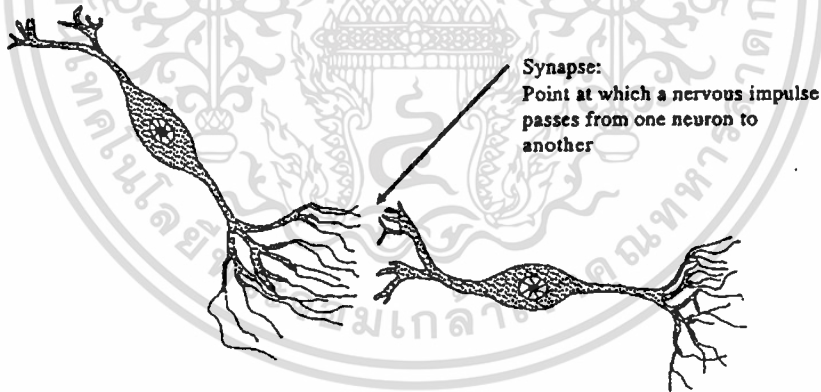
3.2.2 โครงสร้างของนิวรอนและไซแนปส์

เมื่อนิวรอนมากกว่า 1 นิวรอน รวมอยู่ด้วยกันมีการจัดเรียงกันเป็นโครงสร้างของประสาท ดังแสดงในรูปที่ 3.2 จะมีการส่งกระแสประสาทจากนิวรอนหนึ่งไปยังนิวรอนอื่น โดยผ่านจุดเชื่อมต่อระหว่างปลายของแอกซอนของนิวรอนหนึ่งกับตัวเซลล์หรือเดนไดรต์ของอีกนิวรอนหนึ่ง หรือที่เรียกว่า ไซแนปส์ (Synapse) ซึ่งเป็นช่องว่างที่เล็กมากระหว่างนิวรอนสองนิวรอนที่อยู่ติดกันแต่ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ได้สัมผัสกันโดยตรง ไซแนปส์จะเป็นบริเวณที่ควบคุมให้มีการส่งผ่านกระแสประสาทต่อไป หรือยับยั้งการส่งกระแสประสาท รวมถึงเปลี่ยนแปลงลักษณะของกระแสประสาทอีกด้วย



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของนิวรอนชนิดที่มีสองขั้ว [8]



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของประสาท [8]

3.2.3 การส่งผ่านกระแสประสาท

ในสภาวะปกติเมื่อนิวรอนนำกระแสประสาทที่ได้รับจากอวัยวะที่ทำหน้าที่รับรู้ (อาทิเช่น ตา หรือ หู) ไปยังอวัยวะที่ทำหน้าที่ตอบสนอง (อาทิเช่น กล้ามเนื้อ หรือ ต่อมต่างๆภายในร่างกาย) กระแสประสาทจะถูกส่งผ่านจากนิวรอนหนึ่งไปยังอีกนิวรอนหนึ่งโดยผ่านไซแนปส์ เมื่อกระแสประสาทผ่านเข้ามายังไซแนปส์ (เสมือนเป็นอินพุทของไซแนปส์) สารเคมีในไซแนปส์จะมีผลต่อกระแสประสาทได้สองลักษณะ คือ กระตุ้นให้กระแสประสาทมีขนาดเพิ่มขึ้น หรือยับยั้งให้กระแส

นอกจากนี้ยังมีสารที่ส่งผ่านกระแสประสาทที่เรียกว่าสารสื่อประสาท ซึ่งเมื่อเข้าสู่ไซแนปส์ จะไปจับกับตัวรับที่เรียกว่า รีเซพเตอร์ ทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าขึ้นที่ปลายประสาท ซึ่งสัญญาณนี้จะเดินทางต่อไปยังอวัยวะเป้าหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสาทมีขนาดลดลง ซึ่งทั้งสองลักษณะดังกล่าวเปรียบได้กับการที่สัญญาณอินพุตถูกถ่วงน้ำหนัก (Weighted) ให้มีค่ามากขึ้น หรือลดลง เมื่อผ่านออกจากไซแนปส์ กระแสประสาทที่ถูกกระตุ้นและกระแสประสาทที่ถูกยับยั้งจะถูกรวมเข้าด้วยกัน หากผลรวมของกระแสประสาทดังกล่าวมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ ศักคาที่ผิวของนิวรอนถัดไป หรือเรชโฮลด์ (Threshold) กระแสประสาทดังกล่าวก็จะสามารถไหลผ่านเข้าไปในนิวรอนได้ หากผลรวมของกระแสประสาทนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าเรชโฮลด์ กระแสประสาทก็จะถูกยับยั้งไม่ให้ผ่านเข้าไปในนิวรอนนั้น การไหลของกระแสประสาทจะเป็นไปในทิศทางเดียว (One direction) และมีความเร็วอยู่ระหว่าง 10 ถึง 120 เมตรต่อวินาที เมื่อการส่งกระแสประสาทครั้งหนึ่งสิ้นสุดลง ส่วนต่างๆของนิวรอนจะกลับเข้าสู่สภาวะเริ่มต้นอีกครั้งหนึ่งเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับส่งกระแสประสาทครั้งต่อไป

ในสมองของมนุษย์จะประกอบด้วยเซลล์ประสาท (หรือนิวรอน) ประมาณ 1 หมื่นล้านเซลล์ และแต่ละเซลล์สามารถเชื่อมต่อกับเซลล์ประสาทอื่นๆได้มากถึง 2 แสนเซลล์ (โดยปกติเซลล์ประสาทหนึ่งเซลล์จะเชื่อมต่อกับเซลล์ประสาทอื่นๆประมาณ 1,000 ถึง 10,000 เซลล์) เมื่อเซลล์ประสาทแต่ละเซลล์ทำงานร่วมกันจะสามารถส่งกระแสประสาทได้สูงสุดถึง 1,000 สัญญาณ (Pulse) ต่อวินาที และจากการที่เซลล์ประสาทแต่ละเซลล์ส่งผ่าน หรือยับยั้งกระแสประสาท ที่อัตราความเร็วต่างกัน ในเวลาเดียวกันเพื่อเป็นการส่งข้อมูลนั้น ทำให้สมองสามารถรับรู้อินพุตต่างๆ และสร้างผลตอบสนองต่ออินพุตนั้นๆได้ โดยที่การรับรู้และตอบสนองนี้เกิดขึ้นจากการพัฒนาทางพันธุศาสตร์และการเรียนรู้ที่จะจัดระเบียบการตอบสนองต่ออินพุตของสมองเอง

3.3 ชนิดของการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามลักษณะการเรียนรู้คือ Supervised Artificial Neural Network และ Unsupervised Artificial Neural Network

3.3.1 Supervised Artificial Neural Networks

Supervised Artificial Neural Networks เป็นโครงข่ายประสาทเทียมชนิดที่ใช้ทั้งข้อมูลอินพุต และข้อมูลเอาต์พุตในการระหว่างขั้นตอนการฝึกสอน โดยข้อมูลเอาต์พุตนั้นจะเป็นเป้าหมายของการฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมประเภทนี้จะแบ่งออกเป็น Feed-forward Neural Networks และ Radial basis function networks ซึ่งทั้งสองชนิดนิยมใช้ในการแก้ปัญหาลักษณะการประมาณค่าฟังก์ชัน (Function approximation)

3.3.2 Unsupervised Artificial Neural Networks

Unsupervised Artificial Neural Networks เป็นโครงข่ายประสาทเทียมชนิดที่ใช้เพียงข้อมูลอินพุต ในการระหว่างขั้นตอนการฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมประเภทนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ Kohonen networks ซึ่งนิยมใช้ในการแก้ปัญหาลักษณะการแยกแยะ (Classification

problem) และ Recurrent feedback networks ซึ่งนิยมใช้ในการแก้ปัญหาลักษณะการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization problem)

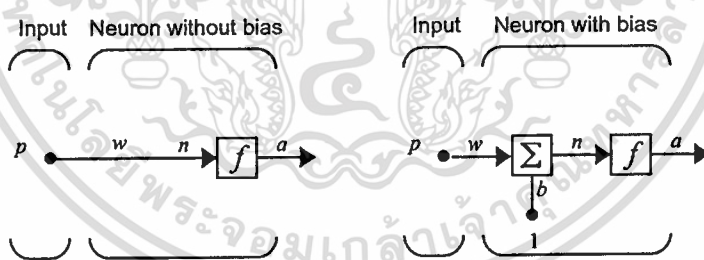
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะขอกล่าวถึงรายละเอียดเฉพาะ Feed-forward Neural Networks ซึ่งใช้ในการแก้ปัญหาระบบไฟฟ้ากำลังเท่านั้น

3.4 Feed-forward Neural Networks

โครงข่ายประสาทเทียมชนิดนี้จะมีการจัดเรียงตัวของนิวรอนในทิศทางที่ส่งข้อมูลไปข้างหน้า ซึ่งโดยทั่วไปนิวรอนจะจัดเรียงกันเป็นชั้น นิวรอนแต่ละตัวอาจจะได้รับข้อมูลจากภายนอกหรือจากนิวรอนในชั้นก่อนหน้าก็ได้ นิวรอนเหล่านี้จะไม่มีการเชื่อมต่อในทิศทางย้อนกลับหรือเชื่อมต่อกับนิวรอนในชั้นเดียวกัน

3.4.1 แบบจำลองของนิวรอน

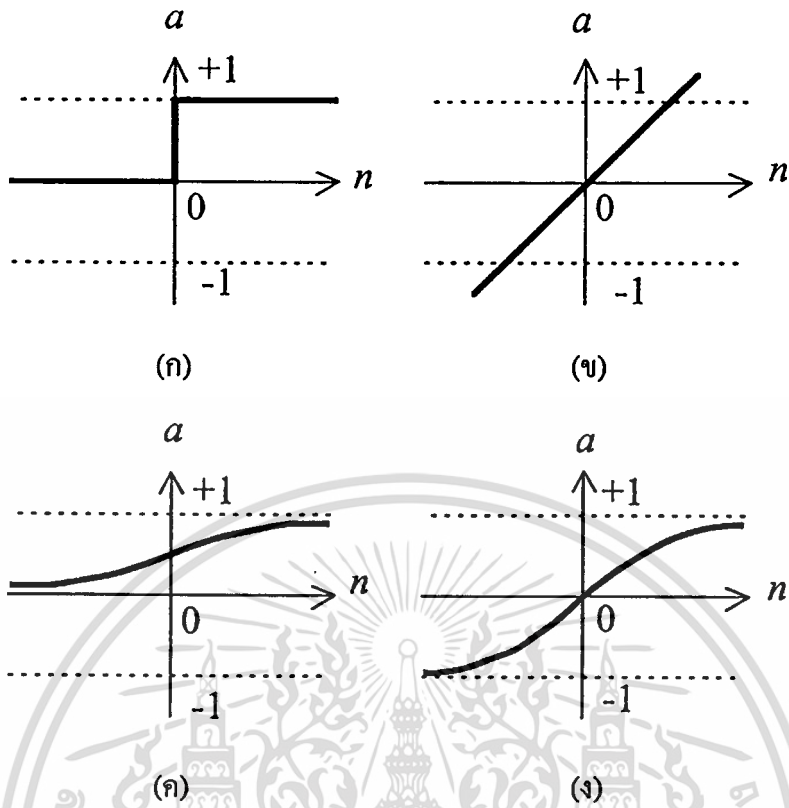
นิวรอนที่มี 1 อินพุท ที่ไม่มีค่าไบแอสแสดงในรูปที่ 3.3 ด้านซ้ายมือ และนิวรอนด้านขวามือจะมีค่าไบแอส “ b ” โดยที่ F คือ ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) อาทิเช่น Linear function หรือ Sigmoid function ซึ่งถูกป้อนด้วยค่า “ n ” และให้ผลลัพธ์เป็นค่า “ a ” โดยส่วนสำคัญที่ทำให้โครงข่ายประสาทเทียมแสดงพฤติกรรมต่างๆ ได้ก็คือ ค่าถ่วงน้ำหนัก “ w ” และค่าไบแอส “ b ” ซึ่งเป็นปริมาณสเกลลาร์ที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้



รูปที่ 3.3 แบบจำลองของนิวรอน [4]

3.4.2 ฟังก์ชันถ่ายโอน

ฟังก์ชันถ่ายโอนที่นิยมใช้กันมากได้แก่ Hard limit, Linear, Log-sigmoid และ Tan-sigmoid แสดงในรูปที่ 3.4 และสมการที่ 3.1 ถึง 3.4 ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 ฟังก์ชันถ่ายโอน (ก) ชนิด Hard limit, (ข) ชนิด Linear, (ค) ชนิด Log-sigmoid และ (ง) ชนิด Tan-sigmoid

$$a(n) = \begin{cases} 0, & n < 0 \\ 1, & n \geq 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

$$a(n) = n \quad (3.2)$$

$$a(n) = \frac{1}{1 + e^{-kn}} \quad (3.3)$$

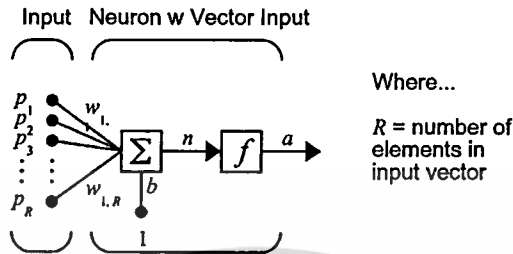
$$a(n) = \frac{1 - e^{-kn}}{1 + e^{-kn}} \quad (3.4)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 นิวรอนที่มีหลายอินพุต

นิวรอนที่มีอินพุต “R” ชุด แสดงในรูปที่ 3.5 ในรูปนี้ อินพุต p_1, p_2, \dots, p_R ถูกเชื่อมต่อกับนิวรอนด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก $W_{1,1}, W_{1,2}, \dots, W_{1,R}$ ตามลำดับ และผลคูณของอินพุตและค่าถ่วงน้ำหนักจะถูกรวมเข้าด้วยกันเป็นอินพุตของฟังก์ชันถ่ายโอน “n” ดังในสมการที่ (3.5)

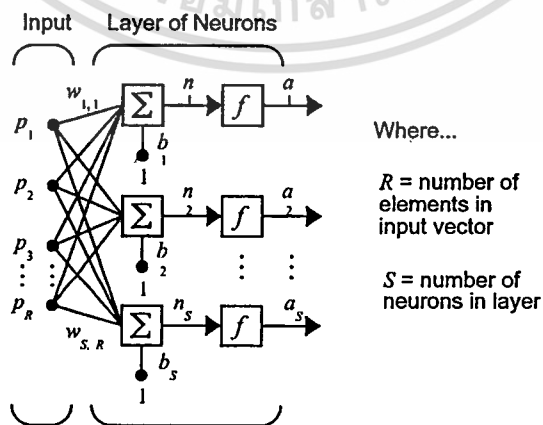


รูปที่ 3.5 แบบจำลองของนิวรอนที่มีหลายอินพุต [4]

$$a = f(W * p + b) \tag{3.5}$$

3.4.4 สถาปัตยกรรมของโครงข่าย

เมื่อมีนิวรอน 2 นิวรอนขึ้นไปเชื่อมต่อกันในลักษณะที่เป็นชั้น เราจะเรียกนิวรอนที่เชื่อมต่อกันว่า ชั้นของนิวรอน (Layer of neurons) โดยในทางปฏิบัติจะพบว่าโครงข่ายประสาทเทียมจะมีชั้นข้อมูลอินพุต (Input layer) 1 ชั้น, ชั้นข้อมูลเอาต์พุต (Output layer) 1 ชั้น และชั้นซ่อน (Hidden layer) อย่างน้อย 1 ชั้น ซึ่งจำนวนของนิวรอนในชั้นข้อมูลอินพุตเท่ากับจำนวนของอินพุตของโครงข่ายและจำนวนของนิวรอนในชั้นข้อมูลเอาต์พุตเท่ากับจำนวนของเอาต์พุตของโครงข่าย ในชั้นแรกจะกล่าวถึงโครงข่ายประสาทเทียมที่มีชั้นซ่อน 1 ชั้น

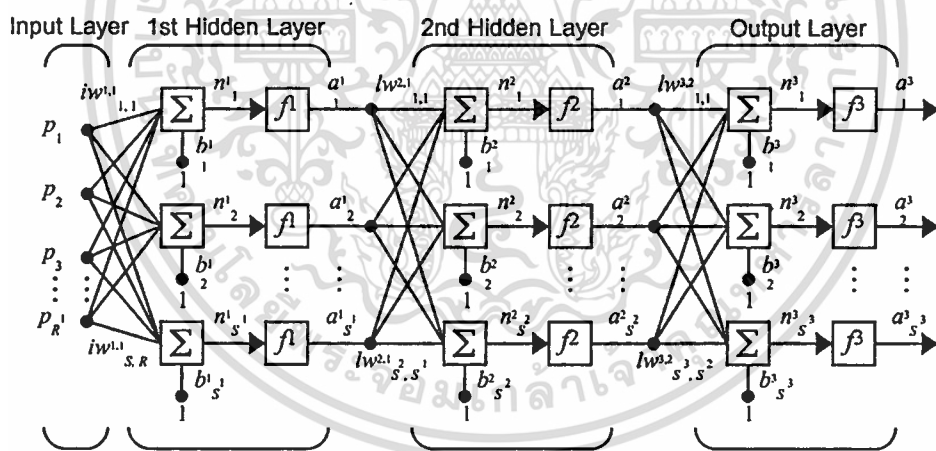


รูปที่ 3.6 แบบจำลองชั้นของนิวรอน [4]

รูปที่ 3.6 แสดงโครงข่ายประสาทเทียมที่มีอินพุต R จุด และมีนิวรอน S นิวรอน โดยที่สมาชิกของอินพุตเวกเตอร์ p (ประกอบไปด้วย p_1, p_2, \dots, p_R) จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับนิวรอนแต่ละนิวรอนด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก W ซึ่งสามารถเขียนแทนด้วย เมตริกซ์ที่มีขนาด $S \times R$ อินพุตของฟังก์ชันถ่ายโอน $n(i)$ เป็นผลลัพธ์จากการรวมผลคูณของอินพุตและค่าถ่วงน้ำหนักแต่ละจุดกับค่าไบแอสของนิวรอนที่ i เมื่อจัดเรียงอินพุตของฟังก์ชันถ่ายโอนเข้าด้วยกันก็จะได้เวกเตอร์ n ซึ่งมีขนาด S ขั้นตอนสุดท้ายเวกเตอร์ n จะถูกป้อนผ่านฟังก์ชันถ่ายโอนโดยจะได้เวกเตอร์ a ซึ่งมีขนาด S เป็นผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียม โดยที่

$$a = f(W * p + b) \quad (3.6)$$

ในกรณีที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการแก้ปัญหาที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้น หรือปัญหาที่ไม่ซับซ้อนมากนัก การใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่มีชั้นซ่อนเพียง 1 ชั้นก็เพียงพอสำหรับแก้ปัญหานั้น แต่เมื่อปัญหามีความซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้นมากขึ้น การแก้ปัญหาก็อาจจำเป็นต้องใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่มีชั้นซ่อนหลายชั้น



รูปที่ 3.7 แบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ชั้นซ่อน [4]

รูปที่ 3.7 แสดงโครงข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ชั้นซ่อน มีอินพุต R จุด, นิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เท่ากับ S^1 และ S^2 และมีเอาต์พุต S^3 จุด เช่นเดียวกับกับโครงข่ายประสาทเทียมที่มีชั้นซ่อน 1 ชั้น สมาชิกของอินพุตเวกเตอร์ P แต่ละตัวจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับนิวรอนแต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 ด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก W^1 (เรียกว่า Input weight, $IW^{1,1}$) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด $S^1 \times R$ และเวกเตอร์ a^1 ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของชั้นซ่อนที่ 1 และมีขนาด S^1 จะเป็นอินพุตของชั้นซ่อนที่ 2 สมาชิกแต่ละตัวของเวกเตอร์ a^1 ก็จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับนิวรอนแต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 ด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก W^2

(เรียกว่า Layer weight, $LW^{2,1}$) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด $S^2 \times S^1$ เช่นเดียวกับกับชั้นซ่อนที่ 1 เวกเตอร์ a^2 ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของชั้นซ่อนที่ 2 และมีขนาด S^2 จะเป็นอินพุทของชั้นข้อมูลเอาต์พุท สมาชิกแต่ละตัวของเวกเตอร์ a^2 จะถูกเชื่อมเข้ากับนิวรอนแต่ละตัวในชั้นข้อมูลเอาต์พุทด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก W^3 ($LW^{3,2}$) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด $S^3 \times S^2$ โดยที่เวกเตอร์ a^3 ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด S^3 จะเป็นผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียม โดยที่

$$a^1 = f^1(p * IW^{1,1} + b^1) \quad (3.7)$$

$$a^2 = f^2(a^1 * LW^{2,1} + b^2) \quad (3.8)$$

$$a^3 = f^3(a^2 * LW^{3,2} + b^3) \quad (3.9)$$

สำหรับปัญหาทั่วไปที่ไม่ซับซ้อนมากนัก โครงข่ายประสาทเทียมชนิดที่มีการแพร่ค่าย้อนกลับมักนิยมใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิด Log-sigmoid ในการแก้ปัญหา แต่ในกรณีที่ปัญหาที่มีความซับซ้อนมากขึ้นจะต้องใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิด Tan-sigmoid เหตุผลหนึ่งที่ว่าฟังก์ชันถ่ายโอนทั้งสองชนิดถูกนำมาใช้ในโครงข่ายประสาทเทียมชนิดที่มีการแพร่ค่าย้อนกลับก็คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดดังกล่าวสามารถหาอนุพันธ์ได้ (Differentiable) จึงทำให้โครงข่ายประสาทเทียมชนิดนี้สามารถใช้แก้ปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้อย่างดี ฟังก์ชันถ่ายโอนอีกชนิดหนึ่งที่ใช้ในโครงข่ายประสาทเทียมชนิดนี้ก็คือ ฟังก์ชันถ่ายโอน Linear ซึ่งจะใช้ในชั้นข้อมูลเอาต์พุท

ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิด feed-forward multi-layer เพื่อใช้แก้ปัญหาเกี่ยวกับการประมาณค่าฟังก์ชัน, การแยกแยะรูปแบบ จะนิยมใช้กฎการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ ซึ่งกฎการเรียนรู้นี้สามารถปรับค่าถ่วงน้ำหนัก และค่าไบแอส ของโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อลดค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดยกกำลังสอง (Mean-square error, MSE) ระหว่างคำตอบที่แท้จริง (t_i) กับผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียม (a_i) ในสมการ (3.10)

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - a_i)^2 \quad (3.10)$$

โดยที่ N = จำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอน

โครงข่ายประสาทเทียมที่ฝึกสอนด้วยกฎการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับนั้น จะมีจำนวนนิวรอนในชั้นข้อมูลอินพุท และชั้นข้อมูลเอาต์พุทคงที่ ซึ่งเท่ากับจำนวนของอินพุท และเอาต์พุทของปัญหานั้นเอง ส่วนจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนนั้นสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่นการคัดลอกหรือการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และไม่มีจำนวนที่เป็นสูตรสำเร็จ ดังนั้นในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจึงต้องมีการปรับเปลี่ยนจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน เพื่อหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ให้ค่าผิดพลาดระหว่างค่าตอบที่แท้จริงกับผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียมต่ำที่สุด (มีประสิทธิภาพสูงที่สุด) จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนนอกจากจะมีผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมแล้วยังมีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนอีกด้วย โครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนน้อย จะใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยกว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนมาก เมื่อฝึกสอนด้วยเงื่อนไขเดียวกัน แต่อย่างไรก็ดีเราไม่สามารถสรุปได้ว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนมากจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนน้อย

3.5 งานวิจัยในอดีตที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการแก้ปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการแก้ปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลังจำนวนมาก งานวิจัยแต่ละชิ้นจะนำเสนอการแก้ปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลังโดยพิจารณาอินพุตและเอาต์พุตแตกต่างกันตามชนิดของปัญหา โดยใช้ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดต่างๆและโครงข่ายประสาทเทียมแตกต่างกันไป วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รวบรวมมานำเสนอโดยสังเขป ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการแก้ปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลัง

Authors, References	Neural Networks	Input of Neural Networks	Output of Neural Networks	Power Systems Size	Notes
Sobajic D. J. et al., [9]	Multi-layer feed-forward network w/ back-propagation algorithm	δ (relative to inertial center of angle at the instant of fault), P_i/M and P_i^2/M	Critical clearing time (CCT)	4 machines 6 buses	
Wong K. P. et al., [10]	Multi-layer feed forward network with back-propagation algorithm	δ , V_r , I_r and the rotor slip frequency	CCT	Single machine infinite bus system	
Aggoune M. et al., [11]	Multi-layer feed forward network	P, Q, Excitation gain, Load demand and Status of lines	“Secure/ Insecure”	3 machines 9 buses	

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

Authors, References	Neural Networks	Input of Neural Networks	Output of Neural Networks	Power Systems Size	Notes
Wong K. P. et al., [12]	Multi-layer feed forward network with back-propagation algorithm	δ , V_r , I_r and the rotor slip frequency	CCT	Single machine infinite bus system	Considered asymmetrical fault conditions
Marpaka D. R. et al., [13]	Multi-layer feed forward network with back-propagation algorithm	δ and ω	"Stable/ Unstable"	Single machine infinite bus system	
Mori H. et al., [14]	Kohonen network	V_{node} , P_{node} and Q_{node}	"Stable/ Critical/ Unstable"	3 machines 9 buses	Considered AVR and governor models
Pao Y. H. et al., [15]	Combined use of unsupervised and supervised learning	P , Q , P_m , δ and M	CCT	4 machines 6 buses	
Omata K. et al., [16]	Multi-layer feed forward network with back-propagation algorithm	δ (pre-fault), P_a (during fault) and P_d (post fault) P_d = decelerating power	"Stable/ Unstable"	1) 6machines 16 buses 2) 34 machine IEEE 118 bus system	
Xianshu L. et al., [17]	Multi-layer feed forward network	P and Q	"Stable/ Unstable"	3 machines 3 buses	
Sharaf A. M. et al., [18]	A single layer perceptron network	$\Delta\delta$, $\Delta\omega$ and ΔP_a	"Stable/ Unstable" and CCT (short or long)	Single machine infinite bus system	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

Authors, References	Neural Networks	Input of Neural Networks	Output of Neural Networks	Power Systems Size	Notes
Liangzhong Y. et al., [19]	Multi-layer feed forward network with back-propagation algorithm	Fault clearing time, Load level (P) and ΔV (energy margin)	Power limits (Critical generator)	4 machines 11 buses	Lyapunov direct method was used as a fast method to obtain the training data.
Huang K. et al., [20]	Multi-layer feed forward network with back-propagation algorithm	P and Q	CCT	5 machines 14 buses	
Liangzhong Y. et al., [21]	Multi-layer feed forward network with back-propagation algorithm	Fault clearing time and ΔV (energy margin)	Power limits (Critical generator)	59 machines 270 buses	Lyapunov direct method was used as a fast method to obtain the training data.
Wei S. et al., [22]	Multi-layer feed forward network with back-propagation algorithm	δ , P (pre-fault), P (during fault) and P_a	CCT	3 machines 9 buses	
Klapper D. B. et al., [23]	Feed forward neural networks and Hopfield neural networks	Potential energy, Kinetic energy and Derivative of potential energy	CCT	1) 3-plant 8-load 2) Two machines infinite bus system	Hopfield neural networks are used to search for the Controlling u.e.p.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

Authors, References	Neural Networks	Input of Neural Networks	Output of Neural Networks	Power Systems Size	Notes
Chang C. S. et al., [24]	Multi-layer feed forward network with back-propagation algorithm	The target field (the desired output the neural network is finally required to generate) and the factor field (for example, the weather conditions, load data, etc.)	Daily peak load, Half-hourly load and Security transfer limit	The longitudinal sample system	The neural network based load forecasting algorithm is generalised with the transient stability algorithm based on the pattern recognition approach.
Zhou Q. et al., [25]	Multi-layer feed forward network with back-propagation algorithm	ΔV (energy margin), UEP (unstable equilibrium point) of advanced generators	“Vulnerable/ Not Vulnerable”	50 machine IEEE 145 bus system	TEF method was used to prepare the training data.
Hobson E. et al., [26]	Multi-layer feed forward network with back-propagation algorithm	$P_1, P_2^2/M, \Delta\delta$ (with respect to center of inertia), B (susceptance) and EN (energy adjustments)	CCT	1) 4 machines 12 buses 2) 20 machines 106 buses	
Nishiura M. et al., [27]	Multi-layer feed forward network with back-propagation algorithm	δ, P (pre-fault), P (immediately after the fault), P_1/M , Potential energy, Kinetic energy and the time derivative of potential energy	CCT	4 machines 6 buses	Lyapunov direct method was used to prepare the training data.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เฉพาะในท้องถิ่น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

Authors, References	Neural Networks	Input of Neural Networks	Output of Neural Networks	Power Systems Size	Notes
Karaki S. et al., [28]	Multi-layer feed forward network with back-propagation algorithm	δ (with respect to the center of inertia), P_s , initial internal machine acceleration (with respect to the center of inertia), V_i and Q	1) CCT 2) δ_{max}	2 machines 5 buses	
Lo K. L. et al., [29]	Modified Kohonen network	P and Q	CCT	3 machines 9 buses	
Sing L. B. et al., [30]	Multi-layer feed forward network	V_i , I_i , δ , P and Q	CCT	Single machine infinite bus system	Considered both symmetrical & asymmetrical fault conditions
Miranda V. et al., [31]	Multi-layer feed forward network with back-propagation algorithm	P, Internal voltage of machines (E) and M	ΔV (energy margin)	7 machines 10 buses (CIGRE test system)	Considered dispatch problem and multi-contingencies
Edwards A. R. et al., [32]	Multi-layer feed forward network with back-propagation algorithm	Many system states	"Stable/ Unstable"	National Grid system (between English and North Wales areas)	
Minussi C. R. et al., [33]	Multi-layer feed forward network with back-propagation algorithm	P (of i^{th} bus in the system) and B (vector containing the number of contingencies)	CCT	8 machines 17 buses	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

Authors, References	Neural Networks	Input of Neural Networks	Output of Neural Networks	Power Systems Size	Notes
Aboytes F. et al., [34]	Multi-layer feed forward network with back-propagation algorithm	P, Q, δ , Number of machines (synchronised at each voltage level), Load level and Topology changes	“Stable/ Unstable”	53 machines 227 buses	
Muknahallipat-na S. et al., [35]	Multi-layer feed forward network with back-propagation algorithm and Radial basis function network	$\Delta\delta, \Delta\omega, \Delta v_p, \Delta P$ and ΔQ	“Stable/ Unstable”	1) 10 machines 39 buses (New England test system) 2) 50 machine IEEE 145 bus system	
Mansour Y. et al., [36]	Multi-layer feed forward network	System features (20 different parameters) such as P_{bus}, Q_{bus} , Total system load P and Q, Generator P and Q, V_{bus} and etc.	Energy margin and the maximum swing angle	1) B.C. Hydro 209 machines 1393 buses 2) Hydro Quebec’s system 87 machines 963 buses	TEF method was used to prepare the training data.
Amjady N., [37]	Parallel neural networks with a functional link net	Pre-fault active power, Pre-fault reactive power, Pre-fault voltage of the faulted element, Type of fault and Three inputs for the position of fault	CCT	IEEE 30 and 118 bus test systems	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

Authors, References	Neural Networks	Input of Neural Networks	Output of Neural Networks	Power Systems Size	Notes
Jiriwibhakorn S., [38]	Multi-layer feed forward network with back-propagation algorithm and three algorithm of weightless neural networks	P, Fault location and Network structure	CCT	10 machines 39 buses (New England test system)	Sobol sequence and time domain simulation method used to prepare the training data.
Gu X. P., et al., [39]	Multi-layer feed forward network with back-propagation algorithm	Many system states	“Stable/ Unstable/ Indeterminate”	10 machines 39 buses (New England test system)	
Paucar, V. L., et al., [40]	Multi-layer feed forward network with back-propagation algorithm	P and Some data of the reference generator’s swing curve	CCT	10 machines 39 buses (New England test system)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ระบบไฟฟ้าที่ทำการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเอาระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ 2 ระบบมาให้โครงข่ายประสาทเทียบเรียนรู้พฤติกรรมของระบบและให้คำตอบเป็นค่า CCT โดยระบบไฟฟ้าทั้งสองระบบประกอบไปด้วยระบบทดสอบ 1 ระบบ คือ IEEE 50 generators test system และระบบที่ใช้งานจริงในทางปฏิบัติอีก 1 ระบบ คือ ระบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) ในส่วนของภาคกลางตะวันตกเชื่อมต่อกับภาคใต้ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ระบบ IEEE 50 generators test system

4.1.1 โครงสร้างของระบบ

ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system นั้นจะประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดต่างๆรวมกัน 50 เครื่อง เชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย บัสทั้งสิ้น 145 บัส, สายส่ง 453 เส้น และโหลดที่บัสต่างๆ ดังรายละเอียดในภาคผนวก ข. เนื่องจากเป็นระบบที่มีการเชื่อมโยงกันด้วยสายส่งที่มากถึง 453 เส้น การนำเสนอภาพรวมของระบบด้วยแผนภาพเส้นเดี่ยว (Single line diagram) จึงไม่สามารถทำได้อย่างครบถ้วนจึงขอนำเสนอเฉพาะในบริเวณที่ศึกษาซึ่งได้ลงรายละเอียดเพิ่มเติมบางส่วนจาก [41] ดังแสดงในรูปที่ 4.1

4.1.2 เงื่อนไขของระบบที่พิจารณา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system โดยกำหนดเงื่อนไขของการศึกษาดังนี้

- 1) แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้เป็นแบบธรรมดา (Classical models)
- 2) จำลองสถานะของระบบโดยกำหนดให้เกิดฟอลต์ชนิด 3 เฟส ในตำแหน่งที่พิจารณา
- 3) พิจารณาดำเนินการที่เกิดฟอลต์ และรูปแบบการเคลียร์ฟอลต์ 5 ตำแหน่งที่มีค่า CCT ต่ำที่สุด
- 4) พิจารณาโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบ
- 5) กำหนดให้ภาระทางไฟฟ้าและตัวประกอบกำลังมีค่าคงที่
- 6) ทำการปรับกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พิจารณาตั้งแต่ 1.0 ถึง 1.5 เท่าของสถานะปกติ
- 7) ใช้วิธีการทางเวลา (TDM) ในการคำนวณหาค่า CCT ในแต่ละเงื่อนไข เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียบ

4.1.3 การจำลองเหตุการณ์

จากการจำลอง (Simulation) ให้เกิดฟอลต์ชนิด 3 เฟสที่ตำแหน่งต่างๆที่เป็นไปได้ในระบบ และทำการเคลียร์ฟอลต์ออกจากระบบ และเลือกตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ที่มีค่า CCT ต่ำที่สุด 5 ตำแหน่ง (F1 – F5) จะเป็นไปดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ซึ่งสอดคล้องกับ [3] หลังจากนั้นจึงทดลองปลดสายส่งในระบบที่เป็นไปได้หนึ่งเส้น และจำลองให้เกิดฟอลต์ชนิด 3 เฟสอีกครั้งหนึ่งเพื่อหาโครงสร้างที่มีผลกระทบโดยตรงต่อค่า CCT ของ F1 – F5 จำนวน 3 โครงสร้าง รวมกับโครงสร้างปกติของระบบได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.3

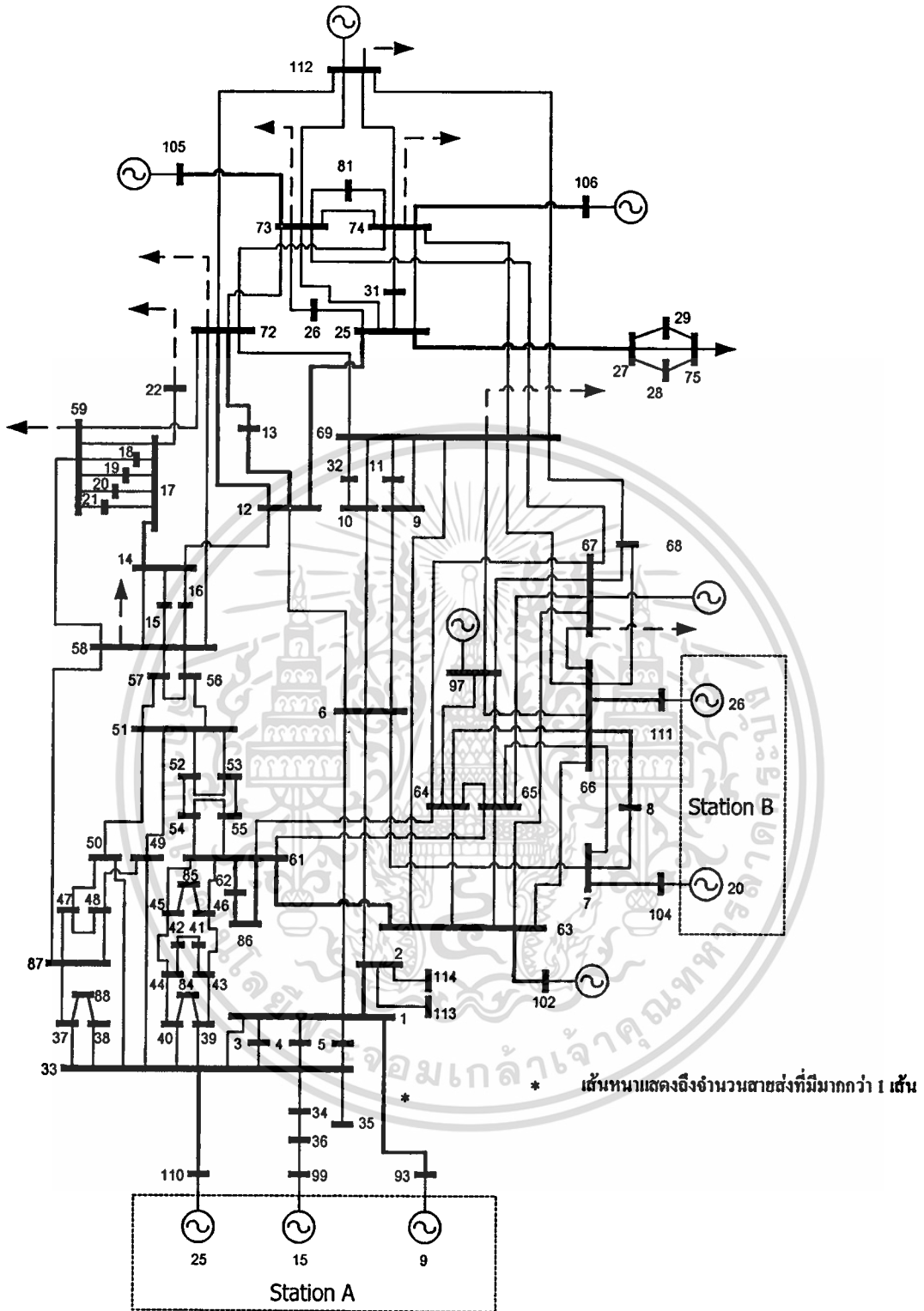
ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งเกิดฟอลต์ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system ที่พิจารณา

ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์	บัสที่เกิดฟอลต์	ปลดสายส่งระหว่างบัส	ค่า CCT ที่คำนวณได้ในสภาวะการทำงานปกติ (วินาที)
F1	6	6 – 1,2,7	0.025
F2	6	6 – 9,10,12#1,#2	0.076
F3	66	66 – 111#1,#2,#3	0.082
F4	7	7 – 6	0.108
F5	105	105 – 73#1,#2	0.119

ตารางที่ 4.2 โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system ที่พิจารณา

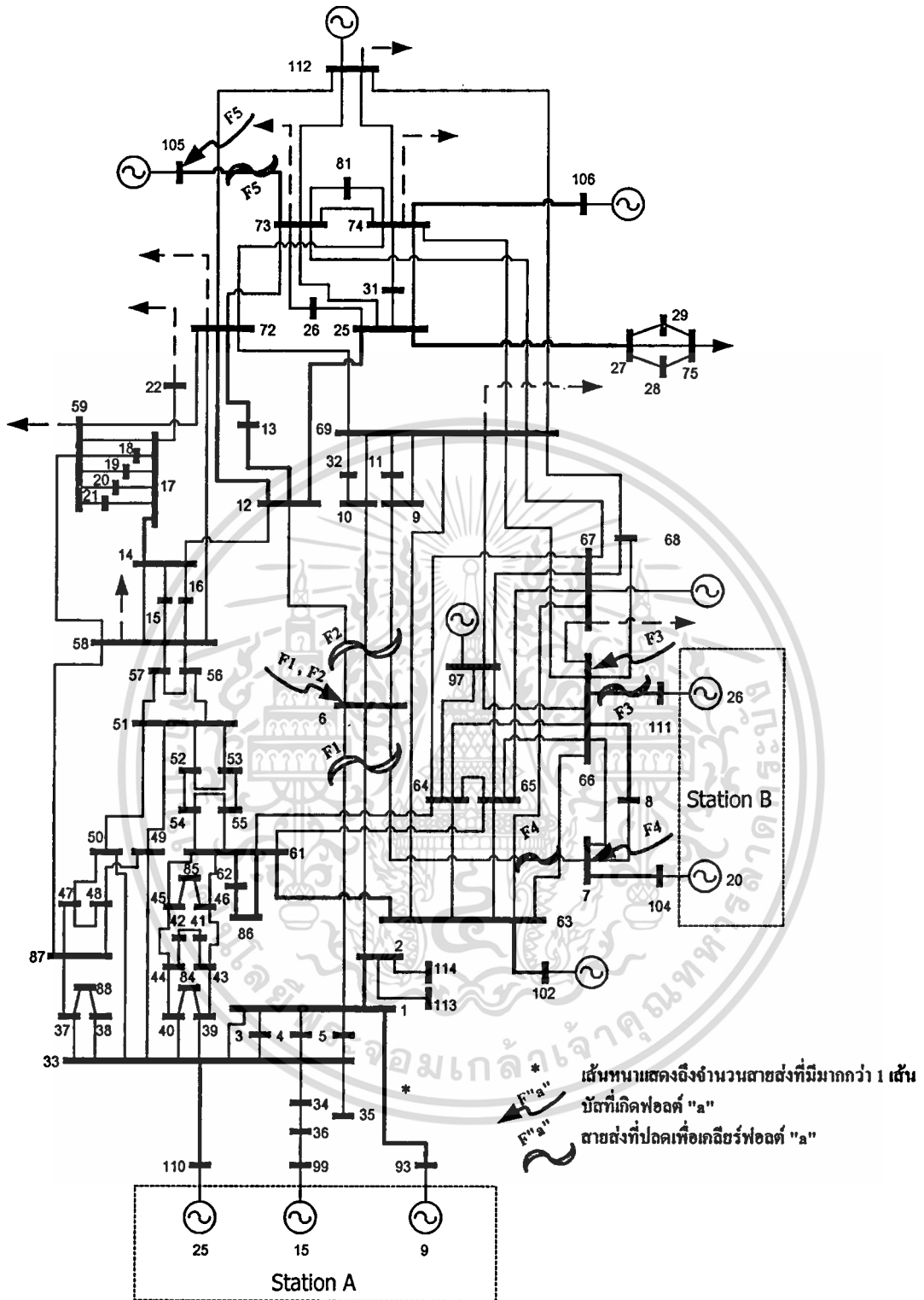
โครงสร้างของระบบ	สถานะของการปลดสายส่ง
S1	ไม่มีการปลดสายส่งใดๆ
S2	มีการปลดสายส่งระหว่างบัส 64 - 66
S3	มีการปลดสายส่งระหว่างบัส 69 - 72
S4	มีการปลดสายส่งระหว่างบัส 25 – 27 ชุดที่ 2

เมื่อได้ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และโครงสร้างของระบบที่ต้องการแล้ว ในขั้นตอนต่อไปจะทำการเลือกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะปรับกำลังผลิต โดยในที่นี้จะพิจารณาตามกรณีศึกษาใน [41] โดยเลือกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่กับบัสหมายเลข 93, 99 และ 110 ใน station A และบัสหมายเลข 104 และ 111 ใน station B ดังแสดงในรูปที่ 4.4



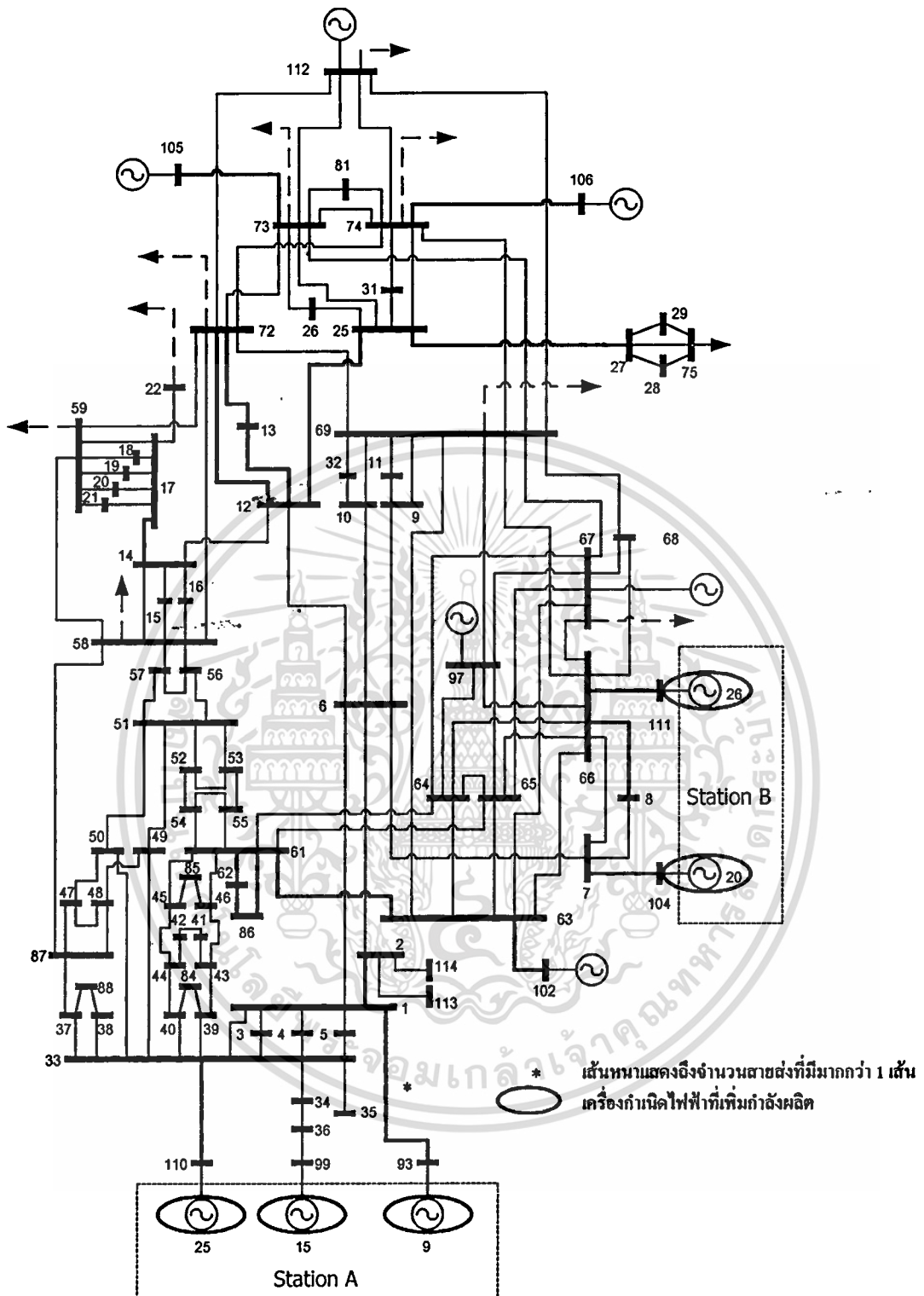
รูปที่ 4.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generator test system บริเวณที่ศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generator test system : ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generator test system : เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เพิ่มกำลังผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

4.2.1 โครงสร้างของระบบ

ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเป็นระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้งานจริง (Practical system) และเป็นระบบไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ที่มีการขยายขนาดของระบบอย่างต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาระบบไฟฟ้าทั้งประเทศแล้ว ระบบจะมีขนาดใหญ่เกินขีดความสามารถของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกพิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเฉพาะในบริเวณภาคกลางตะวันตกและภาคใต้ ซึ่งมีขนาดเหมาะสมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ โดยระบบไฟฟ้าในส่วนที่นำมาพิจารณาจะประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดต่างๆรวมกัน 30 เครื่อง เชื่อมต่อเข้ากับระบบส่งซึ่งประกอบด้วยบัสที่มีขนาดแรงดัน 500 kV, 230 kV, 115 kV ทั้งสิ้น 152 บัส, สายส่ง 234 เส้น และโหลดที่บัสต่างๆ ดังรายละเอียดในภาคผนวก ข. โดยสามารถนำเสนอภาพรวมของระบบเป็นแผนภาพเส้นเคี้ยวแสดงในรูปที่ 4.5 [42]

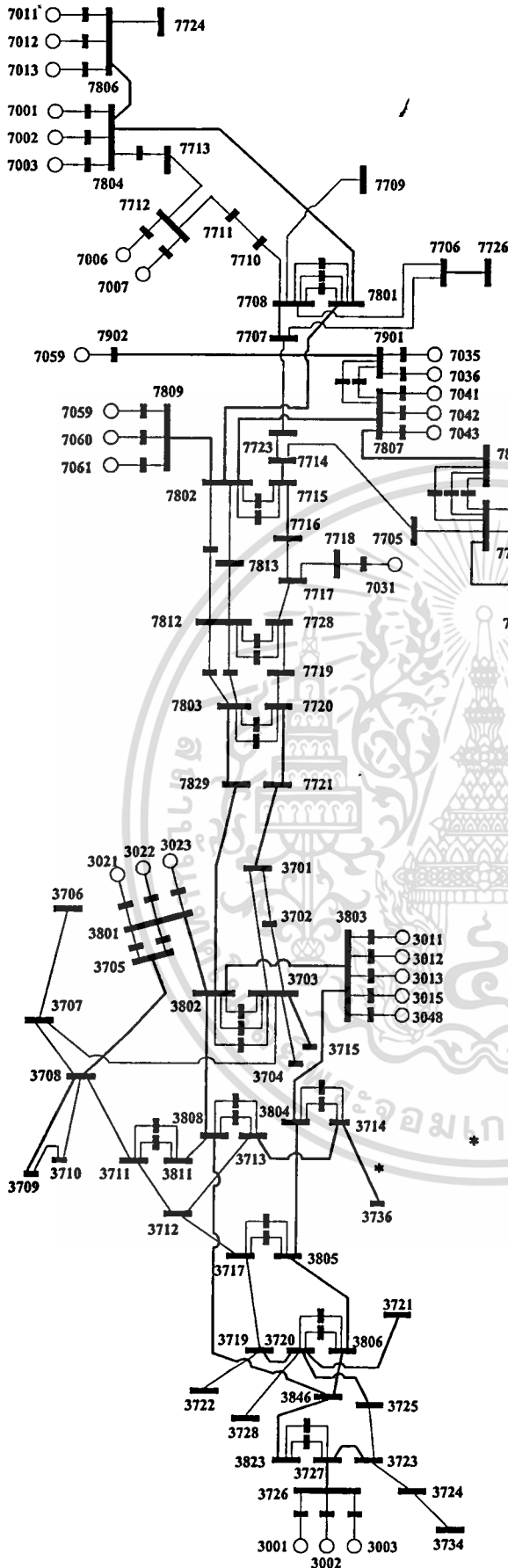
4.2.2 เงื่อนไขของระบบที่พิจารณา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเฉพาะในบริเวณภาคกลางตะวันตกและภาคใต้ โดยกำหนดเงื่อนไขของการศึกษาเช่นเดียวกันกับระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system

4.2.3 การจำลองเหตุการณ์

จากการจำลองให้เกิดฟลัดซ์ชนิด 3 เฟสที่ตำแหน่งต่างๆที่เป็นไปได้ในระบบและทำการเคลียร์ฟลัดต์ออกจากระบบ และเลือกตำแหน่งที่เกิดฟลัดซ์ที่มีค่า CCT ต่ำที่สุด 5 ตำแหน่ง (F1 – F5) จะนำไปดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.6 หลังจากนั้นจึงทดลองเลือกปลดสายส่งในระบบที่เป็นไปได้หนึ่งเส้นโดยพิจารณาจากสายส่งที่ทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากมากไปน้อย และจำลองให้เกิดฟลัดซ์ชนิด 3 เฟสอีกครั้งหนึ่งเพื่อหาโครงสร้างที่มีผลกระทบโดยตรงต่อค่า CCT ของ F1 – F5 จำนวน 3 โครงสร้าง รวมกับโครงสร้างปกติของระบบได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.7

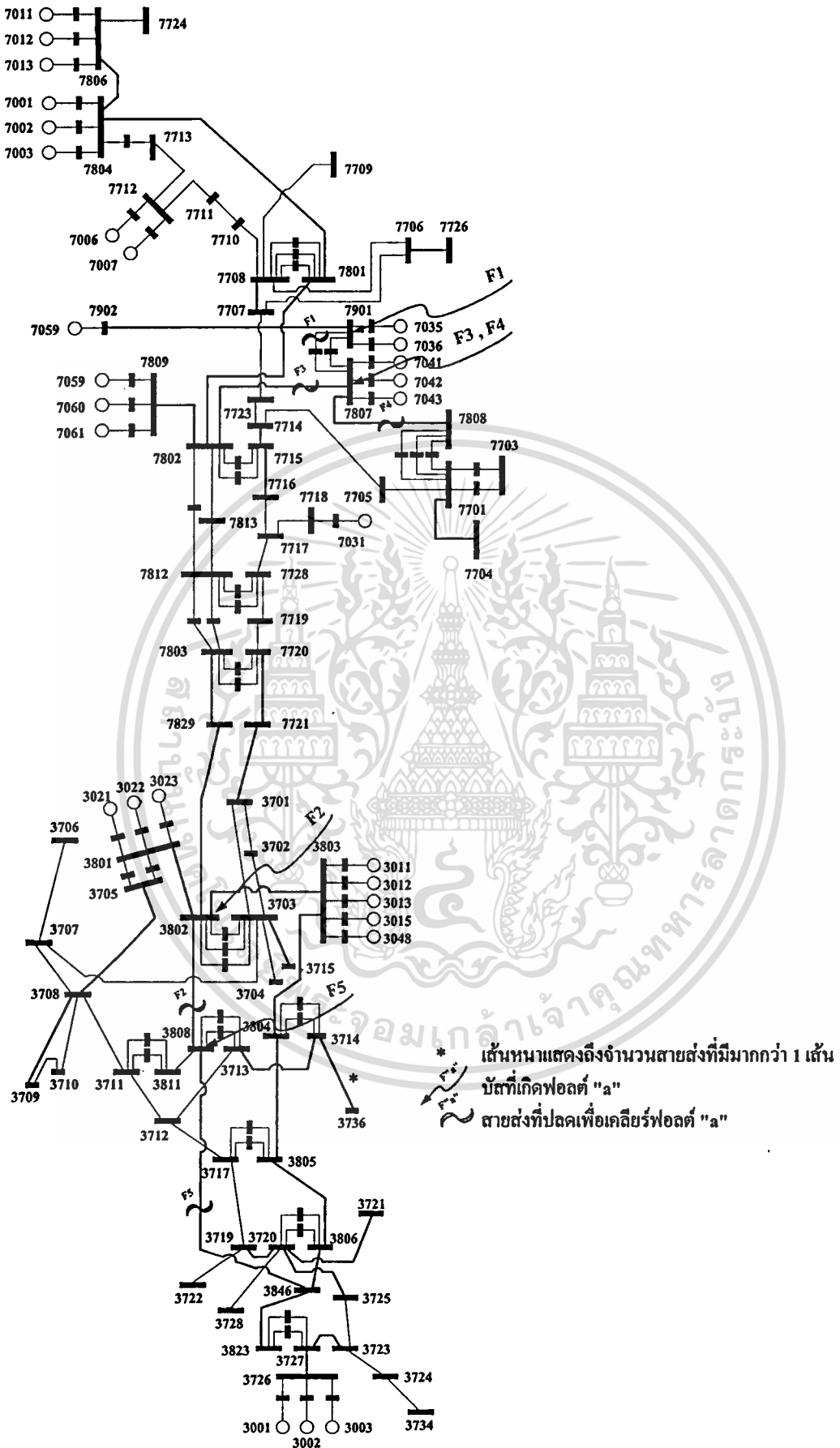
เมื่อได้ตำแหน่งที่เกิดฟลัดซ์ และโครงสร้างของระบบที่ต้องการแล้ว ในขั้นตอนต่อไปจะทำการเลือกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะปรับกำลังผลิต โดยพิจารณากำลังผลิตที่จ่ายอยู่ในสภาวะปกติเปรียบเทียบกับกำลังผลิตที่พิกัด พบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่กับบัสหมายเลข 3015, 7041, 7042 และ 7043 ในสภาวะปกติจ่ายกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ร้อยละ 64 – 66 ของกำลังไฟฟ้าพิกัด ดังนั้นจึงเลือกเครื่องกำเนิดไฟฟ้างกล่าวว่าเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะปรับกำลังผลิต ดังแสดงในรูปที่ 4.8



* เส้นหนาแสดงถึงจำนวนสายส่งที่มีมากกว่า 1 เส้น

รูปที่ 4.5 ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยบริเวณภาคกลางตะวันตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าและภาคใต้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

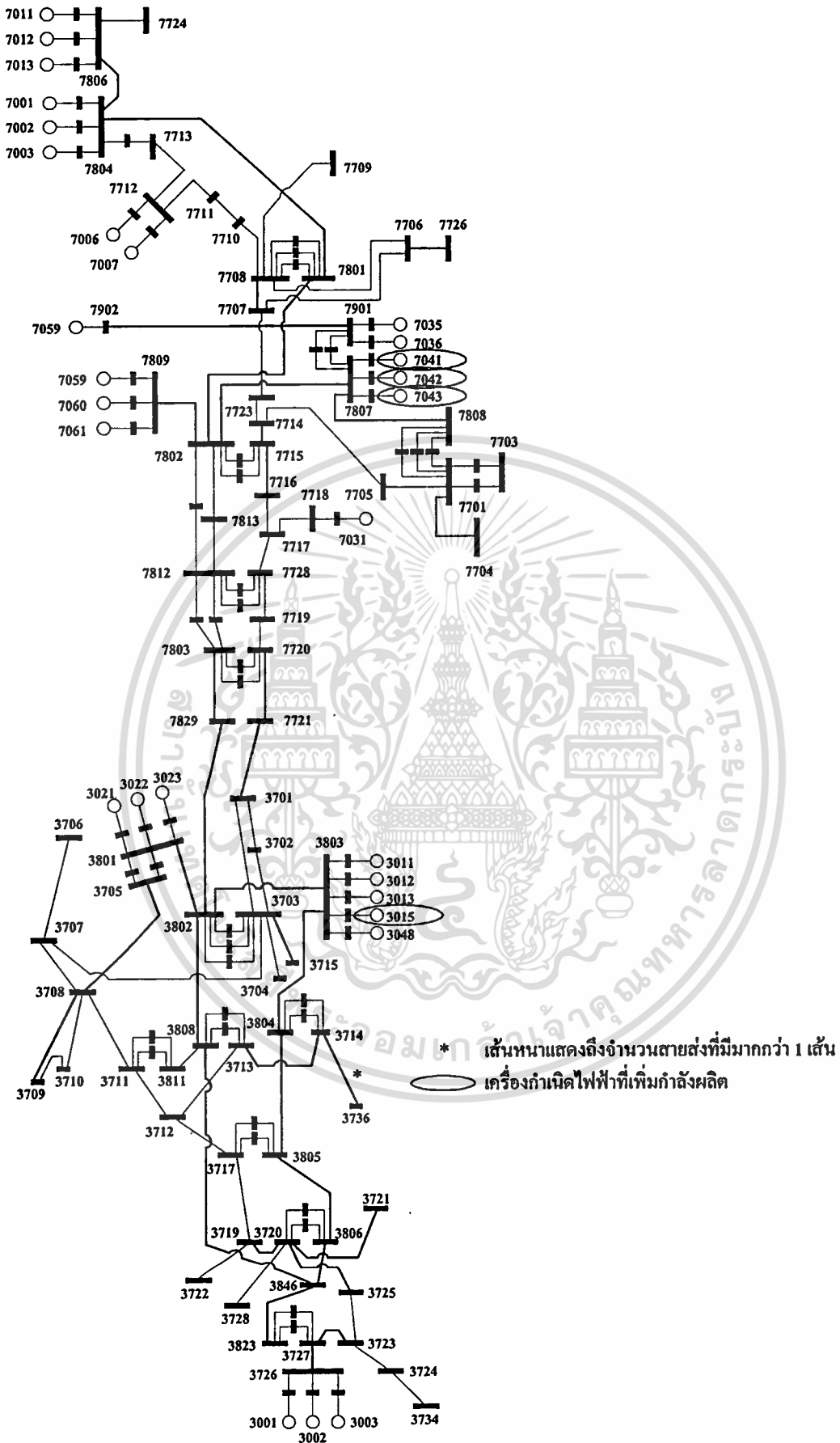


รูปที่ 4.6 ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยบริเวณภาคกลางตะวันตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้มาใช้ประโยชน์ด้านการค้า

และภาคใต้ : ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยบริเวณภาคกลางตะวันตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และภาคใต้: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เพิ่มกำลังผลิต
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ตำแหน่งเกิดฟอลต์ของระบบไฟฟ้ากำลังของ EGAT ที่พิจารณา

ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์	บัสที่เกิดฟอลต์	ปลดสายส่งระหว่างบัส	ค่า CCT ที่คำนวณได้ในสถานะการทำงานปกติ (วินาที)
F1	7901	7901 – 1048	0.069
F2	3802	3802 – 3808#1,#2	0.083
F3	7807	7807 – 7802#1	0.111
F4	7807	7807 – 7808#1	0.100
F5	3808	3808 – 3846#1,#2	0.111

หมายเหตุ ในระบบไฟฟ้ากำลังของ EGAT จะมีการปรับตั้งค่า Fault clearing time เมื่อเกิดฟอลต์ที่บัส, เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และหม้อแปลงไฟฟ้า อยู่ที่ประมาณ 0.080 วินาที (เป็นช่วง Operating time ของรีเลย์ป้องกัน 0.040 วินาที และ Tripping time ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ 0.040 วินาที)

ตารางที่ 4.4 โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังของ EGAT ที่พิจารณา

โครงสร้างของระบบ	สถานะของการปลดสายส่ง
S1	ไม่มีการปลดสายส่งใดๆ
S2	มีการปลดสายส่งระหว่างบัส 1090 – 7803
S3	มีการปลดสายส่งระหว่างบัส 3802 – 7829 เส้นที่ 2
S4	มีการปลดสายส่งระหว่างบัส 3803 – 3804 เส้นที่ 2

4.3 การคำนวณหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

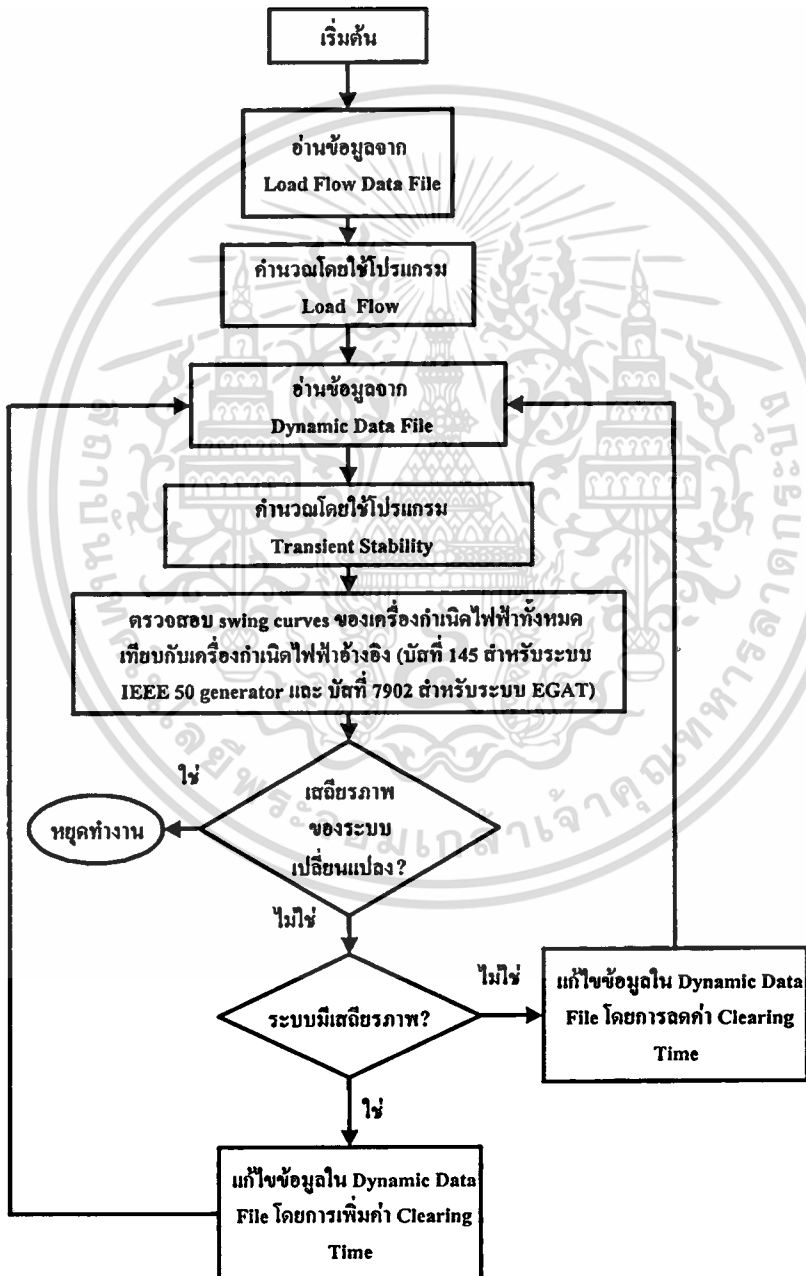
การคำนวณหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤต (CCT) สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังทั้งสองระบบ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Load flow and step by step time simulation เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการฝึกสอนและทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมนั้น จะต้องจัดเตรียมข้อมูลของระบบไฟฟ้ากำลังทั้งสองระบบให้อยู่ในรูปแบบของ Load flow data file และ Dynamic data file

Load flow data file จะประกอบไปด้วยข้อมูลของ แรงดัน, มุมของแรงดัน, กำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ โหลดที่บัสต่างๆของระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อใช้ในการคำนวณ โหลดโฟลว์ ส่วน Dynamic data file จะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์, เวลาที่เคลียร์ฟอลต์ออกจากระบบ, สายส่งที่ปลดออกเพื่อเคลียร์ฟอลต์ และรูปแบบการแสดงผลของโปรแกรม ซึ่งในที่นี้กำหนดให้แสดงผลในรูปแบบของกราฟสวิง โดยรายละเอียดของ Load flow data file และ Dynamic data file จะนำเสนอในภาคผนวก ก.

เมื่อเขียน Load flow data file สำหรับกรณีศึกษาต่างๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พิจารณา, การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังแล้วเสร็จ ก็จะนำไปใช้เป็นอินพุทของโปรแกรม Load flow ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็น ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟ

ฟาริแอกทีฟที่ส่งผ่านจากบัสหนึ่งไปยังบัสอื่นๆในสายส่งแต่ละเส้น, แรงดันและมุมของแรงดันที่บัสต่างๆ จากนั้นสั่งให้โปรแกรม Transient stability ทำงานโดยโปรแกรมดังกล่าวจะอ่านข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการเกิดและการเคลียร์ฟอลต์จาก Dynamic data file และผลลัพธ์จากโปรแกรม Load flow และคำนวณผลลัพธ์ที่ได้แสดงอยู่ในรูปของกราฟสวิง เพื่อนำไปพิจารณาหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 2

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม Load flow and step by step time simulation ในการคำนวณหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤต สามารถแสดงเป็นโฟลว์ชาร์ตดังรูป 4.9



รูปที่ 4.9 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม Load flow and step by step time simulation

ในการคำนวณหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤต เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การคำนวณหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤต

โดยใช้โครงข่ายประสาทดเทียม

การนำโครงข่ายประสาทดเทียมมาใช้ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังนั้น มีองค์ประกอบหลายอย่างที่มีผลต่อการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทดเทียม การที่โครงข่ายประสาทดเทียมสามารถเรียนรู้พฤติกรรมของระบบไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี จะส่งผลให้การคำนวณหาค่าตอบของระบบไฟฟ้ากำลังมีความแม่นยำสูง ดังนั้นก่อนที่จะทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทดเทียมจึงต้องมีการพิจารณาถึงองค์ประกอบที่มีผลต่อการเรียนรู้ และประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทดเทียม ซึ่งประกอบไปด้วย การเลือกใช้ตัวแปรที่เป็นตัวแทนของระบบไฟฟ้ากำลัง (ตัวแปรฝึกสอน), การกระจายของข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอน, ปริมาณของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบ, เงื่อนไขของการฝึกสอน และขั้นตอนในการฝึกสอน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

5.1 การเลือกตัวแปรในการฝึกสอน

ในบรรดาองค์ประกอบที่มีผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทดเทียม อาจกล่าวได้ว่าการเลือกตัวแปรในการฝึกสอนเป็นองค์ประกอบที่มีผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทดเทียมมากที่สุด ตัวแปรที่ใช้ในการฝึกสอนจะประกอบไปด้วยตัวแปรอินพุท และตัวแปรเอาต์พุท ตัวแปรอินพุทคือตัวแปรที่แสดงถึงสถานะของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งป้อนให้กับชั้นข้อมูลอินพุทของโครงข่ายประสาทดเทียม ส่วนตัวแปรเอาต์พุทคือคำตอบที่กำลังพิจารณา ซึ่งได้จากชั้นข้อมูลเอาต์พุทของโครงข่ายประสาทดเทียม

การพิจารณาปัญหาที่เกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังนั้นมีคำตอบของปัญหาที่พิจารณาแตกต่างกันไป อาทิเช่น ในการปรับตั้งช่วงเวลาตัดกระแสของอุปกรณ์ป้องกัน คำตอบของปัญหาที่พิจารณาคือ ค่า CCT, ในการควบคุมเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คำตอบของปัญหาที่พิจารณาคือ ค่ากำลังผลิตสูงสุด (Maximum power limit) หรือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าวิกฤต (Critical generator) เป็นต้น สำหรับคำตอบของปัญหา (ตัวแปรเอาต์พุท) แต่ละปัญหา ก็จะมีตัวแปรอินพุทที่เหมาะสมแตกต่างกันออกไป ในการเลือกตัวแปรอินพุทสำหรับปัญหาของระบบไฟฟ้ากำลังจะต้องพิจารณาดังขนาดของระบบไฟฟ้ากำลังประกอบไปด้วย ในกรณีที่ระบบไฟฟ้ากำลังมีขนาดเล็ก พารามิเตอร์ต่างๆของระบบสามารถนำมาใช้เป็นตัวแปรอินพุทได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อเวลาและขนาดของหน่วยความจำที่ใช้ในการฝึกสอนมากนัก เนื่องจากมีจำนวนของตัวแปรอินพุทไม่มาก แต่เมื่อระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณามีขนาดใหญ่ขึ้น การเลือกตัวแปรอินพุทจะต้องมีการพิจารณาอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละเอียด เนื่องจากไม่สามารถนำพารามิเตอร์ทั้งหมดของระบบมาใช้เป็นตัวแปรอินพุทของโครงข่ายได้ เพราะนอกจากจะทำให้เวลา และหน่วยความจำที่ใช้ในการฝึกสอนมากขึ้นแล้วยังไม่ทำให้ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมดีขึ้นอีกด้วย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้ตัวแปรอินพุท เช่นเดียวกับ [43] ซึ่งได้แก่ กำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (P_g), ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ (F) และ โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง (S) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อค่า CCT โดยตรง และมีจำนวนเหมาะสมกับโครงข่ายประสาทเทียม โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system

- ตัวแปรอินพุท ประกอบด้วย กำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 93, 99, 104, 110 และ 111, ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และ โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง รวม 7 ตัวแปร
- ตัวแปรเอาต์พุท ประกอบด้วย ค่า CCT 1 ตัวแปร

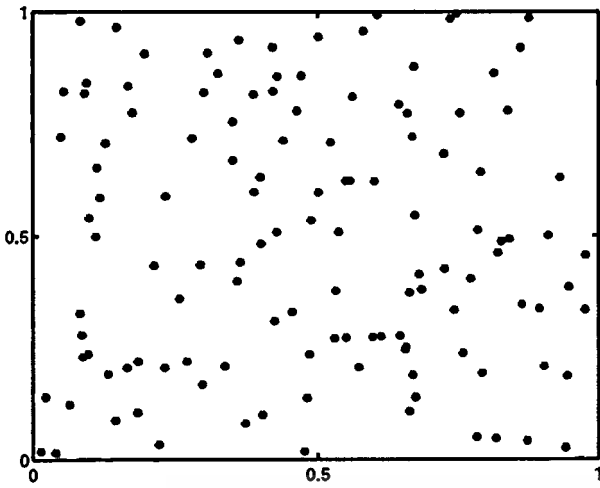
5.1.2 ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT)

- ตัวแปรอินพุท ประกอบด้วย กำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 3015, 7041, 7042 และ 7043, ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และ โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง รวม 6 ตัวแปร
- ตัวแปรเอาต์พุท ประกอบด้วย ค่า CCT 1 ตัวแปร

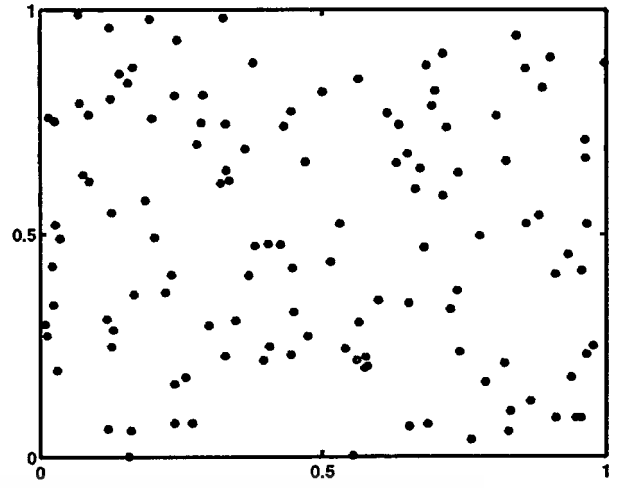
5.2 การกระจายของข้อมูลฝึกสอน

สืบเนื่องจากการที่โครงข่ายประสาทเทียมมีความสามารถในการเรียนรู้ฟังก์ชันต่อเนื่องแบบไม่เชิงเส้นหลายชนิดได้อย่างแม่นยำภายในขอบเขตที่เรียนรู้ ซึ่งภายในขอบเขตนี้โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วสามารถคำนวณคำตอบของปัญหาที่พิจารณาได้โดยมีความถูกต้องและแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ดีถึงดีมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณ (Quantity) และคุณภาพ (Quality) ของข้อมูลที่นำมาฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง คุณภาพของข้อมูล ส่วนปริมาณของข้อมูลจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

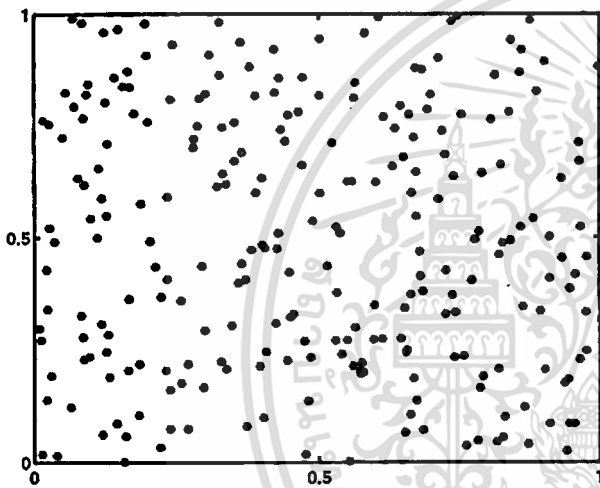
ข้อมูลที่นำมาฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมนั้น จะใช้การกระจายของข้อมูลเป็นเกณฑ์ในการบ่งบอกคุณภาพของข้อมูล กล่าวคือ กรณีที่ข้อมูล 2 ชุดมีปริมาณเท่ากัน ข้อมูลชุดที่มีการกระจายของตัวอย่าง (Sample) อย่างสม่ำเสมอภายในขอบเขตที่กำหนดมากกว่า จะมีคุณภาพมากกว่า และการใช้ข้อมูลปริมาณน้อยแต่มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ จะสามารถฝึกสอนโครงข่ายประสาท



(ก)



(ข)



(ค)

ก) การกระจายของข้อมูลที่ 1 – 125

ข) การกระจายของข้อมูลที่ 126 – 250

ค) การกระจายของข้อมูลที่ 1 – 250

รูปที่ 5.1 การกระจายของข้อมูลที่ได้จาก Pseudo random sequences [4]

เทียบให้มีประสิทธิภาพสูงกว่า และใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยกว่าการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลปริมาณมากแต่ไม่มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้วิธีการเลือกค่าของตัวแปรอินพุทแบบสุ่มเลือก (คำสั่ง Rand [4]) และตรวจสอบการกระจายของข้อมูลด้วยสายตา (Eye inspection) โดยข้อมูลที่ได้จากวิธีการนี้มีการกระจายอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างดี โดยตัวอย่างของการกระจายของข้อมูลแสดงในรูปที่ 5.1 จากนั้นจึงแปลงข้อมูลที่ให้เป็นค่าของตัวแปรที่ใช้ในฝึกสอน ซึ่งสอดคล้องกับหัวข้อที่ 4.1.3 และ 4.2.3 ดังแสดงตารางที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 วิธีการแปลงข้อมูลที่ได้เป็นตัวแปรฝึกสอนสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system

ตัวแปรฝึกสอน	ค่าที่สุ่มได้	วิธีการแปลง
$x_1 - x_5$	$r_1 - r_5$	$x = 1 + (r/2)$
x_6	r_6	เมื่อ $0 < r_6 \leq 1/5, x_6 = F1$
		$1/5 < r_6 \leq 2/5, x_6 = F2$
		$2/5 < r_6 \leq 3/5, x_6 = F3$
		$3/5 < r_6 \leq 4/5, x_6 = F4$
		$4/5 < r_6 \leq 1, x_6 = F5$
x_7	r_7	เมื่อ $0 < r_7 \leq 1/4, x_7 = S1$
		$1/4 < r_7 \leq 2/4, x_7 = S2$
		$2/4 < r_7 \leq 3/4, x_7 = S3$
		$3/4 < r_7 \leq 1, x_7 = S4$

ตารางที่ 5.2 วิธีการแปลงข้อมูลที่ได้เป็นตัวแปรฝึกสอนสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังของ EGAT

ตัวแปรฝึกสอน	ค่าที่สุ่มได้	วิธีการแปลง
$x_1 - x_4$	$r_1 - r_4$	$x = 1 + (r/2)$
x_5	r_5	เมื่อ $0 < r_5 \leq 1/5, x_5 = F1$
		$1/5 < r_5 \leq 2/5, x_5 = F2$
		$2/5 < r_5 \leq 3/5, x_5 = F3$
		$3/5 < r_5 \leq 4/5, x_5 = F4$
		$4/5 < r_5 \leq 1, x_5 = F5$
x_6	r_6	เมื่อ $0 < r_6 \leq 1/4, x_6 = S1$
		$1/4 < r_6 \leq 2/4, x_6 = S2$
		$2/4 < r_6 \leq 3/4, x_6 = S3$
		$3/4 < r_6 \leq 1, x_6 = S4$

5.3 ปริมาณของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบ

ปริมาณของข้อมูลที่น่ามาใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทดัดเทียมนั้นโดยส่วนมากจะมีข้อจำกัดจากวิธีการเตรียมข้อมูล ถ้าข้อมูลดังกล่าวได้มาโดยวิธีการเก็บบันทึกตามช่วงเวลา ปริมาณของข้อมูลก็จะขึ้นอยู่กับช่วงเวลาและความถี่ในการเก็บบันทึก ส่วนในกรณีที่ข้อมูลดังกล่าวเกิดจากการจำลองเหตุการณ์ (Simulation) ปริมาณของข้อมูลก็จะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของการจำลองเหตุการณ์, เวลาที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์ และประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ ดังนั้นการเลือกปริมาณของข้อมูลฝึกสอนจึงต้องพิจารณาตามวิธีการเตรียมข้อมูล

ข้อมูลทดสอบ คือ ข้อมูลที่นำมาทดสอบประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทดัดเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว โดยเป็นข้อมูลที่ประกอบด้วยตัวแปรอินพุท และตัวแปรเอาต์พุท เช่นเดียวกันกับข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้หน้าเว็บไซต์ประชาชนดำเนินการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฝึกสอน หากแต่ค่าของตัวแปรดังกล่าวในชุดข้อมูลทดสอบจะเป็นค่าที่ไม่ถูกใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เป็นค่าที่โครงข่ายประสาทเทียมไม่เคยเรียนรู้มาก่อน (Unseen) การวัดประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมนั้นจะใช้ค่าผิดพลาดของคำตอบของข้อมูลทดสอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วเป็นเกณฑ์ ซึ่งจะนำเสนอในรูปแบบของค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean absolute percentage error , mape) ดังสมการที่ 5.1

$$\text{mape} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\text{CCT}_{\text{ANN}_i} - \text{CCT}_{\text{TDM}_i}}{\text{CCT}_{\text{TDM}_i}} \right| \times 100\% \quad (5.1)$$

โดยที่ CCT_{ANN} คือ CCT ที่เป็นคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียม
 CCT_{TDM} คือ CCT ที่เป็นคำตอบของวิธีการทางเวลา
 n คือ จำนวนข้อมูลทดสอบ

ปริมาณของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นไปตามตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 จำนวนข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

ระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณา	เงื่อนไขที่	จำนวนข้อมูลฝึกสอน	จำนวนข้อมูลทดสอบ
ระบบ IEEE 50 generators test system	1	50	30
	2	100	30
	3	150	30
ระบบของ EGAT	1	150	50
	2	200	50
	3	250	50

5.4 เงื่อนไขของการฝึกสอน

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงเงื่อนไขทั้งหมดที่กำหนดขอบเขตการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งมีผลต่อการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.4.1 ค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส

การเลือกค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส เปรียบเสมือนกับการเลือกค่าแรกในการเล่นเกมส์ทายตัวเลข หากเลือกค่าแรกได้ใกล้เคียงกับคำตอบ จะทำให้สามารถทายตัวเลขได้ถูกต้องอย่างรวดเร็ว และใช้จำนวนครั้งในการทายน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้วิธีการเลือกค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสแบบสุ่ม (คำสั่ง “ net.inputWeights{1,1}.initFcn = 'rands'; ” และ “ net.biases{1}.initFcn = 'rands'; ” [4]) เพื่อให้การฝึกสอนในแต่ละรอบมีทิศทางการลู่เข้าหาคำตอบแตกต่างกันออกไป

5.4.2 ลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส

ลำดับขั้นตอน (Algorithm) การปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิด Feed-forward Neural Networks โดยใช้ Neural Network Toolbox นั้นมีอยู่หลายวิธี อาทิเช่น Levenberg-Maquardt algorithm, Resilient Backpropagation, Conjugate Gradient เป็นต้น แต่ละวิธีก็จะมีประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการฝึกสอนแตกต่างกัน ตามที่ระบุไว้ใน Neural Network Toolbox User's Guide นั้น Levenberg-Maquardt algorithm มีประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการฝึกสอนสูงที่สุด ในการศึกษานี้จึงได้นำเอาลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสวิธีนี้มาใช้ โดยมีลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส ดังสมการที่ 5.2

$$x_{k+1} = x_k + \Delta x = x_k + [J^T \cdot J + \mu I]^{-1} \cdot g \quad (5.2)$$

$$g = J^T \cdot e \quad (5.3)$$

- โดยที่ x คือ ค่าถ่วงน้ำหนัก(w) และค่าไบแอส (b)
- J คือ จาคอบีเยนเมตริกซ์ (Jacobian matrix) ของอนุพันธ์ของค่าผิดพลาด(แต่ละค่า) ต่อค่า x (แต่ละค่า)
- g คือ Gradient factor
- J^T คือ Transpose matrix ของ J
- e คือ เมตริกซ์ของค่าผิดพลาด (Error) ระหว่างคำตอบ (Target , t) กับค่าที่โครงข่ายประสาทเทียมคำนวณได้ (Answer , a)
- μ คือ Learning factor
- I คือ Identity matrix

$$\text{จาโคเบียนเมตริกซ์ของ (W) } J(W) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial w_{1,1}} & \frac{\partial e_1}{\partial w_{1,2}} & \dots & \frac{\partial e_1}{\partial w_{1,s^2}} \\ \frac{\partial e_2}{\partial w_{2,1}} & \frac{\partial e_2}{\partial w_{2,2}} & \dots & \frac{\partial e_2}{\partial w_{2,s^2}} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial e_s}{\partial w_{s,1}} & \frac{\partial e_s}{\partial w_{s,2}} & \dots & \frac{\partial e_s}{\partial w_{s,s^2}} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

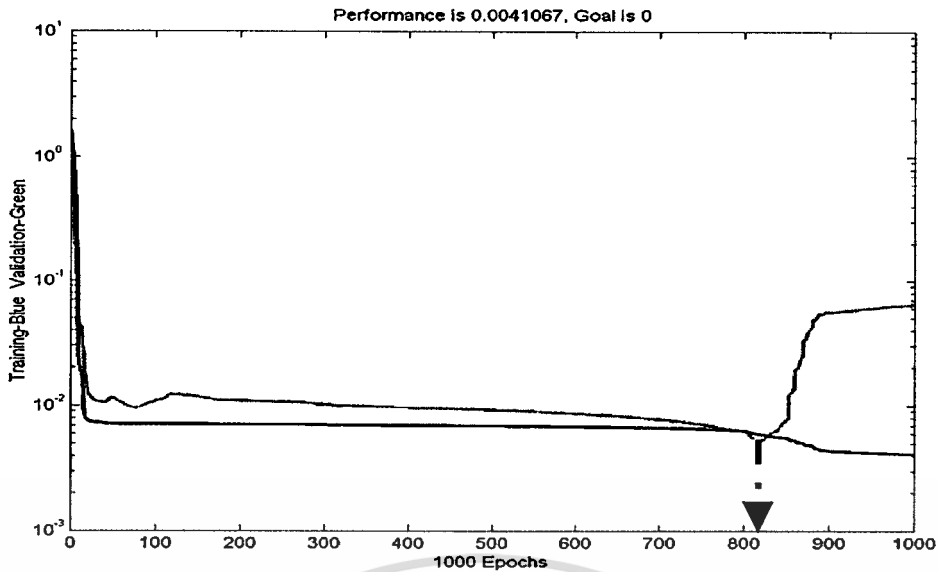
$$\text{จาโคเบียนเมตริกซ์ของค่า (b) } J(b) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial b_1} \\ \frac{\partial e_2}{\partial b_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial e_s}{\partial b_s} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$\text{เมตริกซ์ของค่าผิดพลาด} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 - a_1 \\ t_2 - a_2 \\ \vdots \\ t_s - a_s \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

5.4.3 จำนวนครั้งของการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส

ในขณะที่ทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแต่ละรอบสำหรับระบบไฟฟ้าทั้ง 2 ระบบ จะกำหนดให้มีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสเป็นจำนวน 1,000 ครั้ง(ในที่นี้จะเรียกว่า epoch) เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบระยะเวลาในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมในแต่ละเงื่อนไข และในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสแต่ละ epoch จะทำการคำนวณหาค่าผิดพลาดของคำตอบของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบแต่ละชุด เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดยกกำลังสอง (Mean square error, MSE) ของชุดข้อมูลทดสอบใน epoch ปัจจุบัน กับค่า MSE ของชุดข้อมูลทดสอบที่ได้ epoch ก่อนหน้านี้ และเก็บค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสใน epoch ที่ทำให้ค่า MSE ของชุดข้อมูลทดสอบมีค่าต่ำที่สุดไว้ (ตำแหน่งที่ถูกครี) ไปใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 5.2 โดยการ ใช้ชุดข้อมูลทดสอบเป็น Validation set

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 การเลือกค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสในแต่ละรอบของการฝึกสอน

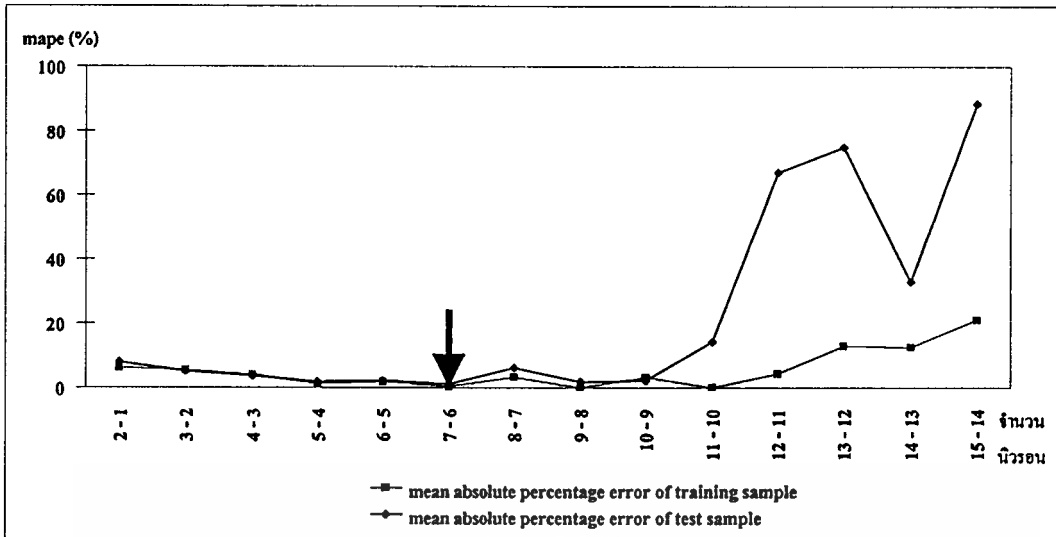
5.4.4 จำนวนรอบของการฝึกสอน

เนื่องจากการศึกษานี้ได้กำหนดวิธีการเลือกค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสเป็นการเลือกแบบสุ่ม จำนวนรอบของการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมในแต่ละโครงสร้างของโครงข่ายนั้นจะต้องเพียงพอให้เกิดการสุ่มค่าดังกล่าวอย่างทั่วถึง จึงกำหนดจำนวนรอบของการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมในแต่ละโครงสร้างไว้ที่ 20 รอบต่อโครงสร้าง และเลือกรอบการฝึกสอนที่มีค่า mape ของชุดข้อมูลทดสอบที่มีค่าต่ำที่สุดใน 20 รอบไปใช้งาน

5.4.5 จำนวนโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นชนิด Feed-forward Neural Networks ที่มีชั้นซ่อน (Hidden layer) 2 ชั้น โดยกำหนดให้ในชั้นซ่อนที่ 1 มีจำนวนนิวรอน (Neurons) ในชั้นซ่อนมากกว่าชั้นซ่อนที่ 2 เป็นจำนวน 1 นิวรอน และมีการปรับจำนวนของนิวรอนในชั้นซ่อนเพิ่มขึ้นเพื่อให้เมตริกซ์ของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสมีขนาดใหญ่เพียงพอในการคำนวณผลลัพธ์ (a) ให้มีค่าใกล้เคียงกับคำตอบที่แท้จริง (t) มากที่สุด โดยเริ่มฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เท่ากับ $2 - 1$ ตามลำดับและเพิ่มจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นซ่อนขึ้นทีละ 1 นิวรอนจนถึง $15 - 14$ และเลือกเอาโครงสร้างที่มีค่า mape ของชุดข้อมูลทดสอบที่มีค่าต่ำที่สุดไปใช้งาน ดังตัวอย่างในรูปที่ 5.3 เป็นการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system ด้วยข้อมูลฝึกสอน 150 ชุดและฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชันเท่ากับ 0.5 ในกรณีนี้โครงข่ายที่มีค่า mape ของชุดข้อมูลทดสอบมีค่าต่ำที่สุดคือ โครงข่ายที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เท่ากับ $7 - 6$ (ตำแหน่งที่ถูกครี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 การเลือกโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

5.4.6 ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน

ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีผลต่อการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิด Feed-forward Neural Networks มีอยู่หลายชนิด อาทิเช่น Log-sigmoid, Tan-sigmoid และ Linear transfer function ดังแสดงในสมการที่ 5.7, 5.8 และ 5.9 ตามลำดับ การนำโครงข่ายประสาทเทียมไปใช้ในการแก้ปัญหาชนิดที่เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องแบบเชิงเส้นและมีความซับซ้อนไม่มากนัก สามารถใช้โครงข่ายประสาทเทียมชนิด Feed-forward Neural Networks ที่มีชั้นซ่อนเพียง 1 ชั้นโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน Log-sigmoid ในชั้นซ่อน และฟังก์ชันถ่ายโอน Linear ในชั้นข้อมูลเอาต์พุต ก็เพียงพอสำหรับการแก้ปัญหา หากปัญหาที่พิจารณามีความซับซ้อนมาก ก็จะต้องพิจารณาเพิ่มจำนวนชั้นซ่อนขึ้นอีก 1 ชั้นและอาจจะเปลี่ยนมาใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน Tan-sigmoid ในชั้นซ่อนแทน โดยฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นข้อมูลเอาต์พุตยังคงเป็นฟังก์ชันถ่ายโอน Linear เช่นเดิม

$$a(n) = \frac{1}{1 + e^{-kn}} \quad (5.7)$$

$$a(n) = \frac{1 - e^{-kn}}{1 + e^{-kn}} \quad (5.8)$$

$$a(n) = n \quad (5.9)$$

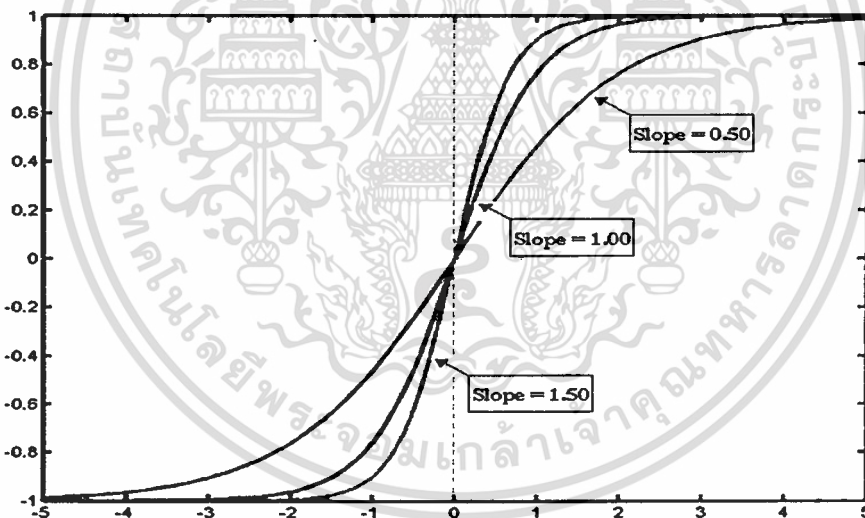
โดยที่ k คือ ค่าคงที่ที่แสดงถึงความชันของฟังก์ชันถ่ายโอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแก้ปัญหาของระบบไฟฟ้ากำลังทั้ง 2 ระบบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ถือเป็นปัญหาชนิดที่เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องแบบไม่เชิงเส้นและมีความซับซ้อนมาก จึงเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน Tan-sigmoid ซึ่งเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนที่สามารถหาอนุพันธ์ได้ในชั้นซ่อนทั้ง 2 ชั้นและฟังก์ชันถ่ายโอน Linear ในชั้นข้อมูลเอาต์พุต

5.4.7 ความชันของฟังก์ชันถ่ายโอน

นอกเหนือจากชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอนแล้ว ความชันของฟังก์ชันถ่ายโอนก็มีผลต่อการตัดสินใจและเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมอีกด้วย โดยเมื่อความชันของฟังก์ชันถ่ายโอน Tan-sigmoid มีค่ามากจะมีลักษณะการตัดสินใจใกล้เคียงกับฟังก์ชันถ่ายโอน Hard limit และเมื่อความชันของฟังก์ชันถ่ายโอน Tan-sigmoid มีค่าน้อยจะมีลักษณะการตัดสินใจคล้ายกับ Fuzzy logic ในการศึกษานี้จึงทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นซ่อนที่มีความชัน (ค่า k ในสมการที่ 5.7) ต่างๆกัน 3 ระดับ คือ 0.50, 1.00 และ 1.50 (โดยความชันเท่ากับ 1.00 เป็นค่าพื้นฐานของ Neural Network Toolbox)



รูปที่ 5.4 ความชันของฟังก์ชันถ่ายโอน Tan-sigmoid ที่ใช้ในการฝึกสอน

5.4.8 เงื่อนไขที่เป็นค่าพื้นฐานของ Neural Network Toolbox

ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิด Feed-forward Neural Networks ด้วย Levenberg-Maquardt algorithm (trainlm) [4] โดยใช้ Neural Network Toolbox จะมีเงื่อนไขพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการสิ้นสุดของการฝึกสอนดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.8.1 ค่า Gradient factor

เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้ในการพิจารณาถึงการสิ้นสุดการฝึกสอน (ค่า g ในสมการที่ 5.3) ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสแต่ละรอบนั้นค่า Gradient factor จะเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับค่าผิดพลาด (e) ที่เกิดขึ้นใน epoch นั้นๆ โดยการฝึกสอนจะสิ้นสุดลงเมื่อ Gradient factor มีค่าน้อยกว่า $1e-10$

5.4.8.2 ค่า Learning factor

ค่า Learning factor (μ ในสมการที่ (5.2)) เป็นค่าคงที่ที่ใช้เร่งการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสให้ลู่ออกเข้าหาคำตอบ ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสแต่ละรอบนั้นหากค่า Gradient factor มีค่าเพิ่มขึ้น จะมีการปรับค่า μ ให้เพิ่มขึ้นจนกระทั่งค่า Gradient factor มีแนวโน้มที่จะลดลง จากนั้นค่า μ จะถูกปรับลดลงเรื่อยๆ และจะมีการปรับเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อค่า Gradient factor มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ค่า μ เริ่มต้นจะมีค่าเท่ากับ 0.001, การปรับค่า μ เพิ่มขึ้นนั้นจะทำโดยการคูณด้วย increased factor ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10 และการปรับค่า μ ลดลงนั้นจะทำการคูณด้วย decreased factor ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.1 และการฝึกสอนจะสิ้นสุดลงเมื่อ ค่า μ มีค่ามากกว่า $1e10$

จากที่กล่าวไว้ในข้างต้นเงื่อนไขการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมทั้งหมดสามารถนำมาสรุปได้ดังตารางที่ 5.4 และ 5.5

ตารางที่ 5.4 เงื่อนไขการฝึกสอนที่ควบคุม

เงื่อนไขที่ควบคุม	ค่าที่กำหนด	ผลต่อการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม
การเลือกค่าเริ่มต้นของ Weight , Bias	เลือกแบบสุ่ม	ประสิทธิภาพของโครงข่ายอาจแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับค่าเริ่มต้นของ Weight , Bias ที่สุ่มได้
ลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส	Levenberg-Maquardt algorithm	มีประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการฝึกสอนสูงที่สุด
จำนวนข้อมูลฝึกสอน	50 , 100 และ 150 ชุด สำหรับระบบ IEEE 50 generators test system และ 150 , 200 และ 250 ชุด สำหรับระบบของ EGAT	ใช้เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนแต่ละเงื่อนไข
จำนวนข้อมูลทดสอบ	30 ชุด สำหรับระบบ IEEE 50 generators test system และ 50 ชุด สำหรับระบบของ EGAT	ใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการฝึกสอนแต่ละเงื่อนไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อนูญตเห็นาเบไซบระเอนชานการคำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 (ต่อ)

เงื่อนไขที่ควบคุม	ค่าที่กำหนด	ผลต่อการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม
จำนวนครั้งการปรับ Weight , Bias ในการฝึกสอนแต่ละรอบ	1,000 ครั้ง	ให้เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนแต่ละเงื่อนไข
จำนวนรอบการฝึกสอน	20 รอบ	ให้เกิดการสุ่มค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสอย่างทั่วถึง
จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน	ในชั้นซ่อนที่ 1 มีนิวรอนมากกว่าในชั้นซ่อนที่ 2 เป็นจำนวน 1 นิวรอน	ให้เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนแต่ละเงื่อนไข
โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม	14 โครงสร้าง ตั้งแต่ 2 - 1 จนถึง 15 - 14	เพื่อให้เมตริกซ์ของ ปรับ Weight , Bias มีขนาดใหญ่เพียงพอสำหรับการคำนวณค่าผลลัพธ์ที่ถูกต้อง
ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน	Tan-sigmoid ในชั้นซ่อนทั้ง 2 ชั้น และ Linear ในชั้นข้อมูลเอาต์พุต	ไม่มีการปรับชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน
ความชันของฟังก์ชันถ่ายโอน	0.50, 1.00 และ 1.50	เปรียบเทียบผลความชันที่มีต่อประสิทธิภาพและเวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

ตารางที่ 5.5 เงื่อนไขการฝึกสอนที่เป็นค่าพื้นฐานของ Neural Network Tool Box

เงื่อนไขที่เป็นค่ามาตรฐานของ Tool Box	ค่าที่กำหนด	ผลต่อการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม
การสิ้นสุดการฝึกสอนแต่ละรอบ	1. การเปลี่ยนแปลงของ Gradient factor ต่ำกว่า $1e-10$ 2. ค่า Learning factor เกินกว่า $1e10$	เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนอาจจะไม่แปรผันตามจำนวนบมประสาทในชั้นซ่อนและความชันของฟังก์ชันถ่ายโอน

5.5 ขั้นตอนการฝึกสอน

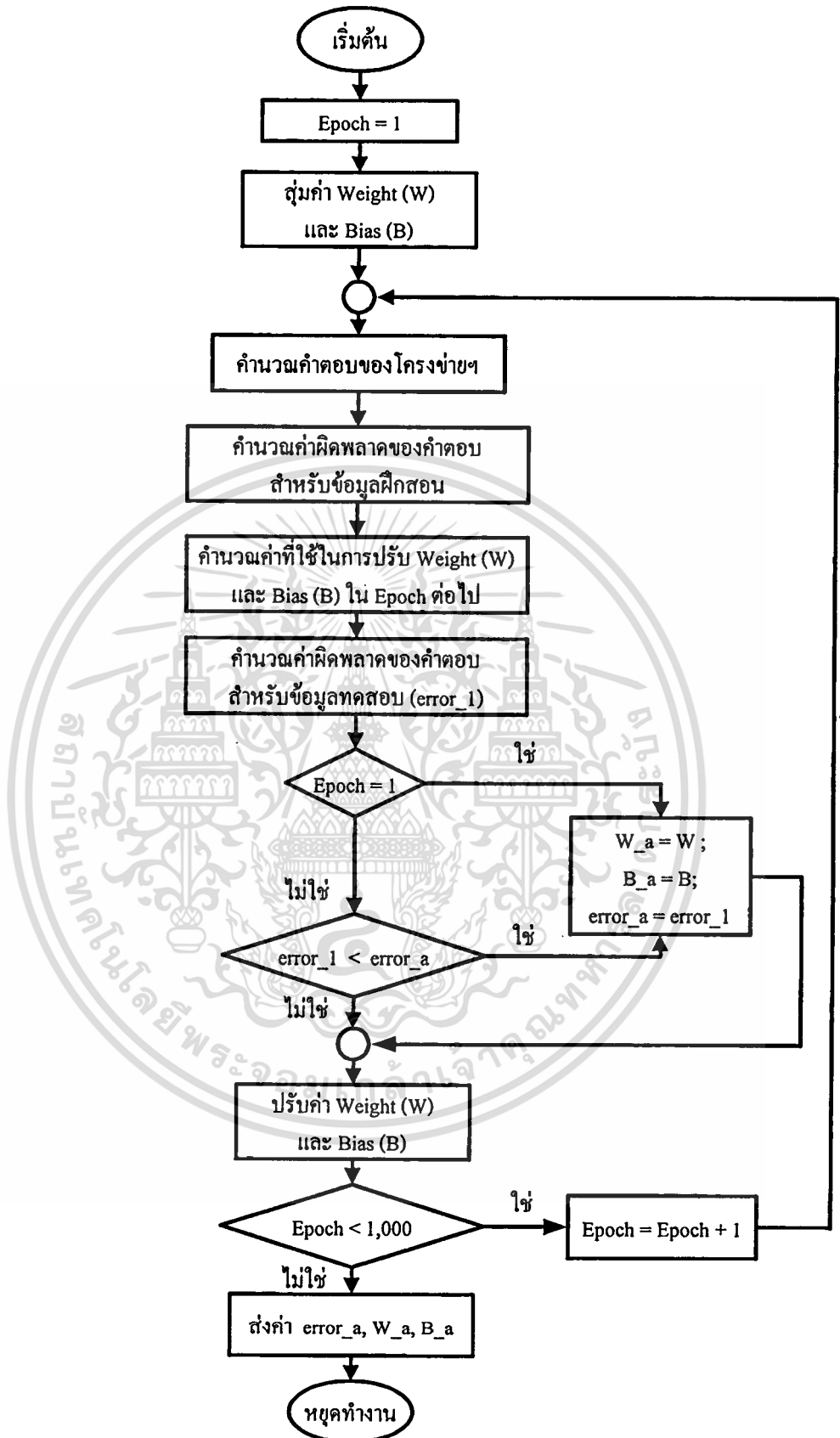
ในขั้นตอนแรกของการฝึกสอนจะเป็นการเตรียมข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนและทดสอบ เมื่อได้ข้อมูลจากการจำลองเหตุการณ์ตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 แล้วจะนำข้อมูลดังกล่าวมาจัดให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ โดยเมตริกซ์ดังกล่าวจะมีจำนวนหลักเท่ากับ จำนวนตัวแปรอินพุตบวกกับจำนวนของตัวแปรเอาต์พุต และมีจำนวนแถวเท่ากับจำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอน หรือข้อมูลทดสอบ ในกรณีของระบบ IEEE 50 generators test system จะใช้ข้อมูลฝึกสอนที่เป็นเมตริกซ์ขนาด 8×50 , 8×100 และ 8×150 และข้อมูลทดสอบที่เป็นเมตริกซ์ขนาด 8×30 ส่วนระบบของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นประโยชน์จากระบบนี้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EGAT นั้นจะใช้ข้อมูลฝึกสอนที่เป็นเมตริกซ์ขนาด 7×150 , 7×200 และ 7×250 และข้อมูลทดสอบที่เป็นเมตริกซ์ขนาด 7×50 จากนั้นนำเมตริกซ์ที่ได้มาจัดระเบียบข้อมูล (Normalization) ให้มีค่าเฉลี่ย (mean) เท่ากับ 0 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Variance) เท่ากับ 1 แล้วจึงนำเมตริกซ์ที่จัดระเบียบข้อมูลแล้วไปฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

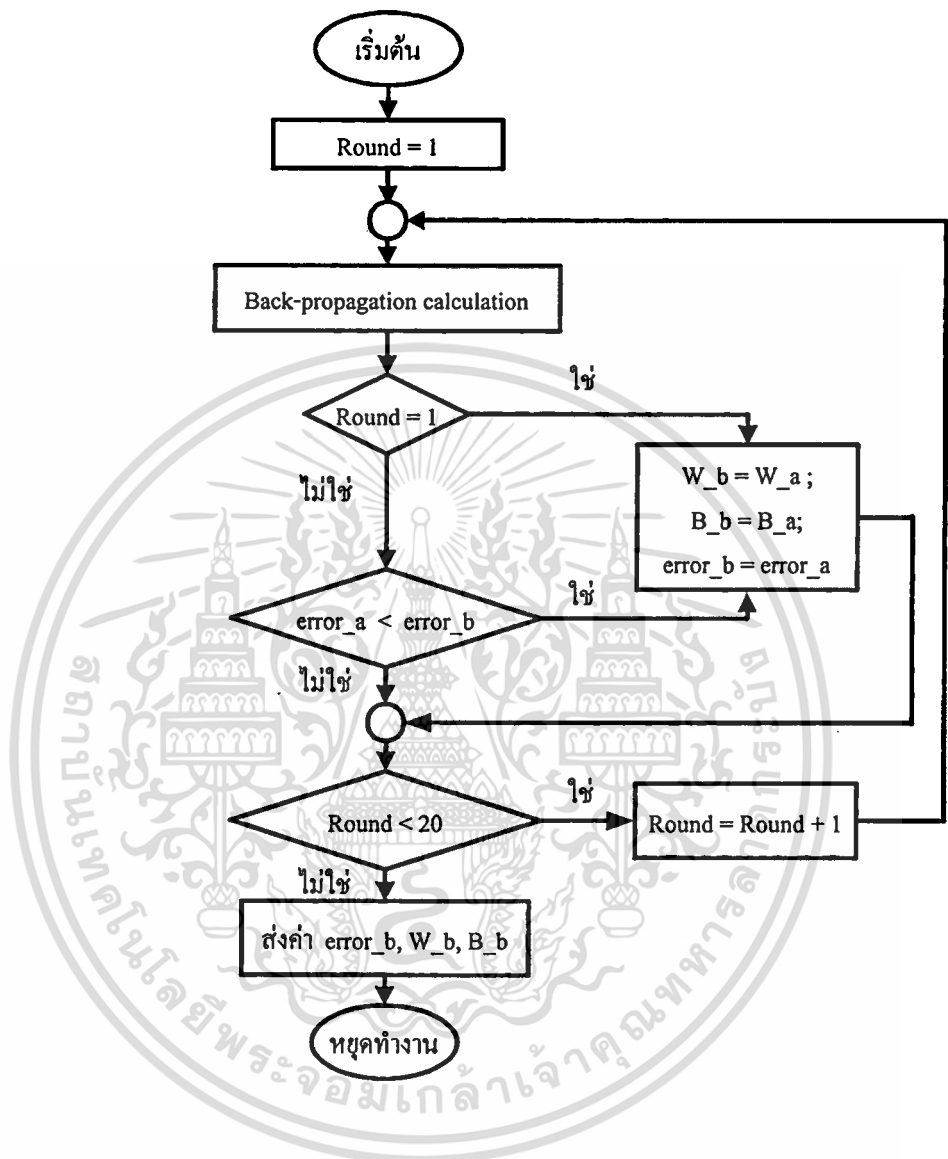
เมื่อทำการกำหนดเงื่อนไขต่างๆในการฝึกสอนตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.4 เรียบร้อยแล้วก็จะเริ่มทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 5.5 – 5.6 โดยรูปที่ 5.5 เป็นขั้นตอน Back-propagation calculation ซึ่งเป็นการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสและคำนวณหาค่าผิดพลาดของคำตอบของข้อมูลทดสอบเป็นจำนวน 1,000 epoch และเลือกเอาค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสที่ทำให้คำตอบของข้อมูลทดสอบมีค่าผิดพลาดน้อยที่สุดเก็บไว้เพื่อเปรียบเทียบกับรอบการฝึกสอนอื่นๆในขั้นตอน Best round selection (รูปที่ 5.6) ซึ่งจะทำซ้ำในขั้นตอน Back-propagation calculation จำนวน 20 รอบ และเลือกเอาค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสที่ทำให้คำตอบของข้อมูลทดสอบมีค่าผิดพลาดน้อยที่สุดของทุกรอบการฝึกสอนเก็บไว้เพื่อเปรียบเทียบกับ การฝึกสอนในโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบอื่นๆในขั้นตอน Best structure and best round selection (รูปที่ 5.7) ซึ่งจะทำการฝึกสอนในขั้นตอน Best round selection ซ้ำโดยเริ่มจากโครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 ตั้งแต่ 2 – 1 นิวรอน ไปจนถึง 15 – 14 นิวรอน ตามลำดับและเลือกเอาค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสที่ทำให้คำตอบของข้อมูลทดสอบมีค่าผิดพลาดน้อยที่สุดของทุกรอบการฝึกสอนและทุกโครงสร้างสำหรับการฝึกสอนในแต่ละเงื่อนไขเก็บไว้เพื่อนำไปใช้งาน

ในการฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อใช้ในการคำนวณค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system นั้นจะทำการฝึกสอนตามเงื่อนไขทั้งสิ้น 9 กรณี ซึ่งประกอบไปด้วยเงื่อนไขของจำนวนข้อมูลฝึกสอน 3 กรณี โดยแต่ละกรณีจะมีเงื่อนไขของความชันของฟังก์ชันถ่ายโอนอีก 3 กรณี ส่วนการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อใช้ในการคำนวณค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตของระบบไฟฟ้ากำลัง ของ EGAT นั้นเนื่องจากระบบของ EGAT เป็นระบบที่ใช้งานจริงและมีความซับซ้อนกว่าระบบ IEEE 50 generators test system การฝึกสอนตามเงื่อนไขของระบบ IEEE 50 generators test system ทั้ง 9 กรณีจึงไม่ได้ผลที่น่าพอใจ ดังนั้นจึงได้เพิ่มเงื่อนไขการฝึกสอนเป็น 45 กรณี โดยแยกกรณีฝึกสอนตามตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ 5 กรณี (F1 – F5) ซึ่งแต่ละกรณีจะซึ่งประกอบไปด้วยเงื่อนไขของจำนวนข้อมูลฝึกสอน 3 กรณีและเงื่อนไขของความชันของฟังก์ชันถ่ายโอนอีก 3 กรณี โดยผลการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังทั้งสองระบบจะนำเสนอในบทที่ 6



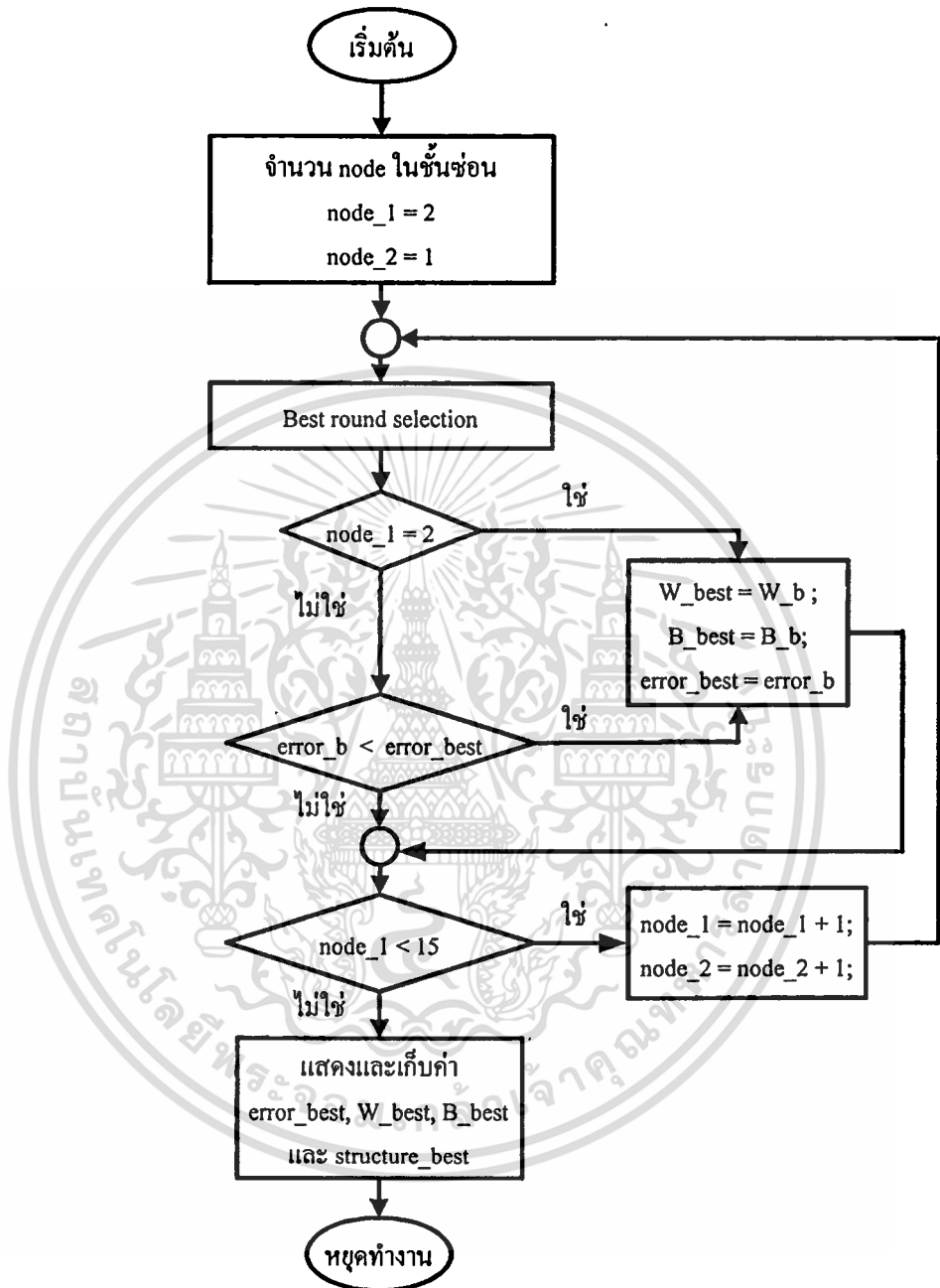
รูปที่ 5.5 โพลีชาร์ตของขั้นตอน Back-propagation calculation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 โพลีชาร์ตของขั้นตอน Best round selection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 โพลีชาร์ตของขั้นตอน Best structure and best round selection

บทที่ 6

ผลการทดลอง

บทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองซึ่งได้จากการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนด้วย Neural Network Toolbox ตามรูปแบบและวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 4 และ 5 โดยมีรายละเอียดดังนี้

6.1 รูปแบบการนำเสนอ

6.1.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งมี 2 ระบบดังนี้

6.1.1.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system

การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อใช้คำนวณหาค่า CCT ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหน่วยประมวลผลกลางเพนเทียมทู 350 MHz หน่วยความจำ 512 MB จากนั้นจึงนำโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอน (ชุดที่มีค่า mape ต่ำที่สุด) ในเงื่อนไขต่างๆ ทั้ง 9 เงื่อนไขมาทดสอบด้วยข้อมูลทดสอบชุดเดียวกัน โดยผลการทดสอบแสดงอยู่ในตารางที่ 6.1 – 6.13 และรูปที่ 6.1 – 6.4

6.1.1.2 ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อใช้คำนวณหาค่า CCT ของระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยบริเวณภาคกลางตะวันตกและภาคใต้ โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหน่วยประมวลผลกลางเพนเทียมทรี 733 MHz หน่วยความจำ 256 MB จากนั้นจึงนำโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอน (ชุดที่มีค่า mape ต่ำที่สุด) ในเงื่อนไขต่างๆ ทั้ง 45 เงื่อนไขมาทดสอบด้วยข้อมูลทดสอบชุดเดียวกัน โดยผลการทดสอบแสดงอยู่ในตารางที่ 6.14 – 6.26 และรูปที่ 6.5 – 6.8

6.1.2 รูปแบบการนำเสนอผลการทดลองของระบบไฟฟ้ากำลังแต่ละระบบ

การแสดงผลการทดลองของระบบไฟฟ้ากำลังแต่ละระบบจะนำเสนอแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยในส่วนแรกจะเปรียบเทียบค่า CCT แต่ละค่าที่คำนวณได้จากวิธีการทางเวลา กับค่า CCT แต่ละค่าที่เป็นคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนในแต่ละเงื่อนไข พร้อมกับกราฟเปรียบเทียบค่าผิดพลาดของคำตอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม ในส่วนที่สองจะแสดงเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนของแต่ละเงื่อนไข และส่วนที่สามจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพ และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมทุกเงื่อนไข

6.2 ผลการทดลองของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system

6.2.1 ผลการทดลองกรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 0.50

ตารางที่ 6.1 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 0.50 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 50 ชุด

ข้อมูลทดสอบชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)	ข้อมูลทดสอบชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)
1	0.001	0.00102	2.379	16	0.001	0.00104	4.208
2	0.112	0.11202	0.015	17	0.001	0.00100	0.098
3	0.001	0.00097	2.994	18	0.001	0.00098	2.463
4	0.090	0.09001	0.013	19	0.001	0.00100	0.156
5	0.013	0.01296	0.291	20	0.001	0.00099	0.914
6	0.001	0.00098	2.469	21	0.098	0.09945	1.480
7	0.001	0.00101	1.179	22	0.088	0.08515	3.241
8	0.106	0.10602	0.017	23	0.001	0.00099	1.373
9	0.001	0.00099	0.766	24	0.094	0.08945	4.846
10	0.001	0.00102	2.491	25	0.001	0.00096	3.517
11	0.001	0.00102	1.602	26	0.001	0.00100	0.246
12	0.001	0.00100	0.442	27	0.001	0.00100	0.228
13	0.110	0.11002	0.015	28	0.001	0.00099	0.990
14	0.047	0.04689	0.240	29	0.001	0.00105	4.690
15	0.001	0.00099	0.890	30	0.001	0.00105	5.311

ตารางที่ 6.2 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 0.50 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 100 ชุด

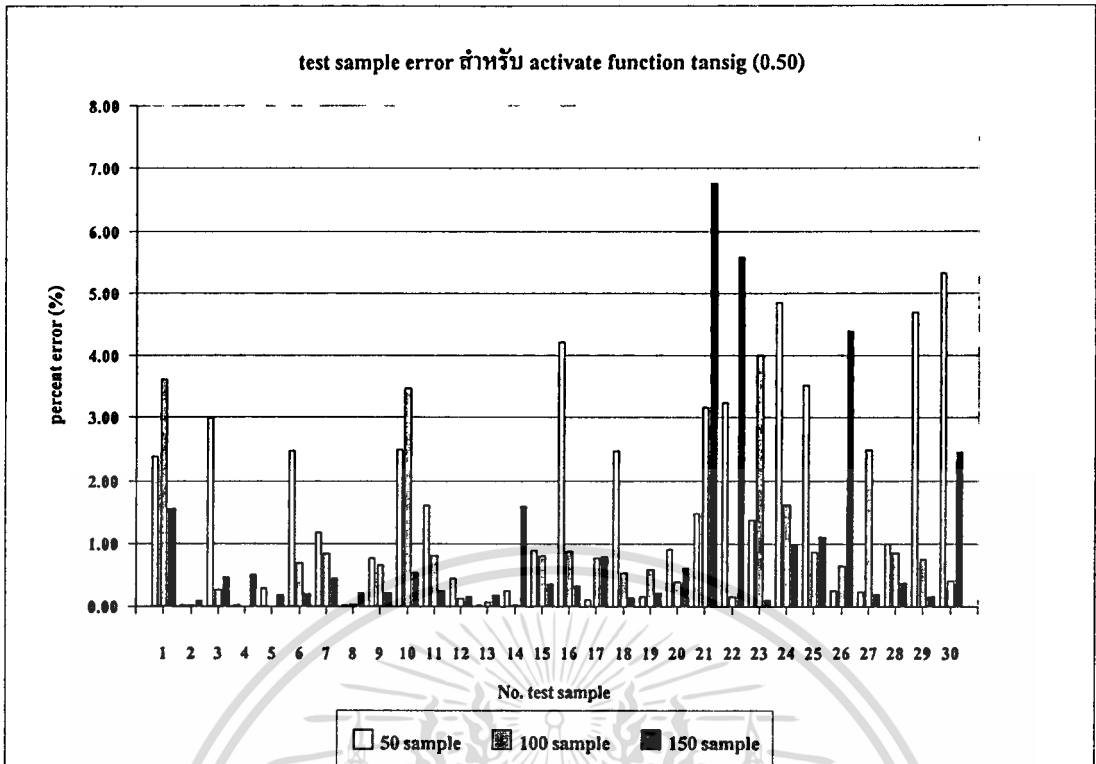
ข้อมูลทดสอบชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)	ข้อมูลทดสอบชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)
1	0.001	0.00104	3.611	16	0.001	0.00099	0.880
2	0.112	0.11202	0.019	17	0.001	0.00099	0.761
3	0.001	0.00100	0.268	18	0.001	0.00101	0.541
4	0.090	0.09001	0.007	19	0.001	0.00099	0.579
5	0.013	0.01300	0.004	20	0.001	0.00100	0.398
6	0.001	0.00099	0.690	21	0.098	0.10110	3.161
7	0.001	0.00099	0.840	22	0.088	0.08786	0.160
8	0.106	0.10596	0.034	23	0.001	0.00104	4.008
9	0.001	0.00099	0.663	24	0.094	0.09249	1.610
10	0.001	0.00103	3.475	25	0.001	0.00099	0.862
11	0.001	0.00099	0.806	26	0.001	0.00099	0.646
12	0.001	0.00100	0.128	27	0.001	0.00102	2.487
13	0.110	0.11007	0.065	28	0.001	0.00099	0.861
14	0.047	0.04700	0.010	29	0.001	0.00099	0.753
15	0.001	0.00099	0.798	30	0.001	0.00100	0.404

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี
ความชัน (k) เท่ากับ 0.50 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด

ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)	ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)
1	0.001	0.00098	1.554	16	0.001	0.00100	0.314
2	0.112	0.11191	0.085	17	0.001	0.00099	0.775
3	0.001	0.00100	0.455	18	0.001	0.00100	0.136
4	0.090	0.09045	0.496	19	0.001	0.00100	0.221
5	0.013	0.01298	0.182	20	0.001	0.00099	0.608
6	0.001	0.00100	0.190	21	0.098	0.10462	6.756
7	0.001	0.00100	0.438	22	0.088	0.09292	5.589
8	0.106	0.10623	0.213	23	0.001	0.00100	0.108
9	0.001	0.00100	0.209	24	0.094	0.09494	0.995
10	0.001	0.00099	0.541	25	0.001	0.00101	1.102
11	0.001	0.00100	0.240	26	0.001	0.00096	4.396
12	0.001	0.00100	0.158	27	0.001	0.00100	0.194
13	0.110	0.11020	0.178	28	0.001	0.00100	0.378
14	0.047	0.04626	1.575	29	0.001	0.00100	0.162
15	0.001	0.00100	0.354	30	0.001	0.00102	2.460

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.1 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสำหรับข้อมูลทดสอบแต่ละชุด กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 0.50

ตารางที่ 6.4 เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 0.50

จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน	เวลาที่ใช้ฝึกสอน (นาที)	จำนวนนิรอนในชั้นซ่อนที่ 1 - 2
50	17.56	3 - 2
100	20.60	4 - 3
150	51.20	7 - 6

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.1 ถึง 6.4 และรูปที่ 6.1 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

- การคำนวณค่า CCT

1. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 50 ชุด สามารถคำนวณค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 1.652 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.013 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 5.311 % (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 30)
2. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 100 ชุด สามารถคำนวณค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 0.984 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.004 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 4.008 % (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 23)
3. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด สามารถคำนวณค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 1.035 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.085 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 6.756 % (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 21)

ค่าผิดพลาดของคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียมที่ฝึกสอนด้วยข้อมูลฝึกสอนทั้ง 3 ชุด จะมีค่าค่อนข้างสูงในช่วงข้อมูลชุดที่ 21 ถึง 30 โดยโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 100 ชุดเป็นโครงข่ายที่มีค่า mape ต่ำที่สุด

- เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยที่สุดคือ โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ข้อมูลฝึกสอน 50 ชุด ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เท่ากับ 3 และ 2 นิวรอนตามลำดับ โดยใช้เวลาฝึกสอน 17.56 นาที และโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เวลาในการฝึกสอนมากที่สุดคือ โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เท่ากับ 7 และ 6 นิวรอนตามลำดับ โดยใช้เวลาฝึกสอนถึง 51.20 นาที

สำหรับการฝึกสอนในเงื่อนไขนี้เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนแปรตามจำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอนและจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน กล่าวคือ เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะมากขึ้นตาม จำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอนที่เพิ่มขึ้น และโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใหญ่ขึ้น (จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนมีจำนวนมากขึ้น)

6.2.2 ผลการทดลองกรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.00

ตารางที่ 6.5 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.00 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 50 ชุด

ข้อมูลทดสอบชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)	ข้อมูลทดสอบชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)
1	0.001	0.00103	3.056	16	0.001	0.00095	5.036
2	0.112	0.11200	0.004	17	0.001	0.00099	0.876
3	0.001	0.00102	2.256	18	0.001	0.00103	3.110
4	0.090	0.09000	0.004	19	0.001	0.00108	8.024
5	0.013	0.01300	0.018	20	0.001	0.00100	0.332
6	0.001	0.00098	1.992	21	0.098	0.10857	10.788
7	0.001	0.00104	3.838	22	0.088	0.09212	4.683
8	0.106	0.10600	0.003	23	0.001	0.00100	0.242
9	0.001	0.00098	2.201	24	0.094	0.09421	0.225
10	0.001	0.00104	3.929	25	0.001	0.00105	4.886
11	0.001	0.00100	0.416	26	0.001	0.00100	0.409
12	0.001	0.00099	0.676	27	0.001	0.00099	0.755
13	0.110	0.11000	0.004	28	0.001	0.00104	3.623
14	0.047	0.04700	0.009	29	0.001	0.00094	6.366
15	0.001	0.00099	0.692	30	0.001	0.00099	1.451

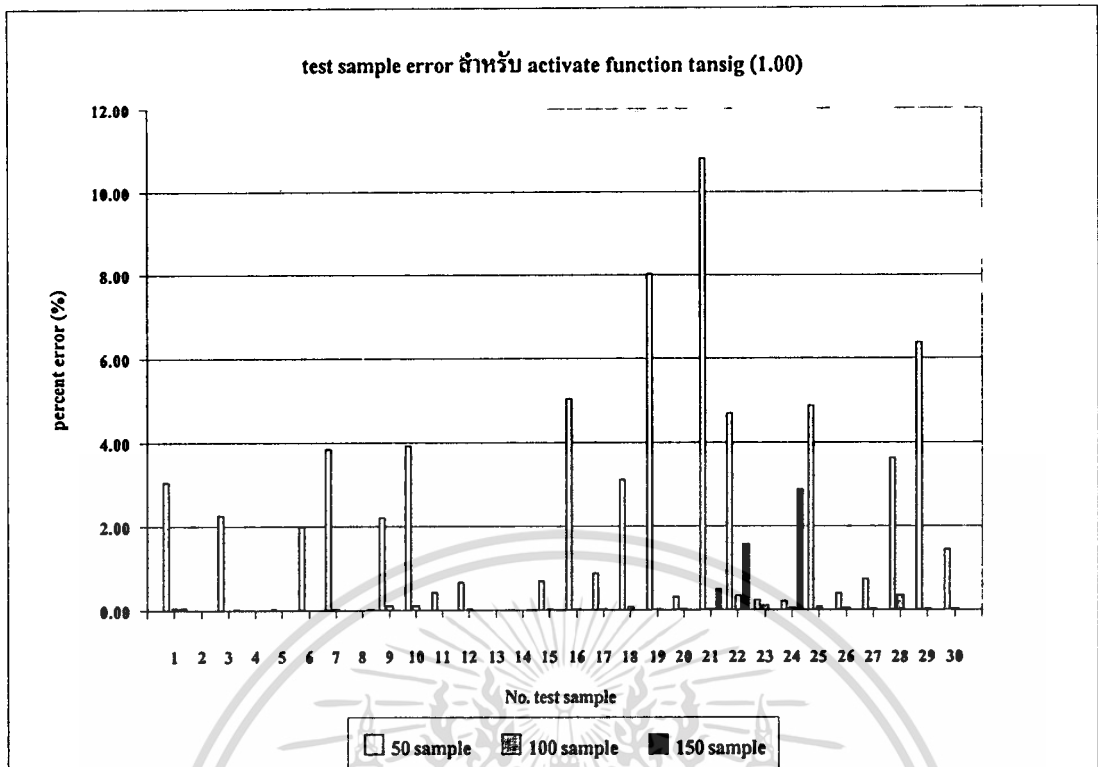
ตารางที่ 6.6 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี
ความชัน (k) เท่ากับ 1.00 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 100 ชุด

ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)	ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)
1	0.001	0.00100	0.055	16	0.001	0.00100	0.017
2	0.112	0.11200	0.000	17	0.001	0.00100	0.020
3	0.001	0.00100	0.003	18	0.001	0.00100	0.078
4	0.090	0.09000	0.000	19	0.001	0.00100	0.040
5	0.013	0.01300	0.000	20	0.001	0.00100	0.015
6	0.001	0.00100	0.000	21	0.098	0.09798	0.022
7	0.001	0.00100	0.020	22	0.088	0.08831	0.347
8	0.106	0.10600	0.000	23	0.001	0.00100	0.115
9	0.001	0.00100	0.097	24	0.094	0.09404	0.043
10	0.001	0.00100	0.095	25	0.001	0.00100	0.087
11	0.001	0.00100	0.001	26	0.001	0.00100	0.060
12	0.001	0.00100	0.040	27	0.001	0.00100	0.034
13	0.110	0.11000	0.000	28	0.001	0.00100	0.349
14	0.047	0.04700	0.000	29	0.001	0.00100	0.032
15	0.001	0.00100	0.035	30	0.001	0.00100	0.017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.7 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี
ความชัน (k) เท่ากับ 1.00 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด

ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)	ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)
1	0.001	0.00100	0.055	16	0.001	0.00100	0.001
2	0.112	0.11200	0.001	17	0.001	0.00100	0.001
3	0.001	0.00100	0.023	18	0.001	0.00100	0.010
4	0.090	0.09000	0.001	19	0.001	0.00100	0.001
5	0.013	0.01300	0.010	20	0.001	0.00100	0.008
6	0.001	0.00100	0.001	21	0.098	0.09750	0.508
7	0.001	0.00100	0.001	22	0.088	0.08939	1.580
8	0.106	0.10603	0.028	23	0.001	0.00100	0.001
9	0.001	0.00100	0.001	24	0.094	0.09128	2.893
10	0.001	0.00100	0.001	25	0.001	0.00100	0.001
11	0.001	0.00100	0.001	26	0.001	0.00100	0.001
12	0.001	0.00100	0.001	27	0.001	0.00100	0.001
13	0.110	0.10999	0.011	28	0.001	0.00100	0.001
14	0.047	0.04700	0.003	29	0.001	0.00100	0.001
15	0.001	0.00100	0.001	30	0.001	0.00100	0.001



รูปที่ 6.2 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสำหรับข้อมูลทดสอบแต่ละชุด กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.00

ตารางที่ 6.8 เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.00

จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน	เวลาที่ใช้ ฝึกสอน (นาที)	จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 - 2
50	26.80	4-3
100	26.55	4-3
150	23.64	4-3

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.5 ถึง 6.8 และรูปที่ 6.2 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

- การคำนวณค่า CCT

1. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 50 ชุด สามารถคำนวณค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 2.330 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.003 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 10.778 % (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 21)
2. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 100 ชุด สามารถคำนวณค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 0.054 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.000 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 0.349 % (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 28)
3. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด สามารถคำนวณค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 0.171 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.001 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 2.893 % (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 24)

ค่าผิดพลาดของคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียมที่ฝึกสอนด้วยข้อมูลฝึกสอนทั้ง 3 ชุด จะมีค่าค่อนข้างสูงในช่วงข้อมูลชุดที่ 21 ถึง 30 โดยโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 100 ชุดเป็นโครงข่ายที่มีค่า mape ต่ำที่สุด

- เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยที่สุดคือ โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เท่ากับ 4 และ 3 นิวรอนตามลำดับ โดยใช้เวลาฝึกสอน 23.64 นาที และโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เวลาในการฝึกสอนมากที่สุดคือ โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ข้อมูลฝึกสอน 50 ชุด ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เท่ากับ 4 และ 3 นิวรอนตามลำดับ โดยใช้เวลาฝึกสอน 26.80 นาที

สำหรับการฝึกสอนในเงื่อนไขนี้เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนจะไม่แปรตามจำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอน ทั้งนี้เนื่องจากการฝึกสอนบางรอบมีการสิ้นสุดการฝึกสอนก่อนถึงกำหนด (การฝึกสอนสิ้นสุดก่อนที่จะมีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส ครบ 1,000 ครั้ง) ซึ่งเป็นเงื่อนไขของ Neural Network Toolbox (หัวข้อที่ 5.4.8)

6.2.3 ผลการทดลองกรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.50

ตารางที่ 6.9 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.50 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 50 ชุด

ข้อมูลทดสอบชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)	ข้อมูลทดสอบชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)
1	0.001	0.00126	25.652	16	0.001	0.00097	3.174
2	0.112	0.11199	0.008	17	0.001	0.00103	2.910
3	0.001	0.00107	6.565	18	0.001	0.00117	17.015
4	0.090	0.09000	0.004	19	0.001	0.00094	6.119
5	0.013	0.01299	0.061	20	0.001	0.00094	6.490
6	0.001	0.00076	24.382	21	0.098	0.09536	2.698
7	0.001	0.00103	2.673	22	0.088	0.08130	7.616
8	0.106	0.10600	0.003	23	0.001	0.00094	5.840
9	0.001	0.00103	2.970	24	0.094	0.11598	23.383
10	0.001	0.00104	4.455	25	0.001	0.00094	6.189
11	0.001	0.00100	0.302	26	0.001	0.00103	3.376
12	0.001	0.00101	1.170	27	0.001	0.00101	1.243
13	0.110	0.11000	0.004	28	0.001	0.00099	1.032
14	0.047	0.04699	0.015	29	0.001	0.00094	6.123
15	0.001	0.00094	5.684	30	0.001	0.00094	6.085

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.10 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี
ความชัน (k) เท่ากับ 1.50 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 100 ชุด

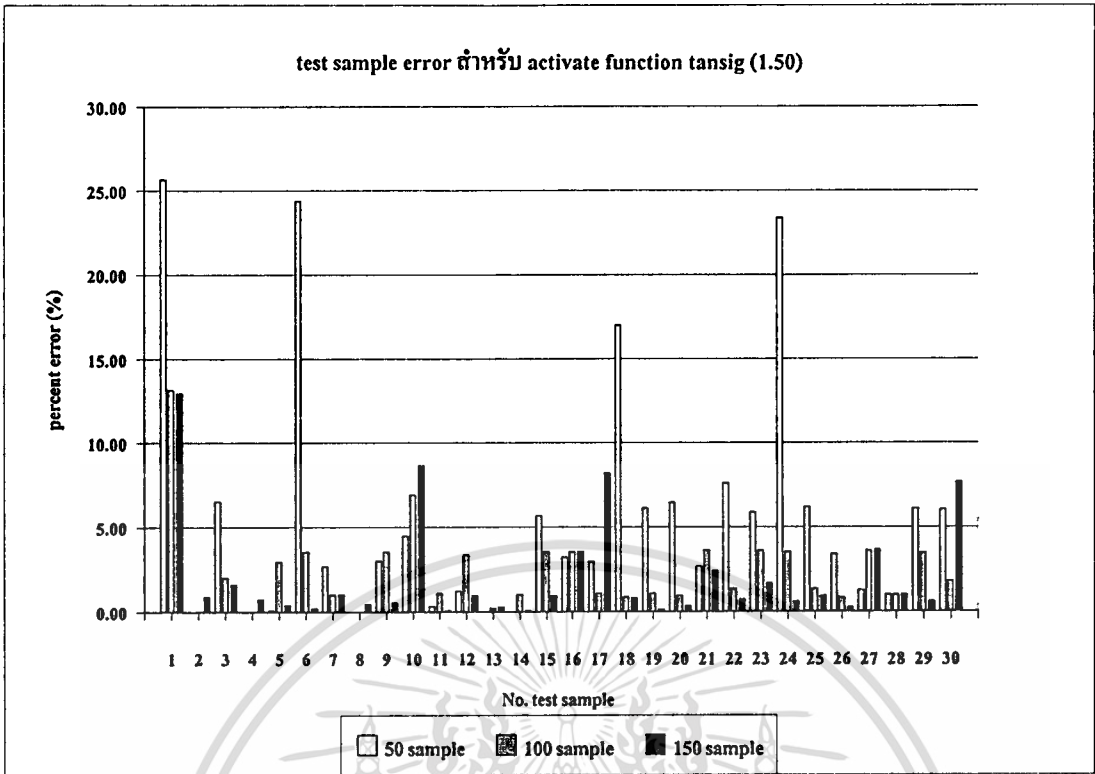
ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)	ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)
1	0.001	0.00113	13.107	16	0.001	0.00096	3.562
2	0.112	0.11199	0.010	17	0.001	0.00099	1.084
3	0.001	0.00102	1.972	18	0.001	0.00101	0.866
4	0.090	0.09002	0.026	19	0.001	0.00099	1.065
5	0.013	0.01262	2.914	20	0.001	0.00099	0.925
6	0.001	0.00096	3.531	21	0.098	0.10152	3.590
7	0.001	0.00099	1.028	22	0.088	0.08917	1.333
8	0.106	0.10602	0.019	23	0.001	0.00096	3.572
9	0.001	0.00096	3.524	24	0.094	0.09066	3.558
10	0.001	0.00107	6.917	25	0.001	0.00099	1.356
11	0.001	0.00099	1.067	26	0.001	0.00099	0.819
12	0.001	0.00097	3.346	27	0.001	0.00096	3.591
13	0.110	0.11022	0.196	28	0.001	0.00099	1.011
14	0.047	0.04652	1.017	29	0.001	0.00097	3.477
15	0.001	0.00096	3.543	30	0.001	0.00102	1.782

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.11 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี
ความชัน (k) เท่ากับ 1.50 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด

ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)	ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)
1	0.001	0.00113	12.913	16	0.001	0.00096	3.549
2	0.112	0.11295	0.845	17	0.001	0.00092	8.188
3	0.001	0.00102	1.609	18	0.001	0.00101	0.794
4	0.090	0.09067	0.739	19	0.001	0.00100	0.123
5	0.013	0.01295	0.382	20	0.001	0.00100	0.323
6	0.001	0.00100	0.191	21	0.098	0.10038	2.430
7	0.001	0.00101	1.014	22	0.088	0.08735	0.738
8	0.106	0.10552	0.454	23	0.001	0.00098	1.650
9	0.001	0.00099	0.564	24	0.094	0.09344	0.595
10	0.001	0.00109	8.670	25	0.001	0.00101	0.931
11	0.001	0.00100	0.045	26	0.001	0.00100	0.241
12	0.001	0.00099	0.947	27	0.001	0.00096	3.653
13	0.110	0.11031	0.279	28	0.001	0.00101	1.023
14	0.047	0.04697	0.054	29	0.001	0.00099	0.573
15	0.001	0.00099	0.927	30	0.001	0.00108	7.681

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสำหรับข้อมูลทดสอบแต่ละชุด กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.50

ตารางที่ 6.12 เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.50

จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน	เวลาที่ใช้ฝึกสอน (นาท)	จำนวนนิรอนในชั้นซ่อนที่ 1 - 2
50	21.57	3 - 2
100	19.15	3 - 2
150	23.88	4 - 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.9 ถึง 6.12 และรูปที่ 6.3 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

- การคำนวณค่า CCT

1. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 50 ชุด สามารถคำนวณค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 5.775 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.003 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 25.652 % (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 1)
2. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 100 ชุด สามารถคำนวณค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 2.460 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.010 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 13.107 % (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 1)
3. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด สามารถคำนวณค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 2.071 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.045 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 12.9133 % (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 1)

ค่าผิดพลาดของคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียมที่ฝึกสอนด้วยข้อมูลฝึกสอนทั้ง 3 ชุด จะมีค่าสูงที่สุดที่ข้อมูลทดสอบชุดเดียวกันคือชุดที่ 1 โดยโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 150 ชุดเป็นโครงข่ายที่มีค่า mape ต่ำที่สุด

- เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

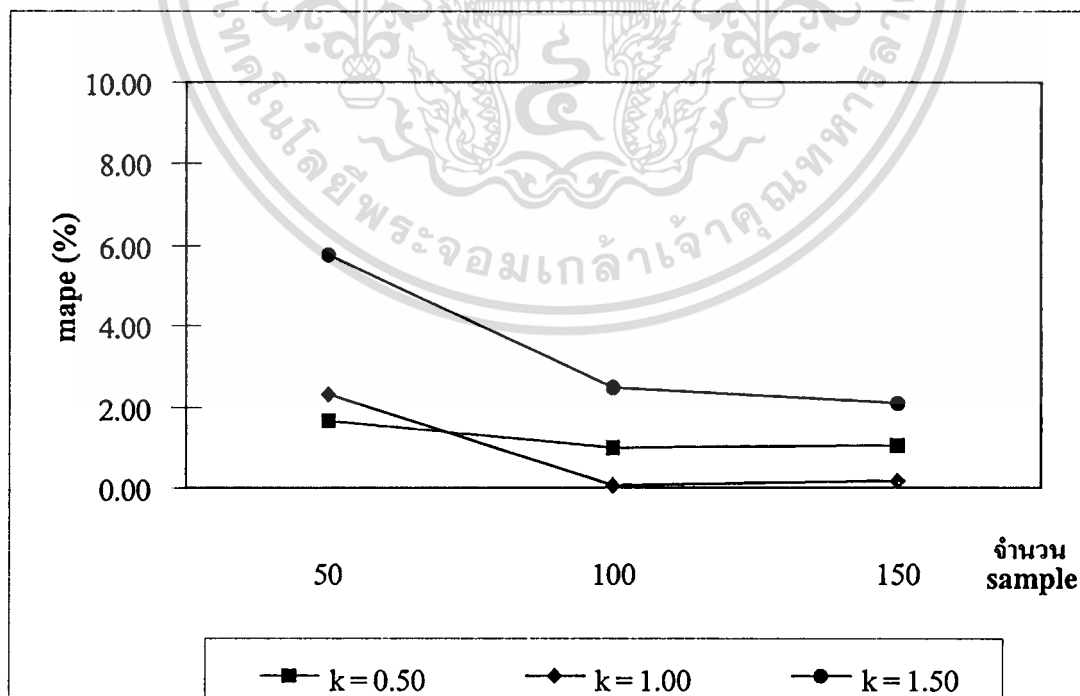
โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยที่สุดคือ โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ข้อมูลฝึกสอน 100 ชุด ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เท่ากับ 3 และ 2 นิวรอนตามลำดับ โดยใช้เวลาฝึกสอน 23.64 นาที และโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เวลาในการฝึกสอนมากที่สุดคือ โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ข้อมูลฝึกสอน 50 ชุด ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เท่ากับ 7 และ 6 นิวรอนตามลำดับ โดยใช้เวลาฝึกสอน 26.80 นาที

สำหรับการฝึกสอนในเงื่อนไขนี้เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนจะไม่แปรตามจำนวนของชุดข้อมูลฝึกสอน ทั้งนี้เนื่องจากการฝึกสอนบางรอบมีการสิ้นสุดการฝึกสอนก่อนถึงกำหนด (การฝึกสอนสิ้นสุดก่อนที่จะมีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส ครบ 1,000 ครั้ง) ซึ่งเป็นเงื่อนไขของ Neural Network Toolbox (หัวข้อที่ 5.4.8)

6.2.4 เปรียบเทียบผลการทดลองทุกกรณี

ตารางที่ 6.13 ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วในเงื่อนไขต่างๆ

k	จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน	เวลาที่ใช้ฝึกสอน (นาที)	จำนวนนิรอนในชั้นซ่อนที่ 1-2	ผลทดสอบของชุดข้อมูลทดสอบ			ผลทดสอบของชุดข้อมูลฝึกสอน		
				mape (%)	max error (%)	min error (%)	mape (%)	max error (%)	min error (%)
0.50	50	17.56	3-2	1.652	5.311	0.013	0.965	4.208	0.002
	100	20.60	4-3	0.984	4.008	0.004	0.737	7.287	0.001
	150	51.20	7-6	1.035	6.756	0.085	0.411	6.487	0.000
1.00	50	26.80	4-3	2.330	10.788	0.003	2.105	10.829	0.000
	100	26.55	4-3	0.054	0.349	0.000	0.037	0.282	0.000
	150	23.64	4-3	0.171	2.893	0.001	0.009	0.147	0.000
1.50	50	21.57	3-2	5.775	25.652	0.003	4.427	25.652	0.000
	100	19.15	3-2	2.460	13.107	0.010	3.033	24.038	0.010
	150	23.88	4-3	2.071	12.913	0.045	3.559	18.952	0.008



รูปที่ 6.4 การเปรียบเทียบค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ในทุกกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.13 และรูปที่ 6.4 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

- การคำนวณค่า CCT

โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.00 โดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 100 ชุด สามารถคำนวณค่า CCT โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) น้อยที่สุดเท่ากับ 0.054 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.000 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 0.349 %

- เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

สำหรับการฝึกสอนในทุกเงื่อนไขเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนส่วนมากจะไม่แปรตามจำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอน แต่จะแปรตามจำนวนนิเวรอนในชั้นซ่อน ทั้งนี้เนื่องจากการฝึกสอนบางรอบมีการสิ้นสุดการฝึกสอนก่อนถึงกำหนด (การฝึกสอนสิ้นสุดก่อนที่จะมีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส ครบ 1,000 ครั้ง) ซึ่งเป็นเงื่อนไขของ Neural Network Toolbox (หัวข้อที่ 5.4.8)



6.3 ผลการทดลองของระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

6.3.1 ผลการทดลองกรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 0.50

ตารางที่ 6.14 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี

ความชัน (k) เท่ากับ 0.50 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด

พอลต์	ข้อมูลทดสอบชุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
		ตำแหน่ง	$CCT_{TDM}(sec)$	0.082	0.097	0.115	0.109	0.001	0.094	0.105	0.091	0.119
"F1"	$CCT_{ANN}(sec)$	0.09241	0.09251	0.12332	0.11320	0.00097	0.09264	0.10789	0.09284	0.12732	0.12736	
	% error	12.7010	4.6256	7.2379	3.8552	2.9519	1.4451	2.7507	2.0247	6.9918	8.3769	
	พอลต์	ข้อมูลทดสอบชุดที่	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ตำแหน่ง	$CCT_{TDM}(sec)$	0.059	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.05900	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	
	% error	0.0011	0.0001	0.0002	0.0001	0.0002	0.0002	0.0001	0.0002	0.0000	0.0000	
พอลต์	ข้อมูลทดสอบชุดที่	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
	ตำแหน่ง	$CCT_{TDM}(sec)$	0.153	0.001	0.294	0.274	0.277	0.273	0.265	0.265	0.258	0.270
		$CCT_{ANN}(sec)$	0.16893	0.00097	0.26545	0.27863	0.27902	0.26545	0.26820	0.26545	0.25856	0.26544
% error		10.4148	3.4022	9.7117	1.6914	0.7295	2.7646	1.2072	0.1689	0.2186	1.6876	
พอลต์	ข้อมูลทดสอบชุดที่	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
	ตำแหน่ง	$CCT_{TDM}(sec)$	0.197	0.270	0.290	0.263	0.166	0.155	0.188	0.193	0.177	0.276
		$CCT_{ANN}(sec)$	0.16835	0.29921	0.29921	0.19610	0.15634	0.15653	0.19009	0.19621	0.17479	0.26608
% error		14.5424	10.8197	3.1769	25.4391	5.8178	0.9848	1.1122	1.6612	1.2494	3.5926	
พอลต์	ข้อมูลทดสอบชุดที่	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	
	ตำแหน่ง	$CCT_{TDM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.060	0.001	0.001	0.001	0.001	0.046	0.001
		$CCT_{ANN}(sec)$	0.00100	0.00100	0.00100	0.06250	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.03948	0.00100
% error		0.0000	0.0000	0.0002	4.1648	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	14.1668	0.0000

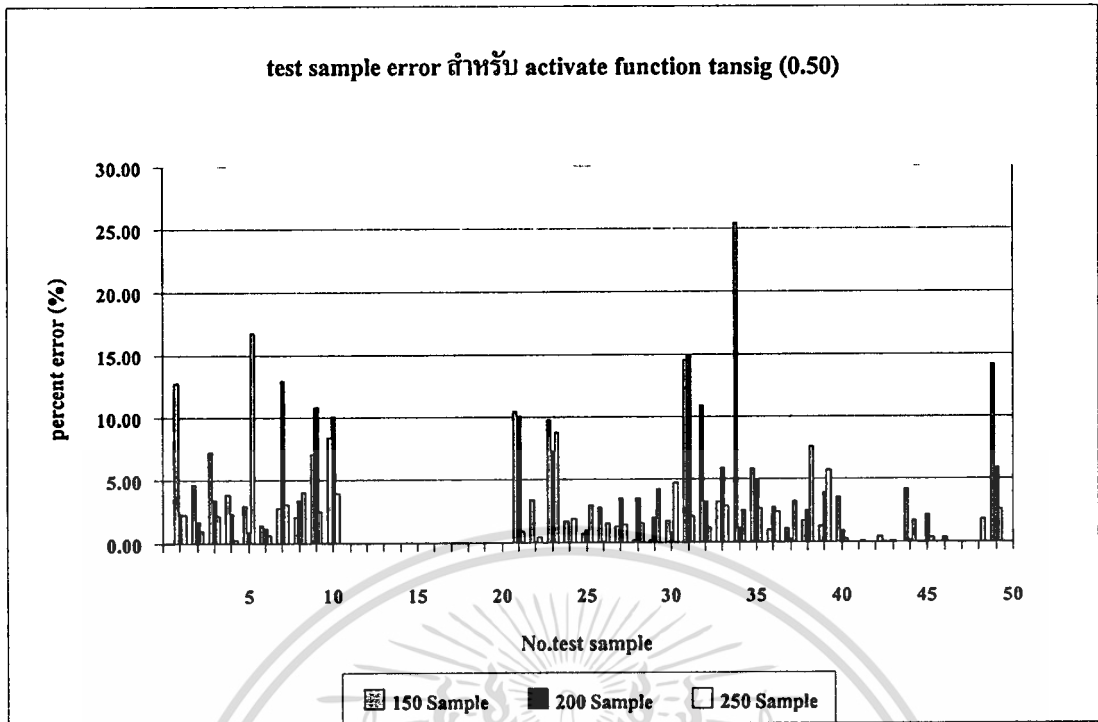
ตารางที่ 6.15 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี
ความชัน (k) เท่ากับ 0.50 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 200 ชุด

พอลต์ ตำแหน่ง "F1"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.082	0.097	0.115	0.109	0.001	0.094	0.105	0.091	0.119	0.139
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.08393	0.09864	0.11113	0.11147	0.00101	0.09510	0.09149	0.08791	0.10618	0.12496
	% error	2.3565	1.6878	3.3675	2.2705	0.8588	1.1735	12.8663	3.3933	10.7706	10.1023
พอลต์ ตำแหน่ง "F2"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.059	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.05901	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100
	% error	0.0090	0.0000	0.0000	0.0002	0.0003	0.0003	0.0001	0.0000	0.0004	0.0000
พอลต์ ตำแหน่ง "F3"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.153	0.001	0.294	0.274	0.277	0.273	0.265	0.265	0.258	0.270
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.16843	0.00100	0.27267	0.27427	0.27427	0.27324	0.27427	0.27427	0.25299	0.27218
	% error	10.0871	0.0499	7.2566	0.0978	0.9863	0.0880	3.4974	3.4974	1.9431	0.8063
พอลต์ ตำแหน่ง "F4"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.197	0.270	0.290	0.263	0.166	0.155	0.188	0.193	0.177	0.276
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.16765	0.27868	0.27308	0.25998	0.17412	0.15076	0.18857	0.19786	0.17003	0.27858
	% error	14.9001	3.2149	5.8355	1.1493	4.8938	2.7333	0.3018	2.5155	3.9404	0.9330
พอลต์ ตำแหน่ง "F5"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.060	0.001	0.001	0.001	0.001	0.046	0.001
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.00100	0.00100	0.00100	0.06010	0.00102	0.00100	0.00100	0.00100	0.04871	0.00100
	% error	0.0031	0.0024	0.0961	0.1730	2.1561	0.3762	0.0018	0.0123	5.9009	0.0047

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.16 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี
ความชัน (k) เท่ากับ 0.50 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด

พอลต์ ตำแหน่ง "F1"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.082	0.097	0.115	0.109	0.001	0.094	0.105	0.091	0.119	0.139
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.08383	0.09791	0.11742	0.10867	0.00083	0.09456	0.10815	0.08736	0.11604	0.14443
	% error	2.2341	0.9422	2.1025	0.3047	16.7071	0.5977	3.0039	4.0044	2.4876	3.9054
พอลต์ ตำแหน่ง "F2"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.059	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.05900	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100
	% error	0.0048	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002
พอลต์ ตำแหน่ง "F3"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.153	0.001	0.294	0.274	0.277	0.273	0.265	0.265	0.258	0.270
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.15441	0.00100	0.26847	0.26890	0.26890	0.26890	0.26866	0.26890	0.26890	0.25726
	% error	0.9238	0.4260	8.6835	1.8613	2.9242	1.5019	1.3814	1.4717	4.2248	4.7195
พอลต์ ตำแหน่ง "F4"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.197	0.270	0.290	0.263	0.166	0.155	0.188	0.193	0.177	0.276
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.20096	0.27312	0.28166	0.25653	0.17043	0.15122	0.18190	0.20765	0.18702	0.27536
	% error	2.0099	1.1541	2.8776	2.4604	2.6706	2.4394	3.2462	7.5915	5.6591	0.2309
พอลต์ ตำแหน่ง "F5"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.060	0.001	0.001	0.001	0.001	0.046	0.001
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.00100	0.00100	0.00100	0.06101	0.00100	0.00100	0.00100	0.00102	0.04719	0.00100
	% error	0.0601	0.4371	0.0377	1.6893	0.3863	0.0181	0.0432	1.7903	2.5880	0.0223



รูปที่ 6.5 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสำหรับข้อมูลทดสอบแต่ละชุด กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 0.50

ตารางที่ 6.17 เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 0.50

ข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด			ข้อมูลฝึกสอน 200 ชุด			ข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด		
ตำแหน่ง เกิดฟอลต์	เวลาที่ใช้ ฝึกสอน (นาทีก)	จำนวน นิวรอน ในชั้นซ่อน ที่ 1-2	ตำแหน่ง เกิดฟอลต์	เวลาที่ใช้ ฝึกสอน (นาทีก)	จำนวน นิวรอน ในชั้นซ่อน ที่ 1-2	ตำแหน่ง เกิดฟอลต์	เวลาที่ใช้ ฝึกสอน (นาทีก)	จำนวน นิวรอน ในชั้นซ่อน ที่ 1-2
F1	9.59	3-2	F1	12.99	3-2	F1	11.09	4-3
F2	10.00	2-1	F2	9.86	2-1	F2	10.96	3-2
F3	9.50	3-2	F3	9.53	3-2	F3	10.74	3-2
F4	9.92	3-2	F4	10.05	3-2	F4	13.79	4-3
F5	10.03	2-1	F5	10.82	4-3	F5	10.13	3-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.14 ถึง 6.17 และรูปที่ 6.5 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

- การคำนวณค่า CCT

1. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด สามารถคำนวณค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 3.4338 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.0000 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 25.4391 % (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 34)
2. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 200 ชุด สามารถคำนวณค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 2.5262 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.0000 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 14.9001 % (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 31)
3. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด สามารถคำนวณค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 2.0365 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.000 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 16.7071 % (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 5)

ค่าผิดพลาดของคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียมที่ฝึกสอนด้วยข้อมูลฝึกสอน 150 และ 200 ชุด จะมีค่าค่อนข้างสูงในช่วงข้อมูลชุดที่ 31 และ 34 โดยโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 250 ชุดเป็นโครงข่ายที่ให้ค่า mape ต่ำที่สุดและมีค่าผิดพลาดสูงกว่า 5% เพียง 4 ชุดเท่านั้น

- เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยที่สุดคือ โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด โดยใช้เวลาฝึกสอน 49.04 นาที และโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เวลาในการฝึกสอนมากที่สุดคือ โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด โดยใช้เวลาฝึกสอนถึง 51.20 นาที

สำหรับการฝึกสอนในเงื่อนไขนี้เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนจะแปรตามจำนวนข้อมูลฝึกสอนและจำนวนของนิเวรอนในชั้นซ่อน กล่าวคือ เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะมากขึ้นตาม จำนวนข้อมูลฝึกสอนที่เพิ่มขึ้น และโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใหญ่ขึ้น (จำนวนนิเวรอนในชั้นซ่อนมีจำนวนมากขึ้น)

6.3.2 ผลการทดลองกรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.00

ตารางที่ 6.18 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.00 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด

พอลต์ ตำแหน่ง "F1"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.082	0.097	0.115	0.109	0.001	0.094	0.105	0.091	0.119	0.139
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.08935	0.09507	0.11341	0.11341	0.00099	0.08937	0.11341	0.08983	0.11341	0.11341
	% error	8.9690	1.9916	1.3869	4.0413	1.4134	4.9255	8.0048	1.2832	4.7016	18.4136
พอลต์ ตำแหน่ง "F2"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.059	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.06000	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100
	% error	1.6949	0.0001	0.0008	0.0001	0.0013	0.0373	0.0001	0.0000	0.0011	0.0001
พอลต์ ตำแหน่ง "F3"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.153	0.001	0.294	0.274	0.277	0.273	0.265	0.265	0.258	0.270
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.16780	0.00110	0.27001	0.27038	0.26702	0.27047	0.26311	0.27001	0.27047	0.26807
	% error	9.6733	10.0745	8.1603	1.3195	3.6020	0.9283	0.7141	1.8901	4.8317	0.7151
พอลต์ ตำแหน่ง "F4"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.197	0.270	0.290	0.263	0.166	0.155	0.188	0.193	0.177	0.276
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.21127	0.26579	0.27327	0.20854	0.18771	0.17783	0.18119	0.19191	0.18072	0.26739
	% error	7.2445	1.5606	5.7690	20.7055	13.0757	14.7298	3.6203	0.5660	2.1025	3.1179
พอลต์ ตำแหน่ง "F5"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.060	0.001	0.001	0.001	0.001	0.046	0.001
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.00100	0.00100	0.00100	0.06340	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.05363	0.00100
	% error	0.0111	0.2059	0.1910	5.6602	0.0362	0.0054	0.0695	0.0173	16.5931	0.2137

ตารางที่ 6.19 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี
ความชัน (k) เท่ากับ 1.00 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 200 ชุด

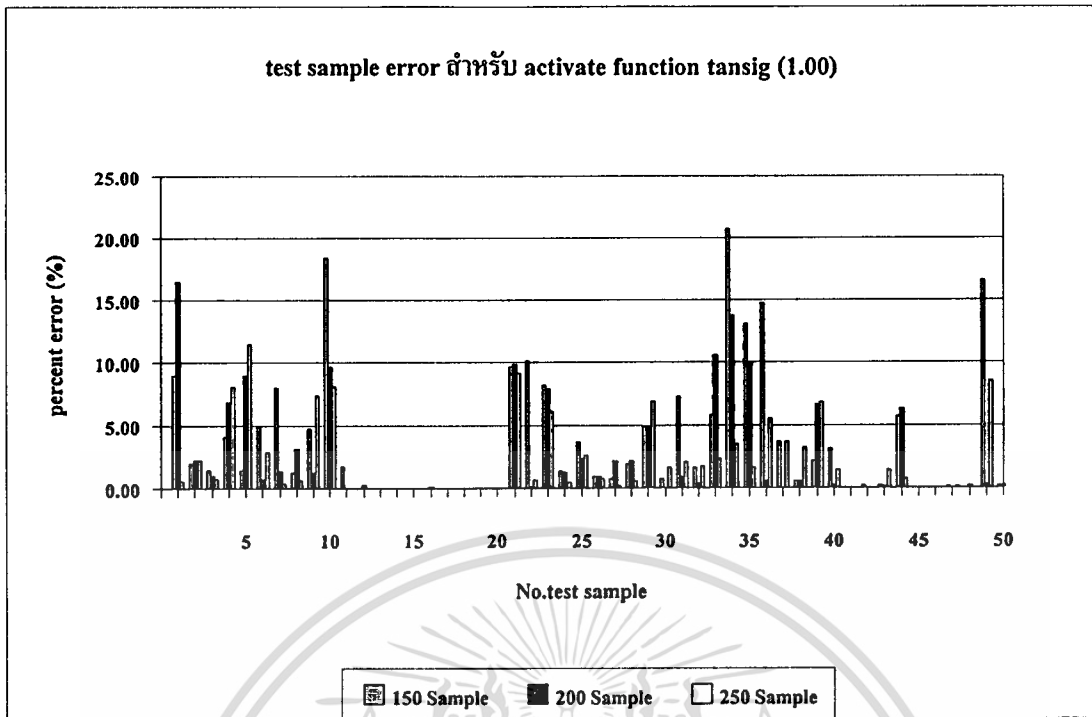
พอลต์ ตำแหน่ง "F1"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.082	0.097	0.115	0.109	0.001	0.094	0.105	0.091	0.119	0.139
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.09553	0.09489	0.11612	0.11641	0.00109	0.09470	0.10638	0.09379	0.11756	0.12562
	% error	16.5043	2.1796	0.9738	6.7942	8.9668	0.7430	1.3127	3.0611	1.2067	9.6283
พอลต์ ตำแหน่ง "F2"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.059	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.05900	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100
	% error	0.0021	0.2670	0.0022	0.0072	0.0014	0.0475	0.0042	0.0027	0.0091	0.0066
พอลต์ ตำแหน่ง "F3"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.153	0.001	0.294	0.274	0.277	0.273	0.265	0.265	0.258	0.270
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.16803	0.00100	0.27068	0.27068	0.27068	0.27068	0.27068	0.27068	0.27068	0.27008
	% error	9.8268	0.0874	7.9328	1.2126	2.2825	0.8507	2.1423	2.1425	4.9138	0.0290
พอลต์ ตำแหน่ง "F4"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.197	0.270	0.290	0.263	0.166	0.155	0.188	0.193	0.177	0.276
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.19869	0.26911	0.25937	0.22693	0.18257	0.15588	0.18803	0.19396	0.18882	0.27516
	% error	0.8594	0.3307	10.5613	13.7141	9.9827	0.5668	0.0175	0.4976	6.6798	0.3041
พอลต์ ตำแหน่ง "F5"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.060	0.001	0.001	0.001	0.001	0.046	0.001
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.00100	0.00100	0.00100	0.06380	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.04587	0.00100
	% error	0.0090	0.0097	0.1074	6.3305	0.0035	0.0022	0.0089	0.1660	0.2781	0.1695

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.20 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี
ความชัน (k) เท่ากับ 1.00 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด

พอลต์ ตำแหน่ง "F1"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.082	0.097	0.115	0.109	0.001	0.094	0.105	0.091	0.119	0.139
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.08246	0.09481	0.11422	0.11780	0.00111	0.09663	0.10535	0.09045	0.12775	0.12775
	% error	0.5619	2.2581	0.6782	8.0729	11.4116	2.8002	0.3307	0.6064	7.3549	8.0919
พอลต์ ตำแหน่ง "F2"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.059	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.05900	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100
	% error	0.0005	0.0010	0.0009	0.0016	0.0018	0.0016	0.0018	0.0009	0.0014	0.0009
พอลต์ ตำแหน่ง "F3"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.153	0.001	0.294	0.274	0.277	0.273	0.265	0.265	0.258	0.270
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.13906	0.00099	0.27623	0.27267	0.27000	0.27498	0.26544	0.26649	0.27584	0.27421
	% error	9.1098	0.6418	6.0443	0.4840	2.5277	0.7259	0.1658	0.5638	6.9136	1.5605
พอลต์ ตำแหน่ง "F4"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.197	0.270	0.290	0.263	0.166	0.155	0.188	0.193	0.177	0.276
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.20101	0.27450	0.28323	0.25387	0.16331	0.14643	0.18119	0.18681	0.18911	0.27201
	% error	2.0344	1.6651	2.3344	3.4720	1.6178	5.5312	3.6223	3.2053	6.8406	1.4472
พอลต์ ตำแหน่ง "F5"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.060	0.001	0.001	0.001	0.001	0.046	0.001
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.00100	0.00100	0.00099	0.06041	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.04993	0.00100
	% error	0.0005	0.0016	1.4220	0.6815	0.0018	0.0126	0.0503	0.0067	8.5391	0.0089

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสำหรับข้อมูลทดสอบแต่ละชุด กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.00

ตารางที่ 6.21 เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียม กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.00

ข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด			ข้อมูลฝึกสอน 200 ชุด			ข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด		
ตำแหน่ง เกิดฟอลต์	เวลาที่ ใช้ ฝึกสอน (นาที)	จำนวน นิวรอน ในชั้นซ่อน ที่ 1 - 2	ตำแหน่ง เกิดฟอลต์	เวลาที่ใช้ ฝึกสอน (นาที)	จำนวน นิวรอน ในชั้นซ่อน ที่ 1 - 2	ตำแหน่ง เกิดฟอลต์	เวลาที่ใช้ ฝึกสอน (นาที)	จำนวน นิวรอน ในชั้นซ่อน ที่ 1 - 2
F1	8.90	2 - 1	F1	9.39	3 - 2	F1	9.86	3 - 2
F2	9.67	2 - 1	F2	14.94	6 - 5	F2	10.11	2 - 1
F3	9.65	4 - 3	F3	9.73	3 - 2	F3	10.93	4 - 3
F4	9.61	5 - 4	F4	10.39	4 - 3	F4	11.23	4 - 3
F5	10.08	4 - 3	F5	10.99	4 - 3	F5	12.31	5 - 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.18 ถึง 6.21 และรูปที่ 6.6 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

- การคำนวณค่า CCT

1. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด สามารถคำนวณค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 3.8854 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.0000 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 20.7055 % (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 34)
2. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 200 ชุด สามารถคำนวณค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 2.6748 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.0014 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 16.5043 % (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 1)
3. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด สามารถคำนวณค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 2.2682 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.0005 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 11.4116 % (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 5)

ค่าผิดพลาดของคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียมที่ฝึกสอนด้วยข้อมูลฝึกสอน 150 และ 200 ชุดจะมีค่าค่อนข้างสูงในช่วงข้อมูลชุดที่ 10 และ 33 ถึง 36 โดยโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 250 ชุดเป็นโครงข่ายที่มีค่า mape ต่ำที่สุด

- เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยที่สุดคือ โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด โดยใช้เวลาฝึกสอน 47.91 นาที และโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เวลาในการฝึกสอนมากที่สุดคือ โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ข้อมูลฝึกสอน 200 โดยใช้เวลาฝึกสอน 55.44 นาที

สำหรับการฝึกสอนในเงื่อนไขนี้เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนจะแปรตามจำนวนของข้อมูลฝึกสอนและจำนวนนิเวรอนในชั้นซ่อนมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากในการฝึกสอนบางรอบมีการสิ้นสุดการฝึกสอนก่อนถึงกำหนด (การฝึกสอนสิ้นสุดก่อนที่จะมีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส ครบ 1,000 ครั้ง) ซึ่งเป็นเงื่อนไขของ Neural Network Toolbox (หัวข้อที่ 5.4.8)

6.3.3 ผลการทดลองกรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.50

ตารางที่ 6.22 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.50 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด

พอลต์ ตำแหน่ง "F1"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.082	0.097	0.115	0.109	0.001	0.094	0.105	0.091	0.119	0.139
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.08807	0.09343	0.12130	0.11492	0.00131	0.09262	0.10630	0.09118	0.12496	0.12787
	% error	7.4068	3.6825	5.4798	5.4351	31.4877	1.4630	1.2343	0.2012	5.0100	8.0045
พอลต์ ตำแหน่ง "F2"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.059	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.05905	0.00100	0.00099	0.00100	0.00099	0.00099	0.00100	0.00100	0.00099	0.00099
	% error	0.0767	0.4075	1.0449	0.4299	1.0449	1.0449	0.4075	0.2504	1.0449	1.0449
พอลต์ ตำแหน่ง "F3"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.153	0.001	0.294	0.274	0.277	0.273	0.265	0.265	0.258	0.270
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.18000	0.00100	0.27296	0.27328	0.27368	0.23351	0.26249	0.26102	0.27338	0.26742
	% error	17.6491	0.3090	7.1562	0.2633	1.1970	14.4668	0.9460	1.5004	5.9622	0.9569
พอลต์ ตำแหน่ง "F4"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.197	0.270	0.290	0.263	0.166	0.155	0.188	0.193	0.177	0.276
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.26368	0.28794	0.29326	0.22824	0.17175	0.15900	0.21502	0.18548	0.17980	0.25470
	% error	33.8479	6.6439	1.1254	13.2173	3.4614	2.5795	14.3697	3.8982	1.5844	7.7186
พอลต์ ตำแหน่ง "F5"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.060	0.001	0.001	0.001	0.001	0.046	0.001
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.00097	0.00100	0.00097	0.05637	0.00099	0.00099	0.00100	0.00101	0.05637	0.00100
	% error	3.0848	0.2795	2.6863	6.0494	1.1494	0.7303	0.2865	0.5772	22.5445	0.0279

ตารางที่ 6.23 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี
ความชัน (k) เท่ากับ 1.50 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 200 ชุด

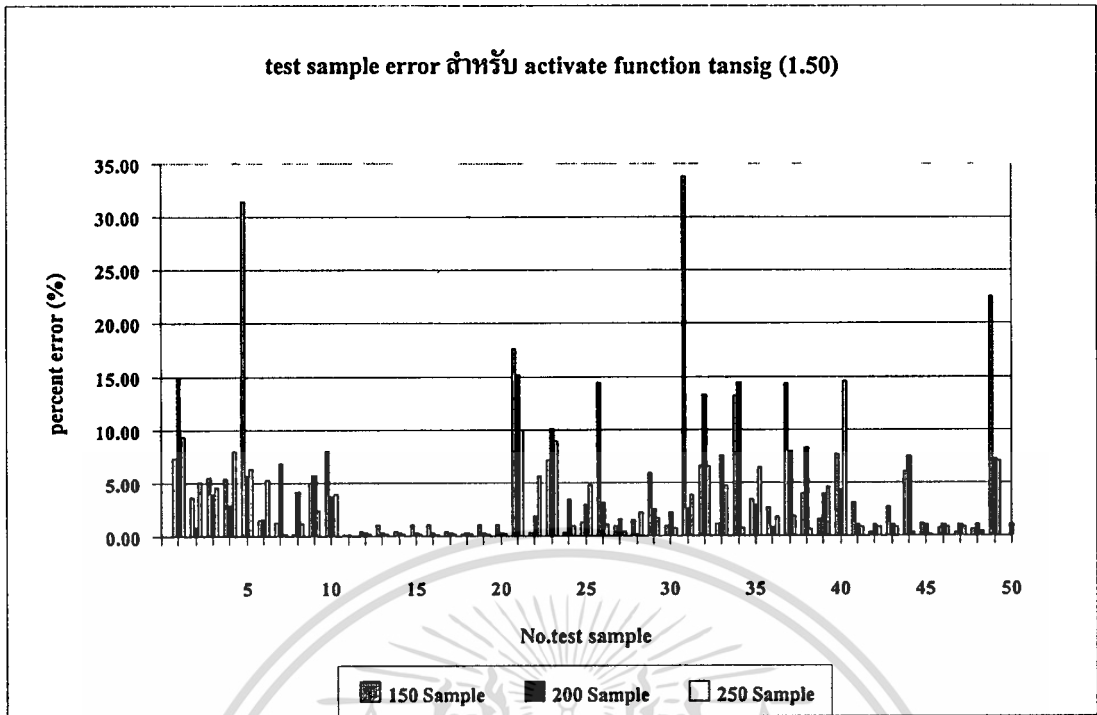
พอลต์ ตำแหน่ง "F1"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.082	0.097	0.115	0.109	0.001	0.094	0.105	0.091	0.119	0.139
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.09417	0.09781	0.11960	0.11220	0.00094	0.09542	0.11220	0.09475	0.11220	0.14424
	% error	14.8432	0.8350	3.9963	2.9376	5.7281	1.5147	6.8591	4.1258	5.7127	3.7718
พอลต์ ตำแหน่ง "F2"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.059	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.05908	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100
	% error	0.1422	0.2732	0.2736	0.2742	0.2742	0.2743	0.2732	0.2732	0.2742	0.2742
พอลต์ ตำแหน่ง "F3"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.153	0.001	0.294	0.274	0.277	0.273	0.265	0.265	0.258	0.270
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.17623	0.00098	0.26450	0.26453	0.26900	0.26452	0.26918	0.26453	0.26453	0.26416
	% error	15.1852	1.9028	10.0329	3.4561	2.8893	3.1057	1.5782	0.1772	2.5316	2.1613
พอลต์ ตำแหน่ง "F4"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.197	0.270	0.290	0.263	0.166	0.155	0.188	0.193	0.177	0.276
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.19191	0.23399	0.26791	0.22503	0.16110	0.15373	0.20300	0.17703	0.18392	0.26398
	% error	2.5842	13.3370	7.6180	14.4359	2.9508	0.8224	7.9786	8.2742	3.9100	4.3540
พอลต์ ตำแหน่ง "F5"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.060	0.001	0.001	0.001	0.001	0.046	0.001
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.00099	0.00099	0.00099	0.05549	0.00099	0.00099	0.00099	0.00099	0.04935	0.00099
	% error	1.0054	1.0054	1.0054	7.5126	1.0050	1.0054	1.0054	1.0047	7.2808	1.0054

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.24 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{ANN} กับค่า CCT_{TDM} กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มี
ความชัน (k) เท่ากับ 1.50 และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด

พอลต์ ตำแหน่ง "F1"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.082	0.097	0.115	0.109	0.001	0.094	0.105	0.091	0.119	0.139
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.08963	0.09209	0.12029	0.11772	0.00094	0.08898	0.10517	0.09206	0.11612	0.13355
	% error	9.3007	5.0620	4.5999	8.0003	6.3461	5.3401	0.1631	1.1661	2.4243	3.9180
พอลต์ ตำแหน่ง "F2"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.059	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.05897	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100
	% error	0.0469	0.2580	0.1775	0.2580	0.1751	0.1448	0.2580	0.2580	0.1751	0.1758
พอลต์ ตำแหน่ง "F3"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.153	0.001	0.294	0.274	0.277	0.273	0.265	0.265	0.258	0.270
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.16822	0.00106	0.26777	0.27152	0.26389	0.27012	0.26386	0.27070	0.25361	0.27198
	% error	9.9499	5.6490	8.9234	0.9060	4.7327	1.0557	0.4298	2.1507	1.7013	0.7324
พอลต์ ตำแหน่ง "F4"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.197	0.270	0.290	0.263	0.166	0.155	0.188	0.193	0.177	0.276
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.18942	0.28780	0.27656	0.26097	0.15530	0.15770	0.19145	0.19177	0.18504	0.23601
	% error	3.8471	6.5923	4.6345	0.7724	6.4467	1.7408	1.8342	0.6379	4.5444	14.4886
พอลต์ ตำแหน่ง "F5"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.060	0.001	0.001	0.001	0.001	0.046	0.001
	$CCT_{ANN}(sec)$	0.00099	0.00099	0.00099	0.05981	0.00100	0.00099	0.00099	0.00100	0.04273	0.00099
	% error	0.8760	0.8671	0.8714	0.3097	0.1356	0.8790	0.8807	0.3741	7.1039	0.7731

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.7 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสำหรับข้อมูลทดสอบแต่ละชุด กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.50

ตารางที่ 6.25 เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียม กรณีฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1.50

ข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด			ข้อมูลฝึกสอน 200 ชุด			ข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด		
ตำแหน่ง เกิดฟอลต์	เวลาที่ใช้ ฝึกสอน (นาที)	จำนวน นิวรอน ในชั้นซ่อน ที่ 1-2	ตำแหน่ง เกิดฟอลต์	เวลาที่ใช้ ฝึกสอน (นาที)	จำนวน นิวรอน ในชั้นซ่อน ที่ 1-2	ตำแหน่ง เกิดฟอลต์	เวลาที่ใช้ ฝึกสอน (นาที)	จำนวน นิวรอน ในชั้นซ่อน ที่ 1-2
F1	8.90	2-1	F1	11.48	4-3	F1	12.33	4-3
F2	9.67	2-1	F2	10.10	2-1	F2	11.06	2-1
F3	9.65	4-3	F3	9.74	3-2	F3	12.68	5-4
F4	9.61	5-4	F4	9.97	3-2	F4	12.71	5-4
F5	10.08	4-3	F5	9.70	3-2	F5	9.50	2-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.22 ถึง 6.25 และรูปที่ 6.7 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

- การคำนวณค่า CCT

1. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด สามารถคำนวณค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 5.0494 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.0279 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 33.8479 % (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 31)
2. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 200 ชุด สามารถคำนวณค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 3.7010 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.1422 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 15.1852 % (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 21)
3. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด สามารถคำนวณค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 2.8618 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.0469 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 14.4886 % (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 40)

ค่าผิดพลาดของคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียมที่ฝึกสอนด้วยข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด จะมีค่าค่อนข้างสูงในข้อมูลชุดที่ 5, 20, 30 และ 49 ส่วนค่าผิดพลาดของคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียมที่ฝึกสอนด้วยข้อมูลฝึกสอน 200 และ 250 ชุด จะมีค่าสูงไม่มากนัก โดยโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 250 ชุดเป็นโครงข่ายที่มีค่า mape ต่ำที่สุด

- เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

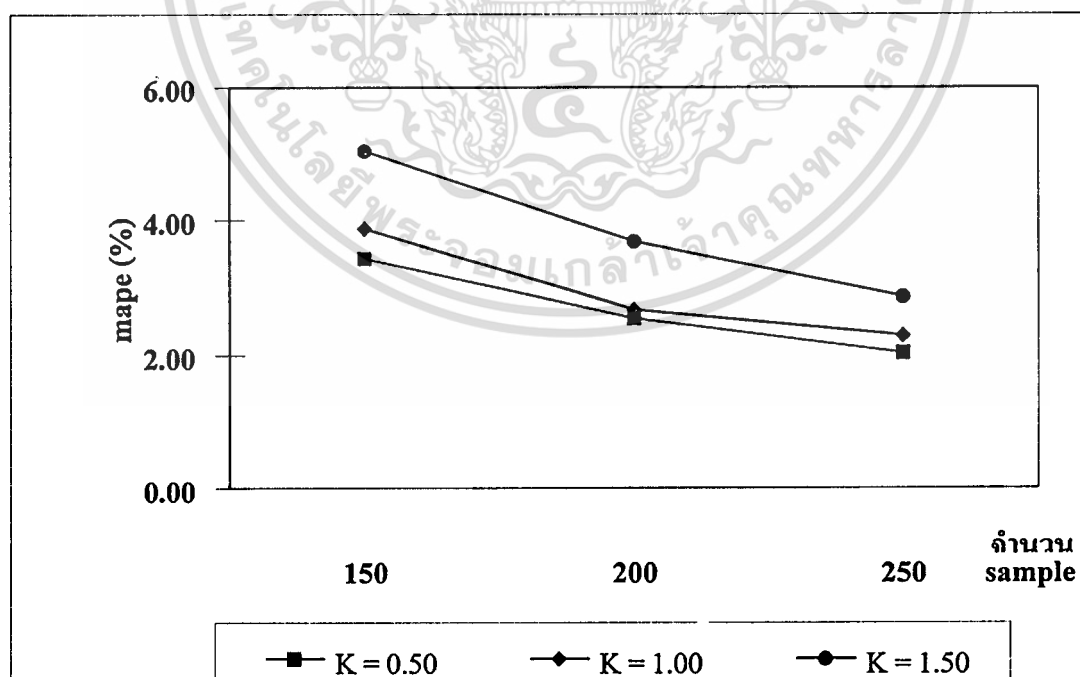
โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยที่สุดคือ โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด โดยใช้เวลาฝึกสอน 44.89 นาที และโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เวลาในการฝึกสอนมากที่สุดคือ โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด โดยใช้เวลาฝึกสอน 58.28 นาที

สำหรับการฝึกสอนในเงื่อนไขนี้เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนส่วนมากจะแปรตามจำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอนและจำนวนนิเวรอนในชั้นซ่อนกล่าวคือ เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะมากขึ้นตาม จำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอนที่เพิ่มขึ้น และโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใหญ่ขึ้น (จำนวนนิเวรอนในชั้นซ่อนมีจำนวนมากขึ้น)

6.3.4 เปรียบเทียบผลการทดลองทุกกรณี

ตารางที่ 6.26 ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วในเงื่อนไขต่างๆ

k	จำนวน ชุดข้อมูล ฝึกสอน	เวลาที่ใช้ ฝึกสอน (นาที)	ผลทดสอบของชุดข้อมูลทดสอบ			ผลทดสอบของชุดข้อมูลฝึกสอน		
			mape (%)	max error (%)	min error (%)	mape (%)	max error (%)	min error (%)
0.50	150	49.04	3.4338	25.4391	0.0000	0.6728	6.7182	0.0000
	200	53.25	2.5262	14.9001	0.0000	1.1054	18.8887	0.0000
	250	56.71	2.0365	16.7071	0.0000	0.5285	17.5778	0.0000
1.00	150	47.91	3.8854	20.7055	0.0000	0.9081	26.0312	0.0000
	200	55.44	2.6748	16.5043	0.0014	0.3345	22.0947	0.0000
	250	54.44	2.2682	11.4116	0.0005	0.1637	4.4855	0.0000
1.50	150	44.89	5.0494	33.8479	0.0279	0.3846	11.1993	0.0000
	200	50.99	3.7010	15.1852	0.1422	0.6559	11.1876	0.0005
	250	58.28	2.8618	14.4886	0.0469	0.5129	14.6746	0.0000



รูปที่ 6.8 การเปรียบเทียบค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ในทุกกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.26 และรูปที่ 6.8 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

- การคำนวณค่า CCT

โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 0.50 โดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด สามารถคำนวณค่า CCT โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) น้อยที่สุดเท่ากับ 2.0365 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.0000 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 16.7071 % และมีค่าผิดพลาดที่สูงกว่า 5.0000 % เพียง 4 ชุดจากจำนวนทั้งสิ้น 50 ชุด

- เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

สำหรับการฝึกสอนในทุกเงื่อนไขเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนส่วนมากจะแปรตามจำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอนและจำนวนนิรอนในชั้นซ่อน มีเพียงไม่กี่กรณีเท่านั้นที่ไม่แปรตาม ทั้งนี้เนื่องจากการฝึกสอนบางรอบมีการสิ้นสุดการฝึกสอนก่อนถึงกำหนด (การฝึกสอนสิ้นสุดก่อนที่จะมีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส ครบ 1,000 ครั้ง) ซึ่งเป็นเงื่อนไขของ Neural Network Toolbox (หัวข้อที่ 5.4.8)

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะชั่วคราว โดยใช้โครงข่ายประสาทยูทิลิตี้ในการคำนวณหาค่าช่วงเวลาที่ตัดกระแสวิกฤตตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอมาแล้วนั้น สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ระบบไฟฟ้าที่ทำการศึกษา ได้ทำการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ 2 ระบบ ได้แก่ ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system ซึ่งเป็นระบบทดสอบ และระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย บริเวณภาคกลางตะวันตกและภาคใต้ ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ในงานจริงในทางปฏิบัติ โดยระบบไฟฟ้ากำลังทั้ง 2 ระบบที่นำมาศึกษาได้มีการปรับเปลี่ยนสถานะการทำงานต่างๆของระบบ อาทิเช่น กำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พิจารณา, ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และ โครงสร้างของระบบ เพื่อให้ครอบคลุมเงื่อนไขที่ทำการศึกษา

2. การเตรียมข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา ข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทยูทิลิตี้จะประกอบไปด้วย ชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พิจารณาเลือกตัวแปรในชุดข้อมูลดังกล่าวที่มีผลต่อค่า CCT โดยตรง [43] และได้ทำการจำลองเหตุการณ์เพื่อหาค่า CCT สำหรับการเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเงื่อนไขที่ทำการศึกษา โดยใช้โปรแกรม Load flow and step by step time simulation [3]

3. การเลือกชนิดของโครงข่ายประสาทยูทิลิตี้ เนื่องจากในขั้นตอนของการเตรียมข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนเป็นการจำลองเหตุการณ์ซึ่งใช้ระยะเวลาค่อนข้างมาก จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทยูทิลิตี้จึงมีอยู่จำกัด ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้พิจารณาเลือกใช้โครงข่ายประสาทยูทิลิตี้ที่มีการแพร่ค่าย้อนกลับ (Feed-forward neural networks with back-propagation learning rule) โดยใช้ Levenberg-Marquardt algorithm ซึ่งมีประสิทธิภาพในการฝึกสอนสูง [4] และเหมาะสมกับจำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอนที่มีอยู่จำกัด ในการเรียนรู้พฤติกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังทั้ง 2 ระบบ และพิจารณาค่า CCT เป็นคำตอบของโครงข่ายประสาทยูทิลิตี้

4. การฝึกสอนโครงข่ายประสาทยูทิลิตี้ ทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทยูทิลิตี้แบ่งตามเงื่อนไข 9 กรณี โดยฝึกสอนด้วยจำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอนต่างๆกัน 3 กรณี โดยแต่ละเงื่อนไขจะทำการปรับความชันของฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นซ่อน (Hidden layer) อีก 3 ค่า เพื่อเปรียบเทียบประ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์แล้ว
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว (Trained ANN) และเป็นแนวทางในการกำหนดเงื่อนไขการฝึกสอนเพื่อให้ได้โครงข่ายประสาทเทียมที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

โดยสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมได้ดังต่อไปนี้

- 4.1 การเลือกตัวแปรในการฝึกสอน หากตัวแปรที่เลือกเป็นอินพุตในการฝึกสอนมีความสัมพันธ์กับตัวแปรเอาต์พุตมาก ก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสูงขึ้นตามไปด้วย
- 4.2 การกระจายของข้อมูลฝึกสอน ข้อมูลฝึกสอนที่มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอภายในขอบเขตที่กำหนด จะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมสามารถเรียนรู้ข้อมูลภายในขอบเขตที่กำหนดได้อย่างทั่วถึง เมื่อทดสอบด้วยชุดข้อมูลทดสอบที่อยู่ในขอบเขตดังกล่าวก็จะสามารถคำนวณผลลัพธ์ได้อย่างแม่นยำ
- 4.3 ปริมาณของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบ ในปัญหาที่มีความซับซ้อนและมีขอบเขตในการเรียนรู้มากนั้น นอกจากจะต้องใช้ข้อมูลฝึกสอนที่มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอแล้วยังจำเป็นต้องมีจำนวนข้อมูลฝึกสอนที่เพียงพอจึงจะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วมีประสิทธิภาพสูง ส่วนปริมาณของข้อมูลทดสอบจะใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว
- 4.4 ค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส การเลือกค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสแบบสุ่มจะทำให้มีการฝึกสอนแต่ละรอบมีทิศทางการรู้เข้าหาค่าตอบแตกต่างกัน
- 4.5 จำนวนครั้งของการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส จำนวนครั้งของการปรับค่าดังกล่าวจะต้องมากเพียงพอ เพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมสามารถคำนวณหาผลลัพธ์ (a) ได้ใกล้เคียงกับคำตอบที่แท้จริง (t) มากที่สุด
- 4.6 จำนวนรอบของการฝึกสอน เนื่องจากวิธีการเลือกค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสเป็นการเลือกแบบสุ่ม จำนวนรอบของการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมในแต่ละโครงสร้างของโครงข่ายนั้นจะต้องเพียงพอให้เกิดการสุ่มค่าดังกล่าวอย่างทั่วถึง
- 4.7 จำนวนโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องปรับเปลี่ยนจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนของโครงข่ายเพื่อให้เมตริกซ์ของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสมีขนาดใหญ่มากเพียงพอในการคำนวณผลลัพธ์ (a) ให้มีค่าใกล้เคียงกับคำตอบที่แท้จริง (t) มากที่สุด
- 4.8 ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน เนื่องจากปัญหาที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นปัญหาชนิดที่เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องแบบไม่เชิงเส้นและมีความซับซ้อนมาก จึงเลือกใช้ฟังก์ชันถ่าย

โหนด Tan-sigmoid ซึ่งเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนที่สามารถหาอนุพันธ์ได้ในชั้นซ่อนทั้ง 2 ชั้นและฟังก์ชันถ่ายโอน Linear ในชั้นข้อมูลเอาต์พุต

4.9 ความชันของฟังก์ชันถ่ายโอน ความชันของฟังก์ชันถ่ายโอนก็มีผลต่อการตัดสินใจและเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม เมื่อความชันของฟังก์ชันถ่ายโอน Tan-sigmoid มีค่ามากจะมีลักษณะการตัดสินใจใกล้เคียงกับฟังก์ชันถ่ายโอน Hard limit ซึ่งทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องต่ำแต่จะใช้เวลาในการฝึกสอนน้อย ส่วนความชันของฟังก์ชันถ่ายโอน Tan-sigmoid ที่มีค่าน้อยจะมีลักษณะการตัดสินใจคล้ายกับ Fuzzy logic ซึ่งจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องสูงแต่จะใช้เวลาในการฝึกสอนมากขึ้น

5. เทคนิคที่ใช้ในการฝึกสอน โดยปกติ (Default) Neural network toolbox ของโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจนครบตามจำนวน epoch ที่กำหนดหรือฝึกสอนจนค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการสิ้นสุดการฝึกสอนถึงค่าที่กำหนดไว้ แล้วจึงนำค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส ที่ทำให้ค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดยกกำลังสอง (Mean square error, MSE) ของชุดข้อมูลฝึกสอนต่ำที่สุดมาเป็นค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสของโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว ซึ่งในกรณีนี้อาจจะไม่ทำให้ผลการทดสอบด้วยชุดข้อมูลทดสอบมีค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean absolute percentage error, mape ซึ่งใช้เป็นเกณฑ์ในการวัดประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม) ต่ำที่สุด ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ใช้เทคนิค Validation ซึ่งสามารถเขียนชุดคำสั่งเพิ่มเติมให้ Neural network toolbox นำเอาชุดข้อมูลทดสอบมาเป็นชุดข้อมูล Validation โดยผลที่ได้จะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมเลือกค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส ที่ทำให้ค่า MSE ของชุดข้อมูลทดสอบต่ำที่สุดมาเป็นค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสของโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเทคนิคนี้จะทำให้ผลการทดสอบด้วยชุดข้อมูลทดสอบมีค่า mape ต่ำที่สุด และค่า mape ของชุดข้อมูลฝึกสอนก็อยู่ในเกณฑ์ที่ดีด้วย

6. ผลการทดสอบ เมื่อนำโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนสำหรับคำนวณหาค่า CCT ของระบบไฟฟ้ากำลังแต่ละระบบ มาทดสอบด้วยชุดข้อมูลทดสอบ (ของแต่ละระบบ) ได้ผลการทดสอบดังนี้

6.1 โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับใช้ในการคำนวณหาค่า CCT ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system ที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว ค่ารวมค่า CCT ของชุดข้อมูลทดสอบโดยมีค่า mape เท่ากับ 0.054 % , ค่าผิดพลาดต่ำสุด 0.000 % , ค่าผิดพลาดสูงสุด 0.349 % และใช้เวลาในการฝึกสอน 26.55 นาที เวลาในการคำนวณหาค่าตอบน้อยกว่า 1 msec [43] (ฝึกสอนด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหน่วยประมวลผลกลางแพนเทียม

ทุก 350 MHz, หน่วยความจำ 512 MB)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 โครงข่ายประสาทยูทิลิตี้สำหรับใช้ในการคำนวณหาค่า CCT ของระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตบริเวณภาคกลางตะวันตกและภาคใต้ ที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว ค่ารวมค่า CCT ของชุดข้อมูลทดสอบโดยมีค่า mape เท่ากับ 2.0365 % , ค่าผิดพลาดต่ำสุด 0.0000 % , ค่าผิดพลาดสูงสุด 16.7071 % และใช้เวลาในการฝึกสอน 56.71 นาที เวลาในการคำนวณหาค่าคอบน้อยกว่า 1 msec [43] (ฝึกสอนด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหน่วยประมวลผลกลางแพนเทียมทรี 733 MHz, หน่วยความจำ 256 MB)

ผลการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นว่าการนำโครงข่ายประสาทยูทิลิตี้มาใช้ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะชั่วคราว โดยพิจารณาค่า CCT เป็นคำตอบของโครงข่ายประสาทยูทิลิตี้ สามารถคำนวณค่า CCT ได้อย่างรวดเร็วและมีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ดี ซึ่งวิธีการที่นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการวางแผนซ่อมบำรุงระบบไฟฟ้ากำลัง, การวางแผนระบบป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง และการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งได้รับความสนใจและพัฒนาอยู่ในปัจจุบันได้เป็นอย่างดี

7. สิ่งที่เราควรได้รับการพัฒนาต่อไป

7.1 พัฒนารูปแบบการเตรียมข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนให้มีความรวดเร็วเพิ่มขึ้น เพื่อเพิ่มจำนวนชุดของข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการฝึกสอนให้มากขึ้น

7.2 พิจารณาแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบควบคุมแบบละเอียด (Detailed models) และการชดเชย (Compensation) รูปแบบต่างๆ ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อค่า CCT ของระบบไฟฟ้ากำลัง

7.3 พัฒนาขั้นตอนการฝึกสอนให้มีความรวดเร็วขึ้น เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนเป็นข้อด้อยของโครงข่ายประสาทยูทิลิตี้ เมื่อนำไปใช้ในการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่ซึ่งมีตัวแปรที่พิจารณามาก แม้ว่าโครงข่ายประสาทยูทิลิตี้ที่ผ่านการฝึกสอนแล้วจะใช้เวลาในการคำนวณหาค่าคอบน้อยมากก็ตาม

7.4 พิจารณาองค์ประกอบอื่นๆ ที่ใช้ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะชั่วคราว อาทิเช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าวิกฤต (Critical generator) [44] ค่ากำลังผลิตสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Maximum power limit) เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

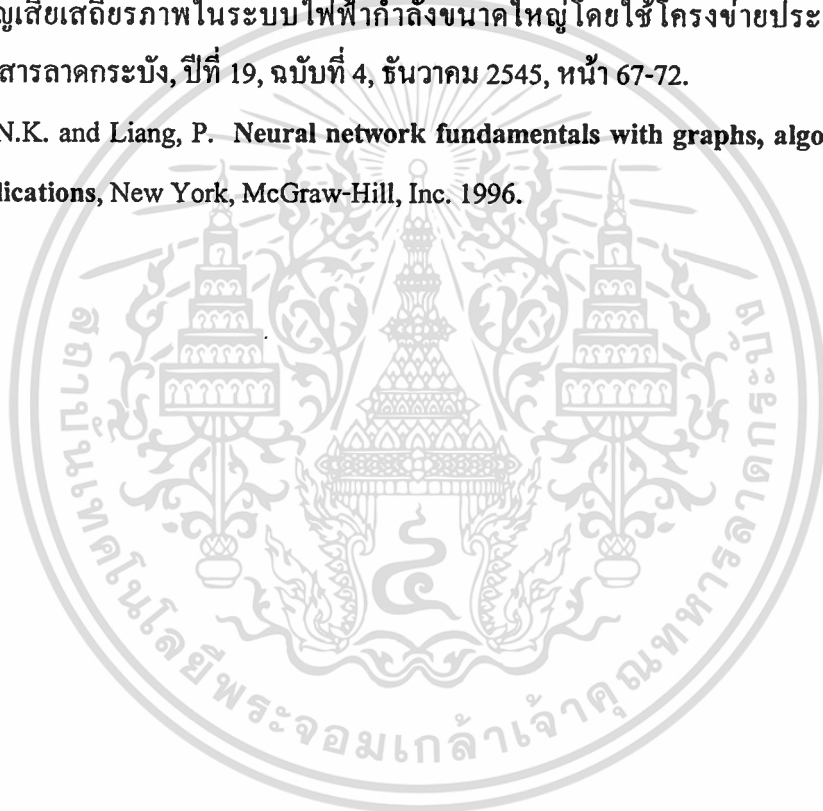
- [1] Pai, M. A. **Energy Function Analysis for Power System Stability**, Kluwer Academic Publishers., 1989.
- [2] Fouad A. A. and Vittal, V. **Power System Transient Stability Analysis Using the Transient Energy Function Method**, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1992
- [3] Jadim, J. 1994 “Advances in Power System Transient Stability Assessment Using Transient Energy Function Methods,” Ph.D. Thesis of University of London and the Diploma of Membership of the Imperial College.
- [4] Demuth, H. and Beale, M. **Neural Network Toolbox User’s Guide**, The Math Works, Inc., March 2001.
- [5] William. D. Stevenson Jr. **Element of Power System Analysis**, Forth Edition. McGraw – Hill, Inc. Singapore, 1982.
- [6] IEEE Std 399-1997, **IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis**, August 1998.
- [7] Digital Equipment Corporation, **Digital Fortran: Language Reference Manual**, Maynard, Massachusetts, April 1997.
- [8] Nelson, M. M. and Illingworth, W. T. **A practical guide to neural nets**, Reading, MA : Addison-Wesley, 1991.
- [9] Sobajic D. J. and Pao, Y. H. “Artificial Neural-Net Based Dynamic Security Assessment for Electric Power Systems”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 1, February 1989, pp. 220-228.
- [10] Wong K. P., Ta, N. P. and Attikiouzel, Y. “Transient Stability Assessment for Single-Machine Power Systems Using Neural Networks”, IEEE Region 10 Conference on Computer and Communication Systems, September 1990, Hong Kong, pp. 32-36.
- [11] Aggoune M., El-Sharkawi, M. A., Park, D. C., Damborg M. J. and Marks, R. J. II “Preliminary Results on Using Artificial Neural Networks for Security Assessment”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 2, May 1991, pp. 890-896.

- [12] Wong K. P., Lim, W., Ta, N. P. and Attikiouzel, Y. "Neural Network Transient Stability Assessment of a Single-Machine System under Asymmetrical Fault Conditions", IEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, November 1991, Hong Kong, pp. 572-577.
- [13] Marpaka D. R., Thursby, M. H. and Aghili, S. M. "Artificial Neural Net Based Stability Study of Power Systems", IEEE SOUTH EASTCON - Conference Proceedings 1991, Vol. 1, pp. 234-238.
- [14] Mori H., Tamaru, Y. and Tsuzuki, S. "An Artificial Neural-Net Based Technique for Power System Dynamic Stability with the Kohonen Model", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 2, May 1992, pp. 856-864.
- [15] Pao Y.-H. and Sobajic, D. J. "Combined Use of Unsupervised and Supervised Learning for Dynamic Security Assessment", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 2, May 1992, pp. 878-884.
- [16] Omata K. and Tanomura, K. "Transient Stability Evaluation Using an Artificial Neural Network", Proceedings of the Second International Forum on Applications of Neural Networks to Power Systems, 1993, pp. 130-135.
- [17] Xianshu L. and Ma, J. "Using Artificial Neural Network to Assess Transient Stability of Power Systems", IEEE TENCON, 1993, Beijing, pp. 91-94.
- [18] Sharaf A. M., Lie, T. T. and Gooi, H. B. "Transient Stability and Critical Clearing Time Classification Using Neural Networks", IEE 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, December 1993, Hong Kong, pp. 365-372.
- [19] Liangzhong Y., Shixin, Z., Yixin, N. and Boming, Z. "An Artificial Neural Network for Estimating Transient Stability Limits," IEE 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, December 1993, Hong Kong, pp. 527-531.
- [20] Huang K., Lam, D. and Yee, H. "Neural-Net based Critical Clearing Time Prediction in Power System Transient Stability Analysis", IEE 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, December 1993, Hong Kong, pp. 679-683.
- [21] Liangzhong Y., Yixin, N. and Boming, Z. "Estimation of Transient Stability Limits Using Artificial Neural Network", IEEE TENCON, 1993, Beijing, pp. 87-90.

- [22] Wei S., Nakamura, K., Sone, M. and Fujita, H. "Neural Network Based Power System Transient Stability Criterion Using DSP-PC System", Proceedings of the Second International Forum on Applications of Neural Networks to Power Systems, 1993, pp. 136-141.
- [23] Klapper D. B., Othman, H. A., Akimoto, Y., Tanaka, H. and Yoshizawa, J. "Application of Neural Networks to Direct Stability Analysis of Power Systems", Proceedings of the Second International Forum on Applications of Neural Networks to Power Systems, 1993, pp. 382-386.
- [24] Chang C. S., Srinivasan, D. and Liew, A. C. "A Hybrid Model for Transient Stability Evaluation of Interconnected Longitudinal Power Systems Using Neural Network/Pattern Recognition Approach", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, February 1994, pp. 85-92.
- [25] Zhou Q., Davidson, J. and Fouad, A. A. "Application of Artificial Neural Networks in Power System Security and Vulnerability Assessment", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, February 1994, pp. 525-532.
- [26] Hobson E. and Allen, G. N. "Effectiveness of Artificial Neural Networks for First Swing Stability Determination of Practical Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 2, May 1994, pp. 1062-1068.
- [27] Nishiura M., Ohsawa, Y., Arai, K. and Takeno, H. "Transient Stability Assessment Using Energy Function and Neural Network", International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, ISAP 1994, Vol. 1, pp. 255-262.
- [28] Karaki S. and Chedid, R. "Artificial Neural Networks: A New Approach for Treating Electrical Engineering Problems", IEEE Frontiers in Education Conference, 1994, pp. 567-572.
- [29] Lo K. L. and Tsai, R. J. Y. "Power System Transient Stability Analysis by Using Modified Kohonen Network", IEEE International Conference on Neural Networks - Conference Proceedings 1995, Vol. 2, pp. 893-898.
- [30] Sing L. B. and Po, W. K. "Transient Stability Assessment: An Artificial Neural Network Approach", IEEE International Conference on Neural Networks - Conference Proceedings 1995, Vol. 2, pp. 702-707.
- [31] Miranda V., Fidalgo, J. N., Pecos Lopes, J. A and Almeida, L. B. "Real Time Preventive Actions for Transient Stability Enhancement with a Hybrid Neural Network –

- Optimisation Approach”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 2, May 1995, pp. 1029-1035.
- [32] Edwards A. R., Chan, K. W., Dunn, R. W. and Daniels, A. R. “Transient Stability Screening Using Artificial Neural Networks within a Dynamic Security Assessment System”, IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Vol. 143, No. 2, March 1996, pp. 129-134.
- [33] Minussi C. R. and Silveira, M. do C. G. “Electric Power Systems Transient Stability Analysis by Neural Networks”, Proceedings of the 38th Midwest Symposium on Circuits and Systems, Vol. 2, 1996, pp. 1305-1308.
- [34] Aboytes F. and Ramirez, R. “Transient Stability Assessment in Longitudinal Power Systems Using Artificial Neural Networks”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 4, November 1996, pp. 2003-2010.
- [35] Muknahallipatna S. and Chowdhury, B. H. “Input Dimension Reduction in Neural Network Training – Case Study in Transient Stability Assessment of Large Systems”, Proceedings of the International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, ISAP 1996, pp. 50-54.
- [36] Mansour Y., Vaahedi, E. and El-Sharkawi, M. A. “Large Scale Dynamic Security Screening and Ranking Using Neural Networks”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 2, May 1997, pp. 954-960.
- [37] Amjady N., “Transient Stability Assessment by a New Artificial Neural Network”, IEEE Winter Meeting Conference, Singapore, January 2000.
- [38] Jiriwibhakorn S. and A. H. Coonick, “Fast Critical Clearing Time Estimation of a Large Power System Using Neural Networks and Sobol Sequences”, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 2000, Vol. 1, pp. 522-527.
- [39] Gu, X.P., Tso, S.K. and Zhang, Q. “Combination of rough set theory and artificial neural networks for transient stability assessment”, International Conference on Power System Technology, PowerCon 2000, Vol. 1 , pp. 19 –24.
- [40] Paucar, V.L., Fernandes, F.C., “A methodology based on neural networks for the determination of the critical clearing time of power systems transient stability”, International Conference on Power System Technology, PowerCon 2002, Vol. 4 , pp. 2669 -2673.

- [41] Electric Power Research Institute, "Analysis of Stressed Interconnected Power Networks," Research Project 8010-28, March 1994.
- [42] Equipment and Power System Diagram Section, Transmission System Operation & Planning Department, System Control Operation Division, EGAT, "Switching and Transmission Line Diagram," September 1999.
- [43] Jiriwibhakorn, S. 2001. "Transient Stability Assessment of Power Systems Using Neural Networks," Ph.D. Thesis of University of London and the Diploma of Membership of the Imperial College.
- [44] เกื้อพงษ์ ธิลานุช, สมชาติ จิรวินากร, "การหาช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สูญเสียเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม", วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 19, ฉบับที่ 4, ธันวาคม 2545, หน้า 67-72.
- [45] Bose, N.K. and Liang, P. **Neural network fundamentals with graphs, algorithms, and applications**, New York, McGraw-Hill, Inc. 1996.



ภาคผนวก ก.

Load Flow and Step by Step Time Simulation Program

โปรแกรม Load flow and step by step time simulation ที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พัฒนาโดย Jardim [3] ซึ่งมีขีดความสามารถของโปรแกรมหาดังต่อไปนี้

1. โปรแกรม Load flow สามารถคำนวณโหลดโพล์ของระบบที่มีบัสไม่เกิน 170 บัส และสายส่งหรือหม้อแปลงไฟฟ้าไม่เกิน 500 ชุด
2. สามารถคำนวณหาคำตอบของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้วิธี Time domain (transient) simulation (fixed time step)
3. สามารถคำนวณหา Eigen values และ Eigen vectors ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มี state variable ไม่เกิน 200 ชุด
4. สามารถคำนวณหาคำตอบของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้วิธี Transient energy function (TEF)

ในส่วน of ข้อกำหนดในการเขียนไฟล์ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรมนี จะขอเสนอเป็นภาษาอังกฤษ เพื่อให้คงความถูกต้องไว้มากที่สุด

1. FILE NAME CONVENTIONS

The name of files used or created by the program has to be in capital letters and is composed of:

- name (up to eight characters)
- extension (three characters).

The convention for extensions are as follows:

.FLW - load flow data files	(created by users)
.DYN - dynamic data files	(created by users)
.HST - historical files	(created by the program)
.OPF - load flow output list	(created by the program)
.STB - time simulation or TEF output list	(created by the program)

2. LOAD FLOW DATA FILE

The data is entered in five blocks in the load flow data file, as follows:

- control of load flow execution block (Program Control Block - Section 2.1 below),
- bus data block (Section 2.2 below),
- line data block (Section 2.3 below),
- shunt impedance data block (optional),
- HVDC data block (optional).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 Program Control Block

This block contains two records.

RECORD # 1

COLUMNS	FORMAT	PARAMETER
1- 3	I3	N - Number of buses
4- 6	I3	NC - Number of shunt elements
7- 9	I3	NL - Number of lines
10- 12	I3	NDC - Number of HVDC links

RECORD # 2

COLUMNS	FORMAT	PARAMETER
1- 3	I3	Maximum number of iterations
4- 11	F8.5	Active power convergence tolerance
12- 19	F8.5	Reactive power convergence tolerance

2.2 Bus Data Block

This block has to contain N (number of buses) records of the following type:

COLUMNS	FORMAT	PARAMETER
1- 3	I3	Bus number
4- 10	F7.5	Voltage (p.u.)
11- 17	F7.3	Angle (degree) - optional
18- 27	F10.3	Active power generation (p.u.)
28- 37	F10.3	Reactive power generation (p.u.)
38- 47	F10.3	Active power load (p.u.)
48- 57	F10.3	Reactive power load (p.u.)
58- 60	I3	Bus type (0, 1, 2)

Bus type:

0 - slack bus

1 - PV

2 - PQ

The parameters (in p.u.) have to be in 100 MVA base.

2.3 Line Data Block

This contains NL (number of lines) records with the following format:

COLUMNS	FORMAT	PARAMETER
1- 3	I3	Bus from number
4- 6	I3	Bus to number
7- 14	F8.5	Resistance (p.u.)
15- 22	F8.5	Reactance (p.u.)
23- 30	F8.5	One half of the line shunt capacitance B (p.u.)
31- 36	F6.3	Tap
37	I1	Circuit number

The parameters (in p.u.) have to be in 100 MVA Base. Phase-Shifter transformers are not supported in this version.

2.4 Shunt Impedance block

This block contains NC (number of shunt impedance loads) record in the following format:

COLUMNS	FORMAT	PARAMETER
1- 3	I3	Bus number
4- 10	F7.4	Susceptance B (p.u.)
11- 18	F8.4	Conductance G (p.u.)

2.5 HVDC Block

Each HVDC link requires one record for the rectifier, one record for the inverter and one record for the line.

RECORD # Rectifier

COLUMNS	FORMAT	PARAMETER
2- 4	I3	Bus number
6	A1	Control mode:constant current/constant power (C or P)
7- 13	F7.1	Current or power order (p.u.) on AC power base
14- 19	F6.1	Specified DC voltage (p.u.) on AC voltage base
20- 21	I2	Number of converters in series
22- 26	F5.3	Current margin (p.u.)
27- 31	F5.3	Commutation reactance (p.u.) - Xc
32- 36	F5.1	Specified firing angle (degrees)
37- 41	F5.1	Minimum firing angle (degrees)
42- 46	F5.1	Maximum firing angle (degrees)
47- 51	F5.3	Specified Tap (a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

52- 56	F5.3	Minimum Tap
57- 61	F5.3	Maximum Tap

RECORD # Inverter

COLUMNS	FORMAT	PARAMETER
2- 4	I3	Bus number
6	A1	Control mode: constant extinction angle (E)
7- 13	F7.1	-
14- 19	F6.1	Specified DC voltage (p.u.) on AC voltage base
20- 21	I2	Number of converters in series
22- 26	F5.3	Inverse slope (p.u.) - SI
27- 31	F5.3	Commutation reactance (p.u.) - Xc
32- 36	F5.1	Specified extinction angle (degrees)
37- 41	F5.1	Minimum extinction angle (degrees)
42- 46	F5.1	Maximum extinction angle (degrees)
47- 51	F5.3	Specified Tap (a)
52- 56	F5.3	Minimum Tap
57- 61	F5.3	Maximum Tap

RECORD # Line

COLUMNS	FORMAT	PARAMETER
1- 8	F8.4	Line resistance

3. DYNAMIC DATA FILE

The data are entered in five main blocks as follows:

- Load flow file block (Section 3.1)
- Dynamic models block (Section 3.2)
- Static load model block (Section 3.3)
- Simulation data block (Section 3.4)
- Plotting data block (Section 3.5)

3.1 Load Flow File Block

This block contains only one record with the name of the load flow file. This file can be either an ASCII file with the initial conditions to run a load flow case or a binary file with the result of a load flow case previously computed. The program identifies the type of the file by extension (FLW for ASCII or HST for binary).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 Dynamic Models Block

This block contain data for dynamical components (generator and associated controls, SVC and induction motor). Each component requires a record (Section 3.2.1) specifying the bus number, the number of the model and, if necessary, additional information. The parameters for the model are entered in subsequent records (one or more, depending on the model specified). This block ends with a record containing “999” in the columns 1-3.

3.2.1 Generator Data Format

RECORD # Model Identification

COLUMNS	FORMAT	PARAMETER
1- 3	I3	Bus number
4- 6	I3	Machine model (1, 2, 3, 4 or 9)
7- 9	I3	Voltage regulator model (1, 2, 3 or 4)
10- 12	I3	Power system stabiliser model (1, 2 or 3)
13- 15	I3	Turbine/Governor model (1 or 2)
16- 18	I3	Controlled bus number (if the controlled bus is remote)
19- 24	F6.4	Line drop compensation - resistive - Rc (p.u.)
25- 30	F6.4	Line drop compensation - reactive - Xc (p.u.)

In this research, the classical machine model (model 1) is adopted. Each machine model is represented by required and optional parameters below:

Machine	Required parameters	Optional parameters
1	$X'd, H$	MVA base, Ra, D
2	$X_d, X'd, X_q, T'do, H$	MVA base, Ra, D, X1, S1.0, S1.2
3	$X_d, X'd, X_q, T'do, T'qo, H$	MVA base, Ra, D, X1, S1.0, S1.2
4	$X_d, X'd, X''d, X_q, X''q, T'do, T''do, T''qo, H$	MVA base, Ra, D, X1, S1.0, S1.2
9	- (infinite bus)	MVA base, Ra, X'd

3.3 Static Load Model Block

Constant impedance model is default. If some or all buses need non-linear load models, then a record for each bus is required. This block ends with a record containing “999” in columns 1-3.

Load Model: $S = P + jQ$

$$P = P_{o1} \cdot V^{p_{v1}} + P_{o2} \cdot V^{p_{v2}}$$

$$Q = Q_{o1} \cdot V^{q_{v1}} + Q_{o2} \cdot V^{q_{v2}}$$

RECORD

COLUMNS	FORMAT	PARAMETER
1- 3	I3	Bus number
4- 11	F8.4	Percent of bus active load for Po1
12- 19	F8.4	pv1
20- 27	F8.4	Percent of bus reactive load for Qo1
28- 38	F8.4	qv1
36- 43	F8.4	Percent of bus reactive load for Po2
44- 51	F8.4	pv2
52- 59	F8.4	Percent of bus reactive load for Qo2
60- 67	F8.4	qv2

If (Po1 + Po2) and/or (Qo1 + Qo2) is less than 100%, then the rest is simulated as constant.

3.4 Simulation Data Block

Different events can be simulated in sequence. Each event requires one or more records. Up to five records can be entered. This block ends with a record containing "999" in columns 1-3.

RECORD

COLUMNS	FORMAT	PARAMETER
1- 3	I3	Fault code (0, 1, 2, 3, 4, 10, 20, 30)
4- 6	I3	Fault bus 1 (if any)
7- 9	I3	Fault bus 2 (if any)
10- 12	I3	Circuit number (if any) - default is 1.
13- 20	F8.4	Fault resistance (if any)
21- 28	F8.4	Fault resistance (if any)
29- 36	F8.4	Simulation time (second)
37- 44	F8.4	Time step (second)
45- 52	F8.4	Convergence tolerance for numerical integration
53- 55	I3	Print interval (number of time steps)

Fault code:

0 - No disturbance. Requires one record.

1 - Short-circuit. Requires one record.

2 - Short-circuit on bus 1 and line switching (bus 1 - bus 2). Requires one record.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3 - Short-circuit on bus 1, switch-off lines (bus 1 - bus 2, circuit number) and (bus 3 - bus 4, circuit number). Buses 3 and 4 are entered in the same columns as buses 1 and 2 in a subsequent record. Thus this event requires two records. A negative integer number has to be placed in the fault code columns (1-3) in this subsequent record.
- 4 - Short-circuit on bus 1, switch-off lines (bus 1 - bus 2, circuit number), (bus 3 - bus 4, circuit number) and (bus 5 - bus 6, circuit number). Buses 3, 4, 5 and 6 are entered in the same columns as buses 1 and 2 in two subsequent records. Therefore three records are required. A negative integer number has to be placed in the fault code columns (1-3) in these two subsequent records.
- 5 - Short-circuit on bus 1, switch-off four lines. The specification of the three additional lines are entered in subsequent records following the same procedure as fault code 4.
- 6 - Short-circuit on bus 1, switch-off five lines.
- 7 - Short-circuit on bus 2, switch-off six lines.
- 10 - Short-circuit Switching-off line (bus 1 - bus 2, circuit number). Requires one record.
- 20 - Generator switching-off (not implemented yet).
- 30 - Step in the voltage reference of the voltage regulator. The percentage and signal is specified in columns (13-20).

3.5 Plotting Data Block

The first record informs the number of plots and the number of variables per plot. Up to five plots are possible. Each plot can have five variables.

RECORD # Number of plots and variables

COLUMNS	FORMAT	PARAMETER
1- 3	I3	Number of variables for plotting group 1
4- 6	I3	Number of variables for plotting group 2
7- 9	I3	Number of variables for plotting group 3
10- 12	I3	Number of variables for plotting group 4
13- 15	I3	Number of variables for plotting group 5

The subsequent records specify the variables.

RECORD # Variables

COLUMNS	FORMAT	PARAMETER
2	A1	Variable type
4- 6	I3	Bus number - NBS
8- 10	I3	Block number - BN
12-14	I3	Reference bus - NBR

Variable types:

V - Bus voltage

I - Machine current

P - Machine active power

Q - Machine reactive power

A - Angular difference between machines NBS and NBR

C - Power on the center of inertia – P_{coi}

D - Dot product to identify the PEBS

K - Kinetic energy

Z - Potential energy

T - Total energy

O - Order of integration

H - Time step

E - Machine data - block number - Machine (BN):

0	EI
1	E''_q or E'_q or E_q
2	E''_d or E'_d or E_d
3	Absolute angle
4	speed - ω
1	E_{fd}
2	P_m
3	V_{ref}
4	ω_{ref}
5	B_{ref}
6	B

R - Block Number - Regulator (BN):

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลของระบบไฟฟ้าที่ทำการศึกษา

ภาคผนวกนี้แสดงรายละเอียดของข้อมูลของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system และระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในบริเวณภาคกลางตะวันตก และภาคใต้ โดยพารามิเตอร์ทั้งหมดของระบบไฟฟ้ากำลังทั้งสองระบบจะอยู่บนค่าฐาน 100 MVA

1 ระบบ IEEE 50 generators test system

1.1 ข้อมูลของบัส (Bus data)

รายละเอียดของระบบไฟฟ้ากำลังในตารางต่อไปนี้นี้จะกล่าวถึง

V	แรงดันที่บัส (p.u.)
δ	มุมของแรงดันที่บัส (องศา)
P_g	กำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิต (MW)
Q_g	กำลังไฟฟารีแอกทีฟที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิต (MVAR)
P_c	กำลังไฟฟ้าแอกทีฟของโหลด (MW)
Q_c	กำลังไฟฟารีแอกทีฟของโหลด (MVAR)
G	ตัวต้านทานขนาน หรือความต้านทานของรีแอกแตนซ์ (p.u.)
B	ตัวเก็บประจุขนาน (+) หรือ รีแอกแตนซ์ขนาน (-)(p.u.)

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลบัสของระบบไฟฟ้า IEEE 50 generators test system

Bus	V	δ	P_g	Q_g	P_c	Q_c	G	B
1	1.08100	-4.320	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
2	1.08090	-4.390	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3	1.10150	-4.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
4	1.10150	-4.020	0.000	0.000	0.000	0.000	-1.2600	0.0000
5	1.10180	-4.020	0.000	0.000	0.000	0.000	-1.2600	0.0000
6	1.04330	-7.840	0.000	0.000	0.000	0.000	-1.2600	0.0000
7	1.07630	3.210	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
8	1.11370	1.150	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
9	1.03960	-8.050	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
10	1.03960	-8.050	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
11	1.09370	-10.660	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
12	1.03890	-8.770	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Bus	V	δ	P_R	Q_R	P_c	Q_c	G	B
13	1.09820	-11.430	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
14	1.03850	-9.180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
15	1.06830	-9.810	0.000	0.000	0.000	0.000	-1.2600	0.0000
16	1.06860	-9.860	0.000	0.000	0.000	0.000	-1.2600	0.0000
17	1.00120	-9.440	0.000	0.000	0.000	0.000	-2.5000	0.0000
18	1.07460	-10.880	0.000	0.000	0.000	0.000	-1.2600	0.0000
19	1.07080	-10.960	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.5800	0.0000
20	1.11310	-10.960	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
21	1.10860	-11.240	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
22	1.03110	-3.880	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
23	1.09790	-5.510	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
24	1.02720	2.300	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
25	1.03800	-9.870	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
26	1.08940	-11.370	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
27	1.03890	-13.070	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
28	1.07620	-15.280	0.000	0.000	0.000	0.000	-1.2600	0.0000
29	1.07460	-15.440	0.000	0.000	0.000	0.000	-1.2600	0.0000
30	1.07310	-5.350	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
31	1.09050	-11.810	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
32	1.09370	-10.660	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
33	1.13920	-4.060	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
34	1.13870	-4.000	0.000	0.000	45.050	46.560	0.0000	0.0000
35	1.13900	-4.080	0.000	0.000	49.190	27.530	0.0000	0.0000
36	1.13850	-3.820	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
37	1.12350	-6.230	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
38	1.13060	-5.290	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
39	1.12700	-7.920	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
40	1.12690	-7.920	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
41	1.11880	-10.430	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.1000	0.5400
42	1.11880	-10.450	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.1000	0.5480
43	1.11890	-10.400	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
44	1.11890	-10.420	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
45	1.11730	-11.410	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
46	1.11730	-11.410	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
47	1.12750	-6.730	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0537	0.1520
48	1.12780	-6.710	0.000	0.000	0.000	0.000	0.5200	0.1380

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Bus	V	δ	P_r	Q_r	P_c	Q_c	G	B
49	1.12790	-6.700	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
50	1.12760	-6.720	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
51	1.11240	-10.160	0.000	0.000	58.450	28.440	0.0000	0.0000
52	1.11180	-11.130	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.0970	0.2300
53	1.11180	-11.130	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.0970	0.2300
54	1.11310	-11.790	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.0930	0.1880
55	1.11310	-11.790	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.0920	0.1870
56	1.10720	-9.940	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.0750	0.1860
57	1.10720	-9.940	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.0700	0.1880
58	1.10670	-9.760	0.000	0.000	76.300	-10.800	1.4000	1.2100
59	1.11650	-10.840	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0863	5.0800
60	1.13700	-6.370	51.000	32.920	0.000	0.000	1.6500	2.0100
61	1.11440	-11.890	0.000	0.000	0.000	0.000	1.4900	0.0000
62	1.05660	-14.470	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
63	1.11090	-13.980	0.000	0.000	0.000	0.000	5.2500	8.2300
64	1.09800	-9.290	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.2600	1.2300
65	1.09800	-9.290	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.2600	1.2400
66	1.11290	1.320	0.000	0.000	102.200	26.700	18.9700	2.1600
67	1.09000	-5.660	1,486.000	285.200	0.000	0.000	12.8000	18.2100
68	1.20860	-30.990	0.000	0.000	0.000	-7.410	-0.2500	0.5630
69	1.09680	-10.420	0.000	0.000	0.000	0.000	-1.4400	9.7100
70	0.99980	-14.170	0.000	0.000	0.000	56.630	-0.8600	1.0300
71	1.02750	-14.260	0.000	0.000	0.000	-21.200	-1.2200	1.0600
72	1.10070	-11.190	0.000	0.000	0.000	0.000	0.2400	10.1900
73	1.09750	-11.060	0.000	0.000	0.000	0.000	8.4100	12.2200
74	1.09730	-11.460	0.000	0.000	81.900	43.700	5.7400	8.5700
75	1.11790	-15.190	0.000	0.000	0.000	0.000	1.9900	3.8700
76	1.02090	5.540	0.000	0.000	0.000	0.000	-1.8500	-6.6700
77	0.98800	6.720	0.000	0.000	0.000	0.000	-1.2500	0.0000
78	1.07400	-5.190	0.000	0.000	89.000	26.800	0.0000	0.0000
79	1.05200	-9.510	250.200	-15.950	9.100	3.000	0.2710	2.3800
80	1.06900	-8.210	47.000	-15.060	17.100	5.000	2.9900	-0.0008
81	1.13040	-25.860	0.000	0.000	82.200	-93.100	-0.4700	0.7000
82	0.97500	-18.660	70.000	17.150	2.100	1.100	-0.2800	1.1100
83	1.09850	-5.380	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.0042	1.0500
84	1.11560	-9.440	0.000	0.000	24.300	8.200	0.0000	0.0000

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Bus	V	δ	P_g	Q_g	P_c	Q_c	G	B
85	1.11650	-13.050	0.000	0.000	27.400	0.300	0.0000	0.0000
86	1.05670	-14.010	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.2200	2.9200
87	1.06520	-7.170	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.4700	0.3770
88	1.10940	-8.350	0.000	0.000	69.000	20.900	0.0000	0.0000
89	1.06600	3.680	673.000	136.390	0.600	0.200	0.7110	6.7800
90	0.95000	-7.350	22.000	-3.870	4.600	1.500	-0.1900	0.2950
91	1.00000	-9.280	64.000	-1.540	0.000	0.000	-0.2700	0.1930
92	0.95610	-12.750	0.000	0.000	0.000	31.020	-0.4300	0.4340
93	1.00000	-1.920	700.000	373.810	100.400	73.200	0.0000	0.0000
94	1.02000	-0.740	300.000	19.050	15.400	7.600	-1.4100	1.4000
95	0.92000	18.880	131.000	10.120	6.700	2.200	-0.5800	0.2720
96	1.00000	-8.980	60.000	21.110	0.000	0.000	-0.4500	0.4780
97	0.96700	-4.340	140.000	45.630	0.000	0.000	-1.7700	1.2900
98	0.97000	5.190	426.000	-32.730	0.000	0.000	-1.2100	0.8210
99	1.00000	1.100	200.000	-8.360	10.460	5.230	0.0000	0.0000
100	1.01400	0.700	170.000	58.720	0.000	0.000	-1.0100	0.5910
101	1.03900	-6.090	310.900	148.660	17.800	4.500	-2.3800	0.6470
102	1.01900	-4.760	2,040.000	488.900	37.600	9.200	-6.1900	4.5800
103	1.00000	1.510	135.000	4.960	0.000	0.000	-0.4500	0.6240
104	1.00590	13.680	2,000.000	500.000	30.200	7.600	0.0000	0.0000
105	1.00700	-2.800	1,620.000	388.340	96.000	167.400	-9.9900	0.2420
106	1.00500	-2.750	1,080.000	209.360	64.000	16.000	-7.1900	0.3690
107	1.02110	-13.570	0.000	0.000	-17.500	-12.800	-0.2200	0.2880
108	1.01400	-14.030	800.000	77.280	0.000	0.000	-2.4400	5.2000
109	0.91500	-18.460	52.000	-15.550	0.000	0.000	-0.4700	0.8450
110	1.00000	-1.310	700.000	519.840	100.400	73.200	0.0000	0.0000
111	1.00000	7.970	2,000.000	563.720	60.400	1,166.000	-9.9900	0.2330
112	1.03700	-6.260	300.000	140.110	18.600	4.600	-2.3600	0.6430
113	0.97800	-4.390	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
114	0.97800	-4.390	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
115	1.04900	-15.610	2,493.000	142.720	683.500	184.700	0.0941	28.5600
116	1.04300	-16.860	2,713.000	631.840	792.600	315.500	-1.9500	19.3000
117	1.03000	-15.320	2,627.000	258.540	485.300	71.400	-0.5400	24.1000
118	1.01000	-17.790	4,220.000	660.380	651.900	328.400	-9.7900	47.8800
119	1.01300	-59.410	8,954.000	4,748.480	2,094.000	3,774.000	-9.9900	99.9900
120	1.03310	-51.600	0.000	0.000	-408.000	175.100	8.5500	20.2600

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Bus	V	δ	P_g	Q_g	P_c	Q_c	G	B
121	1.04600	-20.200	2,997.000	-160.220	237.700	-17.300	10.5500	3.0600
122	1.00000	-2.790	1,009.000	174.040	29.200	7.000	-0.6100	3.9700
123	1.01710	-33.120	0.000	0.000	-84.000	-19.000	0.0140	1.1800
124	1.00000	-1.890	3,005.000	569.190	94.100	780.300	-9.9900	7.6600
125	1.00840	-32.590	0.000	0.000	-712.000	-319.000	-0.7100	28.3100
126	1.05240	-73.900	0.000	0.000	-333.000	-160.000	3.4700	16.0400
127	1.00700	-36.400	0.000	0.000	-546.000	-72.000	-0.5400	3.0500
128	1.02500	-39.710	12,963.000	2,610.820	4,075.000	703.500	-4.7200	52.5200
129	0.98020	-73.070	0.000	0.000	-482.000	-122.000	3.8700	38.5500
130	1.05700	-51.870	5,937.000	1,834.960	4,328.000	944.300	-0.9100	38.3000
131	1.04200	-24.320	28,300.000	7,473.040	21,840.000	4,320.000	-7.8000	51.4500
132	1.04200	-7.240	3,095.000	633.420	491.900	110.200	-2.2600	12.3900
133	1.09220	-11.600	0.000	0.000	-83.000	-36.300	-0.0590	1.0300
134	1.04400	-10.820	20,626.000	7,402.140	22,309.000	7,402.000	-0.7800	-1.4100
135	1.10700	29.040	5,982.000	1,564.840	4,298.000	1,264.000	8.3500	-9.9900
136	1.08300	4.390	51,950.000	14,453.500	52,951.000	13,552.000	3.7500	-9.9900
137	1.06400	-72.730	12,068.000	3,450.760	12,946.000	2,608.000	-2.1900	4.9900
138	1.11380	12.010	0.000	0.000	-363.000	-188.000	-0.8100	4.3300
139	1.04000	-10.560	56,834.000	15,849.650	57,718.000	13,936.000	-9.9900	16.0900
140	1.05000	-26.160	23,123.000	6,710.470	24,775.000	6,676.000	-0.7700	-2.8900
141	1.05300	-9.120	37,911.000	11,669.520	32,799.000	11,361.000	-9.9900	52.1200
142	1.15500	-10.730	24,449.000	5,496.120	17,737.000	3,934.000	22.1000	43.2300
143	1.03100	-13.660	5,254.000	2,158.630	4,672.000	1,709.000	-9.9900	5.8600
144	0.99700	-8.580	11,397.000	2,686.850	9,602.000	2,203.000	-9.9900	-4.3600
145	1.05200	5.020	14,118.620	2,987.150	9,173.000	1,555.000	4.5700	-9.9990

ข.1.2 ข้อมูลของสายส่ง (Branch data)

รายละเอียดของระบบไฟฟ้ากำลังในตารางต่อไปนี้จะกล่าวถึง

From จากบัสหมายเลข

To ไปยังบัสหมายเลข

R ความต้านทานของสายส่ง หรือหม้อแปลงไฟฟ้า

X รีแอกแตนซ์ของสายส่ง หรือหม้อแปลงไฟฟ้า

B กำลังอัดประจุสาย

Tap แท็ปของหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็น Circuit ที่วงจรที่สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลของสายส่งของระบบไฟฟ้า IEEE 50 generators test system

From	To	R	X	B	Tap	Circuit
1	2	0.00003	0.00080	0.03160	1.000	1
1	2	0.00003	0.00080	0.03160	1.000	2
1	3	-0.00900	-0.17180	0.00000	0.935	1
1	4	-0.00900	-0.17180	0.00000	0.935	1
1	5	-0.00890	-0.16970	0.00000	0.935	1
1	6	0.00194	0.02090	1.18960	1.000	1
1	33	0.00010	0.00600	0.00000	0.935	1
1	93	0.00020	0.01380	0.00000	1.103	1
1	93	0.00020	0.01380	0.00000	1.103	2
2	6	0.00194	0.02090	1.18960	1.000	1
2	113	0.00000	0.01480	0.00000	1.105	1
2	114	0.00018	0.01450	0.00000	1.105	1
3	33	0.00020	0.02210	0.00000	1.000	1
4	33	0.00020	0.02210	0.00000	1.000	1
5	33	0.00020	0.02190	0.00000	1.000	1
6	7	0.00129	0.01390	0.73260	1.000	1
6	9	0.00016	0.00170	0.08760	1.000	1
6	10	0.00016	0.00170	0.08760	1.000	1
6	12	0.00020	0.00210	0.43880	1.000	1
6	12	0.00020	0.00210	0.43880	1.000	2
7	8	-0.01120	-0.15160	0.00000	0.971	1
7	66	0.00015	0.00970	0.00000	0.971	1
7	104	0.00036	0.01900	0.00000	1.105	1
7	104	0.00041	0.01740	0.00000	1.105	2
8	66	0.00020	0.02990	0.00000	1.000	1
8	66	0.00020	0.02210	0.00000	1.000	2
9	11	-0.02170	-0.30620	0.00000	0.916	1
9	69	0.00040	0.01880	0.00000	0.916	1
10	32	-0.02700	-0.30410	0.00000	0.916	1
10	69	0.00040	0.01870	0.00000	0.916	1
11	69	0.00020	0.02620	0.00000	1.000	1
12	13	-0.02230	-0.30990	0.00000	0.916	1
12	13	-0.02370	-0.31600	0.00000	0.916	2
12	13	-0.02370	-0.31600	0.00000	0.916	3
12	14	0.00096	0.00910	0.42780	1.000	1
12	14	0.00096	0.00910	0.42780	1.000	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

From	To	R	X	B	Tap	Circuit
12	25	0.00051	0.00550	0.31250	1.000	1
12	25	0.00051	0.00550	0.31250	1.000	2
12	72	0.00030	0.01890	0.00000	0.916	1
12	72	0.00030	0.01900	0.00000	0.916	2
12	72	0.00030	0.01900	0.00000	0.916	3
13	72	0.00020	0.02600	0.00000	1.000	1
13	72	0.00030	0.02620	0.00000	1.000	2
13	72	0.00020	0.02600	0.00000	1.000	3
14	15	-0.04150	-0.39960	0.00000	0.916	1
14	16	-0.01000	-0.16690	0.00000	0.916	1
14	17	0.00339	0.03670	1.72910	1.000	1
14	17	0.00352	0.03670	1.72580	1.000	2
14	58	0.00020	0.00970	0.00000	0.916	1
15	58	0.00020	0.02550	0.00000	1.000	1
16	58	0.00020	0.02200	0.00000	1.000	1
17	18	-0.31810	-1.31500	0.00000	0.870	1
17	19	0.00000	-0.84700	0.00000	0.863	1
17	20	0.00000	-0.86760	0.00000	0.863	1
17	21	-0.00950	-0.16150	0.00000	0.870	1
17	22	0.00228	0.02760	1.31020	1.000	1
17	59	0.00010	0.00710	0.00000	0.870	1
18	59	0.00020	0.02980	0.00000	1.000	1
19	59	0.00000	0.06290	0.00000	1.000	1
20	59	0.00000	0.06380	0.00000	1.000	1
21	59	0.00020	0.03290	0.00000	1.000	1
22	23	0.00000	-0.37870	0.00000	0.932	1
22	24	0.00173	0.02080	0.98240	1.000	1
22	30	0.00000	-0.30660	0.00000	0.953	1
22	78	0.00000	0.02680	0.00000	0.953	1
22	83	0.00000	0.03490	0.00000	0.932	1
23	83	0.00040	0.05950	0.00000	1.000	1
23	83	0.00030	0.05970	0.00000	1.000	2
24	76	0.00020	0.00880	0.00000	0.989	1
24	77	-0.00230	-0.06030	0.00000	0.989	1
25	26	-0.00600	-0.13750	0.00000	0.916	1
25	27	0.00230	0.02660	1.52540	1.000	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

From	To	R	X	B	Tap	Circuit
25	27	0.00230	0.02660	1.52540	1.000	2
25	31	-0.00820	-0.16480	0.00000	0.916	1
25	73	0.00030	0.01720	0.00000	0.916	1
25	74	0.00040	0.01790	0.00000	0.916	1
26	73	0.00030	0.02670	0.00000	1.000	1
27	28	-0.11530	-0.74530	0.00000	0.907	1
27	29	-0.01630	-0.26180	0.00000	0.907	1
27	75	0.00016	0.01000	0.00000	0.907	1
28	75	0.00020	0.02900	0.00000	1.000	1
29	75	0.00020	0.02690	0.00000	1.000	1
30	78	0.00000	0.03350	0.00000	1.000	1
31	74	0.00030	0.02790	0.00000	1.000	1
32	69	0.00020	0.02650	0.00000	1.000	1
33	34	0.00006	0.00090	0.00030	1.000	1
33	35	0.00006	0.00090	0.00030	1.000	1
33	37	0.00996	0.07070	0.05580	1.000	1
33	38	0.00995	0.06930	0.05550	1.000	1
33	39	0.00850	0.06990	0.05030	1.000	1
33	40	0.00849	0.06980	0.05020	1.000	1
33	49	0.00560	0.04930	0.03890	1.000	1
33	50	0.00560	0.04930	0.03890	1.000	1
33	110	0.00024	0.01570	0.00000	1.180	1
33	110	0.00023	0.01560	0.00000	1.180	2
34	36	0.00025	0.00220	0.00030	1.000	1
36	99	0.00080	0.04550	0.00000	1.129	1
37	87	0.00093	0.04420	0.00000	1.050	1
37	88	0.00310	0.16510	0.00000	1.000	1
38	88	0.00310	0.16380	0.00000	1.000	1
39	43	0.00602	0.04950	0.03560	1.000	1
39	84	0.00722	0.27860	0.00000	1.000	1
40	44	0.00603	0.04960	0.03570	1.000	1
40	84	0.00729	0.27560	0.00000	1.000	1
41	42	0.00050	0.15140	0.00000	1.000	1
41	43	0.00001	0.00090	0.00030	1.000	1
42	44	0.00001	0.00090	0.00030	1.000	1
43	46	0.00618	0.05080	0.03660	1.000	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

From	To	R	X	B	Tap	Circuit
44	45	0.00618	0.05080	0.03660	1.000	1
45	61	0.00445	0.03660	0.02630	1.000	1
45	85	0.00000	0.26000	0.00000	1.000	1
46	61	0.00445	0.03660	0.02630	1.000	1
46	85	0.00000	0.25920	0.00000	1.000	1
47	48	-0.01000	0.23060	0.00000	1.000	1
47	50	0.00001	0.00090	0.00030	1.000	1
47	87	0.08310	0.40100	0.00000	1.000	1
48	49	0.00001	0.00090	0.00030	1.000	1
48	87	0.09980	0.43600	0.00000	1.000	1
49	51	0.00898	0.07900	0.06240	1.000	1
50	51	0.00898	0.07900	0.06240	1.000	1
51	52	0.00290	0.02790	0.02330	1.000	1
51	53	0.00290	0.02790	0.02330	1.000	1
51	56	0.00759	0.04830	0.03560	1.000	1
51	57	0.00759	0.04830	0.03560	1.000	1
52	53	-0.00670	0.39110	0.00000	1.000	1
52	54	0.00470	0.02930	0.02310	1.000	1
53	55	0.00470	0.02930	0.02310	1.000	1
54	55	-0.05530	0.92890	0.00000	1.000	1
54	61	0.00141	0.00870	0.00690	1.000	1
55	61	0.00141	0.00870	0.00690	1.000	1
56	57	-0.00900	0.38950	0.00000	1.000	1
56	58	0.00190	0.01200	0.00890	1.000	1
57	58	0.00190	0.01200	0.00890	1.000	1
58	59	0.66740	2.21750	0.00000	1.000	1
58	72	0.03020	0.23640	0.00000	1.000	1
58	87	0.08630	0.39060	0.00000	1.000	1
58	98	0.01310	0.17650	0.00000	1.000	1
58	100	0.11930	1.26900	0.00000	1.000	1
58	103	0.84160	5.53830	0.00000	1.000	1
59	60	-0.18030	5.96590	0.00000	1.000	1
59	72	0.86130	3.04850	0.00000	1.000	1
59	79	0.00990	0.26440	0.00000	1.000	1
59	80	0.28760	2.38980	0.00000	1.000	1
59	89	0.34210	9.05710	0.00000	1.000	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

From	To	R	X	B	Tap	Circuit
59	92	-0.00700	0.56780	0.00000	1.000	1
59	94	0.70410	5.98850	0.00000	1.000	1
59	98	0.10600	0.58450	0.00000	1.000	1
59	100	0.01830	0.20160	0.00000	1.000	1
59	103	0.03680	0.33410	0.00000	1.000	1
59	107	0.03720	0.88340	0.00000	1.000	1
60	135	-1.83100	9.79640	0.00000	1.000	1
60	79	-0.03750	1.10680	0.00000	1.000	1
60	80	0.06550	2.64410	0.00000	1.000	1
60	90	-0.02010	1.51350	0.00000	1.000	1
60	92	-0.26400	3.71390	0.00000	1.000	1
60	94	0.00120	0.07750	0.00000	1.000	1
60	95	-0.08550	0.99260	0.00000	1.000	1
60	138	-0.36390	1.79360	0.00000	1.000	1
61	62	-0.03620	-0.26080	0.00000	1.050	1
61	62	-0.04720	-0.54380	0.00000	1.050	2
61	63	0.00812	0.07820	0.06590	1.000	1
61	63	0.00812	0.07820	0.06590	1.000	2
61	64	0.00242	0.03180	0.02840	1.000	1
61	65	0.00242	0.03180	0.02840	1.000	1
61	86	0.00132	0.03200	0.00000	1.050	1
61	86	0.00110	0.03700	0.00000	1.050	2
61	86	0.00110	0.03700	0.00000	1.050	3
62	86	0.00360	0.05010	0.00000	1.000	1
62	86	0.00130	0.08380	0.00000	1.000	2
63	64	0.01470	0.28250	0.00000	1.000	1
63	65	0.01470	0.28130	0.00000	1.000	1
63	66	0.00560	0.09000	0.00000	1.000	1
63	67	0.03210	0.27850	0.00000	1.000	1
63	69	0.01070	0.15710	0.00000	1.000	1
63	102	0.01060	0.15830	0.00000	1.000	1
63	102	0.01060	0.15760	0.00000	1.000	2
63	102	0.01070	0.16040	0.00000	1.000	3
63	102	0.01040	0.15420	0.00000	1.000	4
63	116	-0.38970	6.85880	0.00000	1.000	1
63	117	0.00300	0.05600	0.00000	1.000	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

From	To	R	X	B	Tap	Circuit
63	118	-0.01250	0.24250	0.00000	1.000	1
63	124	-0.12650	2.02200	0.00000	1.000	1
64	65	0.00130	0.16740	0.00000	1.000	1
64	66	0.00390	0.06840	0.00000	1.000	1
64	67	0.02330	0.21200	0.00000	1.000	1
64	69	0.00750	0.11960	0.00000	1.000	1
64	97	-0.43360	8.29230	0.00000	1.000	1
64	124	-0.10410	1.53750	0.00000	1.000	1
65	66	0.00390	0.06820	0.00000	1.000	1
65	67	0.02330	0.21110	0.00000	1.000	1
65	69	0.00750	0.11910	0.00000	1.000	1
65	97	-0.42920	8.25820	0.00000	1.000	1
65	124	-0.10320	1.53120	0.00000	1.000	1
66	67	0.00810	0.06750	0.00000	1.000	1
66	68	-2.47300	2.47200	0.00000	1.000	1
66	69	0.00280	0.03810	0.00000	1.000	1
66	97	-0.11190	2.64320	0.00000	1.000	1
66	111	0.00000	0.02640	0.00000	1.000	1
66	111	0.00057	0.02660	0.00000	1.000	2
66	111	0.00000	0.02730	0.00000	1.000	3
66	111	0.00057	0.02640	0.00000	1.000	4
66	124	-0.02830	0.49020	0.00000	1.000	1
67	68	-3.44300	3.71720	0.00000	1.000	1
67	69	0.00610	0.05500	0.00000	1.000	1
67	97	0.00630	0.11660	0.00000	1.000	1
67	119	-0.22130	9.39180	0.00000	1.000	1
67	120	-0.00340	1.78470	0.00000	1.000	1
67	121	0.00820	1.17000	0.00000	1.000	1
67	122	-0.00470	0.44730	0.00000	1.000	1
67	124	0.00030	0.00650	0.00000	1.000	1
67	125	0.00620	0.25190	0.00000	1.000	1
67	132	-0.31940	4.35660	0.00000	1.000	1
68	69	-0.69200	0.69840	0.00000	1.000	1
69	70	0.00850	0.33330	0.00000	1.000	1
69	71	0.00750	0.31200	0.00000	1.000	1
69	72	0.00130	0.01000	0.00000	1.000	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

From	To	R	X	B	Tap	Circuit
69	73	0.00980	0.07470	0.00000	1.000	1
69	74	0.01350	0.07410	0.00000	1.000	1
69	97	-0.06740	1.58490	0.00000	1.000	1
69	101	0.01740	0.21880	0.00000	1.000	1
69	112	0.01750	0.22010	0.00000	1.000	1
69	124	-0.02670	0.39860	0.00000	1.000	1
70	71	-0.48910	2.66130	0.00000	1.000	1
70	72	-0.00620	0.12160	0.00000	1.000	1
70	73	-0.04240	0.91250	0.00000	1.000	1
70	74	0.00320	0.91380	0.00000	1.000	1
70	101	-0.12480	1.04090	0.00000	1.000	1
70	112	-0.12570	1.04710	0.00000	1.000	1
71	72	-0.00600	0.11380	0.00000	1.000	1
71	73	-0.04090	0.85410	0.00000	1.000	1
71	74	0.00180	0.85530	0.00000	1.000	1
71	101	-0.15920	1.23030	0.00000	1.000	1
71	112	-0.16030	1.23770	0.00000	1.000	1
72	73	0.00150	0.02750	0.00000	1.000	1
72	74	0.00280	0.02740	0.00000	1.000	1
72	98	0.01380	0.24170	0.00000	1.000	1
72	100	0.13370	1.73840	0.00000	1.000	1
72	101	0.00020	0.08020	0.00000	1.000	1
72	103	1.02240	7.59450	0.00000	1.000	1
72	112	0.00020	0.08060	0.00000	1.000	1
73	74	-0.00070	0.03930	0.00000	1.000	1
73	75	0.01470	0.25810	0.00000	1.000	1
73	81	-0.01220	0.30680	0.00000	1.000	1
73	82	0.00360	2.01690	0.00000	1.000	1
73	91	0.02710	0.57320	0.00000	1.000	1
73	96	0.02450	0.48050	0.00000	1.000	1
73	101	0.00440	0.60140	0.00000	1.000	1
73	105	0.00070	0.03250	0.00000	1.000	1
73	105	0.00070	0.03250	0.00000	1.000	2
73	105	0.00060	0.02950	0.00000	1.000	3
73	108	-0.01820	0.58320	0.00000	1.000	1
73	109	0.05240	3.00590	0.00000	1.000	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

From	To	R	X	B	Tap	Circuit
73	112	0.00430	0.60500	0.00000	1.000	1
73	121	-0.02680	1.76530	0.00000	1.000	1
74	75	0.02150	0.32770	0.00000	1.000	1
74	81	-0.03330	0.46310	0.00000	1.000	1
74	82	-0.00980	1.98590	0.00000	1.000	1
74	91	0.04130	0.75110	0.00000	1.000	1
74	96	0.43500	7.69010	0.00000	1.000	1
74	101	0.03440	0.60050	0.00000	1.000	1
74	106	0.00300	0.03350	0.00000	1.000	1
74	106	0.00050	0.03280	0.00000	1.000	2
74	108	-0.01870	0.45440	0.00000	1.000	1
74	109	0.10040	3.46970	0.00000	1.000	1
74	112	0.03450	0.60420	0.00000	1.000	1
74	121	-0.03480	1.37570	0.00000	1.000	1
75	82	0.07770	1.12500	0.00000	1.000	1
75	91	-0.22550	3.14420	0.00000	1.000	1
75	96	-0.45160	4.63100	0.00000	1.000	1
75	108	0.00420	0.10490	0.00000	1.000	1
75	109	0.10460	1.44650	0.00000	1.000	1
75	121	0.01780	0.31720	0.00000	1.000	1
76	77	0.00020	0.01600	0.00000	1.000	1
76	89	0.00110	0.02210	0.00000	1.000	1
79	80	0.04400	0.09910	0.00000	1.000	1
79	90	0.05060	2.47100	0.00000	1.000	1
79	92	0.00170	0.30320	0.00000	1.000	1
79	94	0.12750	1.11950	0.00000	1.000	1
79	95	0.30500	6.41540	0.00000	1.000	1
79	107	0.07860	1.41400	0.00000	1.000	1
80	90	0.46580	5.87560	0.00000	1.000	1
80	92	0.11920	1.50530	0.00000	1.000	1
80	94	0.46000	2.64750	0.00000	1.000	1
82	91	-0.23490	2.41880	0.00000	1.000	1
82	108	-0.07420	0.72780	0.00000	1.000	1
82	109	-0.00710	0.26340	0.00000	1.000	1
82	121	-0.18920	2.20540	0.00000	1.000	1
83	89	0.05820	0.38550	0.00000	1.000	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา ห้ามมิให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตในทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

From	To	R	X	B	Tap	Circuit
89	103	-1.07300	4.14330	0.00000	1.000	1
90	92	-0.13800	8.29590	0.00000	1.000	1
90	94	0.06890	1.07170	0.00000	1.000	1
91	96	-0.12240	4.24630	0.00000	1.000	1
91	108	-0.10780	0.69940	0.00000	1.000	1
91	109	-0.26990	4.26340	0.00000	1.000	1
91	121	-0.29240	2.12100	0.00000	1.000	1
92	94	0.28830	3.77170	0.00000	1.000	1
92	107	0.01760	3.02270	0.00000	1.000	1
94	95	0.05340	0.99600	0.00000	1.000	1
94	138	-0.11250	1.83850	0.00000	1.000	1
95	138	-0.07320	0.63890	0.00000	1.000	1
96	108	-0.82150	6.11430	0.00000	1.000	1
97	124	-0.37930	1.95570	0.00000	1.000	1
98	100	-0.00630	0.32690	0.00000	1.000	1
98	103	0.05440	1.43580	0.00000	1.000	1
100	103	-0.02490	0.48910	0.00000	1.000	1
101	112	-0.01380	0.36100	0.00000	1.000	1
102	117	-0.00030	0.01900	0.00000	1.000	1
102	118	-0.02670	0.32220	0.00000	1.000	1
108	109	-0.08250	1.27130	0.00000	1.000	1
108	121	-0.00090	0.04310	0.00000	1.000	1
109	121	-0.18810	3.84990	0.00000	1.000	1
115	116	0.00080	0.02910	0.00000	1.000	1
115	117	-0.00920	0.22220	0.00000	1.000	1
115	118	-0.00440	0.06770	0.00000	1.000	1
115	143	-0.10170	0.49240	0.00000	1.000	1
116	117	0.00191	0.02880	0.00000	1.000	1
116	118	-0.00100	0.04400	0.00000	1.000	1
116	143	-0.21870	1.28960	0.00000	1.000	1
117	118	0.00080	0.00810	0.00000	1.000	1
117	143	-0.08340	0.68540	0.00000	1.000	1
118	131	-0.89250	6.23850	0.00000	1.000	1
118	132	-0.69670	8.14300	0.00000	1.000	1
118	143	-0.00110	0.02310	0.00000	1.000	1
119	120	0.00100	0.02360	0.00000	1.000	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

From	To	R	X	B	Tap	Circuit
119	121	-0.01100	0.29010	0.00000	1.000	1
119	122	-0.60130	5.89410	0.00000	1.000	1
119	124	-0.26180	3.39400	0.00000	1.000	1
119	125	-0.00820	0.25950	0.00000	1.000	1
119	126	0.00153	0.01790	0.00000	1.000	1
119	127	-0.11720	1.39320	0.00000	1.000	1
119	128	-0.00540	0.05160	0.00000	1.000	1
119	129	0.00340	0.06420	0.00000	1.000	1
119	130	-0.00220	0.01630	0.00000	1.000	1
119	131	-0.00440	0.02420	0.00000	1.000	1
119	132	-0.41370	2.40270	0.00000	1.000	1
119	144	-0.85110	3.83580	0.00000	1.000	1
120	121	0.00090	0.07790	0.00000	1.000	1
120	122	-0.06100	0.93050	0.00000	1.000	1
120	123	-0.04660	0.50110	0.00000	1.000	1
120	124	-0.02590	0.47220	0.00000	1.000	1
120	125	-0.00020	0.05550	0.00000	1.000	1
120	127	0.00200	0.18180	0.00000	1.000	1
120	128	-0.00290	0.07430	0.00000	1.000	1
120	129	-0.02290	0.49110	0.00000	1.000	1
120	130	-0.16740	1.06750	0.00000	1.000	1
120	131	-0.06870	0.45160	0.00000	1.000	1
120	132	-0.02550	0.45660	0.00000	1.000	1
121	122	-0.01080	0.48300	0.00000	1.000	1
121	123	-0.17120	1.94820	0.00000	1.000	1
121	124	-0.00600	0.34940	0.00000	1.000	1
121	125	0.00000	0.01240	0.00000	1.000	1
121	127	-0.02040	0.83380	0.00000	1.000	1
121	128	-0.02780	0.30950	0.00000	1.000	1
121	129	-0.45450	4.25400	0.00000	1.000	1
121	131	-0.21830	1.50660	0.00000	1.000	1
121	132	-0.13080	1.38150	0.00000	1.000	1
122	123	-0.58400	4.86090	0.00000	1.000	1
122	124	-0.00090	0.05520	0.00000	1.000	1
122	125	-0.00690	0.15830	0.00000	1.000	1
122	131	-0.24330	1.93500	0.00000	1.000	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

From	To	R	X	B	Tap	Circuit
122	132	-0.01870	0.25720	0.00000	1.000	1
122	133	-0.09800	0.98210	0.00000	1.000	1
122	143	-0.03120	0.48880	0.00000	1.000	1
123	124	-0.22300	1.96700	0.00000	1.000	1
123	125	-0.08210	0.60620	0.00000	1.000	1
123	131	-0.17830	1.25350	0.00000	1.000	1
123	132	-0.13550	1.20410	0.00000	1.000	1
124	125	-0.00170	0.09490	0.00000	1.000	1
124	128	-1.15300	8.25130	0.00000	1.000	1
124	131	-0.10620	0.81850	0.00000	1.000	1
124	132	-0.00940	0.16120	0.00000	1.000	1
124	133	-0.03420	1.17980	0.00000	1.000	1
124	143	-0.00780	0.76070	0.00000	1.000	1
125	127	-0.07910	0.98510	0.00000	1.000	1
125	128	-0.06200	0.59910	0.00000	1.000	1
125	129	-0.42170	3.97020	0.00000	1.000	1
125	130	-1.97400	8.48540	0.00000	1.000	1
125	131	-0.12510	0.69390	0.00000	1.000	1
125	132	-0.05360	0.50860	0.00000	1.000	1
127	128	-0.00260	0.12400	0.00000	1.000	1
127	129	-0.03920	1.10820	0.00000	1.000	1
128	129	-0.00100	0.02070	0.00000	1.000	1
128	130	-1.10000	2.99240	0.00000	1.000	1
128	131	-1.55900	4.08690	0.00000	1.000	1
130	131	-0.00270	0.01540	0.00000	1.000	1
130	132	-0.65090	3.03100	0.00000	1.000	1
130	144	-0.75320	3.06640	0.00000	1.000	1
131	132	-0.00320	0.04110	0.00000	1.000	1
131	133	-1.07700	5.52850	0.00000	1.000	1
131	143	-0.05880	0.40550	0.00000	1.000	1
131	144	-0.00220	0.01510	0.00000	1.000	1
132	133	-0.09160	0.82290	0.00000	1.000	1
132	143	-0.00490	0.09650	0.00000	1.000	1
132	144	-0.11080	0.98270	0.00000	1.000	1
133	143	-0.36000	2.63090	0.00000	1.000	1
134	131	-0.40420	0.91440	0.00000	1.000	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

From	To	R	X	B	Tap	Circuit
134	136	-0.06980	0.64280	0.00000	1.000	1
134	139	-0.03530	0.16600	0.00000	1.000	1
134	141	-0.02300	0.11790	0.00000	1.000	1
134	142	-0.02630	0.11670	0.00000	1.000	1
134	144	-0.01450	0.04350	0.00000	1.000	1
134	145	-0.00340	0.02160	0.00000	1.000	1
135	95	-0.34480	3.48450	0.00000	1.000	1
135	136	-0.00310	0.01780	0.00000	1.000	1
135	138	-0.00840	0.17290	0.00000	1.000	1
135	141	-0.12900	0.69930	0.00000	1.000	1
136	115	-0.01200	0.08550	0.00000	1.000	1
136	116	-1.20000	4.26550	0.00000	1.000	1
136	117	-2.96900	9.08750	0.00000	1.000	1
136	118	-0.57490	1.62060	0.00000	1.000	1
136	138	-0.15810	0.54850	0.00000	1.000	1
136	139	-0.00590	0.02930	0.00000	1.000	1
136	140	-2.40300	9.37800	0.00000	1.000	1
136	141	-0.00260	0.01750	0.00000	1.000	1
136	142	-0.04670	0.17090	0.00000	1.000	1
136	143	-1.76200	3.45490	0.00000	1.000	1
136	145	-0.00490	0.05390	0.00000	1.000	1
137	139	-0.01830	0.09360	0.00000	1.000	1
137	140	-2.22900	8.02280	0.00000	1.000	1
137	145	-0.08520	0.40710	0.00000	1.000	1
139	140	-0.00540	0.02390	0.00000	1.000	1
139	141	-0.00830	0.04600	0.00000	1.000	1
139	142	-0.31020	1.26700	0.00000	1.000	1
139	145	-0.00090	0.00800	0.00000	1.000	1
140	145	-0.10880	0.48000	0.00000	1.000	1
141	115	-0.00070	0.01310	0.00000	1.000	1
141	116	-0.15680	0.74480	0.00000	1.000	1
141	117	-0.37020	1.38200	0.00000	1.000	1
141	118	-0.04140	0.14390	0.00000	1.000	1
141	131	-0.23310	0.81290	0.00000	1.000	1
141	132	-1.62800	7.09360	0.00000	1.000	1
141	142	-0.00180	0.01050	0.00000	1.000	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

From	To	R	X	B	Tap	Circuit
141	143	-0.07020	0.17780	0.00000	1.000	1
141	144	-0.07560	0.24410	0.00000	1.000	1
141	145	-0.00380	0.03580	0.00000	1.000	1
142	115	-0.01660	0.15630	0.00000	1.000	1
142	116	-0.69160	2.63020	0.00000	1.000	1
142	117	-0.55960	2.22840	0.00000	1.000	1
142	118	-0.01850	0.10370	0.00000	1.000	1
142	119	-0.27420	1.86110	0.00000	1.000	1
142	120	-0.60430	7.35300	0.00000	1.000	1
142	122	-0.25890	2.17320	0.00000	1.000	1
142	124	-0.17360	2.13470	0.00000	1.000	1
142	125	-1.09000	8.61600	0.00000	1.000	1
142	130	-0.36080	1.86180	0.00000	1.000	1
142	131	-0.00130	0.01570	0.00000	1.000	1
142	132	-0.00550	0.08100	0.00000	1.000	1
142	133	-1.63600	9.17250	0.00000	1.000	1
142	143	-0.00380	0.01870	0.00000	1.000	1
142	144	-0.00200	0.02290	0.00000	1.000	1
142	145	-0.07380	0.43800	0.00000	1.000	1
143	144	-0.48630	2.32820	0.00000	1.000	1
144	145	-0.38350	1.20520	0.00000	1.000	1

ข.1.3 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator data)

รายละเอียดของระบบไฟฟ้ากำลังในตารางต่อไปนี้จะกล่าวถึง

H ค่าคงที่ความเฉื่อย (วินาที)

X_d' รีแอกแตนซ์ชั่วคราว (p.u.)

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า IEEE 50 generators test system

Bus	H	X_d'
93	115.0366	0.02400
104	73.8528	0.01220
105	84.3915	0.02080
106	56.2610	0.03118
110	115.0500	0.02400
111	73.8528	0.01220

Bus	H	X_d'
60	1.4100	0.47690
67	57.1796	0.02130
79	6.6500	0.12920
80	1.2857	0.66480
82	2.1150	0.52910
89	20.5602	0.05850

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bus	H	X'd	Bus	H	X'd
90	0.7628	1.60000	119	248.2200	0.00020
91	1.6848	0.37180	121	116.5400	0.00170
94	17.3424	0.08390	122	39.2400	0.00890
95	5.4662	0.16190	124	116.8600	0.00170
96	2.1216	0.48240	128	503.8700	0.00010
97	5.4912	0.21250	130	230.9000	0.00100
98	13.9600	0.07950	131	1101.7200	0.00010
99	17.1080	0.11460	132	120.3500	0.00160
100	7.5600	0.13860	134	802.1200	0.00030
101	12.2844	0.09240	135	232.6300	0.00080
102	78.4366	0.01350	136	2018.1700	0.00010
103	8.1600	0.10630	137	469.3200	0.00040
108	30.4320	0.02480	139	2210.2000	0.00010
109	2.6622	0.20290	140	899.1900	0.00030
112	12.2844	0.09240	141	1474.2200	0.00010
115	97.3300	0.00240	142	950.8000	0.00030
116	105.5000	0.00220	143	204.3000	0.00230
117	102.1600	0.00170	144	443.2200	0.00040
118	162.7400	0.00140	145	518.0800	0.00180

2 ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในบริเวณภาคกลางตะวันตกและภาคใต้

2.1 ข้อมูลของบัส (Bus data)

รายละเอียดของระบบไฟฟ้ากำลังในตารางต่อไปนี้จะกล่าวถึง

- V แรงดันที่บัส (p.u.)
- δ มุมของแรงดันที่บัส (องศา)
- P_g กำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิต (MW)
- Q_g กำลังไฟฟารีแอกทีฟที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิต (MVAR)
- P_c กำลังไฟฟ้าแอกทีฟของโหลด (MW)
- Q_c กำลังไฟฟารีแอกทีฟของโหลด (MVAR)
- G ตัวต้านทานขนาน หรือความต้านทานของรีแอกแตนซ์ (p.u.)
- B ตัวเก็บประจุขนาน (+) หรือ รีแอกแตนซ์ขนาน (-)(p.u.)

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลับของระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในบริเวณภาค
กลางตะวันตกและภาคใต้

Bus	V	δ	P_r	Q_r	P_s	Q_s	G	B
1000	0.98990	-46.510	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1001	0.99240	-54.260	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1002	0.98910	-52.970	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1003	0.98910	-52.970	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1004	0.99240	-54.260	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1005	1.03970	-57.520	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1006	0.99100	-61.560	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1007	1.03970	-57.520	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1008	0.99100	-61.560	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1009	0.98990	-46.510	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1011	0.98910	-52.970	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1012	0.98890	-66.890	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1013	0.98890	-66.890	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1014	0.98890	-66.890	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1015	0.99030	-58.670	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1016	0.99030	-58.670	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1017	1.04390	-65.620	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1018	1.04390	-65.620	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1019	0.99370	-59.340	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1020	0.99370	-59.340	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1037	0.97060	-15.550	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1038	0.97060	-15.550	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1039	0.97060	-15.550	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1041	1.02450	-13.770	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1042	1.02450	-13.770	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1043	1.01930	-11.490	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1044	1.01930	-11.490	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1045	1.01930	-11.490	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1046	1.02220	-31.660	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1047	1.02220	-31.710	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1048	1.02420	-7.730	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1049	1.02420	-7.730	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1050	0.98270	-6.740	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1052	1.03820	0.060	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1053	1.03820	0.060	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 (ต่อ)

Bus	V	δ	P_r	Q_r	P_c	Q_c	G	B
1054	1.01960	-22.050	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1055	1.01960	-22.050	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1060	1.02610	-36.210	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1061	1.02610	-36.210	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1080	1.03130	-64.290	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1081	1.03130	-64.290	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1087	1.01680	-11.480	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1088	1.01680	-11.480	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1090	1.00890	-22.050	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1091	1.00720	-19.790	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
1092	1.00890	-22.050	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3001	0.96300	-60.120	20.000	-4.730	0.140	0.060	0.0000	0.0000
3002	0.96310	-60.100	20.000	-4.730	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3003	0.96310	-60.100	20.000	-4.730	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3011	0.98680	-43.330	110.010	11.600	0.000	2.030	0.0000	0.0000
3012	0.98680	-43.330	110.010	11.600	0.000	2.040	0.0000	0.0000
3013	0.98680	-43.330	110.010	11.600	0.000	2.030	0.0000	0.0000
3015	0.98330	-41.390	165.000	11.600	0.000	3.270	0.0000	0.0000
3021	0.98020	-44.220	80.000	5.560	0.370	0.170	0.0000	0.0000
3022	0.98040	-44.190	80.000	5.560	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3023	0.98040	-44.190	80.000	5.560	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3047	0.99760	-42.460	70.000	-10.200	3.700	2.400	0.0000	0.0000
3048	0.99020	-43.180	70.000	11.600	4.980	2.680	0.0000	0.0000
3701	0.99940	-41.670	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3702	0.98550	-45.990	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3703	1.04110	-52.760	0.000	0.000	22.870	-2.290	0.0000	0.0000
3704	1.03300	-53.120	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3705	1.04060	-53.860	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3706	1.02250	-66.550	0.000	0.000	19.280	9.690	0.0000	0.1102
3707	1.02060	-60.380	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3708	1.03540	-59.690	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.4408
3709	1.01110	-64.750	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.2204
3710	1.02960	-64.990	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.6612
3711	1.04410	-59.210	0.000	0.000	21.350	9.800	0.0000	0.0000
3712	1.01910	-62.390	0.000	0.000	38.990	19.490	0.0000	0.2204
3713	1.04140	-58.450	0.000	0.000	33.870	17.430	0.0000	0.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นใช้ประโยชน์ตามการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 (ต่อ)

Bus	V	δ	P_r	Q_r	P_s	Q_s	G	B
3714	1.03960	-57.290	0.000	0.000	38.120	16.660	0.0000	0.2204
3715	1.03200	-53.290	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3716	1.04000	-46.560	0.000	0.000	27.770	-15.570	0.0000	0.0000
3717	1.03930	-61.400	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.3306
3719	1.03650	-66.750	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3720	1.03960	-66.510	0.000	0.000	117.080	46.070	0.0000	0.3306
3721	1.03020	-67.370	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3722	1.02420	-70.300	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3723	1.04410	-65.650	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.2204
3724	1.01340	-70.880	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3725	1.02430	-67.660	0.000	0.000	16.120	3.160	0.0000	0.0000
3726	1.04500	-63.710	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3727	1.04420	-65.490	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3728	1.01090	-68.960	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3734	1.01310	-72.430	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3736	1.02980	-58.770	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3801	1.03000	-49.920	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3802	1.02410	-50.300	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3803	1.03500	-47.150	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3804	1.02670	-55.050	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3805	1.02780	-59.820	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3806	1.01710	-62.870	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3808	1.02010	-56.460	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3811	1.01390	-57.900	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3823	1.02100	-64.260	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
3846	1.02160	-62.340	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7001	0.97870	-1.750	70.000	9.150	0.210	0.160	0.0000	0.0000
7002	0.97880	-1.740	70.000	9.150	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7003	0.97880	-1.740	70.000	9.150	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7006	0.99120	-4.060	20.000	-1.550	0.180	0.130	0.0000	0.0000
7007	0.99160	-4.030	20.000	-1.550	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7011	1.00700	4.100	80.000	9.810	0.160	0.090	0.0000	0.0000
7012	1.00700	4.110	80.000	9.810	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7013	1.00760	4.770	80.000	9.810	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7031	1.01510	-14.640	17.000	4.650	0.020	0.010	0.0000	0.0000
7035	0.95150	-1.410	649.160	-183.750	33.070	20.490	0.0000	0.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์อันเป็นการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 (ต่อ)

Bus	V	δ	P_r	Q_r	P_s	Q_s	G	B
7036	0.95150	-1.400	650.000	-183.750	33.070	20.490	0.0000	0.0000
7041	0.99750	-2.720	147.000	1.280	3.780	2.340	0.0000	0.0000
7042	0.99750	-2.720	147.000	1.280	3.780	2.340	0.0000	0.0000
7043	0.99570	-2.940	146.000	1.280	9.450	5.860	0.0000	0.0000
7059	0.99340	-3.810	220.000	13.640	4.720	2.270	0.0000	0.0000
7060	0.99340	-3.810	220.000	13.640	4.720	2.270	0.0000	0.0000
7061	0.99340	-3.810	220.000	13.640	4.720	2.270	0.0000	0.0000
7099	1.05070	-34.460	0.000	102.090	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7701	1.01980	-11.100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7703	1.01290	-11.890	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7704	1.01750	-11.870	0.000	0.000	56.090	29.870	0.0000	0.4408
7705	1.01760	-11.840	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7706	1.02080	-19.120	0.000	0.000	118.040	58.190	0.0000	0.6612
7707	1.02340	-15.520	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.2204
7708	1.02720	-14.510	0.000	0.000	138.290	94.030	0.0000	0.0000
7709	0.98970	-17.420	0.000	0.000	46.570	17.370	0.0000	0.0000
7710	1.01070	-14.220	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7711	1.01050	-13.790	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.2204
7712	1.02500	-7.990	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7713	1.03070	-6.280	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7714	1.02590	-13.140	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7715	1.02630	-13.010	0.000	0.000	129.880	56.860	0.0000	0.3306
7716	1.01710	-16.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7717	1.01330	-19.290	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7718	1.02500	-18.380	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7719	1.00910	-25.470	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7720	1.02230	-31.520	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7721	1.02620	-35.970	0.000	0.000	44.470	-27.770	0.0000	0.0000
7723	1.02550	-13.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7724	1.03170	0.060	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7726	1.02170	-19.270	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.4408
7728	1.01960	-21.900	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.2204
7801	1.00290	-8.640	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7802	1.01660	-8.220	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7803	1.02350	-29.910	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7804	1.02600	-3.870	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของ บริษัท วิศวกรรมไฟฟ้า จำกัด เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์หรือค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 (ต่อ)

Bus	V	δ	P_r	Q_r	P_s	Q_s	G	B
7806	1.04000	0.210	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7807	1.02750	-7.640	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7808	1.02410	-8.700	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7809	1.01750	-7.590	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7812	1.00770	-20.990	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7813	1.00720	-19.790	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7829	1.04000	-34.460	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7901	1.02050	-7.870	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000
7902	1.03000	-8.790	0.720	1,002.210	1,240.000	-100.000	0.0000	-3.0000

2.2 ข้อมูลของสายส่ง (Branch data)

รายละเอียดของระบบไฟฟ้ากำลังในตารางต่อไปนี้จะกล่าวถึง

From จากบัสหมายเลข

To ไปยังบัสหมายเลข

R ความต้านทานของสายส่ง หรือหม้อแปลงไฟฟ้า

X รีแอกแตนซ์ของสายส่ง หรือหม้อแปลงไฟฟ้า

B กำลังอัดประจุสาย

Tap แท็ปของหม้อแปลงไฟฟ้า

Circuit วงจรที่

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลของสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในบริเวณภาคกลางตะวันตกและภาคใต้

From	To	R	X	B	Tap	Circuit
1000	3716	0.00000	-0.01050	0.00000	1.050	1
1000	3803	0.00140	0.13100	0.00000	1.038	1
1001	3705	0.00000	-0.00680	0.00000	1.050	1
1001	3801	0.00060	0.07279	0.00000	1.050	1
1002	3703	0.00000	-0.01050	0.00000	1.050	1
1002	3802	0.00140	0.14050	0.00000	1.000	1
1003	3703	0.00000	-0.01050	0.00000	1.050	1
1003	3802	0.00140	0.14050	0.00000	1.000	1
1004	3705	0.00000	-0.00680	0.00000	1.050	1
1004	3801	0.00060	0.07279	0.00000	1.050	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 (ต่อ)

From	To	R	X	B	Tap	Circuit
1005	3714	0.00000	-0.00680	0.00000	1.000	1
1005	3804	0.00060	0.07279	0.00000	0.988	1
1006	3717	0.00000	-0.00680	0.00000	1.050	1
1006	3805	0.00060	0.07279	0.00000	1.050	1
1007	3714	0.00000	-0.00680	0.00000	1.000	1
1007	3804	0.00060	0.07279	0.00000	0.988	1
1008	3717	0.00000	-0.00680	0.00000	1.050	1
1008	3805	0.00060	0.07279	0.00000	1.050	1
1009	3716	0.00000	-0.01050	0.00000	1.050	1
1009	3803	0.00140	0.13100	0.00000	1.038	1
1011	3703	0.00000	-0.01050	0.00000	1.050	1
1011	3802	0.00140	0.14050	0.00000	1.000	1
1012	3720	0.00000	-0.00680	0.00000	1.050	1
1012	3806	0.00060	0.07279	0.00000	1.013	1
1013	3720	0.00000	-0.00680	0.00000	1.050	1
1013	3806	0.00060	0.07279	0.00000	1.013	1
1014	3720	0.00000	-0.00680	0.00000	1.050	1
1014	3806	0.00060	0.07279	0.00000	1.013	1
1015	3713	0.00000	-0.00680	0.00000	1.050	1
1015	3808	0.00060	0.07279	0.00000	1.013	1
1016	3713	0.00000	-0.00680	0.00000	1.050	1
1016	3808	0.00060	0.07279	0.00000	1.013	1
1017	3727	0.00000	-0.00680	0.00000	1.000	1
1017	3823	0.00060	0.07279	0.00000	0.975	1
1018	3727	0.00000	-0.00680	0.00000	1.000	1
1018	3823	0.00060	0.07279	0.00000	0.975	1
1019	3711	0.00000	-0.00680	0.00000	1.050	1
1019	3811	0.00060	0.07279	0.00000	1.013	1
1020	3711	0.00000	-0.00680	0.00000	1.050	1
1020	3811	0.00060	0.07279	0.00000	1.013	1
1037	7708	0.00000	-0.01050	0.00000	1.052	1
1037	7801	0.00000	0.07250	0.00000	0.988	1
1038	7708	0.00000	-0.01050	0.00000	1.052	1
1038	7801	0.00000	0.07250	0.00000	0.988	1
1039	7708	0.00000	-0.01050	0.00000	1.052	1
1039	7801	0.00000	0.07250	0.00000	0.988	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 (ต่อ)

From	To	R	X	B	Tap	Circuit
1041	7715	0.00000	-0.00971	0.00000	1.000	1
1041	7802	0.00060	0.07163	0.00000	0.975	1
1042	7715	0.00000	-0.00971	0.00000	1.000	1
1042	7802	0.00060	0.07163	0.00000	0.975	1
1043	7701	0.00000	-0.00992	0.00000	1.000	1
1043	7808	0.00060	0.07250	0.00000	1.000	1
1044	7701	0.00000	-0.00992	0.00000	1.000	1
1044	7808	0.00060	0.07250	0.00000	1.000	1
1045	7701	0.00000	-0.00992	0.00000	1.000	1
1045	7808	0.00060	0.07250	0.00000	1.000	1
1046	7720	0.00000	-0.01050	0.00000	1.000	1
1046	7803	0.00140	0.13350	0.00000	1.000	1
1047	7720	0.00000	-0.01450	0.00000	1.000	1
1047	7803	0.00140	0.13750	0.00000	1.000	1
1048	7807	0.00140	-0.00269	0.00000	1.000	1
1048	7901	0.00140	0.02231	0.00000	0.971	1
1049	7807	0.00140	-0.00269	0.00000	1.000	1
1049	7901	0.00140	0.02231	0.00000	0.971	1
1050	7713	0.00000	-0.02317	0.00000	1.050	1
1050	7804	0.00140	0.14283	0.00000	1.050	1
1052	7724	0.00000	0.00127	0.00000	0.994	1
1052	7806	0.00140	0.16447	0.00000	1.000	1
1053	7724	0.00000	0.00127	0.00000	0.994	1
1053	7806	0.00140	0.16447	0.00000	1.000	1
1054	7728	0.00000	-0.00992	0.00000	1.000	1
1054	7812	0.00060	0.07250	0.00000	0.988	1
1055	7728	0.00000	-0.00992	0.00000	1.000	1
1055	7812	0.00060	0.07250	0.00000	0.988	1
1060	7721	0.00000	-0.00992	0.00000	1.000	1
1060	7829	0.00060	0.07250	0.00000	1.013	1
1061	7721	0.00000	-0.00992	0.00000	1.000	1
1061	7829	0.00060	0.07250	0.00000	1.013	1
1080	3708	0.03008	0.21785	0.03020	1.000	1
1080	3710	0.00754	0.03315	0.00496	1.000	1
1081	3708	0.03008	0.21785	0.03020	1.000	1
1081	3710	0.00754	0.03315	0.00496	1.000	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 (ต่อ)

From	To	R	X	B	Tap	Circuit
1087	7701	0.00314	0.02095	0.00538	1.000	1
1087	7703	0.00524	0.02305	0.00345	1.000	1
1088	7701	0.00314	0.02095	0.00538	1.000	1
1088	7703	0.00524	0.02305	0.00345	1.000	1
1090	7803	0.00862	0.06783	0.12783	1.000	1
1090	7812	0.00115	0.00902	0.01700	1.000	1
1091	7802	0.01102	0.08670	0.16339	1.000	1
1091	7812	0.00115	0.00902	0.01699	1.000	1
1092	7803	0.00862	0.06783	0.12783	1.000	1
1092	7812	0.00115	0.00902	0.01699	1.000	1
3001	3726	0.00000	0.33850	0.00000	0.938	1
3002	3726	0.00000	0.33850	0.00000	0.938	1
3003	3726	0.00000	0.33850	0.00000	0.938	1
3011	3803	0.00000	0.06520	0.00000	0.950	1
3012	3803	0.00000	0.06520	0.00000	0.950	1
3013	3803	0.00000	0.06520	0.00000	0.950	1
3015	3803	0.00000	0.06520	0.00000	0.950	1
3021	3801	0.00000	0.13260	0.00000	0.950	1
3022	3801	0.00000	0.13260	0.00000	0.950	1
3023	3801	0.00000	0.13260	0.00000	0.950	1
3047	3716	0.00000	0.11490	0.00000	0.975	1
3048	3803	0.00000	0.11490	0.00000	0.950	1
3701	3702	0.05283	0.15532	0.02023	1.000	1
3701	3703	0.17868	0.52533	0.06842	1.000	1
3701	7721	0.05473	0.16092	0.02096	1.000	1
3701	7721	0.05473	0.16092	0.02096	1.000	2
3702	3703	0.12851	0.37784	0.04921	1.000	1
3703	3704	0.01180	0.02047	0.00214	1.000	1
3703	3707	0.21605	0.37616	0.03943	1.000	1
3703	3715	0.01364	0.04054	0.00517	1.000	1
3703	3715	0.01360	0.03937	0.00518	1.000	2
3705	3708	0.07363	0.20696	0.02901	1.000	1
3705	3708	0.07363	0.20696	0.02901	1.000	2
3705	3708	0.04980	0.21902	0.03280	1.000	3
3705	3708	0.04980	0.21902	0.03280	1.000	4
3706	3707	0.16790	0.36174	0.04362	1.000	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานภายในเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 (ต่อ)

From	To	R	X	B	Tap	Circuit
3707	3708	0.08537	0.14551	0.01580	1.000	1
3708	3709	0.07706	0.22897	0.02920	1.000	1
3708	3709	0.07706	0.22897	0.02920	1.000	2
3708	3711	0.18486	0.31872	0.03400	1.000	1
3709	3710	0.01816	0.05338	0.00695	1.000	1
3711	3712	0.16073	0.27696	0.02953	1.000	1
3712	3713	0.05018	0.14754	0.01921	1.000	1
3712	3717	0.12065	0.20573	0.02235	1.000	1
3713	3714	0.02018	0.14614	0.02026	1.000	1
3713	3714	0.02018	0.14614	0.02026	1.000	2
3714	3736	0.05257	0.23120	0.03463	1.000	1
3714	3736	0.05257	0.23120	0.03463	1.000	2
3717	3719	0.15526	0.26493	0.02880	1.000	1
3719	3720	0.01140	0.02432	0.00299	1.000	1
3719	3720	0.00890	0.02645	0.00337	1.000	2
3719	3722	0.07450	0.22137	0.02823	1.000	1
3720	3721	0.02086	0.06197	0.00790	1.000	1
3720	3721	0.02086	0.06197	0.00790	1.000	2
3720	3725	0.09642	0.28347	0.03692	1.000	1
3720	3725	0.09642	0.28347	0.03692	1.000	2
3720	3728	0.04457	0.13243	0.01689	1.000	1
3723	3724	0.08739	0.18828	0.02270	1.000	1
3723	3725	0.03994	0.11866	0.01513	1.000	1
3723	3727	0.00075	0.00503	0.00129	1.000	1
3723	3727	0.00075	0.00503	0.00129	1.000	2
3724	3734	0.05088	0.14958	0.01948	1.000	1
3726	3727	0.05391	0.11497	0.01415	1.000	1
3726	3727	0.05391	0.11497	0.01415	1.000	2
3801	3802	0.00512	0.04029	0.07593	1.000	1
3801	3802	0.00512	0.04029	0.07593	1.000	2
3802	3803	0.00763	0.06006	0.11318	1.000	1
3802	3803	0.00763	0.06006	0.11318	1.000	2
3802	3808	0.00608	0.05885	0.28519	1.000	1
3802	3808	0.00608	0.05885	0.28519	1.000	2
3802	7829	0.02871	0.22586	0.42563	1.000	1
3802	7829	0.02871	0.22586	0.42563	1.000	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 (ต่อ)

From	To	R	X	B	Tap	Circuit
3803	3804	0.00974	0.07662	0.14440	1.000	1
3803	3804	0.00974	0.07662	0.14440	1.000	2
3804	3805	0.00894	0.07036	0.13259	1.000	1
3804	3805	0.00894	0.07036	0.13259	1.000	2
3805	3806	0.00879	0.06918	0.13036	1.000	1
3805	3806	0.00879	0.06918	0.13036	1.000	2
3806	3846	0.00150	0.01557	0.06576	1.000	1
3806	3846	0.00150	0.01557	0.06576	1.000	2
3808	3811	0.00968	0.07616	0.14353	1.000	1
3808	3811	0.00968	0.07616	0.14353	1.000	2
3808	3846	0.01017	0.10589	0.44708	1.000	1
3808	3846	0.01017	0.10589	0.44708	1.000	2
3823	3846	0.01222	0.09611	0.18112	1.000	1
3823	3846	0.01222	0.09611	0.18112	1.000	2
7001	7804	0.00000	0.05610	0.00000	0.950	1
7002	7804	0.00000	0.05610	0.00000	0.950	1
7003	7804	0.00000	0.05610	0.00000	0.950	1
7006	7712	0.00000	0.36020	0.00000	0.975	1
7007	7712	0.00000	0.36020	0.00000	0.975	1
7011	7806	0.00000	0.09230	0.00000	0.963	1
7012	7806	0.00000	0.09230	0.00000	0.963	1
7013	7806	0.00000	0.10800	0.00000	0.963	1
7031	7718	0.00000	0.41080	0.00000	0.975	1
7035	7901	0.00000	0.01820	0.00000	0.975	1
7036	7901	0.00000	0.01820	0.00000	0.975	1
7041	7807	0.00000	0.06300	0.00000	0.975	1
7042	7807	0.00000	0.06300	0.00000	0.975	1
7043	7807	0.00000	0.06300	0.00000	0.975	1
7059	7809	0.00000	0.03170	0.00000	0.975	1
7060	7809	0.00000	0.03170	0.00000	0.975	1
7061	7809	0.00000	0.03170	0.00000	0.975	1
7099	7829	0.00000	0.03970	0.00000	0.975	1
7701	7704	0.00397	0.02648	0.00680	1.000	1
7701	7704	0.00397	0.02648	0.00680	1.000	2
7701	7705	0.01149	0.03445	0.00430	1.000	1
7705	7714	0.03883	0.11646	0.01454	1.000	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 (ต่อ)

From	To	R	X	B	Tap	Circuit
7706	7707	0.00515	0.05456	0.01391	1.000	1
7706	7708	0.00758	0.08023	0.02046	1.000	1
7706	7726	0.00093	0.00984	0.00251	1.000	1
7706	7726	0.00093	0.00984	0.00251	1.000	2
7707	7708	0.00238	0.02522	0.00643	1.000	1
7707	7708	0.01157	0.03402	0.00443	1.000	2
7707	7723	0.03096	0.09273	0.01162	1.000	1
7708	7709	0.02213	0.06505	0.00847	1.000	1
7708	7710	0.03329	0.09787	0.01275	1.000	1
7710	7711	0.01279	0.03760	0.00490	1.000	1
7711	7712	0.04623	0.13763	0.01772	1.000	1
7712	7713	0.03095	0.09101	0.01185	1.000	1
7714	7715	0.00333	0.01464	0.00219	1.000	1
7714	7715	0.00333	0.01464	0.00219	1.000	2
7714	7723	0.00546	0.01636	0.00205	1.000	1
7715	7716	0.01664	0.11091	0.02849	1.000	1
7715	7716	0.01664	0.11091	0.02849	1.000	2
7716	7717	0.03245	0.09634	0.01203	1.000	1
7717	7718	0.05808	0.12381	0.01525	1.000	1
7717	7728	0.02913	0.08564	0.01115	1.000	1
7719	7720	0.06343	0.18649	0.02429	1.000	1
7719	7728	0.02588	0.07609	0.00991	1.000	1
7720	7721	0.05937	0.17456	0.02273	1.000	1
7720	7721	0.05937	0.17456	0.02273	1.000	2
7801	7802	0.00105	0.01952	0.09908	1.000	1
7801	7802	0.00105	0.01952	0.09908	1.000	2
7801	7804	0.01082	0.08512	0.16040	1.000	1
7801	7804	0.01082	0.08512	0.16040	1.000	2
7801	7804	0.01090	0.08574	0.16158	1.000	3
7801	7804	0.01090	0.08574	0.16158	1.000	4
7802	7807	0.00058	0.01085	0.05508	1.000	1
7802	7807	0.00058	0.01085	0.05508	1.000	2
7802	7809	0.00034	0.00352	0.01486	1.000	1
7802	7809	0.00034	0.00352	0.01486	1.000	2
7802	7813	0.01102	0.08671	0.16339	1.000	1
7803	7829	0.00587	0.04622	0.08709	1.000	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 (ต่อ)

From	To	R	X	B	Tap	Circuit
7803	7829	0.00587	0.04622	0.08709	1.000	2
7804	7806	0.00828	0.06517	0.12281	1.000	1
7804	7806	0.00828	0.06517	0.12281	1.000	2
7807	7808	0.00179	0.01858	0.07846	1.000	1
7807	7808	0.00179	0.01858	0.07846	1.000	2
7812	7813	0.00115	0.00902	0.01700	1.000	1
7901	7902	0.00014	0.00264	0.29970	1.000	1
7901	7902	0.00014	0.00264	0.29970	1.000	2

2.3 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator data)

รายละเอียดของระบบไฟฟ้ากำลังในตารางต่อไปนี้จะกล่าวถึง

H ค่าคงที่ความเฉื่อย (วินาที)

X_d' รีแอกแตนซ์ชั่วคราว (p.u.)

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในบริเวณภาคกลางตะวันตกและภาคใต้

Bus	H	X_d'	Bus	H	X_d'
3001	1.1296	0.2500	7006	0.6	0.2500
3002	1.1296	0.2500	7007	0.6	0.2500
3003	1.1296	0.2500	7011	3.333	0.2500
3011	10.395	0.2640	7012	3.333	0.2500
3012	10.395	0.2640	7013	3.333	0.2500
3013	10.395	0.2640	7031	0.848	0.2500
3015	20.37	0.2640	7035	60.55	0.2640
3021	3.56	0.2500	7036	60.55	0.2640
3022	3.56	0.2500	7041	59.5	0.2640
3023	3.56	0.2500	7042	59.5	0.2640
3047	6.181	0.2640	7043	59.5	0.2640
3048	5.25	0.2640	7059	19.25	0.2640
7001	4.5	0.2500	7060	19.25	0.2640
7002	4.5	0.2500	7061	19.25	0.2640
7003	4.5	0.2500	7902	15.625	0.3000

ประวัติผู้เขียน

นาย ชยชาญ โพธิสาร เกิดเมื่อวันที่ 4 พฤษภาคม 2516 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เมื่อปีการศึกษา 2536

เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทในปี 2544 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีผลงานวิชาการตีพิมพ์ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า ระหว่างศึกษาปริญญาโท 1 บทความคือ วิศวกรรมลาดกระบัง และได้รับการยอมรับให้นำเสนออีก 1 บทความคือ International Federation of Automatic Control , IFAC Symposium on Power Plants & Power Systems Control 2003 ซึ่งจะจัดขึ้นที่ประเทศเกาหลีใต้ในช่วงปลายปี ค.ศ. 2003

ผลงานทางวิชาการ

1. ชยชาญ โพธิสาร, สมชาติ จิริวิภากร, สุธิ บรรจงจิตร, “การหาช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตในระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม.” , วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 19, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2545, หน้า 59-64
2. C. Pothisarn and S. Jiriwibhakorn, “Critical Clearing Time Determination of EGAT System Using Artificial Neural Network” International Federation of Automatic Control , IFAC Symposium on Power Plants & Power Systems Control 2003 (Accepted for Presentation).