การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการหาคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม

APPLICATIONS OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN OPTIMAL POWER FLOW SOLUTIONS

ปรเมศ อิงสุวรรณ
PORRAMATE INGSUWAN

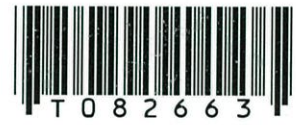
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-020-357

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการหาคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม

APPLCATIONS OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN OPTIMAL POWER FLOW SOLUTIONS



ปรเมศ อิงสุวรรณ

PORRAMATE INGSUWAN

วพ.
ว1169ก
2551
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....82663
วัน,เดือน,ปี.....21 ก.ค. 2551

.b.....11950213.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-020-357

การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการหาคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม

APPLCATIONS OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN OPTIMAL POWER FLOW SOLUTIONS

ปรเมศ อิงสุวรรณ

PORRAMATE INGSUWAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-020-357

APPLCATIONS OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN OPTIMAL POWER FLOW SOLUTIONS

PORRAMATE INGSUWAN

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

2008

KMITL-2008-EN-M-020-357

COPYRIGHT 2008

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการหาคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม
นักศึกษา	นายปรเมศ อิงสุวรรณ
รหัสประจำตัว	46060332
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. สมชาติ จิริวิภากร

บทคัดย่อ

ในการพิจารณาระบบไฟฟ้ากำลัง โรงจักรไฟฟ้าแต่ละโรงมีระยะทางจากโหลดต่างกัน อีกทั้งต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าของแต่ละโรงก็ต่างกัน เพื่อให้สามารถวางแผนการเดินเครื่องโรงจักรไฟฟ้าให้สอดคล้องกับความต้องการโหลดทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน โดยมีต้นทุนการผลิตและจ่ายกำลังไฟฟ้าทั้งหมดต่ำสุด การแก้ปัญหาดังกล่าวเรียกว่า ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม (Optimal power flow, OPF) วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม โดยระบบไฟฟ้าที่นำมาใช้ทดสอบเป็นระบบขนาด 2 บัส 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาด 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบทดสอบ IEEE 30 บัส ดัดแปลงให้มีต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าเสมือนโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละชุดมีต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าไม่เท่ากัน และใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการศึกษาซึ่งสามารถหาคำตอบที่ต้องการได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว

โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เปรียบเทียบผลการทดลองของโครงข่ายประสาทเทียม 2 รูปแบบคือแบบแพร่ค่าย้อนกลับ และแบบเอลแมน ซึ่งพบว่าโครงข่ายประสาทเทียบแบบแพร่ค่าย้อนกลับให้คำตอบที่ดีใกล้เคียงกับแบบเอลแมน แต่ใช้เวลาการฝึกสอนน้อยกว่ามาก

นอกจากนั้นสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ การแยกโครงข่ายเพื่อหาคำตอบเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริง และโครงข่ายสำหรับกำลังไฟฟ้าเสมือนเป็นวิธีที่สามารถเวลาการฝึกสอนลงได้มาก

Thesis Title	**Applications of Artificial Neural Networks in Optimal Power Flow Solutions**
Student	Mr. Porramate Ingsuwan
Student ID.	46060332
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2008
Thesis Advisor	Assos.Prof. Dr. Somchat Jiriwibhakorn

ABSTRACT

In a practical power system, the power plants are not located at the same distance from the center of loads and their fuel costs are different. The objective is to find the real and reactive power scheduling of each power plant to meet a particular load demand in such a way as to minimize the operating cost. This is called the optimal power flow problem (OPF)

This thesis presents a novel method of using an artificial neural network to solve the optimal power flow problem in 2 bus 2 generator test system, 9 bus 3 generator test system with difference of fuel cost and IEEE 30 bus test system (Modified reactive power cost). Using artificial neural networks in this study can solve the problem as other methods.

Back propagation Neural Network (BP-ANNs) and Elman Network (ELM-ANNs) are compared and studied in this thesis. The efficiency of BP-ANNs and ELM-ANNs are similar but BP-ANNs use less training time.

Otherwise, for BP-ANNs the separation of active power output and reactive power output ANNs is the good way to reduce training time.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมชาติ จิริวิภากร ที่ได้ให้ความรู้ , คำแนะนำ และคำปรึกษาต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ภรรยาของข้าพเจ้า คุณบงกช อิงสุวรรณ ที่ได้ช่วยเป็นกำลังใจให้กับข้าพเจ้าในการศึกษาตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้ บิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้และประสบการณ์ทั้งหลายแก่ข้าพเจ้า

ปรเมศ อิงสุวรรณ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... II

กิตติกรรมประกาศ..... III

สารบัญ..... IV

สารบัญรูป..... VIII

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา..... 2

1.3 สมมติฐานของการศึกษา..... 3

1.4 ขอบเขตการศึกษา..... 3

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา..... 4

บทที่ 2 ระบบไฟฟ้ากำลัง..... 5

2.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง..... 5

2.1.1 ระบบผลิตกำลังไฟฟ้า..... 7

2.1.2 ระบบส่งกำลังไฟฟ้า..... 8

2.1.3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า..... 9

2.2 หน่วยงานที่รับผิดชอบเกี่ยวกับระบบไฟฟ้ากำลังในประเทศไทย..... 10

2.2.1 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย..... 10

2.2.2 การไฟฟ้านครหลวง..... 10

2.2.3 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค..... 10

2.3 กิจการไฟฟ้าและตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า..... 11

2.4 การไหลของโหลด..... 12

2.4.1 Gauss-Seidel Method..... 13

2.4.2 Newton - Raphson Power – Flow Solution..... 14

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม..... 19

3.1 การวิเคราะห์และวางแผนระบบไฟฟ้ากำลัง..... 19

3.1.1 การคาดคะเนความต้องการไฟฟ้า..... 19

3.1.2 การวิเคราะห์โหลดโฟลว์..... 19

3.1.3 การวิเคราะห์การลัดวงจร..... 19

3.1.4 การศึกษาเสถียรภาพของระบบ..... 19

3.1.5 การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้..... 19

3.1.6 การจัดการการจ่ายไฟฟ้าอย่างเหมาะสมทางเศรษฐกิจ..... 19

3.1.7 การวิเคราะห์การสูญเสียในสายส่ง..... 21

3.1.8 การวิเคราะห์ด้านยูนิตคอมเมนต์..... 21

3.2 การไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม..... 21

3.2.1 การหารูปแบบเหมะสมที่สุด..... 22

3.2.2 ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม..... 23

3.3 การหาคำตอบของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม..... 25

3.3.1 วิธีทำซ้ำแลมป์ดา..... 25

3.3.2 วิธีโปรแกรมเชิงเส้น..... 27

3.4 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับศึกษาปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า
อย่างเหมาะสม..... 29

3.4.1 ไมโครซอล์ฟเอกเซล..... 29

3.4.2 เพาเวอร์เวิลด์..... 30

3.4.3 MATPOWER..... 31

บทที่ 4 โครงข่ายประสาทเทียม..... 32

4.1 ที่มาของโครงข่ายประสาทเทียม..... 32

4.1.1. การเลียนแบบการทำงานของเซลล์สมองของมนุษย์..... 32

4.1.2 การหาความสัมพันธ์ของเหตุและผลซึ่งยังหาฟังก์ชั่น
ออกมาโดยตรงไม่ได้..... 35

4.1.3 การทำให้คอมพิวเตอร์คิดและตัดสินใจได้ด้วยตัวเอง..... 37

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม..... 38

4.2.1 การจัดประเภทของโครงข่ายประสาทเทียมตามลักษณะการใช้งาน..... 38

4.2.1.1 โครงข่ายแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้นแพร่ค่าย้อนกลับ..... 39

4.2.1.2 โครงข่ายประสาทเทียมเอลแมน..... 43

4.2.2 การจัดประเภทของโครงข่ายประสาทเทียมตามลักษณะการเชื่อมต่อ..... 45

4.2.2.1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว..... 45

4.2.2.2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น..... 45

4.3 กระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม..... 47

4.3.1 การเรียนรู้แบบ Supervised..... 47

4.3.2 การเรียนรู้แบบ Unsupervised..... 48

4.4 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม..... 49

4.5 หัวข้อการวิจัยอื่นที่จะสามารถใช้ ANNs ได้..... 51

บทที่ 5 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม..... 53

5.1 เงื่อนไขในการฝึกสอนและทดสอบ..... 53

5.1.1 เงื่อนไขของการฝึกสอน..... 53

5.1.1.1 Performance gradient Factor..... 53

5.1.1.2 Mu Factor..... 53

5.1.1.3 ปริมาณข้อมูลฝึกสอน..... 54

5.1.1.4 คุณภาพของข้อมูลฝึกสอน..... 54

5.1.2 เงื่อนไขในการทดสอบ..... 54

5.2 ตัวแปรในการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม..... 55

5.2.1 ระบบ 2 บัส 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 55

5.2.2 ระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 56

5.2.3 IEEE 30 bus test system..... 59

5.3 โครงสร้างและเงื่อนไขของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทดสอบ..... 62

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.4 ขั้นตอนการฝึกสอนและการทดสอบ..... 63

5.4.1 เงื่อนไขต่าง ๆ ภายในโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ..... 63

5.4.2 ขั้นตอนการทดสอบด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ...64

5.4.3 ขั้นตอนการทดสอบด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบเอลแมน..... 67

บทที่ 6 ผลการทดลองและการวิเคราะห์..... 68

6.1 ระบบ 2 bus 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 68

6.2 ระบบ 9 bus 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 70

6.2.1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบโครงข่ายเดียว 70

6.2.2 โครงข่ายบ่ระสาทเทียมแบบแยกโครงข่าย..... 76

6.2.3 โครงข่ายประสาทเทียมแบบเอลแมน..... 88

6.3 ระบบดัดแปลง IEEE 30 บัส 6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 90

6.3.1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบโครงข่ายเดียว..... 91

6.3.2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบโครงแยกโครงข่ายทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส..... 96

6.3.3 โครงข่ายประสาทเทียมแบบเอลแมน..... 107

บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 109

7.1 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ..... 109

7.2 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบเอลแมน..... 110

7.3 ข้อดีและข้อเสียของการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในปัญหา OPF 110

เอกสารอ้างอิง..... 113

ภาคผนวก ก. ระบบไฟฟ้าที่ใช้ทำการศึกษา

ระบบไฟฟ้า 2 บัส 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 114

ระบบไฟฟ้า 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....116

ระบบดัดแปลง IEEE 30 บัส.....119

ประวัติผู้เขียน.....124

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในรูปแบบกล่องดำ..... 2
2.1 โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง..... 5
2.2 ตัวอย่างโครงสร้างกิจการไฟฟ้าแบบที่มีการแข่งขัน.....12
3.1 ตัวอย่างเส้นโค้งแสดงเชื้อเพลิงขาเข้าและกำลังไฟฟ้าขาออก..... 26
3.2 หน้าต่าง Solver Parameters ใน Microsoft Excel..... 29
3.3 แสดงการใช้เครื่องมือ Solver เพื่อหาต้นทุนการผลิตรวมต่ำสุด.....30
3.4 แสดงการหาคำตอบ OPF ด้วยโปรแกรม Powerworld..... 30
3.5 แสดงการใช้ MATPOWER เพื่อแก้ปัญหา Optimal power flow..... 31
4.1 โครงสร้างหลักของเซลล์สมอง 1 เซลล์.....33
4.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่เลียนแบบเซลล์สมอง 1 เซลล์.....33
4.3 การกำหนดน้ำหนักของข้อมูลแต่ละเรื่อง..... 34
4.4 ฟังก์ชั่นทำนบ..... 35
4.5 การเชื่อมโยงเหตุและผลผ่านกล่องดำ.....36
4.6 การทำงานของเซลล์สมองเป็นโครงข่าย.....39
4.7 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบ 1 ชั้นซ่อน..... 39
4.8 ฟังก์ชั่นการทำงานของ ANNs แบบโครงข่าย MLFF..... 40
4.9 น้ำหนักจากชั้นซ่อน สู่ชั้น เอาต์พุต.....41
4.10 ความรับผิดชอบของนิวรอล ตัวที่ j ในชั้นซ่อน ที่มีต่อ เอาต์พุต.....42
4.11 แผนภาพจำลองความแตกต่างระหว่าง ANNs แบบป้อนไปข้างหน้าและแบบรีเคอร์เรนต์...43
4.12 โครงข่ายเอลแมนแบบ 2 ชั้น 44
4.13 โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว.....45
4.14 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น..... 46
4.15 ตัวอย่างฟังก์ชั่นถ่ายโอน.....47
4.16 การเรียนรู้แบบ Supervised..... 48
4.17 การเรียนรู้แบบ Unsupervised..... 49
5.1 Performance ของการทดลองปรับค่าถ่วงน้ำหนักและไบแอส 700 รอบ..... 53
5.2 ข้อมูล OPF ในระบบ 2 bus 2 gen เตรียมโดย MS-Excel Solver..... 55
5.3 เรียงสับเปลี่ยนข้อมูลแบบแรนดอม.....55

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.4 การกระจายของข้อมูล P_D 56
5.5 แสดงโปรแกรมเตรียมข้อมูลฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมในระบบ 9 bus 3 gen..... 57
5.6 การกระจายของข้อมูล P_{D5} 58
5.7 การกระจายของข้อมูล P_{D7}..... 58
5.8 การกระจายของข้อมูล P_{D9}..... 58
5.9 การกระจายของข้อมูล P_{D2}, P_{D3}, P_{D4}..... 59
5.10 การกระจายของข้อมูล P_{D5}, P_{D7}, P_{D8}..... 59
5.11 การกระจายของข้อมูล P_{D10}, P_{D12}, P_{D14}..... 59
5.12 การกระจายของข้อมูล P_{D15}, P_{D16}, P_{D17} 60
5.13 การกระจายของข้อมูล P_{D18}, P_{D19}, P_{D20} 60
5.14 การกระจายของข้อมูล P_{D21}, P_{D23}, P_{D24} 60
5.15 การกระจายของข้อมูล P_{D26}, P_{D29}, P_{D30} 60
5.16 แสดงโปรแกรมเตรียมข้อมูลฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมในระบบ IEEE 30 bus..... 61
5.17 BP-ANNs แบบโครงข่ายเดียว..... 62
5.18 BP-ANNs แบบแยกโครงข่ายสำหรับกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน..... 62
5.19 ELM-ANNs แบบโครงข่ายเดียว..... 62
5.20 SLBP-ANNs 63
5.21 แผนภาพการทดสอบด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ..... 66
5.22 แผนภาพการทดสอบด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบเอลแมน..... 67
6.1 ตัวอย่างผลการทดลองและเตรียมข้อมูลโดยใช้ MS-Excel Solver..... 68
6.2 MAPE ของ Single ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig - logsig ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 73
6.3 MAPE ของ Single ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น tansig –tansig ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 73
6.4 MAPE ของ Single ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig-tansig ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 74

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.5 MAPE ของ Single ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น tansig-logsig ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 74
6.6 MAPE ของ P- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig-logsig ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 78
6.7 MAPE ของ P- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น tansig-tansig ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 78
6.8 MAPE ของ P- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig-tansig ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 79
6.9 MAPE ของ P- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig-tansig ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 79
6.10 MAPE ของ Q- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig-logsig ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 83
6.11 MAPE ของ Q- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น tansig-tansig ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 83
6. 12 MAPE ของ Q- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig-tansig ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 84
6.13 MAPE ของ Q- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น tansig-logsig ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 84
6.14 แผนภูมิเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ BP-ANNs และ Elman-ANNs ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 88
6.15 แผนภูมิเปรียบเทียบเวลาการฝึกสอนของ BP-ANNs และ Elman-ANNs ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 88
6.16 MAE ของ Single ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig - logsigทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส..... 93
6.17 MAE ของ Single ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น tansig –tansigทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส..... 93
6.18 MAE ของ Single ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig-tansig ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส..... 94

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.19 MPE ของ Single ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น tansig-logsig ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส..... 94

6.20 MAE ของ P- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig-logsig ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส..... 98

6.21 MAE ของ P- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น tansig-tansig ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส..... 98

6.22 MAE ของ P- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น Logsig-tansigทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส..... 99

6.23 MAE ของ P- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น Tansig-logsigทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส..... 99

6.24 MAE ของ Q- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig-logsig ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส..... 103

6.25 MAE ของ Q- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น tansig-tansig ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส..... 103

6.26 MAE ของ Q- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig-tansig ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส..... 104

6.27 MAE ของ Q- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น tansig-logsig ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส..... 104

6.28 แผนภูมิเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ BP-ANNs และ Elman-ANNs..... 107

6.29 แผนภูมิเปรียบเทียบเวลาการฝึกสอนของ BP-ANNs และ Elman-ANNs โดยสำหรับ Elman-ANNs ที่จำนวนนิวรอน17-20 ใช้คอมพิวเตอร์ Intel® Core™2 Duo 1.6 GHz ในการฝึกสอน..... 107

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม (Optimal power flow, OPF) เป็นปัญหาหลักปัญหาหนึ่งที่ได้รับการสนใจในส่วนของงานวางแผนระบบไฟฟ้ากำลัง โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปการผลิตและจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยต้นทุนการดำเนินงานต่ำสุดภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัด (Constraint) ต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังเช่นพิกัดกำลังการผลิตของโรงไฟฟ้า พิกัดแรงดัน ความต้องการกำลังไฟฟ้าเป็นต้น วิธีการคำนวณหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เป็นการแก้ปัญหาโปรแกรมแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non Linear Programming) ที่ให้คำตอบที่ดีพอสมควร แต่อาจแก้ปัญหาได้ยาก หรือไม่ได้คำตอบที่ดีที่สุดเมื่อมีอัตราการลู่เข้า (Convergence ratio) ต่ำ

เครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาจึงควรให้ผลลัพธ์อย่างรวดเร็วและได้คำตอบที่เป็นค่าต่ำสุดหรือสูงสุดจริง (Global maxima or Global minima) ไม่ใช่แบบเฉพาะส่วน (Local maxima or Local minima)

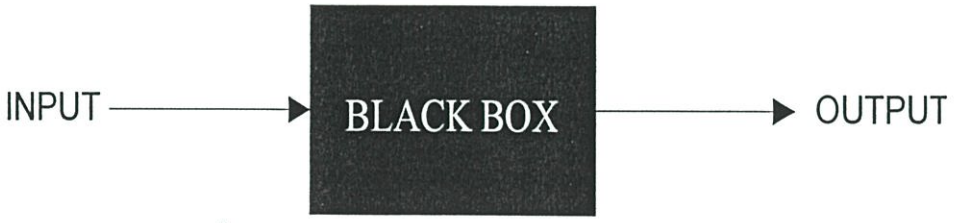
เนื่องจากความซับซ้อนในการแก้ปัญหาดังกล่าวทำให้มีผู้วิจัยเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพสูงหลายชนิดมาใช้แก้ปัญหา OPF เช่นการใช้วิธีการค้นหาแบบตาบู (Tabu search) [1], วิธีเบนเดอร์ดีคอมโพซิชั่น (Bender decomposition) [2]

นอกจากนั้นงานวิจัยในกลุ่มปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) ซึ่งเป็นการจำลองรูปแบบการคำนวณตามปรากฏการธรรมชาติ ก็ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในปัญหา OPF หลายวิธีเช่นวิธีการคำนวณเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) [3], วิธีจำลองอาณาจักรมด (Ant colony algorithm) [4] เป็นต้น

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks, ANNs) เป็น AI ชนิดหนึ่งที่มีความสามารถโปรแกรมแบบไม่เป็นเชิงเส้น ได้ดี และให้คำตอบที่รวดเร็วแต่มีข้อจำกัดคือต้องมีชุดข้อมูลที่มีความถูกต้องมากพอสมควรเพื่อใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม และใช้เวลาค่อนข้างมากในการฝึกสอน

ได้มีผู้วิจัยนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้หาคำตอบ OPF เช่น Nguyen [5] ซึ่งได้นำ ANNs หลายชุดมาเชื่อมต่อกันโดย ANNs แต่ละชุดแทนการคำนวณแบบนิวตัน-ราฟห์สันแต่ละขั้นตอน และ ภูริ สัณห์ [6] ซึ่งได้นำ ANNs มาหาคำตอบ OPF โดยไม่คำนึงถึงกำลังไฟฟ้าเสมือนและเปรียบเทียบกับเกณฑ์การเท่ากันของแลมป์ดา (Equal incremental cost criterion, EICC)

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำโครงข่ายประสาทเทียมแบบ แพร่ค่าย้อนกลับ (Back propagation neural network) และแบบเอลแมน (Elman neural network) มาใช้แก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมโดยไม่คำนึงถึงขั้นตอนการคำนวณทางคณิตศาสตร์เหมือน [5] แต่ใช้ ANNs ในลักษณะที่เป็นกล่องดำ (Black box) โดยคำนึงถึงข้อมูลป้อนเข้า (Input) และข้อมูลออก (Output) เท่านั้น ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในรูปแบบกล่องดำ

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอการเปรียบเทียบประสิทธิภาพและเวลาในการหาคำตอบ OPF ด้วย ANNs เปรียบเทียบกับการหาคำตอบด้วย MATPOWER [7] ซึ่งเป็นชุดโปรแกรมที่ใช้ศึกษาปัญหาทางไฟฟ้ากำลัง ทำงานบนโปรแกรม MATLAB™ ซึ่งในการหาคำตอบ OPF MATPOWER จะเรียกใช้ MATLAB™ Optimization toolbox ซึ่งมีการคำนวณแบบโปรแกรมเชิงเส้น (Linear programming) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมปัจจุบัน โดยคำนึงถึงการสูญเสียในสายส่ง และต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าเสมือนด้วย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ปัจจุบันปัญหาด้านพลังงาน เป็นสิ่งสำคัญที่ควรทำการศึกษาวิจัยเพื่อสามารถลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิง ซึ่งหมดลงไปทุกวัน และราคาค่าพลังงานที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม เป็นการคำนึงถึงการผลิตกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการ โดยต้นทุนการดำเนินการทั้งหมดต่ำที่สุด ซึ่งหมายถึงการใช้โรงจักรไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในสายส่งต่ำ ยังผลให้ประหยัดปริมาณเชื้อเพลิง และค่าไฟฟ้าของผู้ใช้ต่ำลงในปริมาณความต้องการกำลังไฟฟ้าเท่ากัน

อย่างไรก็ตามการนำปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม มาใช้จริงในทางปฏิบัติจำเป็นต้องมีการปรับโครงสร้างของระบบผลิต จ่าย และขายไฟฟ้าให้รองรับการวางแผนการผลิตกำลังไฟฟ้าโดยปัจจุบันโครงสร้างกิจการไฟฟ้าของไทยยังคงเป็นระบบค่อนข้างผูกขาด ซึ่งยังไม่มีการแข่งขันในการซื้อขายไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์ โดยการดำเนินการอยู่ภายใต้การควบคุมของการไฟฟ้าทั้ง 3 แห่ง คือ การไฟฟ้าฝ่ายผลิต (กฟผ.), การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และการไฟฟ้าส่วน

ภูมิภาค ซึ่ง หากมีการจัดตั้งตลาดไฟฟ้า (Electrical market) ขึ้น กิจกรรมต่าง ๆ ในการซื้อขายไฟฟ้าจะสามารถดำเนินไปอย่างอิสระตามกลไกตลาดผ่านตลาดไฟฟ้านี้ [8]

การแปรรูปกิจการทางด้านพลังงานไฟฟ้ายังคงมีความจำเป็นที่จะต้องเกิดขึ้นเพื่อลดบทบาทของภาครัฐและเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงาน การศึกษาถึงปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม เป็นการสร้างเครื่องมือขึ้นเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการเปลี่ยนแปลงไปในอนาคต

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือนำเสนอวิธีการหาคำตอบ OPF ที่มีความถูกต้องและใช้เวลาการคำนวณน้อยกว่าวิธีการที่ต้องใช้การคำนวณแบบทำซ้ำ (Iterative approach) ซึ่งจะมีประโยชน์ในการวิจัยหรือวิเคราะห์ปัญหา OPF ที่ต้องการใช้ข้อมูลจำนวนมากหรือต้องการหาคำตอบแบบทันทีทันใดตามเวลาจริง (Real time) นอกจากนี้ยังได้วิจัยถึงประสิทธิภาพของ ANNs ในการหาคำตอบของกำลังไฟฟ้าเสมือนซึ่งมีความซับซ้อนกว่าคำตอบของกำลังไฟฟ้าจริงอีกด้วย

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

จากคุณสมบัติของโครงข่ายประสาทเทียมที่สามารถเรียนรู้การคำนวณฟังก์ชั่นลักษณะต่าง ๆ และโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วจะใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยมาก วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงตั้งสมมติฐานว่า สามารถนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้หาคำตอบของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมได้ โดยโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการฝึกสอนจากชุดข้อมูลที่มีปริมาณและคุณภาพเพียงพอ จะสามารถหาคำตอบได้แม่นยำและใช้เวลาน้อยกว่าวิธีการคำนวณดั้งเดิม

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาวิธีการคำนวณปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม
2. ศึกษาโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการคำนวณปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยึดถือ MATPOWER เป็นวิธีการหาคำตอบมาตรฐาน และถือว่าคำตอบ OPF จาก MATPOWER ถูกต้อง
3. ศึกษาการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการแก้ปัญหาต่าง ๆ
4. ศึกษาการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการคำนวณปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม โดยพิจารณา ระบบไฟฟ้า 3 ขนาด คือ ระบบไฟฟ้า 2 บัส 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, ระบบไฟฟ้า 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, ระบบไฟฟ้ากรณีศึกษา IEEE 30 บัส
5. เปรียบเทียบการใช้โครงข่ายประสาทเทียม 2 ชนิดคือโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ(BP-ANNs) และโครงข่ายประสาทเทียมแบบเอลแมน (ELM-ANNs) โดย

ศึกษา BP-ANNs 2 รูปแบบ คือ แบบโครงข่ายเดียวให้คำตอบทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน (SINGLE-ANNs) และแบบแยกโครงข่ายสำหรับกำลังไฟฟ้าจริง (P-ANNs) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q-ANNs) และศึกษา ELM-ANNs 1 รูปแบบคือ แบบโครงข่ายเดียวให้คำตอบทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน

6. ศึกษาการหาคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียมเฉพาะชุดข้อมูลที่ MATPOWER สามารถหาคำตอบได้เท่านั้น กล่าวคือศึกษาเฉพาะชุดข้อมูลที่เป็นไปได้ (Feasible data) สำหรับปัญหา OPF เท่านั้น

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

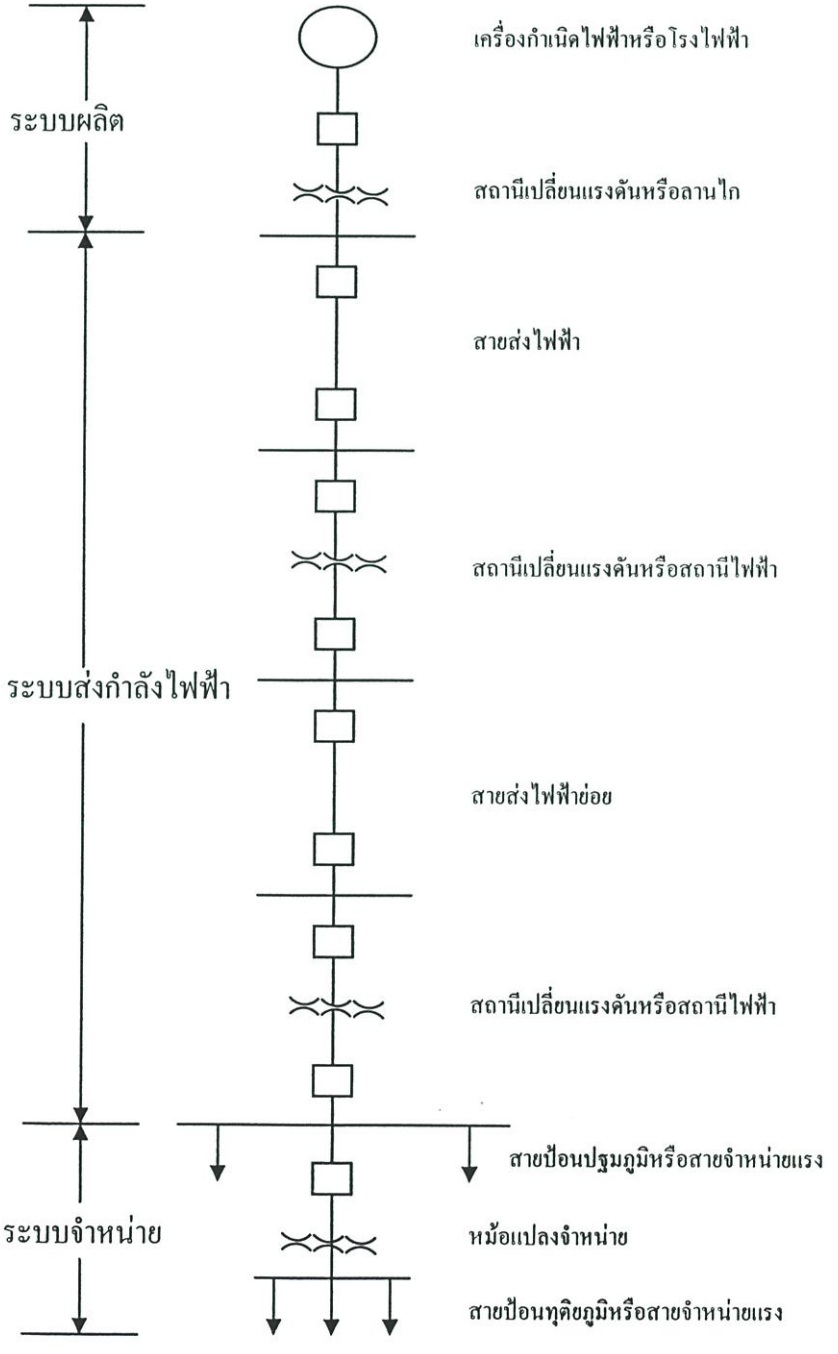
ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆดังต่อไปนี้

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่ต้องใช้ในการศึกษาปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมของระบบไฟฟ้ากำลัง
2. ในเบื้องต้นศึกษาการใช้งานโปรแกรม MS-Excel solver เพื่อหาคำตอบ OPF ในระบบ 2 บัส 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเปรียบเทียบกับการหาคำตอบด้วยโครงข่ายประสาทเทียม
3. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม MATPOWER เพื่อใช้ในการเตรียมข้อมูลฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม
4. ทำการจำลองเหตุการณ์ในระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยเปลี่ยนแปลงโหลดที่ระบบไฟฟ้าต้องการรูปแบบต่าง ๆ โดยเขียนโปรแกรมเพื่อสร้างชุดข้อมูลให้มีความกระจาย
5. นำข้อมูลที่ได้จากการจำลองเหตุการณ์ มาหาคำตอบ OPF โดยใช้โปรแกรม MATPOWER
6. ศึกษาการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ซึ่งได้แก่โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับและโครงข่ายประสาทเทียมชนิดเอลแมน
7. นำข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม MATPOWER ไปฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับและแบบเอลแมน โดยเขียนโปรแกรมให้สามารถบันทึกชุดข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม MATPOWER เป็นรูปแบบ Array เพื่อนำไปใช้ทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม
8. หาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาสูงสุด
9. ทำการจำลองเหตุการณ์ซ้ำโดยใช้ ระบบ IEEE 30 bus 6 Generator
10. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

บทที่ 2
ระบบไฟฟ้ากำลัง

2.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง

โดยทั่วไปสามารถแบ่งระบบไฟฟ้ากำลังออกตามลักษณะการปฏิบัติงานได้เป็น ระบบผลิตไฟฟ้า ระบบส่งไฟฟ้า และระบบจำหน่ายไฟฟ้า ดังนี้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง [9]

จากรูปที่ 2.1 ได้แสดงภาพที่ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยสามารถแบ่งแยกหน้าที่ของส่วนประกอบต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

1. โรงจักรไฟฟ้า (Power Plant) เป็นส่วนประกอบของระบบการผลิตมีชุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generating Set) ทำหน้าที่ผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยระบบแรงดันหนึ่ง แล้วส่งผ่านไปยังหม้อแปลงกำลัง (Power Transformers) เพื่อยกระดับแรงดัน (Step - up) ให้สูงขึ้นแล้วส่งผ่านไปยังลานไกไฟฟ้า (Switchyard) เพื่อส่งเข้าสู่ระบบส่งต่อไป

2. สายส่ง (Transmission Lines) มีหน้าที่ส่งพลังงานไฟฟ้าจากโรงจักรไฟฟ้าไปยังสถานีไฟฟ้าต้นทาง สำหรับระดับแรงดันที่สายส่งของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยใช้ในปัจจุบันมี 3 ระดับ คือ 115 kV, 230 kV และ 500 kV

3. สถานีไฟฟ้าต้นทาง (Terminal Station) จะรับพลังงานไฟฟ้าจากระบบส่งเข้ามายังหม้อแปลงกำลัง เพื่อลดระดับแรงดันลง (Step – down) ให้มีระดับแรงดันอยู่ในระดับของระบบส่งย่อย

4. สายส่งย่อย (Subtransmission Lines) เป็นวงจรของสายส่งที่ออกจากสถานีไฟฟ้าต้นทางเพื่อนำพลังงานไฟฟ้าไปจ่ายให้สถานีไฟฟ้าย่อย ระดับแรงดันของระบบส่งย่อยในประเทศไทยมีอยู่ 2 ระดับ คือ 69 kV และ 115 kV

5. สถานีไฟฟ้าย่อย (Distribution Substations) จะรับพลังงานไฟฟ้าจากสายส่งย่อยเข้ามายังหม้อแปลงกำลัง เพื่อลดระดับแรงดันลงให้มีระดับแรงดันอยู่ในระดับของระบบจำหน่าย

6. สายป้อนปฐมภูมิ (Primary Feeder) เป็นวงจรสายป้อนที่ออกจากสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อนำพลังงานไฟฟ้าไปจ่ายให้กับหม้อแปลงจำหน่าย สำหรับระดับแรงดันที่สายป้อนของระบบจำหน่ายในประเทศไทยปัจจุบันมีใช้งานอยู่ 4 ระดับ คือ 22 kV และ 33 kV สำหรับพื้นที่ให้บริการของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และ 12 kV และ24 kV สำหรับพื้นที่ให้บริการของการไฟฟ้านครหลวง แต่อย่างไรก็ตามในแผนปรับปรุงและขยายระบบจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงได้บรรจุให้มีการเปลี่ยนแรงดันของพื้นที่ในระบบจำหน่ายทั้งหมดจาก 12 kV เป็น 24 kV ยกเว้น “เขตวงจรตาข่าย (Network Area)” (เขตวงจรตาข่ายคือพื้นที่ที่ล้อมรอบด้วยแม่น้ำเจ้าพระยาและคลองผดุงกรุงเกษม)

7. สายป้อนย่อย (Laterals) เป็นวงจรของสายป้อนที่แยกจากสายป้อนปฐมภูมิเพื่อนำพลังไฟฟ้าไปจ่ายให้กับหม้อแปลงจำหน่ายที่ติดตั้งอยู่ตามตรอกหรือซอย

8. หม้อแปลงจำหน่าย (Distribution Transformers) มีหน้าที่ลดระดับแรงดันของสายป้อนลงให้เท่ากับระดับแรงดันใช้งานของโหลด ซึ่งถือว่าเป็นระดับของไฟฟ้าแรงต่ำ

9. สายจำหน่ายแรงดันต่ำ (Low Voltage Circuits) เป็นวงจรของขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงจำหน่ายที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดของผู้ใช้ไฟฟ้า โดยต้องมีระดับแรงดัน

สอดคล้องกับระดับแรงดันใช้งานของโหลด ในประเทศไทยวงจรแรงดันต่ำจะเป็นระบบ 3 เฟส 4 สาย (3 phase 4 wires) มีระดับแรงดัน 220/380 V

2.1.1 ระบบผลิตกำลังไฟฟ้า (Generation System)

ระบบผลิตไฟฟ้า หมายถึง ระบบที่มีการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานรูปอื่น ๆ ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า เช่น เปลี่ยนจากพลังงานศักย์ของน้ำไปเป็นไฟฟ้า หรือเปลี่ยนจากพลังงานความร้อนที่ได้จากถ่านหิน แก๊ส น้ำมัน หรือปฏิกิริยานิวเคลียร์ไปเป็นไฟฟ้า เป็นต้น กระบวนการที่เปลี่ยนจากพลังงานรูปอื่นไปเป็นไฟฟ้านั้น ส่วนใหญ่จะผ่านในรูปของพลังงานกลก่อนเสมอและใช้พลังงานกลเป็นตัวขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกทีหนึ่ง ซึ่งก็มีบ้างที่เปลี่ยนจากพลังงานรูปอื่นไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง เช่น เซลล์แสงอาทิตย์เป็นต้น

ระบบผลิตกำลังไฟฟ้าหรือบางครั้งเรียกว่า โรงไฟฟ้าหรือโรงจักรไฟฟ้า (Power Plant) การเรียกชื่อโรงไฟฟ้านั้นนิยมเรียกตามลักษณะของแหล่งพลังงานหรือไม่ก็เรียกตามชนิดของตัวขับ ซึ่งโรงไฟฟ้าที่ใช้ผลิตไฟฟ้าในปัจจุบันมี ดังนี้

1. โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน (Thermal Power Plant) คือ โรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลทั่วไป เช่น ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน และน้ำมัน ผลิตไอน้ำและใช้ไอน้ำไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โรงไฟฟ้าชนิดนี้มีเครื่องต้นกำลัง คือ เครื่องกังหันไอน้ำที่มีกำลังและความเร็วสูง ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทโรเตอร์รูปทรงกระบอก (Cylindrical Rotor Generator)

2. โรงไฟฟ้าพลังน้ำ (Hydroelectric Power Plant) เป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้พลังน้ำจากเขื่อนมาขับเครื่องกังหันน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โรงไฟฟ้าชนิดนี้มีเครื่องต้นกำลัง คือเครื่องกังหันน้ำที่มีความเร็วต่ำใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งมีขั้วแม่เหล็กแบบซาเลียนท์ (Salient-Pole Generator) หลายขั้ว

3. โรงไฟฟ้ากังหันแก๊ส (Gas Turbine Power Plant) เป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกังหันแก๊สเป็นตัวต้นกำลังในการขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แก๊สร้อนที่ใช้หมุนเครื่องกังหันแก๊สมาจากการเผาไหม้น้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติภายในห้องเผาไหม้ (Combustion chamber) โรงไฟฟ้าชนิดนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนด้วยความเร็วสูงใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบโรเตอร์รูปทรงกระบอก ซึ่งส่วนใหญ่จะมีขั้วแม่เหล็กเพียง 2 ขั้ว การสตาร์ทเครื่องจนกระทั่งจ่ายโหลดใช้เวลาสั้นมาก

4. โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม (Combined Cycle Power Plant) เป็นโรงไฟฟ้าที่ออกแบบให้ใช้เชื้อเพลิงอย่างประหยัด คือ ใช้เครื่องกังหันแก๊สร่วมกับเครื่องกังหันไอน้ำ เครื่องกังหันแก๊สจะส่งไอเสียซึ่งยังมีความร้อนสูงไปยังหม้อน้ำเพื่อต้มน้ำร่วมกับเชื้อเพลิงอื่นและใช้ไอน้ำไปหมุนเครื่องกังหันไอน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามลำดับ เนื่องจากการที่นำเอา

ความร้อนจากไอเสียของเครื่องกังหันแก๊สมาใช้ประโยชน์ในการต้มน้ำจึงทำให้โรงไฟฟ้าชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่าโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนทั่วไป

5. โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ (Nuclear Power Plant) เป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ในการทำให้เกิดความร้อนสูงจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ความร้อนนี้นำไปใช้ในการต้มน้ำและนำเอาไอน้ำไปหมุนเครื่องกังหันไอน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความแตกต่างระหว่างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์และโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนทั่วไปอยู่ที่ลักษณะสมบัติของโรงไฟฟ้าทั้งสองชนิดที่แตกต่างกัน การตอบสนองต่อโหลด เป็นต้น โรงไฟฟ้านิวเคลียร์เป็นโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่ต้องลงทุนสูงมาก และมีการออกแบบที่ระมัดระวังเรื่องอันตรายจากกัมมันตรังสีเป็นพิเศษ

แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยทั่ว ๆ ไปมีค่าไม่เกิน 20 kV ทั้งนี้เกิดจากปัญหาทางด้านฉนวนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและคำนึงถึงผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วย ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ใช้ในปัจจุบันมีแรงดันจ่ายออกหลายระดับ เช่น 3.5 kV , 11 kV และ 13.8 kV แรงดันดังกล่าวจะถูกแปลงให้สูงขึ้นที่ลานไกไฟฟ้า (Switch Yard) มีค่าเป็นไปตามระดับแรงดันมาตรฐานที่ใช้ส่งพลังงาน เช่น 69 kV , 115 kV หรือ 500 kV การส่งพลังงานจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งจะเลือกส่งด้วยระดับแรงดันขนาดใดขึ้นอยู่กับระยะทางที่ใช้ส่งเป็นสำคัญ ในการส่งไฟฟ้าแรงดันสูงนั้นจะส่งด้วยระบบ 3 เฟส เพราะว่าการเพิ่มสายส่งขึ้นอีกหนึ่งเส้นจะสามารถส่งพลังงานได้สูงกว่าระบบเฟสเดียวถึง 73% ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบขณะใช้แรงดันและกระแสไฟฟ้าจำนวนเท่า ๆ กัน

2.1.2 ระบบส่งกำลังไฟฟ้า (Transmission System)

ระบบส่งกำลังไฟฟ้า หมายถึง ระบบขนส่งพลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไปยังระบบจำหน่าย ซึ่งเป็นศูนย์กลางการจ่ายโหลด (Load Center) โดยคำนึงถึงระยะทางที่ใกล้ที่สุดและประหยัดที่สุดในการส่งพลังงานไฟฟ้า อาจใช้สายอากาศเดินเหนือศีรษะ (Overhead Aerial Line) หรือสายเคเบิลใต้ดิน (Underground Cable) ก็ได้ ในกรณีที่ส่งด้วยสายอากาศเดินเหนือศีรษะจะมีสายเส้นเล็ก ๆ ขึงอยู่ข้างบนสายส่งไฟฟ้า เรียกว่า สายดินเหนือศีรษะ (Overhead Ground Wire) สายดินเส้นนี้จะต่อตรงอยู่กับเสาโครงเหล็ก (Steel Tower) มีหน้าที่ป้องกันมิให้สายฟ้ารบกวนสายส่งและเป็นตัวนำกระแสผ่าลงสู่ดิน

การผลิตไฟฟ้าที่ประหยัดนั้นควรตั้งโรงไฟฟ้าไว้ใกล้กับแหล่งพลังงาน เช่น แหล่งพลังน้ำ แหล่งถ่านหิน หรือแหล่งก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น แล้วจึงใช้วิธีส่งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ไปตามสายส่งแรงสูงในระยะไกล การขนส่งพลังงาน เช่น ถ่านหิน มาเพื่อใช้ผลิตไฟฟ้าใกล้กับศูนย์กลางการใช้ไฟฟ้า (Load Center) นั้นเป็นวิธีที่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากกว่าการผลิตไฟฟ้าแล้วส่งไปตามสายไฟฟ้าแรงสูง ด้วยเหตุนี้เองจึงมีการเดินสายไฟฟ้าแรงสูงจากจุดที่ตั้งโรงไฟฟ้าในที่ต่าง ๆ ไปยังจุดจ่ายไฟให้กับผู้ใช้ไฟตามเมืองต่าง ๆ เป็นระยะทางยาวไกล ส่วนของการส่งไฟฟ้าทั้งหมด

ประกอบกันขึ้นเป็นระบบส่งไฟฟ้าซึ่งเป็นส่วนสำคัญของระบบไฟฟ้าที่มีความยุ่งยากสลับซับซ้อนมากขึ้น ทั้งในแง่การวางแผน การออกแบบ และการปฏิบัติการ

แรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกแปลงให้มีแรงดันอยู่ในระดับของระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยอยู่ในระดับตั้งแต่ 115 kV ถึง 765 kV ซึ่งมาตรฐานในระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็น 3 ระดับ

- แรงดันสูง (High Voltages: HV) ระดับแรงดัน 115 kV, 138 kV และ 230 kV
- แรงดันสูงพิเศษ (Extra – High Voltages: EHV) ระดับแรงดัน 345 kV, 500 kV และ 765 kV
- แรงดันสูงยิ่ง (Ultra – High Voltages: UHV) ระดับแรงดัน 1,000 kV ถึง 1,500 kV

ในการส่งกำลังไฟฟ้าระยะไกลจะยกระดับแรงดันขึ้น เช่น จาก 12.5 kV เป็น 69 kV หรือ 230 kV เป็นต้น แล้วส่งเข้ากริดของประเทศไทย (National Grid) ส่วนทางด้านโหลดก็จะนำไฟฟ้าออกจากกริด โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าให้ต่ำลงสู่ระดับแรงดันของระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution Voltage) เช่น จาก 230 kV เป็น 69 kV เป็นต้น

ระบบส่งกำลังไฟฟ้านี้นอกจากจะเชื่อมโยงระหว่างโรงไฟฟ้ากับสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อจำหน่ายไฟฟ้าโดยตรงแล้ว ระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่ดีจะต้องเชื่อมโยงแหล่งจ่ายถึงกันทั้งหมดระหว่างสถานีต่อสถานีเพื่อวัตถุประสงค์ดังนี้คือ

1) ทำให้ระบบใหญ่ขึ้น สามารถจ่ายพลังงานได้มากขึ้น โอกาสที่ไฟจะดับนาน ๆ เมื่อเกิดเหตุขัดข้องจะน้อยลง เพราะเมื่อมีเหตุขัดข้องทางด้านหนึ่งก็ยังรับไฟฟ้าจากอีกด้านหนึ่งได้ ระบบจึงมั่นคงและเชื่อถือได้มากขึ้น

2) ประหยัดเชื้อเพลิงการผลิต เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าสามารถถ่ายเทกันระหว่างระบบได้ ดังนั้นในช่วงที่ต้องการพลังงานลดลงจึงสามารถหยุดเดินเครื่องบางแห่งได้

3) สามารถวางโปรแกรมการเดินเครื่องอย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือสามารถกำหนดลงไปได้ว่าจะใช้เครื่องใดจ่ายโหลดช่วงฐาน (Base Load) เครื่องใดจ่ายเสริมโหลดช่วงยอด (Peak Load) และเครื่องใดเป็นเครื่องสำรอง (Reserve) เป็นต้น

2.1.3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution System)

ระบบจำหน่ายไฟฟ้า หมายถึง ระบบที่ถูกลดแรงดันให้ต่ำจนมีค่าเหมาะสมที่จะบริการให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าได้แล้ว แรงดันที่ใช้ในระบบจำหน่ายมีหลายระดับ เช่น 22 kV และ 33 kV เป็นระบบแรงดันที่ใช้ในการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และ 12 kV กับ 24 kV เป็นระดับแรงดันที่ใช้ในการไฟฟ้านครหลวง สายจำหน่ายชนิดนี้เรียกว่า สายจำหน่ายแรงดันสูงหรือสายป้อนปฐมภูมิ (Primary

Feeder) ซึ่งแรงดันระดับนี้สามารถจำหน่ายให้กับโรงงานอุตสาหกรรมได้ สายจำหน่ายแรงดันสูงนี้จะเห็นเดินอยู่รอบ ๆ ตัวเมืองและจะแปลงระดับแรงดันให้ต่ำลงอีกโดยใช้หม้อแปลงจำหน่าย สายจำหน่ายชนิดนี้เรียกว่า สายจำหน่ายแรงต่ำหรือสายป้อนทุติยภูมิ (Secondary Feeder) ในประเทศไทยได้กำหนดระดับแรงดันใช้งานขนาด 220 V สำหรับระบบ 1 เฟส และ 380 V สำหรับระบบ 3 เฟส

2.2 หน่วยงานที่รับผิดชอบเกี่ยวกับระบบไฟฟ้ากำลังในประเทศไทย

หน่วยงานที่รับผิดชอบเกี่ยวกับการไฟฟ้าภายในประเทศไทยประกอบด้วยการไฟฟ้า 3 แห่ง ซึ่งแต่ละแห่งมีหน้าที่แตกต่างกันดังนี้ คือ [11]

2.2.1 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) มีชื่อเป็นภาษาอังกฤษว่า Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) มีหน้าที่ผลิตและจัดหาแหล่งพลังงานที่เหมาะสมเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอกับการใช้งานภายในประเทศ นอกจากนี้ยังมีหน้าที่ดูแลบำรุงรักษาโรงจักรสายส่งกำลังไฟฟ้า และสถานีเปลี่ยนแรงดัน ให้อยู่ในสภาพที่ดีและสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ตลอดเวลา พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้นี้ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเป็นผู้จำหน่ายให้กับการไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคโดยตรง

2.2.2 การไฟฟ้านครหลวง

การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) มีชื่อเป็นภาษาอังกฤษว่า Metropolitan Electricity Authority (MEA) มีหน้าที่บริการและจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าในเขตจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวง คือ กรุงเทพฯ นนทบุรี และสมุทรปราการ นอกจากนี้ยังรับผิดชอบในการดูแลรักษาสายส่งไฟฟ้าแรงดันสูง สถานีเปลี่ยนแรงดัน สายจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง หม้อแปลงระบบจำหน่ายและสายจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำให้อยู่ในสภาพดี พลังงานไฟฟ้าที่การไฟฟ้านครหลวงจำหน่ายให้กับประชาชนในเขตรับผิดชอบทั้งหมดนั้น รับซื้อจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าแรงดันสูงขนาด 69 kV 115 kV และ 230 kV

2.2.3 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

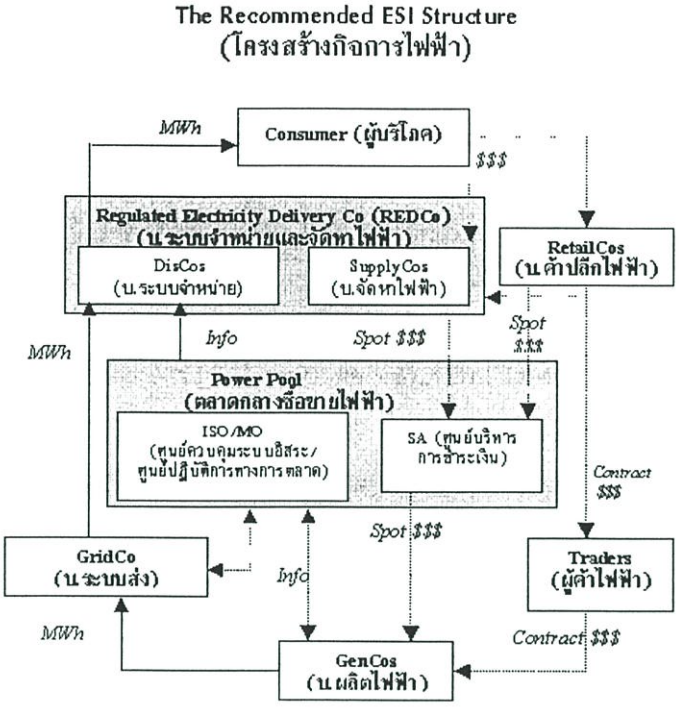
การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มีชื่อเป็นภาษาอังกฤษว่า Provincial Electricity Authority (PEA) มีหน้าที่เช่นเดียวกับการไฟฟ้านครหลวง แต่มีเขตรับผิดชอบอยู่ในส่วนที่เหลือนอกเขตจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวงทั้งหมด พลังงานไฟฟ้าที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคนำมาจำหน่ายให้กับประชาชนนั้นส่วนใหญ่รับซื้อจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ในระบบจำหน่ายแรง

สูง 22 kV หรือ 33 kV และรับซื้อแรงดันสูง 69 kV และ 115 kV บ้างเล็กน้อยจากสถานีไฟฟ้าย่อยของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

2.3 กิจการไฟฟ้าและตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า [8]

เมื่อปี 2543 คณะรัฐมนตรีได้มีมติเสนอการปรับโครงสร้างกิจการไฟฟ้าและการจัดตั้งตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า (Power pool) แต่ต่อมาด้วยเหตุผลทางการเมืองการปรับโครงสร้างดังกล่าวจึงหยุดชะงักไป การผลิต การส่ง และการจำหน่ายไฟฟ้าของประเทศไทยในปัจจุบันยังคงเป็นกิจการที่ค่อนข้างผูกขาดโดยในปัจจุบันระบบผลิตไฟฟ้าส่วนใหญ่และระบบส่งไฟฟ้าทั้งหมดของประเทศไทย อยู่ในความดูแลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ส่วนระบบจำหน่ายไฟฟ้าและการบริการค้าปลีกนั้น อยู่ในความดูแลของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) เท่านั้น โดย กฟผ.ทำการผลิตและส่งไฟฟ้าเกือบทั้งหมดเพื่อขายให้แก่ กฟน. และ กฟภ. เพื่อจัดจำหน่ายให้แก่ผู้ใช้ต่อไป ส่วน กฟน. รับผิดชอบการจัดจำหน่ายไฟฟ้า ให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าในเขตกรุงเทพฯ นนทบุรี และสมุทรปราการ สำหรับ กฟภ. รับผิดชอบในเขตจังหวัดอื่นๆ ที่เหลือทั้งหมดของประเทศ จึงกล่าวได้ว่ากิจการไฟฟ้าของประเทศไทย เกือบทั้งหมดอยู่ภายใต้ความรับผิดชอบและการให้บริการของ 3 หน่วยงานหลักเท่านั้นคือ กฟผ. กฟน. และ กฟภ. อย่างไรก็ตาม รัฐบาลได้เริ่มเปิดโอกาสให้เอกชน เข้ามามีส่วนร่วมในการให้บริการ ในส่วนของระบบผลิตผ่านโครงการผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก (Small Power Producer: SPP) และผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ (Independent Power Producer: IPP) ซึ่งจะทำการผลิตไฟฟ้าขายให้แก่ กฟผ. เพื่อขายต่อให้แก่ กฟน. และ กฟภ. ต่อไป อย่างไรก็ดี ผู้ใช้ไฟฟ้าเกือบทั้งหมดของทั้งประเทศ ยังต้องอาศัยการบริการจาก กฟน. และ กฟภ. เท่านั้น

สำหรับระบบตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า เป็นระบบที่ให้มีการแข่งขันราคาจำหน่ายไฟฟ้าจากผู้ผลิต ผู้ผลิตที่มีต้นทุนการผลิตสูงและราคาขายสูง จะไม่ได้รับอนุญาตให้ผลิตไฟฟ้าจ่ายเข้าระบบ ส่วนผู้ผลิตที่มีต้นทุนการผลิตต่ำและราคาขายต่ำจะให้มีการผลิตและรับซื้อก่อนในปริมาณที่เหมาะสม การจัดการดังกล่าวคือปัญหายูนิตคอมมิตเมนต์ (Unit commitment problem) และปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม (Optimal power flow, OPF) ที่มีเป้าหมายคือให้มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าระบบต่ำสุด ระบบตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าจึงเป็นระบบที่ทำให้งานวางแผนการผลิตกำลังไฟฟ้าให้สอดคล้องกับเงื่อนไข OPF มีความสำคัญขึ้น



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างโครงสร้างกิจการไฟฟ้าแบบที่มีการแข่งขัน

2.4 การไหลของโหลด (Load flow) [12]

การศึกษาการไหลของโหลดเป็นขั้นตอนพื้นฐานที่สำคัญอย่างหนึ่งของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง ไม่ว่าจะเป็นงานด้านปฏิบัติการ ควบคุม และวางแผนระบบไฟฟ้าจะต้องมีการประเมินสมรถนะของระบบไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขที่มีการเปลี่ยนแปลงการทำงานของระบบ และศึกษาถึงผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของอุปกรณ์ในระบบ ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาการไหลของโหลด คือขนาดและมุมของแรงดันที่แต่ละบัสและค่ากำลังไฟฟ้าแอคทีฟ (P), กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (Q) ที่ไหลในแต่ละสายส่ง และรวมไปถึงค่ากระแสในสายด้วย และยังศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากการที่วงจรในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงเปลี่ยนจากสิ่งต่างๆ เช่นการปลดสายส่งเพื่อซ่อมบำรุง ในการศึกษาการไหลของโหลดจัดแบ่งชนิดของบัสบาร์ในระบบไฟฟ้ากำลังดังนี้

1. บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator bus) หรืออาจเรียกว่า P-V บัส เป็นบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ หรือเป็นบัสที่มีทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดต่ออยู่ เป็นบัสที่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้มีขนาดคงที่ได้โดยอาศัย AVR (Automatic voltage regulation) บัสชนิดนี้จะมีพารามิเตอร์ที่คงที่ได้แก่ กำลังไฟฟ้าแอคทีฟ (P) และแรงดันไฟฟ้าที่บัส (V) ส่วนพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงค่าได้คือ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (Q) และมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส (δ)

2. โหลดบัส (Load bus) หรืออาจเรียกว่า P-Q บัส เป็นบัสที่มีโหลดต่ออยู่ ดังนั้นพารามิเตอร์ที่คงที่ได้แก่ กำลังไฟฟ้าแอคทีฟ (P) และกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (Q) ซึ่งเป็นค่าของโหลด

ที่ต่ออยู่กับบัส ส่วนพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงค่าได้คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส (V) และมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส (δ) โดยบัสชนิดนี้จะกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าไว้ในรูป $S = P + jQ$

3. สแลคบัส (Slack bus) หรือบางครั้งเรียก บัสอนันต์ (Infinite bus) สวิงบัส (Swing bus) บัสอ้างอิง (Reference Bus) บัสชนิดนี้เป็นบัสที่ขนาดของแรงดันไฟฟ้าและมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสมีค่าคงที่ และโดยทั่วไปจะกำหนดให้มีมุมเท่ากับ 0° และใช้เป็นบัสอ้างอิงที่จะนำไปเปรียบเทียบกับมุมของแรงดันที่บัสอื่น บัสอ้างอิง ถือว่าเป็นแหล่งกำเนิด (Source) ขนาดใหญ่ที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาได้ตามต้องการ โดยขนาดของแรงดันไฟฟ้า, มุมของแรงดันไฟฟ้า และความถี่ไม่เปลี่ยนแปลง ในทางปฏิบัติ บัสอ้างอิงนี้หมายถึงบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่สุดเชื่อมต่ออยู่ หรือเป็นระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาอยู่ ดังนั้นพารามิเตอร์ที่คงที่คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส (V) และมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส (δ) ส่วนพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงค่าได้คือกำลังไฟฟ้าแอคทีฟ (P) และกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (Q)

การหาการไหลของโหลดโหลดแต่ละชุดจะถูกแปลงเป็นแอดมิตแตนซ์ (Admittance) ที่ต่อลงดินโดยใช้สมการ

$$Z^{-1} = Y$$

หรือจาก

$$Y_L = \frac{P_L + jQ_L}{|V_L|^2} \qquad (2.8)$$

โดยที่ $P_L + jQ_L$ คือ ขนาดของโหลด

V_L คือ ขนาดแรงดันที่โหลดบัส

การหาการไหลของโหลดมีด้วยกันหลายวิธี เช่น Gauss-Seidel Method, Newton - Raphson

2.4.1 Gauss-Seidel Method

สามารถคำนวณได้โดยใช่สมการ

$$E_i^{(k)} = \frac{1}{Y_{ii}}\left[\frac{P_{i,sch} - jQ_{i,sch}}{E_i^{(k-1)*}} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij}E_j^{(k)} - \sum_{j=i+1}^{N} Y_{ij}E_j^{(k-1)}\right] \qquad (2.9)$$

$$P_i^{(k)} = E_i^{(k-1)*}\left[\sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij}E_j^{(k)} + \sum_{j=i}^{N} Y_{ij}E_j^{(k-1)}\right] \quad (2.10)$$

$$Q_i^{(k)} = -\mathrm{Im}\left\{E_i^{(k-1)*}\left[\sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij}E_j^{(k)} + \sum_{j=i}^{N} Y_{ij}E_j^{(k-1)}\right]\right\} \quad (2.11)$$

k คือ จำนวนรอบที่คำนวณ

2.4.2 Newton - Raphson Power – Flow Solution

สามารถคำนวณได้โดยใช่สมการ

$$P_k + jQ_k = V_k I_k^* = V_k \sum_{j=1}^{n-1} (Y_{kj} V_j)^* \quad (2.12)$$

โดยให้ $V_k = a_k + jb_k$ และ $Y_{kj} = G_{kj} - jB_{kj}$ จะได้

$$P_k + jQ_k = (a_k + jb_k) \sum_{j=1}^{n-1} [(G_{kj} - jB_{kj})(a_j + jb_j)] \quad (2.13)$$

ซึ่งจะหาค่า P_k และ Q_k ได้ดังนี้

$$P_k = \sum_{j=1}^{n-1} [a_k(a_j G_{kj} + b_j B_{kj}) + b_k(b_j G_{kj} - a_j B_{kj})] \quad (2.14)$$

$$Q_k = \sum_{j=1}^{n-1} [b_k(a_j G_{kj} + b_j B_{kj}) - a_k(b_j G_{kj} - a_j B_{kj})] \quad (2.15)$$

การที่ใช้บัสเป็น n-1 บัส ก็เนื่องจากบัสอ้างอิง (Slack Bus) ที่ n ผู้ศึกษาจะทราบค่าต่าง ๆ อยู่แล้วจึงไม่นำมาคิด

ค่า P และ Q ที่เปลี่ยนแปลงจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนค่า a และ b ในสมการด้านบน

$$\Delta P_1 = \frac{\partial P_1}{\partial a_1}\Delta a_1 + \frac{\partial P_1}{\partial a_2}\Delta a_2 + \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots + \frac{\partial P_1}{\partial a_{n-1}}\Delta a_{n-1} \qquad (2.16)$$

ในทำนองเดียวกันสามารถเขียน ΔP และ ΔQ ในรูปของ Δa และ Δb ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปคือ

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ * \\ * \\ * \\ \Delta P_{n-1} \\ \Delta Q_1 \\ * \\ * \\ * \\ \Delta Q_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial a_1} \cdots \frac{\partial P_1}{\partial a_{n-1}} & \frac{\partial P_1}{\partial b_1} \cdots \frac{\partial P_1}{\partial b_{n-1}} \\ * \quad * \\ * \quad * \\ * \quad * \\ \frac{\partial P_{n-1}}{\partial a_1} \cdots \frac{\partial P_{n-1}}{\partial a_{n-1}} & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial b_1} \cdots \frac{\partial P_{n-1}}{\partial b_{n-1}} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial a_1} \cdots \frac{\partial Q_1}{\partial a_{n-1}} & \frac{\partial Q_1}{\partial b_1} \cdots \frac{\partial Q_1}{\partial b_{n-1}} \\ * \quad * \\ * \quad * \\ * \quad * \\ \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial a_1} \cdots \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial a_{n-1}} & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial b_1} \cdots \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial b_{n-1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta a_1 \\ * \\ * \\ * \\ \Delta a_{n-1} \\ \Delta b_1 \\ * \\ * \\ * \\ \Delta b_{n-1} \end{bmatrix} \qquad (2.17)$$

ผู้ศึกษาสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปดังนี้

J_A	J_B
J_C	J_D

หาค่าสมาชิกของ J_A ในแนวนอกเส้นทแยงมุมคือ $k \neq j$ ได้ ดังนี้

$$\frac{\partial P_k}{\partial a_j} = a_k G_{kj} - b_k B_{kj} \qquad (2.18)$$

และค่าในแนวทแยงมุมคือ

$$\frac{\partial P_k}{\partial a_k} = 2a_k G_{kk} + b_k B_{kk} - b_k B_{kk} + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq k}}^{n-1} (a_j G_{kj} + b_j B_{kj}) \qquad (2.19)$$

เพื่อให้สมการ 2.19 หาค่าได้สะดวกขึ้น สามารถแทนบางเทอมในรูปกระแสที่บัส k เป็น I_k ซึ่งสามารถเขียนได้ในแต่ละรอบการคำนวณดังนี้

$$I_k = c_k + jd_k = (G_{kk} - jB_{kk})(a_k + jb_k) + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq k}}^{n-1} (G_{kj} + jB_{kj})(a_j + jb_j) \qquad (2.20)$$

เมื่อ $c_k = a_k G_{kk} + b_k B_{kk} + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq k}}^{n-1} (a_j G_{kj} + b_j B_{kj})$ (2.21)

และ $d_k = b_k G_{kk} + a_k B_{kk} + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq k}}^{n-1} (b_j G_{kj} + a_j B_{kj})$ (2.22)

จะได้ว่า

$$\frac{\partial P_k}{\partial a_k} = a_k G_{kk} - b_k B_{kk} + c_k \qquad (2.23)$$

สำหรับ J_B

$$\frac{\partial P_k}{\partial b_k} = a_k B_{kk} + b_k G_{kk} + d_k \quad \text{และ} \quad \frac{\partial P_k}{\partial b_j} - a_k B_{kj} + b_k G_{kj} \quad (k \neq j) \qquad (2.24)$$

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สำหรับ J_C

$$\frac{\partial Q_k}{\partial a_k} = a_k B_{kk} + b_k G_{kk} - d_k \quad \text{และ} \quad \frac{\partial Q_k}{\partial a_j} = a_k B_{kj} + b_k G_{kj} \qquad (k \neq j) \qquad (2.25)$$

สำหรับ J_D

$$\frac{\partial Q_k}{\partial b_j} = -a_k G_{kj} + b_k B_{kj} \qquad \text{และ} \qquad \frac{\partial Q_k}{\partial b_k} = -a_k G_{kk} + b_k B_{kk} + c_k \qquad (2.26)$$

เมื่อให้รอบการคำนวณแทนด้วย P และค่าแรงดันทุกบัสที่ไม่ทราบค่ายกเว้นบัสอ้างอิงสมมุติให้มีค่า 1 p.u. จากการสมมุติค่าแรงดันเหล่านี้จะสามารถหาค่า P และ Q ได้โดยใช้ สมการ 2.14 และ 2.15 และการเปลี่ยนแปลงของ P และ Q สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$\Delta P_k^p = P_{k(\text{specified})} - P_k^p \qquad (2.27)$$

$$\Delta Q_k^p = Q_{k(\text{specified})} - Q_k^p \qquad (2.28)$$

เมื่อ p เป็นจำนวนรอบในการคำนวณ และกระแสก็สามารถคำนวณได้จาก

$$I_k^p = \left(\frac{P_k^p + jQ_k^p}{V^p} \right) = C_k^p + jd_k^p \qquad (2.29)$$

และสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \Delta a \\ \Delta b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_A & J_B \\ J_c & J_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \qquad (2.30)$$

82663

และจะหาค่า a และ b ได้โดย

$$a_k^{p+1} = a_k^p + \Delta a_k^p \qquad (2.31)$$

$$b_k^{p+1} = b_k^p + \Delta b_k^p \qquad (2.32)$$

ขบวนการคำนวณจะกระทำซ้ำต่อไป $p = p + 1$ จนกระทั่ง ΔP และ ΔQ จะน้อยกว่าค่าผิดพลาดที่กำหนดไว้

วิธีของนิวตัน-ราฟสัน จะมีจำนวนรอบในการคำนวณน้อยกว่าวิธีของเกาส์-ไซเดิล และโดยทั่วไปจะเร็วกว่าด้วย แต่ในแต่ละรอบการคำนวณนั้นจะใช้เวลามากกว่าและรอบน้อยกว่าโดยทั่วไปใช้ประมาณ 4 รอบ ในขณะที่วิธีของเกาส์-ไซเดิล ใช้อย่างน้อย 30 รอบ และจำนวนรอบของเกาส์-ไซเดิล แปรตามขนาดระบบด้วย

ข้อเสียของวิธีนิวตัน-ราฟสัน คือ จะต้องฟอร์มจาโคเบียนเมตริกซ์และอินเวอร์ส

ผลที่ได้รับจากการศึกษาการไหลของโหลดจะประกอบด้วย ขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัสต่าง ๆ, การไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังรีแอกทีฟในสายส่งแต่ละวงจรที่ต่อเชื่อมระหว่างบัสและกำลังสูญเสียในส่วนต่าง ๆ ของระบบ ดังนั้นเมื่อระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงไปจากระบบในปัจจุบัน เช่นมีการเติมโตของโหลดมากขึ้น (มีบัสมากขึ้น) มีการก่อสร้างสายส่งเพิ่มขึ้น เป็นต้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระบบไฟฟ้าขึ้นผลการศึกษาการไหลของโหลดจะช่วยให้วิศวกรไฟฟ้าทำการวิเคราะห์สถานภาพของระบบไฟฟ้านี้ได้ เช่น

- มีกำลังการผลิตเพียงพอหรือไม่
- แรงดันที่แต่ละบัสมีค่าต่ำไปหรือไม่
- การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งและหม้อแปลงมากเกินไปหรือไม่
- กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบมากเกินไปหรือไม่

นอกจากนั้นจากผลการศึกษาการไหลของโหลด หากพบว่าจุดใดในระบบมีความไม่ถูกต้องตามหลักเกณฑ์ทางด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ ก็จะสามารถหาวิธีแก้ไขได้อย่างถูกต้อง

บทที่ 3
ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม

ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมเป็นปัญหาหลักอย่างหนึ่งของการวิเคราะห์และวางแผนระบบไฟฟ้ากำลัง คือ การควบคุมให้ระบบไฟฟ้ากำลังสามารถจ่ายโหลดได้อย่างเพียงพอและระบบสามารถดำเนินการอยู่ภายในขอบเขตที่ปลอดภัย โดยมีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด

3.1 การวิเคราะห์และการวางแผนทางระบบไฟฟ้ากำลัง [13]

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ามีจุดประสงค์เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการดำเนินงานใน 2 ระดับ คือ ระดับการวางแผนระบบ (System Planning) และระดับปฏิบัติการ (Operation)

ในระดับการวางแผนระบบไฟฟ้าเพื่อเพิ่มกำลังการผลิตและการขยายสายส่งนั้นจะเริ่มด้วยการพยากรณ์อนาคตถึงความต้องการไฟฟ้าที่จะเพิ่มขึ้น แล้วจึงทำการวางแผนว่าจะขยายหรือสร้างโรงไฟฟ้าขึ้นใหม่ ณ ที่ใด จะใช้พลังงานชนิดใด จะเพิ่มหรือขยายสายส่งจากจุดใดไปจุดใด ขนาดแรงดันไฟฟ้าเป็นเท่าไร เป็นต้น ในการวางแผนขยายระบบไฟฟ้านี้วิศวกรระบบไฟฟ้าจำเป็นจะต้องทำการศึกษาและวิเคราะห์ระบบในด้านต่าง ๆ ดังนี้

3.1.1 การคาดคะเนความต้องการไฟฟ้า (Load Forecasting)

เป็นการคาดคะเนทั้งพลังไฟฟ้า (Demand requirement) และพลังงานไฟฟ้า (Energy requirement) ความต้องการพลังไฟฟ้าใช้เพื่อกำหนดกำลังผลิต (Capacity) ระบบส่งและระบบจำหน่าย ส่วนพลังงานความต้องการไฟฟ้าในแต่ละปีจะใช้เป็นตัวกำหนดชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอุปกรณ์ต่าง ๆ

3.1.2 การวิเคราะห์โหลดโฟลว์ (Load Flow Analysis)

เป็นการศึกษาสภาพการไหลของพลังไฟฟ้า (Real power) และพลังไฟฟ้ารีแอกตีฟ (Reactive Power) ในส่วนต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า ตลอดจนค่าแรงดันไฟฟ้า ณ บัส (Bus) ต่าง ๆ และการสูญเสียในระบบ ในสภาพของโหลดและการผลิตไฟฟ้าต่าง ๆ กัน การวิเคราะห์โหลดโฟลว์นอกจากจะเป็นการศึกษาที่ให้ภาพของการไหลของพลังไฟฟ้าทั้งสองชนิดในระบบแล้ว ยังใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ในด้านอื่น ๆ เช่น การลัดวงจร และเสถียรภาพของระบบอีกด้วย

3.1.3 การวิเคราะห์การลัดวงจร (Short-Circuit Analysis)

การวิเคราะห์การลัดวงจรมีความสำคัญมากในขั้นของการวางแผนทั้งนี้เพราะในการดำเนินการกิจการไฟฟ้านั้น เหตุขัดข้องที่ไม่คาดคิดอาจจะเกิดขึ้นได้เสมอ เช่น การลัดวงจรระหว่างเฟส หรือการลัดวงจรลงดิน หรือเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งทำให้เกิดการสัมผัสกับดิน เป็นต้น เหล่านี้จะทำให้เกิดกระแสจำนวนมากไหลในวงจร กระแสจำนวนนี้อาจมากกว่ากระแสในภาวะปกติหลายเท่า ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องติดตั้งเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่สามารถทนต่อกระแสดังกล่าวได้โดยตัวเองไม่เสียหาย การศึกษากระแสลัดวงจรที่อาจจะเกิดขึ้น เนื่องจากฟอลต์ (Fault) ณ จุดต่าง ๆ ที่สำคัญในระบบจะทำให้การวางแผนและการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันเป็นไปอย่างเหมาะสม

3.1.4 การศึกษาเสถียรภาพของระบบ (System Stability)

เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบขึ้น เช่น การลัดวงจร นอกจากจะมีกระแสลัดวงจรจำนวนมากไหล ณ จุดที่เกิดความบกพร่องในระบบแล้ว ยังมีผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบกล่าวคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางตัวที่ต่ออยู่ในระบบอาจจะหลุดจากซินโครนิสซึม (Syschronism) ได้ อาจทำให้เกิดผลเสียหายอื่นตามมา ดังนั้นในขั้นของการวางแผนจึงจำเป็นต้องศึกษาถึงเสถียรภาพของระบบ โดยเฉพาะในภาวะทรานเซียนท์ (Transient) เพื่อให้เราสามารถออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอุปกรณ์ในระบบให้สามารถหลีกเลี่ยงผลกระทบดังกล่าวที่อาจจะเกิดขึ้นได้

3.1.5 การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ (Reliability Analysis)

ระบบไฟฟ้าที่ดีจะต้องตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าในด้านความต่อเนื่องของบริการ และจะต้องหาทางป้องกันมิให้เกิดข้อขัดข้องจนไฟดับ หรืออย่างน้อยลดโอกาสที่จะเกิดข้อขัดข้องลงให้น้อยที่สุด นั่นคือให้ระบบมีความเชื่อถือได้สูงถึงระดับที่ยอมรับได้ในมาตรฐานสากล วิธีการที่จะทำเช่นนี้ได้ก็คือการพิจารณาเพิ่มการลงทุนในช่วงของการวางแผนระบบหรือการวางแผนขยายระบบ หรือไม่ก็ในช่วงของการดำเนินการหรือทั้งสองอย่าง ปัจจุบันการไฟฟ้าต่าง ๆ ในโลกได้หันมาให้ความสำคัญต่อปัญหาความเชื่อถือได้มากขึ้น

ส่วนในระดับปฏิบัติการ (Operation phase) การไฟฟ้าขนาดใหญ่จะทำการวิเคราะห์ เพื่อจัดการการจ่ายไฟฟ้าให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนต่อไปด้วย ได้แก่

3.1.6 การจัดการการจ่ายไฟฟ้าอย่างเหมาะสมทางเศรษฐกิจ (Economic Dispatch)

เป็นการจัดการเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบเพื่อให้ได้ค่าใช้จ่ายในการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อป้อนให้กับระบบรวมที่ราคาต้นทุนต่ำที่สุด โดยมีกำลังการผลิตไฟฟ้าเพียงพอกับความต้องการด้วย

3.1.7 การวิเคราะห์การสูญเสียในสายส่ง (Transmission Losses)

ในระบบที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ห่างกันมาก จะมีค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในระบบเข้ามาเกี่ยวข้องการวิเคราะห์การสูญเสียในสายส่งทำให้ทราบถึงคุณภาพของสายส่งเพื่อเป็นข้อมูลในการวางแผนการเลือกใช้สายส่ง หรือการลงทุนปรับปรุงระบบสายส่งต่อไป

3.1.8 การวิเคราะห์ด้านยูนิตคอมเมนต์ (Unit Commitment)

จากการที่เมืองขยายตัวและมีโรงงานอุตสากรรมตั้งขึ้นใหม่เรื่อย ๆ ส่งผลให้รูปแบบโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังเปลี่ยนแปลงไป โรงไฟฟ้าบางแห่งจึงอาจไม่คุ้มค่าที่จะเดินเครื่องเพื่อส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหากโหลดอยู่ไกล การเลือกให้โรงไฟฟ้าบางแห่งหยุดเดินเครื่องหรือลำดับการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าเพื่อให้สอดคล้องกับข้อจำกัดทางไฟฟ้ากำลัง คือการวิเคราะห์ด้านยูนิตคอมมิตเมนต์

3.2 การไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม (Optimal Power Flow, OPF)

3.2.1 การหารูปแบบเหมะสมที่สุด (Optimization) [14]

ในการวางแผนดำเนินการใด ๆ มักจะเกิดปัญหาที่ต้องการรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินการ เพื่อให้สามารถนำทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุด ทรัพยากรดังกล่าวประกอบด้วย คน เครื่องจักร วัตถุดิบ เวลา เงินทุน และสิ่งอื่น ๆ ที่จำเป็นต่อการผลิตหรือการให้บริการ

3.2.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการหารูปแบบเหมาะสมที่สุด

ปัญหาการหารูปแบบเหมาะสมที่สุดมักจะมีลักษณะที่คล้ายกัน 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

- การตัดสินใจ (Decision)

เมื่อมีปัญหาที่ต้องการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุด เช่น การตัดสินในหาปริมาณสินค้าที่จะต้องขนส่ง เป็นต้น ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว สามารถจำลองปัญหาให้อยู่ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกำหนดตัวแปรแสดงรูปแบบการตัดสินในในปัญหาดังกล่าว ตัวแปรดังกล่าวเรียกว่า ตัวแปรการตัดสินใจ (Decision Variable) เช่นใช้สัญลักษณ์ x_1, x_2, x_3... x_n เป็นตัวแปรแทนการตัดสินใจปริมาณสินค้าที่จะต้องขนส่ง เป็นต้น

- ข้อจำกัด (Constraint)

การตัดสินใจในปัญหาการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด จะมีปัจจัยที่มีอิทธิพลทำให้เกิดทางเลือกในการตัดสินใจ ปัจจัยดังกล่าว คือ ข้อจำกัด (Constraint) ซึ่งเป็นเงื่อนไขบังคับให้ผู้ตัดสินใจจะต้องเลือกทางเลือกที่อยู่ภายในขอบเขตของข้อจำกัดในแต่ละด้าน เช่น

ข้อจำกัดด้านแรงงาน จำนวนชั่วโมงในการผลิตที่ว่างอยู่ กำลังการผลิต เป็นต้น เมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการแก้ไขปัญหาจะต้องแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการตัดสินใจที่อยู่ในรูปของฟังก์ชั่นให้อยู่ภายใต้ข้อจำกัด โดยทั่วไปมี 3 รูปแบบคือ

เท่ากับข้อจำกัด : $g(x_1, x_2, x_3) = b$ (3.1)

น้อยกว่าหรือเท่ากับข้อจำกัด : $h(x_1, x_2, x_3) \leq c$ (3.2)

มากกว่าหรือเท่ากับข้อจำกัด : $h(x_1, x_2, x_3) \geq d$ (3.3)

ซึ่งแสดงว่าฟังก์ชั่นข้อจำกัดอาจอยู่ในรูปสมการ(Equality constraint) หรืออสมการ (Inequality constraint) ก็ได้

- วัตถุประสงค์ (Objective)

การตัดสินใจแก้ปัญหานอกจากจะต้องเลือกรูปแบบที่อยู่ภายใต้ข้อจำกัดแล้ว สิ่งสำคัญที่สุดที่จะต้องพิจารณาคือ ต้องเลือกรูปแบบที่ทำให้บรรลุวัตถุประสงค์ได้ ไม่ว่าจะเป็นวัตถุประสงค์ที่มีค่าต่ำสุดหรือสูงสุด เช่นการตัดสินใจหาปริมาณการผลิตสินค้าที่ดีที่สุดเพื่อให้เกิดผลกำไรสูงที่สุด หรือการตัดสินใจหาปริมาณสินค้าที่จะต้องขนส่ง เพื่อให้เกิดต้นทุนต่ำที่สุดเป็นต้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัตถุประสงค์จะแสดงอยู่ในรูปฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ (Objective function) ซึ่งมีรูปแบบทั่วไปคือ

Max หรือ Min : $f(x_1, x_2, ..., x_n)$ (3.4)

ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการหารูปแบบเหมาะสมที่สุดสามารถอธิบายในรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้

Max หรือ Min : $f(x_1, x_2, ..., x_n)$

ภายใต้ข้อจำกัด : $g(x_1, x_2, x_3) = b$

: $h(x_1, x_2, x_3) \leq c$

: $h(x_1, x_2, x_3) \geq d$ (3.5)

3.2.1.2 การแก้ปัญหาการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุด

นักคณิตศาสตร์และนักเศรษฐศาสตร์ได้พัฒนาเครื่องมือทางคณิตศาสตร์เพื่อแก้ปัญหาการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับชนิดของตัวแปรและชนิดของฟังก์ชั่นในแบบจำลองเช่นการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming),

การโปรแกรมเต็มจำนวนเชิงเส้น (Integer Linear Programming), การโปรแกรมที่ไม่เป็นเส้นตรง (Non Linear Programming)

3.2.2 ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม (Optimal power flow)

การไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม (Optimal power flow, OPF) โดยทั่วไปมีรูปแบบคือ

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & : f(x) \\ \text{S.t.} \quad & : g_i(x) = 0, \qquad I = 1,...,q \ \text{ and} \\ & : h_j(x) \le 0, \qquad j = q+1,..., m \end{aligned} \tag{3.6}$$

ฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ (Objective function) ของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมเป็นฟังก์ชั่นของต้นทุนในการผลิตและจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบ โดยต้นทุนดังกล่าวสามารถแสดงเป็นสมการควอดราติกเรียกว่าสมการต้นทุนแบบควอดราติก (Quadratic cost function) ได้ดังนี้

$$C_{P_{Gi}} = a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \tag{3.7.1}$$

$$C_{Q_{Gi}} = x_i + y_i Q_{Gi} + z_i Q_{Gi}^2 \tag{3.7.2}$$

โดย P_{Gi} คือกำลังที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า i จ่ายเข้าระบบไฟฟ้ากำลัง

ฟังก์ชั่นเป้าหมายสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแสดงในรูปผลรวมของสมาการต้นทุนแบบควอดราติกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวได้ดังนี้

$$f(x) = C_t = \sum_{i=1}^{N_g} (C_{P_{Gi}}) + \sum_{i=1}^{N_g} (C_{Q_{Gi}}) \tag{3.8}$$

ปัญหาการจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมมีเป้าหมายคือทำให้ต้นทุนการผลิตและจ่ายกำลังฟ้าโดยรวมต่ำที่สุด โดยไม่จำเป็นต้องทำให้ต้นทุนในพื้นที่เฉพาะใด ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังต่ำที่สุด

โดย C_t คือต้นทุนการผลิตโดยรวม;

a_i, b_i, c_i คือสัมประสิทธ์ของฟังก์ชั่นต้นทุน

P_{Gi} คือกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i

N_g คือจำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด

สมการข้อจำกัด (Equality constraint) ของปัญหาการจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมสะท้อนให้เห็นถึงธรรมชาติของระบบไฟฟ้ากำลังตามสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า กล่าวคือผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่แต่ละบัสเป็นศูนย์

ดังนั้น $g(x)$ คือ

$$\Delta P_P = P_{Gp} - P_{Cp} - \sum_{q=1}^{N_B} V_p V_q Y_{pq} \cos(\delta_p - \delta_q - \Theta_{pq}) \tag{3.9}$$

$$\Delta Q_P = Q_{Gp} - Q_{Cp} - \sum_{q=1}^{N_B} V_p V_q Y_{pq} \sin(\delta_p - \delta_q - \Theta_{pq}) \tag{3.10}$$

โดย P_{Gp} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตที่บัส p

Q_{Gp} คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ผลิตที่บัส p

P_{Cp} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ต้องการที่บัส p

Q_{Cp} คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ต้องการที่บัส p

V_p คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส p

V_q คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส q

δ_p คือ มุมแรงดันที่บัส p

δ_q คือ มุมแรงดันที่บัส q

Y_{pq} คือ ขนาดแอดมิตแตนซ์

Θ_{pq} คือ มุมแอดมิตแตนซ์

N_B คือ จำนวนบัสทั้งหมด

อสมการข้อจำกัด (Inequality constraints) ของปัญหาการจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมสะท้อนให้เห็นถึงข้อจำกัดของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังเช่น ขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง, หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปลี่ยนแท็ปได้, หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลื่อนเฟส

ดังนั้น $h(x)$ คือ

$$P_{G\min} \le P_{Gp} \le P_{G\max} \tag{3.11}$$

$$Q_{G\min} \le Q_{Gp} \le Q_{G\max} \tag{3.12}$$

$$V_{\min} \le V_p \le V_{\max} \tag{3.13}$$

$$\delta_{\min} \le \delta_p \le \delta_{\max} \tag{3.14}$$

เนื่องจากปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมเป็นปัญหาทางคณิตศาสตร์แบบไม่เป็นเชิงเส้นขนาดใหญ่ นักคณิตศาสตร์จึงได้พัฒนาอัลกอลิทึมที่ใช้ในการหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพขึ้นหลายวิธีโดยวิธีการคำนวณหลัก เช่น

- วิธีทำซ้ำแลมบ์ดา (Lambda iteration method) หรืออาจเรียกว่าเกณฑ์ต้นทุนส่วนเพิ่มเท่ากัน (Equal incremental cost criterion, EICC) วิธีนี้เป็นวิธีการพื้นฐานสำหรับปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic load dispatch) ตั้งแต่ยุคปี 1930
- วิธีเกรเดียนต์ (Gradient method)
- วิธีของนิวตัน (Newton's method)
- วิธีโปรแกรมเชิงเส้น (Linear programming method)
- วิธีจุดภายใน (Interior point method)

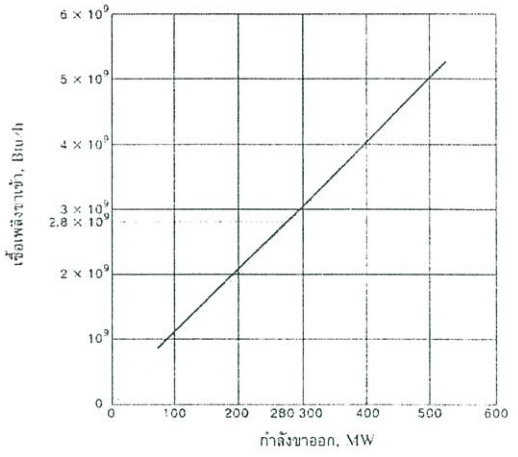
3.3 การหาคำตอบของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม (Optimal Power Flow Problem calculation)

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแสดงการประยุกต์ใช้วิธีทำซ้ำแลมบ์ดา (EICC) และโปรแกรมเชิงเส้น (LP) เพื่อแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าฟ้าอย่างเหมาะสมซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในชุดโปรแกรมแมตเพาเวอร์ (MATPOWER)

3.3.1 วิธีทำซ้ำแลมป์ดา (Lambda iteration method) [10]

ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Efficiency)

ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถหาได้โดยการวัดความร้อนขาเข้ากับพลังงานไฟฟ้าขาออกและเขียนผลลัพธ์ให้เป็นเส้นโค้งที่โหลดต่าง ๆ กัน เส้นโค้งนี้เรียกว่าเส้นโค้งขาเข้า – ขาออก (Input-Output Curve) หรือเรียกอีกอย่างว่าเส้นโค้งแสดงอนุพันธ์ของฟังก์ชั่นต้นทุน (Generation cost differential function curve) ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปความสำพันธ์ระหว่างเชื้อเพลิงขาเข้าต่อเวลา (BTU/H) กับกำลังขาออกที่มีหน่วยเป็นกิโลวัตต์ (kW) หรือ เมกกาวัตต์ (MW) ดังรูป 3.1 อย่างไรก็ดีสามารถให้แกนตั้งเป็นจำนวนเงินต่อเวลา ($/H) ก็ได้ โดยคูณด้วยราคาเชื้อเพลิง



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างเส้นโค้งแสดงเชื้อเพลิงขาเข้าและกำลังไฟฟ้าขาออก

จากรูปที่ 3.1 ถ้าลากเส้นตรงผ่านจากจุดกำเนิดไปยังจุดใด ๆ ที่เส้นโค้ง ส่วนกลับของความชัน (Slope) คือ กำลังขาออก (MW) หารด้วยอัตราเชื้อเพลิงขาเข้า (MBTU/H) หรืออัตราส่วนของพลังงานขาออก (MWH) ต่อเชื้อเพลิงขาเข้า (MBTU) ซึ่งอัตราส่วนนี้คือประสิทธิภาพเชื้อเพลิง (Fuel efficiency) เมื่อลากเส้นตรงผ่านจุดกำเนิดไปสัมผัสจุดต่ำที่สุดของเส้นโค้ง จุดสัมผัสนี้คือจุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดินเครื่องโดยมีประสิทธิภาพสูงสุด

- ต้นทุนส่วนเพิ่ม (Incremental cost)

สามารถพิสูจน์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ได้ว่า การใช้เชื้อเพลิงขาเข้าให้น้อยที่สุดสำหรับการจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 หน่วยจะเกิดขึ้นเมื่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองนั้นมีอัตราส่วนเพิ่มความร้อน (Incremental heat rate) เท่ากัน หรือกล่าวได้ว่า "ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าต่ำสุดเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองมีต้นทุนส่วนเพิ่มเท่ากัน" โดยต้นทุนส่วนเพิ่มดังกล่าวคือ ความชันของเส้นโค้งขาเข้า-ขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังสมาการที่ 3.15

$$\text{Incremental cost} = \frac{dF_i}{dP_i} \tag{3.15}$$

- การจ่ายโหลดอย่างประหยัดระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายในโรงจักรไฟฟ้า (Economic load dispatch between generator within a plant)

ถ้าสมมติให้โรงจักรไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าติดตั้งอยู่ 2 หน่วยจะต้องจ่ายโหลดจำนวนหนึ่งโดยการแบ่งกันจ่ายโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองหน่วย โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหน่วยหนึ่งมีต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงสูงกว่าอีกหน่วยหนึ่ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องถ่ายโอนโหลดที่จ่ายโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงสูง

มาให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีต้นทุนส่วนเพิ่มขอเชื้อเพลิงต่ำกว่าจ่ายโหลดแทน การทำเช่นนี้จะมีผลให้ต้นทุนรวมของเชื้อเพลิงลดลง การถ่ายโอนโหลดระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังคงดำเนินไปอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งต้นทุนส่วนเพิ่มของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 หน่วยมีค่าเท่ากัน ด้วยเหตุผลเดียวกันนี้จึงสามารถนำมาใช้กับโรงจักรไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากกว่า 2 หน่วย ดังนั้นหลักเกณฑ์ทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการจ่ายโหลดระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายในโรงจักรทุกหน่วยจะต้องเดินเครื่องให้มีต้นทุนส่วนเพิ่มของเชื้อเพลิงที่ค่าเดียวกัน ดังสมาการที่ 3.16

$$\lambda = \frac{dF_1}{dP_1} = \frac{dF_2}{dP_2} = ... = \frac{dF_n}{dP_n} \tag{3.16}$$

โดยที่ λ คือ ต้นทุนส่วนเพิ่มของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

- การจ่ายโหลดระหว่างโรงจักรไฟฟ้า (Load dispatch between plants)

วิธีการทางคณิตศาสตร์สำหรับการจ่ายโหลดระหว่างโรงจักรไฟฟ้าก็คล้ายกับการจ่ายโหลดระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายในโรงจักรไฟฟ้า เพียงแต่จะต้องคำนึงถึงกำลังสูญเสียในระบบส่งด้วยดังสมการที่ 3.17

$$\lambda = \frac{dF_i}{dP_i} S_i \tag{3.17}$$

โดยที่ S_i เรียกว่าเพนนัลตีแฟกเตอร์ (Penalty factor) ของโรงจักไฟฟ้า i

$$S_i = \frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_i}} \tag{3.18}$$

สำหรับกำลังสูญเสียในสายส่ง P_L จะมีค่าอนุพันธ์บางส่วนเทียบกับ P_i ดังนี้

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_i} = \frac{\partial}{\partial P_i} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} P_j B_{ji} P_i = 2 \sum_{j=1}^{n} P_j B_{ji} \tag{3.19}$$

3.3.2 วิธีโปรแกรมเชิงเส้น (Linear programming) [15]

การแก้ปัญหา OPF โดยวิธีโปรแกรมเชิงเส้นเป็นวิธีที่ได้ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมปัจจุบัน อย่างไรก็ตามอัลกอลิทึมของวิธีโปรแกรมเชิงเส้นที่ใช้ในชุด

โปรแกรม MATPOWER ซึ่งเป็นชุดโปรแกรมเพื่อการศึกษา จะเป็นรูปแบบพื้นฐานที่มีความซับซ้อนน้อยกว่าโปรแกรมระดับที่ผลิตออกขาย (Production grade software)

วิธีโปรแกรมเชิงเส้นใน MATPOWER จะสามารถเขียนรูปแบบโดยย่อโดยใช้ตัวแปร x ได้ดังนี้

$$\min_{x} f(x_2)$$

Subject to

$$g_1(x_1, x_2) = 0 \qquad \text{(สมการข้อจำกัด)}$$

$$g_2(x_1, x_2) \le 0 \qquad \text{(อสมการข้อจำกัด)} \qquad (3.20)$$

โดยที่ x_1 ประกอบด้วยขนาดแรงดันและมุมของระบบ (System voltage magnitudes and angles) และ x_2 ประกอบด้วยกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนจ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งรูปแบบดังกล่าวนี้เป็นรูปแบบทั่วไปของปัญหาโปรแกรมแบบไม่เป็นเชิงเส้น (General nonlinear programming problem) โดยเพิ่มสมมติฐานที่ว่าเมื่อให้ค่า x_2 สามารถใช้สมการข้อจำกัดหาคำตอบ x_1 ได้

การใช้ MATPOWER หาคำตอบ OPF ด้วยวิธีโปรแกรมเชิงเส้นบน MATLAB™ จะใช้ฟังก์ชั่น LPconstr เพื่อคำนวณฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์, ข้อจำกัดและค่าเกร์เดียนต์ นอกจากนั้นยังใช้ M-file อีกตัวคือ lpeqslvr.m เพื่อหาคำตอบ x_1 จากสมการข้อจำกัดโดยป้อนค่า x_2 รูปแบบนี้ทำให้ง่ายต่อการดัดแปลงแก้ไข

อัลกอลิทึมการแก้ปัญหาดังกล่าวมีดังนี้โดยตัวยก (Superscripts) คือจำนวนการทำซ้ำ (Iteration number)

ขั้นที่ 0: ตั้งการนับจำนวนการทำซ้ำเป็น 0 (k =0) และเลือกค่าเริ่มต้นที่เหมาะสมเรียกว่า x_2^0 สำหรับ x_2

ขั้นที่ 1: หาคำตอบของสมการข้อจำกัด (โหลดโฟล์ว) $g_1(x_1^k, x_2^k) = 0$ สำหรับ x_1^k

ขั้นที่ 2: ทำปัญหาให้เป็นเชิงเส้นและหาคำตอบด้วยวิธีโปรแกรมเชิงเส้น สำหรับ Δx

$$\min_{\Delta x} \left[\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x^k} \right] . \Delta x$$

Subject to

$$\left[\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x^k} \right] . \Delta x \le -g(x^k)$$

$$-\Delta \le \Delta x \le \Delta \qquad (3.21)$$

ขั้นที่ 3: ตั้งการนับ k = k+1 และ $x^k = x^{k-1} + \Delta x$

ขั้นที่ 4: ถ้า x^k ถึงขอบเขตสิ้นสุดให้หยุด ถ้ายังไม่ถึง ให้ทำขั้นที่ 5 ต่อ

ขั้นที่ 5: ปรับค่า Δ โดยใช้อัลกอลิทึมแบบทรัสต์รีเจียน [13] แล้วกลับไปเริ่มขั้นที่ 1

ขอบเขตสิ้นสุดแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial L}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x} + \lambda^T \leq tolerance_1 \qquad (3.22)$$

$$g(x) \leq tolerance_2 \qquad (3.23)$$

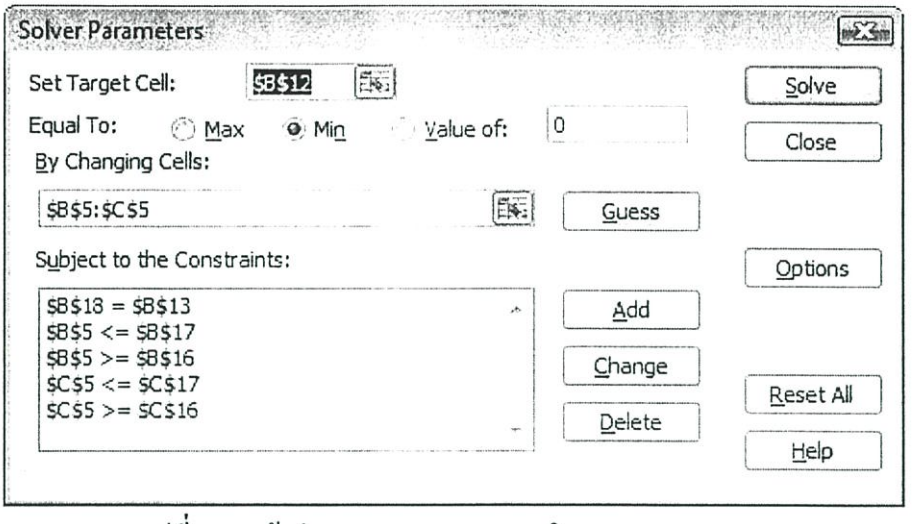
$$\Delta x \leq tolerance_3 \qquad (3.24)$$

โดยที่ λ คือตัวคูณลากรองต์ (Lagrange multiplier) ของปัญหาโปรแกรมเชิงเส้น อสมการที่ (3.22) แสดงถึงขนาดค่าเกรเดียนต์ อสมการที่ (3.23) แสดงถึงขอบเขตของข้อจำกัด อสมการที่ (3.24) แสดงถึงขนาดของค่าที่เปลี่ยนไปในแต่ละรอบการคำนวณ

3.4 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับศึกษาปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม

3.4.1 ไมโครซอล์ฟเอกเซล (MS-Excel) [16]

สำหรับการศึกษาระบบที่ไม่ซับซ้อนมากนักสามารถใช้เครื่องมือ Solver ของโปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization problem) ได้ด้วยการเรียกหน้าต่าง Solver Parameters ขึ้นมาจากนั้นกำหนดเซลเป้าหมาย (Taget cell) เพื่อให้เป็นฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ในที่นี้คือต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าต่ำสุด จากนั้นกำหนดข้อจำกัด (Constraint) ในที่นี้คือกำลังการผลิตต่ำสุดและสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อตั้งค่าต่าง ๆ ครบถ้วนแล้ว กด Solve โปรแกรมจะทำการทำซ้ำเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดตามฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์โดยอยู่ภายใต้ข้อจำกัดที่กำหนด



รูปที่ 3.2 หน้าต่าง Solver Parameters ใน Microsoft Excel

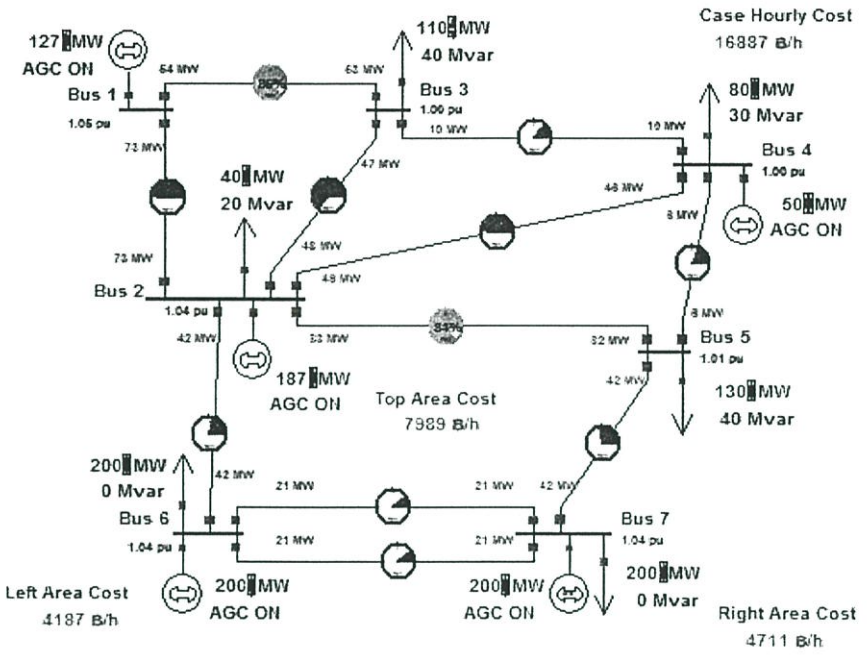
	A	B	C	D
1	การไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมสำหรับโรงจักรไฟฟ้า 2 โรง			
2				
3		Power plant 1	Power plant 2	หมายเหตุ
4	ตัวแปรการตัดสินใจ (Decision Variable)			
5	กำลังไฟฟ้าจ่ายออก (MW)	203.27	102.18	P_{Gi}
6				
7	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)			
8	สัมประสิทธิ์ของสมการต้นทุน a	300.00	200.00	
9	สัมประสิทธิ์ของสมการต้นทุน b	8.50	9.50	
10	สัมประสิทธิ์ของสมการต้นทุน c	0.01	0.02	
11	ต้นทุนการผลิต (บาท)	2,440.98	1,327.32	
12	ต้นทุนการผลิตรวม (บาท)	3,768.30		$Min\ f(x) = C_t = \sum_{i=1}^{N} (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2)$
13	กำลังไฟฟ้าจ่ายออกรวม (MW)	305.45		
14				
15	ข้อจำกัด (Constraints)			
16	กำลังการผลิตขั้นต่ำ	30.00	50.00	$P_{Gmin} \le P_{Gi} \le P_{Gmax}$
17	กำลังการผลิตสูงสุด	300.00	400.00	
18	กำลังไฟฟ้าที่ระบบต้องการ	305.45		P_{Gi}

Program / Data / Data N / Chart1 / Chart N / Chart3 / Sheet3 /

รูปที่ 3.3 แสดงการใช้เครื่องมือ Solver เพื่อหาต้นทุนการผลิตรวมต่ำสุด

3.4.2 เพาเวอร์เวิลด์ (Power world)

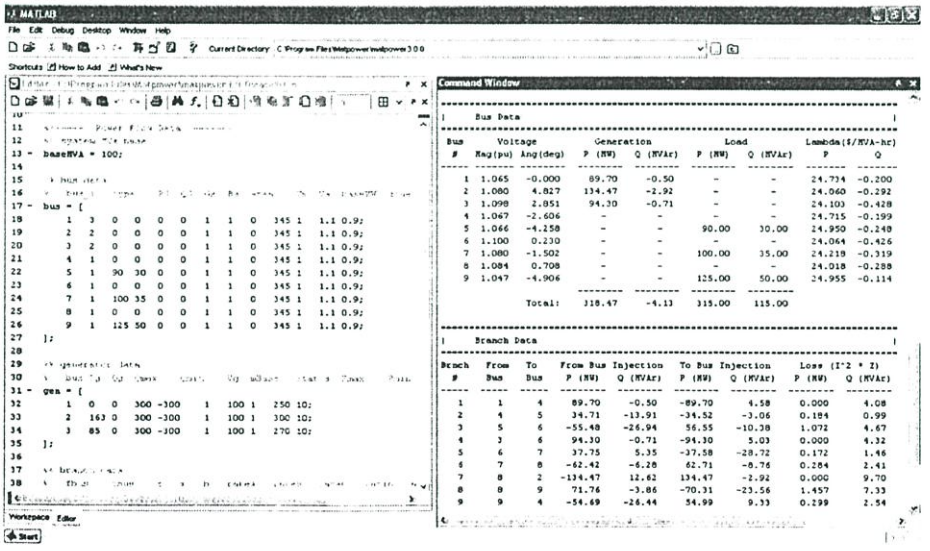
เพาเวอร์เวิลด์เป็นโปรแกรมที่สามารถหาคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow) และการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม (Optimal power flow) โดยสามารถแสดงผลเป็นแผนภาพเส้นเดียว (Single line diagram) ทำให้ผู้ใช้สามารถทำความเข้าใจและนำเสนอได้โดยง่าย



รูปที่ 3.4 แสดงการหาคำตอบ OPF ด้วยโปรแกรม Powerworld

3.4.3 MATPOWER [7]

MATPOWER เป็นชุดโปรแกรม M-file ของโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้หาคำตอบการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow) และการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม (Optimal power flow) ซึ่งพัฒนาโดยทีมงานของมหาวิทยาลัยคอร์เนลล์ โดยได้ออกแบบให้ผู้ทำการวิจัยด้านระบบไฟฟ้ากำลังสามารถนำไปใช้และแก้ไขได้โดยง่าย ภายในชุดโปรแกรมจะมีระบบไฟฟ้ากำลังที่สามารถใช้เป็นระบบทดสอบตั้งแต่ขนาดเล็กเช่นระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปจนถึงระบบจริงขนาดใหญ่เช่น ระบบ 2746 บัสของประเทศโปแลนด์ หรือระบบมาตรฐานเช่นระบบ IEEE118 บัส



รูปที่ 3.5 แสดงการใช้ MATPOWER เพื่อแก้ปัญหา Optimal power flow

บทที่ 4

โครงข่ายประสาทเทียม

(Artificial Neural Networks)

โครงข่ายประสาทเทียม หรือ ANNs เป็นปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) รูปแบบหนึ่ง ซึ่งเป็นระบบการคำนวณที่ทำงานเลียนแบบระบบสมองมนุษย์ เพื่อใช้ประโยชน์ในการคาดคะเนผลลัพธ์จากข้อมูลที่มีอยู่ เช่น การพยากรณ์หุ้นในตลาดหลักทรัพย์ การประมาณค่าฟังก์ชั่นต่าง ๆ และในปัจจุบันได้มีการนำเอา ANNs มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลัง

4.1 ที่มาของโครงข่ายประสาทเทียม [17]

โครงข่ายประสาทเทียมได้รับการพัฒนาจากแนวคิด 3 เรื่อง คือ

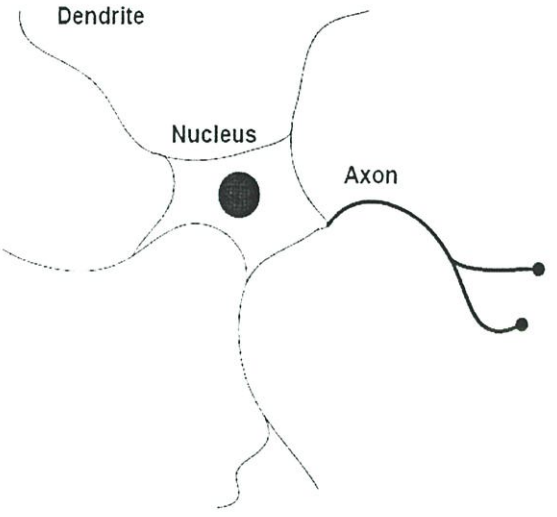
(1) การเลียนแบบการทำงานของเซลล์สมองของมนุษย์

(2) การหาความสัมพันธ์ของเหตุและผลซึ่งยังหาฟังก์ชันออกมาโดยตรงไม่ได้

(3) การทำให้คอมพิวเตอร์คิดและตัดสินใจได้ด้วยตัวเอง

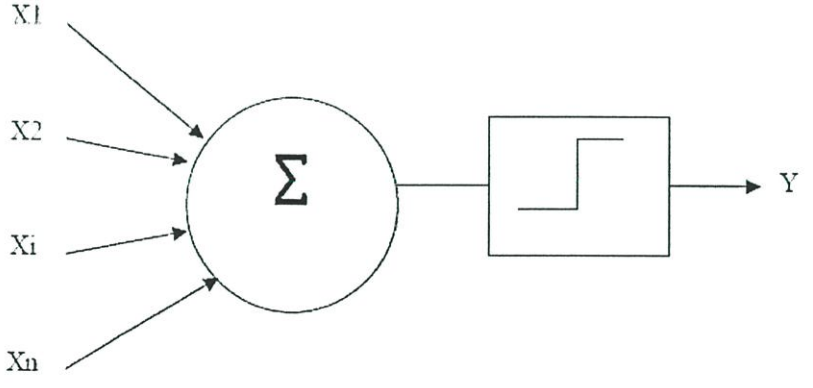
4.1.1 การเลียนแบบการทำงานของเซลล์สมองของมนุษย์

ผู้ที่คิดค้นและศึกษา ANNs เชื่อว่ามนุษย์มีความฉลาดเพราะมีสมองที่ใหญ่กว่าสัตว์เมื่อเปรียบเทียบโดยการวัดน้ำหนักของสมองกับน้ำหนักตัว ความฉลาดของมนุษย์สามารถทำให้มนุษย์ สามารถคิดและตัดสินใจได้เองแม้ว่าสิ่งแวดล้อมจะแตกต่างไปจากที่เคยประสบอย่างไร แม้ว่าข้อมูลจะไม่สมบูรณ์หรือแม้ว่าเซลล์สมองบางเซลล์จะเสียหายไป ความสามารถเหล่านี้คอมพิวเตอร์ไม่สามารถทำได้ เพราะคอมพิวเตอร์จะคิดและตัดสินใจไม่ได้ในสภาพแวดล้อมใหม่ ๆ ที่ไม่เคยได้รับการตั้งโปรแกรมเอาไว้ นอกจากนั้นหากมีข้อมูลไม่ครบถ้วนเช่น ข้อมูลหายไป 1 ค่า ก็ไม่สามารถคำนวณผลลัพธ์ออกมาได้ และหากโปรแกรมเสียหายไป 1บรรทัด คอมพิวเตอร์ก็ทำงานไม่ได้แล้ว ดังนั้น จากความสามารถของสมองที่เหนือกว่าคอมพิวเตอร์ที่ใช้กันในปัจจุบันนี้ ทำให้เชื่อว่าคอมพิวเตอร์รูปแบบใหม่ที่จะไร้ปัญหาดังกล่าว จะต้องทำงานเหมือนสมองของมนุษย์จึงต้องมาศึกษาว่าจริง ๆ แล้วสมองของมนุษย์ทำงานกันอย่างไรในเบื้องต้นก่อน จากนั้นจึงมาคิดว่าจะพยายามสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาเลียนแบบการทำงานของสมองได้หรือไม่ สมองของมนุษย์ประกอบด้วยเซลล์สมองจำนวนมาก หากศึกษาพร้อม ๆ กันทุกเซลล์คงเป็นเรื่องที่ซับซ้อนมาก ดังนั้นเพื่อให้ง่ายก็จะเริ่มทำการศึกษาทีละเซลล์ ซึ่งจากข้อมูลทางวิทยาศาสตร์พบว่า เซลล์สมองแต่ละเซลล์มีส่วนประกอบดังนี้



รูปที่ 4.1 โครงสร้างหลักของเซลล์สมอง 1 เซลล์

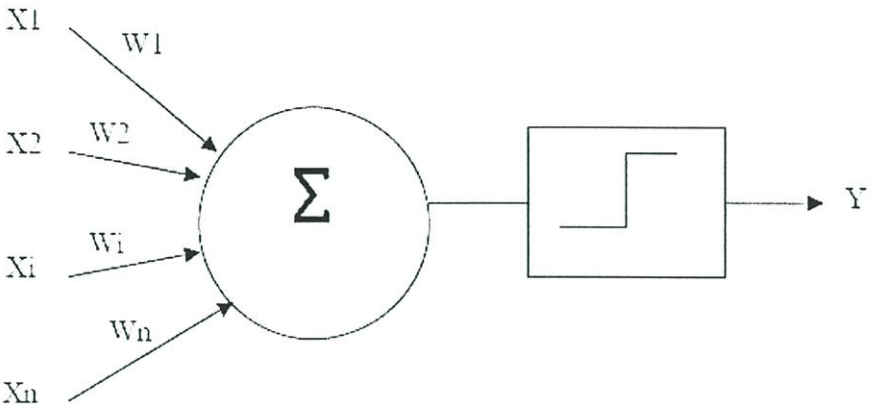
จากรูปที่ 4.1 เซลล์สมองแต่ละเซลล์มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ หนึ่ง Nucleus คือตัวของเซลล์ ทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณ สอง Axon คือ ตัวรับสัญญาณ ซึ่งมีลักษณะเป็นแขนงย่อย และมีจำนวนมาก และส่วนที่สาม คือ Dendrite เป็นตัวส่งสัญญาณออกไปยังเซลล์สมองตัวอื่น มีลักษณะเป็นแขนงใหญ่เพียงแขนงเดียวการทำงานของเซลล์สมองนั้นแท้จริงแล้วก็คือการทำการรับและส่งสัญญาณ ซึ่งอาจจะมีการแปลงสัญญาณระหว่างทางที่ Nucleus แล้วยิงสัญญาณไปยังเซลล์สมองอื่น ๆ ต่อไป จากความรู้นี้ก็เพียงพอที่จะนำมาสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้



รูปที่ 4.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่เลียนแบบเซลล์สมอง 1 เซลล์

จากรูปที่ 4.2 แนวคิดของแบบจำลองคณิตศาสตร์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเริ่มต้นที่การมีสัญญาณนำเข้า (Input) คือ X จำนวนหนึ่งเข้ามารวมกันอยู่ในที่ ๆ หนึ่ง แล้วก่อนที่จะยิงสัญญาณนั้นออกไปก็อาจจะมีการแปลงสัญญาณ ซึ่งการแปลงสัญญาณนี้อาจจกระทำผ่านฟังก์ชั่นบางอย่าง แล้วจึงจะออกมาเป็นสัญญาณส่งออก (Output) คือ Y ที่จะส่งไปยังเป็น อินพุต ของเซลล์สมองตัวต่อไป

ต่อมาเมื่อได้แบบจำลองเซลล์สมองแล้ว ก็อาจจะพิจารณาได้ว่าในบรรดาข้อมูลนำเข้าทั้งหลายนั้น (X) ข้อมูลแต่ละเรื่องอาจจะมีความสำคัญมากน้อยต่างกัน จึงมีการกำหนดค่าน้ำหนักให้กับแต่ละข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 3 ดังนี้



รูปที่ 4.3 การกำหนดน้ำหนักของข้อมูลแต่ละเรื่อง

ดังนั้นหลังจากการรวมสัญญาณนำเข้าซึ่งทำการให้น้ำหนักของความสำคัญของข้อมูลแล้ว เมื่อนำมารวมกันเข้าทุกข้อมูลก็จะได้เป็นผลลัพธ์ออกมา ดังสมการที่ 4.1 ดังนี้

$$w_1x_1 + w_2x_2 + ... + w_nx_n = \sum_{i=1}^{n} w_ix_i = F(x) \qquad (4.1)$$

ผลลัพธ์ที่ได้ออกมาดังกล่าวหากจะนำต้องมาแปลงสัญญาณ ก่อนที่จะส่งต่อออกไปจะนำมาแปลงสัญญาณอย่างไร การแปลงสัญญาณนี้มีเหตุผลอย่างน้อยสองประการ คือ หนึ่ง เพื่อที่จะสะท้อนการตัดสินใจบางอย่าง เช่น การสั่งการให้ทำ หรือ ไม่ทำ และสอง เพื่อที่จะจัดระเบียบของอินพุต ที่เซลล์อื่นจะได้รับต่อไป

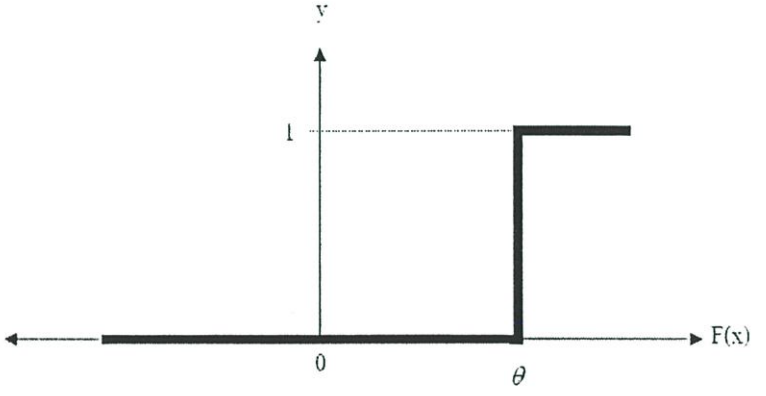
การเลือกรับและส่งสัญญาณเป็นเลข 0 กับ 1 นั้นได้รับแรงบันดาลใจมาจาก Boolean ซึ่งเชื่อว่า "สรรพสิ่งในโลกจริง (Real world) สามารถที่จะสร้างได้ในโลกเสมือนจริง (Virtual) ได้ทั้งหมด" ดังนั้นหาก ANNs สามารถประมวลผลสัญญาณ 0 และ 1 ได้แล้ว ก็หมายความว่า ANNs สามารถที่จะจำลองเอาสรรพสิ่งโลกจริงเข้ามาประมวลผลได้ทั้งหมดทุกเรื่อง

ต่อมาเมื่อมีการพัฒนาเรื่องดิจิตอล สัญญาณในการคำนวณทางดิจิตอลก็คือ 0 กับ 1 ซึ่งการที่คอมพิวเตอร์รู้จักเลขฐานสองนี้ดี ทำให้ไม่ต้องกังวลว่าคอมพิวเตอร์จะไม่เข้าใจ ในทางเศรษฐศาสตร์เลข 0 กับ 1 ก็ยังมีประโยชน์ในเรื่องการตัดสินใจ (Choice model) ว่าจะเลือกทางไหน ซ้ายหรือขวา ทำหรือไม่ทำ บริโภคหรือไม่บริโภค ลงทุนหรือไม่ลงทุน เป็นต้น ดังนั้น ในการศึกษา ANNs เบื้องต้นจึงจะแปลงสัญญาณ F(x) ให้เป็น 0 หรือ 1 แล้วค่อยส่งต่อออกไปยังเซลล์สมองอื่น

ในการแปลงสัญญาณ F(x) ให้เป็น 0 หรือ 1 นั้น เราจะแปลงผ่านฟังก์ชั่นทำนบ (threshold function หรือ hard limiter) โดยเลียนแบบการทำงานของสมองคือ **"เมื่อเซลล์สมองถูกกระตุ้นถึงจุด ๆ หนึ่งแล้วจึงจะมีการยิงสัญญาณต่อ"** จึงมีแนวคิดว่า หากค่าของ F(x) มีค่าเกินค่า ๆหนึ่ง (เช่น θ) จะให้ค่าเป็น 1 แต่หากไม่เป็นเช่นนั้นก็จะให้ค่าเป็น 0 ดังนี้

$$y = \begin{cases} 1 & w_1x_1 + w_2x_2 + \ldots + w_nx_n > \theta \\ 0 & w_1x_1 + w_2x_2 + \ldots + w_nx_n \leq \theta \end{cases} \qquad (4.2)$$

ฟังก์ชั่นทำนบที่ใช้ในการแปลงสัญญาณ มีรูปแบบปรากฏดังรูปที่ 4.4 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.4 ฟังก์ชั่นทำนบ

ต่อมาภายหลังจึงได้ปรับเปลี่ยนจากการใช้ฟังก์ชั่นทำนบเป็นฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) อื่น ๆ เพื่อให้สอดคล้องกับคำตอบที่ต้องการ ดังรูปที่ 4.6

แบบจำลองคณิตศาสตร์ดังกล่าว จึงเป็นต้นแบบของการพัฒนาคอมพิวเตอร์ที่สามารถทำงานได้เลียนแบบการทำงานของสมองมนุษย์

4.1.2 การหาความสัมพันธ์ของเหตุและผลซึ่งยังหาฟังก์ชั่นออกมาโดยตรงไม่ได้

หากใครสักคนพบว่าน่าจะมีความสัมพันธ์ของเหตุและผลบางอย่าง แต่ไม่สามารถหาฟังก์ชั่นความสัมพันธ์กันได้อย่างแน่นอนทางคณิตศาสตร์ แล้วจะแก้ปัญหานี้อย่างไร

การแก้ปัญหาทำโดยการจดบันทึกสิ่งที่เกิดขึ้น (Observations) จากนั้นนำมาคำนวณทางสถิติว่าสิ่งที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ กันนั้นน่าจะมีความสัมพันธ์กันอย่างไร ภายใต้การสมมุติลักษณะ

ความสัมพันธ์ เช่น ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง (Linear function) หรือ ความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรง (Non-Linear function)

แนวคิดของ ANNs นั้นจะเชื่อมโยงเหตุ (x) และผล (y) ผ่านกล่องดำกล่องหนึ่ง ซึ่งไม่รู้ว่าข้างในกล่องดำนั้นมีฟังก์ชั่นหน้าตาอย่างไรอยู่ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การเชื่อมโยงเหตุและผลผ่านกล่องดำ

รูปแบบฟังก์ชั่นของ ANNs ภายในกล่องดำนั้นสามารถแสดงได้ แต่การตีความค่าสัมประสิทธิ์แต่ละตัวอาจจะไม่มีความหมาย ยิ่งหากสร้าง ANNs ให้มีความซับซ้อนมากขึ้นเรื่อย ๆก็จะยากมากที่จะมาวิเคราะห์ความหมายของสัมประสิทธิ์แต่ละตัว ดังนั้น ผู้ใช้ ANNs จึงไม่สนใจสัมประสิทธิ์ดังกล่าว หากแต่สนใจว่าหากมีอินพุตใหม่ แล้วผลลัพธ์จะออกมาอย่างไร

ด้วยเหตุผลที่ไม่ทราบว่า ANNs คิดออกมาได้อย่างไร ทำให้อาจกล่าวได้ว่า ANNs ไม่สามารถอธิบายสิ่งที่คำนวณออกมาได้ว่าเป็นเพราะอะไร ซึ่งเป็นจุดอ่อนที่แก้ไขได้ด้วยการสร้าง ANNs ให้สอดคล้องกับ Logic แล้วจึงอธิบายผลลัพธ์ที่ออกมาด้วย Logic นั้นแทน

อย่างไรก็ตามในการนำไปใช้จริงนั้น ANNs ที่มีอยู่ในประเทศไทย เช่น ในการทำนายลักษณะของผู้ที่น่าจะมีเครดิตไม่ดีที่ไม่สมควรให้เงินกู้ มักจะเป็นเครื่องที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ทำให้รูปแบบฟังก์ชั่นเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อมของต่างประเทศ เมื่อนำมาคำนวณ อินพุต ในสิ่งแวดล้อมแบบไทย ๆ แล้วจึงให้คำทำนายออกมาอาจจะคลาดเคลื่อนไปมาก

ANNs ที่จะใช้งานได้ดีในประเทศไทยจึงควรต้องนำมาปรับแต่งในประเทศไทย โดยการเรียนรู้ข้อมูลแบบไทย ๆ จึงจะทำนายผลได้อย่างถูกต้องยิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่นเครื่องดักสัญญาณสะท้อน (Echo) ของโทรศัพท์ ซึ่งจากโรงงานได้ติดตั้งมาเฉพาะ ANNs ที่ปราศจากข้อมูลใด ๆ เลย แต่ให้เริ่มมาเรียนรู้ข้อมูลในสิ่งแวดล้อมที่ใช้งานจริงANNs จะเริ่มเรียนรู้และปรับสัญญาณจนกระทั่งสัญญาณสะท้อนหายไปได้ในที่สุด

ดังนั้น ANNs ที่เรียนรู้ข้อมูลมาจากสังคมตะวันตกแล้วนำมาใช้ในสังคมตะวันออกโดยไม่สามารถปรับข้อมูลใหม่ตามสังคมตะวันออกจึงย่อมทำให้ทำนายผิดพลาดได้ เฉกเช่นเดียวกับ ผู้ที่อาศัยอยู่ในสังคมตะวันตกนาน ๆ แล้วมาใช้ชีวิตในสังคมตะวันออก แต่ไม่ยอมเรียนรู้อะไรใหม่ ๆ อาจจะเพราะไม่มีใครสอน (ANNs แบบ Supervised learning แต่ไม่มีข้อมูลใหม่เข้ามาให้เรียน)

หรือ ไม่สามารถคิดที่จะปรับปรุงตัวเอง (แต่ ANNs แบบ Unsupervised learning สามารถเรียนรู้เองได้โดยไม่มีใครสอน) ก็ย่อมทำอะไรผิดพลาดในสังคมตะวันออกอยู่เป็นประจำ

4.1.3 การทำให้คอมพิวเตอร์คิดและตัดสินใจได้ด้วยตัวเอง (Soft Computing)

รถที่วิ่งอยู่บนพื้นผิวของดาวอังคารบังคับทิศทางได้อย่างไร หากใช้สัญญาณบังคับวิทยุก็จะต้องส่งจากดาวอังคารมายังโลกแล้วส่งย้อนกลับไปดาวอังคารซึ่งใช้เวลาไม่ต่ำกว่า 30 นาทีต่อครั้ง ความล่าช้าเช่นนี้อาจจะทำให้การบังคับรถไม่ทันการหากรถกำลังวิ่งจะตกเหวที่ดาวอังคาร ดังนั้นการควบคุมรถจึงต้องใช้ความรู้แบบใหม่ที่ทำให้คอมพิวเตอร์ประจำรถคิดเองได้ทันทีที่ได้รับสัญญาณภาพเข้ามา

วิธีหนึ่งที่จะทำให้คอมพิวเตอร์คิดได้ด้วยตัวเองก็คือการให้คอมพิวเตอร์เคยผ่านสถานการณ์นั้น ๆ มาก่อน โดยการให้เรียนรู้จากบทเรียนต่าง ๆ (Supervised learning) แต่สถานการณ์บนดาวอังคารซึ่งมนุษย์ยังมีข้อมูลน้อยอาจจะต่างไปจากบทเรียนที่เคยฝึก ดังนั้นรถที่ลงไปยังพื้นผิวดาวอังคารจึงต้องตัดสินใจเองในสถานการณ์ที่ไม่คุ้นเคยเช่นนั้นได้ เฉกเช่นเดียวกับมนุษย์อวกาศที่ลงพื้นผิวดวงจันทร์เป็นครั้งแรกก็ไม่เคยเรียนรู้สถานการณ์บางอย่างที่เกิดขึ้นบนดวงจันทร์มาก่อนแต่ก็ยังคิดและตัดสินใจได้ คอมพิวเตอร์ก็ต้องทำได้อย่างนั้นเหมือนกันไม่ใช่ไม่ยอมทำงานเลย

หลักการคิดสำหรับเรื่องการทำให้คอมพิวเตอร์สามารถคิดได้เองนั้นคือ การมี อินพุต (X) โดยที่ไม่มี เอาต์พุต (Y) มาเป็นบทเรียน ทำให้คอมพิวเตอร์ต้องพยายามหาทางประมวลผลสัญญาณนำเข้าโดยใช้วิธีการใดก็ตามที่จะทำให้ได้ผลลัพธ์ออกมาดูมีความหมาย เทคนิคหนึ่งคือ การสร้าง ANNs แบบ Unsupervised learning เช่น Self Organizing Maps (SOMs) อย่างไรก็ตาม รถที่ลงบนพื้นผิวดาวอังคารก็ยังสามารถใช้ ANNs แบบ Supervised learning เช่น แบบ Back Propagation ซึ่งเรียนรู้พื้นผิวดาวอังคารจากสถานการณ์จำลองที่ได้จัดให้ลองฝึกขับมาก่อนแล้ว

การให้คอมพิวเตอร์คิดและตัดสินใจด้วยตนเองมีประโยชน์สำหรับงานทั่ว ๆ ไปอย่างน้อย 3 ประการ ดังนี้

(1) การตัดสินใจอย่างเร่งด่วนที่รอให้มนุษย์ตัดสินใจให้ไม่ได้

(2) การทำงานโดยอัตโนมัติ ซึ่งมนุษย์สามารถละเว้นการทำงานได้ เช่น ระบบการบินอัตโนมัติของเครื่องบิน (Autopilot)

(3) การทำงานต่อเนื่องเป็นเวลานาน ซึ่งมนุษย์สามารถพักผ่อนระหว่างนั้นได้

สิ่งจำเป็นสำหรับการทำงานทั้งสามประเภทคือการทำให้ข้อมูลไหลเข้ามาสู่ ANNs อย่างต่อเนื่อง แล้วให้ ANNs ทำงานต่อเนื่องตลอดเวลาด้วย หรือหากจะกล่าวอย่างเฉพาะเจาะจงลงไปก็คือต้องหาวิธีถ่ายโอนข้อมูลจากศูนย์ FIC (Financial and Investment Centre) เข้ามาสู่โปรแกรม ANNs แล้วเปิดคอมพิวเตอร์ให้ ANNs ทำงานทั้ง 24 ชั่วโมง ซึ่งวิธีการทำอย่างหนึ่งคือติดตั้ง ANNs

ในเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมดึงข้อมูล Reuter แล้วหาทางเชื่อมเอาข้อมูลจาก Reuter เข้าสู่ ANNs โดยอัตโนมัติ ข้อมูลที่ต้องการ เช่น SET Index ราคาหลักทรัพย์ อัตราแลกเปลี่ยนเงินตราต่างประเทศ ราคาน้ำมัน และราคาทองคำ เป็นต้น

ในห้างสรรพสินค้าที่มีการไหลของข้อมูลการซื้อขายสินค้าที่ตรวจพบจากระบบ Barcode ในแต่ละวันจะทำการสรุปข้อมูลแล้วส่งเข้าวิเคราะห์ด้วย ANNs ทุกวัน นอกจากนั้นสถาบันการเงินที่สามารถเชื่อมโยงข้อมูลการซื้อขายเข้ากับข้อมูลบัตรเครดิตแล้วนำข้อมูลนั้นมาวิเคราะห์ด้วย ANNs ก็จะสามารถทราบพฤติกรรมของผู้บริโภคได้เป็นอย่างดี

ในด้านการขนส่ง หากสามารถตั้งจุดตรวจจับปริมาณการจราจรได้ในจุดสำคัญของโครงข่ายการจราจรแล้วส่งข้อมูลเหล่านั้นเข้าสู่ ANNs ก็จะสามารถวิเคราะห์เพื่อหาจังหวะการเปิดปิดไฟจราจรเพื่อให้เกิดการไหลเวียนที่ราบรื่นและสมดุลได้ทั้งเมือง

โดยสรุปแล้ว ข้อมูลที่ไหลเวียนอยู่ตลอดเวลาเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับ ANNs แบบนี้ ซึ่งหากสามารถตรวจจับและส่งข้อมูลเข้าสู่ ANNs ได้แล้วก็จะสามารถวิเคราะห์ข้อมูลเหล่านั้นได้

4.2 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม [18]

ANNs ประกอบด้วยเซลล์ประสาท (Neural) ซึ่งจำลองมาจากการทำงานของระบบสมองมนุษย์ โดยใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอน (Transfer function), ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และค่าไบแอส (Bias) เป็นเครื่องมือจำลองคุณสมบัติของเซลล์ประสาท

เซลล์ประสาทหลายๆ ตัวเข้าจะถูกเชื่อมต่อด้วยกันให้เกิดเป็นลักษณะของโครงข่ายเป็นชั้นๆ หรือที่เรียกว่า ชั้น (Layer) ซึ่งเซลล์ประสาทแต่ละตัวที่อยู่ในชั้นเดียวกันจะไม่มีการเชื่อมต่อถึงกัน

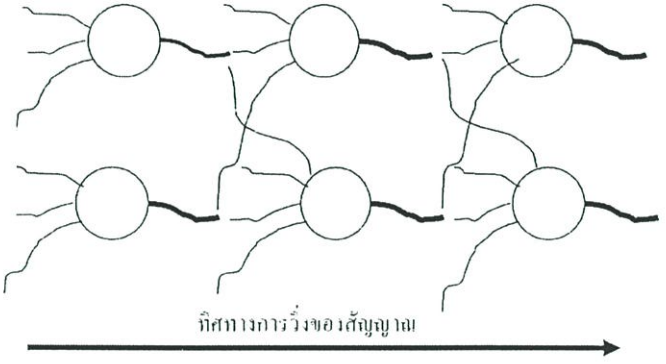
4.2.1 การจัดประเภทของโครงข่ายประสาทเทียมตามลักษณะการใช้งาน

สามารถแบ่งโครงข่ายประสาทเทียมออกเป็นประเภทไดนามิค (Dynamic category) และประเภทสแตติกหรือเรียกอีกอย่างว่าแบบป้อนไปข้างหน้า (Static category or Feedforward network) ซึ่งไม่มีการป้อนกลับ (Feedback) หรือการหน่วงเวลา (Delay) และคำนวณเอาต์พุตโดยตรงจากอินพุตผ่านการเชื่อมต่อแบบป้อนไปข้างหน้า การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมประเภทสแตติกแสดงในโครงข่ายแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้นแพร่ค่าย้อนกลับในหัวข้อที่ 4.2.1.1 ส่วนโครงข่ายประสาทเทียมประเภทไดนามิค เอาต์พุตไม่เพียงขึ้นอยู่กลับอินพุต ณ เวลาปัจจุบันเท่านั้น แต่ขึ้นอยู่กับอินพุตหรือเอาต์พุตหรือสถานะของโครงข่าย ณ ช่วงเวลาก่อนหน้านั้นด้วย ตัวอย่างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบไดนามิคเช่นโครงข่ายประสาทเทียมแบบเอลแมนซึ่งมีการเชื่อมต่อแบบป้อนกลับหรือเรียกอีกอย่างว่าการเชื่อมต่อแบบรีเคอร์เรนต์ ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.2.1.2

โดยทั่วไปแล้วโครงข่ายประเภทไดนามิคจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าโครงข่ายประเภทไดนามิคถึงแม้ว่าจะฝึกสอนยากกว่าก็ตาม เนื่องจากการที่โครงข่ายประเภทไดนามิคมีความจำ (Memory) ทำให้สามารถถูกฝึกสอนให้เรียนรู้รูปแบบที่เป็นลำดับหรือแปรผันตามเวลา

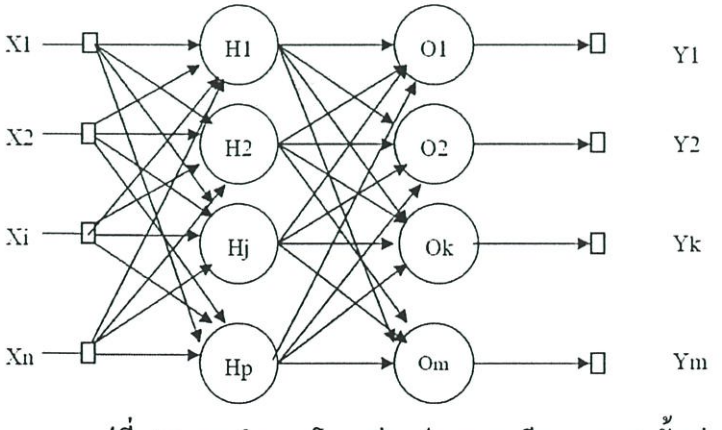
4.2.1.1 โครงข่ายแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้นแพร่ค่าย้อนกลับ (Back Propagation Multilayer Feed Forward Networks) [17]

สมองของมนุษย์ไม่ได้มีเพียงเซลล์เดียว หากแต่ต่อเชื่อมกันเป็นโครงข่าย โดยที่เซลล์สมอง (Neuron) แต่ละตัวก็จะเชื่อมเอา Axons ของตัวเองเข้ากับ Dendrite ของตัวก่อนหน้าหลาย ๆ ตัว และเชื่อมเอา Dendrite ของตัวเองเข้ากับ Axons ของตัวถัดไปอีกหลายตัว และการทำงานของเซลล์สมองนับล้านตัวทำงานไปพร้อม ๆ กัน ดังรูปที่ 4.6 ต่อไปนี้



รูปที่ 4.6 การทำงานของเซลล์สมองเป็นโครงข่าย

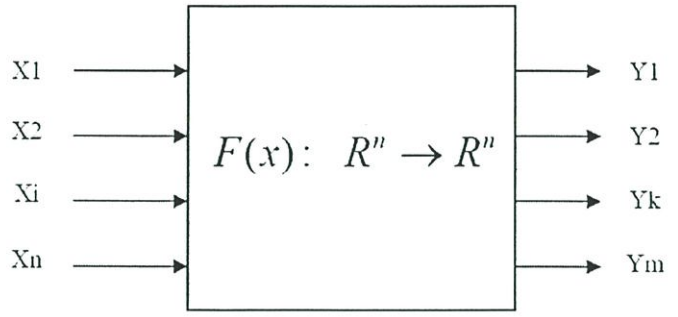
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้แทนการทำงานของเซลล์สมองแบบเครือข่ายจึงมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 4.7 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.7 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบ 1 ชั้นซ่อน

เซลล์สมองที่ต่อกันเป็นโครงข่ายดังแสดงในรูปที่ 4.17 แล้วนำสัญญาณส่งต่อไปข้างหน้า

อย่างเดียวเรียกว่า Multilayer Feed Forward Neural Networks หรือ ANNs แบบ MLFF เป็นฟังก์ชั่นของ R^n ไปยัง R^n ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ฟังก์ชั่นการทำงานของ ANNs แบบโครงข่าย MLFF

วิธีการคำนวณแบบแพร่ย้อนกลับ (Back Propagation)

ให้องค์ประกอบของ ANNs แบบแพร่ย้อนกลับมีดังต่อไปนี้

- อินพุต มีจำนวน n ตัว คือ $X_1, X_2, ..., X_n$
- เอาต์พุต มีจำนวน m ตัว คือ $Y_1, Y_2, ..., Y_m$
- Neuron ใน ชั้นซ่อน มีจำนวน p ตัว $H_1, H_2, ..., H_p$
- Neuron ใน เอาต์พุต Layer มีจำนวน m ตัว คือ $O_1, O_2, ..., O_m$
- ค่าน้ำหนักจากชั้น อินพุต สู่ชั้นซ่อน สำหรับ Neuron แต่ละตัวในชั้น Hidden Layer มีจำนวน n+1 ตัว คือ $W_{0j}^H, W_{1j}^H, W_{2j}^H, ..., W_{ij}^H, ..., W_{nj}^H$

ดังนั้น เมื่อมีจำนวน อินพุต จำนวน n ตัว และมีนิวรอลใน ชั้นซ่อน จำนวน p ตัว แล้ว จะได้ว่าจำนวนค่าน้ำหนักในส่วนนี้มีจำนวนทั้งหมดเท่ากับ (n+1)p ตัว

- ค่าน้ำหนักจากชั้นซ่อน สู่ชั้น เอาต์พุต สำหรับ Neuron แต่ละตัวในชั้น เอาต์พุต มีจำนวน m+1 ตัว คือ $W_{0k}^O, W_{1k}^O, W_{2k}^O, ..., W_{jk}^O, ..., W_{pk}^O$

ดังนั้น เมื่อมีจำนวนนิวรอลใน ชั้นซ่อน จำนวน p ตัว และมี เอาต์พุต จำนวน m ตัว แล้ว จะได้ว่าจำนวนค่าน้ำหนักในส่วนนี้มีจำนวนทั้งหมดเท่ากับ (p+1)m ตัว

การปรับค่าน้ำหนักของ ANNs แบบแพร่ย้อนกลับมีกฎการปรับค่าน้ำหนักที่ต่างกันใน Layer แต่ละชั้น ดังนี้

การปรับค่าน้ำหนักในชั้น เอาต์พุต

จาก Delta rule; $\Delta w = \eta (t - y) f x'$

ค่าน้ำหนักแต่ละตัวที่เชื่อมโยงจาก Neuron ใน ชั้นซ่อน มายังชั้น เอาต์พุต คือ $W_{jk}{}^{O}$ จึงจะมีกฎการปรับค่าน้ำหนักดังนี้

$$\Delta W_{jk}^{O} = \eta(t_k - y_k) f' x_{jk}^{O} \qquad (4.3)$$

แต่ อินพุต ของชั้น เอาต์พุต คือ เอาต์พุต ของชั้นซ่อน ดังนั้น

$$\Delta W_{jk}^{O} = \eta(t_k - y_k) f' y_{jk}^{H} \qquad (4.4)$$

เมื่อ f' คืออนุพันธ์ ของ transfer function จากชั้นซ่อน สู่ชั้น เอาต์พุต

การปรับค่าน้ำหนักในชั้นซ่อน

จาก Delta rule; $\Delta w = \eta\ (t - y) f x'$

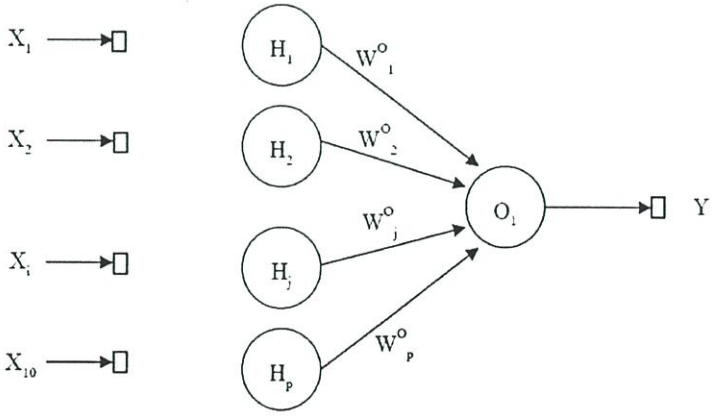
ค่าน้ำหนักแต่ละตัวที่เชื่อมโยงจาก อินพุต มายัง Neuron ใน ชั้นซ่อน คือ $W_{ij}{}^{H}$ จึงจะมีกฎการปรับค่าน้ำหนักดังนี้

$$\Delta W_{ij}^{H} = \eta(t_j - y_j) g' x_{ij}^{H} \qquad (4.5)$$

เมื่อ g' คืออนุพันธ์ ของ transfer function จากชั้น อินพุต สู่ชั้นซ่อน

แต่ปัญหาที่พบก็คือการที่ไม่สามารถหาค่า t_j ได้ เพราะเป็นไปไม่ได้ที่จะบอกว่าค่า y_j ที่นิวรอลแต่ละตัวในชั้นซ่อน สร้างขึ้นมานั้นถูกหรือผิด ดังนั้นจึงไม่สามารถหา Error ได้

ด้วยปัญหาดังกล่าว จึงต้องทำการแก้ไขโดยการสร้าง Error เทียมขึ้นมา โดยอาศัยหลักการว่า นิวรอลตัวใดที่ส่งข้อมูลไปยังชั้น เอาต์พุต มากกว่าก็ต้องรับผิดชอบในความคลาดเคลื่อน (Error) ที่เกิดขึ้นในตอนท้ายที่สุด (t-y) มากกว่า ด้วยแนวคิดดังกล่าว จึงเขียนเป็นแผนผังได้ดังนี้



รูปที่ 4.9 น้ำหนักจากชั้นซ่อน สู่ชั้น เอาต์พุต

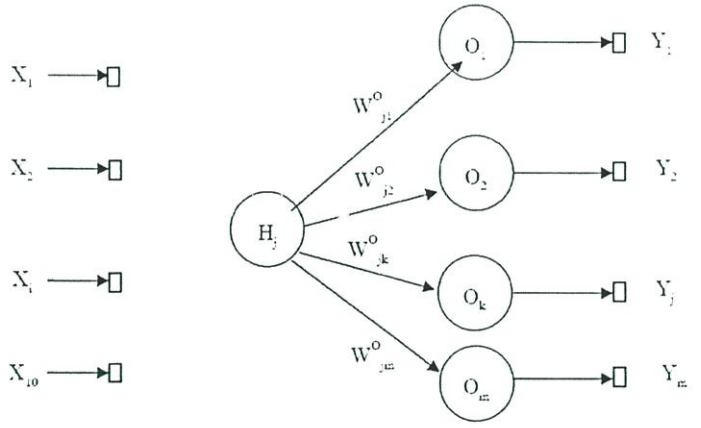
จากรูปจะเห็นว่า ความคลาดเคลื่อนของ เอาต์พุต แต่ละตัว สามารถแบ่งความรับผิดชอบไปยัง Neuron ใน ชั้นซ่อน ทุก ๆ ตัวได้โดยผ่านค่าน้ำหนัก ซึ่งหาก Neuron ใน ชั้นซ่อน ตัวใดมีค่าน้ำหนักมากก็ย่อมต้องรับผิดชอบกับความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมาก

ดังนั้น ความคลาดเคลื่อนที่นิวรอล ตัวที่ j ใน ชั้นซ่อน จะต้องรับผิดชอบสำหรับเอาต์พุต ตัวที่ 1 ก็คือ $W_{j1}^{H}(t_1 - y_1)f'$ อนึ่ง การที่ติดค่า อนุพันธ์ ของ transfer function มาด้วยนั้นก็เพราะการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของ transfer function ย่อมมีผลกระทบกับค่าน้ำหนักด้วย

ความรับผิดชอบรวมทั้งหมดที่ Neuron ตัวที่ j ใน ชั้นซ่อน จะต้องรับผิดชอบสำหรับเอาต์พุต ทุกตัว ก็ย่อมเท่ากับ ผลบวกของความรับผิดชอบที่จะต้องมีต่อ เอาต์พุต แต่ละตัวนั่นเอง ดังนี้

$$\sum_{k=1}^{m} W_{jk}^{H}(t_k - y_k)f'$$

ซึ่งเขียนเป็นแผนภาพได้ดังนี้



รูปที่ 4.10 ความรับผิดชอบของนิวรอล ตัวที่ j ในชั้นซ่อน ที่มีต่อ เอาต์พุต

เมื่อนำเอาความรับผิดชอบที่ Neuron ตัวดังกล่าวต้องรับผิดชอบต่อ เอาต์พุต ทั้งหมดมาเป็น Error เทียม จะทำให้สามารถแก้ปัญหาการปรับค่าน้ำหนักในชั้นซ่อน ได้ดังนี้

$$\Delta W_{ij}^{H} = \eta(t_j - y_j)g' x_{ij}^{H} \qquad (4.6)$$

แต่

$$t_j - y_j = \sum_{k=1}^{m} W_{jk}^{H}(t_k - y_k)f' \qquad (4.7)$$

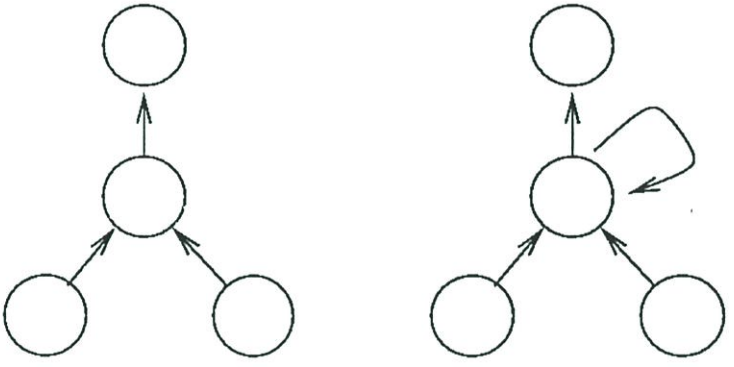
ดังนั้นจึงจะได้กฎการปรับค่าน้ำหนักจากชั้น อินพุต มายังชั้น เอาต์พุต ดังนี้

$$\Delta W_{ij}^{H} = \eta\left(\sum_{k=1}^{m} W_{jk}^{H}(t_k - y_k) f'\right) g' x_{ij}^{H} \qquad (4.8)$$

4.2.1.2 โครงข่ายประสาทเทียมเอลแมน (Elman Artificial Neural Network)[12], [18]

โครงข่ายประสาทเทียมแบบเอลแมนเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบรีเคอร์เรนต์ชนิดหนึ่ง โดยโครงข่ายประสาทเทียมแบบรีเคอร์เรนต์มีลักษณะดังนี้

โครงข่ายประสาทเทียมแบบรีเคอร์เรนต์ (Recurrent Artificial Neural Networks)



รูปที่ 4.11 แผนภาพจำลองความแตกต่างระหว่าง ANNs แบบป้อนไปข้างหน้าและแบบรีเคอร์เรนต์ [12]

พิจารณารูปที่ 4.16 โครงข่ายทางด้านซ้ายเป็นโครงข่ายแบบป้อนไปข้างหน้าทั่วไปส่วนโครงข่ายทางด้านขวาได้เพิ่มการเชื่อมต่อในส่วนชั้นซ่อนมายังตัวของมันเองซึ่งในช่วงเวลาที่โครงข่ายได้รับข้อมูลเข้าจะมีข้อมูลจากช่วงเวลาก่อนหน้านั้นรวมอยู่ด้วย นั้นคือเมื่อนำเข้าข้อมูลอย่างต่อเนื่องข้อมูลเอาต์พุตจะเป็นฟังก์ชั่นของข้อมูลที่โครงข่ายได้รับก่อนหน้านั้นด้วย

ลักษณะโครงสร้างของ ANNs ที่มีการป้อนกลับ (Feedback) จะมีรูปแบบที่อิสระเพราะสามารถเชื่อมต่อจากนิวรอนหนึ่งไปยังอีกนิวรอนหรือเชื่อมต่อกับตัวมันเองก็ได้ การคำนวณของ ANNs แบบรีเคอร์เรนต์จะต้องการข้อมูลในช่วงเวลาก่อนหน้าการคำนวณรอบปัจจุบันดังสมการที่ (4.9)

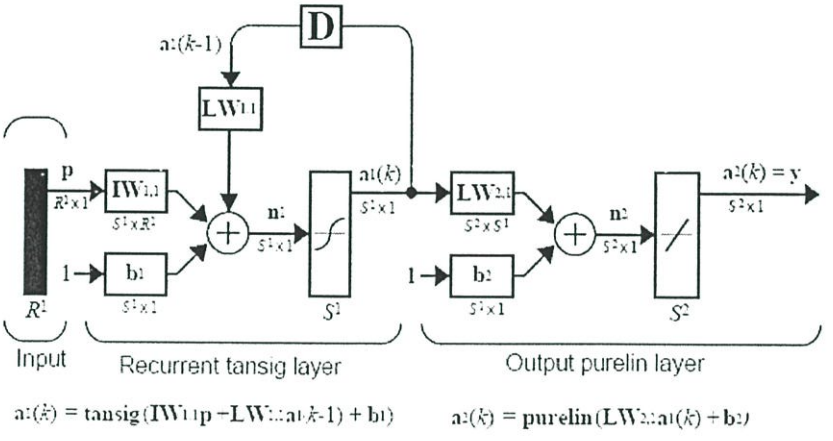
$$y_i(t) = f_i(net_i(t\text{-}1)) \qquad (4.9)$$

อย่างไรก็ตามที่แต่ละขั้นเวลาการคำนวณจะแพร่ไปข้างหน้าผ่านหนึ่งชั้นของการเชื่อมต่อเท่านั้น บางครั้งอาจจะมีการคำนวณต่อเนื่องที่นิวรอนถึงแม้ว่าจะไม่มีข้อมูลอินพุตแล้ว

การป้อนข้อมูลจะเป็นลักษณะอนุกรมเวลา (Time series) เพื่อต้องการเอาต์พุตเป็นอนุกรมเวลาเช่นกัน โครงข่ายลักษณะนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาต่าง ๆ ได้หลากหลายแต่อย่างไรก็ตาม การฝึกสอน ANNs แบบรีเคอร์เรนต์ก็ยังเป็นประเด็นให้ศึกษาต่อไป

โดยทั่วไปโครงข่ายเอลแมนจะมี 2 ชั้น (Two layers) โดยมีการป้อนกลับจาก เอาต์พุต ของชั้นแรกมายัง อินพุต ของชั้นแรก การเชื่อมต่อดังกล่าวเรียกว่า การเชื่อมต่อแบบรีเคอร์เรนต์ (Recurrent connection) ซึ่งทำให้โครงข่ายเอลแมนสามารถทั้งตรวจจับและสร้างรูปแบบที่แปรผันตามเวลา (Time varying pattern) ได้

โครงข่ายเอลแมนแบบ 2 ชั้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 โครงข่ายเอลแมนแบบ 2 ชั้น

โครงข่ายเอลแมนจะมีฟังก์ชั่นถ่ายโอนแบบ Tansig ในชั้นซ่อน (Hidden layer) หรือในที่นี้เรียกอีกอย่างว่าชั้นรีเคอร์เรนต์ (Recurrent layer) และมีฟังก์ชั่นถ่ายโอนแบบ purelin ในชั้นออก (Output layer)

โครงสร้างลักษณะดังกล่าวจะสามารถประมาณค่าฟังก์ชั่นใด ๆ ที่มีจำนวนการขาดช่วงนับได้ (Finite number of discontinuities) อย่างแม่นยำ

ความต้องการเพียงอย่างเดียวคือชั้นซ่อนจะต้องมีจำนวนนิวรอนมากเพียงพอซึ่งฟังก์ชั่นที่มีความซับซ้อนมากก็จะต้องการจำนวนนิวรอนมาก

โครงข่ายเอลแมนต่างจากโครงข่ายประสาทเทียมแบบ 2 ชั้นทั่วไปตรงที่ในชั้นแรกจะมีการเชื่อมต่อแบบรีเคอร์เรนต์ ซึ่งจะเก็บค่าจะขั้นเวลา (Time step) ก่อนหน้ามาใช้ในขั้นเวลาปัจจุบัน

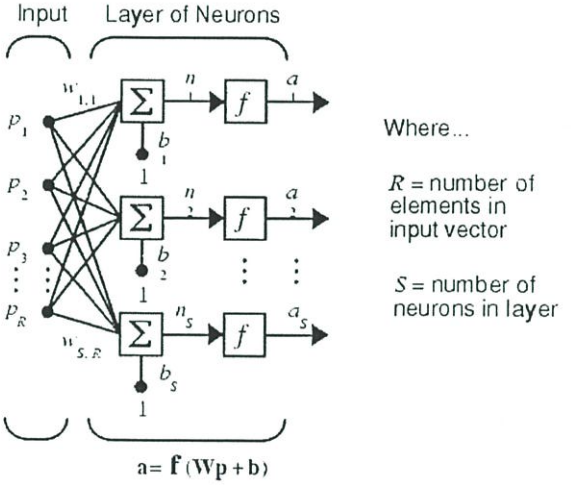
ดังนั้นโครงข่ายเอลแมน 2 ชุดที่มีจำนวนนิวรอน, ค่าถ่วงน้ำหนัก และไบแอส เท่ากันเมื่อทำการป้อน อินพุต อย่างเดียวกันเข้าไป อาจจะให้ เอาต์พุต ที่ต่างกันได้เนื่องจากสถานการณ์ป้อนกลับต่างกัน

4.2.2 การจัดประเภทของโครงข่ายประสาทเทียมตามลักษณะการเชื่อมต่อ

โครงสร้างการเชื่อมต่อโครงข่ายประสาทเทียม พอจะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ดังนี้

4.2.2.1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว (Single Layer Neural Network)

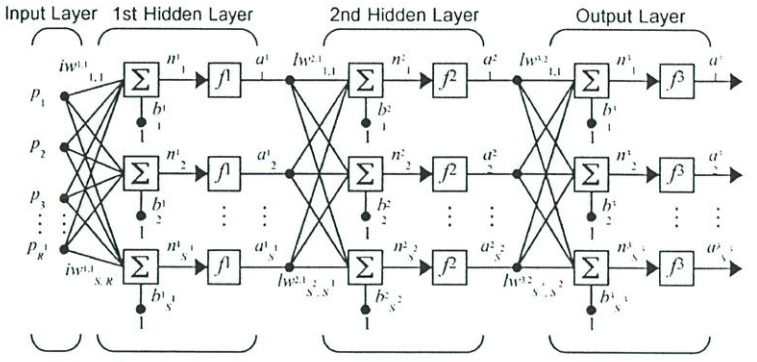
จะประกอบไปด้วยเซลล์ประสาทที่จัดเรียงตัวอยู่ในชั้นต่างๆ ได้แก่ ชั้นอินพุต และชั้นเอาต์พุต สาเหตุที่จัดโครงสร้างแบบนี้เป็นแบบชั้นเดียว เนื่องมาจากนับชั้นเอาต์พุตเพียงชั้นเดียวเท่านั้นว่า เป็นชั้นของเซลล์ประสาท สำหรับชั้นอินพุตเป็นชั้นที่ไม่มีการประมวลใดๆ จึงไม่พิจารณาว่าเป็นชั้นของเซลล์ประสาท จะทำหน้าที่เพียงแค่รับข้อมูลอินพุตเข้ามาและส่งต่อให้กับชั้นถัดไปเท่านั้น



รูปที่ 4.13 โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว

4.2.2.2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi Layer Neural Networks)

โครงสร้างประกอบขึ้นจากการจัดเรียงตัวของเซลล์ประสาทตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป (ไม่นับชั้นอินพุต) โดยปกติโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นจะอยู่ในรูปของการทำงานที่ป้อนไปข้างหน้า (Feed forward) ซึ่งชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นอินพุตและชั้นเอาต์พุต เรียกว่า ชั้นซ่อน (Hidden Layer) ซึ่งชั้นซ่อนนี้เองที่เป็นตัวเพิ่มความสามารถให้แก่โครงข่าย ทั้งนี้สามารถมีชั้นซ่อนได้มากกว่า 1 ชั้น จำนวนของชั้นซ่อนและจำนวนของเซลล์ประสาทในแต่ละชั้นจะมีค่าไม่คงที่ ซึ่งแต่ละชั้นอาจจะมีจำนวนเซลล์ประสาทที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งาน



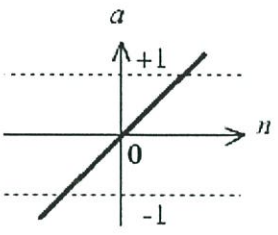
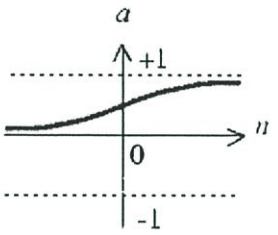
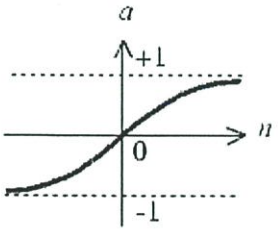
รูปที่ 4.14 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น

เซลล์ประสาทแต่ละตัวจะต่อกับเซลล์ประสาทตัวอื่นตามระบบการเชื่อมต่อที่สร้างขึ้นโดยเอาต์พุตของเซลล์ประสาทตัวหนึ่งจะเป็นอินพุตของเซลล์ประสาทตัวอื่นต่อไป การเชื่อมต่ออาจเป็นการเชื่อมต่อแบบทางเดียว (Unidirectional) หรือแบบเชื่อม 2 ทาง (Two – way connection) ก็ได้

เซลล์ประสาทในชั้น (Layer) หนึ่งอาจเชื่อมโยงหรือไม่เชื่อมโยงกับเซลล์ประสาทตัวอื่นในชั้นเดียวกันก็ได้ แต่เซลล์ประสาทในชั้นหนึ่งจะต้องเชื่อมโยงกับเซลล์ประสาทอย่างน้อย ๆ 1 ตัว ในชั้นอื่นเสมอ

การเชื่อมโยงของเซลล์ประสาทระหว่างชั้น (Inter – Layer Connections) สามารถแบ่งเป็นแบบต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. แบบเชื่อมต่อเต็ม (Fully Connected)
   เซลล์ประสาทแต่ละตัวในชั้นที่ 1 จะเชื่อมต่อกับเซลล์ประสาททุกตัวในชั้นที่ 2
2. แบบเชื่อมต่อบางส่วน (Partially Connected)
   เซลล์ประสาทแต่ละตัวในชั้นที่ 1 จะเชื่อมต่อกับเซลล์ประสาทบางตัวในชั้นที่ 2
3. แบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward)
   เซลล์ประสาทในชั้นที่ 1 ส่งเอาต์พุตให้เซลล์ประสาทในชั้นที่ 2 แต่จะไม่ได้รับ การป้อนกลับ (Feedback) จาก เซลล์ประสาทในชั้นที่ 2
4. แบบสองทิศทาง (Bi – directional)
   เอาต์พุตจากเซลล์ประสาทในชั้นที่ 2 จะถูกส่งกลับมาเป็นอินพุตของ เซลล์ประสาทในชั้นที่ 1

ชนิดฟังก์ชันการถ่ายโอน	สมการฟังก์ชันการถ่ายโอน
 $a = purelin(n)$ Linear Transfer Function	$a(n) = n$
 $a = logsig(n)$ Log-Sigmoid Transfer Function	$a(n) = \frac{1}{1+e^{-n}}$
 $a = tansig(n)$ Tan-Sigmoid Transfer Function	$a(n) = \frac{1-e^{(-n)}}{1+e^{(-n)}}$

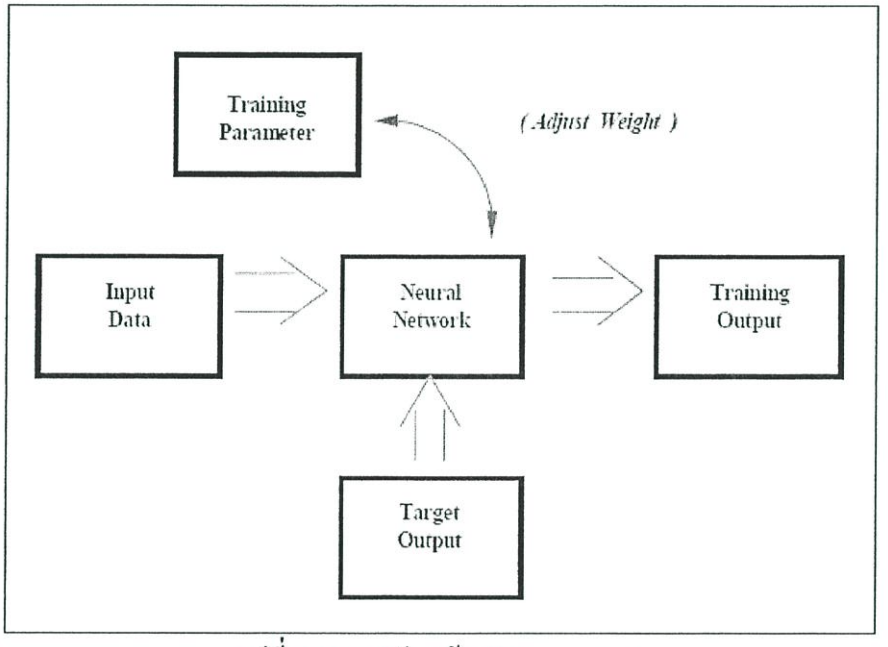
รูปที่ 4.15 ตัวอย่างฟังก์ชั่นถ่ายโอน

4.3 กระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม

ประสิทธิภาพในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมขึ้นอยู่กับค่าถ่วงน้ำหนักของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมกับปัญหา ซึ่งการฝึกสอน (Training) โครงข่ายประสาทเทียม ก็คือ การหาค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมให้แก่โครงข่ายประสาทเทียม เพื่อให้ผลลัพธ์สุดท้ายที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าผิดพลาด (Error) น้อยที่สุด กระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ

4.3.1 การเรียนรู้แบบ Supervised (Supervised Learning)

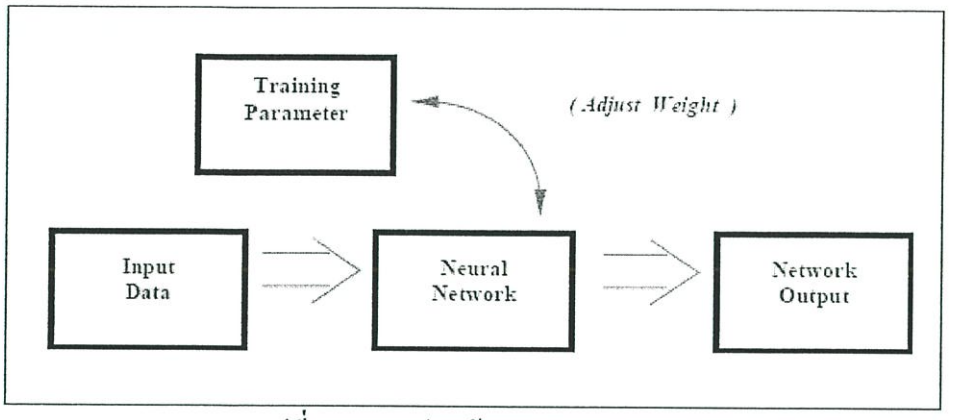
การเรียนรู้แบบ Supervised นั้นจะมีชุดข้อมูลที่เรียกว่า ชุดฝึกสอน (Training Pattern) โดยในชุดฝึกสอนนี้จะมีข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมจะถูกฝึกสอนจากข้อมูลในชุดฝึกสอนเพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสม โดยนำเอาต์พุตที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมไปเปรียบเทียบกับเอาต์พุตของชุดฝึกสอน จากนั้นค่าผิดพลาดที่ได้จากความแตกต่างของเอาต์พุตจากโครงข่ายประสาทเทียมและเอาต์พุตจากชุดฝึกสอนก็จะถูกป้อนกลับไปใหม่ เพื่อให้คำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนักใหม่ เพื่อให้ค่าความผิดพลาดระหว่างเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมกับเอาต์พุตของชุดฝึกสอนมีค่าน้อยที่สุด



รูปที่ 4.16 การเรียนรู้แบบ Supervised

4.3.2 การเรียนรู้แบบ Unsupervised (Unsupervised Learning)

การเรียนรู้แบบ Unsupervised นี้จะเป็นการเรียนรู้ที่ไม่ต้องอาศัยชุดฝึกสอนมาทำการฝึกสอนให้กับโครงข่ายประสาทเทียม การปรับค่าถ่วงน้ำหนักนั้นเซลล์ประสาทจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวเอง นั่นคือการปรับค่าถ่วงน้ำหนักจะไม่มีการกำหนดค่าที่ถูกต้องว่าควรจะใช้ค่าถ่วงน้ำหนักเท่าไร แต่เซลล์ประสาทจะอาศัยการป้อนกลับไปของค่าผิดพลาดและวิเคราะห์หาค่าถ่วงน้ำหนักด้วยตัวเอง



รูปที่ 4.17 การเรียนรู้แบบ Unsupervised

4.4 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks Application) [17]

สามารถนำ ANNs ไปประยุกต์ใช้ในปัญหาด้านต่าง ๆ ได้หลายแนวทางดังต่อไปนี้

4.4.1 การนำ ANNs ไปประยุกต์ใช้ในทางเศรษฐศาสตร์และธุรกิจ

การประยุกต์ใช้ ANNs ที่นำมากล่าวถึงในที่นี้ประกอบด้วย 7 ด้าน คือ การตลาด การค้าปลีก การเงินและการธนาคาร การประกันภัย การสื่อสาร การจัดการด้านการผลิต และอุตสาหกรรมอื่น ๆ ดังนี้

การตลาด

ANNs ได้รับการนำมาใช้ในเรื่องการแยกส่วนตลาด (market segmentation) โดยระบุว่ากลุ่มตลาดเป้าหมายเป็นใคร โดยมีสองเทคนิคคือ แบบ unsupervised จะทำงานโดยการพยายามรวมกลุ่มลูกค้าที่มีลักษณะเหมือนกัน และแบบ supervised ที่จะเรียนรู้เส้นแบ่งกลุ่มว่าลูกค้าแบบไหนเป็นอย่างไร ประโยชน์ของการทราบกลุ่มลูกค้าเป้าหมายจะทำให้นักการตลาดสามารถมุ่งเน้นการขายผลิตภัณฑ์ไปที่ลูกค้ากลุ่มนั้น ซึ่งผลที่ได้รับนั้น ตัวอย่างหนึ่งรายงานว่า การตอบรับของลูกค้าเพิ่มจากร้อยละ 1-2 เป็นร้อยละ 95 เลยทีเดียว ANNs ยังนำมาใช้ศึกษารายละเอียดของการซื้อสินค้าและบริการเพื่อใช้ในการรักษาฐานลูกค้าเก่า และศึกษาว่าลูกค้ากลุ่มใดที่มีโอกาสเปลี่ยนไปซื้อสินค้าหรือบริการของคู่แข่งด้วย นักวิจัยด้านพฤติกรรมยังใช้ นิวรอล networks ในการศึกษาพฤติกรรมการบริโภคหรือการตอบสนองต่อการโฆษณาด้วย

การค้าปลีก

ผู้ค้าปลีกนำ ANNs มาใช้ในการพยากรณ์ยอดขาย โดยที่กล่าวกันว่าผลการทำนายค่อนข้างดีกว่าเทคนิคที่นิยมทั่วไป เช่น regression และการอาศัยความเห็นของผู้เชี่ยวชาญ

ทั้งนี้เพราะ ANNs วิเคราะห์ตัวแปรที่เกี่ยวข้องเป็นจำนวนมาก นอกจากนั้น ANNs ยังสามารถวิเคราะห์ความเชื่อมโยงของการซื้อสินค้าต่าง ๆ ได้ด้วย ผู้ค้าปลีกจึงสามารถนำผลการวิเคราะห์มาปรับที่ตั้งวางสินค้าที่เชื่อมโยงกันมาอยู่ใกล้ ๆ กัน นอกจากนั้น ยังทำให้ทราบถึงระยะเวลาในการทิ้งช่วงซื้อสินค้า ซึ่งข้อมูลส่วนนี้ทำให้ผู้ค้าปลีกสามารถติดต่อลูกค้าได้ทันท่วงทีก่อนที่ลูกค้าจะหันไปหาคู่แข่ง

การเงินและการธนาคาร

ANNs ใช้กันมากในการพยากรณ์ทางการเงินและการค้า เช่น อัตราแลกเปลี่ยนเงินตราต่างประเทศ ราคาหลักทรัพย์ ราคาการซื้อขายล่วงหน้า เป็นต้น นอกจากนั้นยังใช้ในการวิเคราะห์ความเสี่ยงในการให้สินเชื่อ และความเสี่ยงในการล้มละลาย และสิ่งท้าทายใหม่คือ การใช้ ANNs วิเคราะห์ความเชื่อมโยงระหว่างกลยุทธ์ของบริษัทในระยะสั้นกับผลการดำเนินงานของบริษัท และที่ใช้กันมากในปัจจุบันคือการใช้ตรวจสอบการปลอมบัตรเครดิตหรือการฉ้อโกงทางการเงินอื่น ๆ

การประกันภัย

ANNs ใช้ได้ดีในการแบ่งกลุ่มลูกค้าเพื่อที่จะได้คำนวณค่าประกันภัยให้สอดคล้องกับความเสี่ยง นอกจากนั้นยังช่วยทำนายความถี่ในการเรียกเงินประกัน และยังช่วยตรวจสอบการเรียกเงินประกันโดยไม่สุจริต ANNs ยังใช้สำหรับการเสนอเงื่อนไขพิเศษให้แก่ลูกค้าแต่ละรายเพื่อจูงใจให้เป็นลูกค้าของบริษัทต่อไป

การสื่อสาร

ธุรกิจสื่อสารสนใจเรื่องการเปลี่ยนไปใช้บริการของคู่แข่ง และการใช้บริการที่เชื่อมโยงกับการสื่อสาร ซึ่งข้อมูลที่ได้รับจะทำให้มีการสร้างโปรโมชั่นใหม่ ๆ เพื่อรักษาฐานลูกค้าเดิม และพยายามดึงลูกค้าจากบริษัทคู่แข่ง แล้วยังต้องการขายสินค้าอื่น ๆ พ่วงไปกับการสื่อสารด้วย

การจัดการด้านการผลิต

ANNs ใช้ได้อย่างประสบความสำเร็จในด้านการควบคุมตารางเวลาการผลิต เทคนิคที่ใช้กันมาก คือ Hopfield neural network ซึ่งสามารถแก้ปัญหา Optimization ที่ซับซ้อนได้ และได้พัฒนามาเป็น Neuro-dynamic programming การควบคุมการผลิตยังสามารถรับข้อมูลจากการบริโภคของลูกค้าผ่านมาโดยตรง ทำให้เกิดการประสานระหว่างการตลาดและการผลิตได้อย่างสอดคล้อง แล้วยังสามารถเรียนรู้กระบวนการของการผลิตที่ให้ผลที่ดียิ่งขึ้นอีกด้วย

ANNs ยังใช้ได้ดีในเรื่องการควบคุมคุณภาพสินค้า รวมทั้งการตรวจจับความผิดพลาดของผลิตภัณฑ์ แล้วยังช่วยวิเคราะห์ระยะเวลาที่โครงการจะใช้ในการผลิตสินค้าต่าง ๆ ได้อีกด้วย

4.4.2 อุตสาหกรรมอื่น ๆ

การตรวจจับไวรัสคอมพิวเตอร์ ระบบรักษาความปลอดภัยของรถยนต์ ชิปสร้างคำพูด การจดจำลายมือ ก็ใช้ ANNs แต่จุดอ่อนของ ANNs คือ ผู้ใช้ต้องการทราบเหตุผลว่าทำไม ANNs จึงตัดสินใจเช่นนั้น เช่น การไม่อนุมัติเงินกู้ซึ่งมีกฎหมายระบุว่าต้องบอกเหตุผลแก่ลูกค้า ดังนั้น นักวิจัยรุ่นใหม่กำลังศึกษากันมากเรื่องการแกะรอยการคิดของ ANNs นอกจากนั้นความต้องการทางธุรกิจในด้านการอ่านลายมือและเรื่องคำพูดยังทำให้นักวิจัยต้องเร่งสร้าง ANNs ที่ทำงานได้เร็วขึ้นอีก

Data mining

Data mining เป็นกรรมวิธีในการสกัดเอาข้อมูลที่เป็นประโยชน์ออกมาจากข้อมูลจำนวนมาก เครื่องมือหลักในการทำเหมืองข้อมูล คือ ANNs เช่น MFNNs และ SOFMs แต่เครื่องมืออื่น ๆ เช่น Regression, decision tree และวิธีการทางสถิติขั้นสูงอื่น ๆ ก็เป็นองค์ประกอบร่วมด้วยเช่นกันแม้ว่าจะเป็นเรื่องท้าทายใหม่และธุรกิจก็หันมาสนใจกันมาก แต่ก็มีคำวิจารณ์อยู่บ้างว่า Data mining อาจจะไม่ประสบความสำเร็จเสมอไปด้วยความไม่พร้อมและความไม่เข้าใจของผู้ใช้เทคโนโลยี อย่างไรก็ตามการทำความเข้าใจเทคนิคแต่ละเรื่องที่นำมารวมกันใน Data mining ก็จะช่วยให้เกิดการใช้ประโยชน์อย่างได้ผลดีต่อไปในการวิจัยทางเศรษฐศาสตร์ หัวข้อการวิจัยเช่น "ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ...." น่าจะสามารถที่จะใช้เทคนิค ANNs แบบ Data mining ได้ โดยการให้ ANNs อ่านข้อมูลของผู้บริโภคแล้วลองแยกกลุ่มของผู้บริโภคออกมา เช่น ให้ดูข้อมูลของผู้โดยสารที่เลือกใช้บริการของสายการบินต้นทุนต่ำ (Low Cost Airlines) แล้วจำแนกออกมาว่าคนกลุ่มนี้เป็นใคร ต่อมาก็ให้ดูข้อมูลของผู้โดยสารที่เลือกใช้บริการของสายการบินปกติ แล้วก็จำแนกออกมาว่าคนกลุ่มนี้เป็นใครจากนั้นก็ทำการเปรียบเทียบว่าผู้บริโภคทั้งสองกลุ่มเหมือนหรือต่างกันอย่างไร

4.5 หัวข้อการวิจัยอื่นที่จะสามารถใช้ ANNs ได้

ANNs สามารถนำมาใช้ในงานวิจัยอื่นได้อย่างน้อยสามทาง ดังนี้

การวิเคราะห์ข้อมูล Time Series

แม้ว่าจะมีเครื่องมือที่ทันสมัยในการวิเคราะห์ข้อมูล Time Series เช่น ARIMA, SARIMA, Cointegration แต่ ANNs ก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่อาจจะให้ผลการวิเคราะห์ที่นำมาเปรียบเทียบกันได้

ข้อมูล อินพุต ที่ใช้วิเคราะห์นั้น ในเบื้องต้นคล้ายกับ Autoregressive process (AR) ที่ใช้ข้อมูลในอดีตของตัวเอง แต่ยังสามารถเพิ่มตัวแปรอื่นได้ตาม Logic รอีกด้วย อนึ่งการใส่ตัวแปรเข้าไปใน ANNs นั้นมักมีข้อวิพากษ์วิจารณ์กันเสมอว่าในที่สุด ANNs จะไม่สามารถอธิบายได้ว่าผล

การพยากรณ์นั้นเกิดขึ้นได้เพราะอะไร แต่หากใส่ตัวแปรตาม Logic แล้ว นักวิจัยก็จะพอมีทางอธิบายผลที่เกิดขึ้นได้ว่ามีเหตุผลมาอย่างไร

การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงรูปภาพ

ข้อมูลเชิงรูปภาพอาจจะมีประโยชน์สำหรับงานทางด้านเศรษฐศาสตร์ แต่อาจจะยังไม่มีวิธีการแปลงข้อมูลออกมาเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ แต่ด้วยวิธีการของ ANNs สามารถแปลงรูปภาพให้เป็นข้อมูลในรูปเมตริกซ์ (Matrix) แล้วนำไปเป็น อินพุต ให้กับ ANNs
ตัวอย่างข้อมูลเชิงรูปภาพ เช่น ภาพถ่ายทางอากาศ ภาพแสดงรูปกราฟ เป็นต้น

การวิเคราะห์จำแนกลักษณะ

การวิเคราะห์ลักษณะของสิ่งที่สนใจ เช่น ลักษณะของนักท่องเที่ยวที่มาเที่ยวซ้ำ ลักษณะของโครงการลงทุนที่ประสบความสำเร็จ ลักษณะของผู้ที่ประสบความสำเร็จ เป็นต้น

การหาจุดที่เหมาะสม

วิธีการหาจุดที่เหมาะสม (Optimization) ทางเศรษฐศาสตร์จะเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อมีฟังก์ชั่นต่อเนื่องที่สามารถหาอนุพันธ์ได้ (Continuous and differentiable) แต่หากไม่มีฟังก์ชั่นดังกล่าวก็อาจจะประสบปัญหา การแก้ปัญหาทางหนึ่งก็คือการใช้ ANNs โดย ANNs แบบ Supervised learning จะสำรวจการตัดสินใจเลือกจุดที่เหมาะสมโดยผู้มีประสบการณ์ จากนั้นก็จะสำรวจข้อมูลสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เมื่อได้เรียนรู้จากกรณีศึกษามากขึ้นเรื่อย ๆ แล้ว ANNs ก็จะสามารถวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสมได้ในที่สุด

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำ ANNs มาใช้หาจุดหรือคำตอบของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมซึ่งเป็นปัญหาหาจุดที่เหมาะสมหรือเรียกว่าปัญหาออปติไมเซชันอย่างหนึ่ง โดยเลือกใช้ ANNs แบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้นแพร่ค่าย้อนกลับและแบบเอลแมนดังจะกล่าวต่อไปในบทที่ 5

บทที่ 5
การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม

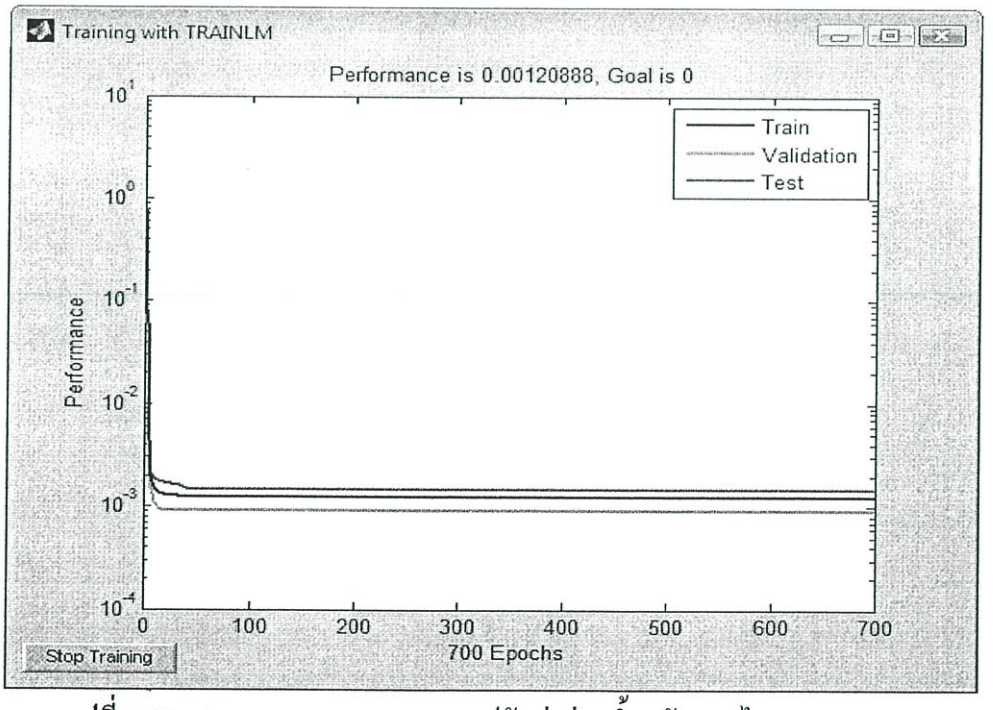
5.1 เงื่อนไขในการฝึกสอนและทดสอบ

5.1.1 เงื่อนไขของการฝึกสอน

ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมและใช้กระบวนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสด้วยวิธี Lavenberg-Marquardt Algorithm นั้นจะมีเงื่อนไขพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการสิ้นสุดการฝึกสอนดังนี้

5.1.1.1 Performance gradient Factor

ค่า Gradient Factor เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้ในการพิจารณาถึงการสิ้นสุดของการฝึกสอน ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสแต่ละรอบนั้นค่า Performance gradient Factor จะเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับค่าผิดพลาด (e) ที่เกิดขึ้นใน Epoch นั้น ๆ โดยการฝึกสอนจะสิ้นสุดลงเมื่อ Performance gradient Factor มีค่าน้อยกว่า 1e-10



รูปที่ 5.1 Performance ของการทดลองปรับค่าถ่วงน้ำหนักและไบแอส 700 รอบ

5.1.1.2 Mu Factor

μ หรือ Learning Factor เป็นค่าคงที่ที่ใช้เร่งการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสให้ลู่เข้าหาคำตอบ ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสแต่ละรอบนั้นหากค่า Gradient Factor มีค่าเพิ่มขึ้น จะมีการปรับค่า μ ให้เพิ่มขึ้นจนกระทั่งค่า Gradient Factor มีแนวโน้มที่จะลดลง จากนั้นค่า μ จะถูกปรับลดลงเรื่อย ๆ และมีการปรับเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อค่า Gradient Factor มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ค่า μ เริ่มต้นจะมีค่าเท่ากับ 0.001 การปรับค่า μ เพิ่มขึ้นนั้นจะทำโดยการคูณด้วย Increased Factor ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10 และการปรับค่า μ ลดลงนั้นจะทำโดยการคูณด้วย Decreased Factor ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.1 และการฝึกสอนจะสิ้นสุดลงเมื่อค่า μ มีค่ามากกว่า 1e10

5.1.1.3 ปริมาณข้อมูลฝึกสอน

ปริมาณข้อมูลที่นำมาใช้ในการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมนั้นจะเป็นเงื่อนไขหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการหาคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียม โดยทั่วไปในปัญหาที่ซับซ่อน การใช้ข้อมูลฝึกสอนจำนวนมากกว่าจะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพการหาคำตอบดีขึ้นทั้งนี้ขึ้นกับคุณภาพของข้อมูลฝึกสอนด้วย

5.1.1.3 คุณภาพของข้อมูลฝึกสอน

ในที่นี้คือการกระจายของชุดข้อมูลฝึกสอน โดยโครงข่ายประสาทเทียมจะสามารถหาคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อมูลฝึกสอนจะต้องมีการกระจายที่ดีพอและข้อมูลทดสอบควรอยู่ในช่วงของการกระจายดังกล่าว

5.1.2 เงื่อนไขในการทดสอบ

5.1.2.1 ประสิทธิภาพของการทดสอบ

การวัดประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมนั้นจะใช้วัดค่าผิดพลาดของคำตอบของข้อมูลทดสอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วเป็นเกณฑ์ สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ค่าผิดพลาดร้อยละสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) ดังสมการที่ 5.1 สำหรับระบบทดสอบ 2 บัส 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนระบบ IEEE 30 bus นั้นได้ใช้ ค่าผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error, MAE) ดังสมการที่ 5.2 ทั้งนี้เนื่องจากชุดข้อมูลทดสอบของระบบ IEEE 30 bus มีข้อมูลบางชุดมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อใช้ MAPE จะมีการหารด้วยศูนย์ทำให้ได้ค่าเป็นอนันต์

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{\text{Taget result}_i - \text{ANNs result}_i}{\text{Taget Result}_i}\right| \times 100\% \qquad (5.1)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\text{Taget result}_i - \text{ANNs result}_i\right| \times 100\% \qquad (5.2)$$

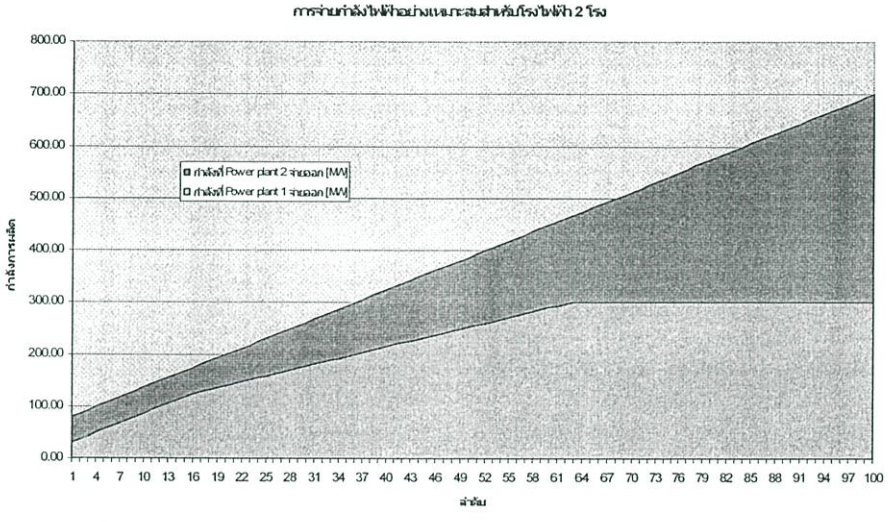
5.2 ตัวแปรในการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม

5.2.1 ระบบ 2 บัส 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

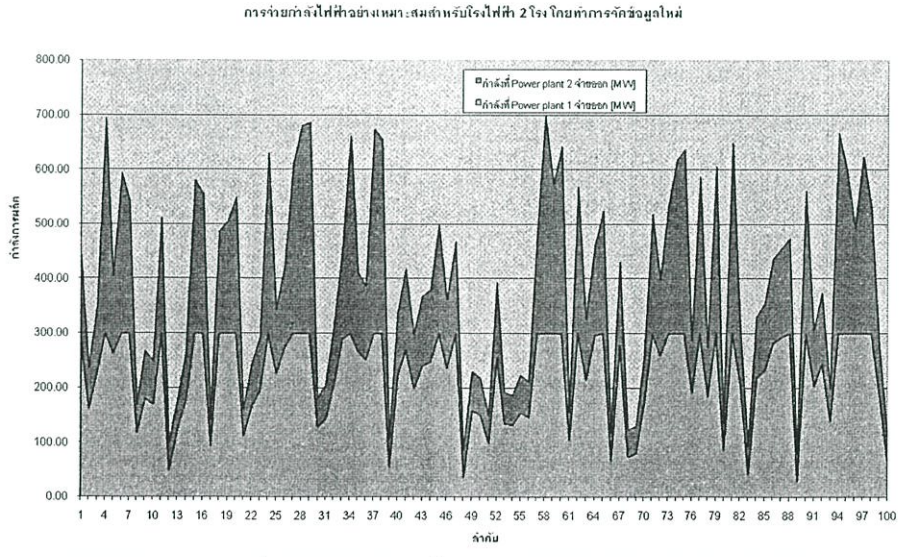
เนื่องจากในระบบมีโหลดจุดเดียวและไม่คำนึงถึงกำลังไฟฟ้าเสมือนดังนั้นกำหนดตัวแปรอินพุตคือโหลดที่บัส 2 ได้แก่ P_D

กำหนดให้ตัวแปรเอาต์พุตคือกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัวในระบบทดสอบ ได้แก่ P_{G1} , P_{G2} , รวมทั้งสิ้น 2 ตัวแปร

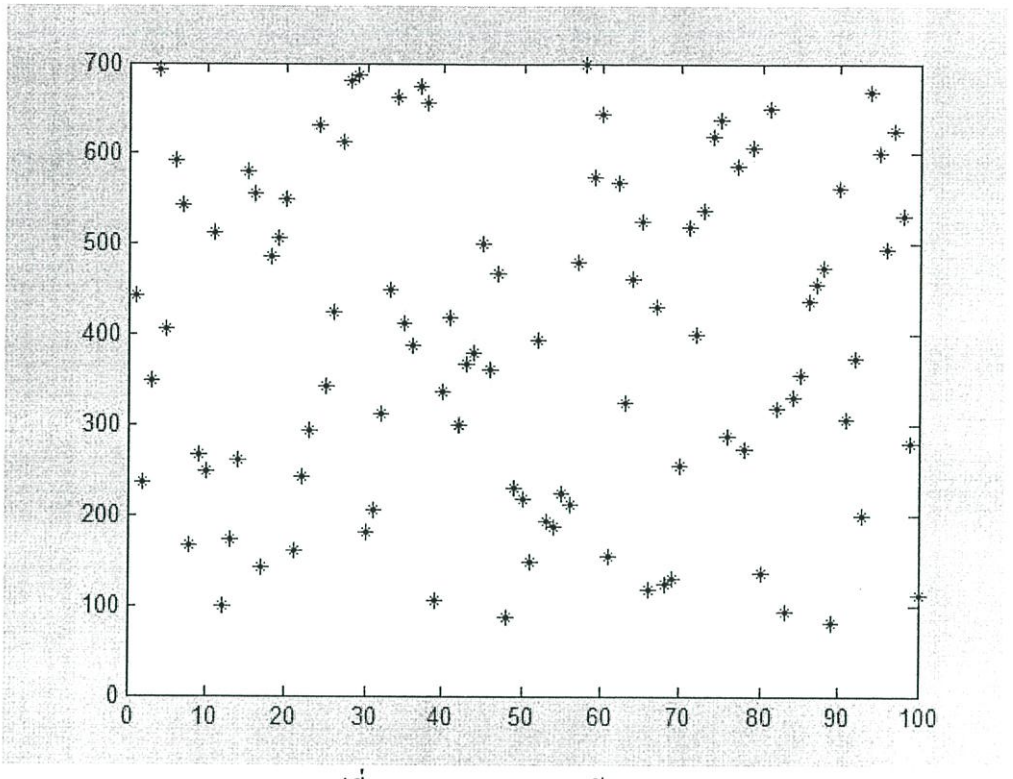
การเตรียมชุดข้อมูลดังกล่าวเตรียมโดยกำหนดให้โหลดกระจายอยู่ในช่วงกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าช่วงละเท่า ๆ กันจากน้อยไปมากดังรูปที่ 5.2 จากนั้นเรียงสับเปลี่ยนลำดับแบบสุ่ม ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 ข้อมูล OPF ในระบบ 2 bus 2 gen เตรียมโดย MS-Excel Solver



รูปที่ 5.3 เรียงสับเปลี่ยนข้อมูลแบบแรนดอม



รูปที่ 5.4 การกระจายของข้อมูล P_D

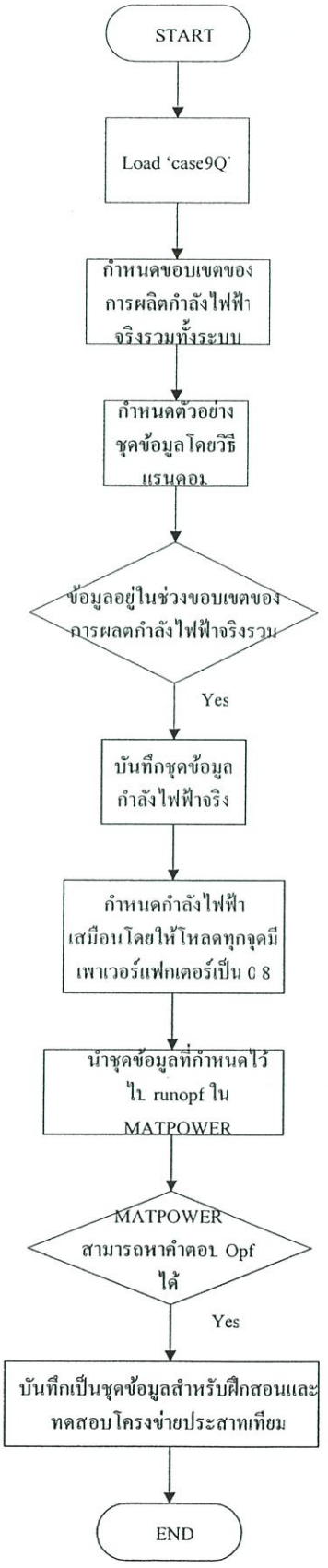
5.2.2 ระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

กำหนดให้ตัวแปรอินพุตคือโหลดทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบทดสอบทั้งหมด ได้แก่ P_{D5}, Q_{D5} , P_{D7}, Q_{D7} ,P_{D9}, Q_{D9} รวมทั้งสิ้น 6 ตัวแปร

กำหนดให้ตัวแปรเอาต์พุตคือกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัวในระบบทดสอบโดยเงื่อนไขการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม ได้แก่ P_{G1} , Q_{G1} , P_{G2} , Q_{G2} ,P_{G3} , Q_{G3} รวมทั้งสิ้น 6 ตัวแปร

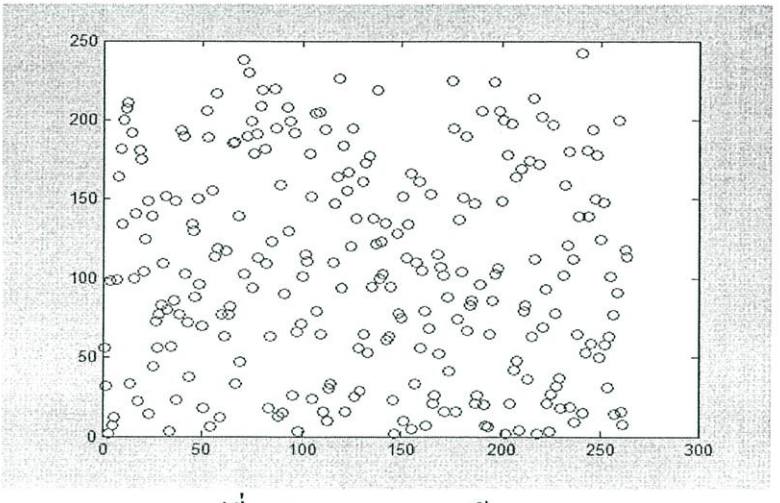
การเตรียมชุดข้อมูลดังกล่าวสามารถเตรียมโดยการเขียนโปรแกรม M-file บน Matlabโดยโปรแกรมมีโครงสร้างดังรูปที่ 5.5 โดยกำหนดเงื่อนไขว่าโหลดทุกจุดมีเพาเวอร์แฟกเตอร์เป็น 0.8 เท่านั้น

การกระจายของข้อมูลอินพุตที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 5.6 -5.8 โดยในที่นี้จะแสดงเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริง ส่วนกำลังไฟฟ้าเสมือนจะมีการกระจายลักษณะเดียวกันกับกำลังไฟฟ้าจริงเนื่องจากกำหนดให้เพาเวอร์แฟกเตอร์คงที่ เป็น 0.8

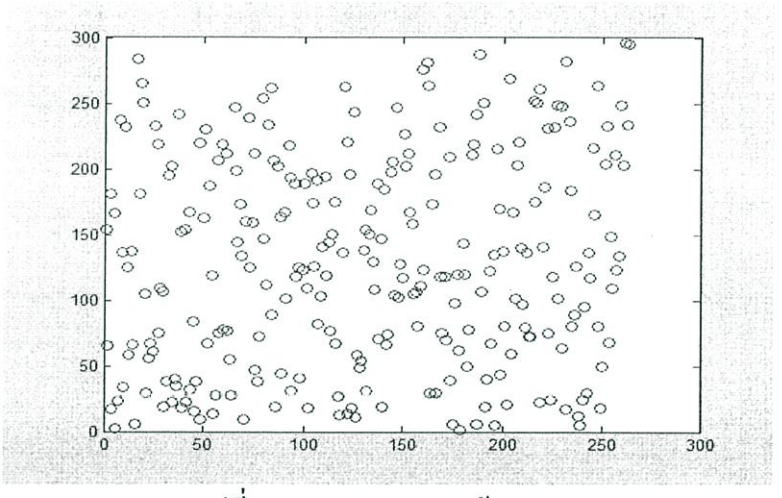


รูปที่ 5.5 แสดงโปรแกรมเตรียมข้อมูลฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมในระบบ 9 bus 3 gen

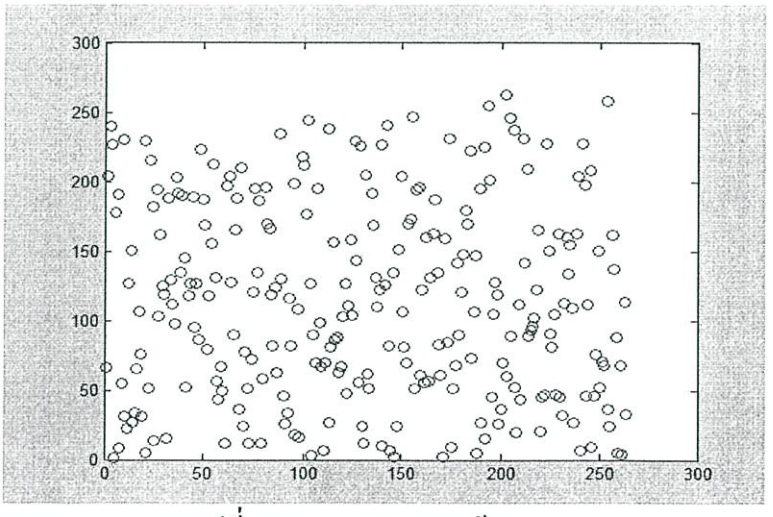
การกระจายของชุดข้อมูลที่ได้เป็นดังนี้



รูปที่ 5.6 การกระจายของข้อมูล P_{D5}



รูปที่ 5.7 การกระจายของข้อมูล P_{D7}



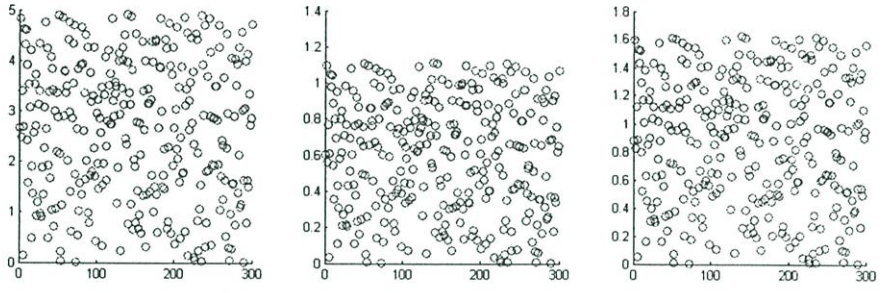
รูปที่ 5.8 การกระจายของข้อมูล P_{D9}

5.2.3 IEEE 30 bus test system.

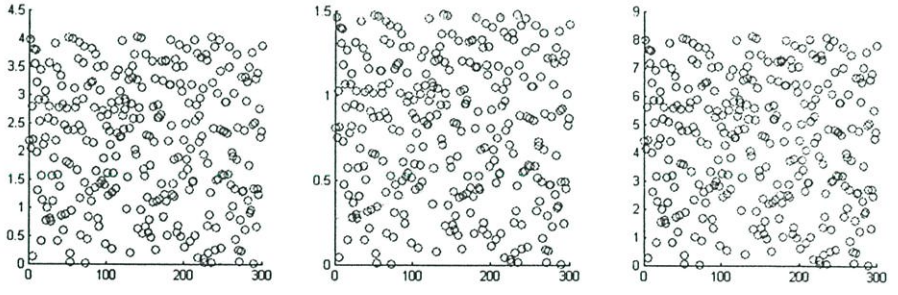
กำหนดให้ตัวแปรอินพุตคือโหลดทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบทดสอบทั้งหมด ได้แก่ P_{D2}, Q_{D2}, P_{D3}, Q_{D3}, P_{D4}, Q_{D4}, P_{D5}, Q_{D5}, P_{D7}, Q_{D7}, P_{D8}, Q_{D8}, P_{D10}, Q_{D10}, P_{D12}, Q_{D12}, P_{D14}, Q_{D14}, P_{D15}, Q_{D15}, P_{D16}, Q_{D16}, P_{D17}, Q_{D17}, P_{D18}, Q_{D18}, P_{D19}, Q_{D19}, P_{D20}, Q_{D20}, P_{D21}, Q_{D21}, P_{D23}, Q_{D23}, P_{D24}, Q_{D24}, P_{D26}, Q_{D26}, P_{D29}, Q_{D29}, P_{D30}, Q_{D30} รวมทั้งสิ้น 42 ตัวแปร

กำหนดให้ตัวแปรเอาต์พุตคือกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัวในระบบทดสอบโดยเงื่อนไขการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม ได้แก่ P_{G1}, Q_{G1}, P_{G2}, Q_{G2}, P_{G5}, Q_{G5}, P_{G8}, Q_{G8}, P_{G11}, Q_{G11}, P_{G13}, Q_{G13} รวมทั้งสิ้น 6 ตัวแปร

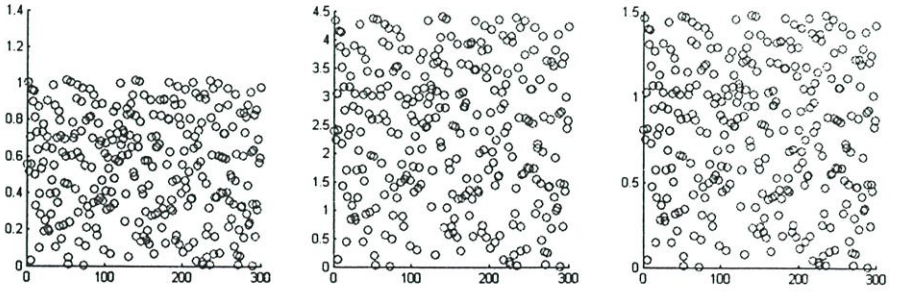
การเตรียมชุดข้อมูลดังกล่าวสามารถเตรียมโดยการเขียนโปรแกรม M-file บน Matlab โดยโปรแกรมมีโครงสร้างลักษณะเดียวกันกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า



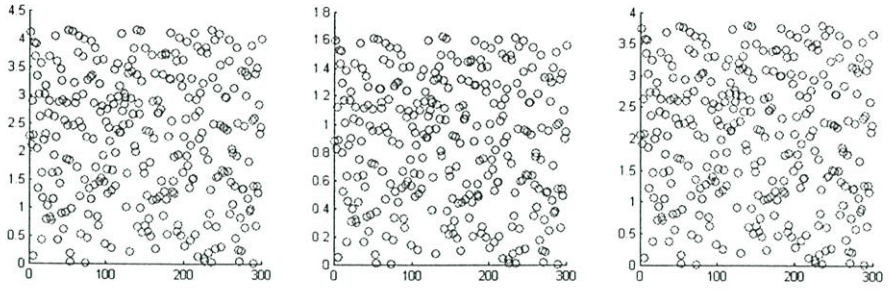
รูปที่ 5.9 การกระจายของข้อมูล P_{D2}, P_{D3}, P_{D4}



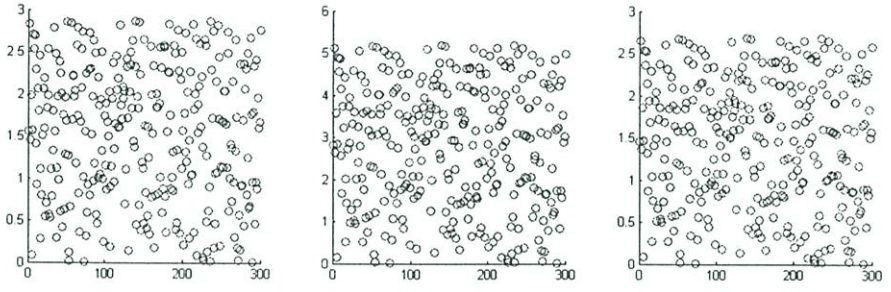
รูปที่ 5.10 การกระจายของข้อมูล P_{D5}, P_{D7}, P_{D8}



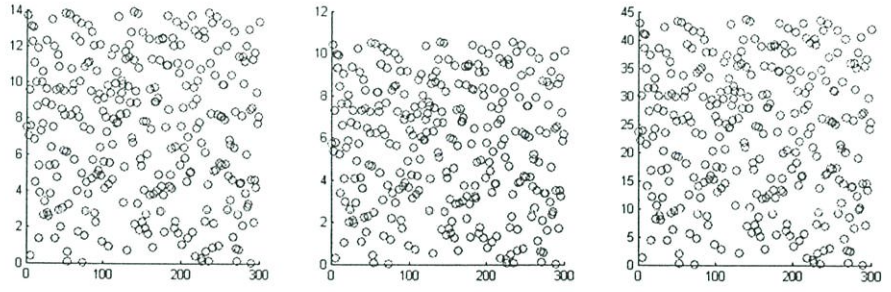
รูปที่ 5.11 การกระจายของข้อมูล P_{D10}, P_{D12}, P_{D14}



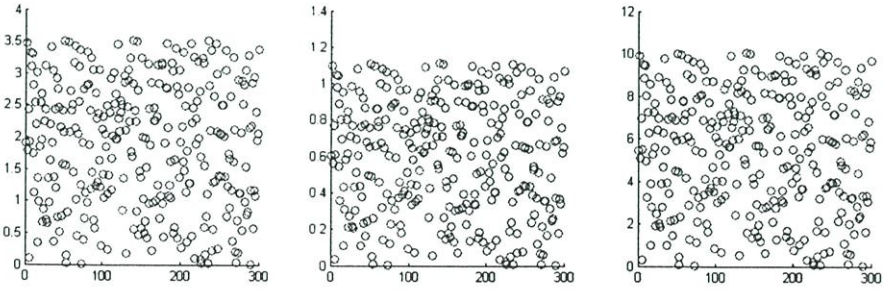
รูปที่ 5.12 การกระจายของข้อมูล P_{D15}, P_{D16}, P_{D17}



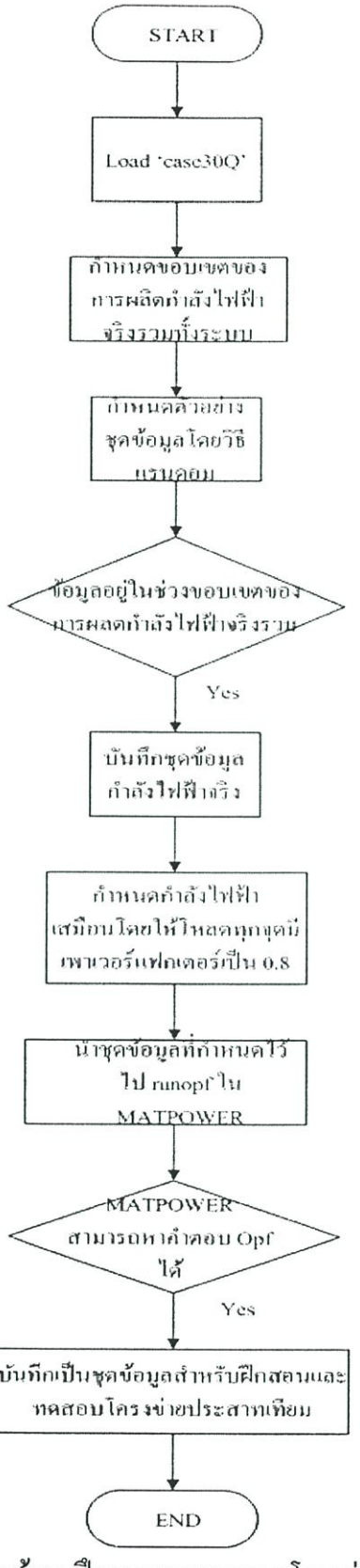
รูปที่ 5.13 การกระจายของข้อมูล P_{D18}, P_{D19}, P_{D20}



รูปที่ 5.14 การกระจายของข้อมูล P_{D21}, P_{D23}, P_{D24}



รูปที่ 5.15 การกระจายของข้อมูล P_{D26}, P_{D29}, P_{D30}



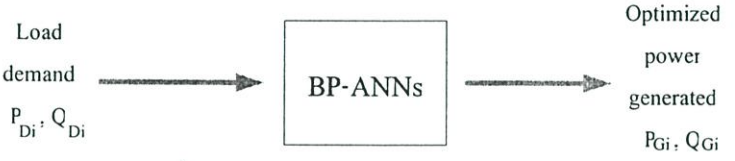
รูปที่ 5.16 แสดงโปรแกรมเตรียมข้อมูลฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมในระบบ IEEE 30 bus

5.3 โครงสร้างและเงื่อนไขของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทดสอบ

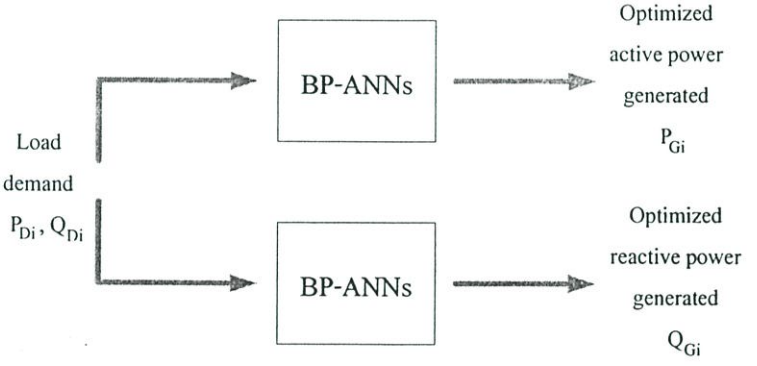
สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ (Back propagation Neural Networks) และแบบเอลแมน (Elman Neural Networks) โดยทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่าย 4 รูปแบบคือ

1. โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับโครงข่ายเดียวให้คำตอบทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนดังรูป 5.17

2. โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับแบบแยกโครงข่ายสำหรับกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนดังรูป 5.18

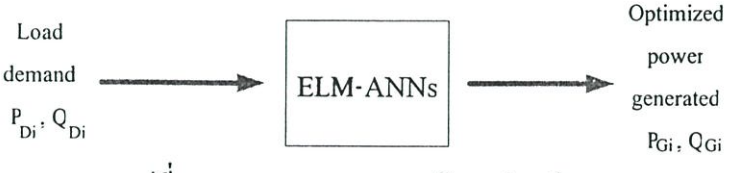


รูปที่ 5.17 BP-ANNs แบบโครงข่ายเดียว



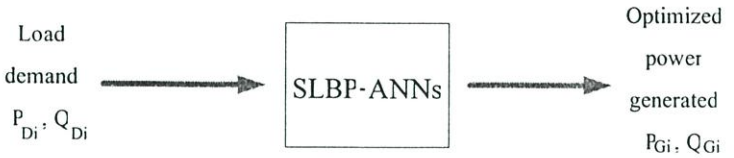
รูปที่ 5.18 BP-ANNs แบบแยกโครงข่ายสำหรับกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน

3. โครงข่ายประสาทเทียมแบบเอลแมนแบบโครงข่ายเดียวให้คำตอบทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนดังรูป 5.19



รูปที่ 5.19 ELM-ANNs แบบโครงข่ายเดียว

4. โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับและมีชั้นซ่อนเดียวให้คำตอบทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนดังรูป 5.20



รูปที่ 5.20 SLBP-ANNs

5.4 ขั้นตอนการฝึกสอนและการทดสอบ

5.4.1 เงื่อนไขต่าง ๆ ภายในโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ

1. ค่าเริ่มต้นที่ใช้เป็นค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) และค่าไบอัส (bias)

ในการเลือกค่าเริ่มต้นที่จะใช้เป็นค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสในโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับนี้ โดยทั่วไปจะมี 2 วิธี คือ กำหนดค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสด้วยตนเอง หรือ อีกวิธีการคือให้โปรแกรมทำการเลือกค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสโดยวิธีการสุ่มเลือก โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้วิธีการสุ่มเลือกค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัส เนื่องจากจะทำให้การฝึกสอนในแต่ละรอบนั้นมีทิศทางการลู่เข้าสู่คำตอบที่แตกต่างกันออกไป

2. ลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัส

การปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสนั้นมีวิธีการอยู่หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสด้วยวิธี Levenberg-Marquardt Algorithm ซึ่งมีประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการฝึกสอนสูงที่สุด

โดยในการทดสอบนี้ได้กำหนดให้มีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสเป็นจำนวน 500 ครั้ง (Epoch) สำหรับโครงข่ายแบบแพร่ค่าย้อนกลับดังรูปที่ 5.17 และ 5.18 และ 100 ครั้งสำหรับโครงข่ายแบบเอลแมนและโครงข่ายแบบแพร่ค่าย้อนกลับชั้นเดียวดังรูปที่ 5.19 และ 5.20 โดยได้กำหนดให้ทำการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสด้วยจำนวนนี้ในทุกการทดสอบเพื่อที่จะได้สามารถเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนได้ ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสในแต่ละรอบนั้นจะทำการคำนวณหาค่าผิดพลาดของคำตอบของข้อมูลของชุดฝึกสอนและข้อมูลของชุดทดสอบแต่ละชุด เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดยกกำลังสอง (Mean Square Error, MSE) ของชุดข้อมูลทดสอบในรอบการคำนวณปัจจุบันกับค่า MSE ของข้อมูลทดสอบที่ได้จากการคำนวณในรอบก่อนหน้านี้ และทำการบันทึกค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสในรอบที่ทำให้ค่า MSE ของข้อมูลชุดทดสอบมีค่าต่ำที่สุด

3. จำนวนรอบของการฝึกสอน

เมื่อโครงข่ายประสาทเทียมทำการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสจนครบแล้ว ถือว่าเป็นหนึ่งรอบของการฝึกสอน ซึ่งหลังจากจบหนึ่งรอบของการฝึกสอนก็จะทำการสุ่มเลือกค่าถ่วงน้ำหนักขึ้นมาใหม่อีก ซึ่งจะเป็นค่าที่ต่างจากค่าเริ่มต้นที่ผ่านมา และจะทำจนครบจำนวนรอบที่เราได้กำหนดไว้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดให้จำนวนรอบของการฝึกสอนในแต่ละโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมคือ 10 รอบต่อโครงสร้าง และเลือกรอบของการฝึกสอนที่ทำให้ค่า MAPE ของชุดทดสอบมีค่าต่ำที่สุด

4. จำนวนโหนดในชั้นซ่อนของโครงข่ายประสาทเทียม

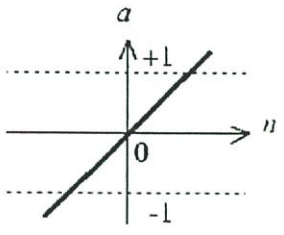
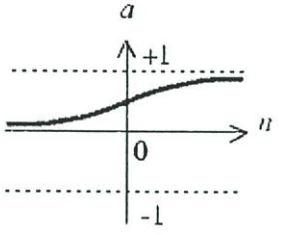
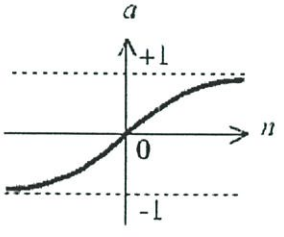
จำนวนโหนดชั้นซ่อนจะมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการฝึกสอน นั่นคือถ้าจำนวนโหนดมากเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนก็มากตามไปด้วย แต่จำนวนโหนดนั้นไม่ได้เป็นสิ่งที่จะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพ นั่นคือจำนวนโหนดในชั้นซ่อนที่มากไม่ได้เป็นตัวที่จะบอกว่าโครงข่ายประสาทเทียมจะมีประสิทธิภาพดี ในบางปัญหาจำนวนโหนดในชั้นซ่อนที่น้อยก็อาจจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนที่มาก

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับตามรูปที่ 5.17 และ 5.18 มีชั้นซ่อน 2 ชั้น โดยจะกำหนดให้จำนวนโหนดของชั้นซ่อนที่ 1 มากกว่าจำนวนโหนดของชั้นซ่อนที่ 2 อยู่จำนวน 1 โหนด ส่วนการทดสอบกับโครงข่ายประสาทเทียมแบบเอลแมนดังรูปที่ 5.19 จะมีชั้นซ่อนหรือที่เรียกอีกอย่างว่าชั้นรีเคอร์เรนต์เพียงชั้นเดียวซึ่งจะเปรียบเทียบการคำนวณกับโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับที่มีชั้นซ่อนเพียงชั้นเดียวดังรูปที่ 5.20

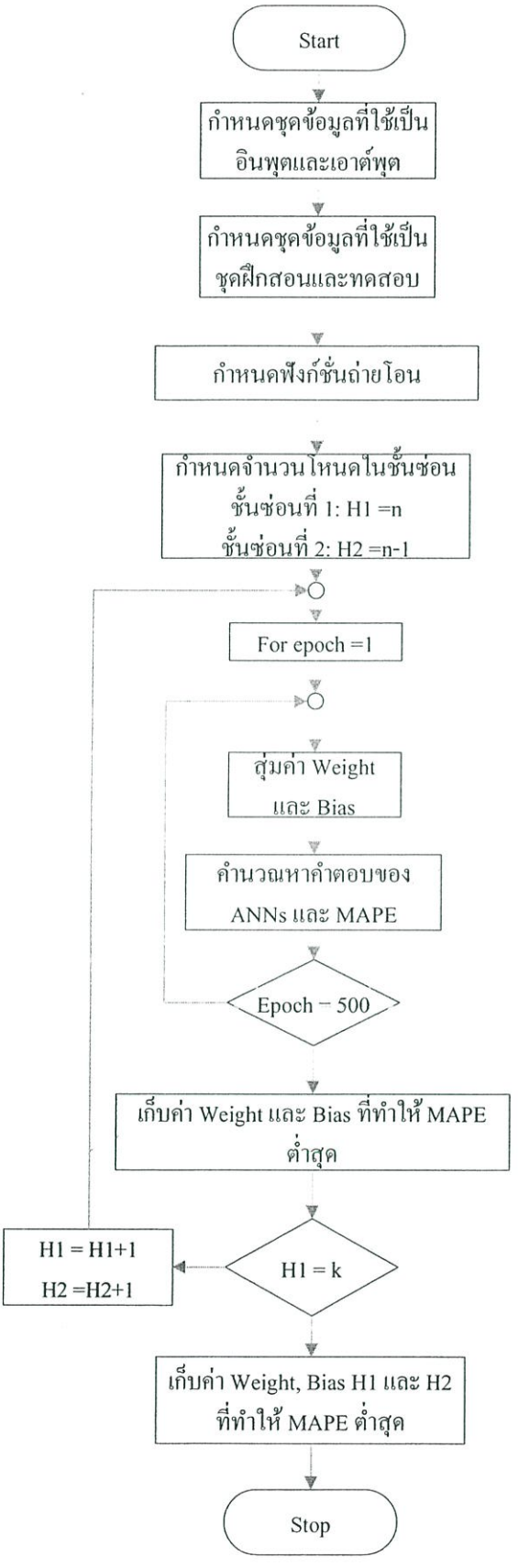
5.4.2 ขั้นตอนการทดสอบด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ

การเลือกใช้ฟังก์ชันในการถ่ายโอนในชั้นซ่อนทั้ง 2 ชั้นและชั้นเอาท์พุทนั้นเพิ่มขึ้น โดยเลือกจากฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบ Log – Sigmoid และ Tan – Sigmoid ส่วนชั้นเอาต์พุตใช้แบบ Linear จากตารางที่ 5.1 จะทำให้ได้โครงข่ายประสาทเทียมทั้งหมด 4 แบบ และทำการเปรียบเทียบว่าโครงข่ายประสาทเทียมแบบใดที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดก็ดูจากค่า MAPE ของชุดทดสอบ

ตารางที่ 5.1 แสดงฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ใช้ในการทดลอง

ชนิดฟังก์ชันการถ่ายโอน	สมการฟังก์ชันการถ่ายโอน
 *a = purelin(n)* Linear Transfer Function	a(n) = n
 *a = logsig(n)* Log-Sigmoid Transfer Function	$a(n) = \frac{1}{1+e^{-n}}$
 *a = tansig(n)* Tan-Sigmoid Transfer Function	$a(n) = \frac{1-e^{(-n)}}{1+e^{(-n)}}$

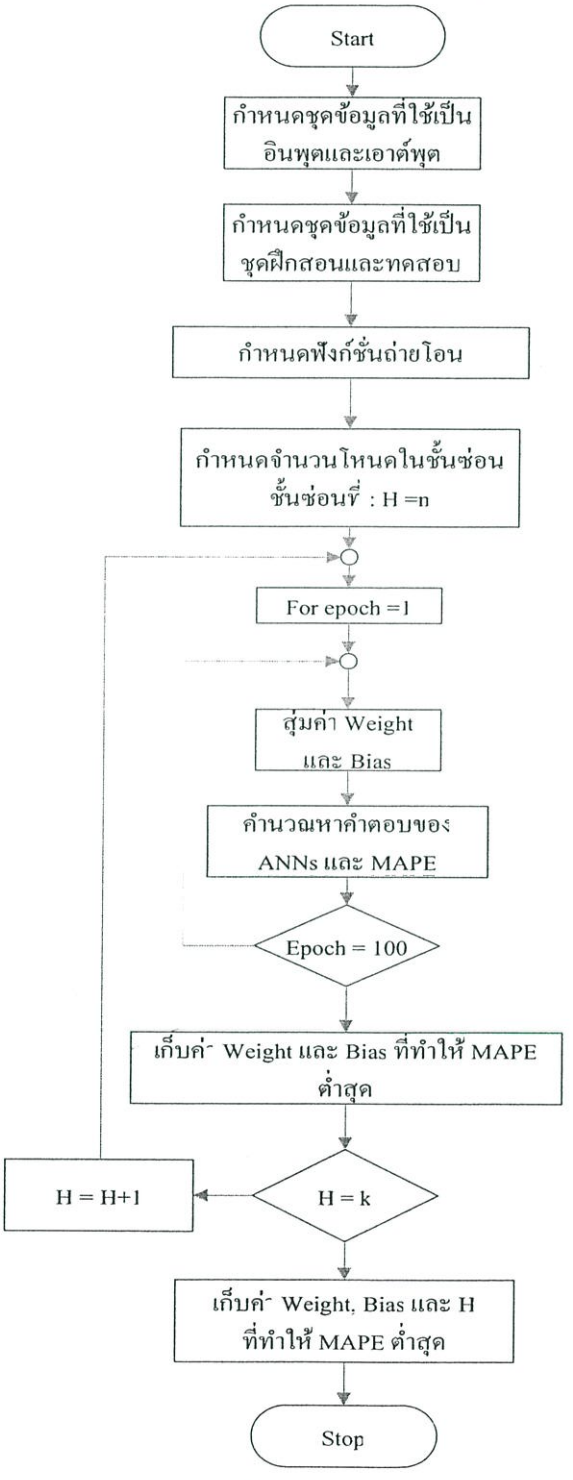
ขั้นตอนการทดสอบด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับที่มีชั้นซ่อน 2 ชั้น มีขั้นตอนดังรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 แผนภาพการทดสอบด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ

5.4.3 ขั้นตอนการทดสอบด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบเอลแมน

เลือกทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมแบบเอลแมนแบบมาตรฐานคือมีชั้นซ่อนหรือที่เรียกว่าชั้นรีเคอร์เรนต์เพียงหนึ่งชั้นและที่ชั้นรีเคอร์เรนต์มีฟังก์ชันถ่ายโอนแบบมาตรฐานเป็น Tan-sigmoid ส่วนชั้นเอาต์พุตเป็นแบบ Linear มีขั้นตอนการทดสอบดังรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 แผนภาพการทดสอบด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบเอลแมน

บทที่ 6

ผลการทดลอง

6.1 ระบบ 2 bus 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับระบบ 2 บัส 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าฝึกสอนด้วยคอมพิวเตอร์ หน่วยประมวลผลกลาง AMD Turion™64 mobile ความเร็ว 1.6 GHz ,หน่วยความจำ 1024 MB ใช้ชุดข้อมูลลำดับที่ 1 ถึง 80 เป็นชุดข้อมูลฝึกสอนและ ลำดับที่ 81 ถึง 100 เป็นชุดทดสอบ ให้ความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบ (Load Demand) เป็นอินพุต และให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตออกจากโรงไฟฟ้าที่ 1 (Pg_1) และ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตออกจากโรงไฟฟ้าที่ 2 (Pg_2) เป็นเอาต์พุตโดยการศึกษานี้จะฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอน แบบ log-sigmoid ในชั้นซ่อนที่ 1 และใช้แบบ Linear ในชั้นซ่อนที่ 2 และในชั้นข้อมูลด้านออก โดยมีความชันในฟังก์ชั่นถ่ายโอน เท่ากับ 1 เท่านั้น

กำหนดให้มีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสเป็นจำนวน 1,000 ครั้ง (ในที่นี้จะเรียกว่า epoch) ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสแต่ละ epoch จะทำการคำนวณหาค่าผิดพลาดของคำตอบของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบแต่ละชุด เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดยกกำลังสอง (Mean square error, MSE) ของชุดข้อมูลทดสอบใน epoch ปัจจุบัน กับค่า MSE ของชุดข้อมูลทดสอบที่ได้ epoch ก่อนหน้านี้ และเก็บค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสใน epoch ที่ทำให้ค่า MSE ของชุดข้อมูลทดสอบมีค่าต่ำที่สุดไว้ไปแสดง ทดสอบโดยใช้โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบ 2 ชั้นซ้อนจำนวน 10 รูปแบบ ในการทดสอบ พบว่าโครงสร้างที่ดีที่สุดคือชั้นซ่อนที่ 1 มี 10 นิวรอน, ชั้นซ่อนที่ 2 มี 9 นิวรอนให้คำตอบดังนี้

	A	B	C	D
1	ตารางแสดงการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างเหมาะสมสำหรับโรงจักรไฟฟ้า 2 โรง			
2				
3		Power plant 1	Power plant 2	หมายเหตุ
4	ตัวแปรการตัดสินใจ (Decision Variable)			
5	กำลังไฟฟ้าจ่ายออก (MW)	203.27	102.18	P_{Gi}
6				
7	ฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ (Objective function)			
8	สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันต้นทุน a	300.00	200.00	
9	สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันต้นทุน b	8.50	9.50	
10	สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันต้นทุน c	0.01	0.02	
11	ต้นทุนการผลิต (บาท)	2,440.98	1,327.32	
12	ต้นทุนการผลิตรวม (บาท)	3,768.30		$Min: f(x) = C_t = \sum_{i=1}^{N} (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2)$
13	กำลังไฟฟ้าจ่ายออกรวม (MW)	305.45		
14				
15	ข้อจำกัด (Constraints)			
16	กำลังการผลิตขั้นต่ำ	30.00	50.00	$P_{Gmin} \le P_{Gy} \le P_{Gmax}$
17	กำลังการผลิตสูงสุด	300.00	400.00	
18	กำลังไฟฟ้าที่ระบบต้องการ	305.45		P_{Gy}

Program / Data / Data N / Chart1 / Chart N / Chart3 / Sheet3 /

รูปที่ 6.1 ตัวอย่างผลการทดลองและเตรียมข้อมูลโดยใช้ MS-Excel Solver

ตารางที่ 6.1 ผลการทดลองและค่าผิดพลาดของโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อเทียบกับ Solver โดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอน 80 ชุด และข้อมูลทดสอบ 20 ชุด

ลำดับ	Solver		ANNs		Error(%)	
	P_1	P_2	P_1	P_2	P_1	P_2
81	300.00	349.90	299.9640	350.0000	0.0120	0.0289
82	210.79	107.19	210.7163	107.0000	0.0350	0.1773
83	42.53	50.00	42.5541	50.0000	0.0567	0.0000
84	218.31	112.20	218.2147	112.0000	0.0437	0.1783
85	233.34	122.22	233.3107	122.0000	0.0126	0.1800
86	282.18	154.79	281.9657	155.0000	0.0759	0.1357
87	293.46	162.30	293.8538	162.0000	0.1342	0.1848
88	300.00	174.55	300.5006	174.0000	0.1669	0.3151
89	30.00	50.00	30.0292	50.0000	0.0973	0.0000
90	300.00	262.22	299.9000	262.0000	0.0333	0.0847
91	203.27	102.18	203.2472	102.0000	0.0112	0.1762
92	244.60	129.74	244.6850	130.0000	0.0348	0.2004
93	139.39	59.60	139.4551	60.0000	0.0467	0.6711
94	300.00	368.69	300.0550	369.0000	0.0183	0.0849
95	300.00	299.80	300.1066	300.0000	0.0355	0.0674
96	300.00	193.33	299.7464	194.0000	0.0845	0.3448
97	300.00	324.85	299.9792	325.0000	0.0069	0.0466
98	300.00	230.91	300.0530	231.0000	0.0177	0.0394
99	188.24	92.16	188.3408	92.0000	0.0535	0.1736
100	61.31	50.00	61.2359	50.0000	0.1209	0.0000

Best node = 10, 9 with MAPE = 0.1047

6.2 ระบบ 9 bus 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าฝึกสอนด้วยคอมพิวเตอร์ หน่วยประมวลผลกลาง Pentium4 ความเร็ว 3.0 GHz ,หน่วยความจำ 1 GB ใช้ชุดข้อมูลลำดับที่ 1 ถึง 100 เป็นชุดข้อมูลฝึกสอนและ ลำดับที่ 101 ถึง 120 เป็นชุดทดสอบ ให้ความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบ (P_{D5}, Q_{D5}, P_{D7}, Q_{D7}, P_{D9},Q_{D9}) เป็นอินพุต และให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตออกจากโรงไฟฟ้าที่ 1 (P_{G1}, Q_{G1}), ผลิตออกจากโรงไฟฟ้าที่ 2 (P_{G2}, Q_{G2}) และ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตออกจากโรงไฟฟ้าที่ 3 (Pg_3, Qg_3) เป็นเอาต์พุต โดยการศึกษานี้จะฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่มีชั้นซ่อน (Hidden layer) 2 ชั้น ด้วยฟังก์ชั่นถ่ายโอน 2 ชนิดคือ แบบ tan-sigmoid และ แบบ log-sigmoid ส่วนในชั้นข้อมูลด้านออกให้มีฟังก์ชั่นถ่ายโอนเป็น linear เท่านั้น

6.2.1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบโครงข่ายเดียว (Single ANNs)

กำหนดให้มีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสเป็นจำนวน 500 ครั้ง ทดสอบโดยใช้โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบ 2 ชั้นซ้อนจำนวน 11 ขนาดในการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 รูปแบบโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับ	ฟังก์ชั้นถ่ายโอนที่ใช้ในโครงข่าย			ขนาดโครงสร้างที่ใช้ทดลอง	
	ชั้นซ่อนที่ 1	ชั้นซ่อนที่ 2	ชั้นข้อมูลด้านออก	โครงสร้างเล็กที่สุด	โครงสร้างใหญ่ที่สุด
1	logsig	logsig	purelin	5-4	20-19
2	tansig	tansig	purelin	5-4	20-19
3	logsig	tansig	purelin	5-4	20-19
4	tansig	logsig	purelin	5-4	20-19

ตารางที่ 6.3 สรุปผลการทดลองและค่าผิดพลาดของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมแบบโครงข่ายเดียวเมื่อเทียบกับ MATPOWER โดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอน 275 ชุด ชุดข้อมูลตรวจสอบ 50 ชุดและข้อมูลทดสอบ 25 ชุด ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

	Structure		Type I			Type II		
			HD1TF	HD2TF	O/PTF	HD1TF	HD2TF	O/PTF
Number	HD1	HD2	logsig	logsig	purelin	tansig	tansig	purelin
1	5	4	11.42			10.75		
2	6	5	10.64			11.44		
3	7	6	9.35			9.39		
4	8	7	7.46			5.85		
5	9	8	5.90			7.66		
6	10	9	5.54			5.49		
7	11	10	5.88			3.60		
8	12	11	5.32			5.12		
9	13	12	4.03			4.40		
10	14	13	4.43			4.22		
11	15	14	4.67			4.16		
12	16	15	4.08			6.45		
13	17	16	2.87			3.07		
14	18	17	2.66			3.31		
15	19	18	2.96			3.21		
16	20	19	3.25			2.87		

Type I : Best node = 18,17 with MAPE = 2.66

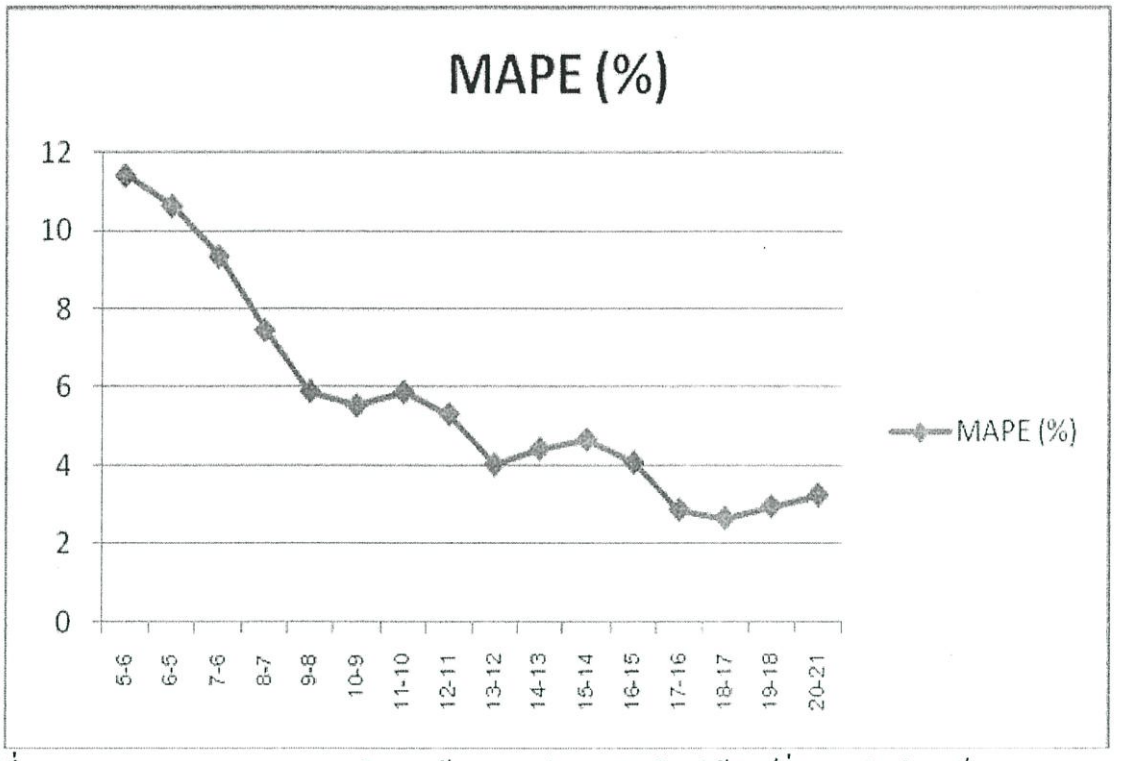
Type II : Best node = 20,19 with MAPE = 2.87

ตารางที่ 6.3 สรุปผลการทดลองและค่าผิดพลาดของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมแบบโครงข่ายเดียวเมื่อเทียบกับ MATPOWER โดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอน 275 ชุด ชุดข้อมูลตรวจสอบ 25 ชุดและข้อมูลทดสอบ 25 ชุด ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ต่อ)

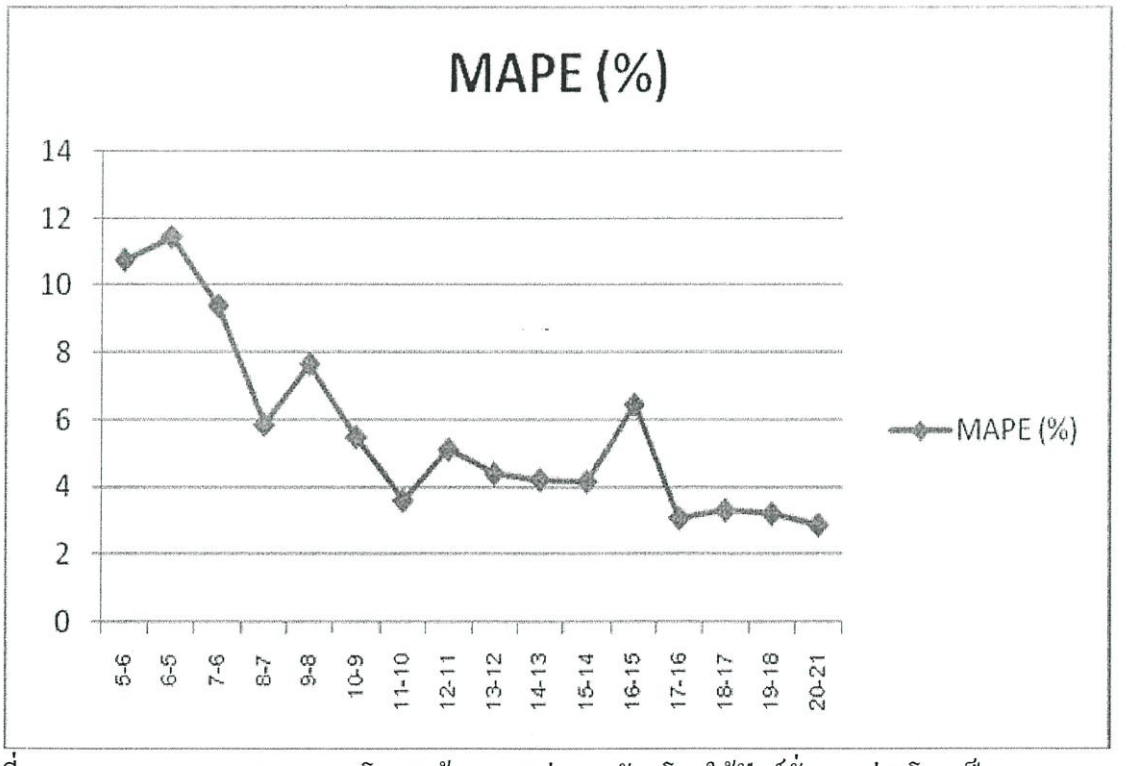
	Structure		Type III			Type IV		
			HD1TF	HD2TF	O/PTF	HD1TF	HD2TF	O/PTF
Number	HD1	HD2	logsig	tansig	purelin	tansig	logsig	purelin
1	5	4	11.09			10.28		
2	6	5	12.50			10.71		
3	7	6	9.33			7.96		
4	8	7	6.99			6.76		
5	9	8	6.41			5.58		
6	10	9	5.80			5.75		
7	11	10	4.86			4.95		
8	12	11	5.69			5.00		
9	13	12	4.02			3.76		
10	14	13	4.63			4.18		
11	15	14	4.35			4.45		
12	16	15	3.32			3.65		
13	17	16	3.99			3.32		
14	18	17	2.55			3.86		
15	19	18	3.08			2.59		
16	20	19	3.36			2.35		

Type III: Best node = 18, 17 with MAPE = 2.55

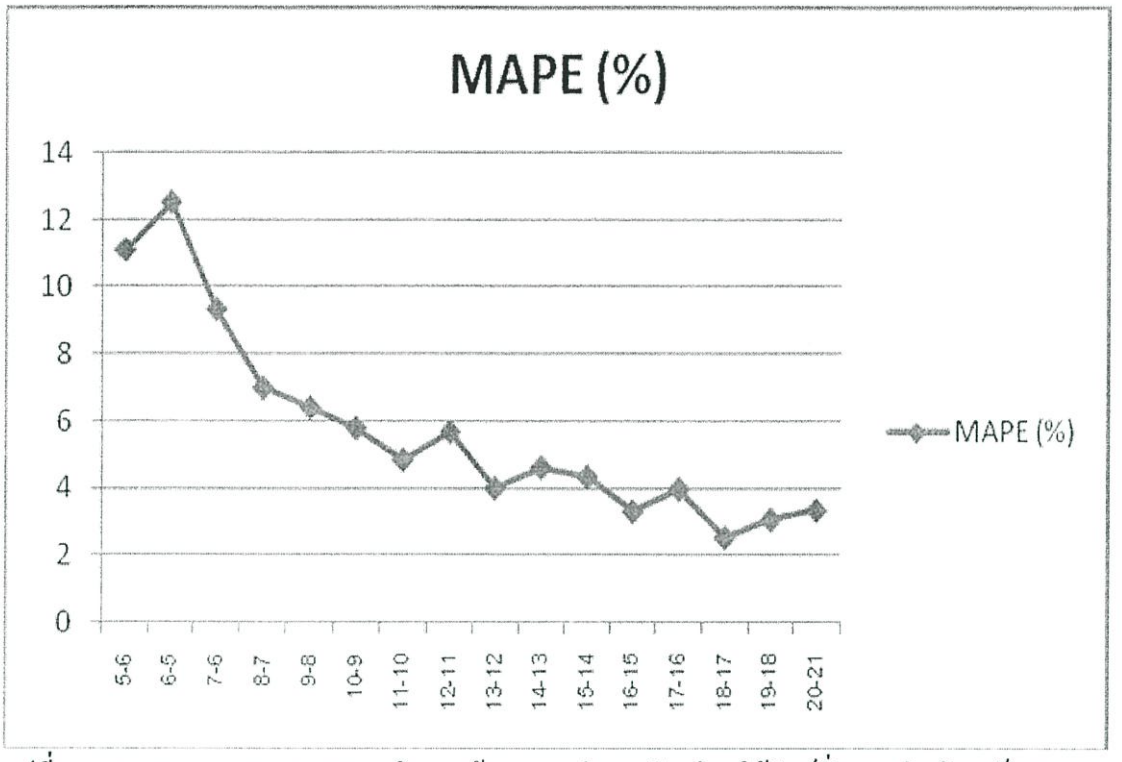
Type IV: Best node = 20, 19 with MAPE = 2.35



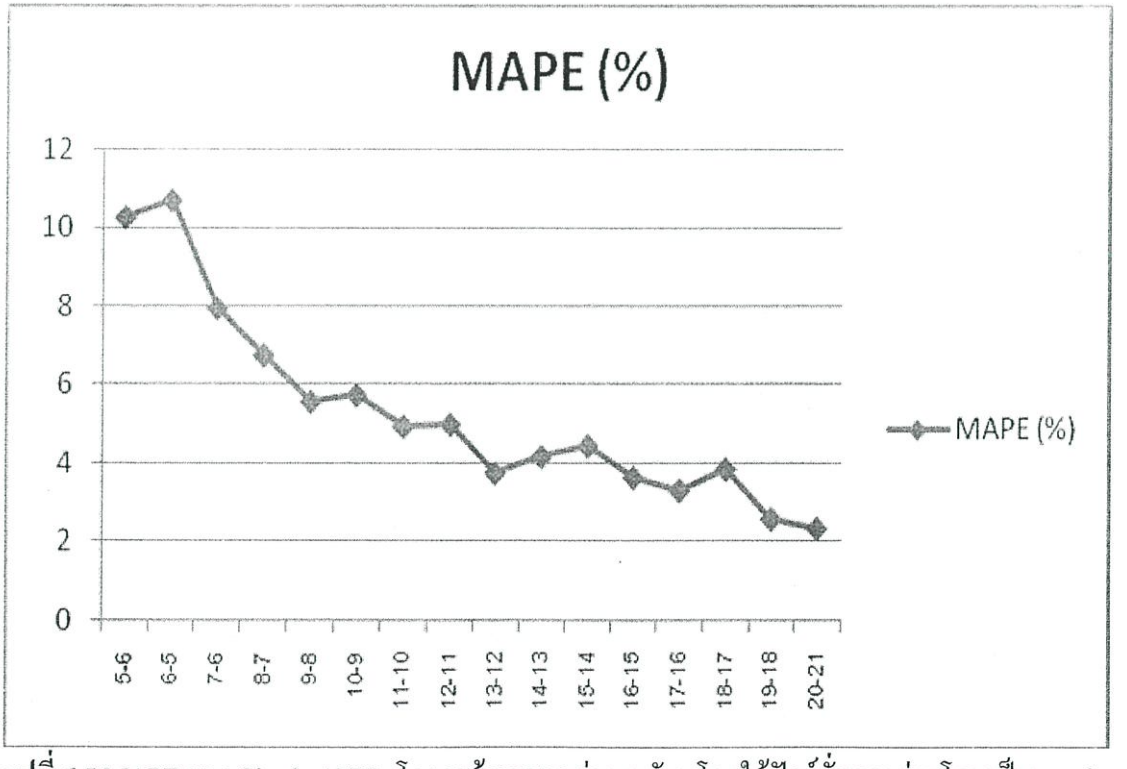
รูปที่ 6.2 MAPE ของ Single ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig – logsig ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 6.3 MAPE ของ Single ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น tansig – tansig ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 6.4 MAPE ของ Single ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig-tansig ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 6.5 MAPE ของ Single ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น tansig-logsig ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ตารางที่ 6.4 ตัวอย่างผลการทดลองที่ดีที่สุด ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนตามโครงสร้างลำดับที่ 4 ตามตารางที่ 6.2 และขนาดโครงสร้างที่ดีที่สุดคือ 20–19

ลำดับ	MATPOWER						SINGLE ANNs					
	P_{G1}	Q_{G1}	P_{G2}	Q_{G2}	P_{G3}	Q_{G3}	P_{G1}	Q_{G1}	P_{G2}	Q_{G2}	P_{G3}	Q_{G3}
276	96.12	120.73	95.82	143.91	97.59	162.51	96.21	120.82	95.87	143.48	97.63	162.73
277	132.37	97.40	93.92	112.54	167.22	155.92	132.03	97.60	93.98	108.04	167.17	155.79
278	123.82	80.62	40.17	135.50	139.93	131.20	123.86	80.51	39.85	135.45	140.09	131.51
279	100.34	181.95	55.47	110.27	137.48	111.28	100.44	192.50	55.71	110.17	137.50	111.18
280	136.23	43.13	80.77	44.11	130.54	63.01	136.41	43.41	81.73	44.26	129.91	62.83
281	138.62	97.71	44.11	40.55	59.37	137.29	139.23	97.23	44.74	40.28	42.72	137.33
282	138.38	89.30	30.76	-0.29	116.88	117.44	138.84	89.24	31.23	-0.44	117.87	117.72
283	122.47	50.14	171.45	5.63	77.28	109.68	122.69	50.54	167.88	5.94	77.06	109.15
284	101.33	105.39	136.46	173.66	132.56	147.09	100.76	105.54	136.42	173.26	132.42	147.08
285	124.91	199.88	183.57	141.23	143.22	185.50	124.98	199.85	183.71	141.20	143.31	188.83
286	195.84	190.92	155.04	114.73	72.19	149.09	195.84	191.01	154.79	114.78	72.20	149.09
287	172.37	142.10	147.31	193.87	89.48	125.29	172.04	141.96	147.43	184.59	89.45	125.30
288	167.21	124.24	161.01	80.10	129.72	75.91	167.05	124.53	160.95	80.53	131.81	75.76
289	73.05	62.17	150.15	141.32	86.49	96.75	69.38	62.35	151.89	142.38	86.30	97.06
290	152.61	155.40	129.81	98.61	51.80	-3.00	133.04	154.21	128.98	97.49	51.56	-4.05
291	81.15	107.62	44.07	96.88	157.84	17.26	81.35	107.32	44.25	95.85	159.93	15.13
292	67.02	105.46	29.07	105.19	97.24	116.15	66.70	105.09	29.38	104.15	97.21	116.56
293	93.21	107.18	93.59	144.65	130.70	100.11	93.22	107.35	93.51	144.49	130.85	99.97
294	101.70	116.53	151.74	130.18	113.24	83.01	101.66	117.27	151.91	130.41	113.22	83.11
295	50.98	105.28	126.57	109.13	105.19	174.93	51.04	105.44	126.63	109.05	105.08	173.75
296	63.06	91.14	121.44	97.80	115.31	27.76	62.95	91.04	121.44	97.75	115.15	27.65
297	51.83	25.91	67.12	37.86	90.01	70.08	49.67	26.14	69.77	37.91	88.71	70.25
298	29.60	31.77	70.43	95.40	77.81	54.88	29.38	31.89	92.49	96.23	77.69	54.81
299	18.73	-0.54	50.92	74.18	70.75	35.62	18.98	-0.48	50.33	74.12	70.29	35.77
300	113.84	1.31	41.09	66.85	58.77	60.42	115.89	2.07	41.06	66.77	59.78	60.08

6.2.2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบแยกโครงข่าย (Separated ANNs, P-ANNs & Q-ANNs)

กำหนดให้มีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสเป็นจำนวน 500 ครั้ง ทดสอบโดยใช้โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบ 2 ชั้นซ้อนจำนวน 11 ขนาดในการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 7.2

ตารางที่ 6.5 สรุปผลการทดลองและค่าผิดพลาดของกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อเทียบกับ MATPOWER โดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอน 275 ชุด ชุดข้อมูลตรวจสอบ 50 ชุดและข้อมูลทดสอบ 25 ชุด ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

	Structure		Type I			Type II		
			HD1TF	HD2TF	O/PTF	HD1TF	HD2TF	O/PTF
Number	HD1	HD2	logsig	logsig	purelin	tansig	tansig	purelin
1	5	4	10.28			0.75		
2	6	5	10.71			0.75		
3	7	6	7.96			0.55		
4	8	7	6.76			0.44		
5	9	8	5.58			0.85		
6	10	9	5.75			0.50		
7	11	10	4.95			1.70		
8	12	11	5.00			0.43		
9	13	12	3.76			1.55		
10	14	13	4.18			0.59		
11	15	14	4.45			1.74		

Type I : Best node = 13, 12 with MAPE = 3.76

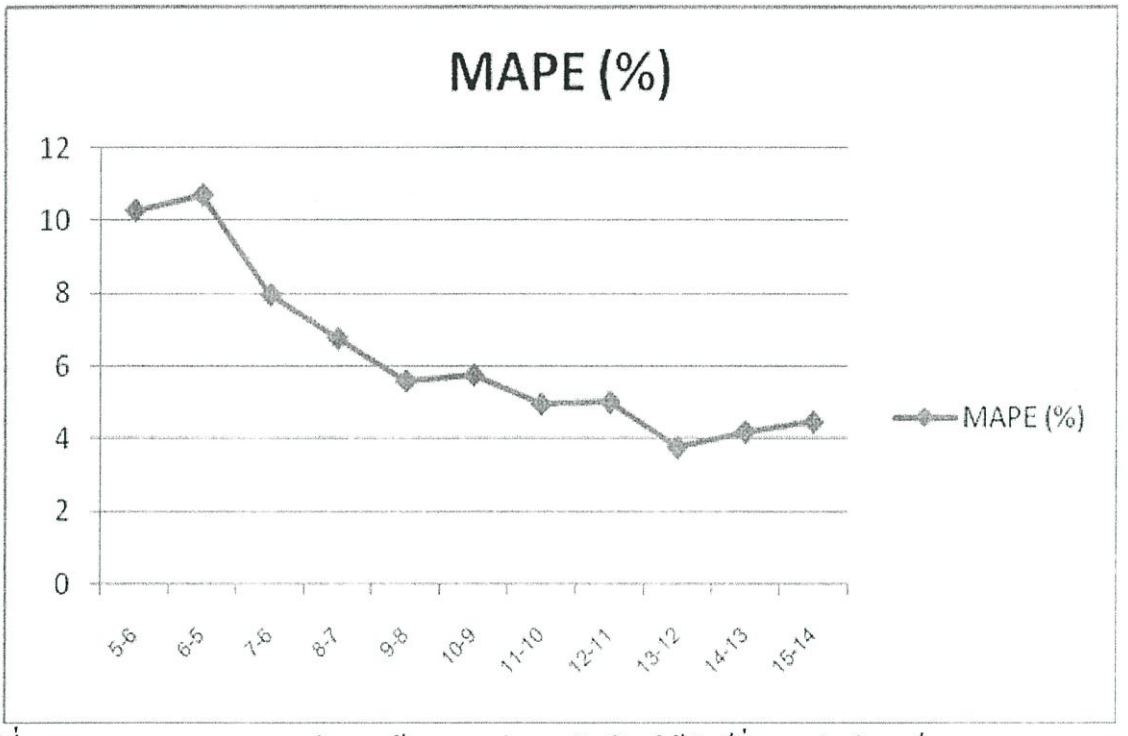
Type II : Best node = 12, 11 with MAPE = 0.43

ตารางที่ 6.5 สรุปผลการทดลองและค่าผิดพลาดของกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อเทียบกับ MATPOWER โดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอน 275 ชุด ชุดข้อมูลตรวจสอบ 50 ชุดและข้อมูลทดสอบ 25 ชุด ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ต่อ)

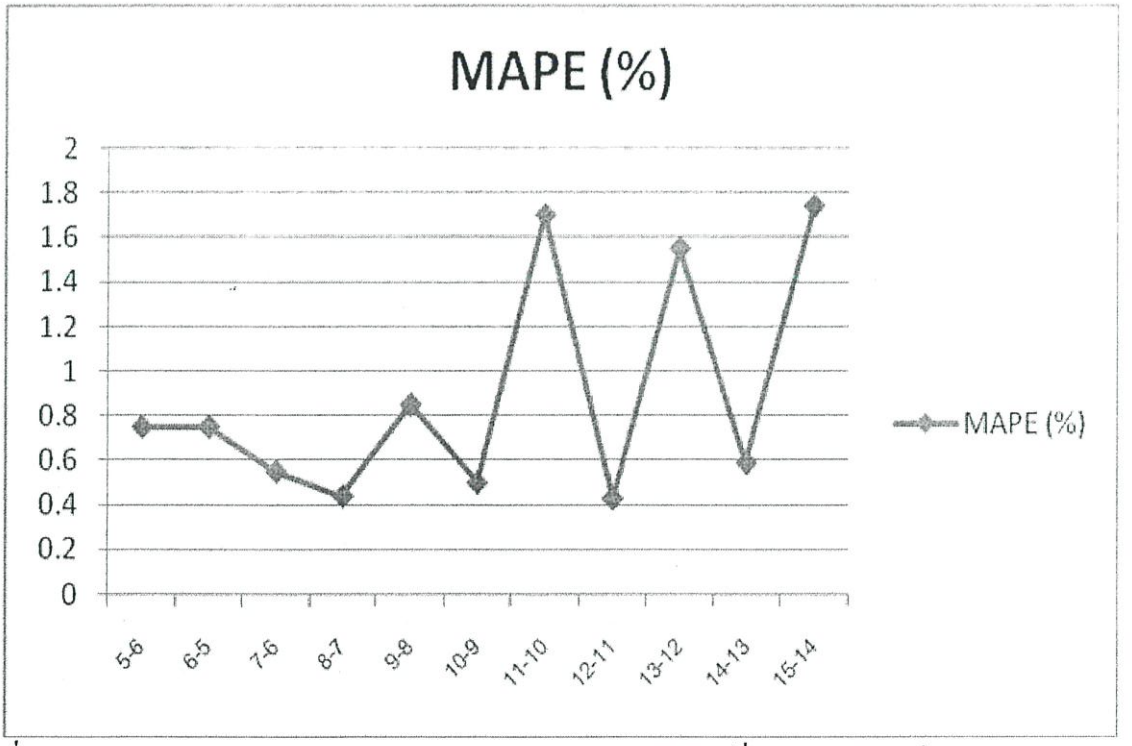
	Structure		Type III			Type IV		
			HD1TF	HD2TF	O/PTF	HD1TF	HD2TF	O/PTF
Number	HD1	HD2	logsig	tansig	purelin	tansig	logsig	purelin
1	5	4	0.89			0.92		
2	6	5	0.66			0.61		
3	7	6	0.66			0.50		
4	8	7	0.68			0.43		
5	9	8	0.63			0.77		
6	10	9	0.47			0.44		
7	11	10	0.33			0.49		
8	12	11	0.38			0.40		
9	13	12	0.44			0.65		
10	14	13	0.48			0.50		
11	15	14	0.68			0.56		

Type III : Best node = 11, 10 with MAPE = 0.33

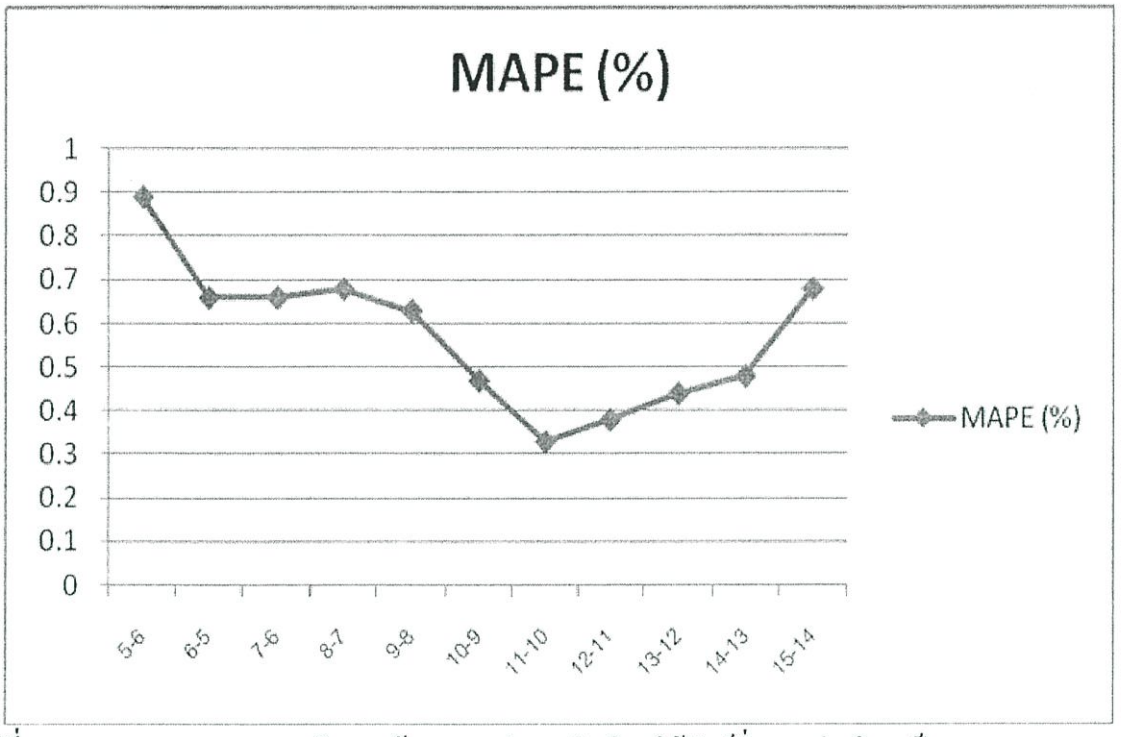
Type IV: Best node = 15, 14 with MAPE = 0.56



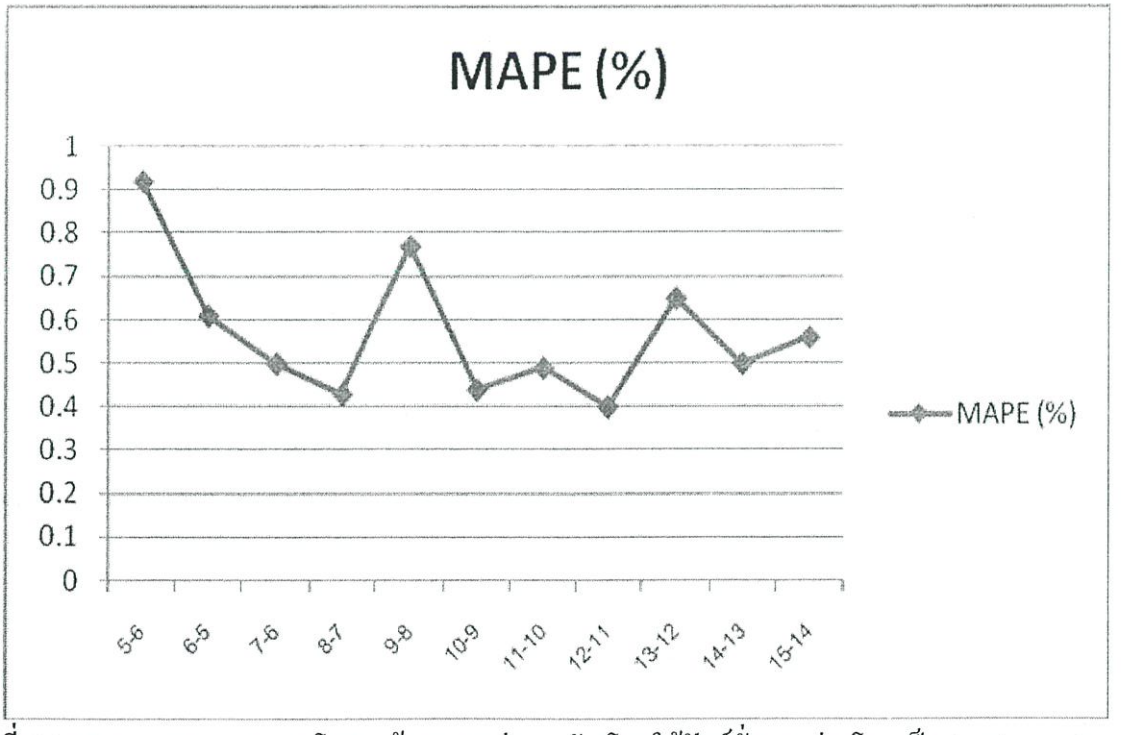
รูปที่ 6.6 MAPE ของ P- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig-logsig ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 6.7 MAPE ของ P- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น tansig-tansig ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 6.8 MAPE ของ P- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig-tansig ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 6.9 MAPE ของ P- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig-tansig ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ตารางที่ 6.6 ตัวอย่างผลการทดลองของกำลังไฟฟ้าจริงที่ดีที่สุด ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนตามโครงสร้างลำดับที่ 3 ตามตารางที่ 6.2 และขนาดโครงสร้างที่ดีที่สุดคือ 11–10

ลำดับ	MATPOWER			ANNs		
	P_{G1}	P_{G1}	P_{G1}	P_{G1}	P_{G1}	P_{G1}
276	96.12	120.73	95.82	96.14	121.42	95.98
277	143.91	97.59	162.51	144.05	97.37	162.42
278	132.37	97.4	93.92	131.87	97.3	93.74
279	112.54	167.22	155.92	117.66	167.6	155.94
280	123.82	80.62	40.17	123.96	80.4	40.2
281	135.5	139.93	131.2	135.12	140	131.52
282	100.34	181.95	55.47	100.14	182.14	55.84
283	110.27	137.48	111.28	110.54	137.67	111.86
284	136.23	136.46	173.66	136.5	136.4	173.38
285	132.56	147.09	124.91	132.66	146.81	124.96
286	199.88	183.57	141.23	200.92	184.01	141.14
287	143.22	185.5	195.84	143.12	183.07	195.73
288	190.92	155.04	114.73	190.87	154.71	114.97
289	72.19	149.09	172.37	72.28	149.91	172.3
290	142.1	147.31	193.87	141.89	147.24	199.53
291	89.48	125.29	167.21	89.48	124.88	166.94
292	124.24	161.01	97.24	124.05	160.66	97.24
293	116.15	93.21	107.18	116.08	93.15	107.1
294	93.59	144.65	130.7	93.61	144.04	130.77
295	100.11	101.7	116.53	100.08	101.85	115.56
296	151.74	130.18	113.24	151.61	129.99	113.13
297	83.01	50.98	105.28	83.11	51.15	105.62
298	126.57	109.13	105.19	126.4	108.89	105.24
299	174.93	63.06	91.14	170.47	62.89	91.04
300	121.44	97.8	115.31	121.36	97.85	115.32

ตารางที่ 6.7 สรุปผลการทดลองและค่าผิดพลาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อเทียบกับ MATPOWER โดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอน 275 ชุด ชุดข้อมูลตรวจสอบ 50 ชุดและข้อมูลทดสอบ 25 ชุด ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

	Structure		Type I			Type II		
			HD1TF	HD2TF	O/PTF	HD1TF	HD2TF	O/PTF
Number	HD1	HD2	logsig	logsig	purelin	tansig	tansig	purelin
1	5	4	14.43			15.37		
2	6	5	12.01			13.90		
3	7	6	11.62			9.65		
4	8	7	10.02			9.55		
5	9	8	8.98			11.88		
6	10	9	8.63			9.74		
7	11	10	6.74			6.51		
8	12	11	6.01			5.80		
9	13	12	8.14			7.38		
10	14	13	5.04			6.83		
11	15	14	4.57			7.41		

Type I : Best node = 15, 14 with MAPE = 4.57

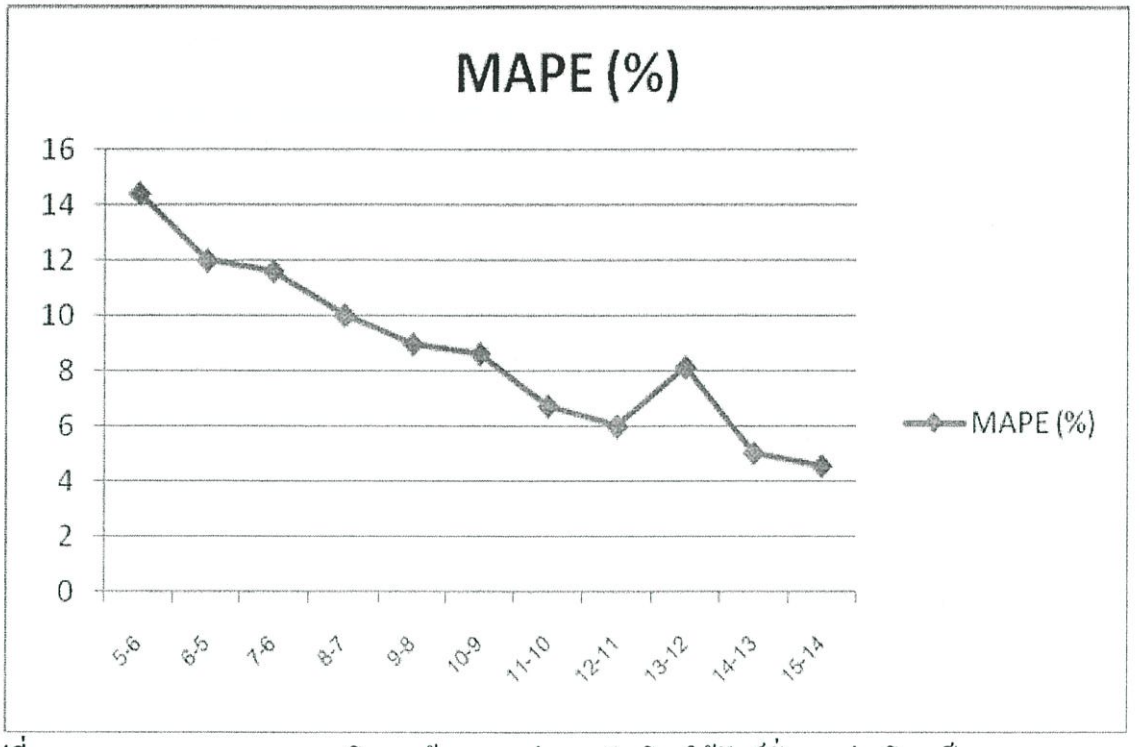
Type II : Best node = 12, 11 with MAPE = 5.80

ตารางที่ 6.7 สรุปผลการทดลองและค่าผิดพลาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อเทียบกับ MATPOWER โดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอน 275 ชุด ชุดข้อมูลตรวจสอบ 50 ชุดและข้อมูลทดสอบ 25 ชุด ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ต่อ)

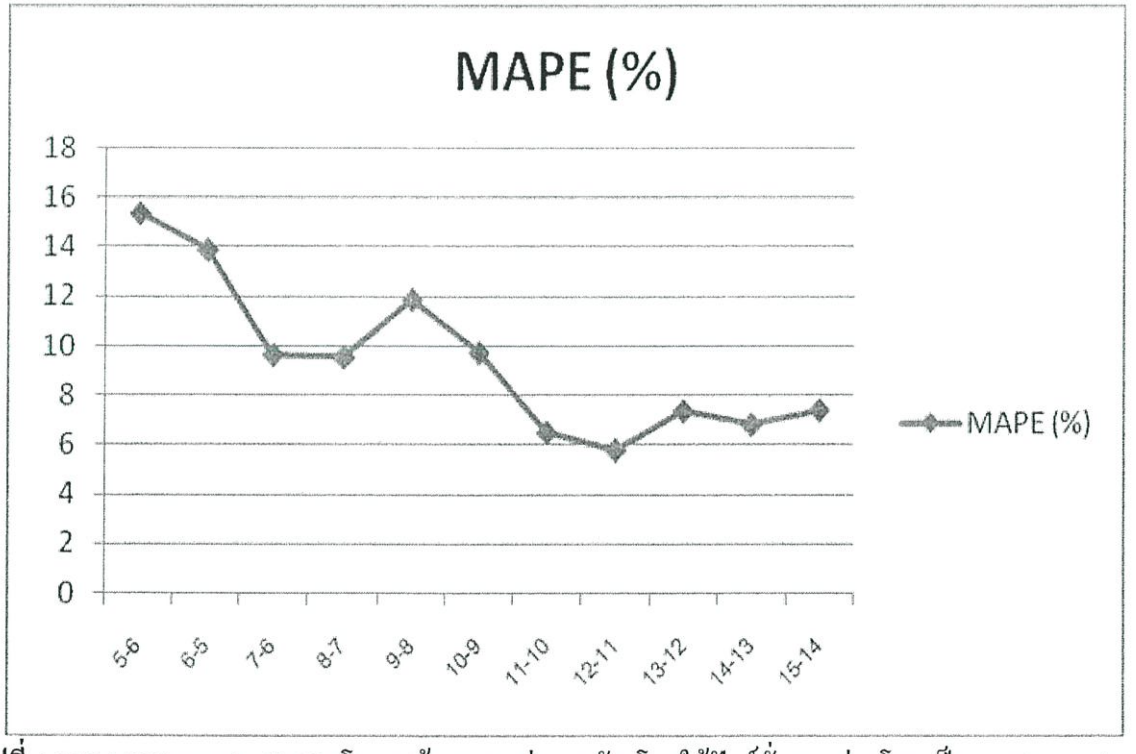
	Structure		Type III			Type IV		
			HD1TF	HD2TF	O/PTF	HD1TF	HD2TF	O/PTF
Number	HD1	HD2	logsig	tansig	purelin	tansig	logsig	purelin
1	5	4	14.31			13.45		
2	6	5	12.34			10.09		
3	7	6	10.54			11.27		
4	8	7	9.55			9.28		
5	9	8	8.63			8.65		
6	10	9	8.71			11.98		
7	11	10	7.67			14.49		
8	12	11	8.11			7.08		
9	13	12	6.16			6.93		
10	14	13	5.34			4.94		
11	15	14	7.16			4.59		

Type III : Best node = 14, 13 with MAPE = 5.34

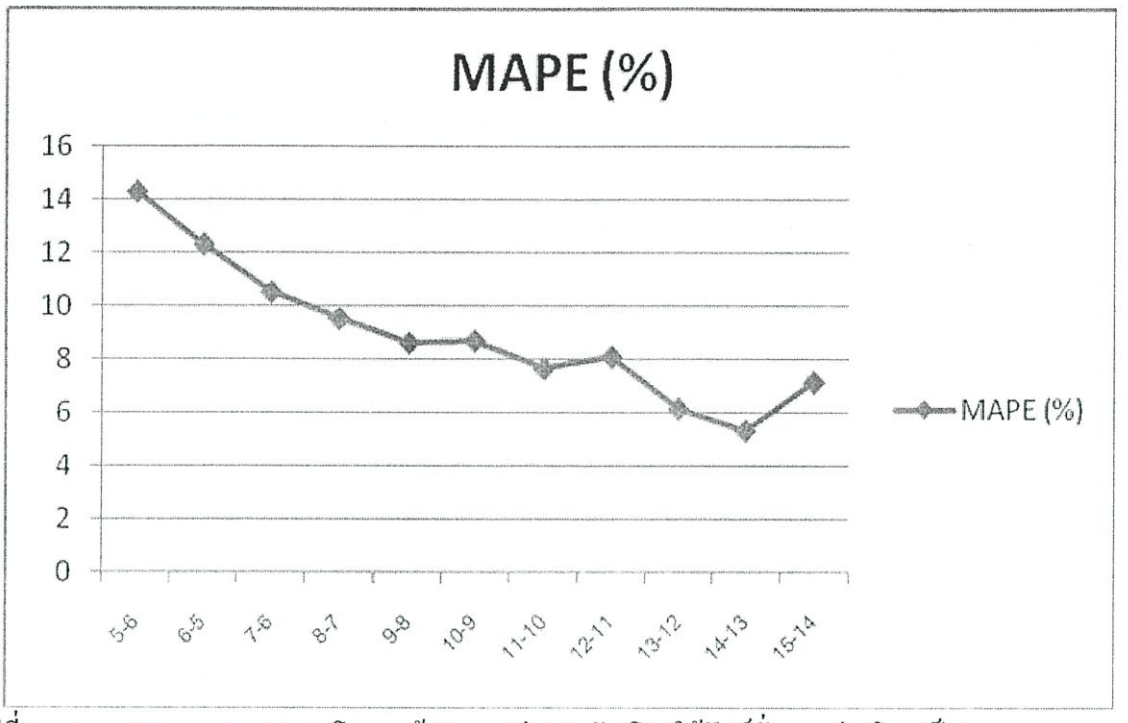
Type IV: Best node = 15, 14 with MAPE = 4.59



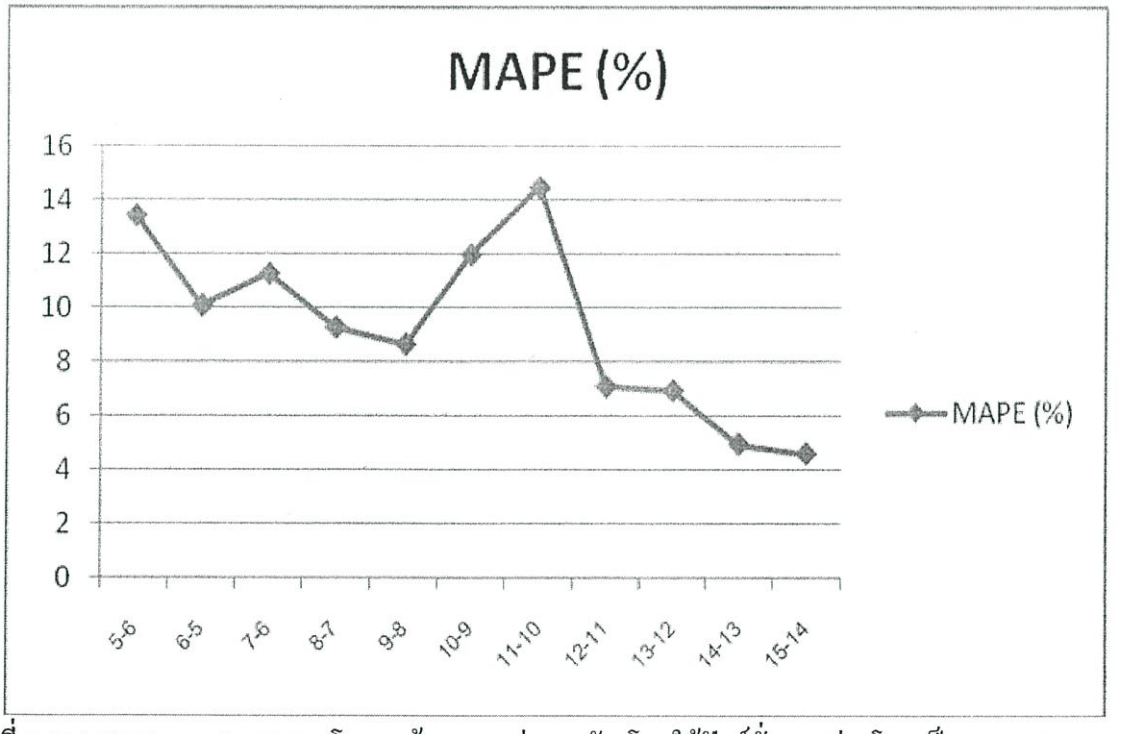
รูปที่ 6. 10 MAPE ของ Q- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig-logsig ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 6.11 MAPE ของ Q- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น tansig-tansig ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 6.12 MAPE ของ Q- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig-tansig ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 6.13 MAPE ของ Q- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น tansig-logsig ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ตารางที่ 6.8 ตัวอย่างผลการทดลองของกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ดีที่สุด ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนตามโครงสร้างลำดับที่ 1 ตามตารางที่ 6.2 และโครงสร้างที่ดีที่สุดคือ 15 – 14

ลำดับ	MATPOWER			ANNs		
	Q_{G1}	Q_{G2}	Q_{G3}	Q_{G1}	Q_{G2}	Q_{G3}
276	43.13	80.77	44.11	42.90	78.15	44.04
277	130.54	63.01	138.62	132.38	63.15	137.97
278	97.71	44.11	40.55	98.68	44.21	40.43
279	59.37	137.29	138.38	62.63	138.24	138.35
280	89.30	30.76	-0.29	89.65	31.07	-0.23
281	116.88	117.44	122.47	116.43	117.91	122.47
282	50.14	171.45	5.63	50.31	169.43	5.70
283	77.28	109.68	101.33	77.30	109.60	101.71
284	105.39	80.10	129.72	104.95	80.32	130.77
285	75.91	73.05	62.17	75.58	73.32	62.66
286	150.15	141.32	86.49	152.45	141.32	86.47
287	96.75	152.61	155.40	96.20	154.64	153.46
288	129.81	98.61	51.80	127.93	97.23	51.66
289	-3.00	81.15	107.62	-3.22	82.67	107.35
290	44.07	96.88	157.84	43.80	95.71	154.96
291	17.26	67.02	105.46	16.50	66.83	105.10
292	29.07	105.19	27.76	28.82	102.35	27.79
293	51.83	25.91	67.12	53.21	25.83	64.46
294	37.86	90.01	70.08	37.98	90.22	69.87
295	29.60	31.77	70.43	29.82	31.94	69.03
296	95.40	77.81	54.88	94.86	77.54	54.82
297	18.73	-0.54	50.92	18.69	-1.49	51.47
298	74.18	70.75	35.62	74.32	71.10	35.87
299	113.84	1.31	41.09	116.40	2.36	41.43
300	66.85	58.77	60.42	66.70	58.33	60.88

ตารางที่ 6.9 ตัวอย่างรูปแบบโหลดอินพุตที่ใช้ในการทดลองกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เปรียบเทียบเวลาการหาคำตอบในตารางที่ 6.10 ถึง 6.13

กรณีที่	P_{D5}	Q_{D5}	P_{D7}	Q_{D7}	P_{D9}	Q_{D9}
	MW	MVAr	MW	MVAr	MW	MVAr
296	48.00	36.00	39.00	29.25	118.00	88.50
297	155.00	116.25	18.00	13.50	142.00	106.50
298	177.00	132.75	142.00	106.50	97.00	72.75
299	234.00	175.50	72.00	54.00	14.00	10.50
300	156.00	117.00	104.00	78.00	142.00	106.50

ตารางที่ 6.10 ผลการหาคำตอบด้วย MATPOWER และเวลาที่ใช้ในการคำนวณจากโหลดในตารางที่ 6.9 ตามลำดับ

กรณีที่	P_{G1}	Q_{G1}	P_{G2}	Q_{G2}	P_{G3}	Q_{G3}	Time
	MW	MVAr	MW	MVAr	MW	MVAr	Sec
296	55.47	5.63	89.48	17.26	63.06	1.31	**3.6320**
297	110.27	77.28	125.29	67.02	91.14	41.09	**0.5822**
298	137.48	109.68	167.21	105.46	121.44	66.85	**0.5770**
299	111.28	101.33	124.24	29.07	97.80	58.77	**0.5191**
300	136.23	105.39	161.01	105.19	115.31	60.42	**0.6446**

ตารางที่ 6.11 ผลการหาคำตอบด้วย SINGLE-ANNs โครงสร้างที่ดีที่สุด และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ จากโหลดในตารางที่ 6.9 ตามลำดับ

กรณีที่	P_{G1}	Q_{G1}	P_{G2}	Q_{G2}	P_{G3}	Q_{G3}	Time
	MW	MVAr	MW	MVAr	MW	MVAr	Sec
296	55.55	5.53	89.28	12.69	63.00	2.95	**0.0252**
297	110.25	77.19	125.53	66.87	91.22	41.16	**0.0293**
298	137.49	109.68	167.16	104.45	121.11	67.18	**0.0246**
299	111.21	101.33	124.22	28.29	97.94	59.76	**0.0238**
300	136.70	105.98	160.81	103.02	115.21	60.24	**0.0359**

ตารางที่ 6.12 ตัวอย่างผลการทดลองเปรียบเทียบการคำนวณด้วย MATPOWER และ P-ANNs ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ลำดับ	MATPOWER				P-POWER ANNs			
	P_{G1} (MW)	P_{G2} (MW)	P_{G3} (MW)	Time(S)	P_{G1} (MW)	P_{G2} (MW)	P_{G3} (MW)	Time (S)
296	55.47	89.48	63.06	**3.2707**	55.67	89.22	63.00	**0.0248**
297	110.27	125.29	91.14	**0.6926**	110.11	125.31	90.97	**0.0334**
298	137.48	167.21	121.44	**0.5644**	137.39	167.17	121.57	**0.0249**
299	111.28	124.24	97.80	**0.5244**	111.30	124.40	97.53	**0.0253**
300	136.23	161.01	115.31	**0.6882**	136.05	161.09	115.22	**0.0252**

ตารางที่ 6.13 ตัวอย่างผลการทดลองเปรียบเทียบการคำนวณด้วย MATPOWER และ Q-ANNs ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ลำดับ	MATPOWER				Q-POWER ANNs			
	Q_{G1} (MVAr)	Q_{G2} (MVAr)	Q_{G3} (MVAr)	Time(S)	Q_{G1} (MVAr)	Q_{G2} (MVAr)	Q_{G3} (MVAr)	Time (S)
296	5.63	17.26	1.31	**3.0849**	4.94	18.60	1.51	**0.0263**
297	77.28	67.02	41.09	**0.5906**	77.13	67.54	40.4	**0.0258**
298	109.68	105.46	66.85	**0.5881**	109.24	106.53	66.36	**0.0259**
299	101.33	29.07	58.77	**0.541**	101.11	29.67	58.74	**0.0257**
300	105.39	105.19	60.42	**0.6732**	105.26	103.38	60.02	**0.0255**

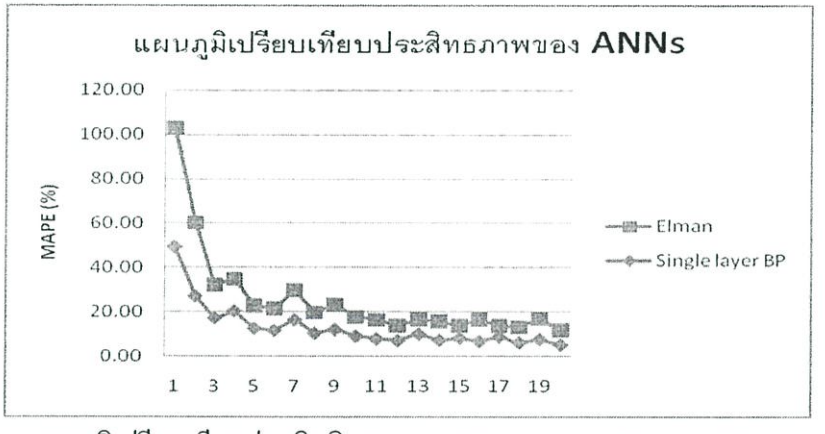
ตารางที่ 6.14 แสดงประสิทธิภาพของ ANNs แบบโครงข่ายเดียวที่ดีที่สุดทดลองกับโครงสร้างขนาด 5-4 ถึง 20-19 ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ลำดับ	รูปแบบ ANNs	เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน (วินาที)	จำนวนนิวรอนในชั้นซ้อนที่ 1 และ 2	Transfer function	MAPE (%)
1	SINGLE-ANNs	1,183.27	20-19	tansig logsig purelin	2.53

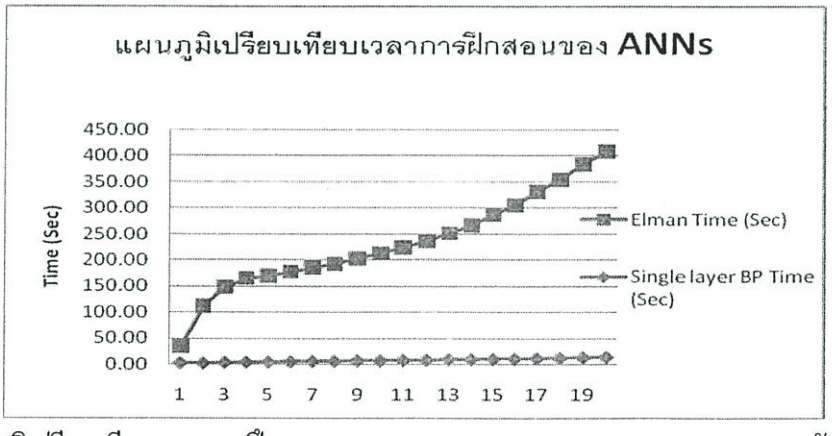
ตารางที่ 6.15 แสดงประสิทธิภาพของ ANNs แบบแยกโครงข่ายที่ดีที่สุดทดลองกับโครงสร้างขนาด 5-4 ถึง 15-14 ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ลำดับ	รูปแบบ ANNs	เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน (วินาที)	จำนวนนิวรอนในชั้นซ้อนที่ 1 และ 2	Transfer function	MAPE (%)
1	P-ANNs	83.84	11-10	logsig tansig	MAPE-P = 0.33
2	Q-ANNs	183.01	15-14	logsig logsig	MAPE-Q = 4.57
					MAPE = 2.45

6.2.3 โครงข่ายประสาทเทียมแบบเอลแมน (Elman Neural Networks)



รูปที่ 6.14 แผนภูมิเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ BP-ANNs และ Elman-ANNs ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 6.15 แผนภูมิเปรียบเทียบเวลาการฝึกสอนของ BP-ANNs และ Elman-ANNs ทดสอบกับระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ตารางที่ 6.16 แสดงประสิทธิภาพของ ANNs แบบแพร่ค่าย้อนกลับชั้นเดียวและแบบเอลแมน

จำนวนนิวรอน	Single layer BP	Training Time (Sec)	Elman	Training Time (Sec)
1	49.33	2.38	53.67	31.39
2	27.13	1.80	33.09	109.62
3	17.28	3.54	14.81	145.48
4	20.49	3.88	14.40	161.11
5	12.68	4.32	10.02	165.67
6	11.76	4.53	9.79	172.97
7	16.61	5.48	13.10	180.43
8	10.45	5.77	9.28	186.48
9	12.16	6.51	10.89	197.04
10	9.22	6.73	8.41	206.25
11	7.98	7.44	8.41	217.01
12	7.16	7.85	6.66	228.72
13	10.14	8.86	6.51	243.04
14	7.38	9.00	8.35	257.70
15	8.29	9.82	5.47	277.23
16	6.85	10.34	9.73	294.75
17	8.92	11.31	4.86	320.01
18	6.26	11.95	6.86	342.99
19	7.77	12.96	9.04	371.56
20	5.25	14.05	6.36	395.42

6.3 ระบบดัดแปลง IEEE 30 บัส 6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ตารางที่ 6.16 ชุดข้อมูลทดสอบของระบบดัดแปลง IEEE 30 บัส

ลำดับ	P_{G1}	Q_{G1}	P_{G2}	Q_{G2}	P_{G5}	Q_{G5}	P_{G8}	Q_{G8}	P_{G11}	Q_{G11}	P_{G13}	Q_{G13}
276	36.92	0.00	6.03	-9.21	0.00	-2.87	0.00	-0.92	0.00	-6.00	0.00	-6.00
277	68.82	0.00	11.28	0.30	0.00	-0.40	0.00	12.76	0.00	1.52	0.00	-6.00
278	97.44	0.00	16.10	0.66	0.00	3.31	0.00	29.43	0.00	6.00	0.00	4.05
279	17.44	0.00	2.84	-16.20	0.00	-4.97	0.00	-10.00	0.00	-6.00	0.00	-6.00
280	84.37	0.00	13.90	-1.02	0.00	1.80	0.00	22.56	0.00	3.18	0.00	0.04
281	94.99	0.00	15.69	0.35	0.00	3.02	0.00	28.09	0.00	5.47	0.00	3.29
282	32.20	0.00	5.26	-10.73	0.00	-3.31	0.00	-3.51	0.00	-6.00	0.00	-6.00
283	102.94	0.00	17.04	1.33	0.00	4.00	0.00	32.55	0.00	7.20	0.00	5.77
284	50.32	0.00	8.23	-5.13	0.00	-1.76	0.00	5.44	0.00	-4.12	0.00	-6.00
285	25.81	0.00	4.21	-12.72	0.00	-3.89	0.00	-6.97	0.00	-6.00	0.00	-6.00
286	26.94	0.00	4.40	-12.37	0.00	-3.79	0.00	-6.36	0.00	-6.00	0.00	-6.00
287	111.24	0.00	18.51	-3.13	0.00	9.06	0.00	40.00	0.00	8.48	0.00	7.87
288	71.59	0.36	11.74	1.18	0.00	-0.03	0.00	14.33	0.00	1.42	0.00	-6.00
289	38.28	0.00	6.25	-8.76	0.00	-2.74	0.00	-0.16	0.00	-6.00	0.00	-6.00
290	0.32	0.00	0.05	-22.38	0.00	-7.38	0.00	-10.00	0.00	-6.00	0.00	-6.00
291	72.61	0.00	11.92	-0.16	0.00	0.42	0.00	16.82	0.00	1.34	0.00	-5.97
292	96.22	0.00	15.90	0.50	0.00	3.17	0.00	28.76	0.00	5.74	0.00	3.67
293	18.57	0.00	3.03	-15.44	0.00	-4.73	0.00	-10.00	0.00	-6.00	0.00	-6.00
294	99.52	0.00	16.46	0.91	0.00	3.57	0.00	30.59	0.00	6.46	0.00	4.70
295	38.19	0.00	6.24	-8.79	0.00	-2.75	0.00	-0.21	0.00	-6.00	0.00	-6.00
296	34.98	0.00	5.71	-9.84	0.00	-3.05	0.00	-1.99	0.00	-6.00	0.00	-6.00
297	79.81	0.00	13.13	-0.18	0.00	1.12	0.00	19.70	0.00	2.52	0.00	-2.17
298	64.76	0.00	10.61	-1.36	0.00	-0.83	0.00	10.23	0.00	1.68	0.00	-6.00
299	68.09	0.00	11.16	0.00	0.00	-0.48	0.00	12.30	0.00	1.55	0.00	-6.00
300	83.49	0.00	21.02	-8.95	0.00	15.70	6.21	40.00	21.88	7.11	0.00	6.97

6.3.1โครงข่ายประสาทเทียมแบบโครงข่ายเดียว (Single ANNs)

ตารางที่ 6.17 สรุปผลการทดลองและค่าผิดพลาดของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมแบบโครงข่ายเดียวเมื่อเทียบกับ MATPOWER โดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอน 275 ชุด ชุดข้อมูลตรวจสอบ 50 ชุดและข้อมูลทดสอบ 25 ชุดทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

	Structure		Type I			Type II		
			HD1TF	HD2TF	O/PTF	HD1TF	HD2TF	O/PTF
Number	HD1	HD2	logsig	logsig	purelin	tansig	tansig	purelin
1	5	4	0.56			0.52		
2	6	5	0.34			0.33		
3	7	6	0.25			0.26		
4	8	7	0.24			0.24		
5	9	8	0.21			0.26		
6	10	9	0.18			0.14		
7	11	10	0.16			0.16		
8	12	11	0.14			0.17		
9	13	12	0.12			0.13		
10	14	13	0.12			0.10		
11	15	14	0.09			0.10		
12	16	15	0.10			0.10		
13	17	16	0.11			0.12		
14	18	17	0.09			0.09		
15	19	18	0.09			0.09		
16	20	19	0.08			0.10		

Type I : Best node = 20,19 with MAE = 0.08

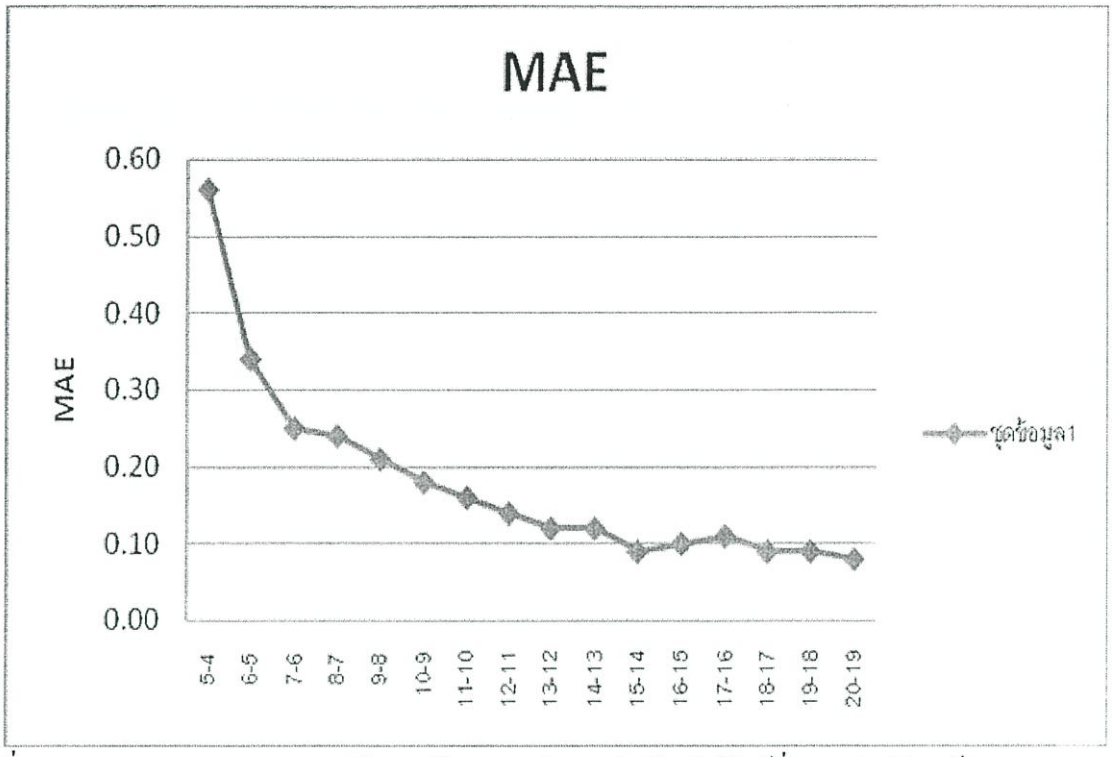
Type II : Best node = 20,19 with MAE = 0.09

ตารางที่ 6.17 สรุปผลการทดลองและค่าผิดพลาดของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมแบบโครงข่ายเดียวเมื่อเทียบกับ MATPOWER โดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอน 275 ชุด ชุดข้อมูลตรวจสอบ 50 ชุดและข้อมูลทดสอบ 25 ชุด ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส (ต่อ)

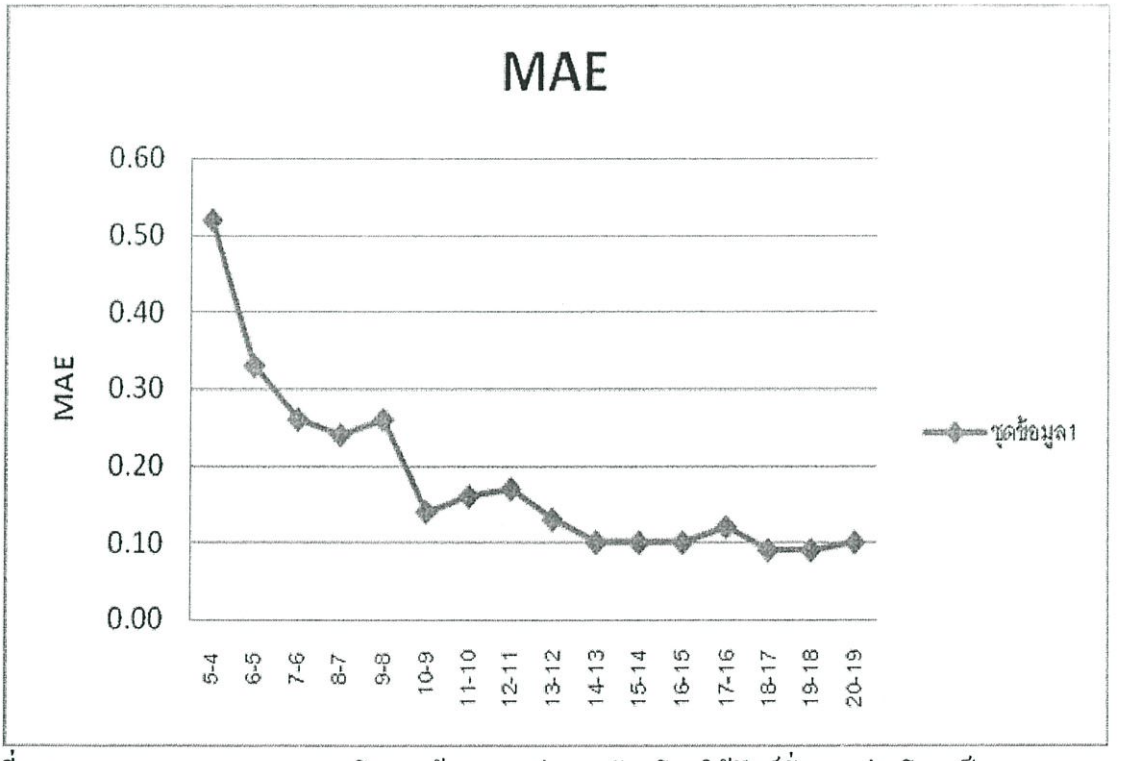
Number	Structure		Type III			Type IV		
	HD1	HD2	HD1TF	HD2TF	O/PTF	HD1TF	HD2TF	O/PTF
			logsig	tansig	purelin	tansig	logsig	purelin
1	5	4	0.54			0.49		
2	6	5	0.35			0.30		
3	7	6	0.25			0.24		
4	8	7	0.25			0.23		
5	9	8	0.18			0.23		
6	10	9	0.17			0.16		
7	11	10	0.13			0.15		
8	12	11	0.12			0.15		
9	13	12	0.11			0.15		
10	14	13	0.11			0.14		
11	15	14	0.09			0.10		
12	16	15	0.10			0.09		
13	17	16	0.10			0.09		
14	18	17	0.09			0.08		
15	19	18	0.09			0.07		
16	20	19	0.07			0.08		

Type III: Best node = 20, 19 with MAE = 0.07

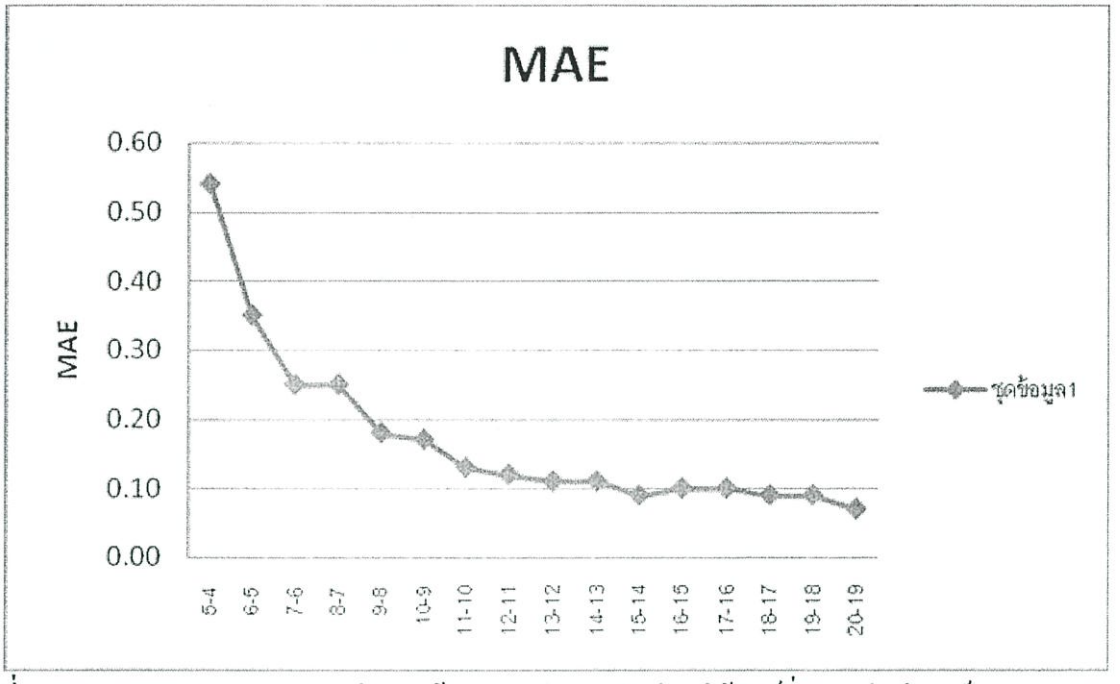
Type IV: Best node = 19, 18 with MAE = 0.07



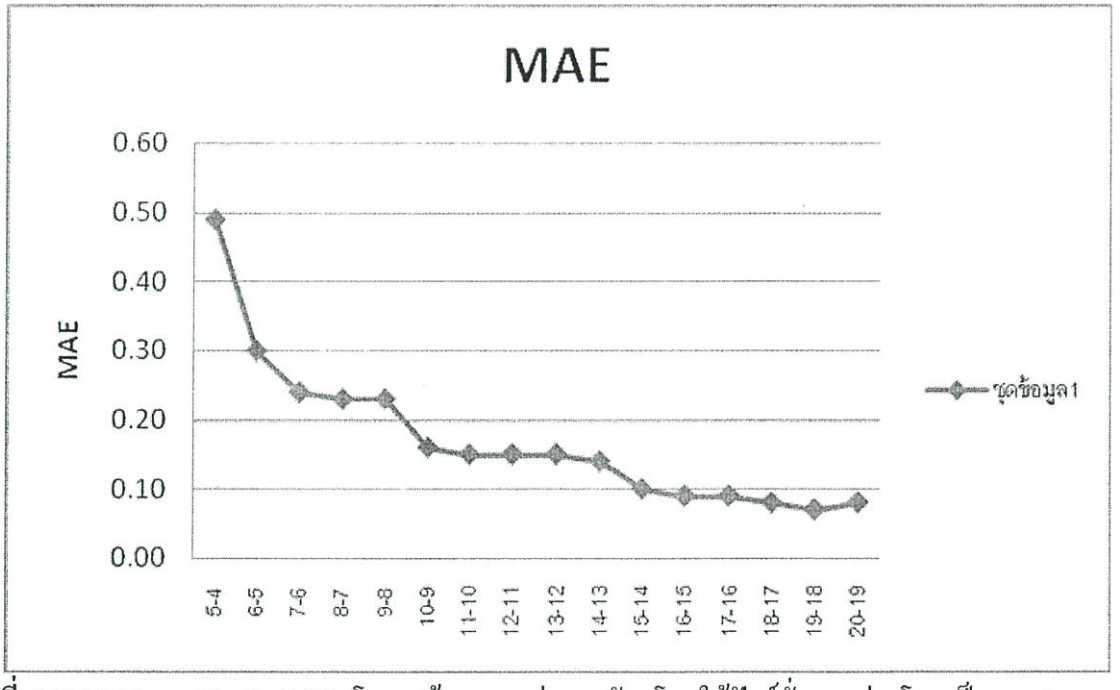
รูปที่ 6.16 MAE ของ Single ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig - logsigทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส



รูปที่ 6.17 MAE ของ Single ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น tansig – tansigทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส



รูปที่ 6.18 MAE ของ Single ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig-tansig ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส



รูปที่ 6.19 MPE ของ Single ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น tansig-logsig ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

ตารางที่ 6.18 ตัวอย่างผลการทดลองของกำลังไฟฟ้าโดยใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนตามโครงสร้างลำดับที่ 4 ตามตารางที่ 6.2 และขนาดโครงสร้างที่ดีที่สุดคือ 19 – 18

ลำดับ	P_{G1}	Q_{G1}	P_{G2}	Q_{G2}	P_{G5}	Q_{G5}	P_{G8}	Q_{G8}	P_{G11}	Q_{G11}	P_{G13}	Q_{G13}
276	36.88	0.00	6.02	-9.21	0.00	-2.89	-0.01	-0.83	0.00	-6.00	0.00	-5.99
277	68.74	0.00	11.31	0.29	0.00	-0.32	0.00	12.81	-0.03	1.53	-0.01	-6.01
278	97.52	0.00	16.10	0.66	0.00	3.34	0.01	29.51	0.01	6.01	0.01	4.06
279	17.28	0.00	2.84	-16.13	0.00	-4.98	0.04	-10.09	-0.05	-6.00	0.00	-6.01
280	84.29	0.00	13.90	-0.49	0.00	1.66	0.00	22.03	-0.01	3.27	0.00	0.04
281	95.17	0.00	15.72	0.36	0.00	3.02	0.02	28.15	0.01	5.47	0.01	3.29
282	32.10	0.00	5.24	-10.71	0.00	-3.30	-0.01	-3.51	0.01	-5.97	0.00	-5.99
283	102.76	0.00	16.97	1.32	0.00	4.05	-0.02	32.55	0.00	7.20	0.01	5.75
284	50.42	0.00	8.25	-5.07	0.00	-1.73	0.01	5.59	-0.01	-4.31	0.00	-6.01
285	25.63	0.00	4.19	-12.68	0.00	-3.85	0.00	-7.11	0.00	-6.02	0.00	-6.00
286	26.74	0.00	4.37	-12.33	0.00	-3.75	0.00	-6.51	0.00	-6.01	0.00	-6.00
287	111.42	0.00	19.46	-5.88	0.00	13.45	0.09	38.98	-1.26	8.38	0.00	7.79
288	71.40	0.36	11.74	0.92	0.00	-0.16	0.03	14.46	0.01	1.38	0.01	-6.00
289	38.25	0.00	6.25	-8.76	0.00	-2.76	0.00	-0.07	0.00	-6.02	0.00	-5.99
290	0.12	0.00	0.03	-22.42	0.00	-7.35	-0.03	-9.97	0.02	-6.00	0.00	-5.98
291	72.60	0.00	11.91	0.10	0.00	0.37	0.01	16.45	0.01	1.35	0.00	-5.95
292	96.36	0.00	15.92	0.52	0.00	3.18	0.02	28.83	0.01	5.74	0.01	3.68
293	18.60	0.00	3.04	-15.47	0.00	-4.74	0.02	-9.86	-0.03	-5.99	0.00	-6.00
294	99.47	0.00	16.42	0.90	0.00	3.61	-0.01	30.66	0.02	6.46	0.01	4.70
295	38.16	0.00	6.23	-8.79	0.00	-2.77	0.00	-0.13	0.00	-6.02	0.00	-5.99
296	34.94	0.00	5.71	-9.83	0.00	-3.06	-0.01	-1.91	0.01	-5.97	0.00	-5.99
297	79.84	0.00	13.14	-0.14	0.00	1.20	-0.01	19.68	-0.01	2.51	0.00	-2.13
298	65.00	0.00	10.63	-1.39	0.00	-0.86	0.08	10.14	-0.08	1.68	0.01	-5.98
299	67.96	0.00	11.11	0.00	0.00	-0.46	-0.07	12.35	0.09	1.54	0.00	-6.01
300	83.35	0.00	21.32	-9.04	0.00	15.64	5.55	40.02	22.29	7.09	0.00	6.97

MAE = 0.07

6.3.2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบโครงแยกโครงข่าย (Separated ANNs, P-ANNs & Q-ANNs) ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

ตารางที่ 6.19 สรุปผลการทดลองและค่าผิดพลาดของกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อเทียบกับ MATPOWER โดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอน 275 ชุด ชุดข้อมูลตรวจสอบ 50 ชุดและข้อมูลทดสอบ 25 ชุด ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

Number	Structure		Type I			Type II		
			HD1TF	HD2TF	O/PTF	HD1TF	HD2TF	O/PTF
	HD1	HD2	logsig	logsig	purelin	tansig	tansig	purelin
1	5	4	0.08			0.11		
2	6	5	0.07			0.07		
3	7	6	0.06			0.07		
4	8	7	0.07			0.08		
5	9	8	0.05			0.07		
6	10	9	0.05			0.07		
7	11	10	0.05			0.05		
8	12	11	0.04			0.05		
9	13	12	0.05			0.05		
10	14	13	0.06			0.05		
11	15	14	0.05			0.05		
12	16	15	0.06			0.05		
13	17	16	0.05			0.04		
14	18	17	0.06			0.04		
15	19	18	0.04			0.04		
16	20	19	0.04			0.05		

Type I : Best node = 20, 19 with MAE = 0.04

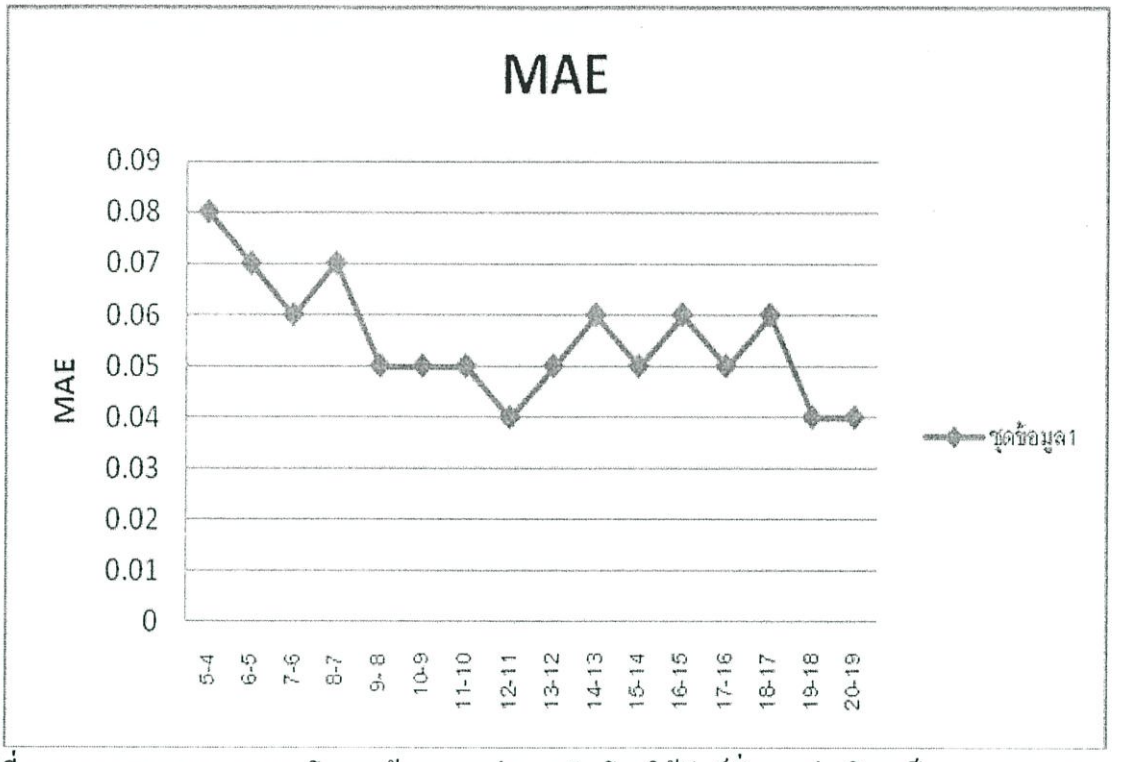
Type II : Best node = 19, 18 with MAE = 0.04

ตารางที่ 6.20 สรุปผลการทดลองและค่าผิดพลาดของกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อเทียบกับ MATPOWER โดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอน 225 ชุด ชุดข้อมูลตรวจสอบ 25 ชุดและข้อมูลทดสอบ 25 ชุด ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส (ต่อ)

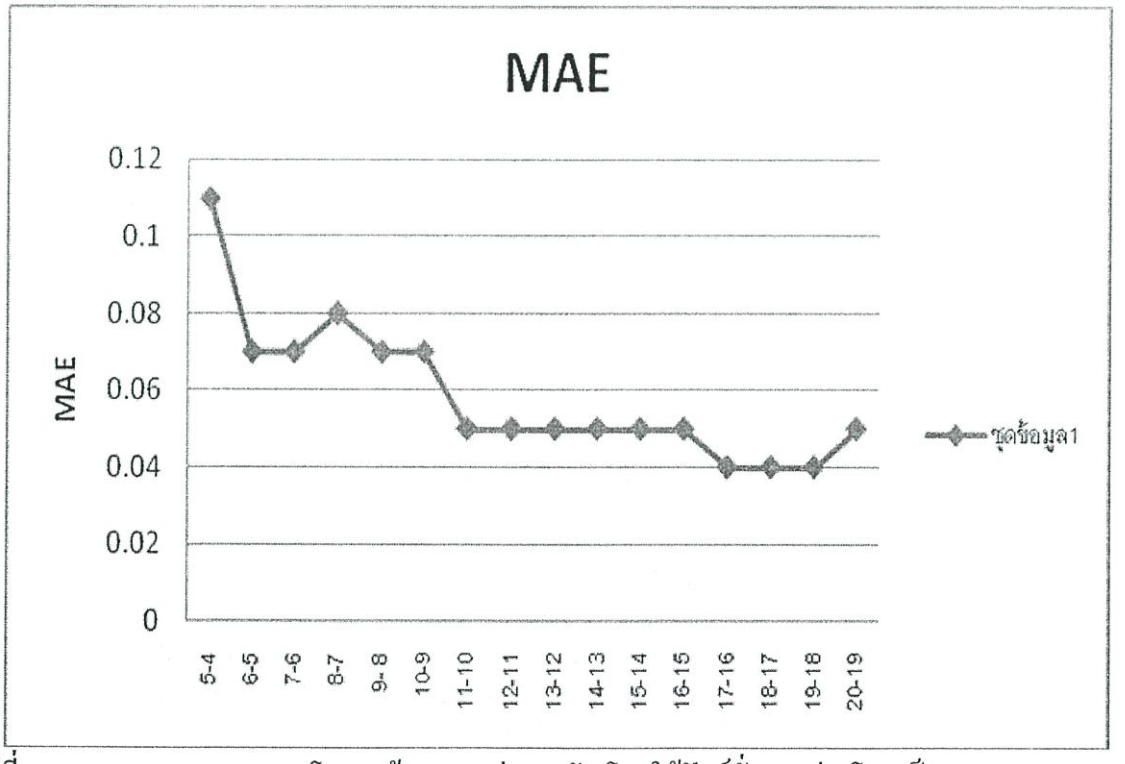
Number	Structure		Type III			Type IV		
	HD1	HD2	HD1TF	HD2TF	O/PTF	HD1TF	HD2TF	O/PTF
			logsig	tansig	purelin	tansig	logsig	purelin
1	5	4	0.08			0.11		
2	6	5	0.07			0.06		
3	7	6	0.05			0.05		
4	8	7	0.07			0.06		
5	9	8	0.06			0.06		
6	10	9	0.05			0.05		
7	11	10	0.05			0.05		
8	12	11	0.07			0.04		
9	13	12	0.06			0.04		
10	14	13	0.05			0.04		
11	15	14	0.05			0.04		
12	16	15	0.06			0.04		
13	17	16	0.05			0.04		
14	18	17	0.05			0.04		
15	19	18	0.06			0.05		
16	20	19	0.06			0.04		

Type III : Best node = 14, 13 with MAE = 0.05

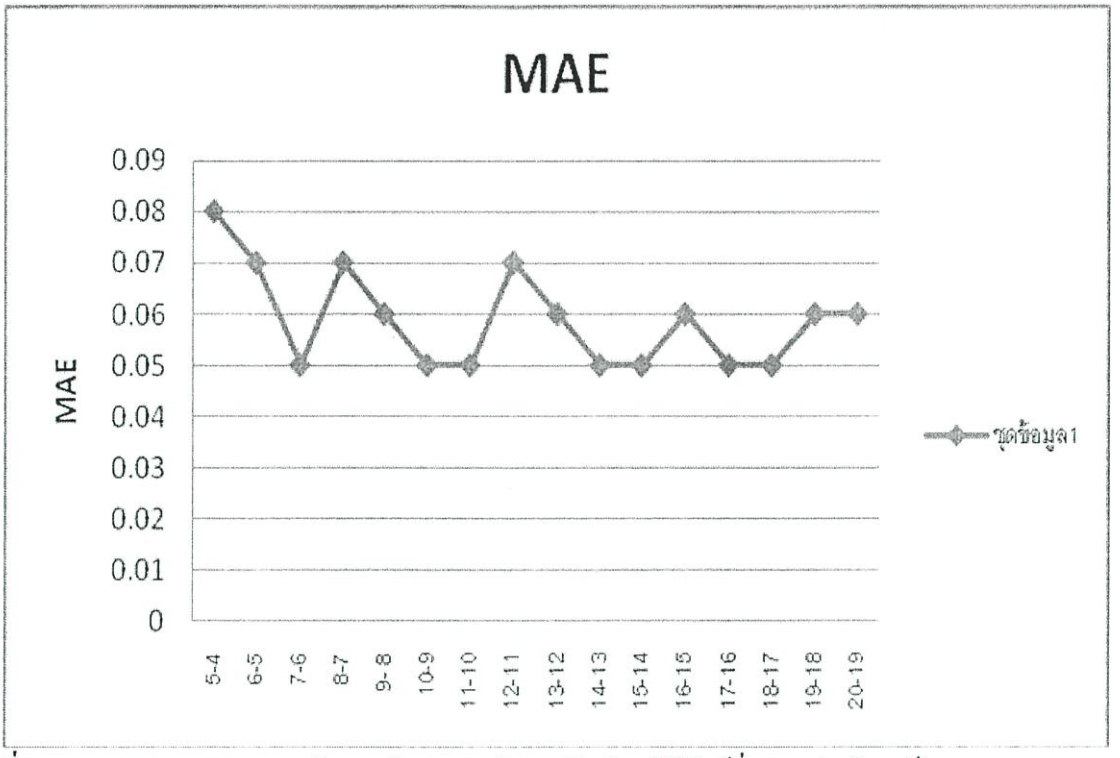
Type IV: Best node = 13, 12 with MAE = 0.04



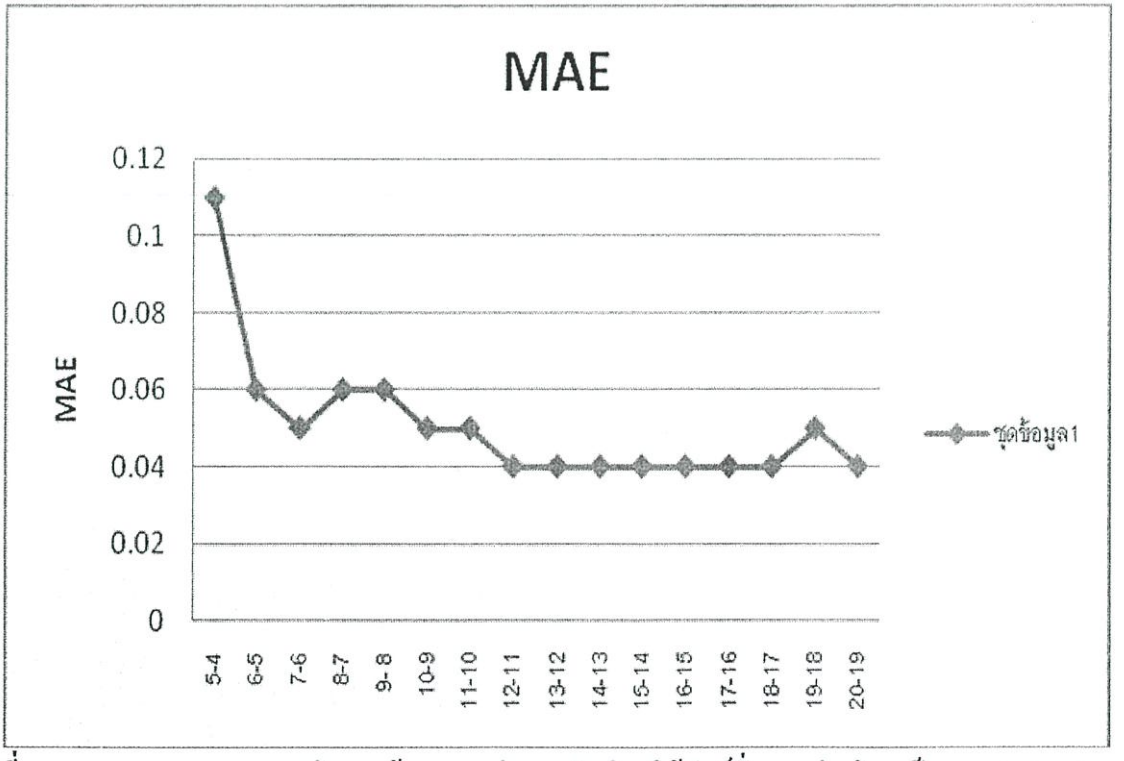
รูปที่ 6.20 MAE ของ P- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig-logsig ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส



รูปที่ 6.21 MAE ของ P- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น tansig-tansig ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส



รูปที่ 6.22 MAE ของ P- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig-tansig ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส



รูปที่ 6.23 MAE ของ P- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น tansig-logsig ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

ตารางที่ 6.21 ตัวอย่างผลการทดลองของกำลังไฟฟ้าจริงที่ดีที่สุดทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส โดยใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนตามโครงสร้างลำดับที่ 4 ตามตารางที่ 6.2 และขนาดโครงสร้างที่ดีที่สุด คือ 13–12

ลำดับ	MATPOWER						P-ANNs					
	P_{G1}	P_{G2}	P_{G5}	P_{G8}	P_{G11}	P_{G13}	P_{G1}	P_{G2}	P_{G5}	P_{G8}	P_{G11}	P_{G13}
276	36.92	6.03	0.00	0.00	0.00	0.00	37.02	6.04	0.00	0.00	0.01	0.00
277	68.82	11.28	0.00	0.00	0.00	0.00	68.83	11.28	0.00	-0.04	0.06	0.00
278	97.44	16.10	0.00	0.00	0.00	0.00	97.45	16.09	0.00	-0.02	0.07	0.00
279	17.44	2.84	0.00	0.00	0.00	0.00	17.26	2.82	0.00	0.04	0.00	0.00
280	84.37	13.90	0.00	0.00	0.00	0.00	84.31	13.90	0.00	0.00	-0.03	0.00
281	94.99	15.69	0.00	0.00	0.00	0.00	94.98	15.67	0.00	-0.01	0.08	0.00
282	32.20	5.26	0.00	0.00	0.00	0.00	32.21	5.24	0.00	0.02	-0.01	0.00
283	102.94	17.04	0.00	0.00	0.00	0.00	103.27	17.06	0.00	0.01	-0.03	0.00
284	50.32	8.23	0.00	0.00	0.00	0.00	50.28	8.23	0.00	-0.01	0.01	0.00
285	25.81	4.21	0.00	0.00	0.00	0.00	25.77	4.21	0.00	0.00	-0.04	0.00
286	26.94	4.40	0.00	0.00	0.00	0.00	26.85	4.38	0.00	0.02	-0.04	0.00
287	111.24	18.51	0.00	0.00	0.00	0.00	110.96	18.67	0.00	0.22	0.08	0.03
288	71.59	11.74	0.00	0.00	0.00	0.00	71.54	11.75	0.00	-0.03	0.05	0.00
289	38.28	6.25	0.00	0.00	0.00	0.00	38.36	6.26	0.00	0.00	0.01	0.00
290	0.32	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.44	0.06	0.00	0.00	0.02	0.00
291	72.61	11.92	0.00	0.00	0.00	0.00	72.58	11.91	0.00	0.00	0.03	0.00
292	96.22	15.90	0.00	0.00	0.00	0.00	96.20	15.88	0.00	-0.02	0.08	0.00
293	18.57	3.03	0.00	0.00	0.00	0.00	18.35	3.00	0.00	0.02	0.03	0.00
294	99.52	16.46	0.00	0.00	0.00	0.00	99.72	16.48	0.00	-0.03	0.04	0.00
295	38.19	6.24	0.00	0.00	0.00	0.00	38.27	6.25	0.00	0.00	0.01	0.00
296	34.98	5.71	0.00	0.00	0.00	0.00	35.08	5.71	0.00	0.01	0.00	0.00
297	79.81	13.13	0.00	0.00	0.00	0.00	79.79	13.14	0.00	0.02	-0.07	0.00
298	64.76	10.61	0.00	0.00	0.00	0.00	64.66	10.60	0.00	0.01	-0.01	0.00
299	68.09	11.16	0.00	0.00	0.00	0.00	68.14	11.13	0.00	0.00	0.06	0.01
300	83.49	21.02	0.00	6.21	21.88	0.00	83.87	21.16	0.00	5.64	21.95	0.01

MAE =0.04

ตารางที่ 6.22 สรุปผลการทดลองและค่าผิดพลาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อเทียบกับ MATPOWER โดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอน 275 ชุด ชุดข้อมูลตรวจสอบ 50 ชุดและข้อมูลทดสอบ 25 ชุด ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

Number	Structure		Type I			Type II		
			HD1TF	HD2TF	O/PTF	HD1TF	HD2TF	O/PTF
	HD1	HD2	logsig	logsig	purelin	tansig	tansig	purelin
1	5	4	0.38			0.43		
2	6	5	0.31			0.38		
3	7	6	0.26			0.32		
4	8	7	0.16			0.20		
5	9	8	0.15			0.17		
6	10	9	0.12			0.12		
7	11	10	0.14			0.12		
8	12	11	0.12			0.11		
9	13	12	0.12			0.10		
10	14	13	0.08			0.10		
11	15	14	0.09			0.10		
12	16	15	0.10			0.10		
13	17	16	0.09			0.11		
14	18	17	0.10			0.09		
15	19	18	0.09			0.08		
16	20	19	0.09			0.08		

Type I : Best node = 14, 13 with MAE = 0.08

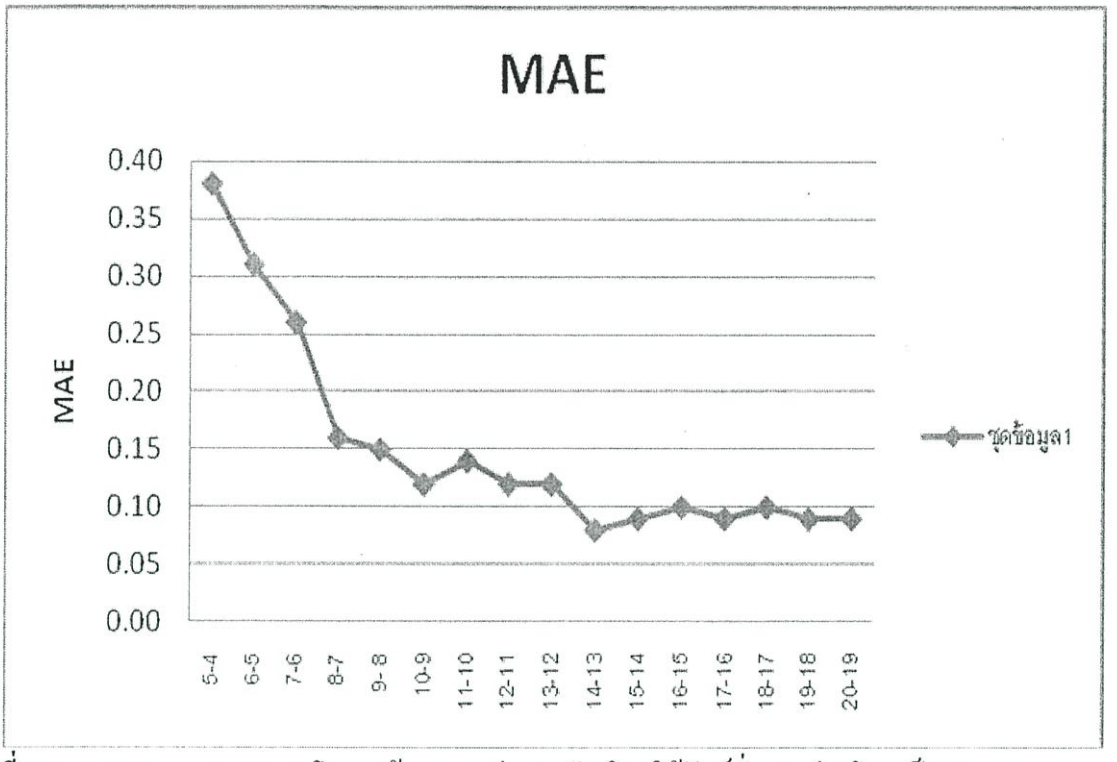
Type II : Best node = 19, 18 with MAE = 0.08

ตารางที่ 6.23 สรุปผลการทดลองและค่าผิดพลาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อเทียบกับ MATPOWER โดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอน 225 ชุด ชุดข้อมูลตรวจสอบ 25 ชุดและข้อมูลทดสอบ 25 ชุด ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส (ต่อ)

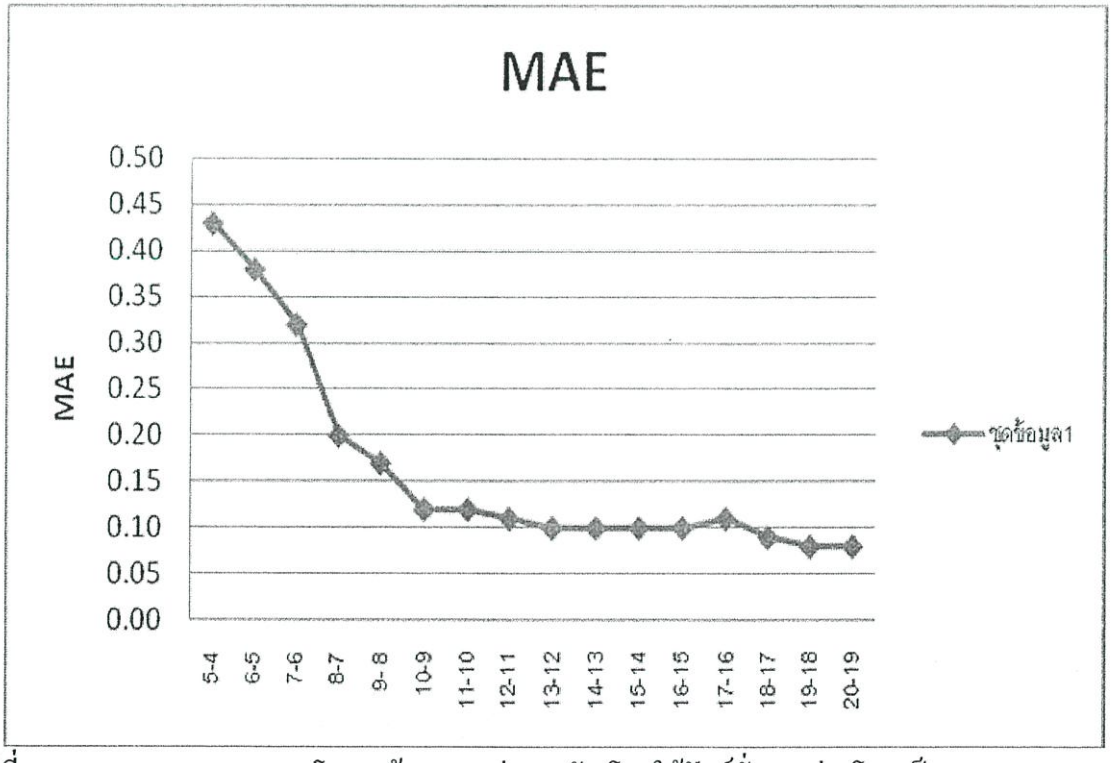
	Structure		Type III			Type IV		
			HD1TF	HD2TF	O/PTF	HD1TF	HD2TF	O/PTF
Number	HD1	HD2	logsig	tansig	purelin	tansig	logsig	purelin
1	5	4	0.43			0.46		
2	6	5	0.33			0.36		
3	7	6	0.24			0.26		
4	8	7	0.22			0.21		
5	9	8	0.15			0.13		
6	10	9	0.10			0.12		
7	11	10	0.14			0.12		
8	12	11	0.11			0.12		
9	13	12	0.10			0.11		
10	14	13	0.11			0.10		
11	15	14	0.10			0.08		
12	16	15	0.09			0.10		
13	17	16	0.08			0.12		
14	18	17	0.08			0.12		
15	19	18	0.09			0.12		
16	20	19	0.08			0.13		

Type III : Best node = 18, 17 with MAE = 0.08

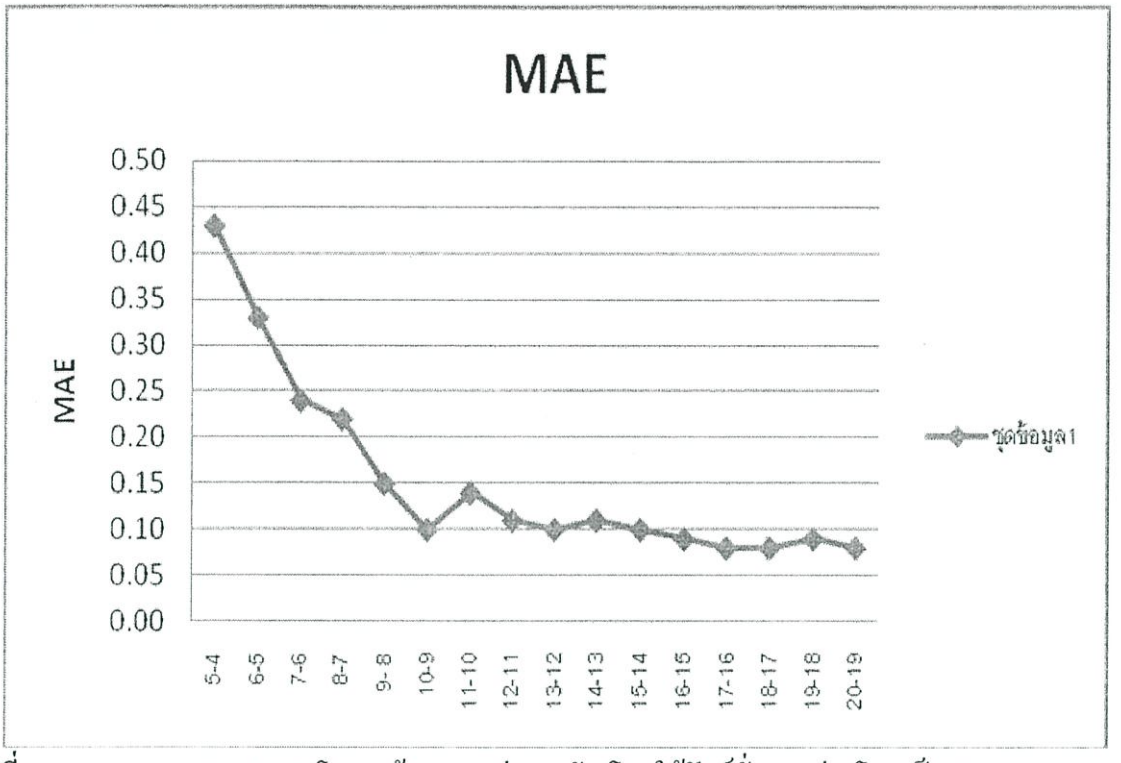
Type IV: Best node = 15, 14 with MAE = 0.08



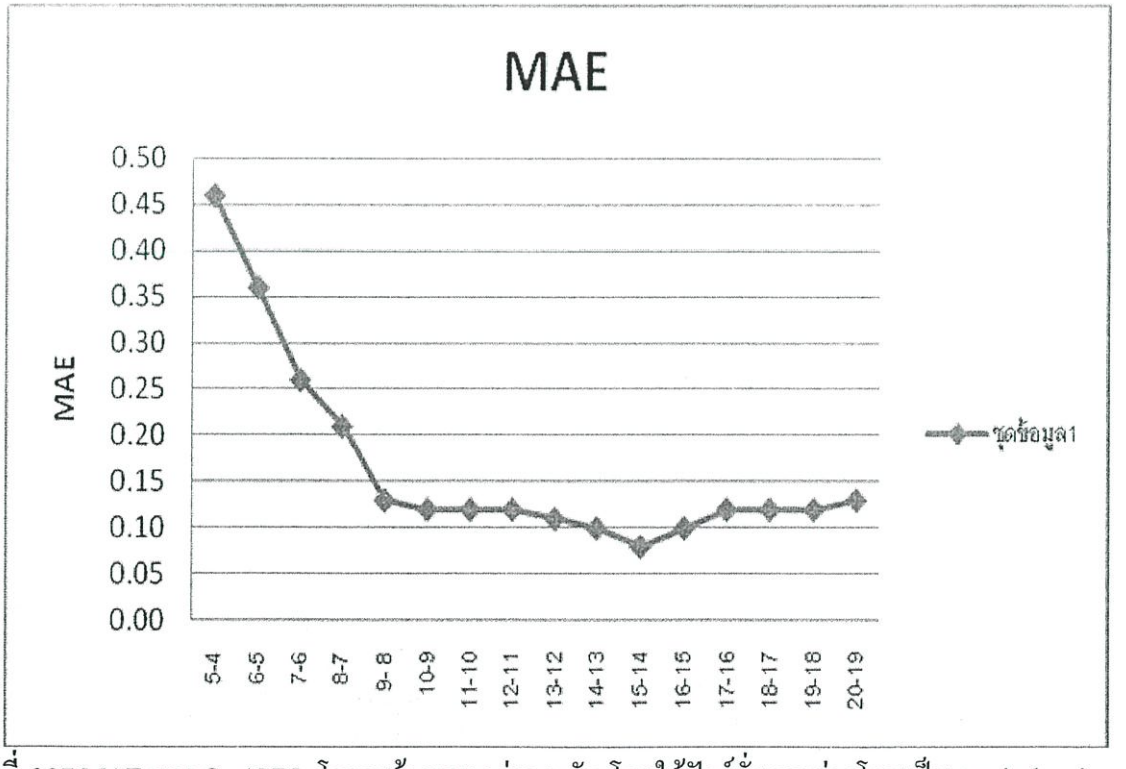
รูปที่ 6.24 MAE ของ Q- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig-logsig ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส



รูปที่ 6.25 MAE ของ Q- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น tansig-tansig ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส



รูปที่ 6.26 MAE ของ Q- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น logsig-tansig ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส



รูปที่ 6.27 MAE ของ Q- ANNs โครงสร้างขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ฟังก์ชั่นการถ่ายโอนเป็น tansig-logsig ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

ตารางที่ 6.24 ตัวอย่างผลการทดลองของกำลังไฟฟ้าจริงที่ดีที่สุดโดยใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนตามโครงสร้างลำดับที่ 1 ตามตารางที่ 6.2 และขนาดโครงสร้างที่ดีที่สุดคือ 14–13 ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

ลำดับ	MATPOWER						Q-ANNs					
	Q_{G1}	Q_{G2}	Q_{G5}	Q_{G8}	Q_{G11}	Q_{G13}	Q_{G1}	Q_{G2}	Q_{G5}	Q_{G8}	Q_{G11}	Q_{G13}
276	0.00	-9.21	-2.87	-0.92	-6.00	-6.00	0.00	-9.22	-2.88	-0.90	-6.00	-6.00
277	0.00	0.30	-0.40	12.76	1.52	-6.00	-0.00	0.30	-0.37	12.76	1.56	-6.00
278	-0.00	0.66	3.31	29.43	6.00	4.05	-0.00	0.68	3.33	29.42	6.02	4.05
279	0.00	-16.20	-4.97	-10.00	-6.00	-6.00	-0.00	-16.21	-4.97	-10.10	-6.01	-6.00
280	0.00	-1.02	1.80	22.56	3.18	0.04	0.00	-0.54	1.66	22.06	3.27	0.05
281	-0.00	0.35	3.02	28.09	5.47	3.29	-0.00	0.39	2.99	28.14	5.48	3.28
282	-0.00	-10.73	-3.31	-3.51	-6.00	-6.00	-0.00	-10.73	-3.31	-3.52	-6.01	-6.00
283	-0.00	1.33	4.00	32.55	7.20	5.77	-0.00	1.27	4.04	32.47	7.20	5.77
284	0.00	-5.13	-1.76	5.44	-4.12	-6.00	0.00	-5.13	-1.75	5.43	-4.07	-6.00
285	0.00	-12.72	-3.89	-6.97	-6.00	-6.00	-0.00	-12.70	-3.90	-7.01	-5.99	-6.00
286	-0.00	-12.37	-3.79	-6.36	-6.00	-6.00	-0.00	-12.35	-3.79	-6.41	-5.99	-6.00
287	0.00	-3.13	9.06	40.00	8.48	7.87	0.00	-4.01	11.43	38.69	8.61	7.93
288	0.36	1.18	-0.03	14.33	1.42	-6.00	0.35	0.77	-0.00	14.83	1.35	-5.99
289	-0.00	-8.76	-2.74	-0.16	-6.00	-6.00	0.00	-8.77	-2.75	-0.14	-5.99	-6.00
290	0.00	-22.38	-7.38	-10.00	-6.00	-6.00	0.00	-22.36	-7.30	-10.03	-6.01	-6.00
291	-0.00	-0.16	0.42	16.82	1.34	-5.97	-0.01	0.08	0.40	16.49	1.36	-5.90
292	0.00	0.50	3.17	28.76	5.74	3.67	-0.00	0.54	3.16	28.78	5.76	3.67
293	-0.00	-15.44	-4.73	-10.00	-6.00	-6.00	-0.00	-15.39	-4.71	-10.05	-6.01	-6.00
294	0.00	0.91	3.57	30.59	6.46	4.70	-0.00	0.91	3.60	30.54	6.47	4.71
295	0.00	-8.79	-2.75	-0.21	-6.00	-6.00	0.00	-8.80	-2.76	-0.19	-5.99	-6.00
296	0.00	-9.84	-3.05	-1.99	-6.00	-6.00	0.00	-9.84	-3.06	-1.98	-6.01	-6.00
297	0.00	-0.18	1.12	19.70	2.52	-2.17	-0.00	-0.13	1.22	19.60	2.51	-2.15
298	0.00	-1.36	-0.83	10.23	1.68	-6.00	-0.00	-1.37	-0.84	10.21	1.75	-6.00
299	-0.00	-0.00	-0.48	12.30	1.55	-6.00	0.00	-0.03	-0.48	12.32	1.54	-6.00
300	-0.00	-8.95	15.70	40.00	7.11	6.97	0.00	-9.03	15.79	40.06	7.14	6.97

MAE = 0.08

ตารางที่ 6.26 ผลการหาคำตอบด้วย MATPOWER และเวลาที่ใช้ในการคำนวณจากโหลดในตารางที่ 6.25 ตามลำดับ

กรณีที่	P_{G1}	Q_{G1}	P_{G2}	Q_{G2}	P_{G5}	Q_{G5}	P_{G8}	Q_{G8}	P_{G11}	Q_{G11}	P_{G13}	Q_{G13}	TIME
	MW	MVAr	MW	MVAr	MW	MVAr	MW	MVAr	MW	MVAr	MW	MVAr	SEC
296	34.98	0.00	5.71	-9.84	0.00	-3.05	0.00	-1.99	0.00	-6.00	0.00	-6.00	4.1442
297	79.81	0.00	13.13	-0.18	0.00	1.12	0.00	19.70	0.00	2.52	0.00	-2.17	0.6805
298	64.76	0.00	10.61	-1.36	0.00	-0.83	0.00	10.23	0.00	1.68	0.00	-6.00	0.9384
299	68.09	0.00	11.16	0.00	0.00	-0.48	0.00	12.30	0.00	1.55	0.00	-6.00	0.7571
300	83.49	0.00	21.02	-8.95	0.00	15.70	6.21	40.00	21.88	7.11	0.00	6.97	0.4698

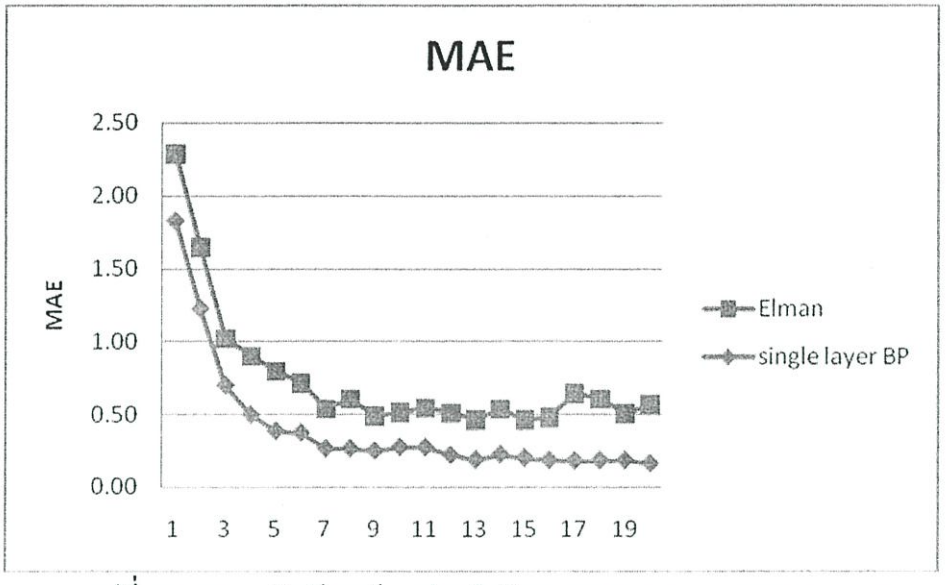
ตารางที่ 6.27 ผลการหาคำตอบด้วย SINGLE-ANNs โครงสร้างที่ดีที่สุด และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ จากโหลดในตารางที่ 6.25 ตามลำดับ

กรณีที่	P_{G1}	Q_{G1}	P_{G2}	Q_{G2}	P_{G5}	Q_{G5}	P_{G8}	Q_{G8}	P_{G11}	Q_{G11}	P_{G13}	Q_{G13}	TIME
	MW	MVAr	MW	MVAr	MW	MVAr	MW	MVAr	MW	MVAr	MW	MVAr	SEC
296	35.04	0.00	5.72	-9.77	0.00	-3.05	0.00	-2.02	0.00	-6.02	0.00	-6.00	0.0191
297	79.85	0.00	13.14	-0.10	0.00	1.17	0.00	19.59	-0.01	2.55	0.00	-2.15	0.0203
298	64.72	0.00	10.61	-1.35	0.00	-0.83	0.00	10.09	0.00	1.74	0.00	-6.00	0.0196
299	67.90	0.00	11.16	0.03	0.00	-0.35	-0.01	12.42	0.05	1.51	0.00	-6.00	0.0192
300	83.24	0.00	21.02	-9.21	0.00	15.70	5.36	39.67	22.27	7.09	-0.01	6.98	0.0186

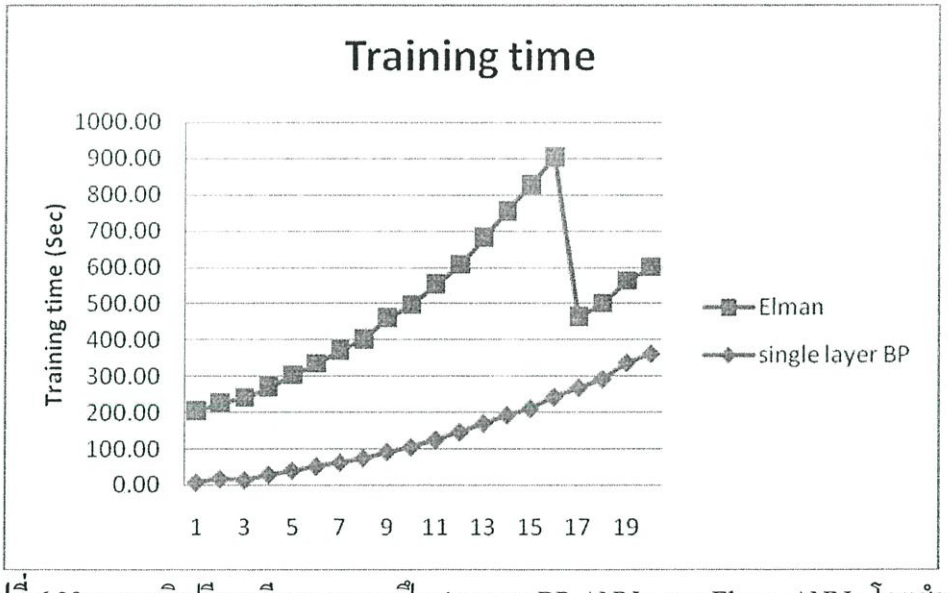
ตารางที่ 6.28 ตัวอย่างผลการทดลองเปรียบเทียบการคำนวณด้วย MATPOWER และ P-ANNs ทดสอบกับระบบ IEEE 30 bus 6 gen

	MATPOWER						
	PG1	PG2	PG5	PG8	PG11	PG13	TIME
กรณีที่	MW	MW	MW	MW	MW	MW	SEC
296	34.98	5.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.5219
297	79.81	13.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.7261
298	64.76	10.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.8194
299	68.09	11.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.7626
300	83.49	21.02	0.00	6.21	21.88	0.00	0.5563
	ANNs						
	P_{G1}	P_{G2}	P_{G5}	P_{G8}	P_{G11}	P_{G13}	TIME
กรณีที่	MW	MW	MW	MW	MW	MW	SEC
296	35.24	5.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0191
297	79.87	13.16	0.00	0.01	0.00	0.00	0.0196
298	65.22	10.72	0.00	0.02	-0.01	0.00	0.0192
299	67.66	11.14	0.00	0.01	0.00	0.00	0.0221
300	83.42	21.43	0.00	5.67	22.12	-0.07	0.0189

6.3.3 โครงข่ายประสาทเทียมแบบเอลแมน (Elman Neural Networks)



รูปที่ 6.28 แผนภูมิเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ BP-ANNs และ Elman-ANNs



รูปที่ 6.29 แผนภูมิเปรียบเทียบเวลาการฝึกสอนของ BP-ANNs และ Elman-ANNs โดยสำหรับ Elman-ANNs ที่จำนวนนิวรอน17-20 ใช้คอมพิวเตอร์ Intel® Core™2 Duo 1.6 GHz ในการฝึกสอน

ตารางที่ 6.32 แสดงประสิทธิภาพของ ANNs แบบชั้นซ่อนเดียวทดลองจากจำนวนนิวรอน 1 ถึง 20

จำนวนนิวรอน	Single layer BP	Time (Sec)	Elman	Time (Sec)
1	1.83	7.79	0.46	195.58
2	1.22	17.76	0.42	209.22
3	0.70	14.14	0.32	225.99
4	0.50	29.05	0.40	240.67
5	0.38	40.31	0.41	263.10
6	0.37	51.49	0.34	282.06
7	0.26	62.16	0.27	308.83
8	0.26	74.63	0.34	327.46
9	0.25	91.58	0.24	368.89
10	0.27	104.37	0.24	392.49
11	0.27	124.43	0.27	429.17
12	0.22	145.25	0.29	461.78
13	0.19	169.43	0.27	512.05
14	0.22	192.22	0.31	562.99
15	0.20	210.27	0.26	616.68
16	0.19	242.01	0.29	662.32
17	0.18	267.90	0.46	195.58
18	0.18	291.32	0.42	209.22
19	0.18	335.99	0.32	225.99
20	0.16	360.39	0.40	240.67

บทที่ 7
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อหาคำตอบในปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมคือหาคำตอบว่าต้องกำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังแต่ละชุดต้องเดินเครื่องเป็นปริมาณเท่าไรเพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไขทางเศรษฐศาสตร์ คือให้ต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าโดยรวมของระบบต่ำที่สุดและเพียงพอต่อความต้องการกำลังไฟฟ้าทั้งนี้ได้คำนึงถึงต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าเสมือนและความต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนด้วย

7.1 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ

สำหรับการนำโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับมาเป็นเครื่องมือในการหาคำตอบ OPF จากการทดลองพบว่าหากใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพียงโครงข่ายเดียวมาหาคำตอบทั้งหมดของระบบจำเป็นต้องใช้โครงข่ายขนาดใหญ่เพื่อให้ได้คำตอบที่ดี ซึ่งโครงข่ายขนาดใหญ่จำเป็นต้องใช้เวลาในการฝึกสอนนานขึ้นมาก การแยกใช้โครงข่ายสำหรับหากำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ที่ต้องผลิต และโครงข่ายสำหรับหากำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power) ที่ต้องผลิต เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถการใช้เวลาในการฝึกสอนลงได้ จากการทดลองวิธีการแยกโครงข่ายดังกล่าวสามารถฝึกสอนได้เร็วขึ้น กล่าวคือใช้เวลาเพียง 1 ใน 4 ของการใช้โครงข่ายเดียว

โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการฝึกสอนแล้วสามารถหาคำตอบของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมได้อย่างรวดเร็ว กล่าวคือใช้เวลาประมาณ 1 ใน 20 ของวิธีการคำนวณแบบทำซ้ำ (Iteration) ทำให้เป็นประโยชน์ในการศึกษาหรือวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าวหากต้องการเตรียมข้อมูลเป็นจำนวนมาก ในระบบเดิม หรือการต้องการหาคำตอบแบบตามเวลาจริง (Real time)

การไหลของกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power flow) เป็นการคำนวณที่มีความซับซ้อนกว่าการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง (Active power flow) มากเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของต้นทุนกำลังไฟฟ้าเสมือน ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมในการคำนวณกำลังไฟฟ้าเสมือนจึงต่ำกว่ากำลังไฟฟ้าจริง อีกทั้ง การใช้ Mean absolute percentage error (MAPE) เป็นเครื่องมือวัดประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม อาจไม่สะท้อนถึงประสิทธิภาพที่แท้จริงของโครงข่ายในกรณีที่ค่าตั้งต้นมีค่าน้อยหรือเข้าใกล้ศูนย์ จะทำให้ MAPE มีค่าสูงมากหรือเข้าใกล้อนันต์ได้

7.2 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบเอลแมน

สำหรับการนำโครงข่ายประสาทเทียมแบบเอลแมนมาเป็นเครื่องมือหาคำตอบ OPF ตามวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พบว่าโครงข่ายประสาทเทียมแบบเอลแมนมีประสิทธิภาพการฝึกสอนต่ำกว่าและใช้เวลาการฝึกสอนนานกว่าโครงข่ายแบบแพร่ค่าย้อนกลับอย่างมาก

ทั้งนี้เนื่องจากชุดข้อมูลฝึกสอนและทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้การสุ่มเลือกชุดข้อมูลให้อยู่ในช่วงที่หาคำตอบได้ (Feasible data) ซึ่งเป็นชุดข้อมูลประเภทสแตติก (Static category) จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับโครงข่ายเอลมานที่เป็นโครงข่ายสำหรับชุดข้อมูลประเภทไดนามิค (Dinamic category) เช่น อนุกรมเวลา (Time series)

อย่างไรก็ตามโครงข่ายประเภทไดนามิคเช่นโครงข่ายเอลแมนอาจเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในปัญหา OPF ในกรณีที่ใช้กับระบบจริงที่รับข้อมูลจริงซึ่งมีข้อมูลอินพุตที่แปรผันตามเวลา หรือการเชื่อมต่อกับระบบตามเวลาจริง (Real time online) ซึ่งเป็นงานวิจัยที่สามารถศึกษาได้ต่อไป

7.3 ข้อดีและข้อเสียของการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในปัญหา OPF

การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม เป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์อย่างหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ได้โดยมีข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดี 1. สามารถหาคำตอบได้อย่างรวดเร็วโดยไม่จำเป็นต้องใช้การคำนวณแบบทำซ้ำ

2. ไม่จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อีกทั้งไม่จำเป็นต้องตีความหมายสัมประสิทธิ์ต่าง ๆในโครงข่าย ที่ได้หลังจากการฝึกสอนสนใจเพียงเอาต์พุตที่ได้เท่านั้น

3. ถ้าระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ก็สามารถนำข้อมูลใหม่มาเพิ่มเติมให้โครงข่ายประสาทเทียมทำการเรียนรู้ได้ โดยไม่จำเป็นต้องลบข้อมูลเดิมออก

ข้อเสีย 1. จำเป็นต้องเตรียมข้อมูลเพื่อทำการฝึกสอนในครั้งแรก

2. ไม่สามารถระบุถึงจำนวนโหนดในชั้นซ่อน และฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ใช้ได้ว่า ต้องใช้จำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่าไร และใช้ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบใด ถึงจะให้ผลดีที่สุด ซึ่งต้องใช้วิธีการทดลองสุ่ม หรือทดลองหลายรูปแบบ

3. จากการทดลองพบว่าโครงข่ายที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่จะให้คำตอบได้ดี แต่จะใช้เวลาในการฝึกสอนนานขึ้นมาก

สิ่งที่ควรได้รับการพัฒนาต่อไปคือความเร็วในการเตรียมโครงข่ายเพื่อให้พร้อมสำหรับการแก้ปัญหา และการปรับปรุงประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมในการหาคำตอบด้านกำลังไฟฟ้าเสมือน

เอกสารอ้างอิง

[1] สุวิทย์ คำสว่าง, จงรักษ์ บุญเส็ง และ ศราวุธ โพธิยา, "การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาบู" ***วิศวกรรมสาร ม.ข. ปีที่ 30 ฉบับที่ 3*** กรกฎาคม – กันยายน 2546

[2] N.Alguacil and A.J. Conejo, "Multiperiod Optimal Power Flow Using Benders Decomposition", ***IEEE Transactions on Power systems,*** Vol.15, No.1, February 2000

[3] M.S. Osman, M.A. Abo-Sinna, A.A. Mousa , "A solution to the optimal power flow using genetic algorithm.", ***www.ElsvierMathematics.com***

[4] Tarek Bouktir and Linda Sliman, "Optimal Power Flow of the Algerian Electrical Network using an Ant Colony Optimization Method", ***Leonado Journal of Sciences,*** Issue 6, July-December 2005, P.43-57

[5] T.T. Nguyen, "Neural Network Optimal Power Flow", ***APSCOM-97, Hong Kong,*** November 1997

[6] ภูริสัณห์ ลักขษร, ***การทำนายการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม.***, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.

[7] Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murillo-Sanchaz, Deqiang(David) Gan, ***MATPOWER Version 3.2 User's Manual.*** Power Systems Engineering Research Center (PSERC) School of Electrical Engineering, Cornell University, Ithaca, NY

[8] สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ, ***การปรับโครงสร้างกิจการไฟฟ้าและการจัดตั้งตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า***, พฤศจิกายน 2543

[9] สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ. ***การผลิต การส่ง และการจ่ายกำลังไฟฟ้า.*** เชียงใหม่ : คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2543. เอกสารอัดสำเนา.

[10] โตศักดิ์ ทัศนสนุตริยะ, ***การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง***, กรุงเทพฯ, ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2540

[11] โตศักดิ์ ทัศนานุตริยะ. ***การผลิต การส่งและจ่ายไฟฟ้า***, กรุงเทพฯ, ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2540.

[12] Hadi Saadat, ***Power System Aalysis.,*** McGraw-Hill, 1999, Singapore

[13] ฉัตรชัย สานติสุขรัตน์, ***การประเมินความเชื่อถือได้ของระบบผลิตกำลังไฟฟ้าโดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียม.,*** วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอม เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.

[14] ณกร อินทร์พยุง, ***การแก้ปัญหาการตัดสินใจในอุตสาหกรรมการขนส่งและลอจิสติกส์***, กรุงเทพฯ, ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2548.

[15] Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murillo-Sanchaz, Deqiang(David) Gan, ***MATPOWER Version 3.0.0 User's Manual.*** Power Systems Engineering Research Center (PSERC) School of Electrical Engineering, Cornell University, Ithaca, NY

[16] กิตติ ภักดีวัฒนะกุล, ***คัมภีร์การวิเคราะห์และตัดสินใจปัญหาเชิงธุรกิจโดยใช้ Excel***, กรุงเทพฯ, สำนักพิมพ์เคทีพี คอมพ์ แอนด์ คอนซัลท์, พิมพ์ครั้งที่ 1 มิถุนายน 2546

[17] คมสัน สุริยะ, ***การวิจัยทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วย Neural Networks***, เชียงใหม่: คณะเศรษฐศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2548, เอกสารอัดสำเนา

[18] Howard Demuth, Mark Beale, Martin Hagan, ***Neural Network Toolbox 5 User's Guide***, The Mathworks Inc., September 2007

[19] สุรชัย ชัยทัศนีย์ พัฒนะ พงศ์จริยา และ รศ.ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, "การจำลองการจัดสรรกำลังการผลิตในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า", ***งานนิทัศการวิชาการทางวิศวกรมครั้งที่ 13***, 6-9 ธันวาคม 2545

[20] www.willamette.edu/~gorr/classes/cs449/rnn1.html

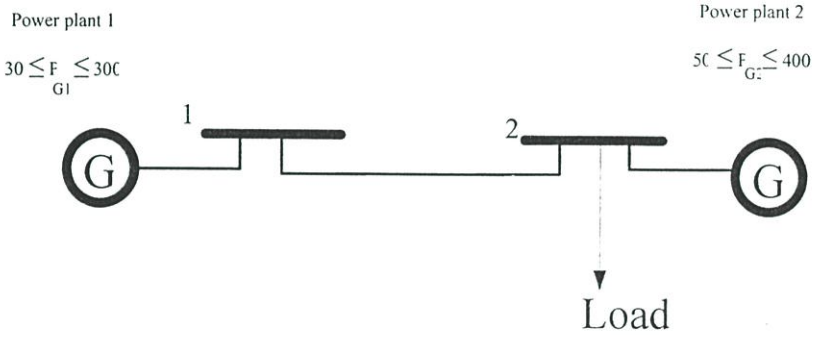
[21] Maxwell G. Dondo and M. E. El-Hawary, Technical University of Nova Scotia, Canada, "Real-Time Electricity Pricing Using a Neural Network Approach"

ภาคผนวก ก
ระบบไฟฟ้าที่ใช้ทำการศึกษา

ระบบไฟฟ้าที่ใช้ทำการศึกษา

ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จำนวน 3 ระบบ เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อนขึ้น โดยในเบื้องต้นเริ่มศึกษาที่ระบบขนาดเล็กที่ไม่คำนึงถึงต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าเสมือน คือระบบไฟฟ้า 2 บัส 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังหัวข้อ ก.1 จากนั้นจึงศึกษาระบบที่ซับซ้อนขึ้น ซึ่งคำนึงถึงต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าเสมือนด้วย คือระบบไฟฟ้า 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบดัดแปลง IEEE 30 บัส 6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังหัวข้อ ก.2 และ ก.3 ตามลำดับ

ก.1 ระบบไฟฟ้า 2 บัส 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า [10]



รูปที่ ก.1 ระบบไฟฟ้า 2 บัส 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

ระบบทดสอบนี้เป็นระบบขนาดเล็กไม่พิจารณาถึงการสูญเสียในสายส่งและกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power) และแสดงในรูปแบบของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสมได้ดังนี้

Objective function:

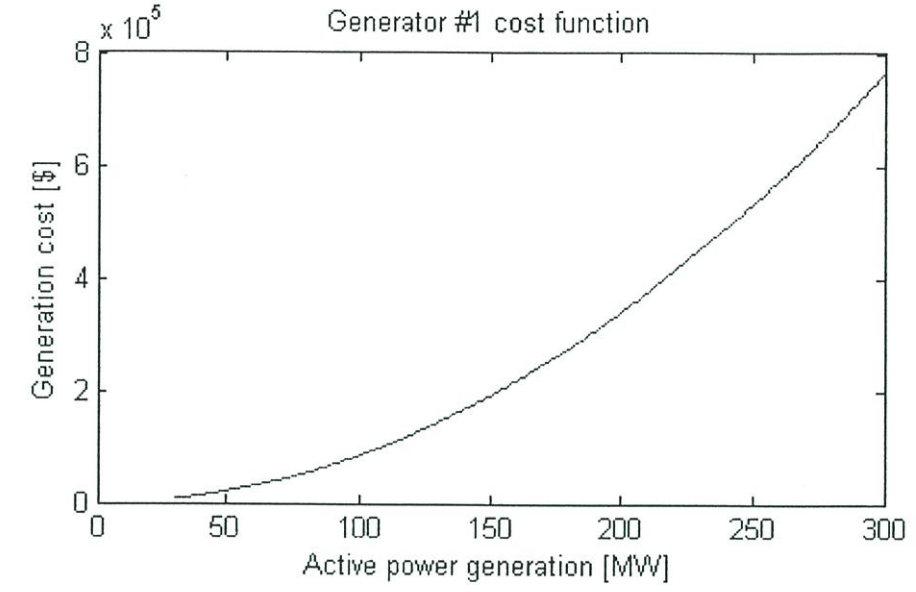
$$\min f(x)$$

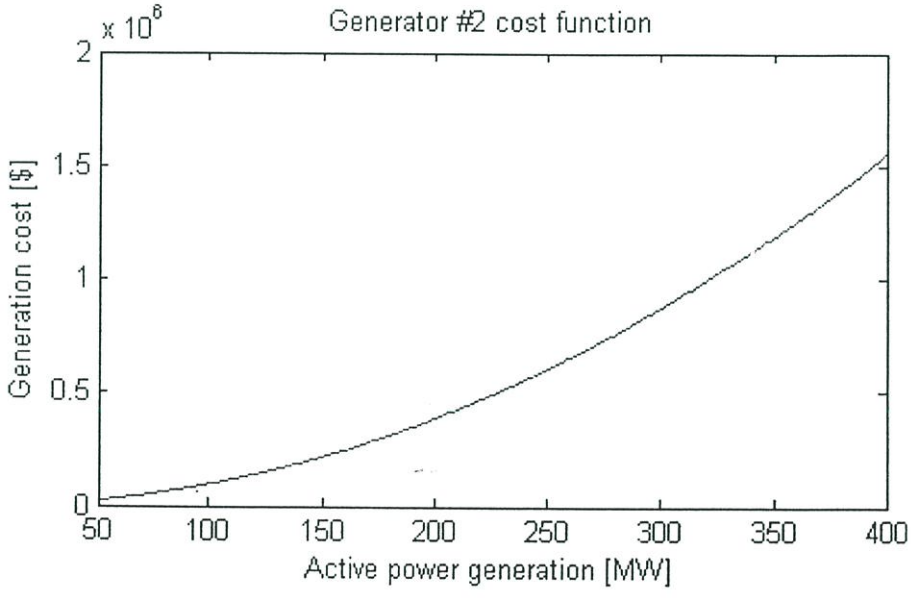
โดยที่

$$f(x) = C_1 + C_2$$
$$= 300 + 8.5P_{G1} + 0.01P_{G1}^2 + 200 + 9.5P_{G2} + 0.2P_{G2}^2$$

Subject to:

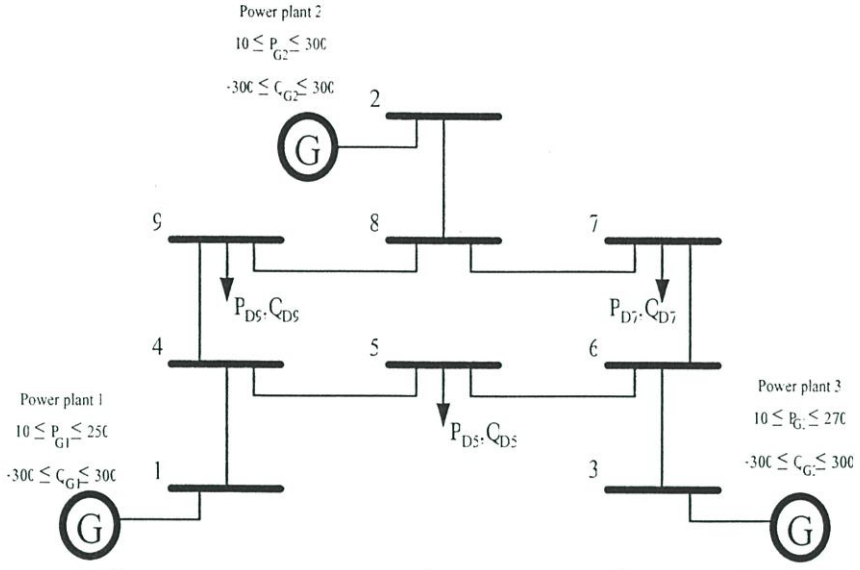
$$30 \le P_{G1} \le 300$$
$$50 \le P_{G2} \le 400 \qquad \text{(ก.1)}$$
$$P_C = P_{G1} + P_{G2}$$





รูปที่ ก.2 เส้นโค้งแสดงฟังก์ชั่นต้นทุนของระบบไฟฟ้า 2 บัส 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำการศึกษา

ก.2 ระบบไฟฟ้า 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า [7]



รูปที่ ก.3 ระบบไฟฟ้า 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา

ระบบทดสอบนี้เป็นระบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้นคือ ขนาด 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งเป็นระบบที่สามารถศึกษาถึงการสูญเสียในสายส่งและกำลังไฟฟ้าเสมือนได้ และมีข้อมูลและขอบเขตของระบบดังนี้

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัส

บัสที่	ชนิด
1	Reference bus
2	PV bus
3	PV bus
4	PQ bus
5	PQ bus
6	PQ bus
7	PQ bus
8	PQ bus

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

บัสที่	กำลังไฟฟ้าเสมือนจ่ายออกสูงสุด (MVAr)	กำลังไฟฟ้าเสมือนจ่ายออกต่ำสุด (MVAr)	กำลังไฟฟ้าจริงจ่ายออกสูงสุด (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงจ่ายออกต่ำสุด (MW)
1	300	-300	250	10
2	300	-300	300	10
3	300	-300	270	10

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลบรานช์ของระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากบัส	ถึงบัส	resistance (p.u.)	reactance (p.u)	susceptance (p.u)	พิกัดสายส่ง (MW)
1	4	0.0000	0.0576	0.0000	250
4	5	0.0170	0.0920	0.158.0	250
5	6	0.0390	0.1700	0.3580	150
3	6	0.0000	0.0586	0.0000	300
6	7	0.0119	0.1008	0.2090	150
7	8	0.0085	0.0720	0.1490	250
8	2	0.0000	0.0625	0.0000	250
8	9	0.0320	0.1610	0.3060	250
9	4	0.0100	0.0850	0.1760	250

ต้นทุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบ 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$C_{PG1} = 0.11P_{G1}^{2}+5P_{G1}+150$$

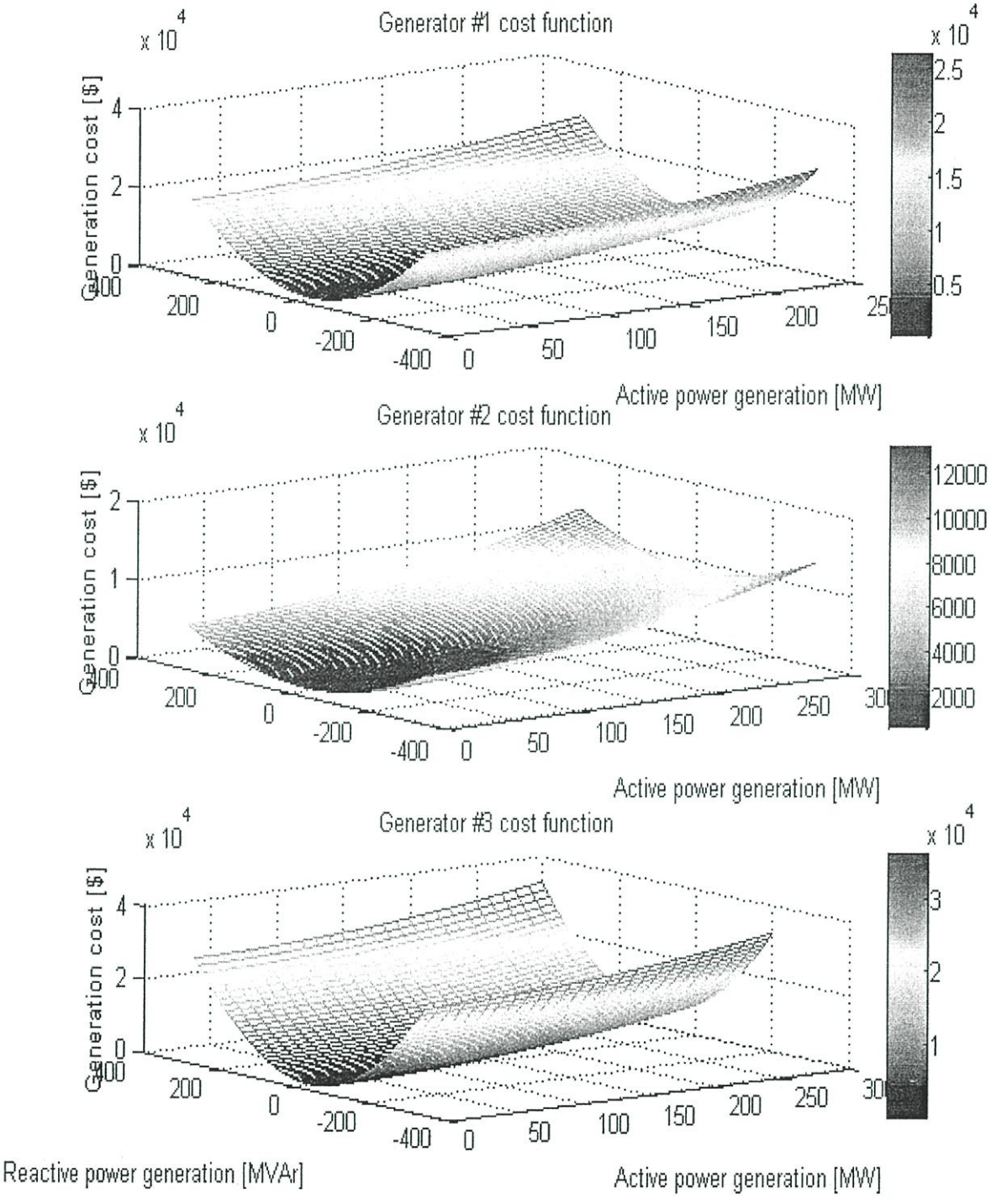
$$C_{PG2} = 0.085P_{G2}^{2}+1.2P_{G2}+600$$

$$C_{PG3} = 0.1125P_{G3}^{2}+P_{G3}^{2}+335$$

$$C_{QG1} = 0.2Q_{G1}^{2}$$

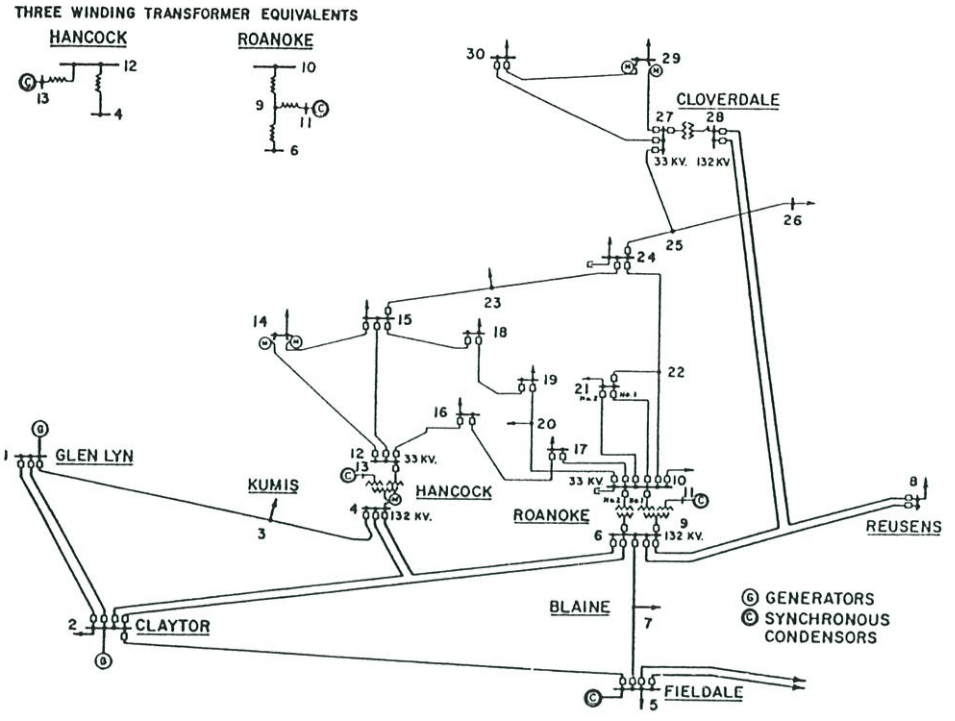
$$C_{QG2} = 0.05Q_{G2}^{2}$$

$$C_{QG3} = 0.3Q_{G3}^{2} \qquad \text{(ก.2)}$$



รูปที่ ก.4 พื้นผิวแสดงฟังก์ชั่นต้นทุนของระบบไฟฟ้า 9 บัส 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา

ก.3 ระบบดัดแปลง IEEE 30 บัส (IEEE 30 bus test system)



รูปที่ ก.5 ระบบไฟฟ้า IEEE 30 บัส ที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลบัสของระบบไฟฟ้า IEEE 30 บัส

บัสที่	ชนิด
1	Reference bus
2	PV bus
3	PQ bus
4	PQ bus
5	PV bus
6	PQ bus
7	PQ bus
8	PV bus
9	PQ bus
10	PQ bus
11	PV bus
12	PQ bus
13	PV bus
14	PQ bus

บัสที่	ชนิด
15	PQ bus
16	PQ bus
17	PQ bus
18	PQ bus
19	PQ bus
20	PQ bus
21	PQ bus
22	PQ bus
23	PQ bus
24	PQ bus
25	PQ bus
26	PQ bus
27	PQ bus
28	PQ bus
29	PQ bus
30	PQ bus

ตารางที่ ก.5. ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า IEEE 30 บัส

บัสที่	กำลังไฟฟ้าเสมือนจ่ายออกสูงสุด (MVAr)	กำลังไฟฟ้าเสมือนจ่ายออกต่ำสุด (MVAr)	กำลังไฟฟ้าจริงจ่ายออกสูงสุด (MW)	กำลังไฟฟ้าจริงจ่ายออกต่ำสุด (MW)
1	10	0	360.2	0
2	50	-40	140	0
5	40	-40	140	0
8	40	-10	100	0
11	24	-6	100	0
13	24	-6	100	0

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลบรานซ์ของระบบไฟฟ้า IEEE 30 บัส

จากบัส	ถึงบัส	resistance (p.u.)	reactance (p.u)	susceptance (p.u)	พิกัดสายส่ง (MW)
1	2	0.0192	0.0575	0.0528	9900
1	3	0.0452	0.1652	0.0408	9900
2	4	0.057	0.1737	0.0368	9900
3	4	0.0132	0.0379	0.0084	9900
2	5	0.0472	0.1983	0.0418	9900
2	6	0.0581	0.1763	0.0374	9900
4	6	0.0119	0.0414	0.009	9900
5	7	0.046	0.116	0.0204	9900
6	7	0.0267	0.082	0.017	9900
6	8	0.012	0.042	0.009	9900
6	9	0	0.208	0	9900
6	10	0	0.556	0	9900
9	11	0	0.208	0	9900
9	10	0	0.11	0	9900
4	12	0	0.256	0	9900
12	13	0	0.14	0	9900
12	14	0.1231	0.2559	0	9900
12	15	0.0662	0.1304	0	9900
12	16	0.0945	0.1987	0	9900
14	15	0.221	0.1997	0	9900
16	17	0.0524	0.1923	0	9900
15	18	0.1073	0.2185	0	9900
18	19	0.0639	0.1292	0	9900
19	20	0.034	0.068	0	9900
10	20	0.0936	0.209	0	9900
10	17	0.0324	0.0845	0	9900
10	21	0.0348	0.0749	0	9900
10	22	0.0727	0.1499	0	9900

จาก บัส	ถึง บัส	resistance (p.u.)	reactance (p.u)	susceptance (p.u)	พิกัดสายส่ง (MW)
21	22	0.0116	0.0236	0	9900
15	23	0.1	0.202	0	9900
22	24	0.115	0.179	0	9900
23	24	0.132	0.27	0	9900
24	25	0.1885	0.3292	0	9900
25	26	0.2544	0.38	0	9900
25	27	0.1093	0.2087	0	9900
28	27	0	0.396	0	9900
27	29	0.2198	0.4153	0	9900
27	30	0.3202	0.6027	0	9900
29	30	0.2399	0.4533	0	9900
8	28	0.0636	0.2	0.0428	9900
6	28	0.0169	0.0599	0.013	9900

ต้นทุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า IEEE 30 บัส

$$C_{PG1} = 0.038432P_{G1}^{2}+20P_{G1}$$

$$C_{PG2} = 0.25P_{G2}^{2}+20P_{G2}$$

$$C_{PG5} = 0.01P_{G5}^{2}+40P_{G5}$$

$$C_{PG8} = 0.01P_{G8}^{2}+40P_{G8}$$

$$C_{PG11} = 0.01P_{G11}^{2}+40P_{G11}$$

$$C_{PG13} = 0.01P_{G13}^{2}+40P_{G13}$$

$$C_{QG1} = 0.2Q_{G1}^{2}$$

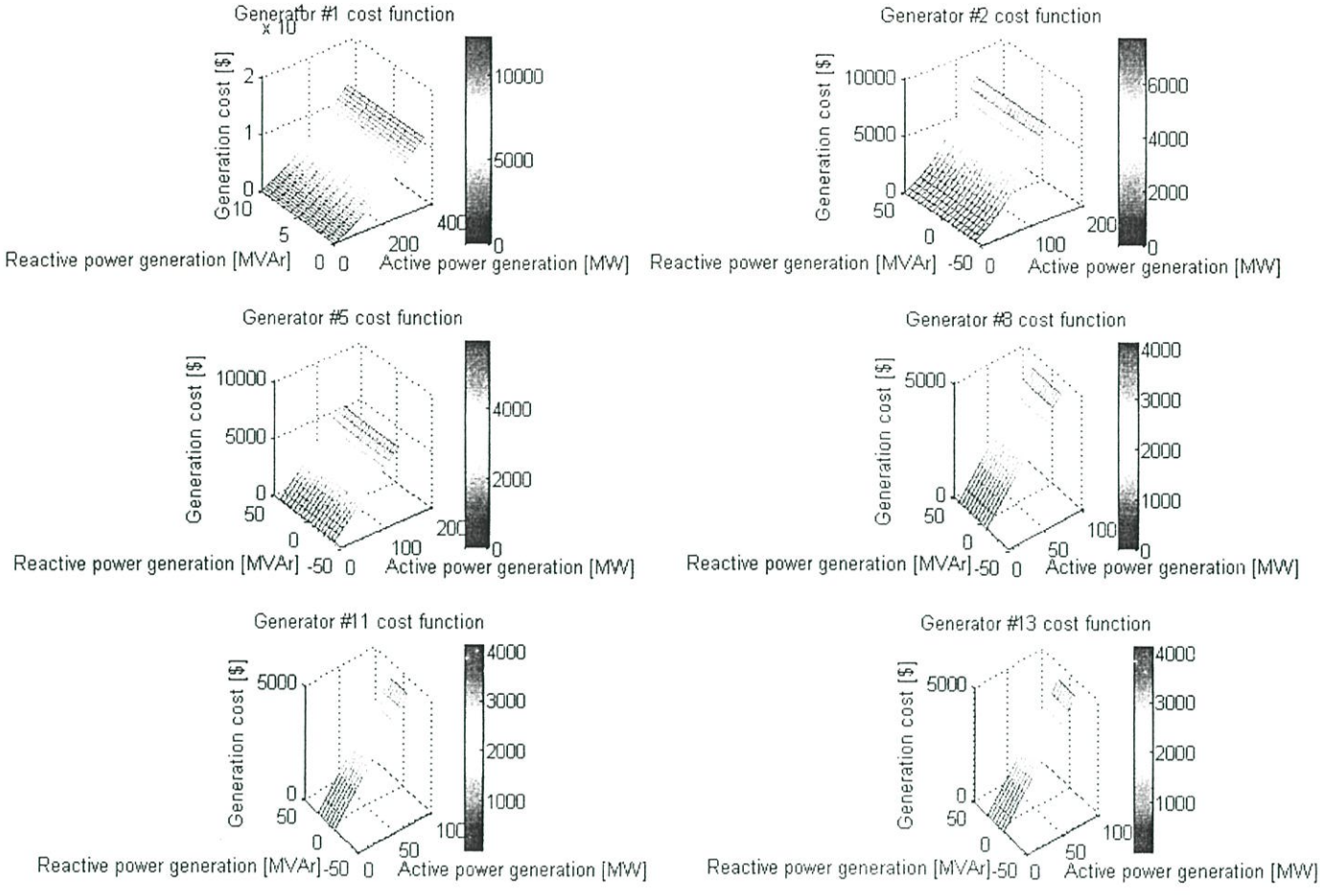
$$C_{QG2} = 0.00175Q_{G2}^{2}$$

$$C_{GQ5} = 0.0625Q_{G5}^{2}$$

$$C_{QG8} = 0.00834Q_{G8}^{2}$$

$$C_{QG11} = 0.025Q_{G11}^{2}$$

$$C_{GQ13} = 0.025Q_{G13}^{2} \qquad \text{(ก.3)}$$



รูปที่ ก.5 พื้นผิวแสดงฟังก์ชั่นต้นทุนของระบบไฟฟ้า IEEE 30 บัส 6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ใช้ในการศึกษา

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายปรเมศ อิงสุวรรณ	
วัน เดือน ปีเกิด	7 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2522 ที่จังหวัดเชียงใหม่	
ที่อยู่	211/18 หมู่บ้านสีวลี-คลองชล ต.แม่เหียะ อ.เมืองเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่	
ประวัติการศึกษา	2539	สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย (วิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์) จากโรงเรียนปรินส์รอยแยลส์วิทยาลัย
	2544	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่
	2546	เข้าศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประวัติการทำงาน	2544-2547	วิศวกรฝ่ายผลิต แผนกโรงไฟฟ้า บมจ. อุตสาหกรรมปิโตรเคมีกัลไทย (TPI) จังหวัดระยอง
	2547-2550	หัวหน้าฝ่ายวิศวกรรม บจก. เค.พี. เอ็กซ์เพอท เอนจิเนียริ่ง จังหวัดเชียงใหม่
	2550	กรรมการผู้จัดการ บจก. เค.เค.พี. อุตสาหกรรม จังหวัดเชียงใหม่ กรรมการบริษัท เค.พี. อะโกรอินดัสทรี้ จังหวัดตาก
	2551-ปัจจุบัน	กรรมการผู้จัดการ บจก. เค.พี. อะโกร อินดัสทรี้ (ลพบุรี) จังหวัดลพบุรี กรรมการบริษัท เค.พี. (จอมทอง) จังหวัดเชียงใหม่
ผลงานทางวิชาการ	การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการแก้ปัญหาออปติมอลเพาเวอร์โฟลว์ วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 18 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม 2551	