

การประมาณสนามไฟฟ้าของสายส่งแรงสูง  
โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

ELECTRIC FIELDS ESTIMATION OF HIGH VOLTAGE  
TRANSMISSION LINE USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-EN-M-020-176

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**การประมาณสนามไฟฟ้าของสายส่งแรงสูง  
โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม**

**ELECTRIC FIELDS ESTIMATION OF HIGH VOLTAGE  
TRANSMISSION LINE USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS**



T117106



ศุภกฤต ทาทอง

SUPHAKRIT THATHONG

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **117106**  
วัน,เดือน,ปี **23 ส.ค. 2554**

b. **12333a31.**  
.....  
.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL 2009-EN-M-020-176

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ELECTRIC FIELDS ESTIMATION OF HIGH VOLTAGE  
TRANSMISSION LINE USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2009**

**KMITL 2009-EN-M-020-176**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2009**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประมาณสนามไฟฟ้าของสายส่งแรงสูงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม  
Thesis Title Electric Fields Estimation of High Voltage Transmission Line using Artificial Neural Networks  
นักศึกษา นายศุภกฤต ทาทอง  
รหัสประจำตัว 50060209  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมชาติ จิรีวิภากร  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-020-176

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ยุทธนา คิดใจเดียว	
ผศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ	
ผศ.ดร.ปานจิต คำรงกุลคำจร	
รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน	
รศ.ดร.สมชาติ จิรีวิภากร	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 20 ตุลาคม พ.ศ. 2552 เวลา 11.00-13.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ. 2552

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.  
วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์  
วันที่ 11 เดือน 10 พ.ศ. 2553

เอกสารนี้คือเอกสารที่ส่งมอบสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประมาณสนามไฟฟ้าของสายส่งแรงสูง โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม
นักศึกษา	นายศุภกฤต ทาทอง
รหัสนักศึกษา	50060209
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สมชาติ จิริวิภากร

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันผลกระทบที่เกิดจากสนามไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูงได้สร้างปัญหาให้กับหน่วยงานที่ออกแบบและก่อสร้างสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเป็นอย่างมาก ดังนั้น โครงการวิจัยนี้นำเสนอการประมาณสนามไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดมาจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับเหนือพื้นดินด้วยวิธีใหม่ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมชนิดที่มีการแพร่ค่าย้อนกลับ เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาในการออกแบบระบบสายส่งแรงสูง ในการศึกษานี้จะใช้ Neural Network Toolbox ของโปรแกรม Matlab ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วย Levenberg-Marquardt algorithm (trainlm) และข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมนั้น จะได้จากโปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW) Version 3.0 [1] ยกตัวอย่างเช่น จำนวนตัวนำต่อเฟส, รูปแบบการจัดเรียงลำดับเฟส และระยะห่างจากจุดกึ่งกลางสายส่ง จำลองตามมาตรฐานสายส่งไฟฟ้า 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยและมาตรฐานเสาส่งไฟฟ้า 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคทั้งวงจรคู่ และวงจรเดี่ยว ในศึกษานี้จะใช้ข้อมูลที่ไม่อยู่ในชุดข้อมูลฝึกสอนเป็นชุดข้อมูลทดสอบ ผลการทดสอบพบว่าโครงข่ายประสาทเทียมสามารถประมาณค่าสนามไฟฟ้าของสายส่งแรงสูงได้ ซึ่งคำตอบที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่ดีและมีประสิทธิภาพ หลังจากนั้นนำโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนและข้อมูลค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากการวัดจริงของเสาส่งไฟฟ้าที่เขตลาดกระบัง มาเปรียบเทียบกับค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW) พบว่า โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW)

**Thesis Title** Electric Fields Estimation of High Voltage Transmission Line  
Using Artificial Neural Networks

**Student** Mr. Suphakrit Thathong

**Student ID.** 50060209

**Degree** Master of Engineering

**Programme** Electrical Engineering

**Year** 2009

**Thesis Advisor** Assoc.Prof. Dr.Somchat Jiriwibhakorn

### ABSTRACT

This paper presents a novel method to estimate of the electric field of transmission line at ground level based on Artificial Neural Networks (ANN). A Feed-Forward (FF) ANN with back-propagation learning rule method was addressed which uses the Levenberg- Marquardt learning algorithm. Input and output data have been simulated by Transmission Line Workstation (TLW) Version 3.0 [8] such as: number of phase conductors, phase sequences and distance from transmission line center etc. according to EGAT transmission lines of 500 kV and PEA transmission lines of 115 kV. The study has been tested on the test patterns which are not included in the training patterns. The results show that ANN could be used to estimate the Electric Field ( $\vec{E}$ ) effectively. After that electric field of transmission line between Artificial Neural Networks (ANN), measurement result and TLW program is compared as simulation transmission line at Ladkrabang district. The result of comparison is shown that electric field from ANN have quite the same trend with electric field from TLW program more than electric field from measurement result .

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยได้รับคำแนะนำ, คำปรึกษา และความเอาใจใส่ เป็นอย่างดี จาก รศ.ดร.สมชาติ จิรวินากร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและ ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ คุณ พิทักษ์ ปิ่นอนงค์ จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ได้เอื้อเฟื้อ ข้อมูลและความช่วยเหลือต่างๆที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือ ในเรื่องต่างๆ

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

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ศุภกฤต ทาทอง

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	3
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.7 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
1.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทที่ 2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	5
2.1 ข้อมูลพื้นฐานระบบไฟฟ้ากำลัง.....	5
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	6
2.2.1 ประจุไฟฟ้า.....	6
2.2.2 ประจุไฟฟ้าในตัวนำ.....	7
2.3 สนามไฟฟ้า.....	8
2.4 แม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก.....	11
2.5 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	13
2.5.1 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามธรรมชาติ.....	13
2.5.1.1 ฟ้าผ่า.....	13
2.5.1.2 สนามแม่เหล็กโลก.....	13
2.5.1.3 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากปรากฏการณ์การแผ่รังสีคอสมิก.....	14
2.5.2 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มนุษย์สร้างขึ้น.....	14
2.5.2.1 สวิตชิงทรานเซียนต์.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นาเบไซประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2.2 สัญญาณสื่อสาร.....	14
2.5.2.3 สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูงและสายป้อนพลังงานไฟฟ้า.....	14
2.6 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าสายส่ง.....	14
2.6.1 สนามไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง.....	17
2.6.2 การคำนวณสนามไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง.....	18
<b>บทที่ 3 โครงข่ายประสาทเทียม.....</b>	<b>21</b>
3.1 ความเป็นมาของโครงข่ายประสาทเทียม.....	21
3.1.1 ช่วงทศวรรษที่ 40 ยุคเริ่มต้นของโครงข่ายประสาทเทียม.....	21
3.1.1.1 นิวรอน McCulloch-Pitts.....	21
3.1.1.2 กฎการเรียนรู้ของ Hebb.....	22
3.1.2 ช่วงทศวรรษที่ 50-60 ยุคทองของโครงข่ายประสาทเทียม.....	22
3.1.2.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิด perceptron.....	22
3.1.2.2 กฎการเรียนรู้ ADALINE.....	23
3.1.3 ช่วงทศวรรษที่ 70 ยุคเงิบของโครงข่ายประสาทเทียม.....	23
3.1.3.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิด Anderson.....	23
3.1.3.2 โครงข่ายประสาทเทียมชนิด Kohonen.....	23
3.1.3.3 โครงข่ายประสาทเทียมชนิด Grossberg.....	24
3.1.3.4 โครงข่ายประสาทเทียมชนิด ART1 และ ART2.....	24
3.1.4 ช่วงทศวรรษที่ 80 ยุคความกระตือรือร้นกลับมาใหม่.....	24
3.1.4.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิด Backpropagation.....	24
3.1.4.2 โครงข่ายประสาทเทียมชนิด Hopfield.....	25
3.1.4.3 โครงข่ายประสาทเทียมชนิด Neocognitron.....	25
3.1.4.4 โครงข่ายประสาทเทียมชนิด Boltzmann.....	25
3.2 การทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม.....	26
3.2.1 นิวรอน.....	26
3.2.2 โครงสร้างของนิวรอนและไซแนปส์.....	26
3.2.3 การส่งผ่านกระแสประสาท.....	27

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 โครงข่ายประสาทเทียม.....	29
3.3.1 คุณสมบัติและความสามารถของโครงข่ายประสาทเทียม.....	29
3.3.2 ลักษณะของปัญหาที่เหมาะสมกับโครงข่ายประสาทเทียม.....	30
3.4 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม (Architectures of Neural Networks).....	30
3.4.1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว (Single Layer Neural Network).....	31
3.4.2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi Layer Neural Network).....	31
3.5 การกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก (Setting the Weights).....	33
3.5.1 การเรียนรู้แบบควบคุม (Supervised Learning).....	34
3.5.2 การเรียนรู้แบบอิสระ (Unsupervised Learning).....	35
3.6 ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function).....	35
3.7 ชนิดของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีอยู่ (Kinds of Neural Networks exist).....	40
3.8 พื้นฐานแนวคิดของโครงข่ายประสาทเทียม (Basis Algorithm of NNs).....	41
3.8.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-propagation NN).....	41
3.8.1.1 โครงสร้าง.....	41
3.8.1.2 แนวคิด.....	42
บทที่ 4 ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่ทำการศึกษา.....	49
4.1 ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.....	49
4.2 ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	51
4.3 สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสูงสุด.....	53
4.4 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์.....	54
4.4.1 ระบบไฟฟ้าแรงสูง 500 kV การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.....	54
4.4.2 ระบบไฟฟ้าแรงสูง 500 kV การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.....	55
บทที่ 5 การลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้า.....	56
5.1 กล่าวนำ.....	56
5.2 การลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้า.....	56
5.2.1 ลักษณะของการจัดวางตัวนำ (Line configuration ).....	56
5.2.2 ความสูงของสายส่ง (Line height ).....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.3 ระยะห่างระหว่างเฟส (Phase spacing ).....	64
5.2.4 ขนาดของสายไฟฟ้า (Conductor dimension ).....	65
5.2.5 การจัดเรียงลำดับเฟส (Phase sequences ).....	65
<b>บทที่ 6 การคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง</b>	
<b>โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม.....</b>	<b>70</b>
6.1 การเลือกตัวแปรในการฝึกสอน.....	70
6.1.1 ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT).....	71
6.1.1.1 สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรเดี่ยว.....	71
6.1.1.2 สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรคู่.....	71
6.1.2 ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA).....	71
6.1.2.1 สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 115 kV วงจรเดี่ยว.....	71
6.1.2.2 สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 115 kV วงจรคู่.....	71
6.2 การกระจายของข้อมูลฝึกสอน.....	71
6.3 ปริมาณของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบ.....	78
6.4 เงื่อนไขของการฝึกสอน.....	79
6.4.1 ค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส.....	80
6.4.2 ลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส.....	80
6.4.3 จำนวนครั้งของการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส.....	81
6.4.4 จำนวนรอบของการฝึกสอน.....	82
6.4.5 จำนวน โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม.....	82
6.4.6 ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน.....	83
6.4.7 เงื่อนไขที่เป็นค่าพื้นฐานของ Neural Network Toolbox.....	83
6.4.7.1 ค่า Gradient factor.....	83
6.4.7.2 ค่า Learning factor.....	84
6.5 ขั้นตอนการฝึกสอน.....	86
<b>บทที่ 7 ผลการทดลอง</b> .....	<b>91</b>
7.1 รูปแบบการนำเสนอ.....	91
7.1.1 ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ในการทดลอง.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7.1.1.1 ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT) .....	91
7.1.1.2 ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) .....	91
7.1.2 รูปแบบการนำเสนอผลการทดลองของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงแต่ละระบบ.....	91
7.2 ผลการทดลองของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) .....	92
7.2.1 ผลการทดลองของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) วงจรเดียว.....	92
7.2.2 ผลการทดลองของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) วงจรคู่.....	97
7.3 ผลการทดลองของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) .....	104
7.3.1 ผลการทดลองของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) วงจรเดียว.....	104
7.3.2 ผลการทดลองของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) วงจรคู่.....	109
7.4 ผลการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม TLW, โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว และการวัด.....	116
บทที่ 8 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	117
บรรณานุกรม.....	122
ภาคผนวก.....	124
ภาคผนวก ก. โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม.....	125
ภาคผนวก ข. โปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW)	

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ค. ข้อกำหนดและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ได้สายส่งแรงสูง.....	157
ภาคผนวก ง. ตารางแสดงคุณสมบัติของสายตัวนำแต่ละชนิดที่มีใช้งาน.....	164
ภาคผนวก จ. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	173
ประวัติผู้เขียน.....	187



# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ชนิดฟังก์ชันกระตุ้น .....	37
5.1 รูปแบบของการจัดวางตัวนำและเฟสของเสาไฟฟ้าตามรูปที่ 5.1 และ 5.2.....	61
5.2 การจัดเรียงลำดับเฟสของสายส่งวงจรในแบบต่างๆ.....	66
6.1 วิธีการแปลงข้อมูลที่ได้เป็นตัวแปรฝึกสอน สำหรับระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย วงจรเดี่ยว.....	74
6.2 วิธีการแปลงข้อมูลที่ได้เป็นตัวแปรฝึกสอน สำหรับระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย วงจรคู่.....	75
6.3 วิธีการแปลงข้อมูลที่ได้เป็นตัวแปรฝึกสอน สำหรับระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 115 kV การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค วงจรเดี่ยว (SS_TG1 และ SD_TG1).....	76
6.4 วิธีการแปลงข้อมูลที่ได้เป็นตัวแปรฝึกสอน สำหรับระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 115 kV การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค วงจรเดี่ยว วงจรคู่ (DS_TG1 และ DD_TG1).....	77
6.5 จำนวนข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม สำหรับระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT).....	79
6.6 จำนวนข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม สำหรับระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA).....	79
6.7 เงื่อนไขการฝึกสอนที่ควบคุม.....	84
6.8 เงื่อนไขการฝึกสอนที่เป็นค่าพื้นฐานของ Neural Network Tool Box.....	86
7.1 ผลเปรียบเทียบค่า $E_{ANN}$ กับค่า $E_{TLW}$ ของข้อมูลทดสอบ 10 ชุด จากจำนวนชุดข้อมูล ฝึกสอน 60 ชุด.....	92
7.2 ผลเปรียบเทียบค่า $E_{ANN}$ กับค่า $E_{TLW}$ ของข้อมูลทดสอบ 10 ชุด จากจำนวนชุดข้อมูล ฝึกสอน 90 ชุด.....	92
7.3 ผลเปรียบเทียบค่า $E_{ANN}$ กับค่า $E_{TLW}$ ของข้อมูลทดสอบ 10 ชุด จากจำนวนชุดข้อมูล ฝึกสอน 120 ชุด.....	93
7.4 ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วในเงื่อนไขต่างๆ.....	93
7.5 เงื่อนไขต่างๆสำหรับการหาค่าตอบของชุดทดสอบแบบ Interpolation.....	95
7.6 ผลเปรียบเทียบค่า $E_{ANN}$ กับค่า $E_{TLW}$ ของข้อมูลทดสอบ 40 ชุด จากจำนวนชุดข้อมูล ฝึกสอน 290 ชุด.....	97
7.7 ผลเปรียบเทียบค่า $E_{ANN}$ กับค่า $E_{TLW}$ ของข้อมูลทดสอบ 40 ชุด จากจำนวนชุดข้อมูล ฝึกสอน 390 ชุด.....	98

# สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
7.8 ผลเปรียบเทียบค่า $E_{ANN}$ กับค่า $E_{TLW}$ ของข้อมูลทดสอบ 40 ชุด จากจำนวนชุดข้อมูล ฝึกสอน 490 ชุด.....	99
7.9 ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วในเงื่อนไขต่างๆ.....	100
7.10 เงื่อนไขต่างๆสำหรับการหาค่าตอบของชุดทดสอบแบบ Interpolation.....	101
7.11 ผลเปรียบเทียบค่า $E_{ANN}$ กับค่า $E_{TLW}$ ของชุดทดสอบ 10 ชุด จากจำนวนชุดข้อมูล ฝึกสอน 30 ชุด.....	104
7.12 ผลเปรียบเทียบค่า $E_{ANN}$ กับค่า $E_{TLW}$ ของชุดทดสอบ 10 ชุด จากจำนวนชุดข้อมูล ฝึกสอน 60 ชุด.....	104
7.13 ผลเปรียบเทียบค่า $E_{ANN}$ กับค่า $E_{TLW}$ ของชุดทดสอบ 10 ชุด จากจำนวนชุดข้อมูล ฝึกสอน 90 ชุด.....	105
7.14 ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วในเงื่อนไขต่างๆ.....	105
7.15 เงื่อนไขต่างๆสำหรับการหาค่าตอบของชุดทดสอบแบบ Interpolation.....	107
7.16 ผลเปรียบเทียบค่า $E_{ANN}$ กับค่า $E_{TLW}$ ของชุดทดสอบ 40 ชุด จากจำนวนชุดข้อมูล ฝึกสอน 350 ชุด.....	109
7.17 ผลเปรียบเทียบค่า $E_{ANN}$ กับค่า $E_{TLW}$ ของชุดทดสอบ 40 ชุด จากจำนวนชุดข้อมูล ฝึกสอน 450 ชุด.....	110
7.18 ผลเปรียบเทียบค่า $E_{ANN}$ กับค่า $E_{TLW}$ ของชุดทดสอบ 40 ชุด จากจำนวนชุดข้อมูล ฝึกสอน 550 ชุด.....	111
7.19 ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วในเงื่อนไขต่างๆ.....	112
7.20 เงื่อนไขต่างๆสำหรับการหาค่าตอบของชุดทดสอบแบบ Interpolation.....	113
7.21 เงื่อนไข สำหรับการหาค่าตอบค่าความเข้มสนามไฟฟ้า.....	116
8.1 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าตามข้อกำหนดของ กฟผ. และการวิเคราะห์.....	121
ค-1 ค่าจำกัดการสัมผัสสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก.....	159
ค-2 เกณฑ์ปริมาณค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของคณะกรรมการระหว่างประเทศด้านการ ป้องกันการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดไม่แตกตัว.....	159
ค-3 เกณฑ์ปริมาณค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของการประชุมชีวอนามัยในโรงงาน อุตสาหกรรมของรัฐบาลสหรัฐอเมริกา (The American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)).....	160

# สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค-4 แสดงเกณฑ์มาตรฐานค่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละมลรัฐของสหรัฐอเมริกา.....	161
ค-5 ค่ากำหนดการสัมผัสความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจาก คณะกรรมการป้องกันกรแพร่รังสีระหว่างประเทศ.....	162
ค-6 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต.....	163
ง-1 คุณสมบัติของสายอะลูมิเนียมชนิดเปลือยตามมาตรฐาน มอก. 85-2517.....	165
ง-2 คุณสมบัติของสายอะลูมิเนียมตีเกลียวเปลือยแกนเหล็กตามมาตรฐาน มอก. 86-22517.....	166
ง-3 คุณสมบัติของสายอะลูมิเนียมหุ้มฉนวนแบบไม่เต็มพิกัดขนาดแรงดัน 25 kV.....	168
ง-4 คุณสมบัติของสายอะลูมิเนียมหุ้มฉนวนแบบไม่เต็มพิกัดขนาดแรงดัน 35 kV.....	169
ง-5 คุณสมบัติของสายอะลูมิเนียมหุ้มฉนวนแบบเต็มพิกัดขนาดแรงดัน 25 kV.....	170
ง-6 คุณสมบัติของสายอะลูมิเนียมหุ้มฉนวนแบบเต็มพิกัดขนาดแรงดัน 35 kV.....	171
ง-7 คุณสมบัติของสายอะลูมิเนียมแกนเหล็ก (ACSR) ตามมาตรฐานอเมริกัน (AWG).....	172

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ระบบไฟฟ้า.....	5
2.2 ประจุไฟฟ้าที่เหมือนกันจะผลักกันและประจุไฟฟ้าที่ต่างกันจะดูดกัน.....	7
2.3 การกระจายของประจุไฟฟ้าในตัวนำและฉนวน.....	7
2.4 ประจุไฟฟ้ารวมตัวกันมากบริเวณที่มีส่วนโค้งน้อยของตัวนำ.....	7
2.5 การกระจายตัวของประจุบนผิวของทรงกลมตัวนำทั้งสอง เมื่อนำมาแตะกัน จะมีจำนวนเท่ากัน ถ้าทรงกลมทั้งสองมีขนาดเดียวกัน.....	8
2.6 ประจุทดสอบ $q_0$ ถูกผลักออกจากทรงกลมประจุบวกในแนวรัศมี.....	9
2.7 ทิศทางของแนวแรงรอบประจุ.....	9
2.8 สนามไฟฟ้ารอบจุดประจุบวก.....	11
2.9 เข็มทิศในสนามแม่เหล็กและเส้นแรงแม่เหล็ก.....	12
2.10 ทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กโลก.....	13
2.11 คลื่นรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากระบบสื่อสาร.....	14
2.12 แถบคลื่นความถี่ ( Frequency Spectrum ).....	15
2.13 คุณลักษณะของคลื่นสนามไฟฟ้าและคลื่นสนามแม่เหล็ก.....	16
2.14 การเกิดสนามไฟฟ้าสูงสุดในตัวกลางอากาศ.....	18
3.1 ตัวอย่างของนิเวศชนิดที่มีสองขั้ว.....	26
3.2 โครงสร้างของประสาท.....	27
3.3 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียม.....	29
3.4 แบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว [11].....	31
3.5 แบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ชั้นซ่อน [11].....	32
4.1 ลักษณะสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500kV ชนิดวงจรเดี่ยวและวงจรคู่ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต.....	49
4.2 เสาไฟฟ้าและระยะห่างเสาไฟฟ้ามาตรฐานของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500kV วงจรเดี่ยว.....	50
4.3 เสาไฟฟ้าและระยะห่างเสาไฟฟ้ามาตรฐานของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500kV วงจรคู่.....	50
4.4 ลักษณะสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 115 kV วงจรเดี่ยว สายไฟฟ้า(SS_TG1) และสายไฟฟ้าคู่ (SD_TG1).....	52
4.5 ลักษณะสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 115 kV วงจรคู่ สายไฟฟ้าเดี่ยว (DS_TG1) และสายไฟฟ้าคู่ (DD_TG1).....	52
4.6 ตำแหน่งที่วิเคราะห์หาสนามไฟฟ้าสูงสุด.....	53
4.7 ตำแหน่งของตัวนำ ณ ตำแหน่งตกท้องช้างของสายส่ง.....	54

# สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1	ลักษณะเสาไฟฟ้าในระบบแรงดัน 500 kV [10].....57
5.2	ลักษณะเสาไฟฟ้าในระบบแรงดัน 500kV[10] (ต่อ).....58
5.3	ตำแหน่งตัวนำของเสาไฟฟ้าในระบบแรงดัน 500 kV ตามรูปที่ 5.1.....59
5.4	ตำแหน่งตัวนำของเสาไฟฟ้าในระบบแรงดัน 500 kV ตามรูปที่ 5.2.....60
5.5	ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของเสาไฟฟ้า 500 kV วงจรเดี่ยวตามรูปที่ 5.1 และ 5.2.....62
5.6	ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของเสาไฟฟ้า 500 kV วงจรคู่ตามรูปที่ 5.1 และ 5.2.....63
5.7	การเพิ่มความสูงของเสาไฟฟ้าระบบแรงดัน 500 kV ทั้งชนิดวงจรเดี่ยวและวงจรคู่.....64
5.8	ระยะห่างระหว่างเฟสของเสาไฟฟ้าระบบแรงดัน 500 kV ทั้งชนิดวงจรเดี่ยวและวงจรคู่....65
5.9	รูปแบบการจัดเรียงลำดับเฟสของสายส่ง 500 kV วงจรคู่ของ กฟผ.....67
5.10	ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามความสูงเสา.....67
5.11	ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างเฟส (วงจรเดี่ยว).....68
5.12	ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างเฟส (วงจรคู่).....68
5.13	ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV ที่เปลี่ยนตามการจัดเรียงของเฟส เมื่อกำหนดวงจรด้านหนึ่งจัดเรียงแบบ ABC.....69
6.1	การกระจายข้อมูลคำสั่ง Sobol sequence points.....72
6.2	การกระจายข้อมูลคำสั่ง Pseudo-random sequence points.....73
6.3	การเลือกค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสในแต่ละรอบของการฝึกสอน.....82
6.4	โพลีชาร์ตของขั้นตอน Back-propagation calculation.....88
6.5	โพลีชาร์ตของขั้นตอน Best round selection.....89
6.6	โพลีชาร์ตของขั้นตอน Best structure and best round selection และ จำนวนคำตอบ สำหรับข้อมูลทดสอบแบบ Interpolation.....90
7.1	การเปรียบเทียบค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในทุกกรณี.....93
7.2	ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของชุดทดสอบแบบ Interpolation ตามเงื่อนไขต่างๆ.....95
7.3	การเปรียบเทียบค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในทุกกรณี.....100
7.4	ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของชุดทดสอบแบบ Interpolation ตามเงื่อนไขต่างๆ.....102
7.5	การเปรียบเทียบค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในทุกกรณี.....105
7.6	ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของชุดทดสอบแบบ Interpolation ตามเงื่อนไขต่างๆ.....107
7.7	การเปรียบเทียบค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในทุกกรณี.....112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ XIVอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.8 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของชุดทดสอบแบบ Interpolation ตามเงื่อนไขต่างๆ.....	114
7.9 ผลการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม TLW, โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว และการวัด.....	116
ข-1 เมนู file ในการเข้าสู่การใช้งาน โปรแกรม TLW.....	148
ข-2 ไดอะล็อกบ็อกซ์ New Project.....	149
ข-3 ใส่รายละเอียดในไดอะล็อกบ็อกซ์ New Project.....	149
ข-4 ไดอะล็อกบ็อกซ์ General Parameters.....	150
ข-5 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Execution Options.....	150
ข-6 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Circuit Specification-General.....	151
ข-7 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Circuit Specification-Regular Bundles.....	151
ข-8 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Right-of-way Descriptions.....	152
ข-9 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Lateral Profile Specifications.....	152
ข-10 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Profile Probe Characteristics.....	153
ข-11 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Climate/Weather Data.....	153
ข-12 ผลที่ได้จากการรัน โปรแกรม TLW.....	154

4. นำเอาโครงข่ายประสาทดเทียม มาประยุกต์ใช้ในการศึกษานามไฟฟ้าของระบบสายส่ง 500 kV และ 115 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ตามลำดับ เพื่อประมาณค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ที่พาดผ่านไปตาม แนวถนน ในเขตเมืองที่เป็นอาคารสิ่งปลูกสร้าง ว่ามีระดับความเข้มของสนามไฟฟ้ามักน้อยเพียงใด เมื่อเทียบกับข้อกำหนดและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้า

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ในการแก้ปัญหาผลกระทบของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจำเป็นต้องมีอย่างยิ่งที่จะต้องมีความเข้าใจในพฤติกรรมของสนามไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องมาจากระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าจะมีผลโดยตรงกับผลกระทบที่เกิดขึ้น ซึ่งการนำโครงข่ายประสาทดเทียมเข้ามาช่วยประมาณสนามไฟฟ้าของสายส่งแรงสูง ซึ่งเราจะพบข้อดีของการใช้โครงข่ายประสาทดเทียมนั้นมีข้อดีคือ มีความสามารถในการเรียนรู้ฟังก์ชันต่อเนื่องแบบไม่เชิงเส้นหลายชนิดได้อย่างแม่นยำในขอบเขตที่เรียนรู้ โดยโครงข่ายประสาทดเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วจะใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยมาก และสามารถนำไปใช้งานแบบทันทีทันใดได้ โดยมีความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของคำตอบอยู่ในเกณฑ์ดี ถึงดีมากหากข้อมูลของระบบไฟฟ้าที่นำมาให้โครงข่ายประสาทดเทียมเรียนรู้มีปริมาณและคุณภาพเพียงพอ

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษานามไฟฟ้าของสายส่งแรงสูง และโครงข่ายประสาทดเทียม (Artificial Neural Network : ANN) เพื่อมาประยุกต์ในการประมาณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่เกิดขึ้นในสายส่งโดยอาศัยแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และ 115 kV การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ทั้งวงจรคู่และวงจรเดี่ยว เป็นแบบจำลองหลักในการศึกษา โดยมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อสนามไฟฟ้า อาทิ จำนวนตัวนำต่อเฟส, รูปแบบการจัดเรียงลำดับเฟส 6 ประเภท, ระยะความสูงของสายส่งจากพื้นดิน, ขนาดตัวนำไฟฟ้าและ ตำแหน่ง Right of way ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้อาศัยโปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW) Version 3.0 [1] ในการจำลองลักษณะต่างๆของสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง และเตรียมข้อมูลฝึกสอนในการฝึกสอนและข้อมูลทดสอบสำหรับ โครงข่ายประสาทดเทียม

## 1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการนำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

การหาสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงในสายส่งโดยใช้วิธีการที่มีอยู่เดิม ซึ่งได้แก่ โปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW) Version 3.0 วิธีแนวคิดแบบนี้จำเป็นที่ใส่รายละเอียดต่างๆให้ครบตามที่โปรแกรมได้กำหนด ซึ่งจะพบว่าต้องใส่รายละเอียดในโปรแกรมค่อนข้างเยอะ ทำให้แต่ละครั้งต้องใช้เวลาในการหาสนามไฟฟ้าของสายส่งแรงสูงค่อนข้างนาน ดังนั้นจึงได้มีกำหนดแนวคิดที่จะนำโครงข่ายประสาทยูนิเทิลเข้ามาช่วยในการประมาณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งเราจะพบข้อดีของการใช้โครงข่ายประสาทเทียมนั้นมีข้อดีคือ ใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยกว่า และสามารถนำไปใช้งานแบบทันทีทันใดได้ เมื่อนำแนวความคิดในการประมาณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงและโครงข่ายประสาทเทียมมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน แล้วนำไปเป็นข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอน (training pattern) ซึ่งเป็นส่วนที่ให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้และข้อมูลทดสอบ (unseen test pattern) ซึ่งใช้ในการหาประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมในการหาคำตอบจากข้อมูลที่ไม่เคยเรียนรู้มาก่อน โดยมีคำตอบที่ต้องการคือ ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า จากนั้นจึงทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม แล้วนำโครงข่ายที่ผ่านการฝึกสอนที่มีประสิทธิภาพสูงสุดไปใช้งาน ซึ่งคำตอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมจะมีความถูกต้องและแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

## 1.6 ขอบเขตของการศึกษา

1. ทำการจำลองสนามไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ด้วยโปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW) เพื่อศึกษารูปแบบของสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกันโดยอาศัยแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และ 115 kV การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ทั้งวงจรคู่และวงจรเดี่ยว เป็นแบบจำลองหลักที่ใช้ในการศึกษา
2. ทำการศึกษารูปแบบของสนามไฟฟ้าที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 และแนวทางการแก้ปัญหาและลดทอนผลกระทบที่เกิดขึ้น โดยพิจารณาไปที่การลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าโดยการออกแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง
3. ทำการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมด้วยข้อมูลที่ได้จาก ขั้นตอนในข้อที่ 2 โดยอาศัยโปรแกรม Neural Network Toolbox ของโปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในฝึกสอนและวิเคราะห์เพื่อหาเงื่อนไขการฝึกสอนที่ทำให้โครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพสูงสุด
4. ทำการศึกษาชุดข้อมูลแบบ Interpolation ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่มีค่าอยู่ระหว่างจุดข้อมูลที่มีอยู่ เพื่อดูว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการฝึกสอน สามารถหาคำตอบของชุดข้อมูลทดสอบแบบ Interpolation นั้นได้หรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

- วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 8 บทด้วยกันคือ
- บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา
- บทที่ 2 กล่าวถึงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
- บทที่ 3 กล่าวถึงโครงข่ายประสาทเทียม
- บทที่ 4 กล่าวถึงระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่ทำการศึกษา
- บทที่ 5 กล่าวถึงการลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้า
- บทที่ 6 กล่าวถึงการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม
- บทที่ 7 กล่าวถึงผลการทดลอง
- บทที่ 8 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

## 1.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Vereshchagin [22] คำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายส่งระบบ 500 และ 750 kV โดยใช้โปรแกรม FIELD 3.0 program ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเอง สามารถคำนวณได้ทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก มีการใส่ค่าพารามิเตอร์ของสายเฟสและสายกราวด์ มีการแสดงรายงานผลการคำนวณออกมาในรูปกราฟฟิค สามารถบันทึกข้อมูลเก็บไว้ได้ คอมพิวเตอร์ที่รองรับการใช้งานเป็นโปรเซสเซอร์ตระกูล Pentium ความเร็ว 100 MHz หน่วยความจำ 16 Mbyte เวลาในการประมวลผลประมาณ 25 นาที

พิทักษ์ ปันอนงค์ [4] พบว่า ปัญหาผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการส่งจ่ายพลังงานผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะเกิดขึ้นในรูปของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เนื่องจากผลของสนามไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ในการวิเคราะห์ได้อาศัยโปรแกรมที่สร้างขึ้นสำหรับคำนวณค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าของกระแสไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นกับบ้านพักอาศัยใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าขนาดของบ้านพักอาศัยและสนามไฟฟ้ามีผลโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

**Mr.LuwenXu, Dr. Yongming Li, Prof. Jihui Yu, Mr. Xingzhe Hou, Dr. Changping**

An [9] บทความนี้ได้นำเสนอแบบจำลอง (Model) สำหรับการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายส่งแรงสูงบนพื้นฐานของ Charge Simulation Method (CSM) ด้วยแบบจำลอง (Model) นี้ ความเข้มของสนามไฟฟ้าภายใต้สายส่งแรงสูงจะถูกคำนวณ และการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าจะถูกวิเคราะห์ในสถานะที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น ความแตกต่างของระยะระหว่างเฟส (Phase), ความแตกต่างของลำดับเฟสสำหรับ Double circuit, ความแตกต่างในการจัดเรียงของสายส่งใน Single Circuit และ Double Circuit ผลของการจำลอง (Simulate) จะพบว่าสนามไฟฟ้าภายใต้สายส่งแรงสูงสามารถทำนายได้ล่วงหน้า ดังนั้น

เราจึงสามารถป้องกันสิ่งแวดล้อมจากสนามไฟฟ้า และ ออกแบบระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสายส่งแรงสูงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

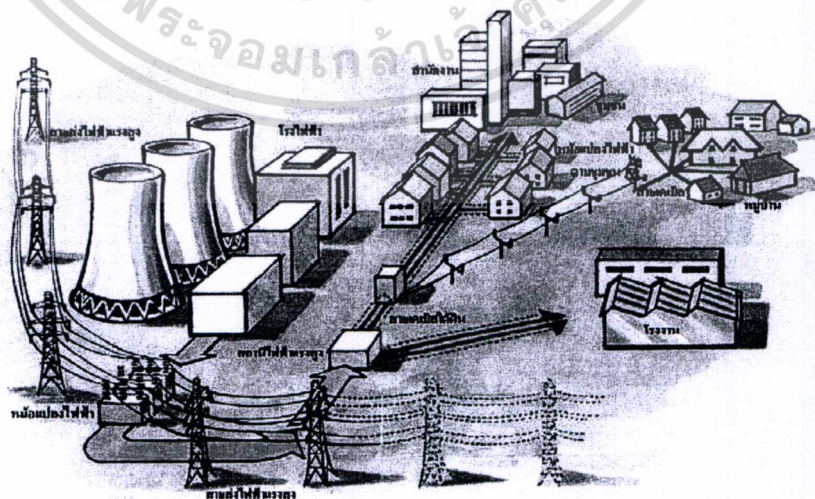
# สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

### 2.1 ข้อมูลพื้นฐานระบบไฟฟ้ากำลัง

(ชวลิต, 2541) ระบบไฟฟ้ากำลังสามารถอธิบายได้ง่ายๆ จากรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงการกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีหลายระดับ เช่น 3.3 kV 11 kV และ 13.8 kV แรงดันดังกล่าวจะถูกแปลงให้สูงขึ้นที่สวิตช์ยาร์ด (Switch yard) มีค่าตามระดับมาตรฐานแรงดันที่ใช้ส่งพลังงาน คือ 115 kV 230 kV และ 500 kV

ระบบส่งกำลังไฟฟ้าจะเชื่อมโยงระหว่างโรงไฟฟ้ากับสถานีไฟฟ้า ซึ่งชนิดของสายส่งกำลังไฟฟ้าต่างกันอยู่ 2 ชนิด คือ สายส่งไฟฟ้าแรงสูง (Transmission Line) มีระดับแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 50 kV ถึง 500 kV และสายไฟฟ้าแรงต่ำ (Distribution Line) มีระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 50 kV

สายส่งไฟฟ้าจะส่งพลังงานไฟฟ้าไปยังสถานีไฟฟ้า (Substation) ซึ่งจะรับพลังงานจากระบบหนึ่งส่งต่อไปให้อีกระบบหนึ่ง พร้อมกับเปลี่ยนระดับแรงดันให้เหมาะสมกับแรงดันที่ใช้ในระบบนั้นๆ เช่น รับแรงดันจากระบบผลิตเข้ามาเปลี่ยนระดับแรงดันให้สูงขึ้นและส่งผ่านไปยังระบบส่งกำลังไฟฟ้า หรือรับแรงดันสูงจากระบบส่งกำลังไฟฟ้าเข้ามาลดแรงดันให้ต่ำลงแล้วส่งผ่านไปยังระบบจำหน่าย เป็นต้น ภายในสถานีไฟฟ้าจะมีอุปกรณ์ที่จำเป็นดังนี้ คือ หม้อแปลงเปลี่ยนแรงดัน อุปกรณ์ตัดตอน อุปกรณ์ควบคุมและป้องกัน



รูปที่ 2.1 ระบบไฟฟ้า[23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากหลักการกำลังไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้ากระแสสลับมีอยู่ 3 ชนิดด้วยกัน คือ

1.1 กำลังไฟฟ้าจริง (Real Power; P) คือ กำลังไฟฟ้าที่ถูกเปลี่ยนให้เป็นกำลังงานในรูปแบบต่างๆที่โหลด ซึ่งกำลังไฟฟ้าชนิดนี้คือกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (Average Power) ที่วัดได้จากวัตต์มิเตอร์ มีหน่วยเป็น วัตต์ (Watt; W) หรือในหน่วยใหญ่นี้อาจจะเป็น กิโลวัตต์ (kilowatt; kW) และ เมกะวัตต์ (megawatt; MW)

1.2 กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (Reactive Power; Q) คือ กำลังไฟฟ้าที่ถูกเปลี่ยนให้เป็นพลังงานรูปอื่นชั่วคราว โดยจะถูกเก็บไว้ภายในตัวเก็บพลังงานครึ่งวัฏจักร (Half cycle) และจะส่งพลังงานกลับไปยังแหล่งจ่ายพร้อมกับเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่งในครึ่งวัฏจักรต่อไป ทำให้กำลังเฉลี่ยในหนึ่งวัฏจักรเป็นศูนย์ กำลังไฟฟ้าชนิดนี้วัดได้จากวาร์มิเตอร์ มีหน่วยเป็น วาร์ (Var; VAR) ย่อมาจาก Volt Ampere Reactive ถ้าเป็นหน่วยใหญ่นี้อาจจะเป็น กิโลวาร์ (kilovar; kVAR) และ เมกกะวาร์ (megavar; MVAR)

1.3 กำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power; S) คือ กำลังไฟฟ้ารวม ใช้เพื่อบอกความสามารถในการรองรับกำลังงานของโหลดหรือการจ่ายกำลังงานของแหล่งจ่าย มีหน่วยเป็น โวลต์แอมแปร์ (VA) ถ้าหน่วยใหญ่นี้อาจจะเป็น กิโลโวลต์แอมป์ (kilovoltampere; kVA) และ เมกกะโวลต์แอมแปร์ (megavoltampere; MVA)

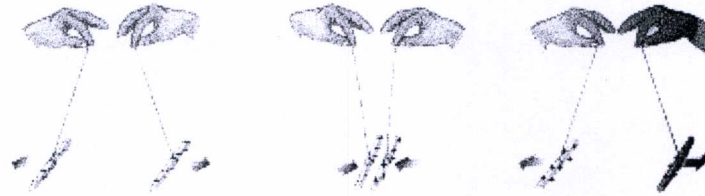
ซึ่งความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าทั้งสาม คือ

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.1)$$

## 2.2 ทฤษฎีพื้นฐานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

2.2.1 ประจุไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงทางไฟฟ้า นายพล ชาล คูลอมบ์ วิศวกรประจำกองทัพบกของฝรั่งเศส เริ่มทำการทดลองเรื่องไฟฟ้าสถิตย์ ราว ค.ศ.1700 ต่อมาในปี 1734 นายคูเฟย์ นักพฤกษศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ได้ทำการศึกษาแรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้า โดยพบว่าประจุไฟฟ้าที่แหล่งกำเนิดเหมือนกันจะออกแรงผลักรัน เช่น เมื่อนำเอาแท่งแก้วทั้งสองอันมาถูกับผ้าไหมแท่งแก้วทั้งสองจะออกแรงผลักรันเช่นเดียวกับการนำเอาแท่งยางสองแท่งสองอันถูกับผ้าขนสัตว์แท่งยางทั้งสองก็ออกแรงผลักรัน แต่ถ้านำแท่งแก้วกับแท่งยางที่ถูแล้วมาอยู่ใกล้กัน มันจะดูดกันทำให้เขาสรุปเป็นใจความสำคัญว่า “ประจุไฟฟ้ามีอยู่สองชนิด ประจุเหมือนกันจะผลักรันและ

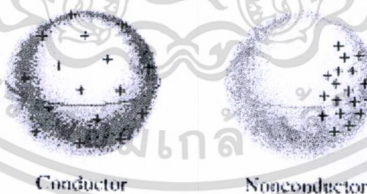
ประจุต่างกันจะดูดกัน” ประจุไฟฟ้าเกิดจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างแท่งยางกับผ้าขนสัตว์ทำให้แท่งยางมีประจุไฟฟ้าเป็นลบและผ้าขนสัตว์มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก



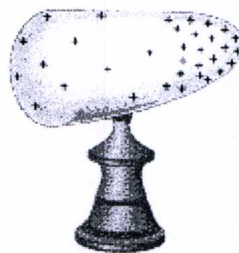
รูปที่ 2.2 ประจุไฟฟ้าที่เหมือนกันจะผลักกันและประจุไฟฟ้าที่ต่างกันจะดูดกัน [24]

ประจุไฟฟ้าบวกจะรวมตัวกันอยู่ในนิวเคลียสของสสาร โดยมีประจุลบเคลื่อนที่อยู่โดยรอบ และประจุลบจะสามารถหลุดออกมาเคลื่อนที่อย่างอิสระได้ถ้ามีพลังงานที่มากพอ โดยปกติวัตถุต่างๆในธรรมชาติจะเป็นกลางทางไฟฟ้าเพราะมีจำนวนประจุไฟฟ้าลบเท่ากับจำนวนประจุไฟฟ้าบวก

2.2.2 ประจุไฟฟ้าในตัวนำ ประจุไฟฟ้าในตัวนำจะกระจายไปทั่วพื้นผิวของตัวนำซึ่งประจุไฟฟ้าแต่ละตัวจะพยายามอยู่ห่างกันให้มากที่สุด สำหรับตัวนำทรงกลมประจุไฟฟ้าจะกระจายอยู่ผิวรอบนอกของทรงกลมอย่างสม่ำเสมอ แต่ถ้าเป็นวัตถุรูปทรงอื่นที่ไม่สมมาตรการกระจายของวัตถุบริเวณผิวนอกจะไม่สม่ำเสมอ โดยประจุไฟฟ้าจะไปรวมตัวกันมากบริเวณที่มีส่วนโค้งน้อย และจะรวมตัวกันน้อยบริเวณที่มีส่วนโค้งมาก



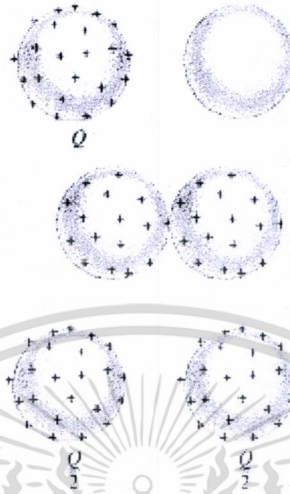
รูปที่ 2.3 การกระจายของประจุไฟฟ้าในตัวนำและฉนวน [24]



รูปที่ 2.4 ประจุไฟฟ้ารวมตัวกันมากบริเวณที่มีส่วนโค้งน้อยของตัวนำ [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับตัวนำทรงกลมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า ถ้าเรานำเอาตัวนำทรงกลมที่มีขนาดเดียวกันมา และ ประจุไฟฟ้าจะเข้าสู่สมดุล โดยจำนวนประจุไฟฟ้าที่อยู่บนตัวนำทรงกลมทั้งสองที่มีรัศมีเท่ากัน จะมีขนาดเท่ากันดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การกระจายตัวของประจุบนผิวของทรงกลมตัวนำทั้งสอง เมื่อนำมาแตะกัน จะมีจำนวนเท่ากัน ถ้าทรงกลมทั้งสองมีขนาดเดียวกัน[24]

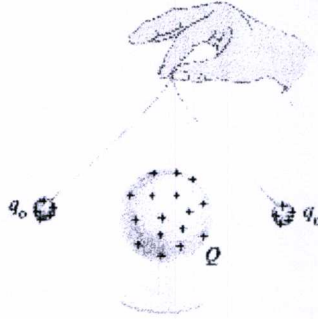
## 2.3 สนามไฟฟ้า

แรงที่เกิดขึ้นระหว่างประจุ 2 อันวางห่างกันนั้น เราสามารถสรุปได้ว่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจาก “สนาม” สนามที่กล่าวถึงนี้ เชื่อว่าเกิดขึ้นรอบๆตัวประจุ และมีผลต่อประจุตัวอื่น ซึ่งพิสูจน์กันได้แล้วว่าน้ำหนักของมวลเกิดขึ้นได้เพราะอยู่ภายใต้สนามความโน้มถ่วงของโลก

เราจะทำการศึกษาถึงอิทธิพลที่เกิดขึ้นจากประจุนี้ โดยการใช้ลูกบอลประจุบวกขนาดเล็ก (ประจุทดสอบ) แขนงไว้อยู่ใกล้กับทรงกลมประจุบวก ลูกบอลจะถูกผลักออกจากทรงกลมประจุบวกที่ทุกๆจุดรอบทรงกลม โดยแรงที่กระทำจะมีทิศในแนวพุ่งออกจากจุดศูนย์กลางของทรงกลมตามรูปที่ 2.6 และเมื่อวาดรูปของแรงที่กระทำต่อประจุทดสอบทุกๆจุดรอบวัตถุ เราจะได้ “เส้นแรง” โดยมีลักษณะเป็นเวกเตอร์ที่ต่อเนื่องกันและทิศทางของสนามไฟฟ้าที่จุดใดๆก็คือ ทิศทางของแรงที่กระทำต่อประจุทดสอบที่เป็นบวก ณ จุดนั้น

ขนาดของสนามไฟฟ้าจะเป็นไปตามกฎของคูลอมบ์คือ จะแปรผกผันกับระยะทางกำลังสองยิ่งห่างจากประจุไฟฟ้ามากจำนวนเส้นแรงไฟฟ้าก็จะยิ่งเบาบาง ความเข้มสนามไฟฟ้าก็จะยิ่งน้อย แต่ถ้ายิ่งใกล้ประจุจำนวนเส้นแรงก็จะยิ่งมาก ความเข้มสนามไฟฟ้าก็จะมากตามไปด้วย

สำหรับทิศทางสนามไฟฟ้าของประจุบวกจะมีทิศพุ่งออกจากประจุบวกและสนามไฟฟ้าของประจุลบจะมีทิศพุ่งเข้าหาประจุลบ



รูปที่ 2.6 ประจุทดสอบ  $q_0$  ถูกผลักรออกจากทรงกลมประจุบวกในแนวรัศมี [24]

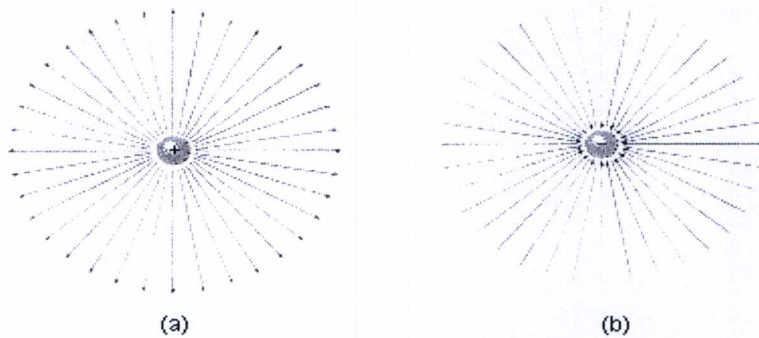
เป็นที่ทราบกันดีว่า เมื่อทดลองนำเอาประจุทดสอบไปเข้าใกล้ประจุบวก จะเกิดแรงกระทำต่อประจุทดสอบ เรานิยามสนามไฟฟ้าว่า คือ แรงที่กระทำต่อประจุที่จุดนั้น

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (2.2)$$

หน่วยของสนามไฟฟ้าเป็นนิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C) ทิศทางของสนามไฟฟ้าคือทิศทางของแรง ประจุ  $q$  เมื่อนำไปวางไว้ที่สนามไฟฟ้า จะเกิดแรงกระทำ

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (2.3)$$

สังเกตดูว่า  $\vec{F}$  กับ  $\vec{E}$  จะมีทิศทางเดียวกัน เมื่อ  $q$  มีประจุเป็นบวก



รูปที่ 2.7 ทิศทางของแนวแรงรอบประจุ [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

a) ทิศทางของแนวแรงรอบประจุบวก

b) ทิศทางของแนวแรงรอบประจุลบ

รูปที่ 2.7 a) แนวแรงของประจุบวก มีทิศพุ่งออกจากจุดประจุ เมื่อเรานำประจุทดสอบ  $+q_0$  ไปวางไว้รอบบริเวณของจุดประจุบวก มันจะถูกผลักออกมาในแนวรัศมี เรากล่าวว่า สนามไฟฟ้าของจุดประจุ  $+q_0$  มีทิศพุ่งออกจากจุดประจุ  $+q_0$  ด้วย ในทางกลับกัน รูปที่ 2.7 b) ถ้าเป็นประจุลบ ทิศทางของสนามไฟฟ้าจะวิ่งเข้าหาประจุ เราสามารถหาสนามไฟฟ้าของจุดประจุโดยใช้สมการ (2.2) ได้ดังนี้

$$E = \frac{F}{q_0} = k_0 \cdot \frac{q \cdot q_0}{r^2} \cdot \frac{1}{q_0}$$

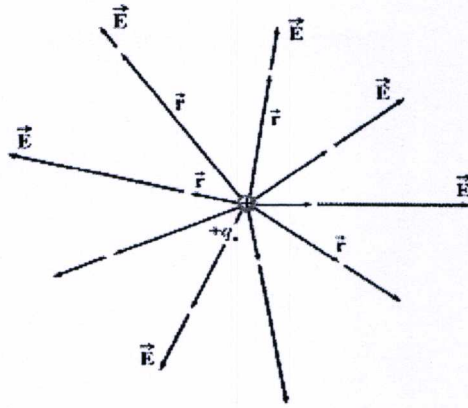
ดังนั้น สนามไฟฟ้าของจุดประจุ  $q$  คือ

$$E = k_0 \cdot \frac{q}{r^2} \quad (2.4)$$

เพื่อให้ผลออกมาในรูปของเวกเตอร์  $\vec{r}$  ดังรูป ในกรณีที่ประจุบวก  $q = +q$  มีทิศพุ่งออกจาก  $q$  สมการบนจะเขียนอยู่ในรูปของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\vec{E} = k_0 \cdot \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad (2.5)$$

ถ้า  $q$  เป็นประจุลบ ทิศทางของสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  จะอยู่ในทิศทางของ  $-\hat{r}$  คือมีทิศพุ่งเข้าหาประจุลบ สมการ 2.2 และ 2.3 เป็นสมการพื้นฐานที่มีความสำคัญมาก เพื่อจะใช้หาสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆรอบจุดประจุ เช่น อิเล็กตรอน หรือ โปรตรอน ก็ได้ ถ้าประจุมีมากกว่า 1 ประจุ และยังมีจำนวนไม่มาก เราสามารถหาสนามไฟฟ้ารวม โดยใช้การคำนวณด้วยมือหรือเครื่องคิดเลขได้ ให้หาสนามไฟฟ้าของจุดประจุแต่ละตัวก่อน และนำมารวมกันแบบเวกเตอร์ดังรูปที่ 2.8 จะได้สนามไฟฟ้าลัพธ์เป็น  $\vec{E}$



รูปที่ 2.8 สนามไฟฟ้ารอบจุดประจุบวก [24]

(rmutphysics, 2006) ปี ค.ศ. 1982 นายโอดิเวอร์ เฮพวิไซด์ วิศวกรไฟฟ้า อธิบายไว้ว่า สนามของสนามไฟฟ้าประกอบด้วยแฟกเตอร์  $1/4\pi$  และค่าคงที่  $\epsilon_0$  โดยเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$k_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (2.6)$$

ที่มีเทอม  $4\pi$  ในสมการอยู่ก็เพราะว่า การกระจายของสนามไฟฟ้าเป็นทรงกลม ซึ่งพื้นผิวทรงกลมคือ  $4\pi r^2$  ส่วนตัว  $\epsilon_0$  นี้เรียกว่า ค่าเพอิมิตติวิตี Permittivity แปลเป็นไทยว่า ค่าการซึมผ่านในกรณีที่ทดลองหาค่าสนามไฟฟ้าอยู่ในสุญญากาศ ค่า  $k_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$  โดยค่า  $\epsilon_0$  เรียกว่า ค่าเพอิมิตติวิตีของอากาศ และมีค่าเท่ากับ

$$\epsilon_0 = 8.8541878 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$$

## 2.4 แม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก

ในธรรมชาติมีสินแร่ชนิดหนึ่งเรียกว่า แมกนีไตต์ (Magnetite) สามารถดูดโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก นิกเกิล ฯลฯ ได้ และถ้าผูกกลางแท่งให้แขวนอย่างอิสระจะวางตัวอยู่ในแนวเหนือ-ใต้เสมอ สินแร่ดังกล่าวเป็นแม่เหล็กธรรมชาติ ซึ่งมนุษย์ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับชี้ทิศทางมาตั้งแต่สมัยโบราณ จึงเรียกว่า หินนำทาง หรือ Leading stone

วัตถุต่างๆ ในโลกถ้าเราแบ่งออกตามคุณลักษณะการดูดหรือผลักกับอำนาจแม่เหล็กเราก็อาจจะแบ่งออกได้เป็น

ก. พวกไม่มีผลต่ออำนาจแม่เหล็ก (non magnetic substance) เช่น ไม้, กระดาษ, สังกะสี

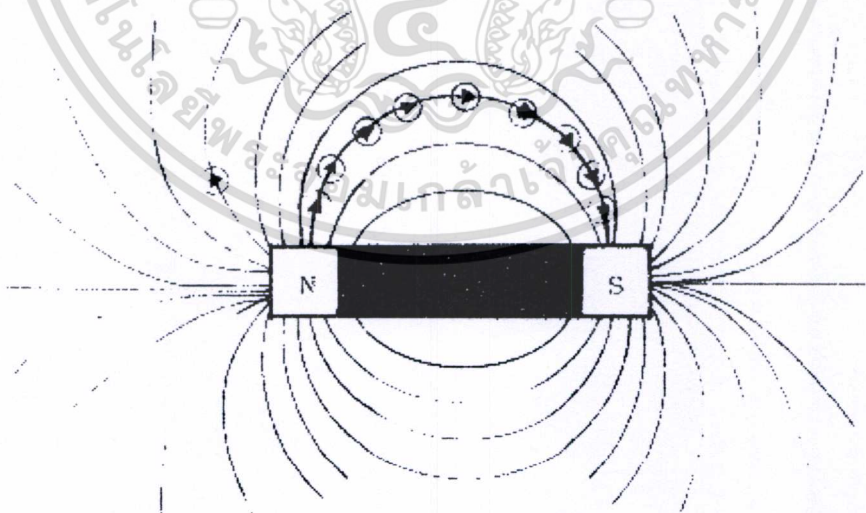
ข. พวกมีผลต่ออำนาจแม่เหล็ก (magnetic substance) แบ่งออกเป็น 3 พวก คือ

1. สารเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic substance) สารพวกนี้จะถูกแม่เหล็กดูดได้ดีหรือทำเป็นแม่เหล็กแรงๆ ได้ เช่น เหล็ก นิกเกิล โคบอล

2. สารพาราแมกเนติก (Paramagnetic substance) สารพวกนี้จะถูกแม่เหล็กดูดอย่างอ่อนๆ ถ้านำมาสร้างเป็นแม่เหล็กจะสร้างยาก เช่น อลูมิเนียม แมงกานีส แพลตตินัม

3. สารไดอาแมกเนติก (Diamagnetic substance) สารพวกนี้จะผลักกับแม่เหล็ก แต่แรงที่เกิดขึ้นจะเป็นแรงผลักอ่อนๆ เช่น บิสมัท ฟอสฟอรัส แอนติโมนี

ถ้าเราเอาเข็มทิศเล็กๆ มาวางใกล้ๆ ขั้วเหนือแม่เหล็ก ปลายเข็มทิศย่อมจะเบนออกจากขั้วเหนือ ถ้าเราจุดตำแหน่งขั้วเหนือไว้แล้วเลื่อนเข็มทิศให้ปลายเข็มทิศอยู่ที่ตำแหน่งที่จุดไว้ แล้วจุดละเลื่อนตำแหน่งไปเรื่อยๆ จะได้เส้นโค้งจากปลายข้างหนึ่งไปยังปลายอีกข้างหนึ่งของแท่งแม่เหล็กดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เข็มทิศในสนามแม่เหล็กและเส้นแรงแม่เหล็ก [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟาราเดย์จึงเรียกเส้นที่เกิดจากการต่อจุดปลายของเข็มทิศในสนามแม่เหล็กว่าเส้นแรงแม่เหล็ก ดังนั้นเราจึงสรุปได้ว่าเส้นแรงแม่เหล็กเป็นเส้นสมมติให้มีทิศทางออกจากขั้วเหนือเข้าสู่ขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็ก เส้นแรงแสดงกล่าวจะไม่ตัดกันและบริเวณที่ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กอยู่เลยเรียกว่าจุดสะเทิน ซึ่งเป็นจุดที่สนามแม่เหล็กหักล้างกันหมดพอดี

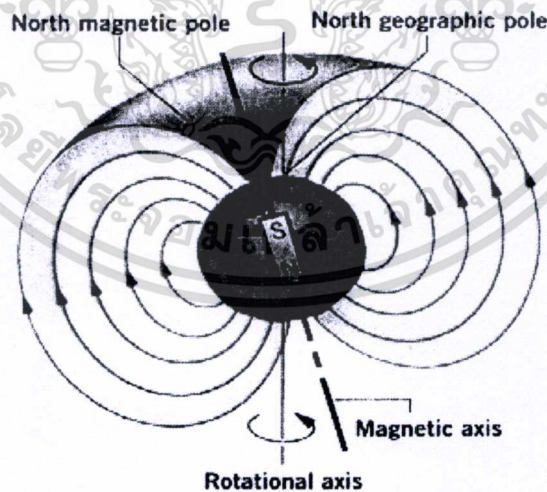
## 2.5 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอาจเกิดขึ้นโดยธรรมชาติเอง หรือเกิดจากมนุษย์สร้างขึ้นก็ได้

### 2.5.1 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามธรรมชาติ

2.5.1.1 ฟ้าผ่า ขณะที่เกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างพื้นโลกกับก้อนเมฆมีค่าค่อนข้างสูง และมีกระแสฟ้าไหลสูงมาก ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าเป็นสาเหตุให้เกิดพัลส์สนามแม่เหล็กขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งก็คือ คลื่นรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงประเภทหนึ่ง

2.5.1.2 สนามแม่เหล็กโลก เป็นสนามแม่เหล็กที่อยู่ระหว่างขั้วโลกเหนือกับขั้วโลกใต้ โดยมีทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งออกจากขั้วโลกเหนือไปสู่ขั้วโลกใต้ มีค่าประมาณ 350 – 500 มิลลิเกาส์ (mG) ในกรณีนี้เรียกว่าพายุสนามแม่เหล็ก (Magnetic storm) ซึ่งพายุสนามแม่เหล็กดังกล่าวยังสร้างสนามไฟฟ้าออกมาอีกด้วย



รูปที่ 2.10 ทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กโลก [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.3 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากปรากฏการณ์การแผ่รังสีคอสมิก (Cosmic ray) เป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง เช่น อินฟราเรด (Infrared) อัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) ฯลฯ หรือออกมาจากระบบสุริยะจักรวาลและดวงอาทิตย์เข้าสู่โลกในลักษณะของคลื่นระนาบ

## 2.5.2 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มนุษย์สร้างขึ้น

แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กที่มนุษย์สร้างขึ้น มีอยู่หลายชนิดแต่ที่สำคัญได้แก่

2.5.2.1 สวิตช์ทรานเซียนต์ (Switching Transient) เป็นทั้งแรงดันและกระแสที่มีขนาดสูง ผิดปกติ และจะมีความถี่สูงกว่าความถี่ใช้งานปกติ การเกิดกระบวนการสวิตช์ในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถสร้างพัลส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแรงต่ำและแรงสูงแพร่ออกสู่บรรยากาศ

2.5.2.2 สัญญาณสื่อสาร เช่น ระบบโทรทัศนและวิทยุ สามารถสร้างคลื่นรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงได้



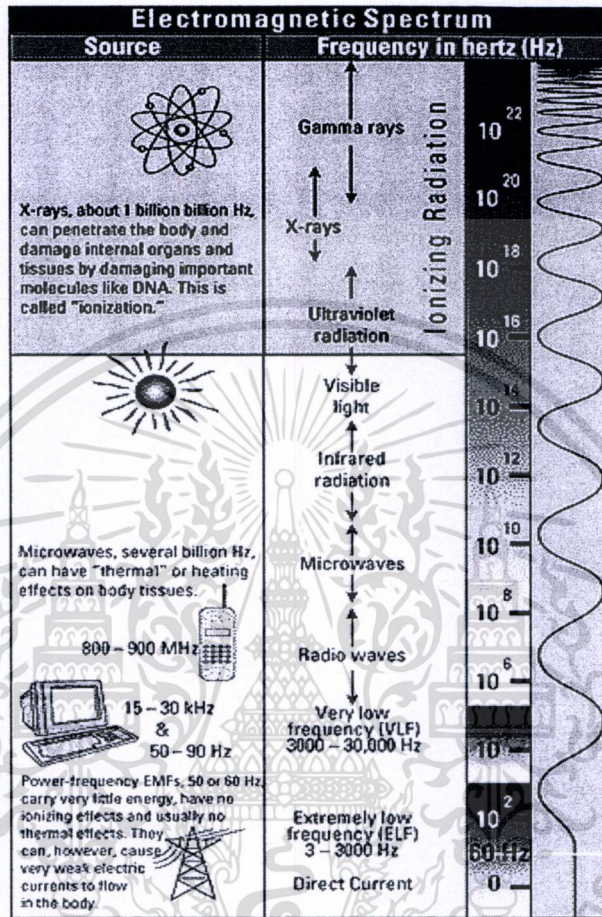
รูปที่ 2.11 คลื่นรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากระบบสื่อสาร [25]

2.5.2.3 สายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูงและสายป้อนพลังงานไฟฟ้าทั้งแรงสูงและแรงต่ำ เป็นแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ 50 Hz

## 2.6 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

สายส่งไฟฟ้าแรงสูงทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการนำพลังงานไฟฟ้าจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง และเมื่อมีการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูง สายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะกลายเป็นแหล่งกำเนิดของคลื่นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กกระจายอยู่โดยรอบในอากาศส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่อยู่ใกล้กับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งปริมาณของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แพร่กระจายออกมานั้นจะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง และระยะห่างจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง สำหรับปริมาณความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แพร่กระจายออกมานั้นเราสามารถหาได้จากการคำนวณและการวัด

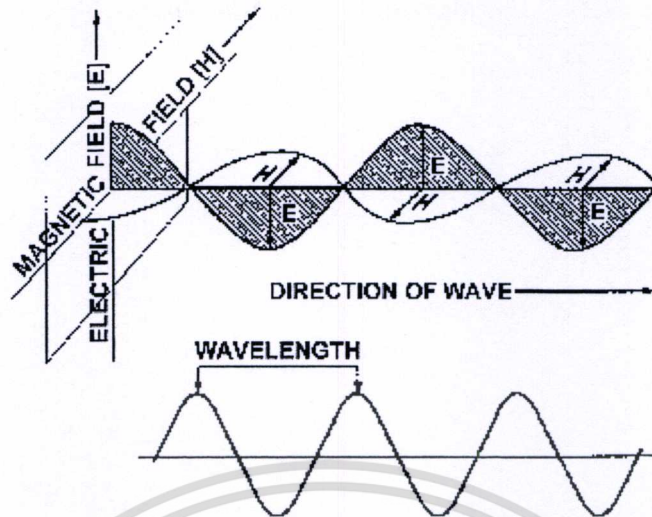


รูปที่ 2.12 แถบคลื่นความถี่ ( Frequency Spectrum ) [25]

ในชีวิตประจำวันเราได้พบเจอกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในรูปแบบต่างๆ ทั้งที่เกิดจากธรรมชาติ เช่น รังสีแกมมา รังสีจากแสงอาทิตย์ และที่เกิดจากการสร้างขึ้นของมนุษย์ เช่น เเรดาร์ ไมโครเวฟ โทรศัพท์ วิทยุ และสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เป็นต้น ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งแยกออกได้ตามช่วงความถี่ (frequency spectrum) ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.12

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะประกอบด้วยคลื่นไฟฟ้า (Electric Wave) และคลื่นแม่เหล็ก (Magnetic Wave) คลื่นทั้งสองจะเคลื่อนที่ไปด้วยกันที่ความเร็วแสงและเป็นคุณลักษณะของความถี่และความยาวคลื่น คือ ความถี่เป็นจำนวนแกว่งของคลื่นต่อหน่วยเวลา และระยะห่างระหว่างยอดคลื่น ความถี่จะวัดในหน่วย Hertz (Hz) โดยที่ 1 Hz เท่ากับ 1 รอบ/วินาที และความยาวคลื่น คือ ระยะทางของคลื่นที่เคลื่อนที่ไปได้ใน 1 รอบ (1 Cycle) ดังรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 คุณลักษณะของคลื่นสนามไฟฟ้าและคลื่นสนามแม่เหล็ก [25]

สำหรับประเทศไทยนั้นทั้งการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ได้ใช้ความถี่ 50 รอบ/นาที หรือ 50 Hz ซึ่งอยู่ในย่านความถี่ที่ต่ำมากๆ (Extreme Low Frequency : ELF) และที่ความถี่ 50 Hz นี้จะมีความยาวคลื่นที่ยาวมากถึง 6,000 กิโลเมตร ทำให้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเป็นอิสระต่อกันและกัน และสามารถแยกพิจารณาเฉพาะค่าได้

ในอดีตที่ผ่านมา มีนักวิจัยจำนวนมากได้ทำการศึกษาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งผลจากการวิจัยที่ผ่านมาได้นำมาพัฒนาปรับปรุง ออกแบบระบบสายส่ง ใดๆก็ตาม ยังคงมีนักวิจัยจำนวนมากสนใจและให้ความสำคัญเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ในการศึกษาเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงนั้น เราจะพบว่าอิทธิพลของสนามไฟฟ้า มีความสำคัญมากกว่า สนามแม่เหล็ก [8] ยกตัวอย่าง ระบบไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคปัจจุบัน จ่ายด้วยระบบแรงดันไฟฟ้า ขนาดของสนามแม่เหล็กนั้นไม่สามารถคาดเดาได้จากแรงดันของระบบไฟฟ้า กล่าวคือ ไม่เสมอไปที่สายส่งไฟฟ้าระบบแรงดัน 69 kV จะสร้างสนามแม่เหล็กที่มีขนาดสูงกว่าระบบแรงดันต่ำ 220 Volt นั้นเป็นเพราะกระแสที่ไหลในสายไฟฟ้าเป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็ก ไม่ใช่แรงดันไฟฟ้า ขนาดของสนามแม่เหล็กจะแปรผันโดยตรงกับขนาดกระแสไฟฟ้า นั่นหมายถึงระดับของสนามแม่เหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายไฟฟ้า ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงซึ่งแปรผันตามแรงดันไฟฟ้าที่ทำการศึกษา

2.6.1 สนามไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

สนามไฟฟ้าเป็นแรงในการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าที่มีทั้งขนาดและทิศทางเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $\vec{E}$  และถูกวัดออกมาในหน่วยของแรงดันต่อระยะทาง (kV/m) โดยที่ขนาดของสนามไฟฟ้าเกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดใดๆ ในสนามไฟฟ้า ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าจะแปรผัน โดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงและจะแปรผกผันกับระยะห่างจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง สนามไฟฟ้า ณ.จุดใดๆ ในอากาศจะประกอบด้วยองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ สำหรับค่าของสนามไฟฟ้าในสภาวะคงที่ (steady-state) เราสามารถเขียนสมการของสนามไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบตามแนวแกน x, y และ z ได้ดังนี้

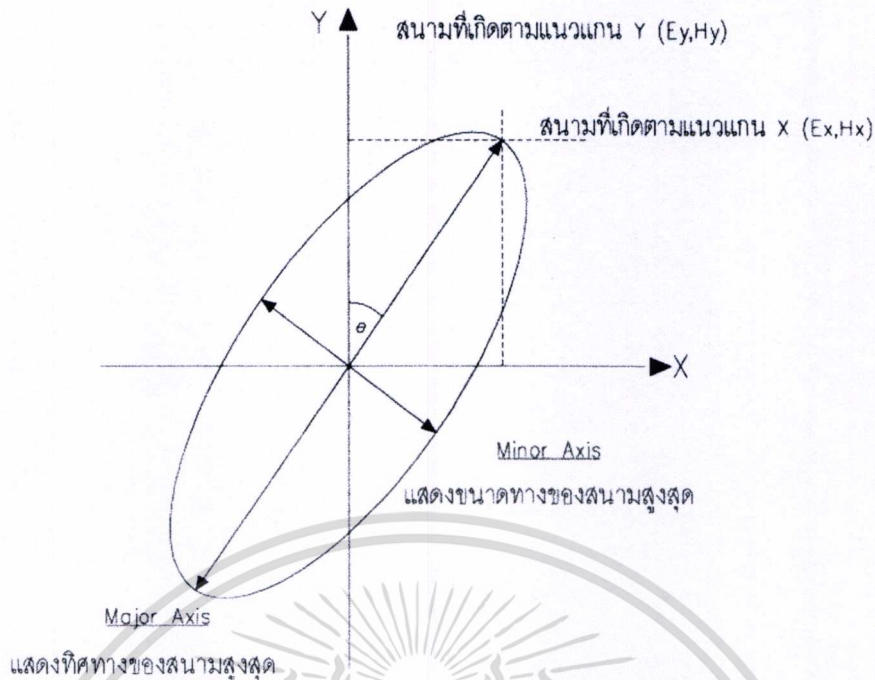
$$\vec{E} = e_x(t) \cdot \vec{u}_x + e_y(t) \cdot \vec{u}_y + e_z(t) \cdot \vec{u}_z \tag{2.7}$$

เมื่อ  $u_x, u_y, u_z$  คือยูนิตเวกเตอร์ตามแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ และ  $e_x(t), e_y(t), e_z(t)$  คือ ขนาดของสนามไฟฟ้าในทิศทางตามแนวแกน x, y และ z ที่อยู่ในรูปฟังก์ชันของเวลา ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x แล้วเราสามารถเขียนสมการของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x ที่อยู่ในรูปฟังก์ชันของเวลาได้ดังนี้

$$e_x(t) = E_x \cos(\omega t + \phi_x) \tag{2.8}$$

$$e_x(t) = E_{x,real} \cos \omega t + E_{x,imag} \sin \omega t \tag{2.9}$$

เมื่อ  $E_x$  เป็นขนาดของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x และ  $\phi_x$  เป็นทิศทางของสนามไฟฟ้า ที่อยู่ในรูปฟังก์ชันของเวลา  $e_x(t)$  สำหรับค่าของ  $E_{x,real}$  และ  $E_{x,imag}$  เป็นค่าของสนามไฟฟ้า ในส่วนที่เป็นจำนวนจริงและในส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพตามลำดับ สนามไฟฟ้าในระบบสามเฟสการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าทั้งขนาดและมุมจะมีผลทำให้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ณ.จุดใดๆ ในตัวกลางอากาศมีการเปลี่ยนแปลงตามไป ด้วย เราสามารถอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงนี้ได้จากลักษณะของวงรีตามรูปที่ 2.14 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าโดยที่ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดตามแนวแกนหลักของวงรี (major axis of ellipse) และขนาดความเข้มสนามไฟฟ้าจะถูกแทนด้วยความยาวของเส้นแกนรองของวงรี (minor axis of ellipse) สำหรับขนาดของสนามไฟฟ้าในทิศตั้งฉากกับวงรีจะมีค่าเท่ากับศูนย์



รูปที่ 2.14 การเกิดสนามไฟฟ้าสูงสุดในตัวกลางอากาศ

## 2.6.2 การคำนวณสนามไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

การคำนวณหาสนามไฟฟ้าที่กระจายอยู่บริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูงได้ตั้งสมมุติฐานในการคำนวณ [2] ไว้ดังนี้ ไม่มีประจุไฟฟ้าใดๆ นอกจากประจุไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง, พื้นดินบริเวณที่พิจารณามีค่าความต้านทานน้อยมากๆ และมีค่าเพอิมิตติวิตี (permittivity) ของตัวกลางอากาศคงที่ ( $\epsilon = 8.854 \times 10^{-12}$  F/m) ค่าประจุไฟฟ้า (Q) ที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากค่าของแรงดันไฟฟ้า (V) และค่าสัมประสิทธิ์ของ Maxwell potential coefficient (P) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$[Q] = [P]^{-1} [V] \quad (2.10)$$

ในการคำนวณได้พิจารณาผลของประจุเงา (image charge) ด้วย ดังนั้นค่าของประจุไฟฟ้าจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นจำนวนจริงและส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ ดังนี้

$$[Q] = [Q_{\text{real}}] + [Q_{\text{imag}}] \quad (2.11)$$

ค่าประจุที่เกิดจากสายไฟฟ้าเฟส a, b, c, ..., m สามารถหาได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} Q_{ra} \\ Q_{rb} \\ \cdot \\ \cdot \\ Q_{rm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ab} & \cdot & \cdot & P_{am} \\ P_{ba} & P_{bb} & \cdot & \cdot & P_{bm} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ P_{ma} & P_{mb} & \cdot & \cdot & P_{mm} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ \cdot \\ \cdot \\ V_{rm} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\begin{bmatrix} Q_{ia} \\ Q_{ib} \\ \cdot \\ \cdot \\ Q_{im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ab} & \cdot & \cdot & P_{am} \\ P_{ba} & P_{bb} & \cdot & \cdot & P_{bm} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ P_{ma} & P_{mb} & \cdot & \cdot & P_{mm} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ \cdot \\ \cdot \\ V_{im} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

ค่าเอลิเมนต์ภายในเมตริกซ์ P สามารถหาได้จาก

$$P_{aa} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot \ln \left[ \frac{4y_a}{D_{eq}(a)} \right] \quad (2.14)$$

$$P_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \left[ \frac{(x_a - x_b)^2 + (y_a + y_b)^2}{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2} \right]^{1/2} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $D_{eq}(a)$  = เส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลของสายควมเฟส a (m)

$$= D \cdot \sqrt[n]{\frac{nd}{D}}$$

D = ระยะห่างของสายควม (m)

n = จำนวนของสายควม

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของสายย่อย (m)

$y_a, y_b$  = ความสูงจากพื้นดินของสายไฟฟ้าเฟส a, b (m)

$x_a, x_b$  = ระยะห่างจากแนวสายส่งของสายไฟฟ้าเฟส a, b (m)

ค่าสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) ที่เกิดจากสายไฟฟ้าเฟส a ณ จุด  $x, y$  ใดๆ ( $x_N, y_N$ ) ในแนวแกน  $x$  และ  $y$  จะหาได้จากสมการ

$$\vec{E}_{x,a} = \frac{(Q_{ra} + jQ_{ia}) \cdot (x_N - x_a)}{2\pi\epsilon [(x_a - x_N)^2 + (y_a - y_N)^2]} - \frac{(Q_{ra} - jQ_{ia}) \cdot (x_N - x_a)}{2\pi\epsilon [(x_a - x_N)^2 + (y_a + y_N)^2]} \quad (2.16)$$

$$\vec{E}_{y,a} = \frac{(Q_{ra} + jQ_{ia}) \cdot (y_N - y_a)}{2\pi\epsilon [(x_a - x_N)^2 + (y_a - y_N)^2]} - \frac{(Q_{ra} + jQ_{ia}) \cdot (y_N - y_a)}{2\pi\epsilon [(x_a - x_N)^2 + (y_a + y_N)^2]} \quad (2.17)$$

$$\vec{E}_x = \vec{E}_{x,a} + \vec{E}_{x,b} + \vec{E}_{x,c} + \dots \quad (2.18)$$

$$\vec{E}_y = \vec{E}_{y,a} + \vec{E}_{y,b} + \vec{E}_{y,c} + \dots \quad (2.19)$$

ค่าสนามไฟฟ้ารวม ณ จุด  $x, y$  ใดๆ ( $x_N, y_N$ ) คือ

$$E^2 = E_x^2 \cdot \cos^2(\omega t + \theta) + E_y^2 \cdot \cos^2(\omega t + \phi) \quad (2.20)$$

ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเมื่อ  $dE^2/dt = 0$  ดังนั้น

$$\tan(2\omega t) = \frac{E_x^2 \sin 2\theta + E_y^2 \sin 2\phi}{E_x^2 \cos 2\theta + E_y^2 \cos 2\phi} \quad (2.21)$$

เมื่อ  $\omega t_1 = \omega t + \pi/2$

$$E_{\max} = \sqrt{(E_x \cos(\omega t_1 + \theta))^2 + (E_y \cos(\omega t_1 + \phi))^2} \quad (2.22)$$

$$\text{angle} = \tan^{-1} \left[ \frac{E_y \cos(\omega t_1 + \phi)}{E_x \cos(\omega t + \theta)} \right] \quad (2.23)$$

## บทที่ 3

# โครงข่ายประสาทเทียม

ในปัจจุบันได้มีการประยุกต์นำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในอุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ เช่น ระบบนักบินอัตโนมัติ (Auto pilot aircraft), เครื่องมือหาปลา (Sonar) ที่มีความฉลาดมากขึ้นเช่น สามารถบอกได้ว่าฝูงปลาที่กำลังตรวจจับอยู่นั้นเป็นปลาชนิดใด จำนวนเท่าไร เป็นต้น ซึ่งเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่นำเอาโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ช่วยวิเคราะห์นั้นจะมีความฉลาดมากขึ้น และมีระบบความคิดที่ทำงานในลักษณะคล้ายกับมนุษย์ นักวิจัยด้านไฟฟ้ากำลังจึงมีแนวคิดที่ประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเข้ามาแก้ปัญหาเกี่ยวกับไฟฟ้ากำลังหลายปัญหาด้วยกัน เช่น ปัญหาโหลดไหล (Load flow), การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้า (Load forecasting) และปัญหาการจ่ายโหลดอย่างมีประสิทธิภาพ (Economics load dispatch) เป็นต้น ในบทนี้เป็นการอธิบายหลักการของโครงข่ายประสาทเทียม โดยจะกล่าวถึงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม, ชนิดของการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม รวมไปถึงโครงข่ายประสาทเทียมชนิดต่างๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการวิจัย

### 3.1 ความเป็นมาของโครงข่ายประสาทเทียม

ความพยายามที่จะทำความเข้าใจการทำงานของสมองของมนุษย์ได้มีมานานนับศตวรรษแล้ว เริ่มต้นในปี ค.ศ. 1890 William James นักสรีรศาสตร์ชาวอเมริกัน ได้แต่งหนังสือชื่อ Psychology (Briefer Course) ซึ่งอธิบายถึงการทำงานของสมอง และยังกล่าวถึงทฤษฎีที่มีอยู่ในปัจจุบันไว้ ล่วงหน้าอีกด้วย

#### 3.1.1 ช่วงทศวรรษที่ 40 ยุคเริ่มต้นของโครงข่ายประสาทเทียม

ในปี ค.ศ. 1936 Alan Turing ได้นำเอาสมองไปใช้เป็นแบบอย่างของการคำนวณใน A way of looking at the world of computing

##### 3.1.1.1 นีวรอน McCulloch-Pitts

ปี ค.ศ. 1943 Warren McCulloch นักประสาทวิทยา และ Walter Pitts นักคณิตศาสตร์ ซึ่งมีอายุเพียง 18 ปีในขณะนั้น ได้ออกแบบและเป็นที่ทำให้ความสนใจโดยทั่วไปว่าเป็นโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแรก นักวิจัยเหล่านั้นยอมรับว่า การรวมหลายๆ นีวรอนไม่ซับซ้อนเข้าไปสู่ระบบโครงข่ายให้เป็นการเพิ่มกำลังในการคำนวณ ค่าถ่วงน้ำหนักของนีวรอน McCulloch-Pitts ได้กำหนดให้มีค่าคงที่ ดังนั้นนีวรอนจึงได้ปฏิบัติเฉพาะฟังก์ชันตรรกศาสตร์ไม่ซับซ้อน นีวรอนสามารถจัดวางเข้าไปในโครงข่ายเพื่อประมวลผลเอาต์พุตใดๆ ที่สามารถแสดงถึงการรวมของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันตรรกศาสตร์ นิเวรอนของ McCulloch-Pitts ประกอบด้วยชั้นของโครงข่ายจำนวน 2 ชั้น คือ ชั้นอินพุตและเอาต์พุต โครงข่ายจะมีการเชื่อมโยงจากชั้นอินพุตไปยังชั้นเอาต์พุตโดยผ่านน้ำหนัก (weight) ความคิดของค่าขีดจำกัด (threshold) กล่าวคือ ถ้าโครงข่ายอินพุตถึงนิเวรอนมีค่าใหญ่กว่าค่าขีดจำกัด แล้วโนดกระตุ้นเป็นลักษณะเด่นอย่างหนึ่งของนิเวรอน McCulloch-Pitts ซึ่งถูกใช้ในหลายๆ โครงข่ายประสาทเทียมในปัจจุบัน

### 3.1.1.2 กฎการเรียนรู้ของ Hebb

ในปี ค.ศ. 1949 Donald Hebb นักจิตวิทยาของมหาวิทยาลัย McGill ได้ออกแบบกฎการเรียนรู้ชนิดแรกสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม กฎการเรียนรู้นี้ก็คือ ถ้าสองนิเวรอนถูกกระตุ้นพร้อมกันแล้ว ความแข็งแรงของการเชื่อมโยงระหว่างพวกมันควรจะเพิ่มขึ้น และได้แต่งหนังสือชื่อ The organization of behavior ซึ่งกล่าวถึงการเชื่อมโยงกันของจิตวิทยาและ สรีรศาสตร์

### 3.1.2 ช่วงทศวรรษที่ 50 - 60 ยุคทองของโครงข่ายประสาทเทียม

การพัฒนาด้านฮาร์ดแวร์และ ซอฟต์แวร์ ในช่วงทศวรรษที่ 1950 ทำให้งานวิจัยด้านต่างๆ เข้าสู่ยุคของการสร้างแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ เป็นผลให้การทดสอบทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายประสาทมีความเป็นไปได้มากยิ่งขึ้น ในปี ค.ศ. 1956 Dartmouth Summer ได้เริ่มทำงานวิจัยด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence : AI) ซึ่งเป็นแรงผลักดันให้เกิดการศึกษาทั้งในด้านปัญญาประดิษฐ์และโครงข่ายประสาทมากขึ้น ในปี ค.ศ. 1958 John von Neumann เขียนหนังสือเรื่อง The Computer and the Brain ซึ่งได้นำเสนอฟังก์ชันการทำงานของเซลล์ประสาทโดยใช้รีเลย์ที่ใช้สำหรับส่งโทรเลขและ หลอดสุญญากาศ (Vacuum tube)

#### 3.1.2.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิด perceptron

ในปี ค.ศ. 1957 Frank Rosenblatt ได้เริ่มศึกษาและพัฒนาประเภทใหญ่ของโครงข่ายประสาทเทียมที่เรียกว่า perceptron ซึ่งเป็นรูปแบบที่สำคัญรูปแบบหนึ่งของโครงข่ายประสาทเทียม โดยส่วนมากสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดนี้ จะประกอบด้วย ชั้นอินพุตเชื่อมโยงผ่านด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก เพื่อเป็นตัวเชื่อมโยงกับนิเวรอนที่ชั้นเอาต์พุต ค่าถ่วงน้ำหนักบนทางผ่านเชื่อมโยงถูกปรับเปลี่ยน กฎการเรียนรู้ perceptron ปรับเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนักซ้ำๆ กัน ซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่ากฎของ Hebb การเรียนรู้ของ perceptron สามารถแสดงให้เห็นว่า ถ้าเข้าสู่ค่าถ่วงน้ำหนักที่ถูกต้อง ถ้าค่าถ่วงน้ำหนักเหล่านั้นจะแก้ปัญหาที่เตรียมพร้อม ในปี ค.ศ. 1962 งานของ Frank Rosenblatt ได้อธิบาย perceptron หลายๆ ชนิดว่า เหมือนนิเวรอนได้ถูกพัฒนาจาก McCulloch และ Pitts และจาก Hebb โครงข่ายประสาทเทียมชนิด perceptron ใช้ค่าเริ่มต้นฟังก์ชันเอาต์พุต

### 3.1.2.2 กฎการเรียนรู้ ADALINE

ในปี ค.ศ. 1959 Bernard Widrow และนักศึกษาของเขา Marcian Hoff ได้พัฒนากฎการเรียนรู้ซึ่งใกล้เคียงกับกฎการเรียนรู้ของ perceptron โดยกฎการเรียนรู้ของ perceptron ปรับค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมโยงที่โหนดเมื่อผลตอบสนองของโหนดไม่ถูกต้อง กฎ delta ปรับค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อลดความแตกต่างระหว่างโครงข่ายอินพุตถึงโหนดเอาต์พุตและค่าเอาต์พุตที่ต้องการ สิ่งเหล่านี้จะสรุปในรูปของค่าผิดพลาดยกกำลังสองเฉลี่ยที่น้อยที่สุด (smallest mean squared error : SMS) และนำสิ่งต่างๆ เหล่านี้ไปใช้สร้างแบบจำลองของ MADALINE (Multiple ADaptive LINear Element) ซึ่งพัฒนามาจาก ADALINE และเป็นกรนำมาเอาโครงข่ายประสาทมาใช้งานในทางปฏิบัติเป็นครั้งแรก โดยนำมาใช้ในการลดเสียงก้องในสายโทรศัพท์

### 3.1.3 ช่วงทศวรรษที่ 70 ยุคเงียบของโครงข่ายประสาทเทียม

ในปี ค.ศ. 1969 Marvin Minsky และ Seymour Papert ได้ตีพิมพ์หนังสือ Perceptron ซึ่งกล่าวถึงข้อจำกัดของ perceptron ว่าไม่สามารถนำไปใช้ในการแก้ปัญหาหลายๆ ปัญหาที่มีความน่าสนใจได้ ซึ่งจุดนี้เองที่ทำให้นักวิจัยหลายคนกลับไปให้ความสนใจด้านปัญญาประดิษฐ์ (AI) มากขึ้น แต่ยังมีนักวิจัยบางกลุ่มที่ไม่ย่อท้อและยังคงทำงานวิจัยด้านโครงข่ายประสาทต่อไป

#### 3.1.3.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิด Anderson

ในปี ค.ศ. 1968 John Anderson ของมหาวิทยาลัย Brown เริ่มวิจัยงานของเขาในโครงข่ายประสาทเทียมด้วยโครงข่ายรวมกลุ่มความสามารถในการจดจำ (associative memory nets) เขาได้พัฒนาแบบจำลองของโครงข่ายประสาทขึ้นมา และให้ชื่อว่า Brain-State-in-a-Box (BSB) งานประยุกต์ที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมชนิดนี้คือ การวินิจฉัยทางการแพทย์ (medical diagnosis)

#### 3.1.3.2 โครงข่ายประสาทเทียมชนิด Kohonen

ในปี ค.ศ. 1972 งานเริ่มต้นของ Teuvo Kohonen ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี Helsinki วิศวกรไฟฟ้าชาวฟินแลนด์ได้จัดการกับโครงข่ายประสาทรวมกลุ่มความสามารถในการจดจำ และต่อมาได้พัฒนากลายเป็น Self organizing map ขึ้นมา สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมชนิด Self organizing map นี้ประกอบด้วยจำนวนชั้น 2 ชั้น คือ ชั้นอินพุตและชั้นเอาต์พุต การเชื่อมโยงที่ชั้นอินพุตไปยังนิวรอนที่ชั้นเอาต์พุตนั้นจะต่อผ่านน้ำหนัก ข้อแตกต่างจากโครงข่ายอื่นๆ คือ กระบวนการเรียนรู้ที่สามารถจัดกลุ่มข้อมูลอินพุตได้ด้วยตัวของมันเองและเรียกการเรียนรู้นี้ว่า การเรียนรู้แบบคอมแพทิทีฟ (competitive learning) โครงข่ายประสาทเทียมชนิดนี้ถูกนำไปใช้เกี่ยวกับการจดจำคำพูด (speech recognition), การแก้ปัญหาของ “Traveling Salesman Problem” เป็นต้น

### 3.1.3.3 โครงข่ายประสาทเทียมของ Grossberg

ในปี ค.ศ. 1967 Stephen Grossberg พร้อมกับเพื่อนร่วมงานหลายๆ คนได้พัฒนา Avalanche ซึ่งเป็นโครงข่ายประสาทชนิดหนึ่งขึ้นมา และนำมาใช้ในการจดจำคำพูดและ สัญงานแขนกล

### 3.1.3.4 โครงข่ายประสาทเทียมชนิด ART1 และ ART2

Gail Carpenter ได้ร่วมวิจัยร่วมกับ Stephen Grossberg ได้พัฒนาทฤษฎีของโครงข่ายประสาทเทียมชนิด self-organizing ที่เรียกว่า adaptive resonance theory หรือ ART

### 3.1.4 ช่วงทศวรรษที่ 80 ยุคความกระตือรือร้นกลับมาใหม่

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

#### 3.1.4.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิด Backpropagation

สองเหตุผลหลักที่ทำให้เกิดยุคเจียบของโครงข่ายประสาทเทียมคือ ความผิดพลาดของ perceptron ชั้นเดียวที่ไม่สามารถแก้ปัญหาที่ไม่ซับซ้อนได้เช่น ฟังก์ชัน XOR และอีกเหตุผลก็คือไม่มีวิธีฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมหลายชั้น วิธีสำหรับแพร่ข้อมูลค่าผิดพลาดที่โนดเอาต์พุตย้อนกลับไปทีชั้นซ่อนได้ถูกค้นพบโดย Paul Werbos ในปี ค.ศ. 1974 แต่ไม่ได้กระจายใช้อย่างกว้างขวาง วิธีนี้ถูกค้นพบอีกครั้งในปี ค.ศ. 1985 โดย David Parker และ LeCun ก่อนที่จะกลายเป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวาง เปรียบเสมือนเป็นวิธีคิดแรกเริ่มในทฤษฎีควบคุมที่เหมาะสม (optimal control theory) ในปี ค.ศ. 1986 งานของ Parker กลายเป็นที่สนใจของกลุ่ม Parallel Distributed Processing ซึ่งนำทีมโดยนักจิตวิทยา David Rumelhart ของมหาวิทยาลัย California ที่ Sandiego และ James McClelland ของมหาวิทยาลัย Carnegie-Mellon ผู้ซึ่งนำวิธีดังกล่าวปรับปรุงให้ดีขึ้นและถูกใช้อย่างกว้างขวางในเวลาต่อมา หลักการของโครงข่ายชนิดนี้สามารถนำไปใช้แก้ปัญหาในลักษณะเชิงเส้น และปัญหาที่ไม่เชิงเส้นได้ ทำให้ประยุกต์เข้ากับโครงงานต่างๆ ได้อย่างหลากหลาย

### 3.1.4.2 โครงข่ายประสาทเทียมชนิด Hopfield

ในปี ค.ศ. 1982 John Hopfield ทำงานที่สถาบันเทคโนโลยี California พร้อมกับ David Tank นักวิจัยที่ AT&T Hopfield ได้พัฒนาโครงข่ายประสาทเทียมที่ประสบความสำเร็จเป็นอย่างดีในนามโครงข่ายประสาทเทียมชนิด Hopfield ส่งผลให้ John Hopfield ได้รับรางวัลโนเบล สาขาฟิสิกส์ และได้พัฒนาจำนวนของโครงข่ายประสาทเทียมพื้นฐานค่าถ่วงน้ำหนักคงที่ และ adaptive activation โครงข่ายเหล่านั้นสามารถมีประโยชน์เหมือนกับโครงข่ายประสาทเทียมรวมกลุ่มความสามารถในการจดจำและสามารถนำไปใช้เพื่อแก้ปัญหาการบีบบังคับความพอใจ เช่น ปัญหา “Traveling Salesman Problem” และเขาได้นำเสนอบทความต่อ National academy of sciences ซึ่งมีเนื้อหาเกี่ยวกับการใช้โครงข่ายประสาทในการทำนายส่วนที่ขาดหายไปของข้อมูลหรือรูปภาพ

### 3.1.4.3 โครงข่ายประสาทเทียมชนิด Neocognitron

ในปี ค.ศ. 1975 - 1988 Kunihiko Fukushima และเพื่อนร่วมงานของเขาที่ห้องทดลอง NHK ในกรุงโตเกียว ได้พัฒนาตระกูลโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้งานเฉพาะสำหรับจดจำตัวอักษร หนึ่งในตัวอย่างของโครงข่ายกลุ่มนี้คือ Neocognitron โครงข่ายประสาทเทียมชนิด self-organizing ในช่วงแรกถูกเรียกว่า cognitron แต่เนื่องจากมีความผิดพลาดเกี่ยวกับสถานะการจดจำ (recognize position) ข้อบกพร่องเหล่านี้ได้ถูกแก้ไขด้วยโครงข่ายประสาทเทียมชนิด Neocognitron

### 3.1.4.4 โครงข่ายประสาทเทียมชนิด Boltzmann

ในช่วงปี ค.ศ. 1983-1987 นักวิจัยหลายท่านได้พัฒนาการหาค่าการเชื่อมโยงและฟังก์ชันกระตุ้น โดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability density function) ต่างจากเดิมที่มักจะใช้แบบ Nondeterministic โดยพัฒนาโครงข่ายประสาทเทียมในนาม Boltzmann ซึ่งอาศัยแนวคิดการจำลองการอบอุ่นตัวลงสู่สถานะเสถียรภาพ (Simulated annealing) และทฤษฎีการตัดสินใจของเบเยเซียน (Bayesian decision theory)

ในปัจจุบันโครงข่ายประสาทได้ถูกพัฒนา ค้นคว้า วิจัยและนำไปใช้ในด้านต่างๆมากขึ้น อาทิ วิทยาศาสตร์ด้านระบบประสาท, การเงินการธนาคาร, ด้านคณิตศาสตร์, การแพทย์, ระบบสื่อสาร รวมไปถึงงานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าอีกด้วย จึงถือได้ว่าโครงข่ายประสาทเป็นศาสตร์แขนงหนึ่งที่ได้รับคามสนใจเป็นอย่างมากในช่วงเวลานี้

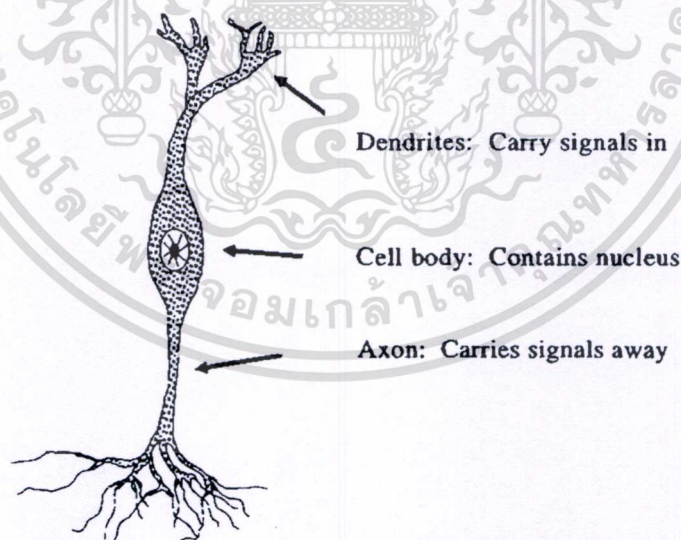
## 3.2 การทำงานของโครงข่ายประสาท

### 3.2.1 นิวรอน

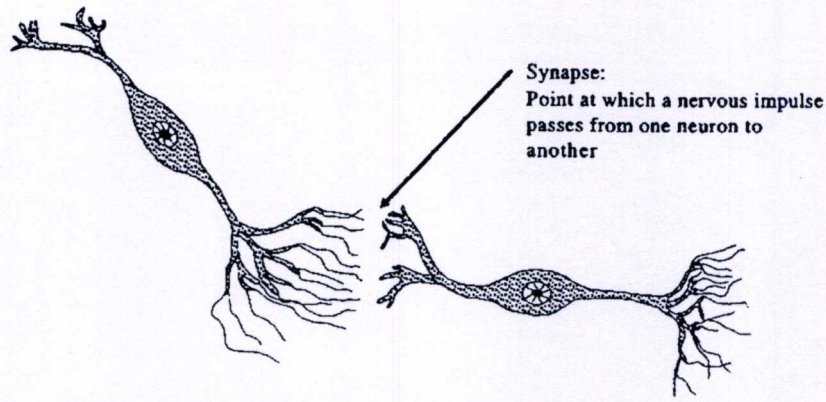
นิวรอน หมายความถึง เซลล์ประสาทและกระบวนการทั้งหมดของเซลล์ประสาท ในรูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างของนิวรอน ที่สามารถพบได้ใน เรตินา เป็นนิวรอนที่มีสองขั้ว (Bipolar neuron) ในตัวเซลล์ (Cell body) ของนิวรอนจะมีนิวเคลียส (Nucleus) อยู่ตรงกลางเซลล์ และมีแขนงอย่างน้อย 1 เส้นเชื่อมต่ออยู่กับตัวเซลล์ แขนงที่ทำหน้าที่นำกระแสประสาท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

### 3.2.2 โครงสร้างของนิวรอนและไซแนปส์

เมื่อนิวรอนมากกว่า 1 นิวรอน รวมอยู่ด้วยกันมีการจัดเรียงกันเป็น โครงสร้างของประสาท ดังแสดงในรูปที่ 3.2 จะมีการส่งกระแสประสาทจากนิวรอนหนึ่งไปยังนิวรอนอื่น โดยผ่านจุดเชื่อมต่อระหว่างปลายของแอกซอนของนิวรอนหนึ่งกับตัวเซลล์หรือเดนไดรต์ของอีกนิวรอนหนึ่ง หรือที่เรียกว่า ไซแนปส์ (Synapse) ซึ่งเป็นช่องว่างที่เล็กมากระหว่างนิวรอนสองนิวรอนที่อยู่ติดกัน แต่ไม่ได้สัมผัสกันโดยตรง ไซแนปส์จะเป็นบริเวณที่ควบคุมให้มีการส่งผ่านกระแสประสาทต่อไป หรือยับยั้งการส่งกระแสประสาท รวมถึงเปลี่ยนแปลงลักษณะของกระแสประสาทอีกด้วย



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของนิวรอนชนิดที่มีสองขั้ว [8]



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของประสาท [8]

### 3.2.3 การส่งผ่านกระแสประสาท

ในสภาวะปกติเมื่อนิวรอนนำกระแสประสาทที่ได้รับจากอวัยวะที่ทำหน้าที่รับรู้ (อาทิเช่น ตา หรือ หู) ไปยังอวัยวะที่ทำหน้าที่ตอบสนอง (อาทิเช่น กล้ามเนื้อ หรือ ต่อมต่างๆภายในร่างกาย) กระแสประสาทจะถูกส่งผ่านจากนิวรอนหนึ่งไปยังอีกนิวรอนหนึ่งโดยผ่านไซแนปส์ เมื่อกระแสประสาทผ่านเข้ามายังไซแนปส์ (เสมือนเป็นอินพุทของไซแนปส์) สารเคมีในไซแนปส์จะมีผลต่อกระแสประสาทได้สองลักษณะ คือ กระตุ้นให้กระแสประสาทมีขนาดเพิ่มขึ้น หรือยับยั้งให้กระแสประสาทมีขนาดลดลง ซึ่งทั้งสองลักษณะดังกล่าวเปรียบได้กับการที่สัญญาณอินพุทถูกถ่วงน้ำหนัก (Weighted) ให้มีค่ามากขึ้น หรือลดลง เมื่อผ่านออกจากไซแนปส์ กระแสประสาทที่ถูกกระตุ้นและกระแสประสาทที่ถูกยับยั้งจะถูกรวมเข้าด้วยกัน หากผลรวมของกระแสประสาทดังกล่าวมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ ศักคาที่ผิวของนิวรอนถัดไป หรือธรชโซลด์ (Threshold) กระแสประสาทดังกล่าวก็จะสามารถไหลผ่านเข้าไปในนิวรอนได้ หากผลรวมของกระแสประสาทนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าธรชโซลด์ กระแสประสาทก็จะถูกยับยั้งไม่ให้ผ่านเข้าไปในนิวรอนนั้น การไหลของกระแสประสาทจะเป็นไปในทิศทางเดียว (One direction) และมีความเร็วอยู่ระหว่าง 10 ถึง 120 เมตรต่อวินาที เมื่อการส่งกระแสประสาทครั้งหนึ่งสิ้นสุดลง ส่วนต่างๆของนิวรอนจะกลับเข้าสู่สภาวะเริ่มต้นอีกครั้งหนึ่งเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับส่งกระแสประสาทครั้งต่อไป

ในสมองของมนุษย์จะประกอบด้วยเซลล์ประสาท (หรือนิวรอน) ประมาณ 1 หมื่นล้านเซลล์ และแต่ละเซลล์สามารถเชื่อมต่อกับเซลล์ประสาทอื่นๆได้มากถึง 2 แสนเซลล์ (โดยปกติเซลล์ประสาทหนึ่งเซลล์จะเชื่อมต่อกับเซลล์ประสาทอื่นๆประมาณ 1,000 ถึง 10,000 เซลล์) เมื่อเซลล์ประสาทแต่ละเซลล์ทำงานร่วมกันจะสามารถส่งกระแสประสาทได้สูงสุดถึง 1,000 สัญญาณ (Pulse) ต่อวินาที และจากการที่เซลล์ประสาทแต่ละเซลล์ส่งผ่าน หรือยับยั้งกระแสประสาท ที่อัตรา

ความเร็วต่างๆกัน ในเวลาเดียวกันเพื่อเป็นการส่งข้อมูลนั้น ทำให้สมองสามารถรับรู้อินพุตต่างๆ และสร้างผลตอบสนองต่ออินพุตนั้นๆ ได้ โดยที่การรับรู้และตอบสนองนี้เกิดขึ้นจากการพัฒนาทาง พันธุศาสตร์และการเรียนรู้ที่จะจัดระเบียบการตอบสนองต่ออินพุตของสมองเอง

อาจสรุปคุณสมบัติของโครงข่ายประสาทชีวภาพได้ดังนี้ [19]

- 1) แต่ละนิวรอนจะรับข้อมูลอินพุตเป็นจำนวนมาก
- 2) ข้อมูลอินพุตอาจถูกปรับให้เหมาะสมด้วยค่าการเชื่อมโยง (Connection value or weight value or strength) ที่ไซแนปส์
- 3) ข้อมูลอินพุตที่ผ่านการปรับด้วยค่าการเชื่อมโยงจะถูกรวมและทำการประมวลผล
- 4) ภายใต้ภาวะที่เหมาะสม เช่น ข้อมูลอินพุตมีจำนวนเพียงพอ นิวรอนจะส่งข้อมูลออกมาหนึ่งค่า
- 5) ข้อมูลเอาต์พุตจากนิวรอนหนึ่งอาจจะถูกส่งไปให้นิวรอนอื่นๆ หลายนิวรอนผ่านทาง แอ็กซอน
- 6) นิวรอนแต่ละนิวรอนมีความเป็นเฉพาะตำแหน่งหรือเฉพาะที่ (Local)
- 7) ความจำแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ
  - ความจำระยะยาว จะเก็บที่ไซแนปส์ของนิวรอนหรือเก็บในค่าการเชื่อมโยง
  - ความจำระยะสั้น สัมพันธ์กับข้อมูลเอาต์พุตจากนิวรอน
- 8) ความถูกต้องของค่าการเชื่อมโยงจะขึ้นกับประสบการณ์ในการเรียนรู้ที่ผ่านมา
- 9) การควบคุมการถ่ายโอนของไซแนปส์อาจจะเป็นการกระตุ้นแบบเสริมหรือแบบหักล้าง

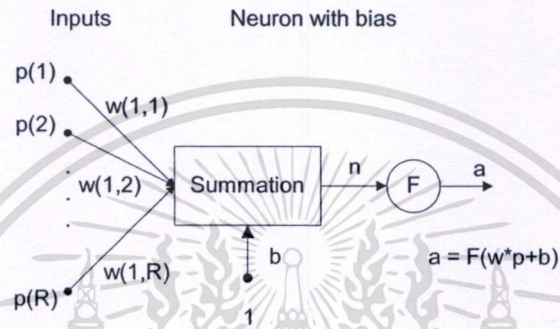
นอกจากที่กล่าวมา โครงข่ายประสาทชีวภาพยังยึดหยุ่นต่อความผิดพลาด (Fault-tolerance) 2 ประเด็นด้วยกัน ประการแรก คือ ความสามารถในการจดจำและจำแนกข้อมูลอินพุตที่แตกต่างจากข้อมูลอินพุตที่เคยได้รับไม่มากนัก ตัวอย่างเช่น ความสามารถในการจำแนกภาพบุคคลที่ไม่เคยเห็นมาก่อน หรือสามารถจดจำบุคคลที่ไม่ได้พบเห็นกันเป็นเวลานาน ประการที่สองความสามารถในการซ่อมแซมหรือชดเชยความเสียหายของตัวนิวรอนเอง ในสมองมนุษย์เมื่อนิวรอนหนึ่งชำรุดเสียหายก็จะมีการสร้างนิวรอนใหม่ขึ้นมาแทน นั่นคือ ยังคงมีการเรียนรู้ (Learning) อย่างต่อเนื่อง แม้ว่าจะสูญเสียนิวรอนบางส่วน ในบางครั้งนิวรอนที่เหลือจะได้รับการฝึกสอน (Training) เพื่อทำหน้าที่แทนนิวรอนที่ชำรุดเสียหาย

จากจุดเด่นหลายประการของโครงข่ายประสาทชีวภาพผนวกกับเทคโนโลยีด้านคอมพิวเตอร์ การทำงานแต่ละครั้งของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในคอมพิวเตอร์จะใช้เวลาอยู่ในช่วงนาโนวินาที ( $10^{-9}$ s) ซึ่งมีความรวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานของสมองมนุษย์ทำให้มีการคิดค้นแนวทางแก้ปัญหาโดยมีโครงสร้างองค์ประกอบและกลไกการแก้ปัญหาหลักขณะเดียวกับโครงข่ายประสาทชีวภาพ โดยเรียกว่า โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมเป็นการใช้ประโยชน์จากความก้าวหน้าของเทคโนโลยี เป็นระบบการประมวลผลข้อมูลที่มีพฤติกรรมบางอย่างเหมือนกับโครงข่ายประสาทชีวภาพ จึงกล่าวได้ว่าโครงข่ายประสาทเทียม เป็นอัลกอริทึมที่เลียนแบบการเรียนรู้ของสมองมนุษย์ โดยมีองค์ประกอบของโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญดังนี้คือ ยูนิต (Unit), ตัวแปรอินพุต (Input layer), ตัวแปรเอาต์พุต (Output layer) และค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighted value) แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดง โครงสร้างพื้นฐานของ โครงข่ายประสาทเทียม [8]

ซึ่งสามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างโครงข่ายประสาทชีวภาพกับโครงข่ายประสาทเทียมได้ดังนี้

โครงข่ายประสาทชีวภาพ	โครงข่ายประสาทเทียม
ตัวเซลล์ (Cell Body)	ยูนิต (Unit)
เดนไดรต์ (Dendrites)	ตัวแปรอินพุต (Input layer)
แอกซอน (Axon)	ตัวแปรเอาต์พุต (Output layer)
ไซแนปส์ (Synapse)	ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight value)

#### 3.3.1 คุณสมบัติและความสามารถของโครงข่ายประสาทเทียม

คุณสมบัติและความสามารถของโครงข่ายประสาทเทียม สามารถสรุปได้ดังนี้คือ

1. โครงข่ายประสาทเทียมไม่ใช่โปรแกรมคอมพิวเตอร์แต่โครงข่ายจะเรียนรู้จากตัวอย่าง
2. มีความยืดหยุ่นสูงจนสามารถจำลองกระบวนการของปัญหาใดๆ ได้
3. มีความสามารถในการจำชุดของคู่อินพุต เอาต์พุตที่มีความซับซ้อนมากจนไม่สามารถจำลองแบบในเชิงความน่าจะเป็นได้
4. มีความสามารถในการปรับตัวเข้ากับการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อม
5. มีความสามารถในการตอบสนองต่อข้อมูลที่ไม่เคยเห็น
6. ความรู้จะกระจายอยู่ทั่วทั้งโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 ลักษณะของปัญหาที่เหมาะสมกับโครงข่ายประสาทเทียม

ลักษณะของปัญหาที่เหมาะสมกับโครงข่ายประสาทเทียมมีดังนี้คือ

1. ตัวอย่างข้อมูลสำหรับการฝึกสอนประกอบด้วยองค์ประกอบหลายๆ ค่า
2. เอาต์พุตที่ต้องการสามารถเป็นค่าจำนวนเต็ม หรือจำนวนจริงหรือเป็นเวกเตอร์ของจำนวนเต็มหรือจำนวนจริงก็ได้
3. ตัวอย่างของข้อมูลสามารถมีความผิดพลาดปะปนอยู่ได้
4. ไม่มีปัญหากับขั้นตอนการฝึกหัดซึ่งอาจใช้เวลานานมาก
5. ต้องการประเมินผลเอาต์พุตอย่างรวดเร็ว
6. ไม่ต้องการเข้าใจวิธีการแก้ปัญหา ต้องการให้ปัญหาได้รับการแก้ไขเท่านั้น

โครงข่ายประสาทเทียมอาจพิจารณาให้เป็นขั้นตอนวิธีทางคณิตศาสตร์ (Mathematical algorithm) ของโครงข่ายประสาทชีวภาพ โดยตั้งบนพื้นฐานดังนี้

1. หน่วยประมวลผลเรียกว่า นิวรอน การส่งผ่านข้อมูลระหว่างนิวรอนทำได้โดยการเชื่อมโยงระหว่างนิวรอน
2. การเชื่อมโยงแต่ละส่วนจะขึ้นอยู่กับค่าการเชื่อมโยงหรือค่าถ่วงน้ำหนัก
3. ข้อมูลเอาต์พุตถูกกำหนดด้วยฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function) ซึ่งปกติความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของข้อมูลอินพุตที่คูณด้วยค่าการเชื่อมโยงกับข้อมูลเอาต์พุตเป็นความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear)

คุณสมบัติของโครงข่ายประสาทเทียมจึงถูกกำหนดด้วยองค์ประกอบทั้งสามส่วน นั่นคือ ส่วนแรกในข้อ 1. เป็นรูปแบบการเชื่อมโยงระหว่างนิวรอนเรียกส่วนนี้ว่า โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม ส่วนต่อไปในข้อ 2 เป็นการกำหนดค่าของการเชื่อมโยงเรียกส่วนนี้ว่า ขั้นตอนวิธีการฝึกสอนหรือการเรียนรู้ ส่วนสุดท้ายคือข้อ 3 เกี่ยวกับการกำหนดข้อมูลเอาต์พุตโดยฟังก์ชันกระตุ้น

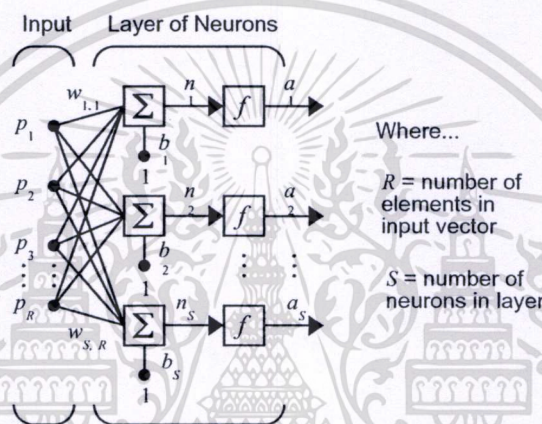
### 3.4 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม (Architectures of Neural Networks) [19]

ในการสร้างเซลล์ประสาทเพียงหนึ่งเซลล์ โดยใช้แนวความคิดจากเซลล์ประสาทชีวภาพ การจะนำเซลล์ประสาทเทียมมาใช้งานได้นั้น ต้องใช้เซลล์ประสาทเทียมที่มีคุณลักษณะต่างๆ กัน (ค่าถ่วงน้ำหนักจะทำให้คุณสมบัติของเซลล์ประสาทเทียมแต่ละเซลล์มีคุณลักษณะแตกต่างกันไป) มาเชื่อมต่อเซลล์ประสาทหลายๆ ตัวเข้าด้วยกันให้เกิดเป็นลักษณะของโครงข่ายเป็นชั้นๆ หรือที่เรียกว่า เลเยอร์ (Layer) ซึ่งเซลล์ประสาทแต่ละตัวที่อยู่ในชั้นเดียวกันจะไม่มี การเชื่อมต่อถึงกัน ประเภทของโครงสร้างการเชื่อมต่อโครงข่ายประสาทเทียม พอจะแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว (Single Layer Neural Network), โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi Layer Neural Network) ซึ่งแต่ละชนิดก็มีคุณลักษณะเด่นที่แตกต่างกันไป

### 3.4.1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว (Single Layer Neural Network)

จะประกอบไปด้วยเซลล์ประสาทที่จัดเรียงตัวอยู่ในชั้นต่างๆ อันได้แก่ ชั้นอินพุต และชั้นเอาต์พุต สาเหตุที่จัดโครงสร้างแบบนี้เป็นแบบชั้นเดียว เนื่องจากเรานับชั้นเอาต์พุตเพียงชั้นเดียวเท่านั้นว่าเป็นชั้นของเซลล์ประสาท สำหรับชั้นอินพุตเราไม่พิจารณาว่าเป็นชั้นของเซลล์ประสาทก็เพราะเป็นชั้นที่ไม่มีกระบวนการใดๆ จะทำหน้าที่เพียงแค้รับข้อมูลอินพุตเข้ามาและส่งต่อไปกับชั้นถัดไปเท่านั้น รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว



รูปที่ 3.4 แบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว [11]

รูปที่ 3.4 แสดงโครงข่ายประสาทเทียมที่มีอินพุต  $R$  ชุด และมีนิวรอน  $S$  นิวรอน โดยที่สมาชิกของอินพุตเวกเตอร์  $p$  (ประกอบไปด้วย  $p_1, p_2, \dots, p_R$ ) จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับนิวรอนแต่ละนิวรอนด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก  $W$  ซึ่งสามารถเขียนแทนด้วยเมตริกซ์ที่มีขนาด  $S \times R$  อินพุตของฟังก์ชันถ่ายโอน  $n(i)$  เป็นผลลัพธ์จากการรวมผลคูณของอินพุตและค่าถ่วงน้ำหนักแต่ละชุดกับค่าไบแอสของนิวรอนที่  $i$  เมื่อจัดเรียงอินพุตของฟังก์ชันถ่ายโอนเข้าด้วยกันก็จะได้เวกเตอร์  $n$  ซึ่งมีขนาด  $S$  ขั้นตอนสุดท้ายเวกเตอร์  $n$  จะถูกป้อนผ่านฟังก์ชันถ่ายโอนโดยจะได้เวกเตอร์  $a$  ซึ่งมีขนาด  $S$  เป็นผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียม โดยที่

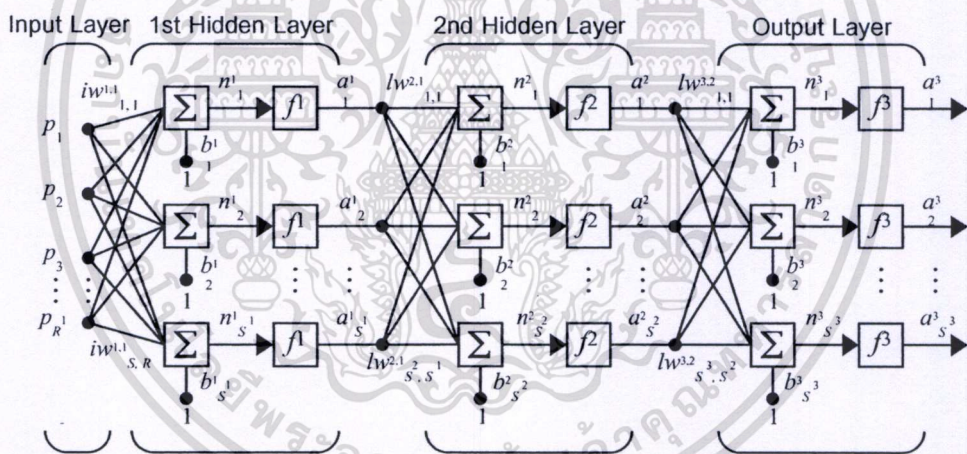
$$a = f(W * p + b) \quad (3.1)$$

### 3.4.2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi Layer Neural Network)

สืบเนื่องมาจากในปี 1969 Minsky และ Seymour Papert ได้พิสูจน์ให้เห็นว่า โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียวมีข้อจำกัด ไม่สามารถนำมาใช้แก้ปัญหาต่างๆ ในบางกรณีได้ นักวิจัยจึงได้นำเสนอรูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น ซึ่งมีโครงสร้างประกอบขึ้นจากการจัดเรียงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวของเซลล์ประสาทตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป (ไม่นับรวมชั้นอินพุท) โดยปกติโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นจะประกอบด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียวหลายๆ ตัวต่ออยู่ในโครงสร้างที่มีลำดับชั้นลดล้นกันลงไป โดยอยู่ในรูปของการทำงานที่ป้อนไปข้างหน้า (Feedforward) ซึ่งชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นอินพุทและชั้นเอาต์พุท เรียกว่า ชั้นซ่อน (Hidden Layer) ซึ่งชั้นซ่อนนี้เองที่เป็นตัวเพิ่มความสามารถให้แก่โครงข่าย ทั้งนี้จำนวนของชั้นซ่อนสามารถมีได้มากกว่า 1 ชั้น จำนวนของชั้นซ่อนและจำนวนของนิวรอนในแต่ละชั้นจะมีค่าไม่คงที่ ซึ่งแต่ละชั้นอาจจะมีจำนวนนิวรอนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับภาระประยุกต์ใช้งาน ซึ่งจะเป็นคำถามที่ว่าผู้พัฒนาจะต้องใช้จำนวนชั้นซ่อนเท่าใด และจำนวนนิวรอนต่อชั้นควรเป็นเท่าใด โดยปกติจะใช้กระบวนการตัดและพยายาม (Cut – and – Try Process) นั่นคือ ใช้นิวรอนให้เยอะๆ ไว้ก่อน แล้วค่อยๆ ลดลงมาจนได้จำนวนน้อยที่สุดที่โครงข่ายประสาทเทียมยังคงเรียนรู้ได้ โดยเทคนิคนี้จะเรียกว่า พรุนนิ่ง (Pruning)

อีกวิธีหนึ่งที่จะทำให้แน่ใจว่า ตัวอย่างที่ใช้ในกระบวนการฝึกสอนโครงข่ายนั้นพอที่จะครอบคลุมข้อมูลทั้งหมดได้ ก็คือพยายามใช้ตัวอย่างที่มีจำนวนมากในการฝึกสอนโครงข่าย เพื่อที่ว่าความรู้ที่มากขึ้นจะเป็นข้อมูลในการสร้างผลตอบสนองของโครงข่ายได้ดีขึ้น



รูปที่ 3.5 แบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ชั้นซ่อน [11]

รูปที่ 3.5 แสดงโครงข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ชั้นซ่อน มีอินพุท R ชุด, นิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เท่ากับ  $S^1$  และ  $S^2$  และมีเอาต์พุท  $S^3$  ชุด เช่นเดียวกับกับโครงข่ายประสาทเทียมที่มีชั้นซ่อน 1 ชั้น สมาชิกของอินพุทเวกเตอร์  $P$  แต่ละตัวจะถูกเชื่อมเข้ากับนิวรอนแต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 ด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก  $W^1$  (เรียกว่า Input weight,  $IW^{1,1}$ ) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด  $S^1 \times R$  และเวกเตอร์  $a^1$  ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของชั้นซ่อนที่ 1 และมีขนาด  $S^1$  จะเป็นอินพุทของชั้นซ่อนที่ 2 สมาชิกแต่ละตัวของเวกเตอร์  $a^1$  ก็จะถูกเชื่อมเข้ากับนิวรอนแต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 ด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก  $W^2$  (เรียกว่า Layer weight,  $LW^{2,1}$ ) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด  $S^2 \times S^1$  เช่นเดียวกับกับชั้นซ่อนที่ 1 เวกเตอร์  $a^2$  ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของชั้นซ่อนที่ 2 และมีขนาด  $S^2$  จะเป็นอินพุทของชั้นข้อมูลเอาต์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมาชิกแต่ละตัวของเวกเตอร์  $a^2$  จะถูกเชื่อมเข้ากับนิวรอนแต่ละตัวในชั้นข้อมูลเอาต์พุตด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก  $W^3$  ( $LW^{3,2}$ ) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด  $S^3 \times S^2$  โดยที่เวกเตอร์  $a^3$  ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด  $S^3$  จะเป็นผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียม โดยที่

$$a^1 = f^1(p * IW^{1,1} + b^1) \quad (3.2)$$

$$a^2 = f^2(a^1 * LW^{2,1} + b^2) \quad (3.3)$$

$$a^3 = f^3(a^2 * LW^{3,2} + b^3) \quad (3.4)$$

ในการสร้างเซลล์ประสาทเพียงหนึ่งเซลล์ โดยใช้แนวความคิดจากเซลล์ประสาทชีวภาพ การจะนำเซลล์ประสาทเทียมมาใช้งานได้นั้น ต้องใช้เซลล์ประสาทเทียมที่มีคุณลักษณะต่างๆ กัน (ค่าถ่วงน้ำหนักจะทำให้คุณสมบัติของเซลล์ประสาทเทียมแต่ละเซลล์มีคุณลักษณะแตกต่างกันไป) มาเชื่อมต่อเซลล์ประสาทหลายๆ ตัวเข้าด้วยกันให้เกิดเป็นลักษณะของโครงข่ายเป็นชั้นๆ หรือที่เรียกว่า เลเยอร์ (Layer) ซึ่งเซลล์ประสาทแต่ละตัวที่อยู่ในชั้นเดียวกันจะไม่มี การเชื่อมต่อถึงกัน

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

### 3.5 การกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก (Setting the Weights) [19]

ค่าถ่วงน้ำหนัก มีความสัมพันธ์กับอะไร และมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร? นั่นก็เช่นเดียวกันกับเด็กที่คลอดออกมาก็มีสมองแล้วแต่สมองยังไม่เจริญเติบโตเพียงพอและยังไม่ได้รับการฝึกสอนและเรียนรู้ เด็กจึงไม่สามารถทำกิจกรรมใดๆ ได้ด้วยตัวเอง เว้นแต่กิจกรรมที่ธรรมชาติสร้างมาพร้อมกับการกำเนิดที่เรียกว่า “สัญชาตญาณ” ซึ่งธรรมชาติใส่คุณลักษณะบางอย่างให้เซลล์สมองบางส่วน ตั้งแต่ทารกเจริญเติบโตอยู่ครรภ์มารดา เช่น ระบบควบคุมการหายใจ, การเรียกร้องเมื่อหิว, ความรู้สึก เป็นต้น เด็กจะพัฒนาการเรียนรู้ไปตามขั้นตอน หลังจากนั้น สมองของเขาจะได้รับการฝึกสอน และเจริญเติบโตไปพร้อมกัน เซลล์สมองจะได้รับการปรับคุณลักษณะสอดคล้องกับการฝึกสอน และจะเจริญเติบโตเป็นโครงข่ายสอดคล้องกัน

โครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้นมามีลักษณะเช่นเดียวกัน คือ เมื่อสร้างเสร็จแต่ละเซลล์ประสาทที่สร้างขึ้นมานั้น จะไม่มีคุณลักษณะใดเลย เนื่องจากยังไม่มี การกำหนดค่าซินแนปติกส์ เวทท์ที่เหมาะสมกับงานที่ต้องการให้กับมัน จึงต้องมีการฝึกสอนเพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้นมีคุณลักษณะตามที่ต้องการ การฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียมจะกระทำโดยการปรับเปลี่ยนค่าซินแนปติกส์เวทท์เพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมจดจำรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่าง

อินพุทกับเอาต์พุทได้ โดยในขั้นตอนแรกอาจกำหนดเป็นค่าสุ่มใดๆ (Random weight) ก่อนแล้วถึงปรับเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนักไปตามอัลกอริทึมสมมติฐาน หลายๆ รอบจนกว่าจะได้เอาต์พุทของโครงข่ายประสาทเทียม เหมือนกับเอาต์พุทของโครงข่ายประสาทเทียมที่ต้องการ ในเงื่อนไขความผิดพลาดที่ยอมรับได้

เนื่องจากการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักที่เป็นค่าสุ่มใดๆ โครงข่ายประสาทเทียมจึงยังไม่สามารถแสดงคุณลักษณะใดออกมา การฝึกสอนให้โครงข่ายก็คือ การปรับค่าถ่วงน้ำหนักทุกๆ จุดให้สอดคล้องกับอินพุทหลายๆ แบบ เพื่อให้ได้เอาต์พุทตามความต้องการนั่นเอง การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะต้องบรรลุถึงกระบวนการเข้าใจพื้นฐานเสียก่อน คือ การเรียนรู้ในโครงข่ายประสาทเทียมนั้นก็มีขีดจำกัด ปัญหาต่างๆ ผู้ใช้คงต้องแก้ให้มันก่อน แล้วนำผลนั้นไปอ้างอิงสำหรับการปรับปรุงค่าถ่วงน้ำหนัก หลังจากปรับจนได้ค่าผิดพลาดที่เอาต์พุทเทียบกับเอาต์พุทเป้าหมายน้อยลงเป็นที่พอใจแล้ว โครงข่ายประสาทเทียมนั้นก็พร้อมที่จะวิเคราะห์อินพุทและให้เอาต์พุทตามลักษณะตัวอย่างที่เคยเรียนรู้มา การเรียนรู้จะมีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักหลายๆ รอบจนค่าถ่วงน้ำหนักสอดคล้องกับตัวอย่างหลายๆ ตัวอย่างแล้วจะสามารถให้เอาต์พุทได้ตามต้องการพบว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้ตัวอย่างสำหรับการปรับสอนมากๆ โครงข่ายก็จะมีความแม่นยำสูงขึ้น แต่ก็ใช้เวลาในการปรับสอนเพิ่มขึ้นเช่นกัน

โครงข่ายประสาทเทียมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ตามลักษณะการเรียนรู้คือ การเรียนรู้แบบควบคุม (Supervised Learning) และการเรียนรู้แบบอิสระ (Unsupervised Learning)

### 3.5.1 การเรียนรู้แบบควบคุม (Supervised Learning)

การเรียนรู้วิธีนี้จะมีการกำหนดคู่ของการฝึกสอนระหว่างอินพุทกับเอาต์พุทที่ต้องการให้โครงข่ายประสาทเทียม ที่เรียกว่าเทรนนิ่งแพร์ (Training pairs) โครงข่ายประสาทเทียมจะถูกฝึกสอนไปตามจำนวนของคู่ที่ป้อน (จำนวนคู่ของ อินพุทกับเอาต์พุทที่ต้องการให้โครงข่ายประสาทเทียมรู้จัก) เอาต์พุทที่คำนวณได้จากโครงข่ายประสาทเทียมจะถูกเปรียบเทียบกับเป้าหมาย ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะถูกป้อนกลับไปยังโครงข่ายประสาทเทียมและเปลี่ยนแปลงค่าถ่วงน้ำหนักให้สอดคล้องกับอัลกอริทึม ที่ทำให้แนวโน้มของค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างเอาต์พุทกับเป้าหมายโดยเฉลี่ยมีค่าลดต่ำลง หลังจากฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมจะถูกทดสอบโดยให้เฉพาะค่าอินพุท แต่ไม่ให้ค่าเอาต์พุทที่ต้องการ และพิจารณาเอาต์พุทที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมใกล้เคียงกับค่าเอาต์พุทที่ถูกต้องหรือไม่

### 3.5.2 การเรียนรู้แบบอิสระ (Unsupervised Learning)

ถึงแม้ว่า อัลกอริทึมแบบควบคุม สามารถจะประยุกต์ใช้เพื่อปรับคุณลักษณะของโครงข่ายประสาทเทียมได้สำเร็จ แต่ก็ยังมีข้อด้อยอยู่ คือ มันเป็นไปอย่างแบบชีวภาพไม่ได้ และยากที่จะเชื่อได้ว่า กลไกการปรับสอนของสมองที่ต้องการ การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ต้องการกับเอาต์พุตจริง โดยกระบวนการป้อนกลับ ไปแก้ไขคุณลักษณะของโครงข่ายประสาทเทียม และถ้าสมมุติว่า สมองมีกลไกเช่นนี้ ต้องมีผู้หาเอาต์พุตที่ต้องการเพื่อนำมาเป็นเป้าหมายตลอดเวลา และจะเอามาจากที่ใด กล่าวโดยสรุปก็คือ ต้องมีผู้คิดเป้าหมายให้กับโครงข่ายประสาทเทียมก่อน โครงข่ายประสาทเทียมไม่สามารถคิดและปรับคุณลักษณะได้ก่อนด้วยตนเอง ในทางตรงกันข้ามหากพิจารณาทารกแรกเกิด สมองของเขาสามารถจัดระบบเองได้อย่างไร การปรับสอนแบบอิสระที่สร้างขึ้นยังคงห่างไกลความเป็นไปได้ ที่จะมิลักษณะการปรับสอนแบบระบบของสมองจนกระทั่งมีการพัฒนาการ ปรับสอนแบบอิสระนี้ขึ้นราวปี 1984 โดยโคโฮเนน (Kohonen) และคณะได้เสนอแนวคิดการปรับสอนแบบไม่ต้องการเป้าหมายไม่มีการตัดสินใจด้วยเหตุผลในอุดมคติมาก่อน ชุดของการปรับสอนจะมีเพียง อินพุตเวกเตอร์เท่านั้น อัลกอริทึมปรับสอนจะเปลี่ยนแปลงค่าถ่วงน้ำหนักของ โครงข่ายประสาทเทียม เพื่อสร้างเอาต์พุตที่มีความมั่นคง ถ้าเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย โครงข่ายประสาทเทียมก็ยังสามารถบอกได้ว่าคือเอาต์พุตตัวเดิม การฝึกสอนวิธีนี้จะไม่สามารถแก้ปัญหาที่ซับซ้อนได้ ดังนั้นจึงนิยมใช้ โครงข่ายประสาทเทียมแบบนี้กับงานง่ายๆ ประเภทการเปรียบเทียบเอกลักษณ์รูปแบบที่สัมพันธ์กันระหว่างอินพุตและเอาต์พุต ที่ถูกกำหนดโดยโครงข่ายประสาทเทียม

### 3.6 ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function)

ฟังก์ชันกระตุ้นหรือหนังสือบางเล่มเรียกว่า ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) เป็นตัวกำหนดค่าเอาต์พุต ฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้ในการฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมมีอยู่หลายชนิด ดังแสดงในตารางที่ 3.1 เราอาจแบ่งฟังก์ชันกระตุ้นพื้นฐานออกได้เป็น 3 ชนิดคือ

1. ฟังก์ชันเทรฮอลด์ (Threshold function หรือ Hard limit function หรือ Step function)
2. ฟังก์ชันเชิงเส้นอิ่มตัว (Saturating Linear Function หรือ Piecewise-Linear Function)
3. ฟังก์ชันซิกมอยด์ (Sigmoid function)

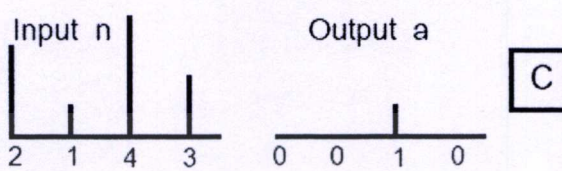
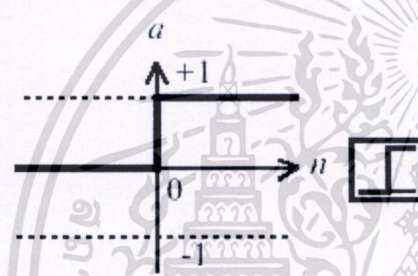
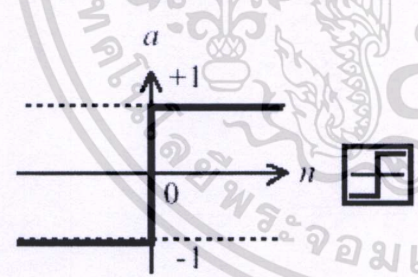
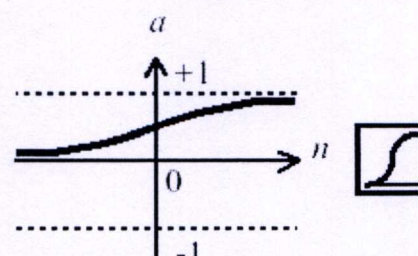
จากฟังก์ชันกระตุ้นพื้นฐานทั้ง 3 ชนิด ฟังก์ชันซิกมอยด์เป็นฟังก์ชันที่ได้รับความนิยมนำมาใช้เป็นฟังก์ชันกระตุ้นของโครงข่ายประสาทเทียมกันมาก เนื่องจากเป็นฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ (Smoothness) นอกเหนือจากฟังก์ชันกระตุ้นพื้นฐานทั้งสาม แล้วยังสามารถนำความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลในรูปแบบอื่นๆ มาเป็นฟังก์ชันกระตุ้นได้ ตัวอย่างเช่น ฟังก์ชันกระตุ้นแบบคอมเพิตีฟ (Competitive function)

โดยทั่วไปฟังก์ชันกระตุ้นจะจำกัดช่วงเอาต์พุตอยู่ตั้งแต่ 0 ถึง 1 ในการประยุกต์ใช้งานบางกรณี อาจมีความจำเป็นต้องใช้ฟังก์ชันที่ได้ค่าออกมานอกเหนือช่วงดังกล่าว เช่น ต้องการเอาต์พุตอยู่ในช่วงตั้งแต่  $-1$  ถึง  $+1$  สำหรับการพิจารณาเลือกใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแบบใดนั้นนับถึงปัจจุบันยังไม่มีข้อกำหนดที่แน่นอน แต่อาจจะพิจารณาจากองค์ประกอบดังต่อไปนี้

1. ความเป็นเชิงเส้น หรือไม่เป็นเชิงเส้น
2. ลักษณะของข้อมูลอินพุต
3. ขอบเขตที่ต้องการและลักษณะของข้อมูลเอาต์พุต
4. ปัจจัยอื่นที่มีนัยสำคัญต่อผลตอบแทนของนิเวรอนหรือโครงข่ายประสาทเทียมโดยรวม

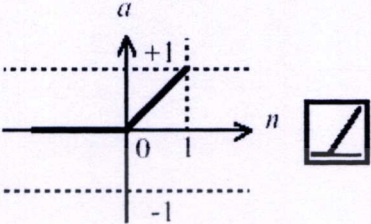
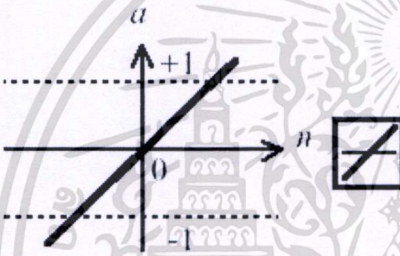
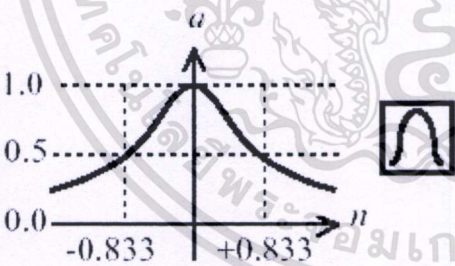
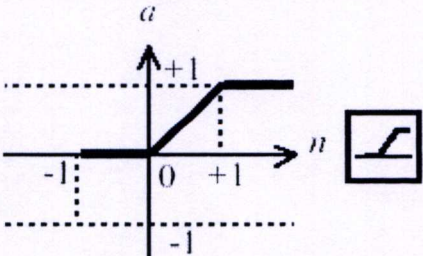
ในบางครั้งอาจเลือกใช้ฟังก์ชันสโตชาสติก (Stochastic function) เป็นฟังก์ชันกระตุ้นในกรณีที่ค่าความน่าจะเป็นของข้อมูลอินพุตมีนัยสำคัญ หรือในบางกรณีอาจเลือกใช้ฟังก์ชันแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นในโครงข่ายประสาทเทียมเดียวกัน ตัวอย่างเช่น โครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี (RBF) ซึ่งใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้นในชั้นซ่อน (Hidden layer) ของโครงข่ายประสาท ขณะที่ชั้นเอาต์พุต (Output layer) ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแบบเป็นเชิงเส้น

ตารางที่ 3.1 แสดงชนิดฟังก์ชันกระตุ้น [11]

ชนิดฟังก์ชันกระตุ้น	สมการฟังก์ชันกระตุ้น
<p>Competitive activation function</p> 	$a(n_i) = \begin{cases} 1; & i = i^* \\ 0; & i \neq i^* \end{cases}$ <p>when</p> $n_{i^0} \geq n_i, \forall i$ $i^* \leq i, \forall n_i = n_i.$
<p>Hard limit activation function</p> 	
<p>Symmetric hard limit activation function</p> 	$a(n) = \begin{cases} 1 & \text{if } n \geq 0 \\ -1 & \text{if } n < 0 \end{cases}$
<p>Log sigmoid activation function</p> 	$a(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}}$

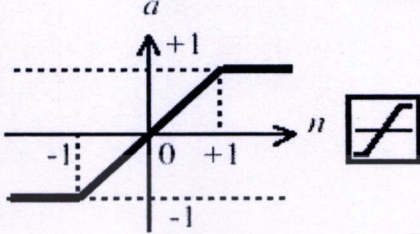
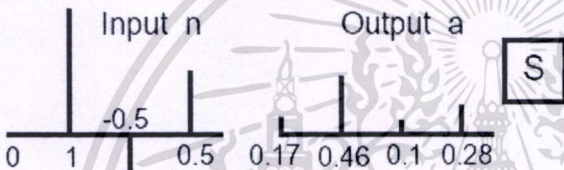
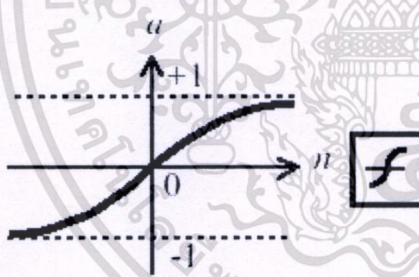
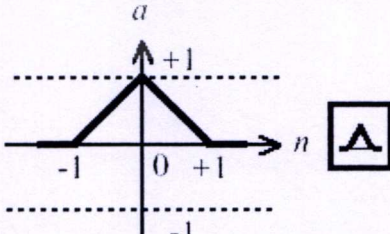
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

ชนิดฟังก์ชันกระตุ้น	สมการฟังก์ชันกระตุ้น
<p data-bbox="339 357 707 385">Positive linear activation function</p> 	$a(n) = \begin{cases} n & \text{if } n \geq 0 \\ 0 & \text{if } n \leq 0 \end{cases}$
<p data-bbox="384 725 666 753">Linear activation function</p> 	$a(n) = n$
<p data-bbox="353 1129 695 1157">Radial basis activation function</p> 	$a(n) = e^{-n^2}$
<p data-bbox="331 1534 725 1561">Saturation linear activation function</p> 	$a(n) = \begin{cases} 0 & n \leq 0 \\ n & \text{if } 0 \leq n \leq 1 \\ 1 & 1 \leq n \end{cases}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

ชนิดฟังก์ชันกระตุ้น	สมการฟังก์ชันกระตุ้น
<p>Symmetric saturating activation function</p> 	$a(n) = \begin{cases} -1 & n \leq -1 \\ n & \text{if } -1 \leq n \leq 1 \\ 1 & 1 \leq n \end{cases}$
<p>Softmax activation function</p> 	$a(n) = \frac{e^n}{\sum e^n}$
<p>Hyperbolic tangent sigmoid activation function</p> 	$a(n) = \frac{1 - e^{-2n}}{1 + e^{-2n}}$
<p>Triangular basis activation function</p> 	$a(n) = \begin{cases} 1 -  n  & \text{if } -1 \leq n \leq 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 ชนิดของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีอยู่ (Kinds of Neural Networks exist)

ในปัจจุบันมีชนิดของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นจำนวนมาก ไม่มีใครรู้อย่างแน่นอนว่ามีอยู่จำนวนเท่าไร ชนิดใหม่ถูกสร้างขึ้นทุกๆ สัปดาห์ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการรวบรวมบางวิธีที่รู้จักกันโดยส่วนมาก

สองชนิดหลักของโครงข่ายคือ ป้อน ไปข้างหน้าและป้อนกลับ

1. ในโครงข่ายประสาทเทียมป้อนไปข้างหน้า (feedforward NNs) การเชื่อมโยงระหว่างโนดไม่อยู่ในรอบหมุนเวียน(วัฏจักร) โครงข่ายประสาทเทียมป้อนไปข้างหน้าโดยส่วนมาก ทำให้เกิดการตอบสนองที่อินพุตอย่างรวดเร็ว โครงข่ายประสาทเทียมป้อนไปข้างหน้าสามารถฝึกสอนโดยใช้ชนิดต่างๆ ของวิธีเกี่ยวกับตัวเลขปกติที่มีประสิทธิภาพ
2. ในโครงข่ายประสาทเทียมป้อนกลับ (feedback or recurrent NNs) มีรอบหมุนเวียน(วัฏจักร) ในการเชื่อมโยง ในบางชนิดโครงข่ายประสาทเทียมป้อนกลับ, แต่ละครั้งอินพุตถูกมอบโครงข่ายประสาทเทียมควรจะวนรอบซ้ำหลายๆ ครั้งเท่าที่ทำได้ ก่อนที่ประมวลผลทำให้เกิดการตอบสนอง โครงข่ายประสาทเทียมป้อนกลับมีความเข้าใจยากกว่าที่จะฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมป้อนไปข้างหน้า

โครงข่ายประสาทเทียมที่แตกต่างกันในชนิดของข้อมูลมีด้วยกัน สองชนิดหลักของข้อมูล คือ แยกประเภท (Categorical) และ เกี่ยวกับปริมาณ (Quantitative)

1. ตัวแปรแยกประเภท (Categorical variables) ใช้ตัวเลขมีขอบเขตที่อาจเกิดขึ้นได้ และมีหลายๆ หรือกรณีตกลงในแต่ละประเภท ตัวแปรแยกประเภทอาจจะมามีค่าสัญลักษณ์ที่ควรนำมาถอดรหัสเข้าในตัวเลขก่อนเอาไปที่โครงข่าย เช่น “ผู้ชาย” และ “ผู้หญิง” หรือ “สีแดง”, “สีเขียว” และ “สีน้ำเงิน” ทั้งวิธีเรียนรู้แบบควบคุมดูแลด้วยค่าเป้าหมายแยกประเภท (categorical target values) และการเรียนรู้แบบอิสระด้วยเอาต์พุตแยกประเภท (categorical outputs) เรียกว่า “การแบ่งประเภท” (classification)
2. ตัวแปรเกี่ยวกับปริมาณ (Quantitative variables) เป็นตัวเลขที่ได้จากการวัดของบางคุณสมบัติ เช่น ความยาวในหน่วยเมตร การเรียนรู้ควบคุมดูแลด้วยค่าเป้าหมายเกี่ยวกับปริมาณ (quantitative target values) ถูกเรียกว่า “การถดถอย” (regression)

บางตัวแปรสามารถปฏิบัติได้ทั้งตัวแปรแยกประเภทและตัวแปรเกี่ยวกับปริมาณ เช่น ตัวเลขของเด็กหรือตัวแปรเลขฐานสอง (binary variable) ขั้นตอนวิธีถดถอย (regression algorithms) ส่วนมากสามารถใช้สำหรับแบ่งประเภทด้วยควบคุมดูแลโดยถอดรหัสค่าเป้าหมายแยกประเภทเป็นตัวแปร 0/1 และใช้ตัวแปรเลขฐานสองเหล่านี้สำหรับขั้นตอนวิธีถดถอย ค่าเอาต์พุตของโครงข่ายเป็นความน่าจะเป็นภายหลังเมื่อวิธีฝึกสอนปกติส่วนมากถูกนำมาใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงข่ายประสาทเทียมในปัจจุบันมีหลากหลายชนิด ซึ่งนำไปใช้ในลักษณะงานที่แตกต่างกัน ในหัวข้อถัดไปจะขอกกล่าวถึงรายละเอียดเฉพาะ โครงข่ายประสาทเทียมที่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เท่านั้น

### 3.8 พื้นฐานแนวคิดของโครงข่ายประสาทเทียม (Basis Algorithm of NNs)

ก่อนที่จะกล่าวถึงพื้นฐานของ โครงข่ายประสาทเทียมในแต่ละชนิด มีตัวพารามิเตอร์บางตัว ที่ต้องเข้าใจเสียก่อน ในโครงข่ายประสาทเทียม ข้อมูลหรือตัวอย่าง (sample) ถูกแยกย่อยเสมอ เข้าไปในชุดฝึกสอน (Training set), ชุดตรวจสอบ (Validation set) และชุดทดสอบ (Test set) ความแตกต่างระหว่างชุดย่อยเหล่านี้มีความสำคัญมาก ชุดตรวจสอบ และทดสอบถูกทำให้สับสนบ่อยๆ

ชุดฝึกสอน (Training set) :

ชุดของตัวอย่างใช้เพื่อเรียนรู้ว่ามีพารามิเตอร์ของการแบ่งประเภทเหมาะสม

ชุดตรวจสอบ (Validation set) :

ชุดของตัวอย่างใช้ปรับพารามิเตอร์ของการประเภท สำหรับตัวอย่างที่เลือกจำนวนของชั้น ซ่อนในโครงข่ายประสาทเทียม

ชุดทดสอบ (Test set) :

ชุดของตัวอย่างใช้ประเมินพารามิเตอร์ของการแยกประเภทที่ระบุไว้เต็มที่

ชุดทดสอบแบบ Interpolation :

ชุดของข้อมูลที่อยู่ระหว่างจุดข้อมูลที่มีอยู่ของชุดข้อมูลฝึกสอน

เมื่อทำความเข้าใจกับพารามิเตอร์เหล่านี้ หัวข้อถัดไปจะขอกกล่าวถึงพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ซึ่งเป็นโครงข่ายประสาทเทียมที่มีอยู่ใน โปรแกรม MATLAB/ Neural Network Toolbox

#### 3.8.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-propagation NN)

##### 3.8.1.1 โครงสร้าง

โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-propagation neural network : BP) ประกอบด้วยนิวรอลเซลล์ที่เรียงกันอยู่มากกว่า 2 ชั้นกล่าวคือ มีได้ตั้งแต่ 3 ชั้นขึ้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งประกอบด้วย ชั้นอินพุท (Input layer), ชั้นซ่อน (Hidden layer) และ ชั้นเอาต์พุท (Output layer) ลักษณะของโครงข่ายชนิดนี้เป็นโครงข่ายที่ป้อนไปข้างหน้า โดยมีการเชื่อมโยงในแต่ละชั้นแบบต่อกันหมด นั่นคือ ทุกๆ นิวรอนในชั้นอินพุทจะส่งสัญญาณไปยังทุกๆ นิวรอนในชั้นซ่อนชั้นแรก และทุกๆ นิวรอนในชั้นซ่อนชั้นแรกจะส่งสัญญาณไปยังทุกๆ นิวรอนในชั้นถัดไปจนในที่สุดทุกๆ นิวรอนในชั้นซ่อนสุดท้ายจะส่งสัญญาณไปยังทุกๆ นิวรอนในชั้นเอาต์พุท จากรูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายที่มี 3 ชั้น

จากรูปที่ 3.5 แสดงโครงข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ชั้นซ่อน มีอินพุท  $R$  ชุด, นิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เท่ากับ  $S^1$  และ  $S^2$  และมีเอาต์พุท  $S^3$  ชุด สมาชิกของอินพุทเวกเตอร์  $P$  แต่ละตัวจะถูกเชื่อมเข้ากับนิวรอนแต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 ด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก  $W^1$  (เรียกว่า Input weight,  $IW^{1,1}$ ) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด  $S^1 \times R$  และเวกเตอร์  $a^1$  ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของชั้นซ่อนที่ 1 และมีขนาด  $S^1$  จะเป็นอินพุทของชั้นซ่อนที่ 2 สมาชิกแต่ละตัวของเวกเตอร์  $a^1$  ก็จะถูกเชื่อมเข้ากับนิวรอนแต่ละนิวรอน ในชั้นซ่อนที่ 2 ด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก  $W^2$  (เรียกว่า Layer weight,  $LW^{2,1}$ ) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด  $S^2 \times S^1$  เช่นเดียวกันกับชั้นซ่อนที่ 1 เวกเตอร์  $a^2$  ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของชั้นซ่อนที่ 2 และมีขนาด  $S^2$  จะเป็นอินพุทของชั้นข้อมูลเอาต์พุท สมาชิกแต่ละตัวของเวกเตอร์  $a^2$  จะถูกเชื่อมเข้ากับนิวรอนแต่ละตัวในชั้นข้อมูลเอาต์พุทด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก  $W^3$  ( $LW^{3,2}$ ) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด  $S^3 \times S^2$  โดยที่เวกเตอร์  $a^3$  ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด  $S^3$  จะเป็นผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียม

### 3.8.1.2 แนวคิด [19]

ขั้นตอนการฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ จะสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนด้วยกัน คือ ป้อนข้อมูลอินพุทไปข้างหน้า, แพร่ค่าย้อนกลับของค่าผิดพลาดที่เกี่ยวข้อง และปรับค่าถ่วงน้ำหนัก

ระหว่างป้อนไปข้างหน้า จะเริ่มต้นด้วยการนำค่าอินพุทที่ได้รับจากชั้นอินพุทมาคำนวณหาผลรวมที่ได้รับในแต่ละนิวรอน แล้วจึงส่งผลลัพธ์ที่ได้ส่งต่อไปยังชั้นซ่อนที่ 1 แต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 จะทำการคำนวณด้วยฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นนั้น แล้วจึงส่งผลลัพธ์ที่ได้ส่งต่อไปยังชั้นซ่อนที่อยู่ถัดไป ในชั้นซ่อนที่ 2 แต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 จะทำการคำนวณด้วยฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นนั้น จากนั้นส่งผลลัพธ์ที่ได้ส่งต่อไปยังชั้นถัดไป สุดท้าย แต่ละนิวรอนในชั้นเอาต์พุทจะทำการคำนวณด้วยฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นเอาต์พุท เพื่อหาค่าตอบหรือผลตอบสนองของโครงข่ายสำหรับ แต่ละรูปแบบข้อมูลที่ป้อนให้ ทิศทางการไหลของข้อมูลเหล่านี้จะเป็นลักษณะเคลื่อนไปข้างหน้าจากชั้นของอินพุท ผ่านชั้นของนิวรอนเซลล์ภายในไปสู่ชั้นเอาต์พุท วิธีการคำนวณของโครงข่ายลักษณะนี้ จึงมีชื่อตามลักษณะดังกล่าวว่า forward-propagation

ขั้นต่อไปจะเป็นการคำนวณแบบ backward-propagation สำหรับขั้นตอนนี้จะเป็นการนำผลลัพธ์ที่ได้จากเอาต์พุทของโครงข่ายมาเปรียบเทียบกับเอาต์พุทเป้าหมายเพื่อคำนวณค่าผิดพลาดที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกี่ยวข้อง แล้วค่าผลต่างระหว่างเอาต์พุตของโครงข่ายกับเอาต์พุตเป้าหมายที่ได้จากโครงข่ายจะถูกส่งถอยหลังกลับมายังชั้นซ่อนที่ 2 และส่งต่อไปยังนิเวรอนต่างๆ ภายในชั้นซ่อนที่ 2 แต่ละโหนดจะได้รับค่าผิดพลาดเพียงบางส่วนขึ้นอยู่กับว่านิเวรอนเซลล์นั้นเป็นตัวที่ส่งผลมากหรือน้อยไปสู่เอาต์พุตนั้น เพื่อปรับค่าถ่วงน้ำหนักระหว่างชั้นเอาต์พุตกับชั้นซ่อนที่ 2 กระบวนการของการส่งค่าความผิดพลาดกลับมานั้นจะทำซ้ำกับชั้นถัดลงมาอีกจนกระทั่งทุกโหนดในโครงข่ายได้รับส่วนแบ่งค่าความผิดพลาดนั้น

ขั้นตอนสุดท้ายจะนำค่าผิดพลาดที่ได้มาใช้ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักจะเปลี่ยนไปมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของค่าความผิดพลาดที่ได้รับ กระบวนการจะกลับไปทำซ้ำในขั้นตอนแรกจนกระทั่งค่าผิดพลาดที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าผิดพลาดต่ำสุดที่กำหนดไว้ ต่อไปเป็นรายละเอียดของการทำงานในแต่ละขั้นตอน

### 1. แพร่ค่าไปข้างหน้า (Forward-propagation)

เมื่อข้อมูลอินพุตปรากฏบนชั้นอินพุต ( $P_R, R = 1, K, R$ ) สัญญาณจากชั้นอินพุตทั้งหมดจะถูกส่งมาตามสายเชื่อมโยงไปยังนิเวรอนเซลล์ในชั้นถัดไป แต่ละนิเวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 ถูกเชื่อมโยงด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก ( $iw_{S^1,R}^{1,1} = S^1 = 1, K, S^1$ ) จะทำการคำนวณสัญญาณอินพุตของนิเวรอนเซลล์ในชั้นซ่อนที่ 1 ได้จากสมการ

$$net_{S^1} = b_{S^1}^1 + \sum_{R=1}^R iw_{S^1,R}^{1,1} P_R \quad (3.5)$$

ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นเพื่อคำนวณสัญญาณเอาต์พุต ( $a^1$ ) ในชั้นซ่อนที่ 1

$$a^1 = f(net_{S^1}) \quad (3.6)$$

เมื่อสัญญาณเอาต์พุต ( $a^1$ ) ในชั้นซ่อนที่ 1 เอาต์พุตที่ได้ส่งต่อไปยังชั้นซ่อนที่ 2 โดยแต่ละนิเวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 ถูกเชื่อมโยงด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก ( $lw_{S^2,S^1}^{2,1} = S^2 = 1, K, S^2$ ) จะทำการคำนวณสัญญาณอินพุตของนิเวรอนเซลล์ในชั้นซ่อนที่ 2 ได้จากสมการ

$$net_{S^2} = b_{S^2}^2 + \sum_{S^1=1}^{S^1} lw_{S^2,S^1}^{2,1} a^1 \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นเพื่อคำนวณสัญญาณเอาต์พุต ( $a^2$ ) ในชั้นซ่อนที่ 2

$$a^2 = f(\text{net}_{S^2}) \quad (3.8)$$

เมื่อ สัญญาณเอาต์พุต ( $a^2$ ) ในชั้นซ่อนที่ 2 เอาต์พุตที่ได้ส่งต่อไปยังชั้นเอาต์พุต โดยแต่ละนิวรอนในชั้นเอาต์พุต ถูกเชื่อมโยงด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก ( $lw_{S^3, S^2} = S^3 = 1, K, S^3$ ) จะทำการคำนวณสัญญาณอินพุตของนิวรอนเซลล์ในชั้นเอาต์พุต ได้จากสมการ

$$\text{net}_{S^3} = b_{S^3} + \sum_{S^2=1}^{S^2} lw_{S^3, S^2} a^2 \quad (3.9)$$

ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นเพื่อคำนวณสัญญาณเอาต์พุต ( $a^3$ ) ในชั้นเอาต์พุต

$$a^3 = f(\text{net}_{S^3}) \quad (3.10)$$

## 2. แพร่ค่าย้อนกลับของค่าผิดพลาด (Back-propagation of error)

ในแต่ละนิวรอนของชั้นเอาต์พุต ค่าผิดพลาดของโครงข่ายจะเป็นผลต่างระหว่างเอาต์พุตเป้าหมายกับเอาต์พุตของโครงข่าย ( $t^3 - a^3$ ) ค่าผิดพลาดที่ได้จะถูกส่งกลับเข้ามายังโครงข่ายในรูปของสัญญาณค่าผิดพลาด (error signal) การหาสัญญาณค่าผิดพลาดที่ชั้นเอาต์พุต หาได้จากสมการ

$$\delta^3 = (t^3 - a^3) f'(\text{net}_{S^3}) \quad (3.11)$$

คำนวณค่าถ่วงน้ำหนักที่เกี่ยวข้อง (ใช้เพื่อปรับปรุ้งค่าถ่วงน้ำหนัก  $lw_{S^3, S^2}$  หลังจากนี้) โดยที่  $\alpha$  คือ อัตราการเรียนรู้ (Learning rate)

$$\Delta lw_{S^3, S^2}^{3,2} = \alpha \delta^3 a^2 \quad (3.12)$$

คำนวณค่าไบอัส (bias) ที่เกี่ยวข้อง (ใช้เพื่อปรับปรุง  $b_{S^3}$  หลังจากนี้)

$$\Delta b_{S^3} = \alpha \delta^3 \quad (3.13)$$

และส่ง  $\delta^3$  ไปที่ชั้นซ่อนที่ 2

ในแต่ละนิเวรอนของชั้นซ่อนที่ 2 การหาสัญญาณค่าผิดพลาดที่ชั้นซ่อนที่ 2 หาได้จากสมการ

$$\delta^2 = \sum_{S^3=1}^{S^3} \delta^3 lw_{S^3, S^2}^{3,2} f'(net_{S^2}) \quad (3.14)$$

คำนวณค่าถ่วงน้ำหนักที่เกี่ยวข้อง (ใช้เพื่อปรับปรุงค่าถ่วงน้ำหนัก  $lw_{S^2, S^1}^{2,1}$  หลังจากนี้)

$$\Delta lw_{S^2, S^1}^{2,1} = \alpha \delta^2 a^1 \quad (3.15)$$

คำนวณค่าไบอัส (bias) ที่เกี่ยวข้อง (ใช้เพื่อปรับปรุง  $b_{S^2}$  หลังจากนี้)

$$\Delta b_{S^2} = \alpha \delta^2 \quad (3.16)$$

และส่ง  $\delta^2$  ไปที่ชั้นซ่อนที่ 1

ในแต่ละนิเวรอนของชั้นซ่อนที่ 1 การหาสัญญาณค่าผิดพลาดที่ชั้นซ่อนที่ 1 หาได้จากสมการ

$$\delta^1 = \sum_{S^2=1}^{S^2} \delta^2 lw_{S^2, S^1}^{2,1} f'(net_{S^1}) \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณค่าถ่วงน้ำหนักที่เกี่ยวข้อง (ใช้เพื่อปรับปรุ่ค่าถ่วงน้ำหนัก  $iw_{S^1,R}^{1,1}$  หลังจากนั้น)

$$\Delta iw_{S^1,R}^{1,1} = \alpha \delta^1 P_R \quad (3.18)$$

คำนวณค่าไบอัส (bias) ที่เกี่ยวข้อง (ใช้เพื่อปรับปรุ่  $b_{S^1}^1$  หลังจากนั้น)

$$\Delta b_{S^1}^1 = \alpha \delta^1 \quad (3.19)$$

### 3. ขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัส

ถ้าหากมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้น ค่าผิดพลาดที่คำนวณได้จะถูกนำมาใช้ในการปรับน้ำหนักเพื่อให้โครงข่ายได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง การปรับน้ำหนักสำหรับแต่ละนิวรอนในชั้นเอาต์พุต คำนวณได้จาก

$$lw_{S^3,S^2}^{3,2} (new) = lw_{S^3,S^2}^{3,2} (old) + \Delta lw_{S^3,S^2}^{3,2} \quad (3.20)$$

ส่วนการปรับน้ำหนักของชั้นซ่อนที่ 2 การทำงานจะเป็นเช่นเดียวกับสมการที่ 4.16 แต่ตัวแปรต่างๆ จะเป็นของชั้นซ่อนอยู่ สำหรับแต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$lw_{S^2,S^1}^{2,1} (new) = lw_{S^2,S^1}^{2,1} (old) + \Delta lw_{S^2,S^1}^{2,1} \quad (3.21)$$

สำหรับแต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1

$$iw_{S^1,R}^{1,1} (new) = iw_{S^1,R}^{1,1} (old) + \Delta iw_{S^1,R}^{1,1} \quad (3.22)$$

การปรับค่าถ่วงน้ำหนักจะปรับทีละชั้นจากชั้นเอาต์พุตกลับไปยังชั้นอินพุต เมื่อเสร็จสิ้นก็จะกลับสู่ส่วนของป้อนไปข้างหน้าอีกครั้ง เพื่อหาค่าเอาต์พุตของโครงข่ายใหม่มาเปรียบเทียบกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเอาต์พุตเป้าหมาย และดำเนินการปรับค่าถ่วงน้ำหนักในส่วนของแพร่ค่าย้อนกลับเช่นนี้ สลับกัน ไป โดยวัฏจักรของการคำนวณหาค่าความผิดพลาดและการปรับน้ำหนักจะคงดำเนินต่อไป จนกระทั่งค่าความผิดพลาดต่ำกว่าที่กำหนดไว้ค่าหนึ่งแล้วจึงหยุดกระบวนการ ค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้ จะเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับทุกคู่ของอินพุตและค่าเป้าหมาย ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ การคำนวณหาความผิดพลาดรวมของตัวอย่าง หาได้จากค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดยกกำลังสอง (Mean-square error, MSE) ระหว่างคำตอบที่แท้จริง ( $t_i^3$ ) กับผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียม ( $a_i^3$ ) ในสมการ (3.23)

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i^3 - a_i^3)^2 \quad (3.23)$$

โดยที่  $N$  = จำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอน

ในขั้นตอนการปรับน้ำหนักที่กล่าวมาข้างต้น เป็นหลักการพื้นฐานแต่ลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสของการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิด Feed-forward Neural Networks โดยใช้ Neural Network Toolbox นั้นมีอยู่หลายวิธี อาทิเช่น Levenberg-Maquardt algorithm, Resilient Backpropagation, Conjugate Gradient เป็นต้น แต่ละวิธีก็จะมีประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการฝึกสอนแตกต่างกัน ตามที่ระบุไว้ใน Neural Network Toolbox User's Guide นั้น Levenberg-Maquardt algorithm มีประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการฝึกสอนสูงที่สุดใน การศึกษานี้จึงได้นำเอาลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสวิธีนี้มาใช้ โดยมีลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส ดังสมการที่ 3.24

$$x_{(new)} = x_{(old)} + \Delta x = x_{(old)} + [J^T \cdot J + \alpha I]^{-1} \cdot J^T \cdot e \quad (3.24)$$

โดยที่  $x$  คือ ค่าถ่วงน้ำหนัก ( $w$ ) และค่าไบแอส ( $b$ )

$J$  คือ จาคอบีเยนเมตริกซ์ ( Jacobian matrix ) ของอนุพันธ์ของค่าผิดพลาด(แต่ละค่า) ต่อค่า  $x$  (แต่ละค่า)

$J^T$  คือ Transpose matrix ของ  $J$

$e$  คือ เมตริกซ์ของค่าผิดพลาด (Error) ระหว่างคำตอบ (Target,  $t^3$ ) กับค่าที่โครงข่ายประสาทเทียมคำนวณได้ (Answer,  $a^3$ )

$I$  คือ Identity matrix

$$\text{จาโคเบียนเมตริกซ์ของ (w) } J(w) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial w_{1,1}} & \frac{\partial e_1}{\partial w_{1,2}} & \dots & \frac{\partial e_1}{\partial w_{1,s^2}} \\ \frac{\partial e_2}{\partial w_{2,1}} & \frac{\partial e_2}{\partial w_{2,2}} & \dots & \frac{\partial e_2}{\partial w_{2,s^2}} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial e_{s^3}}{\partial w_{s^3,1}} & \frac{\partial e_{s^3}}{\partial w_{s^3,2}} & \dots & \frac{\partial e_{s^3}}{\partial w_{s^3,s^2}} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$\text{จาโคเบียนเมตริกซ์ของค่า (b) } J(b) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial b_1} \\ \frac{\partial e_2}{\partial b_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial e_{s^3}}{\partial b_{s^3}} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$\text{เมตริกซ์ของค่าผิดพลาด} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_{s^3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1^3 - a_1^3 \\ t_2^3 - a_2^3 \\ \vdots \\ t_{s^3}^3 - a_{s^3}^3 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

โครงข่ายประสาทเทียมที่ฝึกสอนด้วยกฎการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับนั้น จะมีจำนวนนิวรอนในชั้นข้อมูลอินพุต และชั้นข้อมูลเอาต์พุตทุกชั้น ซึ่งเท่ากับจำนวนของอินพุต และเอาต์พุตของปัญหานั้นเอง ส่วนจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนนั้นสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสม และไม่มีจำนวนที่เป็นสูตรสำเร็จ ดังนั้นในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจึงต้องมีการปรับเปลี่ยนจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน เพื่อหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ให้ค่าผิดพลาดระหว่างระหว่างคำตอบที่แท้จริงกับผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียมต่ำที่สุด (มีประสิทธิภาพสูงที่สุด) จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนนอกจากจะมีผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมแล้ว ยังมีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนอีกด้วย โครงข่ายที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนน้อย จะใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยกว่าโครงข่ายที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนมาก เมื่อฝึกสอนด้วยเงื่อนไขเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตาม ไม่สามารถสรุปได้ว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนมากจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่ทำการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเอาระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับแรงดัน 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และ ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ระดับแรงดัน 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มาให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้พฤติกรรมของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้งสอง และ ให้คำตอบเป็นค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ซึ่งมีรายละเอียดของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้งสองดังต่อไปนี้

### 4.1 ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต แห่งประเทศไทย

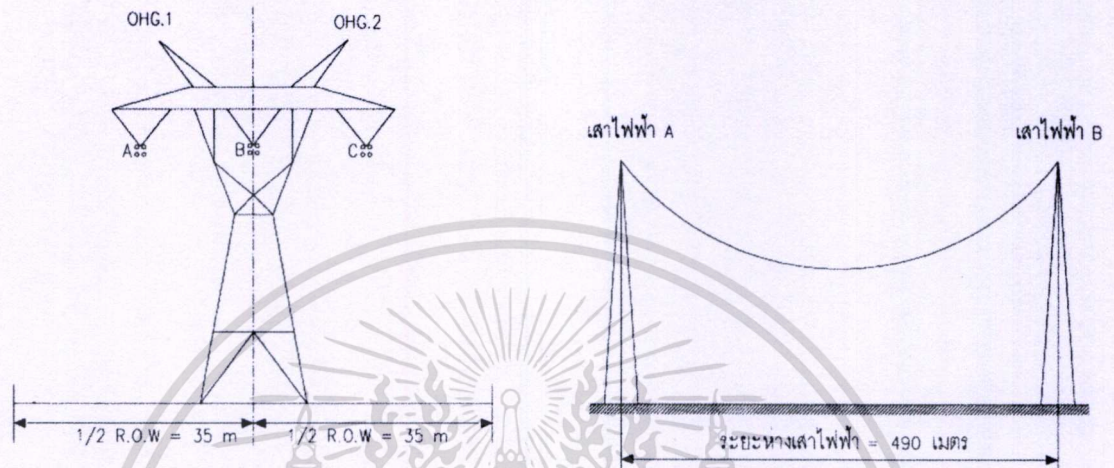
สายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับแรงดัน 500kV ของการ ไฟฟ้าฝ่ายผลิตเป็นสายส่งไฟฟ้าที่มีระดับของแรงดันในการส่งจ่ายสูงสุดในประเทศไทย ปกติแล้วระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามระดับของแรงดัน ไฟฟ้าที่ส่งจ่าย ด้วยเหตุนี้เองสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500kV จึงมีอัตราการกำเนิดของสนามไฟฟ้ามากกว่าสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับแรงดันอื่นๆ ค่าของสนามไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งต่างๆ ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะเป็นสนามไฟฟ้าที่กระจายอยู่บนพื้นดิน ซึ่งปกติแล้วจะพิจารณาที่ระดับความสูง 1 เมตรเหนือพื้นดิน[3]-[4] และค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ระดับความสูง 1 เมตรเหนือพื้นดินนี้จะเป็นค่าที่นำไปวิเคราะห์หาผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อไป



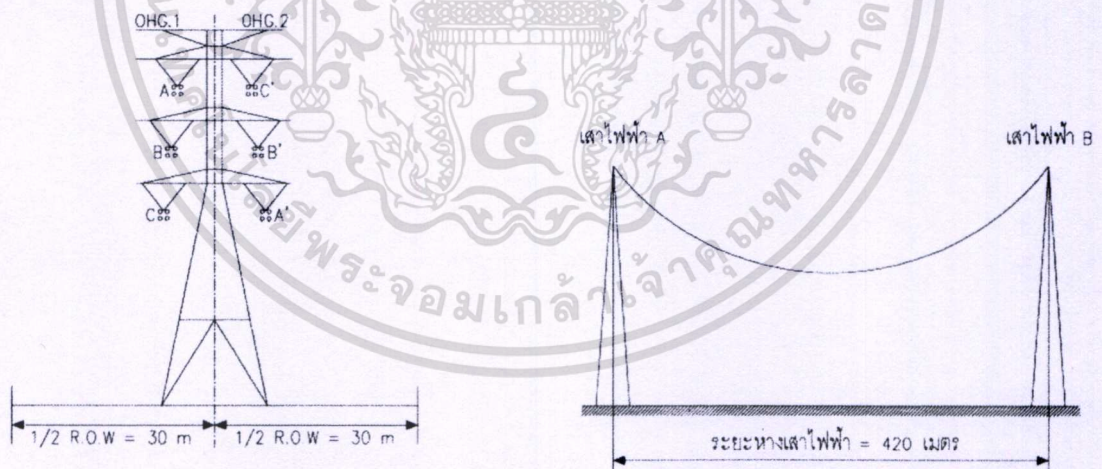
รูปที่ 4.1 ลักษณะสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500kV ชนิดวงจรเดี่ยวและวงจรคู่ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต

ปัจจุบันสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับแรงดัน 500kV ในประเทศไทยมีจำนวนมากกว่า 2,200 วงจร-กิโลเมตร[7] สำหรับสายส่งที่เลือกวิเคราะห์จะเป็นสายส่ง 500 kV ที่ใช้สายตัวนำควม 4-เส้น ขนาด 795 MCM ACSR/GA และ ขนาด1272 MCM ACSR/GA ซึ่งมีทั้งชนิดวงจรเดี่ยว (Single เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Circuit) และชนิดวงจรคู่ ( Double Circuit) ในรูปที่ 4.1 เป็นลักษณะเสาโครงเหล็กของสายส่ง 500kV ชนิดวงจรเดี่ยวและชนิดวงจรคู่ ซึ่งนอกจากจะมีความแตกต่างกันทางโครงสร้างแล้วยังมีความแตกต่างกันในเรื่องของระยะความกว้างของเขตเดินสายไฟฟ้า (Right-of-Way : R.O.W.) ตามรายละเอียดที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 เสาไฟฟ้าและระยะห่างเสาไฟฟ้ามาตรฐานของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500kV วงจรเดี่ยว



รูปที่ 4.3 เสาไฟฟ้าและระยะห่างเสาไฟฟ้ามาตรฐานของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500kV วงจรคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### ตารางที่ 4.1 ข้อมูลทั่วไปของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500kV

ชื่อสายส่ง	ระยะห่างเสาไฟฟ้า มาตรฐาน	ความกว้างของ เขตเดินสายไฟฟ้า
สายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยว	490 เมตร	ข้างละ 35 เมตร
สายส่ง 500 kV วงจรคู่	420 เมตร	ข้างละ 30 เมตร

โดยมีข้อมูลจำเพาะของสายส่งดังนี้

- โครงสร้างเสาส่ง (Tower) แบบ SL tangent  $3^{\circ}$
- จำนวนตัวนำต่อเฟส 4 ตัวนำ (4 bundles)
- ประเภทสาย ACSR 795 MCM ACSR/GA , 1272 MCM ACSR/GA
- ประเภทของสายล่อฟ้า (Over head ground wire) 3/8 inch EHS GALV (St7)
- ความต้านทานของสายตัวนำ 0.0716 โอห์มต่อกิโลเมตร
- ความต้านทานของสายล่อฟ้า 4.19 โอห์มต่อกิโลเมตร
- ระยะห่างของตัวนำระหว่างเฟส 10.65 เมตร
- ระยะห่างของเสาส่งระหว่างต้น (Span) 490 เมตร สำหรับสายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยว และ 420 เมตรสำหรับ สายส่ง 500 kV วงจรคู่
- ความต้านทานของดิน 100 โอห์ม. เมตร

#### 4.2 ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

สายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับแรงดัน 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีแบบมาตรฐานที่นิยมใช้งานอยู่ 4 แบบ คือ

1. Single Circuit Single Conductor Tangent Structure 1 : SS\_TG1
2. Single Circuit Double Conductor Tangent Structure 1 : SD\_TG1
3. Double Circuit Single Conductor Tangent Structure 1 : DS\_TG1
4. Double Circuit Double Conductor Tangent Structure 1 : DD\_TG1

ซึ่งเป็นสายส่งที่มีใช้งานจริง ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

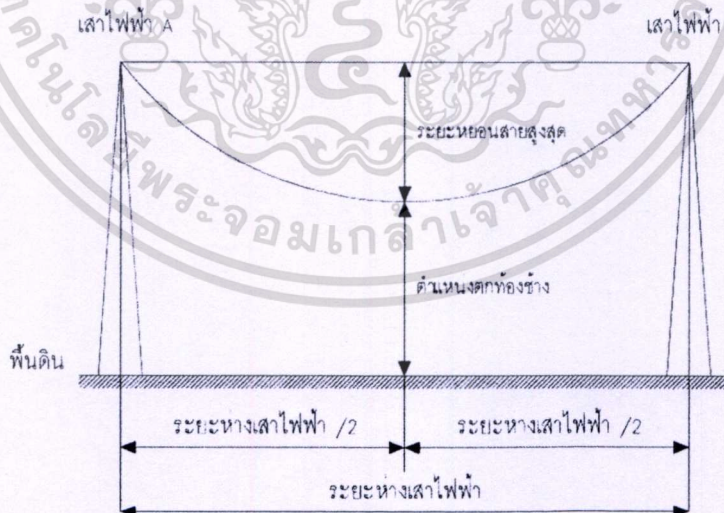


โดยมีข้อมูลจำเพาะของสายส่งดังนี้

- จำนวนตัวนำต่อเฟส 1 ตัวนำ (1 bundle) และ 2 ตัวนำ (2 bundle) สำหรับวงจรเดี่ยว และคู่ตามลำดับ
- ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร
- ระยะห่างระหว่าง Bundle 20 เซ็นติเมตร
- ความต้านทานของดิน 100 โอห์ม. เมตร
- แต่ละวงจร จะประกอบด้วยสายตัวนำ 3 เฟส แต่ละเฟสมีมุมของกระแสห่างกัน 120 องศา
- ไม่คิดระบบจำหน่ายแรงสูงแรงดัน 22, 33 kV และระบบจำหน่ายแรงต่ำแรงดัน 230/380 โวลต์

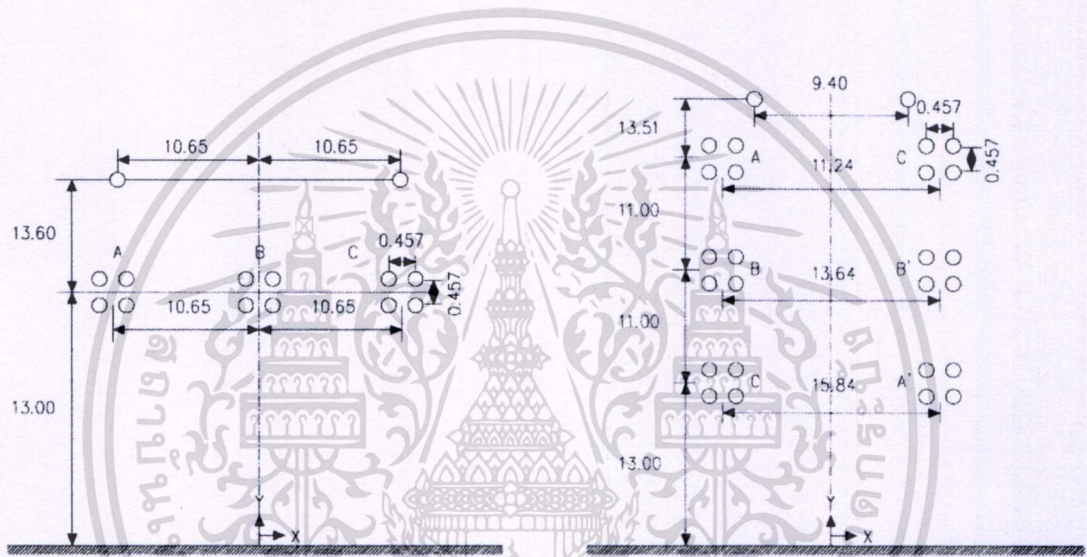
### 4.3 สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสูงสุด

ตามทฤษฎีแล้วสนามไฟฟ้าบนพื้นดินที่เกิดขึ้นบริเวณใต้แนวสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะมีค่าความเข้มสูงสุดในบริเวณที่ตำแหน่งของสายตัวนำอยู่ใกล้กับพื้นดินมากที่สุด นั่นก็คือตำแหน่งคกท้องข้างของสายส่ง หรือที่เราเรียกว่า Midspan (ตามรูปที่ 4.6) ที่ตำแหน่งนี้สายตัวนำจะมีระยะหย่อนตัวสูงสุด (maximum sag) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการที่ต้องการทราบว่าสายส่งไฟฟ้าแรงสูงมีการกระจายของสนามไฟฟ้าออกมาสูงสุดเป็นปริมาณเท่าใด ก็สามารถวิเคราะห์สนามไฟฟ้าได้ ณ ตำแหน่งนี้



รูปที่ 4.6 ตำแหน่งที่วิเคราะห์หาสนามไฟฟ้าสูงสุด

ในการวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นสูงสุด ณ ตำแหน่งตักทองช้างนี้ จะพิจารณาให้ตัวนำไฟฟ้าอยู่สูงจากพื้นดินเป็นระยะเท่ากับระยะความปลอดภัยทางไฟฟ้าต่ำสุด (สำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ระยะความปลอดภัยทางไฟฟ้าในแนวตั้งต่ำสุดสำหรับพื้นที่ทั่วไปจะมีค่าเท่ากับ 13.0 เมตร สำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 115 kV ระยะความปลอดภัยทางไฟฟ้าในแนวตั้งต่ำสุดสำหรับพื้นที่ทั่วไปจะมีค่าเท่ากับ 6.0 เมตร) นอกจากนี้ระบบของแรงดันไฟฟ้าให้ถือว่ามีกระจายโหลดที่สมดุลเนื่องจากในทางปฏิบัติแล้วจะมีการเปลี่ยนแปลงในส่วนนี้บ่อยมาก และตำแหน่งของตัวนำ ณ ตำแหน่งตักทองช้างในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งของตัวนำ ณ ตำแหน่งตักทองช้างของสายส่ง

#### 4.4 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์

##### 4.4.1 ระบบไฟฟ้าแรงสูง 500 kV การไฟฟ้าฝ่ายผลิต แห่งประเทศไทย

ในการจำลองพฤติกรรมของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV เพื่อศึกษาหาสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกัน จึงได้มีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่มี ผลเกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- ประเภทของการจัดเรียงลำดับเฟส 6 ประเภท ได้แก่ ABC, ACB, BAC, BCA, CAB และ CBA
- ระยะความสูงของสายส่งจากพื้นดิน ได้แก่ 13, 18, 23, 28 และ 33 เมตร
- ขนาดตัวนำไฟฟ้า ได้แก่ 795 และ 1272 MCM
- ตำแหน่งเดินสายไฟที่เกิดสนามไฟฟ้า -35, -30, -25, ..., 25, 30, 35 เมตร (ช่วงละ 5 เมตร) สำหรับวงจรเดี่ยว และ -30, -25, -20, ..., 20, 25, 30 เมตร (ช่วงละ 5 เมตร) สำหรับวงจรคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการจำลองในระบบสายส่งไฟฟ้าชนิดวงจรถู่ ได้กำหนดให้การจัดเรียงลำดับเฟสวงจรหนึ่งมีการจัดเรียงลำดับแบบ ABC และส่วนอีกวงจรมีการจัดเรียงลำดับเฟสได้ทั้งหมด 6 ประเภท เพื่อทำการศึกษาลักษณะการสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

#### 4.4.2 ระบบไฟฟ้าแรงสูง 115 kV การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ในการจำลองพฤติกรรมของของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 115 kV เพื่อศึกษาหาสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกัน จึงได้มีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่มี ผลเกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- จำนวนตัวนำต่อเฟส ได้แก่ 1 ตัวนำ (1 bundle) และ 2 ตัวนำ (2 bundles)
- ประเภทของการจัดเรียงลำดับเฟส 6 ประเภท ได้แก่ ABC, ACB, BAC, BCA, CAB และ CBA
- ระยะความสูงของสายส่งจากพื้นดิน ได้แก่ 6, 11 และ 16 เมตร
- ขนาดสายไฟฟ้า 115kV ได้แก่ 240, 300 และ 400 เมตร<sup>2</sup>
- ตำแหน่งเดินสายไฟที่เกิดสนามไฟฟ้า -25, -20, -15, ..., 15, 20, 25 เมตร (ช่วงละ 5 เมตร)

สำหรับการจำลองในระบบสายส่งไฟฟ้าชนิดวงจรถู่ แบบ DD\_TG1 และ DS\_TG1 ได้กำหนดให้การจัดเรียงลำดับเฟสวงจรหนึ่งมีการจัดเรียงลำดับแบบ ABC และส่วนอีกวงจรมีการจัดเรียงลำดับเฟสได้ทั้งหมด 6 ประเภท เพื่อทำการศึกษาลักษณะการสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

## บทที่ 5

### การลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้า

#### 5.1 กล่าวนำ

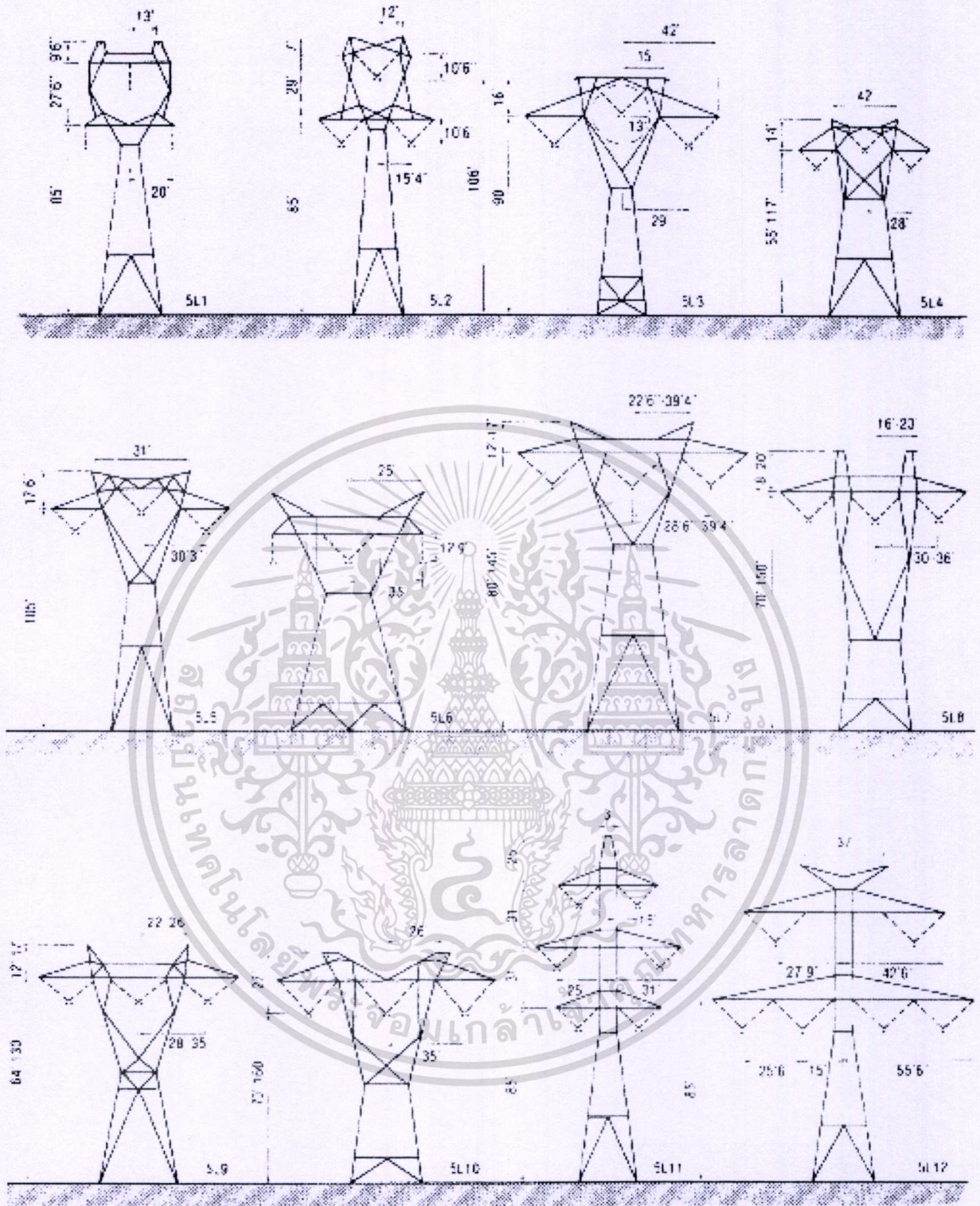
การลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงวิธีการหนึ่งก็คือ การลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่กระจายออกมาจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงลง ซึ่งความเข้มของสนามไฟฟ้านี้จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามแรงดันไฟฟ้า ลักษณะโครงสร้างของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง และสิ่งแวดล้อมต่างๆ บริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เป็นต้น จากปัจจัยต่างๆ ดังกล่าวจะเห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้าของสายส่งจะขึ้นอยู่กับภาระทางโหลดของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงซึ่งยากต่อการควบคุม ทำให้การลดความเข้มของสนามไฟฟ้าโดยทั่วไปจะพิจารณาไปที่การออกแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยพิจารณาจากลักษณะ โครงสร้างของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง นอกจากนั้นสิ่งแวดล้อมต่างๆ บริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูงก็มีผลทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่าลดลงด้วย

#### 5.2 การลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้า[4]

สนามไฟฟ้าที่กระจายออกมาจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามลักษณะ โครงสร้างของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เช่น ลักษณะของการจัดวางตัวนำ (line configuration) ความสูงของสายส่ง (line height) การจัดเรียงลำดับของเฟส (phase sequences) ขนาดของสายไฟฟ้า (conductor dimension) และ ระยะห่างระหว่างเฟส (phase spacing) เป็นต้น ซึ่งการออกแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงให้มีค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าส่งผลกระทบต่อสิ่งต่างๆ ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงน้อยที่สุดนั้น จำเป็นต้องพิจารณาเลือก โครงสร้างของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่เหมาะสม ด้วยการพิจารณาจากลักษณะ โครงสร้างของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงดังนี้

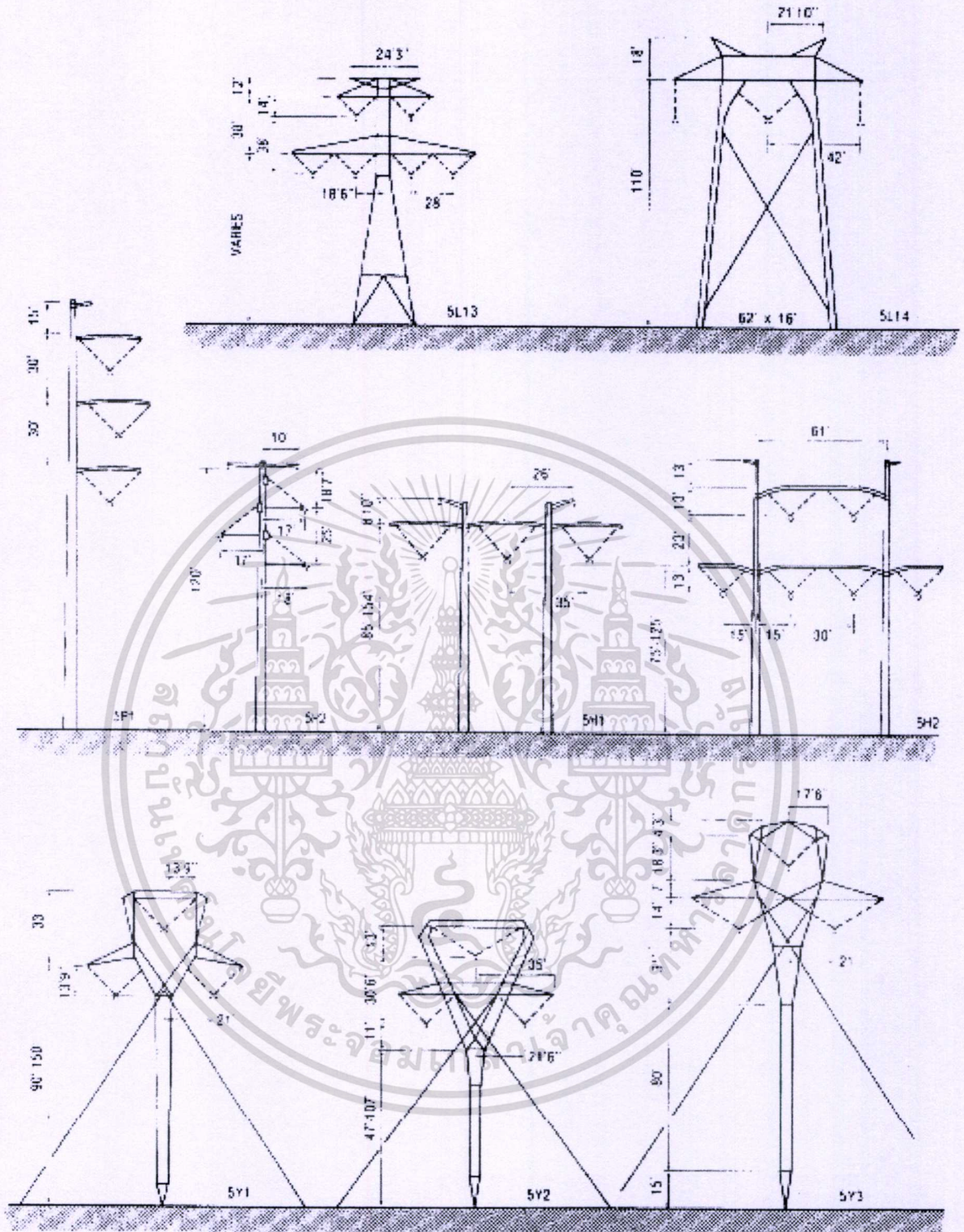
##### 5.2.1 ลักษณะของการจัดวางตัวนำ (line configuration)

ลักษณะของการจัดวางตัวนำไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงโดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ คือ การจัดวางตัวนำแบบสามเหลี่ยม (delta configuration) การจัดวางตัวนำแบบแนวนอน (flat configuration) และ การจัดวางตัวนำแบบแนวตั้ง (vertical configuration)



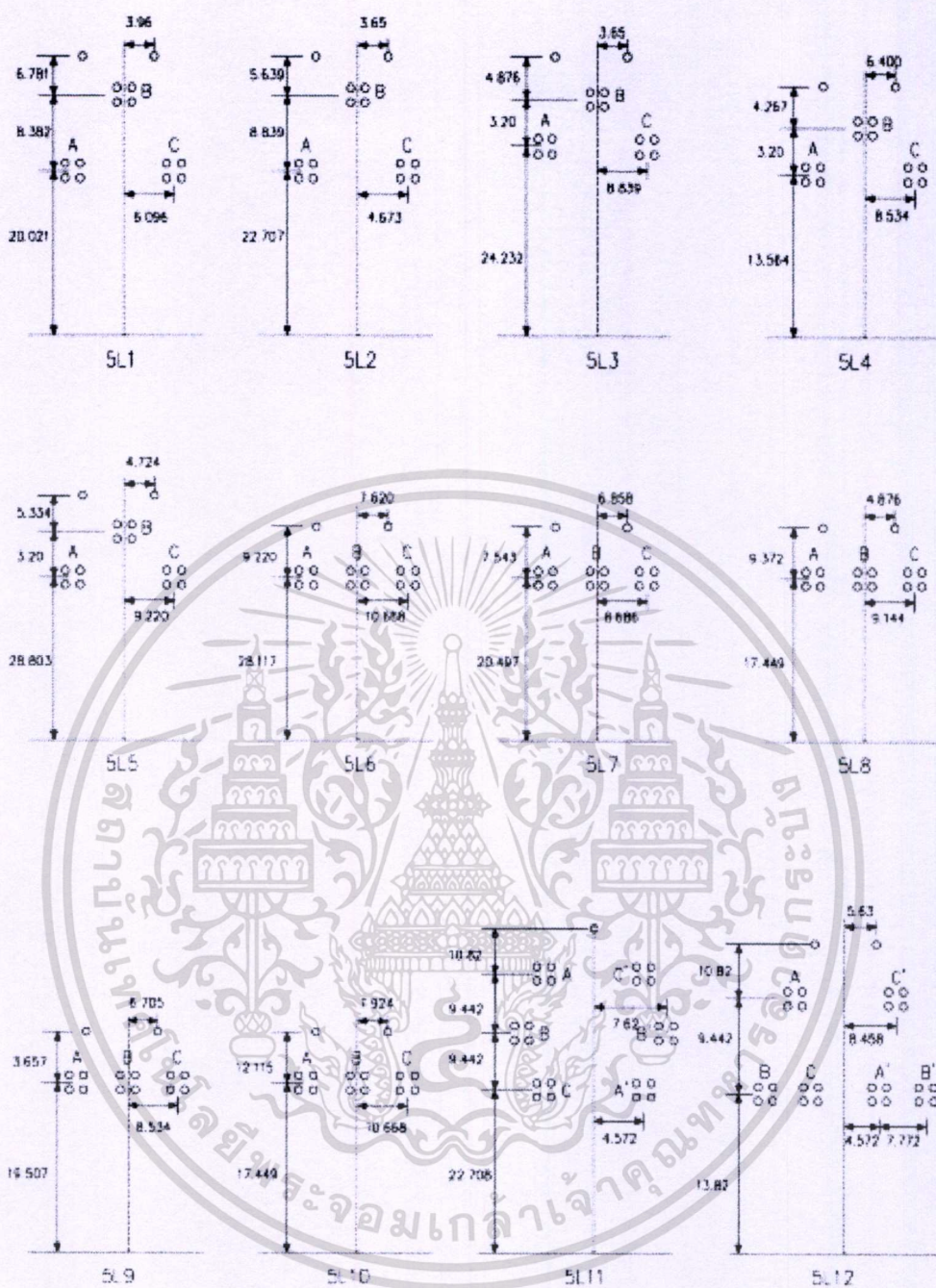
รูปที่ 5.1 ลักษณะเสาไฟฟ้าในระบบแรงดัน 500 kV [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 ลักษณะเสาไฟฟ้าในระบบแรงดัน 500kV[10] (ต่อ)

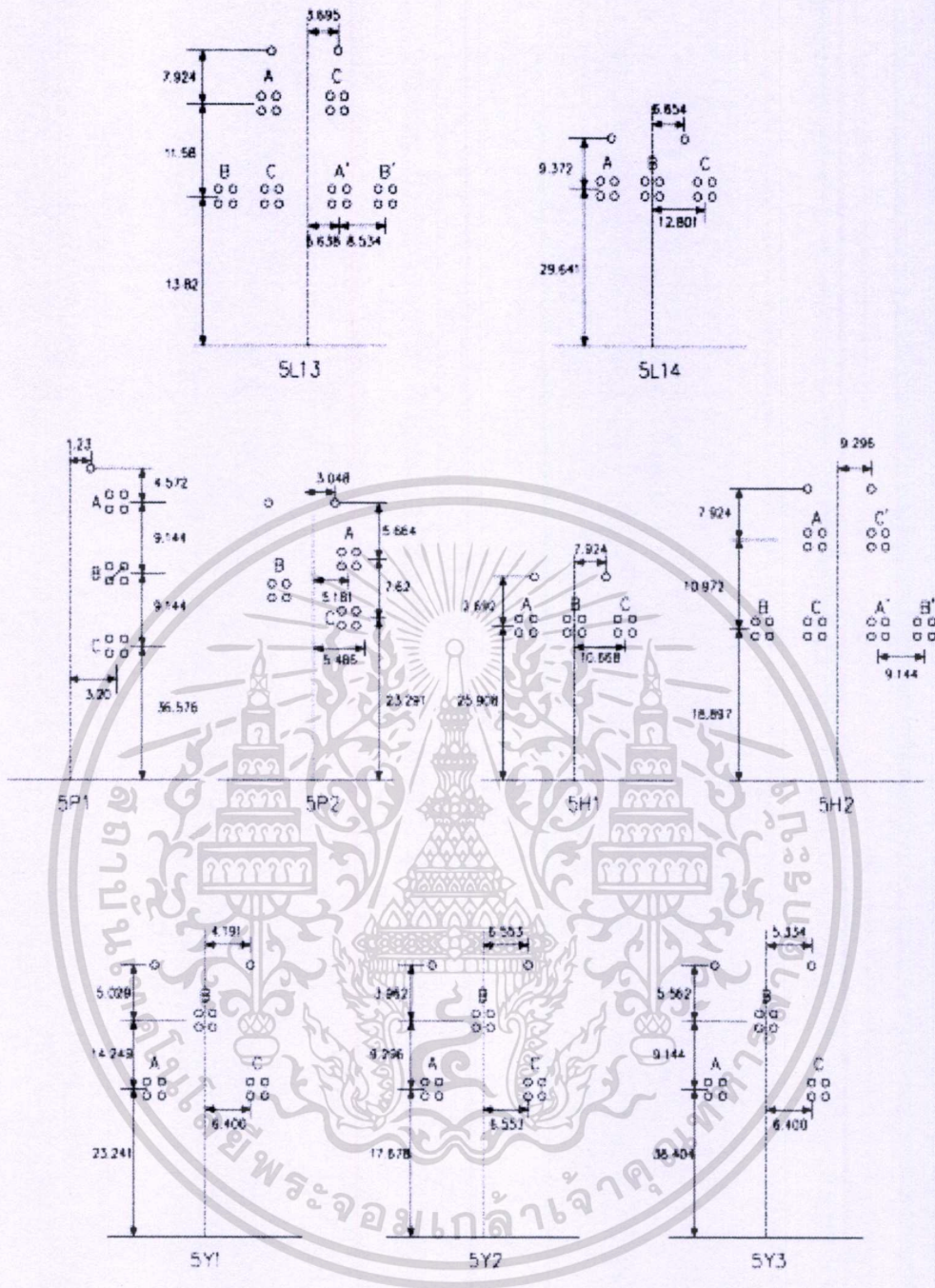
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หมายเหตุ : ระยะต่างๆ ที่แสดงมีหน่วยเป็นเมตร

รูปที่ 5.3 ตำแหน่งตัวของเสาไฟฟ้าในระบบแรงดัน 500 kV ตามรูปที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



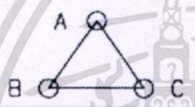
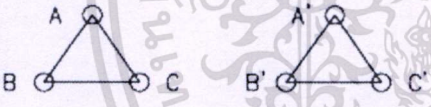
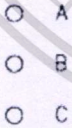
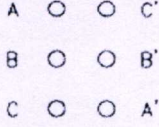
หมายเหตุ : ระยะต่างๆ ที่แสดงมีหน่วยเป็นเมตร

รูปที่ 5.4 ตำแหน่งตัวนำของเสาไฟฟ้าในระบบแรงดัน 500 kV ตามรูปที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งลักษณะการจัดวางตัวนำทั้ง 3 รูปแบบจะส่งผลให้ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่กระจายออกมาจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงมีรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป จากรูปที่ 5.1 และ 5.2 เป็นเสาไฟฟ้าของสายส่งในระบบแรงดัน 500kV ที่ใช้งานอยู่ทั่วไปและมีลักษณะของการจัดวางตัวนำในรูปแบบต่างๆ การวิเคราะห์ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากเสาไฟฟ้ารูปแบบต่างๆ จะเป็นข้อมูลอย่างหนึ่งเพื่อช่วยในการตัดสินใจเลือกรูปแบบของเสาไฟฟ้าในการออกแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงให้มีความเข้มสนามไฟฟ้าเป็นไปตามความต้องการของผู้ออกแบบ ในตารางที่ 5.1 เป็นลักษณะการจัดวางตัวนำของเสาไฟฟ้าแบบต่างๆ

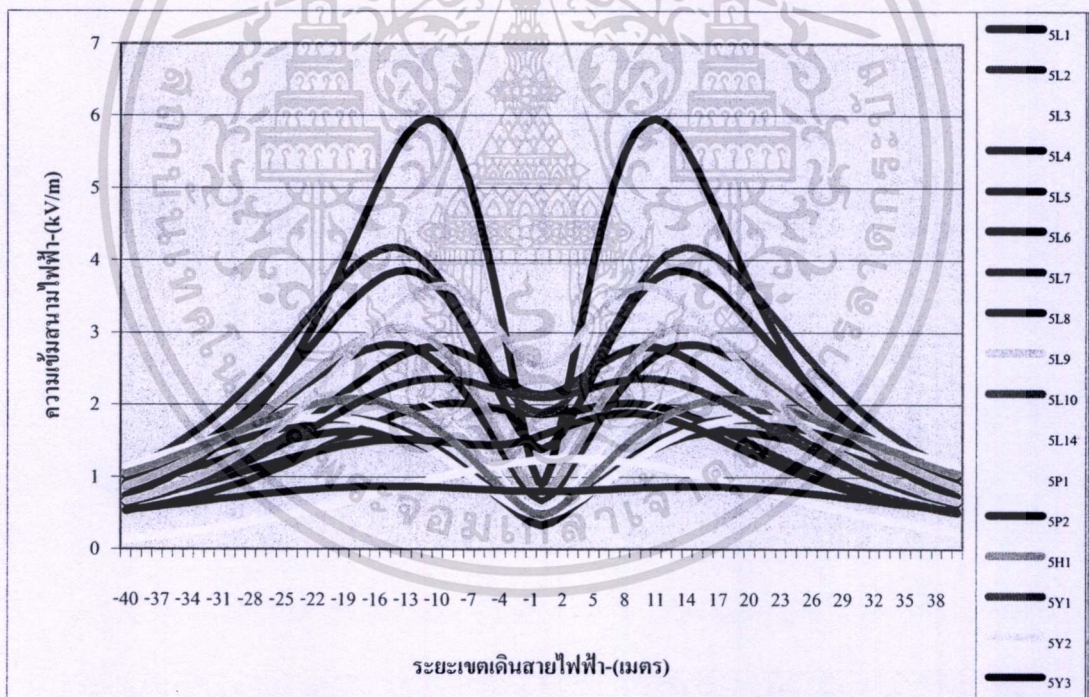
ตารางที่ 5.1 รูปแบบของการจัดวางตัวนำและเฟสของเสาไฟฟ้าตามรูปที่ 5.1 และ 5.2

รูปแบบการจัดวางตัวนำ	หมายเลขเสาไฟฟ้า
1. การจัดวางตัวนำแบบสามเหลี่ยม ( 1 วงจร ) 	5L1,5L2,5L3,5L4,5L5,5P2,5Y1,5Y2 และ 5Y3
2. การจัดวางตัวนำแบบสามเหลี่ยม ( 2 วงจร ) 	5L12, 5L13, และ 5H2
3. การจัดวางตัวนำแบบแนวตั้ง ( 1 วงจร ) 	5P1
4. การจัดวางตัวนำแบบแนวตั้ง ( 2 วงจร ) 	5L11

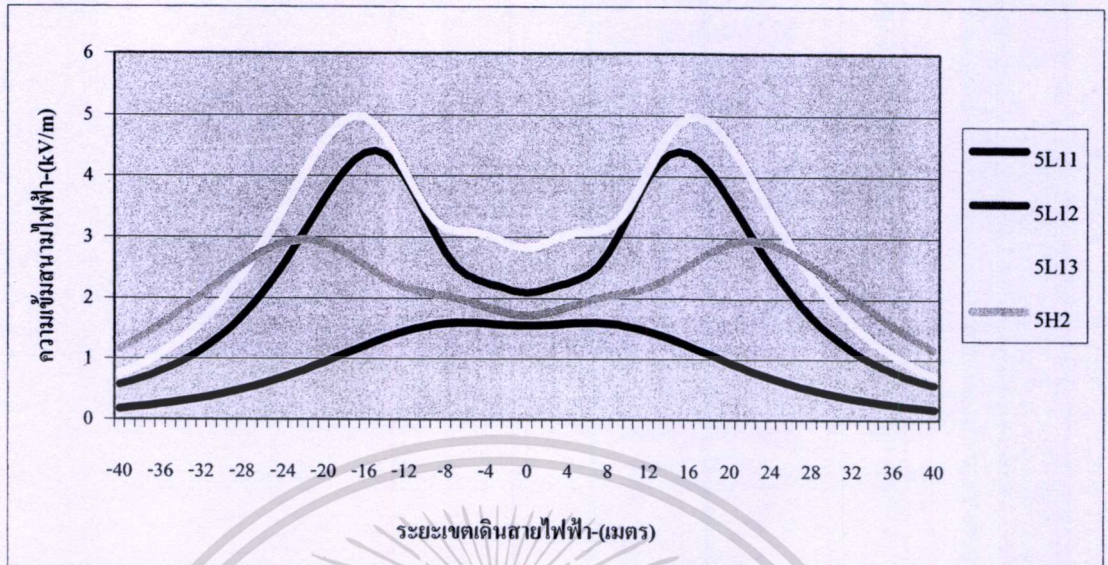
ตารางที่ 5.1 รูปแบบของการจัดวางตัวนำและเฟสของเสาไฟฟ้าตามรูปที่ 5.1 และ 5.2 (ต่อ)

รูปแบบการจัดวางตัวนำ	หมายเลขเสาไฟฟ้า
<p>5.การจัดวางตัวนำแบบแนวนอน</p> <p style="text-align: center;">○   ○   ○ A   B   C</p>	5L6,5L7,5L8,5L9,5L10,5L14 และ 5H1

จากผลจากการวิเคราะห์ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของการจัดวางตัวนำในรูปแบบต่างๆ ของสายส่งระบบแรงดันไฟฟ้า 500 kV ตามรูปที่ 5.1 และ 5.2 โดยใช้โปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW) จะผลการวิเคราะห์ดังนี้



รูปที่ 5.5 ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของเสาไฟฟ้า 500 kV วงจรเดี่ยวตามรูปที่ 5.1 และ 5.2

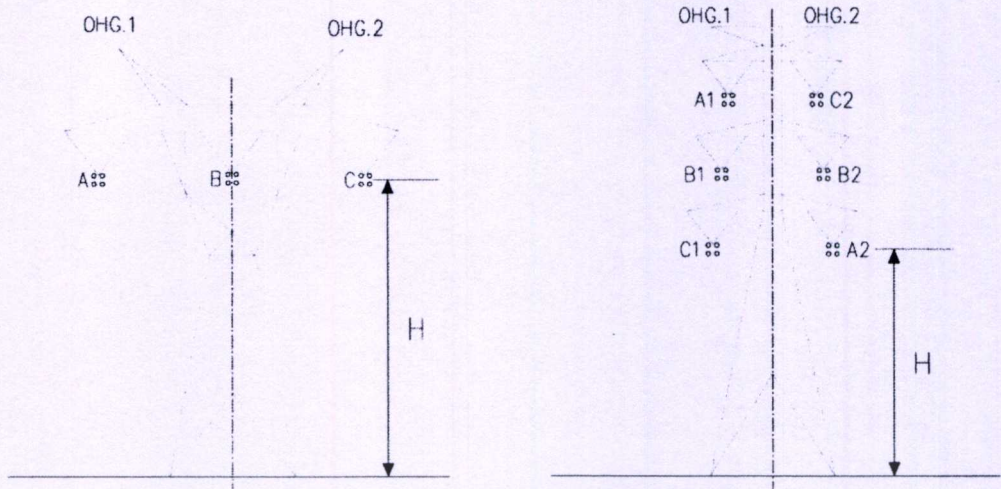


รูปที่ 5.6 ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของเสาไฟฟ้า 500 kV วรรณยุกต์ตามรูปที่ 5.1 และ 5.2

รูปที่ 5.5 และ 5.6 เป็นผลจากการวิเคราะห์ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของการจัดวางตัวนำในรูปแบบต่างๆ ของสายส่งระบบแรงดันไฟฟ้า 500 kV ตามรูปที่ 5.1 และ 5.2 ในการวิเคราะห์ได้กำหนดให้สายไฟฟ้าเป็นแบบควมจำนวน 4 เส้นขนาด 1272 MCM ACSR/GA (CONDOR) โดยมีระยะห่างของตัวนำและรูปแบบของการจัดเรียงลำดับเฟส ตามรูปที่ 5.3 และ 5.4

### 5.2.2 ความสูงของสายส่ง (line height)

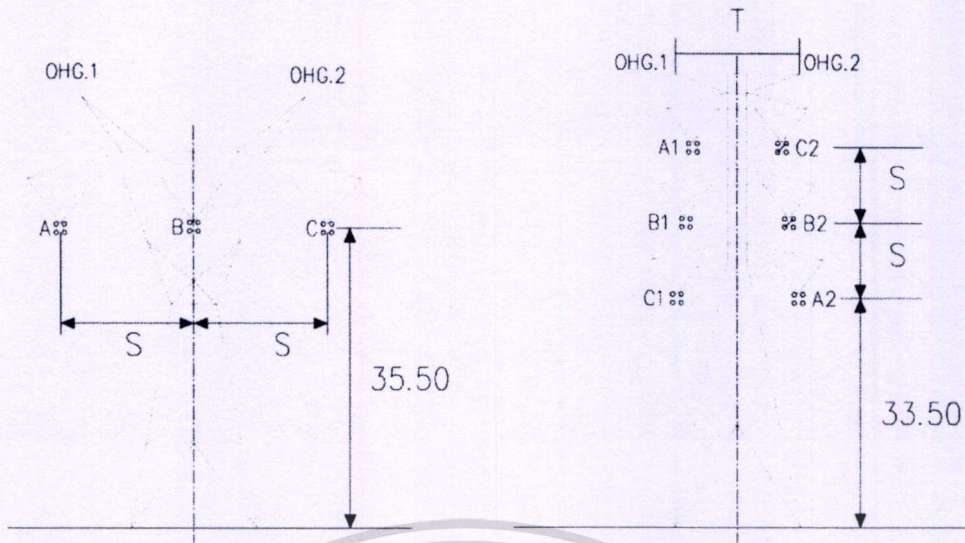
การกำหนดความสูงให้กับสายส่ง โดยทั่วไปจะพิจารณาตามลักษณะของพื้นที่ที่สายส่งไฟฟ้าแรงสูงพาดผ่าน ซึ่งในบางครั้งอาจจะมีผลกระทบจากสนามไฟฟ้าส่งผลกระทบต่อสิ่งต่างๆ ที่อยู่ใกล้กับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ทำให้จำเป็นต้องเพิ่มความสูงให้กับเสาไฟฟ้าเพื่อให้สายส่งมีความสูงเพิ่มขึ้น การเพิ่มความสูงให้กับสายส่งเปรียบเสมือนกับการเพิ่มระยะห่างระหว่างสิ่งที่ได้รับผลกระทบจากสนามไฟฟ้ากับแหล่งจ่ายของสนามไฟฟ้า ในรูปที่ 5.7 เป็นการเพิ่มความสูงให้กับสายส่งโดยการเพิ่มความสูงให้กับเสาไฟฟ้า (H) ซึ่งเป็นเสาไฟฟ้าระดับแรงดัน 500 kV ทั้งชนิดวงจรเดี่ยวและวงจรร่วม สำหรับรูปที่ 5.10 เป็นกราฟความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเพิ่มความสูงให้กับสายส่ง



รูปที่ 5.7 การเพิ่มความสูงของเสาไฟฟ้าระบบแรงดัน 500 kV ทั้งชนิดวงจรเดี่ยวและวงจรคู่

### 5.2.3 ระยะห่างระหว่างเฟส (phase spacing)

ระยะห่างระหว่างเฟสของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะถูกกำหนดจากระยะความปลอดภัยทางไฟฟ้าตามระดับแรงดันของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยที่สายส่งไฟฟ้าแรงสูงแบบวงจรเดี่ยวจะมีระยะห่างระหว่างเฟสอยู่ในแนวนอน และสายส่งไฟฟ้าแรงสูงแบบวงจรคู่จะมีระยะห่างระหว่างเฟสทั้งในแนวนอนและในแนวตั้ง (ตามรูปที่ 5.8) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างเฟสจะส่งผลทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเปลี่ยนแปลงไป รูปที่ 5.11 และ 5.12 เป็นกราฟความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเพิ่มระยะห่างระหว่างเฟสให้กับสายส่ง



รูปที่ 5.8 ระยะห่างระหว่างเฟสของเสาไฟฟ้าระบบแรงดัน 500 kV ทั้งชนิดวงจรถัดและวงจรรู

#### 5.2.4 ขนาดของสายไฟฟ้า (conductor dimension)

สายไฟฟ้าของสายส่งระบบแรงดัน 500 kV จะมีลักษณะเป็นสายควบจำนวน 4 เส้น ดังนั้นขนาดของสายไฟฟ้าต่อเฟสจึงเป็นขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลของสายควบ การเปลี่ยนแปลงขนาดของสายไฟฟ้าในที่นี้จึงหมายถึงการเปลี่ยนชนิดของสายตัวนำ การเปลี่ยนแปลงจำนวนของสายไฟควบต่อเฟส และการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของสายไฟควบ ซึ่งจะทำให้ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลของสายไฟฟ้าเปลี่ยนไปด้วย การเปลี่ยนแปลงขนาดของสายไฟฟ้าเมื่อพิจารณาจากสมการในการคำนวณสนามไฟฟ้าแล้วจะเห็นว่าค่า Maxwell potential coefficient ตามสมการที่ (2.10) จะเปลี่ยนแปลงไปส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่คำนวณได้

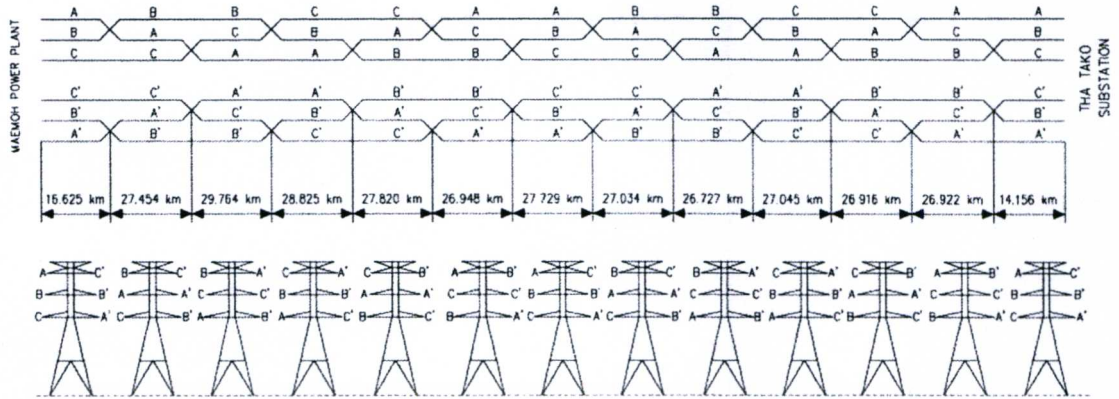
#### 5.2.5 การจัดเรียงลำดับเฟส (phase sequences)

การจัดเรียงลำดับเฟสของสายส่งจะทำให้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะกับสายส่งที่เป็นแบบวงจรรูเนื่องมาจากมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าของสายส่งเกิดการหักล้างและเสริมซึ่งกันและกัน สำหรับสายส่งที่มีรูปแบบของการจัดเรียงลำดับเฟสที่มีการหักล้างกันจะทำให้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย ซึ่งเราเรียกรูปแบบของการจัดเรียงลำดับเฟสแบบนี้ว่า Low-reactance [10] ส่วนสายส่งที่มีรูปแบบของการจัดเรียงลำดับเฟสที่เสริมกันจะทำให้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าเราเรียกรูปแบบของการจัดเรียงลำดับเฟสแบบนี้ว่า superbundle [10]

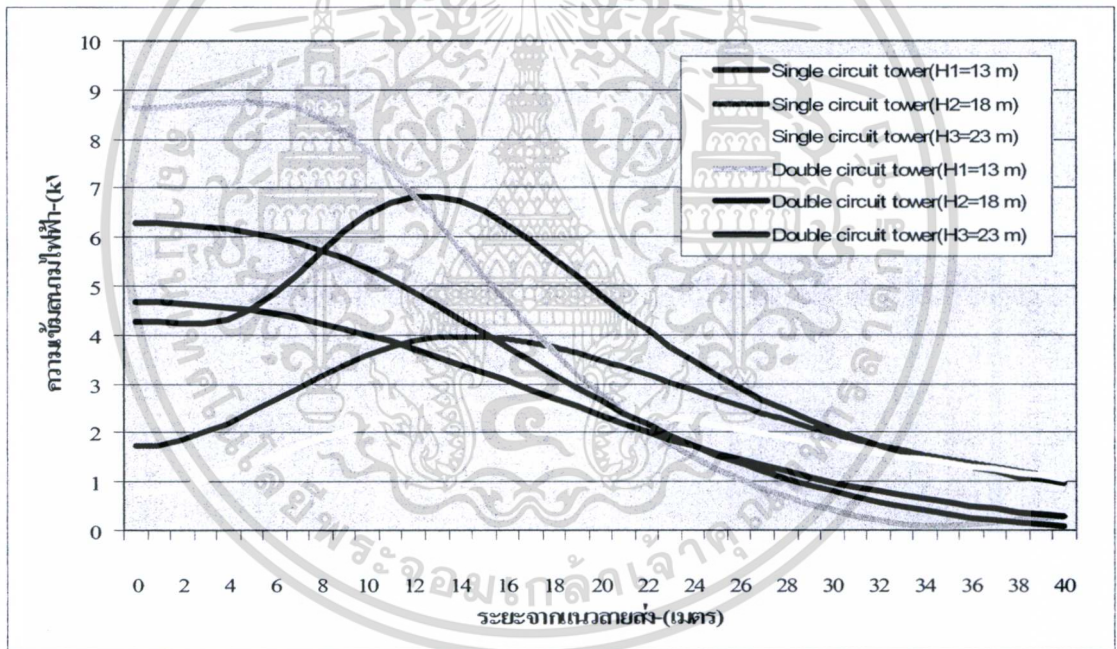
ตารางที่ 5.2 การจัดเรียงลำดับเฟสของสายส่งวงจรคู่ในแบบต่างๆ

รูปแบบการจัดเรียงลำดับเฟส	ลักษณะ
1. การจัดเรียงลำดับเฟส แบบ low-reactance	
2. การจัดเรียงลำดับเฟส แบบ superbundle	
3. การจัดเรียงลำดับเฟส แบบอื่นๆ	

สำหรับสายส่ง 500kV วงจรคู่ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ได้มีการจัดเรียงลำดับเฟส ( สำหรับสายส่งที่มีระยะทางไกลๆ ) โดยมีรูปแบบของการจัดเรียงลำดับเฟสตามรูปที่ 5.9 ซึ่งจะเป็นว่าเป็นการจัดเรียงลำดับของเฟสในแบบ low-reactance ทำให้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากันตลอดความยาวสายส่ง ในรูปที่ 5.13 เป็นผลของการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากการจัดเรียงลำดับของเฟส

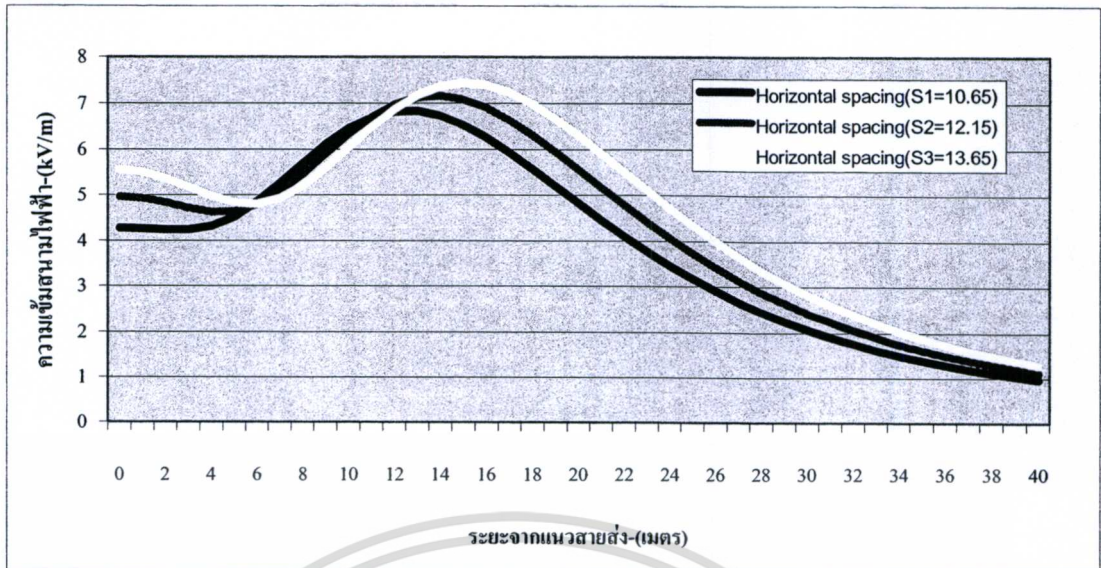


รูปที่ 5.9 รูปแบบการจัดเรียงลำดับเฟสของสายส่ง 500 kV วงจรคู่ของ กฟผ.[4]

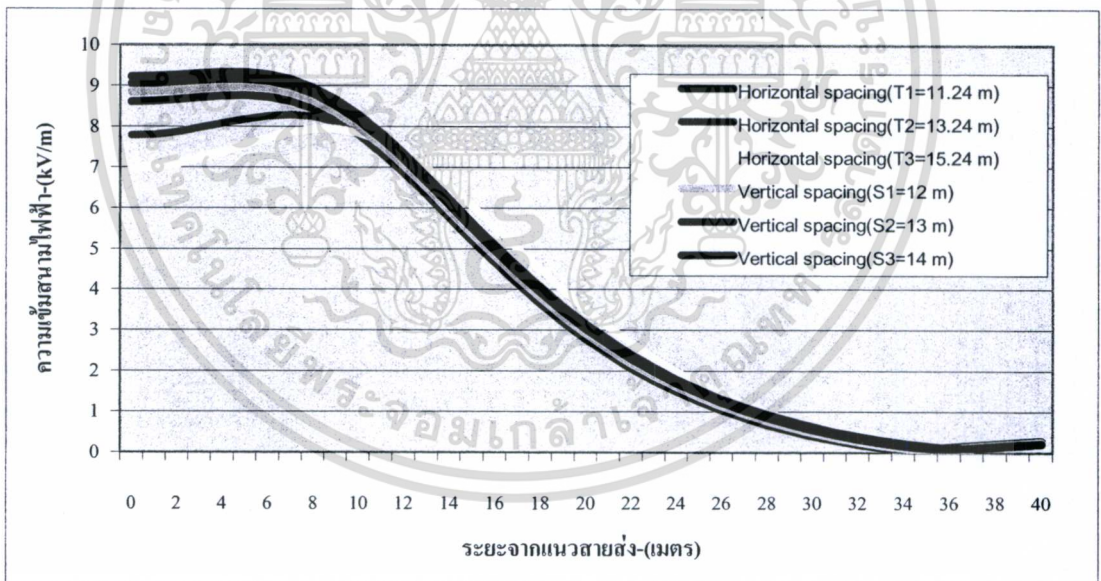


รูปที่ 5.10 ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามความสูงเสา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

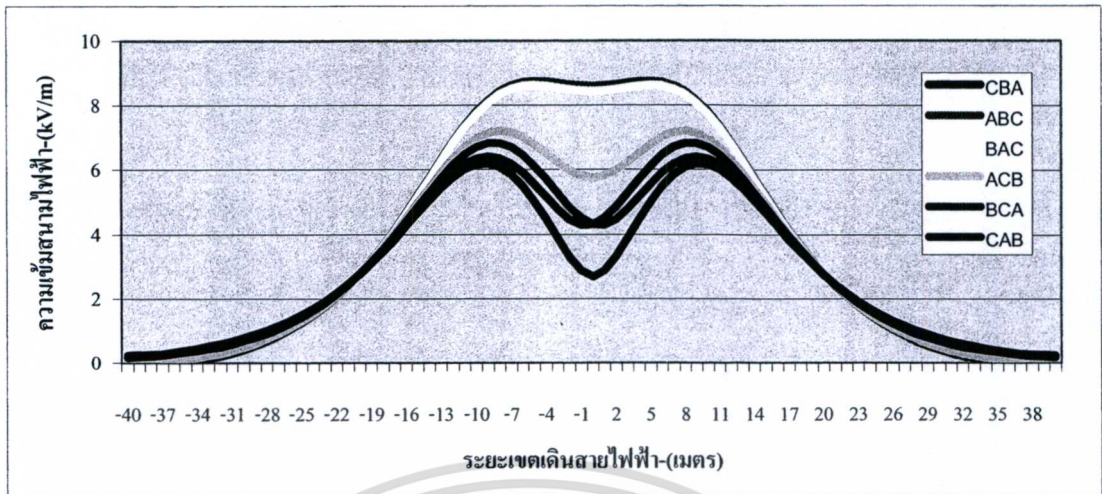


รูปที่ 5.11 ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างเฟส (วงจรเดี่ยว)



รูปที่ 5.12 ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างเฟส (วงจรรคู่)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV ที่เปลี่ยนตามการจัดเรียงของเฟสเมื่อกำหนดวงจรด้านหนึ่งจัดเรียงแบบ ABC



## บทที่ 6

# การคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

การนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงนั้น มีองค์ประกอบหลายอย่างที่มีผลต่อการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม การที่โครงข่ายประสาทเทียมสามารถเรียนรู้พฤติกรรมของระบบไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี จะส่งผลให้การคำนวณหาค่าตอบของระบบไฟฟ้ามีความแม่นยำสูง ดังนั้นก่อนที่จะทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจึงต้องมีการพิจารณาถึงองค์ประกอบที่มีผลต่อการเรียนรู้ และประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งประกอบไปด้วย การเลือกใช้ตัวแปรที่เป็นตัวแทนของระบบไฟฟ้ากำลัง (ตัวแปรฝึกสอน), การกระจายของข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอน, ปริมาณของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบ, เงื่อนไขของการฝึกสอน และขั้นตอนในการฝึกสอน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 6.1 การเลือกตัวแปรในการฝึกสอน

ในบรรดาองค์ประกอบที่มีผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม อาจกล่าวได้ว่าการเลือกตัวแปรในการฝึกสอนเป็นองค์ประกอบที่มีผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมมากที่สุด ตัวแปรที่ใช้ในการฝึกสอนจะประกอบไปด้วยตัวแปรอินพุต และตัวแปรเอาต์พุต ตัวแปรอินพุตคือตัวแปรที่แสดงถึงสถานะของระบบไฟฟ้าซึ่งป้อนให้กับชั้นข้อมูลอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม ส่วนตัวแปรเอาต์พุตคือคำตอบที่กำลังพิจารณา ซึ่งได้จากชั้นข้อมูลเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียม

การพิจารณาปัญหาผลกระทบบจากสนามไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงนั้น มีคำตอบของปัญหาที่พิจารณาคือ ค่าสนามไฟฟ้า (E) (ตัวแปรเอาต์พุต) ในการเลือกตัวแปรอินพุตสำหรับปัญหาของระบบไฟฟ้าจะต้องพิจารณาถึงขนาดของระบบไฟฟ้าประกอบไปด้วย ในกรณีที่ระบบไฟฟ้ามีขนาดเล็ก พารามิเตอร์ต่างๆของระบบสามารถนำมาใช้เป็นตัวแปรอินพุตได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อเวลาและขนาดของหน่วยความจำที่ใช้ในการฝึกสอนมากนัก เนื่องจากมีจำนวนของตัวแปรอินพุตไม่มาก แต่เมื่อระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีขนาดใหญ่ขึ้น การเลือกตัวแปรอินพุตจะต้องมีการพิจารณาอย่างละเอียด เนื่องจากไม่สามารถนำพารามิเตอร์ทั้งหมดของระบบมาใช้เป็นตัวแปรอินพุตของโครงข่ายได้ เพราะนอกจากจะทำให้เวลา และหน่วยความจำที่ใช้ในการฝึกสอนมากขึ้นแล้วยังไม่ทำให้ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมดีขึ้นอีกด้วย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้ตัวแปรอินพุทโดยพิจารณาจากการออกแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง และผลกระทบจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

### 6.1.1 ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT)

#### 6.1.1.1 สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรเดี่ยว

- ตัวแปรอินพุท ประกอบด้วย ระยะความสูงของสายส่งจากพื้นดิน, ขนาดตัวนำไฟฟ้า, ตำแหน่ง Right of way รวม 3 ตัวแปร
- ตัวแปรเอาต์พุท ประกอบด้วย ค่าสนามไฟฟ้า 1 ตัวแปร

#### 6.1.1.2 สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรคู่

- ตัวแปรอินพุท ประกอบด้วย รูปแบบการจัดเรียงลำดับเฟส 6 ประเภท, ระยะความสูงของสายส่งจากพื้นดิน, ขนาดตัวนำไฟฟ้า, ตำแหน่ง Right of way รวม 4 ตัวแปร
- ตัวแปรเอาต์พุท ประกอบด้วย ค่าสนามไฟฟ้า 1 ตัวแปร

### 6.1.2 ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA)

#### 6.1.2.1 สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 115 kV วงจรเดี่ยว (SS\_TG1 และ SD\_TG1)

- ตัวแปรอินพุท ประกอบด้วย จำนวนตัวนำต่อเฟส, ระยะความสูงของสายส่งจากพื้นดิน, ขนาดตัวนำไฟฟ้า, ตำแหน่ง Right of way รวม 4 ตัวแปร
- ตัวแปรเอาต์พุท ประกอบด้วย ค่าสนามไฟฟ้า 1 ตัวแปร

#### 6.1.2.2 สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 115 kV วงจรคู่ (DS\_TG1 และ DD\_TG1)

- ตัวแปรอินพุท ประกอบด้วย จำนวนตัวนำต่อเฟส, รูปแบบการจัดเรียงลำดับเฟส 6 ประเภท, ระยะความสูงของสายส่งจากพื้นดิน, ขนาดตัวนำไฟฟ้า, ตำแหน่ง Right of way รวม 5 ตัวแปร
- ตัวแปรเอาต์พุท ประกอบด้วย ค่าสนามไฟฟ้า 1 ตัวแปร

## 6.2 การกระจายของข้อมูลฝึกสอน

สืบเนื่องจากการที่โครงข่ายประสาทยูทิลิตี้มีความสามารถในการเรียนรู้ฟังก์ชันต่อเนื่องแบบไม่เชิงเส้นหลายชนิดได้อย่างแม่นยำภายในขอบเขตที่เรียนรู้ ซึ่งภายในขอบเขตนี้โครงข่าย

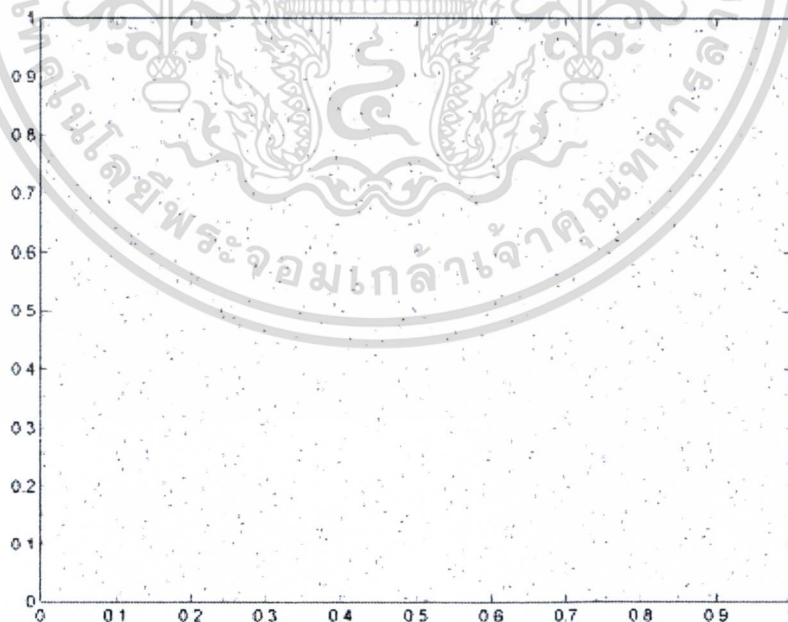
ประสาทยูทิลิตี้ผ่านการฝึกสอนแล้วสามารถคำนวณคำตอบของปัญหาที่พิจารณาได้โดยมีความเอนโทรปีเป็นเอนโทรปีของเวกเตอร์สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกต้องและแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ดีถึงดีมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณ (Quantity) และคุณภาพ (Quality) ของข้อมูลที่นำมาฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง คุณภาพของข้อมูล ส่วนปริมาณของข้อมูลจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

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

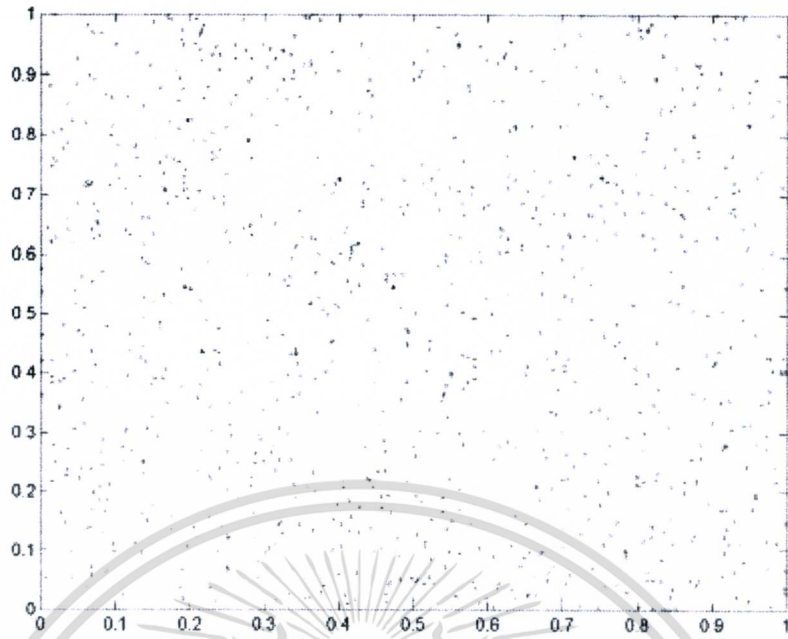
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้วิธีการเลือกค่าของตัวแปรอินพุตแบบสุ่มเลือก ด้วยคำสั่ง Sobol [14] ซึ่งการสุ่มด้วยคำสั่งแบบ Sobol จะให้ค่าลำดับที่ออกมาแบบ Quasi-random [18] (ค่ากึ่งสุ่ม) ซึ่งค่าตัวเลขที่ได้จะอยู่ในรูปทศนิยม ที่มีการแจกแจงตัวเอกกรุป มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งจุดตัวเลขที่ได้ออกมาติดต่อกันนั้น จะถูกเติมในช่องว่างระหว่างจุดก่อนหน้านี้

ใน [18] จะแสดงให้เห็นการกระจายของข้อมูลแบบคำสั่ง Sobol เมื่อเทียบกับคำสั่ง Pseudo-random ซึ่งเป็นการสุ่มค่าแบบที่เคยใช้กันมา จะพบว่ารูปแบบการกระจายข้อมูลด้วยคำสั่งแบบ Sobol จะมีการกระจายของข้อมูลที่มีรูปแบบสม่ำเสมอมากกว่าแบบ Pseudo-random ซึ่งการกระจายข้อมูลยังพบว่ายังมีช่องว่างและไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ดังรูปที่ 6.1 และ 6.2



รูปที่ 6.1 การกระจายข้อมูลคำสั่ง Sobol sequence points [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 การกระจายข้อมูลค่าตั้ง Pseudo-random sequence points. [18]

เมื่อนำค่าตั้งแบบ Sobol มาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะพบว่ามี การกระจายสม่ำเสมออย่าง ดีของข้อมูลฝึกสอนภายในขอบเขต และตรวจสอบการกระจายของข้อมูลด้วยสายตา (Eye inspection) โดยข้อมูลที่ได้จากวิธีการนี้มีการกระจายอยู่ในเกณฑ์ดี โดยตัวอย่างของการกระจายของ ข้อมูลแสดงในรูปที่ 6.1 จากนั้นจึงแปลงข้อมูลที่ได้อให้เป็นค่าของตัวแปรที่ใช้ในฝึกสอน ดังแสดง ตารางที่ 6.1 และ 6.2 สำหรับระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย วงจรเดี่ยว, วงจรคู่ ตามลำดับ ส่วนในตารางที่ 6.3 และ 6.4 สำหรับระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 115 kV การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค วงจรเดี่ยว(SS\_TG1 และ SD\_TG1), วงจรคู่(DS\_TG1 และ DD\_TG1) ตามลำดับ

ตารางที่ 6.1 วิธีการแปลงข้อมูลที่ได้เป็นตัวแปรฝึกสอน สำหรับระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV  
การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย วงจรเดียว

ตัวแปรฝึกสอน	ค่าที่สุ่มได้	วิธีการแปลง
x1	Sobol1	เมื่อ $0 < \text{sobol1} \leq 1/5$ , $x1 = 13$ m.
		$1/5 < \text{sobol1} \leq 2/5$ , $x1 = 18$ m.
		$2/5 < \text{sobol1} \leq 3/5$ , $x1 = 23$ m.
		$3/5 < \text{sobol1} \leq 4/5$ , $x1 = 28$ m.
		$4/5 < \text{sobol1} \leq 1$ , $x1 = 33$ m.
x2	Sobol2	เมื่อ $0 < \text{sobol2} \leq 1/2$ , $x2 = 795$ MCM
		$1/2 < \text{sobol2} \leq 1$ , $x2 = 1272$ MCM
x3	Sobol3	เมื่อ $0 < \text{sobol3} \leq 1/15$ , $x3 = -35$ m.
		$1/15 < \text{sobol3} \leq 2/15$ , $x3 = -30$ m.
		$2/15 < \text{sobol3} \leq 3/15$ , $x3 = -25$ m.
		$3/15 < \text{sobol3} \leq 4/15$ , $x3 = -20$ m.
		$4/15 < \text{sobol3} \leq 5/15$ , $x3 = -15$ m.
		$5/15 < \text{sobol3} \leq 6/15$ , $x3 = -10$ m.
		$6/15 < \text{sobol3} \leq 7/15$ , $x3 = -5$ m.
		$7/15 < \text{sobol3} \leq 8/15$ , $x3 = 0$ m.
		$8/15 < \text{sobol3} \leq 9/15$ , $x3 = 5$ m.
		$9/15 < \text{sobol3} \leq 10/15$ , $x3 = 10$ m.
		$10/15 < \text{sobol3} \leq 11/15$ , $x3 = 15$ m.
		$11/15 < \text{sobol3} \leq 12/15$ , $x3 = 20$ m.
		$12/15 < \text{sobol3} \leq 13/15$ , $x3 = 25$ m.
		$13/15 < \text{sobol3} \leq 14/15$ , $x3 = 30$ m.
$14/15 < \text{sobol3} \leq 1$ , $x3 = 35$ m.		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 วิธีการแปลงข้อมูลที่ได้เป็นตัวแปรฝึกสอน สำหรับระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV  
การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย วงจรคู่

ตัวแปรฝึกสอน	ค่าที่สุ่มได้	วิธีการแปลง
x1	Sobol1	เมื่อ $0 < \text{sobol1} \leq 1/6$ , x1= ABC
		$1/6 < \text{sobol1} \leq 2/6$ , x1= ACB
		$2/6 < \text{sobol1} \leq 3/6$ , x1= BAC
		$3/6 < \text{sobol1} \leq 4/6$ , x1= BCA
		$4/6 < \text{sobol1} \leq 5/6$ , x1= CAB
		$5/6 < \text{sobol1} \leq 1$ , x1= CBA
x2	Sobol2	เมื่อ $0 < \text{sobol2} \leq 1/4$ , x2 = 13 m.
		$1/4 < \text{sobol2} \leq 2/4$ , x2 = 18 m.
		$2/4 < \text{sobol2} \leq 3/4$ , x2 = 23 m.
		$3/4 < \text{sobol2} \leq 1$ , x2 = 28 m.
x3	Sobol3	เมื่อ $0 < \text{sobol3} \leq 1/2$ , x3 = 795 MCM
		$1/2 < \text{sobol3} \leq 1$ , x3 = 1272 MCM
x4	Sobol4	เมื่อ $0 < \text{sobol4} \leq 1/13$ , x4 = -30 m.
		$1/13 < \text{sobol4} \leq 2/13$ , x4 = -25 m.
		$2/13 < \text{sobol4} \leq 3/13$ , x4 = -20 m.
		$3/13 < \text{sobol4} \leq 4/13$ , x4 = -15 m.
		$4/13 < \text{sobol4} \leq 5/13$ , x4 = -10 m.
		$5/13 < \text{sobol4} \leq 6/13$ , x4 = -5 m.
		$6/13 < \text{sobol4} \leq 7/13$ , x4 = 0 m.
		$7/13 < \text{sobol4} \leq 8/13$ , x4 = 5 m.
		$8/13 < \text{sobol4} \leq 9/13$ , x4 = 10 m.
		$9/13 < \text{sobol4} \leq 10/13$ , x4 = 15 m.
		$10/13 < \text{sobol4} \leq 11/13$ , x4 = 20 m.
		$11/13 < \text{sobol4} \leq 12/13$ , x4 = 25 m.
$12/13 < \text{sobol4} \leq 1$ , x4 = 30 m.		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3 วิธีการแปลงข้อมูลที่ได้เป็นตัวแปรฟัคสอน สำหรับระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 115 kV  
การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค วงจรเดี่ยว (SS\_TG1 และ SD\_TG1)

ตัวแปรฟัคสอน	ค่าที่สุ่มได้	วิธีการแปลง
x1	sobol1	เมื่อ $0 < \text{sobol1} \leq 1/2$ , $x1 = 1$
		$1/2 < \text{sobol1} \leq 1$ , $x1 = 2$
x2	sobol2	เมื่อ $0 < \text{sobol2} \leq 1/3$ , $x2 = 6$ m.
		$1/3 < \text{sobol2} \leq 2/3$ , $x2 = 11$ m.
		$2/3 < \text{sobol2} \leq 1$ , $x2 = 16$ m.
x3	sobol3	เมื่อ $0 < \text{sobol3} \leq 1/3$ , $x3 = 240$ mm <sup>2</sup>
		$1/3 < \text{sobol3} \leq 2/3$ , $x3 = 300$ mm <sup>2</sup>
		$2/3 < \text{sobol3} \leq 1$ , $x3 = 400$ mm <sup>2</sup>
x4	sobol4	เมื่อ $0 < \text{sobol4} \leq 1/11$ , $x4 = -25$ m.
		$1/11 < \text{sobol4} \leq 2/11$ , $x4 = -20$ m.
		$2/11 < \text{sobol4} \leq 3/11$ , $x4 = -15$ m.
		$3/11 < \text{sobol4} \leq 4/11$ , $x4 = -10$ m.
		$4/11 < \text{sobol4} \leq 5/11$ , $x4 = -5$ m.
		$5/11 < \text{sobol4} \leq 6/11$ , $x4 = 0$ m.
		$6/11 < \text{sobol4} \leq 7/11$ , $x4 = 5$ m.
		$7/11 < \text{sobol4} \leq 8/11$ , $x4 = 10$ m.
		$8/11 < \text{sobol4} \leq 9/11$ , $x4 = 15$ m.
		$9/11 < \text{sobol4} \leq 10/11$ , $x4 = 20$ m.
$10/11 < \text{sobol4} \leq 1$ , $x4 = 25$ m.		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.4 วิธีการแปลงข้อมูลที่ได้เป็นตัวแปรฟัคสอน สำหรับระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 115 kV การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค วงจรคู่ (DS\_TG1 และ DD\_TG1)

ตัวแปรฟัคสอน	ค่าที่สุ่มได้	วิธีการแปลง
x1	Sobol1	เมื่อ $0 < \text{sobol1} \leq 1/2$ , $x_1 = 1$
		$1/2 < \text{sobol1} \leq 1$ , $x_1 = 2$
x2	Sobol2	เมื่อ $0 < \text{sobol2} \leq 1/6$ , $x_2 = \text{ABC}$
		$1/6 < \text{sobol2} \leq 2/6$ , $x_2 = \text{ACB}$
		$2/6 < \text{sobol2} \leq 3/6$ , $x_2 = \text{BAC}$
		$3/6 < \text{sobol2} \leq 4/6$ , $x_2 = \text{BCA}$
		$4/6 < \text{sobol2} \leq 5/6$ , $x_2 = \text{CAB}$
		$5/6 < \text{sobol2} \leq 1$ , $x_2 = \text{CBA}$
x3	Sobol3	เมื่อ $0 < \text{sobol3} \leq 1/3$ , $x_3 = 6 \text{ m.}$
		$1/3 < \text{sobol3} \leq 2/3$ , $x_3 = 11 \text{ m.}$
		$2/3 < \text{sobol3} \leq 1$ , $x_3 = 16 \text{ m.}$
x4	Sobol4	เมื่อ $0 < \text{sobol4} \leq 1/3$ , $x_4 = 240 \text{ mm}^2$
		$1/3 < \text{sobol4} \leq 2/3$ , $x_4 = 300 \text{ mm}^2$
		$2/3 < \text{sobol4} \leq 1$ , $x_4 = 400 \text{ mm}^2$
x5	Sobol5	เมื่อ $0 < \text{sobol5} \leq 1/11$ , $x_5 = -25 \text{ m.}$
		$1/11 < \text{sobol5} \leq 2/11$ , $x_5 = -20 \text{ m.}$
		$2/11 < \text{sobol5} \leq 3/11$ , $x_5 = -15 \text{ m.}$
		$3/11 < \text{sobol5} \leq 4/11$ , $x_5 = -10 \text{ m.}$
		$4/11 < \text{sobol5} \leq 5/11$ , $x_5 = -5 \text{ m.}$
		$5/11 < \text{sobol5} \leq 6/11$ , $x_5 = 0 \text{ m.}$
		$6/11 < \text{sobol5} \leq 7/11$ , $x_5 = 5 \text{ m.}$
		$7/11 < \text{sobol5} \leq 8/11$ , $x_5 = 10 \text{ m.}$
$8/11 < \text{sobol5} \leq 9/11$ , $x_5 = 15 \text{ m.}$		
$9/11 < \text{sobol5} \leq 10/11$ , $x_5 = 20 \text{ m.}$		
$10/11 < \text{sobol5} \leq 1$ , $x_5 = 25 \text{ m.}$		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3 ปริมาณของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบ

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

ข้อมูลทดสอบ คือ ข้อมูลที่นำมาทดสอบประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว โดยเป็นข้อมูลที่ประกอบด้วยตัวแปรอินพุท และตัวแปรเอาต์พุท เช่นเดียวกับกับข้อมูลฝึกสอน หากแต่ค่าของตัวแปรดังกล่าวในชุดข้อมูลทดสอบจะเป็นค่าที่ไม่ถูกใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เป็นค่าที่โครงข่ายประสาทเทียมไม่เคยเรียนรู้มาก่อน (Unseen) การวัดประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมนั้นจะใช้ค่าผิดพลาดของคำตอบของข้อมูลทดสอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วเป็นเกณฑ์ ซึ่งจะนำเสนอในรูปของค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean absolute percentage error , mape) ดังสมการที่ 6.1

$$mape = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{E_{ANN_i} - E_{TLW_i}}{E_{TLW_i}} \right| \times 100\% \quad (6.1)$$

โดยที่

$E_{ANN}$

คือ E ที่เป็นคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียม

$E_{TLW}$

คือ E ที่เป็นคำตอบของวิธี TLW

$n$

คือ จำนวนข้อมูลทดสอบ

ปริมาณของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบสำหรับระบบสายส่งแรงสูงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นไปตามตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 จำนวนข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม สำหรับระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT)

ระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณา	เงื่อนไขที่	จำนวนข้อมูลฝึกสอน	จำนวนข้อมูลทดสอบ
ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรเดี่ยว	1	60	10
	2	90	10
	3	120	10
ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรคู่	1	290	40
	2	390	40
	3	490	40

ตารางที่ 6.6 จำนวนข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม สำหรับระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA)

ระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณา	เงื่อนไขที่	จำนวนข้อมูลฝึกสอน	จำนวนข้อมูลทดสอบ
ระบบสายไฟฟ้าแรงสูง 115 kV วงจรเดี่ยว(SS_TG1 และ SD_TG1)	1	30	10
	2	60	10
	3	90	10
ระบบสายไฟฟ้าแรงสูง 115 kV วงจรคู่(DS_TG1 และ DD_TG1)	1	350	40
	2	450	40
	3	550	40

หลังจากที่ได้โครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมแล้ว ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำข้อมูลทดสอบ Interpolation [17] ซึ่งเป็นการประมาณค่าในช่วงที่มีค่าข้อมูลอยู่ระหว่างจุดข้อมูลที่มีอยู่ มาทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม การนำชุดทดสอบแบบ interpolation มาทดสอบนั้น จะนำค่าข้อมูลที่อยู่ระหว่างจุดข้อมูลที่มีอยู่ของชุดข้อมูลฝึกสอนมาทดสอบ เช่น ความสูงของสายส่งที่ 10 m., ขนาดตัวนำไฟฟ้าที่ 350 mm<sup>2</sup> และ ตำแหน่ง Right of way ที่ 1 m. มาจำลองสถานการณ์ทั้งสองโครงสร้างเสา เพื่อเพิ่มการตรวจสอบประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอน และคิดว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการฝึกสอนแล้วนั้น สามารถหาคำตอบจริงของชุดข้อมูลที่อยู่ระหว่างชุดข้อมูลฝึกสอนได้ หรือไม่

#### 6.4 เงื่อนไขของการฝึกสอน

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงเงื่อนไขทั้งหมดที่กำหนดขอบเขตการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งมีผลต่อการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 6.4.1 ค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส

การเลือกค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส เปรียบเสมือนกับการเลือกค่าแรกในการเล่นเกมส์ทายตัวเลข หากเลือกค่าแรกได้ใกล้เคียงกับคำตอบ จะทำให้สามารถทายตัวเลขได้ถูกต้องอย่างรวดเร็ว และใช้จำนวนครั้งในการทายน้อยลง

การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้วิธีการเลือกค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสแบบสุ่ม (คำสั่ง “ net.inputWeights{1,1}.initFcn = 'rands'; ” และ “ net.biases{1}.initFcn = 'rands'; ” [11] ) เพื่อให้การฝึกสอนในแต่ละรอบมีทิศทางการลู่เข้าหาคำตอบแตกต่างกันออกไป

#### 6.4.2 ลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส

ลำดับขั้นตอน (Algorithm) การปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิด Feed-forward Neural Networks โดยใช้ Neural Network Toolbox นั้นมีอยู่หลายวิธี อาทิเช่น Levenberg-Maquardt algorithm, Resilient Backpropagation, Conjugate Gradient เป็นต้น แต่ละวิธีก็จะมีประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการฝึกสอนแตกต่างกัน ตามที่ระบุไว้ใน Neural Network Toolbox User's Guide นั้น Levenberg-Maquardt algorithm มีประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการฝึกสอนสูงที่สุด ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำเอาลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสวิธีนี้มาใช้ โดยมีลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส ดังสมการที่ 6.2

$$x_{k+1} = x_k + \Delta x = x_k + [J^T \cdot J + \mu I]^{-1} \cdot g \quad (6.2)$$

$$g = J^T \cdot e \quad (6.3)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จาโคเบียนเมตริกซ์ของ (W) } J(W) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial w_{1,1}} & \frac{\partial e_1}{\partial w_{1,2}} & \dots & \frac{\partial e_1}{\partial w_{1,s}} \\ \frac{\partial e_2}{\partial w_{2,1}} & \frac{\partial e_2}{\partial w_{2,2}} & \dots & \frac{\partial e_2}{\partial w_{2,s}} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial e_s}{\partial w_{s,1}} & \frac{\partial e_s}{\partial w_{s,2}} & \dots & \frac{\partial e_s}{\partial w_{s,s}} \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

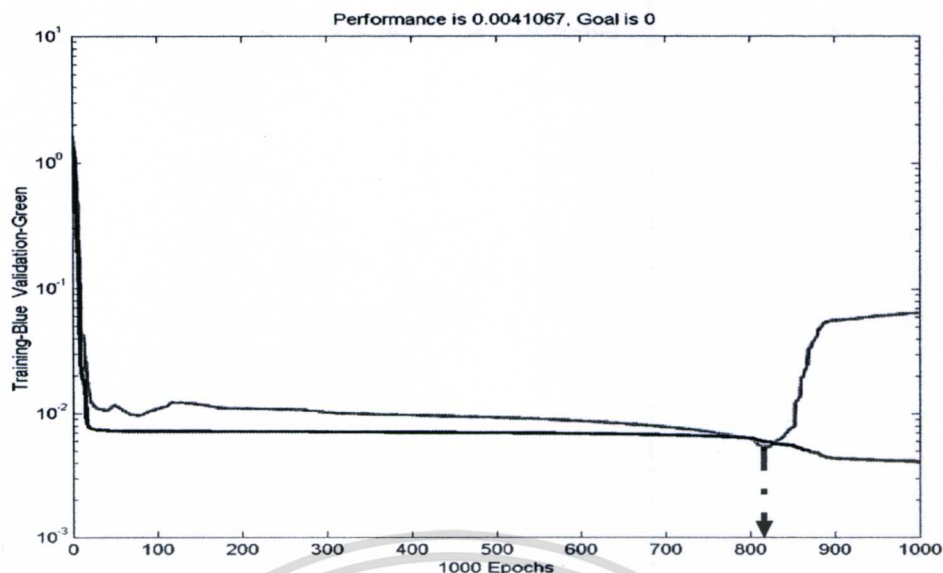
$$\text{จาโคเบียนเมตริกซ์ของค่า (b) } J(b) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial b_1} \\ \frac{\partial e_2}{\partial b_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial e_s}{\partial b_s} \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

$$\text{เมตริกซ์ของค่าผิดพลาด} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 - a_1 \\ t_2 - a_2 \\ \vdots \\ t_s - a_s \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

#### 6.4.3 จำนวนครั้งของการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส

ในขณะที่ทำการฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมแต่ละรอบจะกำหนดให้มีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสเป็นจำนวน 1,000 ครั้ง (ในที่นี้จะเรียกว่า epoch) เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบระยะเวลาในการฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมในแต่ละเงื่อนไข และในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสแต่ละ epoch จะทำการคำนวณหาค่าผิดพลาดของค่าตอบของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบแต่ละชุด เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดยกกำลังสอง (Mean square error, MSE) ของชุดข้อมูลทดสอบใน epoch ปัจจุบัน กับค่า MSE ของชุดข้อมูลทดสอบที่ได้ epoch ก่อนหน้านี้ และเก็บค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสใน epoch ที่ทำให้ค่า MSE ของชุดข้อมูลทดสอบมีค่าที่ต่ำที่สุดไว้ (ตำแหน่งที่ถูกครี) ไปใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 6.3 โดยการใช้ชุดข้อมูลทดสอบเป็น Validation set

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 การเลือกค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสในแต่ละรอบของการฝึกสอน

#### 6.4.4 จำนวนรอบของการฝึกสอน

เนื่องจากการศึกษานี้ได้กำหนดวิธีการเลือกค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสเป็นการเลือกแบบสุ่ม จำนวนรอบของการฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมในแต่ละโครงสร้างของโครงข่ายนั้นจะต้องเพียงพอให้เกิดการลู่ค่าดังกล่าวอย่างทั่วถึง จึงกำหนดจำนวนรอบของการฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมในแต่ละโครงสร้างไว้ที่ 20 รอบต่อโครงสร้าง และเลือกรอบการฝึกสอนที่มีค่า mape ของชุดข้อมูลทดสอบที่มีค่าต่ำที่สุดใน 20 รอบ ไปใช้งาน

#### 6.4.5 จำนวนโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นชนิด Feed-forward Neural Networks ที่มีชั้นซ่อน (Hidden layer) 2 ชั้น โดยกำหนดให้ในชั้นซ่อนที่ 1 มีจำนวนนิวรอน (Neurons) ในชั้นซ่อนมากกว่าชั้นซ่อนที่ 2 เป็นจำนวน 1 นิวรอน และมีการปรับจำนวนของนิวรอนในชั้นซ่อนเพิ่มขึ้นเพื่อให้เมตริกซ์ของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสมีขนาดใหญ่เพียงพอในการคำนวณผลลัพธ์ (a) ให้มีค่าใกล้เคียงกับคำตอบที่แท้จริง (t) มากที่สุด โดยเริ่มฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เท่ากับ 2 - 1 ตามลำดับและเพิ่มจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นซ่อนขึ้นทีละ 1 นิวรอนจนถึง 11-10 สำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงดันเดียว และเพิ่มจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นซ่อนขึ้นทีละ 1 นิวรอนจนถึง 16-15 สำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงดันคู่ ทั้งการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 115 kV และ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย 500kV และเลือกเอาโครงสร้างที่มีค่า mape ของชุดข้อมูลทดสอบที่มีค่าต่ำที่สุดไปใช้งาน

#### 6.4.6 ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน

ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีผลต่อการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิด Feed-forward Neural Networks มีอยู่หลายชนิด อาทิเช่น Log-sigmoid, Tan-sigmoid และ Linear transfer function ดังแสดงในสมการที่ 6.7 , 6.8 และ 6.9 ตามลำดับ การนำโครงข่ายประสาทเทียมไปใช้ในการแก้ปัญหาคณิตที่เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องแบบเชิงเส้นและมีความซับซ้อนไม่มากนัก สามารถใช้โครงข่ายประสาทเทียมชนิด Feed-forward Neural Networks ที่มีชั้นซ่อนเพียง 1 ชั้น โดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน Log-sigmoid ในชั้นซ่อน และฟังก์ชันถ่ายโอน Linear ในชั้นข้อมูลเอาต์พุต

$$a(n) = \frac{1}{1 + e^{-kn}} \quad (6.7)$$

$$a(n) = \frac{1 - e^{-kn}}{1 + e^{-kn}} \quad (6.8)$$

$$a(n) = n \quad (6.9)$$

โดยที่

$$k = 1$$

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ถือว่าเป็นปัญหาคณิตที่เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องแบบไม่เชิงเส้นและมีความซับซ้อน จึงเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน Log-sigmoid ซึ่งเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนที่สามารถหาอนุพันธ์ได้ในชั้นซ่อนทั้ง 2 ชั้นและฟังก์ชันถ่ายโอน Linear ในชั้นข้อมูลเอาต์พุต

#### 6.4.7 เงื่อนไขที่เป็นค่าพื้นฐานของ Neural Network Toolbox

ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิด Feed-forward Neural Networks ด้วย Levenberg-Maquardt algorithm (trainlm) [11] โดยใช้ Neural Network Toolbox จะมีเงื่อนไขพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการสิ้นสุดของการฝึกสอนดังนี้

##### 6.4.7.1 ค่า Gradient factor

เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้ในการพิจารณาถึงการสิ้นสุดการฝึกสอน (ค่า g ในสมการที่ 6.3) ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสแต่ละรอบนั้นค่า Gradient factor จะเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับค่าผิดพลาด (e) ที่เกิดขึ้นใน epoch นั้นๆ โดยการฝึกสอนจะสิ้นสุดลงเมื่อ Gradient factor มีค่าน้อยกว่า  $1e-10$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.4.7.2 ค่า Learning factor

ค่า Learning factor ( $\mu$  ในสมการที่ (6.2)) เป็นค่าคงที่ที่ใช้เร่งการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสให้ลู่เข้าหาค่าตอบ ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสแต่ละรอบนั้นหากค่า Gradient factor มีค่าเพิ่มขึ้น จะมีการปรับค่า  $\mu$  ให้เพิ่มขึ้นจนกระทั่งค่า Gradient factor มีแนวโน้มที่จะลดลง จากนั้นค่า  $\mu$  จะถูกปรับลดลงเรื่อยๆ และจะมีการปรับเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อค่า Gradient factor มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ค่า  $\mu$  เริ่มต้นจะมีค่าเท่ากับ 0.001, การปรับค่า  $\mu$  เพิ่มขึ้นนั้นจะทำได้โดยการคูณด้วย increased factor ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10 และการปรับค่า  $\mu$  ลดลงนั้นจะทำได้โดยการคูณด้วย decreased factor ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.1 และการฝึกสอนจะสิ้นสุดลงเมื่อ ค่า  $\mu$  มีค่ามากกว่า  $1e10$

จากที่กล่าวไว้ในข้างต้นเงื่อนไขการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมทั้งหมดสามารถนำมาสรุปได้ดังตารางที่ 6.7 และ 6.8

ตารางที่ 6.7 เงื่อนไขการฝึกสอนที่ควบคุม

เงื่อนไขที่ควบคุม	ค่าที่กำหนด	ผลต่อการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม
การเลือกค่าเริ่มต้นของ Weight, Bias	เลือกแบบสุ่ม	ประสิทธิภาพของโครงข่ายอาจจะแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับค่าเริ่มต้นของ Weight , Bias ที่สุ่มได้
ลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส	Levenberg-Maquardt algorithm	มีประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการฝึกสอนสูงที่สุด
จำนวนข้อมูลฝึกสอน	60 , 90 และ 120 ชุด สำหรับ โครงสร้างเสววจรเดี่ยวของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต 500 kV 290, 390 และ 490 ชุด สำหรับ โครงสร้างเสววจรคู่ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต 500 kV 30 , 60 และ 90 ชุด สำหรับ โครงสร้างเสววจรเดี่ยวของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 115 kV 350, 450 และ 550 ชุด สำหรับ โครงสร้างเสววจรคู่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 115 kV	ใช้เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนแต่ละเงื่อนไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.7 (ต่อ)

เงื่อนไขที่ควบคุม	ค่าที่กำหนด	ผลต่อการเรียนรู้ของ โครงข่ายประสาทเทียม
จำนวนข้อมูลฝึกสอน	60 , 90 และ 120 ชุด สำหรับ โครงสร้างเสววจรเดี่ยวของการ ไฟฟ้าฝ่ายผลิต 500 kV 290, 390 และ 490 ชุด สำหรับ โครงสร้างเสววจรคู่ของการไฟฟ้า ฝ่ายผลิต 500 kV 30 , 60 และ 90 ชุด สำหรับ โครงสร้างเสววจรเดี่ยวของการ ไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 115 kV 350, 450 และ 550 ชุด สำหรับ โครงสร้างเสววจรคู่ของการไฟฟ้า ส่วนภูมิภาค 115 kV	ใช้เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการ ฝึกสอนแต่ละเงื่อนไข
จำนวนข้อมูลทดสอบ	10 ชุด สำหรับโครงสร้างเสววจร เดี่ยว และ 40 ชุด สำหรับโครงสร้าง เสววจรคู่ ทั้งการไฟฟ้าฝ่ายผลิต 500 kV และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 115 kV	ใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของ การฝึกสอนแต่ละเงื่อนไข
จำนวนครั้งการปรับ Weight, Bias ในการฝึกสอนแต่ละรอบ	1,000 ครั้ง	ใช้เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการ ฝึกสอนแต่ละเงื่อนไข
จำนวนรอบการฝึกสอน	20 รอบ	ให้เกิดการสุ่มค่าเริ่มต้นของค่าถ่วง น้ำหนักและค่าไบแอสอย่างทั่วถึง
จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน	ในชั้นซ่อนที่ 1 มีนิวรอนมากกว่า ในชั้นซ่อนที่ 2 เป็นจำนวน 1 นิวรอน	ใช้เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการ ฝึกสอนแต่ละเงื่อนไข
โครงสร้างของโครงข่าย ประสาทเทียม	10 โครงสร้าง ตั้งแต่ 2 – 1 จนถึง 11-10 สำหรับโครงสร้างเสว แบบวงจรเดี่ยว 15 โครงสร้าง ตั้งแต่ 2-1 จนถึง 16-15 สำหรับโครงสร้างเสว แบบวงจรคู่	เพื่อให้เมตริกซ์ของ ปรับ Weight , Bias มีขนาดใหญ่เพียงพอสำหรับ การคำนวณค่าผลลัพธ์ที่ถูกต้อง
ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน	Log-sigmoid ในชั้นซ่อนทั้ง 2 ชั้น และLinear ในชั้นข้อมูลเอาต์พุต	ไม่มีการปรับชนิดของฟังก์ชันถ่าย โอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.8 เงื่อนไขการฝึกสอนที่เป็นค่าพื้นฐานของ Neural Network Tool Box

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

### 6.5 ขั้นตอนการฝึกสอน

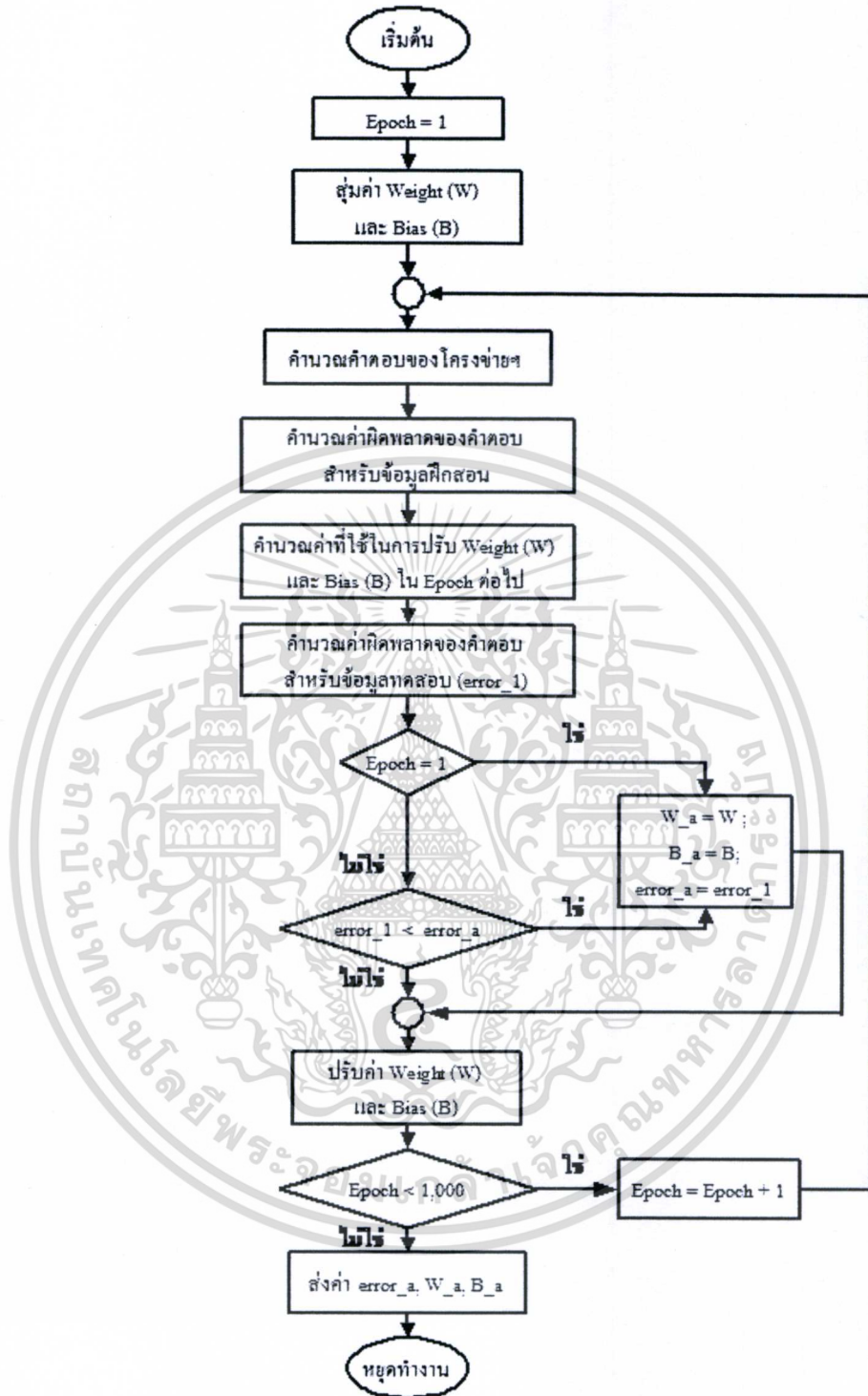
ในขั้นตอนแรกของการฝึกสอนจะเป็นการเตรียมข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนและทดสอบ เมื่อได้ข้อมูลจากการจำลองเหตุการณ์ตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 แล้วจะนำข้อมูลดังกล่าวมาจัดให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ โดยเมตริกซ์ดังกล่าวจะมีจำนวนหลักเท่ากับ จำนวนตัวแปรอินพุตบวกกับจำนวนของตัวแปรเอาต์พุต และมีจำนวนแถวเท่ากับจำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอน หรือข้อมูลทดสอบ ในกรณีของโครงสร้างเสาแบบวงจรเดี่ยวของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต 500 kV จะใช้ข้อมูลฝึกสอนที่เป็นเมตริกซ์ขนาด  $3 \times 60$ ,  $3 \times 90$  และ  $3 \times 120$  และข้อมูลทดสอบที่เป็นเมตริกซ์ขนาด  $3 \times 10$  และโครงสร้างเสาแบบวงจรคู่ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต 500 kV จะใช้ข้อมูลฝึกสอนที่เป็นเมตริกซ์ขนาด  $4 \times 290$ ,  $4 \times 390$  และ  $4 \times 490$  และข้อมูลทดสอบที่เป็นเมตริกซ์ขนาด  $4 \times 40$  ส่วนโครงสร้างเสาแบบวงจรเดี่ยวของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 115 kV จะใช้ข้อมูลฝึกสอนที่เป็นเมตริกซ์ขนาด  $4 \times 30$ ,  $4 \times 60$  และ  $4 \times 90$  และข้อมูลทดสอบที่เป็นเมตริกซ์ขนาด  $4 \times 10$  และโครงสร้างเสาแบบวงจรคู่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 115 kV จะใช้ข้อมูลฝึกสอนที่เป็นเมตริกซ์ขนาด  $5 \times 350$ ,  $5 \times 450$  และ  $5 \times 550$  และข้อมูลทดสอบที่เป็นเมตริกซ์ขนาด  $5 \times 40$  จากนั้นนำเมตริกซ์ที่ได้มาจัดระเบียบข้อมูล (Normalization) ให้มีค่าเฉลี่ย (mean) เท่ากับ 0 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Variance) เท่ากับ 1 แล้วจึงนำเมตริกซ์ที่จัดระเบียบข้อมูลแล้วไปฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

เมื่อทำการกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ในการฝึกสอนตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 6.4 เรียบร้อยแล้ว ก็จะเริ่มทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 6.4 – 6.6 โดยรูปที่ 6.4 เป็นขั้นตอน Back-propagation calculation ซึ่งเป็นการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสและคำนวณหาค่าผิดพลาดของคำตอบของข้อมูลทดสอบเป็นจำนวน 1,000 epoch และเลือกเอาค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสที่ทำให้คำตอบของข้อมูลทดสอบมีค่าผิดพลาดน้อยที่สุดเก็บไว้เพื่อเปรียบเทียบกับรอบการฝึกสอนอื่นๆ ในขั้นตอน Best round selection (รูปที่ 6.5) ซึ่งจะทำซ้ำในขั้นตอน Back-propagation calculation จำนวน 20 รอบ และเลือกเอาค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสที่ทำให้คำตอบของข้อมูลทดสอบมีค่าผิดพลาดน้อยที่สุดของทุกรอบการฝึกสอนเก็บไว้เพื่อเปรียบเทียบกับรอบการฝึกสอนในโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบอื่นๆ ในขั้นตอน Best

structure and best round selection (รูปที่ 6.6) ซึ่งจะทำการฝึกสอนในขั้นตอน Best round selection ซ้ำโดยเริ่มจากโครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 ตั้งแต่ 2 – 1 และเลือกเอาค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสที่ทำให้ค่าตอบของข้อมูลทดสอบมีค่าผิดพลาดน้อยที่สุดของทุกรอบการฝึกสอนและทุกโครงสร้างสำหรับการฝึกสอนในแต่ละเงื่อนไขเก็บไว้เพื่อนำไปใช้งาน

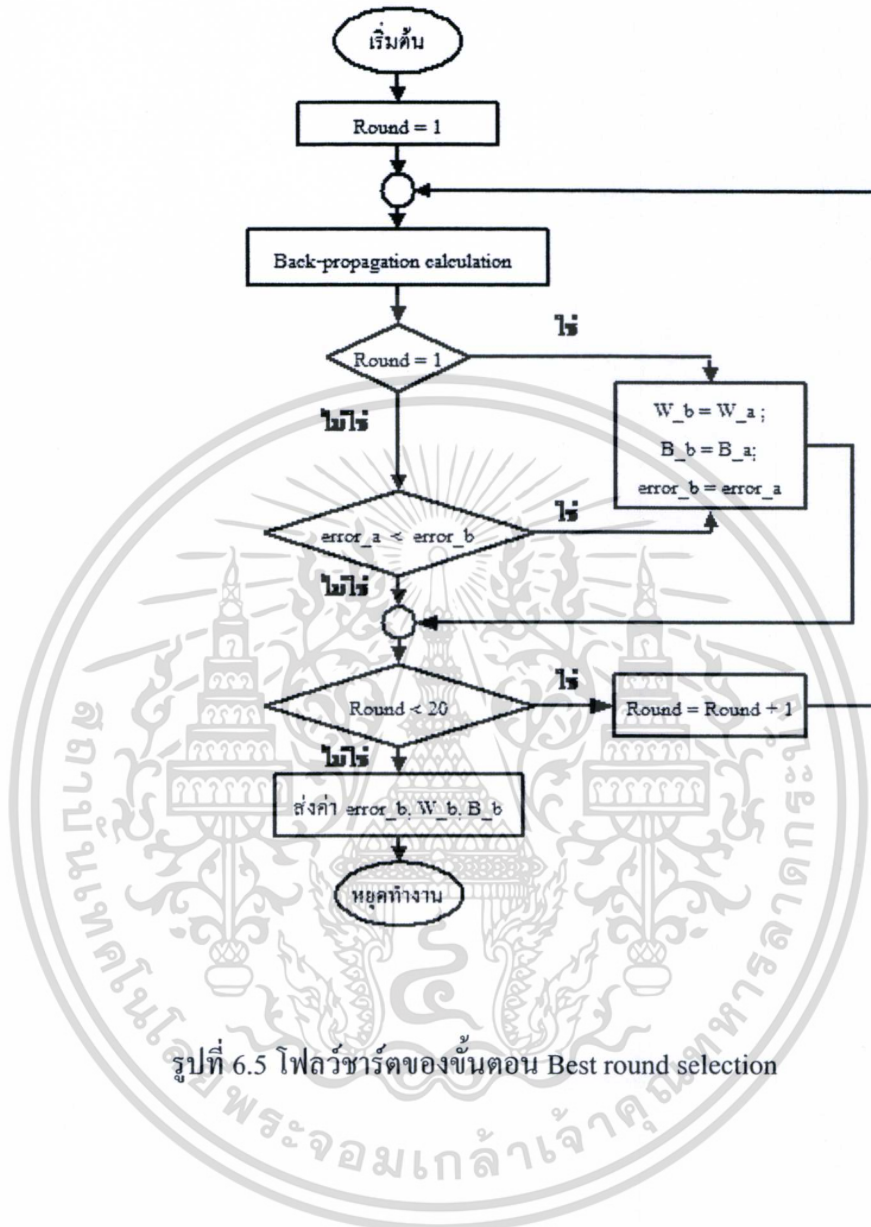


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



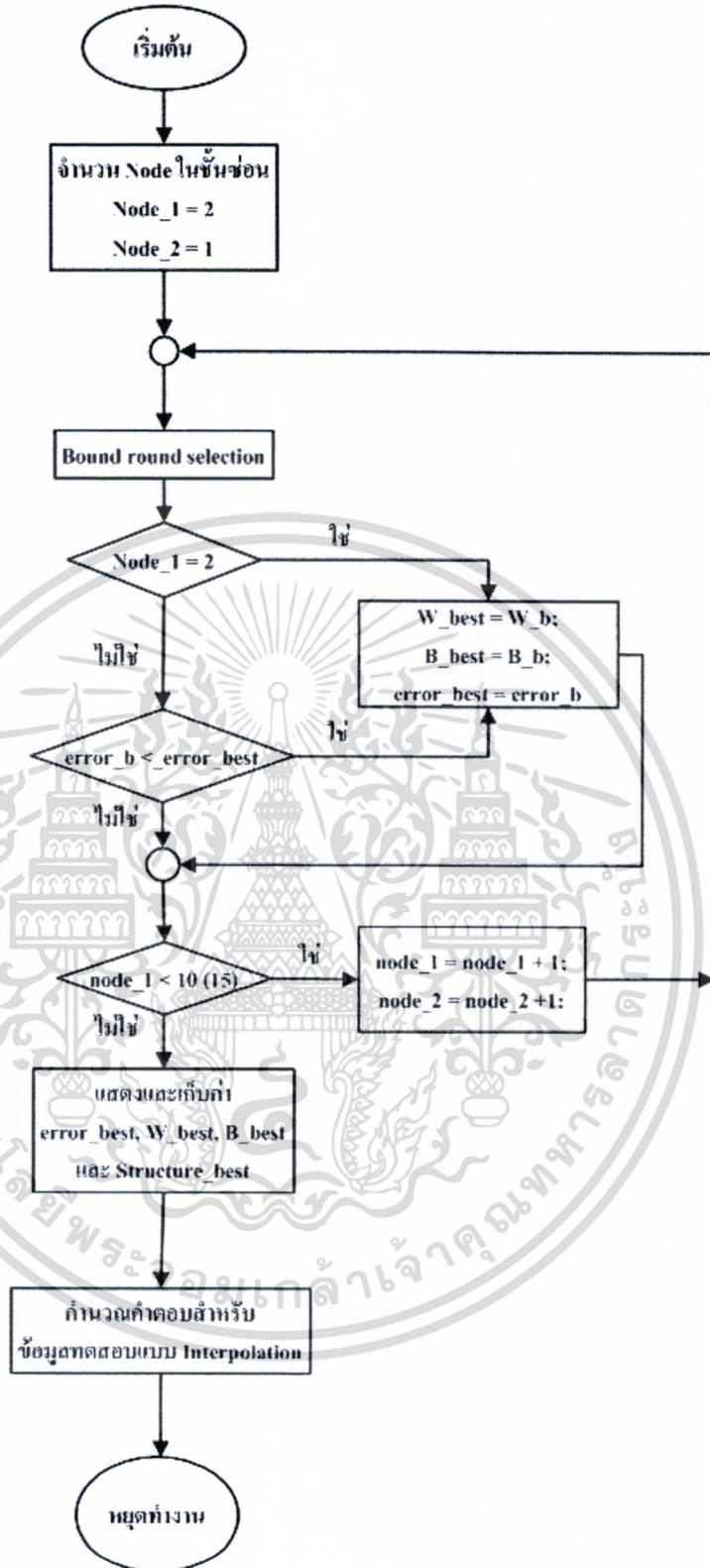
รูปที่ 6.4 โฟลว์ชาร์ตของขั้นตอน Back-propagation calculation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.5 โฟลว์ชาร์ตของขั้นตอน Best round selection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 โพลีชาร์ตของขั้นตอน Best structure and best round selection และ คำนวณคำตอบ สำหรับข้อมูลทดสอบแบบ Interpolation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

### ผลการทดลอง

บทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองซึ่งได้จากการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนด้วย Neural Network Toolbox ตามรูปแบบและวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 6 โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 7.1 รูปแบบการนำเสนอ

##### 7.1.1 ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งมี 2 ระบบดังนี้

###### 7.1.1.1 ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT)

การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อใช้คำนวณหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT) โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุคหน่วยประมวลผลกลางเซเลดอน 1.86 GHz หน่วยความจำ 1 GB จากนั้นจึงนำโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอน (ชุดที่มีค่า mape ต่ำที่สุด) ในเงื่อนไขต่างๆ มาทดสอบด้วยข้อมูลทดสอบชุดเดียวกัน โดยผลการทดสอบแสดงอยู่ในตารางที่ 7.1 – 7.10 และรูปที่ 7.1 – 7.4

###### 7.1.1.2 ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA)

การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อใช้คำนวณหาค่า E ของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุคหน่วยประมวลผลกลางเซเลดอน 1.86 GHz หน่วยความจำ 1 GB จากนั้นจึงนำโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอน (ชุดที่มีค่า mape ต่ำที่สุด) ในเงื่อนไขต่างๆ มาทดสอบด้วยข้อมูลทดสอบชุดเดียวกัน โดยผลการทดสอบแสดงอยู่ในตารางที่ 7.11 – 7.17 และรูปที่ 7.4 – 7.8

##### 7.1.2 รูปแบบการนำเสนอผลการทดลองของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงแต่ละระบบ

การแสดงผลการทดลองของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงแต่ละระบบจะนำเสนอแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยในส่วนแรกจะเปรียบเทียบค่า E แต่ละค่าที่คำนวณได้จาก TLW กับค่า E แต่ละค่าที่เป็นคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนในแต่ละเงื่อนไข พร้อมกับกราฟเปรียบเทียบค่าผิดพลาดของคำตอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม ในส่วนที่สองจะแสดงเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนของแต่ละเงื่อนไข และส่วนที่สามจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพ และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมทุกเงื่อนไข

## 7.2 ผลการทดลองของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT)

### 7.2.1 ผลการทดลองของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) วงจรเดี่ยว

ตารางที่ 7.1 ผลเปรียบเทียบค่า  $E_{ANN}$  กับค่า  $E_{TLW}$  ของข้อมูลทดสอบ 10 ชุด จากจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 60 ชุด

ข้อมูลทดสอบชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	ape (%)	ข้อมูลทดสอบชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	ape (%)
1	1.3720	1.3901	1.3159	6	2.0470	2.0052	2.0430
2	2.4670	2.4778	0.4359	7	1.4020	1.3868	1.0861
3	1.7850	1.7394	2.5522	8	3.9270	3.9643	0.9510
4	3.5860	3.6674	2.2709	9	1.0590	1.1013	3.9905
5	1.1890	1.1803	0.7310	10	4.2830	4.0832	4.6655

ตารางที่ 7.2 ผลเปรียบเทียบค่า  $E_{ANN}$  กับค่า  $E_{TLW}$  ของข้อมูลทดสอบ 10 ชุด จากจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 90 ชุด

ข้อมูลทดสอบชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	ape (%)	ข้อมูลทดสอบชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	ape (%)
1	1.3720	1.3841	0.8835	6	2.0470	2.0233	1.1581
2	2.4670	2.4462	0.8423	7	1.4020	1.4004	0.1160
3	1.7850	1.7872	0.1247	8	3.9270	4.0135	2.2030
4	3.5860	3.6375	1.4349	9	1.0590	1.0673	0.7863
5	1.1890	1.1908	0.1473	10	4.2830	4.2427	0.9407

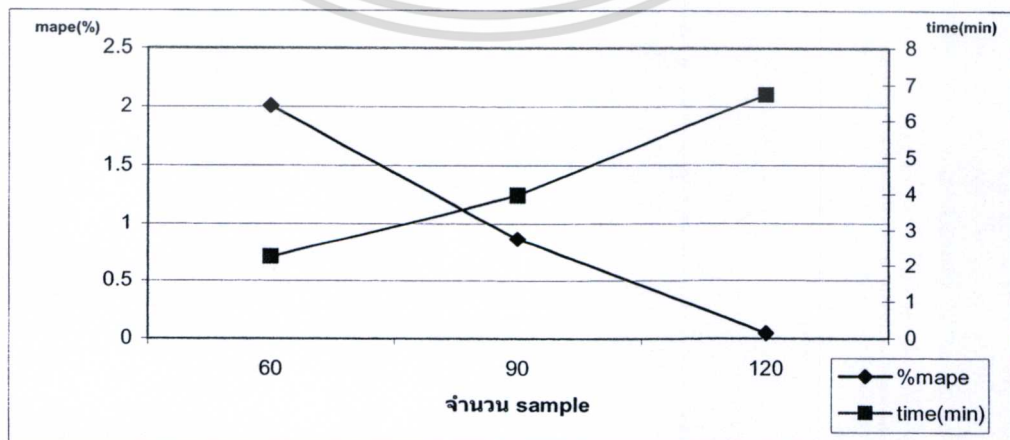
ตารางที่ 7.3 ผลเปรียบเทียบค่า  $E_{ANN}$  กับค่า  $E_{TLW}$  ของข้อมูลทดสอบ 10 ชุด จากจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 120 ชุด

ข้อมูลทดสอบชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	ape (%)	ข้อมูลทดสอบชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	ape (%)
1	1.3720	1.3712	0.0547	6	2.0470	2.0463	0.0335
2	2.4670	2.4670	0.0008	7	1.4020	1.4027	0.0486
3	1.7850	1.7844	0.0344	8	3.9270	3.9267	0.0083
4	3.5860	3.5861	0.0035	9	1.0590	1.0590	0.0003
5	1.1890	1.1878	0.0995	10	4.2830	4.2900	0.1642

ตารางที่ 7.4 ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วในเงื่อนไขต่างๆ

จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน	เวลาที่ใช้ฝึกสอน (นาที)	จำนวนนิรอนในชั้นซ่อนที่ 1 - 2	ผลทดสอบของชุดข้อมูลทดสอบ		
			mape (%)	max ape (%)	min ape (%)
60	2.2495	6-5	2.0042	4.6655	0.4359
90	3.9643	7-6	0.8637	2.2030	0.1160
120	6.7419	9-8	0.0448	0.1642	0.000

รูปที่ 7.1 การเปรียบเทียบค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในทุกกรณี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในตารางที่ 7.1 ถึง 7.4 และ รูปที่ 7.1 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

- การคำนวณค่าสนามไฟฟ้า (E)

1. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 60 ชุด สามารถคำนวณค่าสนามไฟฟ้า (E) ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 2.0042 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.4359 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 4.6655 %
2. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 90 ชุด สามารถคำนวณค่าสนามไฟฟ้า (E) ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 0.8637 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.1160 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 2.2030 %
3. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 120 ชุด สามารถคำนวณค่าสนามไฟฟ้า (E) ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 0.0448 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.000 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 0.1642 %

- เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยที่สุดคือ โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ข้อมูลฝึกสอน 60 ชุด โดยโครงข่ายประสาทเทียมมีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เท่ากับ 6 และ 5 นิวรอนตามลำดับ ใช้เวลาฝึกสอน 2.2495 นาที และโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เวลาในการฝึกสอนมากที่สุดคือ โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ข้อมูลฝึกสอน 120 ชุด โดยโครงข่ายประสาทเทียมมีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เท่ากับ 9 และ 8 นิวรอนตามลำดับ โดยใช้เวลาฝึกสอน 6.7419 นาที

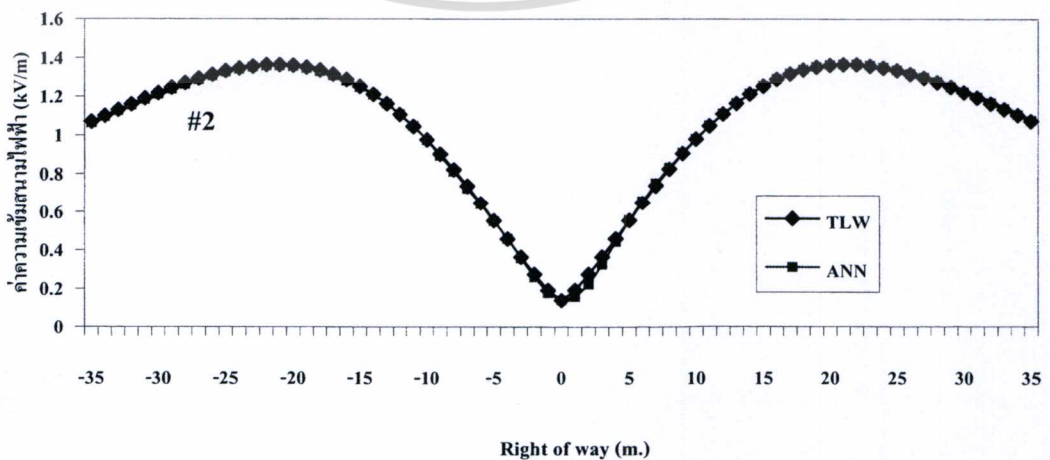
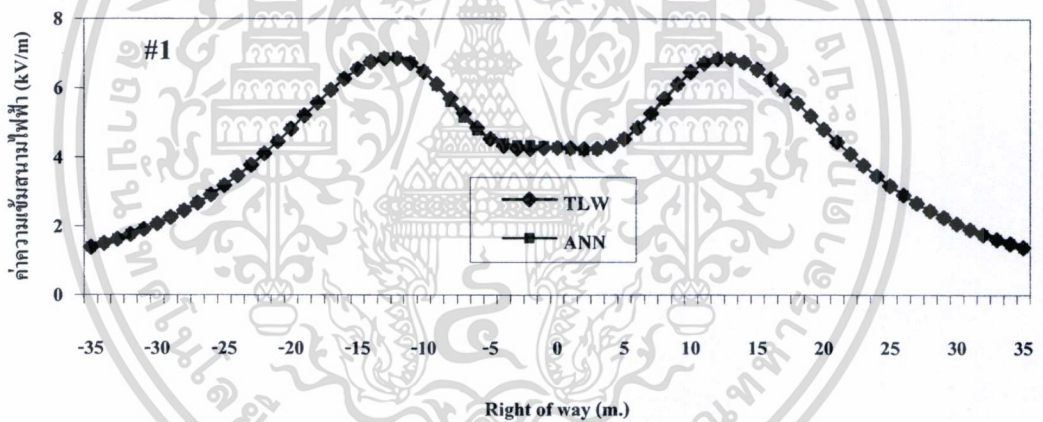
สำหรับการฝึกสอนในเงื่อนไขนี้เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนจะแปรตามจำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอนและจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน กล่าวคือ เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะมากขึ้นตามจำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอนที่เพิ่มขึ้น และ โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใหญ่ขึ้น (จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนมีจำนวนมากขึ้น) ซึ่งจากผลการทดสอบของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT) วงจรเคี้ยว จะพบว่าข้อมูลฝึกสอน 120 ชุดเป็นโครงข่ายที่มีค่า mape ต่ำที่สุด

หลังจากนั้น นำโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนที่มีค่า mape ต่ำสุด หากำตอบในชุดทดสอบแบบ Interpolation ตามเงื่อนไขต่างๆ

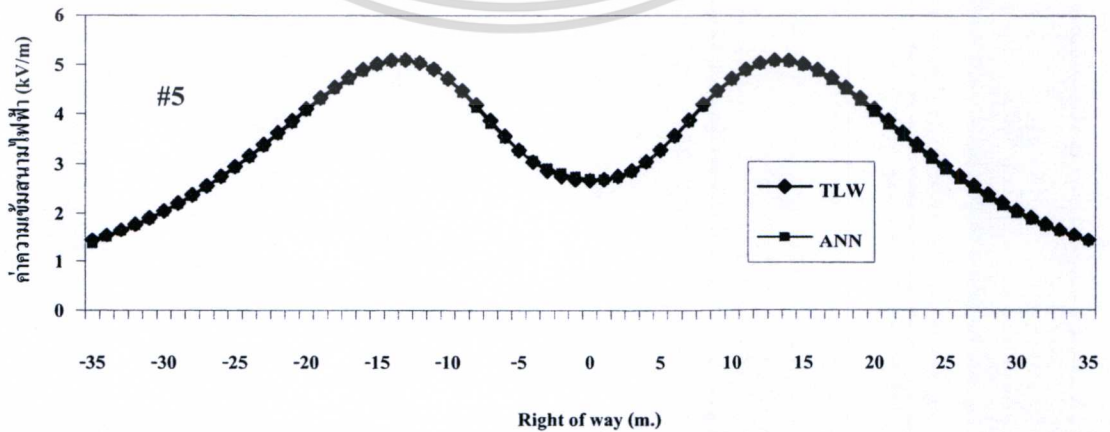
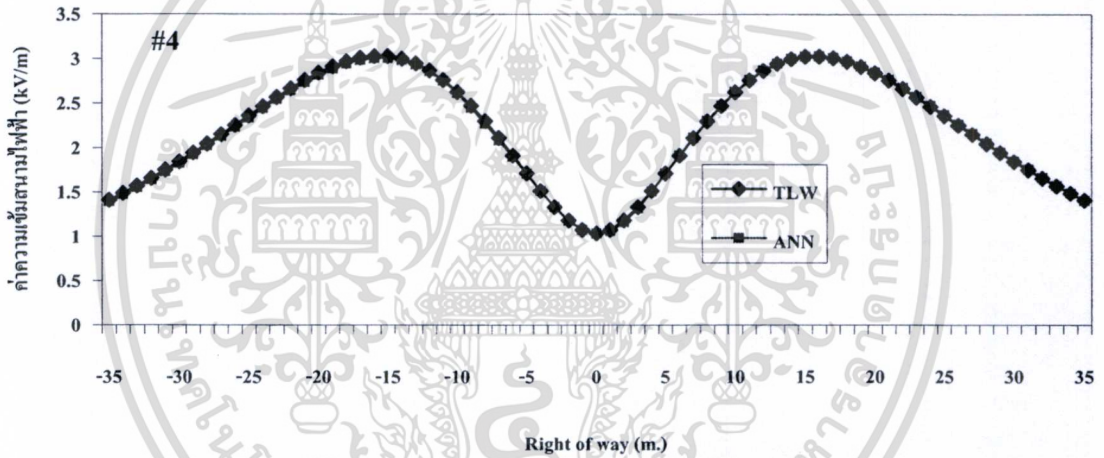
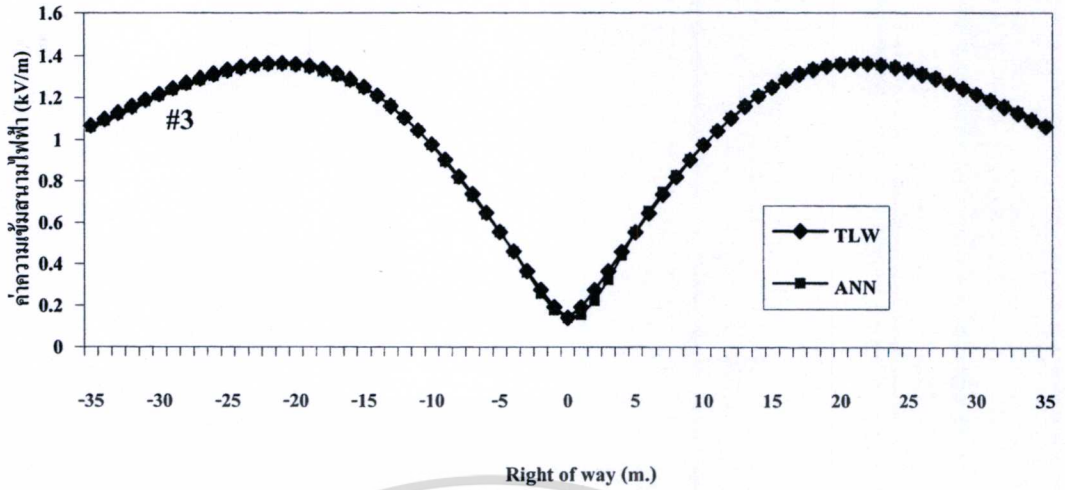
### ตารางที่ 7.5 เส้นใยต่างๆสำหรับการหาค่าตอบของชุดทดสอบแบบ Interpolation

แรงดัน (kV)	เส้นใยที่	ระยะความสูง (m.)	ขนาดตัวนำไฟฟ้า (MCM)	Right of way (m.)
500 kV (วงจรเดี่ยว)	1	13.0	1272	-35, -34,...,34,35
	2	32.5	954	-35, -34,...,34,35
	3	27.0	900	-35, -34,...,34,35
	4	21.0	1113	-35, -34,...,34,35
	5	15.5	954	-35, -34,...,34,35

รูปที่ 7.2 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของชุดทดสอบแบบ Interpolation ตามเส้นใยต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการหาคำตอบค่าสนามไฟฟ้า (E) ของชุด Interpolation จะพบว่า คำตอบที่ได้จาก  
 โครงข่ายประสาทเทียมมีค่าที่แตกต่างเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรม TLW ดังนั้นสรุปได้  
 ว่า โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้ฝึกสอนสามารถให้คำตอบที่มีประสิทธิภาพและแม่นยำในชุดข้อมูล  
 Interpolation สำหรับ ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย  
 (EGAT) วงจรเดียว

## 7.2.2 ผลการทดลองของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต แห่งประเทศไทย (EGAT) วงจรคู่

ตารางที่ 7.6 ผลเปรียบเทียบค่า  $E_{ANN}$  กับค่า  $E_{TLW}$  ของข้อมูลทดสอบ 40 ชุด จากจำนวนชุดข้อมูล  
 ฝึกสอน 290 ชุด

ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	ape (%)	ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	ape (%)
1	6.1210	6.0805	0.6619	21	1.1590	1.1515	0.6505
2	2.5580	2.5554	0.1034	22	1.3230	1.3010	1.6655
3	4.8700	4.8432	0.5495	23	2.3860	2.3720	0.5862
4	3.9050	3.8975	0.1922	24	3.1360	3.1231	0.4118
5	1.4920	1.5113	1.2941	25	2.3050	2.3112	0.2702
6	1.5270	1.5345	0.4893	26	3.0840	3.1166	1.0568
7	1.8510	1.8415	0.5145	27	1.3950	1.3886	0.4564
8	4.3440	4.1787	3.8049	28	2.6570	2.6719	0.5601
9	0.8900	0.90522	1.7105	29	1.7960	1.7912	0.2664
10	2.3650	2.3613	0.1576	30	2.7930	2.8134	0.7312
11	6.6350	6.589	0.6934	31	2.3100	2.3053	0.2030
12	1.6240	1.6235	0.0317	32	3.4090	3.4195	0.3070
13	3.8980	3.9081	0.2593	33	0.9170	0.9275	1.1487
14	8.6490	8.7942	1.6789	34	1.0400	1.0413	0.1217
15	0.9100	0.94935	4.3244	35	3.1540	3.0998	1.7174
16	2.0190	2.0236	0.2289	36	1.286	1.3920	8.2420
17	3.4420	3.3889	1.5414	37	2.1410	2.1505	0.4425
18	6.7110	6.5633	2.2001	38	2.3030	2.3255	0.9767
19	1.3770	1.3695	0.5416	39	1.4540	1.4608	0.4696
20	0.8390	0.8379	0.1271	40	4.6330	4.6546	0.4671

ตารางที่ 7.7 ผลเปรียบเทียบค่า  $E_{ANN}$  กับค่า  $E_{TLW}$  ของข้อมูลทดสอบ 40 ชุด จากจำนวนชุดข้อมูล  
ฝึกสอน 390 ชุด

ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	ape (%)	ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	ape (%)
1	6.1210	6.0830	0.6202	21	1.1590	1.1624	0.2936
2	2.5580	2.5633	0.2057	22	1.3230	1.3321	0.6910
3	4.8700	4.8502	0.4070	23	2.3860	2.3736	0.5199
4	3.9050	3.9089	0.1003	24	3.1360	3.1416	0.1798
5	1.4920	1.4720	1.3398	25	2.3050	2.2765	1.2361
6	1.5270	1.5244	0.1695	26	3.0840	3.1212	1.2067
7	1.8510	1.8547	0.1999	27	1.3950	1.3962	0.0837
8	4.3440	4.1480	4.5124	28	2.6570	2.6268	1.1376
9	0.8900	0.90742	1.9579	29	1.7960	1.7827	0.7389
10	2.3650	2.3659	0.0397	30	2.7930	2.7728	0.7217
11	6.6350	6.6033	0.4784	31	2.3100	2.3636	2.3209
12	1.6240	1.6226	0.0871	32	3.4090	3.4087	0.0096
13	3.8980	3.8800	0.4614	33	0.9170	0.9383	2.3270
14	8.6490	8.5627	0.9982	34	1.0400	1.0425	0.2407
15	0.9100	0.9099	0.0057	35	3.1540	3.0214	4.2033
16	2.0190	2.014	0.2464	36	1.286	1.3005	1.1293
17	3.4420	3.4521	0.2921	37	2.1410	2.1351	0.2774
18	6.7110	6.7062	0.0718	38	2.3030	2.2941	0.3865
19	1.3770	1.3835	0.4718	39	1.4540	1.4542	0.0139
20	0.8390	0.8521	1.5589	40	4.6330	4.6294	0.0772

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.8 ผลเปรียบเทียบค่า  $E_{ANN}$  กับค่า  $E_{TLW}$  ของข้อมูลทดสอบ 40 ชุด จากจำนวนชุดข้อมูล  
ฝึกสอน 490 ชุด

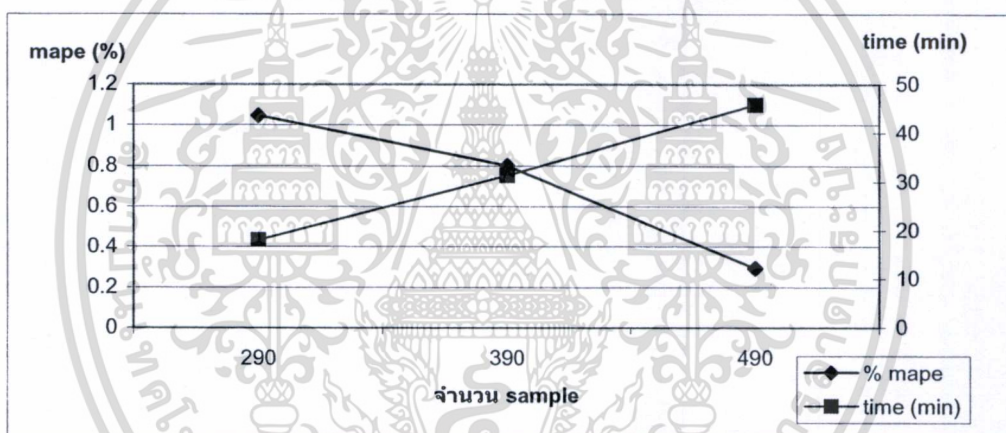
ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	ape (%)	ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	ape (%)
1	6.1210	6.1244	0.0562	21	1.1590	1.1632	0.3582
2	2.5580	2.5488	0.3580	22	1.3230	1.3293	0.4798
3	4.8700	4.8776	0.1565	23	2.3860	2.3873	0.0543
4	3.9050	3.8909	0.3615	24	3.1360	3.1382	0.0706
5	1.4920	1.4791	0.8652	25	2.3050	2.3092	0.1833
6	1.5270	1.5457	1.2252	26	3.0840	3.0934	0.3040
7	1.8510	1.8528	0.0962	27	1.3950	1.3859	0.6490
8	4.3440	4.3564	0.2865	28	2.6570	2.6551	0.0723
9	0.8900	0.8835	0.7348	29	1.7960	1.7831	0.71993
10	2.3650	2.3637	0.0551	30	2.7930	2.7958	0.1004
11	6.6350	6.6331	0.0294	31	2.3100	2.3070	0.1314
12	1.6240	1.6150	0.5570	32	3.4090	3.4098	0.0234
13	3.8980	3.8948	0.0830	33	0.9170	0.9148	0.2449
14	8.6490	8.6529	0.0445	34	1.0400	1.0430	0.2883
15	0.9100	0.9151	0.5571	35	3.1540	3.1521	0.0596
16	2.0190	2.0211	0.1059	36	1.286	1.3058	1.5423
17	3.4420	3.4455	0.1019	37	2.1410	2.1403	0.0327
18	6.7110	6.7019	0.1354	38	2.3030	2.300	0.1298
19	1.3770	1.3804	0.2462	39	1.4540	1.4548	0.0534
20	0.8390	0.8400	0.1189	40	4.6330	4.6312	0.0387

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.9 ผลการทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วในเงื่อนไขต่างๆ

จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน	เวลาที่ใช้ฝึกสอน (นาที)	จำนวนนิเวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 - 2	ผลทดสอบของชุดข้อมูลทดสอบ		
			mape (%)	max ape (%)	min ape (%)
290	18.155	11-10	1.0464	8.2420	0.0317
390	31.341	12-11	0.8005	4.5124	0.0057
490	45.800	13-12	0.2928	1.5423	0.0234

รูปที่ 7.3 การเปรียบเทียบค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในทุกกรณี



จากผลการทดลองในตารางที่ 7.6 ถึง 7.9 และรูปที่ 7.3 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

- การคำนวณค่าสนามไฟฟ้า (E)

1. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 290 ชุด สามารถคำนวณค่าสนามไฟฟ้า (E) ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 1.0464 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.0317 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 8.2420 %
2. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 390 ชุด สามารถคำนวณค่าสนามไฟฟ้า (E) ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 0.8005 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.0057 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 4.5124 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. โครงข่ายประสาทดัดเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 490 ชุด สามารถคำนวณค่าสนามไฟฟ้า (E) ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 0.2928 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.0234 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 1.5423 %

- เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

โครงข่ายประสาทดัดเทียมที่ใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยที่สุดคือ โครงข่ายประสาทดัดเทียมที่ใช้ข้อมูลฝึกสอน 290 ชุด ซึ่งโครงข่ายประสาทดัดเทียมที่ได้มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เท่ากับ 11 และ 10 นิวรอนตามลำดับ โดยใช้เวลาฝึกสอน 18.155 นาที และโครงข่ายประสาทดัดเทียมที่ใช้เวลาในการฝึกสอนมากที่สุดคือ โครงข่ายประสาทดัดเทียมที่ใช้ข้อมูลฝึกสอน 490 ชุด ซึ่งโครงข่ายประสาทดัดเทียมที่ได้มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เท่ากับ 13 และ 12 นิวรอนตามลำดับ โดยใช้เวลาฝึกสอน 45.800 นาที

สำหรับการฝึกสอนในเงื่อนไขนี้ เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนแปรตามจำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอนและจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน กล่าวคือ เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทดัดเทียมจะมากขึ้นตาม จำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอนที่เพิ่มขึ้น และ โครงสร้างของโครงข่ายประสาทดัดเทียมที่ใหญ่ขึ้น (จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนมีจำนวนมากขึ้น) ซึ่งจากผลการทดสอบของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT) วงจรคู่ จะพบว่าข้อมูลฝึกสอน 490 ชุด เป็นโครงข่ายที่มีค่า mape ต่ำที่สุด

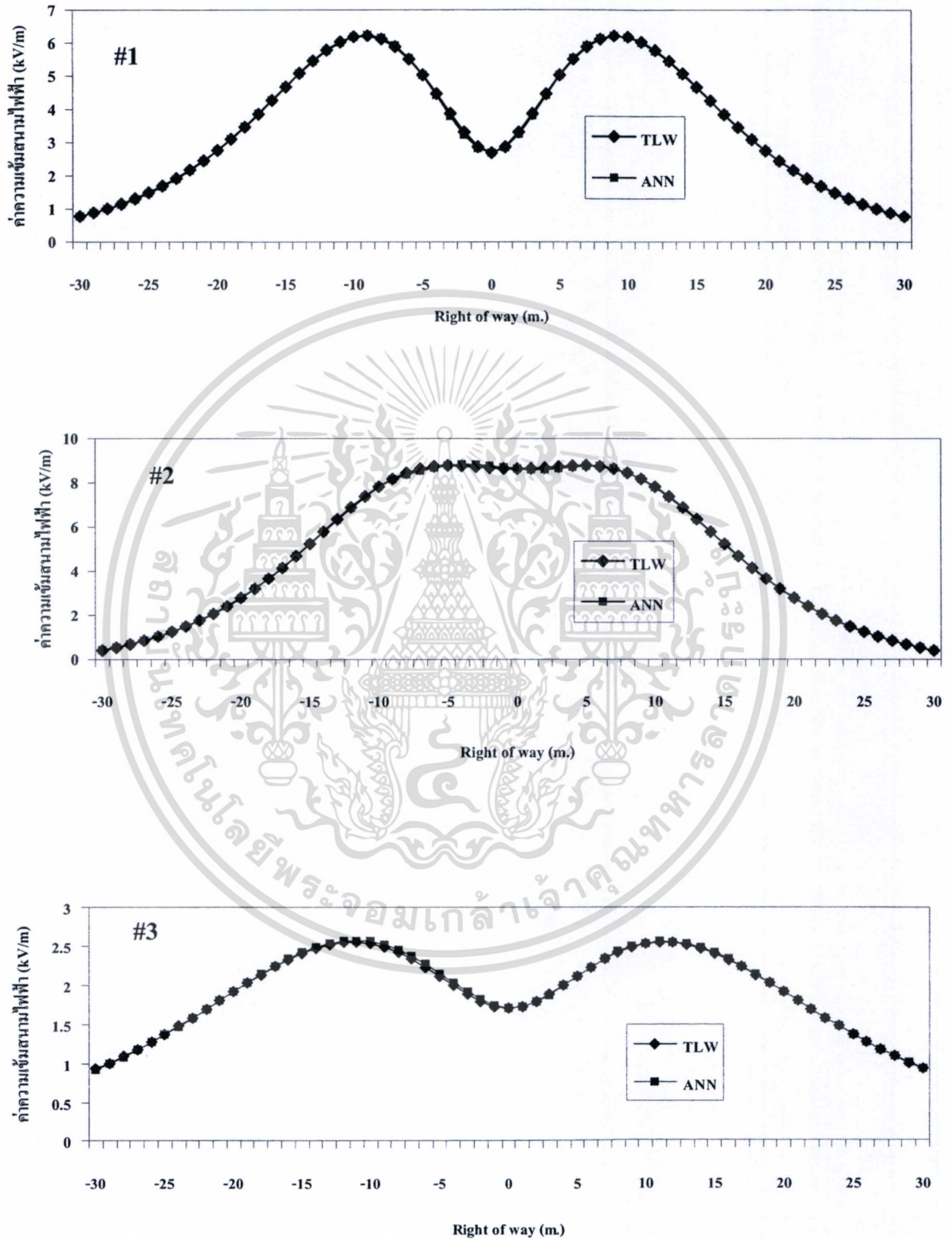
หลังจากนั้น นำโครงข่ายประสาทดัดเทียมที่ผ่านการฝึกสอนที่มีค่า mape ต่ำสุด หากำตอบในชุดทดสอบแบบ Interpolation ตามเงื่อนไขต่างๆ

ตารางที่ 7.10 เงื่อนไขต่างๆสำหรับการหาคำตอบของชุดทดสอบแบบ Interpolation

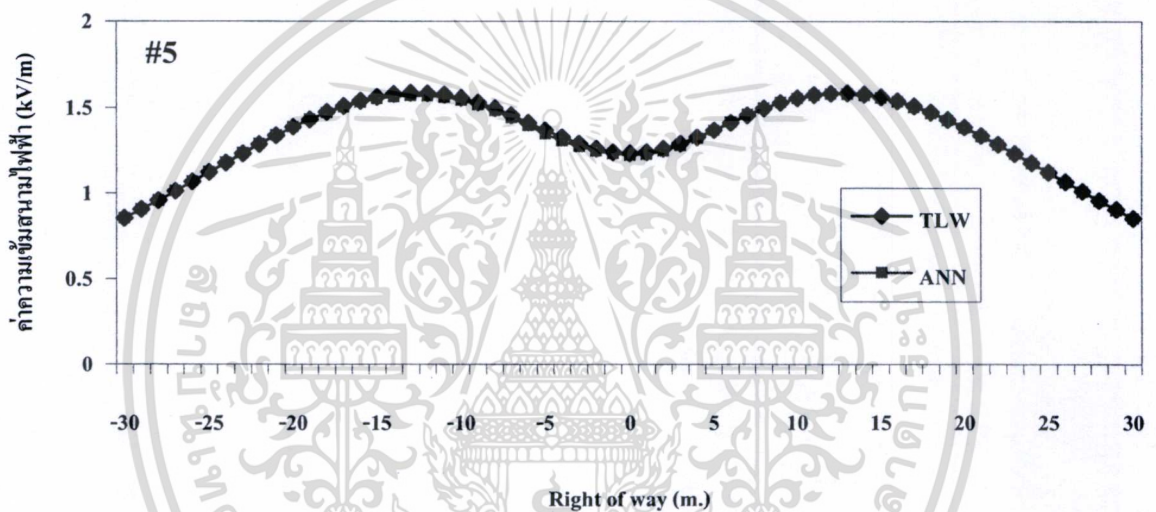
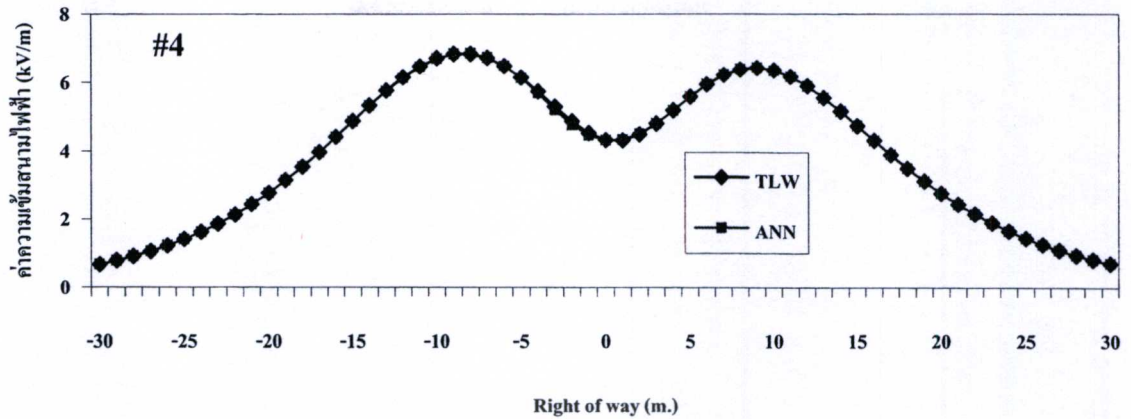
แรงดัน (kV)	เงื่อนไขที่	รูปแบบการจัดเรียงลำดับ	ระยะความสูง (m.)	ขนาดตัวนำไฟฟ้า (MCM)	Right of way (m.)
500 kV (วงจรคู่)	1	ABC-CBA	13.0	1272	-30, -29, ..., 29, 30
	2	ABC-ABC	13.0	1272	-30, -29, ..., 29, 30
	3	ABC-CBA	21.0	900	-30, -29, ..., 29, 30
	4	ABC-BCA	13.0	1272	-30, -29, ..., 29, 30
	5	ABC-CBA	27.0	1113	-30, -29, ..., 29, 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### รูปที่ 7.4 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของชุดทดสอบแบบ Interpolation ตามเงื่อนไขต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากการหาค่าตอบสนองไฟฟ้า (E) ของชุด Interpolation จะพบว่า ค่าตอบที่ได้จาก  
 โครงข่ายประสาทเทียมมีค่าที่แตกต่างเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรม TLW ดังนั้นสรุปได้  
 ว่า โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้ฝึกสอนสามารถหาค่าตอบที่มีประสิทธิภาพและแม่นยำในชุดข้อมูล  
 Interpolation สำหรับ ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย  
 (EGAT) วงจรคู่

### 7.3 ผลการทดลองของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA)

#### 7.3.1 ผลการทดลองของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) วงจรเดี่ยว

ตารางที่ 7.11 ผลเปรียบเทียบค่า  $E_{ANN}$  กับค่า  $E_{TLW}$  ของชุดทดสอบ 10 ชุด จากจำนวนชุดข้อมูล ฟีกสอน 30 ชุด

ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	ape (%)	ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	ape (%)
1	0.4220	0.3354	20.5314	6	0.3160	0.3803	20.3532
2	0.0510	0.0511	0.2283	7	0.0690	0.0667	3.3498
3	0.1270	0.1545	21.6765	8	0.1140	0.1075	5.7167
4	0.0790	0.1114	40.9824	9	0.6150	0.6248	1.6000
5	0.1450	0.1302	10.2386	10	0.4110	0.4120	0.2483

ตารางที่ 7.12 ผลเปรียบเทียบค่า  $E_{ANN}$  กับค่า  $E_{TLW}$  ของชุดทดสอบ 10 ชุด จากจำนวนชุดข้อมูล ฟีกสอน 60 ชุด

ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	ape (%)	ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	ape (%)
1	0.4220	0.4116	2.4654	6	0.3160	0.3323	5.1655
2	0.0510	0.0511	0.1391	7	0.0690	0.0602	12.7816
3	0.1270	0.1259	0.8913	8	0.1140	0.1145	0.4774
4	0.0790	0.0808	2.3146	9	0.6150	0.6025	2.0318
5	0.1450	0.1441	0.6020	10	0.4110	0.3992	2.8728

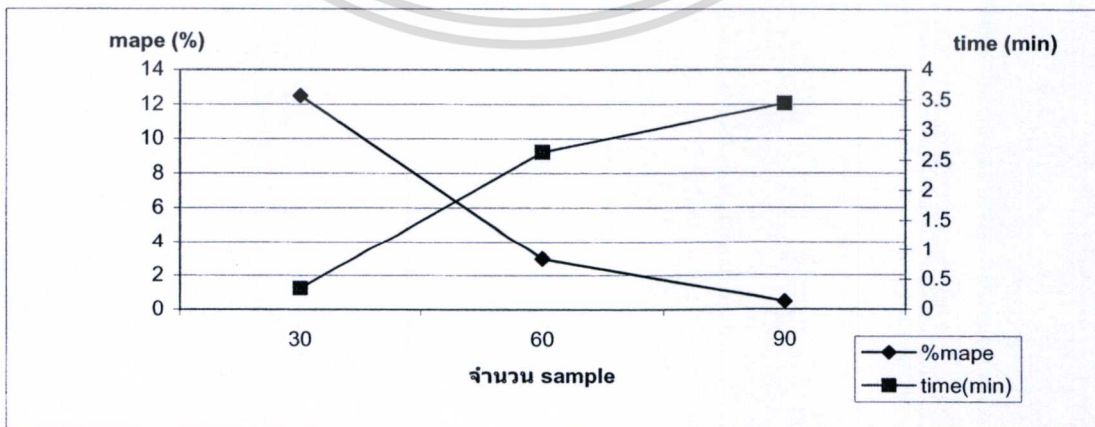
ตารางที่ 7.13 ผลเปรียบเทียบค่า  $E_{ANN}$  กับค่า  $E_{TLW}$  ของชุดทดสอบ 10 ชุด จากจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 90 ชุด

ข้อมูลทดสอบชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	ape (%)	ข้อมูลทดสอบชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	ape (%)
1	0.4220	0.4219	0.0185	6	0.3160	0.3151	0.2992
2	0.0510	0.0519	1.6861	7	0.0690	0.0686	0.6038
3	0.1270	0.1267	0.2392	8	0.1140	0.1137	0.2707
4	0.0790	0.0785	0.6377	9	0.6150	0.6178	0.4609
5	0.1450	0.1454	0.2666	10	0.4110	0.4106	0.1016

ตารางที่ 7.14 ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วในเงื่อนไขต่างๆ

จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน	เวลาที่ใช้ฝึกสอน (นาที)	จำนวนนิรอนในชั้นซ่อนที่ 1-2	ผลทดสอบของชุดข้อมูลทดสอบ		
			mape (%)	max ape (%)	min ape (%)
30	0.3521	6-5	12.4925	40.9824	0.2283
60	2.6318	5-4	2.9742	12.7816	0.1391
90	3.4438	9-8	0.4584	1.6861	0.0185

รูปที่ 7.5 การเปรียบเทียบค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในทุกกรณี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในตารางที่ 7.11 ถึง 7.14 และรูปที่ 7.5 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

- การคำนวณค่าสนามไฟฟ้า (E)

1. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 30 ชุด สามารถคำนวณค่าสนามไฟฟ้า (E) ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 12.4925 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.2283 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 40.9824 %
2. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 60 ชุด สามารถคำนวณค่าสนามไฟฟ้า (E) ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 2.9742 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.1391 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 12.7816 %
3. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 90 ชุด สามารถคำนวณค่าสนามไฟฟ้า (E) ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 0.4584 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.0185 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 1.6861 %

- เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยที่สุดคือ โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ข้อมูลฝึกสอน 30 ชุด ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เท่ากับ 6 และ 5 นิวรอนตามลำดับ โดยใช้เวลาฝึกสอน 0.3521 นาที และโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เวลาในการฝึกสอนมากที่สุดคือ โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ข้อมูลฝึกสอน 90 ชุด ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เท่ากับ 9 และ 8 นิวรอนตามลำดับ โดยใช้เวลาฝึกสอน 3.4438 นาที

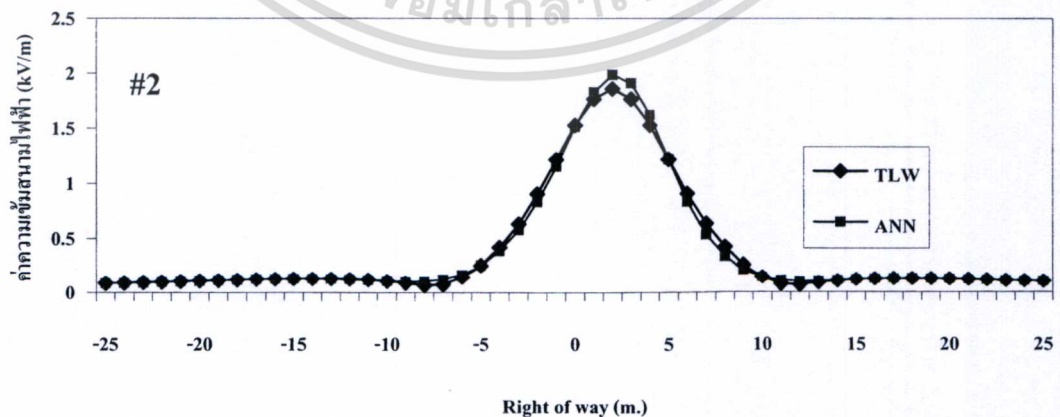
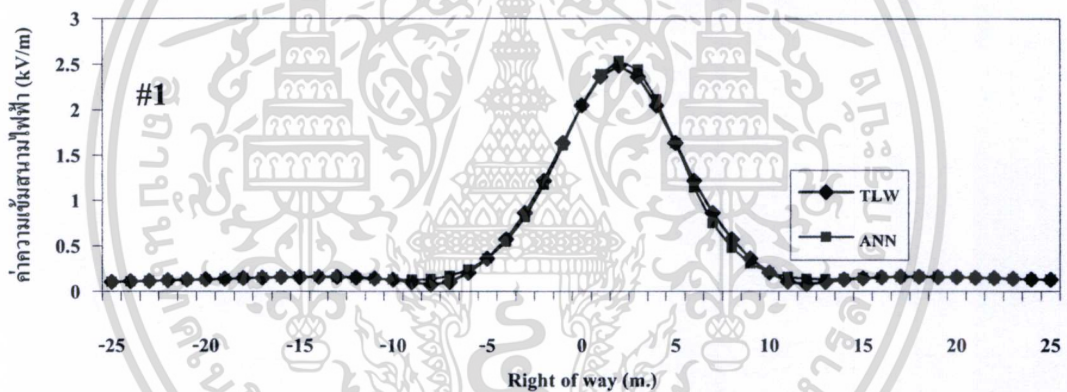
สำหรับการฝึกสอนในเงื่อนไขนี้เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนแปรตามจำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอนและจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน กล่าวคือ เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะมากขึ้นตาม จำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอนที่เพิ่มขึ้น และ โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใหญ่ขึ้น (จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนมีจำนวนมากขึ้น) ซึ่งจากผลการทดสอบของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) วงจรเดียว จะพบว่าข้อมูลฝึกสอน 90 ชุดเป็นโครงข่ายที่มีค่า mape ต่ำที่สุด

หลังจากนั้น นำโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนที่มีค่า mape ต่ำสุด หาคำตอบในชุดทดสอบแบบ Interpolation ตามเงื่อนไขต่างๆ

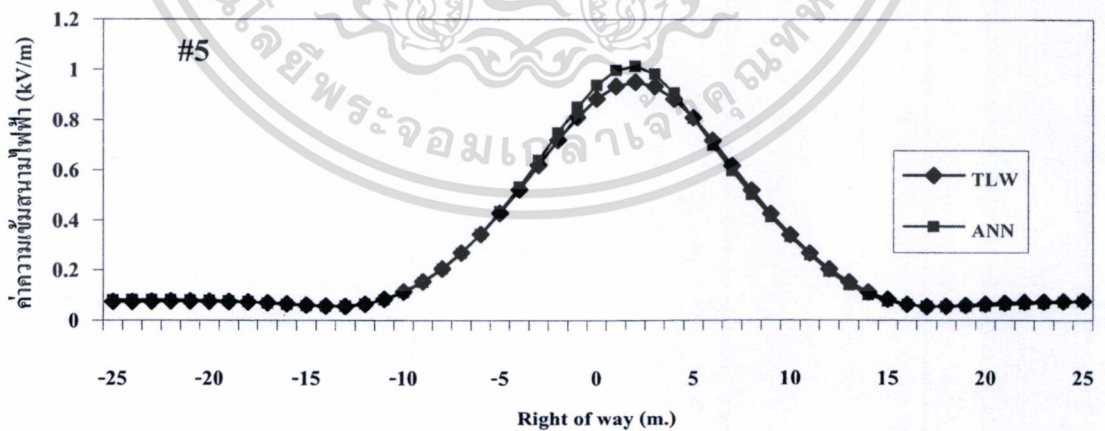
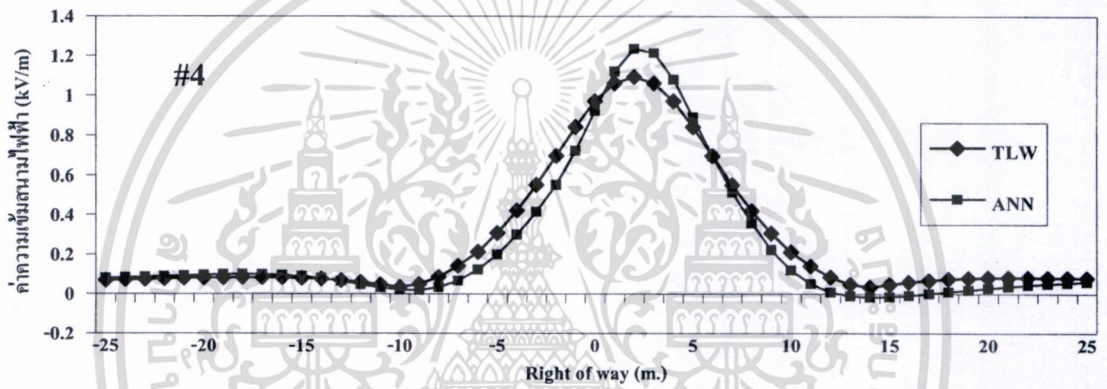
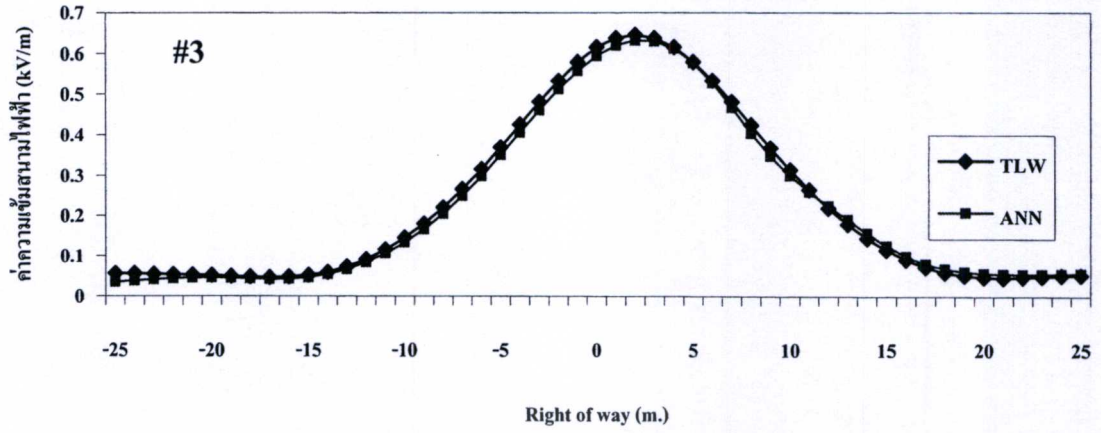
ตารางที่ 7.15 เส้นใยต่างๆสำหรับการหาคำตอบของชุดทดสอบแบบ Interpolation

แรงดัน (kV)	เส้นใยที่	จำนวนตัวนำต่อเฟส	ระยะความสูง (m.)	ขนาดตัวนำไฟฟ้า (mm <sup>2</sup> )	Right of way (m.)
115 kV (วงจรเดี่ยว)	1	2	6.0	400	-25, -24,...,24,25
	2	1	6.0	400	-25, -24,...,24,25
	3	2	13.0	300	-25, -24,...,24,25
	4	1	8.0	250	-25, -24,...,24,25
	5	2	10.5	380	-25, -24,...,24,25

รูปที่ 7.6 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของชุดทดสอบแบบ Interpolation ตามเส้นใยต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการหาคำตอบสนามไฟฟ้า (E) ของชุด Interpolation จะพบว่า คำตอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีผลที่แตกต่างเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรม TLW ดังนั้นสรุปได้ว่า โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้ฝึกสอนสามารถให้คำตอบที่มีประสิทธิภาพและแม่นยำในชุดข้อมูล Interpolation สำหรับ ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) วงจรเดียว

### 7.3.2 ผลการทดลองของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) วงจรคู่

ตารางที่ 7.16 ผลเปรียบเทียบค่า  $E_{ANN}$  กับค่า  $E_{TLW}$  ของชุดทดสอบ 40 ชุด จากจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 350 ชุด

ข้อมูลทดสอบชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	ape (%)	ข้อมูลทดสอบชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	ape (%)
1	0.0690	0.0688	0.2521	21	0.0920	0.0879	4.4230
2	0.3410	0.3396	0.4004	22	1.4630	1.4554	0.5169
3	0.1360	0.1278	6.0549	23	0.0550	0.0528	3.9415
4	1.4880	1.4863	0.1165	24	0.2460	0.2627	6.8048
5	0.4300	0.4266	0.7975	25	0.1910	0.1848	3.2502
6	0.0700	0.0733	4.7717	26	0.1930	0.1950	1.0219
7	0.2830	0.2810	0.7187	27	0.1100	0.1139	3.5381
8	0.0320	0.0311	2.6787	28	1.1970	1.2048	0.6491
9	0.2110	0.2116	0.2944	29	0.0480	0.0474	1.2379
10	0.1940	0.1968	1.4417	30	0.0770	0.0843	9.4766
11	1.9060	1.9083	0.1198	31	0.1180	0.1185	0.4395
12	0.0440	0.0495	12.5640	32	0.0150	0.0120	20.2976
13	0.0540	0.0465	13.8946	33	0.3050	0.3005	1.4805
14	2.9760	2.9399	1.2144	34	0.0190	0.0244	28.6703
15	0.0460	0.0421	8.4713	35	1.5910	1.5919	0.0570
16	0.0300	0.0297	1.0636	36	0.5190	0.5158	0.6075
17	0.0930	0.0953	2.4710	37	0.5000	0.4958	0.8350
18	1.0830	1.0762	0.6245	38	1.0740	1.0660	0.7407
19	0.1040	0.0980	5.7956	39	0.3000	0.2985	0.5005
20	0.8090	0.8105	0.1851	40	0.1240	0.1233	0.5805

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับวงจรรวมเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.17 ผลเปรียบเทียบค่า  $E_{ANN}$  กับค่า  $E_{TLW}$  ของชุดทดสอบ 40 ชุด จากจำนวนชุดข้อมูล  
ฝึกสอน 450 ชุด

ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	ape (%)	ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	ape (%)
1	0.0690	0.0710	2.9451	21	0.0920	0.0900	2.2147
2	0.3410	0.3376	0.9865	22	1.4630	1.4555	0.5111
3	0.1360	0.1337	1.6728	23	0.0550	0.0551	0.2009
4	1.4880	1.4882	0.0153	24	0.2460	0.2490	1.2321
5	0.4300	0.4279	0.4943	25	0.1910	0.1918	0.4047
6	0.0700	0.0725	3.6360	26	0.1930	0.1934	0.2058
7	0.2830	0.2800	1.0546	27	0.1100	0.1092	0.7644
8	0.0320	0.0306	4.4209	28	1.1970	1.1976	0.0470
9	0.2110	0.2094	0.7532	29	0.0480	0.0488	1.6079
10	0.1940	0.1942	0.1063	30	0.0770	0.0763	0.8976
11	1.9060	1.9016	0.2303	31	0.1180	0.1186	0.5109
12	0.0440	0.0498	13.0995	32	0.0150	0.0167	11.4630
13	0.0540	0.0531	1.6042	33	0.3050	0.3058	0.2662
14	2.9760	2.9560	0.6708	34	0.0190	0.0141	25.8002
15	0.0460	0.0461	0.2611	35	1.5910	1.5877	0.2099
16	0.0300	0.0301	0.3188	36	0.5190	0.5149	0.7935
17	0.0930	0.0927	0.3374	37	0.5000	0.5027	0.5363
18	1.0830	1.0829	0.0131	38	1.0740	1.0776	0.3369
19	0.1040	0.1009	2.9424	39	0.3000	0.2990	0.3391
20	0.8090	0.8126	0.4442	40	0.1240	0.1252	0.9904

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.18 ผลเปรียบเทียบค่า  $E_{ANN}$  กับค่า  $E_{TLW}$  ของชุดทดสอบ 40 ชุด จากจำนวนชุดข้อมูล  
ฝึกสอน 550 ชุด

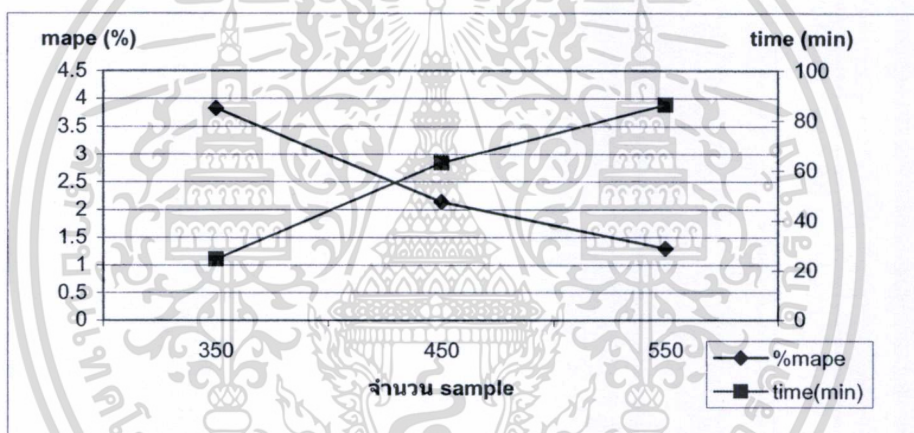
ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	ape (%)	ข้อมูล ทดสอบ ชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	ape (%)
1	0.0690	0.0667	3.3582	21	0.0920	0.0920	0.0515
2	0.3410	0.3401	0.2528	22	1.4630	1.4591	0.2660
3	0.1360	0.1376	1.1660	23	0.0550	0.0556	1.0031
4	1.4880	1.4837	0.2903	24	0.2460	0.2415	1.8348
5	0.4300	0.4280	0.4635	25	0.1910	0.1902	0.4227
6	0.0700	0.0710	1.4226	26	0.1930	0.1898	1.6365
7	0.2830	0.2851	0.7538	27	0.1100	0.1086	1.2776
8	0.0320	0.0326	1.8758	28	1.1970	1.2005	0.2944
9	0.2110	0.2091	0.8993	29	0.0480	0.0463	3.6415
10	0.1940	0.1917	1.2099	30	0.0770	0.0722	6.2442
11	1.9060	1.9047	0.0660	31	0.1180	0.1202	1.8995
12	0.0440	0.0457	3.8059	32	0.0150	0.0145	3.6595
13	0.0540	0.0549	1.6211	33	0.3050	0.3031	0.6182
14	2.9760	2.9773	0.0443	34	0.0190	0.0193	1.6068
15	0.0460	0.0474	2.9846	35	1.5910	1.5915	0.0318
16	0.0300	0.0305	1.5165	36	0.5190	0.5178	0.2347
17	0.0930	0.0947	1.7974	37	0.5000	0.5023	0.4670
18	1.0830	1.0837	0.0685	38	1.0740	1.0731	0.0867
19	0.1040	0.1043	0.2984	39	0.3000	0.3001	0.0232
20	0.8090	0.8099	0.1148	40	0.1240	0.1208	0.0232

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.19 ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วในเงื่อนไขต่างๆ

จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน	เวลาที่ใช้ฝึกสอน (นาที)	จำนวนนิเวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 - 2	ผลทดสอบของชุดข้อมูลทดสอบ		
			mape (%)	max ape (%)	min ape (%)
350	24.713	11-10	3.8250	28.6703	0.0570
450	63.21	14-13	2.1335	25.8002	0.0131
550	86.363	15-14	1.2969	6.2442	0.0232

รูปที่ 7.7 การเปรียบเทียบค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในทุกกรณี



จากผลการทดลองในตารางที่ 7.13 ถึง 7.16 และรูปที่ 7.7 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

- การคำนวณค่าสนามไฟฟ้า (E)

1. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 350 ชุด สามารถคำนวณค่าสนามไฟฟ้า (E) ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 3.8250 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.0570 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 3.8250 %
2. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 450 ชุด สามารถคำนวณค่าสนามไฟฟ้า (E) ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 2.1335 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.0131 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 25.8002 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 550 ชุด สามารถคำนวณค่าสนามไฟฟ้า (E) ของข้อมูลทดสอบโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mape) เท่ากับ 1.2969 %, ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0.0232 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 6.2442 %

- เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยที่สุดคือ โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ข้อมูลฝึกสอน 350 ชุด ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เท่ากับ 11 และ 10 นิวรอนตามลำดับ โดยใช้เวลาฝึกสอน 24.713 นาที และโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เวลาในการฝึกสอนมากที่สุดคือ โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ข้อมูลฝึกสอน 550 ชุด ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เท่ากับ 15 และ 14 นิวรอนตามลำดับ โดยใช้เวลาฝึกสอน 86.363 นาที

สำหรับการฝึกสอนในเงื่อนไขนี้เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนแปรตามจำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอนและจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน กล่าวคือ เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะมากขึ้นตาม จำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอนที่เพิ่มขึ้น และ โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใหญ่ขึ้น (จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนมีจำนวนมากขึ้น) ซึ่งจากผลการทดสอบของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) วงจรคู่ จะพบว่าข้อมูลฝึกสอน 550 ชุดเป็นโครงข่ายที่มีค่า mape ต่ำที่สุด

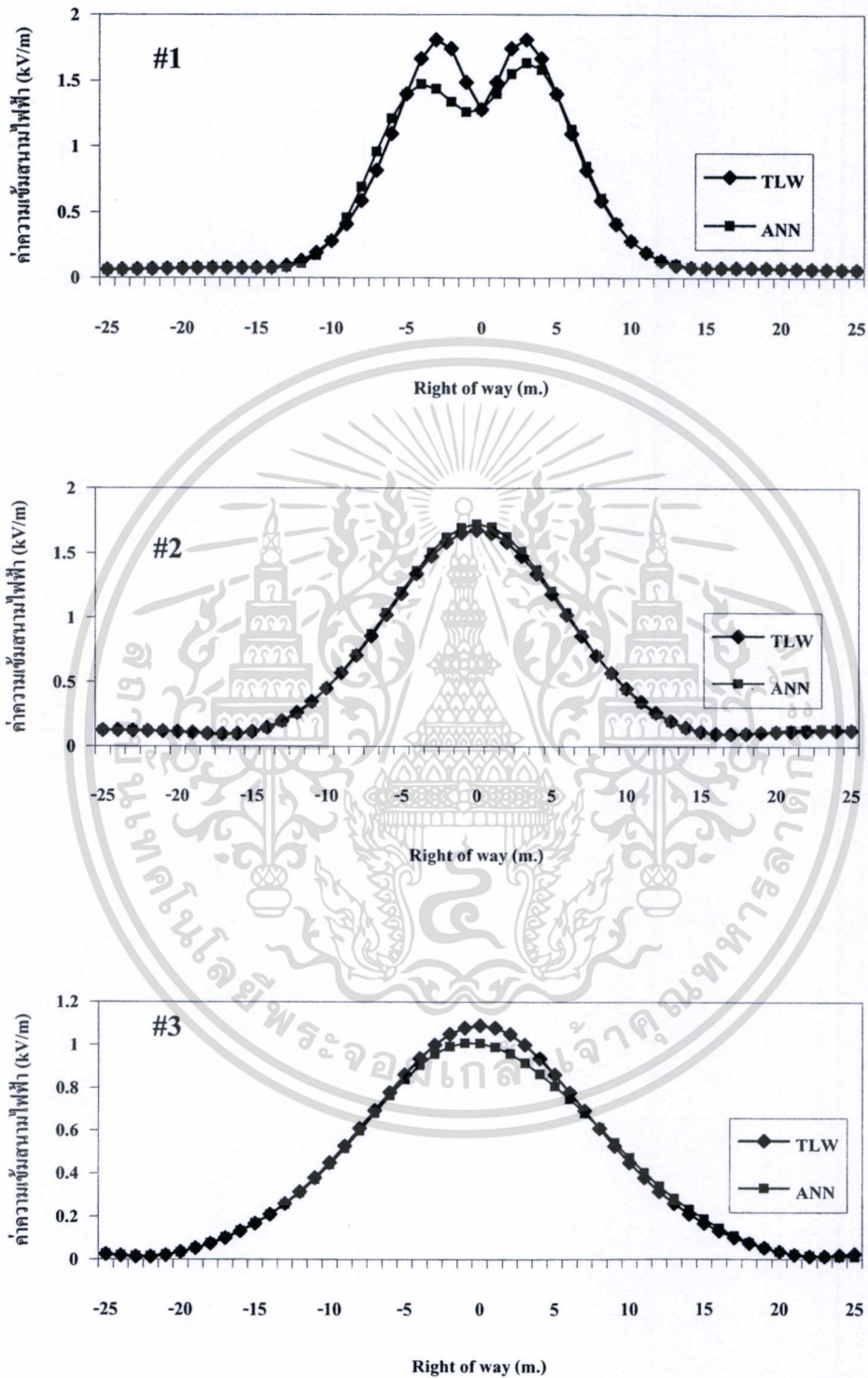
หลังจากนั้น นำโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนที่มีค่า mape ต่ำสุด หาค่าตอบในชุดทดสอบแบบ Interpolation ตามเงื่อนไขต่างๆ

ตารางที่ 7.20 เงื่อนไขต่างๆสำหรับการหาค่าตอบของชุดทดสอบแบบ Interpolation

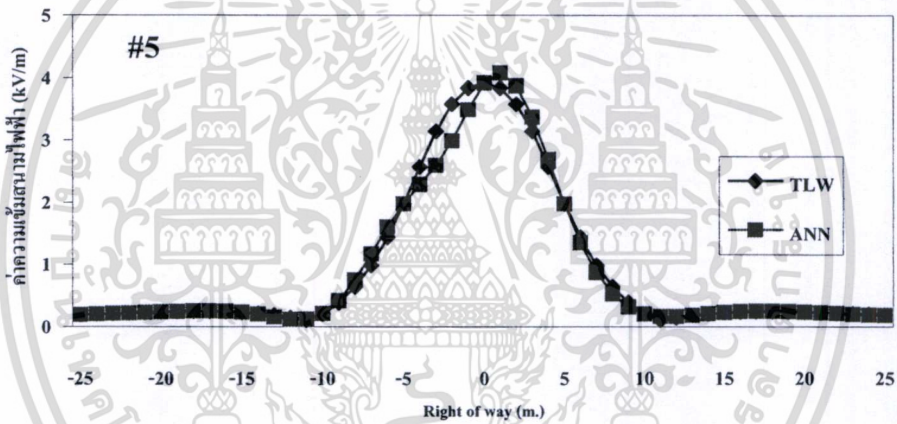
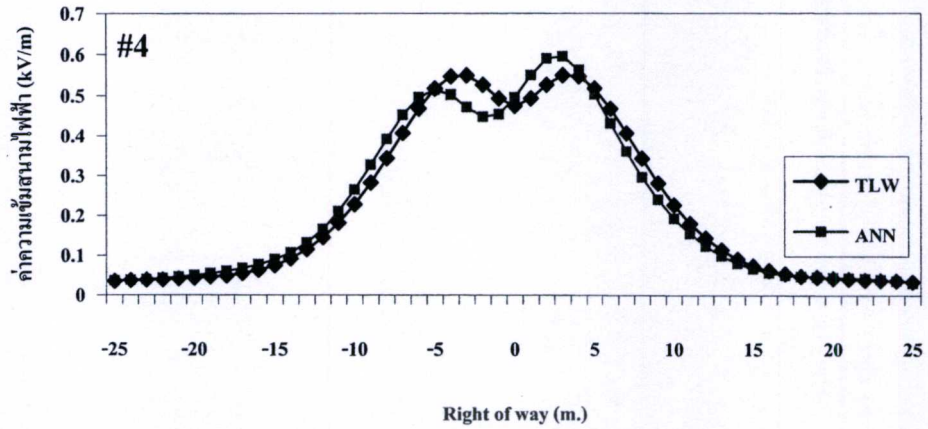
แรงดัน (kV)	เงื่อนไขที่	จำนวนตัวนำต่อเฟส	รูปแบบการจัดเรียงลำดับ	ระยะความสูง (m.)	ขนาดตัวนำไฟฟ้า (mm <sup>2</sup> )	Right of way (m.)
115 kV (วงจรคู่)	1	2	ABC-CBA	6.0	400	-25, -24, ..., 24, 25
	2	2	ABC-ABC	10.5	350	-25, -24, ..., 24, 25
	3	2	ABC-BAC	13.5	380	-25, -24, ..., 24, 25
	4	1	ABC-CBA	9.0	300	-25, -24, ..., 24, 25
	5	2	ABC-ABC	6.0	400	-25, -24, ..., 24, 25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7.8 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของชุดทดสอบแบบ Interpolation ตามเงื่อนไขต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากการหาค่าตอบสนองไฟฟ้า (E) ของชุด Interpolation จะพบว่า ค่าตอบที่ได้จาก  
 โครงข่ายประสาทเทียมมีผลที่แตกต่างเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรม TLW ดังนั้นสรุปได้  
 ว่า โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้ฝึกสอนสามารถให้คำตอบที่มีประสิทธิภาพและแม่นยำในชุดข้อมูล  
 Interpolation สำหรับ ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA)  
 วงจรคู่

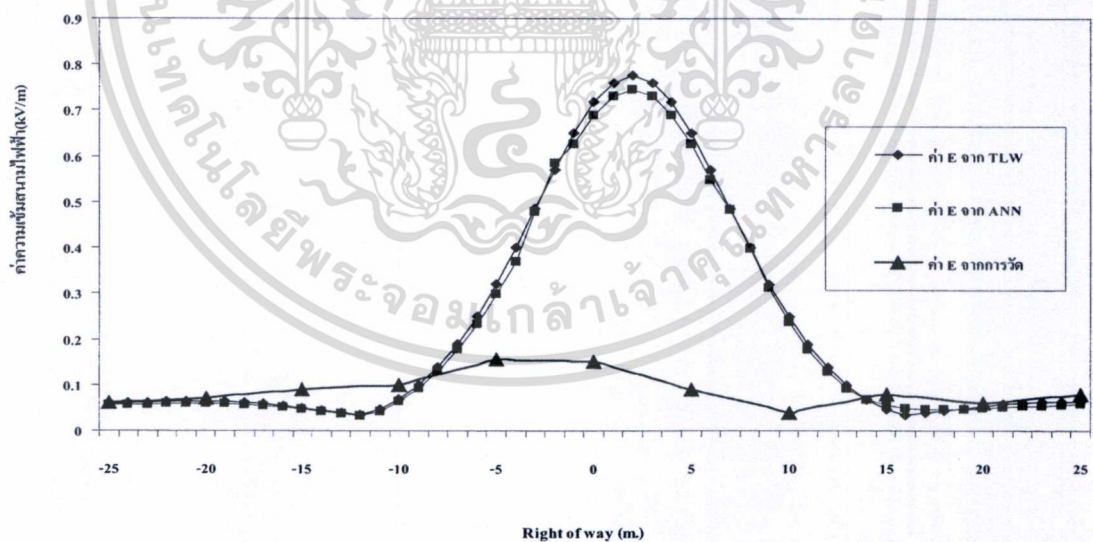
#### 7.4 ผลการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม TLW, โครงข่ายประสาทดัดเทียม ที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว และการวัด

เมื่อนำโครงข่ายประสาทดัดเทียมที่ผ่านการฝึกสอนที่มีค่า mape ต่ำสุด และ ชุดข้อมูลค่าสนามไฟฟ้าจากการวัดจริงที่ได้จากการวัด เสาส่งไฟฟ้าที่ เขตลาดกระบัง มาเปรียบเทียบกับค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW) โดยการจำลองสถานการณ์โครงสร้างเสา วงจรเดี่ยว สายไฟฟ้าเดี่ยว (SS\_TG1) ตามเงื่อนไขดังนี้

ตารางที่ 7.21 เงื่อนไขสำหรับการหาค่าตอบค่าความเข้มสนามไฟฟ้า

แรงดัน (kV)	จำนวนตัวนำ ต่อเฟส	ระยะความสูง (m.)	ขนาดตัวนำ ไฟฟ้า (mm <sup>2</sup> )	Right of way (m.)
115 kV (SS_TG1)	1	10.0	400	-25, -24,...,24,25

รูปที่ 7.9 ผลการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม TLW, โครงข่ายประสาทดัดเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว และการวัด



ในรูปที่ 7.9 พบว่าค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าแตกต่างไปจากการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW) ทั้งนี้เนื่องมาจากสภาพแวดล้อมในบริเวณที่วัด และค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นในขณะที่วัด แต่สำหรับโครงข่ายประสาทดัดเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว พบว่าจะให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 8

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาสนามไฟฟ้าอันเนื่องมาจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการคำนวณหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอมาแล้วนั้น สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ระบบที่ทำการศึกษาสถาปัตยกรรมไฟฟ้า ได้ทำการศึกษาระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และ ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เป็นต้นแบบในการศึกษา ทั้งนี้เนื่องจากระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV มีระดับของแรงดันสูงสุดในประเทศไทย ทำให้ผลกระทบที่เกิดจากสนามไฟฟ้ามีสูงกว่าสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับแรงดันอื่นๆ และ เพื่อให้ครอบคลุมสายส่งไฟฟ้าระดับแรงดันอื่นๆ ได้เลือกระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มาทำการศึกษา โดยระบบไฟฟ้าแรงสูงทั้ง 2 ระบบที่นำมาศึกษาได้มีการปรับเปลี่ยนสถานะการทำงานต่างๆของระบบ อาทิเช่น จำนวนตัวนำต่อเฟส, รูปแบบการจัดเรียงลำดับเฟส 6 ประเภท, ระยะความสูงของสายส่งจากพื้นดิน, ขนาดตัวนำไฟฟ้า และ ตำแหน่ง Right of way เพื่อให้ครอบคลุมเงื่อนไขที่ทำการศึกษา

2. การเตรียมข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา ข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะประกอบไปด้วย ชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พิจารณาเลือกตัวแปรในชุดข้อมูลดังกล่าวที่มีผลต่อค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (E) โดยตรง และได้ทำการจำลองเหตุการณ์เพื่อหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (E) สำหรับผลกระทบต่างๆ ตามเงื่อนไขที่ทำการศึกษา โดยใช้โปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW) Version 3.0

3. การเลือกชนิดของโครงข่ายประสาทเทียม เนื่องจากในขั้นตอนของการเตรียมข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนเป็นการจำลองเหตุการณ์ซึ่งใช้ระยะเวลาค่อนข้างมาก จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจึงมีอยู่จำกัด ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้พิจารณาเลือกใช้โครงข่ายประสาทเทียมชนิดที่มีการแพร่ค่าย้อนกลับ (Feed-forward neural networks with back-propagation learning rule) โดยใช้ Levenberg-Marquardt algorithm ซึ่งมีประสิทธิภาพในการฝึกสอนสูง [4] และเหมาะสมกับจำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอนที่มีอยู่จำกัด ในการเรียนรู้พฤติกรรมของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้ง 2 ระบบ และพิจารณาค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (E) เป็นคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแบ่งตามเงื่อนไขต่างๆ โดยฝึกสอนด้วยจำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอนต่างๆกัน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว (Trained ANN) และเป็นแนวทางในการกำหนดเงื่อนไขการฝึกสอนเพื่อให้ได้โครงข่ายประสาทเทียมที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

โดยสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมได้ดังต่อไปนี้

4.1 การเลือกตัวแปรในการฝึกสอน หากตัวแปรที่เลือกเป็นอินพุตในการฝึกสอนมีความสัมพันธ์กับตัวแปรเอาต์พุตมาก ก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสูงขึ้นตามไปด้วย

4.2 การกระจายของข้อมูลฝึกสอน ในการสุ่มค่าของตัวแปรที่มีการกระจายข้อมูลสม่ำเสมอด้วย คำสั่ง Sobol จะทำให้ได้สถานะที่ครอบคลุมจุดทำงานของระบบไฟฟ้า ภายในขอบเขตที่ศึกษา เพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนสูงขึ้น

4.3 ปริมาณของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบ ในปัญหาที่มีความซับซ้อนและมีขอบเขตในการเรียนรู้มากนั้น นอกจากจะต้องใช้ข้อมูลฝึกสอนที่มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอแล้วยังจำเป็นต้องมีจำนวนข้อมูลฝึกสอนที่เพียงพอจึงจะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วมีประสิทธิภาพสูง ส่วนปริมาณของข้อมูลทดสอบจะใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว

4.4 ค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสการเลือกค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสแบบสุ่มจะทำให้มีการฝึกสอนแต่ละรอบมีทิศทางการดูเข้าหาคำตอบแตกต่างกัน

4.5 จำนวนครั้งของการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส จำนวนครั้งของการปรับค่าดังกล่าวจะต้องมากเพียงพอ เพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมสามารถคำนวณหาผลลัพธ์ (a) ได้ใกล้เคียงกับคำตอบที่แท้จริง (t) มากที่สุด

4.6 จำนวนรอบของการฝึกสอน เนื่องจากวิธีการเลือกค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสเป็นการเลือกแบบสุ่ม จำนวนรอบของการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมในแต่ละโครงสร้างของโครงข่ายนั้นจะต้องเพียงพอให้เกิดการสุ่มค่าดังกล่าวอย่างทั่วถึง

4.7 จำนวนโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องปรับเปลี่ยนจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนของโครงข่ายเพื่อให้เมตริกซ์ของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสมีขนาดใหญ่เพียงพอในการคำนวณผลลัพธ์ (a) ให้มีค่าใกล้เคียงกับคำตอบที่แท้จริง (t) มากที่สุด

4.8 ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน เนื่องจากปัญหาที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นปัญหาชนิดที่เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องแบบไม่เชิงเส้นและมีความซับซ้อน จึงเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน Log-sigmoid ซึ่งเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนที่สามารถหาอนุพันธ์ได้ในชั้นซ่อนทั้ง 2 ชั้นและฟังก์ชันถ่ายโอน Linear ในชั้นข้อมูลเอาต์พุท

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

6. ผลการทดสอบ เมื่อนำโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนสำหรับคำนวณหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงแต่ละระบบ มาทดสอบด้วยชุดข้อมูลทดสอบ (ของแต่ละระบบ) ได้ผลการทดสอบดังนี้

6.1 โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับใช้ในการคำนวณหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 500 kV วงจรเดียวของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว คำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ของชุดข้อมูลทดสอบโดยมีค่า mape เท่ากับ 0.0448 % , ค่าผิดพลาดต่ำสุด 0.000 % , ค่าผิดพลาดสูงสุด 0.1642 % และใช้เวลาในการฝึกสอน 6.7419 นาที เวลาในการคำนวณหาค่าตอบน้อยกว่า 1 msec [43] (ฝึกสอนด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กหน่วยประมวลผลกลางเซเลตอน 1.86 GHz, หน่วยความจำ 1 GB)

6.2 โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับใช้ในการคำนวณหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 500 kV วงจรคู่ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว คำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ของชุดข้อมูลทดสอบโดยมีค่า mape เท่ากับ 0.2928 % , ค่าผิดพลาดต่ำสุด 0.0234 % , ค่าผิดพลาดสูงสุด 1.5423 % และใช้เวลาในการฝึกสอน 45.80 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาในการคำนวณหาค่าตอบน้อยกว่า 1 msec [43] (ฝึกสอนด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุคหน่วยประมวลผลกลางเซเลลอน 1.86 GHz, หน่วยความจำ 1 GB)

6.3 โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับใช้ในการคำนวณหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 115 kV วงจรเดี่ยวของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว จำนวนค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ของชุดข้อมูลทดสอบโดยมีค่า mape เท่ากับ 0.4584 % , ค่าผิดพลาดต่ำสุด 0.0185 % , ค่าผิดพลาดสูงสุด 0.16861 % และใช้เวลาในการฝึกสอน 3.4438 นาที เวลาในการคำนวณหาค่าตอบน้อยกว่า 1 msec [43] (ฝึกสอนด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุคหน่วยประมวลผลกลางเซเลลอน 1.86 GHz, หน่วยความจำ 1 GB)

6.4 โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับใช้ในการคำนวณหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 115 kV วงจรคู่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว จำนวนค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ของชุดข้อมูลทดสอบโดยมีค่า mape เท่ากับ 1.2969 % , ค่าผิดพลาดต่ำสุด 0.0232 % , ค่าผิดพลาดสูงสุด 6.2442 % และใช้เวลาในการฝึกสอน 86.363 นาที เวลาในการคำนวณหาค่าตอบน้อยกว่า 1 msec [43] (ฝึกสอนด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุคหน่วยประมวลผลกลางเซเลลอน 1.86 GHz, หน่วยความจำ 1 GB)

ผลการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นว่าการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการศึกษาสนามไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยพิจารณาค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (E) เป็นคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียม สามารถคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ได้อย่างรวดเร็วและมีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ดี หลังจากนั้น นำโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนที่มีค่า mape ต่ำสุด จำนวนหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ในชุดทดสอบ Interpolation ซึ่งคำตอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าที่แตกต่างเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจาก โปรแกรม TLW

7. ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าด้วยโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้ฝึกสอนแล้ว จากการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV และ 115 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ตามลำดับ ทั้งวงจรคู่ และวงจรเดี่ยว สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

7.1 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV และ 115 kV เมื่อสายส่งมีค่าภาระในการจ่ายโหลดสูงสุด จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (ตารางที่ 8.1)

ตารางที่ 8.1 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าตามข้อกำหนดของ กฟผ. และการวิเคราะห์

ตำแหน่งที่พิจารณา	สนามไฟฟ้า	สายส่งไฟฟ้าแรงสูง			
		500 kV		115 kV	
		วงจรเดี่ยว	วงจรคู่	วงจรเดี่ยว	วงจรคู่
1.ภายในเขตเดินสายไฟฟ้า	15 kV/m	6.8795 kV/m	8.831 kV/m	2.5394 kV/m	4.0824 kV/m
2.ที่ขอบของเขตเดินสายไฟฟ้า	2 kV/m	1.388 kV/m	0.4092 kV/m	0.1283 kV/m	0.1951kV/m

### 7.2 การลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้า

ในการลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้าที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้เน้นที่การลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งในการลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าได้เสนอแนวทางไว้ โดยการออกแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

7.3 เมื่อนำโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนที่มีค่า mape ต่ำสุด และ ชุดข้อมูลค่าสนามไฟฟ้าจากการวัดจริงที่ได้จากการวัด เสาส่งไฟฟ้าที่ เขตลาดกระบัง มาเปรียบเทียบกับค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW)พบว่าค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าแตกต่างไปจากการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW) ทั้งนี้เนื่องมาจากสภาพแวดล้อมในบริเวณที่วัดและค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นในขณะที่วัด แต่สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วพบว่าจะให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW)

## 8. สิ่งที่เราควรได้รับการพัฒนาต่อไป

8.1 งานวิจัยที่นำเสนอนี้เป็นเพียงการหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่มีแหล่งเกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ (High Voltage Alternating Current : HVAC) แต่ในภาพรวมแล้วปัญหาสนามไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากระบบการส่งจ่ายจะมีทั้งระบบการส่งจ่ายที่เป็นสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง(High Voltage Direct Current : HVDC) และระบบการส่งจ่ายที่เป็นสายส่งไฟฟ้าแรงสูงใต้ดิน (Underground Cable System) ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นก็จะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป ทำให้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้ายังต้องดำเนินต่อไป

8.2 พัฒนารูปแบบการเตรียมข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนให้มีความรวดเร็วเพิ่มขึ้น เพื่อเพิ่มจำนวนชุดของข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการฝึกสอนให้มากขึ้น

8.3 พิจารณาแบบจำลองของสนามไฟฟ้ารูปแบบต่างๆ ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

8.4 พัฒนาขั้นตอนการฝึกสอนให้มีความรวดเร็วขึ้น เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนเป็นข้อด้อยของ โครงข่ายประสาทเทียม เมื่อนำไปใช้ในการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่ซึ่งมีตัวแปรที่พิจารณาจำนวนมาก แม้ว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วจะใช้เวลาในการคำนวณหาคำตอบน้อยมากก็ตาม

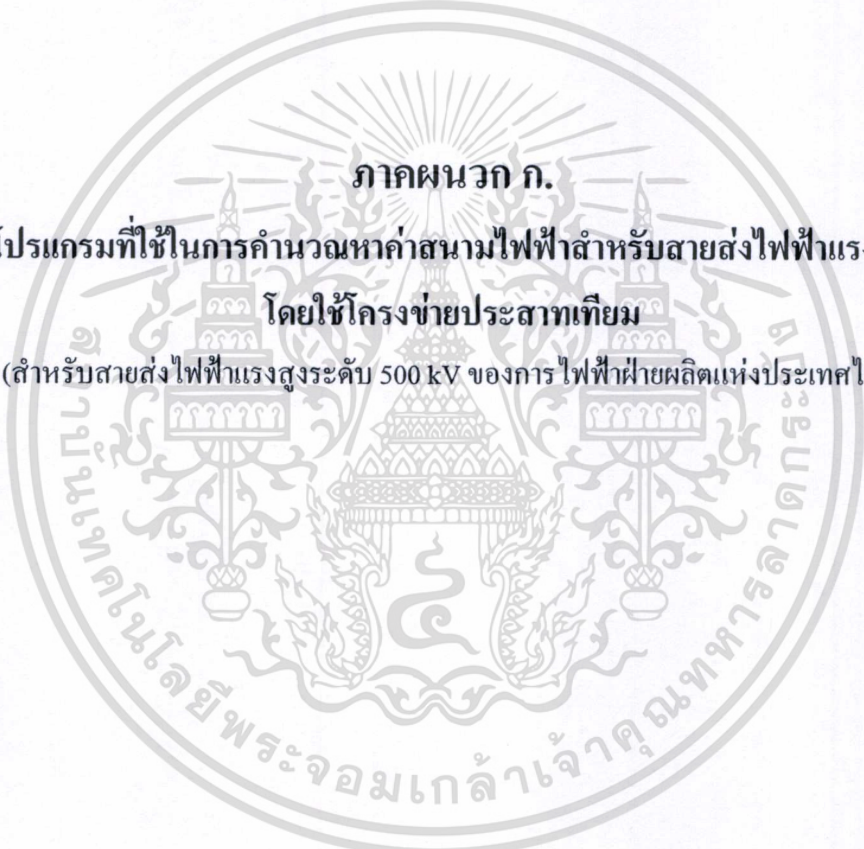
8.5 พัฒนารูปแบบข้อมูลการทดลอง เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้ Normalization ข้อมูลทดลอง ให้อยู่ในมาตรฐานเดียวกัน ดังนั้นจึงไม่มีการเปรียบเทียบว่าการประมาณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงแบบใด ที่ผ่านการฝึกสอนแล้วจากโครงข่ายประสาทเทียมสามารถให้คำตอบและประสิทธิภาพดีที่สุด เมื่อจะเปรียบเทียบการประมาณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าเสาส่งใดๆ จึงต้องมีการ Normalization ข้อมูลทดลอง ให้อยู่ในมาตรฐานเดียวกันก่อน จึงจะเปรียบเทียบกันได้

## บรรณานุกรม

- [1] รศ.ดร. สมชาติ จิรวិภากร. โครงการฝึกอบรมผู้เชี่ยวชาญทางด้าน EMC ชุดคู่มือบรรยาย การปฏิบัติ D-2 Transmission Line Work Station (TLW).กุมภาพันธ์ 2007.
- [2] กองวิศวกรรมไฟฟ้าและเครื่องกล การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2532. คู่มือการก่อสร้างสายส่ง ไฟฟ้าแรงสูง 115 กิโลโวลต์ เล่มที่ 1-4
- [3] ชำนาญ ห่อเกียรติ. 2549. ระบบไฟฟ้ากำลัง. ครั้งที่ 2. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ
- [4] พัทธกษ ปิ่นอนงค์. 2545. การวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อสิ่งแวดล้อม ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงเหนือพื้นดินและกรณีศึกษาการลดผลกระทบที่เกิดขึ้น. สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ
- [5] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2542. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สายไฟฟ้าอะลูมิเนียมตีเกลียวเปลือย มอก.85-2517. ครั้งที่ 4. กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ
- [6] ชยชาญ โพธิสาร , สมชาติ จิรวิภากร, ศุภี บรรจงจิตร “การหาช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตใน ระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 19, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2545, หน้า 59-64
- [7] รศ.ดร. สมชาติ จิรวิภากร. เอกสารคำสอนรายวิชา 01027641 Neural Network Applications , 2007.
- [8] อรรถพล เก้าพิทักษ์กุล. 2547. การแปลงเวฟเล็ดและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับ วิเคราะห์ ฟอลต์ในสายส่ง. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ
- [9] Luwen Xu, Dr. Yongming Li, Prof. Jihui Yu, Mr Xingzhe Hou, Dr. Changping An “Research on Electric Field of High-Voltage Transmission Line Power Frequency” IEEE 2006 International Conference on Power System Technology, pp.1-4
- [10] Electric Power Research Institute. Transmission Line Reference Book 345 kV and Above. second Edition, Revised. California 1987
- [11] Demuth, H. and Beale, M. **Neural Network Toolbox User’s Guide**, The Math Works, Inc., March 2001.
- [12] A. Blum. **Neural Networks in C++**. NY : Wiley. 1992.
- [13] Lefteri H. Tsoukalas, Robert E.Uhrig. **Fuzzy and Neural Approaches in Engineering**. John Wiley & Sons, Inc., 605 Third Avenue, New York, NY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] S. Jiriwibhakorn and A. H. Coonick, "Fast Critical Clearing Time Estimation of a Large Power System Using Neural Networks and Sobol Sequences", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 2000, Vol. 1, pp. 522-527.
- [15] E. Barnard and L.F.A. Wessels "Extrapolation and Interpolation in Neural Network Classifiers", IEEE Control Systems - Conference Proceedings 1992, pp. 50-53.
- [16] S. Jiriwibhakorn "Neural Networks for Constrained Transient Stability Flows", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 2002, Vol. 2, pp. 1119-1123
- [17] Press, William H., jt. auth. **Numerical recipes in C++ : the art of scientific computing.** Cambridge : Cambridge University Press, c2002
- [18] George Levy, " An introduction to quasi-random numbers", Numerical Algorithms Group Ltd
- [19] Fausett Laurene. **Fundamentals of Neural Networks.** Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice Hall International, Inc. 1994.
- [20] Martin Misakian "ELF Electric and Magnetic Field Measurement Methods" National Institute of Standards and Technology. pp.150-155.
- [21] IEEE Std 644-1994, IEEE Standard Procedure for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines.
- [22] Vereshchagin, I.P. 1997. Calculation of Electric and Magnetic Fields Near of the Energy Objects. Electromagnetic Compatibility Proceedings, International Symposium on May : 446-449.
- [23] ตีรรัตน์ อิงประเสริฐ 2546. การวิเคราะห์ผลกระทบของสนามแม่เหล็กที่มีต่อผู้ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ
- [24] ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ 2549. สนามไฟฟ้า ฟิสิกส์ราชมงคล, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมนกล, กรุงเทพฯ
- [25] Riadh W.Y. Habash. "Electromagnetic Fields and Radiation Human Bioeffects and Safety" University of Ottawa , Ottawa, Ontario, Canada. 2002
- [26] ฝ่ายวิจัยและพัฒนา. "ความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้า" การไฟฟ้านครหลวง. 2548



ภาคผนวก ก.  
โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง  
โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม  
(สำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับ 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย วงจรคู่)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

clear all

DATA = [20	1	2	3	18	795	0	6.237
21	2	3	1	28	1272	30	0.901
22	2	1	3	23	795	-20	2.314
23	3	2	1	13	1272	15	4.678
24	1	2	3	23	1272	-15	3.233
25	2	3	1	13	795	20	2.736
42	1	3	2	13	795	15	4.921
43	3	1	2	23	1272	-15	2.3
44	2	1	3	18	795	-10	5.234
45	3	2	1	28	1272	25	1.083
46	1	3	2	23	795	-25	1.372
47	3	1	2	13	1272	-5	5.583
48	1	3	2	18	1272	15	3.525
49	3	1	2	28	795	-20	1.461
50	2	1	3	23	1272	30	1.004
51	2	1	3	18	795	5	5.949
52	2	1	3	28	1272	-25	1.509
53	3	2	1	18	795	-5	2.783
54	1	2	3	13	1272	-10	7.824
55	2	3	1	23	795	20	1.842
61	2	3	1	13	1272	-30	0.682
62	1	3	2	18	795	15	3.486
63	3	1	2	28	1272	-15	1.71
64	2	1	3	18	1272	30	0.839
65	3	2	1	28	795	-5	1.272
66	1	2	3	23	1272	10	4.012
67	2	3	1	13	795	-20	2.74
68	1	2	3	28	1272	-15	2.637
69	2	3	1	18	795	20	2.315
70	1	3	2	13	1272	-30	0.506
71	2	1	3	18	795	-20	2.607

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

73	3	1	2	23	1272	30	0.867
74	2	1	3	28	795	-15	2.569

•

•

•

58	3	2	1	27	1113	27	1.012
59	3	2	1	27	1113	28	0.958
60	3	2	1	27	1113	29	0.906
61	3	2	1	27	1113	30	0.855

];

tr = 490;

ts = 40;

te = 20;

tcal = 13;

tmax = 61;

tp\_1 = 61;

tp\_2 = 61;

tp\_3 = 61;

tp\_4 = 61;

tp\_5 = 61;

tp\_6 = 61;

td\_1 = 61;

td\_2 = 61;

th\_1 = 61;

th\_2 = 61;

th\_3 = 61;

th\_4 = 61;

tmix\_1 = 61;

tmix\_2 = 61;

tmix\_3 = 61;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

str = 1;

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

sttr1 = sttr;
sttr2 = sttr+1;
sttr3 = sttr+2;
entr = sttr+tr-1;
stts = 491;
ents = stts+ts-1;
stts1 = tr+1;
ents1 = stts1+ts-1;
stte = 531;
ente = stte+te-1;
stts2 = tr+ts+1;
ents2 = stts2+te-1;
sttcal = 551;
entcal = sttcal+tcal-1;
stts3 = tr+ts+te+1;
ents3 = stts3+tcal-1;
sttmax = 564;
entmax = sttmax+tmax-1;
stts4 = tr+ts+te+tcal+1;
ents4 = stts4+tmax-1;
sttp_1 = 625;
entp_1 = sttp_1+tp_1-1;
stts5 = tr+ts+te+tcal+tmax+1;
ents5 = stts5+tp_1-1;
sttp_2 = 686;
entp_2 = sttp_2+tp_2-1;
stts6 = tr+ts+te+tcal+tmax+tp_1+1;
ents6 = stts6+tp_2-1;
sttp_3 = 747;
entp_3 = sttp_3+tp_3-1;
stts7 = tr+ts+te+tcal+tmax+tp_1+tp_2+1;
ents7 = stts7+tp_3-1;

```

เอกสารที่ **sttp\_4 = 808**; ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$entp_4 = sttp_4 + tp_4 - 1;$   
 $stts8 = tr + ts + te + tcal + tmax + tp_1 + tp_2 + tp_3 + 1;$   
 $ents8 = stts8 + tp_4 - 1;$   
 $sttp_5 = 869;$   
 $entp_5 = sttp_5 + tp_5 - 1;$   
 $stts9 = tr + ts + te + tcal + tmax + tp_1 + tp_2 + tp_3 + tp_4 + 1;$   
 $ents9 = stts9 + tp_5 - 1;$   
 $sttp_6 = 930;$   
 $entp_6 = sttp_6 + tp_6 - 1;$   
 $stts10 = tr + ts + te + tcal + tmax + tp_1 + tp_2 + tp_3 + tp_4 + tp_5 + 1;$   
 $ents10 = stts10 + tp_6 - 1;$   
 $sttd_1 = 991;$   
 $entd_1 = sttd_1 + td_1 - 1;$   
 $stts11 = tr + ts + te + tcal + tmax + tp_1 + tp_2 + tp_3 + tp_4 + tp_5 + tp_6 + 1;$   
 $ents11 = stts11 + td_1 - 1;$   
 $sttd_2 = 1052;$   
 $entd_2 = sttd_2 + td_2 - 1;$   
 $stts12 = tr + ts + te + tcal + tmax + tp_1 + tp_2 + tp_3 + tp_4 + tp_5 + tp_6 + td_1 + 1;$   
 $ents12 = stts12 + td_2 - 1;$   
 $stth_1 = 1113;$   
 $enth_1 = stth_1 + th_1 - 1;$   
 $stts13 = tr + ts + te + tcal + tmax + tp_1 + tp_2 + tp_3 + tp_4 + tp_5 + tp_6 + td_1 + td_2 + 1;$   
 $ents13 = stts13 + th_1 - 1;$   
 $stth_2 = 1174;$   
 $enth_2 = stth_2 + th_2 - 1;$   
 $stts14 = tr + ts + te + tcal + tmax + tp_1 + tp_2 + tp_3 + tp_4 + tp_5 + tp_6 + td_1 + td_2 + th_1 + 1;$   
 $ents14 = stts14 + th_2 - 1;$   
 $stth_3 = 1235;$   
 $enth_3 = stth_3 + th_3 - 1;$   
 $stts15 = tr + ts + te + tcal + tmax + tp_1 + tp_2 + tp_3 + tp_4 + tp_5 + tp_6 + td_1 + td_2 + th_1 + th_2 + 1;$   
 $ents15 = stts15 + th_3 - 1;$   
 $stth_4 = 1296;$

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

stts16 = tr+ts+te+tc+al+tmax+tp_1+tp_2+tp_3+tp_4+tp_5+tp_6+td_1+td_2+th_1+th_2+th_3+1;
ents16 = stts16+th_4-1;
sttmix_1 = 1357;
entmix_1 = sttmix_1+tmix_1-1;
stts17 =
tr+ts+te+tc+al+tmax+tp_1+tp_2+tp_3+tp_4+tp_5+tp_6+td_1+td_2+th_1+th_2+th_3+th_4+1;
ents17 = stts17+tmix_1-1;
sttmix_2 = 1418;
entmix_2 = sttmix_2+tmix_2-1;
stts18 =
tr+ts+te+tc+al+tmax+tp_1+tp_2+tp_3+tp_4+tp_5+tp_6+td_1+td_2+th_1+th_2+th_3+th_4+tmix_1+1;
ents18 = stts18+tmix_2-1;
sttmix_3 = 1479;
entmix_3 = sttmix_3+tmix_3-1;
stts19 =
tr+ts+te+tc+al+tmax+tp_1+tp_2+tp_3+tp_4+tp_5+tp_6+td_1+td_2+th_1+th_2+th_3+th_4+tmix_1+tmix_2+1;
ents19 = stts19+tmix_3-1;
stnode = 2;
noderange = 1;
structure = 15;
roundperstructure = 20;
INPUT1 = DATA(sttr:entr , 2:7);
OUTPUT1 = DATA(sttr:entr , 8);
INPUT2 = DATA(stts:ents , 2:7);
OUTPUT2 = DATA(stts:ents , 8);
INPUT3 = DATA(stte:ente , 2:7);
OUTPUT3 = DATA(stte:ente , 8);
INPUT4 = DATA(sttcal:entcal , 2:7);
OUTPUT4 = DATA(sttcal:entcal , 8);
INPUT5 = DATA(sttmax:entmax , 2:7);

```

เอกสารนี้ OUTPUT5 = DATA(sttmax:entmax , 8); เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

INPUT6 = DATA(sttp_1:entp_1 , 2:7);
OUTPUT6 = DATA(sttp_1:entp_1 , 8);
INPUT7 = DATA(sttp_2:entp_2 , 2:7);
OUTPUT7 = DATA(sttp_2:entp_2 , 8);
INPUT8 = DATA(sttp_3:entp_3 , 2:7);
OUTPUT8 = DATA(sttp_3:entp_3 , 8);
INPUT9 = DATA(sttp_4:entp_4 , 2:7);
OUTPUT9 = DATA(sttp_4:entp_4 , 8);
INPUT10 = DATA(sttp_5:entp_5 , 2:7);
OUTPUT10 = DATA(sttp_5:entp_5 , 8);
INPUT11 = DATA(sttp_6:entp_6 , 2:7);
OUTPUT11 = DATA(sttp_6:entp_6 , 8);
INPUT12 = DATA(sttd_1:entd_1 , 2:7);
OUTPUT12 = DATA(sttd_1:entd_1 , 8);
INPUT13 = DATA(sttd_2:entd_2 , 2:7);
OUTPUT13 = DATA(sttd_2:entd_2 , 8);
INPUT14 = DATA(stth_1:enth_1 , 2:7);
OUTPUT14 = DATA(stth_1:enth_1 , 8);
INPUT15 = DATA(stth_2:enth_2 , 2:7);
OUTPUT15 = DATA(stth_2:enth_2 , 8);
INPUT16 = DATA(stth_3:enth_3 , 2:7);
OUTPUT16 = DATA(stth_3:enth_3 , 8);
INPUT17 = DATA(stth_4:enth_4 , 2:7);
OUTPUT17 = DATA(stth_4:enth_4 , 8);
INPUT18 = DATA(sttmix_1:entmix_1 , 2:7);
OUTPUT18 = DATA(sttmix_1:entmix_1 , 8);
INPUT19 = DATA(sttmix_2:entmix_2 , 2:7);
OUTPUT19 = DATA(sttmix_2:entmix_2 , 8);
INPUT20 = DATA(sttmix_3:entmix_3 , 2:7);
OUTPUT20 = DATA(sttmix_3:entmix_3 , 8);
INPUT = [ INPUT1 ; INPUT2 ; INPUT3 ; INPUT4 ; INPUT5 ; INPUT6 ; INPUT7 ; INPUT8 ;
INPUT9 ; INPUT10 ; INPUT11 ; INPUT12 ; INPUT13 ; INPUT14 ; INPUT15 ; INPUT16 ;

```

เอกสาร INPUT17 ; INPUT18 ; INPUT19 ; INPUT20]; ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

OUTPUT = [ OUTPUT1 ; OUTPUT2 ; OUTPUT3 ; OUTPUT4 ; OUTPUT5 ; OUTPUT6 ;
OUTPUT7; OUTPUT8 ; OUTPUT9 ; OUTPUT10 ; OUTPUT11 ; OUTPUT12 ; OUTPUT13 ;
OUTPUT14 ; OUTPUT15; OUTPUT16 ; OUTPUT17 ; OUTPUT18; OUTPUT19 ;
OUTPUT20];
OUT = OUTPUT';
[pn,meanp,stdp,tn,meant,stdt] = prestd(INPUT',OUTPUT');
iitr = [sttr1:3:entr sttr2:3:entr sttr3:3:entr];
%iiv = [ sttr3:3:entr];
ptr = pn(:,iitr);
ttr = tn(:,iitr);
Br = OUT(:,iitr);
%pv = pn(:,iiv);
%tv = tn(:,iiv);
%Bv = OUT(:,iiv);
pts = pn(:,stts1:ents1);
tts = tn(:,stts1:ents1);
Bs = OUT(:,stts1:ents1);
pte = pn(:,stts2:ents2);
tte = tn(:,stts2:ents2);
Be = OUT(:,stts2:ents2);
ptcal = pn(:,stts3:ents3);
ttcal = tn(:,stts3:ents3);
Bcal = OUT(:,stts3:ents3);
ptmax = pn(:,stts4:ents4);
ttmax = tn(:,stts4:ents4);
Bmax = OUT(:,stts4:ents4);
ptp_1 = pn(:,stts5:ents5);
ttp_1 = tn(:,stts5:ents5);
Bp_1 = OUT(:,stts5:ents5);
ptp_2 = pn(:,stts6:ents6);
ttp_2 = tn(:,stts6:ents6);
Bp_2 = OUT(:,stts6:ents6);
ptp_3 = pn(:,stts7:ents7);

```

ttp\_3 = tn(:,stts7:ents7);  
 Bp\_3 = OUT(:,stts7:ents7);  
 ptp\_4 = pn(:,stts8:ents8);  
 ttp\_4 = tn(:,stts8:ents8);  
 Bp\_4 = OUT(:,stts8:ents8);  
 ptp\_5 = pn(:,stts9:ents9);  
 ttp\_5 = tn(:,stts9:ents9);  
 Bp\_5 = OUT(:,stts9:ents9);  
 ptp\_6 = pn(:,stts10:ents10);  
 ttp\_6 = tn(:,stts10:ents10);  
 Bp\_6 = OUT(:,stts10:ents10);  
 ptd\_1 = pn(:,stts11:ents11);  
 ttd\_1 = tn(:,stts11:ents11);  
 Bd\_1 = OUT(:,stts11:ents11);  
 ptd\_2 = pn(:,stts12:ents12);  
 ttd\_2 = tn(:,stts12:ents12);  
 Bd\_2 = OUT(:,stts12:ents12);  
 pth\_1 = pn(:,stts13:ents13);  
 tth\_1 = tn(:,stts13:ents13);  
 Bh\_1 = OUT(:,stts13:ents13);  
 pth\_2 = pn(:,stts14:ents14);  
 tth\_2 = tn(:,stts14:ents14);  
 Bh\_2 = OUT(:,stts14:ents14);  
 pth\_3 = pn(:,stts15:ents15);  
 tth\_3 = tn(:,stts15:ents15);  
 Bh\_3 = OUT(:,stts15:ents15);  
 pth\_4 = pn(:,stts16:ents16);  
 tth\_4 = tn(:,stts16:ents16);  
 Bh\_4 = OUT(:,stts16:ents16);  
 ptmix\_1 = pn(:,stts17:ents17);  
 ttmix\_1 = tn(:,stts17:ents17);  
 Bmix\_1 = OUT(:,stts17:ents17);

เอกสาร **ptmix\_2 = pn(:,stts18:ents18)** การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ttmix_2 = tn(:,stts18:ents18);
Bmix_2 = OUT(:,stts18:ents18);
ptmix_3 = pn(:,stts19:ents19);
ttmix_3 = tn(:,stts19:ents19);
Bmix_3 = OUT(:,stts19:ents19);

v.P = pts;
v.T = tts;

for n = 1 : structure
    start = clock;
    w = stnode+noderange*(n - 1);
    u = w - 1;
    net=newff(minmax(ptr),[w,u,1],{'logsig','logsig','purelin'},'trainlm');
    net.trainParam.show=1000;
    net.trainParam.epochs=1000;
    net.trainParam.max_fail=inf;
    for q = 1: roundperstructure
        [i,j] = size(ptr);
        %net.iw{1,1} = 0.5*ones(w,i);
        %net.lw{2,1} = 0.5*ones(u,w);
        %net.lw{3,2} = 0.5*ones(1,u);
        %net.b{1} = 0.5*ones(w,1);
        %net.b{2} = 0.5*ones(u,1);
        %net.b{3} = 0.5*ones(1,1);
        net.layers{1}.initFcn = 'initwb';
        net.inputWeights{1,1}.initFcn = 'rands';
        net.biases{1}.initFcn = 'rands';
        net.layers{2}.initFcn = 'initwb';
        net.layerWeights{2,1}.initFcn = 'rands';
        net.biases{2}.initFcn = 'rands';
        net.layers{3}.initFcn = 'initwb';
        net.layerWeights{3,2}.initFcn = 'rands';
        net.biases{3}.initFcn = 'rands';
        net = init(net);
    end
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

[net,tr] = train(net,ptr,ttr,[ ],[ ],v);
Sn = sim(net,ptr);
S = poststd(Sn,meant,stdt);
SSn = sim(net,pts);
SS = poststd(SSn,meant,stdt);
CC1 = [Br - S];
EE1 = abs(CC1);
for aa1=1:length(S)
    GG1(aa1) = abs(100*[EE1(1,aa1)/Br(1,aa1)]);
end
Rr(q,n) = mean(GG1);
CC2 = [Bs - SS];
EE2 = abs(CC2);
for aa2=1:length(SS)
    GG2(aa2) = abs(100*[EE2(1,aa2)/Bs(1,aa2)]);
end
R(q,n) = mean(GG2);
if q == 1
    q1l = 1;
    nlr = S;
    nl = SS;
    x1 = net.iw{1,1};x2 = net.lw{2,1};x3 = net.lw{3,2};
    y1 = net.b{1};y2 = net.b{2};y3 = net.b{3};
    zr = Rr(q,n)
    z1 = R(q,n)
else
    if R(q,n) < min(R(1:q-1,n))
        q1l = q;
        nlr = S;
        nl = SS;
        x1 = net.iw{1,1};x2 = net.lw{2,1};x3 = net.lw{3,2};
        y1 = net.b{1};y2 = net.b{2};y3 = net.b{3};
        zr = Rr(q,n)
        z1 = R(q,n)
    end
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        z1 = R(q,n)
    end
end
q
n
end
%nlr(:,n) = nlr';
%nl1(:,n) = nl';
CCC1 = [Br - nlr];
EEE1 = abs(CCC1);
for aaa1=1:length(nlr)
    GGG1(aaa1) = abs(100*[EEE1(1,aaa1)/Br(1,aaa1)]);
end
Rlr(n) = mean(GGG1);
CCC2 = [Bs - nl];
EEE2 = abs(CCC2);
for aaa2=1:length(nl)
    GGG2(aaa2) = abs(100*[EEE2(1,aaa2)/Bs(1,aaa2)]);
end
Rl(n) = mean(GGG2);
if n == 1
    n_best = stnode;
    x1_best = x1 ;x2_best = x2 ;x3_best = x3 ;
    y1_best = y1 ;y2_best = y2 ;y3_best = y3 ;
    zr_best = zr
    z1_best = z1
else
    if Rl(n) < min(Rl(1:n-1))
        n_best = w ;
        x1_best = x1 ;x2_best = x2 ;x3_best = x3 ;
        y1_best = y1 ;y2_best = y2 ;y3_best = y3 ;
        zr_best = zr

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

end

end

z1_best

mape_r(n) = zr

mape_s(n) = z1

Timetaken(n) = etime(clock,start)/60

end

net=newff(minmax(ptr),[n_best,n_best-1,1],{'logsig','logsig','purelin'},'trainlm');

net.iw{1,1} = x1_best; net.lw{2,1} = x2_best; net.lw{3,2} = x3_best;

net.b{1} = y1_best; net.b{2} = y2_best; net.b{3} = y3_best;

Sn = sim(net,ptr);

S = poststd(Sn,meant,stdt);

SSn = sim(net,pts);

SS = poststd(SSn,meant,stdt);

SSe = sim(net,pte);

SSS = poststd(SSe,meant,stdt);

SScal = sim(net,ptcal);

S4 = poststd(SScal,meant,stdt);

SSmax = sim(net,ptmax);

S5 = poststd(SSmax,meant,stdt);

SSp_1 = sim(net,ptp_1);

S6 = poststd(SSp_1,meant,stdt);

SSp_2 = sim(net,ptp_2);

S7 = poststd(SSp_2,meant,stdt);

SSp_3 = sim(net,ptp_3);

S8 = poststd(SSp_3,meant,stdt);

SSp_4 = sim(net,ptp_4);

S9 = poststd(SSp_4,meant,stdt);

SSp_5 = sim(net,ptp_5);

S10 = poststd(SSp_5,meant,stdt);

SSp_6 = sim(net,ptp_6);

S11 = poststd(SSp_6,meant,stdt);

```

เอกสารนี้เป็น **SSd\_1** ที่ **sim(net,ptd\_1)**; การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

S12 = poststd(SSd_1,meant,stdt);
SSd_2 = sim(net,ptd_2);
S13 = poststd(SSd_2,meant,stdt);
SSh_1 = sim(net,pth_1);
S14 = poststd(SSh_1,meant,stdt);
SSh_2 = sim(net,pth_2);
S15 = poststd(SSh_2,meant,stdt);
SSh_3 = sim(net,pth_3);
S16 = poststd(SSh_3,meant,stdt);
SSh_4 = sim(net,pth_4);
S17 = poststd(SSh_4,meant,stdt);
SSmix_1 = sim(net,ptmix_1);
S18 = poststd(SSmix_1,meant,stdt);
SSmix_2 = sim(net,ptmix_2);
S19 = poststd(SSmix_2,meant,stdt);
SSmix_3 = sim(net,ptmix_3);
S20 = poststd(SSmix_3,meant,stdt);
M = [Br ; S];
C1 = [Br - S];
E1 = abs(C1);
F1 = Br;
for a1=1:length (E1)
    G1(a1) = abs(100*[E1(1,a1)/F1(1,a1)]);
end
H = sum(C1.^2);
N = [Bs ; SS];
C2 = [Bs - SS];
E2 = abs(C2);
F2 = Bs;
for a2=1:length (E2)
    G2(a2) = abs(100*[E2(1,a2)/F2(1,a2)]);
end

```

เอกสารนี้เป็น  $E = [Be; SSS]$  สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

C3 = [Be - SSS];
E3 = abs(C3);
F3 = Be;
for a3=1:length (E3)
    G3(a3) = abs(100*[E3(1,a3)/F3(1,a3)]);
end
Cal = [Bcal ; S4];
C4 = [Bcal - S4];
E4 = abs(C4);
F4 = Bcal;
for a4=1:length (E4)
    G4(a4) = abs(100*[E4(1,a4)/F4(1,a4)]);
end
Max = [Bmax ; S5];
C5 = [Bmax - S5];
E5 = abs(C5);
F5 = Bmax;
for a5=1:length (E5)
    G5(a5) = abs(100*[E5(1,a5)/F5(1,a5)]);
end
P_1 = [Bp_1 ; S6];
C6 = [Bp_1 - S6];
E6 = abs(C6);
F6 = Bp_1;
for a6=1:length (E6)
    G6(a6) = abs(100*[E6(1,a6)/F6(1,a6)]);
end
P_2 = [Bp_2 ; S7];
C7 = [Bp_2 - S7];
E7 = abs(C7);
F7 = Bp_2;
for a7=1:length (E7)
    G7(a7) = abs(100*[E7(1,a7)/F7(1,a7)]);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

end
P_3 = [Bp_3 ; S8];
C8 = [Bp_3 - S8];
E8 = abs(C8);
F8 = Bp_3;
for a8=1:length (E8)
    G8(a8) = abs(100*[E8(1,a8)/F8(1,a8)]);
end
P_4 = [Bp_4 ; S9];
C9 = [Bp_4 - S9];
E9 = abs(C9);
F9 = Bp_4;
for a9=1:length (E9)
    G9(a9) = abs(100*[E9(1,a9)/F9(1,a9)]);
end
P_5 = [Bp_5 ; S10];
C10 = [Bp_5 - S10];
E10 = abs(C10);
F10 = Bp_5;
for a10=1:length (E10)
    G10(a10) = abs(100*[E10(1,a10)/F10(1,a10)]);
end
P_6 = [Bp_6 ; S11];
C11 = [Bp_6 - S11];
E11 = abs(C11);
F11 = Bp_6;
for a11=1:length (E11)
    G11(a11) = abs(100*[E11(1,a11)/F11(1,a11)]);
end
D_1 = [Bd_1 ; S12];
C12 = [Bd_1 - S12];
E12 = abs(C12);

```

เอกสารนี้เป็น **F12 = Bd\_1** หนึ่งไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for a12=1:length (E12)
    G12(a12) = abs(100*[E12(1,a12)/F12(1,a12)]);
end
D_2 = [Bd_2 ; S13];
C13 = [Bd_2 - S13];
E13 = abs(C13);
F13 = Bd_2;
for a13=1:length (E13)
    G13(a13) = abs(100*[E13(1,a13)/F13(1,a13)]);
end
H_1 = [Bh_1 ; S14];
C14 = [Bh_1 - S14];
E14 = abs(C14);
F14 = Bh_1;
for a14=1:length (E14)
    G14(a14) = abs(100*[E14(1,a14)/F14(1,a14)]);
end
H_2 = [Bh_2 ; S15];
C15 = [Bh_2 - S15];
E15 = abs(C15);
F15 = Bh_2;
for a15=1:length (E15)
    G15(a15) = abs(100*[E15(1,a15)/F15(1,a15)]);
end
H_3 = [Bh_3 ; S16];
C16 = [Bh_3 - S16];
E16 = abs(C16);
F16 = Bh_3;
for a16=1:length (E16)
    G16(a16) = abs(100*[E16(1,a16)/F16(1,a16)]);
end
H_4 = [Bh_4 ; S17];

```

เอกสารนี้เป็น **C17 = [Bh\_4 ; S17]**; ทรัพยากรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

E17 = abs(C17);
F17 = Bh_4;
for a17=1:length (E17)
    G17(a17) = abs(100*[E17(1,a17)/F17(1,a17)]);
end
Mix_1 = [Bmix_1 ; S18];
C18 = [Bmix_1 - S18];
E18 = abs(C18);
F18 = Bmix_1;
for a18=1:length (E18)
    G18(a18) = abs(100*[E18(1,a18)/F18(1,a18)]);
end
Mix_2 = [Bmix_2 ; S19];
C19 = [Bmix_2 - S19];
E19 = abs(C19);
F19 = Bmix_2;
for a19=1:length (E19)
    G19(a19) = abs(100*[E19(1,a19)/F19(1,a19)]);
end
Mix_3 = [Bmix_3 ; S20];
C20 = [Bmix_3 - S20];
E20 = abs(C20);
F20 = Bmix_3;
for a20=1:length (E20)
    G20(a20) = abs(100*[E20(1,a20)/F20(1,a20)]);
end
Timetaken
min1 = min(G1)
mean1 = mean(G1)
max1 = max(G1)
compare2 = N
percenterror2 = G2

```

เอกสารนี้เป็น **min2 = min(G2)** สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

mean2 = mean(G2)
max2 = max(G2)
compare3 = E
percenterror3 = G3
min3 = min(G3)
mean3 = mean(G3)
max3 = max(G3)
compare_cal = Cal
percenterror_cal = G4
min_cal = min(G4)
mean_cal = mean(G4)
max_cal = max(G4)
compare_max = Max
percenterror_max = G5
min_max = min(G5)
mean_max = mean(G5)
max_max = max(G5)
compare_P_1 = P_1
percenterror_P_1 = G6
min_P_1 = min(G6)
mean_P_1 = mean(G6)
max_P_1 = max(G6)
compare_P_2 = P_2
percenterror_P_2 = G7
min_P_2 = min(G7)
mean_P_2 = mean(G7)
max_P_2 = max(G7)
compare_P_3 = P_3
percenterror_P_3 = G8
min_P_3 = min(G8)
mean_P_3 = mean(G8)
max_P_3 = max(G8)
compare_P_4 = P_4

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

percenterror\_P\_4 = G9

min\_P\_4 = min(G9)

mean\_P\_4 = mean(G9)

max\_P\_4 = max(G9)

compare\_P\_5 = P\_5

percenterror\_P\_5 = G10

min\_P\_5 = min(G10)

mean\_P\_5 = mean(G10)

max\_P\_5 = max(G10)

compare\_P\_6 = P\_6

percenterror\_P\_6 = G11

min\_P\_6 = min(G11)

mean\_P\_6 = mean(G11)

max\_P\_6 = max(G11)

compare\_D\_1 = D\_1

percenterror\_D\_1 = G12

min\_D\_1 = min(G12)

mean\_D\_1 = mean(G12)

max\_D\_1 = max(G12)

compare\_D\_2 = D\_2

percenterror\_D\_2 = G13

min\_D\_2 = min(G13)

mean\_D\_2 = mean(G13)

max\_D\_2 = max(G13)

compare\_H\_1 = H\_1

percenterror\_H\_1 = G14

min\_H\_1 = min(G14)

mean\_H\_1 = mean(G14)

max\_H\_1 = max(G14)

compare\_H\_2 = H\_2

percenterror\_H\_2 = G15

min\_H\_2 = min(G15)

mean\_H\_2 = mean(G15)

เอกสารนี้เป็น **mean\_H\_2 = mean(G15)** ารใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

max_H_2 = max(G15)
compare_H_3 = H_3
percenterror_H_3 = G16
min_H_3 = min(G16)
mean_H_3 = mean(G16)
max_H_3 = max(G16)
compare_H_4 = H_4
percenterror_H_4 = G17
min_H_4 = min(G17)
mean_H_4 = mean(G17)
max_H_4 = max(G17)
compare_Mix_1 = Mix_1
percenterror_Mix_1 = G18
min_Mix_1 = min(G18)
mean_Mix_1 = mean(G18)
max_Mix_1 = max(G18)
compare_Mix_2 = Mix_2
percenterror_Mix_2 = G19
min_Mix_2 = min(G19)
mean_Mix_2 = mean(G19)
max_Mix_2 = max(G19)
compare_Mix_3 = Mix_3
percenterror_Mix_3 = G20
min_Mix_3 = min(G20)
mean_Mix_3 = mean(G20)
max_Mix_3 = max(G20)
node1 = n_best
node2 = n_best-1
x1_best
x2_best
x3_best
y1_best

```

เอกสารนี้เป็น  $y2\_best$  ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

y3\_best

MeanAbsoluteErrorTest = mape\_s

MeanAbsoluteErrorTrain = mape\_r

SumSquareError = H

save EGAT\_DD\_n00\_timeperround.txt Timetaken -ascii

save EGAT\_DD\_n00\_node1.txt node1 -ascii

save EGAT\_DD\_n00\_node2.txt node2 -ascii

save EGAT\_DD\_n00\_w1.txt x1\_best -ascii

save EGAT\_DD\_n00\_w2.txt x2\_best -ascii

save EGAT\_DD\_n00\_w3.txt x3\_best -ascii

save EGAT\_DD\_n00\_b1.txt y1\_best -ascii

save EGAT\_DD\_n00\_b2.txt y2\_best -ascii

save EGAT\_DD\_n00\_b3.txt y3\_best -ascii

save EGAT\_DD\_n00\_MSE.txt SumSquareError -ascii

save EGAT\_DD\_n00\_MAPE\_S.txt MeanAbsoluteErrorTest -ascii

save EGAT\_DD\_n00\_MAPE\_R.txt MeanAbsoluteErrorTrain -ascii

save EGAT\_DD\_n00\_testcompare.txt compare2 -ascii

save EGAT\_DD\_n00\_testpercenterror.txt percenterror2 -ascii

save EGAT\_DD\_n00\_trainmin.txt min1 -ascii

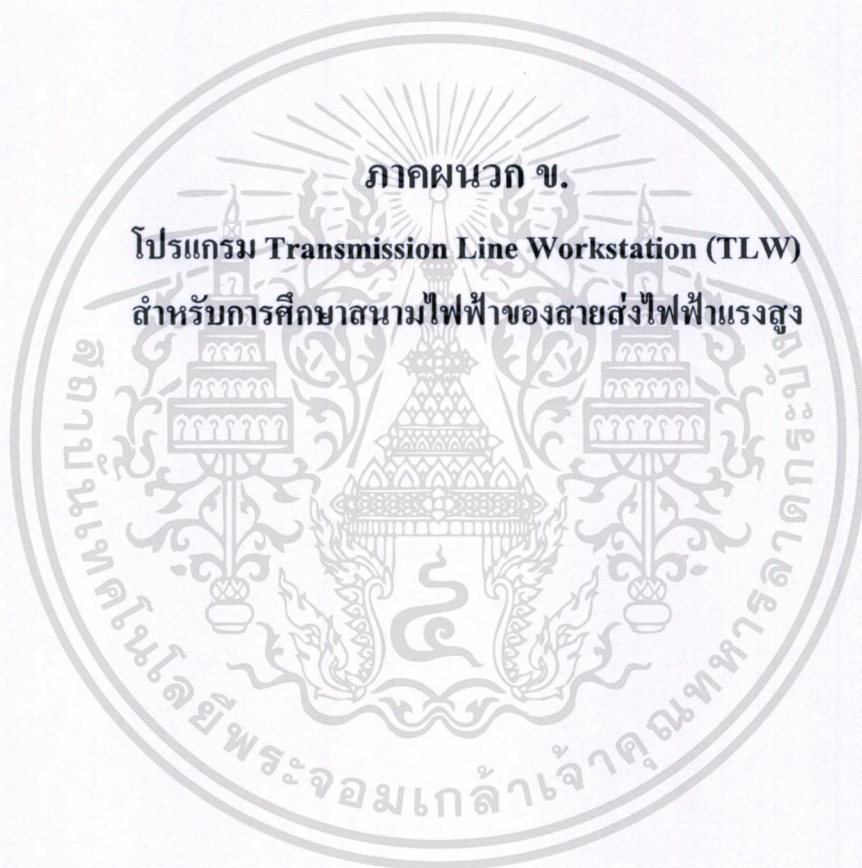
save EGAT\_DD\_n00\_trainmean.txt mean1 -ascii

save EGAT\_DD\_n00\_trainmax.txt max1 -ascii

save EGAT\_DD\_n00\_testmin.txt min2 -ascii

save EGAT\_DD\_n00\_testmean.txt mean2 -ascii

save EGAT\_DD\_n00\_testmax.txt max2 -ascii



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

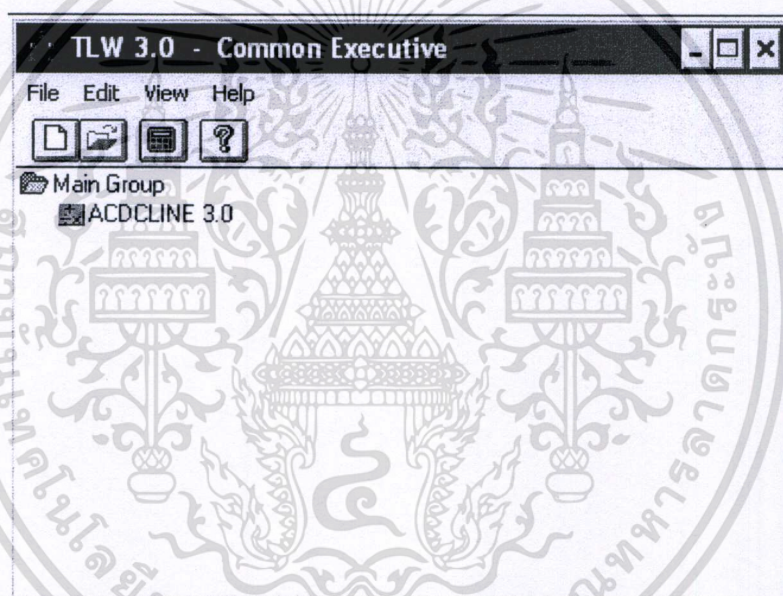
## โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการศึกษาสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

โปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW) เป็นโปรแกรมที่มีเนื้อหาครอบคลุมสำหรับใช้ออกแบบสายส่งใหม่ และอัพเกรดสายส่งเก่าที่มีอยู่เดิม

โปรแกรม TLW ในยุคก่อนใช้งานบน MS-DOS แต่ในปัจจุบันได้อัพเกรดมาจนกระทั่งเวอร์ชัน 3.0 และใช้งานได้เต็มทีบนวินโดวส์ ซึ่งทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของการออกแบบ และปรับปรุงแก้ไขการออกแบบสายส่งได้เป็นอย่างดี

### 1. วิธีการหาสนามไฟฟ้าสำหรับสายส่งแรงสูงด้วย โปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW)

1.1 เมื่อ เปิดโปรแกรม TLW 3.0 จะพบโมดูล ACDC LINE 3.0 จะได้น้ำต่างของโปรแกรมขึ้นมา ดังรูปที่ ข-1



รูปที่ ข-1 เมนู file ในการเข้าสู่การใช้งาน โปรแกรม TLW

1.2 ทำการดับเบิลคลิกที่ ACDC LINE 3.0 จะปรากฏ ไดอะล็อกบ็อกซ์ New Project ขึ้นมา ดังรูปที่ ข-2

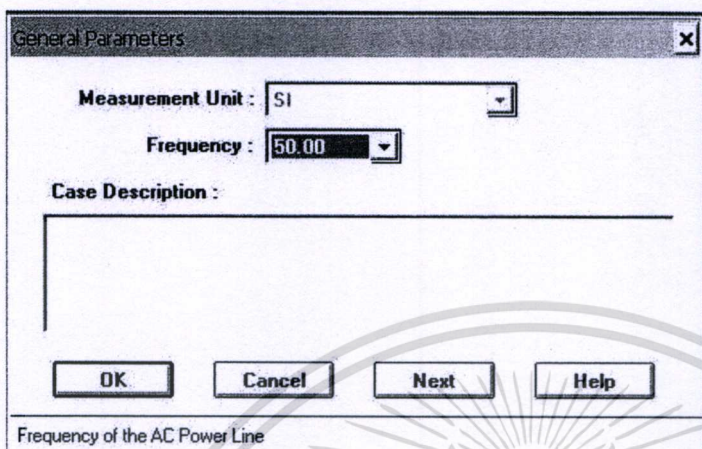
รูปที่ ข-2 ไดอะล็อกบ็อกซ์ New Project

1.3 ทำการใส่รายละเอียด Project Name , Case No., Author Name , Unit และ Description ดังรูปที่ ข-3

รูปที่ ข-3 ใส่รายละเอียดใน ไดอะล็อกบ็อกซ์ New Project

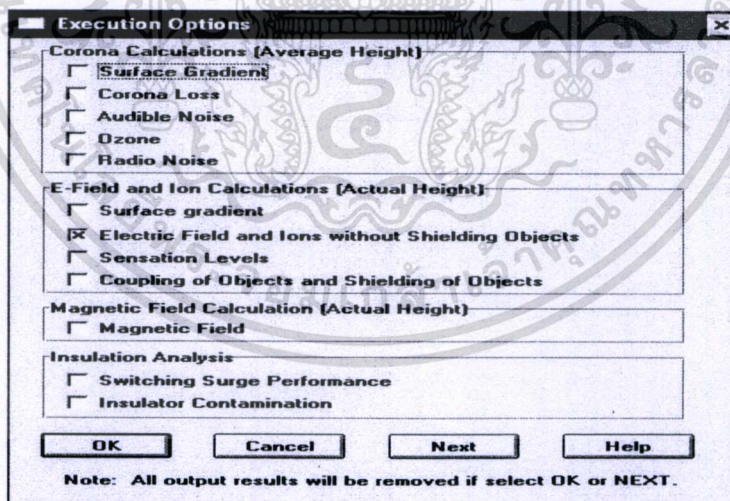
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.4 ในไดอะล็อกบ็อกซ์ General Parameter จะมีช่อง Frequency สามารถเลือกจาก drop down menu (50 และ 60 เฮิร์ตซ์) และในช่อง Case Description สามารถแก้ไขเพิ่มเติมได้จากนั้นกดปุ่ม Next ดังรูปที่ ข-4



รูปที่ ข-4 ไดอะล็อกบ็อกซ์ General Parameters

- 1.5 ปรากฏไดอะล็อกบ็อกซ์ Execution Option ขึ้นมา สามารถเลือกหัวข้อย่อยต่างๆ โดยคลิกในช่องว่างที่ต้องการ ซึ่งในการศึกษานี้เราสนใจในการหาสนามไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ดังรูปที่ ข-5



รูปที่ ข-5 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Execution Options

1.6 หลังจากนั้นจะปรากฏไดอะล็อกซ์ Circuit Specification-General ขึ้นมา ซึ่งใช้สำหรับใส่ข้อมูลต่างๆลงไปดังนี้ จำนวนของกลุ่มสายตัวนำ, จำนวนวงจร, ขั้วหรือเฟส, แรงดัน, กระแสใช้งานปัจจุบัน, มุมเฟส, จำนวนตัวนำของวงจรย่อย, กลุ่มตัวนำ, พิกัดแกน X , พิกัดแกน Y , ระยะห้อยอนยาน, ระยะช่วงเสา ดังรูปที่ ข-6

Bnd. No.	Cir. No.	Pole or Phase	Voltage (kV)	Cur. Amps	Cur. Angle	No. of Subcnd	Regular Bundle	Coordinate X (m)	Coordinate Y at Tower (m)
1	1	A	500.00	1000.00	0.00	4	Y	-13.65	13.00
2	1	B	500.00	1000.00	240.00	4	Y	0.00	13.00
3	1	C	500.00	1000.00	120.00	4	Y	13.65	13.00

รูปที่ ข-6 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Circuit Specification-General

1.7 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Circuit Specification Regular Bundles เป็น ไดอะล็อกบ็อกซ์สำหรับใส่ข้อมูลของกลุ่มสายตัวนำที่ได้กำหนดไว้ในข้อ 4.5.1.6 ในรายละเอียดต่างๆของสายเพิ่มเติม ดังแสดงในรูปที่ ข-7

Row No.	Bnd. No.	Subconductor Name	Subcond Spacing (cm)	Subcond Diameter (cm)	DC Resist. 25°C (ohm/km)	AC Resist. 60Hz 25°C (ohm/km)	Reactance 60Hz (ohm/km)
1	1	DRAKE	45.00	3.40	0.072	0.073	0.248
2	2	DRAKE	45.00	3.40	0.072	0.073	0.248
3	3	DRAKE	45.00	3.40	0.072	0.073	0.248

รูปที่ ข-7 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Circuit Specification-Regular Bundles

- 1.8 จากนั้นจะได้ไอคอนบ็อกซ์ Right-of-way Description สำหรับใส่ข้อมูลความสูงของสายส่งจากระดับน้ำทะเลและค่าความต้านทานของดิน ดังรูปที่ ข-8

รูปที่ ข-8 ไอคอนบ็อกซ์ Right-of-way Descriptions

- 1.9 ในไอคอนบ็อกซ์ Lateral Profile Specifications จะมีช่องว่างสำหรับใส่ค่าอยู่ 10 ช่อง เป็นการกำหนดการวัดค่าตามแนวแกน Z และ X โดยตามแนวแกน X นั้นจะวัดตามจุดต่างๆที่ผู้ใช้กำหนดเองขึ้นเป็นช่วงๆ ได้ 3 ช่วง ดังรูปที่ ข-9

รูปที่ ข-9 ไอคอนบ็อกซ์ Lateral Profile Specifications

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.10 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Profile Probe Characteristics แสดงสภาพในการวัดของมิเตอร์ว่าติดตั้งอยู่สูงจากพื้นเท่าใดตามแนวแกนตั้ง และแกนนอน ดังรูปที่ ข-10

รูปที่ ข-10 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Profile Probe Characteristics

- 1.11 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Climate/Weather Data แสดงค่าความชื้นและอุณหภูมิเป็นรายเดือน ผู้ใช้สามารถเลือกได้จาก drop down menu หรือใส่เองได้ตามสภาพที่เกิดขึ้น และต้องใส่ข้อมูลความเร็วลมที่วิ่งผ่านแนวตั้งฉากด้วย ดังรูปที่ ข-11

Row	Month	Humidity [%]	Temp (°C)
1	JAN	65.00	23.90
2	FEB	65.00	23.90
3	MAR	65.00	23.90
4	APR	65.00	23.90
5	MAY	65.00	23.90
6	JUN	65.00	23.90
7	JUL	65.00	23.80
8	AUG	65.00	23.80
9	SEP	65.00	23.80
10	OCT	65.00	23.80
11	NOV	65.00	23.80

รูปที่ ข-11 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Climate/Weather Data

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.12 การรันโปรแกรม จะใช้เวลารันมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนหัวข้อต่างๆที่เลือก  
ให้โปรแกรมคำนวณ ดังรูปที่ ข-12

ACDCLINE Output Browser

File Edit

---

Results of AC/DCLINE program EFION (EPRI/HVTRC 7-93) for:

ELECTRIC FIELD & IONS WITHOUT SHIELDING OBJECTS

Configuration file name: C:\TLV30\ACDCLINE\DATA\ACCASE1  
Date: 9/ 3/2009 Time: 20:15

CASE1

\*\*\*\*\*  
BUNDLE INFORMATION  
\*\*\*\*\*

BNDL #	CIRC #	VOLTAGE (kV)	ANGLE (DEG)	CURRENT (A)	LOAD ANGLE (DEG)	# OF COND	X (m)	Y (m)	SAG (m)	PH
1	1	500.0	0.	1000.	0.	4	-13.65	13.00	.00	A
2	1	500.0	240.	1000.	240.	4	.00	13.00	.00	B
3	1	500.0	120.	1000.	120.	4	13.65	13.00	.00	C

\*\*\*\*\*  
MINIMUM GROUND CLEARANCE = 13.00 meter  
POWER SYSTEM FREQUENCY = 50. Hz  
SOIL RESISTIVITY = 100. ohm meter  
\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*  
SUBCONDUCTOR INFORMATION - REGULAR BUNDLES  
\*\*\*\*\*

BNDL #	CONDUCTOR NAME	DIAMETER (cm)	SPACING (cm)	DC RESIST (ohm/km)	AC RESIST (ohm/km)	AC REACT (ohm/km)
1	DRAKE	3.400	45.000	0.720	0.730	2.480
2	DRAKE	3.400	45.000	0.720	0.730	2.480
3	DRAKE	3.400	45.000	0.720	0.730	2.480

ACDCLINE Output Browser

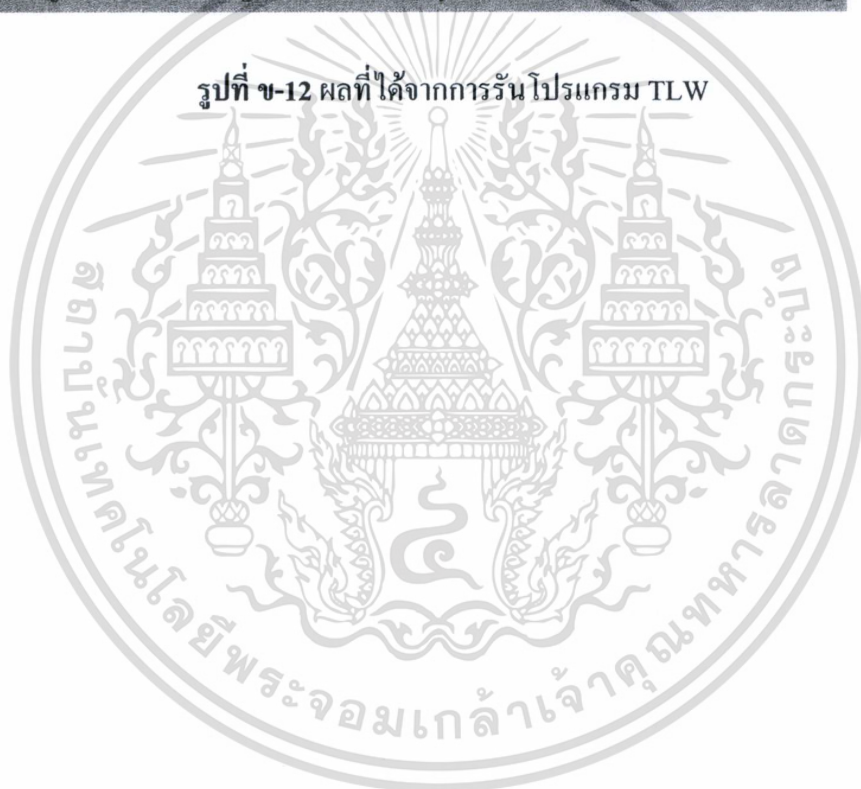
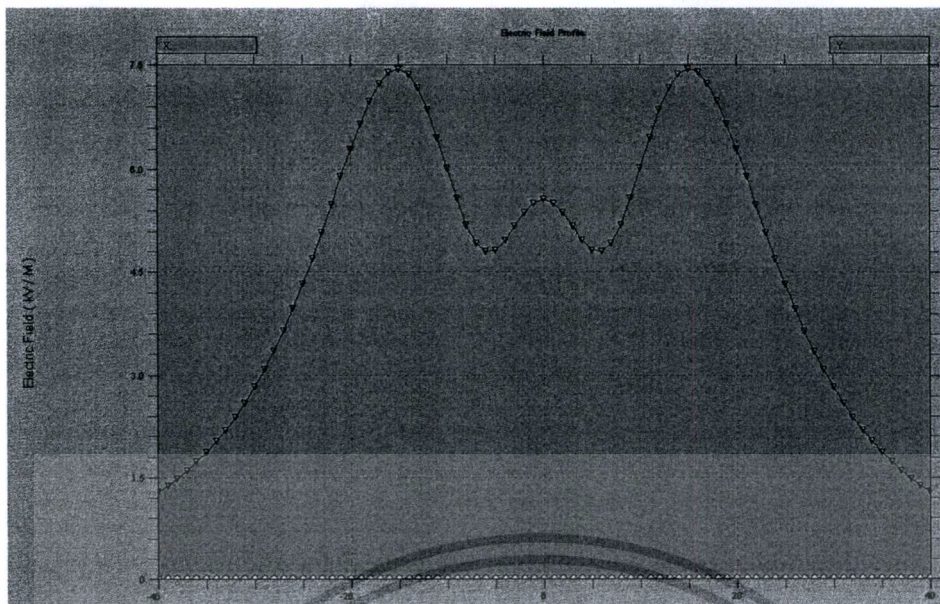
File Edit

---

\*\*\*\*\*  
AC ELECTRIC FIELD PROFILE  
at 1.00 meter above ground  
longitudinal distance: 152.40 meter  
\*\*\*\*\*

LATERAL DISTANCE (feet)	(meters)	MAXIMUM FIELD (kV/m)	MINOR/MAJOR ELLIPSE AXES (ratio)	VERTICAL (kV/m)	HORIZONTAL (kV/m)	SPACE POTENTIAL (kV)
-131.2	-40.00	1.286	.003	1.283	.093	1.285
-128.0	-39.00	1.383	.003	1.380	.102	1.383
-124.7	-38.00	1.490	.003	1.486	.112	1.489
-121.4	-37.00	1.607	.003	1.603	.123	1.607
-118.1	-36.00	1.736	.003	1.731	.135	1.736
-114.8	-35.00	1.878	.003	1.873	.149	1.877
-111.5	-34.00	2.035	.003	2.028	.164	2.034
-108.3	-33.00	2.207	.003	2.200	.181	2.206
-105.0	-32.00	2.397	.003	2.389	.199	2.395
-101.7	-31.00	2.606	.003	2.597	.219	2.604
-98.4	-30.00	2.836	.003	2.825	.240	2.833
-95.1	-29.00	3.088	.002	3.076	.263	3.084
-91.9	-28.00	3.364	.002	3.351	.287	3.359
-88.6	-27.00	3.664	.002	3.651	.312	3.659
-85.3	-26.00	3.990	.001	3.976	.337	3.984
-82.0	-25.00	4.340	.001	4.325	.360	4.332
-78.7	-24.00	4.712	.000	4.697	.380	4.703
-75.5	-23.00	5.103	.001	5.088	.396	5.091
-72.2	-22.00	5.506	.003	5.491	.403	5.491
-68.9	-21.00	5.910	.004	5.897	.399	5.893
-65.6	-20.00	6.304	.006	6.292	.381	6.283
-62.3	-19.00	6.669	.009	6.661	.346	6.644
-59.1	-18.00	6.987	.012	6.982	.295	6.958
-55.8	-17.00	7.236	.017	7.233	.235	7.202
-52.5	-16.00	7.394	.022	7.393	.192	7.356
-49.2	-15.00	7.443	.029	7.443	.217	7.401
-45.9	-14.00	7.371	.038	7.370	.313	7.326
-42.7	-13.00	7.178	.050	7.174	.440	7.131
-39.4	-12.00	6.874	.065	6.864	.573	6.826
-36.1	-11.00	6.481	.085	6.467	.695	6.435
-32.8	-10.00	6.038	.109	6.021	.799	5.997

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. พารามิเตอร์ที่ป้อนให้โปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW)

ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้โปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW) ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์ต่างๆ ในการหาค่าสนามไฟฟ้าจากระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้กับโปรแกรม ดังต่อไปนี้

- สายส่งวงจรคู่ หรือวงจรเดี่ยว ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่จะศึกษา
- เฟส (Phase) A, B, C
- แรงดัน (Volt) 115 kV และ 500 kV
- กระแส (Current) ไม่มีผลกระทบต่อสนามไฟฟ้า
- จำนวนตัวนำต่อเฟส 1, 2 ตัวนำ (1, 2 bundles) สำหรับ 115 kV การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และ 4 ตัวนำ (4 bundles) สำหรับ 500 kV การไฟฟ้าฝ่ายผลิต
- ตำแหน่งของตัวนำในแนวแกน X และ Y
- ระยะหย่อน (Sag) ผลของระยะหย่อนต่อสนามไฟฟ้าปกติจะตัดทิ้ง เนื่องจากพิจารณาที่จุดต่ำสุดของแต่ละสายส่ง
- ระยะห่างของเสาส่งระหว่างต้น (Span) 490 เมตร วงจรเดี่ยว, 420 เมตร วงจรคู่ สำหรับ 500 kV การไฟฟ้าฝ่ายผลิต และ 80 เมตร สำหรับ 115 kV การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- ประเภทสาย อะลูมิเนียมแกนเหล็ก สำหรับ 500 kV การไฟฟ้าฝ่ายผลิต และ อะลูมิเนียมตีเกลียวเปลือย สำหรับ 115 kV การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- ระยะห่างระหว่างตัวนำ 45.7 ซม. สำหรับ 500 kV การไฟฟ้าฝ่ายผลิต และ 20 ซม. สำหรับ 115 kV การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- เส้นผ่าศูนย์กลางของสายไฟ แต่ละประเภทสาย
- ความต้านทานของสายตัวนำ 0.0716 โอห์มต่อกิโลเมตร
- ความต้านทานของดิน 100 โอห์ม. เมตร
- ช่วงในการศึกษา (ระยะ Right of Way)
- ตำแหน่งที่ทำการพิจารณาสนามไฟฟ้าที่ระดับความสูง 1 เมตรเหนือพื้นดิน
- สภาพอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ 65%, อุณหภูมิ 33 องศา และ ความเร็วลม 10 กม./ชม.
- สายล่อฟ้าจะไม่มีผลกระทบต่อสนามไฟฟ้าที่ระดับพื้นดินในทางปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อกำหนดและมาตรฐานของความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้สายส่งจะมีองค์กรหรือหน่วยงานที่ให้ความสนใจในการศึกษาและให้คำแนะนำอยู่หลายองค์กร เช่น

1. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNRP) คือ คณะกรรมการระหว่างประเทศด้านการป้องกันการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดไม่แตกตัว

2. National Radiological Protection Board (NRPB) คือ สภาการป้องกันการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแห่งสหราชอาณาจักรอังกฤษ

3. American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) คือ การประชุมชื่อนามัยในโรงงานอุตสาหกรรมของรัฐบาลสหรัฐอเมริกา

4. World Health Organization (WHO) คือ องค์การอนามัยโลก

5. International Council on Large Electric Systems (CIGRE)

6. NIEHS and U.S. Department of Energy กระทรวงพลังงานของสหรัฐอเมริกา

ซึ่งองค์กรเหล่านี้ยังไม่ได้กำหนดเป็นมาตรฐานบังคับใช้ตายตัวแต่ได้จัดทำเป็นข้อเสนอแนะเพื่อป้องกันไม่ให้ผู้ปฏิบัติงานในบริเวณดังกล่าวได้รับสนามแม่เหล็กมากเกินไปจนอาจเกิดผลกระทบข้างเคียงต่อร่างกาย เช่น การเหนียวนำกระแสในเซลล์หรือการกระตุ้นของเส้นประสาทได้

องค์การอนามัยโลก (World Health Organization) และคณะกรรมการระหว่างประเทศด้านการป้องกันการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดไม่แตกตัว (The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection; ICNIRP) ได้จัดทำรายงาน “ ข้อเสนอแนะสำหรับการจำกัดการสัมผัสสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนตามเวลา (สูงถึงระดับ 300 GHz)” (“ Guideline for Limiting Exposure to Time-varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Field (up to 300 GHz)”) ดังตารางที่ ค-1

ตารางที่ ค-1 ค่าจำกัดการสัมผัสสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

สนาม	การประเมินโดยองค์การอนามัยโลก (WHO)	ข้อเสนอแนะจาก ICNIRP
สนามไฟฟ้า	ไม่จำกัดเวลาการสัมผัสในกรณีที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าน้อยกว่า 10 kV/m	5 kV/m
สนามแม่เหล็ก	ไม่พบอันตรายที่มีผลทางชีววิทยาในบริเวณสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มน้อยกว่า 50,000 มิลลิเกาส์	1,000 มิลลิเกาส์

ที่มา: WHO (1987) และ WHO (1984)

ตารางที่ ค-2 เกณฑ์ปริมาณค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของคณะกรรมการระหว่างประเทศด้านการป้องกันการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดไม่แตกตัว

เกณฑ์ปริมาณค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สัมผัส		
การสัมผัส (ที่ความถี่ 50/60 Hz)	สนามไฟฟ้า	สนามแม่เหล็ก
คนทำงาน:		
ทำงานตลอดทั้งวัน	10 kV/m	5 เกาส์ (397.75 A/m)
ช่วงเวลาสั้นๆ <sup>a</sup>	30 kV/m	50 เกาส์ (3,977.5 A/m)
บริเวณแขน-ขา	-	250 เกาส์ (19,887.5 A/m)
ประชาชนทั่วไป:		
ถึง 24 ชั่วโมงต่อวัน	5 kV/m	1 เกาส์ (79.55 A/m)
2-3 ชั่วโมงต่อวัน	10 kV/m	10 เกาส์ (795.5 A/m)
<sup>a</sup> สำหรับสนามไฟฟ้า 10-30 kV/m , ความเข้มของสนามไฟฟ้า (kV) คูณจำนวนชั่วโมงที่รับสนามไฟฟ้า จะต้องไม่เกิน 80 kV/m ในกรณีที่ทำงานตลอดทั้งวันและทั่วร่างกายที่เปิดรับสนามแม่เหล็กมากถึง 12 ชั่วโมง/วัน แต่จะต้องไม่เกิน 50 เกาส์		แหล่งข้อมูล: ICNIRP ปี พ. ศ. 2537 องค์กรที่มีนักวิทยาศาสตร์ที่เป็นผู้เชี่ยวชาญในการป้องกันการแพร่รังสี 15,000 คน จาก 40 ประเทศ

เอกสารที่มา: The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) (1994) การคัดค้านว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-3 เกณฑ์ปริมาณค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของการประชุมชีวอนามัยในโรงงาน  
อุตสาหกรรมของรัฐบาลสหรัฐอเมริกา (The American Conference of  
Governmental Industrial Hygienists (ACGIH))

เกณฑ์ปริมาณค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สัมผัส (ค่าจำกัดเริ่มต้น)		
การสัมผัส (ความถี่ 60 Hz)	สนามไฟฟ้า	สนามแม่เหล็ก
คนทำงาน:		
ไม่ควรเกินระดับ	25 kV/m (จากความถี่ 0-100 Hz)	10 เก้าซ์ (795.5 A/m)
คนทำงานที่มีเครื่องมือฝังอยู่ใต้ผิวหนังเพื่อควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจให้ปกติด้วยการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า (Cardiac pacemaker)	1 kV/m หรือต่ำกว่า	1 เก้าซ์ (79.55 A/m)
ข้อระมัดระวัง: ควรใช้อุปกรณ์ป้องกัน เช่น ชุดป้องกัน ถุงมือ หรือฉนวนอื่น ๆ เมื่อมีค่าสนามไฟฟ้าสูงเกิน 15 kV/m		
แหล่งข้อมูล : ACGIH พ.ศ. 2539 ACGIH ไม่ใช่หน่วยงานของรัฐบาล แต่เป็นองค์กรที่มีความเชี่ยวชาญและทำการแลกเปลี่ยนข้อมูลเกี่ยวกับการป้องกันสุขภาพอนามัยของคนทำงาน		

ที่มา: NIEHS and U.S. Department of Energy (1995)

ตารางที่ ค-4 แสดงเกณฑ์มาตรฐานค่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละมลรัฐของ  
สหรัฐอเมริกา

มาตรฐานค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าในแต่ละมลรัฐในสหรัฐอเมริกา				
มลรัฐ	สนามไฟฟ้า (kV/m)		สนามแม่เหล็ก (มิลลิเกาส์)	
	ภายในแนวเขต สิทธิปลอดภัย	ขอบแนวเขต สิทธิปลอดภัย	ภายในแนวเขต สิทธิปลอดภัย	ขอบแนวเขต สิทธิปลอดภัย
ฟลอริดา (Florida)	8 <sup>a</sup> 10 <sup>b</sup>	2	-	150 <sup>a</sup> 200 <sup>b</sup> 250 <sup>c</sup>
มินเนโซตา (Minnesota)	8	-	-	-
มอนทานา (Montana)	7 <sup>d</sup>	1	-	-
นิวเจอร์ซีย์ (New Jersey)	-	3	-	-
นิวยอร์ก (New York)	11.8 11 <sup>e</sup> 7 <sup>d</sup>	1.6	-	200
ออเรกอน (Oregon)	9	-	-	-
<sup>a</sup> สำหรับสายส่ง 69-230 kV <sup>b</sup> สำหรับสายส่ง 500 kV <sup>c</sup> สำหรับสายส่ง 500 kV ในแนวเขตสิทธิปลอดภัย <sup>d</sup> สูงสุดสำหรับพื้นที่ที่มีการพาด ของสายส่งจำนวนมาก <sup>e</sup> สูงสุดสำหรับถนนส่วนบุคคล.				

ที่มา: NIEHS and U.S. Department of Energy (1995)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(CIGRE' Working Group 36.01) ข้อเสนอแนะจากคณะกรรมการป้องกันการแผ่รังสีระหว่างประเทศ (International Radiation Protection Association's guidelines) ที่กำหนดค่า ความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่บุคคลทั่วไปและบุคคลที่มีอาชีพเกี่ยวข้องของต้องสัมผัสไม่เกินค่าดังตารางที่ ค-5 ทั้งการสัมผัสในช่วงเวลาสั้น ๆ และช่วงเวลานาน ๆ

ตารางที่ ค-5 ค่ากำหนดการสัมผัสความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจาก คณะกรรมการป้องกันการแผ่รังสีระหว่างประเทศ

ค่าจำกัดการสัมผัสสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 50 หรือ 60 Hz			
ลักษณะการสัมผัส	ความเข้ม	ความเข้มสนามแม่เหล็ก	
	สนามไฟฟ้า kVm-1 (rms)	mT (rms)	A/m.(rms)
ผู้ประกอบอาชีพ			
ทำงานตลอดทั้งวัน	10	0.5	397.75
ระยะเวลาสั้น ๆ	30 <sup>1</sup>	5 <sup>2</sup>	3,977.5 <sup>2</sup>
ช่วงแขน ขา	-	25	19,887.5
บุคคลทั่วไป			
ถึง 24 ชั่วโมง/วัน	5	0.1	79.55
ช่วง 2-3 ชั่วโมง/วัน <sup>3</sup>	10	1	795.5
<sup>1</sup> ช่วงเวลาระหว่างการสัมผัสกับสนามไฟฟ้า 10 และ 30 kVm-1 อาจคำนวณจากสมการ $t \leq 80 / E$ โดยที่ t เป็นช่วงเวลาในชั่วโมง/วัน และ E เป็นความเข้มสนามไฟฟ้า <sup>2</sup> ช่วงเวลาสูงสุดที่สัมผัส คือ 12 ชั่วโมง/วัน <sup>3</sup> ระดับค่านี้สามารถเกินได้แต่ไม่ควรใช้เวลาเกิน 2-3 นาที/วัน เพื่อป้องกันผลกระทบเนื่องจากการคับปลิงทางอ้อม			

ที่มา: CIGRE' Working Group 36.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-6 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต

ตำแหน่งที่พิจารณา	สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV	
	ข้อกำหนดของ กฟผ.	
	สนามไฟฟ้า	สนามแม่เหล็ก
1. ภายในเขตเดินสายไฟฟ้า	15 kV/m	-
2. ที่ขอบของเขตเดินสายไฟฟ้า	2 kV/m	200 mG



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวกที่ 1-1 คุณสมบัติของสายอะลูมิเนียมชนิดเปลือยตามมาตรฐาน มอก. 85-2517

พื้นที่หน้าตัดระบุ (mm <sup>2</sup> )	พื้นที่หน้าตัดจริง (mm <sup>2</sup> )	จำนวนเส้นลวด	เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลางของสายตีเกลียว (mm)	น้ำหนักของตัวนำตีเกลียว (kg/km)	แรงดึงของสายตีเกลียว		กระแสใช้งาน (A)
						N	kg	
16	15.89	7	1.70	5.10	44	2844	290	110
25	25.18	7	2.14	6.42	69	4315	440	145
35	34.91	7	2.52	7.56	69	5737	585	180
50	50.14	7	3.02	9.06	137	7894	805	225
50	49.97	19	1.83	9.15	137	8727	890	225
70	68.98	19	2.15	10.75	190	11816	1205	270
95	94.76	19	2.52	12.60	261	15543	1585	340
120	121.21	19	2.85	14.25	333	19416	1980	390
150	147.12	37	2.25	15.75	406	25201	2570	455
185	184.54	37	2.52	17.64	509	30252	3085	550
240	242.54	61	2.25	20.25	670	39371	4015	625
300	304.24	61	2.52	22.68	840	47265	4820	710
400	389.14	61	2.85	25.65	1075	59081	6025	855
500	506.04	61	3.25	29.25	1398	78105	7695	990
625	626.20	91	2.96	32.56	1735	95060	9694	1140
800	802.08	91	3.35	36.85	2222	118211	12055	1340
1000	999.71	91	3.74	41.14	2769	145570	14845	1540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวกที่ ๒-2 คุณสมบัติของสายอะลูมิเนียมตีเกลียวเปลือยแกนเหล็กตามมาตรฐาน  
มอก. 86-22517

พื้นที่ หน้า ตัดระบุ (mm <sup>2</sup> )	พื้นที่ หน้า ตัดจริง (mm <sup>2</sup> )	จำนวน เส้น ลวด	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของเส้น ลวด (mm)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของสาย ตีเกลียว (mm)	น้ำหนัก ของ ตัวนำ ตีเกลียว (kg/km)	แรงดึงของ สายตีเกลียว		กระแส ใช้งาน (A)
						N	kg	
16/2.5	17.85	6	1	5.4	62	5805	592	90
25/4	27.80	6	1	6.8	97	8982	916	125
35/6	40.00	6	1	8.1	139	12405	1265	145
50/8	56.30	6	1	9.6	195	16827	1716	170
50/30	81.00	12	7	11.7	375	42950	4380	-
70/12	81.30	26	7	11.7	282	26241	2676	290
95/15	109.7	26	7	13.6	381	34958	3565	350
95/55	152.8	12	7	16.0	708	78105	7965	-
120/20	141.4	26	7	15.5	491	44666	4555	410
120/70	193.3	12	7	18.0	896	98393	10034	-
125/30	157.7	30	7	16.1	587	56473	5759	425
150/25	173.1	26	7	17.1	601	54060	5513	470
170/40	211.9	30	7	18.9	789	75261	7975	520
185/30	213.6	26	7	19.0	741	64896	6618	535
210/35	243.2	26	7	20.3	844	73437	7489	590
210/50	261.6	30	7	21.0	974	92078	9390	610
230/30	260.7	24	7	21.0	871	71711	7313	630
240/40	282.5	26	7	21.9	981	84724	8640	645
265/35	297.8	24	7	22.4	995	81458	8307	680

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวกที่ ง-2 คุณสมบัติของสายอะลูมิเนียมตีเกลียวเปลี่ยนแกนเหล็กตามมาตรฐาน  
มอก. 86-22517 (ต่อ)

พื้นที่ หน้า ตัดระบุ (mm <sup>2</sup> )	พื้นที่ หน้า ตัดจริง (mm <sup>2</sup> )	จำนวน เส้น ลวด	เส้นผ่าน	เส้นผ่าน	น้ำหนัก ของ ตัวนำ ตีเกลียว (kg/km)	แรงดึงของ สายตีเกลียว		กระแส ใช้งาน (A)
			ศูนย์กลาง ของเส้น ลวด (mm)	ศูนย์กลาง ของสาย ตีเกลียว (mm)		N	kg	
300/50	353.8	26	7	24.5	1228	104944	10702	740
305/40	344.1	54	7	24.1	1152	97491	9942	740
380/50	431.5	54	7	27.0	1443	120731	12312	840
435/55	490.6	54	7	28.8	1642	134077	13673	900
490/65	553.9	54	7	30.6	1853	150453	15343	960
550/70	621.3	54	7	32.4	2078	167643	17096	1020
680/85	764.8	54	19	36.0	2552	206318	21040	1150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวกที่ ง-3 คุณสมบัติของสายอะลูมิเนียมหุ้มฉนวนแบบไม่เติมพิกัดขนาดแรงดัน 25 kV

ขนาดสาย (mm <sup>2</sup> )	พื้นที่ หน้า ตัด (mm <sup>2</sup> )	จำนวน เส้น อะลูมิเนียม	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ทั้งหมด ของสาย (mm)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของสาย ทีเกลียว (mm)	น้ำหนัก ของ ตัวนำ ทีเกลียว (kg/km)	แรงดึงของ สาย		กระแส ใช้งาน (A)
						N	kg	
35PIC25	35	6	12	6.95	160	5720	583	149
50 PIC25	50	6	14	8.33	216	7890	805	186
70 PIC25	70	12	15	9.73	300	11710	1195	237
95 PIC25	95	12	18	11.45	371	15540	1586	279
120 PIC25	120	15	20	12.95	456	20520	2094	321
185 PIC25	185	30	22.5	15.98	569	30260	3088	429

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวกที่ ง-4 คุณสมบัติของสายอะลูมิเนียมหุ้มฉนวนแบบไม่เต็มพิกัดขนาดแรงดัน 35 kV

ขนาดสาย (mm <sup>2</sup> )	พื้นที่ หน้า ตัด (mm <sup>2</sup> )	จำนวน เส้น อะลูมิเนียม	เส้นผ่าน	เส้นผ่าน	น้ำหนัก ของ ตัวนำ ทีเกลียว (kg/km)	แรงดึงของ สาย		กระแส ใช้งาน (A)
			ศูนย์กลาง ทั้งหมด ของสาย (mm)	ศูนย์กลาง ของสาย ทีเกลียว (mm)		N	kg	
35PIC25	35	6	15	6.95	200	5720	583	148
50 PIC25	50	6	16	8.33	262	7890	805	184
70 PIC25	70	12	18	9.73	360	11710	1195	234
95 PIC25	95	12	20	11.45	434	15540	1586	276
120 PIC25	120	15	22	12.95	531	20520	2094	318
185 PIC25	185	30	25	15.98	764	30260	3088	425

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวกที่ ง-5 คุณสมบัติของสายอะลูมิเนียมหุ้มฉนวนแบบเติมพิกัดขนาดแรงดัน 25 kV

ขนาดสาย (mm <sup>2</sup> )	พื้นที่ หน้า ตัด (mm <sup>2</sup> )	จำนวน เส้น อะลูมิเนียม	เส้นผ่าน	เส้นผ่าน	น้ำหนัก ของ ตัวนำ ทีเกลียว (kg/km)	แรงดึงของ สาย		กระแส ใช้งาน (A)
			ศูนย์กลาง ทั้งหมด ของสาย (mm)	ศูนย์กลาง ของสาย ทีเกลียว (mm)		N	kg	
25PIC25	25	6	20	5.9	317	4310	440	119
35PIC25	35	6	21	6.95	363	5720	584	149
50 PIC25	50	6	22	8.33	432	7890	805	186
70 PIC25	70	12	24.5	9.73	509	11710	1195	229
95 PIC25	95	15	26	11.45	615	15540	1586	279
120 PIC25	120	15	27	12.95	729	19430	1983	321
150PIC25	150	15	29.5	14.27	826	25210	2572	371
185 PIC25	185	30	31	15.98	959	30260	3088	429
240PIC25	240	30	33.5	18.47	1170	39380	4018	520

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวกที่ ง-6 คุณสมบัติของสายอะลูมิเนียมหุ้มฉนวนแบบเต็มพิกัดขนาดแรงดัน 35 kV

ขนาดสาย (mm <sup>2</sup> )	พื้นที่ หน้า ตัด (mm <sup>2</sup> )	จำนวน เส้น อะลูมิเนียม	เส้นผ่าน	เส้นผ่าน	น้ำหนัก ของ ตัวนำ ตีเกลียว (kg/km)	แรงดึงของ สาย		กระแส ใช้งาน (A)
			ศูนย์กลาง ทั้งหมด ของสาย (mm)	ศูนย์กลาง ของสาย ตีเกลียว (mm)		N	kg	
25PIC25	25	6	22.5	5.9	393	4310	440	118
35PIC25	35	6	24.5	6.95	443	5720	584	148
50 PIC25	50	6	25.5	8.33	517	7890	805	184
70 PIC25	70	12	27.5	9.73	599	11710	1195	227
95 PIC25	95	15	29	11.45	711	15540	1586	276
120 PIC25	120	15	31	12.95	831	19430	1983	318
150PIC25	150	15	32.5	14.27	933	25210	2572	367
185 PIC25	185	30	33.5	15.98	1073	30260	3088	425
240PIC25	240	30	36.5	18.47	1293	39380	4018	515

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวกที่ ๗-7 คุณสมบัติของสายอะลูมิเนียมแกนเหล็ก (ACSR) ตามมาตรฐานอเมริกัน  
(AWG)

ขนาด สาย (MCM)	CODE name	จำนวน เส้น อะลูมิเนียม	จำนวน เส้นลวด แกน เหล็ก	เส้นผ่าน ศูนย์กลางของ สายตี เกลียว (mm)	น้ำหนัก ของ ตัวนำ ตีเกลียว (kg/km)	แรงดึงของ สาย		กระแส ใช้งาน (A)
						N	kg	
266.8	PARTRIDG	26	7	16.28	546	50176	5120	437
336.4	ELINNET	26	7	18.31	689	62720	6400	504
477	HAWK	26	7	21.81	978	86828	8860	625
477	HEN	30	7	22.40	1112	105840	10800	630
795	-	42	7	26.80	1274	89376	9120	845
795	CONDOR	54	7	27.72	1524	125440	12800	852
1272	-	42	7	33.91	2040	137690	14050	1125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

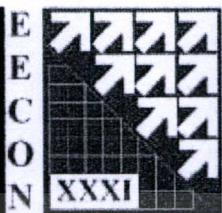
## ภาคผนวก จ.

### ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. ศุภกฤต ทาทอง, สมชาติ จิรวិภากร, “ การประมาณสนามไฟฟ้าของสายส่งแรงสูง โดยใช้  
โครงข่ายประสาทเทียม ” , ได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสารการประชุมวิชาการทาง  
วิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 31 (EECON-31) , 29-31 ตุลาคม 2551 , หน้า 21-24.
2. ศุภกฤต ทาทอง, สมชาติ จิรวิภากร, “ การประมาณสนามไฟฟ้าของสายส่งแรงสูง โดยใช้  
โครงข่ายประสาทเทียม ” , ได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนคร  
เหนือ ปีที่ 20 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน-ธันวาคม 2553.

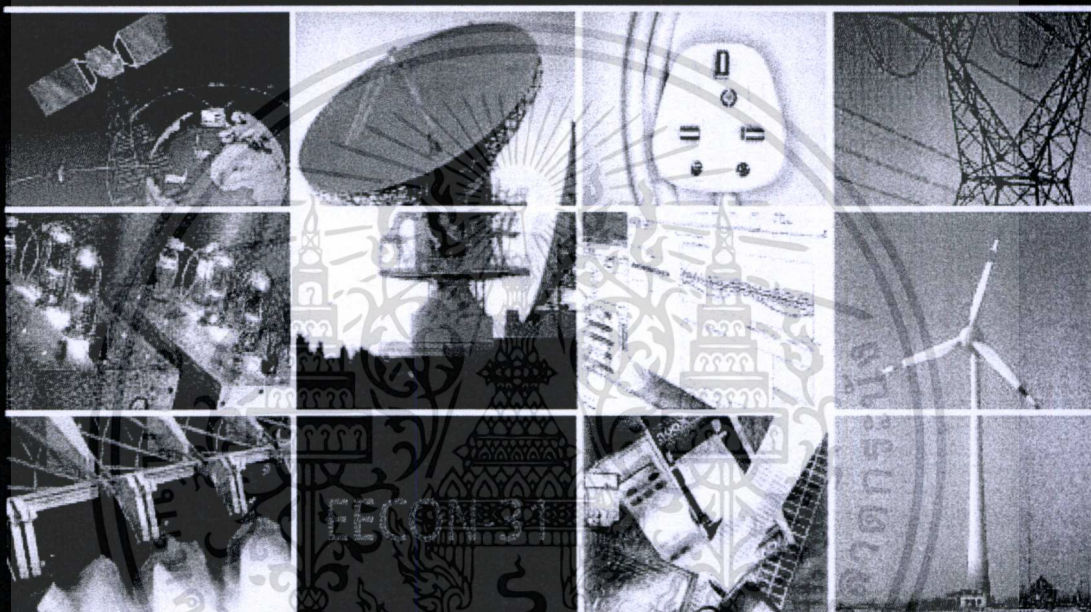


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31

## 31<sup>st</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-31)



29 - 31 ตุลาคม 2551

ณ รอยัลฮิลส์ กอล์ฟ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดนครนายก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การประมาณสนามไฟฟ้าของสายส่งแรงสูง โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

### Electric Fields Estimation of High Voltage Transmission Line Using Artificial Neural Networks

ศุภกฤต ทาทอง สมชาติ จิรวินากร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร 0-2326-4550 E-mail : imaxamin@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอวิธีการประมาณสนามไฟฟ้าที่ชั้นแหล่งกำเนิดมาจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับเหนือพื้นดิน ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมชนิดที่มีการแพร่ค่าย้อนกลับ (Feed-forward neural networks with back-propagation learning rule) ในการศึกษาจะใช้ Levenberg-Marquardt algorithm ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมนั้น จะใช้โปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW) Version 3.0 [1] จำลองตามมาตรฐานโครงสร้างเสาสำหรับทางตรงตลอดแนวความยาวของช่วงเสาส่งไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 115 kV

คำสำคัญ : สนามไฟฟ้า, โครงข่ายประสาทเทียม, สายส่งแรงสูง

#### Abstract

This paper presents a novel method to the estimation of the electric field of transmission line at ground level based on artificial neural networks (ANN). A feed-forward (FF) ANN with back-propagation learning rule method was addressed which uses the Levenberg-Marquardt learning algorithm. Input and output of training and testing data have been simulated by Transmission Line Workstation (TLW) Version 3.0 [1] modeled according to 115 kV PEA transmission lines.

Keywords: Electric Field, Neural Network, Transmission Line

#### 1. คำนำ

สายส่งไฟฟ้าแรงสูงเป็นแหล่งกำเนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กระเจายอยู่โดยรอบบริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูงและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่างๆที่อยู่ใกล้กับสายส่งแรงสูง ซึ่งความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดขึ้นนั้นจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จากสาเหตุดังกล่าวได้สร้างปัญหาให้กับหน่วยงานและวิศวกรที่รับผิดชอบต่อการออกแบบและการก่อสร้าง

สายส่งไฟฟ้าแรงสูง ในการศึกษาเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ของระบบไฟฟ้าแรงสูงนั้น เราจะพบว่าอิทธิพลของสนามไฟฟ้ามีความสำคัญมากกว่าสนามแม่เหล็ก [3] ทำให้ผู้ออกแบบมีการศึกษาวิจัยและทำความเข้าใจเกี่ยวกับปัญหาสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

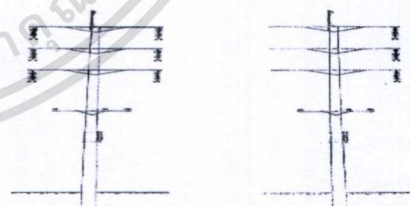
ในช่วงเวลาเดียวกันได้มีการนำโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ไปประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ดังนั้นจึงได้นำแนวความคิดในการประมาณสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อเป็นแนวทางใหม่ สำหรับออกแบบและประมาณสนามไฟฟ้าของสายส่งแรงสูง โดยคำนึงถึงผลกระทบของสนามไฟฟ้า

#### 2. ทฤษฎี และหลักการ

##### 2.1 สนามไฟฟ้าและการคำนวณสนามไฟฟ้า

##### ที่กึ่งกลางสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

สนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุไฟฟ้าเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $\vec{E}$  และถูกวัดออกมาเป็นหน่วยของแรงดันต่อระยะทาง ( $kV/m$ ) ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าแปรผันโดยตรงกับค่าแรงดันไฟฟ้าของสายส่งและแปรผกผันกับระยะห่างจากสายส่งไฟฟ้า



รูปที่ 1 ตัวอย่าง โครงสร้างเสาสายส่งไฟฟ้า 115 kV กฟภ.

ในการคำนวณได้พิจารณาโครงสร้างเสาสายส่ง 115 kV วงจรเดี่ยว สายไฟฟ้าเดี่ยว (SS\_TG1), สายไฟฟ้าคู่ (SD\_TG1) และ วงจรคู่ สายไฟฟ้าเดี่ยว (DS\_TG1), สายไฟฟ้าคู่ (DD\_TG1) ของ กฟภ. และพิจารณาให้สายตัวนำไฟฟ้าเปรียบเสมือนกับวางอยู่บนเหนือพื้นดิน โดยปราศจากเสาโครงสร้างและผลจากความผันผวนของดิน [3] ซึ่งมีพิจารณาจากภาคตัดขวางตัวจำนวน

ของสายตัวนำไฟฟ้าจะประกอบด้วยสายตัวนำในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน สำหรับกรคำนวณสนามไฟฟ้าจะประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

**หาค่าประจุไฟฟ้า (Q)**

จำนวนประจุไฟฟ้า, Q บนสายตัวนำที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า, V และสัมประสิทธิ์ของ Maxwell potential coefficient, P จะหาได้จาก [3]

$$[Q] = [P]^{-1} [V] \tag{1}$$

**หาสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ )**

ค่าสนามไฟฟ้า,  $\vec{E}$  ของสายตัวนำไฟฟ้าใดๆที่เกิดจากประจุไฟฟ้า, Q ณ จุดใดๆ ( $x_N, y_N$ ) บนพื้นดินภายใต้สิ่งแวดล้อมอากาศที่มีค่าเพอร์มิททิวิตีของอากาศ,  $\epsilon$  เท่ากับ  $8.854 \times 10^{-12} F/m$  คือ

$$\tilde{E}_{x,n} = \frac{(q_n + jq_n)(x_N - x_e)}{2\pi\epsilon[(x_e - x_N)^2 + (y_e - y_N)^2]} - \frac{(q_n + jq_n)(x_N - x_e)}{2\pi\epsilon[(x_e - x_N)^2 + (y_e + y_N)^2]} \tag{2}$$

$$\tilde{E}_{y,n} = \frac{(q_n + jq_n)(y_N - y_e)}{2\pi\epsilon[(x_e - x_N)^2 + (y_e - y_N)^2]} - \frac{(q_n + jq_n)(y_N - y_e)}{2\pi\epsilon[(x_e - x_N)^2 + (y_e + y_N)^2]} \tag{3}$$

เมื่อ n = จำนวนสายตัวนำไฟฟ้า: n = 1, 2, 3, ...

และผลรวมของสนามไฟฟ้า,  $\vec{E}$  ตามแนวแกน x และ y คือ

$$\vec{E}_x = \vec{E}_{x,1} + \vec{E}_{x,2} + \vec{E}_{x,3} + \dots \tag{4}$$

$$\vec{E}_y = \vec{E}_{y,1} + \vec{E}_{y,2} + \vec{E}_{y,3} + \dots \tag{5}$$

หลังจากขั้นตอนการคำนวณดังกล่าว โปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW) Version 3.0 [1] เพื่อใช้คำนวณ และวิเคราะห์หาค่าของสนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ บนพื้นดินได้ วิธีแนวคิดแบบนี้จำเป็นที่ต้องใส่รายละเอียดต่างๆให้ครบ ตามที่โปรแกรมได้กำหนด ซึ่งจะพบว่าต้องใส่รายละเอียดในโปรแกรมก่อนข้างบนจะทำให้แต่ละครั้งต้องใช้เวลาในการคำนวณไฟฟ้าของสายส่งแรงสูงค่อนข้างนาน

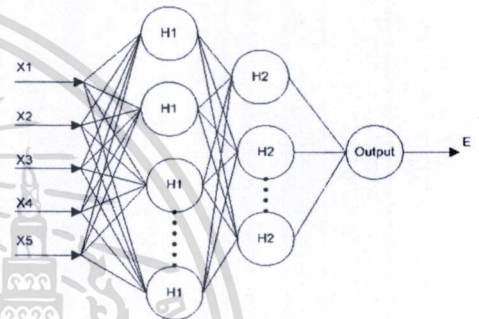
**2.2 โครงข่ายประสาทเทียม**

**2.2.1 โครงข่ายประสาทเทียมและการใช้งาน**

โครงข่ายประสาทเทียมชนิดที่มีการแพร่ค่าย้อนกลับ จะประกอบไปด้วยปมประสาทที่เรียงกันเป็นชั้นๆ โดยปมประสาทในแต่ละชั้นจะเชื่อมต่อกับปมประสาทแต่ละตัวในชั้นก่อนหน้า และในชั้นถัดไป ด้วยตัวเชื่อมที่มีค่าที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ ซึ่งเรียกว่าค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) และจะไม่มีการเชื่อมต่อกันระหว่างปมประสาทในชั้นเดียวกัน ชั้นของปมประสาทดังกล่าวจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือชั้นข้อมูลด้านเข้า (input layer) มีจำนวน 1 ชั้นและมีจำนวนปมประสาทเท่ากับจำนวนอินพุตของโครงข่าย, ชั้นซ่อน(hidden layer) มีอย่างน้อย 1 ชั้น จำนวนปมประสาทในชั้นนี้ขึ้นอยู่กับกรออกแบบโครงข่าย และประเภทสุดท้ายคือชั้นข้อมูลด้าน

ออก (output layer) มีจำนวน 1 ชั้นและมีจำนวนปมประสาทเท่ากับจำนวนเอาต์พุตของโครงข่าย และในแต่ละชั้นจะมีค่าไบแอส (bias) เชื่อมต่อกับ

โครงข่ายประสาทเทียมของสนามไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง จะมี 2 ชั้นซ่อน สำหรับโครงสร้างแบบ SS\_TG1, SD\_TG1 มี x1,x2,...,x4 เป็นอินพุต และส่วนโครงสร้างแบบ DS\_TG1, DD\_TG1 มี x1,x2,...,x5 เป็นอินพุต ทั้งสองโครงข่ายจะมี E เป็นเอาต์พุต ซึ่งเป็นค่าสนามไฟฟ้าสำหรับสายส่งแรงสูง



รูปที่ 2 ตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียมของสนามไฟฟ้าสำหรับโครงสร้างแบบ DS\_TG1, DD\_TG1

ในการศึกษานี้จะใช้ Neural Network Toolbox ของโปรแกรม Matlab ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วย Levenberg-Maquardt algorithm โดยมีการใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นซ่อน (H1,H2) เป็นฟังก์ชันลอจิสติก (log-sigmoid transfer function) ซึ่งแสดงในสมการที่ 6 ในชั้นข้อมูลด้านออกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน linear แสดงในสมการที่ 7

$$a(n) = \frac{1}{1 + e^{-kn}} \tag{6}$$

$$a(n) = n \tag{7}$$

โดยที่กำหนด k = 1

**2.2.2 การเลือกตัวแปร, ข้อมูลฝึกสอน และข้อมูลทดสอบ**

พิจารณาโครงสร้างแบบ SS\_TG1, SD\_TG1 ตัวแปรที่มีทั้งหมด 5 ตัว เป็น อินพุต 4 และ เอาต์พุต 1 โดยอินพุต 4 ตัว ประกอบด้วยจำนวนตัวนำต่อเฟส, ระยะความสูงของสายส่งจากพื้นดิน, ขนาดตัวนำไฟฟ้า, ตำแหน่ง Right of way แทนด้วย x1-x4 ตามลำดับ และ โครงสร้างแบบ DS\_TG1, DD\_TG1 ตัวแปรทั้งหมด 6 ตัว เป็น อินพุต 5 และเอาต์พุต 1 โดยอินพุต 5 ตัว ประกอบด้วยจำนวนตัวนำต่อเฟส, รูปแบบการจัดเรียงลำดับเฟส 6 ประเภท, ระยะความสูงของสายส่งจากพื้นดิน, ขนาดตัวนำไฟฟ้า, ตำแหน่ง

Right of way แทนด้วย  $x_1$ - $x_5$  ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองจะมี  $E$  เป็นเอาท์พุท ค่าของ  $x_1$ - $x_4$  และ  $x_1$ - $x_5$  จะได้จากการสุ่มเลือกด้วยคำสั่ง SOBOLO[5] ซึ่งมีกระบวนการของข้อมูลที่สุ่มพร้อม และนำค่าที่ได้มาแปลงให้สอดคล้องกับสภาวะของระบบที่ศึกษาคงในตัวอย่างตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างวิธีการแปลงค่าที่สุ่มได้เป็นตัวแปรฝึกสอน สำหรับโครงสร้างเสาแบบ DS\_TG1, DD\_TG1

ตัวแปรฝึกสอน	ค่าที่สุ่มได้	วิธีการแปลง
$x_1$	sobol1	เมื่อ $0 < \text{sobol1} \leq 1/2, x_1 = 1$
		$1/2 < \text{sobol1} \leq 1, x_1 = 2$
$x_2$	sobol2	เมื่อ $0 < \text{sobol2} \leq 1/6, x_2 = \text{ABC}$
		$1/6 < \text{sobol2} \leq 2/6, x_2 = \text{ACB}$
		$2/6 < \text{sobol2} \leq 3/6, x_2 = \text{BAC}$
		$3/6 < \text{sobol2} \leq 4/6, x_2 = \text{BCA}$
		$4/6 < \text{sobol2} \leq 5/6, x_2 = \text{CAB}$
		$5/6 < \text{sobol2} \leq 1, x_2 = \text{CBA}$
$x_3$	sobol3	เมื่อ $0 < \text{sobol3} \leq 1/4, x_3 = 9 \text{ m.}$
		$1/4 < \text{sobol3} \leq 2/4, x_3 = 10.5 \text{ m.}$
		$2/4 < \text{sobol3} \leq 3/4, x_3 = 12 \text{ m.}$
$x_4$	sobol4	เมื่อ $0 < \text{sobol4} \leq 1/3, x_4 = 240 \text{ mm}^2$
		$2/3 < \text{sobol4} \leq 1, x_4 = 400 \text{ mm}^2$
$x_5$	sobol5	เมื่อ $0 < \text{sobol5} \leq 1/11, x_5 = -25 \text{ m.}$
		$1/11 < \text{sobol5} \leq 2/11, x_5 = -20 \text{ m.}$
		$2/11 < \text{sobol5} \leq 3/11, x_5 = -15 \text{ m.}$
		$3/11 < \text{sobol5} \leq 4/11, x_5 = -10 \text{ m.}$
		$4/11 < \text{sobol5} \leq 5/11, x_5 = -5 \text{ m.}$
		$5/11 < \text{sobol5} \leq 6/11, x_5 = 0 \text{ m.}$
		$6/11 < \text{sobol5} \leq 7/11, x_5 = 5 \text{ m.}$
		$7/11 < \text{sobol5} \leq 8/11, x_5 = 10 \text{ m.}$
		$8/11 < \text{sobol5} \leq 9/11, x_5 = 15 \text{ m.}$
		$9/11 < \text{sobol5} \leq 10/11, x_5 = 20 \text{ m.}$
$10/11 < \text{sobol5} \leq 1, x_5 = 25 \text{ m.}$		

ในการฝึกสอนจะใช้ข้อมูลฝึกสอน (training patterns) จำนวน 100, 150 และ 200 ชุด และใช้ข้อมูลทดสอบ (test patterns) 20 ชุด ที่ไม่อยู่ในชุดข้อมูลฝึกสอน สำหรับโครงสร้างเสาแบบ SS\_TG1, SD\_TG1 และ ข้อมูลฝึกสอน (training patterns) จำนวน 380, 480 และ 580 ชุด และใช้ข้อมูลทดสอบ (test patterns) 40 ชุดสำหรับ โครงสร้างเสาแบบ DS\_TG1, DD\_TG1 และหลังจากนั้นนำข้อมูลทดสอบอีกชุดหนึ่ง ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่อยู่ระหว่างค่าต่างๆของชุดข้อมูลฝึกสอน จำนวน 20 ชุด ที่เรียกว่า Interpolation [5] มาทดสอบ เช่น ความสูงของสายส่งที่ 10 m., ขนาดคาน้ำไฟที่ 350 mm<sup>2</sup> และ ตำแหน่ง Right of way ที่ 1 m. มาทดสอบทั้งสองโครงสร้างเสาเพื่อหา

ประสิทธิภาพโครงข่ายประสาทเทียมว่ายังคงสามารถหาค่าตอบได้หรือไม่ โดยข้อมูลที่ทั้งหมดจะถูกจัดระเบียบข้อมูล (normalization) ให้มีค่าเฉลี่ย (mean) เท่ากับ 0 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) เท่ากับ 1 ก่อนที่จะนำมาฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม

2.3 ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม

การทดสอบประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมนั้นจะวัดประสิทธิภาพโดยใช้ ค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean absolute percentage error, mape) ของข้อมูลทดสอบเป็นเกณฑ์ หาได้จาก

$$\text{mape} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \left| \frac{E_{ANN} - E_{TLW}}{E_{TLW}} \right| \times 100\% \quad (8)$$

โดยที่  $E_{ANN}$  คือ  $E$  ที่เป็นค่าตอบของโครงข่ายประสาทเทียม  $E_{TLW}$  คือ  $E$  ที่เป็นค่าตอบของ TLW  $n$  คือ จำนวนข้อมูลทดสอบ

ในการศึกษาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพโครงข่ายประสาทเทียม ที่ผ่านการฝึกสอนด้วยข้อมูลฝึกสอนค่าต่างกัน โดยทุกเงื่อนไขจะเลือกค่าเริ่มต้น weight, bias โดยการสุ่มเลือก (rand) และเริ่มต้นทำการฝึกสอนตั้งแต่โครงข่ายที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุดคือ จำนวนปมประสาทในชั้นซ่อนที่ 1 และที่ 2 เท่ากับ 2-1 ไปจนถึง  $10^9$  สำหรับโครงสร้างเสาแบบ SS\_TG1, SD\_TG1 และตั้งแต่ 3-1 จนถึง 14-12 สำหรับโครงสร้างเสาแบบ DS\_TG1, DD\_TG1 โดยแต่ละโครงสร้างจะทำการฝึกสอน 20 รอบ การฝึกสอนหนึ่งรอบจะทำการปรับ weight, bias 1,000 ครั้ง (1,000 iteration) เพื่อหาประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของการฝึกสอน

3. ผลการทดสอบ

โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก หน่วยประมวลผลกลาง เซลลอน i.86 GHz หน่วยความจำ 1 GB จากนั้นนำโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอน (ชุดที่มีค่า mape ต่ำที่สุด) ในเงื่อนไขต่างๆมาทดสอบด้วยข้อมูลชุดเดียวกันจะได้ผลการทดสอบในตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 สำหรับโครงสร้างเสาแบบ SS\_TG1, SD\_TG1

จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน	เวลาที่ใช้ฝึกสอน (นาที)	จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1-2	ผลทดสอบของชุดข้อมูลทดสอบ	ผลการทดสอบของชุด Interpolation
			mape (%)	mape (%)
100	3.7498	6-5	0.9052	5.0223
150	5.7828	8-7	0.6572	2.9005
200	10.9063	9-8	0.4624	2.0186

ตารางที่ 3 สำหรับ โครงสร้างเสาแบบ DS\_TG1, DD\_TG1

จำนวน ชุด ข้อมูล ฝึก สอน	เวลาที่ ใช้ ฝึกสอน (นาที)	จำนวน นิรนาม ในชั้นข้อ ที่ 1 - 2	ผลทดสอบของ	ผลการทดสอบของ
			ชุดข้อมูลทดสอบ mape (%)	ชุด Interpolation mape (%)
380	31.5185	12-10	4.6193	9.7675
480	49.1607	13-11	3.4713	4.5065
580	62.4776	14-12	1.0660	4.2696

จากผลของการฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับ โครงสร้าง  
เสาแบบ SS\_TG1, SD\_TG1 จะพบว่าข้อมูลฝึกสอน 200 ชุด ข้อมูลทดสอบ  
20 ชุด และ ข้อมูล Interpolation 20 ชุด ในตารางที่ 2 เป็นผลที่ดีที่สุด และ  
สำหรับ โครงสร้างเสาแบบ DS\_TG1, DD\_TG1 ด้วยข้อมูลฝึกสอน 580 ชุด  
ข้อมูลทดสอบ 40 ชุด และ ข้อมูล Interpolation 20 ชุด ในตารางที่ 3 เป็นผลที่  
ดีที่สุด

ตารางที่ 4 ตัวอย่างผลเปรียบเทียบค่า  $E_{TLW}$  กับค่า  $E_{ANN}$  ชุด Interpolation  
สำหรับ โครงสร้างเสาแบบ DS\_TG1, DD\_TG1 จากจำนวนชุด  
ข้อมูลฝึกสอน 580 ชุด

ชุดที่	$E_{TLW}$ ( $\frac{Q-V}{Am}$ )	$E_{ANN}$ ( $\frac{Q-V}{Am}$ )	ape* (%)	ชุดที่	$E_{TLW}$ ( $\frac{Q-V}{Am}$ )	$E_{ANN}$ ( $\frac{Q-V}{Am}$ )	ape* (%)
1.	1.7550	1.7676	0.7174	11.	0.9120	0.9376	2.8092
2.	0.1580	0.1586	0.3591	12.	0.0420	0.0409	2.5963
3.	0.1440	0.1293	10.1757	13.	0.0700	0.0675	3.5778
4.	0.5460	0.5325	2.4719	14.	0.4090	0.4457	8.9786
5.	0.1280	0.1270	0.7773	15.	0.3850	0.3943	2.4246
6.	0.2460	0.2440	0.8151	16.	0.1120	0.1126	0.5062
7.	0.3990	0.4073	2.0882	17.	0.0280	0.0356	27.0653
8.	0.9020	0.8625	4.3740	18.	1.4350	1.4229	0.8442
9.	0.0570	0.0593	4.0131	19.	0.5960	0.6127	2.7958
10.	0.1330	0.1291	2.9489	20.	0.1210	0.1149	5.0528

\*ape = absolute percentage error

4. บทสรุป

การหาต้นทุนไฟฟ้า ( $E$ ) สำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยมีการ  
เปลี่ยนแปลงสถานะตั้งที่กล่าวไว้ข้างต้น จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า

1. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว สามารถคำนวณ  
ค่า  $E$  ของโครงสร้างเสาแบบ SS\_TG1, SD\_TG1, DS\_TG1 และ DD\_TG1 ได้  
ในสภาวะต่างๆที่ถูกสมมุติให้เกิดขึ้นในระบบ โดยได้ประสิทธิภาพในการหา  
ค่า  $E$  ที่ดีที่สุด สำหรับ SS\_TG1, SD\_TG1 มีค่า mape ของชุดทดสอบ อยู่ที่  
0.4624 % และชุดข้อมูล Interpolation อยู่ที่ 2.0186 % ในส่วนของค่า  $E$  ที่ดี  
ที่สุด สำหรับ DS\_TG1, DD\_TG1 มีค่า mape ของชุดทดสอบอยู่ที่ 1.0660 %  
และชุดข้อมูล Interpolation อยู่ที่ 4.2696 %

2. โครงสร้างเสาแบบ SS\_TG1, SD\_TG1 จะใช้ข้อมูลฝึกสอนและมี  
ค่า mape น้อยกว่าโครงสร้างเสาแบบ DS\_TG1, DD\_TG1 เนื่องจากว่า  
โครงสร้างเสาแบบหลังนี้มีความซับซ้อนมากกว่า

3. จากการทดลองทั้งสองโครงสร้าง พบว่าชุด Interpolation จะมีค่า  
mape มากกว่าชุดทดสอบ เนื่องจากชุด Interpolation เป็นชุดข้อมูลที่เป็น  
โครงข่ายประสาทเทียมไม่เคยเห็นระหว่างการเรียนรู้

4. ในการสุ่มค่าของตัวแปรที่มีการกระจายข้อมูลสม่ำเสมอด้วย  
คำสั่ง SOBOLE จะทำให้ได้สภาวะที่ครอบคลุมจุดทำงานของระบบไฟฟ้า  
ภายในขอบเขตที่ศึกษา เพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้เพิ่มมากขึ้น  
ซึ่งเป็นผลให้ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนสูงขึ้น

5. เมื่อจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอนมากขึ้นจะทำให้โครงข่ายประสาท  
เทียมสามารถเรียนรู้จุดทำงานของระบบไฟฟ้าได้ครอบคลุมมากขึ้นเป็นผล  
ให้ค่าคอบที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

6. เวลาที่ใช้ในการหาค่าคอบจากโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการ  
ฝึกสอนแล้วนั้นจะรวดเร็วมาก (น้อยกว่า 1 msec) เมื่อเปรียบเทียบกับ  
โปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW)

เอกสารอ้างอิง

- [1] รศ.ดร. สมชาติ จีรวិภากร, โครงข่ายการฝึกอบรมผู้เชี่ยวชาญทางด้าน  
BMC ชุดคู่มือบรรยาย การปฏิบัติ D-2 Transmission Line Work  
Station (TLW), กทม.ภาพันซ์ 2007.
- [2] กองวิศวกรรมไฟฟ้าและเครื่องกล การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2532.  
คู่มือการก่อสร้างสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 115 กิโลโวลต์ เล่มที่ 1-4
- [3] Electric Power Research Institute, Transmission Line Reference  
Book 345 kV and Above: second Edition, Revised, California  
1987
- [4] Demuth, H. and Beale, M., Neural Network Toolbox User's  
Guide, The Math Works, Inc., March 2001.
- [5] Press, William H., jr. auth. Numerical recipes in C++ : the art of  
scientific computing, Cambridge : Cambridge University  
Press, 2002



ศุภกฤต ทาทอง ปริญญาโท  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับระบบการประมาณ  
ตามไฟฟ้าของสายส่งแรงสูง โดยใช้โครงข่าย  
ประสาทเทียม



สมชาติ จีรวิภากร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตร  
Ph.D. DIC จาก Imperial College มหาวิทยาลัย  
ลอนดอน ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง รองศาสตราจารย์  
ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล. ระดับ 8 มี  
ผลงานวิจัยเกี่ยวกับ Applications of neural network  
in power engineering



ที่ ศธ 0525.1(2)/พิเศษ, ๒๖๖

กองบริการการศึกษา สำนักงานอธิการบดี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
1518 ถ.พิบูลสงคราม บางซื่อ กทม. 10800

๒๒ กันยายน 2552

เรื่อง คอบรับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรียน นายสุภกฤต ทาทอง

ตามที่ท่านได้เสนอขอความ เรื่อง การประมาณสนามไฟฟ้าของสายส่งแรงสูงโดยใช้โครงข่ายประสาท  
เทียม เพื่อตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บรรณาธิการวารสารวิชาการได้พิจารณา  
ยอมรับบทความดังกล่าวและให้จัดพิมพ์ลงในวารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 20 ฉบับที่ 3 เดือน  
กันยายน - ธันวาคม 2553

จึงเรียนมาเพื่อ โปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์)

ผู้ช่วยบรรณาธิการวารสารวิชาการ

งานเอกสารและการพิมพ์

โทร. 0 2913-2500 - 24 ต่อ 1626,1627

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 0 2913-5814 ได้รับความช่วยเหลือจากสำนักงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การประมาณสนามไฟฟ้าของสายส่งแรงสูง โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

### Electric Field Estimation of High Voltage Transmission Line Using Artificial Neural Networks

ศุภกฤต ทาทอง\* และ สมชาติ จิรวิภากร\*\*

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประมาณสนามไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดมาจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับเหนือพื้นดินด้วยวิธีใหม่ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมชนิดที่มีการแพร่ค่าย้อนกลับ (Feed-Forward neural networks with back-propagation learning rule) ในการศึกษาจะเลือกใช้ Levenberg-Marquardt algorithm ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมนั้น จะได้จากโปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW) Version 3.0 [8] ยกตัวอย่างเช่น จำนวนตัวนำต่อเฟส, รูปแบบการจัดเรียงลำดับเฟส และระยะห่างจากจุดกึ่งกลางสายส่ง จำลองตามมาตรฐานสายส่งไฟฟ้า 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ในการศึกษาจะใช้ข้อมูลที่ไม่อยู่ในชุดข้อมูลฝึกสอนเป็นชุดข้อมูลทดสอบ ผลการทดสอบพบว่าโครงข่ายประสาทเทียมสามารถประมาณค่าสนามไฟฟ้าของสายส่งแรงสูงได้ ซึ่งคำตอบที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่ดีและมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : สนามไฟฟ้า, โครงข่ายประสาทเทียม, สายส่งไฟฟ้า

#### Abstract

This paper presents a novel method to estimate of the electric field of transmission line at ground level based on Artificial Neural Networks (ANN). A Feed-Forward (FF) ANN with back-propagation learning rule method was addressed which uses the Levenberg-Marquardt learning algorithm.

Input and output data have been simulated by Transmission Line Workstation (TLW) Version 3.0 [8] such as: number of phase conductors, phase sequences and distance from transmission line center etc. according to EGAT transmission lines of 500 kV. The study has been tested on the test patterns which are not included in the training patterns. The results show that ANN could be used to estimate the Electric Field ( $\vec{E}$ ) effectively.

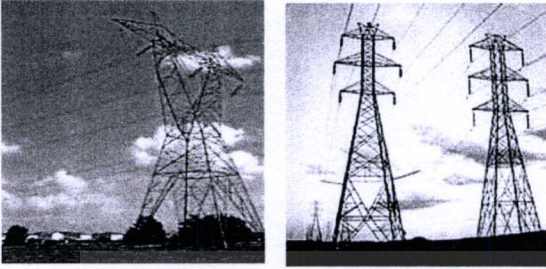
Keywords: Electric Field, Neural Network, Transmission Line

#### 1. คำนำ

สายส่งไฟฟ้าแรงสูงเป็นแหล่งกำเนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายอยู่โดยรอบบริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูงและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่างๆที่อยู่ใกล้กับสายส่งแรงสูง ซึ่งความรุนแรงของผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่เกิดขึ้น นับวันจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จากสาเหตุดังกล่าวได้สร้างปัญหาให้กับหน่วยงานและวิศวกรที่รับผิดชอบต่อการออกแบบและการก่อสร้างสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ในการศึกษาเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำการศึกษาระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเท่านั้น เนื่องจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะไม่พบปัญหาเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงนั้น เราจะพบว่าอิทธิพลของสนามไฟฟ้า มีความสำคัญมากกว่า สนามแม่เหล็ก [1],[7] ทำให้ต้องมีการศึกษาวิจัยและทำความเข้าใจเกี่ยวกับปัญหาสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

\* นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

\*\* รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รูปที่ 1 ลักษณะของสายส่งไฟฟ้า 500 kV การไฟฟ้าฝ่ายผลิต

และในช่วงเวลาเดียวกันได้มีการนำโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ไปประยุกต์ในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ดังนั้นจึงนำแนวความคิดในการประมาณสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และความแม่นยำในการออกแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยคำนึงถึงผลกระทบของความเข้มสนามไฟฟ้า

## 2. ทฤษฎี และหลักการ

### 2.1 สนามไฟฟ้า และการคำนวณสนามไฟฟ้า

ที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

สนามไฟฟ้าเกิดจากประจุไฟฟ้าเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $\vec{E}$  และมีหน่วยเป็นแรงดันต่อระยะทาง ( $kV/m$ ) ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าแปรผันโดยตรงกับค่าแรงดันไฟฟ้าของสายส่งและแปรผกผันกับระยะห่างจากสายส่งไฟฟ้า ในการคำนวณได้พิจารณาสายส่งไฟฟ้า 500 kV วงจรเดียว และ วงจรคู่ ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และพิจารณาให้สายตัวนำไฟฟ้าเปรียบเสมือนกับวางอยู่บนเหนือพื้นดินโดยปราศจากเสาโครงสร้างและผลจากความต้านทานของดิน [3] ซึ่งเมื่อพิจารณาจากภาคตัดขวางแล้วจำนวนของสายตัวนำไฟฟ้าจะประกอบด้วยสายตัวนำในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน สำหรับการคำนวณจะประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

#### หาประจุไฟฟ้า (Q)

จำนวนประจุไฟฟ้า, Q บนสายตัวนำที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า, V และสัมประสิทธิ์ของ Maxwell potential coefficient, P จะหาได้จาก [6]

$$[Q]=[P]^{-1}[V] \quad (1)$$

#### หาสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ )

ค่าสนามไฟฟ้า,  $\vec{E}$  ของสายตัวนำไฟฟ้าใดๆที่เกิดจากประจุไฟฟ้า, Q ณ จุดใดๆ ( $x_N, y_N$ ) บนพื้นดินภายใต้ตัวกลางอากาศที่มีค่า Dielectric constant,  $\epsilon$  เท่ากับ  $8.854 \times 10^{-12} F/m$  คือ

$$\vec{E}_{x,n} = \frac{(q_n + jq_n)(x_n - x_n)}{2\pi\epsilon[(x_n - x_n)^2 + (y_n - y_n)^2]} - \frac{(q_n + jq_n)(x_n - x_n)}{2\pi\epsilon[(x_n - x_n)^2 + (y_n + y_n)^2]} \quad (2)$$

$$\vec{E}_{y,n} = \frac{(q_n + jq_n)(y_n - y_n)}{2\pi\epsilon[(x_n - x_n)^2 + (y_n - y_n)^2]} - \frac{(q_n + jq_n)(y_n - y_n)}{2\pi\epsilon[(x_n - x_n)^2 + (y_n + y_n)^2]} \quad (3)$$

เมื่อ n = จำนวนสายตัวนำไฟฟ้า ; n = 1,2,3....

และผลรวมของสนามไฟฟ้า,  $\vec{E}$  ตามแนวแกน x และ y คือ

$$\vec{E}_x = \vec{E}_{x,1} + \vec{E}_{x,2} + \vec{E}_{x,3} + \dots \quad (4)$$

$$\vec{E}_y = \vec{E}_{y,1} + \vec{E}_{y,2} + \vec{E}_{y,3} + \dots \quad (5)$$

และจากขั้นตอนการคำนวณดังกล่าว โปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW) Version 3.0 [8] เพื่อใช้คำนวณ และวิเคราะห์หาค่าของสนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ บนพื้นดินได้ วิธีแนวคิดแบบนี้จำเป็นต้องใส่รายละเอียดต่างๆให้ครบ ตามที่โปรแกรมได้กำหนด ซึ่งจะพบว่าต้องใส่รายละเอียดในโปรแกรมจำนวนมาก ทำให้แต่ละครั้งต้องใช้เวลาในการหาสนามไฟฟ้าของสายส่งแรงสูงค่อนข้างนาน

### 2.2 โครงข่ายประสาทเทียม

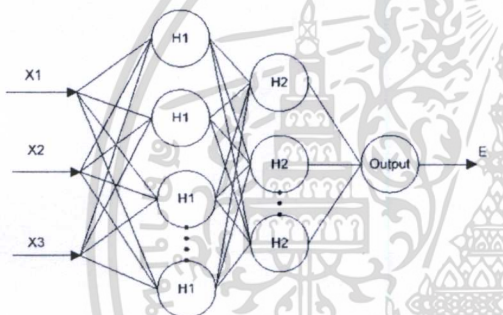
#### 2.2.1 โครงข่ายประสาทเทียมและการใช้งาน

โครงข่ายประสาทเทียมชนิดที่มีการแพร่ค่าย้อนกลับ จะประกอบไปด้วยปมประสาทที่เรียงกันเป็นชั้นๆ โดยปมประสาทในแต่ละชั้นจะเชื่อมต่อกับปมประสาทแต่ละตัวในชั้นก่อนหน้านี และในชั้นถัดไป ด้วยตัวเชื่อมที่มีค่าที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ ซึ่งเรียกว่าค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) และจะไม่มีการเชื่อมต่อกันระหว่างปมประสาทในชั้นเดียวกัน ชั้นของปมประสาทดังกล่าวจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือชั้นข้อมูลด้านเข้า (input layer) มีจำนวน 1 ชั้นและมีจำนวนปมประสาทเท่ากับจำนวนอินพุตของโครงข่าย, ชั้นซ่อน(hidden layer) มีอย่างน้อย 1 ชั้น จำนวนปมประสาทในชั้นนี้ขึ้นอยู่กับ

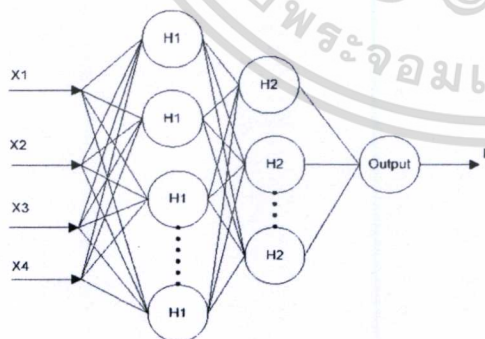
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับการออกแบบโครงข่าย และประเภทสุดท้ายคือชั้นข้อมูลด้านออก (output layer) มีจำนวน 1 ชั้นและมีจำนวนปมประสาทเท่ากับจำนวนเอาต์พุตของโครงข่าย และในแต่ละชั้นจะมีค่าไบแอส (bias) เชื่อมต่ออยู่

โครงข่ายประสาทเทียมของสนามไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง จะมี 2 ชั้นซ่อน รูปที่ 2 มี  $x_1, x_2, x_3$  เป็นอินพุตของสายส่งไฟฟ้า วงจรเดี่ยว และรูปที่ 3 มี  $x_1, x_2, \dots, x_4$  เป็นอินพุตของสายส่งไฟฟ้า วงจรคู่ ทั้งสองโครงข่ายจะมี  $E$  เป็นเอาต์พุต ซึ่งเป็นค่าสนามไฟฟ้าสำหรับสายส่งแรงสูง



รูปที่ 2 โครงข่ายประสาทเทียมของสนามไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้า วงจรเดี่ยว



รูปที่ 3 โครงข่ายประสาทเทียมของสนามไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้า วงจรคู่

ในการศึกษาจะใช้ Neural Network Toolbox ของโปรแกรม Matlab [2] ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วย Levenberg-Maquardt algorithm (trainlm) โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นซ่อน (H1,H2) เป็นลือกซิกมอยด์ (log-sigmoid transfer function) ซึ่งแสดงในสมการที่ 6 ในชั้นข้อมูลด้านออกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน Linear แสดงในสมการที่ 7

$$a(n) = \frac{1}{1 + e^{-kn}} \quad (6)$$

$$a(n) = n \quad (7)$$

โดยที่กำหนด  $k = 1$

## 2.2.2 การเลือกตัวแปร, ข้อมูลฝึกสอน และข้อมูลทดสอบ

พิจารณาสายส่งไฟฟ้า วงจรเดี่ยว ตัวแปรทั้งหมด 4 ตัว เป็น อินพุต 3 และเอาต์พุต 1 โดยอินพุต 3 ตัว ประกอบด้วย ระยะเวลาสูงของสายส่งจากพื้นดิน, ขนาดตัวนำไฟฟ้า, ตำแหน่ง Right OF Way (R.O.W.) แทนด้วย  $x_1-x_3$  ตามลำดับ และ สายส่งไฟฟ้า วงจรคู่ ตัวแปรทั้งหมด 5 ตัว เป็น อินพุต 4 และเอาต์พุต 1 โดยอินพุต 4 ตัว ประกอบด้วย รูปแบบการจัดเรียงลำดับเฟส 6 ประเภท, ระยะเวลาสูงของสายส่งจากพื้นดิน, ขนาดตัวนำไฟฟ้า, ตำแหน่ง Right OF Way (R.O.W.) แทนด้วย  $x_1-x_4$  ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองจะมี  $E$  เป็นเอาต์พุต ค่าของ  $x_1$  ถึง  $x_4$  จะได้จากการสุ่มเลือกด้วยคำสั่ง SOBOL ซึ่งมีกระจายของข้อมูลที่สม่ำเสมอ[5] และนำค่าที่ได้มาแปลงให้สอดคล้องกับสภาวะของระบบที่ศึกษาดังในตัวอย่างตารางที่ 1

ในการฝึกสอนจะใช้ข้อมูลฝึกสอน (training patterns) จำนวน 60, 90 และ 120 ชุด และใช้ข้อมูลทดสอบ (test patterns) 10 ชุด ที่ไม่อยู่ในชุดข้อมูลฝึกสอน สำหรับสายส่งไฟฟ้าวงจรเดี่ยว และ ข้อมูลฝึกสอน (training patterns) จำนวน 290, 390 และ 490 ชุด และใช้ข้อมูลทดสอบ (test patterns) 40 ชุดสำหรับสายส่งไฟฟ้าวงจรคู่

ตารางที่ 1 ตัวอย่างวิธีการแปลงค่าที่สุ่มได้เป็นตัวแปรฝึกสอน สำหรับสายส่งไฟฟ้า วงจรคู่

ตัวแปรฝึกสอน	ค่าที่สุ่มได้	วิธีการแปลง
x1	sobol1	เมื่อ $0 < \text{sobol1} \leq 1/6$ , x1= ABC
		$1/6 < \text{sobol1} \leq 2/6$ , x1= ACB
		$2/6 < \text{sobol1} \leq 3/6$ , x1= BAC
		$3/6 < \text{sobol1} \leq 4/6$ , x1= BCA
		$4/6 < \text{sobol1} \leq 5/6$ , x1= CAB
		$5/6 < \text{sobol1} \leq 1$ , x1= CBA
x2	sobol2	เมื่อ $0 < \text{sobol2} \leq 1/4$ , x2 = 13 m.
		$1/4 < \text{sobol2} \leq 2/4$ , x2 = 18 m.
		$2/4 < \text{sobol2} \leq 3/4$ , x2 = 23 m.
		$3/4 < \text{sobol2} \leq 1$ , x2 = 28 m.
x3	sobol3	เมื่อ $0 < \text{sobol3} \leq 1/2$ , x3 = 795 MCM
		$1/2 < \text{sobol3} \leq 1$ , x3 = 1272 MCM
x4	sobol4	เมื่อ $0 < \text{sobol4} \leq 1/13$ , x4 = -30 m.
		$1/13 < \text{sobol4} \leq 2/13$ , x4 = -25 m.
		$2/13 < \text{sobol4} \leq 3/13$ , x4 = -20 m.
		$3/13 < \text{sobol4} \leq 4/13$ , x4 = -15 m.
		$4/13 < \text{sobol4} \leq 5/13$ , x4 = -10 m.
		$5/13 < \text{sobol4} \leq 6/13$ , x4 = -5 m.
		$6/13 < \text{sobol4} \leq 7/13$ , x4 = 0 m.
		$7/13 < \text{sobol4} \leq 8/13$ , x4 = 5 m.
		$8/13 < \text{sobol4} \leq 9/13$ , x4 = 10 m.
		$9/13 < \text{sobol4} \leq 10/13$ , x4 = 15 m.
		$10/13 < \text{sobol4} \leq 11/13$ , x4 = 20 m.
$11/13 < \text{sobol4} \leq 12/13$ , x4 = 25 m.		
		$12/13 < \text{sobol4} \leq 1$ , x4 = 30 m.

หลังจากนั้นนำชุดข้อมูล ซึ่งอยู่ระหว่างค่าต่างๆของชุดข้อมูลฝึกสอน ที่เรียกว่า Interpolation [4] มาทดสอบ เช่น ความสูงของสายส่งที่ 21 m., ขนาดตัวนำไฟฟ้าที่ 900 MCM และ ตำแหน่ง Right of way ที่ -30, -29,...,29, 30 m. มาทดสอบทั้งสองโครงสร้างเสา เพื่อหาประสิทธิภาพโครงข่ายประสาทย่อยว่ายังคงสามารถหาคำตอบได้หรือไม่ โดยข้อมูลทั้งหมดจะถูกจัดระเบียบข้อมูล (normalization) [9] ให้มีค่าเฉลี่ย (mean) เท่ากับ 0 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard derivation) เท่ากับ 1 ก่อนที่จะนำมาฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม

### 2.3 ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม

การทดสอบประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม นั้นจะวัดประสิทธิภาพโดยใช้ ค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error , MAPE) ของข้อมูลทดสอบเป็นเกณฑ์ หาได้จาก

$$MAPE = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \left| \frac{E_{ANN} - E_{TLW}}{E_{TLW}} \right| \times 100\% \quad (8)$$

และ

$$APE = \left| \frac{E_{ANN} - E_{TLW}}{E_{TLW}} \right| \times 100\% \quad (9)$$

โดยที่  $E_{ANN}$  คือ  $E$  ที่เป็นคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียม

$E_{TLW}$  คือ  $E$  ที่เป็นคำตอบของ TLW  
 $n$  คือ จำนวนข้อมูลทดสอบ

ในการศึกษานี้เปรียบเทียบประสิทธิภาพโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนด้วยข้อมูลฝึกสอนต่างกัน โดยทุกเงื่อนไขจะเลือกค่าเริ่มต้น weight ,bias โดยการสุ่มเลือก(rand) และเริ่มต้นทำการฝึกสอนตั้งแต่โครงข่ายที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุดคือ จำนวนปมประสาทในชั้นซ่อนที่ 1 และที่ 2 เท่ากับ 2 - 1 ไปจนถึง 11-10 สำหรับสายส่งไฟฟ้า วงจรเดี่ยว และตั้งแต่ 2-1 จนถึง 16-15 สำหรับสายส่งไฟฟ้า วงจรคู่ โดยแต่ละโครงข่ายจะทำการฝึกสอน 20 รอบ การฝึกสอนหนึ่งรอบจะทำการปรับ weight, bias 1,000 ครั้ง (1,000 iteration) เพื่อหาประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของการฝึกสอน

### 3. ผลการทดลอง

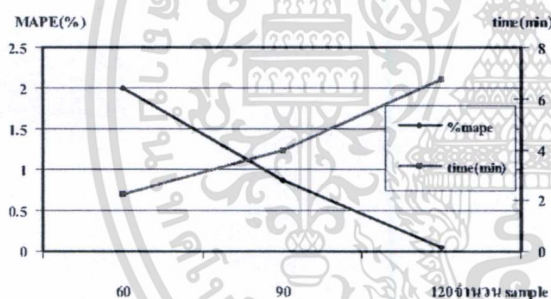
โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก หน่วยประมวลผลกลาง เซเลลอน I.86 GHz หน่วยความจำ 1 GB จากนั้นนำโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอน (ชุดที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า MAPE ต่ำที่สุด) ในเงื่อนไขต่างๆมาทดสอบด้วยข้อมูลชุดเดียวกันจะได้ผลการทดสอบในตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 สำหรับสายส่งไฟฟ้า วงจรเดี่ยว

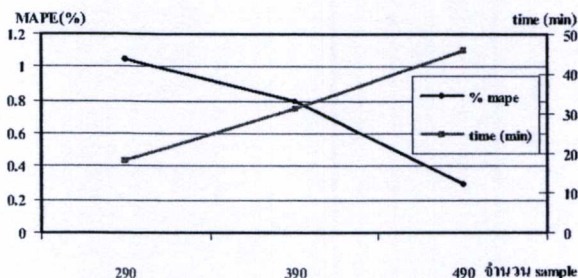
จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน	เวลาที่ใช้ฝึกสอน (นาที)	จำนวนนิรอนในชั้นซ่อนที่ 1-2	ผลทดสอบของชุดข้อมูลทดสอบ		
			MAPE (%)	max APE (%)	min APE (%)
60	2.2495	6-5	2.0042	4.6655	0.4359
90	3.9643	7-6	0.8637	2.2030	0.1160
120	6.7419	9-8	0.0448	0.1642	0.000



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในทุกกรณี (วงจรเดี่ยว)

ตารางที่ 3 สำหรับสายส่งไฟฟ้า วงจรคู่

จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน	เวลาที่ใช้ฝึกสอน (นาที)	จำนวนนิรอนในชั้นซ่อนที่ 1-2	ผลทดสอบของชุดข้อมูลทดสอบ		
			MAPE (%)	max APE (%)	min APE (%)
290	18.155	11-10	1.0464	8.2420	0.0317
390	31.341	12-11	0.8005	4.5124	0.0057
490	45.800	13-12	0.2928	1.5423	0.0234



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในทุกกรณี (วงจรคู่)

โดยปกติแล้วเมื่อจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอนมากขึ้นจะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมสามารถเรียนรู้สภาวะระบบได้มากขึ้นเป็นผลให้คำตอบที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้น จากผลของการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับสายส่งไฟฟ้า วงจรเดี่ยว จะพบว่าข้อมูลฝึกสอน 120 ชุด ข้อมูลทดสอบ 10 ชุด ในตารางที่ 2 เป็นผลที่ดีที่สุด และสำหรับสายส่งไฟฟ้า วงจรคู่ด้วยข้อมูลฝึกสอน 490 ชุด ข้อมูลทดสอบ 40 ชุด ในตารางที่ 3 เป็นผลที่ดีที่สุด สำหรับเวลาในการฝึกสอนนั้นจะแปรตามจำนวนข้อมูลฝึกสอนและความซับซ้อนของจำนวนปมประสาทในชั้นซ่อน ในรูปที่ 4 และ 5

สำหรับตัวอย่างผลเปรียบเทียบ ค่า  $E_{TLW}$  กับค่า  $E_{ANN}$  ชุดข้อมูลทดสอบ 40 ชุด สำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง วงจรคู่ จากจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 490 ชุด ดังแสดงในตารางที่ 4

หลังจากนั้นนำชุดข้อมูลแบบ Interpolation มาทดสอบ เช่น รูปแบบการจัดเรียงลำดับเฟสแบบ ABC, ความสูงของสายส่งที่ 15.5 m., ขนาดตัวนำไฟฟ้าที่ 954 MCM และ ตำแหน่ง R.O.W ที่ -35,-34,...,34, 35 m. สำหรับสายส่งไฟฟ้า วงจรเดี่ยว และ รูปแบบการจัดเรียงลำดับเฟส ABC-CBA, ความสูงของสายส่งที่ 21 m., ขนาดตัวนำไฟฟ้าที่ 900 MCM และ ตำแหน่ง R.O.W. ที่ -30,-29,...,29,30 m. สำหรับสายส่งไฟฟ้า วงจรคู่ ตามเงื่อนไขต่างๆ ในตารางที่ 5 และ แสดงค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของชุดทดสอบแบบ Interpolation ตามเงื่อนไขได้ในรูปที่ 6 และ 7

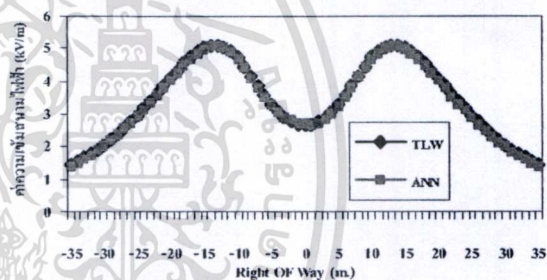
ตารางที่ 4 ตัวอย่างผลเปรียบเทียบค่า  $E_{TLW}$  กับค่า  $E_{ANN}$   
 ชุดข้อมูลทดสอบสำหรับสายส่งไฟฟ้า วงจรคู่  
 จากจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 490 ชุด

ชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	APE* (%)	ชุดที่	$E_{TLW}$ (kV/m)	$E_{ANN}$ (kV/m)	APE* (%)
1.	6.1210	6.1244	0.0562	21.	1.1590	1.1632	0.3582
2.	2.5580	2.5488	0.3580	22.	1.3230	1.3293	0.4798
3.	4.8700	4.8776	0.1565	23.	2.3860	2.3873	0.0543
4.	3.9050	3.8909	0.3615	24.	3.1360	3.1382	0.0706
5.	1.4920	1.4791	0.8652	25.	2.3050	2.3092	0.1833
6.	1.5270	1.5457	1.2252	26.	3.0840	3.0934	0.3040
7.	1.8510	1.8528	0.0962	27.	1.3950	1.3859	0.6490
8.	4.3440	4.3564	0.2865	28.	2.6570	2.6551	0.0723
9.	0.8900	0.8835	0.7348	29.	1.7960	1.7831	0.71993
10.	2.3650	2.3637	0.0551	30.	2.7930	2.7958	0.1004
11.	6.6350	6.6331	0.0294	31.	2.3100	2.3070	0.1314
12.	1.6240	1.6150	0.5570	32.	3.4090	3.4098	0.0234
13.	3.8980	3.8948	0.0830	33.	0.9170	0.9148	0.2449
14.	8.6490	8.6529	0.0445	34.	1.0400	1.0430	0.2883
15.	0.9100	0.9151	0.5571	35.	3.1540	3.1521	0.0596
16.	2.0190	2.0211	0.1059	36.	1.286	1.3058	1.5423
17.	3.4420	3.4455	0.1019	37.	2.1410	2.1403	0.0327
18.	6.7110	6.7019	0.1354	38.	2.3030	2.300	0.1298
19.	1.3770	1.3804	0.2462	39.	1.4540	1.4548	0.0534
20.	0.8390	0.8400	0.1189	40.	4.6330	4.6312	0.0387

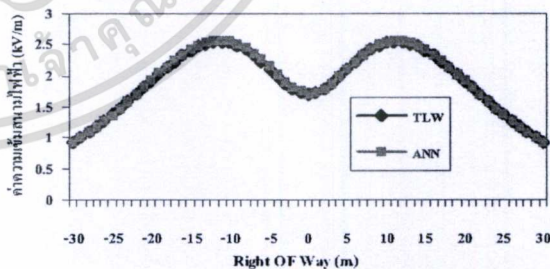
\*APE = Absolute Percentage Error

ตารางที่ 5 เงื่อนไขต่าง ๆ สำหรับการหาค่าตอบของชุด  
 ทดสอบแบบ Interpolation

ชุดที่	แรงดัน (kV)	รูปแบบการ จัด เรียงลำดับ	ระยะ ความสูง (m.)	ต้วนำไฟฟ้า (MCM)
1	500 kV (วงจรเดี่ยว)	ABC	15.5	954
2	500 kV (วงจรคู่)	ABC-CBA	21.0	900



รูปที่ 6 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของชุดทดสอบ  
 แบบ Interpolation ตามเงื่อนไขชุดที่ 1



รูปที่ 7 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของชุดทดสอบ  
 แบบ Interpolation ตามเงื่อนไขชุดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. บทสรุป

การหาค่า  $E$  สนามไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยมีการเปลี่ยนแปลงสถานะดังกล่าวไว้ข้างต้น จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า

1. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วสามารถคำนวณค่า  $E$  ของสายส่งไฟฟ้า วงจรเดี่ยว และวงจรคู่ ได้ ในสภาวะต่างๆที่ถูกระบุให้เกิดขึ้นในระบบ โดยได้ประสิทธิภาพในการหาค่า  $E$  ที่ดีที่สุดสำหรับสายส่งไฟฟ้า วงจรเดี่ยว มีค่า MAPE ของชุดทดสอบ อยู่ที่ 0.0448 % และในส่วนของค่า  $E$  ที่ดีที่สุด สำหรับสายส่งไฟฟ้า วงจรคู่ มีค่า MAPE ของชุดทดสอบอยู่ที่ 0.2928 %

2. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสำหรับ สายส่งไฟฟ้า วงจรเดี่ยว จะใช้ข้อมูลฝึกสอนและ มีค่า MAPE น้อยกว่าสายส่งไฟฟ้า วงจรคู่เนื่องจากว่า สายส่งไฟฟ้าแบบหลังนี้มีความซับซ้อนมากกว่า

3. จากการหาค่าตอบสนองสนามไฟฟ้า ( $E$ ) ของชุดทดสอบแบบ Interpolation ค่าตอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าที่แตกต่างเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรม TLW ดังนั้นโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้ฝึกสอนสามารถให้คำตอบที่มีประสิทธิภาพและแม่นยำในชุดข้อมูล Interpolation

4. ในการสุ่มค่าของตัวแปรที่มีการกระจายข้อมูลสม่ำเสมอด้วย คำสั่ง SOBOLE จะทำให้ได้สภาวะที่ครอบคลุมจุดทำงานของระบบไฟฟ้า ภายในขอบเขตที่ศึกษา เพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนสูงขึ้น

5. เมื่อจำนวนชุดข้อมูลฝึกสอนมากขึ้นจะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมสามารถเรียนรู้จุดทำงานของระบบไฟฟ้าได้ครอบคลุมมากขึ้นเป็นผลให้คำตอบที่ได้มีความถูกต้อง แม่นยำมากขึ้น

6. เวลาที่ใช้ในการหาค่าตอบจากโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วนั้นจะรวดเร็วมาก (น้อยกว่า 1 msec) เมื่อเปรียบเทียบกับ โปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW)

7. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วสามารถประมาณค่าสนามไฟฟ้าของสายส่งแรงสูงได้ ดังนั้นจึงนำไปใช้ในการออกแบบระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงได้

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Electric Power Research Institute. Transmission Line Reference Book 345 kV and Above. second Edition, Revised. California 1987.
- [2] Demuth, H. and Beale, M. Neural Network March 2001.
- [3] พิทักษ์ ปิ่นอนงค์. 2545. การวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อสิ่งแวดล้อมใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงเหนือพื้นดินและกรณีศึกษาการลดผลกระทบที่เกิดขึ้น. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ
- [4] Press, William H., jt. auth. Numerical recipes in C++: the art of scientific computing. Cambridge : Cambridge University Press, 2002.
- [5] George Levy, " An introduction to quasi-random numbers" , Numerical Algorithms Group Ltd , 2003.
- [6] ชำนาญ ห่อเกียรติ. 2549. ระบบไฟฟ้ากำลัง. ครั้งที่ 2. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ
- [7] Luwen Xu, Dr. Yongming Li, Prof. Jihui Yu, Mr Xingzhe Hou, Dr. Changping An "Research on Electric Field of High-Voltage Transmission Line Power Frequency" IEEE 2006 International Conference on Power System Technology, pp.1-4
- [8] รศ.ดร. สมชาติ จิรวិภากร. โครงการฝึกอบรมผู้เชี่ยวชาญทางด้าน EMC ชุดคู่มือบรรยายการปฏิบัติ D-2 Transmission Line Work Station(TLW) กุมภาพันธ์ 2007.
- [9] รศ.ดร. สมชาติ จิรวิภากร. เอกสารคำสอน รายวิชา 01027641 Neural Network Applications, 2007.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นายศุภกฤต ทาทอง เกิดเมื่อวันที่ 13 สิงหาคม พ.ศ.2520 ที่จังหวัดอุบลราชธานี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2543 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2550



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้