

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**การหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้
ระเบียบวิธีการคำนวณ**

**CRITICAL CLEARING TIME DETERMINATION OF POWER SYSTEMS
USING COMPUTATIONAL METHODS**



**พิเชฐ มานะบรรณ
PICHET MANABANYONG**

รพ.
พ 6537
2549

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**63477**
วัน,เดือน,ปี.....**29 ส.ค. 2549**

.b.....**1163795x**.....
.i.....

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2549**

ISBN 974-15-2209-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**CRITICAL CLEARING TIME DETERMINATION OF POWER SYSTEMS
USING COMPUTATIONAL METHODS**



**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**

2006

ISBN 974-15-2209-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้ระเบียบวิธีการคำนวณ
นักศึกษา	นาย พิเชฐ มานะบรรจง
รหัสนักศึกษา	45061020
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สมชาติ จิรวิภากร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการคำนวณในการศึกษาเสถียรภาพในสถานะชั่วคราวของระบบไฟฟ้าที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วโดยนำมาใช้ในการหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะต่างๆของระบบ อาทิ ระดับกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, โครงสร้างของระบบไฟฟ้า, ตำแหน่งที่เกิดที่ฟอลต์ และการเคลียร์ฟอลต์ในรูปแบบต่างๆ ในกรณีศึกษาจะใช้ระบบไฟฟ้ากำลังของ IEEE 50 - Generator Test System เป็นระบบทดสอบ และระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตบริเวณภาคกลาง ตะวันตก และภาคใต้เป็นระบบที่ใช้งานจริง ผลการทดสอบที่ได้อยู่ในระดับดี โดยค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์มีค่าประมาณ 1.5688% และ 0.2891% ตามลำดับ

Thesis Title	Critical Clearing Time Determination of Power System Using Computational Methods
Student	Mr. Pichet Manabanyong
Student ID	45061020
Degree	Master of Engineer
Programme	Electrical Engineer
Year	2006
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Somchat Jiriwibhakorn

ABSTRACT

This thesis presents an application of Computational Methods in transient stability study, with fast access to the answer of the power system. Computational Methods (CM) used to calculate the critical clearing time (CCT) of large power system with various the system condition, such as generation power level, system topology, fault location and fault clearing. The study has been tested on the IEEE 50 - Generator Test System and Electricity Generating Authority of Thailand; EGAT practical system. The results showed that CM could be used to estimate the CCT effectively with the mean absolute percentage error of about 1.5688% and 0.2891% respectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยได้รับคำแนะนำ,คำปรึกษา และความเอาใจใส่เป็นอย่างดี จาก ศศ.ดร.สมชาติ จิริวิภากร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คุณ ศักดิ์ชาญ เหลืองมณีโรจน์ เพื่อนสนิทที่ได้สนับสนุนด้านอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของข้าพเจ้า ผู้ที่มอบชีวิต, การศึกษา และอนาคตที่ดี ให้กับผู้วิจัย รวมถึงสมาชิกในครอบครัวทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจกับผู้วิจัยตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา III ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการ กระจายประสาทเทียม.....	2
1.6 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.7 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะชั่วคราว.....	4
2.1 วิธีการทางเวลา.....	5
2.2 สมการสวิง.....	6
2.3 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและวงจรสมมูลย์ของระบบ ไฟฟ้า.....	9
2.4 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าหลายเครื่อง.....	11
2.5 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการศึกษาเสถียรภาพในสถานะชั่วคราว.....	14
บทที่ 3 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข.....	15
3.1 ความสำคัญของการศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลข.....	15
3.2 รูปแบบระเบียบวิธีเชิงตัวเลข.....	16
3.2.1 Nearest Neighbor Algorithm.....	16
3.2.2 Nonlinear Interpolation.....	17
3.2.3 Weight Average.....	18
3.2.4 Least Square.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สารบัญ (ต่อ)

3.3 คอมพิวเตอร์.....	21
3.4 ความผิดพลาด.....	21
บทที่ 4 ระบบไฟฟ้าที่ทำการศึกษ.....	23
4.1 ระบบ IEEE 50 generators test system.....	23
4.1.1 โครงสร้างของระบบ.....	23
4.1.2 เงื่อนไขของระบบที่พิจารณา.....	23
4.1.3 การจำลองเหตุการณ์.....	24
4.2 ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.....	29
4.2.1 โครงสร้างของระบบ.....	29
4.2.2 เงื่อนไขของระบบที่พิจารณา.....	29
4.2.3 การจำลองเหตุการณ์.....	29
4.3 การคำนวณหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	34
บทที่ 5 การคำนวณหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตโดยใช้ระเบียบวิธีการคำนวณ.....	37
5.1 การเลือกตัวแปรในการฝึกสอน.....	37
5.1.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system.....	38
5.1.2 ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT).....	38
5.2 การกระจายของข้อมูลฝึกสอน.....	38
5.3 ปริมาณของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบ.....	40
5.4 เงื่อนไขของการฝึกสอน.....	41
5.5 ขั้นตอนการฝึกสอน.....	42
บทที่ 6 ผลการทดลอง.....	48
6.1 รูปแบบการนำเสนอ.....	48
6.1.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการทดลอง.....	48
6.1.2 รูปแบบการนำเสนอผลการทดลองของระบบไฟฟ้ากำลังแต่ละระบบ.....	48
6.2 ผลการทดลองของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system.....	49
6.2.1 ผลการทดลองระเบียบวิธีการต่างๆที่จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 50ชุด.....	49
6.2.2 ผลการทดลองระเบียบวิธีการต่างๆที่จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 100 ชุด.....	55

สารบัญ (ต่อ)

6.2.3 ผลการทดลองระเบียบวิธีการต่างๆที่จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด.....	61
6.2.4 เปรียบเทียบผลการทดลองทุกกรณี.....	67
6.3 ผลการทดลองของระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.....	68
6.3.1 ผลการทดลองระเบียบวิธีการต่างๆที่จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150ชุด.....	68
6.3.2 ผลการทดลองระเบียบวิธีการต่างๆที่จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 200ชุด.....	74
6.3.3 ผลการทดลองระเบียบวิธีการต่างๆที่จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 250ชุด.....	80
6.3.4 เปรียบเทียบผลการทดลองทุกกรณี.....	86
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	91
บรรณานุกรม.....	94
ภาคผนวก.....	96
ภาคผนวก ก. ข้อมูลของระบบไฟฟ้าที่ทำการศึกษา.....	97
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	129
ประวัติผู้เขียน.....	140

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนสำหรับ Nearest Neighbor Algorithm.....17
4.1	ตำแหน่งเกิดฟอลต์ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system ที่พิจารณา.....24
4.2	โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system ที่พิจารณา.....24
4.3	ตำแหน่งเกิดฟอลต์ของระบบไฟฟ้ากำลังของ EGAT ที่พิจารณา.....34
4.4	โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังของ EGAT ที่พิจารณา.....34
5.1	วิธีการแปลงข้อมูลที่ได้เป็นตัวแปรฝึกสอนสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system.....39
5.2	วิธีการแปลงข้อมูลที่ได้เป็นตัวแปรฝึกสอนสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังของ EGAT.....40
5.3	จำนวนข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบที่ใช้ในการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณ.....41
5.4	ตำแหน่งของฟอลต์ และ โครงสร้างของระบบจัดอยู่ในรูปของเลขฐานสอง.....42
6.1	ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Nearest Neighbor Algorithm จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 50 ชุด.....49
6.2	ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Nonlinear Interpolation จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 50 ชุด.....50
6.3	ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Weight Average จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 50 ชุด ($k=0.5, \alpha=0.3$).....51
6.4	ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Least Square จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 50 ชุด ($k=0.5, \alpha=0.3$).....52
6.5	เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณ กรณีฝึกสอนด้วยชุดข้อมูล 50ชุด.....53
6.6	ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Nearest Neighbor Algorithm จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 100 ชุด.....55
6.7	ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Nonlinear Interpolation จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 100 ชุด.....56
6.8	ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Weight Average จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 100 ชุด ($k=1, \alpha=0.3$).....57
6.9	ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Least Square จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 100 ชุด ($k=1, \alpha=0.3$).....58
6.10	เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณ กรณีฝึกสอนด้วยชุดข้อมูล 100 ชุด.....59

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.11 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Nearest Neighbor Algorithm จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด.....	61
6.12 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Nonlinear Interpolation จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด.....	62
6.13 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Weight Average จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด ($k=1$ $\alpha=0.3$).....	63
6.14 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Least Square จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด ($k=1$, $\alpha=0.3$).....	64
6.15 เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณ กรณีฝึกสอนด้วยชุดข้อมูล 150 ชุด.....	65
6.16 ผลการทดสอบระเบียบวิธีการคำนวณที่ผ่านการฝึกสอนแล้วในเงื่อนไขต่างๆ.....	67
6.17 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Nearest Neighbor Algorithm จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด.....	68
6.18 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Nonlinear Interpolation จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด.....	69
6.19 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Weight Average จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด ($k=1$ $\alpha=0.89$).....	70
6.20 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Least Square จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด ($k=1$, $\alpha=0.89$).....	71
6.21 เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณ กรณีฝึกสอนด้วยชุดข้อมูล 150 ชุด.....	72
6.22 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Nearest Neighbor Algorithm จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 200 ชุด.....	74
6.23 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Nonlinear Interpolation จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 200 ชุด.....	75
6.24 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Weight Average จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 200 ชุด ($k=1$, $\alpha=0.9$).....	76
6.25 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Least Square จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 200 ชุด ($k=1$, $\alpha=0.9$).....	77
6.26 เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณ กรณีฝึกสอนด้วยชุดข้อมูล 200 ชุด.....	78

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.27 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Nearest Neighbor Algorithm จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด.....	80
6.28 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Nonlinear Interpolation จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด.....	81
6.29 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Weight Average จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด ($k=1, \alpha=0.9$).....	82
6.30 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Least Square จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด ($k=1, \alpha=0.9$).....	83
6.31 เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณ กรณีฝึกสอนด้วยชุดข้อมูล 250 ชุด.....	84
6.32 การทดสอบระเบียบวิธีการคำนวณที่ผ่านการฝึกสอนแล้วในเงื่อนไขต่างๆ.....	86
6.33 ผลการทดสอบระเบียบวิธีการคำนวณกับโครงข่ายประสาทเทียม.....	87
6.34 ผลการทดสอบระเบียบวิธีการคำนวณกับโครงข่ายประสาทเทียม.....	89

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	กราฟสวิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้า IEEE 50 generators test system ที่เกิดฟอลต์ที่บัส 105 และเครื่องฟอลต์ที่เวลา 120 msec.....7
2.2	กราฟสวิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้า IEEE 50 generators test system ที่เกิดฟอลต์ที่บัส 105 และเครื่องฟอลต์ที่เวลา 120 msec.....8
2.3	แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบธรรมดา.....10
2.4	การเชื่อมต่อของแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบธรรมดาที่บวจรสมมูลย์ของระบบไฟฟ้ากำลัง.....10
2.5	โครงข่ายที่ถูกพิจารณาเป็นเมตริกซ์ของบัสแอดมิทแตนซ์.....13
3.1	Nonlinear Interpolation.....18
3.2	Weight Average.....19
3.3	Least Square.....20
4.1	ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generator test system บริเวณที่ศึกษา.....25
4.2	ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generator test system : ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์.....26
4.3	ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generator test system : โครงสร้างของระบบที่พิจารณา.....27
4.4	ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generator test system : เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เพิ่มกำลังผลิต.....28
4.5	ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยบริเวณภาคกลางตะวันตก และ ภาคใต้.....30
4.6	ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยบริเวณภาคกลางตะวันตก และภาคใต้ : ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์.....31
4.7	ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยบริเวณภาคกลางตะวันตก และภาคใต้ : โครงสร้างของระบบที่พิจารณา.....32
4.8	ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยบริเวณภาคกลางตะวันตก และภาคใต้ : เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เพิ่มกำลังผลิต.....33
4.9	ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม Load flow and step by step time simulation ในการคำนวณหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤต.....36
5.1	การกระจายของข้อมูลที่ได้จาก Pseudo random sequences.....39
5.2	ขั้นตอนการหาค่า Output ของวิธี Nearest Neighbor Algorithm.....43
5.3	ขั้นตอนการหาค่า Output ของวิธี Nonlinear Interpolation.....44
5.4	ขั้นตอนการหาค่า Output ของวิธี Weight Average.....46
5.5	ขั้นตอนการหาค่า Output ของวิธี Least square.....47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.1 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสำหรับข้อมูลทดสอบแต่ละชุด กรณีฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลฝึกสอน 50 ชุด.....	53
6.2 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสำหรับข้อมูลทดสอบแต่ละชุด กรณีฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลฝึกสอน 100 ชุด.....	59
6.3 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสำหรับข้อมูลทดสอบแต่ละชุด กรณีฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด.....	65
6.4 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสำหรับข้อมูลทดสอบแต่ละชุด กรณีฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด.....	72
6.5 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสำหรับข้อมูลทดสอบแต่ละชุด กรณีฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลฝึกสอน 200 ชุด.....	78
6.6 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสำหรับข้อมูลทดสอบแต่ละชุด กรณีฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด.....	84
6.7 การเปรียบเทียบค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ระหว่าง ANN กับ CM.....	87
6.8 การเปรียบเทียบค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ระหว่าง ANN กับ CM.....	89

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

การศึกษาเสถียรภาพในสถานะชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลัง (Transient stability) องค์ประกอบหนึ่งที่มีความสำคัญและถูกนำมาพิจารณาในการรักษาเสถียรภาพของระบบ ทั้งในการออกแบบและวางแผนระบบป้องกัน ก็คือ ช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤต (CCT) การคำนวณหาค่า CCT ของระบบไฟฟ้านั้นสามารถทำได้หลายวิธี อาทิเช่น วิธีการทางเวลา (Time domain) , Direct method [6] และ Transient energy function [7] ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีความน่าเชื่อถือ, ความแม่นยำ, ความรวดเร็วในการหาคำตอบ และ ข้อจำกัดในการเลือกใช้แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแตกต่างกัน ในปัจจุบันระบบไฟฟ้ากำลังในทางปฏิบัติได้มีการเชื่อมต่อกัน และขยายขนาดของระบบอย่างต่อเนื่อง รวมทั้งได้มีการนำเอาอุปกรณ์ควบคุมและปรับปรุงเสถียรภาพมาติดตั้งในระบบเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนมากขึ้น การหาค่า CCT ของระบบไฟฟ้าโดยที่กล่าวถึงข้างต้น ก็มีความยุ่งยากและใช้เวลาในการหาคำตอบมากขึ้น

1.2 ความมุ่งหมายของปัญหา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเอาระเบียบวิธีการคำนวณ มาประยุกต์ใช้ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะชั่วคราว โดยพิจารณาหาค่า CCT เป็นคำตอบ (เนื่องจากค่า CCT มีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้ากำลัง ก็คือระยะเวลาที่ยาวนานที่สุดที่ระบบไฟฟ้ากำลังยอมให้เกิดฟอลต์ขึ้นได้ก่อนที่ระบบจะไม่สามารถหลีกเลี่ยงการสูญเสียเสถียรภาพได้) เพื่อให้สามารถคำนวณหาคำตอบได้อย่างถูกต้องและมีความรวดเร็วในการหาคำตอบมากขึ้น

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ได้ตั้งสมมติฐานของการศึกษาโดยพิจารณาจากการที่ระเบียบวิธีการคำนวณมีความสามารถในการเรียนรู้ทั้งเอาต์พุตที่มาก และอินพุตที่มีย่านกว้าง โดยระเบียบวิธีการคำนวณที่ผ่านการฝึกสอนแล้วจะใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยมาก และในปัจจุบันระบบไฟฟ้ากำลังได้มีการขยายขนาดและการเชื่อมโยงของระบบขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้การศึกษเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะชั่วคราวจึงเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนและใช้เวลาในการหาคำตอบเพิ่มขึ้นตามขนาดของระบบไฟฟ้ากำลัง การนำเอาระเบียบวิธีการคำนวณมาใช้ในการเรียนรู้สถานะต่างๆของระบบไฟฟ้ากำลังและหาคำตอบจากระบบที่ได้เรียนรู้ โดย มี คำ ค อ บ ที่ พิจารณาหาค่า CCT ซึ่งคำตอบที่ได้จากระบบระเบียบวิธีการคำนวณจะมีความถูกต้องและแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ในเกณฑ์ดี ถึงดีมาก หากข้อมูลของระบบไฟฟ้าที่นำมาให้ระเบียบวิธีการคำนวณเรียนรู้มี ปริมาณและคุณภาพเพียงพอ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

จากการที่ระเบียบวิธีการคำนวณมีความสามารถในการเรียนรู้ทั้งเอาที่พุทที่มาก และอินพุทที่มีย่านกว้างสามารถนำมาประยุกต์ใช้ศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะชั่วคราวที่มีความซับซ้อนและใช้เวลาในการหาคำตอบเพิ่มขึ้นตามขนาดของระบบไฟฟ้ากำลัง การนำเอาระเบียบวิธีการคำนวณมาใช้ในการเรียนรู้สภาวะต่างๆของระบบไฟฟ้ากำลังและหาคำตอบจากระบบที่ได้เรียนรู้โดยมีคำตอบที่พิจารณาคือค่า CCT ซึ่งคำตอบที่ได้จากระเบียบวิธีการคำนวณจะมีความถูกต้องและแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ดี ถึงดีมาก หากข้อมูลของระบบไฟฟ้าที่นำมาให้ระเบียบวิธีการคำนวณเรียนรู้มีปริมาณและคุณภาพเพียงพอ ซึ่งระเบียบวิธีการคำนวณเป็นเพียงการดำเนินการทางเลขคณิต (Arithmetic Operations) แบบง่ายๆ อันประกอบด้วยการบวก ลบ คูณ หาร เป็นหลัก และมีการใช้เหตุใช้ผลตามหลักตรรกวิทยา (Logic) ร่วมประกอบด้วย

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการโครงข่ายประสาทเทียม

การหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้ระเบียบวิธีการคำนวณกับวิธีการ การหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งช่วงเวลาการหาคำตอบของระเบียบวิธีการคำนวณจะน้อยกว่าช่วงเวลาการหาคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเหมาะสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ และต้องการพิจารณาคำตอบของค่า CCT อยู่ในเกณฑ์ดี ซึ่งก็คือระเบียบวิธีการคำนวณจะใช้ข้อมูลที่มีอยู่มาหาคำตอบของชุดทดสอบ

1.6 ขอบเขตของการศึกษา

- 1 ศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะชั่วคราวที่อยู่ในสภาวะ stressed (สภาวะที่มีการปรับกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวนหนึ่งให้เพิ่มขึ้นจากการทำงานปกติ, มีการปลดสายส่งบางชุดที่รับภาระจำนวนมากออกเพื่อซ่อมบำรุง และพิจารณาดำเนินการเกิดฟอลต์ที่มีความรุนแรงของฟอลต์มาก)
- 2 ศึกษาองค์ประกอบของระบบไฟฟ้ากำลังทดสอบ (IEEE 50 generators test system) ที่มีผลต่อค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤต
- 3 ทำการจำลองให้เกิดฟอลต์ชนิด 3 เฟส ขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังตามตำแหน่งที่ได้จากขั้นตอนในข้อที่ 1 โดยใช้โปรแกรม Load flow and step by step time simulation [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4 ทำการฝึกสอนและทดสอบระเบียบวิธีการคำนวณด้วยข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนในข้อ 3 โดยใช้ โปรแกรม MATLAB เพื่อหาเงื่อนไขการฝึกสอนที่ทำให้ระเบียบวิธีการคำนวณมีประสิทธิภาพสูงสุด
- 5 ทำการศึกษารายละเอียดในข้อที่ 2 – 4 โดยใช้ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้งานจริงในทางปฏิบัติ (ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย)

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆดังต่อไปนี้

- 1 ศึกษาคุณสมบัติ และการทำงานของระเบียบวิธีการคำนวณชนิดต่างๆ
- 2 รวบรวมข้อมูลของระบบ ไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system และ EGAT system บริเวณภาคกลางตะวันตก และภาคใต้
- 3 ศึกษาการใช้งาน โปรแกรม Load flow and step by step time simulation
- 4 ศึกษาการใช้งาน MATLAB
- 5 ทำการจำลองเหตุการณ์โดยใช้ IEEE 50 generators test system
- 6 นำข้อมูลที่ได้ออกไปฝึกสอนและทดสอบระเบียบวิธีการคำนวณ
- 7 พิจารณาหาเงื่อนไขการฝึกสอนที่ทำให้ระเบียบวิธีการคำนวณที่ผ่านการฝึกสอนแล้วมีประสิทธิภาพสูงสุด
- 8 ทำการจำลองเหตุการณ์โดยใช้ EGAT system บริเวณภาคกลางตะวันตก และภาคใต้
- 9 นำข้อมูลที่ได้ออกไปฝึกสอนและทดสอบระเบียบวิธีการคำนวณ โดยพิจารณาหาเงื่อนไขที่ได้
- 10 วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลองและเสนอแนะแนวทางการพัฒนาการศึกษาต่อไป

บทที่ 2

เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะชั่วคราว

การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังคือการศึกษาขีดความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลังต่อการเปลี่ยนแปลงภายในของระบบซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นสามประเภทตามธรรมชาติและลำดับความรุนแรงของการรบกวน (Disturbance) คือ การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสถานะชั่วคราว, สถานะไดนามิก และสถานะอยู่ตัว

การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะชั่วคราว มีจุดมุ่งหมายเพื่อบ่งบอกถึงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังภายหลังจากที่เกิดการรบกวนขนาดใหญ่ อาทิเช่น การเกิดฟอลต์ในระบบ, การเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างทันทีทันใด หรือการสูญเสียกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ เป็นต้น ส่วนการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสถานะไดนามิก (Dynamic stability) และสถานะอยู่ตัว (Steady-state stability) นั้นเป็นการศึกษาในขอบเขตน้อยกว่าในสถานะชั่วคราว และพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียง 1 หรือ 2 เครื่อง ในสถานะการทำงานที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ โดยเป็นการพิจารณาถึงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังภายใต้การเปลี่ยนแปลงรอบๆจุดสมดุล ข้อแตกต่างของการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสถานะไดนามิกและสถานะอยู่ตัว นั้นคือ การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะไดนามิกจะพิจารณาแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบละเอียด (Detailed models), ระบบการกระตุ้น (Excitation systems) และ ระบบบังคับกังหัน (Turbine-governing systems) ส่วนการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะอยู่ตัวนั้น จะพิจารณาแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบธรรมดา (Classical models) โดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ ในปัจจุบัน การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะชั่วคราวจะได้รับความสนใจและให้ความสำคัญมากกว่าการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสถานะ ไดนามิก และสถานะอยู่ตัว

ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะชั่วคราวนั้น ช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤต (Critical clearing time, CCT) เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ถูกนำมาพิจารณาในการรักษาเสถียรภาพของระบบ วิธีการหาค่า CCT นั้นมีอยู่หลายวิธีเวลา อาทิเช่น วิธีการทางเวลา (Time domain simulation method), Direct method [6] และ Transient energy function (TEF) [7] เป็นต้นแต่ละวิธีก็จะมีควมรวดเร็วในการหาค่าตอบและข้อจำกัดแตกต่างกันออกไป วิธีการทางเวลาเป็นวิธีที่มีความแม่นยำและเชื่อถือได้มากที่สุด แต่วิธีการทางเวลาก็มีข้อด้อยคือใช้เวลาในการหาค่าตอบมากกว่าวิธีอื่นๆ วิธีนี้จึงเหมาะสำหรับใช้ในการออกแบบระบบ (Planning) มากกว่าที่จะนำมาใช้งานแบบทันทีทันใด (On-line operation) ส่วนวิธี Direct method และ Transient energy function นั้นแม้จะมีความเร็วในการหาค่าตอบมากกว่าวิธีการทางเวลาแต่วิธีทั้งสองนี้ก็มีข้อจำกัดในการใช้งานจึงเหมาะที่จะใช้กับแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบควบคุมแบบธรรมดา มากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่จะใช้กับแบบจำลองอย่างละเอียด และในกรณีที่ระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบก็ยังไม่รวดเร็วพอที่จะนำมาใช้งานแบบทันทีทันใดได้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะขอกล่าวถึงรายละเอียดเฉพาะวิธีการทางเวลา ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตเพื่อใช้ในการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณ

2.1 วิธีการทางเวลา

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

ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะชั่วคราวโดยวิธีการทางเวลานั้น คุณสมบัติการทำงานของกังหัน (Turbine), เครื่องกำเนิดไฟฟ้า รวมถึงระบบควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ ไดนามิกโหลด จะถูกแทนด้วยสมการอนุพันธ์ ในขณะที่ระบบส่ง และ สมตติกลโหลด จะถูกแทนด้วยสมการพีชคณิต การแก้สมการทั้งสองชุดดังกล่าวนี้จะใช้วิธีการเชิงตัวเลข แต่เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังมีการเชื่อมโยงกันระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดจำนวนมาก การคำนวณด้วยวิธีการเชิงตัวเลขจึงต้องอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ โดยคำตอบที่ได้จะเป็นชุดของค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบไฟฟ้ากำลังที่ลำดับเวลาต่างๆ

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

2.2 สมการสวิง

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

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

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

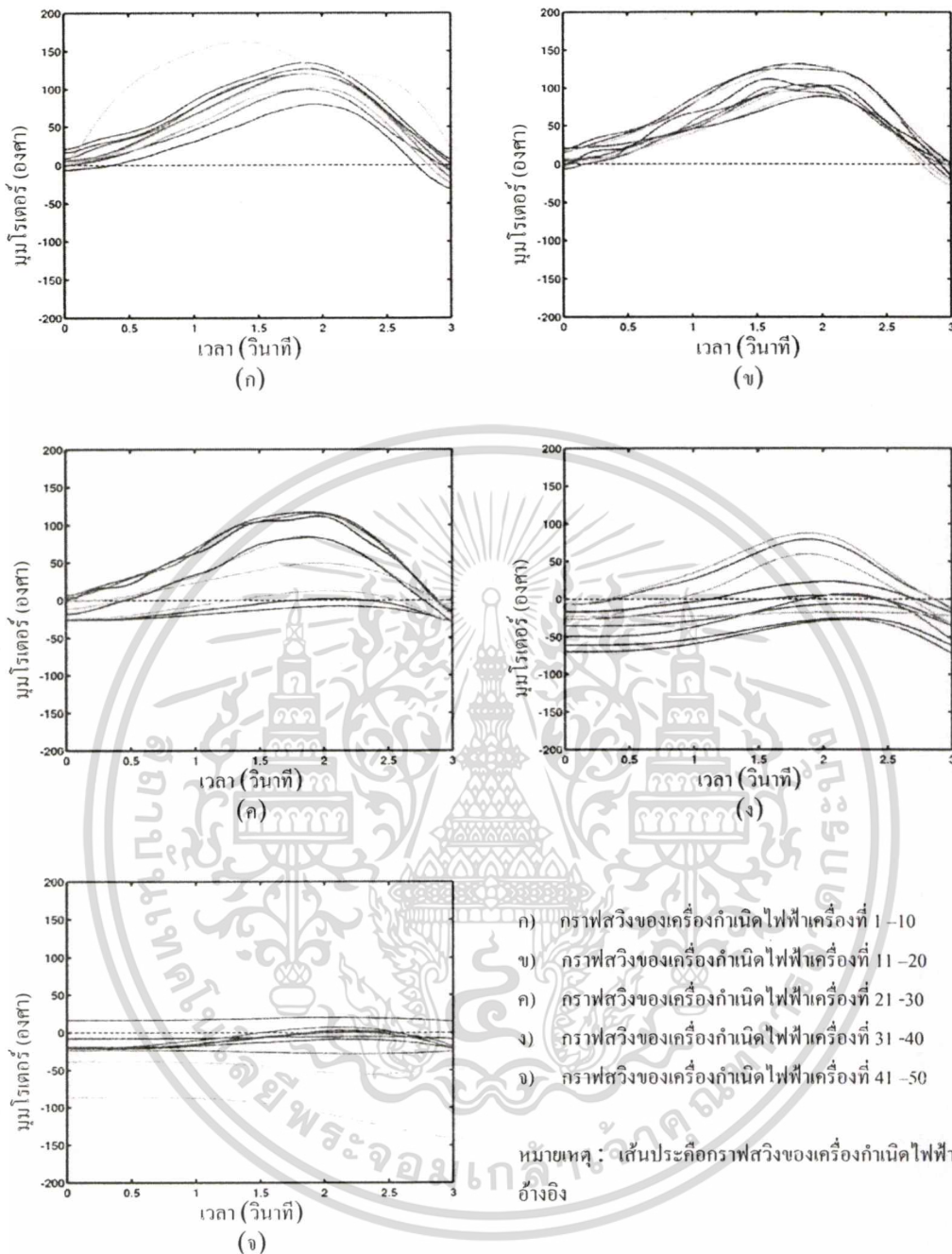
$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (2.3)$$

โดยที่	H	คือ ค่าคงที่ความเฉื่อย (Inertia constant)
	ω_s	คือ ความเร็วเชิงโคจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 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 เป็นค่าเปอร์ยูนิต ในฐานเดียวกับ H

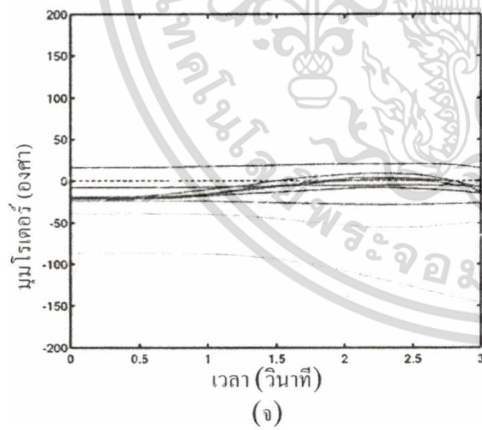
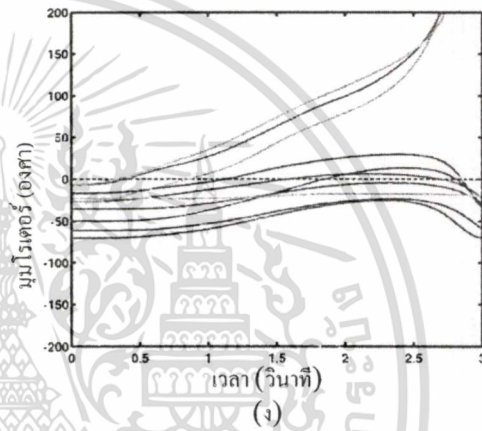
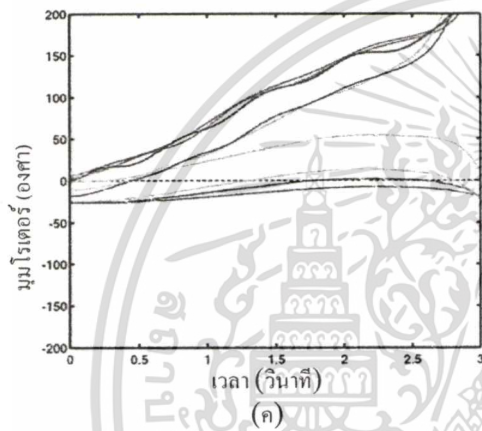
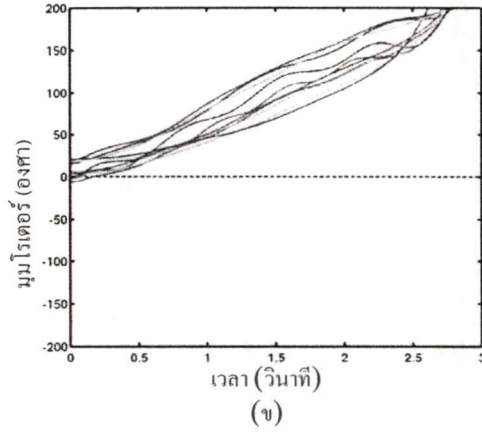
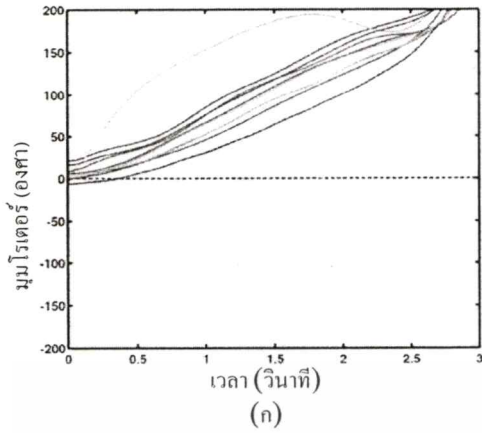
เมื่อทำการแก้สมการสวิง จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง มุมโรเตอร์ δ และเวลา t เมื่อนำไปเขียนกราฟ กราฟที่ได้จะเรียกว่ากราฟสวิง (Swing curve) ซึ่งนำมาใช้ในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง เมื่อเกิดฟลัดจิ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง มุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และหลังจากทำการเคลียร์ฟลัดจิ้นออกจากระบบ หากมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องที่เปรียบเทียบกับมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอ้างอิงมีความแตกต่างกันไม่เกิน 180 องศา [6] และมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างช้าๆจนถึงจุดคงที่จุดใหม่ (ซึ่งมีความสมดุลของกำลังไฟฟ้า และกำลังทางกล) จะถือว่าระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพ ในทางตรงข้าม หากมีมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องใดเครื่องหนึ่งยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อเปรียบเทียบกับมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอ้างอิง ก็จะทำให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 กราฟสวิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้า IEEE 50 generators test system ที่เกิดฟลัดที่บัส 105 และเคอร์รี่ฟลัดที่เวลา 120 msec [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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 ที่เกิดฟลัดที่บัส 105 และเคอร์รี่ฟลัดที่เวลา 120 msec [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหากราฟสวิงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อยู่บนสมมติฐานดังต่อไปนี้

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

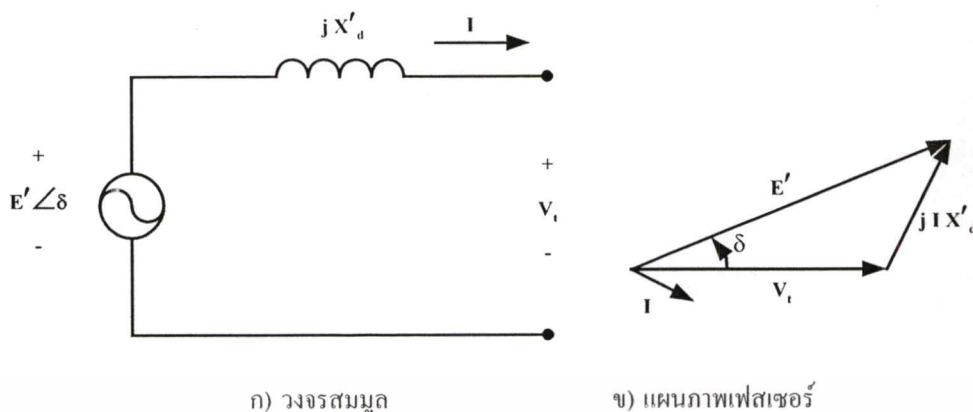
ตัวอย่างกราฟสวิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 50 เครื่องจากระบบไฟฟ้า IEEE 50 generators test system ที่เกิดฟอลต์ที่บัส 105 และเคลียร์ฟอลต์โดยการปลดสายส่งระหว่างบัส 105 และ บัส 73 ชุดที่ 1 และ 2 ที่เวลา 120 msec และ 121 msec หลังจากเกิดฟอลต์ แสดงอยู่ในรูปที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากรูปทั้งสองจะพบว่าเมื่อทำการเคลียร์ฟอลต์ที่เวลา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

2.3 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและวงจรมูลย์ของระบบไฟฟ้า

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

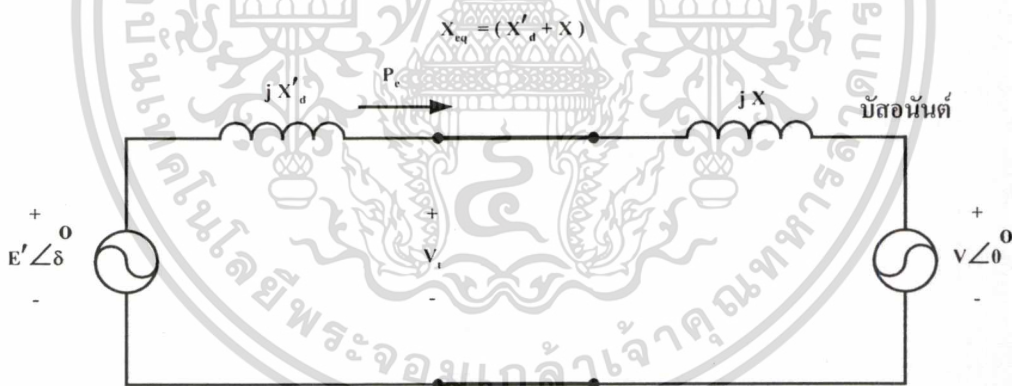
1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานในสภาวะสามเฟสสมดุลลำดับบวก (Balanced 3 phase positive sequence condition)
2. ไม่พิจารณาถึง กำลังสูญเสียและการอิมตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
3. กระแสกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator excitation) มีค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบธรรมดา

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องในระบบไฟฟ้ากำลังจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับระบบซึ่งประกอบไปด้วย สายส่ง, หม้อแปลงไฟฟ้า, โหลด และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องอื่นๆ ในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยทั่วไประบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาจะถูกแทนที่ด้วยบัสอนันต์ (Infinite bus) ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่มีขนาดของแรงดัน, มุมเฟสของแรงดัน และความถี่คงที่ เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยรีแอกแตนซ์ของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบธรรมดา

วงจรมูลของระบบไฟฟ้ากำลัง

รูปที่ 2.4 การเชื่อมต่อของแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบธรรมดากับวงจรมูลของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากรูปที่ 2.4 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบธรรมดาถูกเชื่อมต่อเข้ากับวงจรมูลของระบบไฟฟ้า (บัสอนันต์ และรีแอกแตนซ์ของระบบ) โดยมุมของแรงดันภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า δ จะถูกพิจารณาเป็นมุมกำลังและอ้างอิงกับบัสอนันต์ซึ่งกำหนดให้มีมุมเฟสคงที่เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับ 0° และรีแอกแตนซ์ชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและรีแอกแตนซ์ของระบบ สามารถพิจารณาให้อยู่ในรูปรีแอกแตนซ์สมมูล X_{cq} โดยที่

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

โดยที่ X_d' คือ และรีแอกแตนซ์ชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
 X คือ และรีแอกแตนซ์ของระบบ

2.4 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายเครื่อง

กรณีทีระบบไฟฟ้ากำลังประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายเครื่อง ความซับซ้อนในการคำนวณจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาพิจารณาในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะชั่วคราว ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น เราสามารถแบ่งชนิดของบัสในระบบได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. เจนบัส (Generator bus) หรืออาจเรียกว่า P-V บัส เป็นบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ หรือเป็นบัสที่มีทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ โหลดต่ออยู่ เป็นบัสที่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้มีขนาดคงที่ได้โดยอาศัย AVR (automatic voltage regulation) บัสชนิดนี้จะมีพารามิเตอร์ที่คงที่ได้แก่ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (P) และแรงดันไฟฟ้าที่บัส (V) ส่วนพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงค่าได้คือ แก่ กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (Q) และมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส (δ)

2. โหลดบัส (Load bus) หรืออาจเรียกว่า P-Q บัส เป็นบัสที่มีโหลดต่ออยู่ ดังนั้น พารามิเตอร์ที่คงที่ได้แก่ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (P) และกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (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) และมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส (δ) ส่วนพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงค่าได้คือกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (P) และกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (Q)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายเครื่อง จะต้องมีการเตรียมข้อมูลต่างๆของระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะอยู่ตัว ซึ่งได้มาจากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมโหลดโฟลว์ และ โครงสร้าง (Topology) ของระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะก่อนเกิดฟอลต์, ขณะเกิดฟอลต์ และหลังจากเคลียร์ฟอลต์ไปแล้ว

จากการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ เราจะทราบค่าของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (P), กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q), แรงดัน และมุมของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง และที่โหลดบัส ซึ่งค่าต่างๆจะอ้างอิงกับสวิตช์ โดยแรงดันภายในชั่วคราว (Internal transient voltage) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องสามารถคำนวณได้จาก

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

โดยที่ V_i คือ แรงดันที่ขั้ว
 I คือ กระแสเอาต์พุต

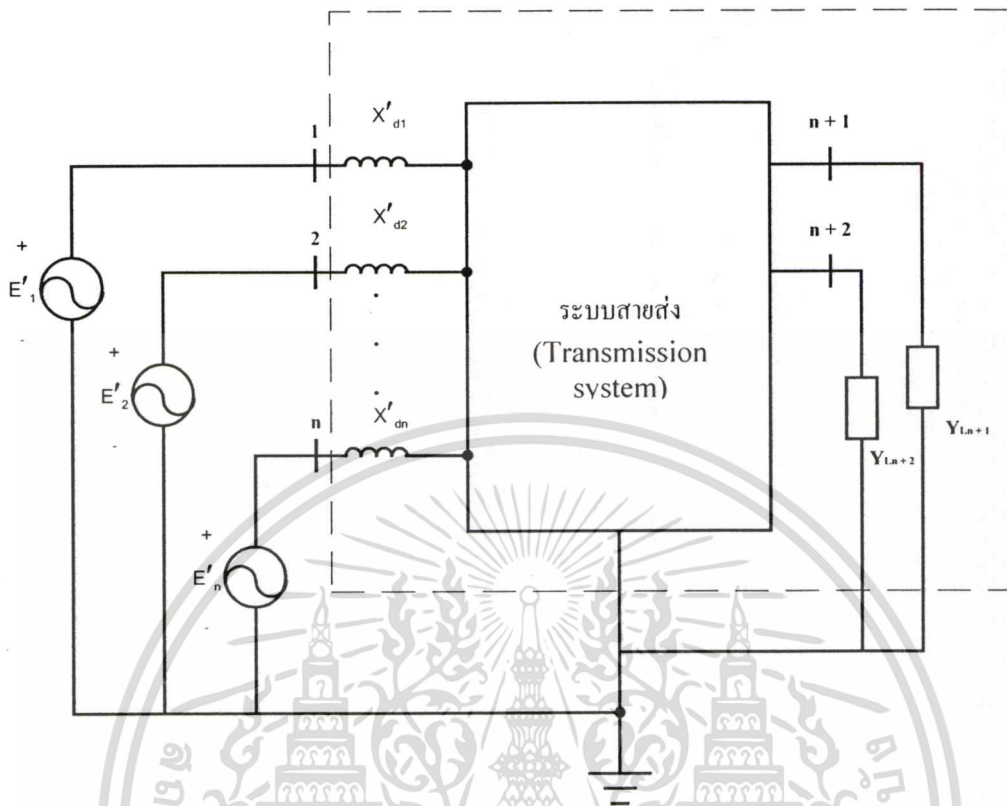
และโหลดแต่ละชุดจะถูกแปลงเป็นแอดมิทแตนซ์ (Admittance) ที่ต่อลงดิน โดยใช้สมการ

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

โดยที่ $P_L + jQ_L$ คือ ขนาดของโหลด
 V_L คือ ขนาดแรงดันที่โหลดบัส

เมตริกซ์ของบัสแอดมิทแตนซ์ ซึ่งครอบคลุมค่าของรีแอกแตนซ์ชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง และแอดมิทแตนซ์ชานานของโหลด (ดังแสดงในรูปที่ 2.5) จะใช้ในการคำนวณโหลดโฟลว์ในสภาวะก่อนเกิดฟอลต์ โดยถือว่ากระแสที่จ่ายเข้าไปในบัสทุกบัส ยกเว้นบัสภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องจะมีค่าเท่ากับศูนย์

ขอบเขตของโครงข่ายที่ถูกพิจารณาเป็นเมตริกซ์ของบัสแอดมิตแดนซ์



รูปที่ 2.5 โครงข่ายที่ถูกพิจารณาเป็นเมตริกซ์ของบัสแอดมิตแดนซ์

ในขั้นตอนต่อไปจะต้องหาเมตริกซ์ของบัสแอดมิตแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปในสภาวะที่เกิดฟอลต์ และหลังจากเคลียร์ฟอลต์ไปแล้ว เนื่องจากบัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลจะมีเพียงบัสภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องเท่านั้น บัสอื่นๆจึงถูกลดรูปจนกลายเป็นเมตริกซ์ที่มีขนาดเท่ากับจำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เราจึงสามารถคำนวณหากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องที่ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังในระหว่างเกิดฟอลต์และหลังจากเคลียร์ฟอลต์ไปแล้วได้จากสมการ

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

- โดยที่ $i = 1, 2, \dots, n$
- $n =$ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด
- $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการเปลี่ยนแปลงของมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องในสภาวะขณะเกิดฟอลต์ 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 และค่าของบัสแอดคิมิตแตนซ์ 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[4] โดยขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจะแสดงไว้อย่างละเอียดในบทที่ 4 ส่วนรายละเอียดและข้อกำหนดของโปรแกรมจะแสดงไว้ใน[4]

บทที่ 3

ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเป็นเพียงกลุ่มของวิธีการต่างๆที่เป็นขั้นเป็นตอน โดยแต่ละวิธีการนั้นเหมาะสมกับการนำไปใช้แก้ปัญหาต่างๆที่มีลักษณะจำเพาะในตัวเองซึ่งอาจแตกต่างกันออกไป หรืออาจกล่าวให้ง่ายขึ้นในอีกนัยหนึ่งก็คือ วิชาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขนั้นมีขั้นตอนกฎเกณฑ์ที่ค่อนข้างแน่นอน ลักษณะพิเศษของระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเป็นระเบียบวิธีที่เป็นเพียงการดำเนินการทางเลขคณิต (Arithmetic Operations) แบบง่ายๆ อันประกอบด้วยการบวก ลบ คูณ หาร เป็นหลัก และมีการใช้เหตุผลตามหลักตรรกวิทยา (Logic) ร่วมประกอบด้วย

จากคำอธิบายในภาพรวมของระเบียบวิธีเชิงตัวเลขข้างต้นนี้ จะเห็นได้ว่าแนวความคิดของระเบียบวิธีเชิงตัวเลขนี้ไม่ได้เป็นศาสตร์ใหม่เลย ระเบียบวิธีต่างๆได้ถูกคิดค้นกันขึ้นเป็นเวลานานแล้ว หากแต่ว่าไม่สามารถนำมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จนกระทั่งถึงการถือกำเนิดของคอมพิวเตอร์เชิงตัวเลข (Digital Computer) ทำให้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสามารถนำมาใช้กันได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถแก้ปัญหาขนาดใหญ่ได้ภายในระยะเวลาอันสั้น รวมถึงปัญหาอื่นๆอีกจำนวนมากที่ไม่สามารถหาผลลัพธ์ได้ด้วยวิธีคณิตศาสตร์แผนเดิม (Classical Mathematics) การผสมผสานเข้าด้วยกันระหว่างระเบียบวิธีเชิงตัวเลข และคอมพิวเตอร์ ก่อให้เกิดผลประโยชน์อย่างมากตามที่มองดูจากภายนอกแล้วสามารถนำไปใช้ได้โดยง่าย และให้ผลลัพธ์ที่รวดเร็ว ทำให้วิธีการนี้ได้รับความนิยม และกลายเป็นรากฐานเพื่อใช้ในการศึกษาระเบียบวิธีอื่นๆที่อยู่ระดับสูงขึ้นไป

3.1 ความสำคัญของการศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

พบว่าระเบียบวิธีเชิงตัวเลขนั้นง่ายแก่การทำความเข้าใจแล้ว ยังสามารถใช้แก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ และวิทยาศาสตร์แล้วยังสามารถแก้ปัญหาต่างๆได้ถ้ามีความเข้าใจถึงความหมายทางกายภาพ (Physical Meaning) ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการแก้ปัญหาขั้นสูงต่อไป ทั้งนี้ก็เพราะว่า การเข้าใจความหมายทางกายภาพของปัญหา จะช่วยให้เราเลือกใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่เหมาะสมกับปัญหานั้นได้ดีที่สุด ยิ่งไปกว่านั้นความเข้าใจในระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (ซึ่งมีหลายรูปแบบที่เราจะศึกษาต่อไป) โดยต้องแท้จะช่วยทำให้เราแก้ปัญหานั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในปัจจุบันถึงแม้จะมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปที่สามารถนำมาใช้ได้โดยตรง แต่หากผู้แก้ปัญหาไม่มีความรู้พื้นฐานที่ใช้ไปในการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์เหล่านั้น ก็ไม่สามารถเลือกใช้โปรแกรมที่เหมาะสมที่สุดกับปัญหานั้นได้โดยถูกต้อง ทั้งนี้สืบเนื่องมาจากหลักความจริงทั่วไปที่ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1 ไม่มีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขวิธีใดวิธีหนึ่งที่สามารถแก้ได้ทุกชนิด
 - 2 ไม่มีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขวิธีใดที่จะไม่ก่อให้เกิดค่าผิดพลาด (Error) ของผลลัพธ์ที่คำนวณได้
 - 3 ไม่มีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขวิธีใดที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาในทุกรูปแบบ
- พื้นฐานความเข้าใจในระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจึงเปรียบเสมือนรากฐานที่มั่นคงเพื่อจะส่งเสริมความสามารถในการคำนวณเพื่อใช้แก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นไป เช่น การคำนวณการไหลของอากาศผ่านเครื่องบิน

3.2 รูปแบบระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

3.2.1 Nearest Neighbor Algorithm

Nearest Neighbor Algorithm [1] ก็คือพื้นฐาน Nearest Neighbor Interpolation มีอยู่ 2 กระบวนการคือ กระบวนการฝึกฝน และกระบวนการนำกลับมา สำหรับกระบวนการฝึกฝนแต่ละอินพุต และเอาต์พุตจะเก็บข้อมูลอยู่ที่ตารางที่ 3.1 ตั้งแต่ข้อมูลฝึกสอนที่ 1 ถึงข้อมูลฝึกสอนที่ n ในส่วนของชุดข้อมูลทดสอบจะเก็บอยู่ที่ตารางที่ 3.1 ตั้งแต่ข้อมูลที่ 1 ถึงข้อมูลที่ d แต่ละชุดข้อมูลทั้งข้อมูลฝึกสอน และข้อมูลทดสอบจะมีหลายอินพุตจนถึง m อินพุต ซึ่งข้อมูลที่ 1 จะใช้หา Nearest Neighbor ซึ่งจะประกอบด้วยชุดทดสอบ $(t_{i1}, t_{i2}, t_{i3}, \dots, t_{im})$ โดยที่ $i=1, 2, 3, \dots, d$ โดยจะเปรียบเทียบกับชุดข้อมูลสอนในตารางที่ 3.1 ซึ่งผลที่ได้ $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ หาได้จาก (3.1) ในส่วนของกระบวนการนำกลับมา (Δ_{min}) คือกฎเกณฑ์อย่างหนึ่งในการหา เอาต์พุตที่ใกล้เคียงกับค่าของเอาต์พุตในตำแหน่งข้อมูลทดสอบ (3.2) ซึ่งข้อมูลฝึกสอนสามารถเลือกมาจาก Δ_{min} ดังนั้นเอาต์พุตของชุดทดสอบ i ก็คือ เอาต์พุตของชุดข้อมูลฝึกสอน k ดังนั้น ok_1 และ ok_2 พิจารณาได้จากตารางที่ 1

ข้อมูลฝึกสอน 1: $W_{1j}; j = 1, 2, \dots, m$

ข้อมูลฝึกสอน 2: $W_{2j}; j = 1, 2, \dots, m$

.....

ข้อมูลฝึกสอน n : $W_{nj}; j = 1, 2, \dots, m$

ข้อมูลทดสอบ i : $t_{ij}; j=1, 2, \dots, m$

$$\Delta_1 = \sum_{j=1}^{j=m} (w_{1j} - t_{ij})^2 \quad (3.1)$$

$$\Delta_2 = \sum_{j=1}^{j=m} (w_{2j} - t_{ij})^2$$

⋮

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta_n = \sum_{j=1}^{j=m} (w_{nj} - t_{ij})^2$$

m=จำนวนสมาชิกของอินพุท

$$\Delta_{min} = \text{ค่าต่ำที่สุดของ } [\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n] \tag{3.2}$$

ดังนั้นข้อมูลฝึกสอนของ Nearest Neighbor Algorithm หาได้จาก Δ_{min} โดยมาจาก $[\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n]$

ตารางที่ 3.1 ตารางข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนสำหรับ Nearest Neighbor Algorithm

ข้อมูลฝึกสอน	สถานะ	ข้อมูลอินพุท				ข้อมูลเอาต์พุท	
		อินพุท 1	อินพุท 2	.....	อินพุท m	เอาต์พุท 1	เอาต์พุท 2
1	1	W_{11}	W_{12}	.....	W_{1m}	O_{11}	O_{11}
2	2	W_{21}	W_{22}	.....	W_{2m}	O_{21}	O_{22}
k	k	W_{k1}	W_{k2}	.....	W_{km}	O_{k1}	O_{k2}
n	n	W_{n1}	W_{n2}	.....	W_{nm}	O_{n1}	O_{n2}

3.2.2 Nonlinear Interpolation

ลักษณะแบบแผน Nonlinear Interpolation [1] จะแสดงในรูปที่ 3.1 ถ้า Nearest Neighbor ของชุดข้อมูลทดสอบ i (ตำแหน่ง *) ก็คือการฝึกสอนชุดข้อมูล m (ตำแหน่ง O) ดังรูปที่ 3.1 (a) ซึ่งจะมีความเกี่ยวข้องกับ Δ_{min} ดังนั้น อินพุทของชุดข้อมูลทดสอบ i' (ตำแหน่ง +) ก็คือ การคำนวณโดยใช้ (3.3) ซึ่งจะมีระยะทาง เหมือนกับระยะทาง Δ_{min} ถึงชุดทดสอบ i ดังนั้นชุดทดสอบ i' ก็คือ การคัดแปลงตำแหน่งของชุดข้อมูลทดสอบ i ถ้า Nearest Neighbor ของชุดทดสอบ i' ก็คือการฝึกฝนชุดข้อมูล n (ตำแหน่ง x) ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับ Δ_{min}' ดังนั้นเอาต์พุทของชุดข้อมูลทดสอบ i Nonlinear Interpolation มาจาก (3.4) ซึ่งเอาต์พุทของชุดข้อมูลทดสอบ i ก็คือการคำนวณโดยใช้เอาต์พุทของชุดข้อมูลฝึกสอน m ซึ่งจะมีความเกี่ยวข้องกับ Δ_{min} และเอาต์พุทของการฝึกฝนชุดข้อมูล n จะมีความเกี่ยวข้องกับ Δ' ดังแสดงใน (3.4) เพราะฉะนั้นค่าเอาต์พุทของชุดข้อมูลทดสอบ i ก็คือค่าเอาต์พุทระหว่างชุดข้อมูลฝึกสอน m และ n ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (b) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับระยะทาง Δ_{min} และ Δ'

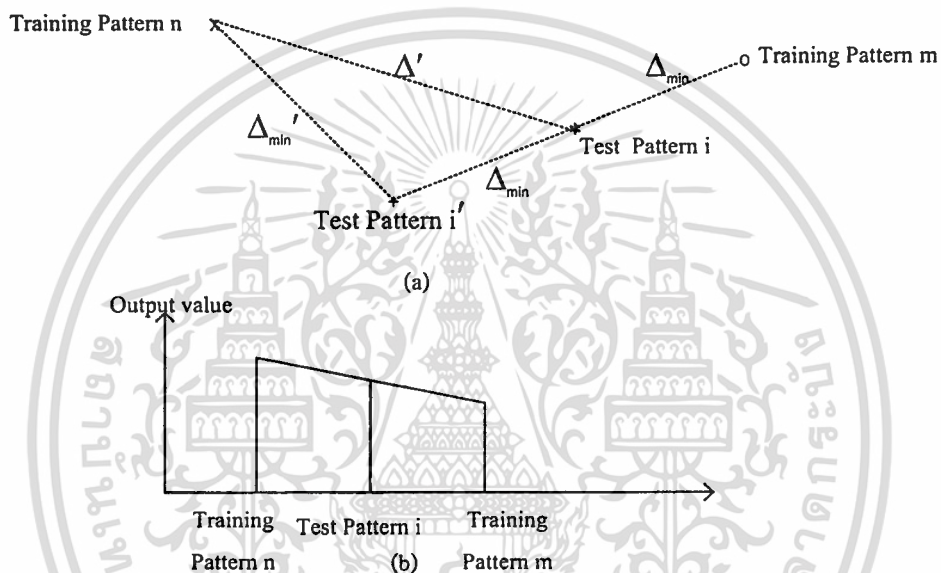
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(อินพุทของตำแหน่ง +) =

$$2 \cdot (\text{อินพุทของตำแหน่ง } *) - (\text{อินพุทของตำแหน่ง } O) \quad (3.3)$$

(เอาท์พุทของตำแหน่ง *) =

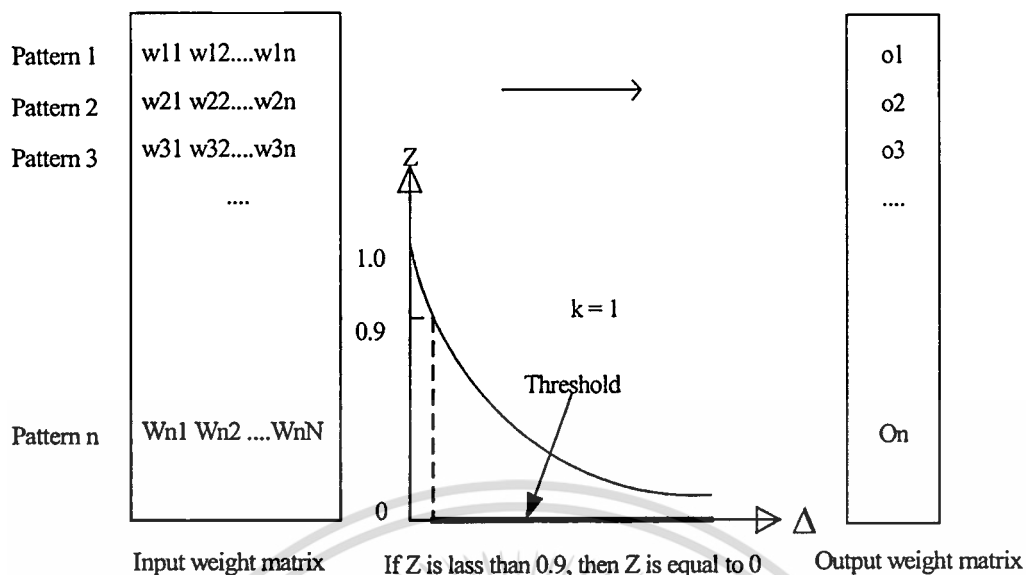
$$\frac{e^{-\Delta_{\min}} \cdot \text{o/p of point } o + e^{-\Delta'} \cdot \text{o/p of point } x}{e^{-\Delta_{\min}} + e^{-\Delta'}} \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.1 Nonlinear Interpolation [1]

3.2.3 Weight Average

ทั้งชุดข้อมูลฝึกสอนอินพุท และเอาท์พุทจะอยู่ในรูปของ input weight matrix และ output weight matrix [1] ตามลำดับโดยมีการ transfer function ระหว่าง input weight และ output weight matrix ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ถ้าเรามีชุดข้อมูลฝึกสอน n และชุดข้อมูลฝึกสอนอินพุทอื่นๆ ซึ่งมี n อินพุท และชุดข้อมูลฝึกสอนเอาท์พุทอื่นๆ 1 เอาท์พุทดังแสดงในรูปที่ 3.2 ดังนั้นชุดข้อมูลฝึกสอนอื่นๆจะมีส่วนประกอบของ input weight matrix คือ



รูปที่ 3.2 Weight Average [1]

ข้อมูลฝึกสอน 1: \$W_{1j}; j = 1, 2, \dots, n\$

ข้อมูลฝึกสอน 2: \$W_{2j}; j = 1, 2, \dots, n\$

.....

ข้อมูลฝึกสอน n: \$W_{nj}; j = 1, 2, \dots, n\$

$$\Delta_{c,i} = \sum_{j=1}^N (w_{cj} - w_{ij})^2 \quad ; i = 1, 2, \dots, c, \dots, n$$

$$\quad ; j = 1, 2, \dots, N \quad (3.5)$$

$$z_{c,i} = e^{-k\Delta_{c,i}} \quad ; k = \text{constant} \quad (3.6)$$

$$\text{output } o_c = \frac{\sum_{i=1}^n z_{c,i} \cdot o_i}{\sum_{i=1}^n z_{c,i}} \quad (3.7)$$

ถ้า \$Z_{c,i} < \alpha\$ แล้ว \$Z_{c,i} = 0\$ สำหรับ (3.6) เมื่อชุดข้อมูลการฝึกสอนแต่ละอินพุท คือเอาท์พุท \$O_c\$ เมื่อใช้ชุดข้อมูลการฝึกสอนใหม่ (ชุดข้อมูลทดสอบ) รวมทั้งเอาท์พุทใหม่ก็คือถ้าใช้ Nearest Neighbor กับชุดข้อมูลฝึกสอนใหม่(ชุดข้อมูลทดสอบ) โดยใช้ (3.5), (3.6) และ (3.7) จะได้ เอาท์พุทใหม่ โดยเลือกจากค่าคงที่ของ \$k\$ และ \$\alpha\$ ซึ่งจะเป็นการประมาณค่าโดยการปรับค่าคงที่ \$k\$ และ \$\alpha\$ จากข้อมูลฝึกสอนทั้งหมด ซึ่งค่าคงที่ของ \$k\$ และ \$\alpha\$ จะเรียนรู้มาจาก 37% ของชุดข้อมูลฝึกสอนทั้งหมด โดยมีอัตราส่วน \$1/e: 1-1/e\$ ดังนั้นการเลือกค่าคงที่ของ \$k\$ และ \$\alpha\$ ที่เหมาะสมที่สุดจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาจากค่า Mean Absolute Error ค่าที่ต่ำที่สุด ซึ่งจะส่งผลต่อค่า O_c ที่ได้ เพื่อนำมาหาค่า Maximum, Mean, และ Minimum โดยเปรียบเทียบกับค่าเอาท์พุทจริงฯ

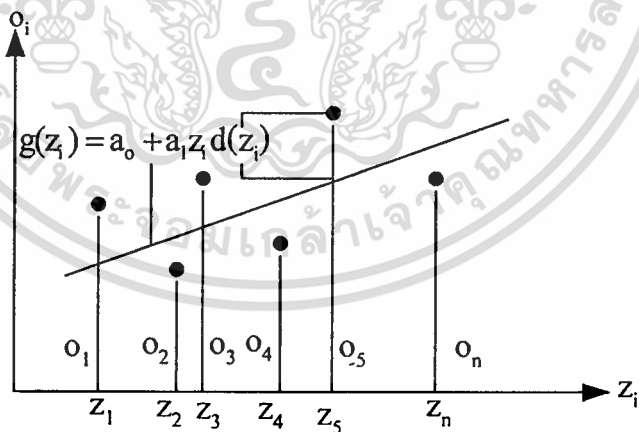
3.2.4 Least Square

การประมาณค่าพารามิเตอร์แบบกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square) ของความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลฝึกสอนอินพุท และเอาท์พุท ซึ่งเป็นเซตของข้อมูลคู่ลำดับเอาท์พุท และอินพุท ดังรูปที่ 3.3 ประกอบด้วยชุดข้อมูลฝึกสอนอินพุท n ข้อมูล และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอนเอาท์พุท 1 เอาท์พุท โดยใช้ Nearest Neighbor กับชุดข้อมูลฝึกสอนใหม่(ชุดข้อมูลทดสอบ) และใช้การ Transfer Function ระหว่างชุดข้อมูลฝึกสอนทางด้านอินพุท และเอาท์พุทดังใน (3.5) และ(3.6) และจัดระเบียบข้อมูลให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันเส้นตรง

$$g(z_i) = a_0 + a_1 z_i \quad ; i = 1, 2, \dots, n \quad (3.8)$$

จากรูปที่ 3.3 จะเห็นว่า ณ ตำแหน่ง z_i ของข้อมูล i ใดๆค่าของฟังก์ชัน $g(z_i)$ จะมีค่าแตกต่างไปจากค่าของข้อมูลเอาท์พุท (o_i) เท่ากับ $d(z_i)$ ที่ตำแหน่งนั้น นั้นหมายถึงว่าค่าความผิดพลาด E ทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากข้อมูลทั้งหมด n ข้อมูล

$$E = \sum_{i=1}^n [d(z_i)]^2 \quad ; i = 1, 2, \dots, n \quad (3.9)$$



รูปที่ 3.3 Least Square

จาก (3.9) จะให้ความหมายของค่าความผิดพลาดทั้งหมดเป็นดังใน (3.10) หาค่า a_0 และ a_1 ที่ต้องการได้โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square) ซึ่งทำการหาค่าต่ำสุด (Minimization) ของค่าความผิดพลาดนั้นคือ (3.11),(3.12)

$$E = \sum_{i=1}^n [o_i - (a_0 + a_1 z_i)]^2 \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_0} = 2 \sum_{i=1}^n [o_i - (a_0 + a_1 z_i)](-1) = 0 \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_1} = 2 \sum_{i=1}^n [o_i - (a_0 + a_1 z_i)](-z_i) = 0 \quad (3.12)$$

3.3 คอมพิวเตอร์

การศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขนั้นประกอบด้วย 2 ส่วนประกอบที่สำคัญส่วนประกอบแรกคือ เนื้อหาขั้นตอนของวิธีการชนิดต่างๆที่ต้องศึกษาทำความเข้าใจ และส่วนประกอบที่สองก็คือ ความสามารถในการใช้คอมพิวเตอร์รวมทั้งความเข้าใจในการใช้ภาษาคอมพิวเตอร์เพื่อเปลี่ยนขั้นตอนของวิธีการชนิดต่างๆนั้นออกมาเป็นตัวเลขความสามารถในการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ และการใช้ภาษาคอมพิวเตอร์ได้อย่างดีนั้นอาจกล่าวได้ว่าขึ้นอยู่กับประสบการณ์ที่ผ่านมาของผู้ใช้เกือบทั้งหมด กล่าวคือ ยังมีโอกาสใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ต่างๆชนิดกันมากเท่าใด และยังสามารถประยุกต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นมาได้มากเพียงใด ก็จะมีประสบการณ์มากขึ้นเพียงนั้นประสบการณ์ดังกล่าวเป็นสิ่งที่สำคัญ และจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการแก้ปัญหาทางด้านเชิงตัวเลขขั้นสูงที่มีความซับซ้อนยิ่งขึ้น

3.4 ความผิดพลาด

โดยปกติทั่วไปการคำนวณย่อมมีความผิดพลาด แต่ความผิดพลาดขนาดไหนถึงเป็นที่ยอมรับได้ และความผิดพลาดดังกล่าวเกิดจากสาเหตุใด

- ความผิดพลาดจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical modeling) ขึ้นตอนในการแก้ปัญหาโดยทั่วไป เริ่มจากการจำลองรูปแบบของปัญหาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- ความผิดพลาดจากการแพร่ขยาย (Propagation of Error) เป็นความผิดพลาดที่เกิดขึ้นขณะทำการคำนวณในขั้นตอนหนึ่งซึ่งจะมีผลไปสู่การคำนวณอีกขั้นตอนหนึ่ง
- ความผิดพลาดจากข้อมูล (Error Form Data) ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณมีส่วนทำให้ผลลัพธ์เปลี่ยนแปลง

- ความผิดพลาดจากการเผลอเรอ (Blunder) เป็นความผิดพลาดที่ปรกติจะเกิดจากมนุษย์ นับตั้งแต่การกรอกข้อมูลผิด พิมพ์ตัวเลขผิด รวมไปถึงการเขียน โปรแกรม คอมพิวเตอร์
- ความผิดพลาดจากการตัดปลาย (Truncation Error) เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการตัดพจน์บางพจน์ของสมการทิ้งไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ระบบไฟฟ้าที่ทำการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเอาระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ 1 ระบบมาให้ระเบียบวิธีการคำนวณเรียนรู้พฤติกรรมของระบบและให้คำตอบเป็นค่า 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 และโหลดที่บัสต่างๆตั้งรายละเอียดในภาคผนวก ก. เนื่องจากเป็นระบบที่มีการเชื่อมโยงกันด้วยสายส่งที่มากถึง 453 เส้น การนำเสนอภาพรวมของระบบด้วยแผนภาพเส้นเดียว (Single line diagram) จึงไม่สามารถทำได้อย่างครบถ้วนจึงขอนำเสนอเฉพาะในบริเวณที่ศึกษา ซึ่งได้ลงรายละเอียดเพิ่มเติมบางส่วนจาก [2] ดังแสดงในรูปที่ 4.1

4.1.2 เงื่อนไขของระบบที่พิจารณา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาสถิติภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system โดยกำหนดเงื่อนไขของการศึกษาดังนี้

- 1) แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้เป็นแบบธรรมดา (Classical models)
- 2) จำลองสถานะของระบบ โดยกำหนดให้เกิดฟอลต์ชนิด 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 เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการฝึกสอนและทดสอบระเบียบวิธีการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การจำลองเหตุการณ์

จากการจำลอง (Simulation) ให้เกิดฟอลต์ชนิด 3 เฟสที่ตำแหน่งต่างๆที่เป็นไปได้ในระบบและทำการเคลียร์ฟอลต์ออกจากระบบ 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 โครงสร้างร่วมกับโครงสร้างปกติของระบบได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.3

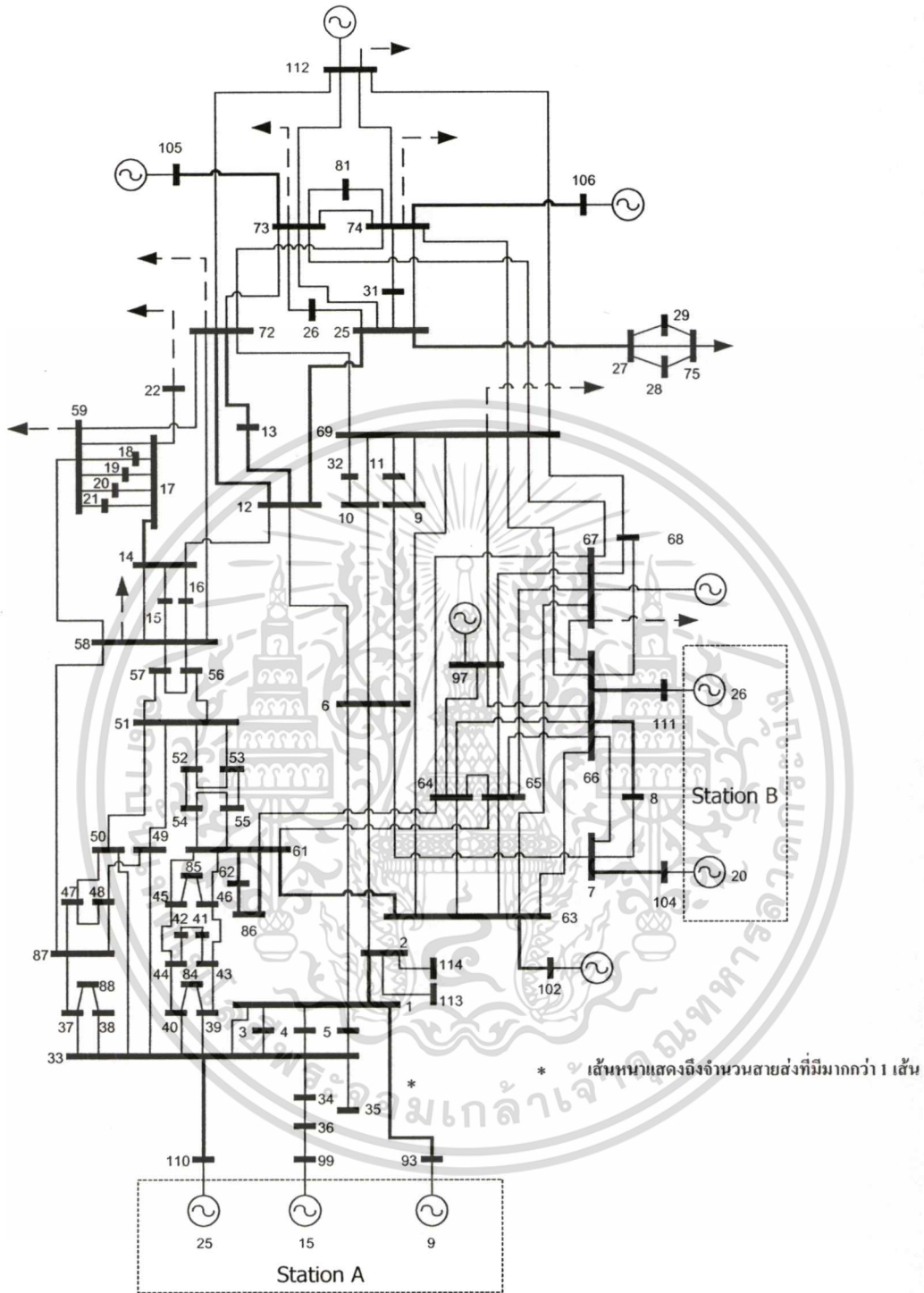
ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งเกิดฟอลต์ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system ที่พิจารณา

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

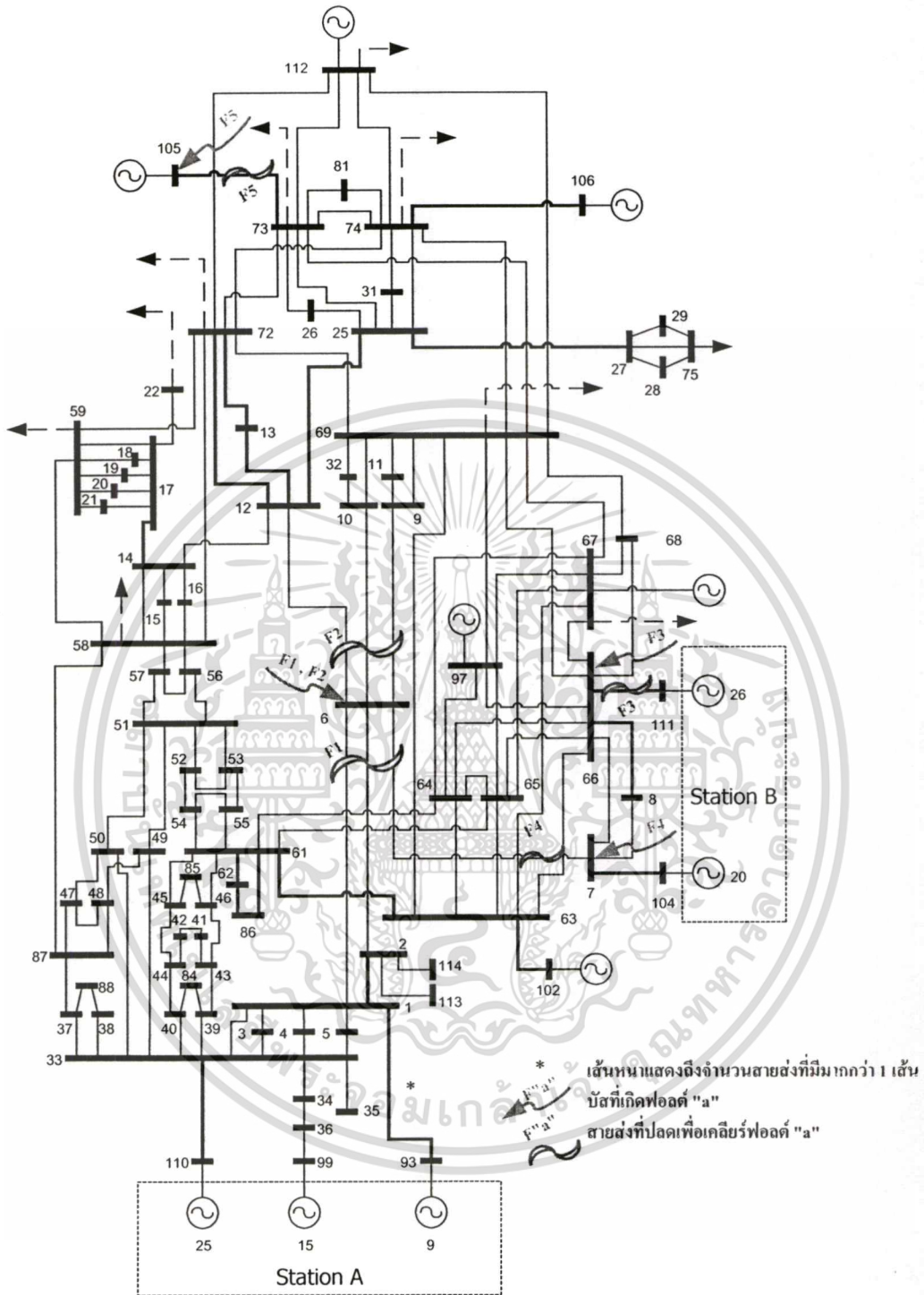
โครงสร้างของระบบ	สถานะของการปลดสายส่ง
S1	ไม่มีการปลดสายส่งใดๆ
S2	มีการปลดสายส่งระหว่างบัส 64 - 66
S3	มีการปลดสายส่งระหว่างบัส 69 - 72
S4	มีการปลดสายส่งระหว่างบัส 25 – 27 ชุดที่ 2

เมื่อได้ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และ โครงสร้างของระบบที่ต้องการแล้ว ในขั้นตอนต่อไปจะทำการเลือกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะปรับกำลังผลิต โดยในที่นี้จะพิจารณาตามกรณีศึกษาใน [2] โดยเลือกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่กับบัสหมายเลข 93, 99 และ 110 ใน station A และบัสหมายเลข 104 และ 111 ใน station B ดังแสดงในรูปที่ 4.4



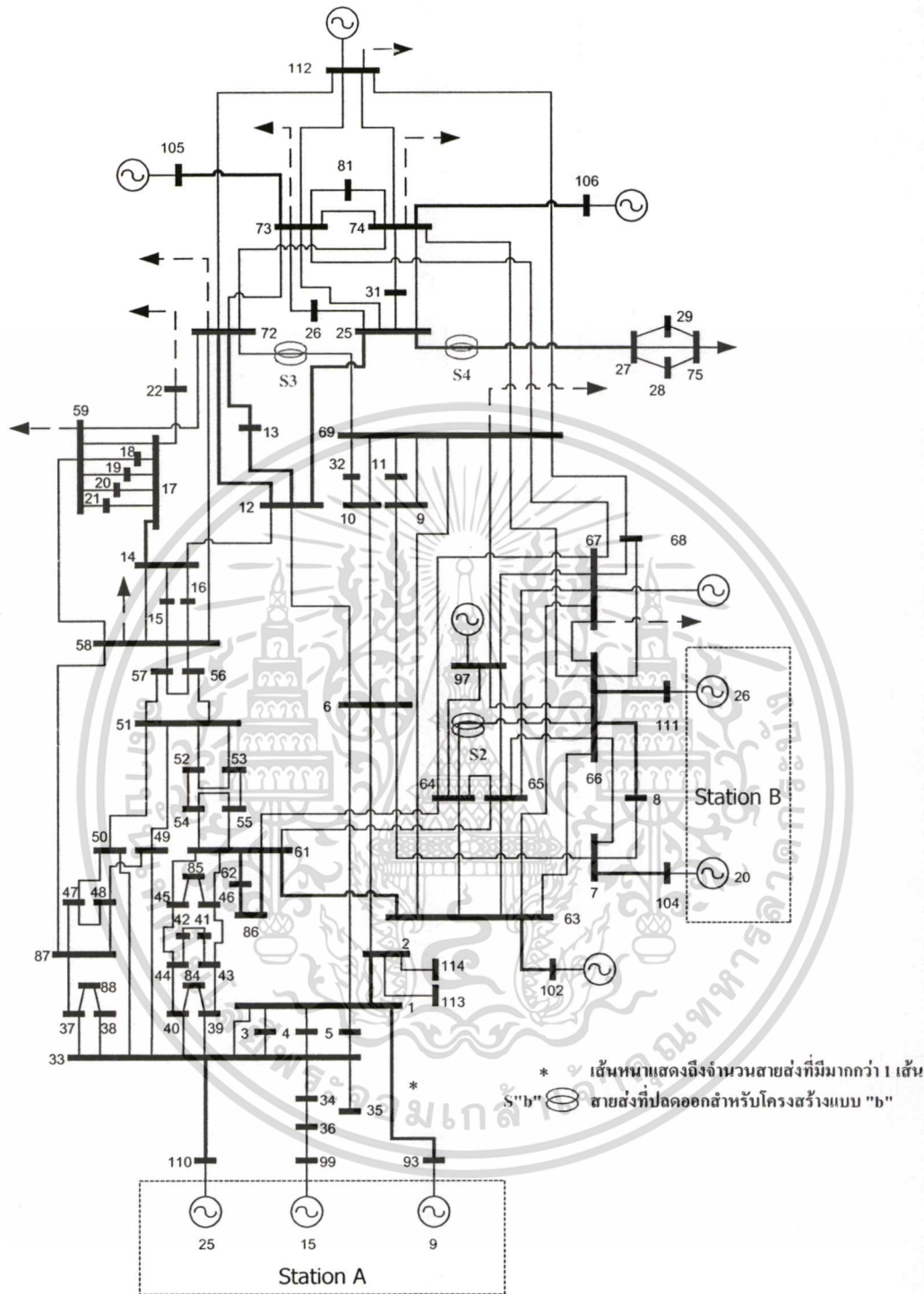
รูปที่ 4.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generator test system บริเวณที่ศึกษา [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



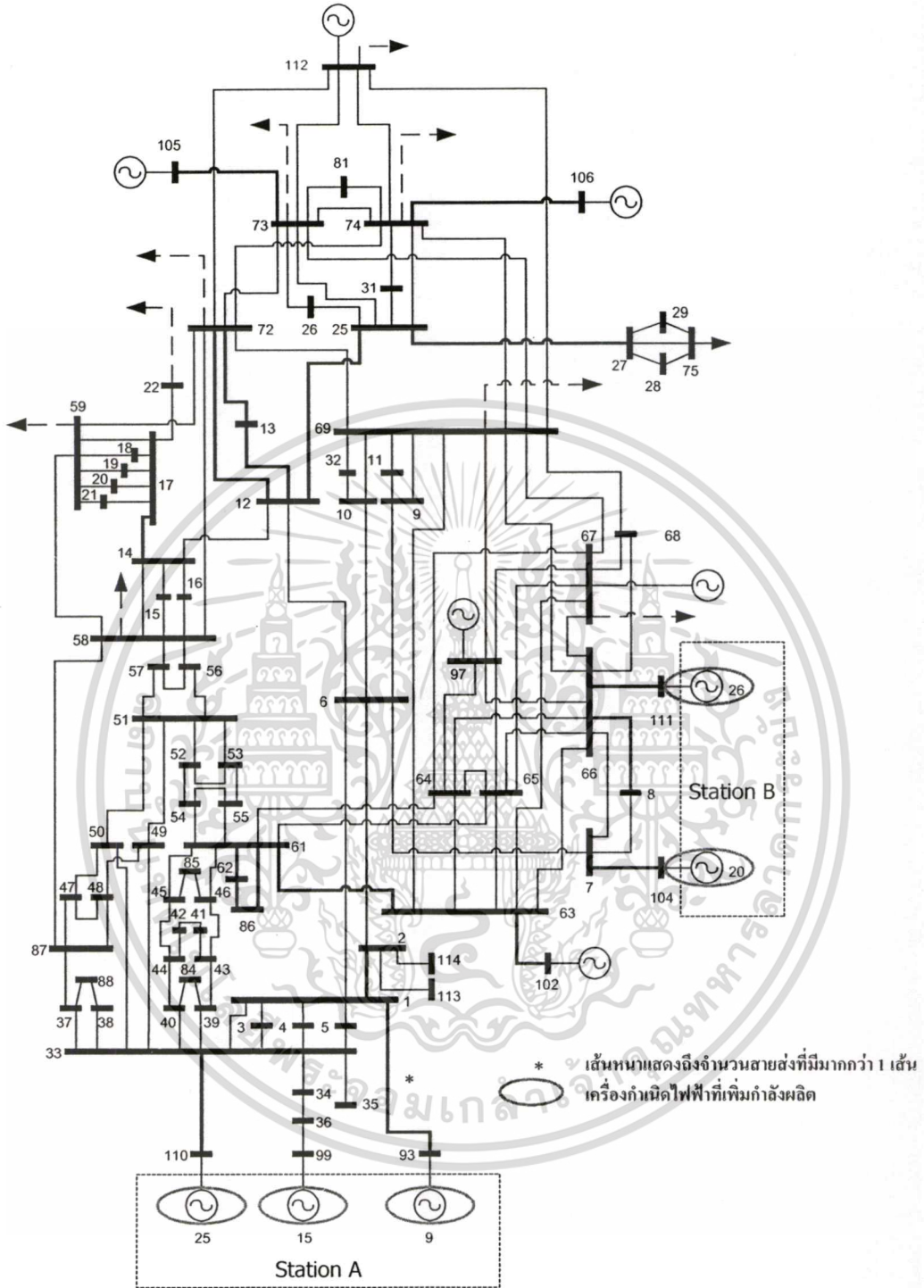
รูปที่ 4.2 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generator test system : ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generator test system : โครงสร้างของระบบที่พิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 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 เมื่อพิจารณาถึงระบบไฟฟ้าทั้งประเทศแล้ว ระบบจะมีขนาดใหญ่เกินขีดความสามารถของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกพิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเฉพาะในบริเวณภาคกลางตะวันตกและภาคใต้ ซึ่งมีขนาดเหมาะสมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ โดยระบบไฟฟ้าในส่วนที่นำมาพิจารณาจะประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดต่างๆรวมกัน 30 เครื่อง เชื่อมต่อเข้ากับระบบส่งซึ่งประกอบด้วย บัสที่มีขนาดแรงดัน 500 kV, 230 kV, 115 kV ทั้งสิ้น 152 บัส, สายส่ง 234 เส้น และโหลดที่บัสต่างๆ ดังรายละเอียดในภาคผนวก ก. โดยสามารถนำเสนอภาพรวมของระบบเป็นแผนภาพเส้นเดียวดังแสดงในรูปที่ 4.5 [8]

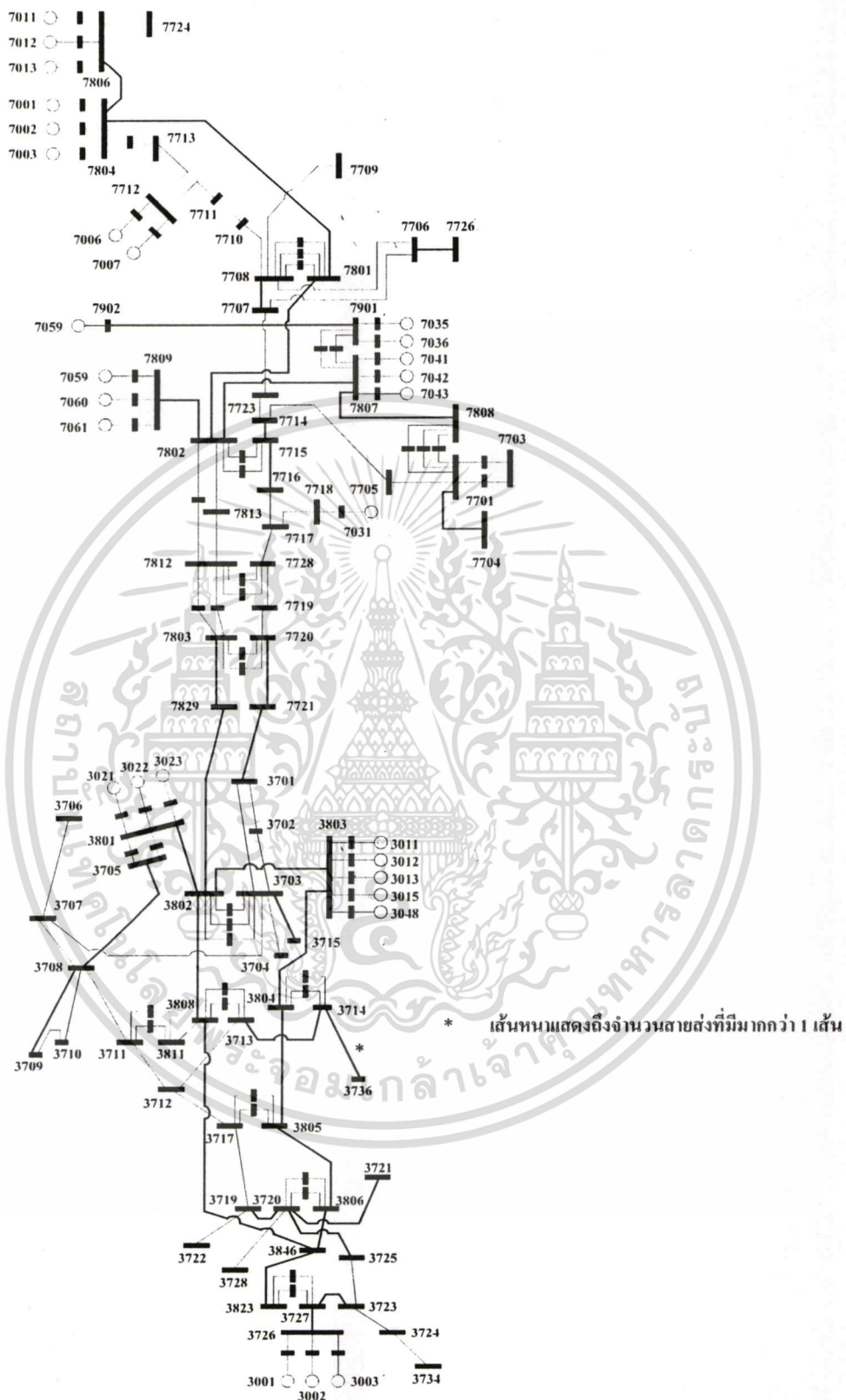
4.2.2 เงื่อนไขของระบบที่พิจารณา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเฉพาะในบริเวณภาคกลางตะวันตกและภาคใต้ โดยกำหนดเงื่อนไขของการศึกษาเช่นเดียวกันกับระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system

4.2.3 การจำลองเหตุการณ์

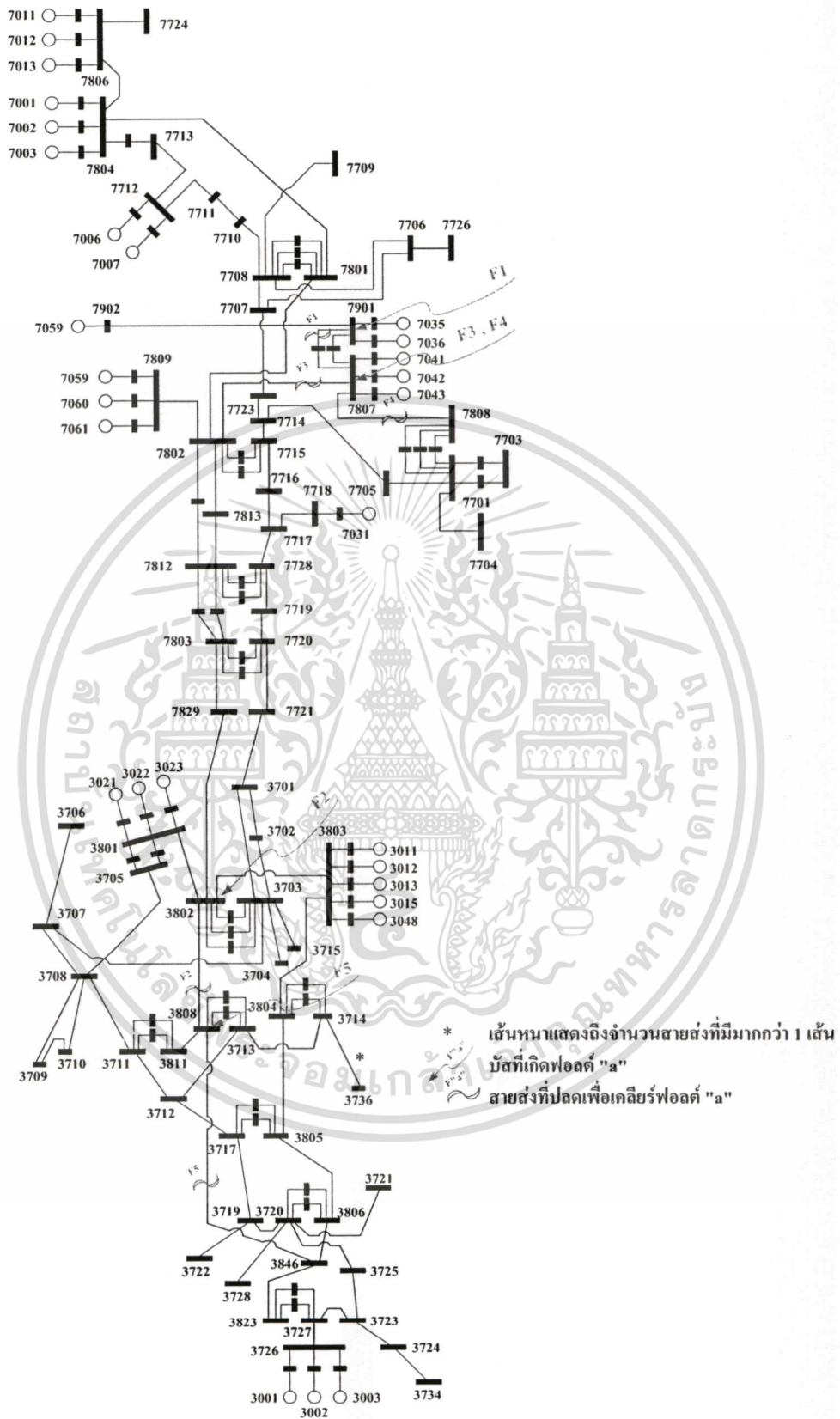
จากการจำลองให้เกิดฟอลต์ชนิด 3 เฟสที่ตำแหน่งต่างๆที่เป็นไปได้ในระบบและทำการเคลียร์ฟอลต์ออกจากระบบ และเลือกตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ที่มีค่า CCT ต่ำที่สุด 5 ตำแหน่ง (F1 – F5) จะนำไปดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.6 หลังจากนั้นจึงทดลองเลือกปลดสายส่งในระบบที่เป็นไปได้หนึ่งเส้นโดยพิจารณาจากสายส่งที่ทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากมากไปน้อย และจำลองให้เกิดฟอลต์ชนิด 3 เฟสอีกครั้งหนึ่งเพื่อหาโครงสร้างที่มีผลกระทบโดยตรงต่อค่า CCT ของ F1 – F5 จำนวน 3 โครงสร้าง ร่วมกับโครงสร้างปกติของระบบได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.7

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



รูปที่ 4.5 ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยบริเวณภาคกลางตะวันตก และภาคใต้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

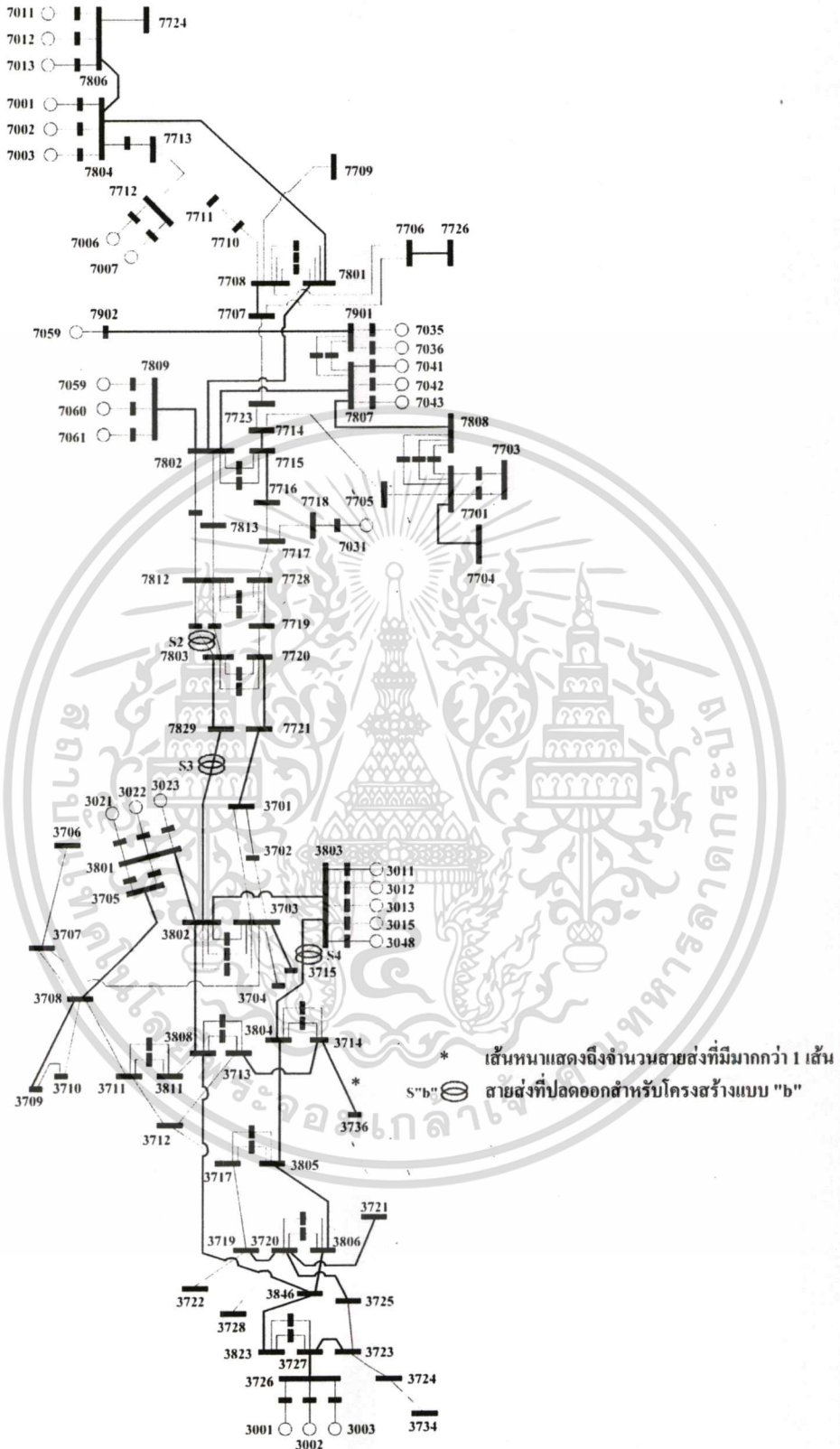


รูปที่ 4.6 ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยบริเวณภาคกลางตะวันตก

และภาคใต้: ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์

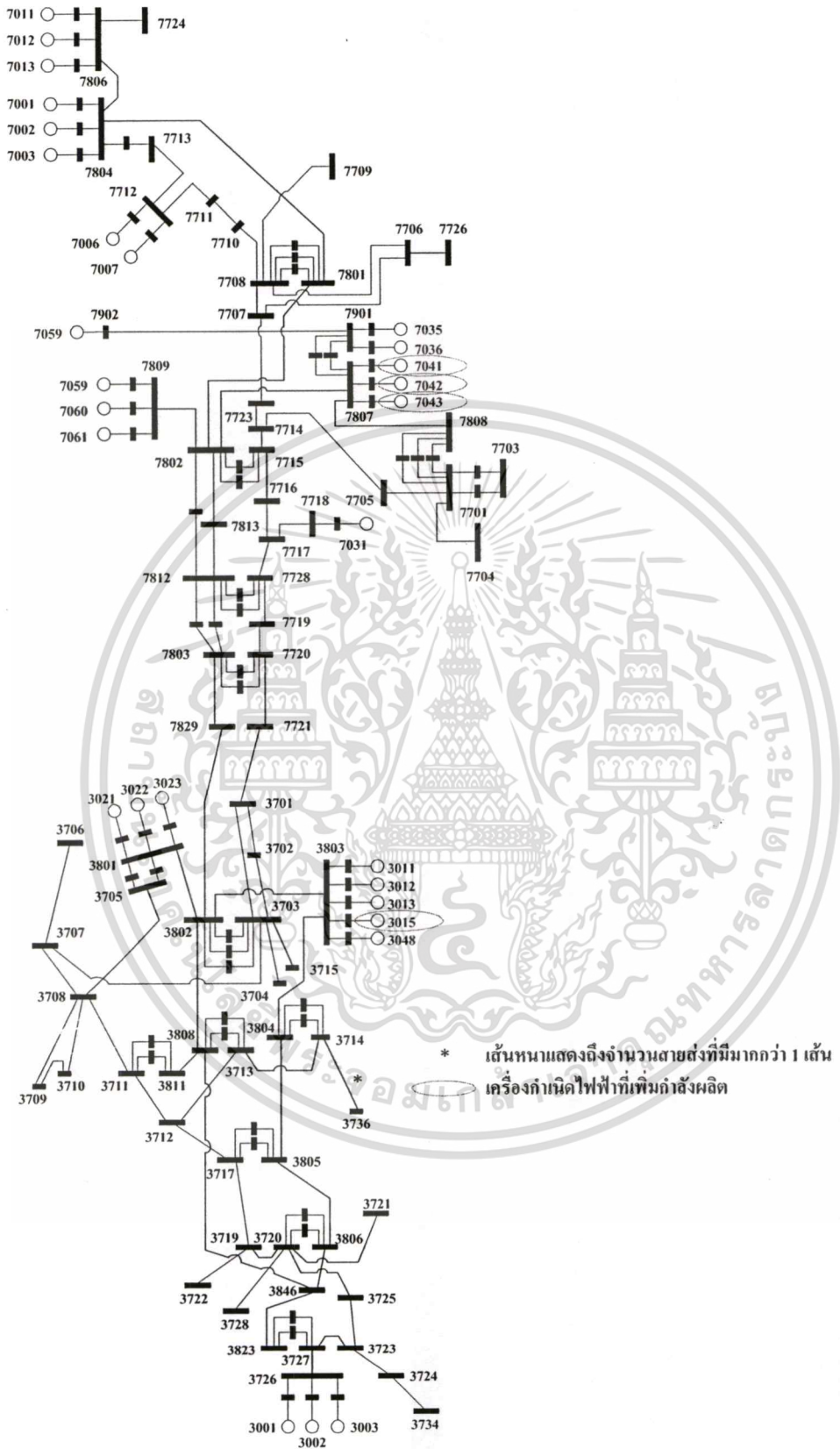
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยบริเวณภาคกลางตะวันตก และภาคใต้ : โครงสร้างของระบบที่พิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยบริเวณภาคกลางตะวันตก

และภาคใต้: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เพิ่มกำลังผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ตำแหน่งเกิดฟอลต์ของระบบไฟฟ้ากำลังของ EGAT ที่พิจารณา

ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์	บัสที่เกิดฟอลต์	ปลดสายส่งระหว่างบัส	ค่า CCT ที่คำนวณได้ในสภาวะการทำงานปกติ (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 เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการฝึกสอนและทดสอบระเบียบวิธีการคำนวณนั้น จะต้องจัดเตรียมข้อมูลของระบบไฟฟ้ากำลังทั้งสองระบบให้อยู่ในรูปแบบของ Load flow data file และ Dynamic data file

Load flow data file จะประกอบไปด้วยข้อมูลของ แรงดัน, มุมของแรงดัน, กำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และโหลดที่บัสต่างๆของระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อใช้ในการคำนวณโหลดโพลว์ ส่วน Dynamic data file จะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์, เวลาที่เคลียร์ฟอลต์ออกจากระบบ, สายส่งที่ปลดออกเพื่อเคลียร์ฟอลต์ และรูปแบบการแสดงผลของโปรแกรม ซึ่งในที่นี้กำหนดให้แสดงผลในรูปของกราฟสวิง โดยรายละเอียดของ Load flow data file และ Dynamic data file [4]

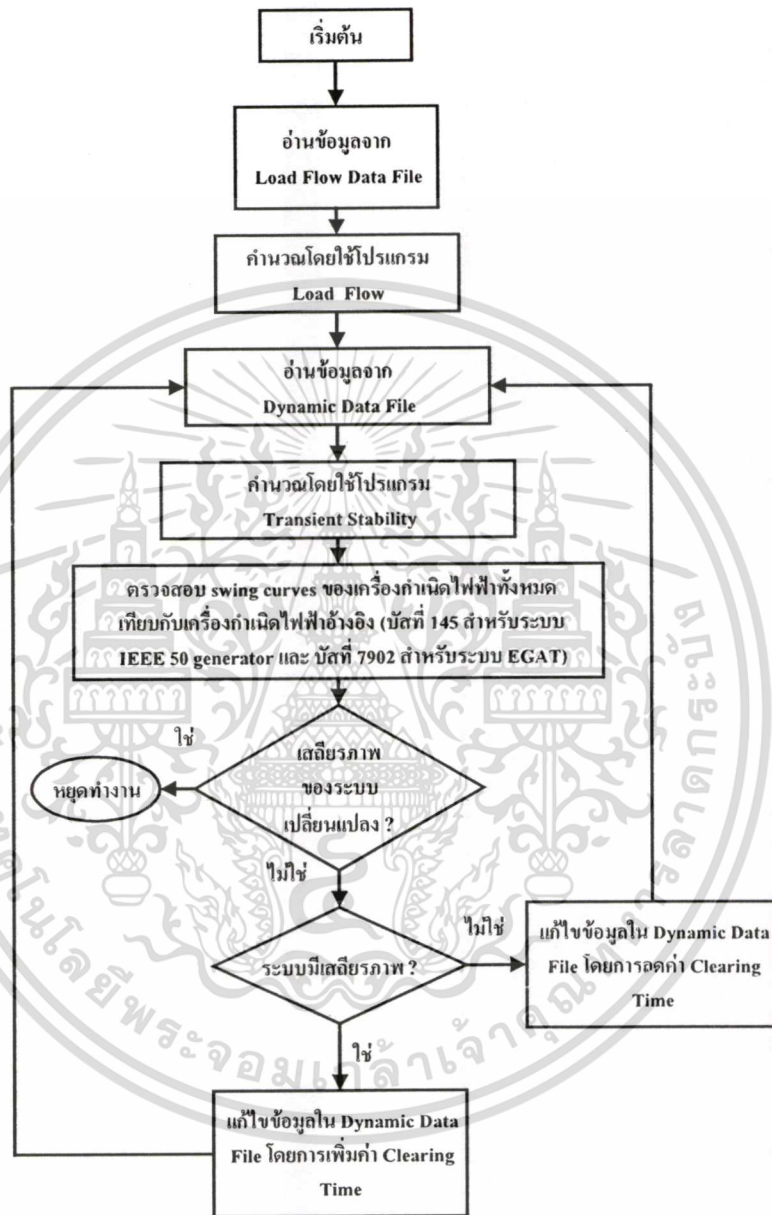
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเขียน Load flow data file สำหรับกรณีศึกษาต่างๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พิจารณา, การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังแล้วเสร็จ ก็จะไปใช้เป็นอินพุตของโปรแกรม Load flow ซึ่งจะแสดงผลเป็น ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ส่งผ่านจากบัสหนึ่งไปยังบัสอื่นๆ ในสายส่งแต่ละเส้น, แรงดันและมุมของแรงดันที่บัสต่างๆ จากนั้นสั่งให้โปรแกรม Transient stability ทำงาน โดยโปรแกรมดังกล่าวจะอ่านข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการเกิดและการเคลียร์ฟอลต์จาก Dynamic data file และผลลัพธ์จากโปรแกรม Load flow และคำนวณผลลัพธ์ที่ได้แสดงอยู่ในรูปของกราฟสวิง เพื่อนำไปพิจารณาหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 2

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าบล็อกไดอะแกรมที่เช็คว่าเสถียรภาพของระบบมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ เป็นการเช็คเสถียรภาพของระบบถ้าระบบมีเสถียรภาพหยุดทำงาน ถ้าไม่มีเสถียรภาพกระโดดไปทำงานบล็อกต่อไปซึ่งจะทำการเช็คว่าจะลดค่า หรือเพิ่มค่า Clearing Time เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพ



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[4]

บทที่ 5

การคำนวณหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตโดยใช้ระเบียบวิธีการ

คำนวณ

การนำระเบียบวิธีการคำนวณมาใช้ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังนั้น มีองค์ประกอบหลายอย่างที่มีผลต่อการเรียนรู้ของระเบียบวิธีการคำนวณ การที่ระเบียบวิธีการคำนวณสามารถเรียนรู้พฤติกรรมของระบบไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี จะส่งผลให้การคำนวณหาค่าตอบของระบบไฟฟ้ากำลังมีความแม่นยำสูง ดังนั้นก่อนที่จะทำการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณจึงต้องมีการพิจารณาถึงองค์ประกอบที่มีผลต่อการเรียนรู้ และประสิทธิภาพของระเบียบวิธีการคำนวณ ซึ่งประกอบไปด้วย การเลือกใช้ตัวแปรที่เป็นตัวแทนของระบบไฟฟ้ากำลัง (ตัวแปรฝึกสอน), การกระจายของข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอน, ปริมาณของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบ, เงื่อนไขของการฝึกสอน และขั้นตอนในการฝึกสอน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

5.1 การเลือกตัวแปรในการฝึกสอน

ในบรรดาค่าประกอบที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระเบียบวิธีการคำนวณ อาจกล่าวได้ว่าการเลือกตัวแปรในการฝึกสอนเป็นองค์ประกอบที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระเบียบวิธีการคำนวณมากที่สุด ตัวแปรที่ใช้ในการฝึกสอนจะประกอบไปด้วยตัวแปรอินพุท และตัวแปรเอาต์พุท ตัวแปรอินพุทคือตัวแปรที่แสดงถึงสถานะของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งป้อนให้กับข้อมูลอินพุทของระเบียบวิธีการคำนวณ ส่วนตัวแปรเอาต์พุทคือคำตอบที่กำลังพิจารณา ซึ่งได้จากข้อมูลเอาต์พุทของระเบียบวิธีการคำนวณ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปรอินพุตได้ เพราะนอกจากจะทำให้เวลา และหน่วยความจำที่ใช้ในการฝึกสอนมากขึ้นแล้ว ยังไม่ทำให้ประสิทธิภาพของระเบียบวิธีการคำนวณดีขึ้นอีกด้วย

5.1.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system

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

5.1.2 ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT)

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

5.2 การกระจายของข้อมูลฝึกสอน

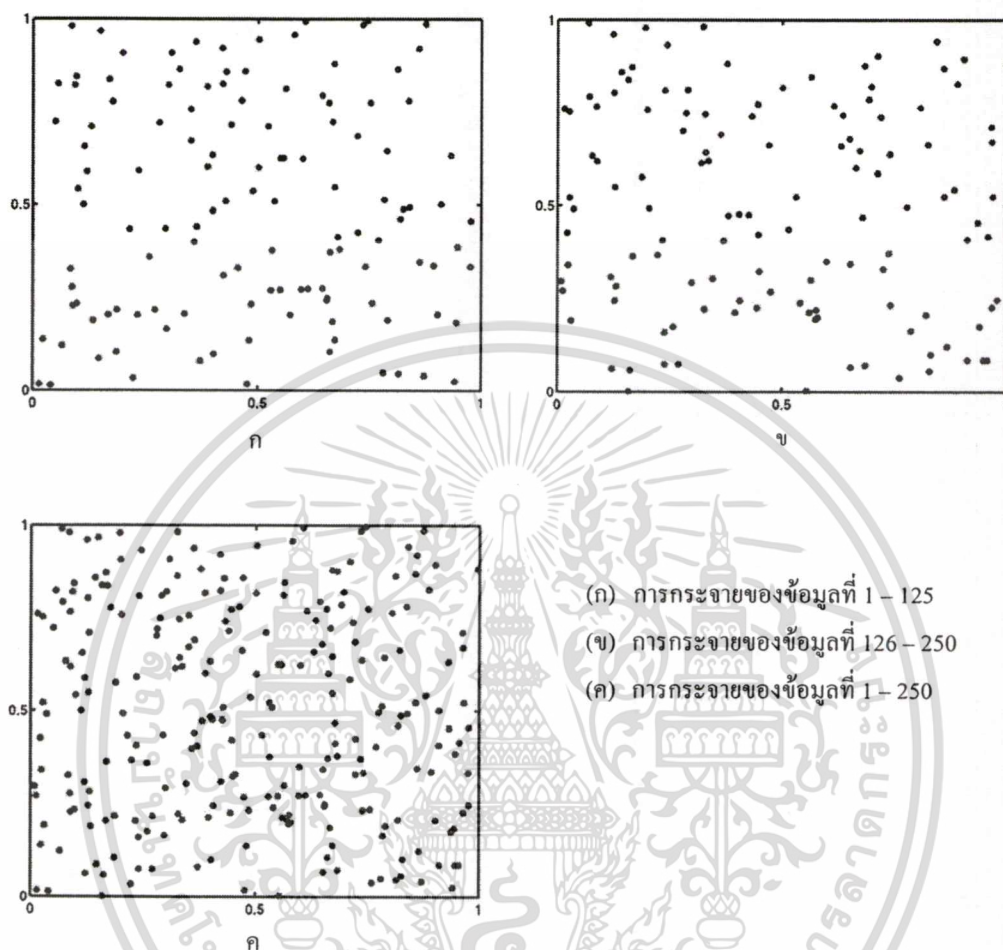
สืบเนื่องจากการที่ระเบียบวิธีการคำนวณมีความสามารถในการเรียนรู้ทั้งเอาต์พุตที่มากและอินพุตที่มีย่านกว้าง ซึ่งภายในขอบเขตนี้ระเบียบวิธีการคำนวณที่ผ่านการฝึกสอนแล้วสามารถคำนวณคำตอบของปัญหาที่พิจารณาได้โดยมีความถูกต้องและแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ดีถึงดีมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณ (Quantity) และคุณภาพ (Quality) ของข้อมูลที่น่ามาฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณ โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง คุณภาพของข้อมูล ส่วนปริมาณของข้อมูลจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

ข้อมูลที่น่ามาฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณนั้น จะใช้การกระจายของข้อมูลเป็นเกณฑ์ในการบ่งบอกคุณภาพของข้อมูล กล่าวคือ กรณีที่ข้อมูล 2 ชุดมีปริมาณเท่ากัน ข้อมูลชุดที่มีการกระจายของตัวอย่าง

(Sample) อย่างสม่ำเสมอภายในขอบเขตที่กำหนดมากกว่า จะมีคุณภาพมากกว่า และการใช้ข้อมูลปริมาณน้อยแต่มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ จะสามารถฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณให้มีประสิทธิภาพสูงกว่า และใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยกว่าการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลปริมาณมากแต่ไม่มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้วิธีการเลือกค่าของตัวแปรอินพุตแบบสุ่มเลือก (คำสั่ง Rand [5]) และตรวจสอบการกระจายของข้อมูลด้วยสายตา (Eye inspection) โดยข้อมูลที่ได้จากวิธีการนี้มีการกระจายอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างดี โดยตัวอย่างของการกระจายของข้อมูลแสดงในรูปที่ 5.1 จากนั้นจึง

แปลงข้อมูลที่ได้ให้เป็นค่าของตัวแปรที่ใช้ในฝึกสอน ซึ่งสอดคล้องกับหัวข้อที่ 4.1.3 ดังแสดง ตารางที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ



รูปที่ 5.1 การกระจายของข้อมูลที่ได้จาก Pseudo random sequences [5]

ตารางที่ 5.1 วิธีการแปลงข้อมูลที่ได้เป็นตัวแปรฝึกสอนสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system

ตัวแปรฝึกสอน	ค่าที่สัมพันธ์	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 $0 < r_7 \leq 1/4, x_7 = S1$
		$1/4 < r_7 \leq 2/4, x_7 = S2$
		$2/4 < r_7 \leq 3/4, x_7 = S3$
		$3/4 < r_7 \leq 1, x_7 = S4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ภายในเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 วิธีการแปลงข้อมูลที่ได้เป็นตัวแปรฝึกสอนสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังของ EGAT

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

5.3 ปริมาณของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบ

ปริมาณของข้อมูลที่น่ามาใช้ในการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณนั้น โดยส่วนมากจะมีข้อจำกัดจากวิธีการเตรียมข้อมูล ถ้าข้อมูลดังกล่าวได้มาโดยวิธีการเก็บบันทึกตามช่วงเวลา ปริมาณของข้อมูลก็จะขึ้นอยู่กับช่วงเวลาและความถี่ในการเก็บบันทึก ส่วนในกรณีที่ข้อมูลดังกล่าวเกิดจากการจำลองเหตุการณ์ (Simulation) ปริมาณของข้อมูลก็จะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของการจำลองเหตุการณ์, เวลาที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์ และประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ ดังนั้นการเลือกปริมาณของข้อมูลฝึกสอนจึงต้องพิจารณาตามวิธีการเตรียมข้อมูล

ข้อมูลทดสอบ คือ ข้อมูลที่นำมาทดสอบประสิทธิภาพของระเบียบวิธีการคำนวณที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว โดยเป็นข้อมูลที่ประกอบด้วยตัวแปรอินพุท และตัวแปรเอาต์พุท เช่นเดียวกันกับข้อมูลฝึกสอน หากแต่ค่าของตัวแปรดังกล่าวในชุดข้อมูลทดสอบจะเป็นค่าที่ไม่ถูกใช้ในการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เป็นค่าที่ระเบียบวิธีการคำนวณไม่เคยเรียนรู้มาก่อน (Unseen) การวัดประสิทธิภาพของระเบียบวิธีการคำนวณนั้นจะใช้ค่าผิดพลาดของค่าตอบของข้อมูลทดสอบที่ได้จากระเบียบวิธีการคำนวณที่ผ่านการฝึกสอนแล้วเป็นเกณฑ์ ซึ่งจะนำเสนอในรูปของค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean absolute percentage error , mape) ดังสมการที่ 5.1

$$Mape = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \times \left| \frac{cct_{CM} - cct_{TDM}}{cct_{TDM}} \right| \times 100 \tag{5.1}$$

โดยที่ CCT_{CM} คือ CCT ที่เป็นคำตอบของระเบียบวิธีการคำนวณ

CCT_{TDM} คือ CCT ที่เป็นคำตอบของวิธีการทางเวลา

n คือ จำนวนข้อมูลทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นไปตามตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 จำนวนข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบที่ใช้ในการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณ

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

5.4 เงื่อนไขการฝึกสอน

จากหัวข้อ 5.3 จะเห็นว่าระบบของ IEEE 50 generators test system ข้อมูลฝึกสอนจะประกอบไปด้วยตัวแปร 8 ตัวเป็นอินพุต 7 ตัว (x1-x7) และเอาต์พุตอีก 1 ตัว คือ CCT (หน่วยเป็น msec) ในการฝึกสอนจะใช้จำนวนข้อมูลฝึกสอน (Training Patterns) 50, 100 และ 150 ชุด และใช้ข้อมูลทดสอบ (Test Patterns) 30 ชุด (ที่ไม่อยู่ในชุดข้อมูลฝึกสอน) โดยที่ค่าตัวแปรอินพุต x6 และ x7 จะอยู่ในรูปของเลขฐานสองดังในตารางที่ 5.4 จาก (3.1) และ(3.5) ทำการคำนวณตำแหน่งของฟอลต์ และโครงสร้างของระบบโดยที่

ระบบของ EGAT ข้อมูลฝึกสอนจะประกอบไปด้วยตัวแปร 7 ตัวเป็นอินพุต 5 ตัว (x1-x6) และเอาต์พุตอีก 1 ตัว คือ CCT (หน่วยเป็น msec) ในการฝึกสอนจะใช้จำนวนข้อมูลฝึกสอน (Training Patterns) 150, 200 และ 250 ชุด และใช้ข้อมูลทดสอบ (Test Patterns) 50 ชุด (ที่ไม่อยู่ในชุดข้อมูลฝึกสอน) โดยที่ค่าตัวแปรอินพุต x5 และ x6 จะอยู่ในรูปของเลขฐานสองดังในตารางที่ 5.4 จาก (3.1) และ(3.5) ทำการคำนวณตำแหน่งของฟอลต์ และโครงสร้างของระบบโดยที่

- ถ้าข้อมูลทั้ง 2 ชุดมีตำแหน่งของฟอลต์ และโครงสร้างของระบบที่เหมือนกันทั้ง 2 ชุด ผลรวมของสมาชิกเลขฐานสองที่ได้เท่ากับ 0
- ถ้าข้อมูลทั้ง 2 ชุดมีตำแหน่งของฟอลต์ และโครงสร้างของระบบที่เหมือนกันเพียง 1 ชุด ผลรวมของสมาชิกเลขฐานสองที่ได้เท่ากับ 2
- ถ้าข้อมูลทั้ง 2 ชุดมีตำแหน่งของฟอลต์ และโครงสร้าง ของระบบที่ต่างกัน ผลรวมของสมาชิกเลขฐานสองที่ได้เท่ากับ 4

ตารางที่ 5.4 ตำแหน่งของฟลัดต์ และ โครงสร้างของระบบจัดอยู่ในรูปของเลขฐานสอง

รายละเอียด	เลขฐานสอง
ฟลัดต์ F1	10000
ฟลัดต์ F2	01000
ฟลัดต์ F3	00100
ฟลัดต์ F4	00010
ฟลัดต์ F5	00001
โครงสร้าง S1	1000
โครงสร้าง S2	0100
โครงสร้าง S3	0010
โครงสร้าง S4	0001

5.5 ขั้นตอนการฝึกสอน

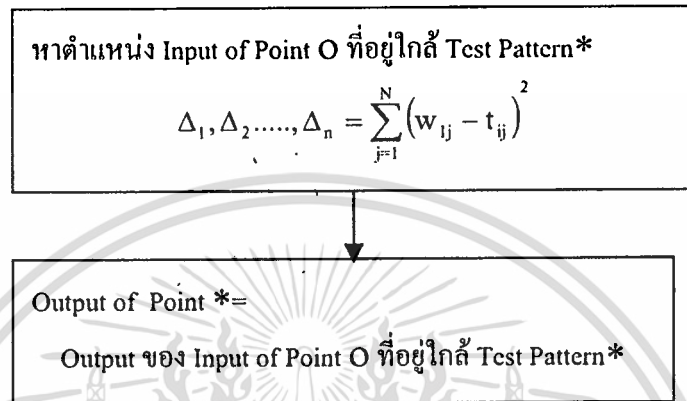
เมื่อทำการกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ในการฝึกสอนตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.4 เรียบร้อยแล้ว ก็จะเริ่มทำการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณ ซึ่งมีขั้นตอนดังในรูปที่ 5.2 – 5.4 โดยรูปที่ 5.2 เป็นขั้นตอน Nonlinear Interpolation, Weight average และ Least Square ตามลำดับ โดยทั้ง 4 แบบจะทำการฝึกสอนด้วยข้อมูลฝึกสอนที่ต่างกัน (50, 100 และ 150 ชุด) ซึ่งแบบแรกจะหา Δ_{min} ที่มีค่าต่ำที่สุดด้วย (3.1) ในแต่ละชุดข้อมูลทดสอบ (30 ชุดข้อมูลทดสอบ) ในส่วนของแบบที่สองจะหา Δ' คือระยะจากชุดข้อมูลทดสอบ (30 ชุดข้อมูลทดสอบ) ถึงชุดข้อมูลฝึกสอน n ด้วย (3.3) และ (3.4) ดังรูปที่ 3.1a และวิธีการของ Weight Average จะหา $Z_{c,i}$ ด้วย (3.5), (3.6), และ (3.7) โดยจะต้องมีการปรับค่าคงที่ k ตั้งแต่ 0.5-1.5 และ α ตั้งแต่ 0.1-0.9 ซึ่งค่าคงที่ k และ α จะปรับขึ้นครั้งละ 0.5 และ 0.1 ตามลำดับเพื่อที่จะหาค่าคงที่ของ k และ α ที่เหมาะสมกับข้อมูลฝึกสอนที่ต่างกัน ซึ่งจะส่งผลต่อค่าเอาท์พุท O_c ในส่วนวิธีการของ Least Square คือกำลังสองน้อยที่สุดของความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลฝึกสอนอินพุท และเอาท์พุท ซึ่งเป็นเซตของข้อมูลคู่ลำดับ (O_i, Z_i) การหาค่า Z_i ด้วย (3.5), (3.6) เพื่อจัดระเบียบชุดข้อมูลให้ใกล้เคียงกับชุดข้อมูลทดสอบ (30 ชุดข้อมูลทดสอบ) และจัดให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันเส้นตรงด้วย (3.8) แล้วหาค่า a_0 และ a_1 ด้วย (3.9), (3.10), (3.11) และ (3.12) แล้วใช้ระเบียบวิธีการของนิวตัน – ราฟสัน เพื่อหา O_i ใกล้เคียงกับเอาท์พุทของข้อมูลที่ใช้ทดสอบ

ในการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าช่วงเวลาตัดกระแส

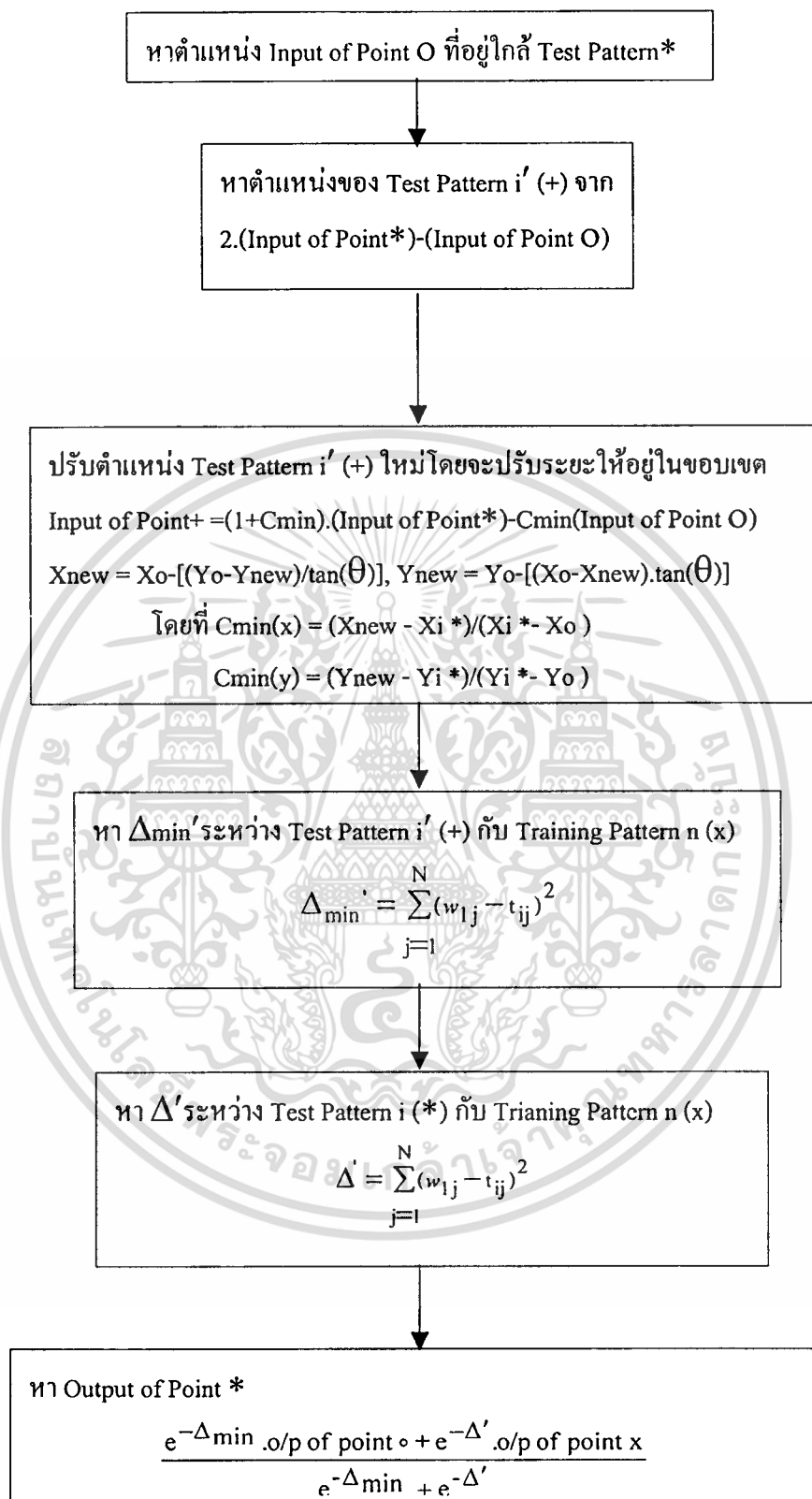
วิกฤตของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system และระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยบริเวณภาคกลางตะวันตก และภาคใต้ นั้น จะทำการฝึกสอนตามเงื่อนไขทั้ง

เอกสารที่ 12 กรณี และ 60 กรณีตามลำดับ ซึ่งประกอบไปด้วยเงื่อนไขของจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 3 การคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีส่วนการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยผลการฝึกสอนและทดสอบระเบียบวิธีการคำนวณสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังจะนำเสนอในบทที่ 6

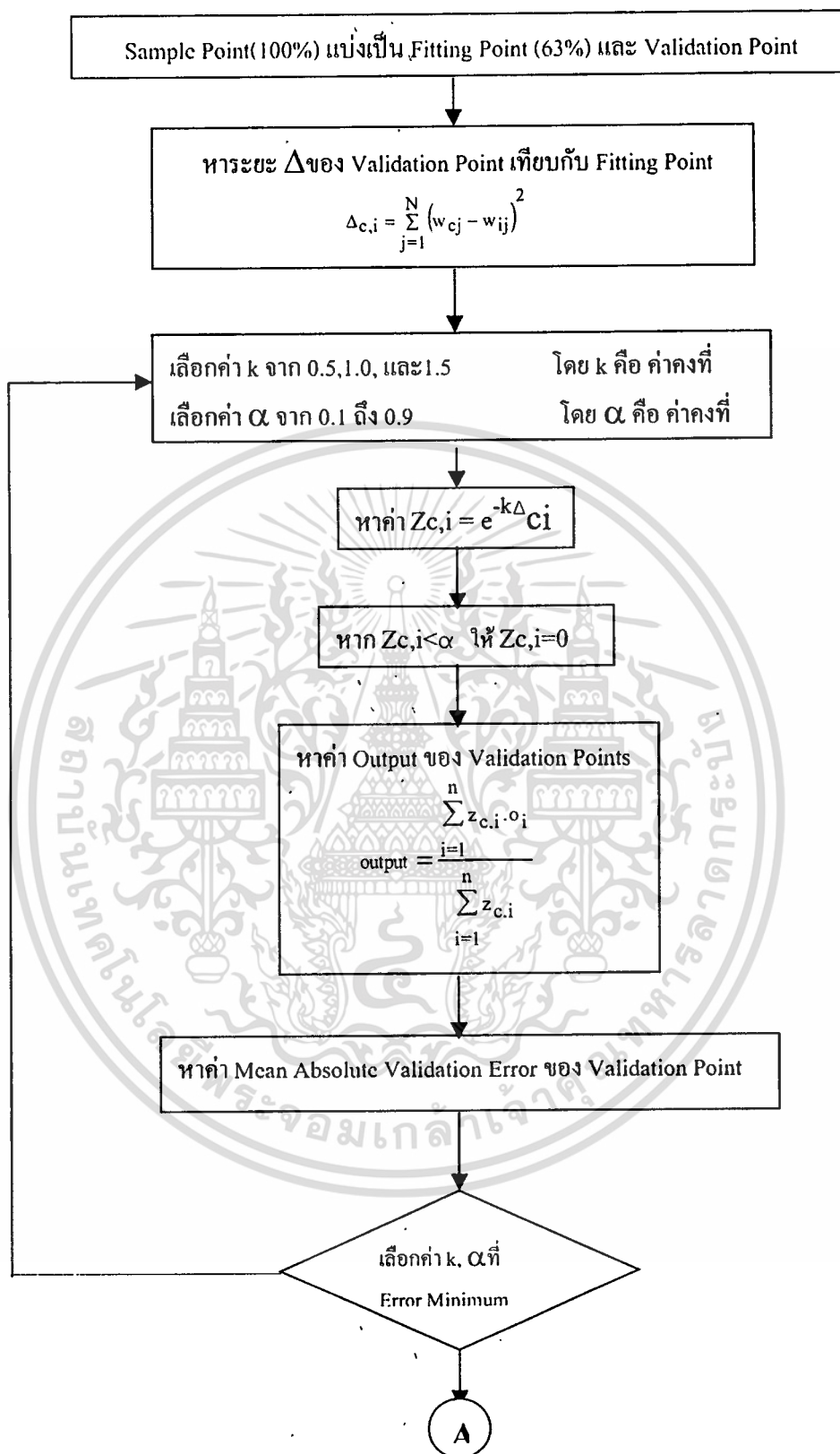


รูปที่ 5.2 ขั้นตอนการหาค่า Output ของวิธี Nearest Neighbor Algorithm



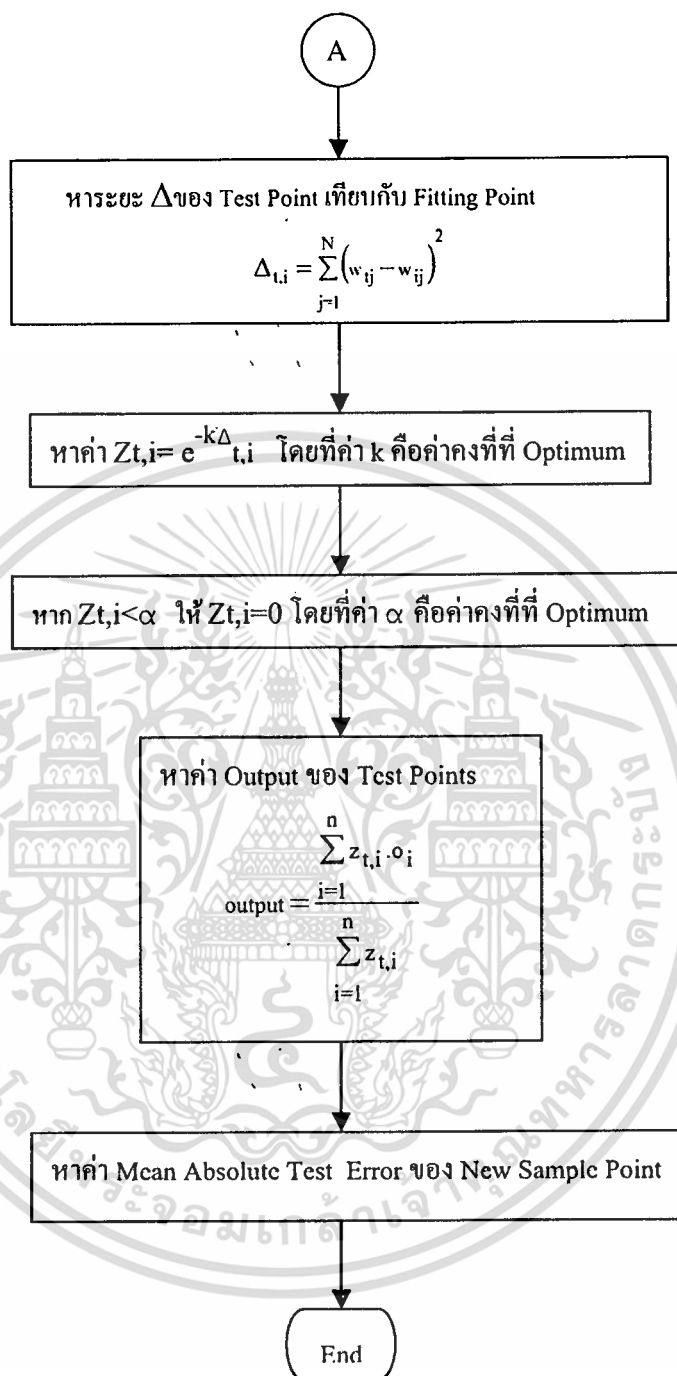
รูปที่ 5.2 ขั้นตอนการหาค่า Output ของวิธี Nonlinear Interpolation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

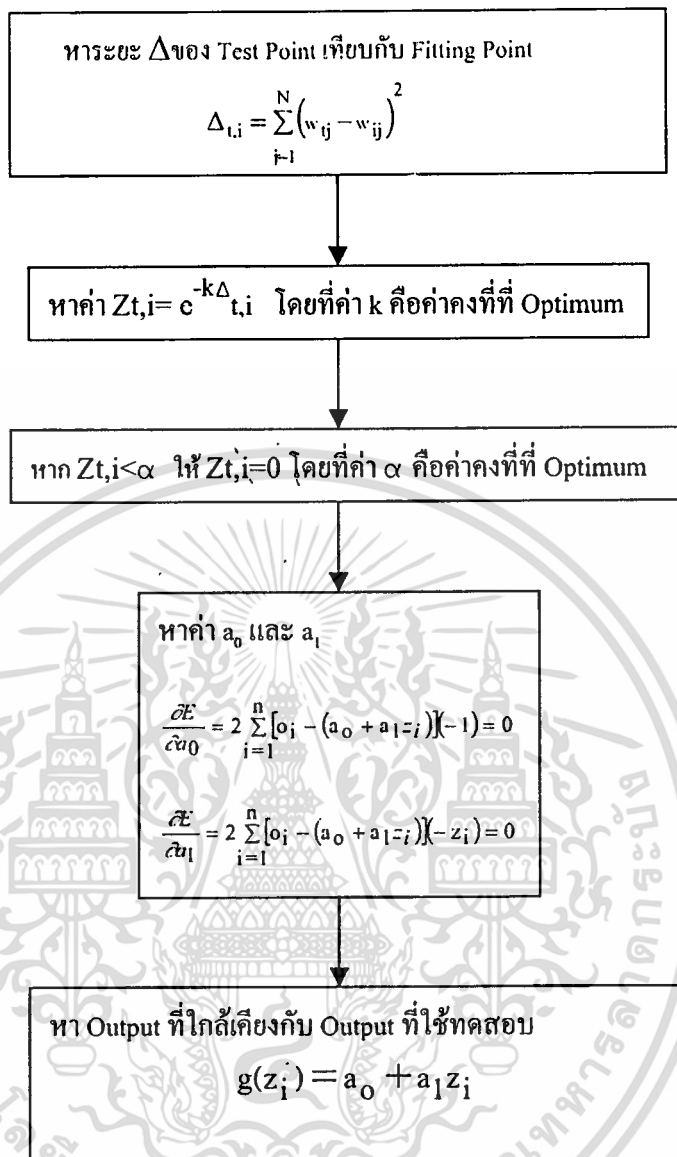


รูปที่ 5.4 ขั้นตอนการหาค่า Output ของวิธี Weight Average (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 ขั้นตอนการหาค่า Output ของวิธี Weight Average



รูปที่ 5.5 ขั้นตอนการหาค่า Output ของวิธี Least square

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ผลการทดลอง

บทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองซึ่งได้จากการทดสอบระเบียบวิธีการคำนวณที่ผ่านการฝึกสอนด้วย Computation Method ตามรูปแบบและวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 4 และ 5 โดยมีรายละเอียดดังนี้

6.1 รูปแบบการนำเสนอ

6.1.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการทดลอง

การฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณเพื่อใช้คำนวณหาค่า CCT ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system และระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยบริเวณภาคกลางตะวันตกและภาคใต้ โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหน่วยประมวลผลกลางแพนเทียม โฟ 1.7 GHz หน่วยความจำ 256 MB จากนั้นจึงนำระเบียบวิธีการคำนวณที่ผ่านการฝึกสอน (ชุดที่มีค่า mape ต่ำที่สุด) ในเงื่อนไขต่างๆ ทั้ง 12 เงื่อนไข และ 60 เงื่อนไขตามลำดับมาทดสอบด้วยข้อมูลทดสอบชุดเดียวกัน โดยผลการทดสอบแสดงอยู่ในตารางที่ 6.1 – 6.32 และรูปที่ 6.1 – 6.6

6.1.2 รูปแบบการนำเสนอผลการทดลองของระบบไฟฟ้ากำลังแต่ละระบบ

การแสดงผลการทดลองของระบบไฟฟ้ากำลังแต่ละระบบจะนำเสนอแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยในส่วนแรกจะเปรียบเทียบค่า CCT แต่ละค่าที่คำนวณได้จากวิธีการทางเวลา กับค่า CCT แต่ละค่าที่เป็นคำตอบของระเบียบวิธีการคำนวณที่ผ่านการฝึกสอนในแต่ละเงื่อนไข พร้อมกับกราฟเปรียบเทียบค่าผิดพลาดของคำตอบที่ได้จากระเบียบวิธีการคำนวณส่วนที่สองจะแสดงเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนของแต่ละเงื่อนไข และส่วนที่สามจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพ และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณทุกเงื่อนไข

6.2 ผลการทดลองของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system

6.2.1 ผลการทดลองระเบียบวิธีการต่างๆที่จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 50ชุด

ตารางที่ 6.1 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Nearest Neighbor Algorithm

จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 50 ชุด

ข้อมูลทดสอบชุดที่	CCT _{TDM} (sec)	CCT _{CM} (sec)	error (%)	ข้อมูลทดสอบชุดที่	CCT _{TDM} (sec)	CCT _{ANN} (sec)	error (%)
1	0.001	0.001	0	16	0.001	0.001	0
2	0.112	0.112	0	17	0.001	0.001	0
3	0.001	0.001	0	18	0.001	0.001	0
4	0.090	0.068	24.4444	19	0.001	0.001	0
5	0.013	0.013	0	20	0.001	0.001	0
6	0.001	0.001	0	21	0.098	0.112	14.2857
7	0.001	0.001	0	22	0.088	0.087	1.1364
8	0.106	0.056	47.1698	23	0.001	0.001	0
9	0.001	0.001	0	24	0.094	0.056	40.4255
10	0.001	0.001	0	25	0.001	0.001	0
11	0.001	0.001	0	26	0.001	0.001	0
12	0.001	0.001	0	27	0.001	0.001	0
13	0.110	0.12	9	28	0.001	0.001	0
14	0.047	0.112	138.2979	29	0.001	0.001	0
15	0.001	0.001	0	30	0.001	0.001	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Nonlinear Interpolation จำนวน ชุดข้อมูลฝึกสอน 50 ชุด

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{CM} (sec)	error (%)	ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)
1	0.001	0.001	0	16	0.001	0.001	0
2	0.112	0.112	0	17	0.001	0.001	0
3	0.001	0.001	0	18	0.001	0.001	0
4	0.090	0.0936	4	19	0.001	0.001	0
5	0.013	0.0116	10.7692	20	0.001	0.001	0
6	0.001	0.001	0	21	0.098	0.112	14.2857
7	0.001	0.001	0	22	0.088	0.0852	3.1818
8	0.106	0.0876	17.3585	23	0.001	0.001	0
9	0.001	0.001	0	24	0.094	0.05	46.8085
10	0.001	0.001	0	25	0.001	0.001	0
11	0.001	0.001	0	26	0.001	0.001	0
12	0.001	0.001	0	27	0.001	0.001	0
13	0.110	0.0885	19.5455	28	0.001	0.001	0
14	0.047	0.112	138.2979	29	0.001	0.001	0
15	0.001	0.001	0	30	0.001	0.001	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Weight Average จำนวนชุดข้อมูล
ฝึกสอน 50 ชุด ($k=0.5, \alpha=0.3$)

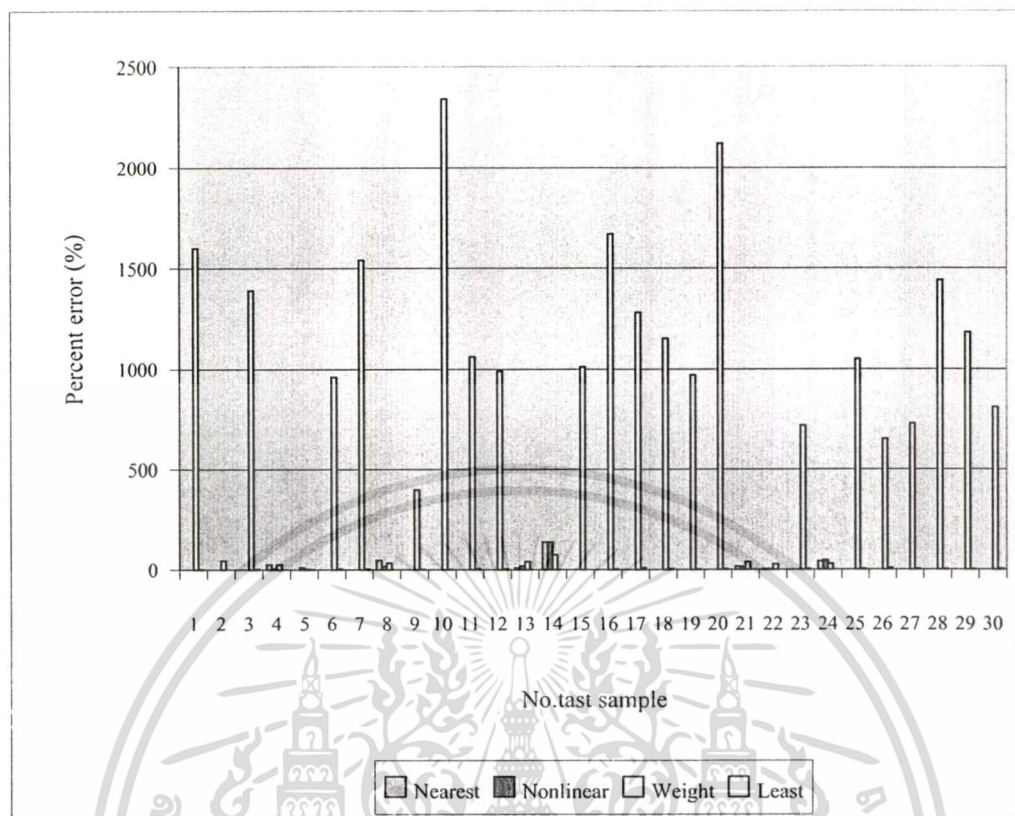
ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{CM} (sec)	error (%)	ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)
1	0.001	0.017	1600	16	0.001	0.0177	1670
2	0.112	0.0626	44.1071	17	0.001	0.0138	1280
3	0.001	0.0149	1390	18	0.001	0.0125	1150
4	0.090	0.0677	24.7778	19	0.001	0.0107	970
5	0.013	0.0127	2.3077	20	0.001	0.0222	2120
6	0.001	0.0106	960	21	0.098	0.0612	37.551
7	0.001	0.0164	1540	22	0.088	0.0652	25.9091
8	0.106	0.0716	32.4528	23	0.001	0.0082	720
9	0.001	0.005	400	24	0.094	0.067	28.7234
10	0.001	0.02544	2340	25	0.001	0.0115	1050
11	0.001	0.0116	1060	26	0.001	0.0075	650
12	0.001	0.0109	990	27	0.001	0.0083	730
13	0.110	0.0665	39.5455	28	0.001	0.0154	1440
14	0.047	0.0118	74.8936	29	0.001	0.0128	1180
15	0.001	0.0111	1010	30	0.001	0.0091	810

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.4 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Least Square จำนวนชุดข้อมูล
ฝึกสอน 50 ชุด ($k=0.5, \alpha=0.3$)

ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{CM} (sec)	error (%)	ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)
1	0.001	0.00101	1	16	0.001	0.00102	2
2	0.112	0.112	0	17	0.001	0.00091	9
3	0.001	0.00102	2	18	0.001	0.00097	3
4	0.090	0.09	0	19	0.001	0.00099	1
5	0.013	0.0131	0.7692	20	0.001	0.00102	2
6	0.001	0.00104	4	21	0.098	0.0982	0.2041
7	0.001	0.00102	2	22	0.088	0.0879	0.1136
8	0.106	0.106	0	23	0.001	0.00098	2
9	0.001	0.00101	1	24	0.094	0.09404	0.0426
10	0.001	0.00101	1	25	0.001	0.00098	2
11	0.001	0.00096	4	26	0.001	0.00093	7
12	0.001	0.00098	2	27	0.001	0.00097	3
13	0.110	0.1099	0.0909	28	0.001	0.00099	1
14	0.047	0.04697	0.0638	29	0.001	0.00099	1
15	0.001	0.001	0	30	0.001	0.00098	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.1 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสำหรับข้อมูลทดสอบแต่ละชุด กรณีฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลฝึกสอน 50 ชุด

ตารางที่ 6.5 เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณ กรณีฝึกสอนด้วยชุดข้อมูล 50 ชุด

ระเบียบวิธีการคำนวณ	เวลาที่ใช้ฝึกสอน (นาที)
Nearest Neighbor	0.12
Nonlinear Interpolation	0.31
Weight average	4.43
Least Square	1.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.1 ถึง 6.4 และรูปที่ 6.1
สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

- การคำนวณค่า CCT

1. ระเบียบวิธีการฝึกสอนที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธี Nearest Neighbor สามารถหาค่า CCT ของข้อมูลทดสอบ โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 10.1873 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 138.2979 % (ข้อมูลทดสอบ ชุดที่ 14)

2. ระเบียบวิธีการฝึกสอนที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธี Nonlinear Interpolation สามารถหาค่า CCT ของข้อมูลทดสอบ โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 8.6544%, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 138.2979 % (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 14)

3. ระเบียบวิธีการฝึกสอนที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธี Weight Average สามารถหาค่า CCT ของข้อมูลทดสอบ โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 845.6756%, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 2.3077 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 2340% (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 10)

4. ระเบียบวิธีการฝึกสอนที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธี Least Square สามารถหาค่า CCT ของข้อมูลทดสอบ โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 1.7761%, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0% และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 9% (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 17)

ค่าผิดพลาดของคำตอบของระเบียบวิธีการคำนวณที่ฝึกสอนด้วยข้อมูลฝึกสอนทั้ง 4 ชุด จะเห็นว่าวิธีการของ Nearest Neighbor และ Nonlinear Interpolation มีค่า mape ใกล้เคียง และมีค่า Max error สูงในชุดข้อมูลทดสอบที่ 14 เนื่องมาจากการกระจายตัวของชุดข้อมูลฝึกสอน ไม่สม่ำเสมอครอบคลุมจุดทดสอบทั้งหมด ในส่วนวิธีการของ Weight Average มีค่า mape ที่สูงเนื่องมาจากการปรับ ค่า k และค่า α ไม่สามารถปรับครอบคลุมจุดทดสอบทั้งหมด

- เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

ระเบียบวิธีการคำนวณที่ใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยที่สุดคือ Nearest Neighbor ใช้เวลาฝึกสอน 0.12 นาทีและใช้เวลาฝึกสอนมากที่สุดคือ Weight Average ใช้เวลาฝึกสอน 4.43 นาที

6.2.2 ผลการทดลองระเบียบวิธีการต่างๆที่จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 100 ชุด

ตารางที่ 6.6 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Nearest Neighbor Algorithm จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 100 ชุด

ข้อมูลทดสอบชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{CM} (sec)	error (%)	ข้อมูลทดสอบชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)
1	0.001	0.001	0	16	0.001	0.001	0
2	0.112	0.112	0	17	0.001	0.001	0
3	0.001	0.001	0	18	0.001	0.001	0
4	0.090	0.089	1.1111	19	0.001	0.001	0
5	0.013	0.013	0	20	0.001	0.001	0
6	0.001	0.001	0	21	0.098	0.092	6.1224
7	0.001	0.001	0	22	0.088	0.087	1.1364
8	0.106	0.106	0	23	0.001	0.001	0
9	0.001	0.001	0	24	0.094	0.106	12.766
10	0.001	0.001	0	25	0.001	0.001	0
11	0.001	0.001	0	26	0.001	0.001	0
12	0.001	0.001	0	27	0.001	0.001	0
13	0.110	0.116	5.4545	28	0.001	0.001	0
14	0.047	0.001	97.8723	29	0.001	0.001	0
15	0.001	0.001	0	30	0.001	0.001	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.7 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Nonlinear Interpolation จำนวน ชุดข้อมูลฝึกสอน 100 ชุด

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{CM} (sec)	error (%)	ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)
1	0.001	0.001	0	16	0.001	0.001	0
2	0.112	0.112	0	17	0.001	0.001	0
3	0.001	0.001	0	18	0.001	0.001	0
4	0.090	0.0973	8.1111	19	0.001	0.001	0
5	0.013	0.0116	10.76	20	0.001	0.001	0
6	0.001	0.001	0	21	0.098	0.112	14.2857
7	0.001	0.001	0	22	0.088	0.0852	3.1818
8	0.106	0.106	0	23	0.001	0.001	0
9	0.001	0.001	0	24	0.094	0.0938	0.2128
10	0.001	0.001	0	25	0.001	0.001	0
11	0.001	0.001	0	26	0.001	0.001	0
12	0.001	0.001	0	27	0.001	0.001	0
13	0.110	0.1112	1.0909	28	0.001	0.001	0
14	0.047	0.001	97.3872	29	0.001	0.001	0
15	0.001	0.001	0	30	0.001	0.001	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.8 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Weight Average จำนวนชุดข้อมูล
ฝึกสอน 100 ชุด ($k=1$ $\alpha=0.3$)

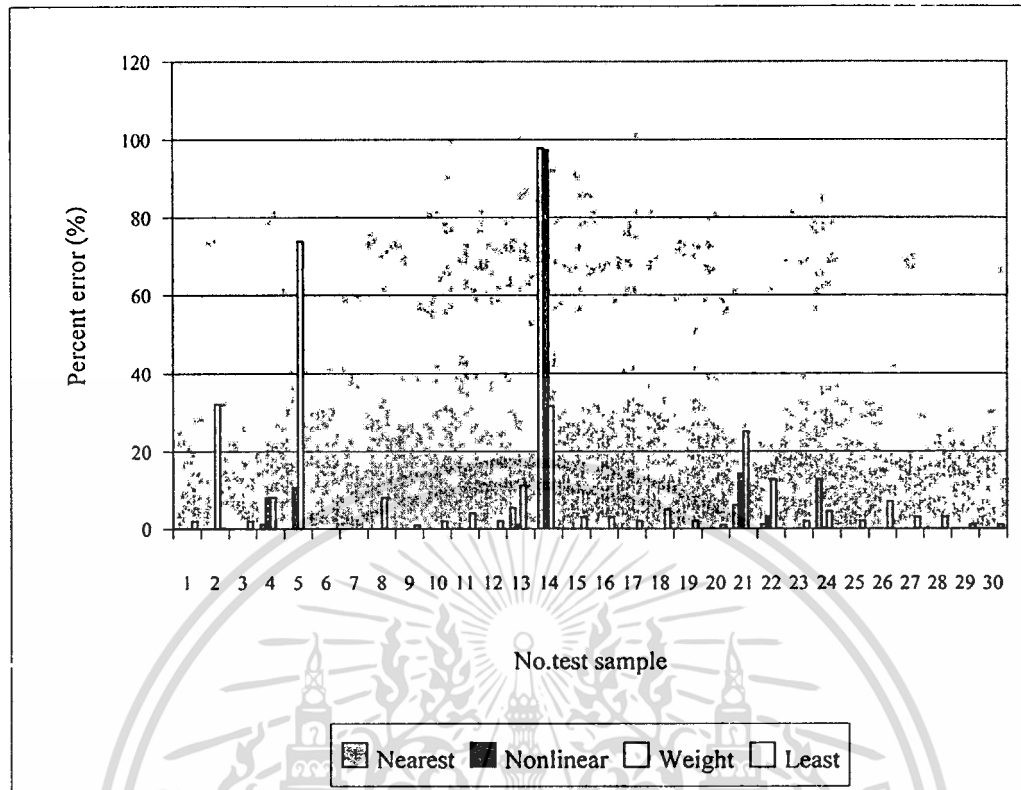
ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{CM} (sec)	error (%)	ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)
1	0.001	0.001	0	16	0.001	0.001	0
2	0.112	0.076	32.1429	17	0.001	0.001	0
3	0.001	0.001	0	18	0.001	0.001	0
4	0.090	0.0974	8.2222	19	0.001	0.001	0
5	0.013	0.0034	73.8462	20	0.001	0.001	0
6	0.001	0.001	0	21	0.098	0.0735	25
7	0.001	0.001	0	22	0.088	0.0768	12.7273
8	0.106	0.0974	8.1132	23	0.001	0.001	0
9	0.001	0.001	0	24	0.094	0.0982	4.4681
10	0.001	0.001	0	25	0.001	0.001	0
11	0.001	0.001	0	26	0.001	0.001	0
12	0.001	0.001	0	27	0.001	0.001	0
13	0.110	0.0972	11.2727	28	0.001	0.001	0
14	0.047	0.0317	31.5532	29	0.001	0.001	0
15	0.001	0.001	0	30	0.001	0.001	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.9 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Least Square จำนวนชุดข้อมูล
ฝึกสอน 100 ชุด (k=1, $\alpha=0.3$)

ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	CCT _{TDM} (sec)	CCT _{CM} (sec)	error (%)	ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	CCT _{TDM} (sec)	CCT _{ANN} (sec)	error (%)
1	0.001	0.00098	2	16	0.001	0.00097	3
2	0.112	0.1119	0.0893	17	0.001	0.00098	2
3	0.001	0.00098	2	18	0.001	0.00095	5
4	0.090	0.09	0	19	0.001	0.00102	2
5	0.013	0.013	0	20	0.001	0.00101	1
6	0.001	0.001	0	21	0.098	0.098	0
7	0.001	0.001	0	22	0.088	0.0879	0.1136
8	0.106	0.106	0	23	0.001	0.00098	2
9	0.001	0.00101	1	24	0.094	0.094	0
10	0.001	0.00102	2	25	0.001	0.00098	2
11	0.001	0.00096	4	26	0.001	0.00093	7
12	0.001	0.00098	2	27	0.001	0.00097	3
13	0.110	0.11	0	28	0.001	0.00097	3
14	0.047	0.04697	0.0638	29	0.001	0.00099	1
15	0.001	0.00097	3	30	0.001	0.00099	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสำหรับข้อมูลทดสอบแต่ละชุด กรณีฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลฝึกสอน 100 ชุด

ตารางที่ 6.10 เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณ กรณีฝึกสอนด้วยชุดข้อมูล 100 ชุด

ระเบียบวิธีการคำนวณ	เวลาที่ใช้ฝึกสอน (นาที)
Neareast Neighbor	0.15
Nonlinear Interpolation	1.06
Weight average	9.51
Least Square	2.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.6 ถึง 6.9 และรูปที่ 6.2

สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

- การคำนวณค่า CCT

1. ระเบียบวิธีการฝึกสอนที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธี Nearest Neighbor สามารถหาค่า CCT ของข้อมูลทดสอบ โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 5.1744 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 97.8723 % (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 14)

2. ระเบียบวิธีการฝึกสอนที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธี Nonlinear Interpolation สามารถหาค่า CCT ของข้อมูลทดสอบ โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 4.6970%, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 97.8723% (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 14)

3. ระเบียบวิธีการฝึกสอนที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธี Weight Average สามารถหาค่า CCT ของข้อมูลทดสอบ โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 6.9449%, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 73.8462% (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 5)

4. ระเบียบวิธีการฝึกสอนที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธี Least Square สามารถหาค่า CCT ของข้อมูลทดสอบ โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 1.7422%, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0% และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 7% (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 26)

ค่าผิดพลาดของคำตอบของระเบียบวิธีการคำนวณที่ฝึกสอนด้วยข้อมูลฝึกสอนทั้ง 4 ชุด จะเห็นว่าวิธีการของ Nearest Neighbor และ Nonlinear Interpolation มีค่า mape ใกล้เคียง และมีค่า Max error สูงในชุดข้อมูลทดสอบที่ 14 เนื่องมาจากการกระจายตัวของชุดข้อมูลฝึกสอนไม่สม่ำเสมอครอบคลุมจุดทดสอบทั้งหมดในขอบเขตที่กำหนด ในส่วนวิธีการของ Weight Average มีค่า mape ที่ต่ำลงมาเนื่องมาจากจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 100 ชุด มีการกระจายตัวดีกว่าจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 50 ชุด

- เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

ระเบียบวิธีการคำนวณที่ใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยที่สุดคือ Nearest Neighbor ใช้เวลาฝึกสอน 0.15 นาทีและใช้เวลาฝึกสอนมากที่สุดคือ Weight Average ใช้เวลาฝึกสอน 9.51 นาที

6.2.3 ผลการทดลองระเบียบวิธีการต่างๆที่จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด

ตารางที่ 6.11 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Nearest Neighbor Algorithm
จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด

ข้อมูลทดสอบชุดที่	CCT _{TDM} (sec)	CCT _{CM} (sec)	error (%)	ข้อมูลทดสอบชุดที่	CCT _{TDM} (sec)	CCT _{ANN} (sec)	error (%)
1	0.001	0.001	0	16	0.001	0.001	0
2	0.112	0.112	0	17	0.001	0.001	0
3	0.001	0.001	0	18	0.001	0.001	0
4	0.090	0.089	1.1111	19	0.001	0.001	0
5	0.013	0.013	0	20	0.001	0.001	0
6	0.001	0.001	0	21	0.098	0.1	2.0408
7	0.001	0.001	0	22	0.088	0.092	4.5455
8	0.106	0.106	0	23	0.001	0.001	0
9	0.001	0.001	0	24	0.094	0.106	12.766
10	0.001	0.001	0	25	0.001	0.001	0
11	0.001	0.001	0	26	0.001	0.001	0
12	0.001	0.001	0	27	0.001	0.001	0
13	0.110	0.116	5.4545	28	0.001	0.001	0
14	0.047	0.001	97.8723	29	0.001	0.001	0
15	0.001	0.001	0	30	0.001	0.001	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.12 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Nonlinear Interpolation จำนวน
ชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด

ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{CM} (sec)	error (%)	ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)
1	0.001	0.001	0	16	0.001	0.001	0
2	0.112	0.112	0	17	0.001	0.001	0
3	0.001	0.001	0	18	0.001	0.001	0
4	0.090	0.0973	8.1111	19	0.001	0.001	0
5	0.013	0.0116	10.76	20	0.001	0.001	0
6	0.001	0.001	0	21	0.098	0.1	2.0408
7	0.001	0.001	0	22	0.088	0.0903	2.6136
8	0.106	0.106	0	23	0.001	0.001	0
9	0.001	0.001	0	24	0.094	0.0938	0.2128
10	0.001	0.001	0	25	0.001	0.001	0
11	0.001	0.001	0	26	0.001	0.001	0
12	0.001	0.001	0	27	0.001	0.001	0
13	0.110	0.1131	2.8182	28	0.001	0.001	0
14	0.047	0.001	97.38723	29	0.001	0.001	0
15	0.001	0.001	0	30	0.001	0.001	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.13 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Weight Average จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด ($k=1$ $\alpha=0.3$)

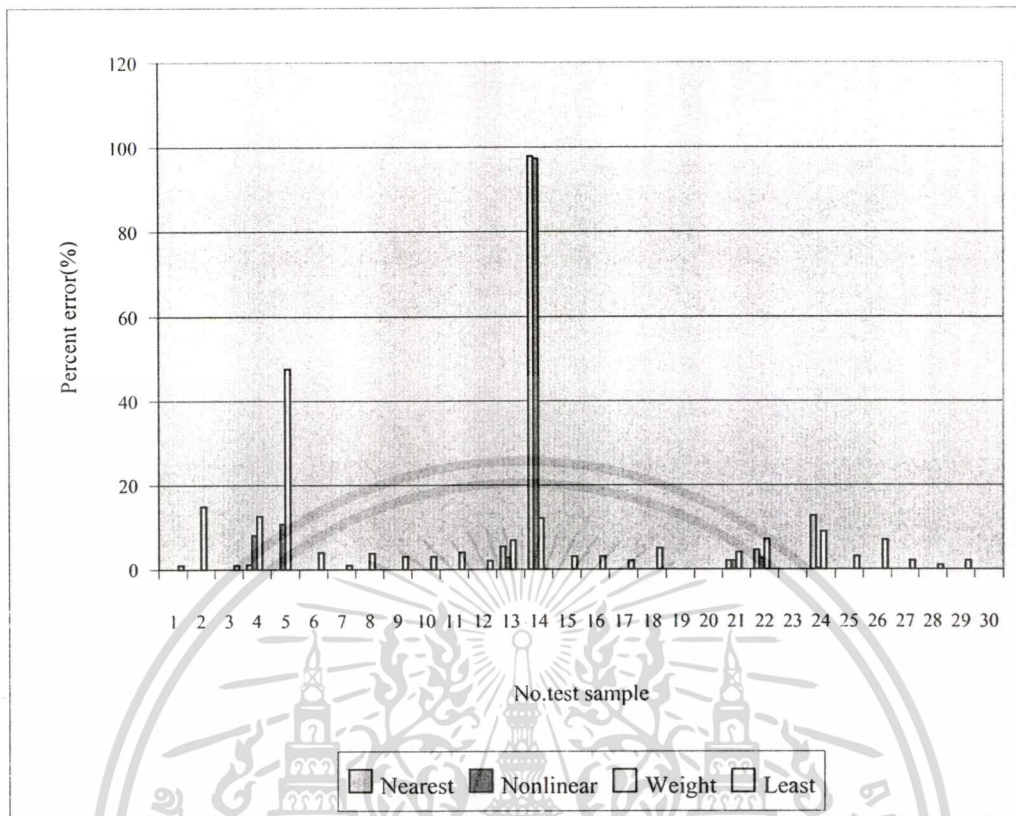
ข้อมูลทดสอบชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{CM} (sec)	error (%)	ข้อมูลทดสอบชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)
1	0.001	0.001	0	16	0.001	0.001	0
2	0.112	0.0953	14.9107	17	0.001	0.001	0
3	0.001	0.001	0	18	0.001	0.001	0
4	0.090	0.1014	12.6667	19	0.001	0.001	0
5	0.013	0.0068	47.6923	20	0.001	0.001	0
6	0.001	0.001	0	21	0.098	0.0941	3.9796
7	0.001	0.001	0	22	0.088	0.0943	7.1591
8	0.106	0.102	3.7736	23	0.001	0.001	0
9	0.001	0.001	0	24	0.094	0.1024	8.9362
10	0.001	0.001	0	25	0.001	0.001	0
11	0.001	0.001	0	26	0.001	0.001	0
12	0.001	0.001	0	27	0.001	0.001	0
13	0.110	0.1024	6.9091	28	0.001	0.001	0
14	0.047	0.0413	12.1277	29	0.001	0.001	0
15	0.001	0.001	0	30	0.001	0.001	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.14 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Least Square จำนวนชุดข้อมูล
ฝึกสอน 150 ชุด ($k=1, \alpha=0.3$)

ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{CM} (sec)	error (%)	ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	CCT_{TDM} (sec)	CCT_{ANN} (sec)	error (%)
1	0.001	0.00099	1	16	0.001	0.00097	3
2	0.112	0.112	0	17	0.001	0.00098	2
3	0.001	0.00101	1	18	0.001	0.00095	5
4	0.090	0.09	0	19	0.001	0.001	0
5	0.013	0.013	0	20	0.001	0.001	0
6	0.001	0.00104	4	21	0.098	0.098	0
7	0.001	0.00099	1	22	0.088	0.088	0
8	0.106	0.106	0	23	0.001	0.001	0
9	0.001	0.00103	3	24	0.094	0.094	0
10	0.001	0.00103	3	25	0.001	0.00097	3
11	0.001	0.00096	4	26	0.001	0.00093	7
12	0.001	0.00098	2	27	0.001	0.00098	2
13	0.110	0.11	0	28	0.001	0.00101	1
14	0.047	0.04697	0.0638	29	0.001	0.00102	2
15	0.001	0.00097	3	30	0.001	0.001	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสำหรับข้อมูลทดสอบแต่ละชุด กรณีฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด

ตารางที่ 6.15 เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณ กรณีฝึกสอนด้วยชุดข้อมูล 150 ชุด

ระเบียบวิธีการคำนวณ	เวลาที่ใช้ฝึกสอน (นาที)
Neareast Neighbor	0.33
Nonlinear Interplation	1.45
Weight average	16.45
Least Square	10.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.11 ถึง 6.14 และรูปที่ 6.3 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

- การคำนวณค่า CCT

1. ระเบียบวิธีการฝึกสอนที่ผ่านกรฝึกสอนด้วยวิธี Nearest Neighbor สามารถหาค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 5.1520%, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 97.8723 % (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 14)

2. ระเบียบวิธีการฝึกสอนที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธี Nonlinear Interpolation สามารถหาค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 4.3274%, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 97.8723% (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 14)

3. ระเบียบวิธีการฝึกสอนที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธี Weight Average สามารถหาค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 3.9385%, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 47.6923% (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 5)

4. ระเบียบวิธีการฝึกสอนที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธี Lcast Square สามารถหาค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 1.5688%, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0% และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 7% (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 26)

ค่าผิดพลาดของคำตอบของระเบียบวิธีการคำนวณที่ฝึกสอนด้วยข้อมูลฝึกสอนทั้ง 4 ชุด จะเห็นว่าวิธีการของ Nonlinear Interpolation มีค่า mape ที่ต่ำกว่า วิธีการ Nearest Neighbor เนื่องจากวิธีการของ Nonlinear Interpolation เอ้าท์พุทที่ได้จะอยู่กึ่งกลางระหว่างเอ้าท์พุท m และ เอ้าท์พุท n ดังรูป 3.1(b) ในส่วนวิธีการของ Weight Average มีค่า mape ที่ต่ำลงมาเนื่องจาก จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด มีการกระจายตัวดีกว่าจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 100 ชุด และ 50 ชุด ในขอบเขตที่กำหนด

- เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

ระเบียบวิธีการคำนวณที่ใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยที่สุดคือ Nearest Neighbor ใช้เวลาฝึกสอน 0.33 นาทีและใช้เวลาฝึกสอนมากที่สุดคือ Weight Average ใช้เวลาฝึกสอน 16.45 นาที

6.2.4 เปรียบเทียบผลการทดลองทุกกรณี

ตารางที่ 6.16 ผลการทดสอบเปรียบเทียบวิธีการคำนวณที่ผ่านการฝึกสอนแล้วในเงื่อนไขต่างๆ

ระเบียบวิธีการ	จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน	เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน (Min)	ผลของข้อมูลทดสอบ (30 ชุด)		
			Mapc (%)	Min Error (%)	Max Error (%)
Nearest Neighbor	50	0.12	10.1873	0	138.2979
	100	0.15	5.1744	0	97.8723
	150	0.33	5.1520	0	97.8723
Nonlinear Interpolation	50	0.31	8.6544	0	138.2979
	100	1.06	4.6970	0	97.8723
	150	1.45	4.3274	0	97.8723
Weight Average	50	4.43	845.6756	0	2340
	100	9.51	6.9149	0	73.8462
	150	16.45	3.9385	0	47.6923
Least Square	50	1.40	1.7761	0	9
	100	2.57	1.7422	0	7
	150	10.16	1.5688	0	7

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.16 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

- การคำนวณค่า CCT

ระเบียบวิธีการคำนวณที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธีการต่างๆทั้ง 4 วิธีจะเห็นว่าจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอนยิ่งมาก ค่า mapc ก็จะมีค่าต่ำลง

- เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

สำหรับการฝึกสอนในวิธีการต่างๆจะเห็นว่าจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอนยิ่งมาก เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนก็จะยิ่งมากขึ้น

6.3 ผลการทดลองของระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

6.3.1 ผลการทดลองระเบียบวิธีการต่างๆที่จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150ชุด

ตารางที่ 6.17 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Nearest Neighbor Algorithm

จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด

พอลดีตำแหน่ง "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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.1	0.103	0.123	0.1	0.001	0.103	0.105	0.088	0.126	0.138
	% error	21.951	6.185	6.956	8.256	0	9.574	0	3.296	5.882	0.719
พอลดีตำแหน่ง "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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	% error	98.305	0	0	0	0	0	0	0	0	0
พอลดีตำแหน่ง "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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.168	0.001	0.203	0.273	0.279	0.273	0.272	0.279	0.260	0.272
	% error	9.803	0	30.952	0.365	0.722	0	2.641	5.283	0.775	0.740
พอลดีตำแหน่ง "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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.203	0.267	0.277	0.269	0.188	0.147	0.214	0.215	0.161	0.269
	% error	3.045	1.111	4.482	2.281	13.253	5.161	13.829	11.399	9.039	2.536
พอลดีตำแหน่ง "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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.054	0.001
	% error	0	0	0	98.333	0	0	0	0	17.391	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.18 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Nonlinear Interpolation จำนวน
ชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด

ฟอลต์ 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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.0947	0.103	0.123	0.1	0.001	0.1054	0.105	0.092	0.1129	0.136
	% error	15.487	6.185	6.956	8.256	0	12.127	0	1.098	5.126	2.158
ฟอลต์ 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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	% error	98.305	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ฟอลต์ 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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.168	0.001	0.203	0.2681	0.2777	0.2678	0.2633	0.2685	0.2616	0.2677
	% error	9.803	0	30.952	2.153	0.252	1.904	0.641	1.320	1.395	0.851
ฟอลต์ 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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.2001	0.267	0.2758	0.2565	0.1705	0.1497	0.214	0.215	0.1872	0.2691
	% error	1.573	1.111	4.896	2.471	2.710	3.419	13.829	11.399	5.762	2.500
ฟอลต์ 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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.0361	0.001	0.001	0.001	0.001	0.054	0.001
	% error	0	0	0	39.833	0	0	0	0	17.391	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.19 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Weight Average จำนวนชุดข้อ
 มูลฝึกสอน 150 ชุด ($k=1$ $\alpha=0.89$)

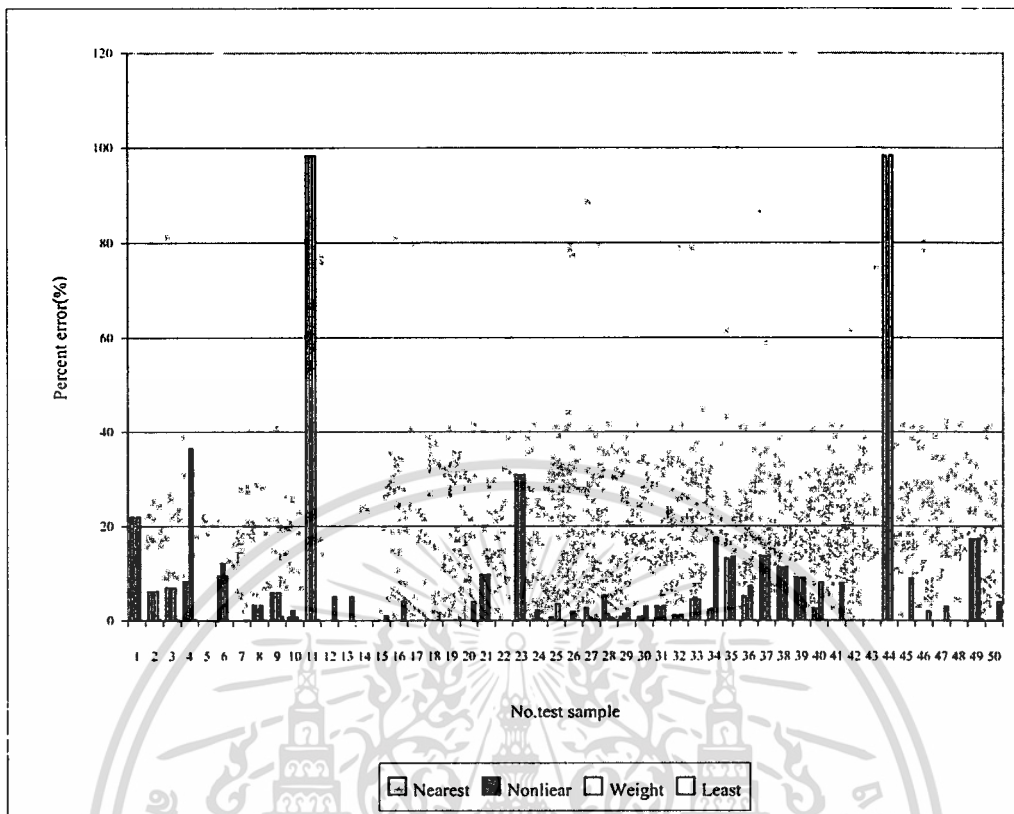
ฟอกส์ตำแหน่ง "F1"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.082	0.097	0.115	0.109	0.001	0.094	0.105	0.091	0.119	0.139
	$CCT_{CM}(sec)$	0.1	0.103	0.123	0.0692	0.001	0.103	0.105	0.088	0.126	0.138
	% error	21.951	6.185	6.956	36.513	0	9.574	0	3.296	5.882	0.719
ฟอกส์ตำแหน่ง "F2"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	% error	98.305	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ฟอกส์ตำแหน่ง "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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.168	0.001	0.203	0.2727	0.2673	0.2727	0.2653	0.2668	0.2642	0.262
	% error	9.803	0	30.952	0.474	3.501	0.109	0.113	0.679	2.403	2.963
ฟอกส์ตำแหน่ง "F4"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.197	0.270	0.290	0.263	0.166	0.155	0.188	0.193	0.177	0.276
	$CCT_{CM}(sec)$	0.203	0.267	0.277	0.2169	0.188	0.1663	0.214	0.215	0.161	0.2536
	% error	3.045	1.111	4.482	17.528	13.253	7.290	13.829	11.399	9.039	8.115
ฟอกส์ตำแหน่ง "F5"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.060	0.001	0.001	0.001	0.001	0.046	0.001
	$CCT_{CM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.054	0.001
	% error	0	0	0	98.333	0	0	0	0	17.391	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.20 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Least Square จำนวนชุดข้อมูล
ฝึกสอน 150 ชุด ($k=1, \alpha=0.89$)

ฟกคต์ ตำแหน่ง "F1"	ข้อมูล	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.082	0.097	0.115	0.109	0.001	0.094	0.105	0.091	0.119	0.139
	$CCT_{CM}(sec)$	0.082	0.0969	0.1149	0.1088	0.001	0.094	0.1049	0.0909	0.118	0.1389
	% error	0	0.103	0.087	0.183	0	0	0.095	0.109	0.840	0.071
ฟกคต์ ตำแหน่ง "F2"	ข้อมูล	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.059	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	$CCT_{CM}(sec)$	0.0589	0.0009	0.0009	0.001	0.0009	0.0009	0.001	0.001	0.001	0.0009
	% error	0.1695	5	5	0	1	4	0	0	0	4
ฟกคต์ ตำแหน่ง "F3"	ข้อมูล	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.153	0.001	0.294	0.274	0.277	0.273	0.265	0.265	0.258	0.270
	$CCT_{CM}(sec)$	0.1529	0.001	0.2939	0.2739	0.2769	0.2729	0.265	0.265	0.258	0.270
	% error	0.065	0	0.034	0.036	0.036	0.036	0	0	0	0
ฟกคต์ ตำแหน่ง "F4"	ข้อมูล	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.197	0.270	0.290	0.263	0.166	0.155	0.188	0.193	0.177	0.276
	$CCT_{CM}(sec)$	0.197	0.2699	0.29	0.263	0.166	0.1549	0.188	0.1929	0.177	0.2759
	% error	0	0.037	0	0	0	0.064	0	0.051	0	0.036
ฟกคต์ ตำแหน่ง "F5"	ข้อมูล	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.060	0.001	0.001	0.001	0.001	0.046	0.001
	$CCT_{CM}(sec)$	0.0009	0.001	0.001	0.06	0.0009	0.0009	0.0009	0.001	0.0459	0.0009
	% error	8	0	0	0	9	2	3	0	0.217	4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสำหรับข้อมูลทดสอบแต่ละชุด กรณีฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด

ตารางที่ 6.21 เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณ กรณีฝึกสอนด้วยชุดข้อมูล 150 ชุด

ระเบียบวิธีการคำนวณ	Nearest Neighbor					Nonlinear Interpolation				
	F1	F2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4	F5
ตำแหน่งของพอลต์	F1	F2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4	F5
เวลาที่ใช้ฝึกสอน (นาท)	0.11	0.12	0.12	0.11	0.12	1.14	1.07	1.11	1.00	1.03
ระเบียบวิธีการคำนวณ	Weight average					Least Square				
	F1	F2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4	F5
ตำแหน่งของพอลต์	F1	F2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4	F5
เวลาที่ใช้ฝึกสอน (นาท)	4.45	4.15	4.31	4.08	4.24	2.10	2.20	2.08	2.06	2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.17 ถึง 6.20 และรูปที่ 6.4 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

- การคำนวณค่า CCT

1. ระเบียบวิธีการฝึกสอนที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธี Nearest Neighbor สามารถหาค่า CCT ของข้อมูลทดสอบ โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 7.8855%, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 98.3333 % (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 44)

2. ระเบียบวิธีการฝึกสอนที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธี Nonlinear Interpolation สามารถหาค่า CCT ของข้อมูลทดสอบ โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 6.2376%, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 98.3051% (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 11)

3. ระเบียบวิธีการฝึกสอนที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธี Weight Average สามารถหาค่า CCT ของข้อมูลทดสอบ โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 8.9041%, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 98.3333% (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 44)

4. ระเบียบวิธีการฝึกสอนที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธี Least Square สามารถหาค่า CCT ของข้อมูลทดสอบ โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 0.9157%, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0% และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 9% (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 45)

ค่าผิดพลาดของคำตอบของระเบียบวิธีการคำนวณที่ฝึกสอนด้วยข้อมูลฝึกสอนทั้ง 4 ชุด จะเห็นว่าวิธีการของ Nearest Neighbor และ Nonlinear Interpolation มีค่า mape ใกล้เคียง และมีค่า Max error สูงในชุดข้อมูลทดสอบที่ 44 และชุดข้อมูลทดสอบที่ 11 เนื่องมาจากการกระจายตัวของชุดข้อมูลฝึกสอนไม่สม่ำเสมอครอบคลุมจุดทดสอบทั้งหมด ในส่วนวิธีการของ Weight Average มีค่า mape ที่สูงเนื่องมาจากการปรับ ค่า k และค่า α ไม่สามารถปรับครอบคลุมจุดทดสอบทั้งหมด

- เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

ระเบียบวิธีการคำนวณที่ใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยที่สุดคือ Nearest Neighbor ใช้เวลาฝึกสอน 0.58 นาทีและใช้เวลาฝึกสอนมากที่สุดคือ Weight Average ใช้เวลาฝึกสอน 22.03 นาที

6.3.2 ผลการทดลองระเบียบวิธีการต่างๆที่จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 200ชุด

ตารางที่ 6.22 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Nearest Neighbor Algorithm จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 200 ชุด

พอลต์ตำแหน่ง "F1"	ข้อมูลทดสอบชุดที่	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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.1	0.103	0.112	0.1	0.001	0.103	0.105	0.088	0.126	0.138
	% error	21.951	6.185	2.608	8.256	0	9.574	0	3.296	5.882	0.719
พอลต์ตำแหน่ง "F2"	ข้อมูลทดสอบชุดที่	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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.067	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	% error	13.559	0	0	0	0	0	0	0	0	0
พอลต์ตำแหน่ง "F3"	ข้อมูลทดสอบชุดที่	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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.146	0.001	0.203	0.273	0.279	0.273	0.272	0.279	0.26	0.272
	% error	4.575	0	30.952	0.365	0.722	0	2.641	5.283	0.775	0.740
พอลต์ตำแหน่ง "F4"	ข้อมูลทดสอบชุดที่	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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.203	0.267	0.277	0.269	0.188	0.144	0.181	0.215	0.181	0.269
	% error	3.045	1.111	4.482	2.281	13.253	7.096	3.723	11.399	2.259	2.536
พอลต์ตำแหน่ง "F5"	ข้อมูลทดสอบชุดที่	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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.079	0.001	0.001	0.001	0.001	0.054	0.001
	% error	0	0	0	31.666	0	0	0	0	17.391	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6. 23 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Nonlinear Interpolation จำนวน ชุดข้อมูลฝึกสอน 200 ชุด

พอลต์ ตำแหน่ง	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
"F1"	$CCT_{TDM}(sec)$	0.082	0.097	0.115	0.109	0.001	0.094	0.105	0.091	0.119	0.139
	$CCT_{CM}(sec)$	0.0947	0.103	0.112	0.1	0.001	0.1054	0.105	0.092	0.1117	0.136
	% error	15.487	6.185	2.608	8.256	0	12.127	0	1.098	6.134	2.158
"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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.084	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
% error	42.3729	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
"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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.146	0.001	0.203	0.2681	0.2777	0.2678	0.2633	0.2685	0.2616	0.2677
% error	4.575	0	30.952	2.153	0.252	1.904	0.641	1.320	1.395	0.851	
"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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.2001	0.267	0.2758	0.2565	0.1705	0.1467	0.1963	0.215	0.1712	0.2691
% error	1.573	1.111	4.896	2.471	2.710	5.354	4.414	11.399	3.276	2.500	
"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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.079	0.001	0.001	0.001	0.001	0.054	0.001
% error	0	0	0	31.667	0	0	0	0	17.391	0	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6. 24 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Weight Average จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 200 ชุด ($k=1, \alpha=0.9$)

พอลดีตำแหน่ง "F1"	ข้อมูล	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.082	0.097	0.115	0.109	0.001	0.094	0.105	0.091	0.119	0.139
	$CCT_{CM}(sec)$	0.1	0.103	0.1175	0.103	0.001	0.103	0.105	0.088	0.126	0.138
	% error	21.951	6.185	2.173	5.504	0	9.574	0	3.296	5.882	0.719
พอลดีตำแหน่ง "F2"	ข้อมูล	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.059	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	$CCT_{CM}(sec)$	0.035	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	% error	41.355	0	0	0	0	0	0	0	0	0
พอลดีตำแหน่ง "F3"	ข้อมูล	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.153	0.001	0.294	0.274	0.277	0.273	0.265	0.265	0.258	0.270
	$CCT_{CM}(sec)$	0.1566	0.001	0.203	0.2727	0.2673	0.2727	0.2653	0.2668	0.2636	0.2552
	% error	2.352	0	30.952	0.474	3.501	0.109	0.113	0.679	2.170	5.481
พอลดีตำแหน่ง "F4"	ข้อมูล	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.197	0.270	0.290	0.263	0.166	0.155	0.188	0.193	0.177	0.276
	$CCT_{CM}(sec)$	0.203	0.267	0.277	0.2451	0.188	0.1606	0.1938	0.1921	0.1702	0.2536
	% error	3.045	1.111	4.482	6.806	13.253	3.612	3.085	0.466	3.841	8.115
พอลดีตำแหน่ง "F5"	ข้อมูล	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.060	0.001	0.001	0.001	0.001	0.046	0.001
	$CCT_{CM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.079	0.001	0.001	0.001	0.001	0.054	0.001
	% error	0	0	0	31.666	0	0	0	0	17.391	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.22 ถึง 6.25 และรูปที่ 6.5
สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

- การคำนวณค่า CCT

1. ระเบียบวิธีการฝึกสอนที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธี Nearest Neighbor สามารถหาค่า CCT ของข้อมูลทดสอบ โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 4.3665 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 31.666% (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 44)

2. ระเบียบวิธีการฝึกสอนที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธี Nonlinear Interpolation สามารถหาค่า CCT ของข้อมูลทดสอบ โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 4.5846%, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 42.3729% (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 11)

3. ระเบียบวิธีการฝึกสอนที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธี Weight Average สามารถหาค่า CCT ของข้อมูลทดสอบ โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 4.7868%, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 41.355% (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 11)

4. ระเบียบวิธีการฝึกสอนที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธี Least Square สามารถหาค่า CCT ของข้อมูลทดสอบ โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 0.5675%, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0% และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 8% (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 50)

ค่าผิดพลาดของคำตอบของระเบียบวิธีการคำนวณที่ฝึกสอนด้วยข้อมูลฝึกสอนทั้ง 4 ชุด จะเห็นว่าวิธีการของ Nearest Neighbor และ Nonlinear Interpolation มีค่า mape ใกล้เคียง และมีค่า Max error สูงในชุดข้อมูลทดสอบที่ 11 และชุดข้อมูลทดสอบที่ 44 เนื่องมาจากการกระจายตัวของชุดข้อมูลฝึกสอนไม่สม่ำเสมอครอบคลุมจุดทดสอบทั้งหมดในขอบเขตที่กำหนด ในส่วนวิธีการของ Weight Average มีค่า mape ที่ต่ำลงมานี้เนื่องมาจากจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 200 ชุด มีการกระจายตัวดีกว่าจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด

- เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

ระเบียบวิธีการคำนวณที่ใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยที่สุดคือ Nearest Neighbor ใช้เวลาฝึกสอน 4.17 นาทีและใช้เวลาฝึกสอนมากที่สุดคือ Weight Average ใช้เวลาฝึกสอน 32.43 นาที

6.3.3 ผลการทดลองระเบียบวิธีการต่างๆที่จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 250ชุด

ตารางที่ 6. 27 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Nearest Neighbor Algorithm จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด

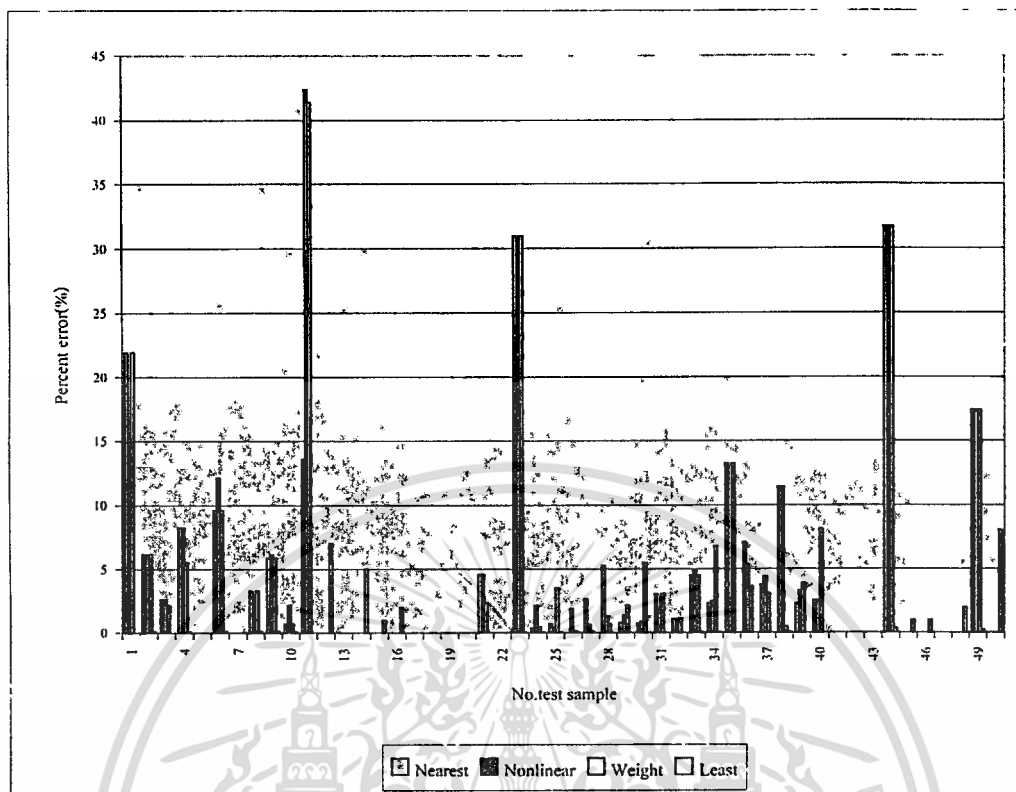
พอลดีตำแหน่ง "F1"	ข้อมูล	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.082	0.097	0.115	0.109	0.001	0.094	0.105	0.091	0.119	0.139
	$CCT_{CM}(sec)$	0.1	0.091	0.112	0.1	0.001	0.103	0.105	0.088	0.126	0.138
	% error	21.951	6.185	2.608	8.256	0	9.574	0	3.296	5.882	0.719
พอลดีตำแหน่ง "F2"	ข้อมูล	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.059	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	$CCT_{CM}(sec)$	0.063	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	% error	6.779	0	0	0	0	0	0	0	0	0
พอลดีตำแหน่ง "F3"	ข้อมูล	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.153	0.001	0.294	0.274	0.277	0.273	0.265	0.265	0.258	0.270
	$CCT_{CM}(sec)$	0.146	0.001	0.236	0.273	0.279	0.273	0.272	0.279	0.26	0.272
	% error	4.575	0	19.727	0.365	0.722	0	2.641	5.283	0.775	0.740
พอลดีตำแหน่ง "F4"	ข้อมูล	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.197	0.270	0.290	0.263	0.166	0.155	0.188	0.193	0.177	0.276
	$CCT_{CM}(sec)$	0.203	0.267	0.277	0.269	0.188	0.144	0.181	0.215	0.181	0.269
	% error	3.045	1.111	4.482	2.281	13.253	7.096	3.723	11.399	2.259	2.536
พอลดีตำแหน่ง "F5"	ข้อมูล	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.060	0.001	0.001	0.001	0.001	0.046	0.001
	$CCT_{CM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.067	0.001	0.001	0.001	0.001	0.054	0.001
	% error	0	0	0	11.666	0	0	0	0	17.391	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.25 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Least Square จำนวนชุดข้อมูล
ฝึกสอน 200 ชุด ($k=1, \alpha=0.9$)

พอลดีค่าแห่ง "F1"	ข้อมูล	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.082	0.097	0.115	0.109	0.001	0.094	0.105	0.091	0.119	0.139
	$CCT_{CM}(sec)$	0.082	0.0969	0.115	0.1089	0.001	0.0941	0.105	0.0909	0.1189	0.1389
% error	0	0.103	0	0.091	0	0.106	0	0.109	0.084	0.071	
พอลดีค่าแห่ง "F2"	ข้อมูล	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.059	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	$CCT_{CM}(sec)$	0.059	0.0009	0.001	0.0009	0.0009	0.0009	0.001	0.001	0.001	0.001
% error	0	7	0	5	1	2	0	0	0	0	
พอลดีค่าแห่ง "F3"	ข้อมูล	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.153	0.001	0.294	0.274	0.277	0.273	0.265	0.265	0.258	0.270
	$CCT_{CM}(sec)$	0.153	0.001	0.2939	0.2739	0.2769	0.2729	0.265	0.265	0.258	0.27
% error	0	0	0.034	0.034	0.036	0.036	0	0	0	0	
พอลดีค่าแห่ง "F4"	ข้อมูล	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.197	0.270	0.290	0.263	0.166	0.155	0.188	0.193	0.177	0.276
	$CCT_{CM}(sec)$	0.197	0.270	0.2899	0.2629	0.166	0.155	0.188	0.1929	0.177	0.276
% error	0	0	0.034	0.038	0	0	0	0.051	0	0	
พอลดีค่าแห่ง "F5"	ข้อมูล	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.060	0.001	0.001	0.001	0.001	0.046	0.001
	$CCT_{CM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.0598	0.0009	0.0009	0.001	0.0009	0.0459	0.0009
% error	0	0	0	0.333	1	1	0	2	0.217	8	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.5 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสำหรับข้อมูลทดสอบแต่ละชุด กรณีฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลฝึกสอน 200 ชุด

ตารางที่ 6.26 เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณ กรณีฝึกสอนด้วยชุดข้อมูล 200 ชุด

ระเบียบวิธีการคำนวณ	Nearest Neighbor					Nonlinear Interpolation				
	F1	F2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4	F5
ตำแหน่งของพอลต์	F1	F2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4	F5
เวลาที่ใช้ฝึกสอน (นาท)	0.50	0.51	0.53	0.52	0.51	2.13	2.11	2.10	2.04	2.04
ระเบียบวิธีการคำนวณ	Weight average					Least Square				
	F1	F2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4	F5
ตำแหน่งของพอลต์	F1	F2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4	F5
เวลาที่ใช้ฝึกสอน (นาท)	6.50	6.22	6.31	6.17	6.43	4.30	4.22	4.20	4.14	4.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.28 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Nonlinear Interpolation จำนวน
ชุดข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด

พอลดีตำแหน่ง "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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.0947	0.097	0.112	0.1	0.001	0.1054	0.105	0.092	0.1117	0.136
	% error	15.487	0	2.608	8.256	0	12.127	0	1.098	6.134	2.158
พอลดีตำแหน่ง "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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.063	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	% error	6.779	0	0	0	0	0	0	0	0	0
พอลดีตำแหน่ง "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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.146	0.001	0.236	0.2681	0.2777	0.2678	0.2633	0.2685	0.2616	0.2677
	% error	4.575	0	19.727	2.153	0.252	1.904	0.641	1.320	1.395	0.851
พอลดีตำแหน่ง "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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.2001	0.267	0.2758	0.2565	0.1705	0.1467	0.1963	0.215	0.1712	0.2691
	% error	1.573	1.111	4.896	2.471	2.710	5.354	4.414	11.399	3.276	2.500
พอลดีตำแหน่ง "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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.0652	0.0249	0.001	0.001	0.001	0.054	0.001
	% error	0	0	0	9.895	0	0	0	0	17.391	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.29 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Weight Average จำนวนชุดข้อ
 มวลฝึกสอน 250 ชุด ($k=1, \alpha=0.9$)

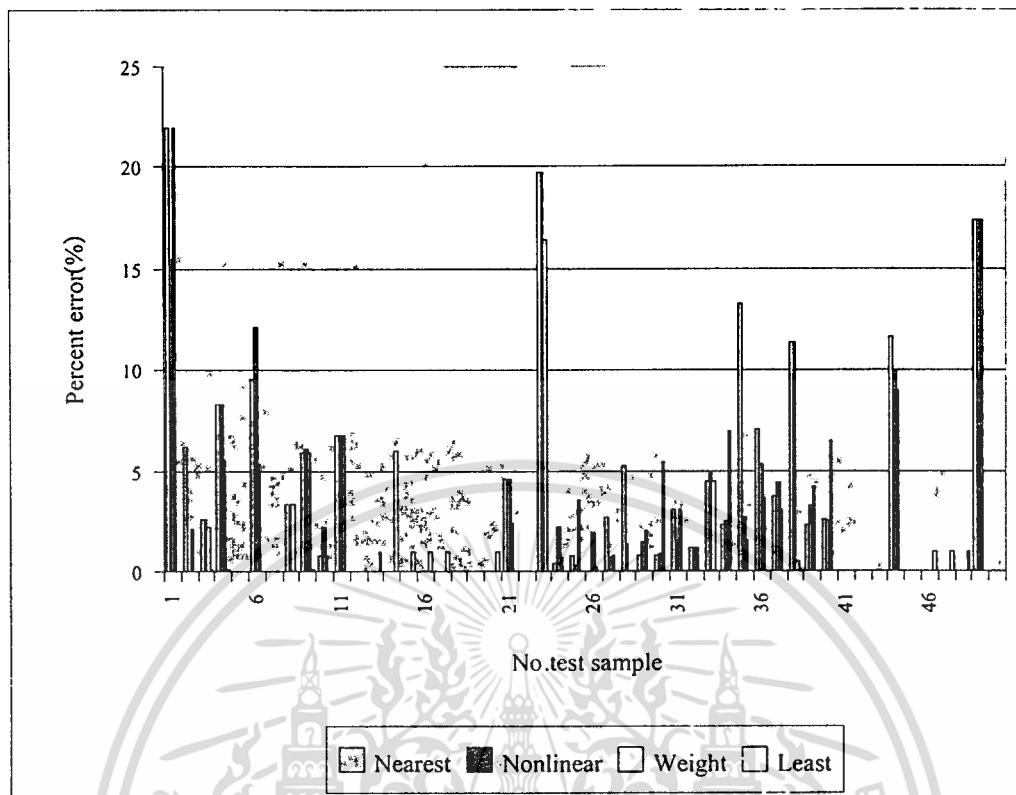
พอลต์ตำแหน่ง "F1"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.082	0.097	0.115	0.109	0.001	0.094	0.105	0.091	0.119	0.139
	$CCT_{CM}(sec)$	0.1	0.099	0.1175	0.103	0.001	0.099	0.105	0.088	0.126	0.138
	% error	21.951	2.061	2.217	5.504	0	5.319	0	3.296	5.882	0.719
พอลต์ตำแหน่ง "F2"	ข้อมูล ทดสอบชุดที่	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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.063	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	% error	6.779	0	0	0	0	0	0	0	0	0
พอลต์ตำแหน่ง "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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.1566	0.001	0.2457	0.2722	0.2673	0.2725	0.263	0.265	0.2631	0.2552
	% error	2.352	0	16.428	0.656	3.501	0.183	0.754	0	1.976	5.481
พอลต์ตำแหน่ง "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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.203	0.267	0.277	0.2447	0.1686	0.1606	0.1938	0.1921	0.1696	0.258
	% error	3.045	1.111	4.482	6.958	1.566	3.612	3.085	0.466	4.180	6.521
พอลต์ตำแหน่ง "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
	$CCT_{CM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.0546	0.001	0.001	0.001	0.001	0.054	0.001
	% error	0	0	0	8.956	0	0	0	0	17.391	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.30 ผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{TDM} ด้วยวิธี Least Square จำนวนชุดข้อมูล
ฝึกสอน 250 ชุด ($k=1, \alpha=0.9$)

พอลด์ตำแหน่ง "F1"	ข้อมูล	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.082	0.097	0.115	0.109	0.001	0.094	0.105	0.091	0.119	0.139
	$CCT_{CM}(sec)$	0.082	0.097	0.1149	0.1089	0.001	0.094	0.105	0.091	0.1189	0.139
	% error	0	0	0.087	0.091	0	0	0	0	0.084	0
พอลด์ตำแหน่ง "F2"	ข้อมูล	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.059	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	$CCT_{CM}(sec)$	0.059	0.001	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.001	0.001	0.0009
	% error	0	0	1	6	1	1	1	0	0	1
พอลด์ตำแหน่ง "F3"	ข้อมูล	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.153	0.001	0.294	0.274	0.277	0.273	0.265	0.265	0.258	0.270
	$CCT_{CM}(sec)$	0.153	0.001	0.294	0.2739	0.2769	0.2729	0.265	0.265	0.258	0.270
	% error	0	0	0	0.036	0.036	0.036	0	0	0	0
พอลด์ตำแหน่ง "F4"	ข้อมูล	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.197	0.270	0.290	0.263	0.166	0.155	0.188	0.193	0.177	0.276
	$CCT_{CM}(sec)$	0.197	0.270	0.29	0.2629	0.166	0.155	0.188	0.1929	0.177	0.276
	% error	0	0	0	0.038	0	0	0	0.051	0	0
พอลด์ตำแหน่ง "F5"	ข้อมูล	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
	ทดสอบชุดที่										
	$CCT_{TDM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.060	0.001	0.001	0.001	0.001	0.046	0.001
	$CCT_{CM}(sec)$	0.001	0.001	0.001	0.060	0.001	0.0009	0.0009	0.0009	0.046	0.001
	% error	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสำหรับข้อมูลทดสอบแต่ละชุด กรณีฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด

ตารางที่ 6.31 เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณ กรณีฝึกสอนด้วยชุดข้อมูล 250 ชุด

ระเบียบวิธีการคำนวณ	Nearest Neighbor					Nonlinear Interpolation				
	F1	F2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4	F5
ตำแหน่งของพอลต์	F1	F2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4	F5
เวลาที่ใช้ฝึกสอน (นาท)	1.20	1.19	1.19	1.19	1.20	3.49	3.41	3.41	3.38	3.45
ระเบียบวิธีการคำนวณ	Weight average					Least Square				
	F1	F2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4	F5
ตำแหน่งของพอลต์	F1	F2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4	F5
เวลาที่ใช้ฝึกสอน (นาท)	10.40	9.53	10.25	9.35	10.17	6.23	6.20	6.28	6.34	6.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.27 ถึง 6.30 และรูปที่ 6.6

สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

- การคำนวณค่า CCT

1. ระเบียบวิธีการฝึกสอนที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธี Nearest Neighbor สามารถหาค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 3.6064%, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 21.951% (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 1)

2. ระเบียบวิธีการฝึกสอนที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธี Nonlinear Interpolation สามารถหาค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 3.0891%, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 19.727% (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 23)

3. ระเบียบวิธีการฝึกสอนที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธี Weight Average สามารถหาค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 2.9286%, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 21.951% (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 1)

4. ระเบียบวิธีการฝึกสอนที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธี Least Square สามารถหาค่า CCT ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 0.2891%, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0% และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 6% (ข้อมูลทดสอบชุดที่ 14)

ค่าผิดพลาดของคำตอบของระเบียบวิธีการคำนวณที่ฝึกสอนด้วยข้อมูลฝึกสอนทั้ง 4 ชุด จะเห็นว่าวิธีการของ Nonlinear Interpolation มีค่า mape ที่ต่ำกว่า วิธีการ Nearest Neighbor เนื่องจากวิธีการของ Nonlinear Interpolation เอ้าท์พุทที่ได้จะอยู่กึ่งกลางระหว่างเอ้าท์พุท m และ เอ้าท์พุท n ดังรูป 3.1(b) ในส่วนวิธีการของ Weight Average มีค่า mape ที่ต่ำลงมาเนื่องจากจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด มีการกระจายตัวดีกว่าจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 200 ชุด และ 150 ชุด ในขอบเขตที่กำหนด

- เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

ระเบียบวิธีการคำนวณที่ใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยที่สุดคือ Nearest Neighbor ใช้เวลาฝึกสอน 6.37 นาทีและใช้เวลาฝึกสอนมากที่สุดคือ Weight Average ใช้เวลาฝึกสอน 50.50 นาที

6.3.4 เปรียบเทียบผลการทดลองทุกกรณี

ตารางที่ 6.32 ผลการทดสอบระเบียบวิธีการคำนวณที่ผ่านการฝึกสอนแล้วในเงื่อนไขต่างๆ

ระเบียบวิธีการ	จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน	เวลาที่ใช้การฝึกสอน (Min)	ผลของข้อมูลทดสอบ (30 ชุด)		
			Mapc (%)	Min Error (%)	Max Error (%)
Nearest Neighbor	150	0.58	7.8855	0	98.333
	200	4.17	4.3665	0	31.666
	250	6.37	3.6064	0	21.951
Nonlinear Interpolation	150	5.35	6.2376	0	98.305
	200	10.42	4.5846	0	42.372
	250	18.34	3.089	0	19.727
Weighted Average	150	22.03	8.9041	0	98.333
	200	32.43	4.7868	0	41.355
	250	50.50	2.9286	0	21.951
Least Square	150	10.57	0.9157	0	9
	200	21.44	0.5675	0	8
	250	32.13	0.2891	0	6

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.32 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

- การคำนวณค่า CCT

ระเบียบวิธีการคำนวณที่ผ่านการฝึกสอนด้วยวิธีการต่างๆทั้ง 4 วิธีจะเห็นว่าจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอนยิ่งมาก ค่า mapc ก็จะมีค่าต่ำลง

- เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

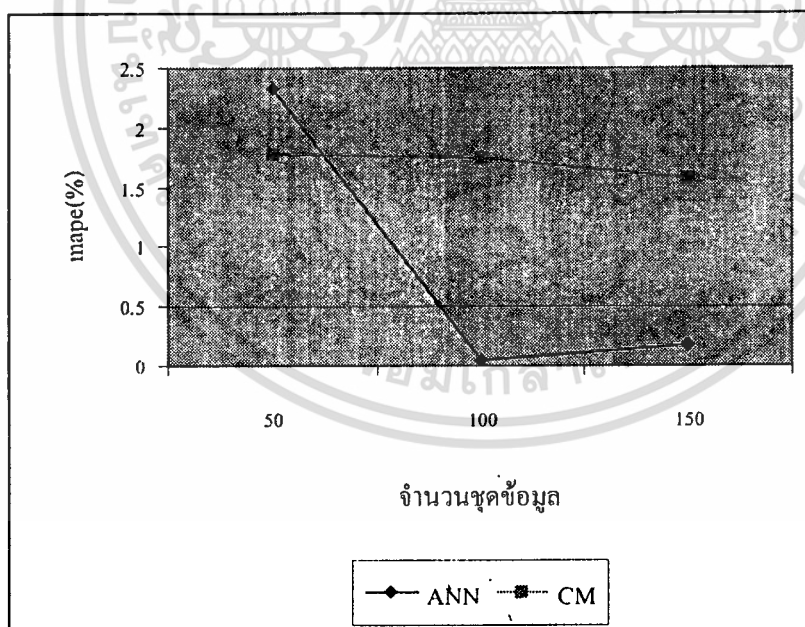
สำหรับการฝึกสอนในวิธีการต่างๆจะเห็นว่าจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอนยิ่งมาก เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนก็จะยิ่งมากขึ้น

6.4 เปรียบเทียบผลการทดลองกับโครงข่ายประสาทเทียม

6.4.1 ผลการทดลองของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system

ตารางที่ 6.33 ผลการทดสอบระเบียบวิธีการคำนวณกับโครงข่ายประสาทเทียม

วิธีการ	จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน	เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน (Min)	ผลของข้อมูลทดสอบ (30 ชุด)		
			Mape (%)	Min Error (%)	Max Error (%)
ANN	50	26.80	2.330	0	10.788
	100	26.55	0.054	0	0.349
	150	23.64	0.171	0	2.893
CM	50	1.40	1.7761	0	9
	100	2.57	1.7422	0	7
	150	10.16	1.5688	0	7



รูปที่ 6.7 การเปรียบเทียบค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ระหว่าง ANN กับ CM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการเปรียบเทียบในตารางที่ 6.33 และรูปที่ 6.7

- การคำนวณหาค่า CCT

โครงข่ายประสาทเทียม(ANN) ที่ผ่านการฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 1 โดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด สามารถคำนวณค่า CCT โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) น้อยที่สุดเท่ากับ 0.171 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 2.893 % และระเบียบวิธีการคำนวณ(CM) ที่จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด มีค่า $k=1, \alpha=0.3$ สามารถคำนวณค่า CCT โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) น้อยที่สุดเท่ากับ 1.5688 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 7% จะเห็นว่าวิธีการของ ANN มีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) น้อยกว่า วิธีการของ CM แต่วิธีการของ CM จะมีค่าค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) มีค่าน้อยลงเมื่อจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอนมากขึ้น

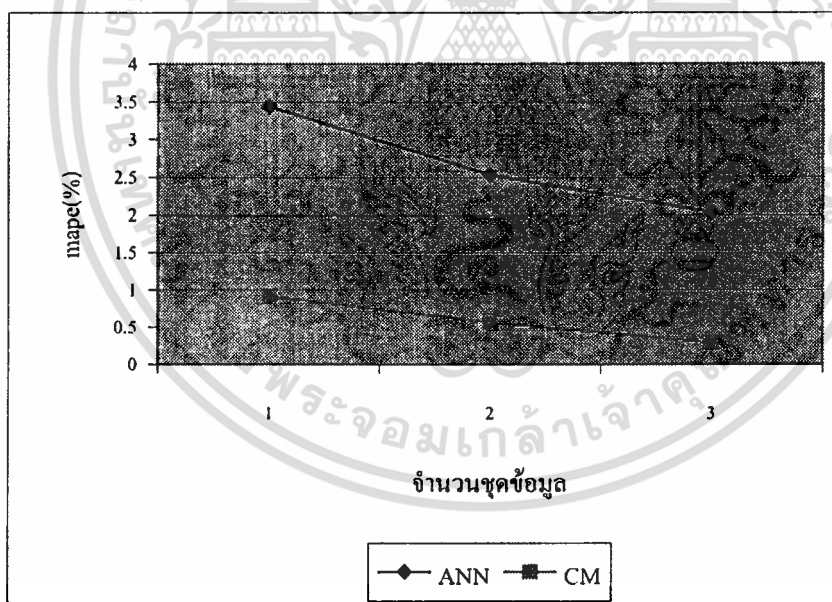
- เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

จากตารางที่ 6.33 วิธีการของ CM ใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยกว่าวิธีการของ ANN ในจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอนเท่ากัน

6.4.2 ผลการทดลองของระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ตารางที่ 6.34 ผลการทดสอบเปรียบเทียบวิธีการคำนวณกับโครงข่ายประสาทเทียม

วิธีการ	จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน	เวลาที่ใช้การฝึกสอน (Min)	ผลของข้อมูลทดสอบ (30 ชุด)		
			Mapc (%)	Min Error (%)	Max Error (%)
ANN	150	49.04	3.4338	0	25.4391
	200	53.25	2.5262	0	14.9001
	250	56.71	2.0365	0	16.7071
CM	150	10.57	0.9157	0	9
	200	21.44	0.5675	0	8
	250	32.13	0.2891	0	6



รูปที่ 6.8 การเปรียบเทียบค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ระหว่าง ANN กับ CM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการเปรียบเทียบในตารางที่ 6.34 และรูปที่ 6.8

- การคำนวณหาค่า CCT

โครงข่ายประสาทเทียม(ANN) ที่ผ่านการฝึกสอนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความชัน (k) เท่ากับ 0.5 โดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด สามารถคำนวณค่า CCT โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) น้อยที่สุดเท่ากับ 2.0365 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 16.7071 % และระเบียบวิธีการคำนวณ(CM) ที่จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 250 ชุด มีค่า $k=1, \alpha=0.9$ สามารถคำนวณค่า CCT โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) น้อยที่สุดเท่ากับ 0.2891%, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 6% จะเห็นว่าวิธีการของ CM มีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) น้อยกว่า วิธีการของ ANN

- เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

จากตารางที่ 6.34 วิธีการของ CM ใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยกว่าวิธีการของ ANN ในจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอนเท่ากัน



บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะชั่วคราว โดยใช้ระเบียบวิธีการคำนวณในการคำนวณหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอมาแล้วนั้น สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ระบบไฟฟ้าที่ทำการศึกษา ได้ทำการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ ได้แก่ ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system ซึ่งเป็นระบบทดสอบ และระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยบริเวณภาคกลางตะวันตก และภาคใต้ ซึ่งเป็นระบบที่ใช้งานจริงในทางปฏิบัติ โดยระบบไฟฟ้ากำลังทั้ง 2 ระบบที่นำมาศึกษาได้มีการปรับเปลี่ยนสถานะการทำงานต่างๆของระบบ อาทิเช่น กำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พิจารณา, ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และโครงสร้างของระบบ เพื่อให้ครอบคลุมเงื่อนไขที่ทำการศึกษา

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

3. การฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณ ทำการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณแบ่งตามเงื่อนไข 9 กรณี โดยฝึกสอนด้วยจำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอนต่างๆกัน 3 กรณี โดยแต่ละเงื่อนไขมีวิธีการฝึกสอนที่ต่างกันเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระเบียบวิธีการคำนวณที่ผ่านการฝึกสอน

โดยสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณได้ดังต่อไปนี้

3.1 การเลือกตัวแปรในการฝึกสอน หากตัวแปรที่เลือกเป็นอินพุตในการฝึกสอนมีความสัมพันธ์กับตัวแปรเอาต์พุตมาก ก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณสูงขึ้นตามไปด้วย

3.2 การกระจายของข้อมูลฝึกสอน ข้อมูลฝึกสอนที่มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอภายในขอบเขตที่กำหนด จะทำให้ระเบียบวิธีการคำนวณสามารถเรียนรู้ข้อมูลภายในขอบเขตที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดได้อย่างทั่วถึง เมื่อทดสอบด้วยชุดข้อมูลทดสอบที่อยู่ในขอบเขตดังกล่าว ก็จะสามารถคำนวณผลลัพธ์ได้อย่างแม่นยำ

3.3 ปริมาณของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบ ในปัญหาที่มีความซับซ้อนและมีขอบเขตในการเรียนรู้มากนั้น นอกจากจะต้องใช้ข้อมูลฝึกสอนที่มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอแล้วยังจำเป็นต้องมีจำนวนข้อมูลฝึกสอนที่เพียงพอจึงจะทำให้ระเบียบวิธีการคำนวณที่ผ่านการฝึกสอนแล้วมีประสิทธิภาพสูง ส่วนปริมาณของข้อมูลทดสอบจะใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของระเบียบวิธีการคำนวณผ่านการฝึกสอนแล้ว

4. ผลการทดสอบ เมื่อนำระเบียบวิธีการคำนวณที่ผ่านการฝึกสอนสำหรับคำนวณหาค่า CCT ของระบบไฟฟ้ากำลังแต่ละระบบ มาทดสอบด้วยชุดข้อมูลทดสอบ (ของแต่ละระบบ) ได้ผลการทดสอบดังนี้

4.1 ระเบียบวิธีการคำนวณสำหรับใช้ในการคำนวณหาค่า CCT ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system ที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว คำนวณค่า CCT ของชุดข้อมูลทดสอบ โดยมีค่า mape เท่ากับ 1.5688% , ค่าผิดพลาดต่ำสุด 0% , ค่าผิดพลาดสูงสุด 7% และใช้เวลาในการฝึกสอน 10.16 นาที (ฝึกสอนด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหน่วยประมวลผลกลางแพนเทียม โฟ 1.7 GHz, หน่วยความจำ 256 MB)

4.2 ระเบียบวิธีการคำนวณสำหรับใช้ในการคำนวณหาค่า CCT ของระบบไฟฟ้ากำลัง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตบริเวณภาคกลางตะวันตกและภาคใต้ ที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว คำนวณค่า CCT ของชุดข้อมูลทดสอบ โดยมีค่า mape เท่ากับ 0.2891% , ค่าผิดพลาดต่ำสุด 0% , ค่าผิดพลาดสูงสุด 6% และใช้เวลาในการฝึกสอน 31.33 นาที (ฝึกสอนด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหน่วยประมวลผลกลางแพนเทียม โฟ 1.7 GHz, หน่วยความจำ 256 MB)

5. จากการทดลองจะเห็นว่าค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตจะมีค่ามากทำให้การหาอุปกรณ์ตัดคอนที่ใช้แยกฟอลต์ออกจากระบบทำได้ยาก เนื่องจากการทดลองได้ทำการทดสอบที่ระดับกำลังผลิตที่ 1.5 เท่าของพิกัดจึงทำให้ฟอลต์ที่เกิดรุนแรงมาก

6. สิ่งที่ควรพัฒนาต่อไป

6.1 การเพิ่มประสิทธิภาพของระเบียบการคำนวณในการหาค่า CCT ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สูงขึ้นก็คือวิธีการสุ่มที่มีการกระจายของข้อมูลสม่ำเสมอกว่า Pseudo Random Sequence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาทิเช่น Sobol Sequence[1] หรือวิธีการอื่นที่สามารถกระจายข้อมูลให้สม่ำเสมอ จะทำให้ได้สถานะที่ครอบคลุมจุดทำงานของระบบไฟฟ้า

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] S. Jiriwibhakorn, A. H. Coonick, "Fast Critical Clearing Time Estimation of a Large Power System Using Neural Networks and Sobol Sequences," IEEE proceeding Summer Meeting. Vol.1, pp.522-527, 2000.
- [2] Electric power Research Institute, "Analysis of Stressed Interconnected Power Networks," Research Project 8010-28, March 1994
- [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] C. Pothisarn, "Critical Clearing Time Estimation of Electrical Power Systems Using Neural Networks," Ladkrabang Engineering Journal, Vol.19, No.1, March 2002
- [5] The Math Works, Using MATLAB, The Math Works, Inc., June 2001.
- [6] M.A. Pai, Energy Function Analysis for Power System Stability, Kluwer Academic Publishers., 1989.
- [7] A. A. Fouad and V. Vittal, Power System Transient Stability Analysis Using the Transient Energy Function Method, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ., 1992.
- [8] Equipment and Power System Diagram Section, Transmission System Operation & Planning Department, System Control Operation Division, EGAT, "Switching and Transmission Line Diagram," September 1999
- [9] 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.
- [10] S. Jiriwibhakorn, C.Pothisarn, "Application of Nearest Neighbor Algorithm for Critical Clearing Time (CCT)," IEEE, 2002.
- [11] William. D. Stevenson Jr. Element of Power System Analysis, Forth Edition. McGraw – Hill, Inc. Singapore, 1982.
- [12] Leonardo V. and Fabricio C. "A Methodology Based on Neural Networks for the Determination of the Critical Clearing Time of Power Systems Stability," IEEE, 2002.

- [13] Yoshinori Kato. and Shinichi Iwamoto. "Transient stability Preventive Control for stable Operating Condition with Desired CCT," IEEE Transaction on Power Systems, Vol 17, No. 4, November 2002.
- [14] รศ.ดร.มนัส สัจจวรศิลป์, วรรัตน์ ภัทรอมรกุล 2543.คู่มือการใช้ MATLAB ฉบับสมบูรณ์. สำนักพิมพ์อินโฟเพรส, กรุงเทพฯ.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลของระบบไฟฟ้าที่ทำการศึกษา

ภาคผนวกนี้แสดงรายละเอียดของข้อมูลของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 50 generators test system และระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในบริเวณภาคกลางตะวันตกและภาคใต้ 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 ก.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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

Bus	V	δ	P _r	Q _r	P _i	Q _i	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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

Bus	V	δ	P_r	Q_r	P_s	Q_s	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	1,486.00	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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

Bus	V	δ	P _r	Q _r	P _s	Q _s	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	2,040.00	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	2,000.00	500.000	30.200	7.600	0.0000	0.0000
105	1.00700	-2.800	1,620.00	388.340	96.000	167.400	-9.9900	0.2420
106	1.00500	-2.750	1,080.00	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	2,000.00	563.720	60.400	1,166.00	-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	2,493.00	142.720	683.500	184.700	0.0941	28.5600
116	1.04300	-16.860	2,713.00	631.840	792.600	315.500	-1.9500	19.3000
117	1.03000	-15.320	2,627.00	258.540	485.300	71.400	-0.5400	24.1000
118	1.01000	-17.790	4,220.00	660.380	651.900	328.400	-9.7900	47.8800
119	1.01300	-59.410	8,954.00	4,748.48	2,094.00	3,774.00	-9.9900	99.9900
120	1.03310	-51.600	0.000	0.000	-408.000	175.100	8.5500	20.2600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

Bus	V	δ	P _r	Q _r	P _s	Q _s	G	B
121	1.04600	-20.200	2,997.00	-160.220	237.700	-17.300	10.5500	3.0600
122	1.00000	-2.790	1,009.00	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	3,005.00	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	12,963.0	2,610.82	4,075.00	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	5,937.00	1,834.96	4,328.00	944.300	-0.9100	38.3000
131	1.04200	-24.320	28,300.0	7,473.04	21,840.0	4,320.00	-7.8000	51.4500
132	1.04200	-7.240	3,095.00	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	20,626.0	7,402.14	22,309.0	7,402.00	-0.7800	-1.4100
135	1.10700	29.040	5,982.00	1,564.84	4,298.00	1,264.00	8.3500	-9.9900
136	1.08300	4.390	51,950.0	14,453.5	52,951.0	13,552.0	3.7500	-9.9900
137	1.06400	-72.730	12,068.0	3,450.76	12,946.0	2,608.00	-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	56,834.0	15,849.6	57,718.0	13,936.0	-9.9900	16.0900
140	1.05000	-26.160	23,123.0	6,710.47	24,775.0	6,676.00	-0.7700	-2.8900
141	1.05300	-9.120	37,911.0	11,669.5	32,799.0	11,361.0	-9.9900	52.1200
142	1.15500	-10.730	24,449.0	5,496.12	17,737.0	3,934.00	22.1000	43.2300
143	1.03100	-13.660	5,254.00	2,158.63	4,672.00	1,709.00	-9.9900	5.8600
144	0.99700	-8.580	11,397.0	2,686.85	9602.000	2,203.00	-9.9900	-4.3600
145	1.05200	5.020	14,118.6	2,987.15	9,173.00	1,555.00	4.5700	-9.9900

ก.1.2 ข้อมูลของสายส่ง (Branch data)

รายละเอียดของระบบไฟฟ้ากำลังในตารางต่อไปนี้จะกล่าวถึง

From จากบัสหมายเลข

To ไปยังบัสหมายเลข

R ความต้านทานของสายส่ง หรือหม้อแปลงไฟฟ้า

X รีแอกแตนซ์ของสายส่ง หรือหม้อแปลงไฟฟ้า

B กำลังอัดประจุสาย

Tap แท็ปของหม้อแปลงไฟฟ้า

Circuit วงจรที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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 ระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในบริเวณภาคกลาง ตะวันตกและภาคใต้

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.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลับของระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในบริเวณภาค
กลางตะวันตกและภาคใต้

Bus	V	δ	P _r	Q _r	P _i	Q _i	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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น. ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 (ต่อ)

Bus	V	δ	P _r	Q _r	P _i	Q _i	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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 (ต่อ)

Bus	V	δ	P _r	Q _r	P _i	Q _i	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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.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	1,002.21	1,240.00	-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 ก.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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.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 อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.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 ก.6 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ในบริเวณภาคกลางตะวันตกและภาคใต้

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



ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. พิเชฐ มานะบรรยง, สมชาติ จิรวิภากร, “การหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้ระเบียบวิธีการคำนวณ”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 22, ฉบับที่ 2, มิถุนายน 2548, หน้า 19-24
2. พิเชฐ มานะบรรยง, สมชาติ จิรวิภากร, “Critical Clearing Time Determination of EGAT systems Using Computation Methods”, The 28th Electrical Engineering Conference (EECON-28)

การหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้ ระเบียบวิธีการคำนวณ

Critical Clearing Time Determination of Power Systems Using Computational Methods

พิชญ์ มานะบรรจง สมชาติ จิรวิภากร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E-mail: Pichay.M@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการคำนวณในการศึกษาเสถียรภาพในสถานะชั่วคราวของระบบไฟฟ้าที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วโดยนำมาใช้ในการหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะต่างๆของระบบ อาทิ ระดับกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, โครงสร้างของระบบไฟฟ้า, ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และการเคลื่อนที่ฟอลต์ในรูปแบบต่างๆ ในกรณีศึกษาจะใช้ระบบไฟฟ้ากำลังของ IEEE 50-Generator Test System เป็นระบบทดสอบ ผลการทดสอบที่ได้อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงค่าที่หาได้จากวิธีคำนวณมีค่าประมาณ 1.5688%

สำคัญ: ช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤต, ฟอลต์, สถานะชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลัง

Abstract

This paper presents an application of computational methods in transient stability study, with fast access to the answer of the power system stability problems. Computation Methods (CM) used to calculate the critical clearing time (CCT) of large power system with various system condition, such as generation power level, system topology, fault location and fault clearing. The study has been tested on the IEEE 50-Generator Test System. The results showed that CM could be used to estimate the CCT effectively with the mean absolute percentage error of about 1.5688%.

Keywords: Critical Clearing Time (CCT), Fault, Transient Stability

1. บทนำ

การศึกษาระบบไฟฟ้าในสถานะชั่วคราวของระบบไฟฟ้าชั่วคราว (Transient stability) ของระบบที่มีขนาดใหญ่และถูกนำมาพิจารณาในกรณีศึกษาของระบบ ทั้งในการออกแบบและวางแผนระบบเบื้องต้น ก็คือช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤต (CCT) การคำนวณค่า CCT ของระบบไฟฟ้านั้นสามารถทำได้หลายวิธี อาทิเช่น วิธีการทางคณิตศาสตร์ (Time Domain), Direct Method [1] และ Transient Energy Function [2] ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีข้อดีและข้อเสีย, ความรวดเร็วในการหาค่าตอบและ

ข้อจำกัดในการเลือกใช้แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตลอดจนขั้นตอนในการคำนวณระบบไฟฟ้าที่นำไปปฏิบัติได้จริง การศึกษาระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ของระบบจะซับซ้อนเนื่องรวมทั้งได้มีสถานการณ์ที่ควบคุมและปรับปรุงเสถียรภาพให้ดีขึ้นเป็นระบบเพิ่มเติมมากขึ้น ทำให้ระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนมากขึ้น การหาค่า CCT ของระบบไฟฟ้าดังกล่าวจึงข้างต้น ก็จะมีต้นทุนสูงและใช้เวลาในการหาค่าตอบมากขึ้นวิธีการหาค่า CCT อีกวิธีหนึ่งที่มีความรวดเร็วของผลที่จะนำไปใช้แบบเบบกับที่เห็นได้ก็คือ การใช้ระเบียบวิธีการคำนวณ [2] (Computation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Methods ที่มีผลรวมสมมาตร ในการฝึกฝนการวิจัยผู้ซึ่งเอาที่ทุกที่ (CCT) และอินพุทที่มีอัตราว่าง (โครงสร้างของระบบ, ลำดับของพอลิ, ระดับกำลังสถิติ) ซึ่งค่าลบ (CCT) ที่ได้จะมีผลรวมของค่าและเกณฑ์อยู่ในเกณฑ์ที่ดีถึงค่าตามค่าข้อมูลของระบบ ให้ที่ที่นั้นนำไปใช้เพื่อวิธีการคำนวณวิธีที่มีปริมาณและคุณภาพเพื่อหา ข้อมูลที่มีมาศึกษาใหม่จากวิธีการตามเวลา[4]

2.ระเบียบวิธีการคำนวณ

2.1 Nearest Neighbor Algorithm

Nearest Neighbor Algorithm ที่ชื่อกระบวนการฝึกฝนแต่ละอินพุท และเอาที่ทุกที่มีข้อมูลฝึกสอนที่ 1 ถึงข้อมูลฝึกสอนที่ n ในส่วนของชุดข้อมูลทดสอบจะมีข้อมูลที่ 1 ถึงข้อมูลที่ d แต่ละชุดข้อมูลทั้งข้อมูลฝึกสอน และข้อมูลทดสอบจะมีหลายอินพุทจนถึง m อินพุท ซึ่งข้อมูลที่ 1 จะใช้ให้ Nearest Neighbor ซึ่งจะประกอบด้วยชุดทดสอบ (n1,n2,n3,...,nm) โดยที่ i=1,2,3,...,d โดยจะเปรียบเทียบกับชุดข้อมูลฝึกสอน ซึ่งผลที่ได้ $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_d$ หากได้จากค่า Δ เป็นส่วนของ Δ_{min} ก็คือทุกจุดอยู่ในหนึ่งบรรทัดเอาที่ทุกที่ โดยที่ค่าของเอาที่ทุกที่ในด้านข้อมูลทดสอบ

$$\Delta_{min} = \min_{k=1, j=1}^{k=n, j=m} \sum_{k=1, j=1}^k (w_{kj} - t_{ij})^2 \quad (1)$$

w_k = จำนวนสมาชิกของอินพุท
 w = สมาชิกของข้อมูลฝึกสอน
 t = สมาชิกของข้อมูลทดสอบ

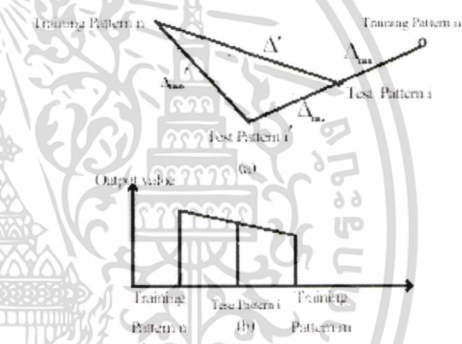
2.2 Nonlinear Interpolation

อีกกระบวนการ Nonlinear Interpolation คือรูปที่ 1 นี้ Nearest Neighbor ของชุดข้อมูลทดสอบ (เอาที่หนึ่ง) * คือการฝึกสอนชุดข้อมูล m ลำดับ (O) ดังรูปที่ 1 (a) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ Δ_{min} ดังนั้น อินพุทของชุดข้อมูลทดสอบ i (เอาที่หนึ่ง *) ก็คือ การคำนวณโดยใช้ (2) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ Δ_{min} ดังนั้นค่าของเอาที่หนึ่งชุดข้อมูลทดสอบ i * ก็คือ การคิดแปลงค่าของเอาที่หนึ่งชุดข้อมูลทดสอบ i * Nearest Neighbor ของชุดข้อมูลทดสอบ i * คือการฝึกสอนชุดข้อมูล n (เอาที่หนึ่ง x) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

Δ_{min}^* ดังนั้นเอาที่หนึ่งชุดข้อมูลทดสอบ i Nonlinear Interpolation มาจาก (3) ซึ่งเอาที่หนึ่งชุดข้อมูลทดสอบ i * คือการคำนวณโดยใช้เอาที่หนึ่งชุดข้อมูลฝึกสอน m * ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ Δ_{min} และเอาที่หนึ่งชุดข้อมูลทดสอบ n * จะมีค่าเท่ากับ Δ' ดังใน (3) เพราะฉะนั้นเอาที่หนึ่งชุดข้อมูลทดสอบ i * คือค่าของเอาที่หนึ่งชุดข้อมูลฝึกสอน m และ n ดังแสดงในรูปที่ 1 (b) ซึ่งชุดข้อมูลฝึกสอนชุดข้อมูล n และ ชุดข้อมูลฝึกสอนชุดข้อมูล m * ก็คือค่าของเอาที่หนึ่งชุดข้อมูลทดสอบ i * และ ลำดับของอินพุท และ โครงสร้างของระบบให้ที่

เอาที่หนึ่งชุดข้อมูล (เอาที่หนึ่ง *) = $2 \times$ (เอาที่หนึ่งชุดข้อมูล *) - (เอาที่หนึ่งชุดข้อมูล O) (2)

(เอาที่หนึ่งชุดข้อมูล *) = $\frac{e^{-\Delta_{min}} \cdot \text{o/p of point o} + e^{-\Delta'} \cdot \text{o/p of point x}}{e^{-\Delta_{min}} + e^{-\Delta'}} \quad (3)$

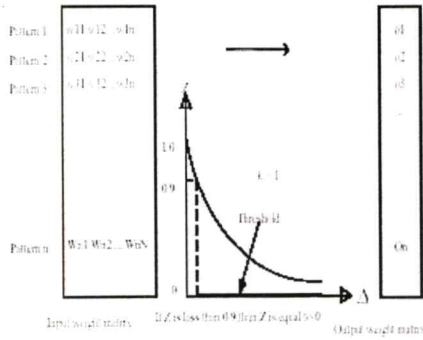


รูปที่ 1 Nonlinear Interpolation [2]

2.3 Weight Average

หนึ่งชุดข้อมูลฝึกสอนอินพุท (โครงสร้างของระบบ, ลำดับของพอลิ, ระดับกำลังสถิติ) และเอาที่ทุก (CCT) ละ อยู่ในรูปของ Input Weight Matrix O หรือ Output Weight Matrix n m ลำดับ โดยที่มี Transfer Function ระหว่าง Input Weight O หรือ Output Weight Matrix ดังในรูปที่ 2 ซึ่งวิธีของ Weight Average จะให้เอาที่หนึ่งชุดข้อมูลของแต่ละเอาที่หนึ่งที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ (4) จนถึงเอาที่หนึ่งชุดข้อมูล k และ α โดยมี α เป็นตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 Weight Averaged 2

$$\Delta_{c,i} = \sum_{j=1}^N (w_{c,j} - w_{ij})^2 \quad ; i = 1, 2, \dots, c, \dots, n$$

$$; j = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

$$z_{c,i} = e^{-k\Delta_{c,i}} \quad ; k = \text{constant} \quad (5)$$

$$\text{output } o_c = \frac{\sum_{i=1}^n z_{c,i} \phi_i}{\sum_{i=1}^n z_{c,i}} \quad (6)$$

กำหนดค่า $z_{c,i}$ ถ้า $z_{c,i} = 0$ และ $z_{c,i} = 1$ สำหรับ (6) เมื่อชุดข้อมูลการฝึกสอนแต่ละอินพุต คืออินพุต ϕ_c เมื่อใช้ชุดข้อมูลการฝึกสอนใหม่ (ชุดข้อมูลทดสอบ) รวมทั้งอินพุตทุกอินพุตก็ใช้ Nearest Neighbor กับชุดข้อมูลฝึกสอนใหม่ (ชุดข้อมูลทดสอบ) โดยใช้ (4), (5) และ (6) จะได้เอาท์พุตใหม่ โดยเลือกจากค่าที่ของ k และ α ซึ่งจะเป็นการประมาณค่าโดยการปรับค่าที่มี k และ α จากข้อมูลฝึกสอนทั้งหมด ซึ่งค่าของ k และ α จะเวียนวนกันค่า 37% ของชุดข้อมูลฝึกสอนทั้งหมดโดยมีอัตราส่วน $\alpha = 1$ โดยการใช้ค่าเริ่มต้นของ k และ α ที่เหมาะสมที่สุดจะพิจารณาจากค่า Mean Absolute Error ที่มีค่าที่สุด ซึ่งจะส่งค่าออกมาให้ได้น้อยที่สุด (Maximum, Mean, And Minimum) โดยปรับค่าเริ่มต้นให้ดูตามที่กล่าวไว้

2.4.1. Least Square

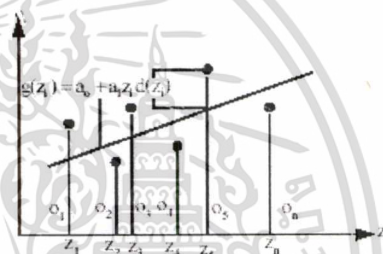
การประมาณค่าการเบี่ยงเบนค่าตั้งของน้อยที่สุด (Least Square) ของความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลฝึกสอนอินพุต และเอาท์พุต ซึ่งเป็นเซตของข้อมูลคู่ค่าอินพุต และอินพุตในรูปแบบที่ 3 ประกอบด้วยชุดข้อมูลฝึก

สอนอินพุต n ข้อมูล และจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอนเอาท์พุต โดยการใช้ Nearest Neighbor กับชุดข้อมูลฝึกสอนใหม่ (ชุดข้อมูลทดสอบ) โดยใช้การ Transfer Function ระหว่างชุดข้อมูลฝึกสอนกับอินพุต และเอาท์พุตค่าใน (4) และ (5) และจัดระเบียบข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบเวกเตอร์เส้นตรงคือ

$$g(z_i) = a_0 + a_1 z_i \quad ; i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ชัด เส้นตรง z_i ของข้อมูล i ค่าค่าของฟังก์ชัน $g(z_i)$ จะมีค่าใกล้เคียงไปจากค่าของข้อมูลเอาท์พุต (ϕ_i) เท่ากับ z_i ที่สัมพันธ์กันนั้น นั่นหมายความว่าค่าความผิดพลาด E ที่หมดที่เกิดขึ้นจากข้อมูลทั้งหมด n ข้อมูลคือ

$$E = \sum_{i=1}^n [d(z_i)]^2 \quad ; i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$



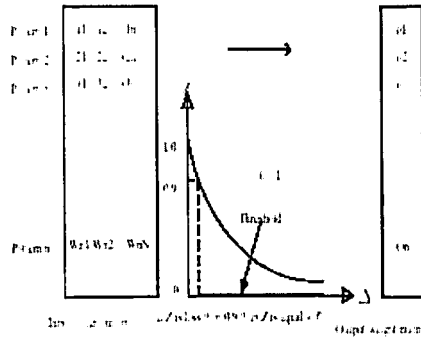
รูปที่ 3 Least Square

จาก (8) จะให้รวมกันมาของค่าความผิดพลาดทั้งหมดเป็นดังใน (9) นั่นคือ a_0 และ a_1 ที่น้อยที่สุด (Least Square) ซึ่งถ้าหาวิธีที่ดีที่สุด (Minimization) ของค่าความผิดพลาดนั่นคือ (10) (11)

$$E = \sum_{i=1}^n [\phi_i - (a_0 + a_1 z_i)]^2 \quad (9)$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_0} = 2 \sum_{i=1}^n [\phi_i - (a_0 + a_1 z_i)](-1) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_1} = 2 \sum_{i=1}^n [\phi_i - (a_0 + a_1 z_i)](-z_i) = 0 \quad (11)$$



รูปที่ 2 Weight Averaged

$$\Delta c_{c,j} = \sum_{j=1}^N (w_{c,j} - w_{y_j})^2 \quad ; j = 1, 2, \dots, N$$

$$z_{c,i} = e^{-k\Delta c_{c,i}} \quad ; k = \text{constant}$$

$$\text{output } o_c = \frac{\sum_{i=1}^n z_{c,i} \cdot o_i}{\sum_{i=1}^n z_{c,i}}$$

กำหนดค่า $\Delta c_{c,j}$ เป็น $\Delta c_{c,i} - 0$ สำหรับ (6) เมื่อจุดข้อมูลการฝึกสอนแต่ละดินทุก คือเวกเตอร์ C_c เมื่อใช้จุดข้อมูลการฝึกสอนใหม่ (จุดข้อมูลทดสอบ) รวมทั้งองค์ทุกใหม่ก็ใช้ใช้ Nearest Neighbor กับจุดข้อมูลฝึกสอนใหม่ (จุดข้อมูลทดสอบ) โดยใช้ (4), (5) และ (6) จะได้เอาท์พุทใหม่ โดยเลือกจากค่าที่ค่าของ k และ α ซึ่งจะเป็นการประมาณค่า α , การปรับค่าความ k และ α จากข้อมูลฝึกสอนทั้งหมด ซึ่งค่าของ k และ α จะเริ่มต้นที่ขนาด 37% ของจุดข้อมูลฝึกสอนทั้งหมดโดยไม่มีอัตราส่วน α โดยการใช้ค่าความ k และ α ที่เหมาะสมที่สุดจะพิจารณาจากค่า Mean Absolute Error ค่าที่ต่ำที่สุด ซึ่งจะได้ผลค่า O_c ที่ดี หรือค่าที่มากกว่า Maximum, Mean, และ Minimum จะปรับค่าเริ่มต้นค่า k จากที่ทุกวิธี

2.4.1 Least Square

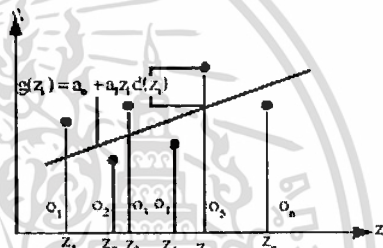
การปรับค่าความ k การปรับค่า α หรือหาค่าที่ดีที่สุด (Least Square) ของความสัมพันธ์ระหว่างจุดข้อมูลฝึกสอนทั้งหมด และเอาท์พุท ขึ้นกับเซตของข้อมูลสุ่มที่เลือกเอาท์พุท และอินพุทที่รูปที่ 3 กระบวนการของจุดข้อมูล

ก่อนอินพุท n ข้อมูล และจำนวนจุดข้อมูลของเอาท์พุทใช้จุดข้อมูลโดยใช้ Nearest Neighbor กับจุดข้อมูลฝึกสอนใหม่ เซตของข้อมูลทดสอบ โดยใช้ (4) Transfer Function ระหว่างจุดข้อมูลฝึกสอนกับเอาท์พุท และเอาท์พุทใหม่ (4) และ (5) และจะหาค่าของจุดข้อมูลใหม่ในรูปของอินพุทชั้นเส้นตรงคือ

$$g(z_j) = a_0 + a_1 z_j \quad ; j = 1, 2, \dots, n$$

การปรับค่า α จะหาค่า α จากเอาท์พุท z_j ของจุดข้อมูล n ค่าของอินพุท z_j จะคล้ายคลึงกันไปจากค่าของเอาท์พุท o_j แต่ถ้าใช้ z_j ที่คล้ายกันนั้น จะหมายถึงว่าค่าความผิดพลาด E ทั้งหมดจะเกิดขึ้นจากข้อมูลทั้งหมด ข้อมูลคือ

$$E = \sum_{i=1}^n [d(z_i)]^2 \quad ; i = 1, 2, \dots, n$$



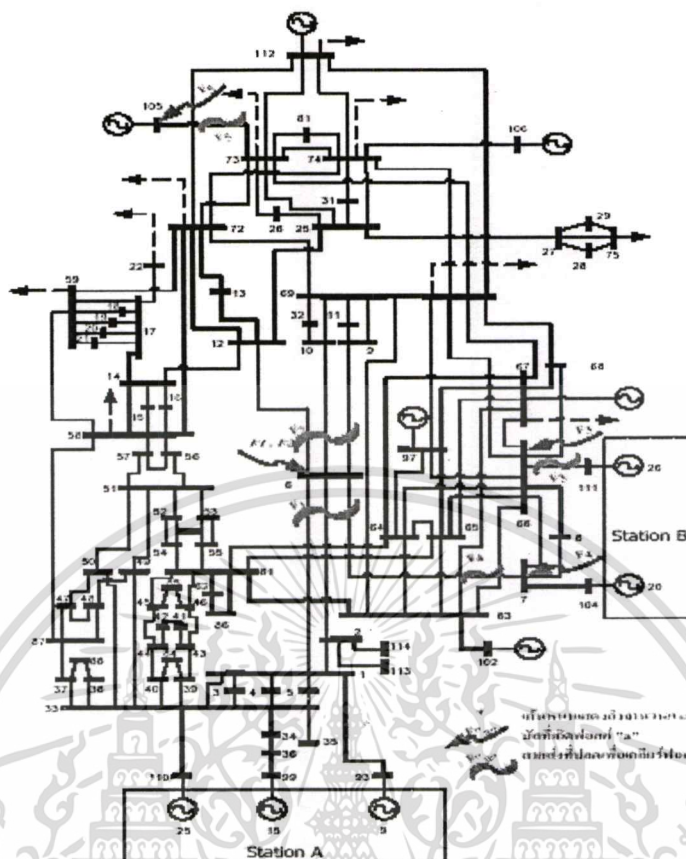
รูปที่ 3 Least Square

จาก (8) จะให้สามนัยของค่าความผิดพลาดทั้งหมดเป็นดังใน (9) หาก a_0 และ a_1 ที่ต้องการได้โดยวิธีหาค่าที่ดีที่สุด (Least Square) ซึ่งเป็นการหาค่าที่ดีที่สุด (Minimization) ของค่า E จะเห็นค่า E เป็นดังนี้

$$E = \sum_{i=1}^n [o_i - (a_0 + a_1 z_i)]^2$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_0} = 2 \sum_{i=1}^n [o_i - (a_0 + a_1 z_i)] \cdot (-1) = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_1} = 2 \sum_{i=1}^n [o_i - (a_0 + a_1 z_i)] \cdot (-z_i) = 0$$



รูปที่ 4 ระบบไฟฟ้าของ IEEE 50-Generator Test System ที่ใช้ในการศึกษา [3]

3. การประมวลผลค่า CCT โดยใช้ระเบียบวิธีการตาม

3.1 โครงสร้างของระบบที่ใช้การศึกษา

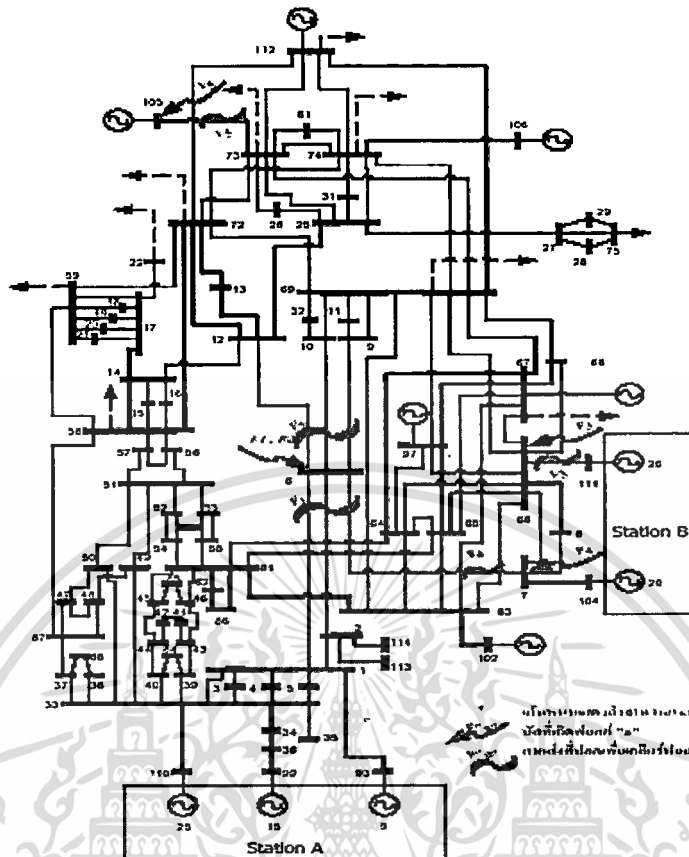
ช่วงเวลาวิกฤตวิกฤต (CCT) คือระยะเวลาที่ยาวนานที่สุดที่ระบบไฟฟ้ากำลังยอมให้เกิดฟลอสต์ขึ้นได้ก่อนที่ระบบจะไม่สามารถยกเลิกเหตุการณ์เสียดังกล่าวได้ สำหรับระบบกำลังจะได้นับค่าของเชิงครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบธรรมดา (Classical model) ซึ่งกำหนดให้แรงดันภายใน (Internal voltage, E') ที่กำลังรวมเข้มนับรวมกับค่าความต้านทานชั่วคราว (transient Reactance, X_d') มีค่าคงที่ โดยใช้ Load flow and step-by-step timesimulate program [4] ในการหาค่า CCT ของ IEEE 50 - Generator Test System จะทำการศึกษารวมเฉพาะค่าของแรงดันและค่าได้ Test System ดังในรูปที่ 4

การศึกษานี้ทำเป็นสถานะของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส

93, 99, 110 (Station A) และ 104, 111 (Station B) ด้วยค่า 1.0-1.5 เท่าของปกติ ซึ่งเป็นเงื่อนไขเดียวกันกับการศึกษาใน [5] โดยที่คำนวณหาค่าฟลอสต์และการเคลื่อนที่ของ 5 ตัวแปร (P1-P5) ดังในตารางที่ 1 ซึ่งแตกต่างจากกรณีที่มีค่า CCT ค่าที่ชุด 5 กรณี ซึ่งสอดคล้องกับ [4] สำหรับโครงสร้างของระบบจะพิจารณาโครงสร้างที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบ (S1-S4) โดยมีรูปแบบที่มีการปลดสายส่งเริ่มต้นที่มีผลกระทบต่อกำ CCT ในบุคลากรของ P1-P5 และค่ารูปแบบที่ไม่มีการปลดสายส่งใดๆ

3.2 การเลือกตัวแปร, ข้อมูลวิกฤต และข้อมูลทดสอบ

ตามที่ได้อธิบายไว้ที่ 3.1 ตัวแปรที่มีผลต่อค่า CCT ที่นำมาพิจารณาคือ ประกอบไปด้วยค่าเชิงผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 93, 99, 104, 110 และ 111 นอกด้วยตัวแปร x1 ถึง x5 คนลำดับ, ตำแหน่งฟอสต์ และการ



รูปที่ 4 ระบบไฟฟ้าของ IEEE 50-Generator Test System หน่วยงานการศึกษา [3]

3. การประมาณค่า CCT โดยใช้ระเบียบวิธีการคำนวณ

3.1 โครงสร้างของระบบที่ทำการศึกษา

ช่วงเวลาหลังการสวิตกัต (CCT) คือระยะเวลาที่ยาวนานที่สุดที่ระบบไฟฟ้ากำลังจะก่อให้เกิดฟลอคัสขึ้นได้ ก่อนที่ระบบจะไม่น่าจะรับมือต่อการสูญเสียเสถียรภาพได้ โดยทั่วไปแล้ว จะนิยมใช้แบบจำลองแบบคลาสสิก (Classical model) ซึ่งกำหนดให้แรงดันตกเป็น terminal voltage และถึงอัตราความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าชั่วคราว (transient Reactance, X_d') มีค่าคงที่ โดยใช้ Load flow and step-by-step time simulation program [4] ในการจำลอง CCT ของ IEEE 50-Generator Test System จะสามารถจำลองเหตุการณ์การล้มลงและขาดได้ Test System ดังรูปที่ 4

การศึกษานี้ทำในสภาวะของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส

93, 99, 104, Station A และ 104, 111, Station B) ซึ่งมี 1.0-1.5 เท่าของวิกฤต ซึ่งเป็นเงื่อนไขเดียวกันกับการศึกษาใน [5] โดยมีตำแหน่งบัสฟลอคัสและจากรายชื่อรหัส 5 ตำแหน่ง (91-95) ดังในตารางที่ 1 ซึ่งเชิงของกรณีที่มีค่า CCT ต่ำที่สุด 5 กรณี ซึ่งผลจะสอดคล้องกับ 4 ส่วนรับโครงสร้างของระบบจะพิจารณาโครงสร้างที่กล่าวถึง 4 รูปแบบ (S1-S4) โดยมีรูปแบบที่การกระจายกำลังมีผลกระทบบ่อค่า CCT ในเหตุการณ์ของ 91-95 และ 96 รูปแบบที่ไม่มีการปลดจ่ายใดๆ

3.2 การเลือกตัวแปร ข้อมูลที่ประกอบและข้อมูลทดสอบ

เกณฑ์ที่ได้กล่าวไว้ที่ 3.1 คือแปรที่มีผลต่อค่า CCT ทั้งหมดที่พิจารณาจะแปรกลับไปสู่ค่าเดิมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 93, 99, 104, 110 และ 111 ยกเว้นตัวแปร x1 ถึง x5 ตามลำดับ, สถานะของฟลอคัส และการ

เฉลี่ยที่สอดคล้องกันคือ x_6 และ โครงสร้างของระบบ (Network Structure or Topology) บนคือ x_7 ซึ่งได้มาปรัลิมค่ามีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 CCT โดยตรง ค่าของ x_1 ถึง x_7 จะได้จาก Pseudo Random Sequence โดยใช้วิธี rand (6) (แต่ขนาดที่ได้ $n=67$) แทนค่าให้สอดคล้องกับสภาวะของระบบที่เลือก (z) (โดยที่ x_1 ถึง x_7 คือลักษณะของ input)

ตารางที่ 1 ลักษณะของกลไกของรหัสที่พิจารณา

ลักษณะที่ ทดสอบ	รหัสที่ ใช้ทดสอบ	โหนดสายส่งระหว่างรหัส
E1	6	6-1,2,7
E2	6	6-9,10,12+1,2
E3	66	66-111+1,2,3
E4	7	7-6
E5	105	105-73+1,2

3.3 ประสิทธิภาพของระเบียบวิธีการคำนวณ

การวัดผลประสิทธิภาพของระเบียบวิธีการคำนวณนั้นจะใช้ประสิทธิภาพโดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error) หรือ MApe ของข้อมูลทดสอบเป็นเกณฑ์ซึ่งหาได้จาก

$$mape = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \times \left| \frac{cct_{cm} - cct_{ms}}{cct_{ms}} \right| \times 100 \quad (12)$$

โดยที่ cct_{cm} คือ CCT ที่นำค่าของระเบียบวิธีมาคำนวณ cct_{ms} คือ CCT ที่เป็นค่าต้นของวิธีการคำนวณ n คือ จำนวนข้อมูลทดสอบ

ในการศึกษานี้จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระเบียบวิธี การคำนวณ คือ (1) Nearest Neighbor, Nonlinear, Weight Average (2) Least Square (3) (4) (5) (6) และ (7) การทดสอบด้วยข้อมูลทดสอบที่จำนวน 50, 100, 150 และ 180 ชุด ซึ่งนับเป็นค่า Δ_{ms} ที่ต้องนำมาคำนวณ โดยใส่ค่าของข้อมูลทดสอบ 30 ชุดข้อมูลทดสอบ (30 ชุดข้อมูลทดสอบ) ถึงชุดข้อมูลทดสอบที่ (60, 90) และ (120) ลำดับรูปที่ 16 และ วิธีการของ Weight Average จะมีค่า Z_i ด้วย (4), (5), และ (6) โดยจะตั้งมีการปรับค่าครั้งที่ 1 ถึง 4 คือ 0.8, 1.8 และ 0.2 ดังมีค่า 0.1-0.9 ซึ่งค่าของ k และ α จะ

ปรับขึ้นครึ่งละ 0.5 และ 0.1 ตามลำดับเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของ k และ α ที่เหมาะสมกับข้อมูลทดสอบที่ค่า k นี้จะส่งต่อค่าของ α ในส่วนวิธีการของ Least Square คือค่าเชิงลบน้อยที่สุดของความชันกับระบบข้อมูลข้อมูลทดสอบคืนทุก และเวลาทุก ซึ่งเป็นผลของข้อมูลคู่ลำดับ (O_i, Z_i) การหาค่า Z_i ด้วย (4), (5) เพื่อจัดระเบียบข้อมูลให้ใกล้เคียงกับชุดข้อมูลทดสอบ (30 ชุดข้อมูลทดสอบ) และจัดให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันเส้นตรงด้วย (7) แล้วหาค่า α และ k ด้วย (8), (9), (10) และ (11) แล้วใช้ระเบียบวิธีการของ α เดิม - ราชัน ที่ชื่อ O_i ใกล้จะตรงกับค่าทุกของข้อมูลที่ใช้ทดสอบ

4. ผลการศึกษ

เมื่อทำการฝึกสอนระเบียบวิธีการคำนวณตามเงื่อนไขที่กล่าวถึงใน 2.1, 2.2, 2.3 และ 2.4 โดยใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหน่วยประมวลผลแทนที่ด้วย 1.7 GHz หน่วยความจำ 256 MB จากนั้นจึงนำระเบียบวิธีการคำนวณแต่ละวิธีที่นำมาฝึกสอนมาทดสอบกับชุดข้อมูลทดสอบเดียวกันจะได้ผลการทดสอบดังในตารางที่ 2 ถึง ตารางที่ 5 จะเห็นว่าค่า Max Errors ทั้ง 5 วิธีคือ Nearest, Nonlinear และ Weight มีค่าสูงเนื่องมาจากการกระจายตัวของชุดข้อมูลที่ไม่สม่ำเสมอครบถ้วนจากทดสอบจึงส่งผลไปขอพบค่าที่เกินค่า ทำให้มีจำนวนค่าของชุดทดสอบที่มีค่า Max Errors สูง 6 วิธีคือ Least Square คือการหาค่าต่ำสุด (Minimization) ของค่าความผิดพลาดของชุดข้อมูลฝึกสอนที่ผ่านการฝึกสอนมาจัดรูปของสมการเส้นตรงที่ค่า Max Errors มีค่าต่ำ และด้วยข้อมูลเปรียบเทียบค่า CCT ที่เป็นค่าของระเบียบวิธีการคำนวณของวิธี Least Square กับค่า CCT ที่เป็นค่าของระเบียบวิธีการคำนวณ ดังในตารางที่ 6 (จำนวนข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด โดยที่ $k=1$ $\alpha=0.4$)

สรุปผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อจำนวนชุดข้อมูลทดสอบมากขึ้นทำให้ระเบียบวิธีการคำนวณที่ 4 วิจัยการเปรียบเทียบของระบบไปให้รู้ได้มากขึ้นเห็นผลให้ค่าของที่ได้มีค่ารวมถูกต้องแม่นยำมากขึ้นทำให้ค่า Mean Absolute Percentage Error หรือ mape มีค่าลดลงผลการศึกษวิธีการของ Weight Average และ Least Square ที่ใช้ k และ α มีค่าคือค่า Mean Absolute Percentage Error (Mape) ดังมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การฝึกสอนระบบเบย์วิธีเบย์จำนวนที่น้อยไปใช้งาน จึงควรพิจารณาปรับค่า α ของผู้ไปกับการปรับจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน เพื่อให้ระบบนี้ใช้การคำนวณได้มีประสิทธิภาพสูงสุด

ตารางที่ 2 ผลการวัดผลของ Nearest Neighbor

จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน	เวลาที่ใช้ฝึกสอน (Min)	ผลของข้อมูลทดสอบ (30 ชุด)		
		Min Errors (%)	Maps (%)	Max Errors (%)
50	0.12	0	10.1873	138.2979
100	0.12	0	3.1744	97.8723
150	0.33	0	2.1520	97.8723

ตารางที่ 3 ผลการวัดผลของ Nonlinear Interpolation

จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน	เวลาที่ใช้ฝึกสอน (Min)	ผลของข้อมูลทดสอบ (30 ชุด)		
		Min Errors (%)	Maps (%)	Max Errors (%)
50	0.31	0	8.6544	138.2979
100	1.06	0	4.6970	97.8723
150	1.15	0	4.3274	97.8723

ตารางที่ 4 ผลการวัดผลของ Weight Average

จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน	k	α	เวลาที่ใช้ฝึกสอน (Min)	ผลของข้อมูลทดสอบ (30 ชุด)		
				Min Errors (%)	Maps (%)	Max Errors (%)
50	0.5	0.3	4.43	0	815.6750	2340
100	1	0.3	0.51	0	6.9149	75.8462
150	1	0.4	1.915	0	3.9385	47.6923

ตารางที่ 5 ผลการวัดผลของ Least Square

จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน	k	α	เวลาที่ใช้ฝึกสอน (Min)	ผลของข้อมูลทดสอบ (30 ชุด)		
				Min Errors (%)	Maps (%)	Max Errors (%)
50	0.5	0.6	1.40	0	1.7761	7
100	1	0.3	2.57	0	1.7422	7
150	1	0.4	0.106	0	1.3088	7

5. บทสรุป

บทความนี้ได้เสนอวิธีการหาค่า CCT ของระบบไฟฟ้าที่คำนวณหาโดยผู้มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของระบบไฟฟ้าโดยใช้ระบบผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งผลการศึกษานี้ได้แสดงให้เห็นว่าระบบผู้เชี่ยวชาญที่นำมา

การฝึกสอนนี้ สามารถคำนวณค่า CCT ของ IEEE 50-Generator Test System ในสถานะการพาดานที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับกำลัง, ลักษณะที่เปลี่ยนแปลงของระบบไฟฟ้าที่คำนวณได้ซึ่งคำนวณไว้ล่วงหน้ามีระบบถูกต้อง ซึ่งเป็นผลสำเร็จของการศึกษานี้

ตารางที่ 6 ตัวอย่างผลเปรียบเทียบค่า CCT_{CM} กับค่า CCT_{IMM} ที่จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด

ข้อ	CCT _{IMM} (sec)	CCT _{CM} (sec)	Error (%)	ข้อ	CCT _{IMM} (sec)	CCT _{CM} (sec)	Error (%)
1	0.001	0.00099	1	16	0.001	0.00097	3
2	0.112	0.112	0	17	0.001	0.001	0
3	0.001	0.00101	1	18	0.001	0.00105	5
4	0.09	0.09	0	19	0.001	0.001	0
5	0.013	0.013	0	20	0.001	0.001	0
6	0.001	0.00104	3	21	0.098	0.098	0
7	0.001	0.00099	1	22	0.088	0.088	0
8	0.106	0.106	0	23	0.001	0.00102	2
9	0.001	0.00103	3	24	0.094	0.094	0
10	0.001	0.00103	3	25	0.001	0.00097	3
11	0.001	0.00096	4	26	0.001	0.00093	7
12	0.001	0.00098	2	27	0.001	0.00098	2
13	0.11	0.11	0	28	0.001	0.00101	1
14	0.047	0.04692	0.264	29	0.001	0.00102	2
15	0.071	0.06997	1.5	30	0.001	0.001	0

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. A. Pai, Energy Function Analysis for Power System Stability, Kluwer Academic Publishers, 1989.
- [2] S. Jirawibhakorn, A. H. Counick, "Fast Critical Clearing Time Estimation of a Large Power System Using Neural Networks and Subol Sequences," IEEE Proceeding Summer Meeting, Vol.1, pp.522-527, 2000.
- [3] C. Potbisan, S. Jirawibhakorn, "Critical Clearing Time Estimation of Electrical Power Systems Using Neural Networks," Lankrabang Engineering Journal, Vol.19, No.1, March 2002
- [4] J. Cadini, "Advances in Power System Transient Stability Assessment Using Transient Energy Function Methods," Ph.D. Thesis 1994, Imperial College University of London
- [5] Electric Power Research Institute, "Analysis of Stressed Interconnected Power Networks," Research Project 8010-28, March 1994
- [6] The Math Works, Using MATLAB, The Math Works, Inc., June 2001.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การฝึกสอนจะเปลี่ยนวิธี เร่งรัดการฝึกต่อไปใช้ระบบ วิธีการ
การลดเป็นค่า $\alpha = 0.5$ สามารถใช้กับค่าเริ่มต้นของระบบ
ซึ่งใกล้เคียงกันหรือไม่ อย่างไร นำมาใช้ การลดค่า α จะทำให้
ความถูกต้อง

ตารางที่ 2 ผลการฝึกสอนของ NN Nearest Neighbor

จำนวนชุด ข้อมูลฝึก สอน	เวลาที่ใช้ ฝึกสอน (Min)	ผลของข้อมูลทดสอบ (30 ชุด)		
		Min Errors (%)	Mape (%)	Max Errors (%)
5%	0.12	0	10.6873	136.2079
10%	0.12	0	3.1711	97.8723
15%	0.31	0	3.1520	97.8723

ตารางที่ 3 ผลการฝึกสอนของ NN Nonlinear Interpolation

จำนวนชุด ข้อมูลฝึก สอน	เวลาที่ใช้ ฝึกสอน (Min)	ผลของข้อมูลทดสอบ (30 ชุด)		
		Min Errors (%)	Mape (%)	Max Errors (%)
5%	0.31	0	8.6544	136.2079
10%	1.00	0	4.6920	97.8723
15%	1.15	0	4.5574	97.8723

ตารางที่ 4 ผลการฝึกสอนของ NN Weight Average

จำนวน ชุดฝึก สอน	k	α	เวลาที่ ใช้ฝึก สอน (Min)	ผลของข้อมูลทดสอบ (30 ชุด)		
				Min Errors (%)	Mape (%)	Max Errors (%)
5%	0.5	0.3	4.43	0	815.6756	2140
10%	1	0.3	9.51	0	691.49	73.8462
15%	1	0.3	18.15	0	3.9385	87.6922

ตารางที่ 5 ผลการฝึกสอนของ NN Least Square

จำนวน ชุดฝึก สอน	k	α	เวลาที่ ใช้ฝึก สอน (Min)	ผลของข้อมูลทดสอบ (30 ชุด)		
				Min Errors (%)	Mape (%)	Max Errors (%)
5%	0.5	0.3	1.40	0	1.7761	9
10%	1	0.3	2.57	0	1.7422	9
15%	1	0.3	3.10	0	1.5988	9

5. บทสรุป

บทความนี้ได้ค้นพบวิธีการที่ CCT ของ
ระบบไฟฟ้าที่ลดความผิดพลาดในการประมาณ
ของระบบไฟฟ้าที่มีลักษณะการคำนวณ ซึ่งผล
การฝึกสอนได้แสดงให้เห็นว่าระบบวิธีการคำนวณที่ค้น

พบวิธีการสอนนี้สามารถลดเวลา CCT ของระบบ
Generator Test System ในหลายกรณีการคำนวณที่ลดความ
ผิดพลาดของค่าผลลัพธ์ สามารถใช้ได้กับค่าเริ่มต้นของระบบ
ของระบบไฟฟ้าที่ต่างกันทั้งนี้ยังพบว่าวิธีการที่ค้นพบ
นี้ยังใช้เป็นค่าเริ่มต้นของวิธีการอื่น

ตารางที่ 6 ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบค่า CCT กับค่า CCT_{min}
ที่ขึ้นอยู่กับขนาดข้อมูลทดสอบ 15% ชุด

ชุด ข้อมูล	CCT _{min} (Sec)	CCT _{min} (Sec)	Time (%)	ค่า ที่ ได้	CCT _{min} (Sec)	CCT _{min} (Sec)	Error (%)
1	0.011	0.019	1	16	0.011	0.0107	1
2	0.112	0.112	0	17	0.011	0.011	0
3	0.001	0.00101	1	18	0.011	0.0106	5
4	0.09	0.09	0	19	0.011	0.011	0
5	0.013	0.013	0	20	0.011	0.011	0
6	0.001	0.00101	1	21	0.011	0.0108	0
7	0.001	0.00099	1	22	0.011	0.0108	0
8	0.106	0.106	0	23	0.011	0.0102	2
9	0.001	0.00103	1	24	0.011	0.011	0
10	0.001	0.00103	1	25	0.011	0.0107	1
11	0.001	0.00098	1	26	0.011	0.0103	7
12	0.001	0.00098	2	27	0.011	0.0109	2
13	0.11	0.11	0	28	0.011	0.0101	1
14	0.047	0.04692	0.064	29	0.011	0.0102	2
15	0.011	0.01092	3	30	0.011	0.011	0

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. A. Pai, Energy Function Analysis for Power System Stability, Kluwer Academic Publishers, 1989.
- [2] S. Jirawibhakorn, A. H. Counick, "Fast Critical Clearing Time Estimation of a Large Power System Using Neural Networks and Sobol Sequences," IJLL Proceeding Summer Meeting, Vol.1, pp.522-527, 2000.
- [3] C. Pothisam, S. Jirawibhakorn, "Critical Clearing Time Estimation of Electrical Power Systems Using Neural Networks," Laikrabang Engineering Journal, Vol.19, No.1, March 2002
- [4] J. Cadini, "Advances in Power System Transient Stability Assessment Using Transient Energy Function Methods," Ph.D. Thesis, 1994, Imperial College University of London
- [5] Electric power Research Institute, "Analysis of Stressed Interconnected Power Networks," Research Project 8010-28, March 1994
- [6] The Math Works, Using MATLAB, The Math Works, Inc., June 2001.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

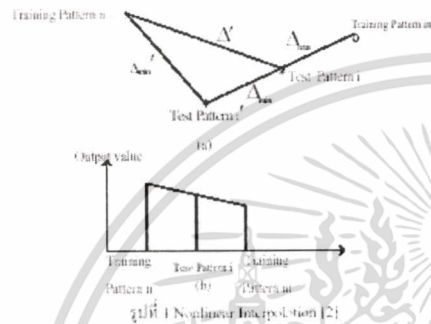
ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ย Δ_{max} ดังนั้นค่าที่ตรงจุดข้อมูลทดสอบ :
 Nonlinear Interpolation หน้าที่ (3) ซึ่งค่าที่ตรงจุดข้อมูลทดสอบ เป็น
 คณิตศาสตร์ใหม่โดยที่เมื่อมีค่าของจุดข้อมูลทดสอบ m ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ
 Δ_{max} หรือค่าที่ตรงจุดข้อมูลทดสอบ n จะถูกนำมาใช้ เพื่อคำนวณ
 N' ดังใน (3) เพราะฉะนั้นค่าที่ตรงจุดข้อมูลทดสอบ : ค่าที่คำนวณหา
 สูตรระหว่างจุดข้อมูลทดสอบ m และ n ดังแสดงในรูปที่ 1 (b) ซึ่งจะมีข้อดี

(Input of point i) =

$$2 \cdot (\text{Input of point } i) - (\text{Input of point } O) \quad (2)$$

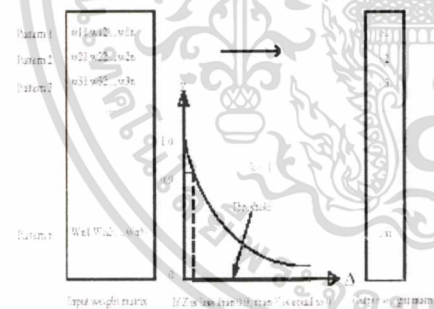
(Output of point i) =

$$\frac{e^{-\Delta_{\text{max}}} \cdot \text{o/p of point } O + e^{-N'} \cdot \text{o/p of point } x}{e^{-\Delta_{\text{max}}} + e^{-N'}} \quad (3)$$



2.3 Weight Average

ซึ่งจุดข้อมูลทดสอบมีค่าสูง และค่าที่หาจะอยู่ในรูปของ
 input weight matrix และ output weight matrix คำนวณโดยใช้ฟังก์ชัน
 transfer function ดังในรูปที่ 2 (a) Input weight matrix และ output weight matrix ดังใน
 รูปที่ 2 ซึ่งวิธีการของ Weight Average จะให้อัตราที่ทุกจุดข้อมูลที่จะ
 เอาเข้าฟังก์ชันการฝึกสอน โดยไม่จำเป็นต้องใช้ค่าการแปรปรวนค่าคงที่



$$A_{c,i} = \sum_{j=1}^N (w_{ij} - w_{ij}^0)^2 \quad ; i = 1, 2, \dots, n$$

$$; j = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

$$z_{c,i} = e^{-\lambda x_{c,i}} \quad ; k = \text{constant} \quad (5)$$

$$\text{output } o_c = \frac{\sum_{i=1}^n z_{c,i} \cdot o_i}{\sum_{i=1}^n z_{c,i}} \quad (6)$$

ของ k และ λ ที่ transfer function ใน (5) โดยมี λ เป็นตัวกำหนดค่า $z_{c,i}$
 ที่ $z_{c,i} = \lambda$ แล้ว $z_{c,i} = 0$ สำหรับ (6) เมื่อจุดข้อมูลการฝึกสอนแต่ละอัน
 มีค่าแตกต่างกัน λ เมื่อใช้จุดข้อมูลการฝึกสอนใหม่ จุดข้อมูลทดสอบ
 ร่วมกับค่าที่หามาใช้คือใช้ Nearest Neighbor กับจุดข้อมูลการฝึกสอน
 ใหม่จุดข้อมูลทดสอบ โดยใช้ (4) (5) และ (6) จะได้ค่าที่หามาใช้ โดย
 เลือกจากค่าที่ของ k และ λ ซึ่งเป็นค่าการประมาณค่าโดยการปรับค่า
 ของ k และ λ จากข้อมูลฝึกสอนทั้งหมด ซึ่งค่าที่ของ k และ λ จะ
 เรียนรู้มาจาก 37% ของจุดข้อมูลฝึกสอนทั้งหมดโดยอัตโนมัติ 1x1 ดัง
 นั้นการเลือกค่าที่ของ k และ λ ที่เหมาะสมที่สุดจะพิจารณาจากค่า
 Mean Absolute error ค่าที่ต่ำที่สุด ซึ่งจะสังเกตค่า λ ที่ได้นั้นนำมา
 ใช้ Maximum, Mean, และ Minimum โดยเปรียบเทียบกับค่าค่าที่หามาใช้จริง

3. การประมาณค่า CCT โดยใช้ระเบียบวิธีการคำนวณ

3.1 โครงสร้างของระบบที่ทำการศึกษา

ส่วนงานศึกษาจะทำการใช้ (CEM) ที่ระดับแรงดันที่งานนั้น
 สูงที่ระดับ 10 kV ซึ่งจะพบที่จุดต่อขึ้นได้ก่อนที่ระบบจะไม่มีการ
 ผลิตพลังงานสูงที่ระดับแรงดันได้ สำหรับการศึกษานี้จะใช้แบบจำลอง
 ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบธรรมดา (Classical model) ซึ่งกำหนดให้แรง
 ดันภายใน (Internal voltage, E') มาถึงจากปริมาณเชื้อเพลิงที่ผลิตออกมา
 (Transient Reactance, $X'd$) มีค่าคงที่ โดยใช้ Load flow and step-by-
 step time simulate program [4] ในรูปที่ 3 CCT ของ EGET ซึ่งจะอาศัย
 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมโหลดและมุมเฟส นำมาเขียนสูตรฟังก์ชัน (Swing
 curve) เพื่อใช้ในการประมาณค่าของระบบไฟฟ้าที่ทำการใช้ โดยการ
 เรียนรู้ก่อนมุมโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทุกกรณีกับมุมโหลด
 ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอ้างอิงมีความแตกต่างกันไม่เกิน 180 องศา แสดงว่า
 ระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพ จะมีการศึกษาระบบที่แตกต่างและระดับค
 และภาคใช้ Test System ดังในรูปที่ 3

การศึกษานี้ทำในลักษณะของระบบที่มีระดับที่เปลี่ยนแปลง
 ระดับกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ระดับ 3015, 3041, 3042 และ 3043
 ที่ระดับ 1.5 หรือที่ค่าซึ่งเป็นเงื่อนไขคือตัวคูณการศึกษานี้ (S)
 โดยมีลักษณะที่สอดคล้องกับระบบที่ค่า S ความแรงของระบบ S ดังใน
 ตารางที่ 1 ซึ่งสังเกตการณ์ที่ค่าของ S ค่าที่ค่า S ความถี่สอดคล้องกับ
 มุม ส่วนเริ่มโครงสร้างของระบบจะทำการสร้างที่โครงสร้างที่แตกต่างกัน 4 รูป
 แบบ (SI) S โดยที่รูปแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงส่วนที่หลักการของค่า
 CCT ในทุกกรณีของ 1-5 หรือที่รูปแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นาย พิเชฐ มานะบรรยง สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร เมื่อการศึกษา 2542 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทในปี 2545 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีผลงานวิชาการตีพิมพ์ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า ระหว่างศึกษาปริญญาโท 2 บทความคือ วิศวกรรมลาดกระบัง และการประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 28



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นาย พิเชฐ มานะบรรยง สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร เมื่อการศึกษา 2542 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทในปี 2545 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีผลงานวิชาการตีพิมพ์ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า ระหว่างศึกษาปริญญาโท 2 บทความคือ วิศวกรรมลาดกระบัง และการประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 28



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้