

วิธีการทำงานผิดพลาดของ DIFFERENTIAL PROTECTION RELAY
สำหรับหม้อแปลงขนาดใหญ่โดยใช้หลักการของ NEURAL-FUZZY SYSTEMS

REDUCED MALOPERATION OF DIFFERENTIAL PROTECTION RELAY
FOR POWER TRANSFORMER USING NEURAL-FUZZY SYSTEMS

อภิสิทธิ์ เอกชวานนท์
APISIT EKCHEEWANON

วิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์ของภาควิชาวิศวกรรมตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-324-043-8

วิธีลดการทำงานผิดพลาดของ DIFFERENTIAL PROTECTION RELAY
สำหรับหม้อแปลงขนาดใหญ่โดยใช้หลักการของ NEURAL-FUZZY SYSTEMS

REDUCED MALOPERATION OF DIFFERENTIAL PROTECTION RELAY
FOR POWER TRANSFORMER USING NEURAL-FUZZY SYSTEMS

อภิสิทธิ์ เอกชีวานนท์

APISIT EKCHEEWANON

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 44102
วัน, เดือน, ปี..... 28 ต.ค. 2545

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-324-043-8

**REDUCED MALOPERATION OF DIFFERENTIAL PROTECTION RELAY
FOR POWER TRANSFORMER USING NEURAL-FUZZY SYSTEMS**

APISIT EKCHEEWANON

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THEREQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2002

ISBN 974-324-043-8

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์ วิธีลดการทำงานผิดพลาดของ DIFFERENTIAL PROTECTION
RELAY สำหรับหม้อแปลงขนาดใหญ่โดยใช้หลักการของ
NEURAL-FUZZY SYSTEMS

นักศึกษา นายอภิสิทธิ์ เอกชีวานนท์

รหัสนักศึกษา 39061038

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ. 2545

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ. วิทยา ทิพย์สุวรรณพร

บทคัดย่อ

ในโครงสร้างของรีเลย์ป้องกันหม้อแปลงที่ใช้ในปัจจุบันนี้ ส่วนใหญ่จะใช้หลักการของ Percentage Differential Current ในการตัดสินใจปลดวงจร และใช้หลักการ Harmonic Restraint มาเป็นส่วนช่วยป้องกันการส่งปลดวงจรผิดพลาดในกรณีของการเกิดกระแสอินรัชขึ้นในหม้อแปลง แต่หลักการดังกล่าวยังมีข้อบกพร่องในการทำงาน หากเกิดการฟอลต์ขึ้นภายในหม้อแปลงที่มีส่วนประกอบฮาร์โมนิกอันดับสองอยู่สูง หรือมีผลกระทบจากการอิ่มตัวของแกนเหล็กของหม้อแปลง กระแสมีผลทำให้กระแสที่ได้ผิดเพี้ยน อีกทั้งยังไม่สามารถให้ความเชื่อถือในการไม่สั่งปลดวงจรในกรณีที่เกิดกระแสอินรัชที่มีประกอบฮาร์โมนิกอันดับสองอยู่ต่ำ หรือมีผลกระทบจากการอิ่มตัวของแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแสมีผลทำให้กระแสที่ได้ผิดเพี้ยนหรือมีผลของกระแสตรงมาเกี่ยว ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงมีเสถียรภาพ และความน่าเชื่อถือของรีเลย์ป้องกันหม้อแปลงให้ดีขึ้น โดยใช้หลักการร่วมของระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) และฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic) โดยแบ่งการประมวลผลเป็น 2 ส่วน โดยในส่วนประมวลผลเบื้องต้นได้ออกแบบให้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมทำการเรียนรู้รูปร่างคลื่นของกระแสในสถานะต่างๆ รวมถึงชดเชยการผิดเพี้ยนของกระแสเนื่องจากการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กในแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแส และหลังจากผ่านการประมวลผลเบื้องต้น ข้อมูลทั้งหมดก็จะถูกส่งไปยังส่วนประมวลผลขั้นสุดท้ายซึ่งได้นำเสนอการใช้ Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) มาทำการตัดสินใจในการสั่งปลดวงจร ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับหลักการเดิม ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม MATLAB / SIMULINK สำหรับจำลองโครงสร้างรีเลย์ที่นำเสนอ และใช้โปรแกรม EMTP-ATP จำลองสถานะต่างๆ ของหม้อแปลงเพื่อใช้ในเรียนรู้และทดสอบหลักการที่นำเสนอ

Thesis Title	REDUCED MALOPERATION OF DIFFERENTIAL PROTECTION RELAY FOR POWER TRANSFORMER USING NEURAL-FUZZY SYSTEMS
Student	Mr. Apisit Ekcheewanon
Student ID	39061038
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Vittaya Tipsuwanporn

ABSTRACT

The conventional differential protection relay using for Transformer mostly uses Percentage Differential Principle for making decision and uses Harmonic Restraint principle for preventing false operation due to inrush current. But such principles are not effectiveness for protecting the transformer from internal fault with high percentage of second harmonic or distorted current due to CT saturation. Moreover it could not guarantee the reliability for spurious fault such as inrush current with low percentage of second harmonic, external distorted fault current due to CT saturation or high DC offset. As a result, this thesis proposes the method for reducing maloperation of Differential Protection Relay using Neural Network and Fuzzy Logic principle. The proposed relay's structure can be formed into 2 levels of data processing. The Pre-Processing Data uses the advantage of Neural Network for recognizing and correcting the differential current. In the Final Decision Processing Block, the Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) is used for making decision from all inputs as supported and corrected information from Pre-processing Data block. The MATLAB/SIMULINK is used to model the transformer protection relay. By using EMTP-ATP, the power transformers are modeled, all currents flowing into transformer was recorded.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วง ได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก ร.ศ. วิทยา ทิพย์ สุวรรณพร อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุม ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณวิศวกรบริษัทเอบีบี จำกัด คุณเมทินี แจ่มจรัสและคุณพิชัย จินดา ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อมูลในส่วนของผลการทดสอบหม้อแปลงที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้

ขอขอบคุณสื่อชัย สุรพงษ์พันธ์ และคุณชนพงษ์ สงวนศรี วิศวกรของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ได้คำแนะนำและข้อมูลในส่วนของระบบไฟฟ้าในประเทศไทย

และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ทั้งที่เรียนมาด้วยกัน และในบริษัทเอบีบี ๗ ทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการให้คำแนะนำ และช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ และต้องกราบขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งสำหรับกำลังใจจากคุณแม่ที่มีให้มาโดยตลอด

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นายอภิสิทธิ์ เอกชีวานนท์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	IX
สารบัญตาราง	XVII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญในการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า	1
1.2 การพัฒนาของโครงสร้างและหลักการป้องกันหม้อแปลง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	3
1.4 รายละเอียดวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2 หลักการทำงานและข้อผิดพลาดของการใช้หลักการ Percentage Difference Current และ Harmonic Restraint สำหรับป้องกันหม้อแปลง	5
2.1 หลักการ Percentage Differential Current	5
2.2 หลักการ Harmonic Restraint	7
2.3 ข้อผิดพลาดของการใช้หลักการ Percentage Differential Current ในการสั่งปลดวงจร	12
2.4 ข้อผิดพลาดของการใช้หลักการ Harmonic Restraint ในการสั่งยับยั้งการปลดวงจร	12
บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการเบื้องต้นของฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic) และระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network)	14
3.1 ฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic)	14
3.1.1 ฟัซซี่เซต	14
3.1.2 การดำเนินการต่างๆ กับฟัซซี่เซต	16
3.1.3 หลักการของกระบวนการฟัซซี่อินเฟอร์เรนซ์	18
3.2 ระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network)	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม	20
3.2.2 การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม	23
3.2.3 การเรียนรู้ในลักษณะที่มีผู้สอน (Supervised Learning)	23
3.2.4 เกรเดียนต์เดสเซนต์ (Gradient Descent)	24
3.2.5 แบบและลักษณะของโครงข่ายประสาทเทียม	25
3.2.6 ความสามารถในการแยกแยะความแตกต่างของโครงข่าย ประสาทเทียม (Artificial Neural Network Discrimination Ability)	26
3.2.7 โครงข่ายประสาทเทียมที่แบ่งแยกได้อย่างเชิงเส้น	26
3.2.8 โครงข่ายประสาทเทียมที่แบ่งแยกได้อย่างเชิงเส้นหลายตัว	28
3.2.9 โครงข่ายประสาทเทียมที่แบ่งแยกได้อย่างไม่เป็นเชิงเส้น	30
3.2.10 เพอร์เซปตรอน (Perceptron)	31
3.2.11 เพอร์เซปตรอนแบบหลายชั้น (Multilayer Perceptron)	33
3.2.12 กระบวนการเรียนรู้แบบเดลต้า (Delta Learning Rule)	35
3.2.13 อัลกอริทึมการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ	37
3.3 ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System)	48
3.3.1 โครงสร้างของโครงข่ายที่ปรับได้	49
3.3.2 กฎการเรียนรู้แบบรวม	52
3.3.3 ฟัซซี่ลอจิกที่นำเอาระบบโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในกระบวนการ อินเฟอร์เรนซ์ (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System)	55
บทที่ 4 ทฤษฎีและหลักการใช้โปรแกรม ATP-EMTP สำหรับจำลองสถานะฟอลต์ต่างๆ เพื่อใช้ในการทดสอบการทำงานของรีเลย์	58
4.1 แบบจำลองของหม้อแปลงโดยใช้โปรแกรมย่อย BCTRAN	64
4.2 แบบจำลองสถานะกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง	71
4.3 แบบจำลองสถานะฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง	78
4.4 แบบจำลองการผิบนองของกระแสเนื่องจากสถานะการอิมตัวของ แกนเหล็กของหม้อแปลงกระแส	82
4.5 แบบจำลองวงจรของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้	86

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.1 แบบจำลองวงจรในกรณีที่มีผลของกระแสอินรัชขณะเริ่มจ่ายไฟ	86
4.5.2 แบบจำลองวงจรในกรณีของฟอลต์ลงดินภายในหม้อแปลง ชนิดขดลวดลัดวงจรลงดิน (Turn to Earth Fault) ทั้งแบบมี และไม่มีผลของกระแสอินรัช	87
4.5.3 แบบจำลองวงจรในกรณีของฟอลต์ภายในหม้อแปลง ชนิดลัดวงจร ระหว่างรอบขดลวด (Turn to Turn Fault) ทั้งแบบมีและไม่มีผลของ กระแสอินรัช	87
4.5.4 แบบจำลองวงจรในกรณีของการเกิดฟอลต์แบบภายนอก (External Fault) ชนิดฟอลต์ลงดินเส้นเดียว (Single line to ground fault)	88
4.5.5 แบบจำลองวงจรในกรณีของการเกิดฟอลต์แบบภายนอก (External Fault) ชนิดฟอลต์แบบ 3 เฟส (Three Phase fault)	88
4.5.6 แบบจำลองวงจรในกรณีของการเกิดฟอลต์แบบภายนอก (External Fault) ชนิดฟอลต์ระหว่างสาย (line to line fault)	89
บทที่ 5 หลักการป้องกันหม้อแปลงโดยการใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับ ระบบฟิชชี่ลอจิก	90
5.1 ส่วนประมวลผลเบื้องต้น (Pre-processing Block)	92
5.1.1 ส่วนตรวจจับกระแสอินรัช	92
5.1.2 ส่วนชดเชยกระแสที่ผิดเพี้ยนจากผลของการอิ่มตัวในแกนเหล็กของ หม้อแปลงกระแส	97
5.1.3 ส่วนการวิเคราะห์อัตราผลต่างของกระแสกับผลรวมของกระแส	102
5.1.4 ส่วนการแยกส่วนประกอบฮาร์มอนิก	104
5.1.5 ส่วนการตรวจสอบการเกิดฟอลต์ภายใน	105
5.2 ส่วนประมวลผลสุดท้าย (Post Processing Block)	111
บทที่ 6 ผลการทดลอง	123
6.1 วิธีการเปรียบเทียบการทำงานของหลักการที่เสนอกับหลักการ Percentage Differential Current และ Harmonic Restraint	123

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.2 ผลการทดสอบหลักการที่นำเสนอ เมื่อนำไปป้องกันหม้อแปลง ชนิด YNyn0 ขนาด 50 MVA 115KV/23 KV	127
6.2.1 ผลการทำงานของหลักการที่นำเสนอต่อสภาวะกระแสอินรัช	129
6.2.1.1 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสภาวะกระแสอินรัชขณะเริ่ม จ่ายไฟทั้งแบบมีและไม่มีสนามแม่เหล็กตกค้าง	129
6.2.2 ผลการทำงานของหลักการที่นำเสนอต่อสภาวะที่เกิดการฟอลต์ แบบภายนอกพื้นที่ป้องกัน	132
6.2.2.1 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสภาวะกระแสฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดิน	132
6.2.2.2 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสภาวะกระแสฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสต่อเฟส	134
6.2.2.3 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสภาวะกระแสฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรทั้งสามเฟส	136
6.2.2.4 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสภาวะกระแสฟอลต์ภายนอก แบบเฟสเดียวลงกราวด์ และมีผลของการอิมิตัวของ แกนเหล็กในหม้อแปลงกระแส	138
6.2.2.5 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสภาวะกระแสฟอลต์ภายนอก แบบเฟสเดียวลงดินแบบค่าความต้านทานสูง	140
6.2.3 ผลการทดลองการทำงานของรีเลย์ต่อสภาวะที่เกิดการฟอลต์ แบบภายในพื้นที่ป้องกัน	142
6.2.3.1 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสภาวะกระแสฟอลต์ภายใน ที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดิน	142
6.2.3.2 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสภาวะกระแสฟอลต์ภายใน ที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดินแบบ มีผลการอิมิตัวของหม้อแปลงกระแส	145
6.2.3.3 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสภาวะกระแสฟอลต์ภายใน ที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดินแบบ มีค่าความต้านสูง	148

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.2.3.4 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสถานะกระแสฟอลต์ภายใน ที่เกิดขึ้นซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด	151
6.2.3.5 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสถานะกระแสฟอลต์ภายใน ที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด แบบมีค่าความต้านสูง	153
6.2.3.6 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสถานะกระแสฟอลต์ภายใน ที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดิน ขณะเริ่มจ่ายไฟซึ่งมีผลของกระแสอินรัช	155
6.2.3.7 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสถานะกระแสฟอลต์ภายใน ที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดินแบบมีค่า ความต้านทานสูง ขณะเริ่มจ่ายไฟซึ่งมีผลของกระแสอินรัช.....	157
6.2.3.8 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสถานะกระแสฟอลต์ภายใน ที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวดแบบมีค่า ความต้านทานสูง ขณะเริ่มจ่ายไฟซึ่งมีผลของกระแสอินรัช	160
บทที่ 7 สรุป	163
เอกสารอ้างอิง	167
ภาคผนวก ก การคำนวณค่าพารามิเตอร์สำหรับกับ โปรแกรม EMTP - ATP ที่ใช้ในงานวิจัย...	169
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์จริงที่ใช้หลักการ Percentage Differential Current และ Harmonic Restraint	184
ภาคผนวก ค บทความและผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	188
ประวัติผู้เขียน	189

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ขอบเขตการป้องกันในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า	2
2.1 วงจรของรีเลย์ป้องกันหม้อแปลงที่ใช้หลักการของ Percentage Diferential Current.....	5
2.2 แสดงเส้นคุณลักษณะของรีเลย์ที่ใช้หลักการ Percentage Differential Current	6
2.3 กระแสอินรัชขณะเริ่มจ่ายไฟให้กับหม้อแปลง โดยมีมุมของแรงดันเฟส A, B และ C ที่ 90, 330, 210.....	8
2.4 ผลของสนามแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กที่มีต่อขนาดของกระแสทรานเซียน ขณะที่สนามมูมของสนามแม่เหล็กขณะต่อวงจรสอดคล้องกับสนามแม่เหล็ก ที่ตกค้าง	8
2.5 ผลของสนามแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กที่มีต่อขนาดของกระแสทรานเซียน ขณะที่สนามมูมของสนามแม่เหล็กขณะต่อวงจรไม่สอดคล้องกับสนามแม่เหล็ก ที่ตกค้าง	9
2.6 แสดงการเปลี่ยนขนาดของฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ที่แปรตามค่าของมูมในการต่อวงจร	9
2.7 กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นหลังจากเกิดการฟอลต์ภายนอก.....	10
2.8 กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นจากหม้อแปลงที่เกาะบนบัสเดียวกัน เริ่มจ่ายไฟ.....	10
2.9 ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดันหรือความถี่ที่มีต่อส่วนประกอบฮาร์มอนิก.....	11
3.1 แสดงค่าความเป็นสมาชิกแบบครีส์ป์เซต I_A ; $A = [5,8]$	15
3.2 ฟัชชีเซตของคนอายุน้อย	16
3.3 ฟัชชีเซต A มีค่าระหว่าง 5 และ 8.....	17
3.4 ฟัชชีเซต B มีค่าประมาณ 4	17
3.5 ฟัชชีเซต A และ B (อินเตอร์เซกต์)	17
3.6 ฟัชชีเซต A หรือ B (ยูเนียน)	18
3.7 นิเสธของฟัชชีเซต A.....	18
3.8 ตัวอย่างกระบวนการฟัชชีอินเฟอร์เรนซ์	19
3.9 แสดงการทำงานของนิวรอล 1 ตัว.....	20
3.10 แสดงชนิดของฟังก์ชันกระตุ้นแบบมีขอบเขตจำกัด.....	22
3.11 แสดงการทำงานของเกรเดียนต์เดสเซนต์ โดยการทำให้ค่าความผิดพลาด ลาดลงไปสู่ตำแหน่งที่ต่ำที่สุด	24

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 แสดงวิธีการปรับค่านำหนักตามวิธีเกรเดียนต์เดสเซนต์ โดยการทำให้ ค่าความผิดพลาดลดลงไปสู่ตำแหน่งที่ต่ำที่สุด.....	25
3.13 แสดงตัวอย่างต้นแบบของโครงข่ายประสาทเทียม	25
3.14 แสดงความสามารถในการแบ่งแยกกลุ่มรูปแบบอินพุททั้งสี่อย่างเป็นเชิงเส้น	27
3.15 แสดงโครงข่ายประสาทเทียมอย่างง่ายซึ่งยังไม่รวมฟังก์ชันกระตุ้น	27
3.16 แสดงความสามารถในการแบ่งแยกกลุ่มรูปแบบอินพุททั้งสี่อย่างเป็นเชิงเส้น โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่แบ่งแยกได้อย่างเชิงเส้นหลายตัว	29
3.17 แสดงโครงข่ายประสาทเทียมที่แบ่งแยกได้อย่างเชิงเส้นหลายตัว ซึ่งสามารถ แก้ปัญหา Exclusive – OR ได้	29
3.18 แสดงการแบ่งแยกหมวดหมู่ของปัญหาที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้ โครงข่ายประสาทเทียมที่แบ่งแยกได้ไม่เป็นเชิงเส้น	30
3.19 แสดงการแบ่งกลุ่มปัญหาที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นจากระบบที่มีเปอร์เซปตรอน หนึ่งตัว โดยมีพื้นฐานจากการวิเคราะห์ในทางคณิตศาสตร์	30
3.20 โมเดลเปอร์เซปตรอน 1 ตัว	32
3.21 แสดงเปอร์เซปตรอนแบบหลายชั้น	34
3.22 แสดงเปอร์เซปตรอนแบบหลายชั้นที่มีลักษณะการคำนวณไปข้างหน้า	37
3.23 แสดงเปอร์เซปตรอนแบบหลายชั้น โดยมีจำนวนชั้นเท่ากับ 3 ชั้น.....	39
3.24 แสดงตัวอย่างการเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดในกรณีที่เกิดการแกว่ง	45
3.25 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดทั้งแบบมี และไม่มีโมเมนตัม.....	46
3.26 แสดงตัวอย่างการเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดในกรณีที่มีการรวมเทอม โมเมนตัมด้วย	46
3.27 แสดงตัวอย่างการเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดในกรณีที่มีการรวมเทอม โมเมนตัมและมีการปรับเปลี่ยนค่าอัตราการเรียนรู้ด้วย	47
3.28 กระบวนการฟิชชี่อินเฟอร์เรนซ์แต่ละชนิด	48
3.29 โครงสร้างโครงข่ายที่ปรับค่าได้.....	49
3.30 กระบวนการฟิชชี่อินเฟอร์เรนซ์ ชนิดที่ 3 โดยการใช้โครงข่ายที่ปรับได้.....	56
4.1 วงจรที่ใช้อธิบายหลักการของเทวินิน	59
4.2 วงจรเทียบเคียงของวงจรในรูป 4.1 (Reactance Valve in p.u. Base on 100 MVA, 60 Hz)	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3	60
4.4	61
4.5	62
4.6	74
4.7	75
4.8	77
4.9	78
4.10	79
4.11	81
4.12	84
4.13	84
4.14	85
4.15	85
4.16	86
4.17	86
4.18	87
4.19	87

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20	วงจรถ่ายใช้ในการทดสอบเบรคในกรณีที่มีการเกิดฟอลต์ภายนอกหม้อแปลง ชนิดฟอลต์ลงดินเส้นเดียว..... 88
4.21	วงจรถ่ายใช้ในการทดสอบเบรคในกรณีที่เกิดการฟอลต์ภายนอกหม้อแปลง ชนิดฟอลต์แบบ 3 เฟส 88
4.22	วงจรถ่ายใช้ในการทดสอบเบรคในกรณีที่เกิดการฟอลต์ภายนอกหม้อแปลง ชนิดฟอลต์ระหว่างสาย..... 89
5.1	กระบวนการจำลองความผิดปกติของระบบไฟฟ้าแล้วนำมาประมวลผล โดยการใช้โปรแกรม MATLAB ร่วมกับ โปรแกรม EMTP-ATP 90
5.2	โครงสร้างของหลักการป้องกันหม้อแปลงที่นำเสนอ โดยการใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK 91
5.3	หลักการดำเนินงานของส่วนตรวจจับกระแสอินรัชโดยใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม 92
5.4	โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้สำหรับตรวจจับกระแสอินรัชโดยใช้ โปรแกรม SIMULINK 93
5.5	กระแสอินรัชขณะเริ่มจ่ายไฟ (บน), เอาท์พุทของ Percentage Harmonic Restraint ($I_{d,j}/I_{d,p}$) (กลาง), เอาท์พุท ของ Inrush detector Block (ล่าง) 96
5.6	กระแสอินรัชขณะเริ่มจ่ายไฟและมีฟอลต์อยู่ (บน), เอาท์พุทของ Percentage Harmonic Restraint ($I_{d,j}/I_{d,p}$) (กลาง), เอาท์พุท ของ Inrush detector Block (ล่าง) 96
5.7	หลักการชดเชยการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นอันเนื่องมาจากการอิมพัลส์ของ แกนเหล็กโดยใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม 97
5.8	โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้สำหรับชดเชยการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นอันเนื่องมาจาก การอิมพัลส์ของแกนเหล็ก โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK 98
5.9	กระแสด้านปฐมภูมิที่ผิดเพี้ยนจากผลของกระแสตรง ทำให้แกนเหล็ก CT อิมพัลส์ (บน), ส่วนชดเชย(กลาง), เปรียบเทียบกระแสด้านปฐมภูมิ หลังชดเชยกับกระแสทุติยภูมิ (ล่าง) 101
5.10	กระแสด้านปฐมภูมิที่ผิดเพี้ยนจากผลของกระแสสลับ ทำให้แกนเหล็ก CT อิมพัลส์ (บน), ส่วนชดเชย(กลาง), เปรียบเทียบกระแสด้านปฐมภูมิ หลังชดเชยกับกระแสทุติยภูมิ (ล่าง) 101
5.11	เส้นคุณลักษณะของหลักการ Percentage Differential Current 102
5.12	ส่วนการแยกส่วนประกอบฮาร์มอนิกโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK 104

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.13 ส่วนวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขนาดของฟอลต์เฟสระหว่างด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิเทียบกับก่อนเกิดฟอลต์ $C5_{\mu}(n)$ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK	105
5.14 ส่วนวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของผลรวมของกระแสทั้ง 3 เฟส ระหว่างด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเทียบกับก่อนการเกิดฟอลต์ $C5_{\mu}(n)$ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK	107
5.15 ส่วนวิเคราะห์ความสัมพันธ์กระแสตกค้าง ระหว่างด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ $C5_{\mu}(n)$ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK	108
5.16 ส่วนวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของส่วนประกอบกระแสตรงของผลต่างกระแสดระหว่างด้านปฐมภูมิตกับทุติยภูมิ $C5_{\mu}(n)$ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK	109
5.17 เอาท์พุทที่ได้จากส่วนตรวจสอบฟอลต์ภายใน สำหรับกรณีขดลวดหม้อแปลง ด้านทุติยภูมิลัดวงจรลงดินแบบมีค่าอิมพีแดนซ์สูง	110
5.18 เอาท์พุทที่ได้จากส่วนตรวจสอบฟอลต์ภายใน สำหรับกรณีที่เกิดฟอลต์ภายนอก แบบลัดวงจรลงดินเส้นเดียว	110
5.19 เอาท์พุทที่ได้จากส่วนตรวจสอบฟอลต์ภายใน สำหรับกรณีที่เกิดฟอลต์ภายนอก ด้านลงดินเส้นเดียวแบบมีผลของกระแสตรงทำให้เกิดการอิมตัวในแกนเหล็ก	111
5.20 โครงสร้างของส่วนประมวลผลขั้นสุดท้ายที่ใช้ระบบแอนฟิส	112
5.21 กระบวนการอินเฟอร์เรนซ์ของระบบแอนฟิส	113
5.22 แสดงถึงส่วนประมวลผลขั้นสุดท้ายที่ใช้ระบบแอนฟิส โดยใช้โปรแกรม MATAB	118
5.23 แสดงค่าความเป็นสมาชิกของอินพุททั้ง 5 อินพุทโดยใช้ฟังก์ชัน Gaussain (μ) Inrush check C1 (ข) Percentage Diff. Current check C2 (ค) Percentage h2/h1 check C3 (ง) Percentage h5/h1 check C4 และ (จ) Internal fault check C5	120
5.24 พื้นผิวของเอาท์พุทต่ออินพุท [C1 C2 C3 C4 C5] (ก) [C1 C2 0.5 0.5 0.1] (ข) [C1 C2 0.1 0.2 0.4] (ค) [C1 0.1 C3 0.2 0.4] (ง) [C1 0.8 C3 0.1 0.6] (จ) [1 C2 0.5 0.05 C5] (ซ) [0 C2 0.1 0.1 C5]	121
6.1 โครงสร้างภายในของรีเลย์ที่มีใช้กันอยู่ปัจจุบัน	124
6.2 โครงสร้างของรีเลย์ที่ใช้หลักการ Percentage Differential Current และ Harmonic Restraint ที่จำลองขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK	125

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.3	แบบจำลองเปรียบเทียบผลการทำงานของหลักการ 2 หลักการ ระหว่างหลักการ ที่ได้นำเสนอ เทียบกับหลักการเดิม(Percentage Differential Current และ Harmonic Restraint) 126
6.4	วงจรเส้นเดียวของสถานีไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง 127
6.5	วงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองโดยการใช้โปรแกรม ATP Draw 127
6.6	แสดงตำแหน่งการเปิดวงจรซึ่งมีผลต่อฟลักซ์ที่ค้าง (Residual flux) และตำแหน่ง การต่อวงจรซึ่งหมายถึงมุมในการจ่ายไฟ (Energizing Angle) 128
6.7	ผลการทำงานของหลักการที่ได้นำเสนอต่อสภาวะการเกิดกระแสอินรัช 130
6.8	ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบ โครงข่ายประสาทเทียบร่วมกับระบบพีชชีลลจิก ในการสั่งปลดวงจรต่อสภาวะฟอลต์ภายนอกแบบเฟสเดียวลงกราวน์ 131
6.9	ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน ที่เวลา 0.042 วินาที 132
6.10	ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบ โครงข่ายประสาทเทียบร่วมกับพีชชีลลจิก ในการสั่งปลดวงจรต่อสภาวะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน 133
6.11	ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสต่อเฟส ระหว่าง เฟส A และเฟส B ที่เวลา 0.042 วินาที 134
6.12	ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบ โครงข่ายประสาทเทียบร่วมกับพีชชีลลจิก ในการสั่งปลดวงจรต่อสภาวะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสต่อเฟส 135
6.13	ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรทั้งสามเฟสที่เวลา 0.042 วินาที 136
6.14	ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบ โครงข่ายประสาทเทียบร่วมกับพีชชีลลจิก ในการสั่งปลดวงจรต่อสภาวะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรทั้งสามเฟส 137
6.15	ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดินที่เฟส B และมีผลของการอิมตัวของแกนเหล็กในหม้อแปลงกระแสที่เวลา 0.042 วินาที 139
6.16	ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบ โครงข่ายประสาทเทียบร่วมกับพีชชีลลจิก ในสั่งปลดวงจรต่อสภาวะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน และมีผลของการอิมตัวของแกนเหล็กในหม้อแปลงกระแส 139
6.17	ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดินที่เฟส B แบบมีค่าความต้านทานสูงที่เวลา 0.042 วินาที 140

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.18 ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับฟิชชี่ลอจิก ในการสั่งปลดวงจรต่อสภาวะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน แบบมีค่าความต้านสูง	141
6.19 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายในที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวด ลงดินที่เฟส B ที่เวลา 0.042 วินาที	143
6.20 ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับฟิชชี่ลอจิก ในการสั่งปลดวงจรต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดิน	144
6.21 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดินที่ เฟส B และ มีผลของการอิมิตัวของแกนเหล็กในหม้อแปลงกระแสที่เวลา 0.042 วินาที ...	146
6.22 ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับฟิชชี่ลอจิก ในการสั่งปลดวงจรต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวด ลงดิน แบบมีผลของการอิมิตัวในแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแส	147
6.23 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดิน ที่เฟส B และมีค่าความต้านทานสูงที่เวลา 0.042 วินาที	149
6.24 ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับฟิชชี่ลอจิก ในการสั่งปลดวงจรต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวด ลงดินแบบมีค่าความต้านทานสูง	150
6.25 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายในที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบ ขดลวดที่เฟส B ที่เวลา 0.042 วินาที	151
6.26 ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับฟิชชี่ลอจิก ในการสั่งปลดวงจรต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด	152
6.27 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด ที่เฟส B และมีค่าความต้านทานสูงที่เวลา 0.042 วินาที	153
6.28 ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับฟิชชี่ลอจิก ในการสั่งปลดวงจรต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบ ขดลวดแบบมีค่าความต้านทานสูง	154
6.29 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดิน ที่เฟส B ขณะเริ่มจ่ายไฟที่เวลา 0.042 วินาที	155

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.30 ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับฟิชชี่ลอจิก ในการสั่งปลดวงจรต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดินขณะเริ่มจ่ายไฟ	156
6.31 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดินที่เฟส B แบบมีค่าความต้านทานสูงขณะเริ่มจ่ายไฟที่เวลา 0.042 วินาที	158
6.32 ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับฟิชชี่ลอจิก ในการสั่งปลดวงจรต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดินแบบมีค่าความต้านทานสูงขณะเริ่มจ่ายไฟ	159
6.33 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวดที่เฟส B แบบมีค่าความต้านทานสูงขณะเริ่มจ่ายไฟที่เวลา 0.042 วินาที	161
6.34 ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับฟิชชี่ลอจิก ในการสั่งปลดวงจรต่อสภาวะฟอลต์ภายในระหว่างรอบขดลวดแบบมีค่าความต้านทานสูงขณะเริ่มจ่ายไฟ	162

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	สรุปวิธีการเรียนรู้แบบร่วมของ ANFIS 54
4.1	แสดงถึงชื่อของหม้อแปลงกำลังและหม้อแปลงกระแสที่ใช้ในการทดลอง 63
4.2	แสดงผลการทดสอบ (Test Report) ของหม้อแปลง A 68
4.3	แสดงผลการทดสอบ (Test Report) ของหม้อแปลง B 70
4.4	แสดงผลการคำนวณหาค่ากระแส และแรงดันที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กสำหรับ โปรแกรมย่อย SATURA ของหม้อแปลง A (แรงดันเบสที่ $\frac{11.05}{\sqrt{3}}$ kV, $\frac{35}{3}$ MVA) 73
4.5	แสดงผลการคำนวณหาค่ากระแส และแรงดันที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นอินพุท ให้กับโปรแกรมย่อย SATURA ของหม้อแปลง B (แรงดันเบสที่ $\frac{23}{\sqrt{3}}$ kV, $\frac{50}{3}$ MVA) 76
4.6	ภาระที่รับได้ที่มีค่ามาตรฐาน (Standard Burden) ของหม้อแปลงกระแส 83
5.1	พอลต์กรณีต่างๆ ที่ใช้ในการฝึกหัดระบบแอนฟิส 122
6.1	ผลการทำงานของหลักการที่ได้นำเสนอต่อสภาวะการเกิดกระแสอินรัช 130
6.2	ผลการทดสอบต่อสภาวะพอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน ที่เวลา 0.042 วินาที 132
6.3	ผลการทดสอบต่อสภาวะพอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสต่อเฟส ระหว่างเฟส A และ เฟส B ที่เวลา 0.042 วินาที 134
6.4	ผลการทดสอบต่อสภาวะพอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรทั้งสามเฟส ที่เวลา 0.042 วินาที 136
6.5	ผลการทดสอบต่อสภาวะพอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน ที่เฟส B และมีผลของการอิมิตัวของแกนเหล็กในหม้อแปลงกระแส ที่เวลา 0.042 วินาที 138
6.6	ผลการทดสอบต่อสภาวะพอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน ที่เฟส B แบบมีค่าความต้านทานสูงที่เวลา 0.042 วินาที 140
6.7	ผลการทดสอบต่อสภาวะพอลต์ภายในที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่าง ขดลวดลงดินที่เฟส B ที่เวลา 0.042 วินาที 142
6.8	ผลการทดสอบต่อสภาวะพอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดิน ที่เฟส B และมีผลของการอิมิตัวของแกนเหล็กในหม้อแปลงกระแส ที่เวลา 0.042 วินาที 145

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.9 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดิน ที่เฟส B และมีค่าความต้านทานสูงที่เวลา 0.042 วินาที	148
6.10 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายในที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบ ขดลวดที่เฟส B ที่เวลา 0.042 วินาที	151
6.11 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด ที่เฟส B และมีค่าความต้านทานสูงที่เวลา 0.042 วินาที	153
6.12 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดิน ที่เฟส B ขณะเริ่มจ่ายไฟที่เวลา 0.042 วินาที	155
6.13 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดิน ที่เฟส B แบบมีค่าความต้านทานสูงขณะเริ่มจ่ายไฟที่เวลา 0.042 วินาที	157
6.14 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด ที่เฟส B แบบมีค่าความต้านทานสูงขณะเริ่มจ่ายไฟที่เวลา 0.042 วินาที.....	160

บทที่ 1

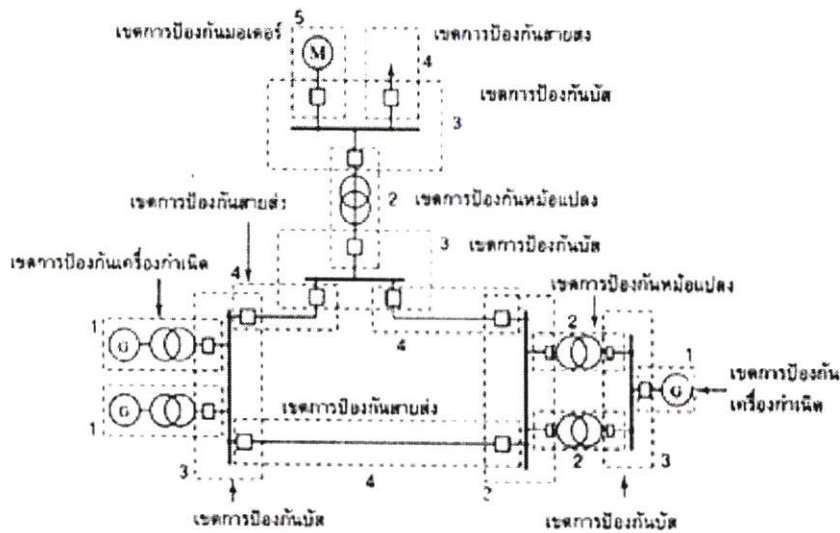
บทนำ

1.1 ความสำคัญในการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า

ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าจัดเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการดำเนินชีวิตและการพัฒนาประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาด้านอุตสาหกรรม ดังนั้นหากเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า เช่น เกิดสถานะกระแสลัดวงจรในระบบส่งจ่ายมีผลทำให้กระแสไฟฟ้าขาดหาย อันเนื่องมาจากการลัดวงจรของรีเลย์ป้องกันยอมทำให้เกิดความเสียหายต่อกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรม ทั้งนี้เนื่องจากระบบส่งจ่ายไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านโดยสายส่งซึ่งพาดผ่านในแต่ละพื้นที่ของประเทศเป็นระยะทางไกลหรือมีการเชื่อมโยงต่อระบบจ่ายไฟอื่นๆ ซึ่งสถานะผิดปกติในบางครั้ง และยากต่อการตัดสินใจว่าสถานะปกติที่เกิดขึ้นเป็นสถานะที่จะส่งผลเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า หรือเป็นแค่สถานะผิดปกติชั่วขณะที่ไม่ร้ายแรงต่อระบบและอุปกรณ์ ดังนั้น วิธีการอย่างหนึ่งที่จะช่วยให้ระบบไฟฟ้าทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ และลดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องมีการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความน่าเชื่อถือสูง

ในระบบส่งจ่ายกระแสไฟฟ้านั้น หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังถือเป็นส่วนสำคัญและจำเป็นในระบบ โดยมีหน้าที่ในการเปลี่ยนระดับแรงดันให้เป็นไปตามความเหมาะสมต่อความต้องการ และวัตถุประสงค์อื่นๆ ซึ่งโดยปกติราคาของหม้อแปลงกำลังจะมีราคาสูง โดยขึ้นอยู่กับขนาดของหม้อแปลงนั้นๆ ในกรณีที่เกิดความเสียหายใดๆ กับตัวหม้อแปลง ย่อมมีผลกระทบไม่เฉพาะแค่ค่าซ่อม หรือค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนหม้อแปลงตัวใหม่เท่านั้นแต่ยังมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตในด้านอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องให้ความสำคัญ และการดูแลรักษาที่ดีต่ออุปกรณ์ดังกล่าว

ในการออกแบบระบบป้องกันในระบบส่งจ่ายโดยปกติจะแบ่งขอบเขตการป้องกันในกรณีที่เกิดฟอลต์ขึ้นในส่วนต่างๆ อย่างเหมาะสม โดยในการป้องกันระบบไฟฟ้าจะแบ่งเขตป้องกันตามชนิดของอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน อันได้แก่ เขตป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เขตป้องกันหม้อแปลง เขตป้องกันบัส เขตป้องกันสายส่ง หรือสายจำหน่าย และเขตป้องกันโหลดหรือมอเตอร์ โดยในแต่ละส่วนจะมีรีเลย์ป้องกันที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ติดตั้งอยู่ เพื่อทำหน้าที่ป้องกันการเกิดฟอลต์ภายในขอบเขตที่ถูกกำหนดให้รับผิดชอบ โดยในแต่ละขอบเขต จะถูกกำหนดให้ดูแลพื้นที่แบบซ้อนทับกันกับขอบเขตก่อนและหลังด้วย (Overlap) ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 1.1 รีเลย์จะต้องทำการป้องกันอย่างถูกต้องหากเกิดฟอลต์ในขอบเขตที่ถูกกำหนด และจะต้องไม่ส่งปลดวงจรในกรณีที่เกิดฟอลต์ขึ้นนอกพื้นที่ที่กำหนด



รูปที่ 1.1 ขอบเขตการป้องกันในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า

1.2 การพัฒนาของโครงสร้างและหลักการป้องกันหม้อแปลง

หากกล่าวถึงรีเลย์ที่ใช้ในการป้องกันหม้อแปลง ระยะหลังได้มีการเปลี่ยนรูปแบบการประมวลผล จากการประมวลผลสัญญาณแบบอนาล็อก (Analog) ไปเป็นการประมวลผลสัญญาณที่เป็นแบบดิจิทัล (Digital) จึงได้มีการคิดค้นรีเลย์ที่ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์มาเป็นหัวใจหลักในการประมวลผลสัญญาณหรือเรียกกรีเลย์ชนิดนี้ว่า “ดิจิทัลรีเลย์” ซึ่งจะให้ผลดีในเรื่องของความถูกต้องแม่นยำในการตัดสินใจ และให้ผลดีในเรื่องของเวลา

ดังนั้นในปัจจุบันได้มีความนิยมใช้ดิจิทัลรีเลย์มาใช้กับการป้องกันหม้อแปลงซึ่งการป้องกันหม้อแปลงกำลังถือว่ามีความสำคัญและยุ่งยากมาก ทั้งนี้เนื่องจากหม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานโดยอาศัยสนามแม่เหล็ก หรือว่าฟลักซ์ในการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันในขดลวดอีกขดหนึ่ง ซึ่งจัดว่าเป็นอุปกรณ์ที่ให้ผลการตอบสนองทั้งที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งอาจมีผลของการอิ่มตัวในแกนเหล็ก การตอบสนองของฟลักซ์แม่เหล็กต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันในทันทีทันใด จะมีผลทำให้เกิดกระแสวนเฉียนไหลผ่านในตัวหม้อแปลง ซึ่งในระยะหลังดิจิทัลรีเลย์ที่นำมาใช้ป้องกันหม้อแปลงได้มีการออกแบบระบบป้องกันเพิ่มเติม เพื่อเสริมการตัดสินใจให้ถูกต้องมากขึ้น โดยหลักการที่ใช้ในรีเลย์สำหรับป้องกันในหม้อแปลงจะใช้หลักการ Percentage Differential Current โดยการหาค่าหาค่าผลต่างของกระแสที่ไหลเข้า และออกจากหม้อแปลง และอีกหลักการหนึ่งที่ใช้ก็คือ หลักการ Harmonic Restraint สำหรับป้องกันการสั่นปลดวงจรในกรณีที่เกิดกระแสผลต่างอันเนื่องมาจากผลของกระแสอินรัช (Inrush Current) แต่อย่างไรก็ตามยังพบว่า ยังคงมีการทำงานที่ผิดพลาดหรือยังให้ผลการทำงานในเรื่องของเวลาไม่ดีพอ หรือในบางครั้งมีผลกระทบจากการผิดเพี้ยนของกระแสไฟที่ส่งออกมาจากหม้อแปลงวัดกระแสซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการอิ่มตัวในของสนาม

แม่เหล็กในแกนเหล็กหรือค่าความผิดพลาดในตัวหม้อแปลงกระแส ซึ่งสาเหตุดังกล่าวยังผลให้รีเลย์ที่ใช้หลักการดังกล่าวมีข้อผิดพลาดในการตัดสินใจในการสั่งปลดวงจร เช่น ไม่สามารถสั่งปลดวงจรได้รวดเร็วหากเกิดฟอลต์ภายในพื้นที่ป้องกัน (Internal Fault) หรือสั่งปลดวงจรในสภาวะกระแสอินรัชในช่วงเริ่มจ่ายไฟให้กับหม้อแปลง หรือสั่งปลดวงจรในกรณีสภาวะที่เกิดฟอลต์ขึ้นภายนอก (External Fault) หรือทำงานได้ไม่รวดเร็วในกรณีที่ฟอลต์ที่เกิดขึ้นเป็นชนิดที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง (High Impedance Fault)

1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการใช้หลักการ Percentage Differential Current ร่วมกับการใช้หลัก Harmonic Restraint ยังคงมีข้อผิดพลาดอยู่ในบางกรณี ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองของหลักการป้องกันหม้อแปลงโดยใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) มาเสริมข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในหลักการเดิม และใช้ฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic) ที่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ในส่วนของการอนุมานอินเฟอร์เรนซ์ (Inference system) มาทำหน้าที่วิเคราะห์ข้อมูลที่มีอยู่ทั้งหมด โดยขอบเขตและเป้าหมายของหลักการใหม่ที่นำเสนออีกคือ เพิ่มประสิทธิภาพในการแยกแยะการฟอลต์ภายในพื้นที่ที่ถูกกำหนดให้ป้องกัน ออกจากฟอลต์ภายนอกพื้นที่ป้องกัน และกระแสอินรัช อีกทั้งลดความผิดพลาดในการตัดสินใจ หากเกิดการผิดพลาดของกระแสที่ได้รับจากหม้อแปลงกระแส เนื่องจากผลของการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กในแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแส (Current Transformer Saturation) ซึ่งสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับหลักการเดิมที่ใช้กันอยู่โดยอาศัยการจำลองบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งมีเครื่องมือ (Tool Boxes) ในส่วนของการประมวลผลแบบคิจิตลออยู่พร้อม

ในส่วนของการที่ใช้ในการทดสอบสามารถหาผลของรูปคลื่นในสภาวะผิดพลาดต่างๆ ที่ต้องการทดสอบโดยอาศัยโปรแกรม EMTP-ATP ซึ่งมีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับในการสร้างแบบจำลองเพื่อหาผลตอบสนองในด้านรูปคลื่นในลักษณะที่มีผลของทรานเซียน

1.4 รายละเอียดวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีจำนวนบททั้งหมดอยู่ 7 บท ในบทแรกได้กล่าวถึงความเป็นมาคร่าวๆ ของหลักการป้องกันและ อุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลง รวมถึงวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงหลักการเดิมและข้อผิดพลาดของการป้องกันหม้อแปลงที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งได้แก่หลักการ Percentage Differential Current และการใช้หลักการ Harmonic Restraint สำหรับป้องกันการสั่งปลดวงจรในกรณีที่เกิดกระแสอินรัช และได้สรุปถึงข้อผิดพลาดในการใช้หลักการดังกล่าว

ในบทที่ 3 ได้อธิบายในส่วนของหลักการของระบบประมวลผลแบบฉลาด (Artificial Intelligence System) ที่นำมาใช้ในงานวิจัย ได้แก่ทฤษฎี และหลักการของระบบฟัซซี่ลอจิก ระบบโครงข่ายประสาทเทียม และการใช้ฟัซซี่ที่นำเอาระบบโครงข่ายประสาทเทียมมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการอินเฟอร์เรนซ์ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)

ในบทที่ 4 ได้อธิบายทฤษฎีและหลักการใช้โปรแกรม ATP-EMTP สำหรับจำลองสถานะฟอลต์ต่างๆ เพื่อใช้ในการทดสอบการทำงานของหลักการป้องกันหม้อแปลงที่นำเสนอ

ส่วนในบทที่ 5 ได้กล่าวถึงโครงสร้างและหลักการป้องกันหม้อแปลงที่นำเสนอโดยการนำเอาระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับระบบฟัซซี่ลอจิกมาเสริมในการประมวลผลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในการจำลองโครงสร้างดังกล่าว

ในบทที่ 6 ได้รายงานผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์ที่ใช้หลักการที่นำเสนอ เปรียบเทียบกับผลการทำงานของรีเลย์ที่ใช้หลักการ Percentage Differential Current และหลักการ Harmonic Restraint ซึ่งเป็นหลักการเดิม

ส่วนในบทสุดท้าย ได้มีการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ตลอดจนถึงปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางการแก้ไขรวมถึงและการพัฒนาการทำงานวิจัยต่อไป

ในส่วนของภาคผนวก ได้แนบการคำนวณค่าพารามิเตอร์สำหรับป้อนในโปรแกรม EMTP-ATP และผลการทดสอบเปรียบเทียบจริงเปรียบเทียบกับแบบจำลอง รวมถึงผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

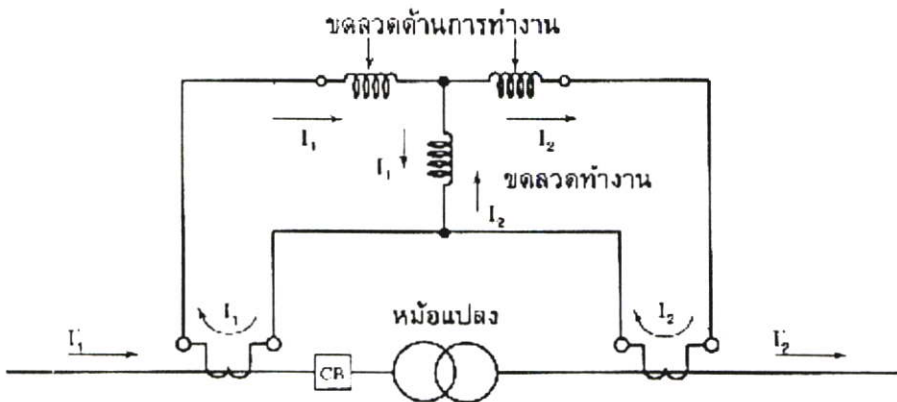
บทที่ 2

หลักการทํางานและข้อผิดพลาดของหลักการ Percentage Differential Current และ Harmonic Restraint สำหรับป้องกันหม้อแปลง

รีเลย์ป้องกันหม้อแปลงที่ใช้ในปัจจุบันไม่ว่าจะเป็นรีเลย์ของ ABB, Siemens หรือ SEL จะใช้หลักการ Percentage Differential Current สำหรับตรวจสอบสถานะฟอลต์ที่เกิดขึ้นว่าเป็นฟอลต์ที่เกิดขึ้นจริงภายใน หรือภายนอกบริเวณที่ป้องกัน และยังคงใช้หลักการ Harmonic Restraint เพื่อป้องกันการสั่งปลดวงจร เนื่องมาจากกระแสฮาร์มอนิก [1-3] ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการทํางานและข้อผิดพลาดของการใช้หลักการดังกล่าวมาป้องกันหม้อแปลง

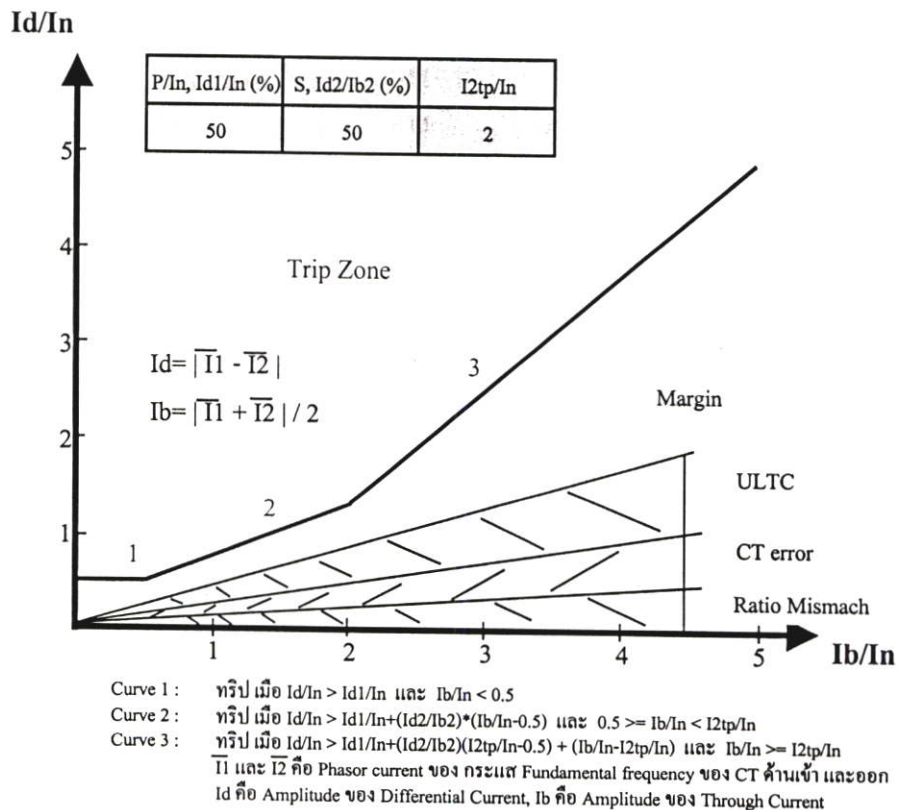
2.1 หลักการ Percentage Differential Current

จากรูปที่ 2.1 ในกรณีที่กระแสที่ไหลเข้าหม้อแปลงมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลออกจากหม้อแปลงนั้นหมายความว่า กระแสที่ได้จากหม้อแปลงกระแสที่ต่อต้านปฐมภูมิ (I_1) จะมีค่าเท่ากับกระแสที่ได้จากหม้อแปลงกระแสต้านทุติยภูมิ (I_2) ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านรีเลย์ป้องกันจะมีค่าเป็นศูนย์ หากกำหนดให้ค่ากระแสผลต่างระหว่าง I_1 และ I_2 มีค่าเป็น I_d นั้นหมายความว่า I_d มีค่าเป็น 0 ซึ่งในทางทฤษฎีจะหมายความว่าไม่มีฟอลต์ภายในเกิดขึ้น



รูปที่ 2.1 วงจรของรีเลย์ป้องกันหม้อแปลงที่ใช้หลักการของ Percentage Differential Current

แต่ในความเป็นจริงแล้ว แม้ว่าอยู่ในสถานะที่ไม่ได้เกิดฟอลต์ภายในขึ้น ค่ากระแส I_d อาจมีค่าไม่เท่ากับ 0 ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของค่าความผิดพลาดที่ไม่เท่ากันของหม้อแปลงกระแสทั้งสองด้าน (Current Transformer Error) ค่าอัตราส่วนที่ต่างกันของหม้อแปลงกระแสทั้งสองด้าน (Current Transformer Mismatch Ratio) และตำแหน่งของ On-Load Tap Changer ซึ่งจะมีผลให้มีกระแสจำนวนหนึ่งไหลผ่านรีเลย์ป้องกัน ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วรีเลย์ป้องกันหม้อแปลงที่ใช้กันอยู่จะมีการนำค่ากระแสไหลผ่าน (Through Current) หรือกระแสไบอัส (Bias Current) มาเป็นส่วนร่วมในการตัดสินใจในการสั่งปลดวงจร ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 ในส่วนของแกนตั้งจะเป็นค่ากระแสผลต่างต่อกระแสพิภคของหม้อแปลงกระแสด้านทุติยภูมิ (I_d/I_n) ส่วนในแกนนอนจะเป็นค่าของกระแสไบอัสต่อกระแสพิภคของหม้อแปลงกระแสด้านทุติยภูมิ (I_b/I_n) หลักการตัดสินใจสั่งปลดวงจรดังกล่าวต้องอาศัยการตั้งค่าเซตติ้ง (Setting Values) อัตราส่วนระหว่างกระแสผลต่างต่อกระแสไบอัส รีเลย์จะทำงานก็ต่อเมื่อ ค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสผลต่างต่อกระแสไบอัสจริงในขณะนั้นมีค่ามากกว่าค่าที่ได้ตั้งไว้



รูปที่ 2.2 แสดงเส้นคุณลักษณะของรีเลย์ที่ใช้หลักการ Percentage Differential Current

ที่มา : ABB's Relay Manual รุ่น SPAD346C

จากรูปที่ 2.2 ในช่วง Curve ที่ 1 เป็นช่วงที่ตั้งค่าสำหรับการทำงานของหม้อแปลงในช่วงที่ไม่มีโหลด (No-Load) ในการตั้งค่ากระแสในช่วงดังกล่าวจะต้องตั้งค่ากระแสผลต่าง (Differential Current) ให้มีค่ามากกว่ากระแสกระตุ้นของหม้อแปลง (Excitation Current) หรือมีค่ามากกว่ากระแสขณะไม่มีโหลดของหม้อแปลง (No Load current) ดังนั้น ในช่วงนี้ รีเลย์จะสั่งปลดวงจรก็ต่อเมื่อ

$$Id/In > Id1/In \text{ และ } Ib/In < 0.5 \quad (2.1)$$

ส่วนในช่วง Curve ที่ 2 เป็นช่วงสภาวะการทำงานของหม้อแปลงในการตั้งค่ารีเลย์ช่วงนี้จะต้องเผื่อค่าความผิดพลาดของหม้อแปลงกระแสทั้งสองด้าน ค่าอัตราส่วนที่ต่างกันของหม้อแปลงกระแสทั้งสองด้าน และตำแหน่งของ On-Load Tap Changer ที่ทำให้กระแสผลต่างมีค่ามากที่สุด ดังนั้น รีเลย์จะสั่งปลดวงจรก็ต่อเมื่อ

$$Id/In > Id1/In + (Id2/Ib2)*(Ib/In-0.5) \text{ และ } 0.5 \geq Ib/In < I2tp/In \quad (2.2)$$

ส่วนในช่วง Curve ที่ 3 เป็นช่วงสภาวะของการเกิดฟอลต์ภายนอกพื้นที่ป้องกันซึ่งจะต้องคำนึงค่ากระแสผลต่างที่เกิดจากกระแสฟอลต์สูงสุด ดังนั้น ในช่วงนี้ รีเลย์จะสั่งปลดวงจรก็ต่อเมื่อ

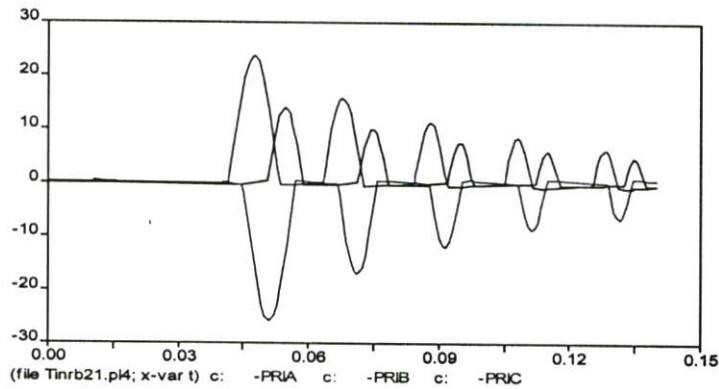
$$Id/In > Id1/In + (Id2/Ib2)(I2tp/In-0.5) + (Ib/In-I2tp/In) \text{ และ } Ib/In \geq I2tp/In \quad (2.3)$$

โดยที่ $I1$ และ $I2$ คือ Phasor current ของ กระแส Fundamental frequency ของ CT ด้านเข้าและออก Id คือ ขนาดของ Differential Current, Ib คือ ขนาดของ Through Current และ $Id1/In$ หรือค่า P, $Id2/Ib2$ หรือค่า S และ $I2tp / In$ เป็นค่าเซตตั้งที่ต้องตั้งไว้ในรีเลย์

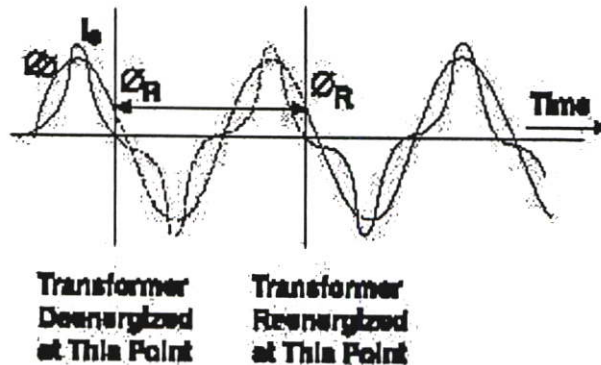
2.2 หลักการ Harmonic Restraint

ในระยะหลังรีเลย์ที่ผลิตออกมาจะมีการใช้หลักการหน่วงการสั่งปลดวงจรโดยใช้การวิเคราะห์อัตราส่วนของส่วนประกอบฮาร์โมนิกที่ 2 กับฮาร์โมนิกที่ 1 (Id_2/Id_1) ของกระแสผลต่างระหว่างด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิของหม้อแปลง ซึ่งหลักการดังกล่าวเรียกว่าหลักการ Harmonic Restraint ซึ่งจุดประสงค์ก็เพื่อป้องกันการสั่งปลดวงจรอันเนื่องมาจากกระแสอินรัช (Inrush Current) ซึ่งเป็นกระแส ทรานเซียน (Transient Current) ที่เกิดเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของแรงดันไฟฟ้า (Sudden Voltage Change)

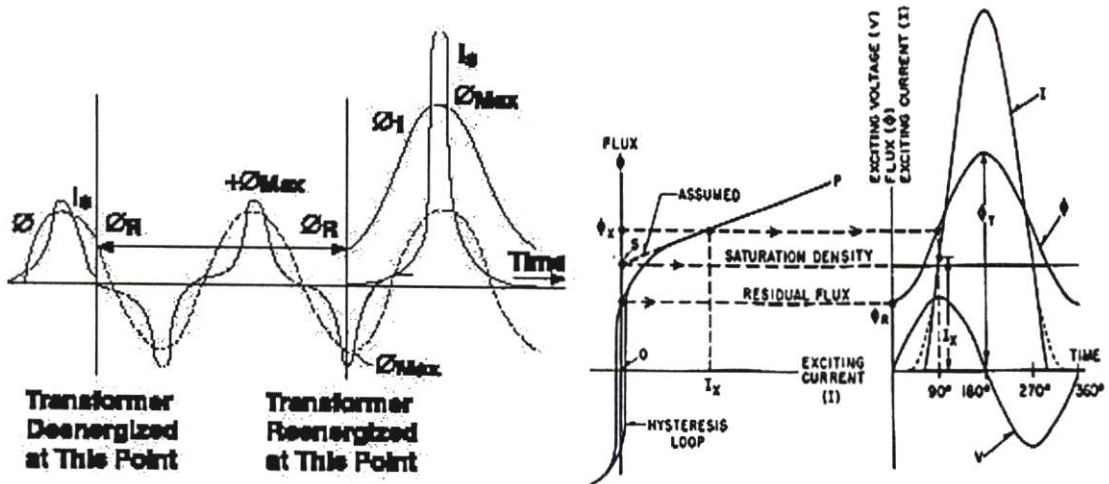
ในรูปที่ 2.3 ได้แสดงถึงกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นขณะเริ่มจ่ายไฟให้กับหม้อแปลง (Energizing Inrush Current) ซึ่งกระแสดังกล่าวอาจจะมีค่าสูงถึง 6-30 เท่าของกระแสโหลด (Full Load Current) และอาจจะมีระยะเวลาเป็นเศษส่วนของวินาทีจนถึงระดับนาที่ ส่วนในรูปที่ 2.4 ได้แสดงกระแสอินรัชในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็ก (Residual Flux) จะเห็นได้ว่าการต่อวงจรใหม่ ค่ามูมของสนามแม่เหล็กขณะนั้นได้ต่อเนื่องกับสนามแม่เหล็กตกค้าง จึงไม่มีกระแสทรานเซียนท์โหลด และจะมีแค่กระแสกระตุ้นของหม้อแปลง (Excitation Current) ปกติที่ไหล ในทางกลับกันหากในการต่อวงจรค่าของสนามแม่เหล็กขณะนั้นไม่ต่อเนื่องกับสนามแม่เหล็กตกค้าง ยกตัวอย่างเช่นในรูป 2.5 เป็นกรณีที่ต้องวงจรขณะที่ค่าสนามแม่เหล็กอยู่ในช่วงลบสูงสุด ซึ่งเมื่อรวมกับสนามแม่เหล็กตกค้างที่เป็นค่าบวก ซึ่งจะเป็นสภาวะที่ทำให้เกิดกระแสทรานเซียนท์โหลดในหม้อแปลง และในรูปที่ 2.6 ได้แสดงถึงการเปลี่ยนขนาดของฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ที่แปรตามค่าของมุมในการต่อวงจร (Incident Angle)



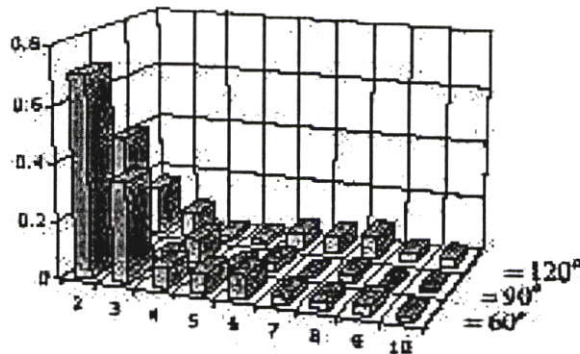
รูปที่ 2.3 กระแสอินรัชขณะเริ่มจ่ายไฟให้กับหม้อแปลง โดยมีมุมของแรงดันเฟส A, B และ C ที่ 90, 330, 210 ตามลำดับ



รูปที่ 2.4 ผลของสนามแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กที่มีต่อขนาดของกระแสทรานเซียนท์ขณะที่มีมูมของสนามแม่เหล็กขณะต่อวงจรสอดคล้องกับสนามแม่เหล็กที่ตกค้าง

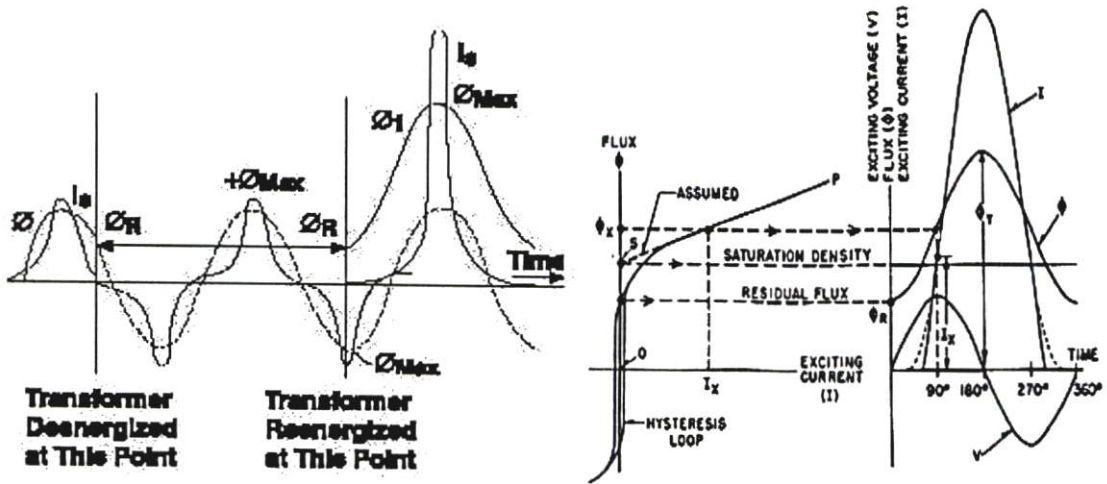


รูปที่ 2.5 ผลของสนามแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กที่มีต่อขนาดของกระแสทรานเซียนขณะที่มีมุมของสนามแม่เหล็กขณะต่อวงจรไม่สอดคล้องกับสนามแม่เหล็กที่ตกค้าง

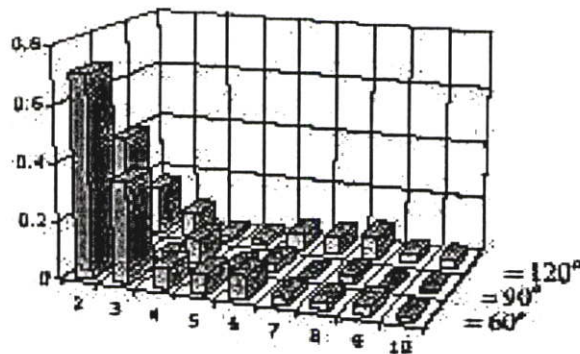


รูปที่ 2.6 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดของฮาร์โมนิกลำดับต่างๆ ที่แปรตามค่าของมุมในการต่อวงจร

กระแสอินรัชสามารถเกิดขึ้นได้ในสภาวะหลังจากเกิดฟลัดท์ภายนอกของอีก Feeder หนึ่งที่ต่ออยู่บนบัสเดียวกัน กระแสอินรัชชนิดนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนของแรงดันอย่างทันทีทันใดในช่วงขณะที่ฟลัดท์ภายนอกแล้วกลับเข้าสู่สภาวะแรงดันปกติ จึงทำให้เกิดสภาวะทรานเซียนของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงเกิดกระแสทรานเซียนขึ้นซึ่งสามารถเรียกกระแสอินรัชชนิดนี้ว่า Recovery Inrush Current ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 แต่ว่ากระแสอินรัชชนิดนี้จะมีค่าไม่สูงเท่ากับกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในช่วงเริ่มจ่ายไฟ

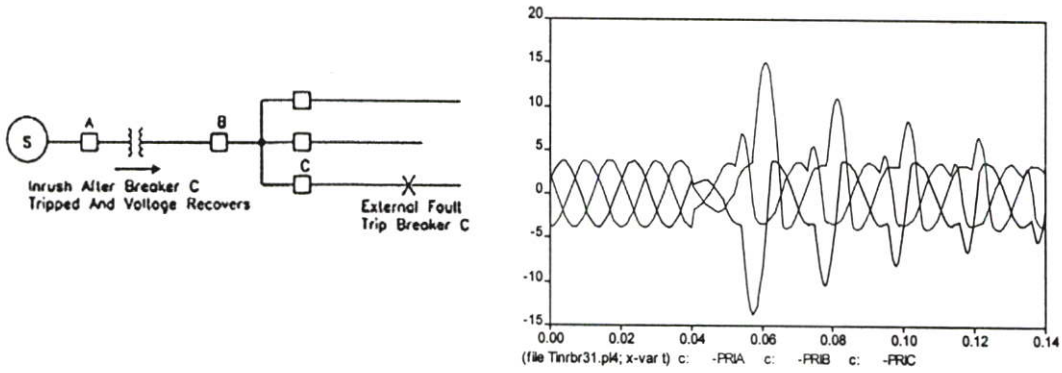


รูปที่ 2.5 ผลของสนามแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กที่มีต่อขนาดของกระแสทรานเซียนขณะที่มีมุมของสนามแม่เหล็กขณะต่อวงจรไม่สอดคล้องกับสนามแม่เหล็กที่ตกค้าง



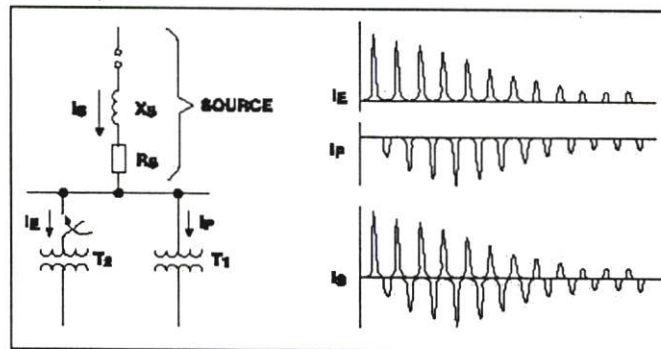
รูปที่ 2.6 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดของฮาร์โมนิกลำดับต่างๆ ที่แปรตามค่าของมุมในการต่อวงจร

กระแสอินรัชสามารถเกิดขึ้นได้ในสภาวะหลังจากเกิดฟอลต์ภายนอกของอีก Feeder หนึ่งที่ต่ออยู่บนบัสเดียวกัน กระแสอินรัชชนิดนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนของแรงดันอย่างทันทีทันใดในช่วงขณะที่ฟอลต์ภายนอกแล้วกลับเข้าสู่สภาวะแรงดันปกติ จึงทำให้เกิดสภาวะทรานเซียนของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงเกิดกระแสทรานเซียนขึ้นซึ่งสามารถเรียกกระแสอินรัชชนิดนี้ว่า Recovery Inrush Current ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 แต่ว่ากระแสอินรัชชนิดนี้จะมีค่าไม่สูงเท่ากับกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในช่วงเริ่มจ่ายไฟ



รูปที่ 2.7 กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นหลังจากเกิดการฟอลต์ภายนอก

อีกสถานะหนึ่งทำให้เกิดกระแสอินรัชขึ้นได้ก็คือ ในกรณีที่มีหม้อแปลงต่อขนานกันโดยที่หม้อแปลงตัวแรกได้จ่ายไฟแล้ว และตัวที่ 2 อยู่ในช่วงเริ่มจ่ายไฟ กระแสอินรัชประเภทนี้เรียกว่า Sympathetic Inrush Current ซึ่งในสถานะที่หม้อแปลงตัวที่ 2 เริ่มจ่ายไฟนั้น จะมีกระแสอินรัชไหลเข้าสู่หม้อแปลงดังกล่าว ดังนั้นจึงมีส่วนประกอบของกระแสตรงไหลผ่านในค่าความต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์ในสายส่ง จึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมในสายส่งทำให้เกิดกระแสไหลผ่านสายส่งดังกล่าวเข้าสู่หม้อแปลงที่จ่ายไฟในสถานะปกติ ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.8 กระแสอินรัชชนิดนี้จะมีค่าไม่สูงเท่ากับ กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในช่วงเริ่มจ่ายไฟ



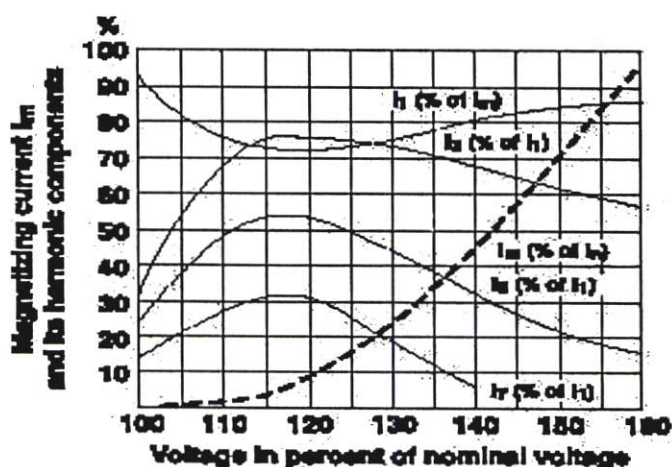
รูปที่ 2.8 กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นจากหม้อแปลงที่เกาะบนบัสเดียวกัน เริ่มจ่ายไฟ (Sympathetic Inrush Current)

ซึ่งขนาดของกระแส (Magnitude) และช่วงระยะเวลาลดลง (Decaying Time) ของกระแสดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับ ขนาด ชนิดของแกนเหล็ก และการออกแบบของหม้อแปลง (Transformer Size, type of core and Design) ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย (Source Impedance) ค่าสนามแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็ก ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งของรูปคลื่นขณะปลดวงจร (Interrupting angle) ค่ามุมของรูป

คลื่นไซน์ขณะต่อวงจร (Energizing Angle) ชนิดการต่อขอลวดของหม้อแปลง ขนาดและที่ตั้งของระบบไฟฟ้า

จะสังเกตได้ว่ากระแสอินรัชจะเป็นกระแสที่ไหลเข้าหม้อแปลงอย่างเฉียว ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสผลต่างมีค่าๆหนึ่ง ซึ่งอาจทำให้รีเลย์ที่ใช้หลักการ Percentage Differential Current เพียงอย่างเดียวสั่งปลดวงจรได้ หากเราวิเคราะห์ส่วนประกอบฮาร์มอนิกของกระแสอินรัช จะพบว่าจะมีส่วนประกอบฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 สูง ซึ่งมีค่ามากกว่า 15% ของส่วนประกอบฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 ดังนั้นรีเลย์ที่ใช้กันอยู่จะมีการตรวจสอบหาค่าอัตราส่วนของฮาร์โมนิกที่ 2 ต่อฮาร์โมนิกที่ 1 ของผลต่างกระแสทางด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิของหม้อแปลง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในกรณีป้องกันการสั่งปลดวงจรในกรณีที่กระแสที่ไหลผ่านเป็นกระแสอินรัช

ในรีเลย์บางรุ่นได้มีการตรวจสอบอัตราส่วนของส่วนประกอบกระแสฮาร์มอนิกที่เป็นอันดับที่ 5 ต่อของส่วนประกอบกระแสฮาร์มอนิกที่เป็นอันดับที่ 1 สำหรับป้องกันความร้อนที่จะเกิดขึ้นในหม้อแปลงในสถานะที่มีการกระตุ้นเกิน (Over-excitation) เป็นผลเนื่องมาจากแรงดันเกิน (Overvoltage) หรือ ค่าความถี่ตก (Under Frequency) ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.9 ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าสนามแม่เหล็ก (Flux) จะแปรผันตรงกับค่าแรงดัน (Voltage) และแปรผกผันกับค่าความถี่ (Frequency) จากรูปจะเห็นได้ว่าในขณะที่เกิดสถานะแรงดันเกิน ค่าส่วนประกอบกระแสพื้นฐาน (Fundamental Harmonic) จะตกลง ส่วนค่าส่วนประกอบกระแสฮาร์มอนิกที่เป็นอันดับคี่ เช่น 3 และ 5 จะมีค่าสูงขึ้น แต่ในหม้อแปลงที่มีขดลวดปฐมภูมิที่การต่อแบบ Delta ค่าส่วนประกอบฮาร์มอนิกที่เป็น Triple Frequency (อันดับ 3, 9 และอื่นๆ) จะมีค่าอินเฟสกับค่าส่วนประกอบกระแสพื้นฐาน (Fundamental Harmonic) ดังนั้นจะทำให้ส่วนประกอบกระแสฮาร์มอนิกที่เป็นอันดับ 3 ไม่มีผลในขณะเกิดสถานะแรงดันเกิน



รูปที่ 2.9 ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน หรือความถี่ที่มีต่อส่วนประกอบฮาร์มอนิก

2.3 ข้อผิดพลาดของการใช้หลักการ Percentage Differential Current ในการสั่งปลด

วงจร

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.1 ถึงวิธีการใช้หลักการ Percentage Differential Current ในการตรวจสอบป้องกันการฟอลต์ภายในหม้อแปลง อย่างไรก็ตามรีเลย์ที่ใช้หลักการดังกล่าวยังมีข้อผิดพลาดในการสั่งปลดวงจรหากรูปคลื่นที่วัดเข้ามาเกิดการผิดเพี้ยน เช่นในกรณีที่เกิดฟอลต์ภายนอกพื้นที่ป้องกัน โดยรูปคลื่นค่านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่ทำการป้องกันเกิดการผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากการอิ่มตัวของแกนเหล็กไม่ว่าจะเป็นการอิ่มตัวจากผลของกระแสสลับ (AC Saturation) หรืออิ่มตัวจากผลของกระแสตรง (DC Saturation) จนทำให้เกิดค่าอัตราส่วนของกระแสผลต่างต่อกระแสไบอัสเกินกว่าค่าเซตคั้งที่ตั้งไว้จนทำให้รีเลย์สั่งปลดวงจร

อีกกรณีที่สามารถทำให้เกิดการผิดพลาดในการสั่งปลดวงจรก็คือ กรณีเกิดฟอลต์ภายในพื้นที่ป้องกัน ชนิดที่ค่าอิมพีแดนซ์สูง (High Impedance Internal Fault) หรือการฟอลต์ลงดินของขดลวดภายในหม้อแปลง (Winding to Earth Fault) บริเวณช่วงปลายๆ ของขดลวด หรือการเกิดฟอลต์ระหว่างขดลวด (Turn to Turn Fault) ภายในหม้อแปลง ซึ่งจะมีผลต่างกระแสไม่มากนัก จนมีผลทำให้ไม่สามารถตรวจพบได้ทั้งนี้เนื่องมาจาก ในการตั้งเซตคั้งของค่าอัตราส่วนของกระแสผลต่างต่อกระแสไบอัส จำเป็นต้องเผื่อค่าของอัตราส่วนการแปลงที่ไม่เท่ากันระหว่างหม้อแปลงกระแสที่ต่ออยู่ทั้งด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิ หรือค่า CT Ratio Mismatch และต้องเผื่อค่าความผิดพลาดของหม้อแปลงกระแส หรือค่า CT error รวมทั้งการเปลี่ยนของกระแสด้านปฐมภูมิที่อาจจะสูงขึ้นหรือต่ำลงอันเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงของหม้อแปลง

ยิ่งไปกว่านั้นหากเกิดกระแสอินรัชไม่ว่าชนิดใดชนิดหนึ่ง รีเลย์ที่ใช้หลักการดังกล่าวมีโอกาสที่จะสั่งปลดวงจร หากขนาดของกระแสผลต่างมีค่าถึงค่าที่ได้ตั้งไว้

2.4 ข้อผิดพลาดของการใช้หลักการ Harmonic Restraint ในการสั่งยับยั้งการปลดวงจร

ในหัวข้อที่ 2.2 เราได้กล่าวถึงวิธีการใช้หลักการ Harmonic Restraint ในการตรวจสอบป้องกันการสั่งปลดวงจรในกรณีที่กระแสที่ไหลผ่านในหม้อแปลงเป็นกระแสอินรัช ซึ่งจะมีส่วนประกอบฮาร์มอนิกอันดับ 2 อยู่สูง อย่างไรก็ตามการใช้หลักการดังกล่าวยังคงมีข้อผิดพลาดในการทำงานอยู่ เช่น อาจจะทำงานไม่ถูกต้องบางสภาวะ เช่น ในกรณีการเกิดฟอลต์ภายในบริเวณที่ป้องกันที่มีส่วนประกอบฮาร์มอนิกอันดับ 2 สูงจึงทำให้รีเลย์ที่ใช้หลักการดังกล่าว จะล่อการสั่งปลดวงจรซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในบางกรณี เช่น ในช่วงรูปคลื่นแรกค่าอัตราส่วนของส่วนประกอบฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 ต่อฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 ของกระแสผลต่าง (I_{d2}/I_{d1}) จะมีค่าค่อนข้างสูงอันเนื่องมาจากรีเลย์โดยทั่วไปจะใช้วงจรแยกส่วนประกอบฮาร์มอนิกชนิดเต็มรูปคลื่น ยกตัวอย่างเช่น วงจรแยกส่วนประกอบฮาร์มอนิกโดยใช้หลักการของฟูเรียร์ชนิดเต็มรูปคลื่น (Full Wave Discrete

Fourier Transform) หรือในบางครั้ง การเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลง ขณะเริ่มจ่ายไฟซึ่งจะมีผลของกระแสอินรัชมาเกี่ยวข้องทำให้ค่าอัตราส่วนของฮาร์โมนิคอันดับที่ 2 ต่อฮาร์โมนิคอันดับที่ 1 ของกระแสผลต่าง จะมีค่าค่อนข้างสูง อีกกรณีหนึ่งในบางครั้งการเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลง ซึ่งอาจมีผลของส่วนประกอบกระแสตรงมาเกี่ยวข้อง (DC Offset) จนทำให้ค่าอัตราส่วนของฮาร์โมนิคอันดับที่ 2 ต่อฮาร์โมนิคอันดับที่ 1 ของกระแสผลต่างจะมีค่าค่อนข้างสูง หรือในบางระบบส่งจ่ายไฟฟ้าอาจมีค่าคาปาซิแตนซ์ (Capacitance) อยู่มากจนเพียงพอที่จะทำให้การเกิดฟอลต์ในบางครั้งจะมีส่วนประกอบของฮาร์โมนิคอันดับที่ 2 อยู่มาก

นอกจากนั้นผลของแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแสอิมตัวก็มีผลทำให้รีเลย์ที่ใช้หลักการดังกล่าวทำงานผิดพลาดได้ เช่น ในบางครั้งในกรณีที่เกิดฟอลต์ภายในพื้นที่ป้องกัน โดยรูปคลื่นด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่จะป้องกันเกิดการผิดพลาดขึ้นเนื่องมาจากการอิมตัวของแกนเหล็กไม่ว่าจะเป็นชนิดอิมตัวเนื่องจากผลของกระแสสลับ หรือกระแสตรง จนทำให้ค่าอัตราส่วนของฮาร์โมนิคอันดับที่ 2 ต่อฮาร์โมนิคอันดับที่ 1 ของกระแสผลต่าง จะมีค่าค่อนข้างสูง ดังนั้นรีเลย์ที่ใช้หลักการดังกล่าวไม่สั่งปลดวงจร หรือปลดวงจรซ้ำ

ในหม้อแปลงชนิดที่ต่อแบบ Delta โดยปกติกระแสอินรัชที่เกิดขึ้น จะมีค่าอัตราส่วนของฮาร์โมนิคอันดับที่ 2 ต่อฮาร์โมนิคอันดับที่ 1 ของกระแสผลต่าง ต่ำกว่า 20% ซึ่งในบางครั้งอาจจะทำให้รีเลย์ที่ใช้หลักการ Harmonic Restraint ซึ่งได้ถูกตั้งค่าเซตตั้งไว้ที่ 20% จะสั่งปลดวงจรหากค่าอัตราส่วนดังกล่าวต่ำกว่าค่าที่ได้ตั้งไว้

นอกจากนั้นหลักการดังกล่าวจะต้องอาศัยการตั้งค่าเซตตั้งที่เหมาะสม ซึ่งหากการตั้งค่าไม่เหมาะสม จะมีผลทำให้รีเลย์ทำงานผิดพลาดในการสั่งปลดวงจร (False Operation)

บทที่ 3

ทฤษฎีและหลักการเบื้องต้นของฟัซซี่ลอจิก และระบบโครงข่ายประสาทเทียม

3.1 ฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic)

ฟัซซี่ลอจิก เป็นตรรกวิทยาแขนงใหม่ที่สัมพันธ์กับตรรกวิทยาดั้งเดิมอย่างใกล้ชิด ซึ่งใช้ตัวเลขแทนตัวแปรที่เป็นภาษาพูดตามธรรมชาติที่คลุมเครือไม่ชัดเจนของมนุษย์ เนื่องจากฟัซซี่ลอจิกจัดการกับข้อมูลโดยการประมาณอย่างเป็นระบบ ทำให้สามารถนำฟัซซี่ลอจิกมาใช้ควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) หรือจำลองระบบที่ซับซ้อน (complex system modeling) ได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย

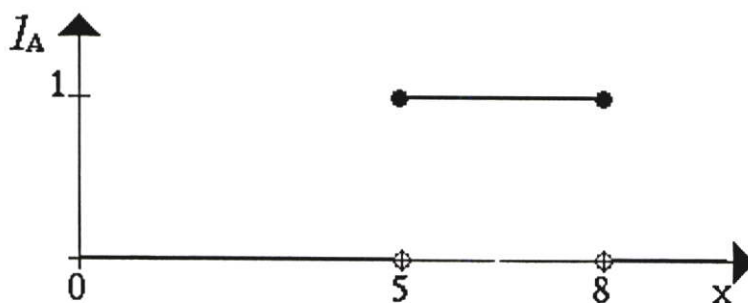
“Fuzzy Logic” ประกอบด้วยคำในภาษาอังกฤษสองคำคือ Fuzzy และ Logic คำว่า Logic นั้นแปลว่า “ตรรกวิทยา” ซึ่งเกี่ยวข้องกับกรรมวิธีทางตรรกะต่างๆ เช่น “AND” “OR” “IF-THEN” เป็นต้น ส่วนคำคุณศัพท์ Fuzzy นั้น มาจากคำนามว่า Fuzz ที่แปลว่า สิ่งเล็กๆ ที่มาบดบัง Fuzzy จึงแปลว่า ไม่ชัดเจน คลุมเครือ จากความหมายของแต่ละคำข้างต้น “Fuzzy Logic” สามารถแปลได้ว่า ตรรกวิทยาที่คลุมเครือ ไม่เด่นชัด

3.1.1 ฟัซซี่เซต (Fuzzy Set)

ผู้ที่คิดเกี่ยวกับทฤษฎีฟัซซี่เซต (Fuzzy Set Theory) และฟัซซี่ลอจิกขึ้นเป็นคนแรกในปี ค.ศ. 1965 ก็คือ ลอตฟี เอ ซาเดห์ (Lotfi A. Zadeh) ด้วยความคิดที่ว่า งานการตัดสินใจและการแก้ปัญหาต่างๆ นั้นซับซ้อนเกินไปที่จะสามารถเข้าใจได้โดยคอมพิวเตอร์โดยกรรมวิธีเชิงปริมาณ อย่างไรก็ตาม คนสามารถทำงานดังกล่าวได้อย่างง่ายดายโดยอาศัยความรู้ความเข้าใจที่ไม่แน่นอนที่ตรงนัก ซาเดห์จึงเลียนแบบการใช้เหตุผลของมนุษย์ที่ใช้ข้อมูลที่ได้จากการประมาณ (Approximated information) และความไม่แน่นอน (Uncertainty) ในการตัดสินใจ “ฟัซซี่ลอจิก” ถูกออกแบบมาโดยเฉพาะเพื่อใช้เป็นตัวแทนความไม่แน่นอนและความคลุมเครือ ด้วยสูตรทางคณิตศาสตร์ และเพื่อใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการจัดการความคลาดเคลื่อน (Imprecision) ที่สามารถพบเห็นได้ในปัญหาต่างๆ ไปในทางตรงกันข้าม หากใช้การคำนวณตามปกติจะต้องใช้ความเที่ยงตรงสูงในระดับบิต การแสดงความรู้ต่างๆ แบบธรรมชาติโดยการใช้ฟัซซี่เซต ทำให้ปัญหาการตัดสินใจและปัญหาทางวิศวกรรมต่างๆ ง่ายขึ้นต่อการทำความเข้าใจทฤษฎีเซตแบบปกติ ซึ่งถูกเรียกว่า “คริสป์เซต” (Crisp set) มีขอบเขตในการจัดกลุ่มของข้อมูลที่แน่นอน เช่น ถ้าเซต X เป็นจำนวนจริงระหว่าง 0 ถึง 10 และ A เป็นซับเซตของ X ซึ่งเป็นจำนวนจริง ตั้งแต่ 5 ถึง 8

$$A=[5,8]$$

เราแสดงเซต A ในรูปฟังก์ชันค่าแแรกเตอร์สติก (Characteristic function) (นั่นคือ ฟังก์ชันที่ให้ค่า 1 หรือ 0 ตามค่าต่างๆ ของ X แล้วแต่ว่าค่านั้นจะอยู่ในเซต A หรือไม่) ได้ตามรูปที่ 3.1



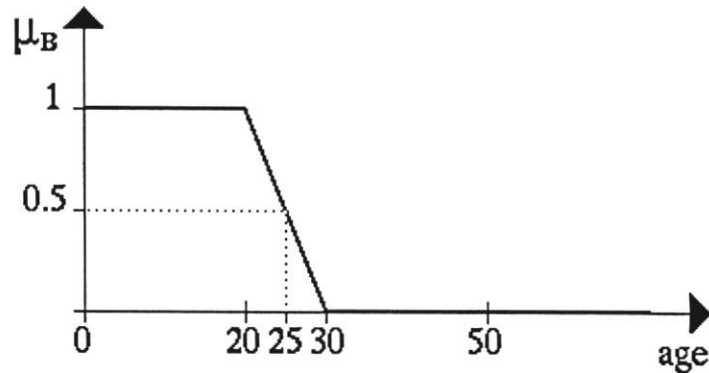
รูปที่ 3.1 แสดงค่าความเป็นสมาชิกแบบคริสป์เซต I_A ; $A = [5,8]$

จากรูปที่ 3.1 จำนวนที่อยู่บนแกน X ที่มีค่าจากฟังก์ชันเท่ากับ 1 เป็นค่าที่อยู่ในเซต A ส่วนจำนวนที่อยู่บนแกน X ที่มีค่าจากฟังก์ชันเท่ากับ 0 เป็นค่าที่ไม่อยู่ในเซต A เซตแบบปกตินี้ใช้ได้กับงานในรูปแบบต่างๆ แต่อาจขาดความยืดหยุ่นและไม่เหมาะสมกับการใช้งานในบางกรณี ซึ่งจะแสดงในตัวอย่างถัดไปในตัวอย่างนี้

เราต้องการใช้เซตเป็นตัวแทนคนที่มีอายุน้อย (young people) โดยกำหนดให้ $B = \{\text{เซตของคนอายุน้อย}\}$ โดยทั่วไปจะมีอายุตั้งแต่ 0 ปีขึ้นไป ส่วนจุดสิ้นสุดนั้นค่อนข้างยากที่จะกำหนด สมมติว่าเราให้เท่ากับ 20 ปี ดังนั้นเราจะสามารถแสดงเซต B ได้ก็คือ $B = [0,20]$ ในวันคล้ายวันเกิดครบรอบ 20 ปีของคนๆ หนึ่งเขายังเป็นคนอายุน้อยอยู่ แต่พอถัดมาในวันรุ่งขึ้นเขาก็กลายเป็นคนอายุมากอย่างนั้น หรือสิ่งนี้เป็นปัญหาที่เห็นได้ชัดของเซตแบบปกติ

ทฤษฎีฟัซซี่ใช้วิธีที่เป็นธรรมชาติในการแบ่งชั้น (Class) หรือจัดกลุ่ม (Group) ด้วยขอบเขตของข้อมูลที่ไม่ชัดเจนแน่นอน ดังนั้นวิธีการสร้างเซต B แบบฟัซซี่ คือการไม่ยึดติดกับการแบ่งแยกระหว่างการเป็นคนอายุน้อย และการไม่เป็นคนอายุน้อย ซึ่งสามารถทำได้โดยการให้ค่าตัดสินใจว่าเขาอยู่ในเซตของคนอายุน้อยมากหรือน้อย แทนที่จะแบ่งว่าเขาอยู่หรือไม่อยู่ในเซตเพียงอย่างเดียว นั่นคือการให้ค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 แทนที่จะเป็น 0 หรือ 1 อายุที่อยู่ในเซต B จะมีค่าเป็น 1 และอายุที่น่าจะอยู่ในเซต B เลยจะมีค่าเป็น 0 ช่วงอายุอื่นๆ จะเป็นสมาชิกของเซต B เพียงเล็กน้อย ดังที่แสดง

ในรูปที่ 3.2 ซึ่งแสดงถึงเซตของคนอายุน้อย จะเห็นได้ว่าคนที่มียุ 25 ปีจะมีดีกรีหรือค่าความเป็นสมาชิกของการมีอายุน้อยเท่ากับ 0.5 เปอร์เซนต์



รูปที่ 3.2 ฟัซซี่เซตของคนอายุน้อย

3.1.2 การดำเนินการต่างๆ กับฟัซซี่เซต (Operations on Fuzzy Sets)

การดำเนินการต่างๆ กับเซตปกติ เราต้องการที่จะอินเทอร์เซกต์ (Intersect) ยูเนียน (Union) และนิเสธ (Negate) ฟัซซี่เซตด้วยเช่นกัน ซาเคห์ได้แนะนำการดำเนินการ (operations) กับฟัซซี่เซต ดังนี้

- การกระทำแบบอินเทอร์เซกต์ของฟัซซี่เซต A และ B ซึ่งมีระดับการเป็นสมาชิก μ_A และ μ_B ดังนี้

$$\mu_{A(x)} \text{ AND } \mu_{B(x)} = \mu_{A(x)} \cap \mu_{B(x)} = \text{Minimum} [\mu_{A(x)}, \mu_{B(x)}] \quad (3.1)$$

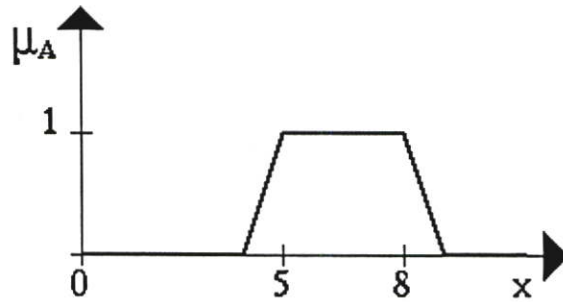
- การกระทำแบบยูเนียนของฟัซซี่เซต A และ B ซึ่งมีระดับการเป็นสมาชิก μ_A และ μ_B ดังนี้

$$\mu_{A(x)} \text{ OR } \mu_{B(x)} = \mu_{A(x)} \cup \mu_{B(x)} = \text{Maximum} [\mu_{A(x)}, \mu_{B(x)}] \quad (3.2)$$

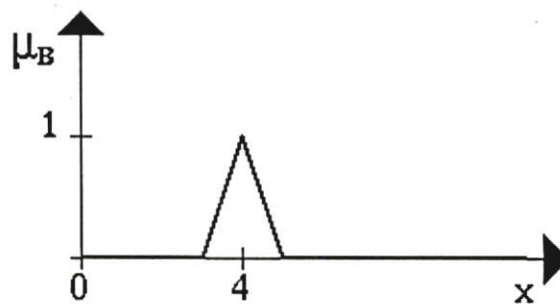
- การกระทำแบบนิเสธของฟัซซี่เซต A ซึ่งมีระดับการเป็นสมาชิก μ_A ดังนี้

$$\bar{\mu}_A(X) = 1 - \mu_A(X) \quad (3.3)$$

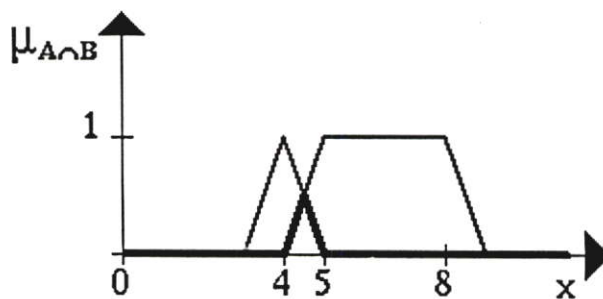
เพื่อให้เห็นภาพการดำเนินการกับฟuzzyเซตชัดเจนยิ่งขึ้น สมมติให้ A เป็นช่วงแบบฟuzzy ระหว่าง 5 และ 8 และ B เป็นจำนวนฟuzzyที่มีค่าประมาณ 4 ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ในรูปที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ ดังนั้นผลของการดำเนินการแบบอินเทอร์เซคท์ จะแสดงในรูปที่ 3.5 ส่วนผลของการดำเนินการแบบยูเนียนได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.6 และในรูปที่ 3.7 แสดงผลของการดำเนินการนิเสธ



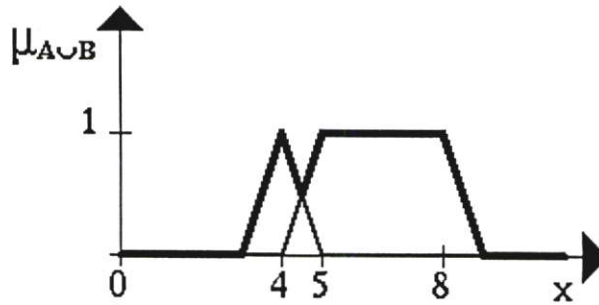
รูปที่ 3.3 ฟuzzyเซต A มีค่าระหว่าง 5 และ 8



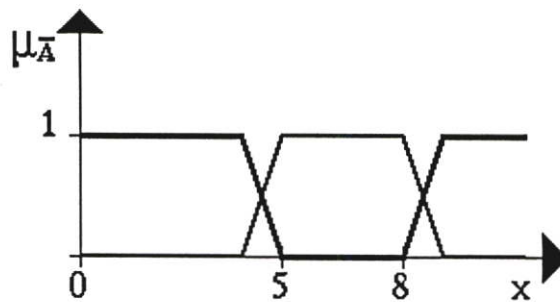
รูปที่ 3.4 ฟuzzyเซต B มีค่าประมาณ 4



รูปที่ 3.5 ฟuzzyเซต A และ B (อินเทอร์เซคท์)



รูปที่ 3.6 ฟัชชีเซต A หรือ B (ยูเนียน)



รูปที่ 3.7 นิเสธของฟัชชีเซต A

3.1.3 หลักการของกระบวนการฟัชชีอินเฟอร์เรนซ์ (Principle of Fuzzy Inference System)

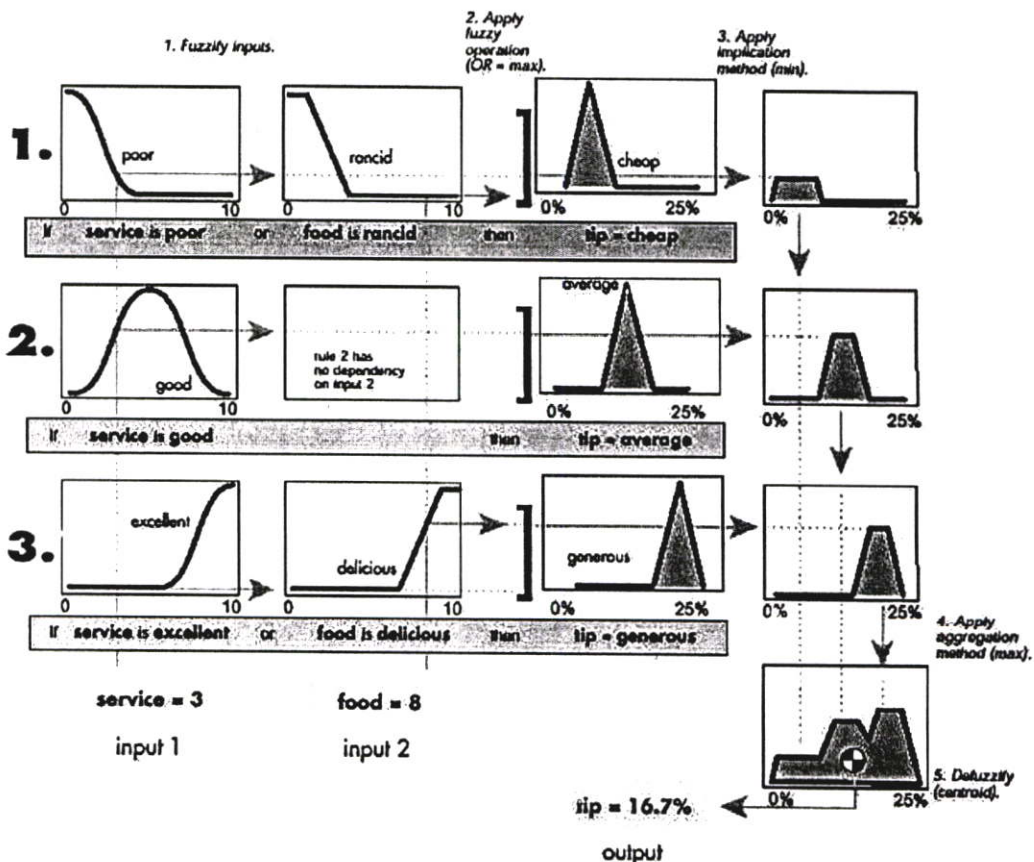
การประมวลผลและตัดสินใจแบบฟัชชีลอจิกเราจะเรียกว่า กระบวนการฟัชชีอินเฟอร์เรนซ์ (Fuzzy Inference Process) หรือ Fuzzy Rule based System หรือ Fuzzy Reasoning ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3.8 โดยปกติจะประกอบด้วย 3 ส่วน ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานอันได้แก่

- ฟัชชีฟิเคชัน (Fuzzification) คือการแปลงอินพุตแบบคริสป์เป็นค่าแบบฟัชชี โดยนำตัวแปรอินพุตมาหาค่าระดับการเป็นสมาชิกในฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต (Degree of Input membership function)

- การประเมินค่าจากกฎของการวินิจฉัย (Rule Evaluation) คือการประเมินค่าเอาท์พุตแบบฟัชชีจากกฎต่างๆ ซึ่งจะกระทำโดยการรวมค่าสมาชิกที่ได้จากการทำฟัชชีฟิเคชันทั้งหมด โดยใช้ตัวโอเปอเรเตอร์ อาจจะเป็น min หรือ max มาหาค่าน้ำหนัก (Firing Strength หรือ Weight) ในกฎแต่ละข้อ หากแบ่งเป็นส่วนย่อยในส่วนนี้ประกอบไปด้วยส่วนตัวแปรภาษาพูด (Linguistic Variables) เช่น ต่ำ อุ่น สูง ฯลฯ เป็นชื่อที่ใช้อ้างฟัชชีเซตที่ซ้อนกันอยู่ ค่าต่างๆที่เป็นรูปสามเหลี่ยมเรียกว่า “ฟังก์ชันสมาชิก” (Membership Function) ส่วนที่บรรจุกฎ (Rule Base) คือส่วนที่ว่าด้วยกฎ “IF

THEN” และส่วนต่อมาก็คือ ส่วนการตัดสินใจ ซึ่งจะกระทำโดยใช้ตัวโอเปอเรเตอร์ในแต่ละกฎ (Decision-Making Unit) ส่วนที่มาของกฎการวินิจฉัย ก็ได้มาจากการสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง อินพุตและเอาต์พุตนั่นเอง

- ดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification) คือการแปลงเอาต์พุตแบบฟัซซีกลับเป็นค่าแบบคริสป์ ซึ่งเทคนิคในการเปลี่ยนเอาต์พุตแบบฟัซซีกลับเป็นค่าแบบคริสป์จะมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีการเลือกค่าสูงสุด (Maximizer) เป็นการเลือกค่าสูงสุดของค่าระดับการเป็นสมาชิกจากการกระทำหลายๆ แบบแล้วคัดเลือกการกระทำเพียง 1 รูปแบบ วิธีที่ 2 เป็นวิธีการหาค่าน้ำหนักเฉลี่ย (Weight Average) จะใช้ค่าเฉลี่ยของการกระทำหลังจากการกำหนดค่าระดับของการเป็นสมาชิกไว้ล่วงหน้าแล้ว เป็นวิธีที่ง่ายและใช้การคำนวณเพียงเล็กน้อยแต่ให้ค่าไม่ค่อยชัดเจน ส่วนวิธีที่ 3 เป็นวิธีการหาค่าแบบ ศูนย์ถ่วง (Center of Gravity, Centroid) เป็นการหาค่าเอาต์พุตที่สัมพันธ์กับจุดศูนย์ถ่วง ซึ่งวิธีนี้จะทำให้เอาต์พุตที่ได้มีความชัดเจน เพราะเป็นการใช้จุดศูนย์ถ่วงของมวลของเอาต์พุต ไม่ได้ใช้ค่า ขอบของฟังก์ชัน ส่วนอีกวิธีก็คือ วิธีซิงเกิลตัน (Singleton) เป็นกรรมวิธีพิเศษในการหาค่าศูนย์กลาง วิธีนี้เป็นการนำค่าเอาต์พุตที่ได้จากฟัซซีเซตมาใช้ใหม่เป็นค่าเอาต์พุตเดียว โดยใช้ค่าน้ำหนักเฉลี่ยจาก การกระทำรวมกันหลายๆ วิธีนี้ได้รับความถูกต้องน้อยกว่าวิธีการหาศูนย์กลางมวล แต่ว่าการคำนวณไม่ ยุ่งยากนัก ในรูปที่ 3.8 เป็นตัวอย่างกระบวนการฟัซซีอินเฟอร์เรนซ์



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างกระบวนการฟัซซีอินเฟอร์เรนซ์

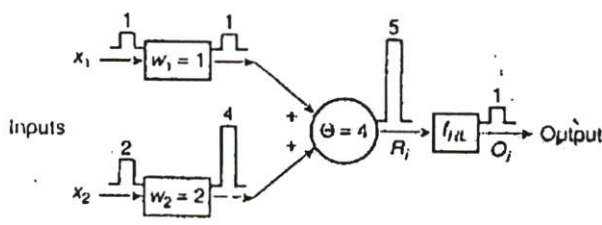
3.2 ระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network)

แนวคิดเริ่มต้นของระบบโครงข่ายประสาทเทียมคือ การลอกเลียนแบบการทำงานของ เซลล์ประสาทภายในสมองของมนุษย์ โดยการพยายามอธิบายถึงหลักการพื้นฐานและพฤติกรรมของเซลล์ประสาทในทางคณิตศาสตร์ สถาปัตยกรรมของโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียมจะนิยามถึง โครงสร้างของโครงข่ายซึ่งก็คือจำนวนของเซลล์ประสาทเทียมในโครงข่ายและลักษณะในการเชื่อมต่อของเซลล์ประสาททั้งหมด โครงข่ายประสาทจะประกอบด้วยจำนวนของเซลล์ประสาท หรือนิวรอนที่เชื่อมต่อเข้าด้วยกันเป็นจำนวนมาก โดยมีความเข้มในการเชื่อมโยงผ่านไซแนปส์ หรือเรียกว่าค่าน้ำหนักไซแนปส์ที่แตกต่างกัน ยังผลให้การกระตุ้นที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ประสาทแตกต่างกัน ดังนั้นผลตอบสนองเอาท์พุทก็แตกต่างกันไปด้วย คุณลักษณะของโครงข่ายก็คือ ความสามารถเรียนรู้ (Learning) ต่อรูปแบบอินพุต แล้วทำการตอบสนองที่เอาท์พุท

3.2.1 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

การสร้างแบบจำลองของโครงข่ายจะเรียกว่า Paradigms เป็นภาษากรีก แปลว่าตัวอย่างต้นแบบ หรือสิ่งที่สร้างได้เหมือนกับสิ่งหนึ่ง จะถูกพัฒนาขึ้นจากนักวิชาการหลายกลุ่ม ต้นแบบบางตัว จะเหมือนกับโครงข่ายเซลล์ประสาทในทางชีววิทยาอย่างมาก ในขณะที่แบบจำลองในลักษณะอื่น อาจจะมีคุณสมบัติที่ไม่เหมือนกับโครงข่ายเซลล์ประสาทในทางชีววิทยาเท่าใดนัก ทั้งนี้ความเข้าใจในลักษณะการทำงาน และคุณลักษณะของเซลล์ประสาททางชีววิทยาจะเป็นพื้นฐานที่สำคัญอย่างมากในการสร้างต้นแบบและการประยุกต์ใช้งานที่ดีกว่า

การพัฒนาโครงข่ายประสาทเทียมในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะอธิบายหน้าที่การทำงาน ของระบบทางชีววิทยาได้อย่างดีที่สุด คอมพิวเตอร์สามารถจำลองรูปแบบได้อย่างรวดเร็ว และการเฝ้าดูการทำงานและหน้าที่ของโครงข่ายจะทำให้มีความเชื่อมั่นของแบบจำลองที่สร้างมีมากยิ่งขึ้น การเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบจำลองจะมีผลต่อความสามารถของโครงข่ายตลอดจนคุณลักษณะต่างๆของโครงข่ายทั้งหมด อย่างไรก็ตามในการสร้างแบบจำลองซึ่งเลียนแบบระบบทางชีววิทยาจะต้องศึกษา และทำความเข้าใจในระบบทางชีววิทยาในทุกรายละเอียด



รูปที่ 3.9 แสดงการทำงานของนิวรอน 1 ตัว

ในรูปที่ 3.9 ได้แสดงตัวอย่างของการทำงานของนิรอล 1 ตัว ซึ่งมีจำนวนอินพุตเท่ากับ 2 ได้แก่ x_1 และ x_2 และมีค่าน้ำหนักเท่ากับ w_1 และ w_2 ซึ่งหากผลรวมของอินพุตที่ปรับค่าโดยการคูณ โดยน้ำหนักมีค่ามากกว่าค่า เธรชโฮลด์ θ จะทำให้ได้ผลตอบสนองออกมา จากนั้นก็จะผ่านฟังก์ชัน กระตุ้นซึ่งได้ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดฮาร์ดลิมิตเตอร์ (Hard Limiter) โดยจะให้เอาต์พุตออกมาเป็น 1 หากค่าสัญญาณกระตุ้นมีค่ามากกว่า 0

นิรอลพื้นฐานโดยทั่วไป จะมีกลุ่มของอินพุต n จำนวน โดยแทนเป็น x_i โดยที่ตัวห้อย (Subscript) จะมีค่าได้ตั้งแต่ 1 ถึง n ซึ่งแสดงถึงจำนวนของแหล่งจ่ายของสัญญาณอินพุต โดยแต่ละ อินพุตจะถูกกำหนดค่าความเข้มในการเชื่อมโยง (Connection Strength) โดยการคูณด้วยค่าน้ำหนัก ไซแนปส์ w_i ก่อนที่จะถึงลำตัวหลักของนิรอล ซึ่งถ้าผลรวมสัญญาณอินพุตที่ได้นับนิรอลมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าระดับเธรชโฮลด์ (Threshold) θ_i เซลล์ประสาทจะสร้างผลตอบสนองเป็นสัญญาณ ออกมาซึ่งเรียกว่า สัญญาณกระตุ้น (Activating Signal) R_i เมื่อนำสัญญาณกระตุ้นดังกล่าวไปผ่าน ฟังก์ชันกระตุ้น (Activating Function) f_i แล้ว ก็จะได้เป็นสัญญาณเอาต์พุต o_i ออกมา ซึ่งเอาต์พุตที่ ได้อาจจะนำไปเป็นอินพุตของนิรอลตัวอื่นของโครงข่ายในชั้นถัดไป หากเราเขียนการทำงานของ ระบบโครงข่ายประสาทเทียมในรูปของสมการจะได้เป็น สมการดังต่อไปนี้

$$o_i = f_i \left(\sum_{j=1}^N (x_j w_{ij}) - \theta_i \right) \quad (3.4)$$

และสถานะที่เซลล์ประสาทจะทำงานคือ

$$\sum_{j=1}^n x_j w_{ij} \geq \theta_i \quad (3.5)$$

โดยที่ x_{ij} คือ อินพุตลำดับที่ j ที่ป้อนให้กับนิรอล i .

w_{ij} คือ ค่าน้ำหนักไซแนปส์ระหว่างอินพุตลำดับที่ j หรืออาจจะเป็นเอาต์พุตลำดับที่ j ในโครง ข่ายชั้นก่อนหน้านี้ กับนิรอล i .

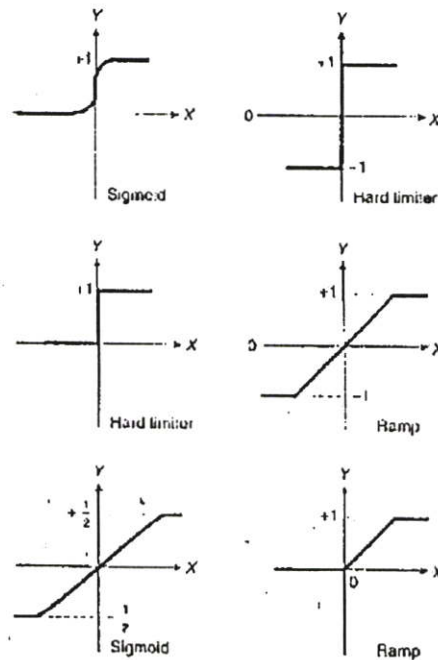
f_i คือ ฟังก์ชันกระตุ้นของนิรอล i

o_i คือ ผลตอบสนอง หรือเอาต์พุตของนิรอล i .

θ_i คือระดับเธรชโฮลด์

ฟังก์ชันที่เลือกใช้ในระบบโครงข่ายประสาทเทียม ส่วนมากจะเป็นฟังก์ชันแบบมีขอบเขต จำกัด จุดประสงค์ของการใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแบบมีขอบเขตจำกัดคือ ทำให้แน่ใจว่าผลตอบสนอง

ของเซลล์ประสาทจะถูกจำกัดขอบเขต (Saturation or Limit) ในรูปที่ 3.10 เป็นตัวอย่างของฟังก์ชันแบบมีขอบเขตจำกัด



รูปที่ 3.10 แสดงชนิดของฟังก์ชันกระตุ้นแบบมีขอบเขตจำกัด

ฟังก์ชันที่เป็นที่นิยมใช้กันส่วนมากคือ ฟังก์ชันที่เป็นแบบฮาร์ดลิมิตเตอร์ และฟังก์ชันแบบซิกมอยด์ (Sigmoid Function) ฟังก์ชันในรูปที่ 3.10 จะเป็นฟังก์ชันที่ถูกจำกัดขอบเขตทั้งหมด โดยแต่ละฟังก์ชันจะมีค่าที่จำกัดทางเอาท์พุท โดยค่าขอบเขตบนและล่างเป็น $(+1 -1)$, $(+1/2 -1/2)$ และ $(+1 0)$ เป็นต้น ฟังก์ชันแบบซิกมอยด์เป็นฟังก์ชันกระตุ้นที่นิยมใช้กันอย่างมาก เพราะมีคุณลักษณะเป็นแบบโมโนโตนิค (Monotonic) คือ ฟังก์ชันจะให้ค่าที่มีค่าเดียวในทุกค่าของ x และเป็นฟังก์ชันต่อเนื่องทำให้สามารถหาดิฟเฟอเรนเชียลได้ง่าย เพราะค่าดิฟเฟอเรนเชียลของฟังก์ชันจะอยู่ในรูปของสมการของฟังก์ชันปกติคือ $f'(s) = kf(s) [1 - f(s)]$ ซึ่งจะมีความสะดวกในการนำไปใช้ในการคำนวณอัลกอริทึมการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (Back-propagation Algorithm) นอกจากนี้ ฟังก์ชันซิกมอยด์สามารถกำหนดให้มีคุณลักษณะแบบโมโนโตนิคชนิดลด (Monotonic Decreasing Function) หรือเป็นแบบโมโนโตนิคชนิดไม่ลด (Monotonic Non-Decreasing Function) แต่ในฟังก์ชันฮาร์ดลิมิตเตอร์จะไม่ใช่โมโนโตนิค เพราะฟังก์ชันจะไม่มีค่าต่อเนื่องที่จุดกำเนิด (Origin) ดังนั้นจะทำให้หาค่าดิฟเฟอเรนเชียลของฟังก์ชันยากขึ้น อย่างไรก็ตามเซลล์ประสาทจะให้ผลตอบสนองอยู่ภายในขอบเขตบน และขอบเขตล่างเท่านั้น และค่าดิฟเฟอเรนเชียลของ $f(s)$ ในช่วงของขอบเขตบนและขอบเขตล่างมีค่า $f'(s) = k$

3.2.2 การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม

กระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายคือ ช่วงที่โครงข่ายจะปรับตัวเอง ซึ่งหมายถึงการปรับค่าน้ำหนักไซแนปส์ จากผลของการกระตุ้นของอินพุตแล้วทำการสร้างผลตอบสนองออกมา โครงข่ายจะพยายามสร้างผลตอบสนองให้ได้ตรงกับความต้องการโดยอาศัยกระบวนการเรียนรู้ กระบวนการเรียนรู้จะทำการแบ่งกลุ่มของสัญญาณอินพุตที่โครงข่ายได้รับ เมื่อสัญญาณกระตุ้นปรากฏที่โครงข่าย โครงข่ายจะจดจำมัน หรือทำการจัดกลุ่มแบบใหม่ ซึ่งในระหว่างกระบวนการเรียนรู้นี้ โครงข่ายจะปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวเองคือ ค่าน้ำหนักไซแนปส์ในการตอบสนองสัญญาณกระตุ้นอินพุตเพื่อให้มีผลตอบสนองที่มีรูปแบบตามที่เรต้องการ เมื่อโครงข่ายสร้างผลตอบสนองออกมาตรงกับความต้องการ โครงข่ายจะทำการหยุดการเรียนรู้อย่างสมบูรณ์ หมายถึง โครงข่ายได้รับความรู้แล้วโดยความรู้เหล่านั้นจะหมายถึงค่าน้ำหนักไซแนปส์ต่างๆ ค่าในโครงข่ายนั่นเอง แบบจำลองที่พัฒนาแล้วจะประกอบด้วยนิวรอล ซึ่งอาจจะถูกเชื่อมต่อกันในรูปแบบต่างๆ อย่างไรก็ตาม กระบวนการเรียนรู้ในแต่ละแบบจะไม่เหมือนกัน ซึ่งในแต่ละแบบจะมีกฎการเรียนรู้ (Learning Rules) ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการในทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า สมการการเรียนรู้ (Learning Equation) โดยสมการการเรียนรู้จะอธิบายขั้นตอนการเรียนรู้สำหรับ ซึ่งในการทำงานจริงก็คือ การประมวลผลที่มีวิธีการปรับค่าน้ำหนักไซแนปส์ของโครงข่ายที่แตกต่างกัน หากเปรียบเทียบกับคนอาจจะอธิบายได้ว่าแต่ละคนจะมีวิธีการเรียนรู้ของแต่ละคนแตกต่างกัน ดังนั้นเทคนิคการเรียนรู้ที่แตกต่างกันจะเหมาะสมกับโครงข่ายประสาทเทียมที่แตกต่างกันเช่นกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การเรียนรู้ในลักษณะที่มีผู้สอน (Supervised Learning) ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการตัดสินใจ ซึ่งมีรูปแบบของเอาต์พุตที่ต้องอยู่แล้ว

3.2.3 การเรียนรู้ในลักษณะที่มีผู้สอน (Supervised Learning)

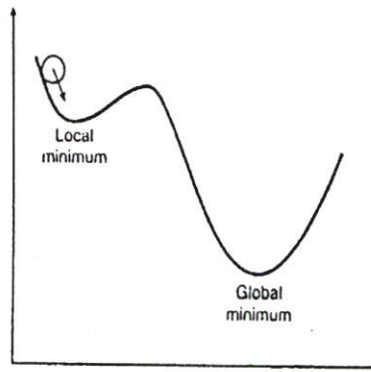
ระหว่างช่วงการฝึกหัดของโครงข่าย สัญญาณกระตุ้นที่อินพุตของโครงข่ายจะถูกป้อนเข้าไป และโครงข่ายจะสร้างผลตอบสนองที่เอาต์พุต ผลตอบสนองนี้จะถูกเปรียบเทียบกับเอาต์พุตที่ต้องการในแต่ละรูปแบบสัญญาณอินพุตที่กระตุ้น หรือเรียกว่าผลตอบสนองเป้าหมาย (Target Response) ถ้าผลตอบสนองจากโครงข่ายแตกต่างจากผลตอบสนองเป้าหมายที่ต้องการ โครงข่ายจะสร้างสัญญาณความผิดพลาด ซึ่งจะถูกใช้ในการคำนวณการปรับค่าน้ำหนักไซแนปส์ของโครงข่ายที่ทำให้เอาต์พุตจริงสัมพันธ์กับเอาต์พุตเป้าหมายนั่นคือ การทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุดหรือมีค่าเป็น 0 ถ้าเป็นไปได้

กระบวนการปรับค่าผิดพลาดให้ได้น้อยที่สุดนั้นต้องมีส่วนในการสร้างค่าผิดพลาดนั้น คือ ต้องมีผู้สอน (Teacher) หรือผู้ควบคุม (Supervisor) ซึ่งก็คือค่าเอาต์พุตที่ต้องการนั่นเอง ดังนั้นการเรียนรู้แบบนี้จะเขียนย่อได้เป็น Supervised Learning ความเข้าใจของผู้สอนมาจากการเฝ้าสังเกต ซึ่งหากการเฝ้าสังเกตในทางชีววิทยาอาจมีตัวอย่างเช่น มีการเรียนภาษา เราจะได้ฟังเสียงคำอ่านจาก

ผู้สอน เสียงนั้นจะถูกเก็บในหน่วยความจำของสมอง และเราจะพยายามสร้างเสียงนั้นอีกครั้งเมื่อเราได้ยินเสียงของเราที่พยายามพูด (Actual sound) เราจะเปรียบเทียบมันในใจด้วยเสียงที่ถูกเก็บเอาไว้ (Target sound) และบันทึกความผิดพลาดเอาไว้ ถ้าความผิดพลาดนี้มากเราจะพยายามใหม่จนกระทั่งมันใกล้เคียงกับเสียงที่เราเก็บไว้มากที่สุด นั่นคือค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยมาก หรือ เท่ากับ ศูนย์คั้งนั้นเราจึงหยุด

3.2.4 เกรเดียนต์เดสเซนต์ (Gradient Descent)

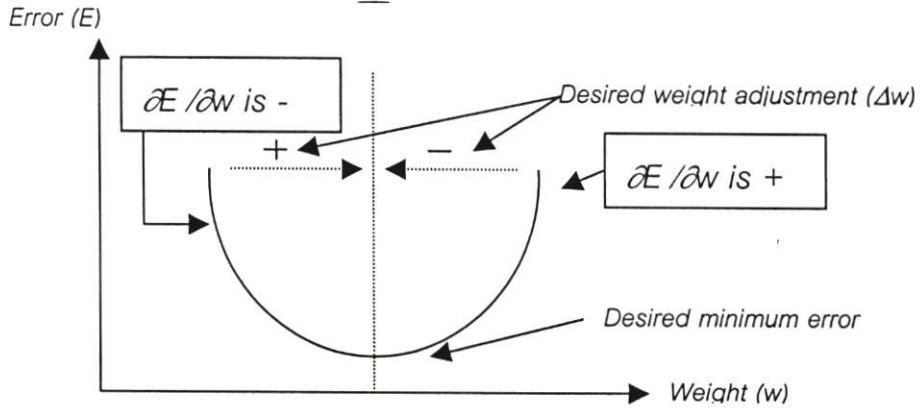
ในกระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม โครงข่ายใช้วิธีการปรับค่าน้ำหนักเพื่อให้โครงข่ายสร้างผลตอบสนองออกมาใกล้เคียงกับผลตอบสนองเป้าหมาย นั่นหมายความว่าค่าความผิดพลาดจะมีค่าลดลงไปเรื่อยๆจนกระทั่งถึงจุดต่ำที่สุด (Global minimum)



รูปที่ 3.11 แสดงการทำงานของเกรเดียนต์เดสเซนต์ โดยการทำให้ค่าความผิดพลาดลดลงไปสู่ตำแหน่งที่ต่ำที่สุด

เกรเดียนต์เดสเซนต์ (Gradient Descent) จะเป็นวิธีที่ใช้ในการปรับค่าน้ำหนักของโครงข่ายจนเป็นผลให้ค่าความผิดพลาดของโครงข่ายวิ่งเข้าสู่จุดต่ำสุด โดยการหาค่าเกรเดียนต์ (Gradient) ซึ่งก็คือวิธีการหาค่าดิฟเฟอเรนเชียลของค่าผิดพลาดระหว่างค่าเอาต์พุตเป้าหมายกับค่าเอาต์พุตจริงเทียบกับค่าน้ำหนัก จากนั้นก็จะทำการปรับปรุงค่าของน้ำหนักไซแนปส์โดยเป็นสัดส่วนกับค่าดิฟเฟอเรนเชียลของค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น ซึ่งการปรับปรุงน้ำหนักของโครงข่ายจะคำนึงถึงการเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดในทิศทางที่ลาดลง (Descend) ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.11

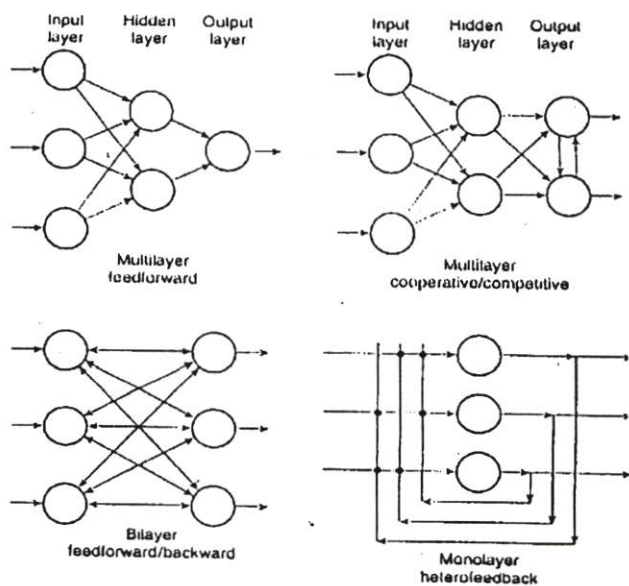
ในรูปที่ 3.12 แสดงวิธีการปรับค่าน้ำหนักเพื่อให้ค่าความผิดพลาด หรือค่า Error (E) ลู่เข้าสู่จุดต่ำสุด ซึ่งหากค่า $\partial E / \partial w$ หรือค่าเกรเดียนต์มีค่าเป็นบวก ค่า Δw จะต้องมีค่าเป็นลบ ในการกลับกัน หากค่า $\partial E / \partial w$ หรือค่าเกรเดียนต์มีค่าเป็นลบ ค่า Δw จะต้องมีค่าเป็นบวก



รูปที่ 3.12 แสดงวิธีการปรับค่าน้ำหนักตามวิธีเกรเดียนต์เดสเซนต์ โดยการทำให้ค่าความผิดพลาดลดลงไปสู่ตำแหน่งที่ต่ำที่สุด

3.2.5 แบบและลักษณะของโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network Topologies)

โครงข่ายประสาทเทียมจะประกอบด้วยเซลล์ประสาทหรือนิวรอลจำนวนมากที่ถูกเชื่อมโยงเข้าด้วยกันในเส้นทางที่แน่นอน รูปแบบที่ใช้กันส่วนมากจะแสดงได้ในรูปที่ 3.13 ซึ่งวงกลมจะแสดงถึงเซลล์ประสาท จากรูปจะเป็นโครงข่ายแบบหลายชั้น โดยปกติรูปแบบอินพุตจะถูกป้อนเข้าสู่ชั้นอินพุต และผลตอบสนองของแต่ละนิวรอลจะถูกส่งเป็นอินพุตต่อไปในแต่ละชั้น และผลตอบสนองหรือ เอาท์พุตสุดท้ายของโครงข่ายจะแสดงที่โหนดแต่ละตัวในชั้นเอาท์พุต ส่วนชั้นระหว่างชั้นอินพุต และชั้นเอาท์พุต เรียกว่า ชั้นซ่อน (Hidden Layer) ที่อาจจะมีจำนวนชั้นเป็น 1 หรือมากกว่านี้ก็ได้



รูปที่ 3.13 แสดงตัวอย่างต้นแบบของโครงข่ายประสาทเทียม

3.2.6 ความสามารถในการแยกแยะความแตกต่างของโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network Discrimination Ability)

โครงข่ายประสาทเทียมจะถูกฝึกหัดให้จดจำรูปแบบ โดยการเรียนรู้ตามตัวอย่างที่ต้องการสอนโครงข่าย โครงข่ายจะสามารถแยกแยะรูปแบบอินพุตต่างๆที่ป้อนให้กับโครงข่าย และมันจะสร้างผลตอบสนองเอาต์พุตที่ต้องการ อย่างไรก็ตาม ลักษณะของโครงข่ายอาจมีข้อจำกัดในการแยกแยะรูปแบบของอินพุตบางกรณี เช่นตัวอย่างปัญหา Exclusive - OR ซึ่งมีรูปแบบของอินพุตเป็น $(+1 -1)$, $(-1 +1)$, $(+1 -1)$ และ $(-1 +1)$ ซึ่งหากกำหนดให้โครงข่ายแยกแยะโดยการแบ่งอินพุตเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกคือ $(+1 +1)$ และ $(-1 -1)$ และกลุ่มที่สองคือ $(+1 -1)$ และ $(-1 +1)$ โดยกำหนดให้โครงข่ายสร้างผลตอบสนองเอาต์พุตเป็น 1 เมื่อหนึ่งในอินพุตทั้งสองของกลุ่มแรกถูกป้อนเข้าสู่โครงข่าย และจะสร้างผลตอบสนองเป็น -1 เมื่อหนึ่งในรูปแบบทั้งสองของกลุ่มที่สองถูกป้อนเข้าสู่โครงข่าย การแยกแยะรูปแบบของอินพุตทั้งสองกลุ่มอาจจะดูเหมือนเป็นปัญหาเล็กน้อยที่สามารถแก้ไขได้อย่างง่ายดายมาก โดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในลักษณะเช่นเดียวกับจำนวนของรูปแบบและกลุ่มที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามโครงข่ายของเปอร์เซปตรอน (Perceptron) เริ่มต้นของ Rosenblatt ไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ แต่เปอร์เซปตรอนแบบหลายชั้นที่ถูกพัฒนาขึ้นในเวลาต่อมา สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ จะเห็นได้ว่าความสามารถในการแยกแยะของโครงข่ายจะอยู่บนพื้นฐานของคุณลักษณะความเป็นเชิงเส้น (Linear) หรือไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ของโครงข่ายนั่นเอง ซึ่งก็คือลักษณะของฟังก์ชันที่เลือกใช้ในนิวรอลแต่ละตัว ดังนั้น จำนวนของรูปแบบซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมมีความสามารถในการแยกแยะได้จะถูกเรียกว่า ความสามารถในการแยกแยะ (Discriminating Ability) โดยโครงข่ายจะถูกวัดโดยจำนวนที่มากที่สุดของรูปแบบอินพุตที่มันสามารถแบ่งแยกได้ หรือหาเอกลักษณ์ได้อย่างชัดเจน และโครงข่ายจะจัดหาผลตอบสนองเพียงคำตอบเดียว ความสามารถของโครงข่ายนี้จะประยุกต์ใช้อย่างกันอย่างมากมายในปัญหาการจดจำรูปแบบการทดสอบ

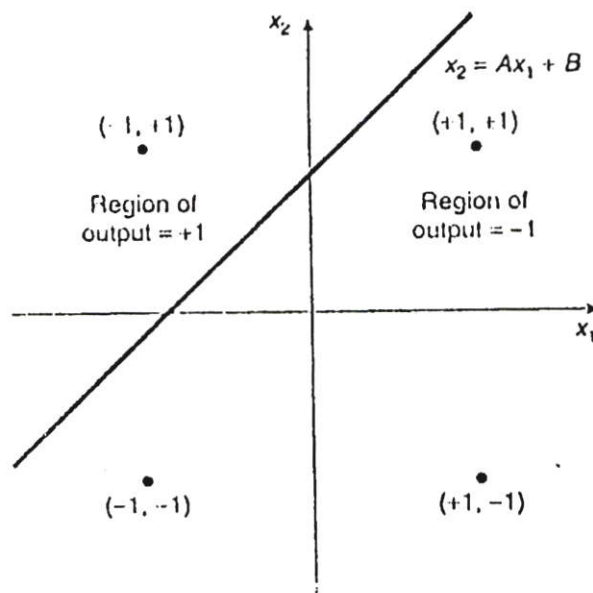
3.2.7 โครงข่ายประสาทเทียมที่แบ่งแยกได้อย่างเชิงเส้น (Linearly Separable Artificial Neural Networks)

ในการอธิบายโครงข่ายประสาทเทียมที่สามารถแบ่งแยกปัญหาได้อย่างเชิงเส้น เมื่อพิจารณา รูปแบบอินพุตที่มีลักษณะไบนารี $(+1 +1)$, $(-1 +1)$, $(+1 -1)$ และ $(-1 -1)$ โดยกำหนดให้โครงข่ายสร้างผลตอบสนองเป็น 1 เมื่อรูปแบบอินพุต $(-1 +1)$ ถูกป้อนเข้าสู่โครงข่ายเรียกว่าเป็นกลุ่ม 1 และโครงข่ายจะสร้างผลตอบสนองเป็น 0 เมื่อรูปแบบ $(+1 -1)$, $(+1 +1)$ และ $(-1 -1)$ ตัวใดตัวหนึ่งทั้งสามตัวถูกป้อนเข้าสู่โครงข่ายเรียกว่าเป็นกลุ่ม 0 รูปแบบอินพุตทั้งสี่สามารถพิจารณาได้ในระนาบสองมิติเพราะรูปแบบอินพุตมีจำนวนอินพุตเท่ากับ 2 เพราะฉะนั้นในกรณีที่มีจำนวนอินพุตมีค่าเท่ากับ 3 เช่น (011) ควรจะพิจารณาในรูปแบบ 3 มิติ และในกรณีที่อินพุตมีจำนวนที่มากกว่า 3 จะไม่

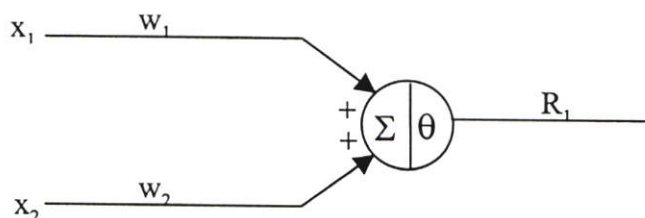
แสดงอยู่ในรูปของกราฟมิติ เนื่องจากมีความยุ่งยากในทางกราฟโดยจะแสดงให้เห็นอยู่ในรูปของสมการคณิตศาสตร์แทน

จากรูปที่ 3.14 จะพบว่าเส้นตรงสามารถแบ่งแยกส่วนของระนาบ 2 มิติได้เป็น 2 ส่วน โดยแต่ละส่วนก็คือ กลุ่มของปัญหาที่ถูกแยกแยะได้แล้วตามที่กำหนดไว้นั่นเอง

จากสมการเส้นตรงโดยทั่วไปคือ $y = Ax + B$, สำหรับตัวอย่างนี้เส้นตรงจะถูกสมมุติ โดยฟังก์ชัน $x_2 = 1.1x_1 + 0.8$ โดยแยกระนาบ x_1, x_2 เป็น 2 ส่วน ตามกลุ่มที่ต้องการ โดยพื้นฐานนี้ ถ้าเรามีโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งสามารถหาเอกลักษณ์หรือแบ่งแยกจุดทั้ง 4 เป็นกลุ่มที่ต้องการ 2 กลุ่ม ดังนั้นเราจะได้โครงข่ายประสาทเทียมที่จดจำรูปแบบได้



รูปที่ 3.14 แสดงความสามารถในการแบ่งแยกกลุ่มรูปแบบอินพุตทั้งสองอย่างเป็นเชิงเส้น



รูปที่ 3.15 แสดงโครงข่ายประสาทเทียมอย่างง่ายซึ่งยังไม่รวมฟังก์ชันกระตุ้น

เราสามารถสร้างโครงข่ายซึ่งถูกอธิบายด้วยผลของสมการ $x_2 = Ax_1 + B$ โดย A และ B คือพารามิเตอร์ของโครงข่าย ดังนั้นถ้าเราออกแบบโครงข่ายที่มีพารามิเตอร์ $A = 1.1$ และ $B = 0.8$ โครงข่ายจะสร้างผลตอบสนองเอาต์พุตที่ต้องการสำหรับรูปแบบปัญหาทั้ง 4 เมื่อป้อนเข้าที่อินพุตของโครงข่าย ในความเป็นจริงจะพบว่ามีจำนวนพารามิเตอร์ A และ B ที่จะสร้างผลตอบสนองที่ต้องการ คือสามารถแก้ปัญหาได้ครบทั้ง 4 รูปแบบ มีมากจนนับไม่ถ้วน ซึ่งก็คือมีเส้นตรงจำนวนมากที่ยังสามารถแบ่งกลุ่มของปัญหาทั้งสองได้อย่างเป็นเชิงเส้น ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของโครงข่ายที่สามารถแก้ปัญหาได้ดีที่สุดจะถูกคำนวณได้ดังนี้

เมื่อพิจารณาอินพุตจำนวน 2 อินพุตของนิเวศ 1 ตัวดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3.15 สภาวะชเรชโฮลด์ที่วิกฤติจะหาได้ดังนี้

$$R_i = x_1 w_{i1} + x_2 w_{i2} - \theta_i = 0 \quad (3.6)$$

ซึ่งจะได้

$$x_2 = -\left[\frac{w_{i1}}{w_{i2}}\right]x_1 + \frac{\theta_i}{w_{i2}} = Ax_1 + B \quad (3.7)$$

โดยที่ $A = -\left[\frac{w_{i1}}{w_{i2}}\right]$ คือความชันของสมการ และ $B = \frac{\theta_i}{w_{i2}}$ คือ จุดตัดของเส้นตรงบนแกน x_2

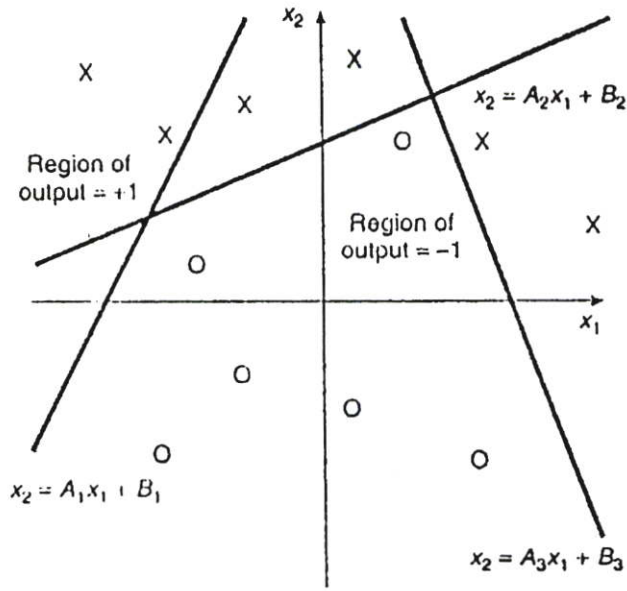
จากความสัมพันธ์เหล่านี้ พารามิเตอร์ θ_i , w_{i1} , และ w_{i2} จะหาค่าได้ สำหรับ $A = 1.1$ และ $B = 0.8$ และปรับ θ ให้เป็นค่าชเรชโฮลด์ที่มีค่าน้อยเช่น 0.2 ซึ่งจะได้ค่า $w_{i1} = 2.75$ และ $w_{i2} = -2.5$

จากตัวอย่างข้างต้นจะพบว่านิเวศเพียง 1 ตัวสามารถที่จะแบ่งหมวดหมู่ของกลุ่มปัญหาออกเป็นลักษณะเชิงเส้นได้ถ้ากลุ่มของปัญหานั้นสามารถที่จะแยกเป็นสองกลุ่มได้อย่างเป็นเชิงเส้น และปัญหาไม่มีความซับซ้อนมากนัก

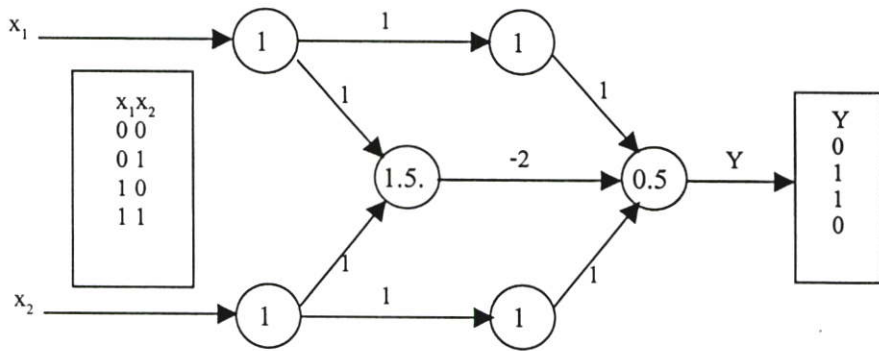
3.2.8 โครงข่ายประสาทเทียมที่แบ่งแยกได้อย่างเชิงเส้นหลายตัว (Multilinear Artificial Neural Network)

โครงข่ายประสาทเทียมชนิดนี้จะสามารถแบ่งแยกกลุ่มของจุดบนระนาบ x_1 x_2 ได้เป็น 2 กลุ่มหรือมากกว่า โครงข่ายประกอบด้วยชุดของฟังก์ชันที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งแต่ละฟังก์ชันจะมีความชันและจุดตัดแกนที่ต่างกันดังที่แสดงไว้ดังรูปที่ 3.16 ซึ่งสามารถแก้ปัญหาของ Exclusive - OR โดยการใช้องค์ข่ายประสาทเทียมที่มีลักษณะ Feed- Forward Multilinear และได้ทำการเรียนรู้รูป

แบบอินพุตที่ต้องการให้แบ่งแยกแล้ว รูปที่ 3.17 ได้แสดงลักษณะของโครงข่ายประสาทเทียมที่แบ่งแยกได้อย่างเชิงเส้นหลายตัว



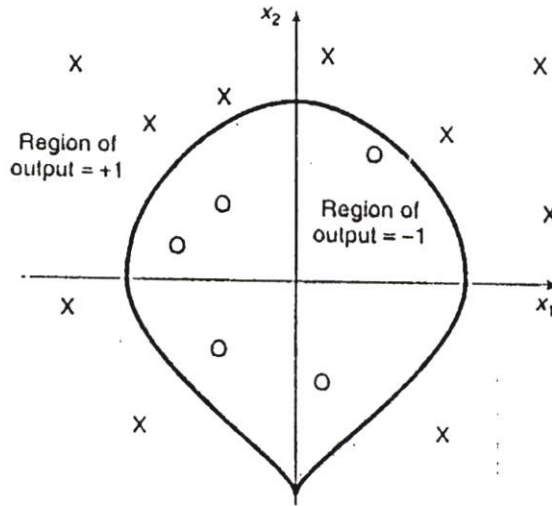
รูปที่ 3.16 แสดงความสามารถในการแบ่งแยกกลุ่มรูปแบบอินพุตทั้งสี่อย่างเป็นเชิงเส้น โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่แบ่งแยกได้อย่างเชิงเส้นหลายตัว



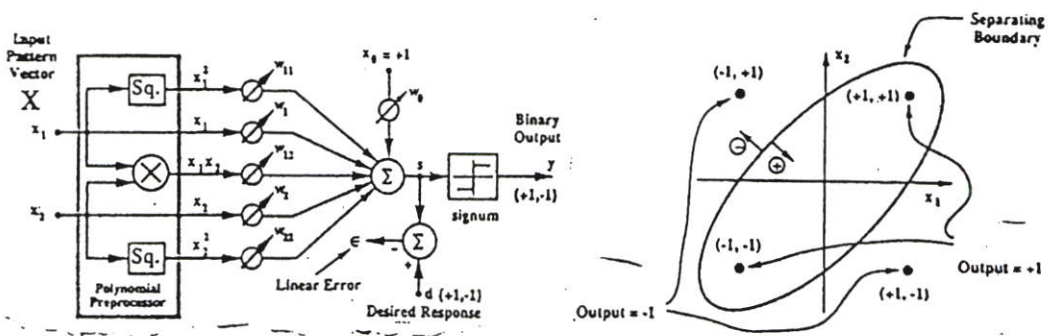
รูปที่ 3.17 แสดงโครงข่ายประสาทเทียมที่แบ่งแยกได้อย่างเชิงเส้นหลายตัว ซึ่งสามารถแก้ปัญหา Exclusive - OR ได้

3.2.9 โครงข่ายประสาทเทียมที่แบ่งแยกได้อย่างไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Separable Artificial Neural Networks)

ในโครงข่ายประสาทเทียมที่แบ่งแยกกลุ่มของปัญหาได้อย่างไม่เป็นเชิงเส้นนี้ โครงข่ายจะมีการทำงานอยู่บนพื้นฐานของฟังก์ชันกระตุ้นที่ไม่เป็นเชิงเส้นบนนิเวศของแต่ละตัว ขึ้นอยู่กับความไม่เป็นเชิงเส้นของอินพุตซึ่งอาจจะมีความซับซ้อนมาก ตัวอย่างดังรูป 3.18



รูปที่ 3.18 แสดงการแบ่งแยกหมวดหมู่ของปัญหาที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่แบ่งแยกได้ไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 3.19 แสดงการแบ่งกลุ่มปัญหาที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นจากระบบที่มีเปอร์เซปตรอนหนึ่งตัวโดยมีพื้นฐานจากการวิเคราะห์ในทางคณิตศาสตร์

ในกรณีที่ทราบรูปแบบอินพุตและเอาต์พุตเป้าหมายอย่างชัดเจน เราสามารถสร้างแบบจำลองของเปอร์เซปตรอนขึ้นใหม่ โดยมีพื้นฐานมาจากสมการคณิตศาสตร์ เช่นในกรณีของปัญหา Exclusive-OR โดยสามารถแบ่งกลุ่มปัญหาโดยใช้สมการวงรีแทนการใช้สมการเส้นตรงหลายเส้นในการการแบ่งกลุ่ม ดังที่แสดงในรูป 3.19

3.2.10 เปอร์เซปตรอน (Perceptron)

เปอร์เซปตรอน คือระบบโครงข่ายประสาทเทียมที่ต้องการเรียนรู้แบบลักษณะที่มีผู้สอน นั่นคือ จะเป็นระบบการจัดกลุ่มรูปแบบซึ่งจัดจํารูปแบบอินพุต และสามารถแบ่งแยกรูปแบบอินพุตได้อย่างเหมาะสมแม้ว่าอาจสิ่งรบกวนในอินพุต กลไกในการเรียนรู้ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของข้อผิดพลาดระหว่างเป้าหมาย และข้อมูลเอาต์พุตจริงจากโครงข่ายในระหว่างช่วงการเรียนรู้

สำหรับทรานเฟอร์ฟังก์ชันของเปอร์เซปตรอนของ Rosenblatt จะใช้ฟังก์ชันกระตุ้นที่เป็นลักษณะฮาร์ด - ลิมิตเตอร์

$$f_{HL}(y) = \begin{cases} 1 & y > 0 \\ 0 & y \leq 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

โดยเทอมในการไบอัสโดยทั่วไปจะตั้งค่าไว้ที่ 1 และค่าไบอัสของน้ำหนักไซแนปส์ w_0 จะถูกรวมในส่วนของเวกเตอร์อินพุต โดยที่ $X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n, 1]$

ในระหว่างการฝึกหัดเปอร์เซปตรอน เอาต์พุตที่ได้จากผลตอบสนองของโครงข่าย O จะถูกปรับเทียบกับเอาต์พุตเป้าหมาย T ในแต่ละรูปแบบอินพุต และค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้น หรือค่าความผิดพลาด E จะถูกใช้ในการปรับค่าน้ำหนักไซแนปส์ที่เป็นพื้นฐานบนกระบวนการเรียนรู้ ค่าความผิดพลาดดังกล่าวสามารถแสดงเป็นสมการดังต่อไปนี้

$$E = T - O \quad (3.9)$$

โดยที่ E คือค่าความผิดพลาดที่วัดได้จากโครงข่าย

T คือค่าผลตอบสนองเป้าหมาย

O คือผลตอบสนองจริงของโครงข่าย

การเปลี่ยนแปลงของค่าน้ำหนักไซแนปส์จะถูกคำนวณได้จากทฤษฎีของเกรเดียนต์เดสเซนต์

$$\Delta w = \eta \nabla_w E(w) = \eta \left[T - f(w \cdot x) \right] x \quad (3.10)$$

$$\Delta w = \eta [T - f(w_{(k)} x)] x \quad (3.11)$$

และค่าน้ำหนักที่ต้องปรับปรุงใหม่จะเป็นดังสมการต่อไปนี้

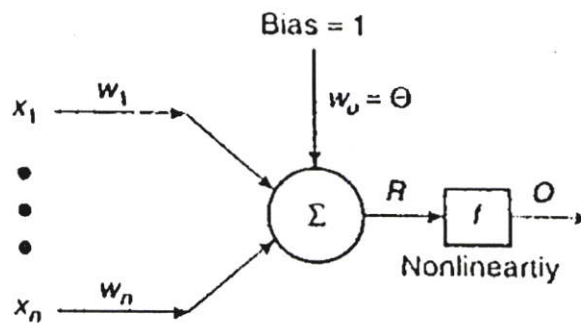
$$w_{(k+1)} = w_{(k)} + \Delta w = w_{(k)} + \eta [T - f(w_{(k)} x)] x \quad (3.12)$$

โดยที่ $w_{(k+1)}$ คือค่าน้ำหนักใหม่หลังจากผ่านกระบวนการเรียนต่อรูปแบบอินพุตในรอบที่ k

$w_{(k)}$ คือค่าน้ำหนักในรอบที่ผ่านมา

Δw คือค่าส่วนเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของเกรเดียนต์เดสเซนต์

η คือค่าอัตราการเรียนรู้ (Learning Rate)



รูปที่ 3.20 โมเดลเปอร์เซปตรอน 1 ตัว

ค่าอัตราการเรียนรู้ η จะมีผลต่อความเร็วและเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ค่าผิดพลาดเข้าสู่จุดต่ำสุด ซึ่งหากกำหนดให้มีค่าบวกมากๆ จะทำให้อัตราการเคลื่อนที่ของค่าผิดพลาดจะมีค่ามาก และเวลาในการเรียนรู้จะเร็วแต่จะทำให้เกิดการแกว่งในการวิ่งเข้าหาจุดต่ำสุด แต่หากกำหนดให้มีค่าบวกน้อยๆ จะทำให้อัตราการเคลื่อนที่ของค่าผิดพลาดจะมีค่าน้อย ทำให้ใช้เวลาในการเรียนรู้มาก เนื่องจากจำนวนรอบในการปรับน้ำหนักมีค่ามาก แต่จะทำให้เข้าสู่จุดต่ำสุดที่แน่นอนกว่า

หากสรุปขั้นตอนในการเรียนรู้ของเปอร์เซปตรอน และเงื่อนไขที่ต้องกำหนดก่อนการเรียนรู้จะเป็นดังต่อไปนี้

1. เลือกกลุ่มของเวกเตอร์อินพุต $\{x\}$
2. เลือกกลุ่มของเอาต์พุตเป้าหมาย $\{O\}$
3. เลือกค่าอัตราการเรียนรู้ที่เป็นค่าบวกที่มีค่าน้อย (η)

4. เลือกฟังก์ชันกระตุ้นที่เหมาะสม
5. หลักการตัดสินใจหยุดของกระบวนการฝึกหัดโครงข่าย โดยการกำหนดค่าความผิดพลาดน้อยๆที่สามารถยอมรับได้ หรือโดยปรับตั้งค่าที่มากที่สุดของจำนวนรอบในการคำนวณ (Maximum Epoch) อย่างไรก็ตามวิธีที่ใช้หยุดขบวนการตัวหลังนี้จะไม่ได้ประกันว่าเป็นผลลัพธ์ของค่าน้ำหนักนั้นจะอยู่ในสภาวะคงตัว
6. กำหนดค่าเริ่มต้นของค่าชเรชโซลด์ และค่าน้ำหนักไซแนปส์โดยตั้งค่า $w_j(0)$ และ θ เป็นค่าสุ่มที่มีจำนวนน้อยๆ
7. ป้อนรูปแบบอินพุต x_p และพิจารณาเอาต์พุตเป้าหมาย T_p ที่สอดคล้องกันเมื่อ P คือจำนวนของแบบในการกลุ่มของรูปแบบ
8. คำนวณค่าเอาต์พุตจริง (O) จาก

$$O_{(k)} = f \left[\sum_{j=0}^N w_{j(k)} x_{j(k)} \right] \quad (3.13)$$

เมื่อ N คือจำนวนอินพุตทั้งหมดที่เชื่อมโยงกับนิวรอล หรืออาจอยู่ในรูปของเวกเตอร์

$$O_{(k)} = f(w_{(k)}^T x) \quad (3.14)$$

9. ปรับค่าน้ำหนักไซแนปส์โดยใช้ความสัมพันธ์ของรอบการฝึกหัด

$$w_{(k+1)} = w_{(k)} + \eta [T_{(k)} - w_{(k)} x_{(k)}] x_{(k)} \quad \text{สำหรับ } 0 < k \leq N-1 \quad (3.15)$$

ค่าเอาต์พุตของเปอร์เซปตรอนจะถูกต้องในทุกรูปแบบอินพุต เมื่อค่าน้ำหนักไซแนปส์และค่าชเรชโซลด์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรืออยู่ในสภาวะคงตัว

10. กลับไปยังขั้นตอนที่ 7-9

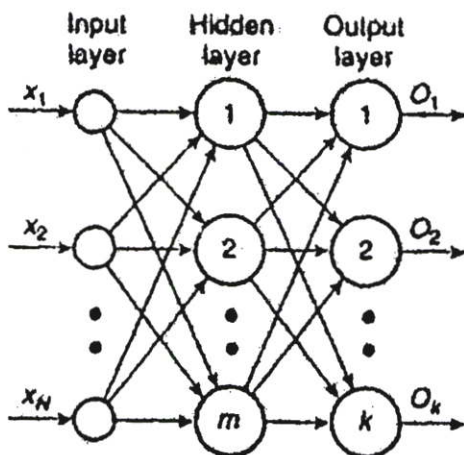
3.2.11 เปอร์เซปตรอนแบบหลายชั้น (Multilayer Perceptron)

จากที่กล่าวมาแล้วว่าโครงข่ายเปอร์เซปตรอนที่มีจำนวนชั้นเพียง 1 ชั้น จะมีข้อจำกัดในการแยกแยะรูปแบบอินพุตคือสามารถแยกแยะปัญหาในลักษณะที่เป็นเชิงเส้นเท่านั้น ซึ่งข้อจำกัดดังกล่าวจะไม่เกิดขึ้นหากจำนวนชั้นในโครงข่ายมีมากกว่า 1 ชั้น โดยปกติเปอร์เซปตรอนแบบหลายชั้น (MLP) จะประกอบด้วยเปอร์เซปตรอนหลายๆ ตัวต่ออยู่ในโครงสร้างที่มีลำดับชั้นลดลั่นกันลง

ไปโดยอยู่ในรูปของการทำงานที่ไปข้างหน้า (Feed Forward) ซึ่งระหว่างชั้นอินพุตกับชั้นเอาต์พุต อาจมีชั้นซึ่งเรียกว่าชั้นซ่อน (Hidden Layer) จำนวนหนึ่งชั้น หรือมากกว่า ดังที่ได้แสดงรูปที่ 3.21 จำนวนของชั้นซ่อนและจำนวนของนิวรอนในแต่ละชั้นจะมีค่าไม่คงที่ ซึ่งแต่ละชั้นอาจจะมีจำนวนนิวรอนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับงานประยุกต์ใช้งาน ซึ่งจะเป็นคำถามที่ว่าผู้พัฒนาจะต้องใช้จำนวนชั้นซ่อนจำนวนเท่าใด และจำนวนนิวรอนต่อชั้นควรเป็นเท่าใด ซึ่งโดยปกติจะใช้ขบวนการตัดและพยายาม (Cut - and - Try Process) นั่นคือใช้นิวรอนให้เยอะๆ ไว้ก่อน แล้วค่อยๆ ลดลงมาจนได้จำนวนที่น้อยที่สุดที่โครงข่ายประสาทเทียมยังคงเรียนรู้ได้ โดยเทคนิคนี้จะเรียกว่า พรุนนิ่ง (Pruning)

อีกวิธีหนึ่งที่จะทำให้แน่ใจว่าตัวอย่างที่ใช้ในกระบวนการฝึกหัดโครงข่ายนั้นพอที่จะครอบคลุมข้อมูลทั้งหมดได้ ก็คือพยายามใช้ตัวอย่างที่มีจำนวนมากในการฝึกหัดโครงข่าย เพื่อที่ว่าความรู้ที่มากขึ้นจะเป็นข้อมูลในการสร้างผลตอบสนองของโครงข่ายได้ดีขึ้น

จากรูปแบบของเปอร์เซปตรอนแบบชั้นเดียวที่สามารถสร้างการตัดสินใจเป็น 2 ส่วน และเมื่อเพิ่มเปอร์เซปตรอนเป็นแบบสองชั้น ทำให้โครงข่ายสามารถที่จะสร้างขอบเขตการตัดสินใจที่มีลักษณะเป็นส่วนที่เว้านูน หรือเป็นหลายเหลี่ยมได้ และเปอร์เซปตรอนแบบสามชั้นสามารถสร้างขอบเขตของการตัดสินใจที่มีความซับซ้อนอย่างมากในรูปแบบอินพุตได้



รูป 3.21 แสดงเปอร์เซปตรอนแบบหลายชั้น

เปอร์เซปตรอนแบบหลายชั้นจะสามารถใช้ขบวนการเรียนรู้ที่ต่างกันก็ได้ โดยปกติจะใช้กฎของเดลต้า (Delta Rule) และวิธีการแพร่ย้อนกลับ (Back Propagation) และหากปัญหาที่ต้องการแยกแยะเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น อาจจะใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแบบซิกมอยด์ในนิวรอนแต่ละชั้น ซึ่งมีสมการดังต่อไปนี้

$$f_s(R) = \frac{1}{(1 + e^{-kR})} \quad (3.16)$$

โดยที่ k คือค่าเกน (Gain) ของฟังก์ชันซิกมอยด์ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงได้จาก $-\alpha$ ถึง $+\alpha$ โดยค่าเกนนี้จะทำให้ฟังก์ชันซิกมอยด์มีลักษณะของการลาดชันที่แตกต่างกัน เช่นหากกำหนดให้ค่าเกนนี้มีค่าเป็นบวก และมีค่าน้อยกว่า 1 ฟังก์ชันที่ได้จะมีลักษณะที่ลาดชันน้อย แต่หากกำหนดให้ค่าเกนมีค่ามากกว่า 1 ฟังก์ชันที่ได้จะมีความชันมาก ซึ่งหากค่าเกนนี้มีค่าเป็นบวก ฟังก์ชันจะอยู่ในลักษณะของโมโนโตนิคชนิดไม่ลด แต่หากกำหนดให้ค่าเกนมีค่าเป็นลบ จะทำให้ฟังก์ชันอยู่ในลักษณะของโมโนโตนิคชนิดลด ประโยชน์ของการใช้ฟังก์ชันซิกมอยด์เป็นฟังก์ชันกระตุ้นก็คือฟังก์ชันที่สามารถหาค่าดิฟเฟอเรนเชียลได้ทุกๆค่า ทำให้การปรับค่าน้ำหนักของโครงข่ายซึ่งเป็นส่วนสำคัญกับค่าเกรเดียนต์ของผลรวมค่าความผิดพลาด ซึ่งจะต้องใช้ฟังก์ชันที่หาอนุพันธ์ได้ในทุกๆค่าโดเมน ซึ่งอนุพันธ์ของฟังก์ชันซิกมอยด์สามารถแสดงให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันปกติได้ นั่นคือ $f'(s) = kf(s)[1 - f(s)]$ ซึ่งทำให้ง่ายในการหาผลลัพท์

3.2.12 กระบวนการเรียนรู้แบบเดลต้า (Delta Learning Rule)

กระบวนการเรียนรู้แบบเดลต้าได้ถูกนำเสนอโดย Windrow และ Hoff ซึ่งในบางครั้งเรียกว่า Windrow - Hoff Learning Rule ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของวิธีการหาค่าผิดพลาดกำลังสองที่น้อยที่สุด (Least - Square - Error Minimization Method) เป้าหมายของวิธีนี้ คือการแสดงความแตกต่างของเอาต์พุตจริง และเอาต์พุตเป้าหมายในรูปของอินพุตและค่าน้ำหนักไซแนปส์ และพยายามทำให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นสมการของค่าความผิดพลาด (Error Function) จะเป็นดังต่อไปนี้

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (T_i - O_i)^2 \quad (3.17)$$

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (T_i - f_i \sum_{j=1}^m (w_{ij} x_j))^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (T_i - f_i(w_i, x))^2 \quad (3.18)$$

โดย E คือค่าความผิดพลาดกำลังสองที่น้อยที่สุด

O_i คือเอาต์พุตจริงที่ได้จากโครงข่าย โดยแสดงอยู่ในรูปเวกเตอร์

T_i คือเอาต์พุตเป้าหมาย หรือเอาต์พุตที่ต้องการ โดยแสดงอยู่ในรูปเวกเตอร์

w_{ij} คือค่าน้ำหนักไซแนปส์ระหว่างอินพุตที่ j กับนิวรอนที่ i

x_j คือค่าอินพุตลำดับที่ j ที่ป้อนให้กับโครงข่าย

f_i คือฟังก์ชันกระตุ้นที่เลือกใช้นิวรอน i

w_i คือค่าน้ำหนักไซแนปส์ที่เชื่อมโยงกับนิวรอน i แสดงอยู่ในรูปของเมตริกซ์

x คือค่าอินพุตที่ป้อนให้กับโครงข่ายแสดงอยู่ในรูปของเวกเตอร์

n คือจำนวนนิวรอนในชั้นเอาต์พุต หรือจำนวนเอาต์พุตของโครงข่าย

m คือจำนวนอินพุตทั้งหมดที่ป้อนให้กับโครงข่าย

ค่าเกรเดียนต์ หรือค่าดิฟเฟอเรนเชียลของค่าความผิดพลาดเทียบกับค่าน้ำหนักจะได้

$$\nabla_w E(w) = \frac{\partial E(w)}{\partial w_i} = -(T_i - O_i) f'_i(w_i x) x \quad (3.19)$$

เมื่อเราจะพิจารณาให้อยู่ในค่าความผิดพลาดมีทิศทางเคลื่อนที่ไปยังค่าที่น้อยที่สุด ดังนั้น หากค่าเกรเดียนต์มีเป็นบวก การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักจะต้องลดลง แต่หากค่าเกรเดียนต์มีค่าเป็นลบ การเปลี่ยนของน้ำหนักจะต่อเพิ่มขึ้นดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3.12 ดังนั้นจึงเติมเครื่องหมายลบให้กับค่าเกรเดียนต์ที่ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta w_i = -\eta \nabla_w E(w) \quad (3.20)$$

โดยที่ค่า η คือ อัตราการเรียนรู้ซึ่งมีค่าคงที่ และมีเครื่องหมายเป็นบวกใช้สำหรับกำหนด Step Size หรือขนาดของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในแต่ละรอบการเรียนรู้ ดังนั้น Δw_i จะเป็น

$$\Delta w_i = \eta (T_i - O_i) f'_i(w_i x) x \quad (3.21)$$

ดังนั้นการปรับปรุงเวกเตอร์ค่าน้ำหนักไซแนปส์จะได้จาก

$$w_{i(k+1)} = w_{i(k)} + \Delta w = w_{i(k)} + \eta (T_i - O_i) f'_i(w_i x) x \quad (3.22)$$

โดยที่ $w_{i(k+1)}$ คือค่าน้ำหนักใหม่หลังจากผ่านกระบวนการเรียนต่อรูปแบบอินพุตในรอบที่ k

$w_{i(k)}$ คือค่าน้ำหนักในรอบที่ผ่านมา

Δw คือค่าส่วนเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของเกรเดียนต์เดสเซนต์

ถ้าเราสมมุติให้ฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้เป็นฟังก์ชันซิกมอยด์ที่มีเกนเท่ากับ 1 ค่าเกรเดียนต์ของฟังก์ชันดังกล่าวจะถูกประมาณค่าได้โดยความสัมพันธ์ของ

$$f'(w_i x_i) = \frac{1}{2} (T_i - O_i^2) \quad (3.23)$$

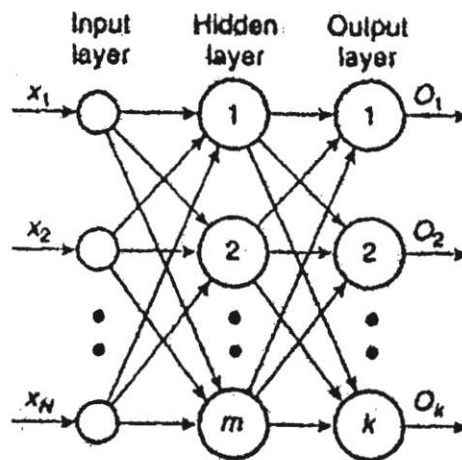
ดังนั้น

$$w_{i(k+1)} = w_{i(k)} + \frac{\eta}{2} (T_i - O_i)(T_i - O_i^2)x \quad (3.24)$$

3.2.13 อัลกอริทึมการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (Back - Propagation learning Algorithm)

อัลกอริทึมการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (BP) ถูกพัฒนาขึ้นโดย Paul Werbos ในปี 1974 และได้ถูกพัฒนาต่ออีกครั้งโดย Rumelhart และ Parleer และถูกใช้อย่างกว้างขวางในเวลาต่อมา โดยเป็นอัลกอริทึมในการเรียนรู้ในโครงข่ายนิวรอลแบบหลายชั้นที่มีลักษณะเป็นการคำนวณที่เคลื่อนที่ไปข้างหน้า (Feed Forward Neural Network) ในลักษณะที่คำนวณไปที่ละชั้น โดยรูปแบบอินพุตจะถูกป้อนเข้าไปในโครงข่ายในชั้นแรก หรือชั้นอินพุต จากนั้นก็จะส่งต่อไปยังชั้นซ่อน ซึ่งชั้นซ่อนอาจมีจำนวน 1 ชั้น หรือมากกว่า จนกระทั่งถึงชั้นสุดท้ายซึ่งก็คือชั้นเอาต์พุต ดังที่ได้แสดงในรูปที่

3.22



รูปที่ 3.22 แสดงเปอร์เซปตรอนแบบหลายชั้นที่มีลักษณะการคำนวณไปข้างหน้า

บนพื้นฐานอัลกอริทึมนี้ โครงข่ายจะเรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นอินพุตและเอาต์พุตที่ป้อน กระบวนการปรับค่าจะเริ่มโดยค่าน้ำหนักไซแนปส์จะถูกคำนวณในช่วงระหว่างการเรียนรู้โครงข่าย โดยทั่วไปความยากของเปอร์เซปตรอนแบบหลายชั้นก็คือ การคำนวณค่าน้ำหนักไซแนปส์ของชั้นซ่อนเพื่อที่จะลดค่าผิดพลาดกำลังสองของเอาต์พุตให้มีค่าน้อยที่สุด ถ้าชั้นซ่อนที่มากขึ้นไปอีกจะทำให้เกิดความยุ่งยากมากขึ้นอีก

ในการปรับปรุงค่าน้ำหนักไซแนปส์ขั้นแรกจะต้องคำนวณความผิดพลาดในชั้นเอาต์พุต ค่าความผิดพลาดนี้จะถูกวัดได้จากความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตจริงจากโครงข่ายและเอาต์พุตที่เป้าหมาย อย่างไรก็ตามในชั้นซ่อน จะไม่สามารถหาค่าความผิดพลาดโดยตรงดังนั้น จะต้องใช้กฎลูกโซ่มาช่วยในการคำนวณหาค่าความผิดพลาดที่ชั้นซ่อน และจะทำให้ความผิดพลาดที่เอาต์พุตมีค่าน้อยที่สุด นั่นคือเป้าหมายท้ายสุดของการเรียนรู้

ระหว่างช่วงในการฝึกหัดโครงข่ายของรูปแบบที่แสดงคือ $\{x^{(k)}, t^{(k)}\}$ โดย $x^{(k)}$ คือรูปแบบอินพุต และ $t^{(k)}$ คือเป้าหมายหรือเอาต์พุตที่ต้องการ หากป้อนรูปแบบอินพุตเข้าไปที่โครงข่าย จะเป็นผลให้มีผลตอบสนองที่เอาต์พุตของแต่ละนิวรอนในแต่ละชั้นจนกระทั่งถึงชั้นเอาต์พุตและความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตจริง และเอาต์พุตเป้าหมายจะเป็นผลให้เกิดค่าความผิดพลาดซึ่งค่าความผิดพลาดนี้ขึ้นอยู่กับค่าของน้ำหนักไซแนปส์ของนิวรอนในแต่ละชั้น จากนั้นโครงข่ายจะทำการแพร่ย้อนกลับค่าความผิดพลาดจากชั้นเอาต์พุตไปที่แต่ละชั้นจนกระทั่งถึงชั้นอินพุตซึ่งในระหว่างการแพร่ย้อนกลับ โครงข่ายจะคำนวณค่าน้ำหนักใหม่เพื่อให้ค่าความผิดพลาดดังกล่าวมีค่าน้อยลง กระบวนการปรับปรุงค่าน้ำหนักไซแนปส์จะขึ้นอยู่กับแพ็คเกจต่างๆ เช่น อัลตราการเรียนรู้ ซึ่งมีผลต่อความเร็ว และความเที่ยงตรงของกระบวนการเรียนรู้

ก่อนที่จะเริ่มขบวนการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ ต้องเตรียมข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็นในการเรียนรู้ดังต่อไปนี้

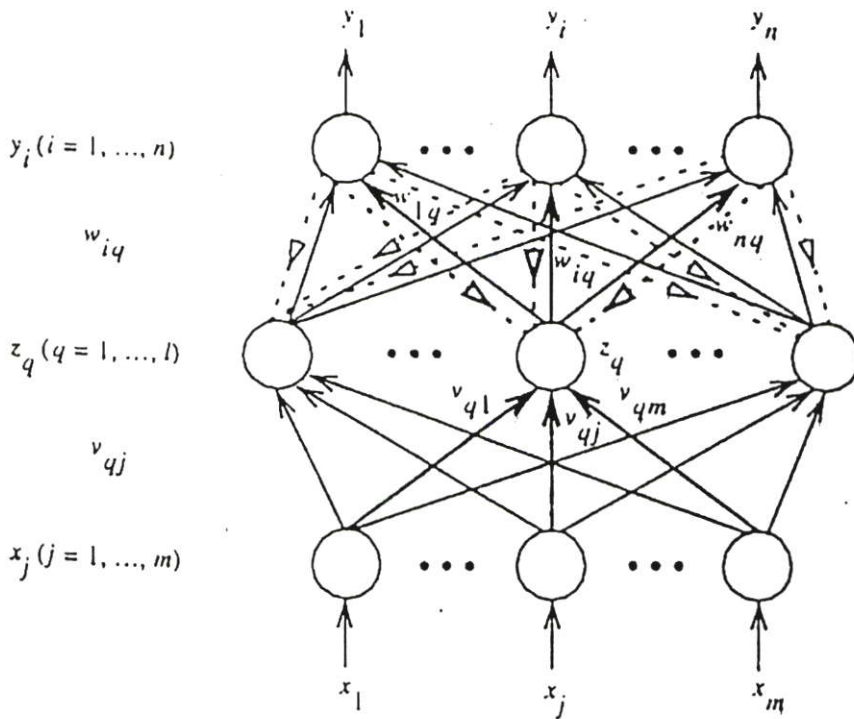
1. กลุ่มของรูปแบบอินพุต และ เป้าหมาย
2. ค่าของอัตราการเรียนรู้
3. เงื่อนไขที่จะทำให้กระบวนการผลของอัลกอริทึมนี้สิ้นสุดลง
4. วิธีการที่จะปรับปรุงค่าน้ำหนักไซแนปส์
5. ฟังก์ชันกระตุ้นที่เหมาะสม
6. ค่าน้ำหนักไซแนปส์เริ่มต้น ซึ่งโดยทั่วไปจะ ใช้การสุ่มค่าซึ่งจะเป็นค่าน้อยๆ

กระบวนการเรียนรู้จะเริ่มต้นโดยการป้อนรูปแบบอินพุต และเอาต์พุตเป้าหมายที่สัมพันธ์กันคู่แรกเข้าไปที่โครงข่าย ค่าเวกเตอร์ของอินพุตจะเป็นผลให้เกิดผลตอบสนองที่นิวรอนของชั้นแรก ซึ่งจะเป็นตัวทำให้เกิดผลตอบสนองในชั้นซ่อนถัดไป โดยลักษณะเช่นนี้จะทำให้เกิดผลตอบสนองสุดท้ายที่แต่ละนิวรอนในชั้นเอาต์พุต

ผลตอบสนองนี้จะถูกเปรียบเทียบกับเอาต์พุตเป้าหมายที่ต้องการ และค่าความแตกต่างหรือค่าความผิดพลาดจะถูกคำนวณจากความผิดพลาดในแต่ละนิวรอนของชั้นเอาต์พุต อัลกอริทึมจะคำนวณค่าน้ำหนักไซแนปส์ในแต่ละชั้นใหม่โดยมีเป้าหมายคือ ค่าความผิดพลาดของเอาต์พุตมีค่าน้อยที่สุด การคำนวณจะเริ่มจากหาค่าความผิดพลาดในชั้นเอาต์พุตแล้วทำการปรับค่าน้ำหนักไซแนปส์ใหม่ จากนั้นอัลกอริทึมต่อไปจะคำนวณค่าความผิดพลาดของเอาต์พุตที่ชั้นซ่อนในชั้น

สุดท้าย แล้วคำนวณค่าน้ำหนักไซแนปส์ใหม่ระหว่างชั้นซ่อนสุดท้าย และชั้นซ่อนก่อนชั้นสุดท้าย อัลกอริทึมจะยังคงดำเนินการคำนวณต่อไป ค่าความผิดพลาดและการคำนวณค่าน้ำหนักไซแนปส์ใหม่จนกระทั่งการคำนวณดำเนินมาถึงชั้นอินพุต จากนั้น อัลกอริทึมจะเลือกรูปแบบของค่าคู่อินพุตกับเอาต์พุตคู่ต่อไปและทำการคำนวณในรูปแบบนี้ต่อไป แม้ว่าผลตอบสนองจะเคลื่อนที่ในทิศทางข้างหน้า (Forward Direction) แต่ค่าน้ำหนักไซแนปส์จะถูกคำนวณในทิศทางย้อนกลับ (Backward Direction) ดังนั้นจึงได้ชื่อว่าการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ

รูปที่ 3.23 แสดงเปอร์เซปตรอนแบบหลายชั้น โดยมีจำนวนชั้นเท่ากับ 3 ชั้น



ถ้าลองพิจารณาเปอร์เซปตรอนที่มีจำนวนชั้นเท่ากับ 3 ชั้น ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3.23 แล้วมาพิจารณาหาสมการของอัลกอริทึมการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ โดยที่กำหนดให้มีจำนวนนิวรอนของชั้นอินพุตเท่ากับ m โดยมีตัวแปรที่บอกลำดับที่ของนิวรอนคือ $j=1..m$ ส่วนในชั้นซ่อนจะมีจำนวนนิวรอนเท่ากับ l โดยมีตัวแปรที่บอกลำดับที่ของนิวรอนคือ $q=1..l$ และในชั้นเอาต์พุตมีจำนวนนิวรอนเท่ากับ n โดยตัวแปรที่บอกลำดับที่ของนิวรอนคือ $i=1..n$ ซึ่งในเส้นทึบในรูปที่ 3.23 แสดงการคำนวณไปข้างหน้า ส่วนเส้นปะแสดงถึงการแพร่ย้อนกลับค่าความผิดพลาด โดยกำหนดให้อินพุตที่ป้อนเข้าโครงข่ายคือ x และเอาต์พุตเป้าหมายคือ t ดังนั้น ในส่วนของการคำนวณแบบไปข้างหน้า จะได้สมการดังต่อไปนี้

ในชั้นซ่อน โดยนิเวรอลลำดับที่ q จะได้รับสัญญาณดังต่อไปนี้

$$net_q = \sum_{j=1}^m v_{qj} x_j \quad (3.25)$$

โดยที่ m คือจำนวนนิเวรอลทั้งหมดในชั้นอินพุต net_q ก็คือสัญญาณกระตุ้นที่เกิดขึ้นภายในนิเวรอลลำดับที่ q และ v_{qj} คือค่าน้ำหนักระหว่างเอาต์พุตในชั้นก่อนหน้าซึ่งก็คือชั้นอินพุตลำดับที่ j กับนิเวรอลลำดับที่ q ในชั้นปัจจุบันซึ่งก็คือชั้นซ่อน

หลังจากนั้น นิเวรอลลำดับที่ q จะนำสัญญาณกระตุ้นดังกล่าวมาผ่านฟังก์ชันกระตุ้น แล้วส่งออกไปที่เอาต์พุต

$$z_q = f_q(net_q) = f_q\left(\sum_{j=1}^m v_{qj} x_j\right) \quad (3.26)$$

โดยที่ f_q คือฟังก์ชันกระตุ้นของนิเวรอลลำดับที่ q จากนั้น เอาต์พุต z_q ที่ได้จากนิเวรอลลำดับที่ q ในชั้นซ่อนจะเป็นอินพุตให้กับนิเวรอลในชั้นเอาต์พุตของนิเวรอลลำดับที่ i

$$net_i = \sum_{q=1}^l w_{iq} z_q = \sum_{q=1}^l w_{iq} f_q\left(\sum_{j=1}^m v_{qj} x_j\right) \quad (3.27)$$

โดยที่ l คือจำนวนนิเวรอลทั้งหมดในชั้นซ่อน net_i ก็คือสัญญาณกระตุ้นที่เกิดขึ้นภายในนิเวรอลลำดับที่ i และ w_{iq} คือค่าน้ำหนักระหว่างเอาต์พุตของนิเวรอลลำดับที่ q ในชั้นก่อนหน้าซึ่งก็คือชั้นซ่อนกับนิเวรอลลำดับที่ i ในชั้นปัจจุบันซึ่งก็คือชั้นเอาต์พุต

หลังจากนั้น นิเวรอลลำดับที่ i จะนำสัญญาณกระตุ้นดังกล่าวมาผ่านฟังก์ชันกระตุ้น แล้วส่งออกไปที่เอาต์พุต

$$y_i = f_i(net_i) = f_i\left(\sum_{q=1}^l w_{iq} z_q\right) = f_i\left(\sum_{q=1}^l w_{iq} f_q\left(\sum_{j=1}^m v_{qj} x_j\right)\right) \quad (3.28)$$

โดยที่ f_i คือฟังก์ชันกระตุ้นของนิเวรอลลำดับที่ i จากนั้น เอาต์พุต y_i ที่ได้จากนิเวรอลลำดับที่ i ในชั้นเอาต์พุตจะเป็นเอาต์พุตของโครงข่ายลำดับที่ i

หลังจากที่การคำนวณแบบไปข้างหน้าจนถึงชั้นเอาต์พุตแล้ว โคจรข่ายก็จะทำการคำนวณค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย จากนั้นก็จะทำการแพร่ย้อนกลับไปยังชั้นซ่อนจนกระทั่งถึงชั้นอินพุต สมการต่อไปนี้เป็นกรคำนวณหาค่าความผิดพลาดกำลังสอง

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (t_i - y_i)^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [t_i - f_i(\text{net}_i)]^2 \quad (3.29)$$

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[t_i - f_i \left(\sum_{q=1}^l w_{iq} z_q \right) \right]^2 \quad (3.30)$$

โดยที่ $E(w)$ คือค่าความผิดพลาดกำลังสองอยู่ซึ่งเป็นผลรวมค่าความผิดพลาดของทุกๆ เอาต์พุต และ n คือจำนวนนิวรอลในชั้นเอาต์พุต และ t_i คือเอาต์พุตเป้าหมาย

จากนั้น ใช้ทฤษฎีของเกรเดียนต์เดสเซนต์มาทำการหาค่าน้ำหนักที่ต้องปรับปรุงใหม่โดยเริ่มปรับปรุงค่าน้ำหนักจากชั้นเอาต์พุตไปจนถึงชั้นอินพุต โดยเริ่มจากค่าน้ำหนักในชั้นซ่อนกับชั้นเอาต์พุต Δw_{iq} ดังสมการต่อไปนี่

$$\Delta w_{iq} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{iq}} \quad (3.31)$$

โดยที่ค่า η คือค่าอัตราการเรียนรู้ และในการหา $\frac{\partial E}{\partial w_{iq}}$ จะต้องใช้กฎลูกโซ่ (Chain rule) มาช่วย ดังนั้น

$$\Delta w_{iq} = -\eta \left[\frac{\partial E}{\partial y_i} \right] \left[\frac{\partial y_i}{\partial \text{net}_i} \right] \left[\frac{\partial \text{net}_i}{\partial w_{iq}} \right] = \eta [t_i - y_i] [f'_i(\text{net}_i)] [z_q] \underline{\Delta} \eta \delta_{oi} z_q \quad (3.32)$$

โดยที่ค่า δ_{oi} คือค่าสัญญาณความผิดพลาดของนิวรอลลำดับที่ i ในชั้นเอาต์พุต ซึ่งก็คือ

$$\delta_{oi} \underline{\Delta} = \frac{\partial E}{\partial \text{net}_i} = - \left[\frac{\partial E}{\partial y_i} \right] \left[\frac{\partial y_i}{\partial \text{net}_i} \right] = [t_i - y_i] [f'_i(\text{net}_i)] \quad (3.33)$$

สำหรับการปรับปรุงค่าน้ำหนักในชั้นต่อไปคือ การปรับปรุงน้ำหนักในชั้นอินพุตกับชั้นซ่อน Δv_{qj} ซึ่งต้องใช้กฎลูกโซ่มาช่วยในการคำนวณเช่นกัน

$$\Delta v_{qj} = -\eta \left[\frac{\partial E}{\partial v_{qj}} \right] = -\eta \left[\frac{\partial E}{\partial net_q} \right] \left[\frac{\partial net_q}{\partial v_{qj}} \right] \quad (3.34)$$

$$\Delta v_{qj} = -\eta \left[\frac{\partial E}{\partial z_q} \right] \left[\frac{\partial z_q}{\partial net_q} \right] \left[\frac{\partial net_q}{\partial v_{qj}} \right] \quad (3.35)$$

โดยที่ $\frac{\partial E}{\partial z_q} = \sum_{i=1}^n [(t_i - y_i) f'_i(net_i) w_{iq}]$, $\frac{\partial E}{\partial z_q} = f'_q(net_q)$ และ $\frac{\partial net_q}{\partial v_{qj}} = x_j$ ดังนั้น

$$\Delta v_{qj} = \eta \sum_{i=1}^n [(t_i - y_i) f'_i(net_i) w_{iq}] f'_q(net_q) x_j \quad (3.36)$$

นำสมการ (3.33) มาแทนในสมการที่ (3.36) จะได้

$$\Delta v_{qj} = \eta \sum_{i=1}^n [\delta_{oi} w_{iq}] f'_q(net_q) x_j = \eta \delta_{hq} x_j \quad (3.37)$$

โดยที่ค่า δ_{hq} คือค่าสัญญาณความผิดพลาดของนิวรอลลำดับที่ q ในชั้นซ่อน ซึ่งก็คือ

$$\delta_{hq} \triangleq -\frac{\partial E}{\partial net_q} = -\left[\frac{\partial E}{\partial z_q} \right] \left[\frac{\partial z_q}{\partial net_q} \right] = f'_q(net_q) \sum_{i=1}^n \delta_{oi} w_{iq} \quad (3.38)$$

จะเห็นได้ว่าค่าสัญญาณความผิดพลาดที่ได้จากชั้นซ่อน δ_{hq} จะไม่ได้เป็นค่าเดียวกันกับค่าสัญญาณความผิดพลาดที่ได้จากชั้นเอาต์พุต δ_{oi} ดังนั้นในการปรับปรุงค่าน้ำหนักดังกล่าวจึงเรียกว่าวิธี กฎการเรียนรู้แบบเจนเนอรัลไรซ์เดลต้า (Generalized Delta Learning Rule) จะเห็นได้ว่าสมการ Δw_{iq} และ Δv_{qj} จะอยู่ในรูปแบบที่คล้ายๆกัน ดังนั้นหากจำนวนชั้นซ่อนมากกว่า 1 ชั้นสามารถที่จะทำการหาค่าน้ำหนักที่ต้องปรับปรุงได้โดยอาศัยสมการดังต่อไปนี้

$$\Delta w_{ij} = \eta \delta_i x_j = \eta \delta_{output-i} x_{input-j} \quad (3.39)$$

โดยที่ “output-i” และ “input-j” หมายถึง การเชื่อมต่อระหว่างนิวรอล i ของนิวรอลในชั้นปัจจุบัน กับ นิวรอล j ในชั้นก่อนหน้านี้ ซึ่งสามารถอ้างอิงการหาค่าน้ำหนักระหว่างนิวรอล i

ของนิวรอลในชั้นปัจจุบัน กับ นิวรอล j ในชั้นก่อนหน้านี้ นั้นหมายความว่า สมการที่ (3.39) สามารถนำไปใช้ในการปรับน้ำหนักในโครงข่ายชั้นไหนๆก็ได้

หากเรากำหนดให้ฟังก์ชันกระตุ้นของโครงข่ายที่ใช้คือ ซิกมอยด์ชนิดไบโพลาร์ (Bipolar Sigmoid) ค่าสัญญาณความผิดพลาดในสมการที่ (3.33) และ (3.38) จะเป็นดังต่อไปนี้

$$\delta_{oi} = \frac{1}{2}(1 - y_i^2) [t_i - y_i] \quad (3.40)$$

$$\delta_{hq} = \frac{1}{2}(1 - z_q^2) \sum_{i=1}^n \delta_{oi} w_{iq} \quad (3.41)$$

หากพิจารณาโครงข่ายที่มีจำนวนชั้นทั้งหมด Q โดยที่แต่ละชั้นสามารถกำหนดให้เป็นชั้นที่ $q = 1, 2, \dots, Q$ แล้วให้ ${}^q net_i$ เป็นค่าสัญญาณกระตุ้นหรือผลรวมอินพุตของนิวรอลลำดับที่ i ในชั้นที่ q และ ${}^q y_i$ เป็นค่าสัญญาณเอาต์พุตของนิวรอลลำดับที่ i ในชั้นที่ q โดยที่โครงข่ายมีจำนวนนิวรอลในชั้นอินพุตทั้งหมดเท่ากับ m และจำนวนนิวรอลในชั้นเอาต์พุตเท่ากับ n และกำหนดให้ ${}^q w_{ij}$ เป็นค่าน้ำหนักระหว่างนิวรอล ${}^{q-1} y_j$ กับ ${}^q y_i$ ดังนั้นหากสรุปอัลกอริทึมของการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับสามารถสรุปขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

1. เลือกค่าคู่อินพุตและเอาต์พุตที่จะป้อนให้กับโครงข่าย $\{(x^{(k)}, t^{(k)}) | k = 1, 2, \dots, p\}$ โดยที่ p คือจำนวนรูปแบบของคู่อินพุตและเอาต์พุตทั้งหมด $x_{m+1}^{(k)} = -1$
2. เลือกค่าอัตราการเรียนรู้ $\eta > 0$ และกำหนดค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ E_{\max} โดยที่กำหนดค่าน้ำหนักเริ่มต้นให้มีค่าสุ่มจำนวนน้อยๆ
3. เริ่มต้นการฝึกหัด โดยการป้อนรูปแบบอินพุตที่ k เข้าไปที่โครงข่ายชั้นอินพุต $q=1$ ดังนั้น

$${}^q y_i = {}^1 y_i = x_i^{(k)} \quad \text{ทุกๆค่า } i \quad (3.42)$$

4. ทำการคำนวณผลตอบสนองในแต่ละชั้นแบบเคลื่อนไปข้างหน้าโดยเริ่มจากชั้นอินพุตจนถึงชั้นเอาต์พุต

$${}^q y_i = a({}^q net_i) = a\left(\sum_j {}^q w_{ij} {}^{q-1} y_j\right) \quad (3.43)$$

5. หลังจากที่ได้ผลตอบสนองของโครงข่ายในชั้นเอาต์พุตแล้ว จากนั้นทำการคำนวณค่าความผิดพลาด E โดยเปรียบเทียบค่าเอาต์พุตเป้าหมาย และทำการคำนวณค่าสัญญาณผิดพลาด e_i ที่ชั้นเอาต์พุต

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (t_i^{(k)} - e_{y_i})^2 \quad (3.44)$$

$$e_i = (t_i^{(k)} - e_{y_i}) a'(e_{net_i}) \quad (3.45)$$

6. ทำการแพร่ย้อนกลับค่าความผิดพลาดกลับไปในโครงข่ายพร้อมทั้งปรับปรุงค่าน้ำหนักในแต่ละชั้นใหม่ และทำการคำนวณค่าสัญญาณผิดพลาด ${}^{q-1}\delta_i$ ที่ชั้นดังกล่าวด้วย

$$\Delta^q w_{ij} = \eta^q \delta_i {}^{q-1} y_j \quad (3.46)$$

$${}^q w_{ij}^{new} = {}^q w_{ij}^{old} + \Delta^q w_{ij} \quad (3.47)$$

$${}^{q-1}\delta_i = a'({}^{q-1} net_i) \sum_j {}^q w_{ji} {}^q \delta_j \quad (3.48)$$

สำหรับทุกค่า q โดยที่ $q = Q, Q-1, \dots, 2$

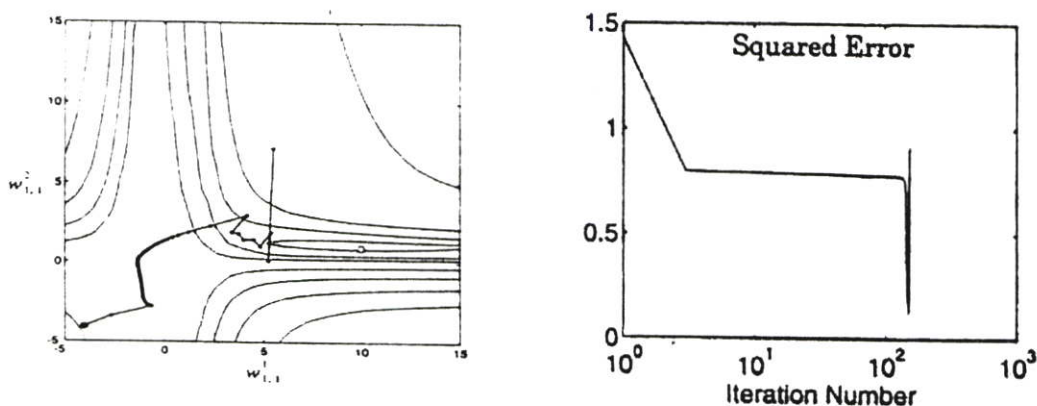
7. ในตอนนี้ โครงข่ายได้รับการฝึกหัดให้รู้จักกับรูปแบบอินพุตที่ $k = 1$ แล้ว ในขั้นต่อไปคือนำรูปแบบอินพุตที่เหลืออยู่ป้อนให้กับโครงข่าย แล้วกลับไปที่ยังตอนที่ 3 จนกระทั่ง $k = p$ จึงข้ามไปทำขั้นตอนต่อไป
8. หลังจากที้นำรูปแบบอินพุตที่มีอยู่ทั้งหมดป้อนให้โครงข่ายทำการเรียนรู้ ขั้นตอนต่อไปคือการตรวจสอบค่าความผิดพลาดว่ามีค่าต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้แล้วหรือยัง ถ้าค่า $E < E_{max}$ โครงข่ายจะหยุดกระบวนการเรียนรู้ แต่หากไม่เป็นเช่นนั้น โครงข่ายจะเริ่มการเรียนรู้ในรอบต่อไป (Next Epoch) โดยการกลับไปที่ยังตอนที่ 3 แล้วทำฝึกหัดให้เรียนรู้กับรูปแบบอินพุตที่ $k = 1$ ใหม่

ในรูปแบบของการฝึกหัดโครงข่ายจากอัลกอริทึมที่ได้กล่าวมา เป็นรูปแบบของการฝึกหัดชนิด Incremental หรือ Pattern by Pattern Training Mode ซึ่งก็คือ จะมีการปรับปรุงค่าน้ำหนักทุกๆ ครั้ง หลังจากรูปแบบอินพุตแต่ละรูปแบบถูกป้อนให้กับโครงข่าย ในอีกทางเลือกหนึ่งของขั้นตอน

ในการฝึกหัดโครงข่ายก็คือ การฝึกหัดแบบ Batch Mode ซึ่งก็คือจะมีการปรับปรุงน้ำหนักภายในโครงข่ายหลังจากที่รูปแบบอินพุตทั้งหมดที่มีอยู่ ได้ถูกป้อนให้กับโครงข่ายเรียบร้อยแล้ว

อย่างไรก็ตามในการฝึกหัดโครงข่ายให้มีผลที่น่าพอใจ อาจมีค่าตัวประกอบ (Factor) บางตัวมาเกี่ยวข้องเช่น ค่าน้ำหนักเริ่มต้น ค่าอัตราการเรียนรู้ ในส่วนของค่าน้ำหนักเริ่มต้นนั้นปกติ จะกำหนดให้เป็นค่าสุ่มจำนวนน้อยๆ เนื่องจากว่า หากกำหนดให้ค่าน้ำหนักเริ่มต้นมีค่ามาก จะทำให้ค่าความผิดพลาดของโครงข่ายเคลื่อนที่เข้าสู่จุดต่ำสุดเฉพาะที่ (Local Minimum) หรืออาจจะเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณที่เป็นพื้นราบ (Flat area) ใกล้กับจุดเริ่มต้น ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากเอาท์พุตที่ได้จากแต่ละชั้นในโครงข่ายจะอยู่ในการของค่าสูงสุด หรือ ค่าต่ำสุด หรือเกิดการอิ่มตัว (Saturation) ในกรณีที่ผ่านมาฟังก์ชันแบบมีขอบเขตจำกัด เช่น ฟังก์ชันซิกมอยด์

ในการกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้ หากเรากำหนดให้มีค่าน้อยๆ ก็จะทำให้ค่าความผิดพลาดของโครงข่ายมีโอกาสเคลื่อนที่เข้าสู่จุดต่ำสุดจริง (Global minimum) ได้ แต่ว่าจะใช้เวลาในการเคลื่อนที่เข้าสู่จุดต่ำสุดนานอันเนื่องมาจากมีขนาดของการเคลื่อนที่ (Step Size) ในแต่ละรอบมีค่าน้อย แต่หากกำหนดให้ค่าอัตราการเรียนรู้มีค่ามาก จะทำให้การเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดของโครงข่ายเกิดการแกว่ง (Oscillation) และจะมีสภาวะไม่คงตัว (Unstable) เวลาเคลื่อนที่เข้าใกล้จุดต่ำสุด ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3.24 ซึ่งเป็นการพยายามที่จะทำให้ค่าความผิดพลาดเคลื่อนที่เข้าสู่จุดต่ำสุด แต่เกิดการแกว่งอันเนื่องมาจากการกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้มากเกินไป

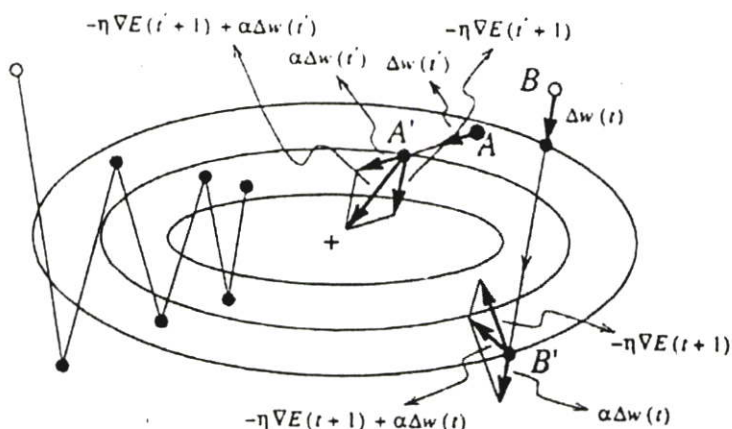


รูปที่ 3.24 แสดงตัวอย่างการเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดในกรณีที่เกิดการแกว่ง

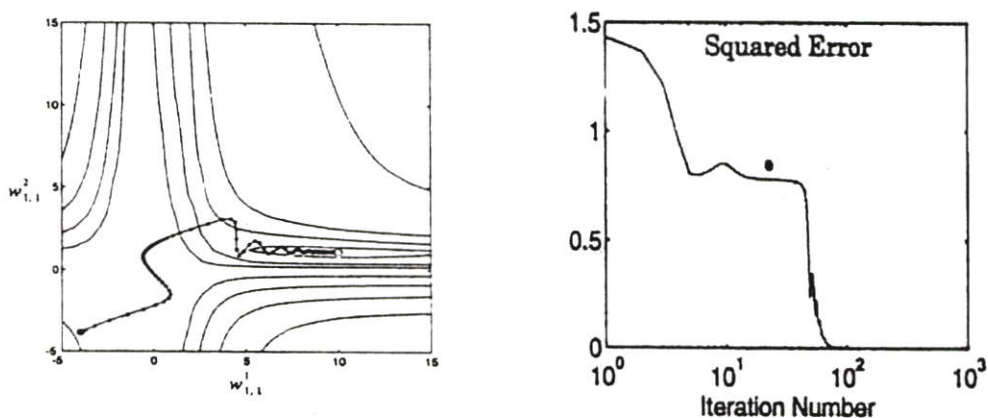
อย่างไรก็ตาม ได้มีการค้นคว้าวิธีที่จะไม่ทำให้การเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดเกิดการแกว่งในกรณีที่ค่าอัตราการเรียนรู้มีค่ามาก ซึ่งวิธีดังกล่าวเรียกว่า โมเมนตัม (Momentum) โดยหลักการของวิธีโมเมนตัม ก็คือการเคลื่อนที่ของค่าของความผิดพลาดแบบมีความเฉื่อย โดยการเพิ่มเทอมของโมเมนตัมเข้าไปในสมการปรับปรุงค่าน้ำหนัก ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta w(t) = -\eta \nabla E(t) + \alpha \Delta w(t-1) \quad (3.49)$$

โดยที่ $\alpha \in [0,1]$ โดยปกติจะมีค่าอยู่ที่ 0.9



รูปที่ 3.25 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดทั้งแบบมี และไม่มีโมเมนตัม



รูปที่ 3.26 แสดงตัวอย่างการเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดในกรณีที่มีการรวมเทอม โมเมนตัมด้วย

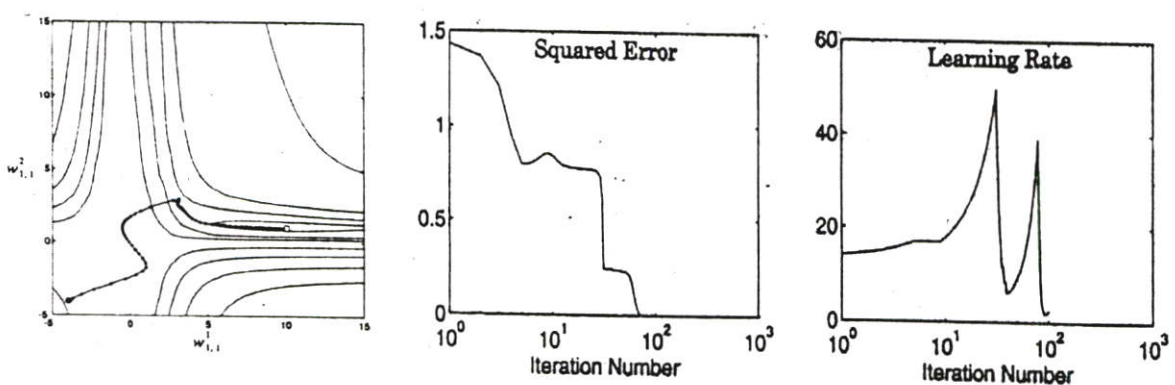
ในรูปที่ 3.25 ได้แสดงการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดระหว่างแบบไม่มีโมเมนตัม ก็คือด้านซ้ายมือของรูป และแบบมีโมเมนตัม จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดแบบไม่มีโมเมนตัมจะเกิดการแกว่ง ซึ่งอาจทำให้มีโอกาสเคลื่อนที่ออกจากจุดต่ำสุดเมื่อมีโอกาสเคลื่อนที่เข้าใกล้ แต่หากมีการนำค่าโมเมนตัมมาคิดจะทำให้การเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดไม่เกิดการแกว่ง และใช้เวลาน้อยกว่าในการเคลื่อนที่เข้าสู่จุดต่ำสุด ส่วนในรูปที่ 3.26 เป็นตัวอย่างในกรณีที่มีการเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดแบบมีเทอมของโมเมนตัมมาเกี่ยวข้อง

อย่างไรก็ตามการที่กำหนดให้มีค่าอัตราการเรียนรู้ที่คงที่อาจไม่เหมาะสมกับบางปัญหา หรือในบางครั้ง การเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาด ได้เคลื่อนอยู่บนพื้นที่ราบ ซึ่งไม่มีความจำเป็นที่

ต้องกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้ให้มีค่าต่ำๆ เพื่อที่ให้มีการเคลื่อนที่ช้า หรือในบางกรณีเช่นการเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความชัน คงไม่คืนักหากกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้ที่มีค่ามาก ดังนั้นหากสามารถปรับเปลี่ยนค่าอัตราการเรียนรู้ในช่วงการฝึกหัดให้เปลี่ยนแปลงไปตามความชันของพื้นผิวของค่าความผิดพลาด โดยที่มีการเพิ่มอัตราการเรียนรู้ หากการเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงแนวราบเพื่อที่จะเร่งให้เข้าสู่จุดต่ำสุด แต่หากการเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงที่มีความชัน ก็ให้ลดอัตราการเรียนรู้ลงเพื่อที่จะได้เข้าสู่จุดต่ำสุดอย่างแท้จริง ซึ่งในรูป 3.27 แสดงตัวอย่างการเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดในกรณีที่มีการรวมเทอมโมเมนตัม และมีการปรับเปลี่ยนค่าอัตราการเรียนรู้ด้วย

ในการปรับเปลี่ยนค่าอัตราการเรียนรู้ของโครงข่ายมีด้วยกันหลายวิธี แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการปรับเปลี่ยนค่าอัตราการเรียนรู้ โดยการใช้ผลลัพธ์ของการปรับค่าน้ำหนักในแต่ละรอบ ซึ่งจะมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. ถ้าค่าความผิดพลาดกำลังสองของโครงข่ายมีการเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าหนึ่ง กำหนดให้เป็น ζ ซึ่งโดยปกติจะให้ค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์หลังจากการปรับปรุงค่าน้ำหนัก อัลกอริทึมจะยกเลิกการปรับปรุงค่าน้ำหนัก แล้วทำการปรับลดอัตราการเรียนรู้ใหม่โดยการคูณด้วยค่า ρ ซึ่ง $0 < \rho < 1$ แล้วกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัม α มีค่าเท่ากับ 0
2. ถ้าค่าความผิดพลาดกำลังสองของโครงข่ายมีการลดลง มากกว่า ζ หลังจากการปรับปรุงค่าน้ำหนัก อัลกอริทึมจะยอมรับการปรับปรุงค่าน้ำหนักนั้น แล้วทำการปรับเพิ่มอัตราการเรียนรู้ใหม่โดยการคูณด้วยค่า ρ ซึ่ง $\rho > 1$ แล้วกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัม α มีค่าเท่ากับค่าเดิมก่อนการปรับค่าให้เท่ากับ 0
3. ถ้าค่าความผิดพลาดกำลังสองของโครงข่ายมีการเพิ่มขึ้น แต่น้อยกว่าค่า ζ อัลกอริทึมจะยอมรับการปรับปรุงค่าน้ำหนัก ส่วนอัตราการเรียนรู้ และค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัม จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.27 แสดงตัวอย่างการเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดในกรณีที่มีการรวมเทอมโมเมนตัมและมีการปรับเปลี่ยนค่าอัตราการเรียนรู้ด้วย

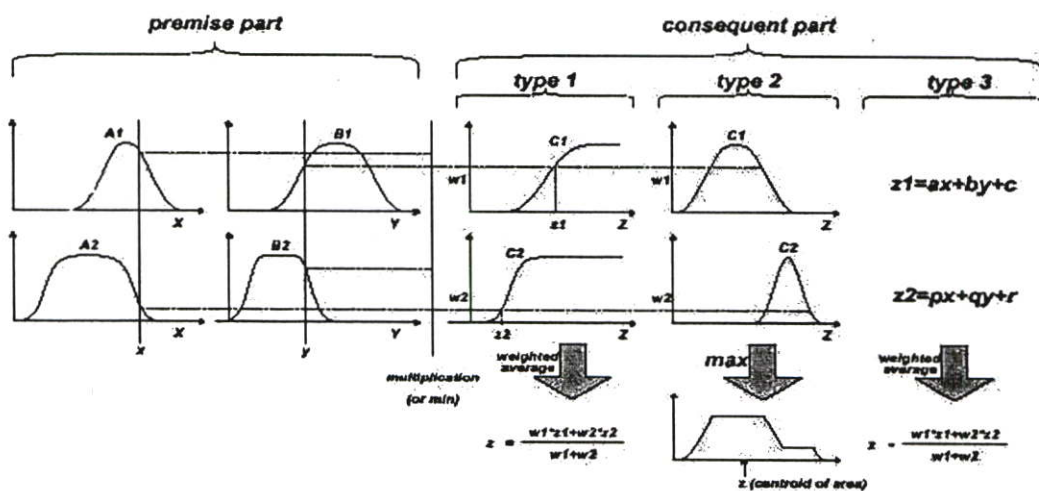
3.3 ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System)

“ANFIS” เป็นคำย่อมาจาก Adaptive Neuro Fuzzy Inference System โดยหลักการของระบบนี้ก็คือ การนำเอาระบบโครงข่ายประสาทเทียมมาประยุกต์ใช้งานกับกระบวนการประมวลผล และตัดสินใจของฟัซซีลอจิก ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเรียกว่า กระบวนการอินเฟอร์เรนซ์ (Inference System) โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ได้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เหมาะสมกับปัญหา ซึ่งหลักการดังกล่าวได้ถูกนำเสนอโดย Roger Jang [4] ซึ่งกระบวนการฟัซซีอินเฟอร์เรนซ์ที่นำเสนอส่วนใหญ่สามารถแบ่งออกได้อยู่ 3 ชนิดใหญ่ๆ ด้วยกัน คือ

ชนิดที่ 1: ในส่วนนี้เราจะเรียกว่าเป็น กระบวนการฟัซซีอินเฟอร์เรนซ์ชนิดที่ 1 (Type 1) ในส่วนของเอาต์พุตของกระบวนการฟัซซีอินเฟอร์เรนซ์ชนิดนี้ จะได้มาจากการนำเอาค่าน้ำหนักที่ได้ในกฎแต่ละข้อมาเฉลี่ย ดังนั้น ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตที่ใช้ในกฎแต่ละข้อจะต้องเป็นชนิดโมโน โทนิค แบบไม่มีการลด (Monotonic non-decreasing)

ชนิดที่ 2: ในส่วนนี้เราจะเรียกว่าเป็น กระบวนการฟัซซีอินเฟอร์เรนซ์ชนิดที่ 2 (Type 2) ในส่วนของเอาต์พุตของกระบวนการฟัซซีอินเฟอร์เรนซ์ชนิดนี้จะได้มาจากการนำเอาค่าน้ำหนักที่ได้ในกฎแต่ละข้อมาผ่านการกระทำแบบเลือกค่าที่สูงที่สุด (Max Operator)

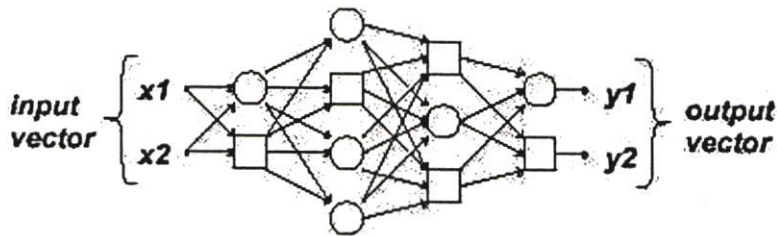
ชนิดที่ 3: ในส่วนนี้เราจะเรียกว่าเป็น กระบวนการฟัซซีอินเฟอร์เรนซ์ชนิดที่ 3 (Type 3) เนื่องจากกระบวนการฟัซซีอินเฟอร์เรนซ์ชนิดนี้ได้ใช้ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตที่ใช้ในกฎแต่ละข้อเป็นชนิดเชิงเส้นหรือเรียกว่า Takagi Sugeno's Fuzzy if-then rules ในส่วนของเอาต์พุตของกระบวนการฟัซซีอินเฟอร์เรนซ์ชนิดนี้ จะได้มาจากการนำเอาค่าน้ำหนักที่ได้ในกฎแต่ละข้อมาเฉลี่ย (Weight Average) ในรูปที่ 3.28 ได้แสดงถึง กระบวนการฟัซซีอินเฟอร์เรนซ์แต่ละชนิด



รูปที่ 3.28 กระบวนการฟัซซีอินเฟอร์เรนซ์แต่ละชนิด

3.3.1 โครงสร้างของโครงข่ายที่ปรับได้

โครงสร้างของโครงข่ายที่ปรับได้ (Adaptive Network) โดยทั่วไปจะมีส่วนคล้ายระบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่มีผู้สอน (Supervised Artificial Neural Network) ซึ่งจะประกอบไปด้วย โหนด และ ลิงค์ ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.29 โดยหลักการทำงานของโครงข่ายที่ปรับได้ก็คือในแต่ละโหนดจะมีฟังก์ชัน ซึ่งพารามิเตอร์ของแต่ละโหนดสามารถเปลี่ยนแปลงได้ และในส่วนของการเชื่อมต่อกันระหว่างโหนด หรือ ลิงค์ จะเป็นเพียงแค่วิธีทางการเคลื่อนที่ของการคำนวณ โครงสร้างของโครงข่ายที่ปรับได้จะประกอบด้วยโหนดชนิดที่เป็นสี่เหลี่ยม หมายถึงเป็นอแดปทีฟโหนด หรือ โหนดที่ปรับค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันได้ และโหนดชนิดวงกลมจะเป็นโหนดชนิดคงที่ไม่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันได้ นั้นหมายความว่าค่าพารามิเตอร์ของโครงข่ายปรับค่าได้ จะได้มาจากการทำยูเนียน (Union) หรือการรวมกันของค่าพารามิเตอร์ของโหนดต่างๆ ที่ปรับค่าได้



รูปที่ 3.29 โครงสร้างโครงข่ายที่ปรับค่าได้

ในการที่จะทำให้ผลตอบสนองที่ได้จากโครงข่ายที่ปรับได้ มีค่าใกล้เคียงและถูกต้องตามที่เป้าหมาย จะต้องมีการเตรียมข้อมูลเพื่อฝึกหัดโครงข่ายที่ปรับค่าได้ โดยเป้าหมายของการฝึกหัดก็คือเพื่อหาค่าผิดพลาดให้มีค่าน้อยที่สุดในทุกรูปแบบอินพุต ซึ่งหลักการในการปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ค่าผิดพลาดเข้าสู่จุดที่ต่ำที่สุดคือ การใช้วิธีเกรเดียนต์เดสเซนต์ สมมติให้โครงข่ายมีจำนวนชั้นทั้งหมด L ชั้น และในชั้นที่ k มีจำนวนโหนดทั้งหมดอยู่ $\#(k)$ ดังนั้นเราสามารถอ้างอิงโหนดที่ i ในชั้นที่ k ดังนั้นค่าโหนดฟังก์ชันก็คือ O_i^k ซึ่งโหนดเอาต์พุตจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาจากค่าพารามิเตอร์ของแต่ละโหนดในชั้นต่างๆ ดังนั้น

$$O_i^k = O_i^k(O_1^{k-1}, \dots, O_{\#(k-1)}^{k-1}, a, b, c, \dots), \quad (3.50)$$

โดยที่ a, b, c คือค่าพารามิเตอร์ในโหนดนั้นๆ โดยที่ O_i^k เป็นทั้งโหนดเอาต์พุต และโหนดฟังก์ชันพร้อมๆ กัน

สมมติว่าให้ P เป็นกลุ่มข้อมูลทั้งหมดที่ใช้สำหรับฝึกหัดโครงข่าย ดังนั้นเราสามารถกำหนดค่าความผิดพลาดให้อยู่ในรูปของค่าความผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุด สำหรับข้อมูลที่ p -th โดยที่ $(1 \leq p \leq P)$ เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$E_p = \sum_{m=1}^{\#(L)} (T_{m,p} - O_{m,p}^L)^2, \quad (3.51)$$

โดยที่ $T_{m,p}$ คือค่าเวกเตอร์ของเอาต์พุตเป้าหมายที่ m -th สำหรับข้อมูลอินพุตที่ p -th และ $O_{m,p}^L$ คือค่าเวกเตอร์เอาต์พุตที่ m -th ที่ได้จากโครงข่ายจริง สำหรับข้อมูลอินพุตที่ p -th ดังนั้นค่าผิดพลาดทั้งหมดจะได้อาจมาจากผลรวมของค่าความผิดพลาดต่อทุกรูปแบบอินพุต หรือ $E = \sum_{p=1}^P E_p$ ส่วนวิธีที่ใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของโครงข่ายในช่วงการฝึกหัดเพื่อให้โครงข่ายสามารถให้ผลตอบสนองที่ถูกต้อง จะต้องใช้วิธีเกรเดียนต์เดสเซนส์ในการทำให้ค่าความผิดพลาด E มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งในขั้นแรกต้องคำนวณค่าอัตราความผิดพลาด (Error Rate) หรือค่าคิฟเฟอร์เรนท์เฉลี่ยของค่าความผิดพลาดระหว่างเอาต์พุตเป้าหมายกับเอาต์พุตจริงที่ได้จากโครงข่าย เทียบกับค่าเอาต์พุตจริง หรือ $\frac{\partial E_p}{\partial O}$ สำหรับรูปแบบอินพุต p -th ในทุกๆเอาต์พุตโหนด O ดังนั้นค่าความผิดพลาดของ เอาต์พุตโหนดที่ (L, i) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\frac{\partial E_p}{\partial O_{i,p}^L} = -2(T_{i,p} - O_{i,p}^L) \quad (3.52)$$

และสำหรับค่าความผิดพลาดในโหนดภายในที่ (k, i) สามารถคำนวณได้โดยใช้กฎของลูกโซ่มาช่วยดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial E_p}{\partial O_{i,p}^k} = \sum_{m=1}^{\#(k+1)} \frac{\partial E_p}{\partial O_{m,p}^{k+1}} \frac{\partial O_{m,p}^{k+1}}{\partial O_{i,p}^k}, \quad (3.53)$$

โดยที่ $1 \leq k \leq L-1$ นั่นคือ ค่าความผิดพลาดของโหนดภายในสามารถแสดงในรูปของลิเนียร์คอมไบเนชันของค่าอัตราความผิดพลาดของโหนดในขั้นต่อไป ดังนั้นสำหรับค่า $1 \leq k \leq L$ และ $1 \leq i \leq \#(k)$ นั้น เราสามารถหาค่า $\frac{\partial E_p}{\partial O_{i,p}^k}$ จากสมการที่ (3.52) และ (3.53) ถ้า α เป็นค่าพารามิเตอร์ของโครงข่ายที่ปรับได้ เราจะได้

$$\frac{\partial E_p}{\partial \alpha} = \sum_{O^* \in S} \frac{\partial E_p}{\partial O^*} \frac{\partial O^*}{\partial \alpha}, \quad (3.54)$$

โดยที่ S คือ เซตของโหนดที่มีค่าเอาต์พุตขึ้นอยู่กับค่า α ดังนั้นเราสามารถหาค่าอนุพันธ์ของค่าความผิดพลาดทั้งหมดดังนี้

$$\frac{\partial E}{\partial \alpha} = \sum_{p=1}^P \frac{\partial E_p}{\partial \alpha}. \quad (3.55)$$

ดังนั้นสูตรการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ α คือ

$$\Delta \alpha = -\eta \frac{\partial E}{\partial \alpha}, \quad (3.56)$$

ซึ่ง η คือ ค่าอัตราการเรียนรู้ (Learning Rate) สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\eta = \frac{k}{\sqrt{\sum_{\alpha} \left(\frac{\partial E}{\partial \alpha} \right)^2}}, \quad (3.57)$$

ค่า k คือ ค่าขนาดของเสต็ป (Step Size) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดขนาดของการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ α ในพารามิเตอร์สเปซ (Parameter Space) ซึ่งหมายความว่าเราสามารถปรับเปลี่ยนค่า k เพื่อเร่ง หรือชะลอความเร็วในการเข้าสู่จุดต่ำสุดได้

โดยทั่วไปแล้วโครงข่ายที่ปรับได้ จะมีวิธีการเรียนรู้อยู่ 2 วิธี คือการเรียนรู้แบบแบทช์หรือแบบออฟไลน์ (Batch or Off-line Learning) ซึ่งจะใช้สมการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ α ในสมการที่ (3.55) และการปรับปรุงจะกระทำหลังจากรูปแบบอินพุตทั้งหมดที่ใช้ในการเรียนรู้ได้ส่งผ่านเข้าไปยังโครงข่ายแล้ว เช่นการปรับปรุงหลังจากการเรียนรู้ในแต่ละรอบ (Epoch) ส่วนอีกวิธีหนึ่งก็คือ การปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ทันทีหลังจากรูปแบบของอินพุตและเอาต์พุตเป้าหมายใดๆ ได้ถูกป้อนเข้าที่โครงข่าย ซึ่งสูตรที่ใช้ในการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์จะเป็นดังสมการที่ (3.54) โดยเราจะเรียกรูปแบบนี้ว่า การเรียนรู้แบบแพทเทิร์นหรือแบบออนไลน์ (Pattern or On-line Learning) อย่างไรก็ตาม ในการใช้วิธีการเดสเซนต์เดสเซนต์ในการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของโครงข่ายที่ปรับค่าได้ จะมีข้อด้อยอยู่ เช่นในเรื่องของความเร็ว หรือในบางครั้งจะได้ผลการเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดไปหยุดอยู่ที่จุดต่ำสุดที่ไม่แท้จริง หรือจุดต่ำสุดเฉพาะที่ (Local Minimum) ซึ่งหมายความว่าไม่ใช่จุดที่ต่ำที่สุดของระบบจริงๆ ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ จึงจำเป็นต้องการหลักการบางหลักการมาช่วยในการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ เช่นหลักการของการ

ประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยที่สุด หรือ LSE (Least Square Estimation) มาร่วม ซึ่งวิธีนี้เราจะเรียกว่าการกฎเรียนรู้แบบร่วม (Hybrid Learning Rule)

3.3.2 กฎการเรียนรู้แบบร่วม

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการนำเอาหลักการของการประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยที่สุด หรือ LSE มาใช้ร่วมกับหลักการของกราเดียนต์เดสเซนต์ ก็เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ ดังนั้นในส่วนนี้จะอธิบายถึงหลักการของการเรียนรู้แบบร่วมแบบออฟไลน์ และแบบออนไลน์ โดยจะเริ่มที่การเรียนรู้แบบออฟไลน์ก่อน สมมติว่าโครงข่ายมีจำนวนเอาต์พุตเท่ากับ 1 ดังนั้น สมการของเอาต์พุตก็คือ

$$\text{output} = F(\bar{I}, S) \quad (3.58)$$

โดยที่ \bar{I} คือ กลุ่มของรูปแบบอินพุต F คือ ฟังก์ชันที่เลือกใช้ในโครงข่าย และ S คือ กลุ่มของพารามิเตอร์ แต่ถ้ากำหนดให้โครงข่ายดังกล่าวมีฟังก์ชันอีกฟังก์ชันหนึ่ง ได้แก่ H ซึ่งทำให้ผลของการรวมฟังก์ชัน หรือการทำคอมโพสิทฟังก์ชัน (Composite Function) $H \circ F$ จะมีค่าเป็นเชิงเส้นในบางค่าของพารามิเตอร์ S ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ทำให้ $H \circ F$ มีค่าเป็นเชิงเส้นดังกล่าวสามารถหาได้จากการแยกพารามิเตอร์ S ให้เป็น 2 ส่วน ก็คือ

$$S = S_1 \oplus S_2, \quad (3.59)$$

โดยที่ \oplus หมายถึงการบวกโดยตรง (Direct Sum) ดังนั้น $H \circ F$ และจะมีค่าเป็นเชิงเส้นสำหรับทุกค่าของพารามิเตอร์ S_2 ดังนั้นเราสามารถประยุกต์วิธีการดังกล่าวเข้ากับสมการที่ (3.58)

$$H(\text{output}) = H \circ F(\bar{I}, S), \quad (3.60)$$

ซึ่งจะมีค่าเป็นเชิงเส้นในทุกๆค่าสำหรับพารามิเตอร์ S_2 หากเรารู้ค่าของ S_1 เราสามารถนำรูปแบบข้อมูลอินพุตที่ใช้ในการฝึกหัดโครงข่าย P มาใส่ในสมการที่ (3.60) ซึ่งจะได้สมการเมตริกซ์ดังนี้

$$AX = B \quad (3.61)$$

โดยที่ X คือเวกเตอร์ของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า ซึ่งก็คือค่าพารามิเตอร์ S_2 ส่วน A ก็คือเมตริกซ์ของฟังก์ชันของสมการทั้งหมด ส่วน B ก็คือคำตอบของสมการที่ทราบค่า หากให้ $|S_2| = M$

ดังนั้นขนาดของ A , X และ B คือ $P \times M$, $M \times 1$ และ $P \times 1$ ตามลำดับ ซึ่ง P ก็คือจำนวนรูปแบบอินพุตที่ใช้ในการฝึกหัดโครงข่าย และโดยปกติจะมีค่ามากกว่า M หากกำหนดให้ X^* ซึ่งถูกจัดให้อยู่ในรูปของค่าผิดพลาดกำลังสอง (Squared Error) ซึ่งมีสมการเป็น $\|AX - B\|^2$ ซึ่งสมการนี้จัดเป็นสมการปัญหามาตรฐานสำหรับลিনিยรีเกรซชัน (Linear Regression) ซึ่งสูตรที่ทราบกันดีและใช้กันก็คือการใช้ Pseudo-inverse ของค่า X

$$X^* = (A^T A)^{-1} A^T B, \quad (3.62)$$

แต่เนื่องจากสมการดังกล่าวจะต้องเกี่ยวข้องกับหาอินเวอร์สของเมตริกซ์ ซึ่งค่อนข้างยุ่งยากหรือ ในบางครั้งอาจจะหาค่าไม่ได้ ดังนั้นจึงใช้วิธีของสมการแบบลำดับแทน (Sequential Formula) โดยที่เรากำหนดให้เวกเตอร์ในแถวที่ i -th ของเมตริกซ์ A เป็น a_i^T และ เวกเตอร์ในแถวที่ i -th ของเมตริกซ์ B เป็น b_i^T ดังนั้นเราสามารถคำนวณแบบซ้ำๆ เพื่อหาค่า X ได้จาก

$$X_{i+1} = X_i + S_{i+1} a_{i+1} (b_{i+1}^T - a_{i+1}^T X_i) \quad (3.63)$$

$$S_{i+1} = \left[S_i - \frac{S_i a_{i+1} a_i^T + S_i}{1 + a_{i+1}^T S_i a_{i+1}} \right] \quad i = 0, 1, \dots, P-1 \quad (3.64)$$

โดยที่ S_i คือ โควาเรียนซ์เมตริกซ์ (Covariance Matrix) ส่วนการประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยที่สุดของค่า X^* จะมีค่าเท่ากับ X_p และค่าเริ่มต้นของสมการที่ (3.63) และ (3.64) ก็คือ $X_0 = 0$ และ $S_0 = \gamma I$ โดยที่ γ คือค่าจำนวนบวกที่มีค่ามาก และ I คือ เมตริกซ์เสมือน (Identity Matrix) ที่มีขนาด $M \times M$ ซึ่งหากเอาที่พุดในโครงข่ายมีหลายเอาที่พุด สมการที่ (3.63) และ (3.64) ก็ยังคงใช้ได้ ยกเว้น b_i^T คือเวกเตอร์ในแถวที่ i -th ของเมตริกซ์ B การประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยที่สุดแบบลำดับ (Sequential Least Square Estimation) ของค่า X สามารถแปลงให้อยู่ในรูปของคาลมานฟิลเตอร์ (Kalman Filter) ดังต่อไปนี้

$$X(k+1) = X(k), \quad (3.65)$$

$$Y(k) = A(k)X(k) + noise, \quad (3.66)$$

โดยที่ $X(k) = X_k$, $Y(k) = b_k$ และ $A(k) = a_k$

ดังนั้นในแต่ละรอบ (Epoch) ของการเรียนรู้แบบรวมจะประกอบไปด้วยการดำเนินการแบบไปข้างหน้า (Forward Pass) และการดำเนินการแบบย้อนกลับหลัง (Backward Pass) ในการดำเนินการแบบไปข้างหน้า เราจะป้อนอินพุตเข้าไปแล้วคำนวณหาเอาต์พุต จนกระทั่งหาค่าเมตริกซ์ใน A และ B ในสมการที่ (3.61) ได้ ซึ่งทำให้หาค่าของพารามิเตอร์ S_2 ได้ ซึ่งก็คือค่าพารามิเตอร์ในชั้นที่ 4 ของโครงข่ายที่ปรับได้ โดยใช้วิธีการประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยที่สุดแบบลำดับ (Sequential Least Square Estimate) ตามสมการที่ (3.63) และ (3.64) ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถเรียกได้ว่าเป็น คอนซีควენტพารามิเตอร์ (Consequent Parameter) หลังจากนั้นก็จะดำเนินการแบบไปข้างหน้าอีกจนกระทั่งค่าความผิดพลาดของโครงข่ายสามารถคำนวณได้ ในส่วนของการดำเนินการแบบย้อนกลับหลังซึ่งหลังจากที่เราได้ค่าความผิดพลาดมาแล้วก็จะคำนวณหาอัตราความผิดพลาด (Error Rate) หรือค่าคิฟเฟอร์เรนซ์เฉลี่ยของค่าความผิดพลาดระหว่างเอาต์พุตเป้าหมายกับเอาต์พุตจริงที่ได้จากโครงข่ายเทียบกับค่าเอาต์พุตจริง ของในแต่ละโหนดตามสมการที่ (3.52) และ (3.53) แล้วทำการแพร่ย้อนกลับจากชั้นของเอาต์พุต ไปยังชั้นอินพุต จนทำให้ค่า พารามิเตอร์ S ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ในชั้นที่ 1 จะถูกปรับปรุงโดยวิธีของเกรเดียนต์เดสเซนส์ตาม สมการที่ (3.56) ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวเรียกว่า ปริมิสพารามิเตอร์ ส่วนในตารางที่ 3.1 ได้สรุปวิธีการเรียนรู้แบบรวมของ ANFIS

จะเห็นได้ว่าหากเรากำหนดให้หากเรากำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ S_1 คงที่ เราจะต้องได้ค่าพารามิเตอร์ S_2 ที่ต่ำที่สุด (Global Optimum Point) ในพารามิเตอร์สเปซของ S_2 ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการใช้วิธีการหาค่าความผิดพลาดกำลังสองเป็นตัววัดค่าความผิดพลาด ดังนั้นข้อดีของกฎการเรียนรู้แบบรวมไม่เฉพาะที่จะลดขนาดของ Search Space ในวิธีของเกรเดียนต์เดสเซนส์ แต่อย่างยิ่งคงลดเวลาในการเข้าสู่ของค่าความผิดพลาดเข้าสู่จุดต่ำสุดอีกด้วย

ตารางที่ 3.1 สรุปวิธีการเรียนรู้แบบรวมของ ANFIS

	Forward Pass	Backward Pass
Premise Parameters	Fixed	Gradient Descent
Consequent Parameters	Least Squares Estimate	Fixed
Signals	Node outputs	Error Rates

อย่างไรก็ตามกระบวนการฟัซซี่อินเฟอร์เรนซ์ทั้ง 3 ชนิดก็ยังคงมีข้อเสียอยู่เช่น ชนิดที่ 1 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในส่วนของคอนซีควेंटพารามิเตอร์จะต้องเป็นแบบโมโนโตนิคชนิดไม่ลดเท่านั้น (Monotonically Non-Decreasing Function) ซึ่งไม่สอดคล้องกับการบอกปริมาณแบบภาษาพูดที่บอกระดับ “กลาง” (Medium) ซึ่งจะเหมาะกับฟังก์ชันในรูปของระฆังคว่ำมากกว่า (Bell Shape) ส่วนชนิดที่ 2 การทำดีฟัซซี่ฟิเคชัน หรือการแปลงเอาต์พุตแบบฟัซซี่กลับเป็นค่าแบบคริस्प จะทำให้เสียเวลา และยุ่งยากมากในการปรับค่าพารามิเตอร์ ส่วนชนิดที่ 3 (Type 3) ก่อนข้าง

ยากที่จะระบุเป็นภาษาพูด (Linguistic term) ในส่วนของคอนซีควันทพารามิเตอร์ซึ่งไม่ใช่เป็นฟังก์ชันแบบฟัซซี่

ส่วนในการเรียนรู้ของโครงข่ายแบบออนไลน์ ก็คือค่าพารามิเตอร์จะถูกปรับปรุงหลังจากรูปแบบอินพุตแต่ละรูปแบบได้ถูกป้อนผ่านโครงข่าย ดังนั้นในส่วนของกฎการเรียนรู้ก็ยังคงเป็นแบบร่วมอยู่ แต่ในส่วนของปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ที่ต้องใช้วิธีของเกรเดียนต์เดสเซนต์ ค่าเกรเดียนต์จะต้องใช้ค่า E_p แทน E แต่ในส่วนของหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิธีการประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยที่สุดแบบลำดับ จะต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลในช่วงเวลาต่างๆ ซึ่งมีความจำเป็นที่ต้องคงค่า (Decay) รูปแบบอินพุตและเอาท์พุตเป้าหมาย จนกระทั่งรูปแบบข้อมูลชุดใหม่ถูกป้อนให้กับโครงข่าย ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มเทอมของค่าคงที่ λ (Forgetting Factor) เข้าไปในสมการที่ (3.64) ดังสมการต่อไปนี้

$$X_{i+1} = X_i + S_{i+1} a_{i+1} (b_{i+1}^T - a_{i+1}^T X_i) \quad (3.67)$$

$$S_{i+1} = \frac{1}{\lambda} \left[S_i - \frac{S_i a_{i+1} a_i^T + S_i}{1 + a_{i+1}^T S_i a_{i+1}} \right] \quad (3.68)$$

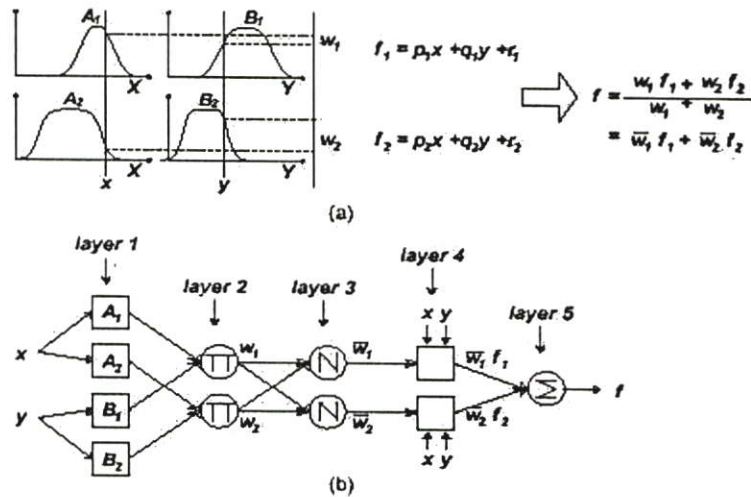
3.3.3 ฟัซซี่ลอจิกที่นำระบบโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในกระบวนการอินเฟอร์เรนซ์ (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System)

จากที่ได้อธิบายมาแล้วถึงโครงสร้าง และกฎการเรียนรู้ของโครงข่าย ในส่วนนี้จะอธิบายถึงการนำเอาโครงข่ายที่ปรับได้มาทำหน้าที่เป็น กระบวนการฟัซซี่อินเฟอร์เรนซ์สำหรับฟัซซี่ลอจิก ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวจะถูกเรียกว่า ANFIS ซึ่งย่อมาจาก Adaptive Network Based Fuzzy Inference System หรือ Adaptive Neuro Fuzzy Inference System ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกเอากระบวนการฟัซซี่อินเฟอร์เรนซ์ ชนิดที่ 3 มาใช้ด้วยเหตุผลที่ว่า มีความรวดเร็วในการคำนวณ (Computationally Efficient) ให้ผลตอบสนองอย่างต่อเนื่อง (Continuity of Output Surface) และสามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ผลตอบสนองออกมาดีที่สุด

สมมติว่าเรากำหนดให้กระบวนการฟัซซี่อินเฟอร์เรนซ์ ชนิดที่ 3 ซึ่งมีจำนวนอินพุตอยู่ 2 อินพุต จะได้กฎดังนี้

กฎข้อที่ 1: ถ้า x คือ A_1 และ y คือ B_1 ดังนั้น $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$

กฎข้อที่ 2: ถ้า x คือ A_2 และ y คือ B_2 ดังนั้น $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$



รูปที่ 3.30 กระบวนการฟัซซี่อินเฟอร์เรนซ์ ชนิดที่ 3 โดยการใช้โครงข่ายที่ปรับได้

ในรูปที่ 3.30 (a) ได้แสดงถึงกระบวนการฟัซซี่อินเฟอร์เรนซ์ ชนิดที่ 3 ส่วนในรูปที่ 3.30 (b) ได้แสดงถึงโครงสร้างของ ANFIS ที่มีจำนวนอินพุตอยู่ 2 อินพุต ซึ่งสามารถแสดงฟังก์ชันได้ในแต่ละโหนด แต่ละชั้นได้ดังต่อไปนี้

ในชั้นที่ 1 : ทุกๆ โหนดในชั้นนี้จะอยู่ในรูปของโหนดสี่เหลี่ยม (Square Node) ซึ่งหมายถึงเป็นอแดปทีฟโหนด หรือโหนดที่ปรับค่าฟังก์ชันได้ ซึ่งเอาที่พุดของโหนดดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ซึ่งจะมีฟังก์ชันกำหนดในแต่ละโหนดนั้นๆ ดังต่อไปนี้

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x), \quad (3.67)$$

โดย x คือ อินพุตที่เข้ามาที่โหนด i และ A_i ก็คือตัวแปรภาษาที่ระบุถึงขนาดในโหนดนั้นๆ เช่น เล็ก ใหญ่ ส่วน O_i^1 คือ ค่าระดับสมาชิกของ A_i สมมติว่าเราเลือก μ_{A_i} เป็นรูประฆังคว่ำ (Bell Shape) เราจะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{b_i}}, \quad (3.68)$$

หรือถ้าเราเลือก μ_{A_i} เป็นฟังก์ชันแบบเกาส์เซียน (Gaussian Function) เราจะได้

$$\mu_{A_i}(x) = \exp \left[- \left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right], \quad (3.69)$$

โดยที่ $\{a_p, b_p, c_p\}$ คือกลุ่มพารามิเตอร์ที่สามารถปรับค่าได้ ซึ่งพารามิเตอร์ในชั้นนี้เราจะเรียกว่า ปริมิสพารามิเตอร์ (Premise Parameter)

ในชั้นที่ 2 : ทุกๆ โหนดในชั้นนี้จะอยู่ในรูปของโหนดวงกลม (Circle Node) ซึ่งไม่สามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ได้ โดยทุกๆ โหนดในชั้นนี้จะมีชื่อว่า Π โดยจะทำหน้าที่รับอินพุตที่ได้มาจากเอาต์พุตของชั้นที่ 1 มาทำการคูณ แล้วส่งออกไปในรูปของผลคูณ (Product) เช่น

$$w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y), \quad i = 1, 2. \quad (3.70)$$

ซึ่งเอาต์พุตของแต่ละโหนดจะแสดงถึงค่าน้ำหนัก (Firing Strength or Weight) ของกฎแต่ละข้อ

ในชั้นที่ 3 : ทุกๆ โหนดในชั้นนี้จะอยู่ในรูปของโหนดวงกลมจะมีชื่อว่า N และในแต่ละโหนดจะทำหน้าที่ปรับค่าของสัญญาณที่เข้ามาในช่วงสเกลเดียวกันกับโหนดอื่นๆ ข้างเคียงทั้งหมด (Normalize Firing Strengths or Normalized weight) หรือในอีกนัยหนึ่งก็คือปรับค่าน้ำหนักของกฎในโหนดนั้นๆ ให้เป็นอัตราส่วนกับค่าผลรวมน้ำหนักของกฎที่ได้จากโหนดอื่นๆ ซึ่งสมการจะเป็นดังนี้

$$\overline{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2. \quad (3.71)$$

ในชั้นที่ 4 : ทุกๆ โหนดในชั้นนี้จะอยู่ในรูปของโหนดสี่เหลี่ยมซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ ซึ่งเอาต์พุตของโหนดดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่าการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ซึ่งจะมี ฟังก์ชันที่กำหนดให้ในแต่ละโหนดนั้นๆ โดยจะมีสมการดังต่อไปนี้

$$O_i^4 = \overline{w}_i f_i = \overline{w}_i (p_i x + q_i y + r_i), \quad (3.72)$$

โดย \overline{w}_i คือเอาต์พุตที่ได้จากชั้นที่ 3 และ $\{p_i, q_i, r_i\}$ คือค่าพารามิเตอร์ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ ซึ่งพารามิเตอร์ในชั้นนี้เราจะเรียกว่าคอนซีควันท์พารามิเตอร์ (Consequent Parameters)

ในชั้นที่ 5 : ทุกๆ โหนดในชั้นนี้จะอยู่ในรูปของโหนดวงกลม (Circle Node) จะมีชื่อว่า Σ และจะมีจำนวนโหนดอยู่เพียงโหนดเดียว ซึ่งจะทำหน้าที่รวมสัญญาณที่รับมาจากเอาต์พุตของโหนดต่างๆ ในชั้นที่ 4 แล้วส่งเป็นเอาต์พุตออกไป สมการจะเป็นดังต่อไปนี้

$$O_1^5 = \text{overall output} = \sum_i \overline{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (3.73)$$

บทที่ 4

ทฤษฎีและหลักการใช้โปรแกรม ATP-EMTP สำหรับจำลองสถานะฟอลต์ต่างๆ เพื่อใช้ในการทดสอบการทำงานของรีเลย์

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม ATP-EMTP (Alternative Transient Program-Electromagnetic Transient Program) สำหรับการจำลองสถานะต่างๆ ของหม้อแปลงที่ทำการป้องกัน (Protected Power Transformer) รวมถึงการจำลองสถานะต่างๆของหม้อแปลงกระแส (Current Transformer) ความสามารถของโปรแกรมดังกล่าวคือสามารถหาผลตอบสนองของระบบในสถานะทรานเซียนได้ ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวเป็นที่ยอมรับและใช้กันในงานวิจัยอย่างแพร่หลายสำหรับจำลองหาผลตอบสนองของหม้อแปลงในสถานะทรานเซียน รวมถึงการจำลองระบบไฟฟ้าและระบบส่งจ่ายไฟฟ้า [5-15] ATP-EMTP จะมีโปรแกรมย่อย (Sub-routine Program) สำหรับการจำลองอุปกรณ์ต่างๆ ทางไฟฟ้า ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักในการคำนวณทางจรเทียบเคียงในสถานะต่างๆ ของหม้อแปลงซึ่งจะมีโปรแกรมย่อยสำหรับการจำลองหม้อแปลงอยู่หลายโปรแกรมได้แก่ BCTRAN, Saturable Transformer, X Transformer และ Ideal Transformer

ในการจำลองหม้อแปลงในช่วงเริ่มแรกนั้น ได้มีการนำเสนอมวงจรสตาร์ (Star Circuit) ซึ่งแสดงถึงหม้อแปลงจำนวน N ขด ซึ่งต่อมาได้ถูกเรียกว่า “Saturable Transformer Component” ซึ่งเป็นการหาค่าเมตริกซ์ $[R]$ และ $[L]^{-1}$ สำหรับช่วงทรานเซียน (Transient state)

$$[L]^{-1} [V] = [L]^{-1} [R] [i] + [di/dt] \quad (4.1)$$

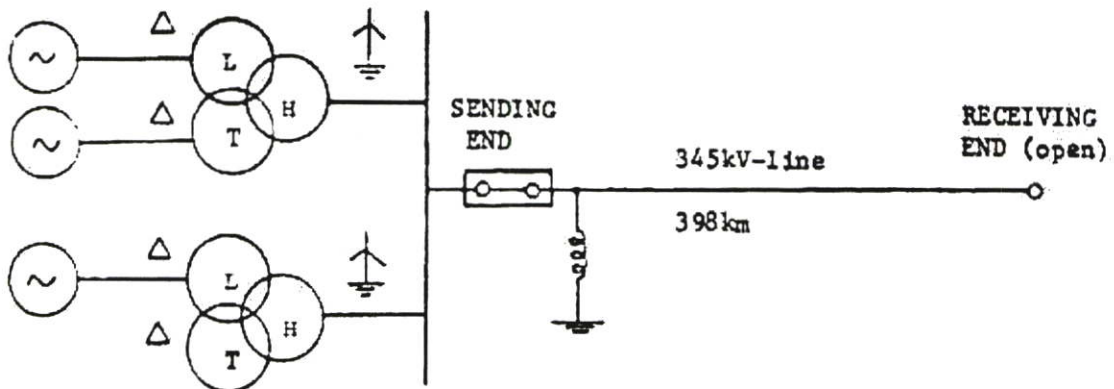
ต่อมาได้มีการพัฒนาโปรแกรมย่อย BCTRAN สำหรับการนำเสนอมิพีแดนซ์เมตริกซ์ (Impedance Matrix) และ มิพีแดนซ์เมตริกซ์ผกผัน (Inverse Impedance Matrix) ของหม้อแปลงชนิด 3 เฟส ที่อยู่ในรูปของ Coupled R-L มีการนำค่ารีลักแตนซ์ลำดับศูนย์ของอากาศ (Zero-Sequence Air-Return Path Reluctance) มาคิดด้วย หากต้องการคำนึงถึงผลของการอิ่มตัวของแกนเหล็กก็สามารถทำได้โดยต่อตัวรีแอคเตอร์ชนิดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Reactance) ที่เทอร์มินอลของเมตริกซ์ที่ได้จากโปรแกรม BCTRAN และหากต้องการให้คำนึงถึงผลของฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ในแกนเหล็กก็สามารถทำได้โดยการต่อรีแอคเตอร์ที่มีผลของฮิสเทอรีซิส หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “Pseudo-Nonlinear Hysteresis Reactor” [5]

ในการที่จะอธิบายที่มาของวงจรเทวินินนั้น ให้ลองดูที่ตัวอย่างในรูป 4.1 เมื่อวงจรประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิด 3 ชุด และหม้อแปลงชนิดขดลวดจำนวน 2 ตัว ค่ารีแอกแตนซ์ลัดวงจร (Short Circuit Reactance) ของหม้อแปลง ระหว่างขดลวดแรงสูง กับขดแรงต่ำ X_{HL} มีค่า 0.117 pu และระหว่างขดแรงสูงกับ ขดลวดเทอร์เชียรี่รี (Tertiary winding) X_{HT} มีค่า 0.115 pu และระหว่างขดแรงต่ำกับ ขดลวดเทอร์เชียรี่รี X_{LT} มีค่า 0.241 pu. ส่วนค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิด X_d'' มีค่า 0.1385 pu. ที่เบส 100 MVA, 60Hz ดังนั้น

$$X_H = \frac{1}{2} (X_{HL} + X_{HT} - X_{LT}) = \frac{1}{2} (0.117 + 0.115 - 0.241) = -0.0045 \text{ pu.}$$

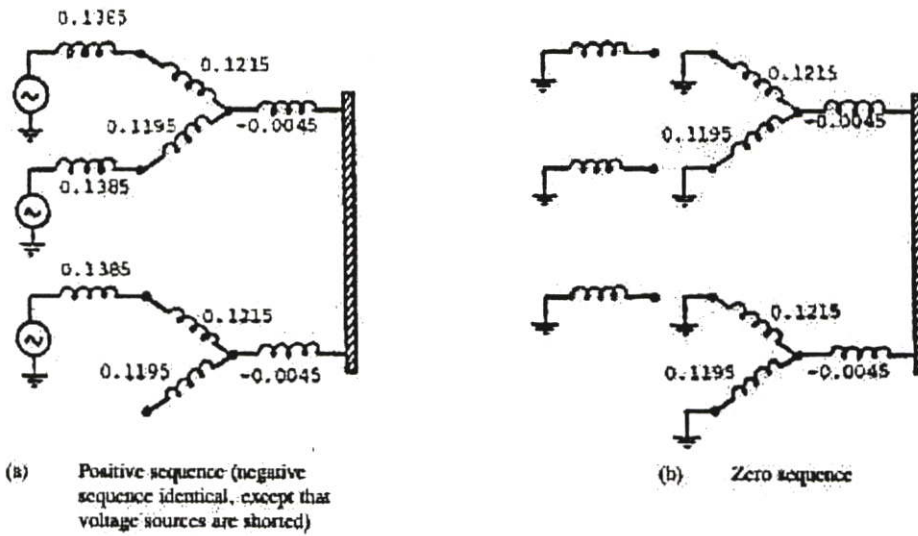
$$X_L = \frac{1}{2} (X_{HL} + X_{LT} - X_{HT}) = \frac{1}{2} (0.117 + 0.241 - 0.115) = -0.1215 \text{ pu.}$$

$$X_T = \frac{1}{2} (X_{HT} + X_{LT} - X_{HL}) = \frac{1}{2} (0.115 + 0.241 - 0.117) = -0.1195 \text{ pu.}$$



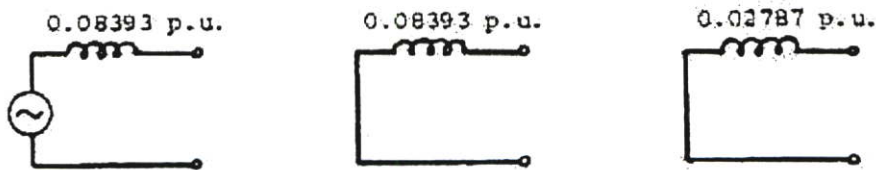
รูปที่ 4.1 วงจรที่ใช้อธิบายหลักการของเทวินิน

ด้วยความรู้จากวงจรสตาร์ (Equivalent Star Circuit) สำหรับหม้อแปลง 3 ชุด จึงทำให้วงจรในรูป 4.1 สามารถแสดงในรูปของอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ (Zero Sequence Impedance) และอิมพีแดนซ์ลำดับบวก (Positive Sequence Impedance) ดังในรูป 4.2 และเพื่อให้่ายในการคำนวณค่าความต้านทานจึงไม่นำมาคิด จากในรูปที่ 4.2 ค่ารีแอกแตนซ์ลำดับศูนย์ (Zero Sequence Reactance) ได้ถูกประมาณให้มีค่าเท่ากับค่ารีแอกแตนซ์ลำดับบวก (Positive Sequence Reactance) ซึ่งจะให้ผลถูกต้องในกรณีของหม้อแปลงชนิดเฟสเดียว 3 ตัวมาต่อกันเป็นหม้อแปลง 3 เฟส แต่จะให้ค่าที่ไม่ถูกต้องนักสำหรับหม้อแปลงชนิด 3 เฟส

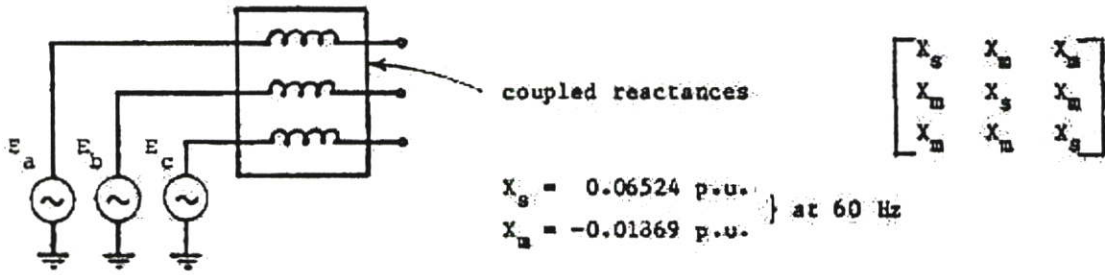


รูปที่ 4.2 วงจรเทียบเคียงของวงจรในรูป 4.1 (Reactance Value in p.u. Base On 100MVA, 60 Hz)

สังเกตได้ว่าขดลวดที่ต่อแบบเดลต้าจะทำตัวเหมือนสถานะลัดวงจรสำหรับกระแสลำดับศูนย์ (Zero Sequence Current) โครงข่ายในรูป 4.2 สามารถลดให้อยู่ในรูปของวงจรเทวินินชนิด Sequence Quantity ได้ 3 วงจร ดังในรูปที่ 4.3 และแปลงให้เป็นวงจรเทวินินชนิด 3 เฟสในรูปของ Phase Quantity ได้ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งวงจร 3 เฟสชนิด Phase Quantity ดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้ในโปรแกรม EMTP สำหรับแสดงถึง Power Plant ซึ่งค่าที่ได้จะถูกแปลงจากค่าเปอร์ยูนิตให้เป็นค่าจริง โดยค่าแรงดันจริงอยู่ที่ 345KV ดังนั้นค่า X_{pos} และ X_{neg} มีค่าเท่ากับ $0.08393 \times (345kV)^2 / 100$ หรือเท่ากับ 99.90 Ω ส่วนค่า X_{zero} มีค่าเท่ากับ 33.17 Ω หรือหากเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ Self และ Mutual Inductance จะได้ X_s มีค่าเท่ากับ 77.65 Ω และ X_m มีค่าเท่ากับ 22.25 Ω ที่ 60 Hz วงจรในช่วงของการจำลองขณะทรานเซียน ค่าเมตริกซ์ $[X]$ จะถูกแทนที่โดยค่า Inductance Matrix $[L]$



รูปที่ 4.3 วงจรเทวินิน ในรูปของ Sequence Quantities



รูปที่ 4.4 วงจรเทวินินแบบ 3 เฟส ในรูปของ Phase Quantities

สำหรับหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด (Two Winding Transformer) สมมติว่าค่ารีแอคแตนซ์ลัดวงจร (Short Circuit Reactance) มีค่า 10% , ค่าความต้านทานลัดวงจร (Short Circuit Resistance) มีค่า 0.5% และ ค่ากระแสกระตุ้น (Exciting Current) มีค่า 1% สอดคล้องกับ V_{rating} และ S_{rating} ของหม้อแปลง ในที่นี้เราไม่นำค่า Excitation Loss มาคิด ส่วนค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร คือ Z_{pu} ค่าสูญเสียในขดลวดคือ P_{loss} และกำลังไฟฟ้าคือ S_{rating} ดังนั้นค่าความต้านทานลัดวงจร และค่ารีแอคแตนซ์ลัดวงจรคือ

$$R_{pu} = P_{loss} / S_{rating} \quad (4.2)$$

$$X_{pu} = \sqrt{Z_{pu}^2 - R_{pu}^2} \quad (4.3)$$

เนื่องจากค่าสูญเสียในขดลวดที่บอกไม่ได้ระบุการกระจายค่าสูญเสียระหว่างขดลวด 1 หรือขดลวด 2 ดังนั้นเราจึงประมาณว่า

$$R_{1pu} = R_{2pu} = \frac{1}{2} \times R_{pu} \quad (4.4)$$

ดังนั้นเราสามารถหาความต้านทานของขดลวดได้จากสมการข้างต้น ในรูปที่ 4.5 แสดงถึงวงจร T ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรจึงมีค่า $0.005 + j 0.10 \text{ pu}$. (Short circuit resistance = 0.5%, Short circuit reactance = 10%) ซึ่งจะถูกแบ่งให้มีค่าเท่ากับ 2 ค่า และ ค่า Magnetizing Reactance คือ $j99.95 \text{ pu}$. เป็นค่าที่ไม่ได้นำค่าสูญเสียในแกนเหล็ก (Excitation Loss) มาคิด ดังนั้นค่า Input Impedance จึงมีค่าเท่ากับ 100 pu (ไม่นำผลของ Excitation Loss มาคิด) ดังนั้นจะได้

$$\begin{bmatrix} V_{1pu} \\ V_{2pu} \end{bmatrix} = \left[\begin{bmatrix} 0.0025 & 0 \\ 0 & 0.0025 \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} 100 & 99.95 \\ 99.95 & 100 \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} I_{1pu} \\ I_{2pu} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

สำหรับ Steady State Solution หรือ

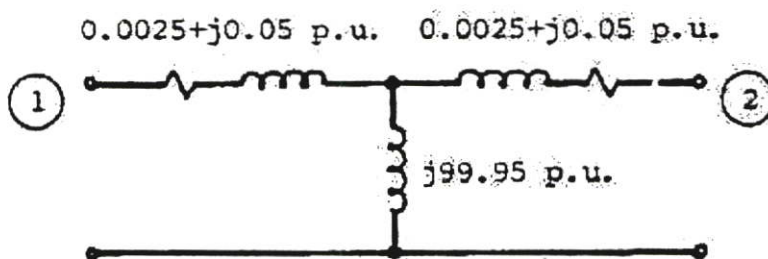
$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + [L] \begin{bmatrix} di_1 / dt \\ di_2 / dt \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

สำหรับ Transient Solution

ค่า $[R]$ จะเป็นค่าเดียวกันกับสมการที่ 4.2 และค่า $[L] = 1/\omega[X]$ โดยส่วนมากแล้ว โปรแกรม EMTP จะประมวลผลโดยใช้ค่าจริงมากกว่าค่าเปอร์ยูนิต ดังนั้นสมการที่ (4.5) จึงถูกแปลงเป็นค่าจริง

$$[Z] = \frac{1}{S_{rating}} \left[\begin{bmatrix} 0.0025V_1^2 & 0 \\ 0 & 0.0025V_2^2 \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} 100V_1^2 & 99.95V_1V_2 \\ 99.95V_1V_2 & 100V_2^2 \end{bmatrix} \right] \Omega \quad (4.7)$$

โดยที่ S_{rating} คือกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power Rating) ของหม้อแปลง ส่วน V_1, V_2 คือ ค่าแรงดันพิกัดของหม้อแปลง



รูปที่ 4.5 วงจร T แสดงถึงหม้อแปลง 2 ขดลวด

หลักการพื้นฐานที่ได้กล่าวมาเป็นหลักการที่ใช้ในโปรแกรมย่อย BCTRAN และโปรแกรมย่อย Saturable Transformer ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้โปรแกรมย่อย BCTRAN สำหรับคำนวณค่าเมตริกซ์ของค่าความต้านทาน และค่าเหนี่ยวนำที่อยู่ในรูปของ Self Inductance และ Mutual Inductance [5,6] ซึ่งเมตริกซ์ดังกล่าวจะออกมาในรูปของวงจรเทียบเคียงที่มีความต้านทาน และค่า

ความเหนี่ยวนำต่ออยู่ (Coupled Linear Resistance-Inductance Branch Equivalent Circuit) ขนาด 6x6 สำหรับหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด และขนาด 9x9 สำหรับหม้อแปลงชนิด 3 ขดลวด ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวจะอาศัยผลการทดสอบหม้อแปลงมาคำนวณหาค่าความต้านทาน และค่าความเหนี่ยวนำในรูปของ Self Inductance และ Mutual Inductance ซึ่งผลการทดสอบของหม้อแปลงที่จำเป็น ได้แก่ ผลการทดสอบแบบลัดวงจรของหม้อแปลง (Short Circuit Test or Load Test) ผลทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นของหม้อแปลง หรือการทดสอบแบบเปิดวงจร ซึ่งจะต้องทำการทดสอบทั้งลำดับบวกและลำดับศูนย์ (Positive and Zero Excitation Test or No Load Test or Open circuit test)

เนื่องจากในการทดลองเกี่ยวกับรีเลย์ป้องกันหม้อแปลงจะต้องมีหม้อแปลงเข้ามาเกี่ยวข้องหลายตัว ทั้งในส่วนของหม้อแปลงกำลัง (Power Transformers) และหม้อแปลงกระแส (Current Transformers) ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการอ้างอิงในภายหลัง จึงได้ตั้งชื่อของหม้อแปลงต่างๆ ไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงถึงชื่อของหม้อแปลงกำลัง และหม้อแปลงกระแสที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อหม้อแปลง	วัตถุประสงค์	ชนิด และขนาด
A	เป็นหม้อแปลงกำลังใช้สำหรับการเรียนรู้ของรีเลย์ที่นำเสนอ	หม้อแปลงกำลังขนาด 35 MVA, 132/11.05 kV YNyn0 แกนเหล็กเป็นแบบ 3 ขา
A150C30	เป็นหม้อแปลงกระแสที่ต่อต้านแรงสูงของหม้อแปลง A	หม้อแปลงกระแส 150/5 A Class C30
A150C400	เป็นหม้อแปลงกระแสที่ต่อต้านแรงสูงของหม้อแปลง A	หม้อแปลงกระแส 150/5 A Class C400
A2000C200	เป็นหม้อแปลงกระแสที่ต่อต้านแรงต่ำของหม้อแปลง A	หม้อแปลงกระแส 2000/5A Class C200
A2000C800	เป็นหม้อแปลงกระแสที่ต่อต้านแรงต่ำของหม้อแปลง A	หม้อแปลงกระแส 2000/5A Class C800
B	เป็นหม้อแปลงกำลังใช้สำหรับทดสอบของรีเลย์ที่นำเสนอ	หม้อแปลงกำลัง ขนาด 50 MVA, 115/23.0 kV YNyn0 แกนเหล็กเป็นแบบ 3 ขา
B400C100	เป็นหม้อแปลงกระแสที่ต่อต้านแรงสูงของหม้อแปลง B	หม้อแปลงกระแส 400/5A Class C100
B1300C100	เป็นหม้อแปลงกระแสที่ต่อต้านแรงต่ำของหม้อแปลง B	หม้อแปลงกระแส 1300/5A Class C100

4.1 แบบจำลองของหม้อแปลงโดยใช้โปรแกรมย่อย BCTRAN

ในที่นี้จะกล่าวถึงหลักการหาจรรยาเทียบของหม้อแปลง (Terminal Equivalent Circuit) โดยโปรแกรมย่อย BCTRAN [6] โปรแกรมย่อย BCTRAN สามารถใช้สำหรับหาจรรยาเทียบเคียงของหม้อแปลงทั้งแบบที่มีแกนเหล็กเป็นชนิด Core หรือ Shell และทั้งชนิด 2 ขดลวด และ 3 ขดลวด โดยใช้ผลการทดสอบของหม้อแปลงมาเป็นข้อมูลอินพุต ซึ่งในโปรแกรมนี้นำผลของการสูญเสียในแกนเหล็ก (Excitation Loss) มาคิดด้วย แม้ว่าค่าสูญเสียในแกนเหล็กสามารถจะได้สำหรับกรณีของหม้อแปลงชนิดเฟสเดียว หรือหม้อแปลงสามเฟสที่มีค่ารีลักแตนซ์ต่ำ (Low Reluctance) ซึ่งสังเกตได้จากค่าของกระแสกระตุ้นต่ำ เป็นผลให้ค่าสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าต่ำ แต่สำหรับหม้อแปลงสามเฟสที่มีค่ารีลักแตนซ์สูงค่าความสูญเสียของแกนเหล็กจะมีผลเป็นอย่างมาก และยังคงนำผลการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์แบบเปิดวงจร (Zero Sequence excitation test) มาคิดด้วย

สำหรับผลการทดสอบของหม้อแปลงสามเฟสที่มีขดลวดที่ต่อแบบเดลต้าย่างน้อย 1 ขดลวด ชนิดของแกนเหล็กจะไม่มีผลต่อความถูกต้องของจรรยาเทียบเคียงมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากในกรณีทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์แบบเปิดวงจร ขดลวดดังกล่าวจะเปรียบเสมือนการลัดวงจร ดังนั้นจะให้ผลการทดสอบออกมาเหมือนกับการทดสอบแบบลัดวงจรลำดับศูนย์ (Zero sequence short circuit test) ดังนั้นในการทดสอบหม้อแปลงแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์ ควรจะเปิดวงจรของขดลวดทุกขดที่ต่อแบบเดลต้า ซึ่งจะมีผลในกรณีที่เกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็ก (Saturation) จะทำให้ฟลักซ์ที่เกิดขึ้นสามารถลัดผ่านไปยังตัวถังของหม้อแปลง แต่อย่างไรก็ตามทั้งนี้เนื่องจากในการทดสอบจะทำการทดสอบแค่ 1 จุดการทำงานเพื่อนำไปหาค่าสูญเสียของแกนเหล็กแทนการหาแบบครบจุดการทำงานตามเส้นโค้งการอิ่มตัว (Saturation Curve) ดังนั้นในการทดสอบแม้ว่าจะไม่เปิดวงจรขดลวดเดลต้า ค่าของกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์ (Zero Sequence Exciting Current) หรือค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์ (Zero Sequence Exciting Loss) จะไม่มีผลต่อความถูกต้องของจรรยาเทียบเคียงมากนัก

สำหรับหม้อแปลงที่มีขดลวดต่อแบบสตาร์อย่างเดียว ชนิดของแกนเหล็กจะมีผลอย่างมากในการหาจรรยาเทียบเคียงสำหรับในกรณีที่หม้อแปลงเป็นชนิดที่มีค่ารีลักแตนซ์ต่ำ อันได้แก่หม้อแปลงสามเฟสที่มีแกนเหล็กเป็นแบบ Shell หรือหม้อแปลงที่มีแกนเหล็กชนิด 4 หรือ 5 ขา หรือหม้อแปลงชนิดเฟสเดียวที่นำมาต่อเป็น 3 เฟส ซึ่งในกรณีดังกล่าว โฮโมโพลาร์ฟลักซ์ (Homopolar Flux) จะคล่องผ่านแกนเหล็ก ดังนั้นจึงทำให้ค่ารีลักแตนซ์ต่ำ ดังนั้นค่ากระแสกระตุ้นลำดับศูนย์จึงมีค่าต่ำ ดังนั้นค่าสูญเสียในแกนเหล็กจึงสามารถจะได้ แต่สำหรับหม้อแปลงที่มีค่ารีลักแตนซ์สูง (High reluctance) อันได้แก่หม้อแปลงชนิด 3 ขาที่มีแกนเหล็กเป็นแบบ Core ในการทดสอบแบบกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์ ค่าโฮโมโพลาร์ฟลักซ์ (Homopolar Flux) จะคล่องผ่านอากาศและตัวถังของหม้อแปลง ดังนั้นค่ากระแสกระตุ้นลำดับศูนย์จึงมีความสำคัญ ดังนั้นค่าสูญเสีย

ในแกนเหล็กจึงไม่สามารถละได้ แต่อย่างไรผลที่ได้จากการทดสอบก็จะมีแคในจุดทำงานแทนที่จะครบทุกจุดการทำงานตามเส้นโค้งการอิ่มตัวของแกนเหล็ก (Saturation Curve)

ในการหาจรรยาเทียบเคียงของโปรแกรมย่อย BCTRAN จะไม่คำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของแกนเหล็ก (Nonlinearities of Core) หากต้องการผลของความไม่เป็นเชิงเส้นก็สามารถทำได้โดยการต่อค่าอินดักแตนซ์ชนิดที่ไม่เป็นเชิงเส้นชนิด 96 หรือ 98 (Nonlinear Inductance type 96, 98) ที่เทอร์มินอลของหม้อแปลงที่มีขดลวดใกล้กับแกนเหล็กมากที่สุด [7,8] ซึ่งจะให้ผลของอินทิเกรตของแรงดันมีค่าใกล้เคียงกับแกนเหล็ก แต่จะต้องระบุค่ากระแสกระตุ้นลำดับบวกเป็นศูนย์ $I_{ex,dir} = 0$ เพื่อไม่ให้มี Magnetizing Inductance ซ้อนกัน ดังนั้นเอาท์พุทที่ได้จากโปรแกรม BCTRAN จะอยู่ในรูปของการต่อร่วมกันของค่าความต้าน(Resistance) และค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ชนิดเชิงเส้น (Coupled linear RL) มาแสดงเป็นวงจรรเทียบของหม้อแปลงในรูปของเวลา (Time Domain) โดยในสภาวะทรานเซียนจะมีสมการเฟสเซอร์ดังต่อไปนี้

$$[v] = [R][i] + [L]\frac{d}{dt}[i] \quad (4.8)$$

ถ้า $[A] = [L]^{-1}$ ดังนั้น

$$\frac{d}{dt}[i] = [A][v] - [A][R][i] \quad (4.9)$$

ในหม้อแปลงเฟสเดียว จำนวนขดลวด N ขด ในช่วงสภาวะ Steady State สมการเฟสเซอร์ คือ

$$[V] = [Z][I] \quad (4.10)$$

ค่าของ $[Z]$ ในแนวทแยงมุม (Diagonal Element) จะสามารถหาได้จากผลการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้น จากความสัมพันธ์ของ

$$Z_{ii} = f(I_{exci}, P_{Fei}) \quad (4.11)$$

โดยที่ I_{exci} คือค่ากระแสกระตุ้นที่วัดได้จากการที่จ่ายกระแสให้กับหม้อแปลง ณ ขดลวดที่ i ขณะที่ทำการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้น

P_{Fei} คือ ค่าสูญเสียในแกนเหล็กที่วัดได้จากการที่จ่ายกระแสให้กับหม้อแปลง ณ ขดลวดที่ i ขณะที่ทำการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้น ส่วนค่าของ $[Z]$ แนวที่ไม่ใช่แนวทแยงมุม (Off Diagonal Element) จะสามารถหาได้จากผลการทดสอบแบบลัดวงจร

$$Z_{ik} = f(P_{Cu ik}, V_{ik}^{short}) \quad (4.12)$$

โดยที่ (i,k) คือ คู่ของขดลวดที่ทำการทดสอบแบบลัดวงจร

$P_{Cu ik}$ คือ ค่าความสูญเสียในขดลวดที่วัดได้ (Copper Loss)

V_{ik}^{short} คือ ค่าแรงดันขณะลัดวงจร (Short Circuit pu Voltage)

ซึ่งค่าความสูญเสียในขดลวดจะนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานของขดลวด (Winding Resistance) แต่อย่างไรก็ตามถ้าทราบค่าความต้านทานจากการวัดโดยตรง ก็สามารถนำมาป้อนให้กับโปรแกรมแทนการคำนวณหาค่าความสูญเสียในขดลวด ส่วนค่าแรงดันลัดวงจรจะนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานของขดลวดต่อไฟฟ้าสลับ (Reactance) ดังนั้นถ้าให้ค่าอิมพีแดนซ์ขณะลัดวงจรเป็น Z_{ik}^{short} , ค่า Mutual Impedance สามารถหาได้จาก

$$Z_{ik} = Z_{ki} = \sqrt{(Z_{ii} - Z_{ik}^{short})Z_{kk}} \quad (4.13)$$

ซึ่งค่าเมตริกซ์ $[R]$ และ $[L]$ ในสมการที่ (4.8) สามารถหาได้จากค่าจริง (Real part) และค่าจินตภาพ (Imaginary part) ของเมตริกซ์ $[Z]$ ในสมการที่ (4.13)

ในส่วน of ค่า $[Z]$ ของหม้อแปลงสามเฟสจำนวนขดลวด N ขด ในช่วงสภาวะ Steady State นั้น ยังคงใช้สมการที่ใช้กับหม้อแปลงเฟสเดียวที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นได้ แต่จะต้องมีการเปลี่ยนค่ากระแส แรงดันและอิมพีแดนซ์ จากค่าที่เป็น Scalar มาเป็น Matrices ดังต่อไปนี้

$$i_k \rightarrow [i_{kA} i_{kB} i_{kC}]^T \quad (4.14)$$

$$v_k \rightarrow [v_{kA} v_{kB} v_{kC}]^T \quad (4.15)$$

$$Z_{ki} \rightarrow \begin{bmatrix} Z_{kis} & Z_{kim} & Z_{kim} \\ Z_{kim} & Z_{kis} & Z_{kim} \\ Z_{kim} & Z_{kim} & Z_{kis} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

โดยที่ A, B, C คือ การบ่งบอกถึงเฟส

Z_{kis} คือ ค่า Self Impedance ระหว่างขดลวด k และขดลวด i ซึ่งก็คือค่า Mutual Impedance ระหว่างขดลวด 2 ขดในเฟสเดียวกัน

Z_{kim} คือ ค่า Mutual Impedance ระหว่างขดลวด k และขดลวด i ซึ่งก็คือค่า Mutual Impedance ระหว่างขดลวด 2 ที่ต่างเฟสกัน

ในสมการที่ 4.16 จะใช้สำหรับหาค่าอิมพีแดนซ์ โดยใช้ผลการทดสอบทั้งแบบลำดับศูนย์ และลำดับบวก จากนั้นทำการแปลงให้เป็นค่า Self และ Mutual Impedance โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$Z_s = \frac{1}{3}(Z_0 + 2Z_1), \quad Z_m = \frac{1}{3}(Z_0 - Z_1) \quad (4.17)$$

ดังนั้นเอาท์พุทที่ได้จากโปรแกรมย่อย BCTRAN จะอยู่ในรูปของเมทริกซ์ของ R และ L ดังสมการที่ 4.18 และ 4.19 ซึ่งสามารถนำเมทริกซ์ที่ได้ดังกล่าวส่งไปให้โปรแกรม ATP-EMTP ในการจำลองระบบไฟฟ้าต่อไป

$$[R] = \begin{bmatrix} R_1 & & 0 \\ & \dots & \\ 0 & & R_6 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_1 & L_{12} & \dots & L_{16} \\ L_{21} & L_2 & \dots & L_{26} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{61} & L_{62} & \dots & L_6 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

จากที่ได้กล่าวมาเป็นหลักการหาแบบจำลองของหม้อแปลงในรูปของ Self และ Mutual Impedance โดยอาศัยผลการทดสอบหม้อแปลงทั้งในแบบจ่ายกระแสกระตุ้น และแบบลัดวงจร ในงานวิจัยนี้ได้มีการจำลองหม้อแปลงกำลังจำนวน 2 ตัว ซึ่งกำหนดชื่อเป็น หม้อแปลง A และ B สำหรับการจำลองหม้อแปลง A มีวัตถุประสงค์เพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการเรียนรู้ จดจำ และ การแยกแยะพอลดี สำหรับรีเลย์ที่ใช้ระบบพีชชีลอจิกและระบบโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเป็นหลักการใหม่ที่นำเสนอในงานวิจัย ส่วนหม้อแปลง B จะถูกนำมาใช้ในการทดสอบ

การป้อนข้อมูลให้กับโปรแกรม BCTRAN สำหรับหม้อแปลง A

สำหรับหม้อแปลง A นั้นเป็นหม้อแปลงขนาด 35 MVA 132/11.05 kV มีการต่อขดลวดแบบ YNyn0 ซึ่งผลการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้น และแบบลัดวงจร มีรายละเอียดดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบ(Test Report) ของหม้อแปลง A

Description	Data
Power rating S/winding connection	35.0 MVA/YNyn0
Voltage rating	132.0 / 11.05 kV
Current rating	153.08/1828.76
Positive Sequence Test (Direct measurements):	
Excitation losses (Open HV)	18.112 kW
Excitation current	2.39 A
Excitation voltage (Energized at rated voltage)	11.01 kV
Short-circuit losses(Short LV)	192.53 kW
Short-circuit current (Energized at rated current)	153.1 A
Short-circuit voltage	35.213 kV
Zero Sequence Test (Homopolar measurement):	
Excitation losses (Open HV)	115.325 kW
Excitation current	500.0 A
Excitation voltage	1.183 kV
Short-circuit losses(Short LV)	8.825 kW
Short-circuit current	70. A
Short-circuit voltage	2.86 kV

ที่มา : ATP rule book [6]

จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 เป็นข้อมูลที่ได้มาจากการทดสอบทั้งแบบจ่ายกระแสกระตุ้น และการทดสอบแบบลัดวงจร ทั้งการทดสอบแบบ ลำดับบวก และลำดับศูนย์ จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดสอบไปทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์สำหรับป้อนให้กับโปรแกรม BCTRAN (รายละเอียดการคำนวณ ดูได้จากภาคผนวก ก.)

ดังนั้นข้อมูลที่ใช้ในการป้อนให้กับโปรแกรม BCTAN จะเป็นไปตามข้างล่างนี้

```
BEGIN NEW DATA CASE
ACCESS MODULE BCTAN
$ERASE
C |   FREQ|   IEXPOS|   SPOS|   LEXPOS|   IEXZERO|   SZERO|   LEXZERONPITIWIPI
2 |   50. |   .1311 |   35. |  18.244 |   49.15 |   35. |  3353.93 0 2 2-1
C k|   VRAT|   R1| |bus1||bus2||bus1||bus2||bus1||bus2|
1 |  76.21 |   |   BUS1_RBUSH  BUS1_SBUSH  BUS1_TBUSH
C k|   VRAT|   R2| |bus1||bus2||bus1||bus2||bus1||bus2|
2 |   6.38 |   |   BUS2_RBUSL  BUS2_SBUSL  BUS2_TBUSL
C | |   PIJ|   ZPOSIJ|   SPOS|   ZZEROIJ|   SHOMIDIL
1 2 | 192.53 26.691 |   35. |  24.6213 |   35. 0 1
BLANK CARD TERMINATE INPUT OF SHORT-CIRCUIT TEST DATA
$PUNCH
BLANK
BEGIN NEW DATA CASE
```

หลังจากที่นำข้อมูลต่างๆ ไปป้อนให้กับโปรแกรมย่อย BCTAN ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวจะนำไปประมวลผลและสร้างเอาท์พุทออกมาให้อยู่ในรูปของ Coupled RL ดังข้างล่างนี้

```
$VINTAGE, 1,
1BUS2_RBUSL          4474.4655159359
2BUS2_SBUSL          -2218.910788382
                      4474.4655159359
3BUS2_TBUSL          -2218.910788382
                      -2218.910788382
                      4474.4655159359

USE RL
$UNITS, 0.50E+02 , 0.
1BUS1_RBUSH          1.369233463069 276371.46702425
2BUS2_RBUSL          0.0 23125.893148548
                      .0095961038351 1936.0083753803
3BUS1_SBUSH          0.0 -137608.3908058
                      0.0 -11519.74302843
4BUS2_SBUSL          1.369233463069 276371.46702425
                      0.0 -11519.74302843
                      0.0 -964.3873575831
                      0.0 23125.893148548
                      .0095961038351 1936.0083753803
5BUS1_TBUSH          0.0 -137608.3908058
                      0.0 -11519.74302843
                      0.0 -137608.3908058
                      0.0 -11519.74302843
6BUS2_TBUSL          1.369233463069 276371.46702425
                      0.0 -11519.74302843
                      0.0 -964.3873575831
                      0.0 -11519.74302843
                      0.0 -964.3873575831
                      0.0 23125.893148548
                      .0095961038351 1936.0083753803
```

การป้อนข้อมูลให้กับโปรแกรม BCTRAN สำหรับหม้อแปลง B

สำหรับหม้อแปลง B จะถูกนำมาใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้ เป็นหม้อแปลงขนาด 50 MVA และมีใช้อยู่ที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อยู่ในสถานีไฟฟ้าย่อยจังหวัดมหาสารคาม ซึ่งผลิตจากบริษัทเอบีบี จำกัด ซึ่งมีผลการทดสอบดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบ (Test Report) ของหม้อแปลง B

<i>Description</i>	<i>Data</i>
Power rating S/winding connection	50.0 MVA/YNyn0
Voltage rating	115.0 / 23 kV
Current rating	251.02/1255.11A
Positive Sequence Test (Direct measurements):	
Excitation losses (Open HV)	22.18 kW
Excitation current	0.922 A
Excitation voltage (Energized at rated voltage)	23 kV
Short-circuit losses (Short LV)	148.10 kW
Short-circuit current (Energized at rated current)	251.07 A
Short-circuit voltage	14.44 kV
Zero Sequence Test (Homopolar measurements):	
Excitation losses (Open HV)	221.0 kW
Excitation current	200 A
Excitation voltage	1.993 kV
Short-circuit losses (Short LV)	345.0 kW
Short-circuit current	200.2 A
Short-circuit voltage	3.224 kV

ที่มา : รายงานการทดสอบหม้อแปลง (Test Report) จากบริษัท เอบีบี จำกัด Serial no. 56039

จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 เป็นข้อมูลที่ได้มาจากการทดสอบทั้งแบบจ่ายกระแสกระตุ้น และการทดสอบแบบลัดวงจร ทั้งการทดสอบแบบลำดับบวก และลำดับศูนย์ จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดสอบไปทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์สำหรับป้อนให้กับโปรแกรม BCTRAN (รายละเอียดการคำนวณ ดูได้จากภาคผนวก ก.)

ดังนั้นข้อมูลที่ใช้ในการป้อนให้กับ โปรแกรม BCTAN จะเป็นไปตามข้างล่างนี้

```

BEGIN NEW DATA CASE
ACCESS MODULE BCTAN
$ERASE
C |   FREQ|   IEXPOS|   SPOS|   LEXPOS|   IEXZERO|   SZERO|   LEXZERONPITIWIP
  2    50.    .0734    50.    22.180    35.39    50.    9810.97  0 2 2-1
C k|   VRAT|   R1| |bus1||bus2||bus1||bus2||bus1||bus2|
  1   66.39          BUS1_RBUSH  BUS1_SBUSH  BUS1_TBUSH
C k|   VRAT|   R2| |bus1||bus2||bus1||bus2||bus1||bus2|
  2   13.28          BUS2_RBUSL  BUS2_SBUSL  BUS2_TBUSL
C | |   PIJ|   ZPOSIJ|   SPOS|   ZZEROIJ|   SHOMIDIL
  1 2  148.10  12.557    50.    18.265    50. 0 1
BLANK CARD TERMINATE INPUT OF SHORT-CIRCUIT TEST DATA
$PUNCH
BLANK
BEGIN NEW DATA CASE

```

4.2 แบบจำลองสถานะกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง (Transformer Inrush Current)

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าวงจรเทียบเคียงของหม้อแปลงที่ได้มาจากโปรแกรมย่อย BCTAN จะไม่คำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของแกนเหล็ก แต่หากต้องการผลของความไม่เป็นเชิงเส้นก็สามารถทำได้โดยการต่อค่าอินดักแตนซ์ชนิดที่ไม่เป็นเชิงเส้นชนิด 96 (Pseudo Nonlinear Inductance type 96) ที่เทอร์มินอลของหม้อแปลงที่มีขดลวดใกล้กับแกนเหล็กมากที่สุดซึ่งจะให้ผลของอินทิเกรตของแรงดัน หรือค่าฟลักซ์มีค่าใกล้เคียงกับค่าฟลักซ์ในแกนเหล็ก [6,7] แต่จะต้องระบุค่ากระแสกระตุ้นลำดับบวกเป็นศูนย์ $I_{ex,dir} = 0$ หรือให้เหลือแต่เฉพาะในส่วนของค่าสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) เพื่อไม่ให้มี Magnetizing Inductance ซ้อนกัน ดังนั้นในการหาค่ากระแสกระตุ้นลำดับบวกที่คิดเฉพาะค่าสูญเสียในแกนเหล็กจะเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$I_{cu,dir} \approx \frac{P_{ex,dir}}{\sqrt{3} \cdot U_{ex,dir}} \quad (4.20)$$

โดยที่ $I_{cu,dir}$ คือค่ากระแสที่สูญเสียไปในแกนเหล็กจากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับบวก, $P_{ex,dir}$ คือค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับบวก และ $U_{ex,dir}$ คือค่าแรงดันกระตุ้นที่วัดได้จากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับบวกดังนั้น

สำหรับการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์สามารถหาค่ากระแสกระตุ้นลำดับศูนย์ที่คิดเฉพาะค่าสูญเสียในแกนเหล็กจะเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$I_{cu,har} \approx \frac{P_{ex,har}}{3 \cdot U_{ex,har}} \quad (4.21)$$

โดยที่ $I_{cu,har}$ คือค่ากระแสที่สูญเสียไปในแกนเหล็กจากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์, $P_{ex,har}$ คือค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์ และ $U_{ex,har}$ คือค่าแรงดันกระตุ้นที่วัดได้จากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์

สำหรับรายละเอียดการคำนวณหาค่ากระแสกระตุ้นที่คิดเฉพาะค่าสูญเสียในแกนเหล็กสำหรับหม้อแปลงที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถดูได้จากภาคผนวก ก.

ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับป้อนในโปรแกรม BCTRAN สำหรับหา Coupled Matrix ของหม้อแปลง A ซึ่งค่ากระแสกระตุ้นได้ปรับเปลี่ยนไปจะเป็นดังต่อไปนี้

```
BEGIN NEW DATA CASE
ACCESS MODULE BCTRAN
$ERASE
C |   FREQ|   IEXPOS|   SPOS|   LEXPOS|   IEXZERO|   SZERO|   LEXZERONPITIWIPI
  2    50.    .0510    35.    18.244    9.582    35.    3353.93  0 2 2-1
C k|   VRAT|   R1| |bus1||bus2||bus1||bus2||bus1||bus2|
  1   76.21          BUS1_RBUSH  BUS1_SBUSH  BUS1_TBUSH
C k|   VRAT|   R2| |bus1||bus2||bus1||bus2||bus1||bus2|
  2    6.38          BUS2_RBUSL  BUS2_SBUSL  BUS2_TBUSL
C | |   PIJ|   ZPOSIJ|   SPOS|   ZZEROIJ|   SHOMIDIL
  1 2  192.53  26.691    35.    24.6213    35. 0 1
BLANK CARD TERMINATE INPUT OF SHORT-CIRCUIT TEST DATA
$PUNCH
BLANK
BEGIN NEW DATA CASE
```

จากนั้นหาค่ารีแอกเตอร์ชนิดไม่เป็นเชิงเส้น และมีผลของฮิสเตอร์รีซีต (Type 96) มาต่อที่เทอร์มินอลของแบบจำลองหม้อแปลง ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้โปรแกรม SATURA และ HYSDAT โปรแกรม SATURA เป็นโปรแกรมสำหรับเปลี่ยนเส้นโค้งของกระแสกระตุ้นต่อแรงดันกระตุ้น ($v_{rms} - i_{rms}$) ที่ได้จากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้น ไปเป็นเส้นโค้งของฟลักซ์แม่เหล็กต่อกระแส ($\psi_{peak} - I_{peak}$) โดยการนำผลจากการทดสอบมาพลอตให้เป็นเส้นโค้งของกระแสกระตุ้นต่อแรงดันกระตุ้น ($v_{rms} - i_{rms}$) จากนั้นนำค่าที่ได้ไปป้อนให้กับโปรแกรมย่อย SATURA ในลักษณะของจุดการทำงาน หลังจากนั้นโปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ป้อนเป็นการเปลี่ยนเส้นโค้งของกระแสกระตุ้นต่อแรงดันกระตุ้น ไปเป็นเส้นโค้งของฟลักซ์แม่เหล็กต่อกระแส ($\psi_{peak} - I_{peak}$) ของแกนเหล็กของหม้อแปลง รายละเอียดในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ป้อนเป็นอินพุตให้กับโปรแกรม SATURA สำหรับหม้อแปลงที่ใช้ในงานวิจัยได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

ส่วนวิธีการหาค่ากระแสที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กอย่างเดียว โดยตัดกระแสที่เป็นส่วนที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็กออก สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$I_{ex,w} \approx I_{ex} \text{ (harmonics neglected)}$$

$$I_{m,w} \approx \sqrt{I_{ex,w}^2 - I_{cu,w}^2} \quad (4.22)$$

$$I_{m,w} \approx \sqrt{I_{ex,w}^2 - \left(\frac{P_{ex,w}}{U_{ex,w}}\right)^2} \quad (4.23)$$

โดยที่ $I_{ex,w}$ คือ กระแสที่กระตุ้นที่วัดได้จากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้น $I_{cu,w}$ คือ ค่ากระแสที่เป็นส่วนของการสูญเสียไปในแกนเหล็กต่อเฟส $P_{ex,w}$ คือ ค่ากำลังสูญเสียที่อ่านได้จากการทดสอบต่อเฟส และ $U_{ex,w}$ คือ ค่าแรงดันกระตุ้นที่วัดได้ต่อเฟสจากการทดสอบ และ $I_{m,w}$ คือ ค่ากระแสที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กต่อเฟส

หลังจากที่ได้ค่า $I_{m,w}$ ครอบคลุมจุดการทำงานบนเส้นโค้งกระแสกระตุ้น (Excitation Curve) แล้ว ให้ปรับค่ากระแสและแรงดันที่สร้างสนามแม่เหล็กให้อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ โดยใช้สมการ $I_{rms}(PU) = I_{rms} / I_{base}$ และ $V_{rms}(PU) = V_{rms} / V_{base}$ โดยที่ข้อมูลอินพุตทั้งหมดที่จะนำไปป้อนให้กับโปรแกรม SATURA ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการคำนวณหาค่ากระแส และแรงดันที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กสำหรับ

โปรแกรมย่อย SATURA ของหม้อแปลง A (แรงดันเบสที่ $\frac{11.05}{\sqrt{3}}$ kV, $\frac{35}{3}$ MVA)

$U_{ex(L-L)}kV$	$U_{ex(Phase)}kV$	$I_{ex}(A)$	$P_{ex}(kW)$	$I_{m,w}(A)$	$U_{ex(Phase)}(PU)$	$I_{m,w}(PU)$
9.0998	5.2538	1.6893	16.489	1.3263	0.8235	0.0007252
9.7498	5.6291	1.8639	17.545	1.5474	0.8823	0.0008461
11.05	6.3797	2.4074	18.244	2.2106	1	0.0012088
11.8290	6.83	4.9467	18.522	4.8634	1.0705	0.0026594
12.5448	7.2428	44.2214	18.899	44.2128	1.1352	0.0241771
12.9	7.5	132.64	18.93	132.638	1.1756	0.0725313

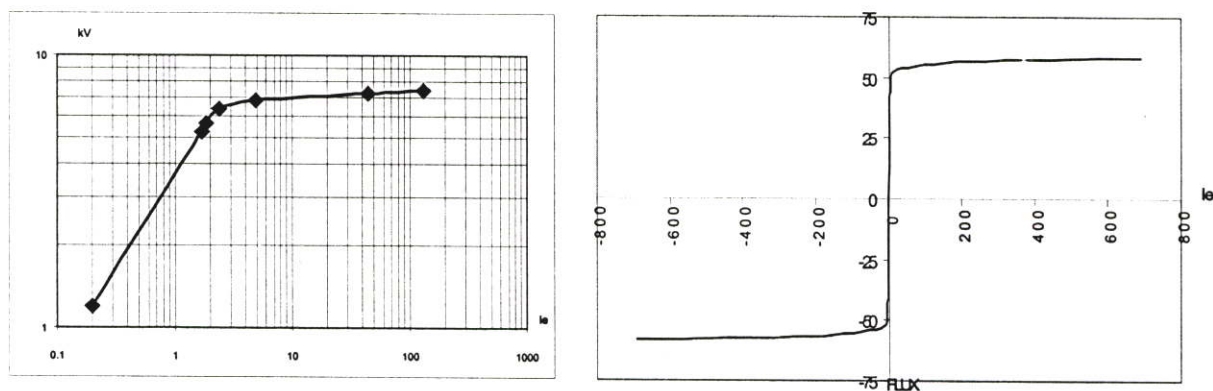
หลังจากนั้นนำค่า $U_{ex,(phase)}(PU)$ และ $I_{m,w}(PU)$ ป้อนเป็นอินพุตสำหรับโปรแกรมย่อย SATURA ดังต่อไปนี้

```

BEGIN NEW DATA CASE
$ERASE
C Input data for supporting routine SATURA
C      1      2      3      4      5      6
7      8
C
345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901
234567890
SATURATION
C FREQ | VBASE | SBASE | IPUNCH| KTHIRD|
50.0   6.3797 11.6666      1      1
C Irms (pu) | Vrms (pu) |
.7252      -3 .8235
.8461      -3 .8823
1.2088     -3 1
2.6594     -3 1.0705
24.1771    -3 1.1352
72.5313    -3 1.1756
          9999
$PUNCH
BLANK
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

หลังจากที่รัน โปรแกรม ATP จะได้เอาท์พุตออกมาในพันทซ์ไฟล์ (Punch File) ซึ่งจะมีค่าของ กระแส และฟลักซ์ออกมาเป็นจำนวนจุดเท่ากับจำนวนจุดของอินพุต เส้น โคง์เอาท์พุตได้แสดงไว้ใน รูปที่ 4.6



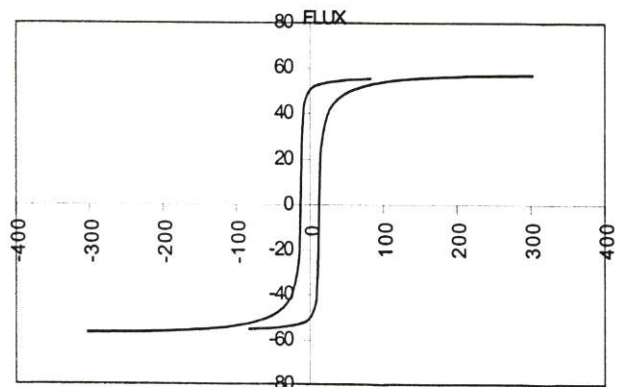
รูปที่ 4.6 เส้น โคง์ผลตอบสนองของแรงดันต่อกระแสกระตุ้น ($v_{rms} - i_{rms}$) (ซ้าย), เส้น โคง์เอาท์พุตใน รูปของฟลักซ์ต่อกระแส ($\psi_{peak} - I_{peak}$) ที่ได้จากโปรแกรม SATURA ของหม้อแปลง A

สังเกตได้ว่าเอาท์พุตที่ได้มาจากโปรแกรม SATURA เป็นค่ายอด (Peak) แต่เนื่องจากเอาท์พุต ที่ได้จากโปรแกรม SATURA อยู่ในลักษณะความเป็นเชิงเส้นแบบช่วง (Piecewise linear) ซึ่งจะไม่มีความต่อเนื่องในช่วงการทำงาน และในบางครั้งอาจได้ค่าตอบสนองไม่ถูกต้อง อีกทั้งไม่นำผลของ ฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis Effect) ของแกนเหล็กมาคิด ซึ่งในโปรแกรม ATP-EMTP ได้มีโปรแกรม

ย่อยที่ชื่อ HYSDAT ซึ่งใช้สำหรับสร้างเส้นโค้งที่มีผลของฮิสเตอร์รีซิส ปกติแล้วขนาดของฮิสเตอร์รีซิสจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพจำนวนขดลวดของหม้อแปลง โดยโปรแกรมดังกล่าวจะให้ผลตอบสนองของฟลักซ์และกระแสอ้างอิงตามแกนเหล็กหม้อแปลงชนิด Armco ซึ่งทำมาจากเหล็กซิลิกอน (Oriented Silicon Steel) โดยสิ่งที่จะต้องป้อนให้กับโปรแกรมดังกล่าวคือ ค่ากระแส และฟลักซ์แม่เหล็ก ณ จุดอิ่มตัว ซึ่งสามารถจะเลือกจุดดังกล่าวได้จากเอาท์พุทของโปรแกรม SATURA รายละเอียดของอินพุทที่จะต้องป้อนให้กับ โปรแกรม HYSDAT สำหรับรีแอกเตอร์ที่นำมาต่อที่เทอร์มินอลของหม้อแปลง A จะมีรายละเอียดดังข้างล่างนี้

```
BEGIN NEW DATA CASE
C Input data for supporting routine HYSDAT
C          1          2          3          4          5          6
7          8
C
34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
234567890
HYSTERESIS
$ERASE
C ITYPE | LEVEL |
          1      4
C CURSAT| FLXSAT|
          126.98  32.6
$PUNCH
BLANK
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
```

ซึ่งเอาท์พุทที่ได้จะอยู่ในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 เส้นโค้งการตอบสนองของฟลักซ์แม่เหล็กต่อกระแส ($\psi_{peak} - I_{peak}$) ที่ได้จากโปรแกรม HYSDAT สำหรับหม้อแปลง A

ในการหาค่ารีแอกเตอร์มาต่อที่เทอร์มินอลสำหรับหม้อแปลง B ซึ่งใช้สำหรับทดสอบ โดยวิธีการทำจะเหมือนกับการหาค่ารีแอกเตอร์มาต่อที่เทอร์มินอลสำหรับหม้อแปลง A โดยตารางที่ 4.5

แสดงค่ากระแส และแรงดันที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กทั้งอยู่ในรูปของค่าจริง และค่าเปอร์ยูนิต ส่วนในรูปที่ 4.8 ได้แสดงถึงเส้นโค้งผลตอบสนองของแรงดันต่อกระแสกระตุ้น

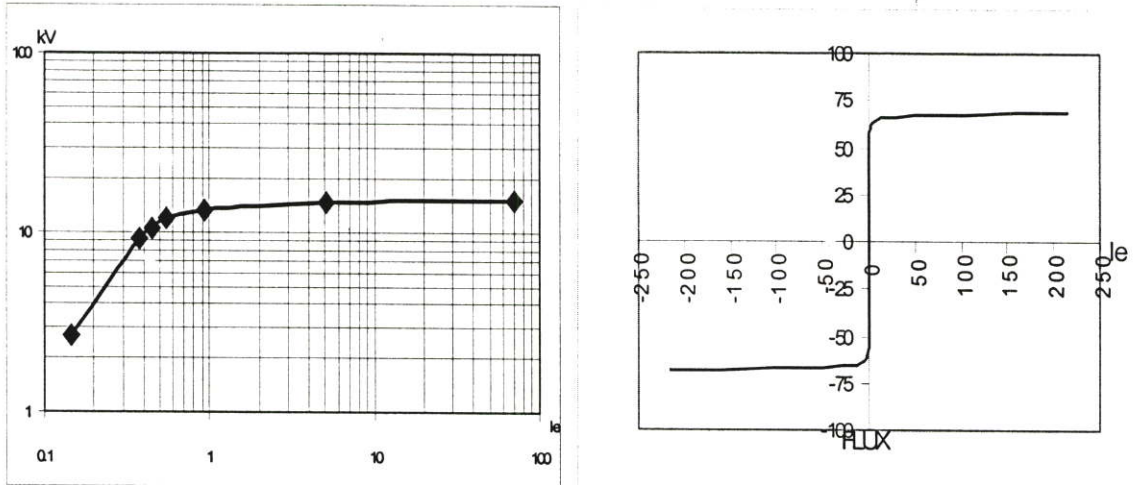
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการคำนวณหาค่ากระแส และแรงดันที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นอินพุต ให้กับโปรแกรมย่อย SATURA ของหม้อแปลง B (แรงดันเบสที่ $\frac{23}{\sqrt{3}}$ kV, $\frac{50}{3}$ MVA)

$U_{ex(L-L)}kV$	$U_{ex(Phase)}kV$	$I_{ex}(A)$	$P_{ex}(kW)$	$I_{m,w}(A)$	$U_{ex(Phase)}(PU)$	$I_{m,w}(PU)$
4.60	2.6559	0.146	0.961	0.0823	0.20	0.00006554
6.90	3.9838	0.198	2.071	0.0958	0.30	0.00007631
9.20	5.3118	0.241	3.505	0.0985	0.40	0.00007846
11.50	6.6397	0.283	5.249	0.1032	0.50	0.00008219
13.80	7.9677	0.328	7.354	0.1137	0.60	0.00009056
16.10	9.2956	0.378	9.888	0.1309	0.70	0.00010433
18.40	10.6236	0.445	13	0.1778	0.80	0.00014169
20.70	11.9515	0.553	16.76	0.2954	0.90	0.00023539
23.00	13.2794	0.922	22.18	0.7349	1.00	0.00058554
25.30	14.6074	5.075	34.93	5.0120	1.10	0.00399340

หลังจากนั้นนำค่า $U_{ex,(phase)}(PU)$ และ $I_{m,w}(PU)$ ป้อนให้กับการ์ด 5 ซึ่งจะได้อไฟล์ที่ใช้ เป็นอินพุตสำหรับโปรแกรมย่อย SATURA ดังต่อไปนี้

```
BEGIN NEW DATA CASE
$ERASE
C Input data for supporting routine SATURA
C      1      2      3      4      5      6
7      8
C
34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901
234567890
SATURATION
C  FREQ | VBASE | SBASE | IPUNCH| KTHIRD|
   50.0 13.279 16.666      1      1
C  Irms (pu) | Vrms (pu) |
0.0          0.0
6.554309    -5 0.2
1.043283    -4 0.7
1.416907    -4 0.8
2.353886    -4 0.9
5.855433    -4 1
3.993400    -3 1.1
5.576000    -2 1.152
          9999
$PUNCH
BLANK
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
```

หลังจากที่รันโปรแกรม ATP จะได้เอาท์พุตออกมาในพันทซ์ไฟล์ (Punch File) ซึ่งจะมีค่าของกระแสและฟลักซ์ออกมาเป็นจำนวนจุดเท่ากับจำนวนจุดของอินพุตเส้นโค้งเอาท์พุตได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.8

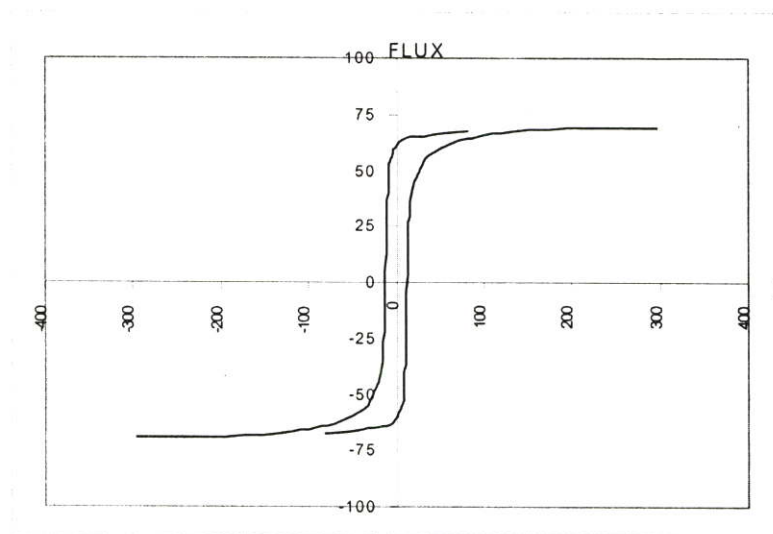


รูปที่ 4.8 เส้นโค้งผลตอบสนองของแรงดันต่อกระแสกระตุ้น ($v_{rms} - i_{rms}$) (ซ้าย), เส้นโค้งเอาท์พุตในรูปของฟลักซ์ต่อกระแส ($\psi_{peak} - I_{peak}$) ที่ได้จากโปรแกรม SATURA ของหม้อแปลง B

หลังจากนั้นเลือกจุดอิมิตัวของหม้อแปลงที่ได้จากโปรแกรม SATURA แล้วนำไปป้อนให้กับโปรแกรม HYSDAT อินพุตที่ต้องป้อนให้โปรแกรมเพื่อให้ได้เส้นโค้งของฟลักซ์ต่อกระแสสำหรับรีแอกเตอร์ที่นำมาต่อที่เทอร์มินอลของหม้อแปลง B จะมีรายละเอียดดังข้างล่างนี้

```
BEGIN NEW DATA CASE
HYSTERESIS
$ERASE
C ITYPE | LEVEL |
  1      | 4          |
C CURSAT| FLXSAT|
  215   | 68.9      |
$PUNCH
BLANK
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
```

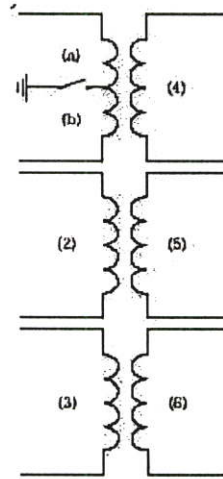
ซึ่งเอาท์พุทที่ได้จะอยู่ในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 เส้นโค้งการตอบสนองของฟลักซ์แม่เหล็กต่อกระแส ($\psi_{peak} - I_{peak}$) ที่ได้จากโปรแกรม HYSDAT สำหรับหม้อแปลง B

4.3 แบบจำลองสถานะฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง (Transformer Internal Fault Model)

หลังจากที่ได้เอาท์พุทเมตริกซ์ซึ่งแสดงถึงวงจรเทียบเคียงของหม้อแปลงในรูปแบบของ Coupled Impedance Matrix ขนาด 6×6 สำหรับหม้อแปลง 2 ขดลวด และขนาด 7×7 สำหรับหม้อแปลง 3 ขดลวด โดยการใช้โปรแกรมย่อย BCTAN ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 4.1 หากต้องการที่จะใช้วงจรเทียบเคียงของหม้อแปลงที่ได้จากโปรแกรมห้มาสร้างสถานะการเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลง จะสามารถทำได้โดยแบ่งขดลวดที่เกิดการลัดวงจรออกเป็น 2 ขดลวดย่อย [9-13] โดยการแก้ไขเมตริกซ์จาก ขนาด 6×6 สำหรับหม้อแปลงที่มี 2 ขดลวด ไปเป็น 7×7 สำหรับการเกิดฟอลต์ชนิดขดลวดลัดวงจรลงดิน (Turn to Earth fault) ทั้งนี้เนื่องมาจากเราจะต้องแบ่งขดลวดที่เกิดการลัดวงจรลงดิน จาก 1 ขด ไปเป็น 2 ขดย่อยดังในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ขดลวดของหม้อแปลงขณะเกิดขดลวดลัดวงจรลงดิน

$$[R] = \begin{bmatrix} R_a & 0 & & 0 \\ 0 & R_b & & \\ & & R_2 & 0 \\ & & & \dots \\ 0 & & & & R_6 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{a2} & L_{a3} & L_{a4} & L_{a5} & L_{a6} \\ L_{ba} & L_b & L_{b2} & L_{b3} & L_{b4} & L_{b5} & L_{b6} \\ L_{2a} & L_{2b} & L_2 & & & & \\ L_{3a} & L_{3b} & & \dots & & & \\ L_{4a} & L_{4b} & & & \dots & & \\ L_{5a} & L_{5b} & & & & \dots & \\ L_{6a} & L_{6b} & & & & & L_6 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

จากนั้นเราต้องหาค่า Self Impedance และ Mutual Impedance ในระหว่างขดลวดย่อยที่สร้างขึ้นเนื่องจากการฟลัดลัดกับขดลวดที่เหลือทั้งหมด ซึ่งต้องใช้หลักการของ Consistency, Leakage และ Proportionality มาช่วยในการหาค่าอิมพีแดนซ์ดังกล่าว ในส่วนของค่าความต้านทานนั้นสามารถใช้หลักการของ Proportionality มาหาค่าความต้านทานของขดลวดย่อยที่ได้สร้างขึ้นได้เลย

$$R_a = \frac{n_a}{n_1} R_1, \quad R_b = \frac{n_b}{n_1} R_1 \quad (4.26)$$

โดยที่ n_a , n_b คือจำนวนรอบของขดลวดในขดลวดย่อย a (Sub-coil a) และ b (Sub-coil b) ตามลำดับ และ $n_a + n_b = n_1$

สำหรับการคำนวณค่า Self Inductance และ Mutual Inductance ระหว่างขดลวดย่อย a และ b จะต้องใช้ความสัมพันธ์ของหลักการทั้ง 3 หลักการ มาช่วยดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Consistency: } L_a + 2L_{ab} + L_b = L_1 \quad (4.27)$$

$$\text{Leakage: } \delta_{ab} = 1 - \frac{L_{ab}^2}{L_a L_b} \quad (4.28)$$

$$\text{Proportionality: } \frac{L_a}{L_b} = \left(\frac{n_a}{n_b} \right)^2 \quad (4.29)$$

ค่า δ_{ab} เป็นค่าการรั่วซึมของสนามแม่เหล็ก (Leakage Factor) สามารถหาได้จากลักษณะทางกายภาพของขดลวดของหม้อแปลง (Winding Geometry data) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งการลัดวงจรจริงคืนของขดลวด แต่ในที่นี้จะถือว่าค่านี้เป็นค่าที่กำหนดขึ้นมา และหากกำหนดให้ค่า k คือค่าอัตราส่วนของขดลวดย่อย a และ b, $k = \left(\frac{n_a}{n_b} \right)$ ดังนั้น

$$L_a = \frac{L_1}{\frac{1}{k^2} + \frac{2\sqrt{1-\delta_{ab}}+1}{k}} \quad (4.30)$$

$$L_b = \frac{L_1}{k^2 + 2k\sqrt{1-\delta_{ab}}+1} \quad (4.31)$$

$$L_{ab} = \frac{L_1 \sqrt{1-\delta_{ab}}}{\left(k + \frac{1}{k} \right) + 2\sqrt{1-\delta_{ab}}} \quad (4.32)$$

และในการคำนวณค่า Mutual Inductance ระหว่าง ขดลวดย่อย a และ b กับ ขดลวดอื่นๆ จำเป็นต้องแยกเป็น 2 กรณีคือ

กรณีที่ 1 เมื่อพิจารณา ขดลวด i ที่พันอยู่บนแกนเหล็กเดียวกับขดลวดย่อย a และ b

$$L_{ai} = L_{ia} = L_{1i} \sqrt{\varepsilon} \sqrt{\frac{L_a}{L_1}} \sqrt{1 + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}} \frac{L_1 L_i}{L_{1i}^2} \quad (4.33)$$

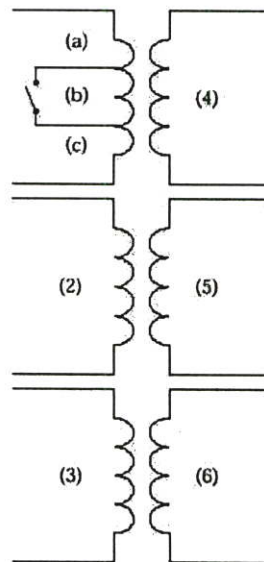
$$L_{bi} = L_{ib} = L_{1i} = L_{ai} \quad (4.34)$$

โดยที่ $\varepsilon = \frac{\delta_{ai}}{\delta_{1i}}$

กรณีที่ 2 เมื่อพิจารณา ขดลวด i ที่ไม่ได้พันอยู่บนแกนเหล็กเดียวกับขดลวดย่อย a และ b

$$L_{ai} = L_{ia} = \frac{k}{1+k} L_{1i}, L_{bi} = L_{ib} = \frac{1}{1+k} L_{1i} \quad (4.35)$$

หลังจากที่ได้วงจรเทียบเคียงของหม้อแปลงที่อยู่ในรูปของเมตริกซ์ ทั้งในกรณีปกติและกรณีที่เกิดการลัดวงจรลงดินดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จากนั้นนำเมตริกซ์ดังกล่าวไปทำการแปลงเป็น Punch File และแปลงเป็น Library File เพื่อนำไปใช้ในการจำลองสถานะต่างๆ ร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ



รูปที่ 4.11 ขดลวดของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด

สำหรับฟอลต์ชนิดลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด (Turn to Turn fault) สามารถทำได้ ลักษณะเดียวกับการหาเมตริกซ์เทียบเคียงในกรณีที่เกิดขดลวดลัดวงจรลงดิน ต่างกันตรงที่ว่าจะต้องแยกขดลวดที่เกิดการลัดวงจรออกเป็น 3 ขดลวดย่อย (Sub-coil) ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.11 โดยการแก้ไขเมตริกซ์จาก ขนาด 6×6 สำหรับหม้อแปลงที่มี 2 ขดลวด เป็นขนาด 8×8 [9-13]

$$[R] = \begin{bmatrix} R_a & 0 & & & \\ & R_b & & 0 & \\ 0 & & R_c & & \\ & & & R_2 & 0 \\ & 0 & & & \dots \\ & & & 0 & R_6 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ac} & L_{a2} & \dots & L_{a6} \\ L_{ba} & L_b & L_{bc} & L_{b2} & \dots & L_{b6} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c & L_{c2} & \dots & L_{c6} \\ L_{2a} & L_{2b} & L_{2c} & L & \dots & L_{26} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{6a} & L_{6b} & L_{6c} & L_{62} & \dots & L_6 \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

4.4 แบบจำลองการผิดเพี้ยนของกระแสเนื่องจากสภาวะการอิ่มตัวของแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแส (Distorted Current Model due to CT Saturation)

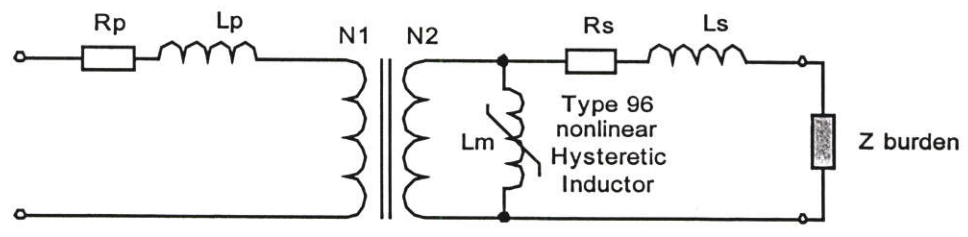
ในงานวิจัยนี้ได้เลือกหม้อแปลงกระแสซึ่งค่าความถูกต้องจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ANSI C57.13 ซึ่งหม้อแปลงกระแสที่ใช้สำหรับรีเลย์ป้องกันจะมีตัวเลขระบุค่าความถูกต้องแม่นยำชนิด C (C Class) หรือชนิด T (T Class) เช่น C100, C200 หรือ C400 สำหรับหม้อแปลงกระแสที่มีคลาส C นั้น เส้นโค้งการกระตุ้นจะถูกพลอตลงในกราฟล็อก-ล็อก (Log-Log Coordination Paper) ส่วนตารางที่ได้แสดงค่าภาระที่รับได้ (Burden) ที่เป็นค่ามาตรฐานของหม้อแปลงกระแสที่มีขนาดของกระแสด้านทุติยภูมิเท่ากับ 5A ส่วนความแตกต่างระหว่างคลาส C และ คลาส T ก็คือสำหรับคลาส C ค่าฟลักซ์รั่วไหลจะไม่มีผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน (Non-appreciable Effect on Ratio) หากมีไหลดที่ต่ออยู่ไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 4.6 ดังนั้นค่าอัตราส่วนจึงสามารถคำนวณได้ ส่วนคลาส T ค่าฟลักซ์รั่วไหลจะมีผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน (Appreciable Effect on Ratio) ดังนั้นจึงไม่สามารถคำนวณได้ แต่สามารถหาได้จากการวัดส่วนค่าผลกระทบของฟลักซ์รั่วไหลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนจะมีการกำหนดในลักษณะเป็นจำนวนเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่าอัตราส่วนที่คำนวณได้กับค่าจริง

ตารางที่ 4.6 ภาระที่รับได้ที่มีค่ามาตรฐาน (Standard Burden) ของหม้อแปลงกระแส

Burden Designation	Class	Resistance (Ω)	Inductance (mH)	Impedance (Ω)	Volt-Amp (VA) at 5A	PF
B-1	C100	0.5	2.3	1.0	25	0.5
B-2	C200	1.0	4.6	2.0	50	0.5
B-4	C400	2.0	9.2	4.0	100	0.5
B-8	C800	4.0	18.4	8.0	200	0.5

ในความหมายของคลาสในแต่ละคลาสสามารถบ่งบอกถึงค่าความถูกต้อง ยกตัวอย่างเช่น หม้อแปลงกระแสที่มีค่าความแม่นยำคลาส C100 หมายความว่าค่าอัตราส่วน สามารถคำนวณได้ และค่าการปรับอัตราส่วนความถูกต้อง (Ratio Correction) จะไม่เกิน 10% หากค่ากระแสที่ไหลผ่านทางด้านทุติยภูมิมีจำนวนตั้งแต่ 1 เท่า ถึง 20 เท่าของกระแสพิกัดทางด้านทุติยภูมิ (CT Secondary rating) และมีโหลดต่ออยู่ไม่เกิน 1Ω ($1 \Omega * 5A * 20 \text{ เท่า} = 100\text{Volt}$)

ในโปรแกรม ATP-EMTP จะมีโปรแกรมย่อยที่ชื่อ Ideal Transformer และ Saturable Transformer สำหรับโปรแกรมย่อยที่ชื่อ Ideal Transformer จะไม่คำนึงถึงผลของค่าสูญเสียในแกนเหล็ก และผลของค่าสูญเสียในขดลวดของหม้อแปลง ส่วนโปรแกรมย่อย Saturable Transformer จะนำผลของค่าสูญเสียในแกนเหล็กและผลของค่าสูญเสียในขดลวดของหม้อแปลงมาคิด อีกทั้งยังได้คำนึงถึงผลของการอิ่มตัวในแกนเหล็กโดยจะมีการต่อค่านี้ออกเตอร์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Pseudo Nonlinear Reactance) ไว้ที่ด้านปฐมภูมิภายในแบบจำลอง แต่อย่างไรก็ตามค่านี้ออกเตอร์แบบไม่เป็นเชิงเส้นที่มีอยู่ในโปรแกรมย่อย Saturable Transformer จะไม่มีผลของฮิสเตอร์รีซิส ดังนั้นในการที่จะทำให้หม้อแปลงกระแสที่ได้จากโปรแกรมย่อยดังกล่าวคำนึงถึงผลของการอิ่มตัวในแกนเหล็ก และผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก สามารถทำได้โดยการต่อรีแอคเตอร์แบบไม่เป็นเชิงเส้นชนิด 96 (Pseudo Nonlinear Reactance Type 96) ไว้ที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง [14-15] ในรูปที่ 4.12 ได้แสดงถึงการแบบจำลองของหม้อแปลงกระแสที่ใช้โปรแกรมย่อย Saturable Transformer ส่วนที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจะมีรีแอคเตอร์แบบไม่เป็นเชิงเส้นชนิด 96 มาต่อเพื่อทำหน้าที่เป็นผลตอบสนองของแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแส ซึ่งจะมีผลตอบสนองแบบไม่เป็นเชิงเส้นและมีผลของฮิสเตอร์รีซิส จากนั้นจะมีค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับด้านทุติยภูมิ ซึ่งจะแสดงถึงค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟ และอิมพีแดนซ์ของรีเลย์

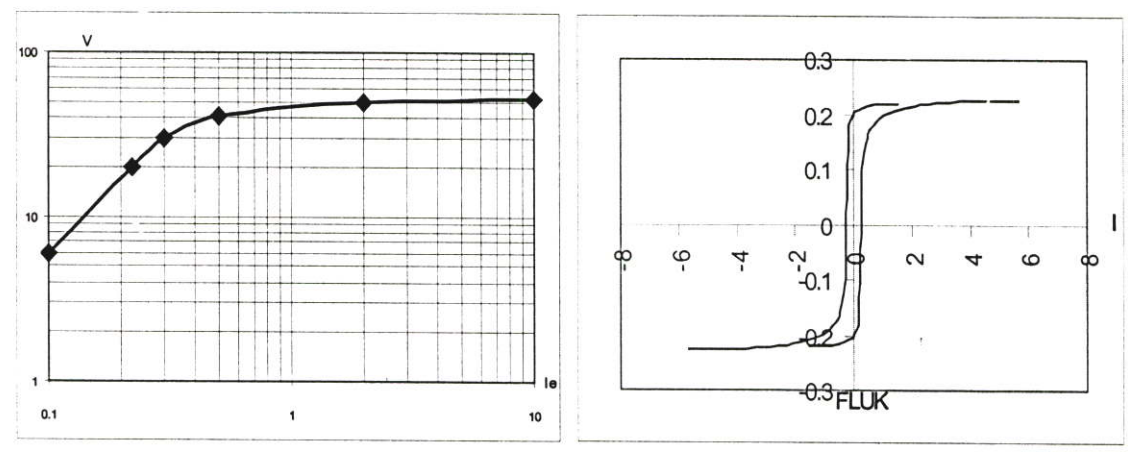


R_p : Transformer primary resistance
 L_p : Transformer primary leakage inductance
 R_s : Transformer secondary resistance
 L_s : Transformer secondary leakage inductance
 L_m : Transformer magnetizing inductance (Type-96 Pseudo nonlinear hysteretic Inductor)
 Z_b : Relay burden + lead impedance
 $N_1:N_2$: Transformer tum ratio

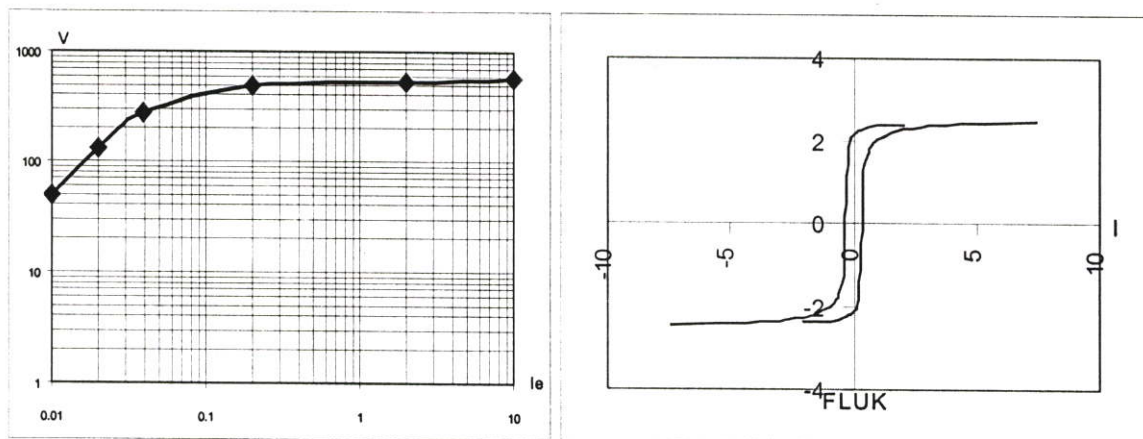
รูปที่ 4.12 วงจรเทียบเคียงของหม้อแปลงกระแส

สำหรับขั้นตอนในการหารีแอกเตอร์มาต่อที่ภายนอกของหม้อแปลงเพื่อให้มีผลของฮิสเตอร์รีซีสของแกนเหล็กจะกระทำเหมือนขั้นตอนการหารีแอกเตอร์สำหรับสภาวะกระแสอินรัชดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.2

สำหรับหม้อแปลงกระแสที่ใช้กับหม้อแปลง A จะมีชื่อดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ส่วนเส้นโค้งกระแสกระตุ้นของหม้อแปลงกระแสที่ใช้แต่ละตัวได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.14

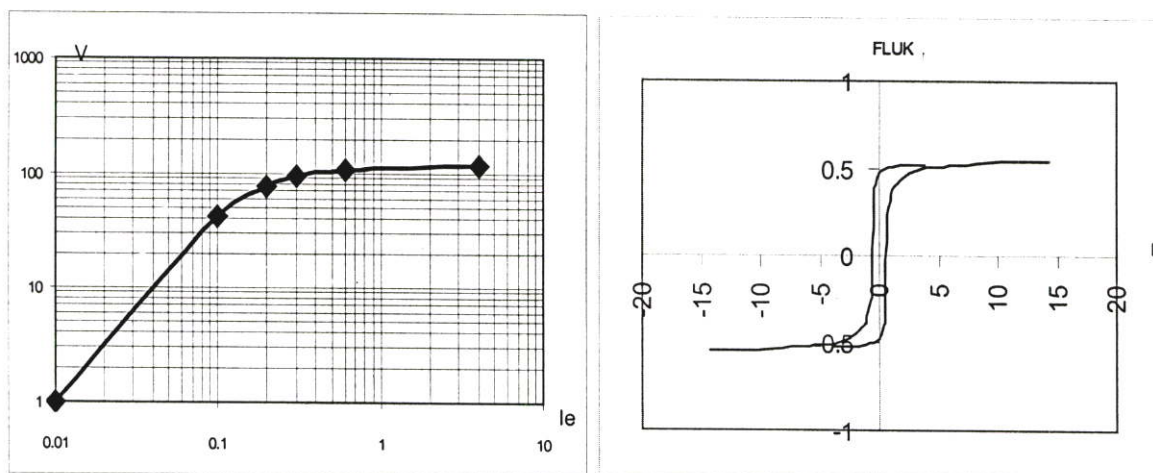


รูปที่ 4.13 เส้นโค้งกระแสกระตุ้น ($v_{rms} - i_{rms}$) (ซ้าย) และเส้นโค้งฟลักซ์ต่อกระแส ($\psi_{peak} - I_{peak}$) ที่มีผลของฮิสเตอร์รีซีส (ขวา) ของหม้อแปลงกระแส A150C30

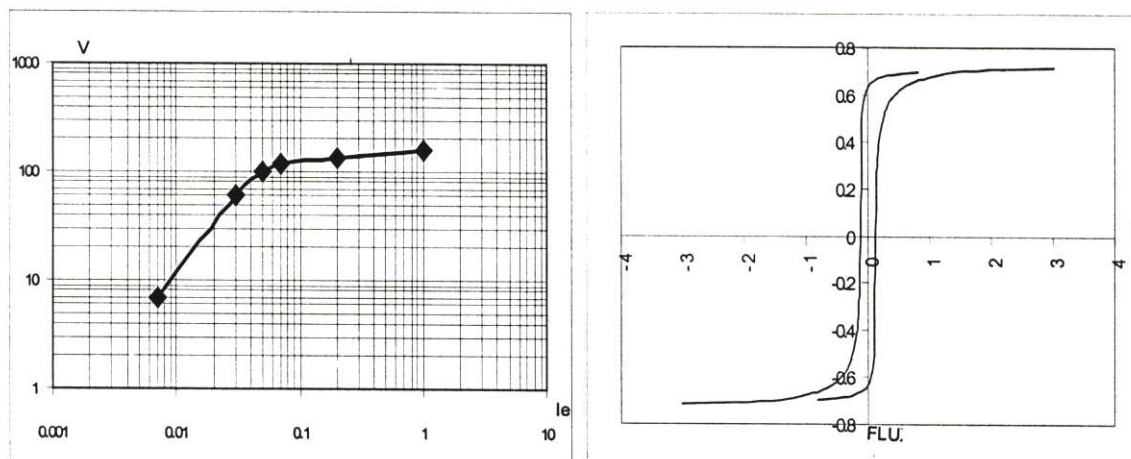


รูปที่ 4.14 เส้นโค้งกระแสกระตุ้น ($v_{rms} - i_{rms}$) (ซ้าย) และเส้นโค้งฟลักซ์ต่อกระแส ($\psi_{peak} - I_{peak}$) ที่มีผลของฮิสเตอร์รีซิส (ขวา) ของหม้อแปลงกระแส A150C400

สำหรับหม้อแปลงกระแสที่ใช้กับหม้อแปลง B จะมีชื่อดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ส่วนเส้นโค้งกระแสกระตุ้นของหม้อแปลงกระแสที่ใช้แต่ละตัวได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16



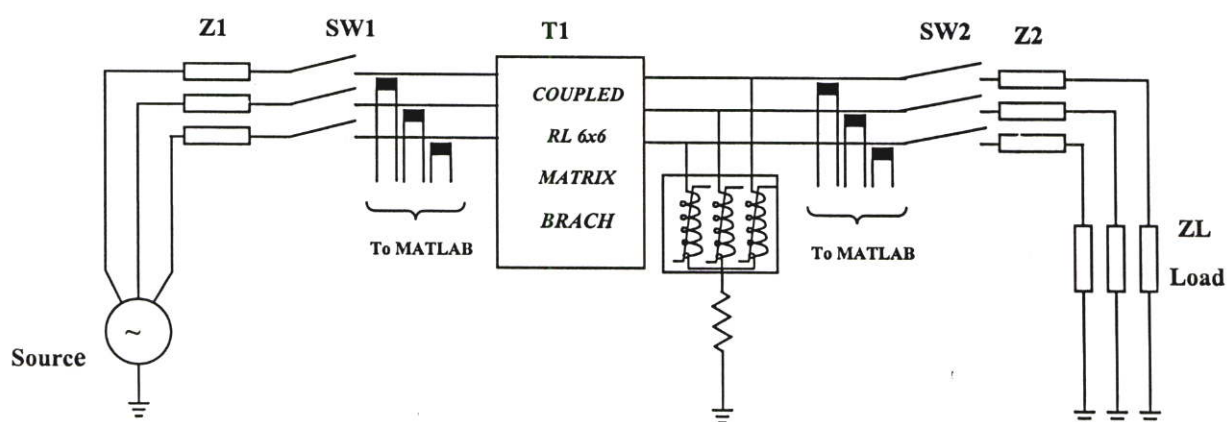
รูปที่ 4.15 เส้นโค้งกระแสกระตุ้น ($v_{rms} - i_{rms}$) (ซ้าย) และเส้นโค้งฟลักซ์ต่อกระแส ($\psi_{peak} - I_{peak}$) ที่มีผลของฮิสเตอร์รีซิส (ขวา) ของหม้อแปลงกระแส B400C100



รูปที่ 4.16 เส้นโค้งกระแสแรงแคร่คั่น ($v_{rms} - i_{rms}$) (ซ้าย) และเส้นโค้งฟลักซ์ต่อกระแส ($\psi_{peak} - I_{peak}$) มีผลของฮิสเตอร์รีซิส (ขวา) ของหม้อแปลงกระแส B1300C100

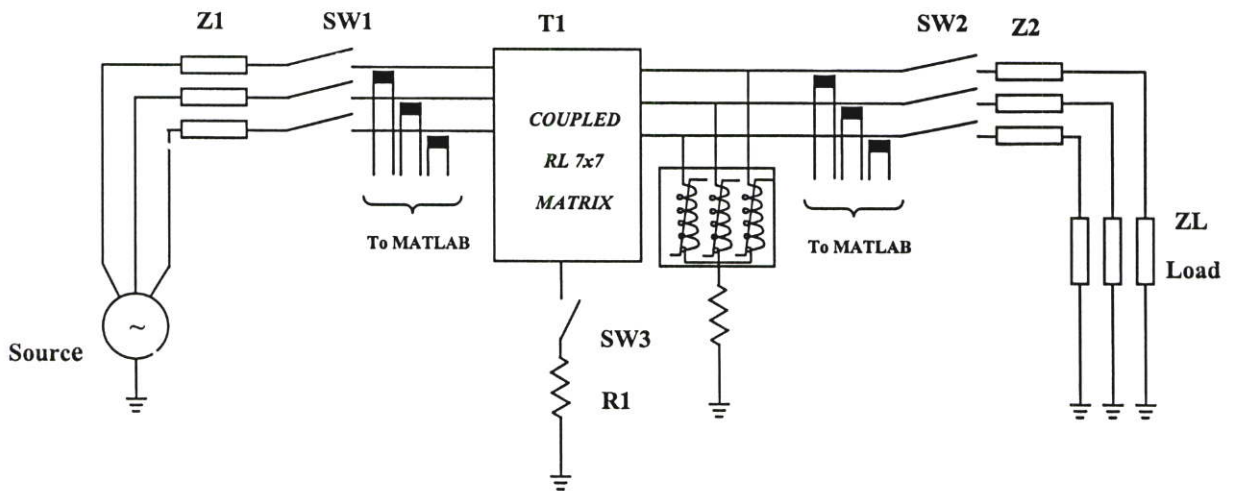
4.5 แบบจำลองวงจรของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้

4.5.1 แบบจำลองวงจรในกรณีที่มีผลของกระแสอินรัชขณะเริ่มจ่ายไฟ (Energizing Inrush Current)



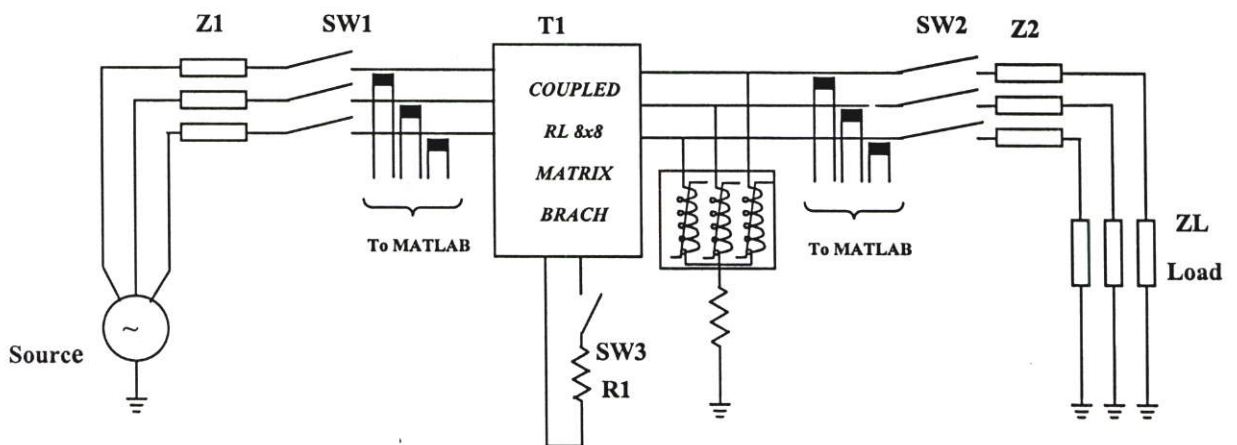
รูปที่ 4.17 วงจรที่ใช้ในการทดสอบรีเลย์ในกรณีที่มีผลของกระแสอินรัชขณะเริ่มจ่ายไฟ

4.5.2 แบบจำลองวงจรในกรณีของฟอลต์ภายในหม้อแปลงชนิดขดลวดลัดวงจรลงดิน (Turn to Earth Fault) ทั้งแบบมีและไม่มีผลของกระแสอินรัช



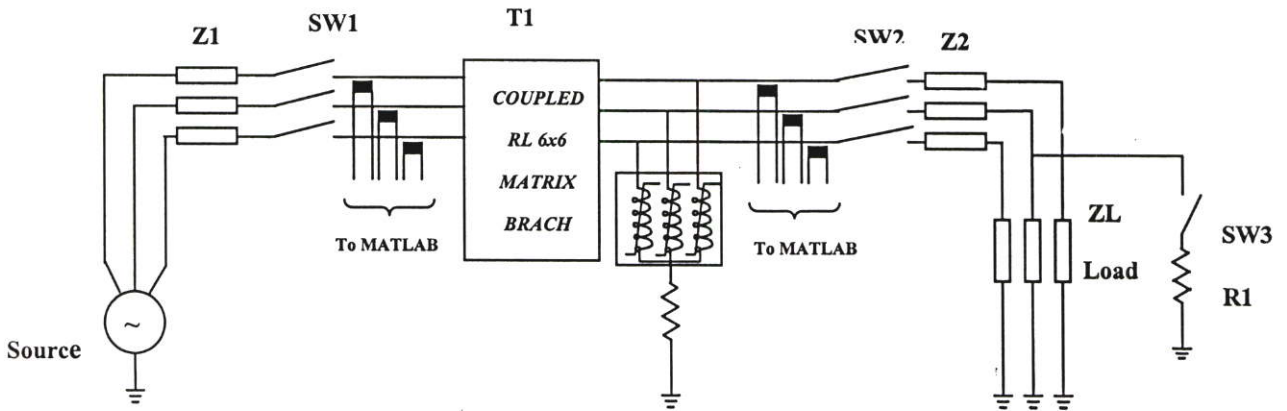
รูปที่ 4.18 วงจรที่ใช้ในการทดสอบรีเลย์ในกรณีที่มีการเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลง ชนิดขดลวดลัดวงจรลงดิน

4.5.3 แบบจำลองวงจรในกรณีของฟอลต์ภายในหม้อแปลง ชนิดลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด (Turn to Turn Fault) ทั้งแบบมีและไม่มีผลของกระแสอินรัช



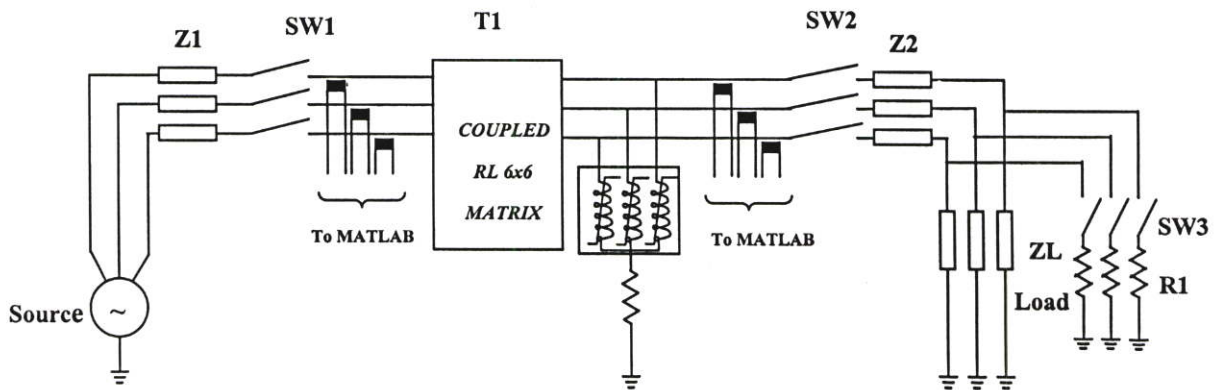
รูปที่ 4.19 วงจรที่ใช้ในการทดสอบรีเลย์ในกรณีที่มีการเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลงชนิดลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด

4.5.4 แบบจำลองวงจรในกรณีของการเกิดฟอลต์แบบภายนอก (External Fault) ชนิดฟอลต์ลงดินเส้นเดียว (Single line to ground fault)



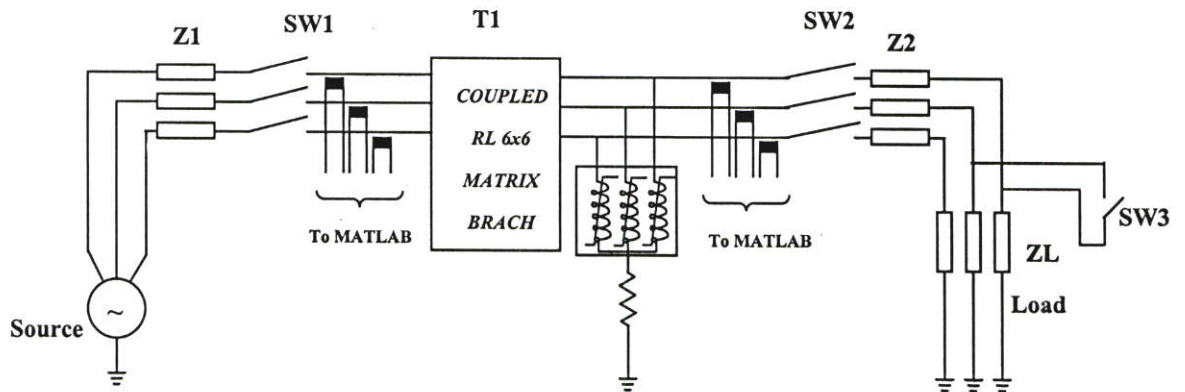
รูปที่ 4.20 วงจรที่ใช้ในการทดสอบรีเลย์ในกรณีที่เกิดการฟอลต์ภายนอกหรือแปลงชนิดฟอลต์ลงดินเส้นเดียว

4.5.5 แบบจำลองวงจรในกรณีของการเกิดฟอลต์แบบภายนอก (External Fault) ชนิดฟอลต์แบบ 3 เฟส (Three phase fault)



รูปที่ 4.21 วงจรที่ใช้ในการทดสอบรีเลย์ในกรณีที่เกิดการฟอลต์ภายนอกหรือแปลงชนิดฟอลต์แบบ 3 เฟส

4.5.6 แบบจำลองวงจรในกรณีของการเกิดฟอลต์แบบภายนอก (External Fault) ชนิดฟอลต์ระหว่างสาย (line to line fault)

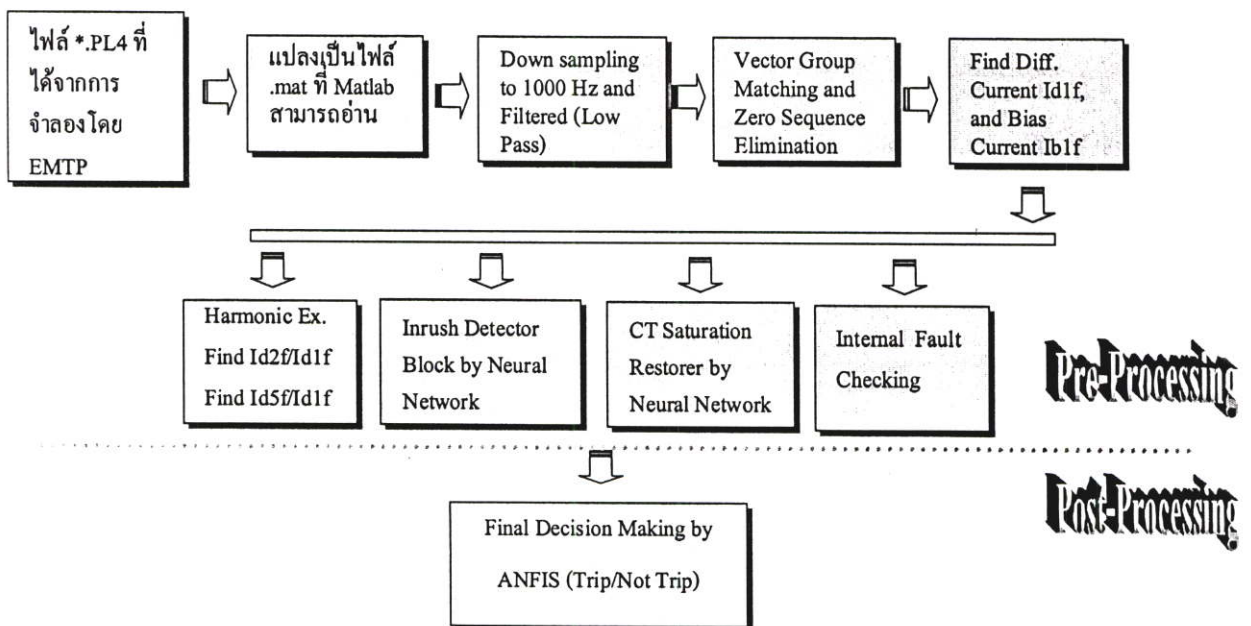


รูปที่ 4.22 วงจรที่ใช้ในการทดสอบรีเลย์ในกรณีที่เกิดการฟอลต์ภายนอกหรือแปลงชนิดฟอลต์ระหว่างสาย

บทที่ 5

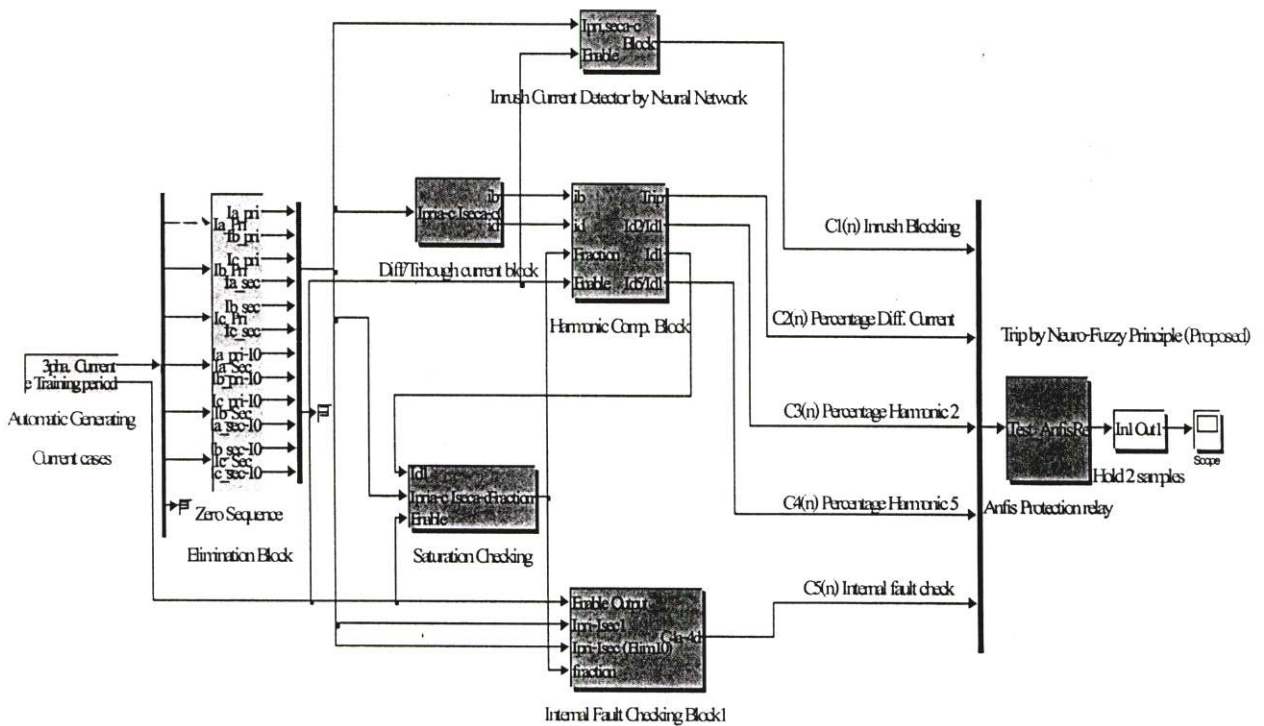
หลักการป้องกันหม้อแปลงโดยการจากระบบโครงข่ายประสาท เทียมร่วมกับระบบพีซซีลอจิก

ในงานวิจัยได้นำเสนอหลักการป้องกันหม้อแปลงซึ่งอาศัยการทำงานร่วมกันของระบบโครงข่ายประสาทเทียมและพีซซีลอจิกมาปรับปรุงเสถียรภาพ และเสริมความถูกต้องในการทำงานเมื่อเทียบกับหลักการ Percentage Differential current และ Harmonic Restraint ซึ่งเป็นหลักการที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK สำหรับจำลองโครงสร้างและทดสอบหลักการดังกล่าว หลักการที่นำเสนอมีโครงสร้างการประมวลผลแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนประมวลผลสัญญาณเบื้องต้น (Pre-processing Block) และในส่วนของตัวประมวลผลขั้นสุดท้าย (Post-processing Block) ซึ่งหลังจากที่ได้รูปคลื่นของกระแสในกรณีต่างๆ จากการจำลองโดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP ทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ซึ่งอยู่ในรูปของไฟล์นามสกุล .PL4 จากนั้นทำการแปลงไฟล์ดังกล่าวให้อยู่ในรูปของไฟล์นามสกุล .Mat ซึ่งโปรแกรม MATLAB / SIMULINK สามารถอ่าน และการส่งต่อไปเพื่อประมวลผลในแบบจำลองของรีเลย์ที่ได้สร้างขึ้นมา ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 กระบวนการจำลองความผิดปกติของระบบไฟฟ้าแล้วนำมาประมวลผลโดยการ
ใช้โปรแกรม MATLAB ร่วมกับ โปรแกรม EMTP-ATP

โดยหลักการป้องกันหม้อแปลงที่นำเสนอประกอบด้วยประมวลผลหลายส่วน ซึ่งบางส่วนเป็นส่วนประกอบพื้นฐานของระบบรีเลย์ป้องกันทั่วไป หลังจากที่ได้รับรูปคลื่นกระแสมาจากหม้อแปลงกระแส ก่อนที่นำไปประมวลผลจะต้องตัดความถี่ที่ไม่มีคามจำเป็นในการประมวลผลออกไป ซึ่งในที่นี้เราจะสนใจความถี่ที่ 5 เท่าของความถี่พื้นฐาน (Harmonic Order 5th) ดังนั้นจึงเลือกความถี่ที่ 300 เฮิรท์จะเป็นความถี่สูงสุดสำหรับการนำมาประมวลผล จากนั้นทำการสุ่มโดยในที่นี้เลือกความถี่ในการสุ่มที่ 1000 เฮิรท์ ซึ่งหมายถึงข้อมูลในอุกๆ 1 มิลลิวินาที เนื่องจากระบบไฟฟ้าที่ใช้มีความถี่ที่ 50 เฮิรท์ ดังนั้นระยะคาบในแต่ละรูปคลื่นคือ 20 มิลลิวินาที หรือในแต่ละรูปคลื่นจะถูกสุ่มที่ 20 ครั้ง จากนั้นก็จะทำการกำจัดกระแสลำดับศูนย์ (Zero Sequence Current Elimination) เพื่อป้องกันรีเลย์ทำงานผิดพลาดอันเนื่องมาจากการเกิดฟอลต์ลงดินภายนอกพื้นที่ป้องกัน ซึ่งโดยปกติเวลาเกิดฟอลต์ลงดินจะทำให้มีกระแสลำดับศูนย์ไหล ซึ่งหากหม้อแปลงที่ป้องกันมีทางเดินของกระแสลำดับศูนย์ (Zero Sequence Path) ก็จะทำให้เกิดกระแสดังกล่าวไหลในหม้อแปลง ซึ่งจะทำให้รีเลย์มองเห็นว่าเกิดผลต่างกระแสขึ้นในพื้นที่ป้องกัน และสั่งปลดวงจรในทันทีที่กระแสดังกล่าวเกินค่าที่ได้ตั้งไว้หลักจากนั้นจะเป็นส่วนประมวลผลเบื้องต้น และส่วนประมวลผลขั้นสุดท้ายที่นำเสนอ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



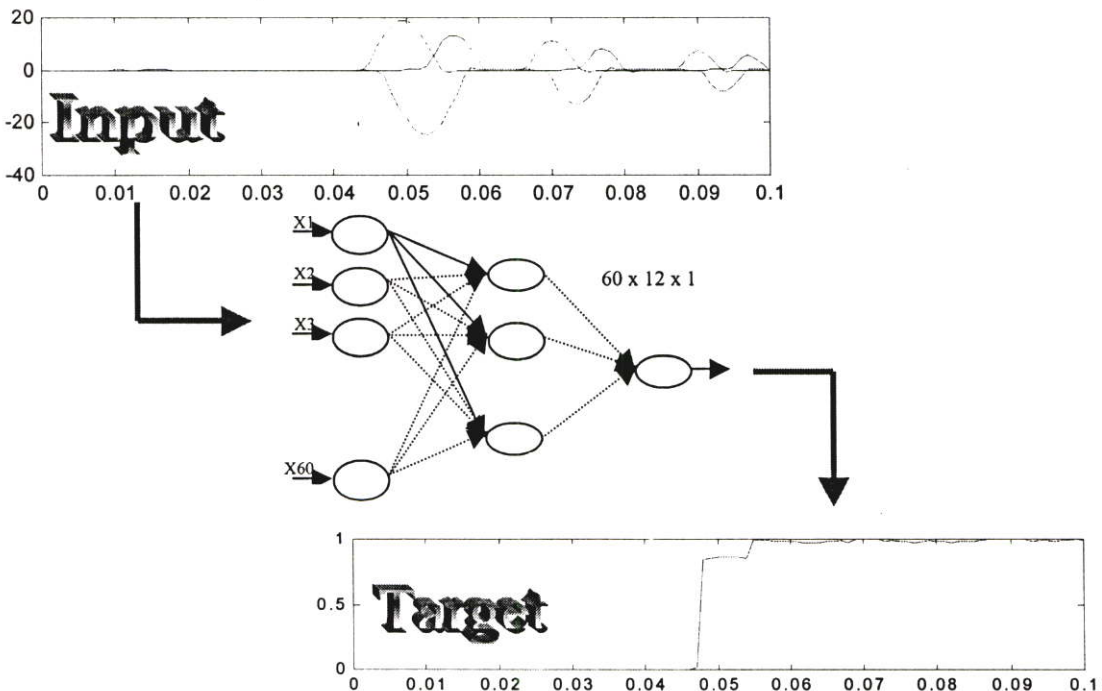
รูปที่ 5.2 โครงสร้างของหลักการป้องกันหม้อแปลงที่นำเสนอ โดยการใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

5.1 ส่วนประมวลผลเบื้องต้น (Pre-processing Block)

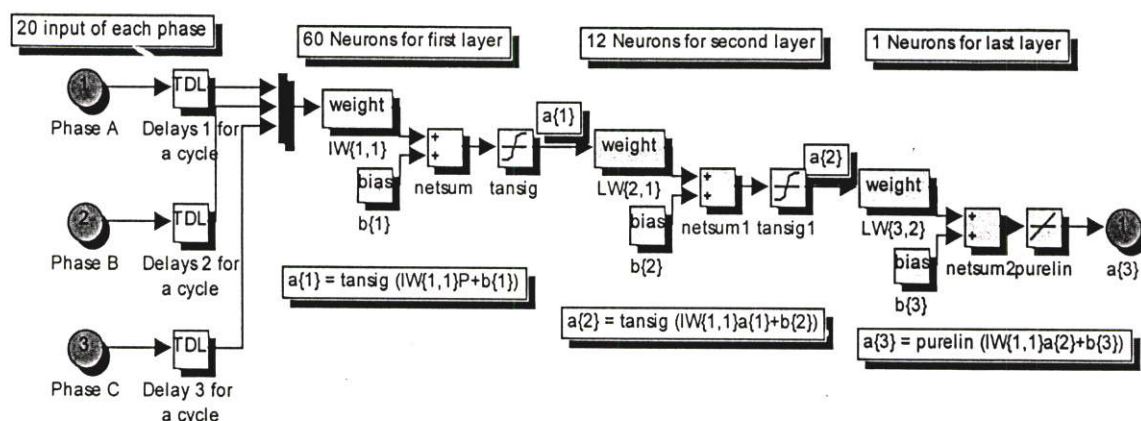
ส่วนประมวลผลเบื้องต้นจะเป็นส่วนที่แยกการวิเคราะห์หาสาเหตุที่ทำให้รีเลย์มีโอกาสทำงานผิดพลาดได้ เช่น การเกิดกระแสอินรัช การเกิดการอิมพัลส์ของแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแส หรือการเกิดฟอลต์ชนิดที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง โดยอาศัยหลักการของโครงข่ายประสาทเทียมมาช่วย โดยสามารถแบ่งเป็นส่วนประกอบย่อยๆ ได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ส่วนตรวจจับกระแสอินรัช (Inrush Current Detector Block)

ส่วนตรวจจับกระแสอินรัช ได้ถูกออกแบบโดยมีวัตถุประสงค์คือ ให้มีความสามารถในการแยกแยะรูปคลื่นของกระแสอินรัช ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดของสนามแม่เหล็กภายในหม้อแปลง และมักจะเกิดขึ้นในช่วงเริ่มจ่ายไฟให้กับหม้อแปลง ซึ่งสภาวะดังกล่าวถือว่าไม่ใช่ฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง แต่หากใช้รีเลย์ที่ใช้หลักการของ Percentage Differential Current จะมองว่าเกิดฟอลต์ภายในขึ้นเนื่องมาจากมีกระแสผลต่างเกิดขึ้น และในบางครั้งกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นอาจมีส่วนประกอบฮาร์โมนิคอันดับ 2 อยู่ด้วย ซึ่งอาจเป็นผลให้รีเลย์ที่ใช้หลักการหน่วงการส่งปลดวงจรเนื่องมาจากกระแสอินรัชที่ใช้หลักการของ Harmonic Restraint ทำงานผิดพลาด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการนำเอาระบบโครงข่ายประสาทเทียมมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบสภาวะดังกล่าว ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 หลักการทำงานของส่วนตรวจจับกระแสอินรัชโดยใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม



รูปที่ 5.4 โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้สำหรับตรวจจ็กระแสอินรัชโดยใช้โปรแกรม SIMULINK

สำหรับหลักการตรวจจ็กระแสอินรัชซึ่งสร้างขึ้นโดยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.4 ซึ่งระบบโครงข่ายประสาทเทียมดังกล่าวได้ถูกฝึกหัดให้จดจำและแยกแยะกระแสอินรัชออกจากสถานะอื่นๆ โดยการกำหนดให้โครงข่ายจะต้องให้เอาต์พุตออกมาเป็น 1 ในกรณีพบกระแสที่ไหลผ่านเป็นกระแสอินรัช และจะต้องให้เอาต์พุตออกมาเป็น 0 สำหรับกรณีอื่นๆ ในที่นี้ได้ออกแบบระบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบชนิดหลายชั้น (Multilayer Feedforward Neural Network) โดยมีจำนวนทั้งหมด 3 ชั้น (ไม่รวมชั้นอินพุต) โดยในชั้นช่อนที่ 1 มี 60 นิวรอล โดยรับอินพุตของกระแสด้านปฐมภูมิทั้ง 3 เฟส มาจากชั้นอินพุต โดยกำหนดให้แต่ละเฟสมี 20 นิวรอล เพื่อให้ครอบคลุมสัญญาณใน 1 วัฏคลื่น ส่วนในชั้นช่อนที่ 2 นั้นกำหนดให้มี 12 นิวรอล และในชั้นเอาต์พุตมี 1 นิวรอล ซึ่งกำหนดฟังก์ชันแบบ Hyperbolic Tangent Sigmoid สำหรับนิวรอลในชั้นช่อนที่ 1 และ 2 ส่วนในชั้นสุดท้ายได้กำหนดฟังก์ชันเป็นแบบ Pure Linear หรือเชิงเส้นแบบไม่จำกัดขอบเขต ซึ่งในการกำหนดฟังก์ชันดังกล่าว สามารถครอบคลุมลักษณะปัญหาในรูปแบบต่างๆได้ ส่วนการฝึกหัดโครงข่ายให้มีการเรียนรู้ ได้เลือกใช้วิธี Gradient Descent with Momentum & Adaptive Learning Rate Back Propagation ซึ่งในทอมโมเมนต์จะมีผลทำให้การเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดไม่เกิดการแกว่ง และใช้เวลาน้อยกว่าในการเคลื่อนที่เข้าสู่จุดต่ำสุด ในส่วนการปรับเปลี่ยนอัตราการเรียนรู้ขณะฝึกหัดของโครงข่ายทำให้สามารถเพิ่มอัตราการเรียนรู้ หากการเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงแนวราบเพื่อที่จะเร่งให้เข้าสู่จุดต่ำสุด แต่หากการเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงที่มีความชัน ก็ให้ลดอัตราการเรียนรู้ลงเพื่อที่จะได้เข้าสู่จุดต่ำสุดอย่างแท้จริง ดังนั้นหากกำหนดให้ w_1 คือเมตริกซ์ที่เป็นค่าน้ำหนักที่ได้จากโครงข่ายในชั้นอินพุตกับชั้นช่อนที่ 1 และ w_2 คือค่าน้ำหนักที่ได้จากโครงข่ายในชั้นช่อนที่ 1 กับชั้นช่อนที่ 2 ส่วน w_3 คือค่าน้ำหนักที่ได้จากโครงข่ายในชั้นช่อนที่ 2 กับชั้นเอาต์พุต ส่วน b_1, b_2, b_3 คือ

เมตริกซ์ที่เป็นค่าไบอัสในชั้นซ่อนที่ 1 ชั้นซ่อนที่ 2 และ ชั้นซ่อนที่ 3 ตามลำดับ ดังนั้นสมการสำหรับการคำนวณไปข้างหน้าของโครงข่าย ซึ่งอยู่ในรูปของเมตริกซ์ก็คือ

$$\mathbf{a}_3 = \mathbf{f}_3(\mathbf{net}_3) = \mathbf{f}_3(\mathbf{w}_3\mathbf{a}_2 + \mathbf{b}_3) \quad (5.1)$$

โดยที่ $\mathbf{a}_2 = \mathbf{f}_2(\mathbf{net}_2)$ ดังนั้น

$$\mathbf{a}_3 = \mathbf{f}_3[\mathbf{w}_3\mathbf{f}_2[\mathbf{net}_2] + \mathbf{b}_3] = \mathbf{f}_3[\mathbf{w}_3\mathbf{f}_2[\mathbf{w}_2\mathbf{a}_1 + \mathbf{b}_2] + \mathbf{b}_3] \quad (5.2)$$

โดยที่ $\mathbf{a}_1 = \mathbf{f}_1(\mathbf{net}_1)$ ดังนั้น

$$\mathbf{a}_3 = \mathbf{f}_3[\mathbf{w}_3\mathbf{f}_2[\mathbf{w}_2\mathbf{f}_1(\mathbf{net}_1) + \mathbf{b}_2] + \mathbf{b}_3] = \mathbf{f}_3[\mathbf{w}_3\mathbf{f}_2[\mathbf{w}_2\mathbf{f}_1(\mathbf{w}_1\mathbf{p} + \mathbf{b}_1) + \mathbf{b}_2] + \mathbf{b}_3] \quad (5.3)$$

ซึ่ง $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$ คือเอาต์พุตที่ได้จากโครงข่ายในชั้นซ่อนที่ 1 ชั้นซ่อนที่ 2 และ ชั้นซ่อนที่ 3 ตามลำดับ $\mathbf{net}_1, \mathbf{net}_2, \mathbf{net}_3$ คือสัญญาณกระตุ้นที่ได้จากโครงข่ายในชั้นซ่อนที่ 1 ชั้นซ่อนที่ 2 และ ชั้นซ่อนที่ 3 ตามลำดับ \mathbf{f}_1 คือค่าฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นซ่อนที่ 1 ซึ่งในที่นี้เลือกเป็นชนิด Hyperbolic Tangent Sigmoid \mathbf{f}_2 คือค่าฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นซ่อนที่ 2 ซึ่งในที่นี้เลือกเป็นชนิด Hyperbolic Tangent Sigmoid \mathbf{f}_3 คือค่าฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นเอาต์พุต ซึ่งในที่นี้เลือกเป็นชนิด Pure Linear และ \mathbf{p} คือค่าเวกเตอร์ของรูปแบบอินพุต

ในส่วนของ การแพร่ย้อนกลับค่าความผิดพลาดและการปรับปรุงค่าน้ำหนัก โดยเริ่มจากชั้นเอาต์พุต เป็นต้นไปจนกระทั่งถึงชั้นอินพุต จะเป็นไปตามสมการต่อไปนี้ โดยเริ่มจากค่าอัตราการเรียนรู้เปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก

$$\Delta\mathbf{w}(t) = -\eta(1-\alpha)\nabla\mathbf{E}(t) + \alpha\Delta\mathbf{w}(t-1) \quad (5.4)$$

โดยที่ $\Delta\mathbf{w}(t)$ คือค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก η คือค่าอัตราการเรียนรู้ α คือค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัม $\mathbf{E}(t)$ คือค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองที่คำนวณได้จากความแตกต่างของเอาต์พุตเป้าหมายกับเอาต์พุตที่ได้จากโครงข่ายจริง ส่วนเทอม $\alpha\Delta\mathbf{w}(t-1)$ ก็คือโมเมนตัมเทอม ซึ่งในส่วนของ การกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้ η ได้กำหนดไว้ที่ 0.01 และกำหนดค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัม α อยู่ที่ 0.9

ในการปรับเปลี่ยนค่าอัตราการเรียนรู้ของโครงข่าย ได้ใช้วิธีการปรับเปลี่ยนค่าอัตราการเรียนรู้ โดยการใช้ผลลัพธ์ของการปรับค่าน้ำหนักในแต่ละรอบ ซึ่งจะมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. ถ้าค่าความผิดพลาดกำลังสองของโครงข่ายมีการเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าหนึ่ง กำหนดให้มีค่าอยู่ที่ 4 เปอร์เซ็นต์หลังจากการปรับปรุงค่าน้ำหนัก อัลกอริทึมจะยกเลิกการปรับปรุงค่าน้ำหนัก แล้วทำการปรับลดอัตราการเรียนรู้ใหม่โดยการคูณค่าอัตราการเรียนรู้ด้วยค่า 0.7 แล้วกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัม α มีค่าเท่ากับ 0
2. ถ้าค่าความผิดพลาดกำลังสองของโครงข่ายมีการลดลงมากกว่า 4 เปอร์เซ็นต์หลังจากการปรับปรุงค่าน้ำหนัก อัลกอริทึมจะยอมรับการปรับปรุงค่าน้ำหนักนั้น แล้วทำการปรับเพิ่มอัตราการเรียนรู้ใหม่โดยการคูณค่าอัตราการเรียนรู้ด้วยค่า 1.05 แล้วกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัม α มีค่าเท่ากับค่าเดิมก่อนการปรับค่าให้เท่ากับ 0
3. ถ้าค่าความผิดพลาดกำลังสองของโครงข่ายมีการเพิ่มขึ้น แต่น้อยกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ อัลกอริทึมจะยอมรับการปรับปรุงค่าน้ำหนัก ส่วนอัตราการเรียนรู้ และค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัม จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง

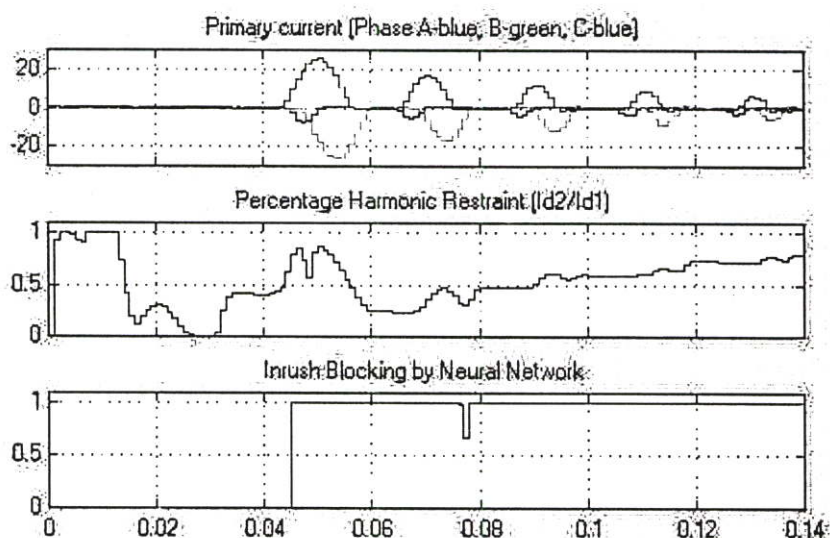
ส่วนเงื่อนไขในการหยุดกระบวนการฝึกหัดได้กำหนดให้มีการตรวจสอบเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. จำนวนรอบในการฝึกหัดเกินกว่าจำนวนรอบการฝึกหัดสูงสุด (Maximum Epochs) ที่กำหนดไว้
2. ค่าเกรเดียนต์ มีค่าต่ำกว่าค่าเกรเดียนต์ (Minimum Gradient) ต่ำสุดที่กำหนดไว้ ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 0.000001
3. ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square Error) ที่คำนวณได้ ต่ำกว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองเป้าหมายซึ่งได้กำหนดไว้อยู่ที่ 0.0005

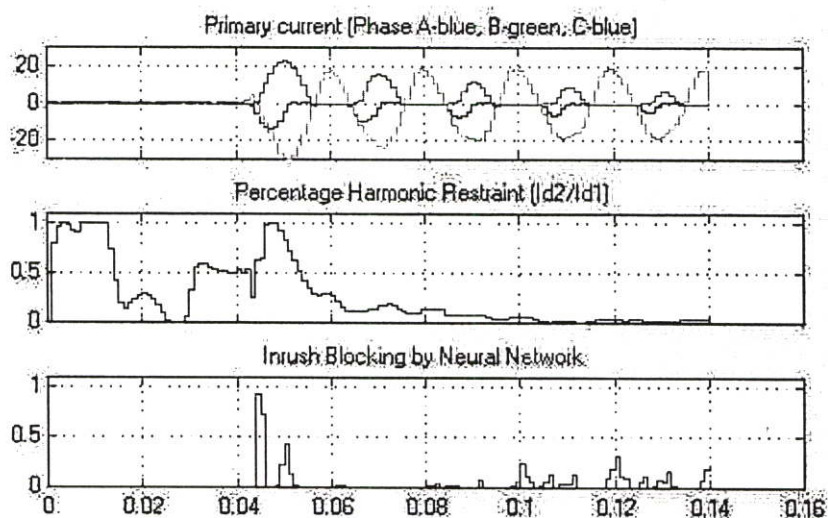
ในการจำลองกระแสในสถานะอินรัซสำหรับฝึกหัดโครงข่ายนั้น ได้ทำการจำลองทั้งในกรณีที่มีและไม่มีสนามแม่เหล็กตกค้าง จำนวน 40 ตัวอย่าง สถานะที่จ่ายโหลดปกติไม่มีฟอลต์เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงจำนวน 20 ตัวอย่าง สถานะที่เกิดฟอลต์ขึ้นภายในหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดอยู่แล้วจำนวน 40 ตัวอย่าง สถานะที่เกิดฟอลต์ขึ้นภายในหม้อแปลงขณะเพิ่งเริ่มจ่ายโหลดอยู่จำนวน 25 ตัวอย่าง สถานะที่เกิดฟอลต์ขึ้นภายในหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดอยู่แล้ว และมีผลของแกนเหล็กหม้อแปลงกระแสมัดตัวจำนวน 30 ตัวอย่าง และสถานะที่เกิดฟอลต์เกิดขึ้นภายนอกพื้นที่ป้องกันจำนวนทั้งแบบที่มี และ ไม่มีผลกระทบของแกนเหล็กหม้อแปลงกระแสมัดตัว 60 ตัวอย่าง เพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการฝึกหัดโครงข่ายประสาทเทียมดังกล่าว เพื่อใช้สำหรับตรวจจับกระแสอินรัซ ซึ่งในกระบวนการฝึกหัดโครงข่าย ได้เลือกใช้วิธี Pattern by Pattern ซึ่งค่าน้ำหนักของโครงข่ายจะถูกปรับปรุงทุกๆ ครั้งหลังจากที่แต่ละรูปแบบอินพุตถูกป้อนผ่านโครงข่าย โดยที่รูปแบบอินพุตทั้งหมดได้ถูกสุ่มให้ป้อนผ่านโครงข่าย ผลที่ได้จากส่วนประมวลผลเบื้องต้นส่วนนี้จะนำไปป้อนให้กับส่วนประมวลผลขั้นสุดท้าย (Post-processing Block) เพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจโดยที่กำหนดให้เป็นเงื่อนไขที่ 1 (Criteria 1) หรือกำหนดให้เป็นตัวย่อว่า $C1$ ดังนี้

CI : คือ ค่าระดับสัญญาณที่ส่งออกมาจากส่วนตรวจจับกระแสอินรัช (Inrush Detector Block) ค่าระดับสัญญาณจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 หากระดับสัญญาณเข้าใกล้ 1 มาก จะมีผลในการยับยั้งการสั่งปลดวงจรมาก นั้นหมายความว่ากระแสที่ไหลผ่านในหม้อแปลงช่วงนั้นเป็นกระแสอินรัช

$$CI(n)=[0 \ 1] \quad (5.5)$$



รูปที่ 5.5 กระแสอินรัชขณะเริ่มจ่ายไฟ (บน), เอาท์พุทของ Percentage Harmonic Restraint (I_{d2}/I_{d1}) (กลาง), เอาท์พุท ของ Inrush detector Block (ล่าง)

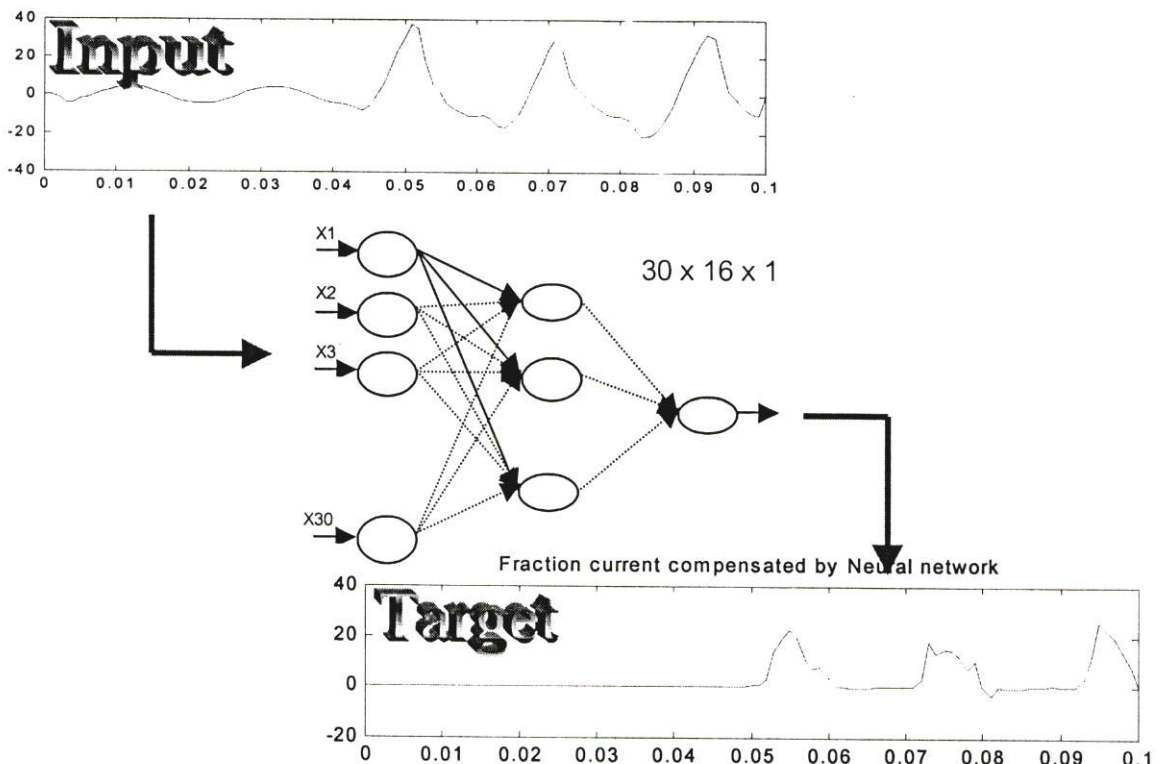


รูปที่ 5.6 กระแสอินรัชขณะเริ่มจ่ายไฟและมีฟอลต์อยู่ (บน), เอาท์พุทของ Percentage Harmonic Restraint (I_{d2}/I_{d1}) (กลาง), เอาท์พุท ของ Inrush detector Block (ล่าง)

ในรูปที่ 5.5 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำงานของส่วนตรวจจับกระแสอินรัช ที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม กับหลักการหน่วงการสั่งปลดวงจรที่ใช้อัตราส่วนของส่วนประกอบฮาร์มอนิกอันดับ2 กับฮาร์มอนิกอันดับ1 ของผลต่างกระแส หรือหลักการ Harmonic Restraint ขณะที่เริ่มจ่ายไฟที่เวลา 0.042 วินาที ซึ่งมีกระแสอินรัชไหลผ่านในหม้อแปลงในช่วงเวลานั้น จะเห็นได้ว่าเอาต์พุตของส่วนตรวจจับกระแสอินรัชโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม จะส่งสัญญาณยับยั้งการสั่งปลดวงจรคงที่กว่าเอาต์พุตที่ได้จากหลักการ Harmonic Restraint ซึ่งหากตั้งค่า I_{d2}/I_{d1r} ไว้สูงกว่า 25 % จะทำให้รีเลย์ที่ใช้หลักการดังกล่าวสั่งปลดวงจรผิดพลาด

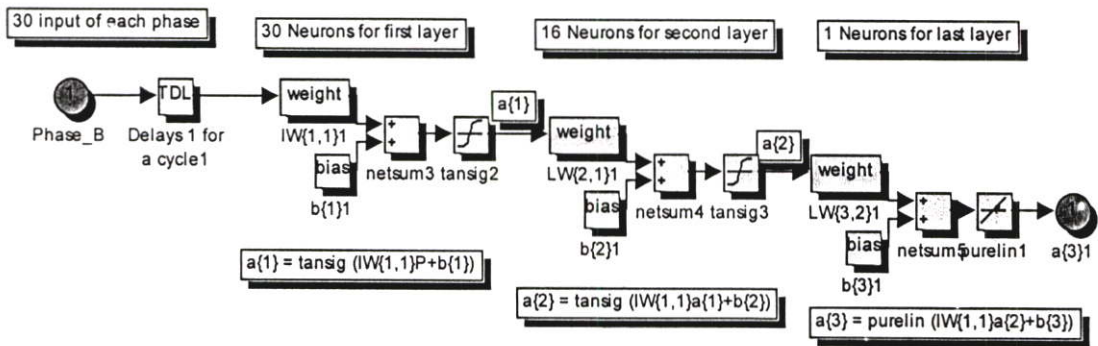
จากรูปที่ 5.6 เปรียบเทียบผลการทำงานของส่วนตรวจจับกระแสอินรัช ที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมกับ หลักการ Harmonic Restraint ขณะที่หม้อแปลงเกิดภายในหม้อแปลง ในช่วงเวลาที่เริ่มจ่ายไฟ ที่เวลา 0.042 วินาที ซึ่งมีผลของกระแสอินรัชมาเกี่ยวข้อง จะเห็นได้ว่าส่วนตรวจจับกระแสอินรัชที่ใช้หลักการของระบบโครงข่ายประสาทเทียม สามารถแยกแยะว่ากระแสที่ผ่านในช่วงเวลานั้นว่าไม่ใช่กระแสอินรัช จึงไม่ส่งสัญญาณยับยั้งการสั่งปลดวงจรออกไป ทำให้สั่งปลดวงจรได้เร็วกว่าหลักการ Harmonic Restraint

5.1.2 ส่วนชดเชยกระแสที่ผิดเพี้ยนจากผลของการอิ่มตัวในแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแส (CT Saturation Restoration Block)



รูปที่ 5.7 หลักการชดเชยการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นอันเนื่องมาจากการอิ่มตัวของแกนเหล็ก โดยใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม

ในบางครั้งรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนมาจากผลของการอิมพัลส์ในแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแส จะมีผลทำให้รีเลย์ที่ใช้หลักการเดิมทำงานผิดพลาด ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเอาระบบโครงข่ายประสาทเทียมมาเสริมข้อบกพร่องดังกล่าว โดยการจดจำรูปคลื่นไฟฟ้าในสถานะปกติ คือ ไม่มีการผิดเพี้ยนใดๆ และทำการชดเชยหารูปคลื่นที่วัดได้จริงผิดเพี้ยนไป ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.8 โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้สำหรับชดเชยการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นอันเนื่องมาจากการอิมพัลส์ของแกนเหล็ก โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

สำหรับหลักการชดเชยการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นอันเนื่องมาจากการอิมพัลส์ของแกนเหล็กซึ่งสร้างขึ้นโดยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.8 ซึ่งระบบโครงข่ายประสาทเทียมดังกล่าวได้ถูกฝึกหัดให้จดจำรูปคลื่นไฟฟ้าในสถานะปกติ คือ ไม่มีการผิดเพี้ยนใดๆ และต้องทำการชดเชยหารูปคลื่นที่วัดได้จริงมีการผิดเพี้ยนไปจากผลของการอิมพัลส์ในแกนเหล็ก โดยการกำหนดให้โครงข่ายจะต้องให้เอาท์พุตออกมาเป็นรูปคลื่นกระแสที่ขาดหายไป (Fraction Current) จากผลของการอิมพัลส์ของแกนเหล็กและจะต้องไม่ชดเชยกระแสใดๆ ออกมาในกรณีที่กระแสที่ผ่านเข้ามายังโครงข่ายไม่ใช่กระแสที่ผิดเพี้ยนเนื่องจากการอิมพัลส์ในแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแส เช่น กระแสอินรัช หรือ กระแสลัดวงจรแบบมีผลของกระแสตรง ในที่นี้ได้ออกแบบระบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบชนิดหลายชั้น (Multilayer Feedforward Neural Network) โดยมีจำนวนทั้งหมด 3 ชั้น (ไม่รวมชั้นอินพุต) โดยในชั้นช่อนที่ 1 มี 30 นิวรอน โดยรับอินพุตของกระแสด้านปฐมภูมิขนาด 1 เฟส ในช่วงเวลา 30 คำสุ่ม หรือ 1 ไซเคิลครั้ง เพื่อให้ครอบคลุมในกรณีที่มีผลของกระแสตรงมาเกี่ยวข้อง ส่วนในชั้นช่อนที่ 2 นั้นกำหนดให้มี 16 นิวรอน และในชั้นเอาท์พุตมี 1 นิวรอน ซึ่งกำหนดฟังก์ชันแบบ Hyperbolic Tangent Sigmoid สำหรับนิวรอนในชั้นช่อนที่ 1 และ 2 ส่วนในชั้นสุดท้ายได้กำหนดฟังก์ชันเป็นแบบ Pure Linear หรือเชิงเส้นแบบไม่จำกัดขอบเขต ซึ่งในการกำหนดฟังก์ชันดังกล่าว สามารถครอบคลุมลักษณะปัญหาในรูปแบบต่างๆ ได้ ส่วนการฝึกหัดโครงข่ายให้มีการเรียนรู้ ได้เลือกใช้วิธี Gradient Descent with Momentum & Adaptive Learning

Rate Back Propagation ซึ่งในทอมโมเมนตัมจะมีผลทำให้การเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดไม่เกิดการแกว่ง และใช้เวลาน้อยกว่าในการเคลื่อนที่เข้าสู่จุดต่ำสุด ในส่วนการปรับเปลี่ยนอัตราการเรียนรู้ ขณะฝึกหัดของโครงข่ายทำให้สามารถเพิ่มอัตราการเรียนรู้ หากการเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงแนวราบเพื่อที่จะเร่งให้เข้าสู่จุดต่ำสุด แต่หากการเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงที่มีความชัน ก็ให้ลดอัตราการเรียนรู้ลงเพื่อที่จะได้เข้าสู่จุดต่ำสุดอย่างแท้จริง ดังนั้นหากกำหนดให้ w_1 คือเมตริกซ์ที่เป็นค่าน้ำหนักที่ได้จากโครงข่ายในชั้นอินพุตกับชั้นซ่อนที่ 1 และ w_2 คือค่าน้ำหนักที่ได้จากโครงข่ายในชั้นซ่อนที่ 1 กับชั้นซ่อนที่ 2 ส่วน w_3 คือค่าน้ำหนักที่ได้จากโครงข่ายในชั้นซ่อนที่ 2 กับชั้นเอาต์พุต ส่วน b_1, b_2, b_3 คือเมตริกซ์ค่าไบอัสในชั้นซ่อนที่ 1 ชั้นซ่อนที่ 2 และชั้นซ่อนที่ 3 ตามลำดับ ดังนั้นสมการสำหรับการคำนวณไปข้างหน้าของโครงข่าย ซึ่งอยู่ในรูปของเมตริกซ์ก็คือ

$$a_3 = f_3[w_3 f_2[w_2 f_1(w_1 p + b_1) + b_2] + b_3] \quad (5.6)$$

ซึ่ง a_1, a_2, a_3 คือเอาต์พุตที่ได้จากโครงข่ายในชั้นซ่อนที่ 1 ชั้นซ่อนที่ 2 และ ชั้นซ่อนที่ 3 ตามลำดับ net_1, net_2, net_3 คือสัญญาณกระตุ้นที่ได้จากโครงข่ายในชั้นซ่อนที่ 1 ชั้นซ่อนที่ 2 และชั้นซ่อนที่ 3 ตามลำดับ f_1 คือค่าฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นซ่อนที่ 1 ซึ่งในที่นี้เลือกเป็นชนิด Hyperbolic Tangent Sigmoid f_2 คือค่าฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นซ่อนที่ 2 ซึ่งในที่นี้เลือกเป็นชนิด Hyperbolic Tangent Sigmoid f_3 คือค่าฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นเอาต์พุต ซึ่งในที่นี้เลือกเป็นชนิด Pure Linear และ p คือค่าเวกเตอร์ของรูปแบบอินพุต

ในส่วนของการแพร่ย้อนกลับค่าความผิดพลาดและการปรับปรุงค่าน้ำหนัก โดยเริ่มจากชั้นเอาต์พุต เป็นคืบไปจนกระทั่งถึงชั้นอินพุต จะเป็นไปตามสมการต่อไปนี้ โดยเริ่มจากค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก

$$\Delta w(t) = -\eta(1 - \alpha)\nabla E(t) + \alpha\Delta w(t-1) \quad (5.7)$$

โดยที่ $\Delta w(t)$ คือค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก η คือค่าอัตราการเรียนรู้ α คือค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัม $E(t)$ คือค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองที่คำนวณได้จากความแตกต่างของเอาต์พุตเป้าหมายกับเอาต์พุตที่ได้จากโครงข่ายจริง ส่วนเทอม $\alpha\Delta w(t-1)$ ก็คือโมเมนตัมเทอม ซึ่งในส่วนของการกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้ η ได้กำหนดไว้ที่ 0.01 และกำหนดค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัม α อยู่ที่ 0.9

ในการปรับเปลี่ยนค่าอัตราการเรียนรู้ของโครงข่าย ได้ใช้วิธีการปรับเปลี่ยนค่าอัตราการเรียนรู้ โดยการใชัพลัทธิของการปรับค่าน้ำหนักในแต่ละรอบ ซึ่งจะมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

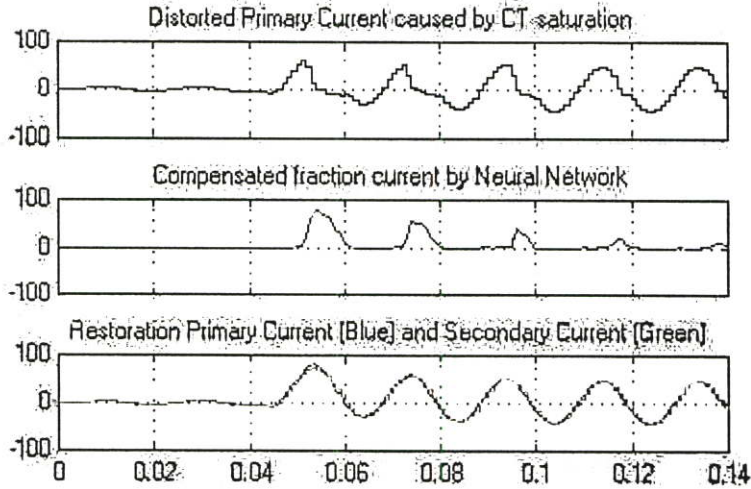
1. ถ้าค่าความผิดพลาดกำลังสองของโครงข่ายมีการเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าหนึ่ง กำหนดให้มีค่าอยู่ที่ 4 เปอร์เซนต์หลังจากการปรับปรุงค่าน้ำหนัก อัลกอริทึมจะยกเลิกการปรับปรุงค่าน้ำหนัก แล้วทำการปรับลดอัตราการเรียนรู้ใหม่โดยการคูณค่าอัตราการเรียนรู้ด้วยค่า 0.7 แล้วกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัม α มีค่าเท่ากับ 0
2. ถ้าค่าความผิดพลาดกำลังสองของโครงข่ายมีการลดลงมากกว่า 4 เปอร์เซนต์หลังจากการปรับปรุงค่าน้ำหนัก อัลกอริทึมจะยอมรับการปรับปรุงค่าน้ำหนักนั้น แล้วทำการปรับเพิ่มอัตราการเรียนรู้ใหม่โดยการคูณค่าอัตราการเรียนรู้ด้วยค่า 1.05 แล้วกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัม α มีค่าเท่ากับค่าเดิมก่อนการปรับค่าให้เท่ากับ 0
3. ถ้าค่าความผิดพลาดกำลังสองของโครงข่ายมีการเพิ่มขึ้น แต่น้อยกว่า 4 เปอร์เซนต์ อัลกอริทึมจะยอมรับการปรับปรุงค่าน้ำหนัก ส่วนอัตราการเรียนรู้ และค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัม จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ส่วนเงื่อนไขในการหยุดกระบวนการฝึกหัดได้กำหนดให้มีการตรวจสอบเงื่อนไขดังต่อไปนี้

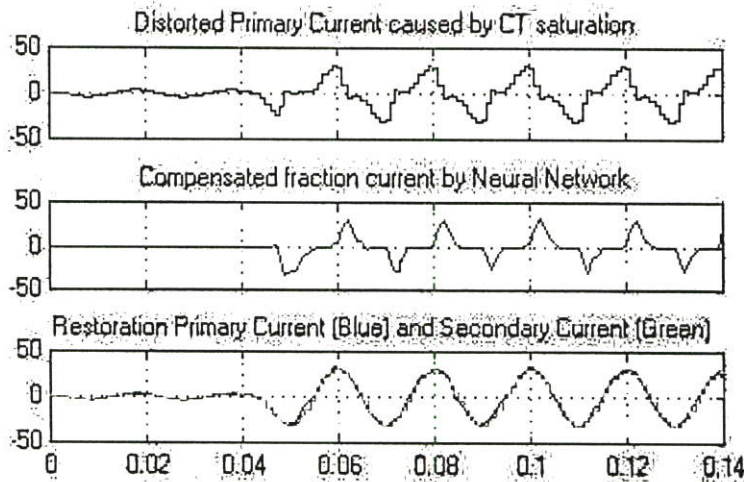
1. จำนวนรอบในการฝึกหัดเกินกว่าจำนวนรอบการฝึกหัดสูงสุด (Maximum Epochs) ที่กำหนดไว้
2. ค่าเกรเดียนต์ มีค่าต่ำกว่าค่าเกรเดียนต์ (Minimum Gradient) ต่ำสุดที่กำหนดไว้ ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 0.000001
3. ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square Error) ที่คำนวณได้ ต่ำกว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองเป้าหมายซึ่งได้กำหนดไว้อยู่ที่ 0.001

ในการฝึกหัดโครงข่ายนั้นได้มีการจำลองรูปคลื่นสถานะต่างๆ โดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP ซึ่งสถานะต่างๆ ที่ได้จำลองนั้นได้แก่ สถานะกระแสที่ผิดเพี้ยนไปเนื่องมาจากการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กทั้งแบบมีการอิ่มตัวอันเนื่องมาจากผลของกระแสตรง (DC Saturation) และการอิ่มตัวจากผลของกระแสสลับ (AC Saturation) อันเนื่องมาจากผลของภาระของแปลงกระแสมีมากเกินกำหนด หรือการเลือกหม้อแปลงไม่เหมาะสม เอาท์พุทที่ได้จากส่วนประมวลผลเบื้องต้นส่วนนี้จะอยู่ในรูปของกระแสที่หายไปจากผลของการอิ่มตัวของแกนเหล็ก ($I_{fraction}$) ซึ่งจะนำไปชดเชยในส่วนประมวลผลเบื้องต้นส่วนอื่นๆ ของหลักการที่นำเสนอเพื่อให้มีการประมวลผลที่ถูกต้อง ดังนั้นหลักการดังกล่าวนี้จะช่วยเสริมเพิ่มความถูกต้องในการตัดสินใจหากรูปคลื่นกระแสที่วัดได้เกิดการผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากผลของการอิ่มตัวของแกนเหล็ก ดังที่ได้แสดงผลไว้ในรูปที่ 5.9 ซึ่งเป็นการชดเชยที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมในกรณีที่รูปคลื่นกระแสเกิดการผิดเพี้ยน อันเนื่องมาจากผลการอิ่มตัวในแกนเหล็กจากผลของกระแสตรง และ ส่วนในรูปที่ 5.10 เป็นการชดเชยในกรณีที่รูปคลื่นกระแสเกิดการผิดเพี้ยน อันเนื่องมาจากผลการอิ่มตัวในแกนเหล็กจากผลของกระแสสลับ ซึ่งจะเห็น

ได้ว่าระบบโครงข่ายประสาทยูเอ็มสามารถชดเชยค่ากระแสออกมา ทำให้กระแสหลังชดเชยมีค่าใกล้เคียงกับรูปคลื่นกระแสที่ไม่ผิดเพี้ยน



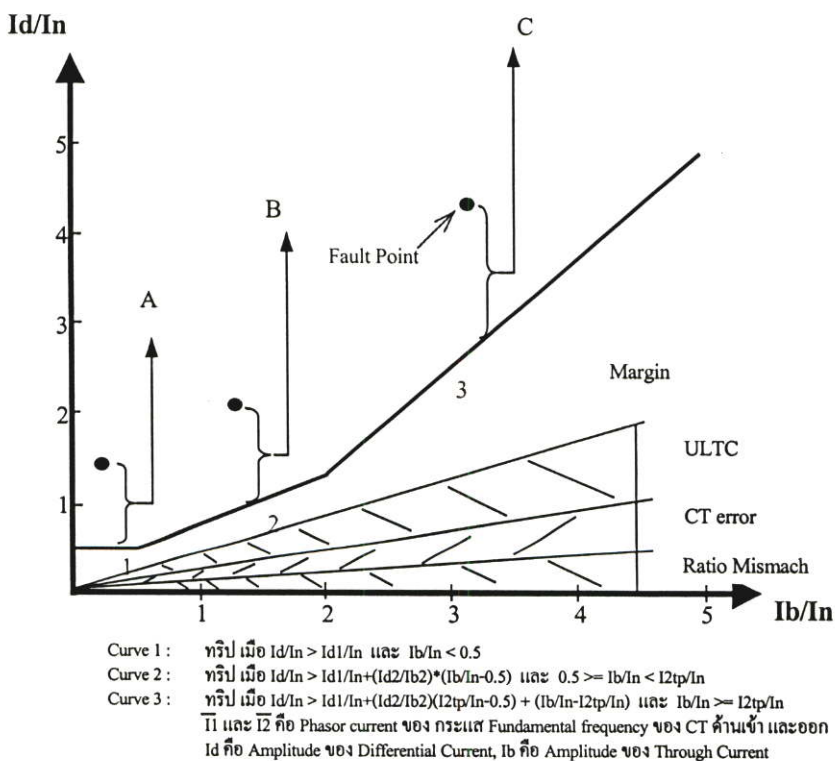
รูปที่ 5.9 กระแสด้านปฐมภูมิที่ผิดเพี้ยนจากผลของกระแสตรง ทำให้แกนเหล็ก CT อิ่มตัว (บน), ส่วนชดเชย(กลาง), เปรียบเทียบกระแสด้านปฐมภูมิหลังชดเชยกับกระแสทุติยภูมิ (ล่าง)



รูปที่ 5.10 กระแสด้านปฐมภูมิที่ผิดเพี้ยนจากผลของกระแสสลับ ทำให้แกนเหล็ก CT อิ่มตัว (บน), ส่วนชดเชย(กลาง), เปรียบเทียบกระแสด้านปฐมภูมิหลังชดเชยกับกระแสทุติยภูมิ (ล่าง)

5.1.3 ส่วนการวิเคราะห์อัตราผลต่างของกระแสกับผลรวมของกระแส (Percentage Differential Current)

หลักการวิเคราะห์อัตราผลต่างของกระแสกับผลรวมของกระแส หรือหลักการ Percentage Differential Current จะยังคงถูกใช้งานอยู่เพื่อเป็นข้อมูลเสริมการตัดสินใจของส่วนประมวลผลสุดท้าย ในการตัดสินใจสั่งปลดวงจรร่วมกับข้อมูลที่ได้จากส่วนประมวลผลสัญญาณเบื้องต้นอื่นๆ ซึ่งจะต้องกำหนดค่าเซตคั้งที่ต้องการให้รีเลย์ในการสั่งปลดวงจร รีเลย์จะทำงานเมื่อไหร่ก็ตามที่อัตราผลต่างของกระแสกับผลรวมของกระแสมากกว่าค่าที่ได้ตั้งไว้ โดยทั่วไปจะกำหนดช่วงการทำงานเป็น 3 ช่วง ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.11 ซึ่งในช่วงแรกจะกำหนดเป็นเส้นตรงที่ไม่มี ความชัน โดยขึ้นกับค่ากระแสผลต่าง (I_d) อย่างเดียว ซึ่งในช่วงนี้ต้องตั้งค่าเซตคั้งเพื่อไว้สำหรับค่ากระแสของหม้อแปลงแบบไม่มีภาระ (No load Current or Excitation Current) ในช่วงสองและ สามจะกำหนดเป็นเส้นตรงที่มีความชัน โดยจะขึ้นกับค่ากระแสผลต่าง (I_d) และกระแสผลรวม หรือ กระแสไบอัสด้วย (I_b) ซึ่งต้องตั้งค่าเซตคั้งเพื่อไว้สำหรับสิ่งที่จะทำให้รีเลย์เกิดการ ทำงานที่ผิดพลาด อันได้แก่ อย่างแรกคือ ค่าความผิดพลาดของหม้อแปลงกระแส (CT Error) อย่างที่สองคือ ค่าอัตราส่วนการแปลงที่ไม่เท่ากันระหว่างหม้อแปลงกระแสที่ต่ออยู่ทั้งด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิ (CT Ratio Mismatch) อย่างที่สามคือ ผลของการเปลี่ยนของกระแสด้านปฐมภูมิที่สูงขึ้นหรือต่ำลงอันเนื่องมาจากผลจากการเปลี่ยนแทปของ On-Load Tap Change (OLTC)



รูปที่ 5.11 เส้นคุณลักษณะของหลักการ Percentage Differential Current

ในงานวิจัยนี้อินพุตที่นำไปป้อนให้กับส่วนประมวลผลขั้นสุดท้ายก็คือ เป็นอัตราส่วนจำนวนเท่าของค่ากระแส ณ ขณะนั้นเทียบกับค่าที่ตั้งค่าไว้ โดยที่กำหนดให้เป็นเงื่อนไขที่ C2 (Criteria 2) ซึ่งเรากำหนดค่าเซตตั้งของ I_d/I_n หรือค่า P/I_n ไว้ที่ 10%, ส่วนค่า I_d/I_b , หรือค่า S ไว้ที่ 0.5% และค่า $I2tp$ ได้ตั้งไว้ที่ 2 ซึ่งค่ากระแส I_d ที่วัดได้จะถูกชดเชยจากส่วนชดเชยการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นอันเนื่องมาจากการอิมิตัวของแกนเหล็ก $Ifraction$ ในกรณีที่เกิดการอิมิตัวของแกนเหล็ก หม้อแปลงกระแส

C2: คืออัตราส่วนของขนาดของผลต่างกระแส (I_d) ซึ่งได้รับการชดเชยกระแสจากส่วนชดเชยกระแสผิดเพี้ยนเนื่องจากการอิมิตัวของแกนเหล็ก ($Ifraction$) ต่อ ค่าเซตตั้งที่ได้ตั้งไว้ ได้แก่ I_d/I_n , I_d/I_b และ $I2tp$ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ช่วงดังต่อไปนี้

- ในกรณีที่ $I_d/I_n > I_d/I_n$ และ $I_b/I_n < 0.5$ ซึ่งก็คือระยะ A ในรูปที่ 5.11

$$C2(n) = \frac{(I_d + Ifraction)/I_n}{I_d/I_n} \quad (5.8)$$

- ในกรณีที่ $I_d/I_n > I_d/I_n + (I_d/I_b) * (I_b/I_n - 0.5)$ และ $0.5 \geq I_b/I_n < I2tp/I_n$ ซึ่งก็คือระยะ B ในรูปที่ 5.11

$$C2(n) = \frac{(I_d + Ifraction) / I_n}{(I_d / I_n + ((I_d / I_b) * (I_b / I_n - 0.5))} \quad (5.9)$$

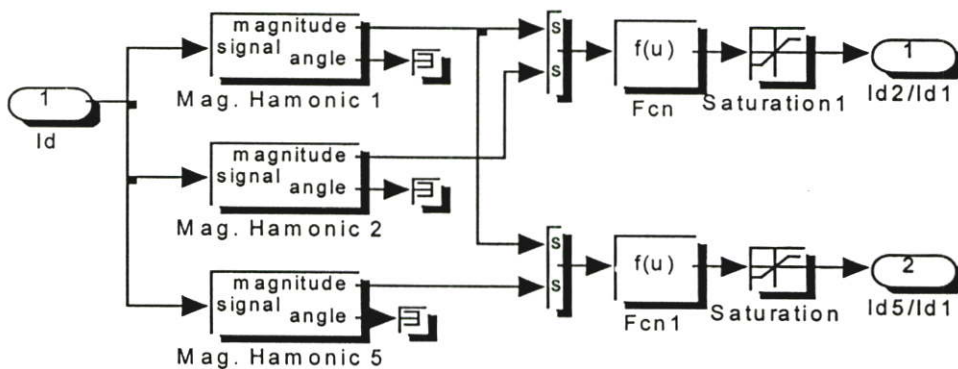
- ในกรณีที่ $I_d/I_n > I_d/I_n + (I_d/I_b) * (I2tp/I_n - 0.5) + (I_b/I_n - I2tp/I_n)$ และ $I_b/I_n \geq I2tp/I_n$ ซึ่งก็คือระยะ C ในรูปที่ 5.11

$$C2(n) = \frac{(I_d + Ifraction) / I_n}{(I_d / I_n + ((I_d / I_b) * (I_b / I_n - 0.5)) + (I_b / I_n - I2tp / I_n))} \quad (5.10)$$

โดยที่ I_d คือ ขนาดของกระแสผลต่าง (Differential Current) $Ifraction$ คือกระแสชดเชยในกรณีของการผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากการอิมิตัวของแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแส I_b คือขนาดของกระแสผลรวม (Through Current) หรือกระแสไบอัส I_n คือค่าพิคคของกระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส ส่วน I_d/I_n , I_d/I_b และ $I2tp$ เป็นค่าเซตตั้งที่ต้องกำหนดไว้

5.1.4 ส่วนการแยกส่วนประกอบฮาร์โมนิก (Harmonic Component Extractor Block)

อัตราส่วนขนาดของฮาร์โมนิกบางอันดับกับฮาร์โมนิกอันดับที่ 1 ของผลต่างของกระแสยังคงมีความจำเป็นที่จะนำไปเป็นข้อมูลเสริมการตัดสินใจของส่วนประมวลผลสุดท้ายสำหรับการตัดสินใจยับยั้งการสั่งปลดวงจร ซึ่งในส่วนนี้จะเป็นส่วนประมวลผลเบื้องต้นอีกส่วนที่ทำหน้าที่ร่วมกับส่วนประมวลผลสัญญาณเบื้องต้นอื่นๆ โดยการแยกอัตราส่วนระหว่างส่วนประกอบฮาร์โมนิกอันดับ 2 กับฮาร์โมนิกอันดับ 1 (I_{d2}/I_{d1}) และอัตราส่วนระหว่างฮาร์โมนิกอันดับ 5 กับฮาร์โมนิกอันดับ 1 (I_{d5}/I_{d1}) จึงถูกส่งผ่านไปยังส่วนประมวลผลสุดท้าย โดยการใช้หลักการหน่วงการสั่งปลดวงจรโดยใช้อัตราส่วนของฮาร์โมนิกอันดับที่ 2 ต่อฮาร์โมนิกอันดับที่ 1 มาเป็นส่วนป้องกันเสริมการสั่งปลดวงจรผิดพลาดอันเนื่องมาจากผลของกระแสอินรีช และใช้หลักการหน่วงโดยใช้อัตราส่วนของฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 ต่อฮาร์โมนิกอันดับที่ 1 มาเป็นส่วนป้องกันการสั่งปลดวงจรผิดพลาดอันเนื่องมาจากผลของอัตราผลต่างของกระแสต่อผลรวมของกระแสมากกว่าค่าที่ได้ตั้งไว้ ซึ่งเกิดจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กมากเกินไป (Over-excitation) โดยอาจเกิดได้จากสถานะแรงดันเกินหรือความถี่ตก นอกจากนั้นการหน่วงโดยใช้อัตราส่วนของฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 ต่อฮาร์โมนิกอันดับที่ 1 ยังใช้เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลง จากผลของความร้อนอันเนื่องมาจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กมากเกินไป



รูปที่ 5.12 ส่วนการแยกส่วนประกอบฮาร์โมนิกโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

ผลที่ได้จากส่วนประมวลผลเบื้องต้นส่วนนี้จะนำไปป้อนให้กับส่วนประมวลผลขั้นสุดท้ายเพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจ โดยที่กำหนดให้เป็นเงื่อนไขที่ C3 (Criteria 3) และ เงื่อนไขที่ C4 (Criteria 4) ดังนี้

C3: เป็นค่าระดับสัญญาณอัตราส่วนขนาดของ ส่วนประกอบฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 กับ ฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 ของผลต่างของกระแสด้านเข้าและด้านออกของหม้อแปลง ซึ่งจะถูกกำหนด ให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

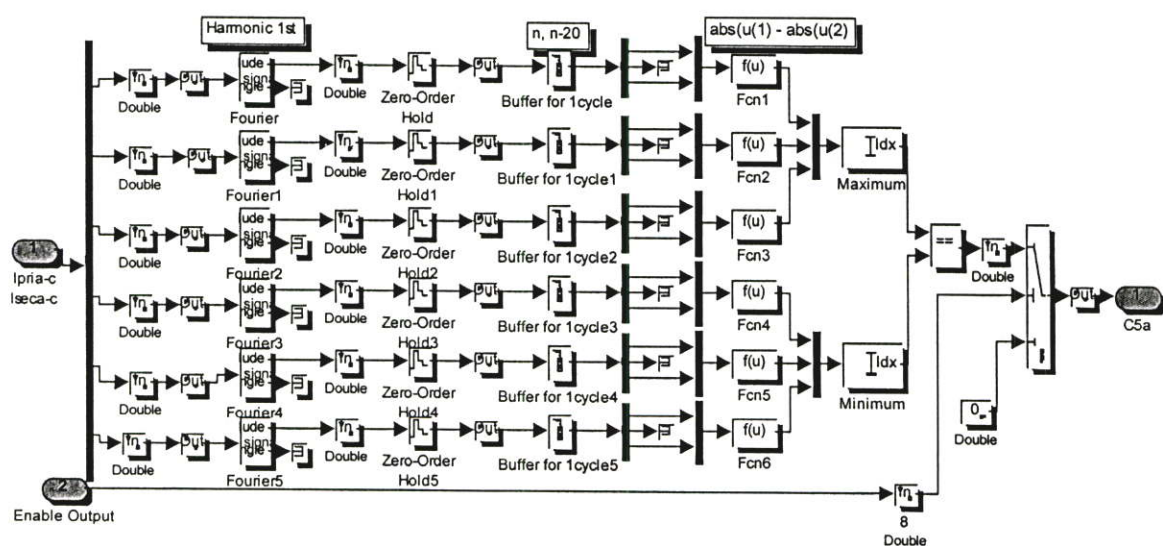
$$C3(n) = \frac{Id_{2f}}{Id_{1f}} \quad (5.11)$$

C4: เป็นค่าระดับสัญญาณอัตราส่วนขนาดของส่วนประกอบฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 กับ ฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 ของกระแสผลต่างด้านเข้าและด้านออกของหม้อแปลง ซึ่งจะถูกกำหนดให้มี ค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

$$C4(n) = \frac{Id_{5f}}{Id_{1f}} \quad (5.12)$$

5.1.5 ส่วนการตรวจสอบการเกิดฟอลต์ภายใน (Internal Fault Detector Block)

ส่วนนี้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิของหม้อแปลงที่จะ ป้องกัน เพื่อหาความแตกต่างระหว่างเกิดการเกิดฟอลต์ขึ้นภายใน และการเกิดฟอลต์ภายนอก ทั้งนี้ เนื่องจากการเกิดฟอลต์ภายในพื้นที่ป้องกันและการเกิดฟอลต์ภายนอกพื้นที่ป้องกันจะให้ความ สัมพันธ์ระหว่างด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิต่างกัน โดยการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเทียบกับในเวลา 1 รูปคลื่น ซึ่งหากนำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาพิจารณาเพื่อที่จะสามารถแยกแยะฟอลต์ ระหว่าง ฟอลต์ภายในและฟอลต์ภายนอก จะได้หลักการหาความแตกต่างอยู่ 4 อย่าง ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.13 ส่วนวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขนาดของฟอลต์เฟสระหว่างด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ เทียบกับก่อนเกิดฟอลต์ $C5_u(n)$ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

ความแตกต่างอย่างแรกที่จะทำการวิเคราะห์คือ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงในเชิงขนาด (Magnitude) ของในแต่เฟสระหว่างด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ ณ เวลาปัจจุบัน (n) เทียบกับสภาวะก่อนหน้า 1 รูปคลื่น ($n-20$) ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 5.13 หากหม้อแปลงที่จะป้องกันเป็นหม้อแปลงที่ต่อขดลวดระหว่างด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น Dyn1 หรือ YNd11 จะต้องทำการปรับเวกเตอร์ให้มีทิศทางเดียวกันและขนาดให้มีค่าเท่ากัน ผลที่ได้จากส่วนประมวลผลเบื้องต้นส่วนนี้จะทำให้สามารถทราบการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทำงานของหม้อแปลง หากสภาวะเฟสใดเฟสหนึ่งทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่ทำการป้องกันรับกระแสมากขึ้น แต่ปรากฏว่ากระแสด้านทุติยภูมิในเฟสเดียวกันนั้นมีค่าน้อยลงนั้นหมายความว่าอาจจะเกิดการฟอลต์ภายในหม้อแปลง ความสัมพันธ์นี้จะไม่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของ OLTC ผลที่ได้จากส่วนประมวลผลเบื้องต้นส่วนนี้จะนำไปป้อนให้กับส่วนประมวลผลขั้นสุดท้ายเพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจ โดยที่กำหนดให้เป็นเงื่อนไขที่ $C5_a$ (Criteria 5_a) ดังนี้

$C5_a$ (Primary and Secondary relation check): เป็นค่าความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงขนาดของฟอลต์เฟสระหว่างด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ เทียบกับสภาวะก่อนการเกิดฟอลต์ ซึ่งจะถูกกำหนดให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

$$C5_a(n)=[0 \quad 1] \quad (5.13)$$

ซึ่งจะมีค่าเป็น 1 ในกรณีที่

$$\begin{aligned} & \text{Max}[I_{1,pri_a}(n) - I_{1,pri_a}(n-20), I_{1,pri_b}(n) - I_{1,pri_b}(n-20), \\ & I_{1,pri_c}(n) - I_{1,pri_c}(n-20)] = \text{Min} [I_{1,sec_a}(n) - I_{1,sec_a}(n-20) \\ & I_{1,sec_b}(n) - I_{1,sec_b}(n-20), I_{1,sec_c}(n) - I_{1,sec_c}(n-20)] \end{aligned}$$

โดยที่ I_{1,pri_α} คือขนาดของส่วนประกอบฮาร์โมนิกอันดับ 1 ของกระแสด้านปฐมภูมิ, I_{1,sec_α} คือค่าขนาดของส่วนประกอบฮาร์โมนิกอันดับที่ 1 ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง α คือ เฟส a, b หรือ c.

ความแตกต่างอย่างสองที่จะทำการวิเคราะห์คือ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงผลรวมของกระแสทั้ง 3 เฟส ระหว่างด้านปฐมภูมิ และ ด้านทุติยภูมิ เทียบกับสภาวะก่อนการเกิดฟอลต์ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.14 ผลที่ได้จากส่วนประมวลผลเบื้องต้นส่วนนี้จะทำให้สามารถทราบการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทำงานของหม้อแปลง หากผลรวมกระแสทั้งสามเฟสในเชิงขนาดของหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิ ณ เวลาปัจจุบัน (n) รับกระแสมากขึ้นเมื่อเทียบกับช่วงเวลา 1 รูปคลื่นที่ผ่านมา ($n-20$) นั้นหมายความว่าอาจจะเกิดการฟอลต์ภายในหม้อแปลง และเมื่อเทียบเป็นอัตราส่วนกับการเปลี่ยนแปลงผลรวมกระแสทั้งสามเฟสของหม้อแปลงทางด้านทุติยภูมิจะทำให้สามารถบ่งบอกถึงขนาดของกระแสฟอลต์ หากกระแสฟอลต์มีค่าสูง ก็จะทำให้ค่าอัตราส่วนดังกล่าว

สูงขึ้นไป ผลที่ได้จากส่วนประมวลผลเบื้องต้นส่วนนี้จะนำไปป้อนให้กับส่วนประมวลผลขั้นสุดท้าย เพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจ โดยที่กำหนดให้เป็นเงื่อนไขที่ $C5_b$ (Criteria 5_b) ดังนี้

$C5_b$ (Summation check): เป็นค่าความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงของผลรวมของกระแสทั้ง 3 เฟส ระหว่างด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเทียบกับสภาวะก่อนการเกิดฟอลต์ ค่าระดับสัญญาณนี้จะถูกปรับให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

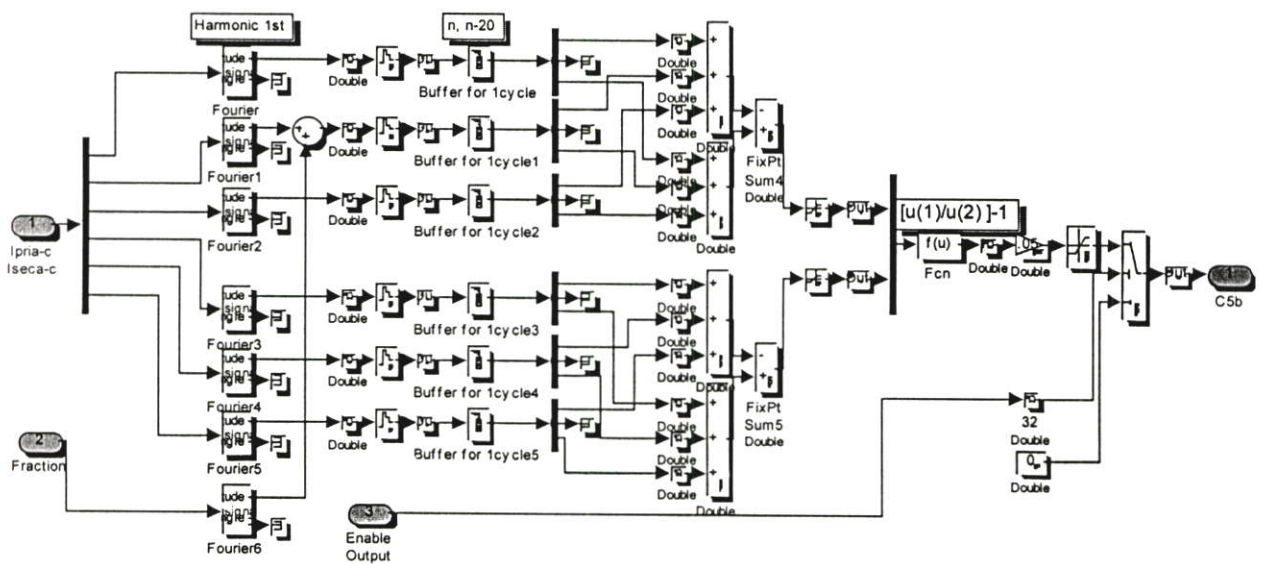
$$C5_b(n) = \frac{Fpri(n)}{Fsec(n)} - 1 \tag{5.14}$$

โดยที่

$$Fpri(n) = [((I_{1pri_a}(n) + I_{1pri_b}(n) + I_{1pri_c}(n)) - ((I_{1pri_a}(n-20) + I_{1pri_b}(n-20) + I_{1pri_c}(n-20)))]$$

และ

$$Fsec(n) = [((I_{1sec_a}(n) + I_{1sec_b}(n) + I_{1sec_c}(n)) - ((I_{1sec_a}(n-20) + I_{1sec_b}(n-20) + I_{1sec_c}(n-20)))]$$



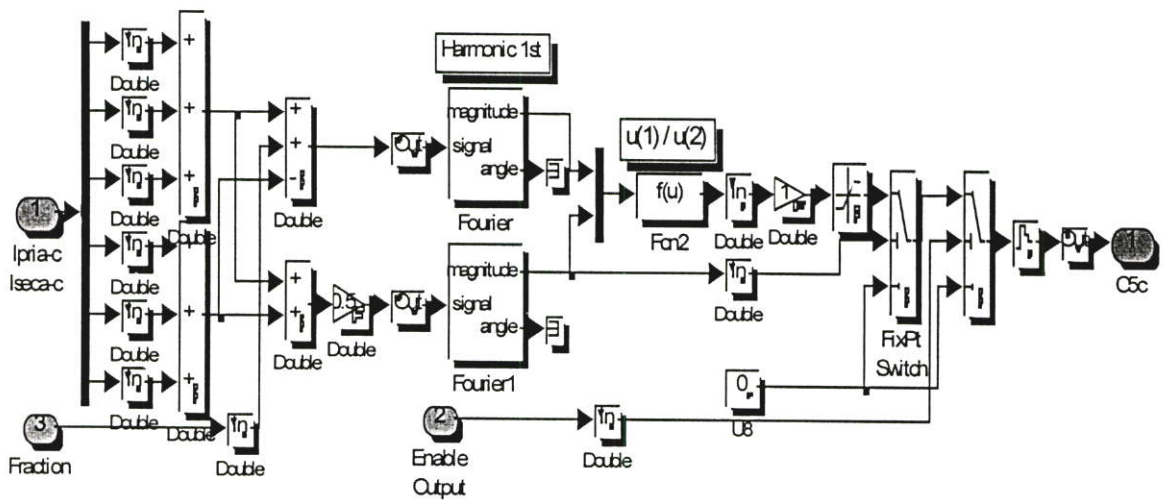
รูปที่ 5.14 ส่วนวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของผลรวมของกระแสทั้ง 3 เฟส ระหว่างด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิเทียบกับก่อนการเกิดฟอลต์ $C5_b(n)$ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

ความแตกต่างอย่างสามที่จะทำการวิเคราะห์คือ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์กระแสตกค้าง (Residual Current) ระหว่างด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์นี้ จะไม่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแทปของ OLTC ผลที่ได้จากส่วนประมวลผลเบื้องต้น ส่วนนี้จะนำไปป้อนให้กับส่วนประมวลผลขั้นสุดท้ายเพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจ โดยที่กำหนดให้เป็นเงื่อนไขที่ $C5_c$ (Criteria 5_c) ดังนี้

$C5_c$ (Percentage differential residual current check) : เป็นความสัมพันธ์ของกระแสตกค้าง (Residual Current) ระหว่างด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ค่าระดับสัญญาณจะถูกปรับให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

$$C5_c(n) = \frac{Id_1_residual(n)}{Ib_1_residual(n)} \quad (5.15)$$

โดยที่ $Id_1_residual(n)$ คือขนาดของผลต่างของกระแสตกค้างด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ส่วน $Ib_1_residual(n)$ คือขนาดของผลรวมหารสองของกระแสตกค้างทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ของหม้อแปลง



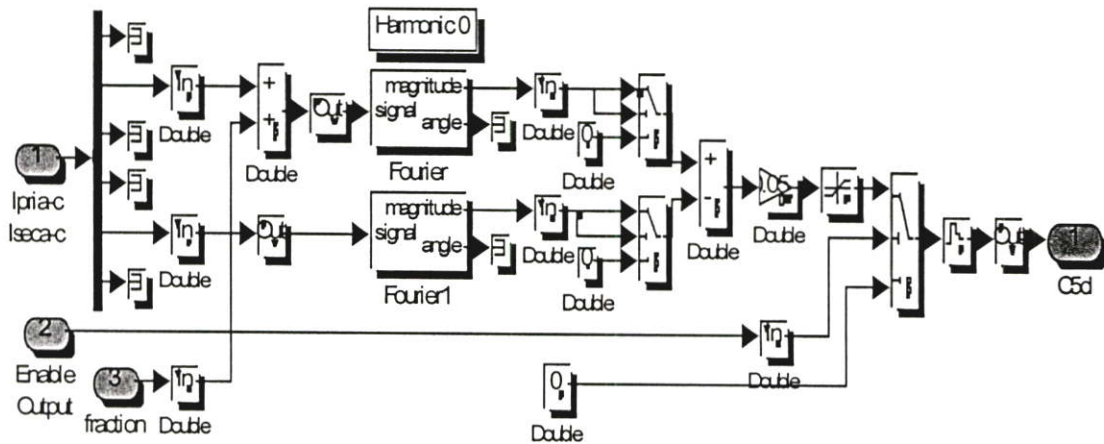
รูปที่ 5.15 ส่วนวิเคราะห์ความสัมพันธ์กระแสตกค้าง ระหว่างด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ $C5_c(n)$ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

และความแตกต่างอย่างสุดท้ายที่จะทำการวิเคราะห์คือ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของส่วนประกอบกระแสตรง (DC Component) ระหว่างด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ ผลที่ได้จากส่วนประมวลผลเบื้องต้นส่วนนี้จะนำไปป้อนให้กับส่วนประมวลผลขั้นสุดท้าย เพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจ โดยที่กำหนดให้เป็นเงื่อนไขที่ $C5_d$ (Criteria 5_d) ดังนี้

$C5_d$ (Percentage differential current check) : เป็นค่าขนาดส่วนประกอบกระแสตรง (DC Component) ของผลต่างกระแสระหว่างด้านปฐมภูมิกับทุติยภูมิ ซึ่งจะได้รับการชดเชยจากส่วนชดเชยกระแสผิดเพี้ยนเนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็ก

$$C5_d(n) = Id_0 - Ifraction \quad (5.16)$$

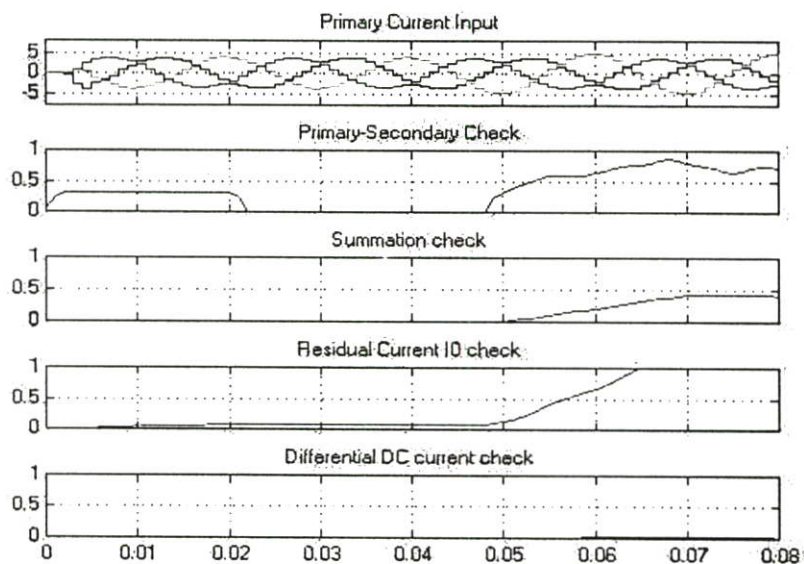
โดยที่ Id_0 คือ ขนาดส่วนประกอบกระแสตรงของผลต่างกระแสระหว่างด้านปฐมภูมิกับทุติยภูมิ $Ifraction$ คือ ขนาดของส่วนประกอบกระแสตรงของกระแสชดเชยที่ได้จากส่วนชดเชยกระแสผิดเฟสขึ้นอันเนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็ก n คือ ค่าลำดับการสุ่ม ณ เวลานั้นๆ



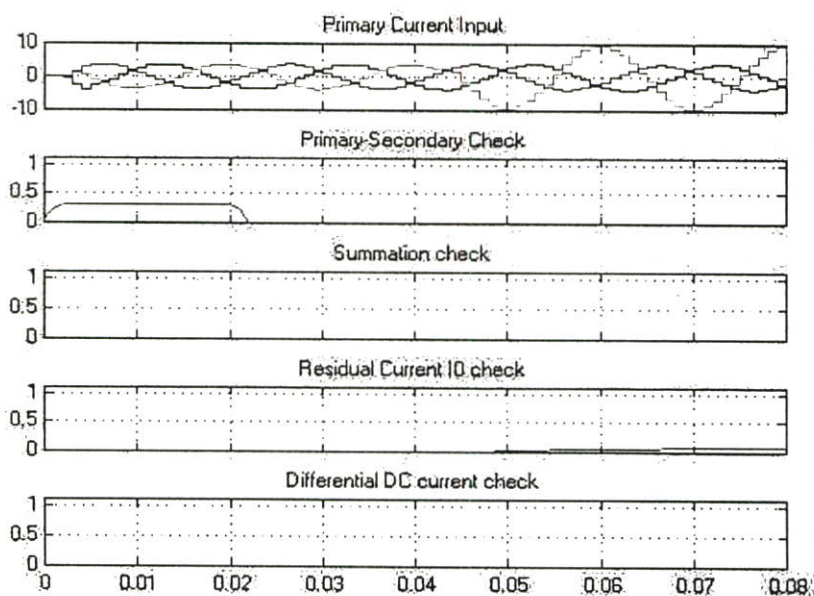
รูปที่ 5.16 ส่วนวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของส่วนประกอบกระแสตรงของผลต่างกระแสระหว่างด้านปฐมภูมิกับทุติยภูมิ $C5_d(n)$ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

ในรูปที่ 5.17 แสดงถึงการทำงานของส่วนตรวจสอบการเกิดฟลัดภายในสำหรับกรณีที่เกิดการฟลัดภายในแบบมีค่าอิมพีแดนซ์สูง ซึ่งเห็นได้ว่าสามารถตรวจพบการเกิดฟลัดที่มีกระแสฟลัดน้อยๆ ได้ โดยสังเกตได้จากค่าเอาต์พุตของส่วนตรวจสอบย่อยทั้งสี่ ($C5_d(n) - C5_d(n)$) จึงมีค่าค่อนข้างมาก

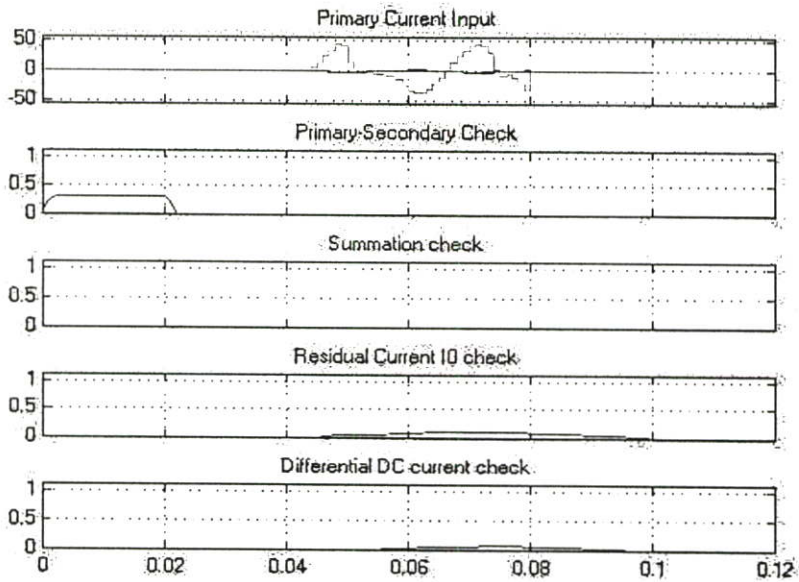
ส่วนในรูปที่ 5.18 และ 5.19 ได้แสดงถึงผลการทำงานของส่วนตรวจสอบการเกิดฟลัดภายในสำหรับกรณีที่เกิดการฟลัดภายนอกทั้งที่มี และไม่มีผลการผิดเฟสของรูปคลื่นกระแสอันเนื่องมาจากเกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็ก ซึ่งจะเห็นได้ว่าส่วนตรวจสอบการเกิดฟลัดภายในดังกล่าวยังคงให้ค่าเอาต์พุตออกมามีค่าน้อยมาก แม้ว่ารูปคลื่นกระแสได้ผิดเฟสไป



รูปที่ 5.17 เาท์พุทที่ได้จากส่วนตรวจสอบฟอลต์ภายใน สำหรับกรณีขดลวดหม้อแปลงค้ำ
ทุติยภูมิถัดวงจรลงดินแบบมีค่าอิมพีแดนซ์สูง (High Impedance Turn to Earth fault)



รูปที่ 5.18 เาท์พุทที่ได้จากส่วนตรวจสอบฟอลต์ภายใน สำหรับกรณีที่เกิดฟอลต์ภายนอกแบบลัด
วงจรลงดินเส้นเดียว (External single line to ground fault)



รูปที่ 5.19 เอาท์พุทที่ได้จากส่วนตรวจสอบฟอลต์ภายใน สำหรับกรณีที่เกิดฟอลต์ภายนอกด้านลง ดินเส้นเดียวแบบมีผลของกระแสตรงทำให้เกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็ก(External Single Line to Ground Fault with DC offset caused of CT saturation)

5.2 ส่วนประมวลผลสุดท้าย (Post-processing Block)

ส่วนนี้จะเป็นส่วนที่นำข้อมูลที่ได้จากส่วนประมวลเบื้องต้นทั้งหมดนำมาประมวลผล และตัดสินใจว่าจะปลดวงจรหรือไม่ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอพีชคณิตลอจิก ซึ่งได้นำเอาระบบโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในกระบวนการอินเฟอร์เรนซ์ (Adaptive Neuro fuzzy Inference System) ซึ่งสามารถเรียกย่อๆ ว่าระบบแอนฟิส (ANFIS) มาเป็นตัวประมวลผลขั้นสุดท้าย ซึ่งจะทำให้การตัดสินใจในการส่งปลดวงจรจะขึ้นอยู่กับข้อมูลที่รับจากส่วนประมวลผลเบื้องต้นทั้งหมด และจะไม่ขึ้นอยู่กับข้อมูลใดข้อมูลหนึ่งเท่านั้น ซึ่งอินพุทที่ป้อนให้กับส่วนประมวลผลสุดท้ายมีดังต่อไปนี้

C1(Inrush Check): คือ ค่าระดับสัญญาณที่ส่งออกมาจากส่วนตรวจจับกระแสอินรัช

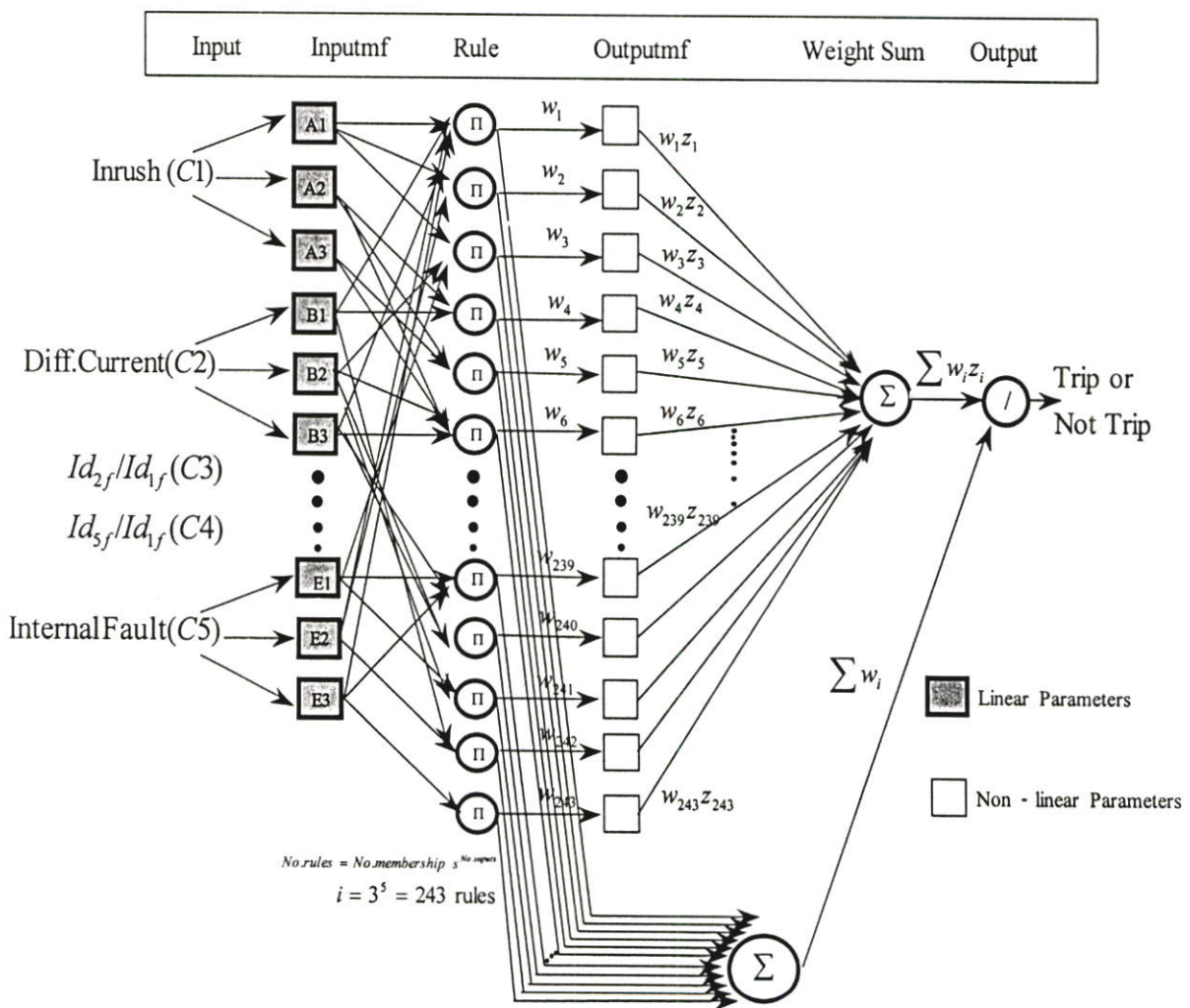
C2(Percentage Differential current check): คืออัตราส่วนของขนาดของผลต่างกระแส (I_d) ซึ่งได้รับการชดเชยกระแสจากส่วนชดเชยกระแสผิดเพี้ยนเนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็ก (Ifraction) ต่อค่าที่ได้ตั้งไว้ I_{d1}/I_n , I_{d2}/I_{b2} และ I_{2tp}

C3(Percentage Harmonic Order $2^{nd}/1^{st}$ check): เป็นค่าระดับสัญญาณอัตราส่วนขนาดของส่วนประกอบฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 กับฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 ของผลต่างของกระแสด้านเข้าและด้านออกของหม้อแปลง

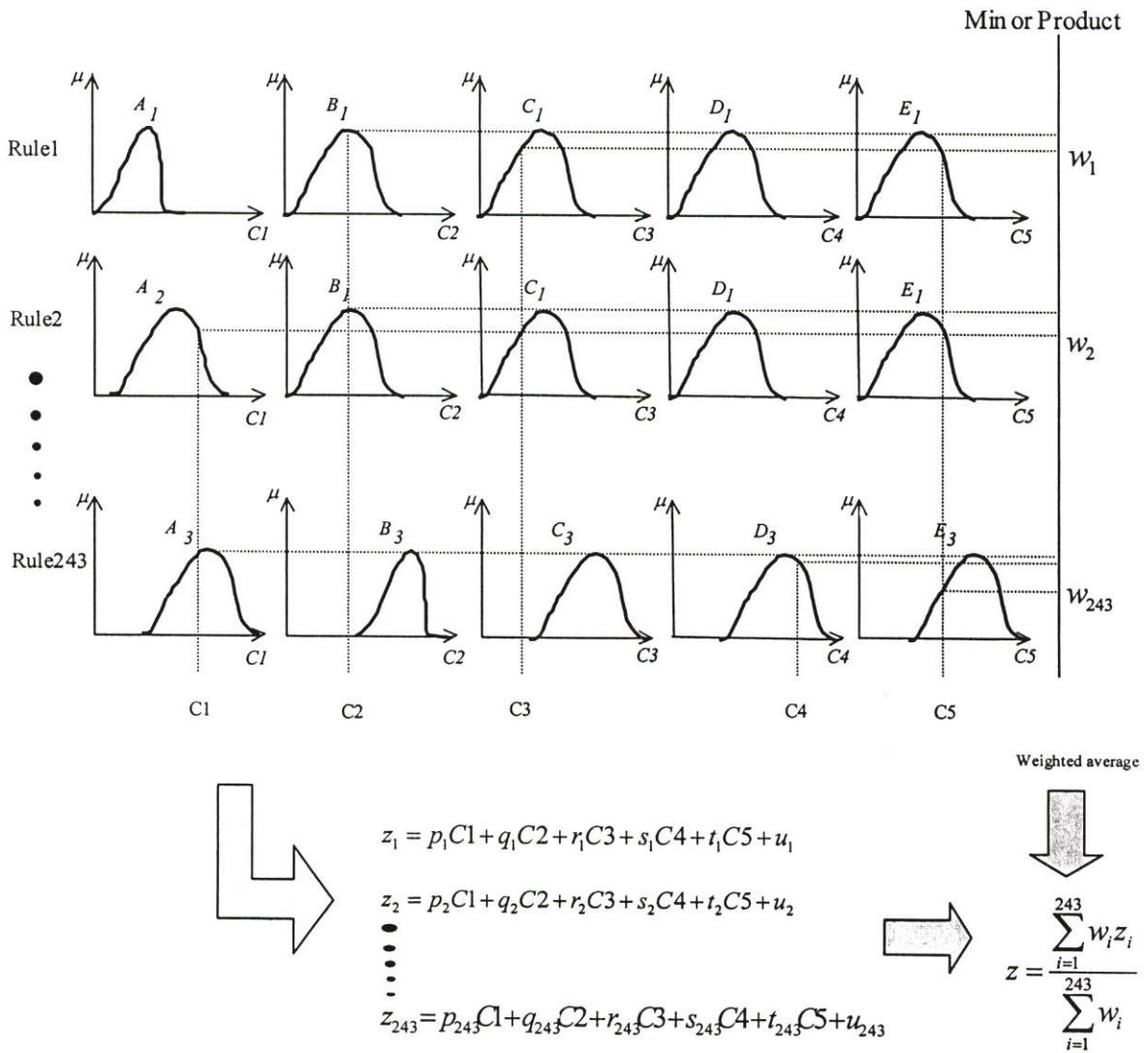
C4(Percentage Harmonic Order $5^{th}/1^{st}$): เป็นค่าระดับสัญญาณอัตราส่วนขนาดของส่วนประกอบฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 กับฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 ของกระแสผลต่างด้านเข้าและด้านออกของหม้อแปลง

C5(Internal Fault Check): เป็นค่าระดับสัญญาณของความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงกระแสเข้า และออกซึ่งได้มาจากการนำ $C5_a$, $C5_b$, $C5_c$ และ $C5_d$ มารวมกันแล้วหาค่าเฉลี่ยออกมา

โดยที่ $C5_a$ เป็นค่าความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงขนาดของฟอลต์เฟส ระหว่างด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ เทียบกับสภาวะก่อนการเกิดฟอลต์ $C5_b$ เป็นค่าความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงของผลรวมของกระแสทั้ง 3 เฟส ระหว่างด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเทียบกับสภาวะก่อนการเกิดฟอลต์ $C5_c$ เป็นค่าความสัมพันธ์กระแสตกค้างระหว่างด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ $C5_d$ เป็นค่าขนาดส่วนประกอบกระแสตรงของผลต่างกระแสระหว่างด้านปฐมภูมิกับทุติยภูมิ ซึ่งจะได้รับการชดเชยจากส่วนชดเชยกระแสผิดเพี้ยนเนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็ก



รูปที่ 5.20 โครงสร้างของส่วนประมวลผลขั้นสุดท้ายที่ใช้ระบบแอนฟิส



รูปที่ 5.21 กระบวนการอินเฟอร์เรนซ์ของระบบแอนฟิส

ในรูปที่ 5.20 ได้แสดงโครงสร้างของระบบแอนฟิสที่ทำหน้าที่เป็นส่วนประมวลผลสุดท้ายในการตัดสินใจสั่งปลดวงจร โดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากส่วนประมวลผลเบื้องต้น ในส่วนหลักการของระบบแอนฟิสได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 โครงสร้างโดยรวมมีการทำงานเหมือนกับฟัซซี่ลอจิกทั่วไป แต่จะต่างกันตรงที่ในส่วนของการอินเฟอร์เรนซ์ ซึ่งแอนฟิสจะประกอบไปด้วยโหนดที่ปรับได้ นั้นหมายความว่า ในโหนดที่ปรับค่าได้นั้นจะมีค่าพารามิเตอร์เป็นตัวกำหนดรูปแบบฟังก์ชันของโหนดนั้นๆ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ที่กำหนด ซึ่งในการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์สามารถทำได้โดยอาศัยการฝึกหัด ซึ่งมีลักษณะการฝึกหัดเหมือนการฝึกหัดระบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบมีผู้สอน เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้เลือกระบบแอนฟิสที่มีโครงสร้างเป็นฟัซซี่ลอจิกชนิดที่ 3 (Type 3) ซึ่งเป็น เซอร์จิโนฟัซซี่ลอจิก (Sugeno Fuzzy Logic) ด้วยเหตุผลที่ว่ามีการคำนวณที่รวดเร็วและให้ผลตอบสนองอย่างต่อเนื่อง ซึ่งกระบวนการอินเฟอร์เรนซ์ดังกล่าวได้

แสดงไว้ในรูปที่ 5.21 ซึ่งได้กำหนดจำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของแต่ละอินพุตอยู่ที่ 3 ได้แก่ สูง (High) กลาง (Medium) และ ต่ำ (Low) โดยที่อินพุตของระบบแอนฟิสก็คือ เอาท์พุตที่ได้จากส่วนประมวลผลเบื้องต้น ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 5 อินพุต คือ C_1, C_2, C_3, C_4 และ C_5 ดังนั้นกระบวนการอินเฟอร์เรนซ์ของส่วนประมวลผลสุดท้ายจะมีกฎที่เป็นรูปแบบดังต่อไปนี้

กฎข้อที่ 1: ถ้า C_1 คือ A_1 และ C_2 คือ B_1 และ C_3 คือ C_1 และ C_4 คือ D_1 และ C_5 คือ E_1 ,

$$\text{ดังนั้น } f_1 = p_1 C_1 + q_1 C_2 + r_1 C_3 + s_1 C_4 + t_1 C_5 + u_1$$

กฎข้อที่ 2: ถ้า C_1 คือ A_2 และ C_2 คือ B_2 และ C_3 คือ C_2 และ C_4 คือ D_2 และ C_5 คือ E_2 ,

$$\text{ดังนั้น } f_2 = p_2 C_1 + q_2 C_2 + r_2 C_3 + s_2 C_4 + t_2 C_5 + u_2$$

โดยที่ $\{p_i, q_i, r_i, s_i, t_i, u_i\}$ คือพารามิเตอร์ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ ซึ่งจะมีจำนวนกฎทั้งหมดอยู่ที่ 243 ข้อ ซึ่งจำนวนกฎทั้งหมดได้มาจากกระบวนการอินเฟอร์เรนซ์ดังกล่าวมีอินพุตทั้งหมด 5 อินพุต และแต่ละอินพุตมีจำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอยู่ 3 ระดับดังนั้นจำนวนกฎทั้งหมดได้มาจาก การนำเอาค่าจำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของแต่ละอินพุตคูณกันซึ่งก็คือ $3 \times 3 \times 3 \times 3 \times 3$ ได้เท่ากับ 243 ข้อ และในส่วนคำเชื่อม “และ” ที่ระบุภายในกฎแต่ละข้อได้เลือกใช้วิธีการทำแบบผลคูณ (Product) และส่วนของกระบวนการอิมพลิเคชัน (Implication) ได้เลือกใช้วิธีการทำแบบเลือกค่าต่ำสุด (Minimum) และในส่วนของการดีฟัซซิฟิเคชันได้ใช้วิธีหาค่าน้ำหนักเฉลี่ย (Weight Average)

โดยโครงสร้างของแอนฟิสจะมีจำนวนชั้นทั้งหมด 5 ชั้นซึ่งในแต่ละชั้นจะมีหน้าที่แตกต่างกันไป ซึ่งสามารถแสดงฟังก์ชันได้ในแต่ละโหนด ภายในแต่ละชั้นได้ดังต่อไปนี้

ในชั้นที่ 1 : ทุกๆ โหนดในชั้นนี้ทำหน้าที่ในการหาค่าความเป็นสมาชิกของอินพุต และจะอยู่ในรูปของโหนดสี่เหลี่ยม ซึ่งหมายถึงเป็นโหนดที่ปรับค่าฟังก์ชันได้ ซึ่งเอาท์พุตของโหนดดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่าการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ซึ่งจะมีฟังก์ชันกำหนดในแต่ละโหนดนั้นๆ

$$O^1 = \mu_{A_j}(C_1), \quad (5.17)$$

โดย C_1 คืออินพุตที่เข้ามายังโหนด และ A_j ก็คือตัวแปรภาษาที่ระบุถึงขนาดในโหนดนั้นๆ เช่น เล็ก ใหญ่ i คือจำนวนฟังก์ชันสมาชิกซึ่งในที่นี้มีค่าตั้งแต่ 1-3 ส่วน O^1 คือเอาท์พุตซึ่งเป็นค่าระดับสมาชิกของ A_j ซึ่งได้เลือก μ_{A_j} เป็นฟังก์ชันแบบเกาส์เซียน (Gaussian Function) ซึ่งจำนวนเอาท์พุตในที่นี้จะต้องมีทั้งหมด 243 เอาท์พุต โดยการหมุนเปลี่ยนการแทนค่าในสมการ (5.17) จากค่า C_1 เป็น C_2 โดย

ที่มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิก μ_{B_j} โดยที่ j เท่ากับ 1 ถึง 3 จนกระทั่งถึง C5 และฟังก์ชันความเป็นสมาชิกคือ μ_{E_j} ดังนั้นระดับความเป็นสมาชิกของแต่ละอินพุตจะเป็นดังนี้

$$\mu_{A_j}(x) = \exp\left[-\left(\frac{C1 - c_j}{a_j}\right)^2\right], \quad (5.18)$$

โดยที่ $\{a_j, c_j\}$ คือกลุ่มพารามิเตอร์ที่สามารถปรับค่าได้ ซึ่งพารามิเตอร์ในขั้นนี้เราจะเรียกว่า ปริมิสพารามิเตอร์ (Premise Parameter)

ในขั้นที่ 2 : ทุกๆ โหนดในขั้นนี้จะอยู่ในรูปของโหนดวงกลม ซึ่งไม่สามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ได้ โดยทุกๆ โหนดในขั้นนี้จะมีชื่อว่า Π โดยจะทำหน้าที่รับอินพุตที่ได้มาจากเอาต์พุตของขั้นที่ 1 มาทำการคูณ แล้วส่งออกไปในรูปของผลคูณ (Product) เช่น

$$w_i = \mu_{A_j}(C1) \times \mu_{B_j}(C2) \times \mu_{C_j}(C3) \times \mu_{E_j}(C4) \times \mu_{F_j}(C5), \quad i = 1, 2, \dots, 243 \quad (5.19)$$

ซึ่งเอาต์พุตของแต่ละโหนดจะแสดงถึงค่าน้ำหนัก (Firing Strength or Weight) ของกฎแต่ละข้อ ซึ่งมีทั้งหมด 243 กฎ โดยการคูณการหมุนเปลี่ยนการแทนค่า $j = 1..3$ ในสมการ 5.19

ในขั้นที่ 3 : ทุกๆ โหนดในขั้นนี้จะอยู่ในรูปของโหนดสี่เหลี่ยม ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ ซึ่งเอาต์พุตของโหนดดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ซึ่งจะมีฟังก์ชันที่กำหนดให้ในแต่ละโหนดนั้นๆ โดยจะมีสมการดังต่อไปนี้

$$O_i^3 = w_i f_i = w_i (p_i C1 + q_i C2 + r_i C3 + s_i C4 + t_i C5 + u_i), \quad i = 1, 2, \dots, 243 \quad (5.20)$$

โดย w_i คือเอาต์พุตที่ได้จากขั้นที่ 2 และ $\{p_i, q_i, r_i, s_i, t_i, u_i\}$ คือค่าพารามิเตอร์ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ ซึ่งพารามิเตอร์ในขั้นนี้เราจะเรียกว่าคอนซีควენტพารามิเตอร์ (Consequent Parameters)

ในขั้นที่ 4 : ทุกๆ โหนดในขั้นนี้จะอยู่ในรูปของโหนดวงกลมจะมีชื่อว่า Σ และในแต่ละโหนดจะทำหน้าที่รวมสัญญาณ หรือเอาต์พุตที่ได้จากขั้นที่แล้วส่งต่อยังขั้นถัดไป

$$O^4 = \sum_{i=1}^{243} w_i f_i, \quad i = 1, 2, \dots \quad (5.21)$$

ในชั้นที่ 5 . โหนดในชั้นนี้จะเป็นเอาต์พุตโหนด ซึ่งมีอยู่เพียงโหนดเดียว ซึ่งจะทำหน้าที่รวมหาค่าเฉลี่ยน้ำหนัก โดยการปรับค่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากชั้นที่ 4 ให้เป็นอัตราส่วนกับค่าผลรวมน้ำหนักทั้งหมด ซึ่งสมการจะเป็นดังต่อไปนี้

$$O^5 = \frac{\sum_{i=1}^{243} w_i f_i}{\sum_{i=1}^{243} w_i} \quad (5.22)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าในกระบวนการอินเฟอร์เรนซ์ของระบบแอนฟิสจะมีพารามิเตอร์ที่สามารถกำหนดได้อยู่ 2 ส่วน ซึ่งส่วนแรกคือ ค่าพารามิเตอร์ความเป็นสมาชิกของอินพุตในชั้นที่ 1 หรือ ฟรึมิสพารามิเตอร์ และอีกส่วนก็คือค่าพารามิเตอร์ความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตในชั้นที่ 3 หรือ คอนซีแคว้นท์พารามิเตอร์

ในส่วนของการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ สามารถทำได้โดยอาศัยการฝึกหัด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการเรียนรู้แบบรวมคือ เป็นการทำงานร่วมกันของวิธีการประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยที่สุด หรือ LSE (Least Square estimation) และวิธีการแพร่ย้อนกลับ (Back Propagation) ด้วยเหตุผลที่ว่าในส่วนของคอนซีแคว้นท์พารามิเตอร์เป็นลักษณะฟังก์ชันแบบเป็นเชิงเส้น ดังนั้นในการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ หากใช้หลักการของการประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยที่สุด จะทำให้มีความเร็วในการคำนวณกว่าการใช้วิธีแพร่ย้อนกลับ ซึ่งหลักการดังกล่าวสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังสมการที่ (5.23) – (5.25) โดยในการแก้ปัญหาในลักษณะเชิงเส้นจะมีสมการต่อไปนี้

$$AX = B \quad (5.23)$$

โดยที่ X คือเวกเตอร์ของพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบค่า ส่วน A ก็คือเมตริกซ์ของฟังก์ชันของสมการทั้งหมด ส่วน B ก็คือคำตอบของสมการที่ทราบค่า ในการหาค่า X จะใช้วิธีของสมการแบบลำดับแทน (Sequential Formula) โดยที่เรากำหนดให้เวกเตอร์ในแถวที่ i -th ของเมตริกซ์ A เป็น a_i^T และ เวกเตอร์ในแถวที่ i -th ของเมตริกซ์ B เป็น b_i^T ดังนั้นเราสามารถคำนวณแบบซ้ำๆ เพื่อหาค่า X ได้จาก

$$X_{i+1} = X_i + S_{i+1} a_{i+1} (b_{i+1}^T - a_{i+1}^T X_i) \quad (5.24)$$

$$S_{i+1} = \left[S_i - \frac{S_i a_{i+1} a_i^T + S_i}{1 + a_{i+1}^T S_i a_{i+1}} \right] \quad i = 0, 1, \dots, P-1 \quad (5.25)$$

โดยที่ S_j คือ โควาเรียนซ์เมตริกซ์ (Covariance Matrix) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะกระทำแบบไปข้างหน้า (Forward Pass)

แต่ในส่วนของพรีมิสพารามิเตอร์จะใช้วิธีการแพร่ย้อนกลับโดยการคำนวณหาค่าความผิดพลาดกำลังสอง จากนั้นใช้วิธีเกรเดียนต์เดสเซนต์ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ใหม่ ซึ่งหากกำหนดให้ค่าพรีมิสพารามิเตอร์มีค่าเป็น α สมการที่ใช้ในการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์จะเป็นดังต่อไปนี้

$$E = \sum (T - O^s)^2, \quad (5.26)$$

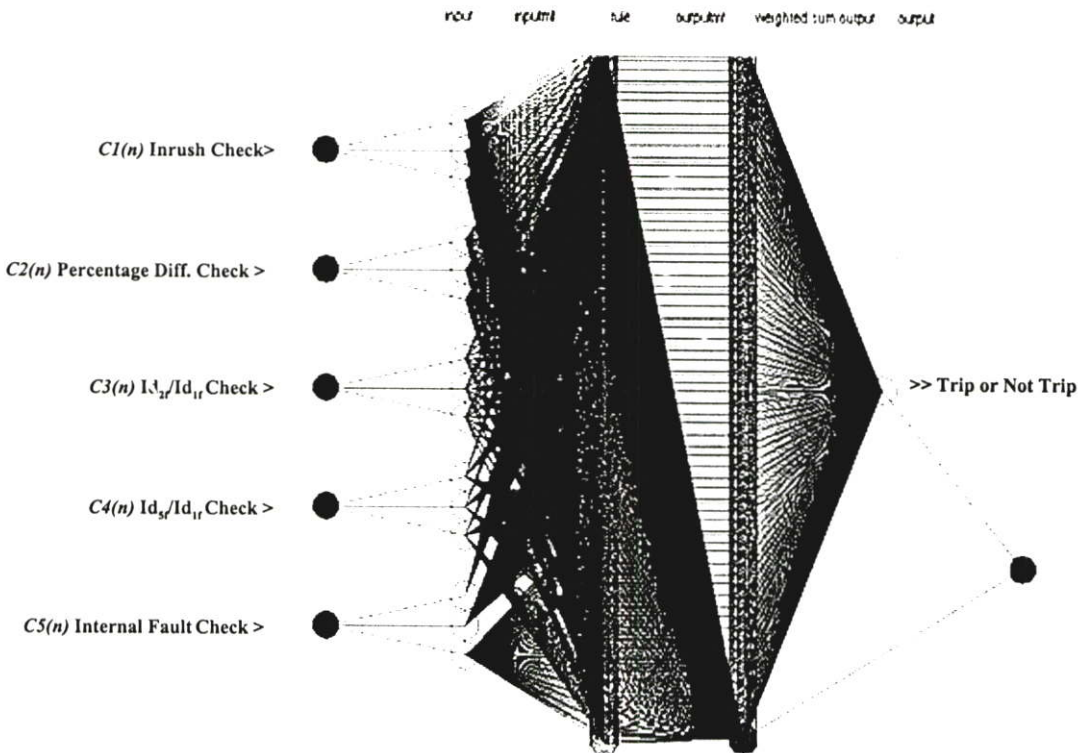
$$\Delta\alpha = -\eta \frac{\partial E}{\partial \alpha}, \quad (5.27)$$

ซึ่ง η คือ ค่าอัตราการเรียนรู้ (Learning Rate) สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\eta = \frac{k}{\sqrt{\sum_{\alpha} \left(\frac{\partial E}{\partial \alpha} \right)^2}}, \quad (5.28)$$

ค่า k คือ ค่าขนาดของเสต็ป (Step Size) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดขนาดของการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ α ในพารามิเตอร์สเปซ ซึ่งหมายความว่าเราสามารถปรับเปลี่ยนค่า k เพื่อเร่งหรือชะลอความเร็วในการเข้าสู่จุดต่ำสุดได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ค่า k เริ่มต้นที่ 0.01 ซึ่งในการเปลี่ยนแปลงขนาดของเสต็ป ได้ใช้วิธีกำหนดค่าอัตราการเพิ่ม (Increasing Rate) ไว้ที่ 1.1 และค่าอัตราการลด (Decreasing Rate) ไว้ที่ 0.9 ซึ่งหากการเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดต่ำลงเป็นจำนวน 4 ครั้งติดต่อกัน ค่า k จะถูกคูณด้วยค่าอัตราการเพิ่ม แต่หากการเคลื่อนที่ของค่าความผิดพลาดสูงขึ้นเป็นจำนวน 2 ครั้งติดต่อกัน ค่า k จะถูกคูณด้วยค่าอัตราการลด

โดยโหมดในการเรียนรู้นั้นเป็นแบบออฟไลน์ (Off-line Learning Mode) ซึ่งจะทำให้การปรับปรุงค่าพารามิเตอร์หลังจากข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการเรียนรู้ได้ส่งผ่านเข้าไปยังโครงข่ายแล้ว เช่นการปรับปรุงหลังจากการเรียนรู้ในแต่ละรอบ ในรูปที่ 5.22 แสดงส่วนประมวลผลขั้นสุดท้ายที่ได้จากโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 5.22 แสดงถึงส่วนประมวลผลขั้นสุดท้ายที่ใช้ระบบแอนฟิส โดยใช้โปรแกรม MATAB

ในรูปที่ 5.23 ได้แสดงค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุตทั้ง 5 อินพุตหลังจากที่ผ่านการฝึกหัดมาแล้วโดยจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการสอนได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1 ซึ่งเป็นการจำลองสถานะต่างๆ กว่า 300 กรณี โดยการใช้โปรแกรม EMTP-ATP ซึ่งมีทั้งกรณีปกติทั่วไป และกรณีที่มีโอกาสที่รีเลย์ที่ใช้หลักการเดิมสามารถส่งปลดวงจรผิดพลาดได้

ในรูปที่ 5.24(ก) แสดงพื้นผิวของเอาต์พุตของส่วนประมวลผลสุดท้าย ต่ออินพุตตลอดย่านของ $C1$ (Inrush Check) และ $C2$ (Percentage Differential Current) เมื่ออินพุตอื่นๆ มีแนวโน้มไม่น่าจะเกิดฟอลต์ภายใน โดยที่อินพุต $C3$ (Percentage I_{d2}/I_{d1}) มีค่า 0.5 ส่วนอินพุต $C4$ (Percentage I_{ds}/I_{d1}) มีค่า 0.5 และ อินพุต $C5$ (Internal Fault Check) มีค่า 0.1 ซึ่งหากเขียนเป็นเมตริกซ์อินพุตจะได้ $[C1 \ C2 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.1]$ โดยที่ $C1$ และ $C2$ มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1

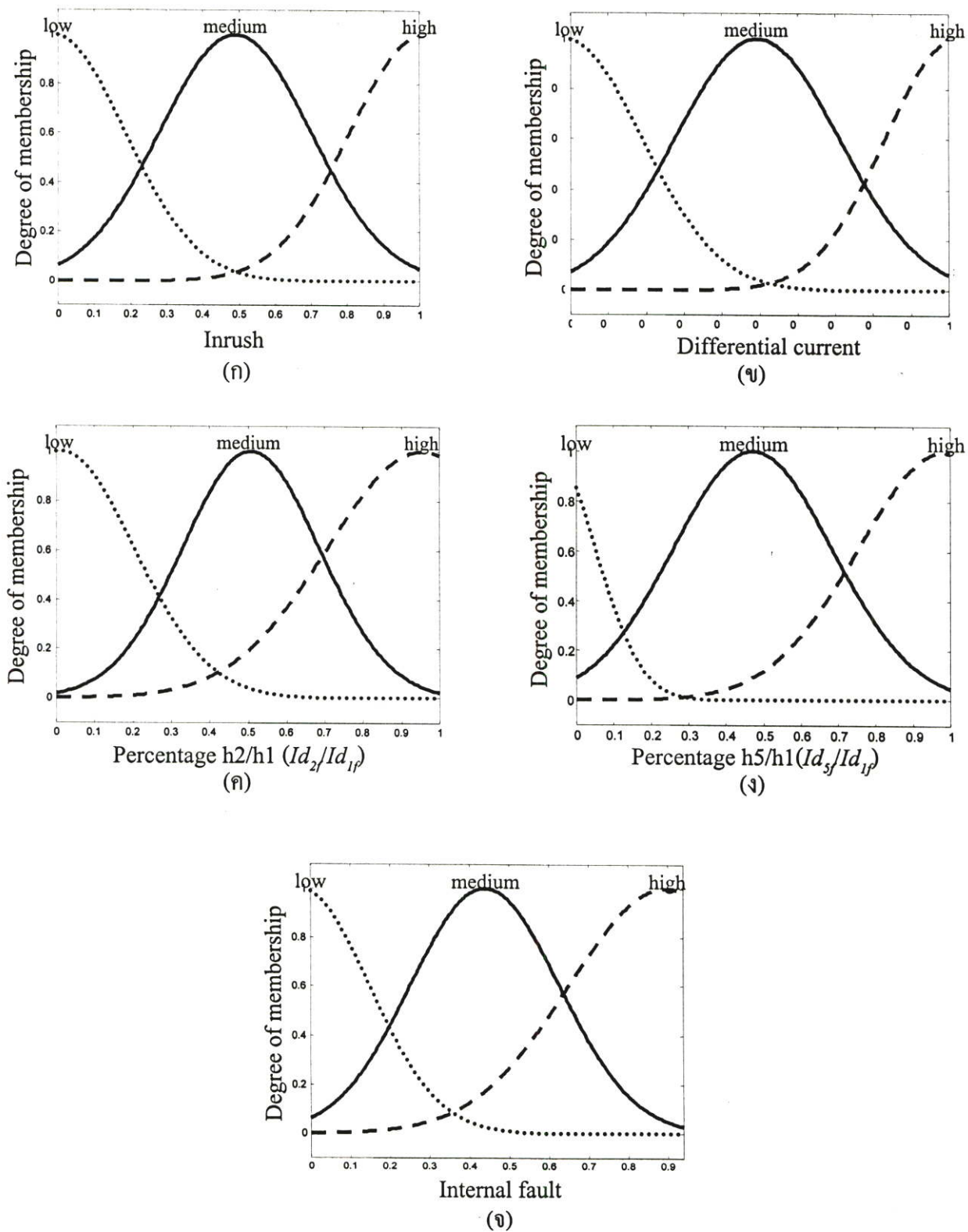
รูปที่ 5.24(ข) แสดงพื้นผิวของเอาต์พุตของส่วนประมวลผลสุดท้าย ต่ออินพุตตลอดย่านของ $C1$ (Inrush Check) และ $C2$ (Percentage Differential Current) เมื่ออินพุตอื่นๆ มีแนวโน้มว่าจะเกิดฟอลต์ภายใน โดยที่อินพุต $C3$ (Percentage I_{d2}/I_{d1}) มีค่า 0.1 ส่วนอินพุต $C4$ (Percentage I_{ds}/I_{d1}) มีค่า 0.2 และ อินพุต $C5$ (Internal Fault Check) มีค่า 0.4 ซึ่งหากเขียนเป็นเมตริกซ์อินพุตจะได้ $[C1 \ C2 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.4]$ โดยที่ $C1$ และ $C2$ มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1

รูปที่ 5.24(ค) แสดงพื้นผิวของเอาต์พุตของส่วนประมวลผลสุดท้าย ต่ออินพุตตลอดย่านของ $C1$ (Inrush Check) และ $C3$ (Percentage $I_{d_2}/I_{d_{1f}}$) เมื่ออินพุตอื่นๆ มีแนวโน้มไม่น่าจะเกิดฟอลต์ภายใน โดยที่อินพุต $C2$ (Percentage Differential Current) มีค่า 0.1 ส่วนอินพุต $C4$ (Percentage $I_{d_3}/I_{d_{1f}}$) มีค่า 0.2 และ อินพุต $C5$ (Internal Fault Check) มีค่า 0.4 ซึ่งหากเขียนเป็นเมตริกซ์อินพุตจะได้ $[C1\ 0.1\ C3\ 0.2\ 0.4]$ โดยที่ $C1$ และ $C3$ มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1

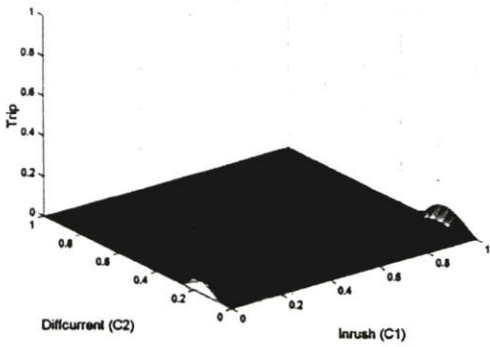
รูปที่ 5.24(ง) แสดงพื้นผิวของเอาต์พุตของส่วนประมวลผลสุดท้าย ต่ออินพุตตลอดย่านของ $C1$ (Inrush Check) และ $C3$ (Percentage $I_{d_2}/I_{d_{1f}}$) เมื่ออินพุตอื่นๆ มีแนวโน้มไม่น่าจะเกิดฟอลต์ภายใน โดยที่อินพุต $C2$ (Percentage Differential Current) มีค่า 0.8 ส่วนอินพุต $C4$ (Percentage $I_{d_3}/I_{d_{1f}}$) มีค่า 0.1 และ อินพุต $C5$ (Internal Fault Check) มีค่า 0.6 ซึ่งหากเขียนเป็นเมตริกซ์อินพุตจะได้ $[C1\ 0.8\ C3\ 0.1\ 0.6]$ โดยที่ $C1$ และ $C3$ มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1

รูปที่ 5.24(จ) แสดงพื้นผิวของเอาต์พุตของส่วนประมวลผลสุดท้าย ต่ออินพุตตลอดย่านของ $C2$ (Percentage Differential Current) และ $C5$ (Internal Fault Check) เมื่ออินพุตอื่นๆ มีแนวโน้มไม่น่าจะเกิดฟอลต์ภายใน โดยที่อินพุต $C1$ (Inrush Check) มีค่า 1 ส่วนอินพุต $C3$ (Percentage $I_{d_2}/I_{d_{1f}}$) มีค่า 0.5 และ อินพุต $C4$ (Percentage $I_{d_3}/I_{d_{1f}}$) มีค่า 0.05 ซึ่งหากเขียนเป็นเมตริกซ์อินพุตจะได้ $[1\ C2\ 0.5\ 0.05\ C5]$ โดยที่ $C2$ และ $C5$ มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1

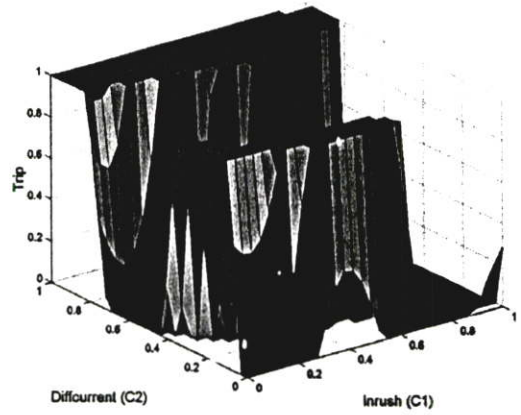
รูปที่ 5.24(ข) แสดงพื้นผิวของเอาต์พุตของส่วนประมวลผลสุดท้าย ต่ออินพุตตลอดย่านของ $C2$ (Percentage Differential Current) และ $C5$ (Internal Fault Check) เมื่ออินพุตอื่นๆ มีแนวโน้มไม่น่าจะเกิดฟอลต์ภายใน โดยที่อินพุต $C1$ (Inrush Check) มีค่า 0 ส่วนอินพุต $C3$ (Percentage $I_{d_2}/I_{d_{1f}}$) มีค่า 0.1 และ อินพุต $C4$ (Percentage $I_{d_3}/I_{d_{1f}}$) มีค่า 0.1 ซึ่งหากเขียนเป็นเมตริกซ์อินพุตจะได้ $[0\ C2\ 0.1\ 0.1\ C5]$ โดยที่ $C2$ และ $C5$ มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1



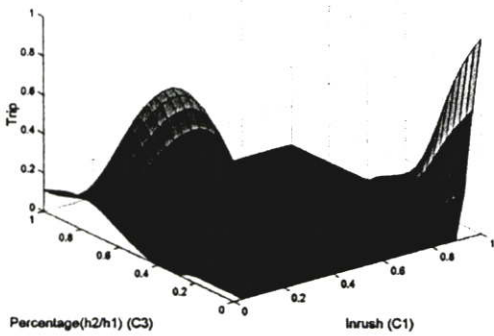
รูปที่ 5.23 แสดงค่าความเป็นสมาชิกของอินพุตทั้ง 5 อินพุต โดยใช้ฟังก์ชัน Gaussain (ก) Inrush check C1 (ข) Percentage Diff. Current check C2 (ค) Percentage h_2/h_1 check C3 (ง) Percentage h_5/h_1 check C4 และ (จ) Internal fault check C5



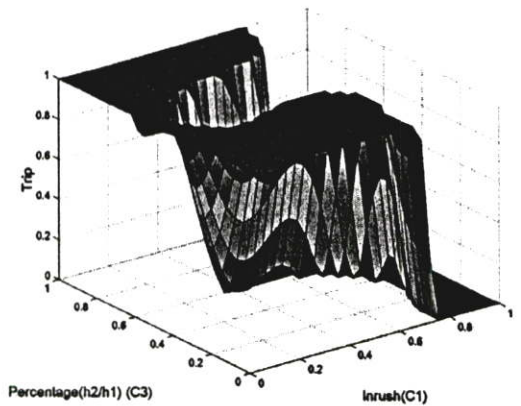
(ก)



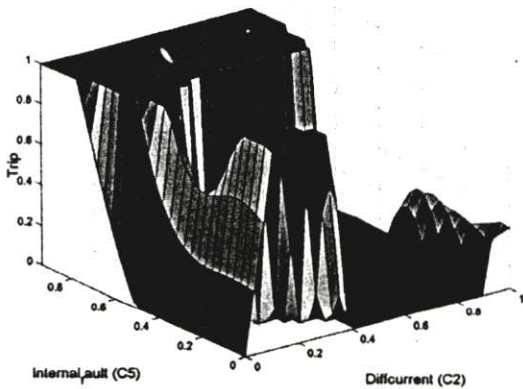
(ข)



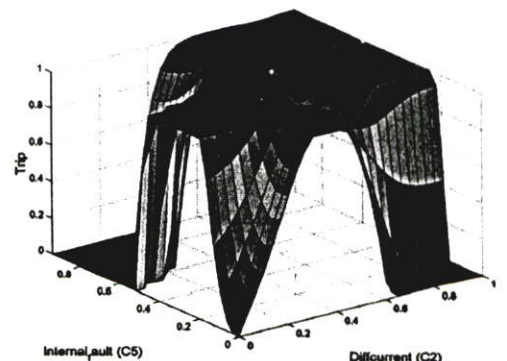
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 5.24 พื้นผิวของเอ้าท์พุตต่ออินพุต [C1 C2 C3 C4 C5] (ก) [C1 C2 0.5 0.5 0.1]
 (ข) [C1 C2 0.1 0.2 0.4] (ค) [C1 0.1 C3 0.2 0.4] (ง) [C1 0.8 C3 0.1 0.6]
 (จ) [1 C2 0.5 0.05 C5] (ฉ) [0 C2 0.1 0.1 C5]

ตารางที่ 5.1 ฟอลต์กรณีต่างๆ ที่ใช้ในการฝึกหัดระบบแอนฟิส

กรณี	รายละเอียด	จำนวน
1	ฟอลต์ภายในขดลวดด้านปฐมภูมิลงดินแบบมีผลของกระแสตรงทำให้เกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็ก (Turn to earth Fault with DC offset caused of CT saturation)	50
2	ฟอลต์ภายในขดลวดด้านปฐมภูมิลงดินแบบมีค่าอิมพีแดนซ์สูง (High impedance Turn to Earth fault on primary side)	30
3	ฟอลต์ภายในขดลวดด้านทุติยภูมิลงดินแบบมีค่าอิมพีแดนซ์สูง (High impedance Turn to Earth fault on secondary side)	30
4	ฟอลต์ภายนอกด้านลงดินเส้นเดียวแบบมีผลของกระแสตรงทำให้เกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็ก (External single line to ground Fault with DC offset caused of CT saturation)	88
5	ฟอลต์ภายนอกด้านลงดินเส้นเดียวแบบไม่มีผลของกระแสตรง (External single line to ground Fault without DC offset)	25
6	ผลของกระแสอินรัชขณะเริ่มจ่ายไฟแบบไม่มีสนามแม่เหล็กตกค้าง (Energizing Inrush current)	12
7	ผลของกระแสอินรัชขณะเริ่มจ่ายไฟแบบมีสนามแม่เหล็กตกค้าง (Energizing Inrush current with residual flux)	38
8	ฟอลต์ภายในขดลวดด้านปฐมภูมิลงดินขณะเริ่มจ่ายไฟทำให้มีผลของกระแสอินรัช (Turn to earth Fault on primary side during energization)	44
9	ฟอลต์ภายในขดลวดด้านปฐมภูมิลงดินขณะเริ่มจ่ายไฟทำให้มีผลของกระแสอินรัช (Turn to earth Fault on primary side during energization)	25

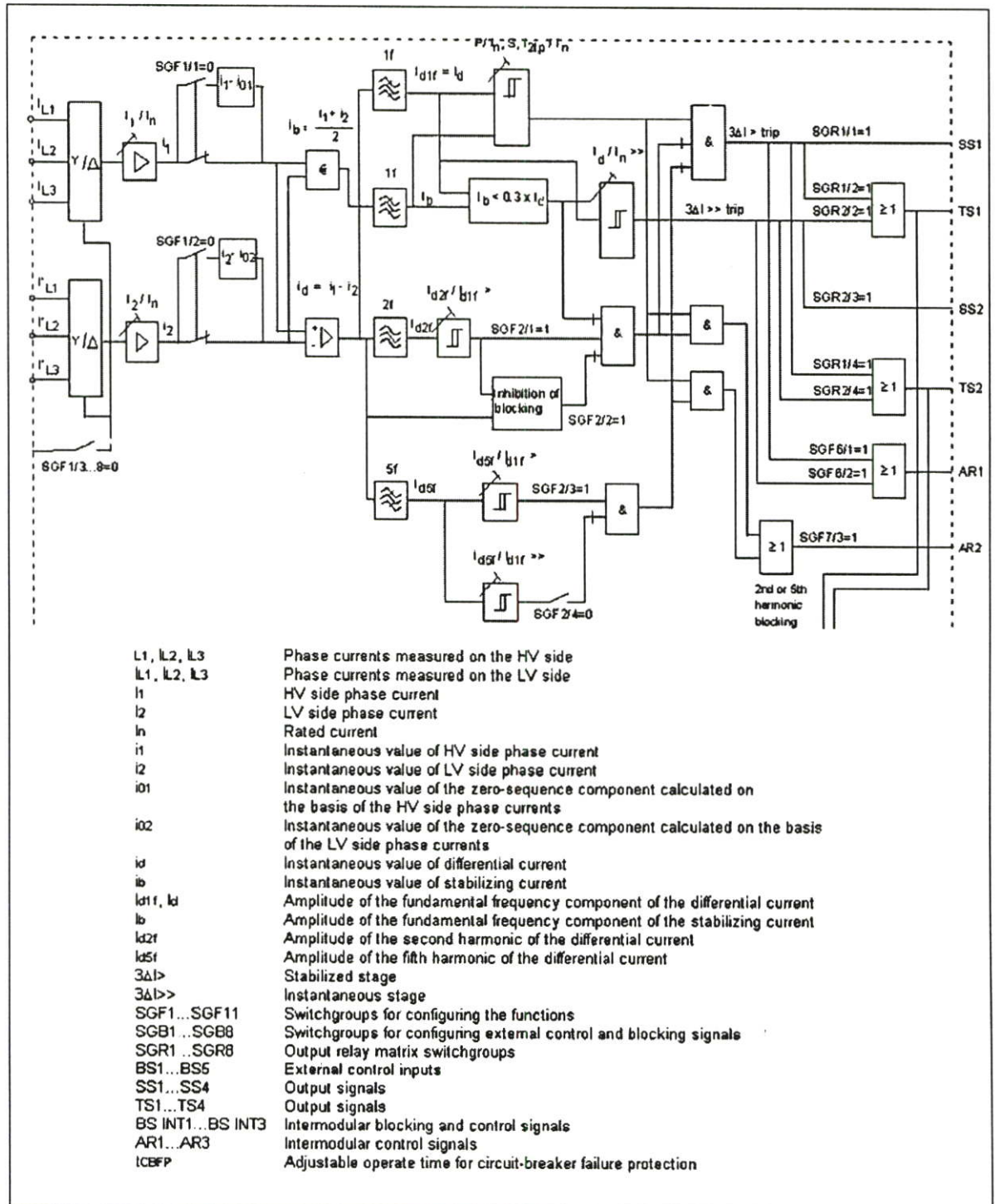
บทที่ 6

ผลการทดลอง

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการทดสอบการทำงานของหลักการป้องกันหม้อแปลงที่นำเสนอเปรียบเทียบกับหลักการเดิมที่รีเลย์ในปัจจุบันใช้กันอยู่ [1-3] ซึ่งก็คือหลักการ Percentage Differential Current ควบคู่กับการป้องกันการส่งปลดวงจรอันเนื่องมาจากการเสอินรัชโดยการใช้หลักการ Harmonic Restraint

6.1 วิธีการเปรียบเทียบผลการทำงานของหลักการที่เสนอกับหลักการ Percentage Differential Current และ Harmonic Restraint

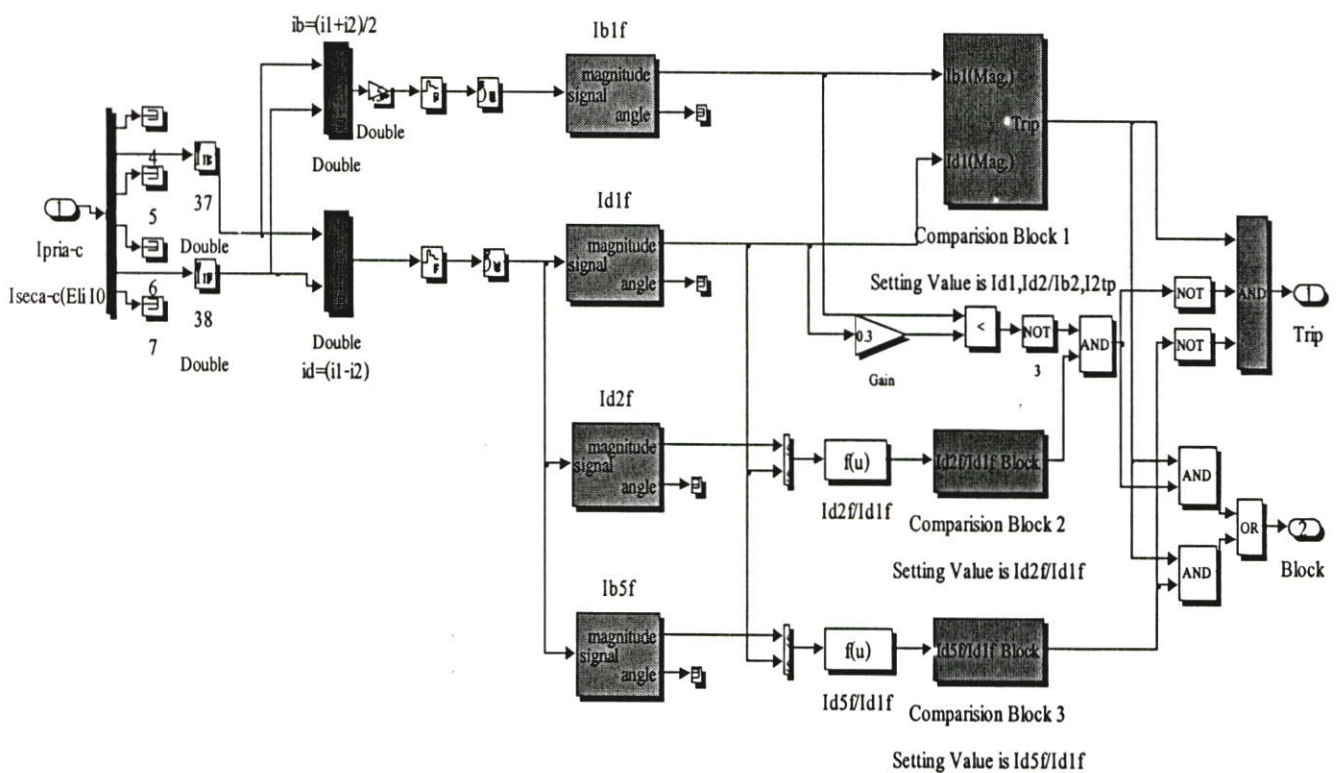
ในการเปรียบเทียบหลักการที่นำเสนอกับหลักการ Percentage Differential Current ร่วมกับหลักการ Harmonic Restraint สามารถทำได้โดยการใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK โดยการเขียนโครงสร้างของรีเลย์ภายในของรีเลย์ที่มีโดยทั่วไป ในงานวิจัยนี้ได้เขียนโครงสร้างภายในที่เกี่ยวข้องกับหลักการ Percentage Differential Current ร่วมกับหลักการ Harmonic Restraint ของรีเลย์รุ่นที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.1 โดยเริ่มจากการรับกระแสด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิจากหม้อแปลงกระแสเข้ามาแล้วทำการปรับเปลี่ยนเวกเตอร์รูปเพื่อให้มีขนาด (Amplitude) และ มุมที่ตรงกัน (Phase Shift) จากนั้นก็จะเป็นส่วนการปรับชดเชยอัตราส่วนของหม้อแปลงทั้งสองด้านที่ไม่เท่ากัน (Ratio Mismatch Compensation) ต่อจากนั้นก็เป็นส่วนการกำจัดกระแสลำดับศูนย์ (Zero Sequence Current Elimination) จากนั้นจะเป็นการกรอง (Filter) เอากระแสที่มีส่วนประกอบฮาร์มอนิกที่ต้องการเพื่อนำไปประมวลผล กระแสที่ได้ดังกล่าวจะถูกส่งไปทำการหาค่ากระแสไบอัส (I_b) และกระแสผลต่าง (I_d) ซึ่งเป็นการหักลบกันโดยใช้ค่าของกระแส ณ เวลานั้น (Instantaneous Value) จากนั้นค่าดังกล่าวก็จะถูกส่งไปยังส่วนเปรียบเทียบกับค่าเซตคั้งที่ได้คั้งไว้ ซึ่งได้แก่ค่า P/I_n หรือ I_d/I_n , S หรือ I_d/I_b , และ ค่า I_{2tp}/I_n ซึ่งจะมีคุณลักษณะดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 ซึ่งโครงสร้างของรีเลย์ดังกล่าวจะมีส่วนประมวลผลอีกส่วนที่เป็นหลักการ Harmonic Restraint ซึ่งเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนระหว่างค่ากระแสผลต่างที่ฮาร์มอนิก อันดับ 2 ต่อ อันดับ 1 หรือค่า I_{d2}/I_{d1r} กับค่าเซตคั้งที่ได้คั้งไว้ ซึ่งใช้สำหรับป้องกันการส่งปลดวงจรในกรณีที่กระแสผลต่างเกิดจากผลของกระแสอินรัช รีเลย์ดังกล่าวจะส่งปลดวงจรในกรณีที่ค่าอัตราส่วนของผลต่างกระแสด้านปฐมภูมิกับด้านทุติยภูมิ ต่อผลรวมกระแสทั้งสองด้านมีค่าเกินค่าเซตคั้ง และไม่มีการสั่งยับยั้งการปลดวงจรจากส่วนเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนระหว่างค่ากระแสผลต่างที่ฮาร์มอนิก อันดับ 2 ต่อ อันดับ 1



รูปที่ 6.1 โครงสร้างภายในของรีเลย์ที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

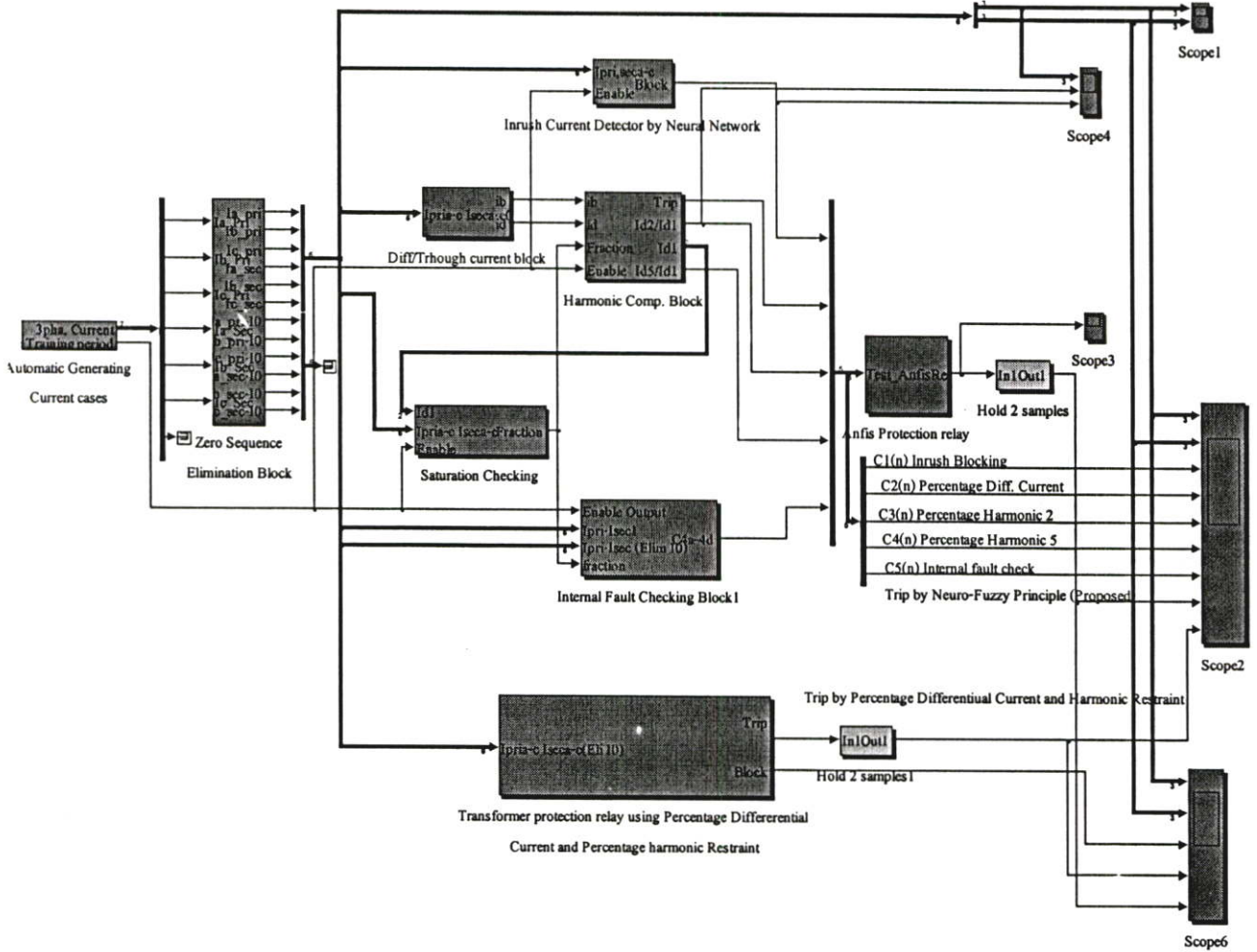
ที่มา : คู่มือรีเลย์รุ่น SPAD346C

ในรูปที่ 6.2 ได้แสดงโครงสร้างของรีเลย์ในปัจจุบันที่ใช้หลักการ Percentage Differential Current และหลักการวิเคราะห์อัตราส่วนของส่วนประกอบฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 ต่อ ฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 หรือหลักการ Harmonic Restraint ที่สร้างขึ้นโดยใช้ MATLAB/SIMULINK โดยมีหลักการทำงานเหมือนรีเลย์จริงในรูปที่ 6.1 ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวได้ทำเปรียบเทียบผลการทำงานทั้งในเรื่องของเวลา (Operating Time Test) และ ในส่วนของความแม่นยำในการทำงาน (Pick Up Test) กับรีเลย์จริง โดยอาศัยการทดสอบรีเลย์จริงโดยใช้เครื่องทดสอบ รวมถึงได้ทดสอบการทำงานของรีเลย์จริงต่อสถานะที่ผิดปกติต่างๆ เช่น รูปคลื่นกระแสที่วัดได้ค่านปริมณูมที่มีการผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากการอิ่มตัวในแกนเหล็ก ดังที่ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข.



รูปที่ 6.2 ได้แสดงโครงสร้างของรีเลย์ที่ใช้หลักการ Percentage Differential Current และ Harmonic Restraint ที่จำลองขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

รูปที่ 6.3 ได้แสดงหลักการเปรียบเทียบการทำงานของหลักการ 2 หลักการที่สร้างขึ้นโดยใช้ MATLAB/SIMULINK โดยใช้ผลการส่งปลดควจจรของหลักการที่ได้นำเสนอสำหรับการป้องกันหม้อแปลงโดยการ ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับระบบพีซีซีลอจิก เทียบกับแบบจำลองที่ใช้หลักการหลักการ Percentage Differential Current ร่วมกับหลักการ Harmonic Restraint

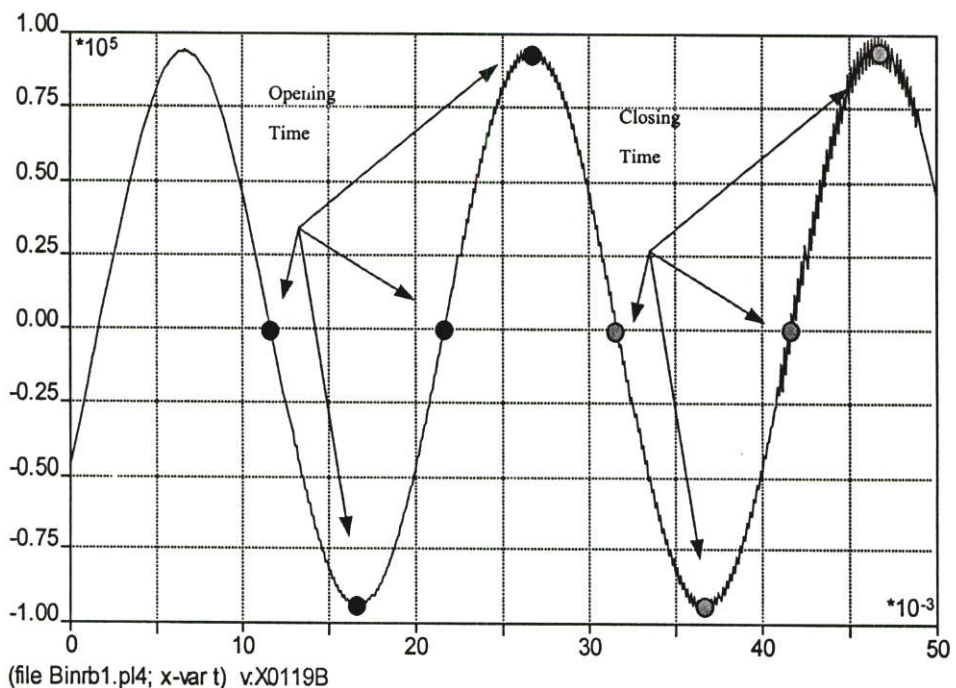


รูปที่ 6.3 แบบจำลองเปรียบเทียบผลการทำงานของหลักการ 2 หลักการ ระหว่างหลักการที่ได้นำเสนอ เทียบกับหลักการเดิม(Percentage Differential Current และ Harmonic Restraint)

โดยในการเปรียบเทียบนั้น เนื่องจากทั้งสองหลักการยังคงมีการหาค่าอัตราส่วนของผลต่างกระแส ต่อ ผลรวมกระแส (Percentage Differential Current) ซึ่งจำเป็นต้องมีการหาค่าความผิดพลาดที่สามารถเกิดได้จากความแตกต่างของคลาสหรือ ความแม่นยำของหม้อแปลงกระแส ดังนั้นจะต้องมีการตั้งค่าเซตตั้งในทั้งสองหลักการ โดยการกำหนดให้มีค่าเซตตั้งเท่ากันคือ P/In หรือ Id_2/In มีค่าเท่ากับ 10%, ค่า S หรือ Id_2/Ib_2 มีค่าเท่ากับ 10% และค่า $I2tp/In$ มีค่าเท่ากับ 2 ในส่วนของการตั้งค่าเซตตั้งในส่วนของการหักการช่วงการสั่งปลดวงจร Harmonic Restraint ซึ่งเป็นหลักการเดิม กำหนดให้มีค่า Id_2/Id_{1f} อยู่ที่ 20% และ ค่า Id_3/Id_{1f} อยู่ที่ 30%

โดยรายละเอียดของการหาแบบจำลองทั้งในส่วนของหม้อแปลงที่จะทำการป้องกัน และหม้อแปลงกระแส ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 ซึ่งในการสร้างแบบจำลองสำหรับสถานีไฟฟ้าดังกล่าวสามารถสร้างได้โดยการใช้โปรแกรม ATP Draw ร่วมกับโปรแกรม EMTP-ATP ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 6.5 จากในรูป ค่า Z1 เป็นค่า Driving Point หรือค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ในส่วนหม้อแปลงกระแสด้านปฐมภูมิ (CT1A, CT1B, CT1C) มีอัตราส่วนการแปลงอยู่ที่ 400/5 A และมีคลาสมความแม่นยำอยู่ที่ C100 และในส่วนของหม้อแปลงกระแสด้านทุติยภูมิ (CT2A, CT2B, CT2C) มีอัตราส่วนการแปลงอยู่ที่ 1300/5 A มีคลาสมความแม่นยำอยู่ที่ C100 สำหรับหม้อแปลงที่ทำการป้องกัน (T1) ได้ใช้โปรแกรม BCTRAN ร่วมกับ SATURA และ HYSDAT ทำการจำลองให้มีผลตอบสนองทั้งในแบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นตามคุณสมบัติของแกนเหล็กโดยอาศัยข้อมูลจากผลการทดสอบหม้อแปลงจากโรงงานผู้ผลิต

ในส่วนของสวิตช์ SW1 และ SW2 ทำหน้าที่เป็นตัวต่อวงจรโดยการกำหนดเวลาซึ่ง SW1 จะถูกใช้ในกรณีของการทดสอบสภาวะกระแสอินรัชเพื่อเป็นตัวกำหนดสนามแม่เหล็กตกค้าง (Residual Flux) ส่วน SW2 เป็นตัวกำหนดมุมในการต่อวงจร (Energizing Angle) และ รีแอกเตอร์ L1 L2 และ L3 ได้ทำหน้าที่แสดงผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของแกนเหล็กหม้อแปลง แบบมีผลของ ฮิสเตอร์รีซิส ในส่วนของสวิตช์ SW4 และความต้านทาน R1 จะถูกใช้ในกรณีของการทดสอบการเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลงทั้งแบบขดลวดลัดวงจรลงดิน และการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด ส่วนของสวิตช์ SW5 และความต้านทาน R2 จะถูกใช้ในกรณีของการทดสอบการเกิดฟอลต์ภายนอกหม้อแปลง



รูปที่ 6.6 แสดงตำแหน่งการเปิดวงจรซึ่งมีผลต่อฟลักซ์ที่ค้าง (Residual flux) และตำแหน่งการต่อวงจรซึ่งหมายถึงมุมในการจ่ายไฟ (Energizing Angle)

โดยในการทดสอบการทำงานของหลักการที่นำเสนอได้นั้นได้แบ่งสถานะสำหรับการทดสอบ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

สถานะกระแสอินรัช (Inrush Current)

- Inrush Current with/without residual flux

สถานะการเกิดฟอลต์ภายนอก (External Fault)

- Single Line to Ground fault
- Line to Line fault
- Three phases fault
- Single Line to Ground fault with CT Saturation
- High Impedance Single Line to Ground fault

สถานะของการเกิดฟอลต์ภายใน (Internal Fault)

- Turn to Earth fault
- Turn to Earth with CT saturation
- High Impedance Turn to Earth fault
- Turn to Turn fault
- High Impedance Turn to Turn fault
- Internal Turn to Earth fault during energization
- High Impedance Turn to Earth fault during energization
- Internal Turn to Turn fault during energization
- High Impedance Turn to Turn fault during energization

6.2.1 ผลการทำงานของหลักการที่นำเสนอต่อสถานะกระแสอินรัช (Inrush Current Cases)

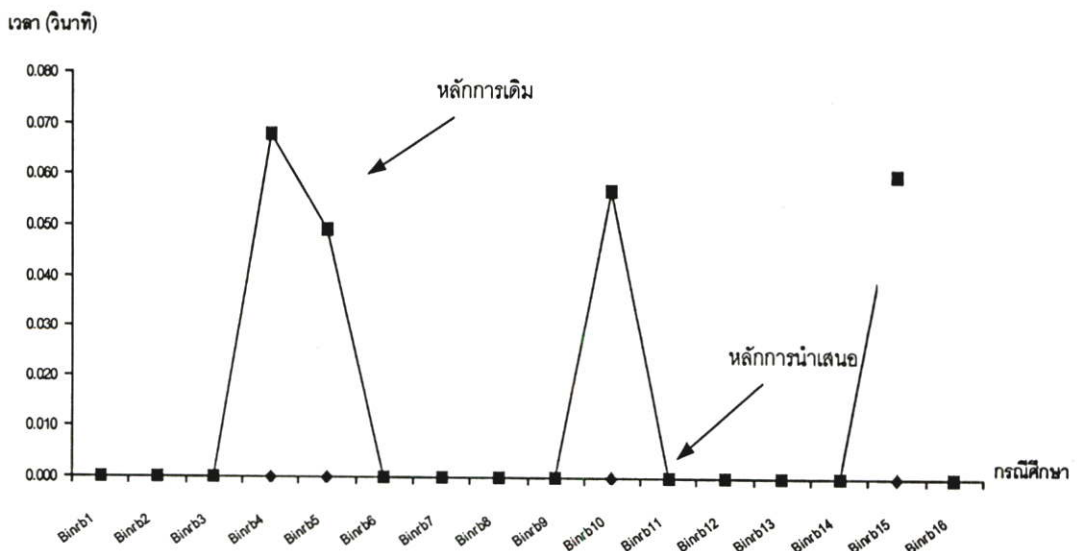
6.2.1.1 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสถานะกระแสอินรัชขณะเริ่มจ่ายไฟทั้งแบบมี และไม่มีสนามแม่เหล็ก ตกค้าง (Energizing Inrush Current with/without Residual Flux)

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดกระแสอินรัช ได้แก่ ค่าความต้านทานของแหล่งจ่าย (Source Resistance) ค่าสนามแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็ก (Residual flux in core) ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งของรูปคลื่นขณะปลดวงจร (Interrupting angle) ค่ามุมของรูปคลื่นไซน์ขณะต่อวงจร (Energizing angle) ชนิดการต่อขอลวดของหม้อแปลง (Transformer winding connection)

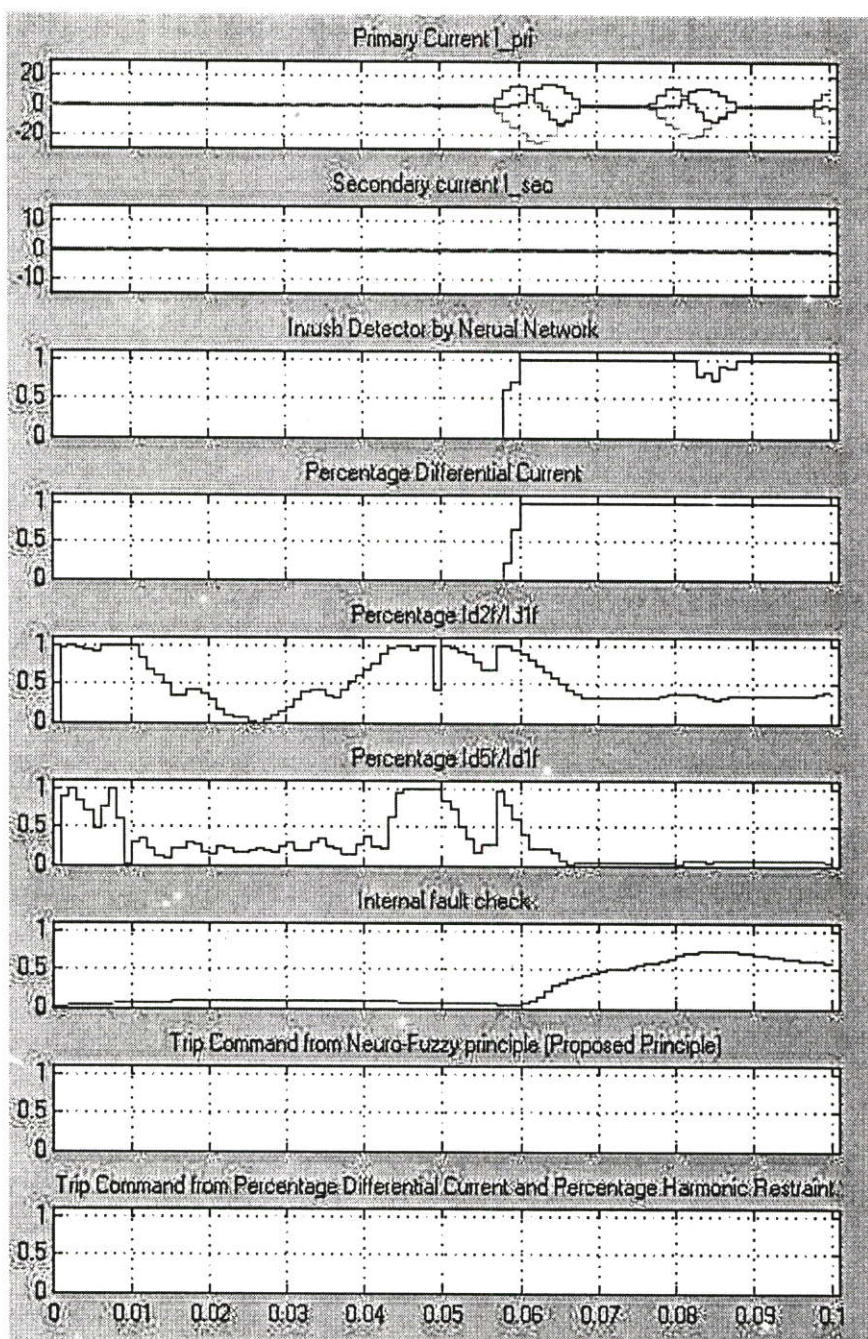
ดังนั้นในการทดสอบการทำงานของหลักการที่ได้นำเสนอต่อสถานะการเกิดกระแสอินรัชสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนตำแหน่งของรูปคลื่นทั้งในขณะปลดวงจร และในขณะต่อวงจร ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 6.6 ของแหล่งจ่าย ซึ่งได้แสดงผลการทำงานไว้ในตารางที่ 6.1 และรูปที่ 6.7

ตารางที่ 6.1 ผลการทำงานของหลักการที่ได้นำเสนอต่อสภาวะการเกิดกระแสอินรัช

ชื่อกรณี	ตำแหน่งของรูปคลื่นขณะปลดวงจร (SW1) (วินาที)	ตำแหน่งของรูปคลื่นขณะต่อวงจร (SW2) (วินาที)	ผลการสั่งปลดวงจรของหลักการเดิม (Percentage Diff. & Harmonic Restraint (วินาที))	ขนาดค่าสุดของค่าอัตราส่วน $I_{d,j}/I_{d,r}$ ของหลักการเดิมที่อ่านได้ (เปอร์เซ็นต์, %)	ผลการสั่งปลดวงจร (Trip) ของหลักการที่นำเสนอ (วินาที)
Binrb1	0.0116666	0.0316666	-	25	-
Binrb2	0.0116666	0.0366666	-	14	-
Binrb3	0.0116666	0.0416666	-	46	-
Binrb4	0.0116666	0.0466666	0.068	17	-
Binrb5	0.0166666	0.0316666	0.049	14	-
Binrb6	0.0166666	0.0366666	-	65	-
Binrb7	0.0166666	0.0416666	-	76	-
Binrb8	0.0166666	0.0466666	-	34	-
Binrb9	0.0216666	0.0316666	-	46	-
Binrb10	0.0216666	0.0366666	0.057	17	-
Binrb11	0.0216666	0.0416666	-	25	-
Binrb12	0.0216666	0.0466666	-	18	-
Binrb13	0.0266666	0.0316666	-	23	-
Binrb14	0.0266666	0.0366666	-	34	-
Binrb15	0.0266666	0.0416666	0.06	17	-
Binrb16	0.0266666	0.0466666	-	30	-



รูปที่ 6.7 ผลการทำงานของหลักการที่ได้นำเสนอต่อสภาวะการเกิดกระแสอินรัช



รูปที่ 6.8 ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับฟuzzyลอจิกในการสั่งปลดวงจรต่อสถานะกระแสอินรัช

รูปที่ 6.8 ได้แสดงผลในกรณีที่มี Binrb2 ซึ่งแสดงรูปคลื่นของเอาต์พุตทั้ง 5 ที่ประมวลผลมาจากส่วนประมวลเบื้องต้นเพื่อส่งให้ส่วนประมวลผลส่วนสุดท้ายตัดสินใจ และยังได้แสดงการเปรียบเทียบการสั่งปลดวงจรระหว่างหลักการที่นำเสนอเทียบกับหลักการเดิม

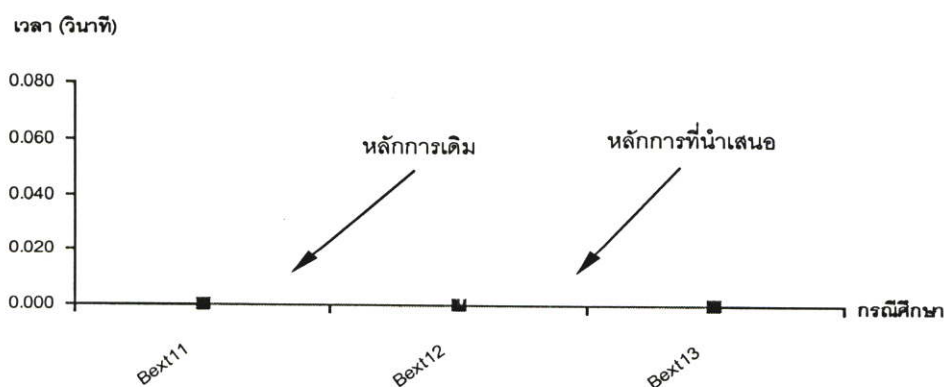
6.2.2 ผลการทำงานของหลักการที่นำเสนอต่อสภาวะที่เกิดการฟอลต์แบบภายนอกพื้นที่ป้องกัน (External Fault Cases)

สิ่งที่มีผลต่อขนาดของกระแสลัดวงจรเนื่องจากเกิดการฟอลต์แบบภายนอก ได้แก่ ค่าอิมพีแดนซ์ตั้งแต่แหล่งจ่ายไฟจนถึงจุดที่เกิดฟอลต์ และผลของกระแสตรง (DC Offset) ซึ่งมีผลเนื่องมาจากค่า X/R ของแหล่งจ่ายไฟ ดังนั้นในการทดลองจึงทำการปรับเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งเพื่อดูผลการทำงานต่อกระแสขนาดต่างๆ

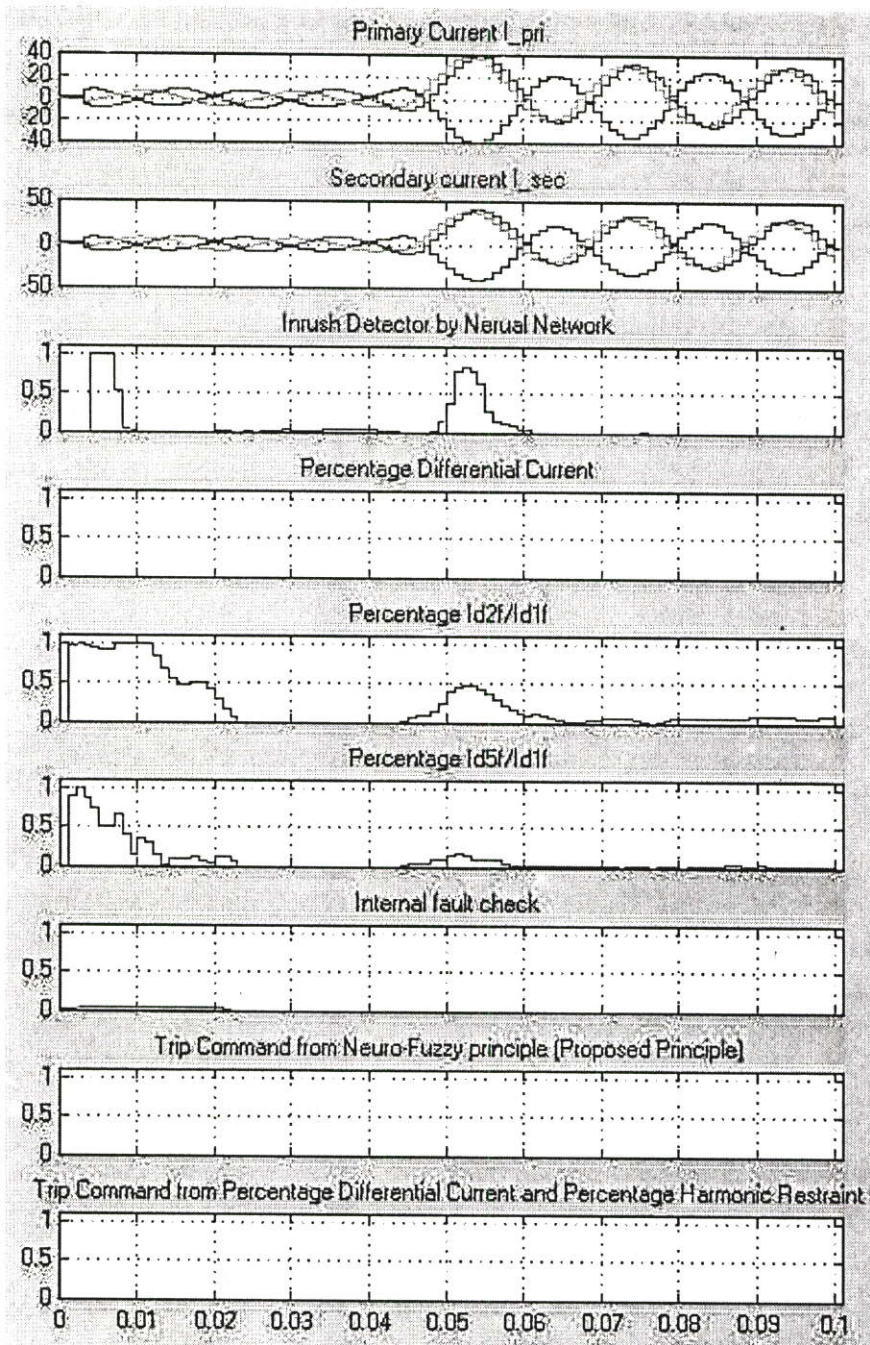
6.2.2.1 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสภาวะกระแสฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน ดิน (External Phase to Ground Fault)

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดินที่เวลา 0.042 วินาที

กรณีศึกษา	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (Ohm)	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (Ohm)	เวลาในการสั่งปลดวงจร (Trip) ของ Percentage Diff. & Harmonic Restraint (วินาที)	เวลาในการสั่งปลดวงจร (Trip) ของหลักการที่นำเสนอ (วินาที)
Bext11	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Z0=0.2552+j3.056 Z1=0.0776+j0.168	-	-
Bext12	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Z0=2.552+j30.56 Z1=0.776+j1.68	-	-
Bext13	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Z0=25.52+j305.6 Z1=7.76+j16.8	-	-



รูปที่ 6.9 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดินที่เวลา 0.042 วินาที



รูปที่ 6.10 ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับฟัซซีลอจิกในการสั่งปลดวงจรต่อสภาวะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน

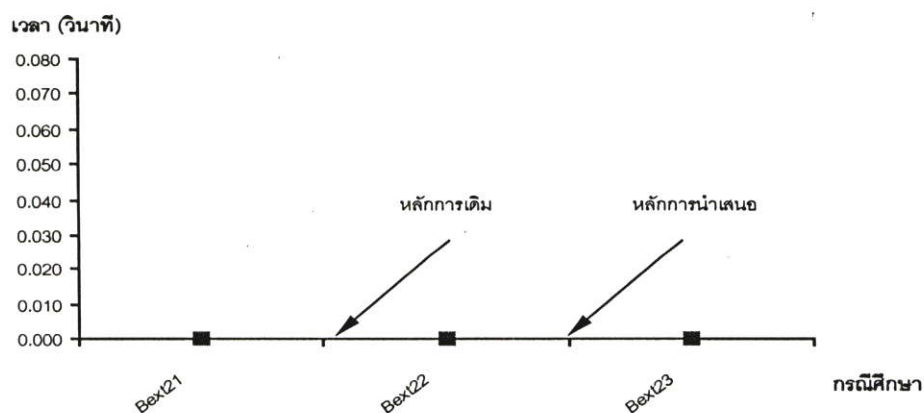
ในตารางที่ 6.2 และรูปที่ 6.9 แสดงผลการทำงานของหลักการที่นำเสนอ ต่อสภาวะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน ในรูปที่ 6.10 แสดงผลในกรณีที่ Bext11 ซึ่งแสดงรูปคลื่นของเอาต์พุตทั้ง 5 ที่ประมวลผลมาจากส่วนประมวลเบื้องต้นเพื่อส่งให้ส่วนประมวลผลส่วนสุดท้ายตัดสินใจ และยังได้แสดงการเปรียบเทียบการสั่งปลดวงจรระหว่างหลักการที่นำเสนอเทียบกับหลักการเดิม

6.2.2.2 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสถานะกระแสฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสต่อเฟส (External Line to Line Fault)

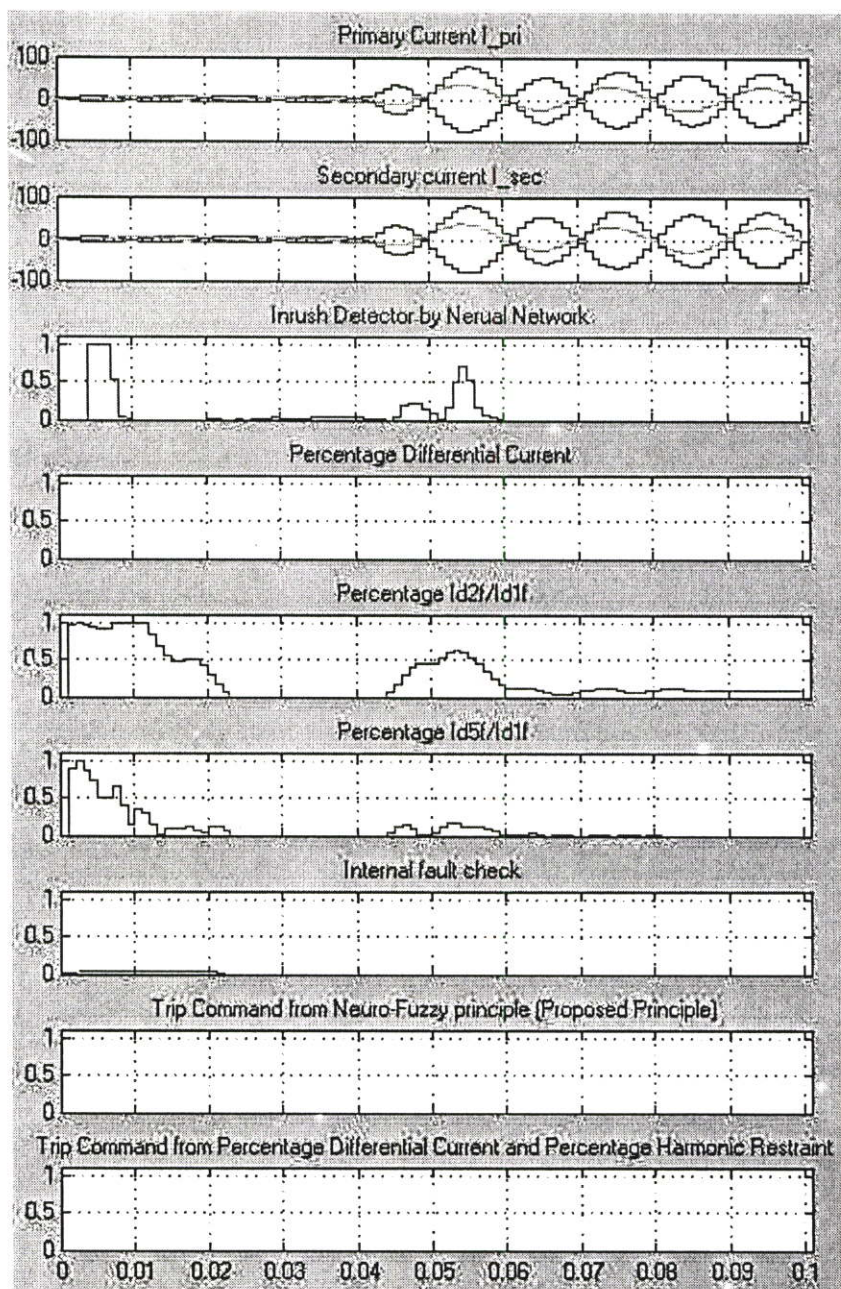
ในตารางที่ 6.3 และรูปที่ 6.11 แสดงผลการทำงานของรีเลย์ต่อสถานะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสต่อเฟส และ ในรูปที่ 6.12 แสดงผลในกรณี Bext21 ซึ่งแสดงรูปคลื่นของเอาต์พุตทั้ง 5 ที่ประมวลผลมาจากส่วนประมวลเบื้องต้นเพื่อส่งให้ส่วนประมวลผลส่วนสุดท้ายตัดสินใจ และยังได้แสดงการเปรียบเทียบการสั่งปลดวงจรระหว่างหลักการที่น่าเสนอเทียบกับหลักการเดิม

ตารางที่ 6.3 ผลการทดสอบต่อสถานะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสต่อเฟส ระหว่างเฟส A และ เฟส B ที่เวลา 0.042 วินาที

กรณี	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (Ohm)	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (Ohm)	เวลาในการสั่งปลดวงจร (Trip) ของ Percentage Diff. & Harmonic Restraint (วินาที)	เวลาในการสั่งปลดวงจร (Trip) ของ หลักการที่น่าเสนอ (วินาที)
Bext21	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Z0=0.2552+j3.056 Z1=0.0776+J0.168	-	-
Bext22	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Z0=2.552+j30.56 Z1=0.776+j1.68	-	-
Bext23	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Z0=25.52+j305.6 Z1=7.76+j16.8	-	-



รูปที่ 6.11 ผลการทดสอบต่อสถานะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสต่อเฟส ระหว่างเฟส A และเฟส B ที่เวลา 0.042 วินาที



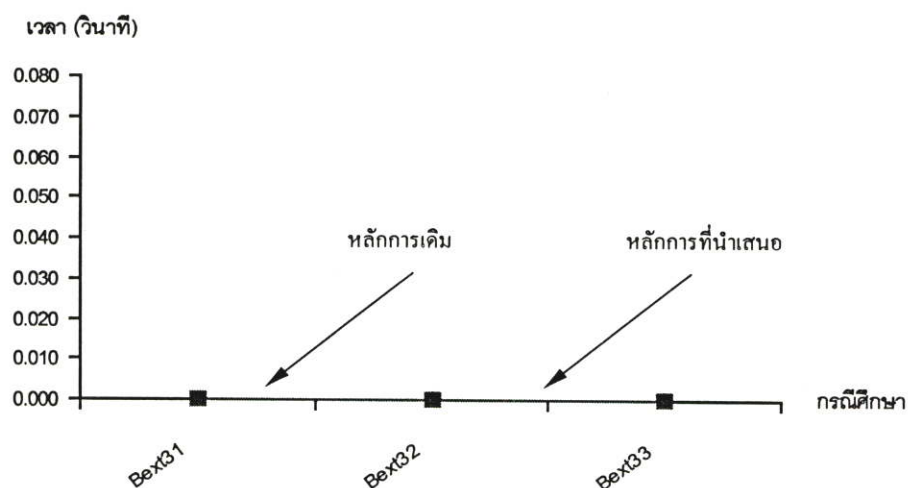
รูปที่ 6.12 ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับฟัซซี่ลอจิกในการสั่งปลดวงจรต่อสภาวะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสต่อเฟส

6.2.2.3 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสภาวะกระแสฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรทั้งสามเฟส (External Three Phases Fault)

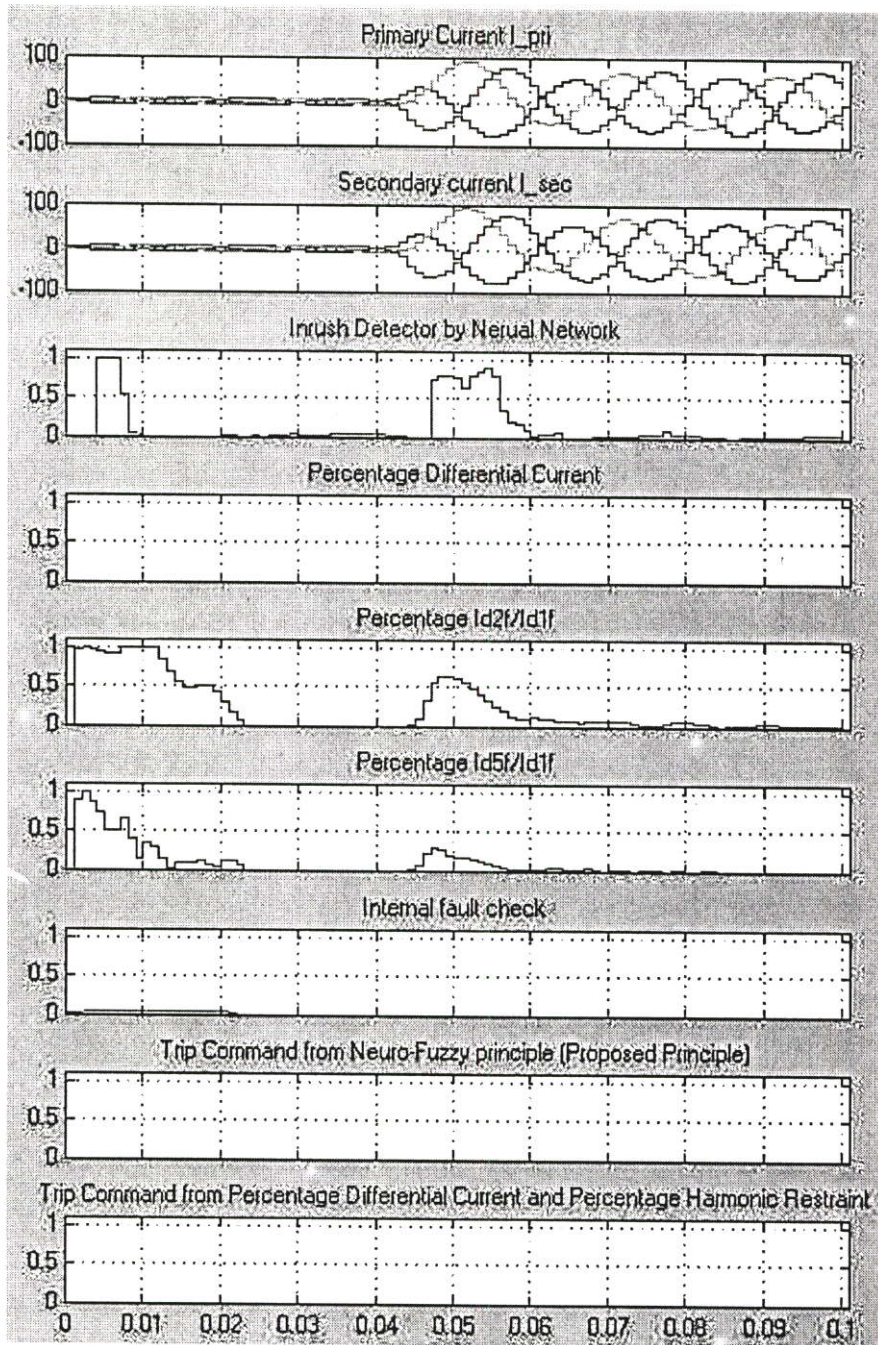
ในตารางที่ 6.4 และรูปที่ 6.13 แสดงผลการทำงานของรีเลย์ต่อสภาวะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรทั้งสามเฟส ส่วนในรูปที่ 6.14 แสดงผลในกรณีที่มี Bext31 ซึ่งแสดงรูปคลื่นของเอาต์พุตทั้ง 5 ที่ประมวลผลมาจากส่วนประมวลเบื้องต้นเพื่อส่งให้ส่วนประมวลผลส่วนสุดท้ายตัดสินใจ และยังได้แสดงการเปรียบเทียบการสั่งปลดวงจรระหว่างหลักการที่น่าเสนอเทียบกับหลักการเดิม

ตารางที่ 6.4 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรทั้งสามเฟสที่เวลา 0.042 วินาที

กรณี	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (Ohm)	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (Ohm)	เวลาในการสั่งปลดวงจร (Trip) ของ Percentage Diff. & Harmonic Restraint (วินาที)	เวลาในการสั่งปลดวงจร (Trip) ของ หลักการที่น่าเสนอ (วินาที)
Bext31	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Z0=0.2552+j3.056 Z1=0.0776+j0.168	-	-
Bext32	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Z0=2.552+j30.56 Z1=0.776+j1.68	-	-
Bext33	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Z0=25.52+j305.6 Z1=7.76+j16.8	-	-



รูปที่ 6.13 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรทั้งสามเฟสที่เวลา 0.042 วินาที



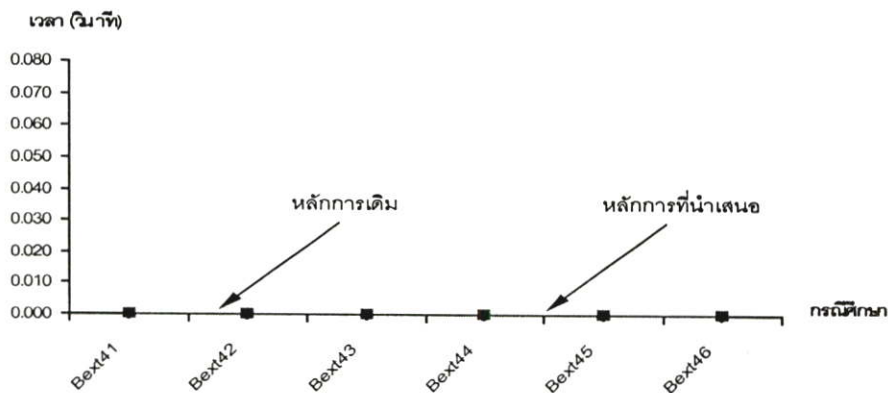
รูปที่ 6.14 ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับพีซีซีลอจิกในการสั่งปลดวงจรต่อสภาวะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรทั้งสามเฟส

6.2.2.4 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสถานะกระแสฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน และมีผลของการอิ่มตัวของแกนเหล็กในหม้อแปลงกระแส (External Single Line to Ground Fault with CT saturation)

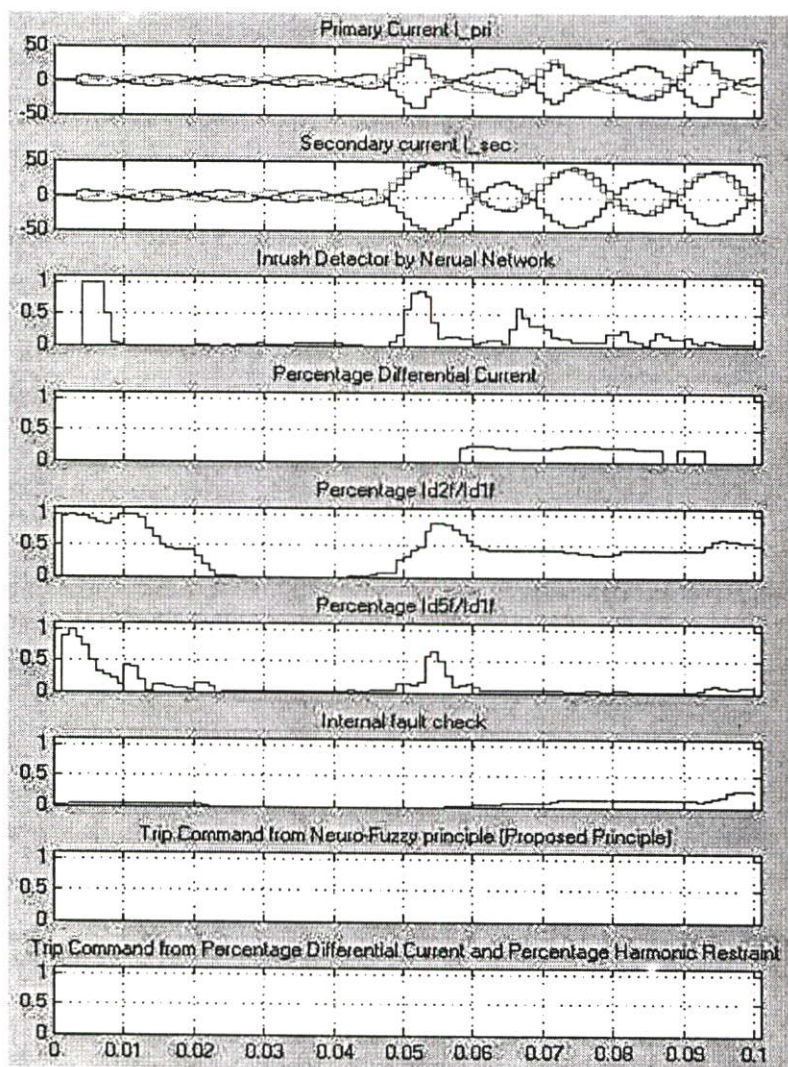
ในตารางที่ 6.5 และรูปที่ 6.15 แสดงผลการทำงานของรีเลย์ต่อสถานะกระแสฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดินแบบมีผลของการอิ่มตัวของแกนเหล็กในหม้อแปลงกระแส ส่วนในรูปที่ 6.16 แสดงผลในกรณีที่ Bext45 ซึ่งแสดงรูปคลื่นของเอาต์พุตทั้ง 5 ที่ประมวลผลมาจากส่วนประมวลเบื้องต้นเพื่อส่งให้ส่วนประมวลผลส่วนสุดท้ายตัดสินใจ และยังได้แสดงการเปรียบเทียบการสั่งปลดวงจรระหว่างหลักการที่นำเสนอเทียบกับหลักการเดิม จะเห็นได้ว่าสาเหตุที่หลักการ Percentage Differential Current และ Harmonic Restraint ไม่สั่งปลดวงจรเป็นเพราะในช่วงที่เกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็กมีค่าส่วนประกอบฮาร์มอนิกอันดับ 2 อยู่สูง ซึ่งทำให้มีการยับยั้งการสั่งปลดวงจรโดยหลักการ Harmonic Restraint

ตารางที่ 6.5 ผลการทดสอบต่อสถานะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน ที่เฟส B และมีผลของการอิ่มตัวของแกนเหล็กในหม้อแปลงกระแสที่เวลา 0.042 วินาที

กรณี	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (Ohm)	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (Ohm)	ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงกระแสเฟส B (Burden) (Ohm)	เวลาในการสั่งปลดวงจร (Trip) ของ Percentage Diff. & Harmonic Restraint (วินาที)	เวลาในการสั่งปลดวงจร (Trip) ของหลักการที่นำเสนอ (วินาที)
Bext41	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Z0=0.2552+j3.056 Z1=0.0776+j0.168	3	-	-
Bext42	Z0=2.10+j8.50 Z1=5.20 +j7.50	Z0=0.2552+j3.056 Z1=0.0776+j0.168	3	-	-
Bext43	Z0=1.50+j6.50 Z1=3.50 +j5.50	Z0=0.2552+j3.056 Z1=0.0776+j0.168	3	-	-
Bext44	Z0=0.750+j3.20 Z1=1.20 +j3.20	Z0=0.2552+j3.056 Z1=0.0776+j0.168	3	-	-
Bext45	Z0=0.750+j3.20 Z1=i.20 +j3.20	Z0=0.2552+j3.056 Z1=0.0776+j0.168	2	-	-
Bext46	Z0=0.750+j3.20 Z1=1.20 +j3.20	Z0=0.2552+j3.056 Z1=0.0776+j0.168	1	-	-



รูปที่ 6.15 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดินที่เฟส B และมีผลของการอิมิตัวของแกนเหล็กในหม้อแปลงกระแสที่เวลา 0.042 วินาที

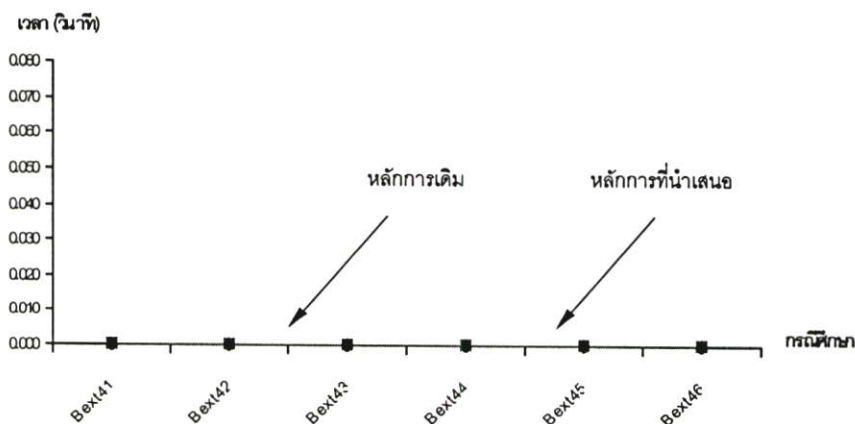


รูปที่ 6.16 ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับฟuzzy logic ในการสั่งปลดวงจรต่อสภาวะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน และมีผลของการอิมิตัวของแกนเหล็กในหม้อแปลงกระแส

6.2.2.5 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสภาวะกระแสฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดินแบบค่าความต้านทานสูง (High Impedance Single Line to Ground Fault)

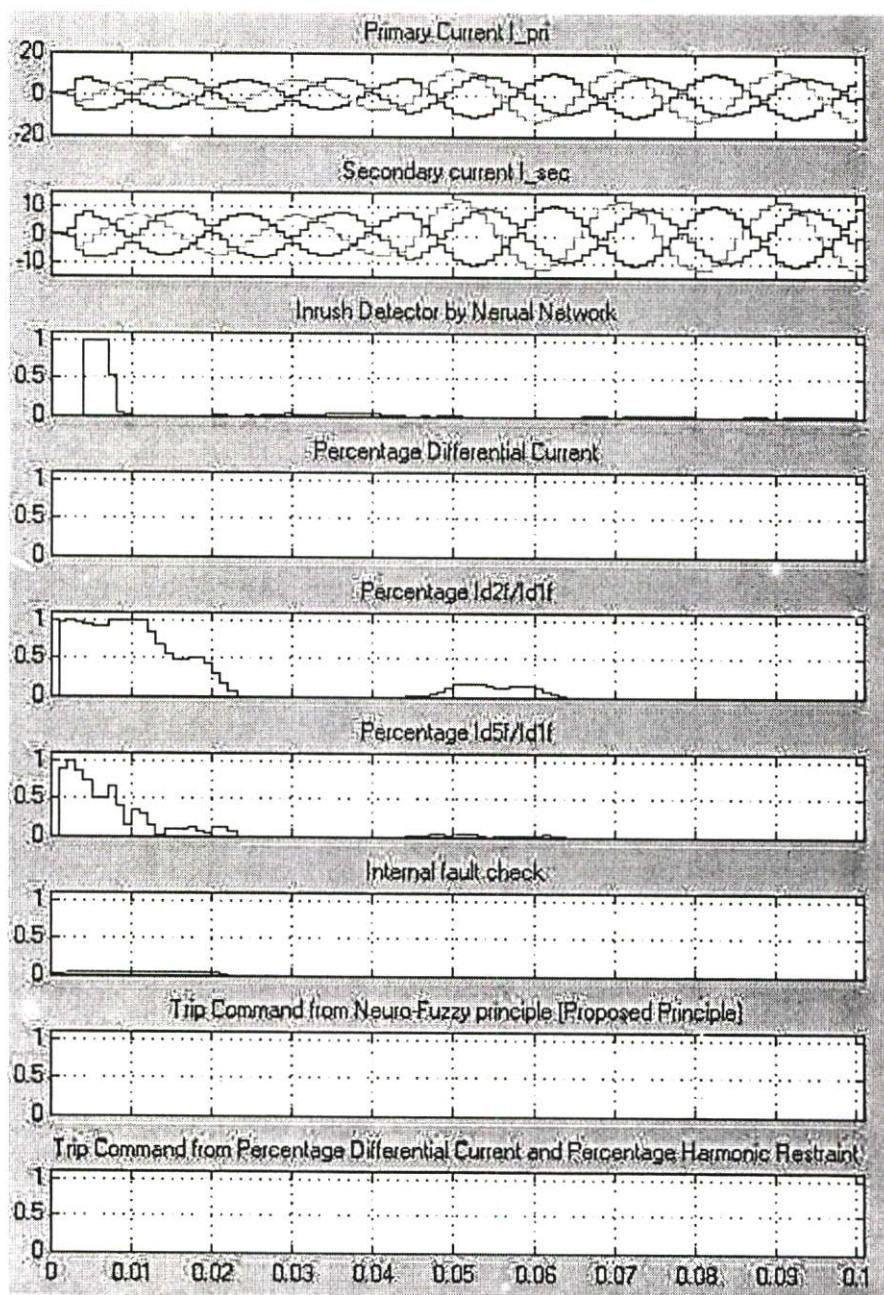
ตารางที่ 6.6 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน ที่เฟส B แบบมีค่าความต้านทานสูงที่เวลา 0.042 วินาที

กรณีที่	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (Ohm)	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (Ohm)	ค่าอิมพีแดนซ์ ณ จุดที่เกิดฟอลต์เฟส B (Ohm)	เวลาในการสั่งปลดวงจร (Trip) ของ Percentage Diff. & Harmonic Restraint (วินาที)	เวลาในการสั่งปลดวงจร (Trip) ของหลักการที่นำเสนอ (วินาที)
Bext51	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Z0=0.2552+j3.056 Z1=0.0776+J0.168	5	-	-
Bext52	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Z0=0.2552+j3.056 Z1=0.0776+J0.168	10	-	-
Bext53	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Z0=0.2552+j3.056 Z1=0.0776+J0.168	20	-	-
Bext54	Z0=2.648+j27.9 Z1=7.384 +j21.39	Z0=0.2552+j3.056 Z1=0.0776+j0.168	30	-	-
Bext55	Z0=2.648+j41.85 Z1=7.384 +j32.091	Z0=2.552+j30.56 Z1=0.776+j1.68	5	-	-
Bext56	Z0=2.648+j55.80 Z1=7.384 +j42.788	Z0=25.52+j305.6 Z1=7.76+j16.8	5	-	-



รูปที่ 6.17 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน ที่เฟส B แบบมีค่าความต้านทานสูงที่เวลา 0.042 วินาที

ในตารางที่ 6.6 และรูปที่ 6.17 แสดงผลการทำงานต่อสภาวะกระแสฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดินแบบมีค่าความต้านทานสูง ในรูปที่ 6.18 แสดงผลในกรณีนี้ Bext52 ซึ่งแสดงรูปคลื่นของเอาต์พุตทั้ง 5 ที่ประมวลผลมาจากส่วนประมวลเบื้องต้นเพื่อส่งให้ส่วนประมวลผลส่วนสุดท้ายตัดสินใจ และยังได้แสดงการเปรียบเทียบการสั่งปลดวงจรระหว่างหลักการที่นำเสนอเทียบกับหลักการเดิม



รูปที่ 6.18 ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับฟuzzyลอจิก ในการสั่งปลดวงจรต่อสภาวะฟอลต์ภายนอก ซึ่งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดินแบบมีค่าความต้านทานสูง

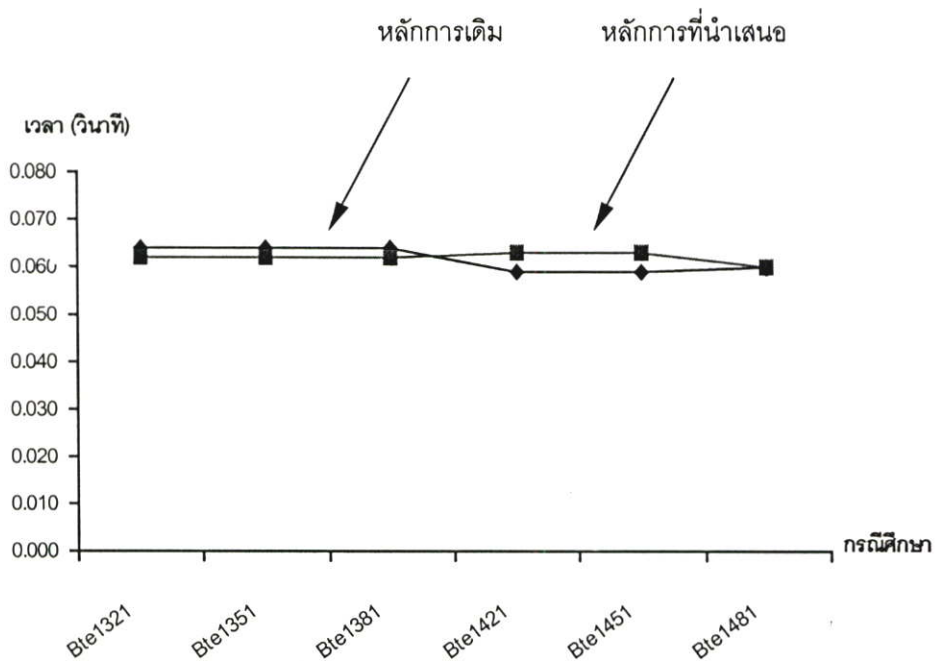
6.2.3 ผลการทดลองการทำงานของรีเลย์ต่อสถานะที่เกิดการฟอลต์แบบภายในพื้นที่ป้องกัน (Internal Fault)

สิ่งที่มีผลต่อขนาดของกระแสลัดวงจร เนื่องจากเกิดการฟอลต์แบบภายใน ได้แก่ จำนวนของขดลวดที่ลัดวงจรลงดินต่อจำนวนขดลวดทั้งหมด และผลของกระแสตรง (DC Offset) ซึ่งมีผลเนื่องมาจากค่า X/R ของแหล่งจ่ายไฟ ดังนั้นในการทดลองจึงทำการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าวสำหรับทดสอบการทำงานของหลักการที่นำเสนอ

6.2.3.1 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสถานะกระแสฟอลต์ภายในที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดิน (Turn to Earth Fault)

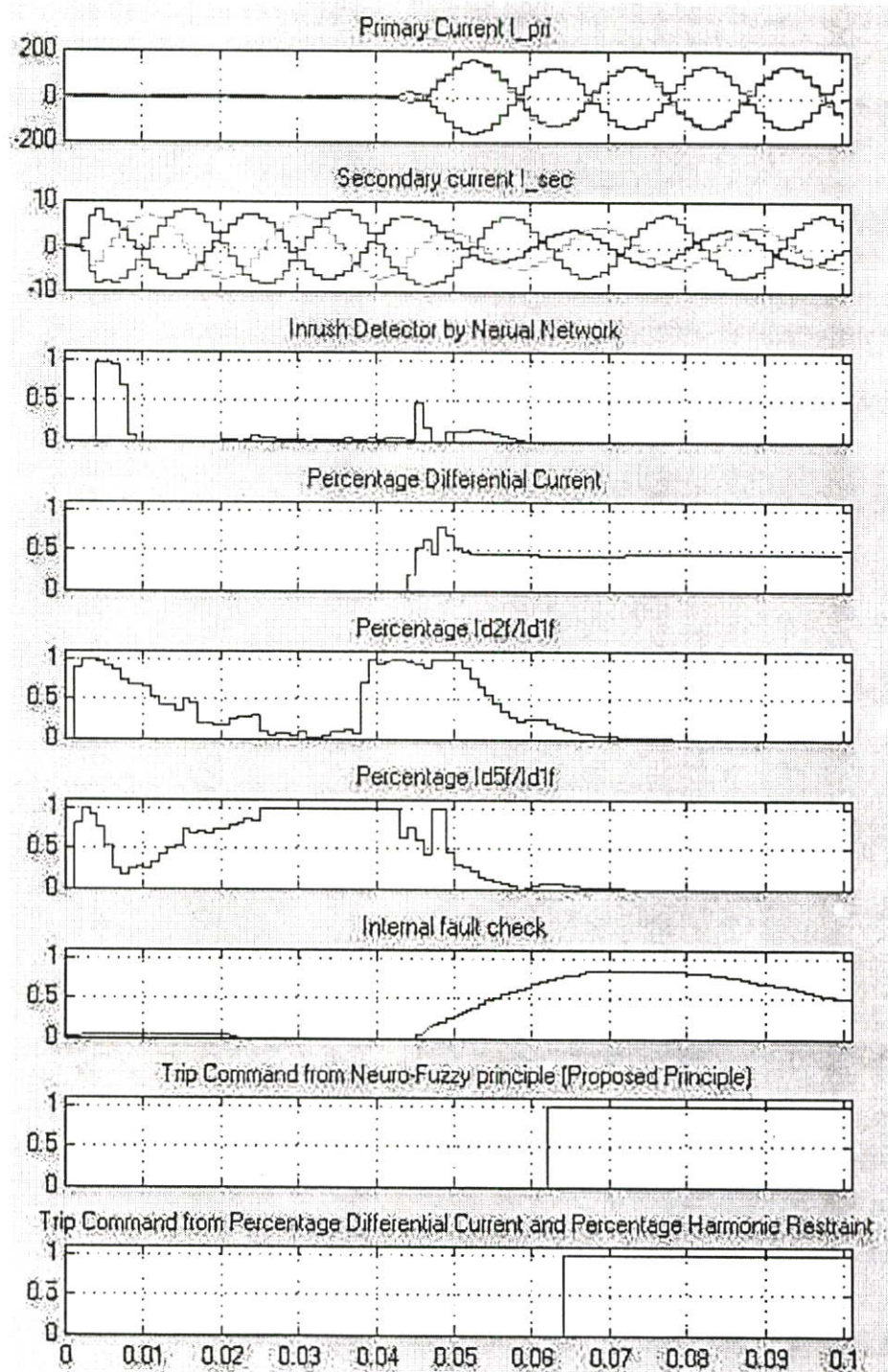
ตารางที่ 6.7 ผลการทดสอบต่อสถานะฟอลต์ภายในที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดินที่เฟส B ที่เวลา 0.042 วินาที

กรณีที่	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (Ohm)	ด้านของหม้อแปลงที่เกิดการฟอลต์ / จำนวนเปอร์เซ็นต์ของขดที่ลัดวงจรลงดิน ต่อขดลวดทั้งหมด	เวลาในการสั่งปลดวงจร (Trip) ของ Percentage Diff. & Harmonic Restraint (วินาที)	เวลาในการสั่งปลดวงจร (Trip) ของหลักการที่นำเสนอ (วินาที)
Bte1321	$Z_0=2.648+j13.95$ $Z_1=7.384 +j10.697$	Primary/20%	0.064	0.062
Bte1351	$Z_0=2.648+j13.95$ $Z_1=7.384 +j10.697$	Primary/50%	0.064	0.062
Bte1381	$Z_0=2.648+j13.95$ $Z_1=7.384 +j10.697$	Primary/80%	0.064	0.062
Bte1421	$Z_0=2.648+j13.95$ $Z_1=7.384 +j10.697$	Secondary/20%	0.059	0.063
Bte1451	$Z_0=2.648+j13.95$ $Z_1=7.384 +j10.697$	Secondary/50%	0.059	0.063
Bte1481	$Z_0=2.648+j13.95$ $Z_1=7.384 +j10.697$	Secondary/80%	0.060	0.060



รูปที่ 6.19 ผลการทดสอบต่อสภาวะพอลต์ภายในที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดินที่เฟส B ที่เวลา 0.042 วินาที

ในตารางที่ 6.7 และรูปที่ 6.19 แสดงผลการทำงานต่อสภาวะสภาวะพอลต์ภายในซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดิน ในรูปที่ 6.20 แสดงผลในกรณี Bte1321 ซึ่งแสดงรูปคลื่นของเอาต์พุตทั้ง 5 ที่ประมวลผลมาจากส่วนประมวลเบื้องต้นเพื่อส่งให้ส่วนประมวลผลส่วนสุดท้ายตัดสินใจ และยังได้แสดงการเปรียบเทียบการสั่งปลดวงจรระหว่างหลักการที่นำเสนอเทียบกับหลักการเดิม ซึ่งหลักการที่นำเสนอสามารถสั่งปลดวงจรได้เร็วกว่า

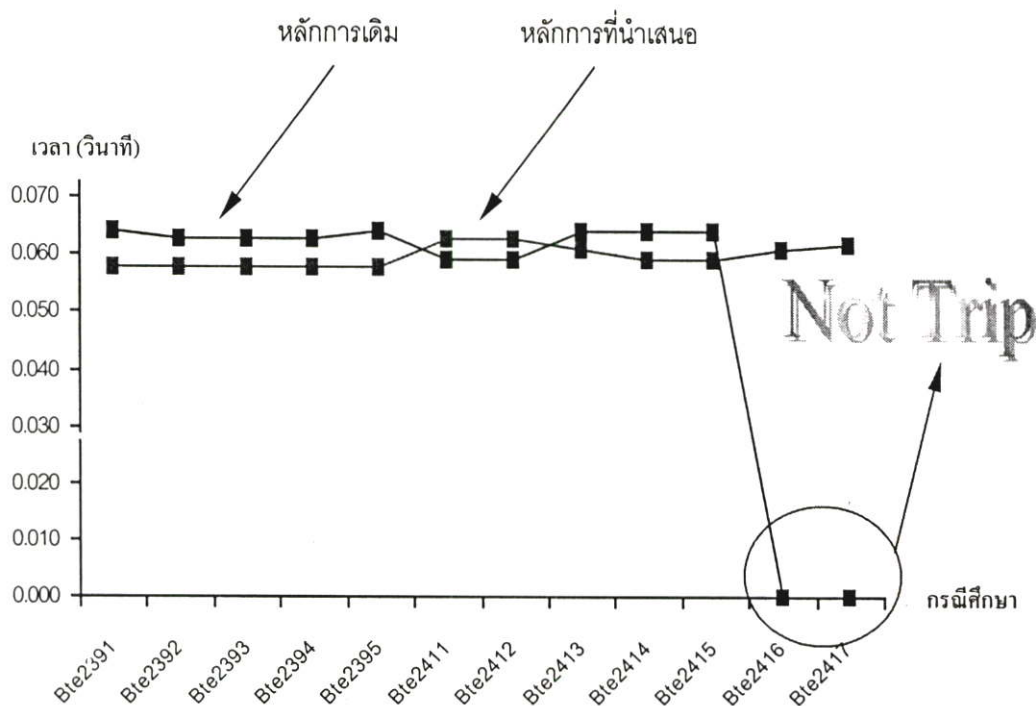


รูปที่ 6.20 ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับฟิวส์ช็อลจิกในการสั่งปลดวงจรต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดิน

6.2.3.2 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสถานะกระแสฟอลต์ภายในที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่าง
ขดลวดลงดินแบบมีผลการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส (Turn to Earth fault with CT
saturation)

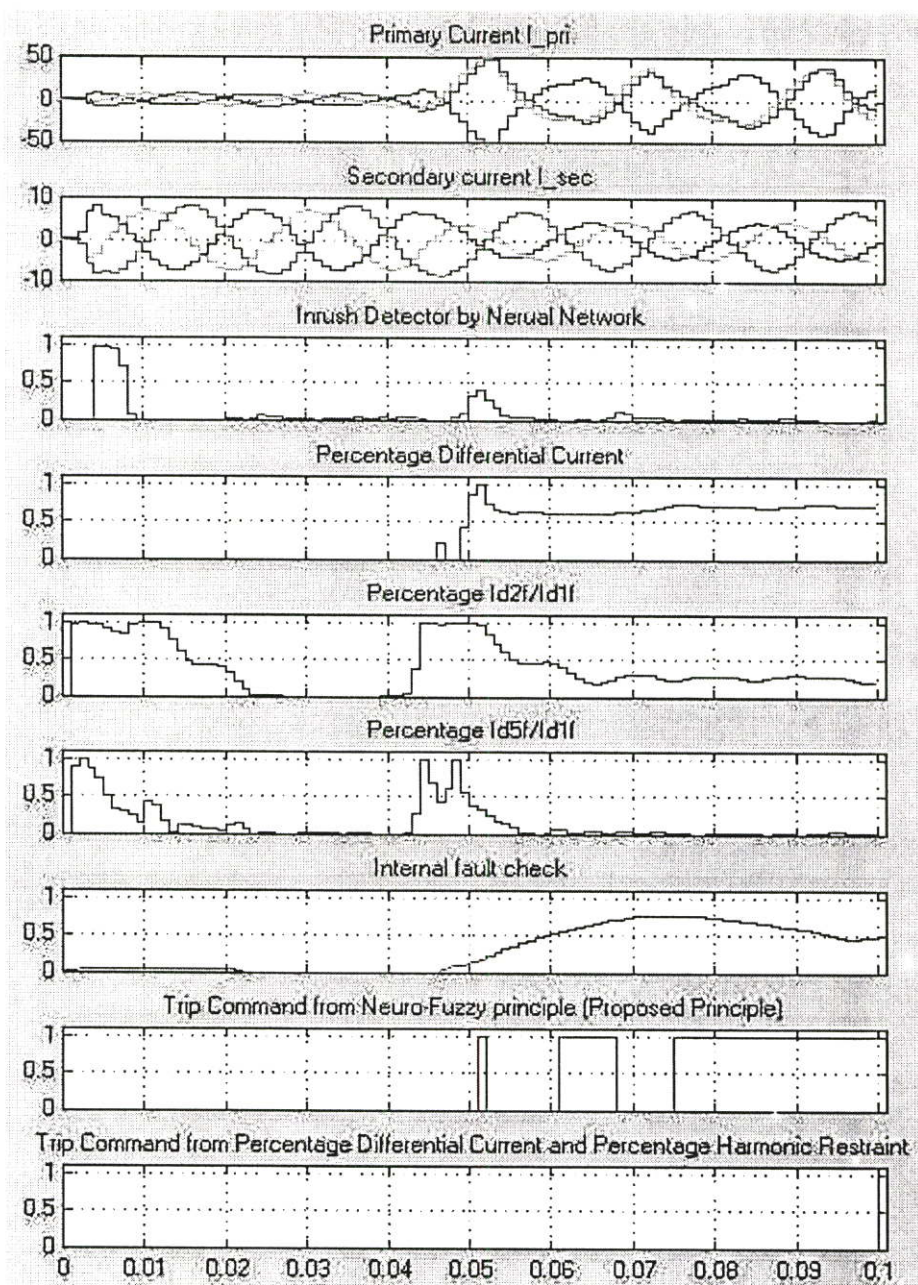
ตารางที่ 6.8 ผลการทดสอบต่อสถานะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดิน ที่
เฟส B และมีผลของการอิ่มตัวของแกนเหล็กในหม้อแปลงกระแสที่เวลา 0.042 วินาที

กรณี	ค่าอิมพีแดนซ์ของ สายส่งด้านปฐมภูมิ ของหม้อแปลง (Ohm)	ด้านของหม้อแปลงที่ เกิดการฟอลต์/ จำนวนเปอร์เซ็นต์ ของขดที่ลัดวงจร ลงดิน ต่อขดลวดทั้ง หมด	ค่าอิมพีแดนซ์ ของหม้อแปลง กระแส เฟส B (Burden) (Ohm)	เวลาในการสั่งปลด วงจร (Trip) ของ Percentage Diff. & Harmonic Restraint (วินาที)	เวลาในการสั่ง ปลดวงจร (Trip)ของ หลักการที่นำ เสนอ (วินาที)
Bte2391	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/90%	1.2	0.064	0.058
Bte2392	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/90%	1.6	0.063	0.058
Bte2393	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/90%	2.1	0.063	0.058
Bte2394	Z0=2.648+j27.9 Z1=7.384 +j21.39	Primary/90%	2.5	0.063	0.058
Bte2395	Z0=2.648+j41.85 Z1=7.384 +j32.091	Primary/90%	1.6	0.064	0.058
Bte2411	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Secondary/10%	1	0.059	0.063
Bte2412	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Secondary/10%	1.2	0.059	0.063
Bte2413	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Secondary/10%	1.5	0.064	0.061
Bte2414	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Secondary/10%	1.8	0.064	0.059
Bte2415	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Secondary/10%	2.3	0.064	0.059
Bte2416	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Secondary/10%	2.8	-	0.061
Bte2417	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Secondary/10%	2.8	-	0.062



รูปที่ 6.21 ผลการทดสอบต่อสถานะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดินที่เฟส B และมีผลของการอิมิตัวของแกนเหล็กในหม้อแปลงกระแสที่เวลา 0.042 วินาที

ในตารางที่ 6.8 และรูปที่ 6.21 แสดงผลการทำงานต่อสถานะกระแสฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดินแบบมีผลของการอิมิตัวในแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแส ในรูปที่ 6.22 แสดงผลในกรณีศึกษา Bte2416 ซึ่งแสดงรูปคลื่นของเอาต์พุตทั้ง 5 ที่ประมวลผลมาจากส่วนประมวลเบื้องต้นเพื่อส่งให้ส่วนประมวลผลส่วนสุดท้ายตัดสินใจ และยังได้แสดงการเปรียบเทียบการส่งปลดวงจรระหว่างหลักการที่นำเสนอเทียบกับหลักการเดิม ซึ่งหลักการเดิมไม่ทำการส่งปลดวงจรในกรณีดังกล่าวซึ่งถือว่าไม่ถูกต้อง แต่หลักการที่นำเสนอสามารถส่งสามารถส่งปลดวงจรได้เร็วกว่า และถูกต้อง

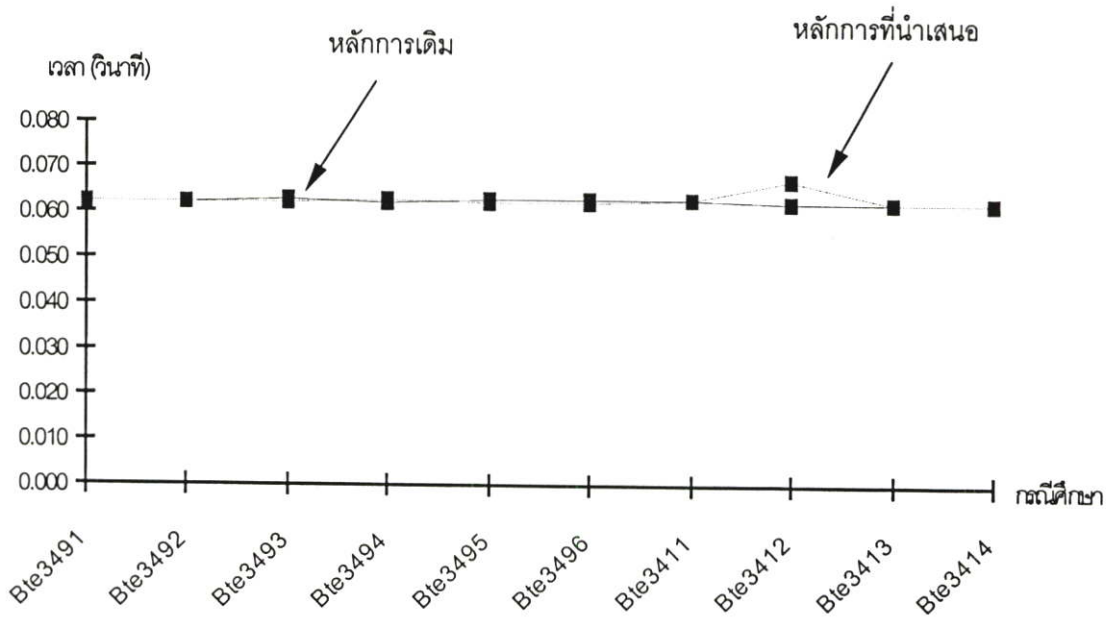


รูปที่ 6.22 ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับฟuzzyลอจิกในการสั่งปลดวงจรต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดิน แบบมีผลของการอิมพัลส์ในแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแส

6.2.3.3 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสถานะกระแสฟอลต์ภายในที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่าง
ขดลวดลงดินแบบมีค่าความต้านสูง (High Impedance Turn to Earth Fault)

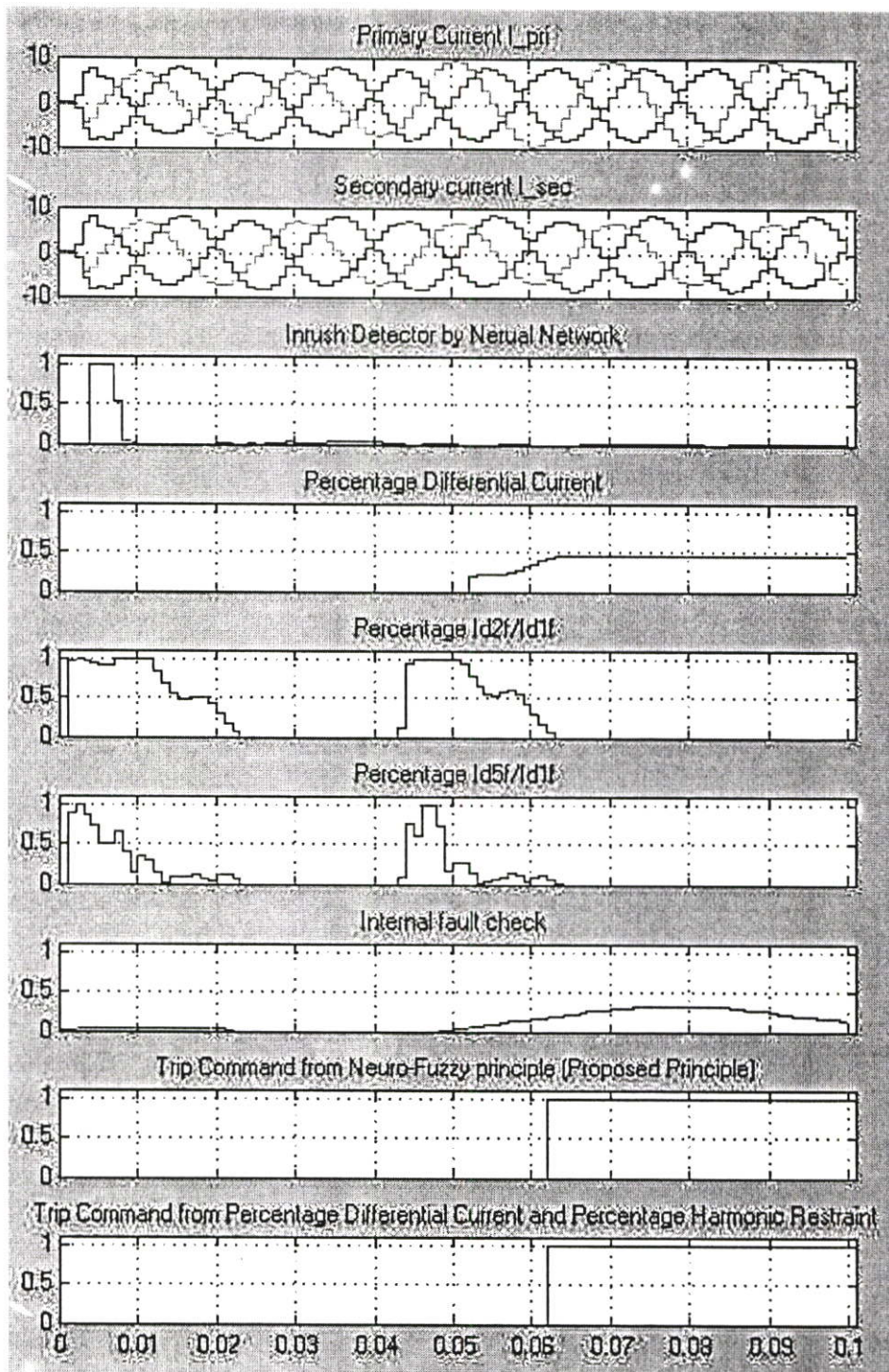
ตารางที่ 6.9 ผลการทดสอบต่อสถานะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดิน ที่
เฟส B และ มีค่าความต้านทานสูงที่เวลา 0.042 วินาที

กรณี	ค่าอิมพีแดนซ์ของ สายส่งด้านปฐมภูมิ ของหม้อแปลง (Ohm)	ด้านของหม้อแปลงที่ เกิดการฟอลต์ / จำนวน เปอร์เซ็นต์ของขดที่ลัด วงจรลงดิน ต่อขดลวด ทั้งหมด	ค่าอิมพีแดนซ์ ณ จุดที่เกิดการ ฟอลต์เฟส B (Ohm)	เวลาในการสั่ง ปลดวงจร (Trip) ของ Percentage Diff. & Harmonic Restraint (วินาที)	เวลาในการสั่ง ปลดวงจร (Trip)ของ หลักการที่นำ เสนอ (วินาที)
Bte3491	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Secondary/90%	5	0.062	0.062
Bte3492	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Secondary/90%	7.5	0.062	0.062
Bte3493	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Secondary/90%	10	0.063	0.062
Bte3494	Z0=2.648+j27.9 Z1=7.384 +j21.39	Secondary/90%	15	0.062	0.063
Bte3495	Z0=2.648+j41.85 Z1=7.384 +j32.091	Secondary/90%	5	0.063	0.062
Bte3496	Z0=2.648+j55.80 Z1=7.384 +j42.788	Secondary/90%	5	0.063	0.062
Bte3411	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Secondary/10%	5	0.063	0.063
Bte3412	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Secondary/10%	10	0.062	0.067
Bte3413	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Secondary/10%	15	0.062	0.062
Bte3414	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Secondary/10%	20	0.062	0.062



รูปที่ 6.23 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดิน ที่เฟส B และมีค่าความต้านทานสูงที่เวลา 0.042 วินาที

ในตารางที่ 6.9 และรูปที่ 6.23 แสดงผลการทำงานต่อสภาวะกระแสฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดินแบบมีค่าความต้านทานสูง ในรูปที่ 6.24 แสดงผลในกรณี Bte3414 ซึ่งแสดงรูปคลื่นของเอาต์พุตทั้ง 5 ที่ประมวลผลมาจากส่วนประมวลเบื้องต้นเพื่อส่งให้ส่วนประมวลผลส่วนสุดท้ายตัดสินใจ และยังได้แสดงการเปรียบเทียบการลัดวงจรระหว่างหลักการที่นำเสนอเทียบกับหลักการเดิม



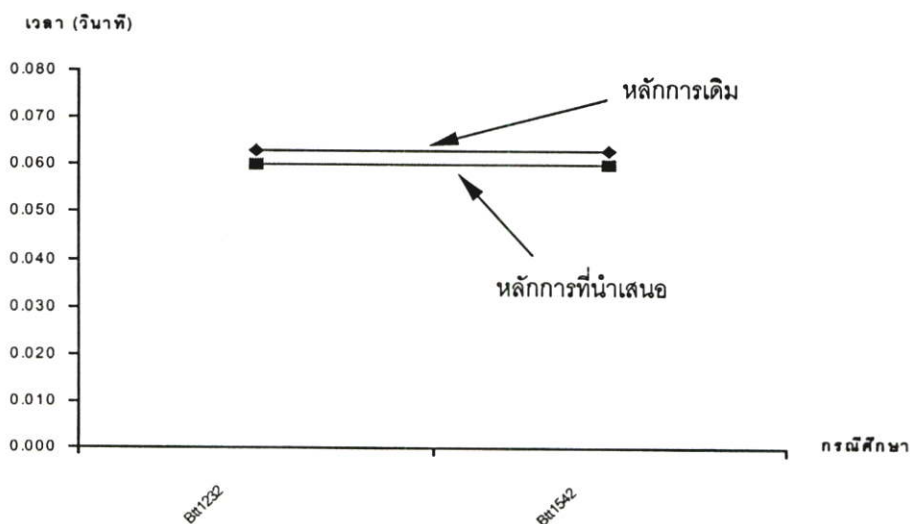
รูปที่ 6.24 ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับฟuzzyลอจิกในการสั่งปลดวงจรต่อสถานะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดินแบบมีค่าความต้านทานสูง

6.2.3.4 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสภาวะกระแสฟอลต์ภายในที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด (Turn to Turn Fault)

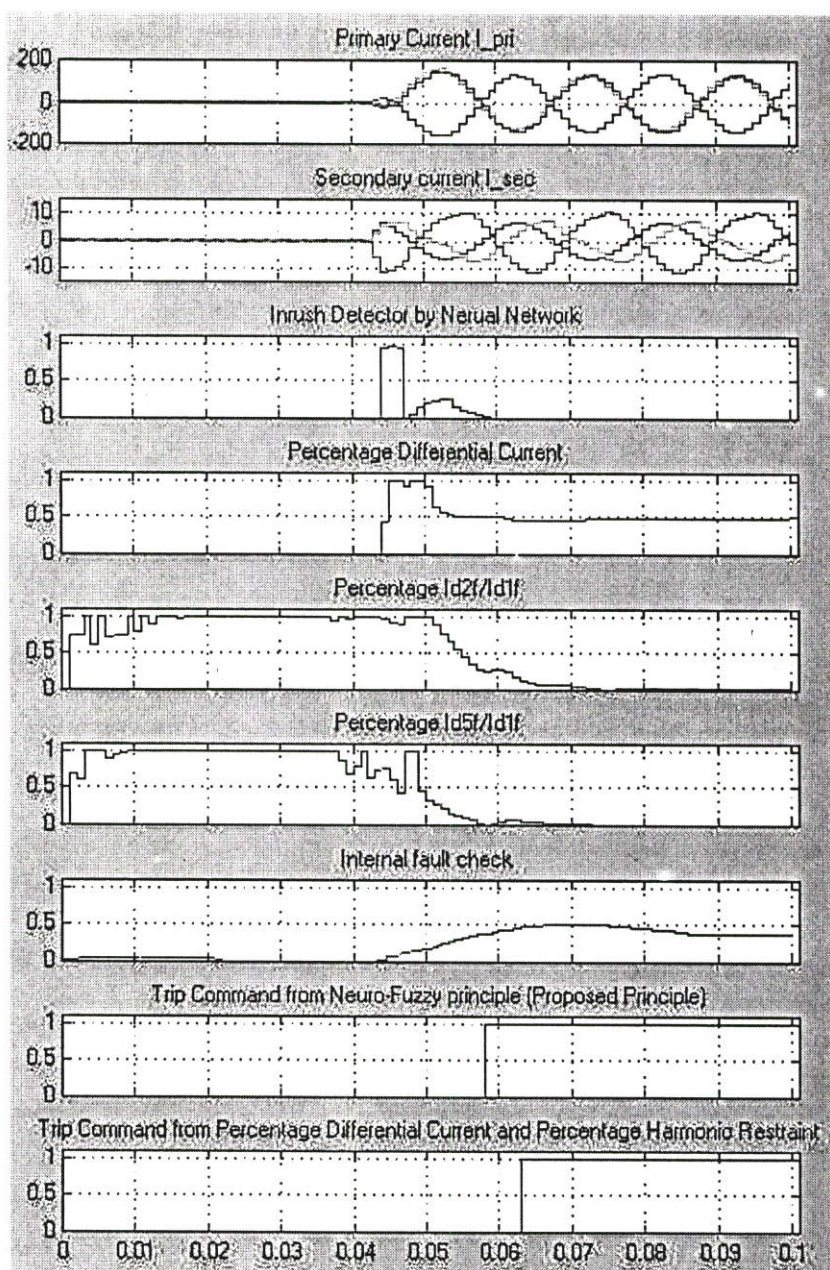
ในตารางที่ 6.10 และรูปที่ 6.25 แสดงผลการทำงานของรีเลย์ต่อสภาวะสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด ในรูปที่ 6.26 แสดงผลในกรณีที่ Btt1232 ซึ่งแสดงรูปคลื่นของเอาต์พุตทั้ง 5 ที่ประมวลผลมาจากส่วนประมวลเบื้องต้นเพื่อส่งให้ส่วนประมวลผลส่วนสุดท้าย ตัดสินใจ และยังได้แสดงการเปรียบเทียบการสั่งปลดวงจรระหว่างหลักการที่นำเสนอเทียบกับหลักการเดิม ซึ่งหลักการที่นำเสนอสามารถสั่งปลดวงจรได้เร็วกว่า

ตารางที่ 6.10 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายในที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวดที่เฟส B ที่เวลา 0.042 วินาที

กรณี	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (Ohm)	ด้านของหม้อแปลงที่เกิดการฟอลต์ / จำนวนเปอร์เซ็นต์ของขดที่ลัดวงจรต่อขดลวดทั้งหมด (%)	เวลาในการสั่งปลดวงจร (Trip) ของ Percentage Diff. & Harmonic Restraint (วินาที)	เวลาในการสั่งปลดวงจร (Trip) ของหลักการที่นำเสนอ (วินาที)
Btt1232	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/20-30%	0.063	0.060
Btt1542	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/80-90%	0.063	0.060



รูปที่ 6.25 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายในที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวดที่เฟส B ที่เวลา 0.042 วินาที

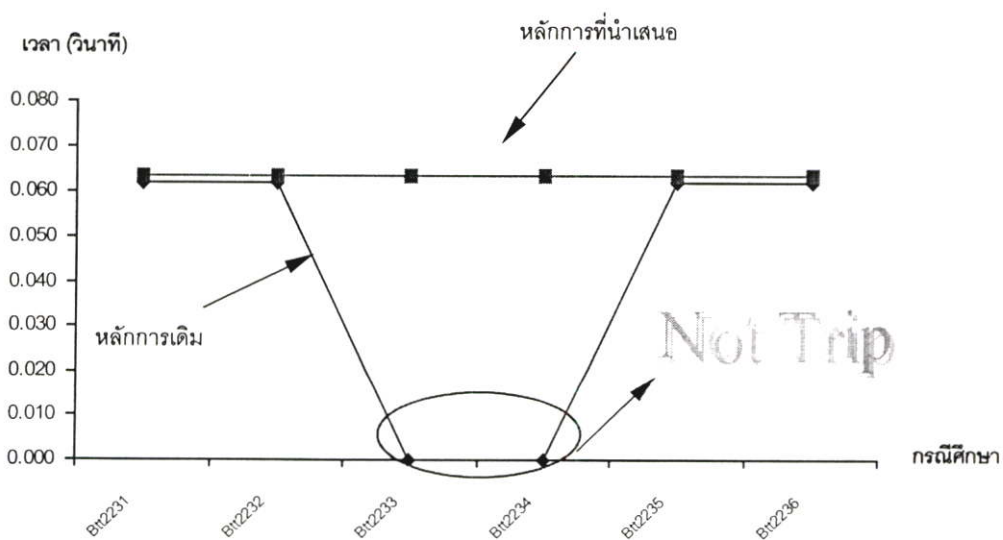


รูปที่ 6.26 ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับฟuzzyลอจิกในการสั่งปลดวงจรต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด

6.2.3.5 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสถานะกระแสฟอลต์ภายในที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่าง
 รอบขดลวดแบบมีค่าความต้านสูง (High Impedance Turn to Turn fault)

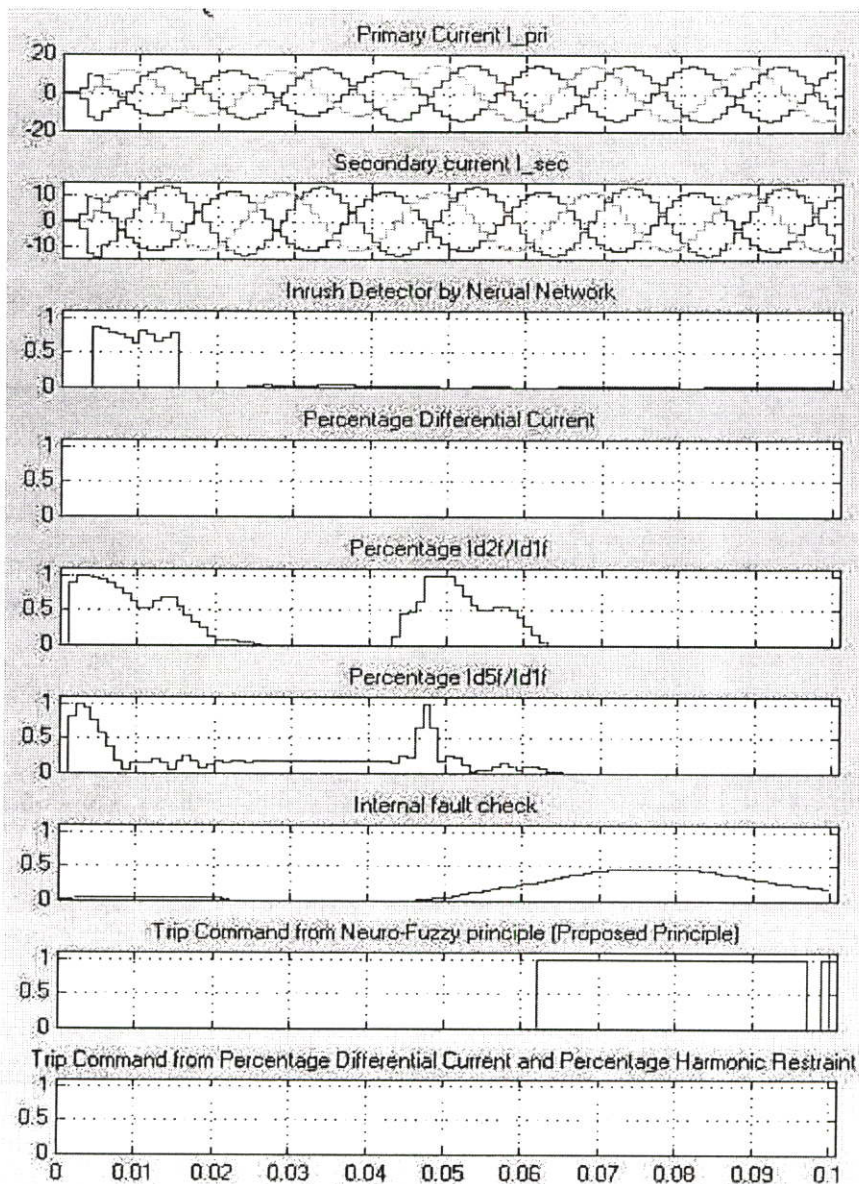
ตารางที่ 6.11 ผลการทดสอบต่อสถานะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวดที่เฟส
 B และมีค่าความต้านทานสูงที่เวลา 0.042 วินาที

กรณีศึกษา	ค่าอิมพีแดนซ์ของสาย ส่งด้านปฐมภูมิของ หม้อแปลง (Ohm)	ด้านของหม้อแปลงที่ เกิดการฟอลต์ / จำนวน เปอร์เซ็นต์ของขดที่ลัด วงจรลงดิน ต่อขดลวด ทั้งหมด	ค่าอิมพีแดนซ์ ณ จุดที่เกิดการ ฟอลต์เฟส B (Ohm)	เวลาในการสั่งปลด วงจร (Trip) ของ Percentage Diff. & Harmonic Restraint (วินาที)	เวลาในการสั่ง ปลดวงจร (Trip)ของหลัก การที่นำเสนอ (วินาที)
Btt2231	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Secondary/20-50%	5	0.062	0.063
Btt2232	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Secondary/20-50%	15	0.062	0.063
Btt2233	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Secondary/20-50%	30	-	0.063
Btt2234	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Secondary/20-50%	50	-	0.063
Btt2235	Z0=2.648+j27.9 Z1=7.384 +j21.39	Secondary/20-50%	20	0.062	0.063
Btt2236	Z0=2.648+j41.85 Z1=7.384 +j32.091	Secondary/20-50%	20	0.062	0.063



รูปที่ 6.27 ผลการทดสอบต่อสถานะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด ที่เฟส B
 และมีค่าความต้านทานสูงที่เวลา 0.042 วินาที

ในตารางที่ 6.11 และรูปที่ 6.27 แสดงผลการทำงานต่อสถานะกระแสฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวดแบบค่าความต้านทานสูง ในรูปที่ 6.28 แสดงผลในกรณีที่มี Bte2234 ซึ่งแสดงรูปคลื่นของเอาต์พุตทั้ง 5 ที่ประมวลผลมาจากส่วนประมวลเบื้องต้นเพื่อส่งให้ส่วนประมวลผลส่วนสุดท้ายตัดสินใจ และยังได้แสดงการเปรียบเทียบการสั่งปลดวงจรระหว่างหลักการที่นำเสนอเทียบกับหลักการเดิม ซึ่งหลักการที่นำเสนอสามารถสั่งปลดวงจรได้แม้ว่ากระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย แต่หลักการเดิมไม่สามารถมองเห็น จึงไม่สั่งปลดวงจร

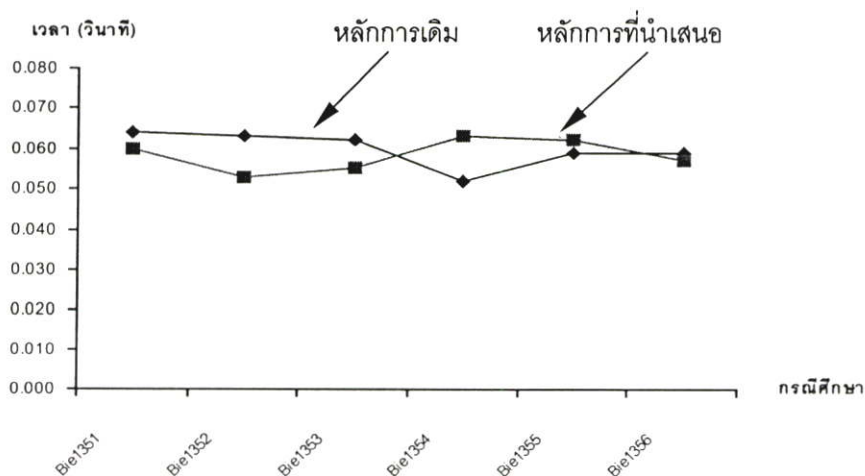


รูปที่ 6.28 ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับฟิวส์ซีลอจิกในการสั่งปลดวงจรต่อสถานะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวดแบบมีค่าความต้านทานสูง

6.2.3.6 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสภาวะกระแสฟอลต์ภายในที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดินขณะเริ่มจ่ายไฟซึ่งมีผลของกระแสอินรัช (Turn to Earth Fault During Energization)

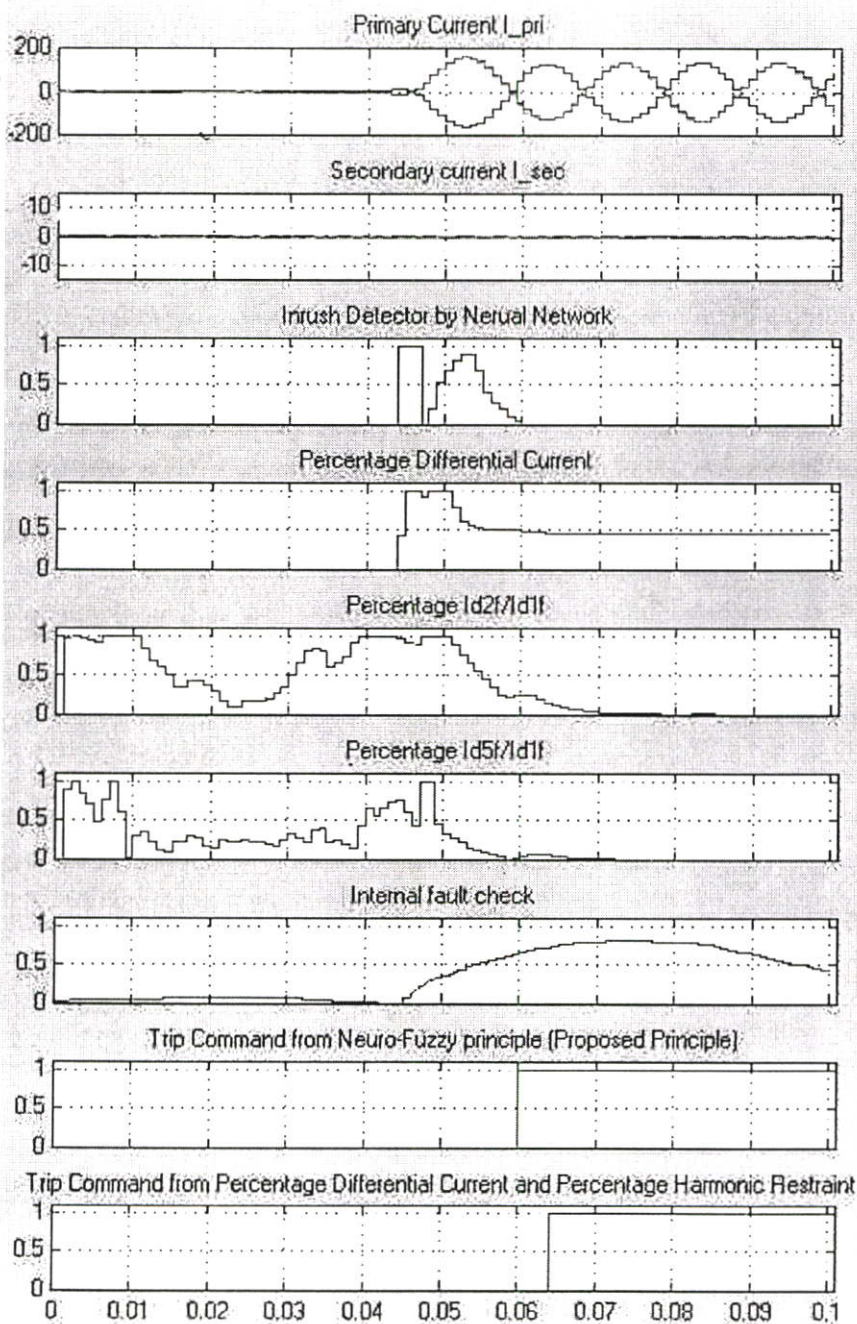
ตารางที่ 6.12 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดิน ที่เฟส B ขณะเริ่มจ่ายไฟที่เวลา 0.042 วินาที

กรณีศึกษา	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (Ohm)	ด้านของหม้อแปลงที่เกิดการฟอลต์ / จำนวนเปอร์เซ็นต์ของขดที่ลัดวงจรลงดิน ต่อขดลวดทั้งหมด	เวลาในการต่อวงจรของ SW1 (วินาที)	เวลาในการสั่งปลดวงจร (Trip) ของ Percentage ของ Diff. & Harmonic Restraint (วินาที)	เวลาในการสั่งปลดวงจร (Trip) ของหลักการที่นำเสนอ (วินาที)
Bie1351	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/50%	0.011666	0.064	0.060
Bie1352	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/50%	0.016666	0.063	0.053
Bie1353	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/50%	0.021666	0.062	0.055
Bie1354	Z0=2.648+j27.9 Z1=7.384 +j21.39	Primary/50%	0.026666	0.052	0.063
Bie1355	Z0=2.648+j41.85 Z1=7.384 +j32.091	Primary/50%	0.016666	0.059	0.062
Bie1356	Z0=2.648+j55.80 Z1=7.384 +j42.788	Primary/50%	0.016666	0.059	0.057



รูปที่ 6.29 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดิน ที่เฟส B ขณะเริ่มจ่ายไฟที่เวลา 0.042 วินาที

ในตารางที่ 6.12 และรูปที่ 6.29 แสดงผลการทำงานต่อสภาวะกระแสฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดินขณะเริ่มจ่ายไฟ ในรูปที่ 6.30 แสดงผลในกรณีที่ Bie1351 ซึ่งแสดงรูปคลื่นของเอาต์พุตทั้ง 5 ที่ประมวลผลมาจากส่วนประมวลเบื้องต้นเพื่อส่งให้ส่วนประมวลผลส่วนสุดท้ายตัดสินใจ และยังได้แสดงการเปรียบเทียบการสั่งปลดวงจรระหว่างหลักการที่น่าเสนอเทียบกับหลักการเดิม ซึ่งหลักการที่น่าเสนอสามารถสั่งปลดวงจรได้เร็วกว่า

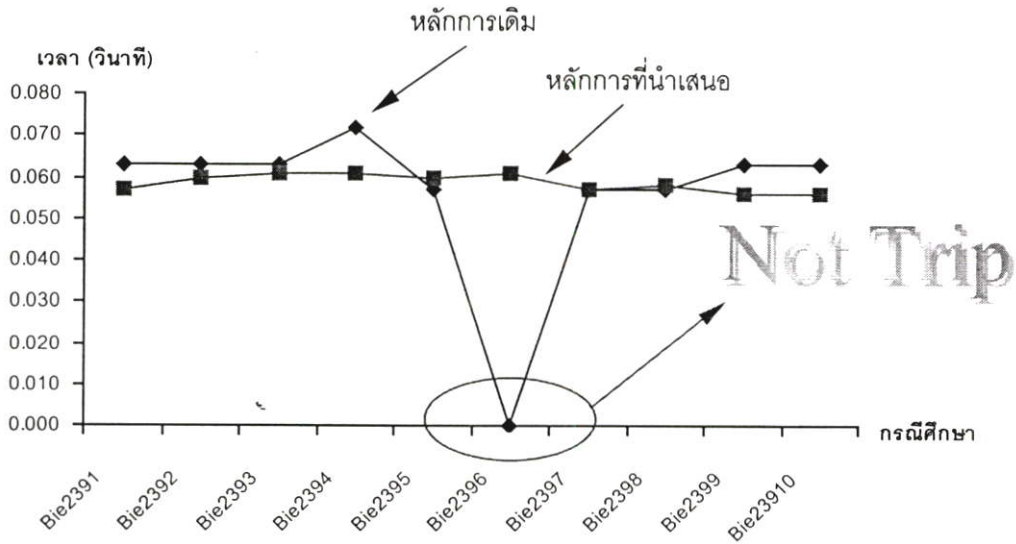


รูปที่ 6.30 ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับฟuzzyลอจิกในการสั่งปลดวงจรต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดินขณะเริ่มจ่ายไฟ

**6.2.3.7 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสถานะกระแสฟอลต์ภายในที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่าง
ขดลวดลงดินแบบมีค่าความต้านทานสูง ขณะเริ่มจ่ายไฟซึ่งมีผลของกระแสอินรัช (High
Impedance Turn to Earth Fault During Energization)**

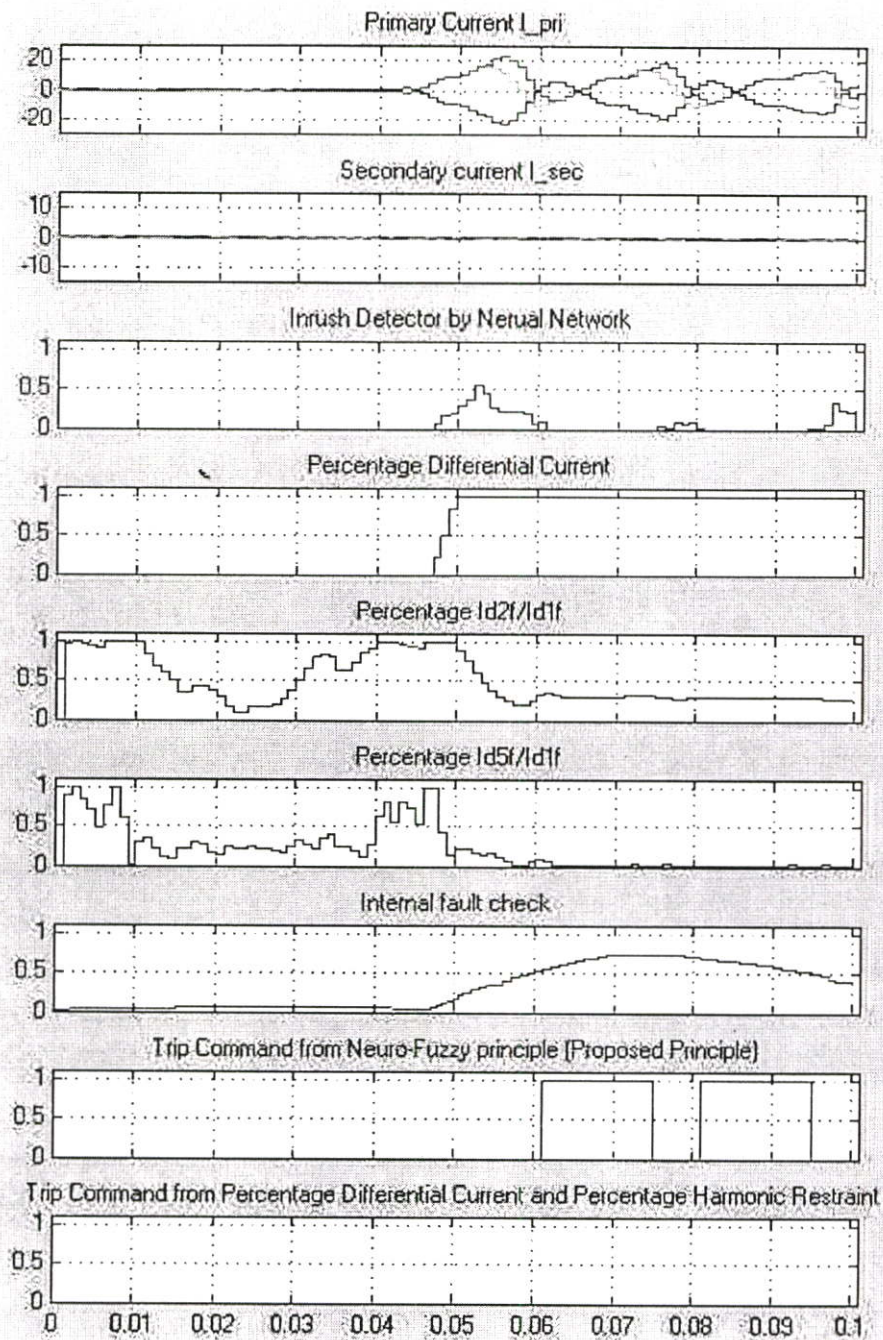
**ตารางที่ 6.13 ผลการทดสอบต่อสถานะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดิน ที่
เฟส B แบบมีค่าความต้านทานสูงขณะเริ่มจ่ายไฟที่เวลา 0.042 วินาที**

กรณี	ค่าอิมพีแดนซ์ของ สายส่งด้านปฐมภูมิ ของหม้อแปลง (Ohm)	ด้านของหม้อ แปลงที่เกิด การฟอลต์/ จำนวนเปอร์เซ็นต์ ของขดที่ลัดวงจร ลงดิน ต่อขดลวด ทั้งหมด	เวลาในการ ต่อวงจรของ SW1 (วินาที)	ค่าอิมพีแดนซ์ ณ จุดที่เกิด การ ฟอลต์เฟส B (Ohm)	เวลาในการสั่ง ปลดวงจร (Trip) ของ Percentage Diff. & Harmonic Restraint (วินาที)	เวลาใน การสั่ง ปลดวงจร (Trip)ของ หลักกรที่ นำเสนอ (วินาที)
Bie2391	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/90%	0.016666	5	0.063	0.057
Bie2392	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/90%	0.016666	10	0.063	0.060
Bie2393	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/90%	0.016666	20	0.063	0.061
Bie2394	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/90%	0.016666	30	0.072	0.061
Bie2395	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/90%	0.016666	30	0.057	0.060
Bie2396	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/90%	0.016666	50	-	0.061
Bie2397	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/90%	0.021666	30	0.057	0.057
Bie2398	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/90%	0.021666	50	0.057	0.058
Bie2399	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/90%	0.026666	30	0.063	0.056
Bie23910	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/90%	0.026666	50	0.063	0.056



รูปที่ 6.31 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟลัดต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดิน ที่เฟส B แบบมีค่าความต้านทานสูงขณะเริ่มจ่ายไฟที่เวลา 0.042 วินาที

ในตารางที่ 6.13 และรูปที่ 6.31 แสดงผลการทำงานต่อสภาวะกระแสฟลัดต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดินแบบมีค่าความต้านทานสูงขณะเริ่มจ่ายไฟ ในรูปที่ 6.32 แสดงผลในกรณีที่ Bie2396 ซึ่งแสดงรูปคลื่นของเอาต์พุตทั้ง 5 ที่ประมวลผลมาจากส่วนประมวลเบื้องต้น เพื่อส่งให้ส่วนประมวลผลส่วนสุดท้ายตัดสินใจ และยังได้แสดงการเปรียบเทียบการสั่งปลดวงจรระหว่างหลักการที่นำเสนอเทียบกับหลักการเดิม ซึ่งหลักการที่นำเสนอสามารถสั่งปลดวงจรได้เร็วกว่า และถูกต้องแม้ว่ามีส่วนประกอบฮาร์ดมอเน็คอันดับ 2 อยู่สูง

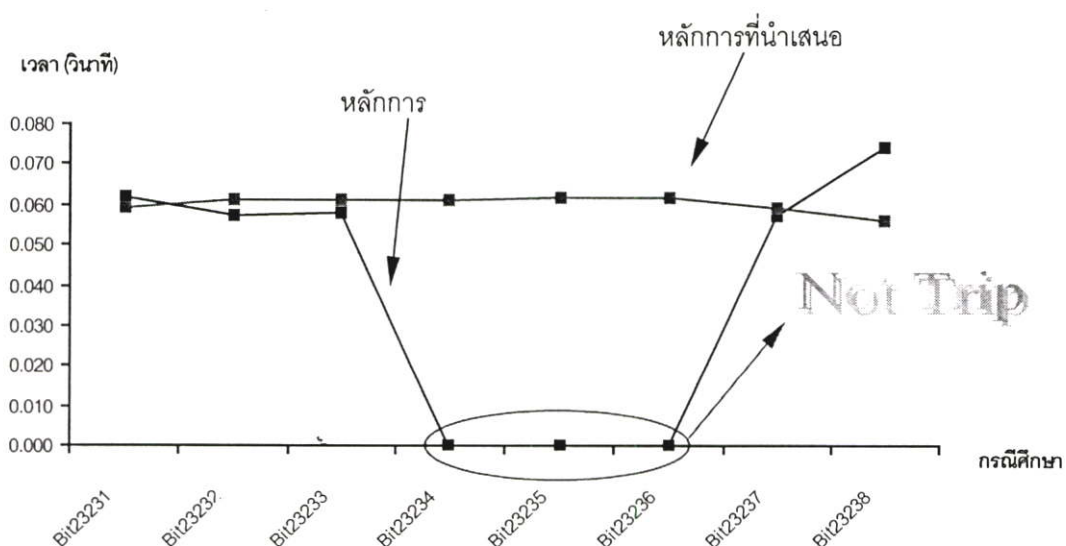


รูปที่ 6.32 ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับฟuzzyลอจิกในการสั่งปลดวงจรต่อสถานะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดินแบบมีค่าความต้านทานสูงขณะเริ่มจ่ายไฟ

6.2.3.8 ผลการทำงานของรีเลย์ต่อสภาวะกระแสฟอลต์ภายในที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่าง
 รอบขดลวดแบบมีค่าความต้านทานสูง ขณะเริ่มจ่ายไฟซึ่งมีผลของกระแสอินรัช (High
 Impedance Turn to Turn Fault During Energization)

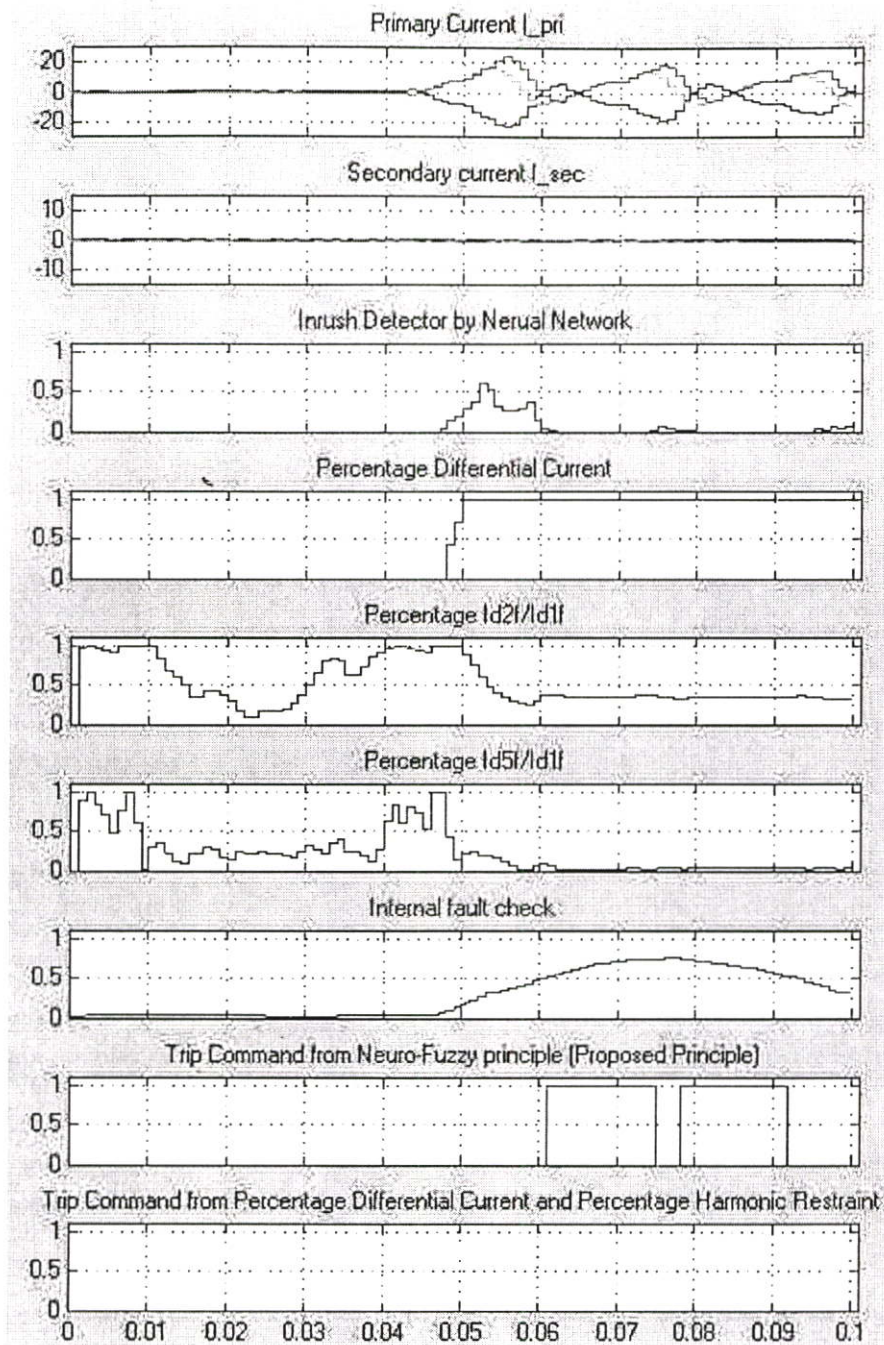
ตารางที่ 6.14 ผลการทดสอบต่อสภาวะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด ที่
 เฟส B แบบมีค่าความต้านทานสูงขณะเริ่มจ่ายไฟที่เวลา 0.042 วินาที

กรณีที่	ค่าอิมพีแดนซ์ของ สายส่งด้านปฐมภูมิ ของหม้อแปลง (Ohm)	ด้านของหม้อแปลง ที่เกิดการฟอลต์ / จำนวนเปอร์เซ็นต์ ของขดที่ลัดวงจร ลงดิน ต่อขดลวด ทั้งหมด	เวลาใน การต่อวง จรของ SW1 (วินาที)	ค่าอิมพีแดนซ์ ณ จุดที่เกิด การ ฟอลต์เฟส B (Ohm)	เวลาในการสั่ง ปลดวงจร (Trip) ของ Percentage Diff. & Harmonic Restraint (วินาที)	เวลาในการ สั่งปลดวงจร (Trip)ของ หลักการที่นำ เสนอ (วินาที)
Bit23231	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/ 20-50%	0.011666	5	0.062	0.059
Bit23232	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/ 20-50%	0.011666	10	0.057	0.061
Bit23233	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/ 20-50%	0.011666	15	0.058	0.061
Bit23234	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/ 20-50%	0.016666	20	-	0.061
Bit23235	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/ 20-50%	0.016666	30	-	0.062
Bit23236	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/ 20-50%	0.016666	30	-	0.062
Bit23237	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/ 20-50%	0.021666	30	0.057	0.059
Bit23238	Z0=2.648+j13.95 Z1=7.384 +j10.697	Primary/ 20-50%	0.021666	50	0.074	0.056



รูปที่ 6.33 ผลการทดสอบต่อสถานะฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด ที่เฟส B แบบมีค่าความต้านทานสูงขณะเริ่มจ่ายไฟที่เวลา 0.042 วินาที

ในตารางที่ 6.14 และรูปที่ 6.33 แสดงผลการทำงานต่อสถานะกระแสฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวดแบบมีค่าความต้านทานสูงขณะเริ่มจ่ายไฟ ในรูปที่ 6.34 แสดงผลในกรณีที่ Bie23234 ซึ่งแสดงรูปคลื่นของเอาต์พุตทั้ง 5 ที่ประมวลผลมาจากส่วนประมวลเบื้องต้น เพื่อส่งให้ส่วนประมวลผลส่วนสุดท้ายตัดสินใจ และยังได้แสดงการเปรียบเทียบการสั่งปลดวงจรระหว่างหลักการที่นำเสนอเทียบกับหลักการเดิม ซึ่งหลักการที่นำเสนอสามารถสั่งปลดวงจรได้ถูกต้องกว่าแม้ว่ามีส่วนประกอบฮาร์ดแวร์อันดับ 2 อยู่สูง และค่ากระแสผลต่างมีค่าน้อย



รูปที่ 6.34 ผลการทำงานของหลักการที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับฟัซซี่ลอจิกในการสั่งปลดวงจรต่อสภาวะฟอลต์ภายในระหว่างรอบขดลวดแบบมีค่าความต้านทานสูงขณะเริ่มจ่ายไฟ

บทที่ 7

บทสรุป

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า การนำเอาระบบโครงข่ายประสาทยูทิลิตี้ร่วมกับฟิวส์ลอคจิกมาทำเป็นแบบจำลองรีเลย์ป้องกันหม้อแปลง สามารถชดเชยข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นได้ในแบบจำลองรีเลย์ที่ใช้หลักการหา Percentage Differential Current ร่วมกับการใช้หลักการ Harmonic Restraint

ซึ่งหากวิเคราะห์การทำงานในส่วนประมวลผลย่อยเบื้องต้นของหลักการที่นำเสนอ โดยเริ่มจากการตรวจจับกระแสอินรัช จะเห็นได้ว่าหลักการที่นำเสนอจะมีส่วนตรวจจับสภาวะดังกล่าวอยู่ 2 ส่วนคือการใช้ระบบโครงข่ายประสาทยูทิลิตี้ซึ่งสามารถแยกแยะรูปคลื่นตามการเรียนรู้ที่ได้รับ และอีกส่วนได้แก่ส่วนการหาค่าอัตราส่วนฮาร์มอนิกของกระแสผลต่าง ซึ่งทั้ง 2 ส่วนส่งเอาข้อมูลที่ให้กับส่วนประมวลผลสุดท้ายซึ่งรับข้อมูลในแต่ละส่วนมาตัดสินใจอีกที จากการทดลองจะพบว่า การนำเอาระบบโครงข่ายประสาทยูทิลิตี้มาเป็นส่วนเสริม ในการตรวจจับกระแสอินรัชสามารถแยกแยะกระแสอินรัชได้รวดเร็วกว่า และมีโอกาสผิดพลาดน้อยกว่าการใช้หลักการ Harmonic Restraint เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากการใช้หลักการหน่วงโดยใช้ผลของส่วนประกอบฮาร์มอนิกเพียงอย่างเดียวจะมีโอกาสผิดพลาดในกรณีที่กระแสอินรัชที่วัดมีค่าอัตราส่วนส่วนประกอบฮาร์มอนิกอันดับ 2 อยู่ต่ำ หรือมีการตั้งค่าเซตคั้งอัตราส่วน I_{d2}/I_{d1} ไว้สูง ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีของการนำไปป้องกันหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดเป็นชนิดเคลด้า ทั้งนี้ประสิทธิภาพของการตรวจจับโดยใช้โครงข่ายประสาทยูทิลิตี้จะขึ้นกับจำนวนข้อมูลที่ใช้เป็นตัวอย่างในการฝึกหัด และชนิดของโครงสร้างภายในของโครงข่ายประสาทยูทิลิตี้ เช่น จำนวนอินพุตของระบบที่กำหนดเพื่อให้ครอบคลุมความยาวของรูปคลื่น (Data Window for Processing) ในงานวิจัยนี้จะเน้นการแยกแยะในส่วนจากรูปร่างเป็นหลัก ซึ่งรูปร่างของกระแสอินรัชจะขึ้นอยู่กับการคำนวณแม่เหล็กคดค้างในแกนเหล็ก (Residual Flux in Core) ซึ่งขึ้นอยู่กับการตำแหน่งของรูปคลื่นขณะปลดวงจร (Interrupting Angle) ค่ามุมของรูปคลื่นไซน์ขณะต่อวงจร (Energizing Angle) ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย ชนิดการต่อขดลวดของหม้อแปลง (Transformer Winding Connection) ดังนั้นในการสอนให้ระบบโครงข่ายประสาทยูทิลิตี้เรียนรู้กระแสอินรัชอย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องจำลองรูปคลื่นกระแสอินรัชให้ครอบคลุมเงื่อนไขต่างๆ ในการทดลองจะพบว่าระบบโครงข่ายประสาทยูทิลิตี้สามารถจดจำกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในขดลวดที่ต่อแบบสตาร์ได้ดีกว่าขดลวดที่ต่อแบบเคลด้า

ในอีกส่วนของการทำงานของระบบโครงข่ายประสาทยูทิลิตี้ที่ถูกนำมาใช้ได้แก่ส่วนชดเชยความผิดพลาดของรูปคลื่นกระแส อันเนื่องมาจากแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวต่อค่าสนามแม่เหล็ก ซึ่งได้ถูกออกแบบให้สามารถชดเชยรูปคลื่นที่ขาดหายไปออกมา ซึ่งสิ่งที่มีผลต่อการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นได้แก่ ค่า X/R ของแหล่งจ่ายไฟ ส่วนค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor)

ของภาวะที่ต่ออยู่กับหม้อแปลง จะมีผลต่อขนาดของส่วนประกอบกระแสลับซึ่งยังผลให้เกิดการอิ่มตัวทั้งด้านบวกและลบ ส่วนค่าภาระของหม้อแปลงกระแส (Burden) จะมีผลต่อความรุนแรงของการอิ่มตัวในแกนเหล็ก สิ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการชดเชยความผิดเพี้ยนของระบบโครงข่ายประสาทยุทิม ได้แก่ โครงสร้างของโครงข่ายที่ได้ออกแบบไว้ อันได้แก่ จำนวนอินพุตของระบบที่กำหนดเพื่อให้ครอบคลุมความยาวของรูปคลื่น ซึ่งหากกำหนดให้ครอบคลุมรูปคลื่นที่ยาวกว่า จะให้ผลการชดเชยที่ดีในกรณีของการเกิดอิ่มตัวในแกนเหล็กเนื่องจากผลของส่วนประกอบกระแสตรง ซึ่งมีการลดลงของกระแสตรง (DC Decaying Current) ในการทดลองพบว่าโครงข่ายที่ออกแบบไว้ให้ผลการชดเชยได้ทั้งการอิ่มตัวจากผลของกระแสลับ (AC Saturation) และ จากผลของกระแสตรง (DC Saturation) จะทำงานผิดพลาดไม่เกิน 15 % ในแง่ของรูปร่างและขนาด ซึ่งหากต้องการให้ผลการชดเชยมีค่าผิดพลาดน้อยกว่านี้จำเป็นต้องเพิ่มความถี่ในการสุ่ม ซึ่งในการทดลองนี้ได้กำหนดความถี่ในการสุ่มไว้เพียง 1000 MHz หรือ 20 ค่าต่อ 1 รูปคลื่น ส่วนอีกวิธีคือการแยกการชดเชยความผิดเพี้ยนเนื่องจากการอิ่มตัวจากผลของกระแสลับ (AC Saturation) และ จากผลของกระแสตรง (DC Saturation) ออกจากกัน

สำหรับการประมวลผลในส่วนตรวจสอบการเกิดฟอลต์ภายใน (Internal Fault Check) เป็นการนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดภายในหม้อแปลง นำมาหาค่าเฉลี่ยออกมาเป็นเอาต์พุตสำหรับยืนยันว่าเป็นการฟอลต์ภายในจริง ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงในเชิงขนาดของในแต่ละเฟสระหว่างด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงผลรวมของกระแสทั้ง 3 เฟส ระหว่างด้านปฐมภูมิ และ ด้านทุติยภูมิ เทียบกับสภาวะก่อนการเกิดฟอลต์ และการวิเคราะห์ความสัมพันธ์กระแสตกค้าง (Residual Current) ระหว่างด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ ซึ่งในกรณีที่เกิดการฟอลต์ภายในที่แท้จริง ค่าเฉลี่ยที่ได้จะสูงกว่าทุกๆ กรณี

ในส่วนประมวลผลสุดท้ายซึ่งได้เลือกใช้ฟิชชี่ลอจิกที่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการอินเฟอร์เรนซ์ เพื่อให้เหมาะสมกับข้อมูล และเอาต์พุตที่ต้องการในช่วงการเรียนรู้ ซึ่งข้อดีของการใช้ระบบฟิชชี่ดังกล่าวคือ ไม่ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการกำหนดกฎต่างๆ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถสร้างขึ้นมาโดยอาศัยการเรียนรู้แทน ข้อดีอีกอย่างในการเลือกใช้ฟิชชี่ลอจิกเช่นกระบวนการตัดสินใจขั้นสุดท้ายคือในกรณีที่อินพุตที่รับเข้ามีค่าไม่ชัดเจน ค่าเอาต์พุตที่ระบบส่งออกไปจะขึ้นอยู่กับระดับความเป็นสมาชิกของแต่ละอินพุต ซึ่งหากได้รับการฝึกหัด โดยข้อมูลที่ครอบคลุมสภาวะต่างๆ ค่าเอาต์พุตที่ได้จะมีความต่อเนื่องและถูกต้องในทุกกรณี

จากโครงสร้าง และหลักการที่นำเสนอสามารถสรุปได้ว่าหากมีการเตรียมข้อมูลในการฝึกหัดระบบโครงข่ายประสาทยุทิมและฟิชชี่ลอจิก ให้มีความสามารถในการแยกแยะ (Recognition) และมีการครอบคลุมในทุกๆกรณี (Generalization) โดยการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อรูปร่างของรูปคลื่น และขนาดอย่างทั่วถึง จะทำให้ประสิทธิภาพของการนำเอาหลักการดังกล่าวไปใช้ในการ

ป้องกันหม้อแปลงดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้นในการใช้หลักการ Percentage Differential Current ร่วมกับการใช้หลักการ Harmonic Restraint สำหรับตรวจสอบการเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลง ได้ถูกทำให้ลดลงในหลักการที่นำเสนอ เช่นการเกิดฟอลต์ในขณะเริ่มจ่ายไฟซึ่งมีผลส่วนประกอบของฮาร์โมนิกอันดับ 2 อยู่สูง หรือ การผิดเพี้ยนของรูปคลื่นเนื่องจากอิมิตัวในแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแสนมีผลทำให้เกิดมีส่วนประกอบของฮาร์โมนิกอยู่สูง หรือมีค่าผลต่างกระแสต่ำ ซึ่งหากเปรียบเทียบผลการทำงานของหลักการที่นำเสนอกับหลักการเดิมเป็นไปดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำงานระหว่างหลักการที่นำเสนอกับหลักการเดิม

กรณีศึกษา	รีเลย์		หลักการที่นำเสนอ
	หลักการ Percentage Diff. Current & Harmonic Restraint		
	ใช้ค่าเฉลี่ยฮาร์โมนิก 3 เฟส หรือต่อ CT เป็น Delta	ใช้ค่าฮาร์โมนิก 1 เฟส	
Inrush Current	Good	Not Good	Good
Internal Fault during energization	Not Good	Good	Good
Internal Fault	Good	Good	Good
High Impedance Internal Fault	Fare	Fare	Good
Internal Fault with CT Saturation	Fare	Fare	Good
External Fault	Good	Good	Good
External Fault with CT Saturation	Fare	Fare	Good

โดยสรุปแล้ว หลักการที่นำเสนอมักจะมีทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการใช้หลักการ Percentage Differential Current ร่วมกับการใช้หลักการ Harmonic Restraint ในกรณีดังต่อไปนี้

- ในกรณีเกิดฟอลต์ภายใน ขณะเริ่มจ่ายไฟให้กับหม้อแปลง หลักการที่นำเสนอสามารถส่งปลดวงจรได้เร็วกว่า
- สามารถทำงานอย่างมีประสิทธิภาพผลของกระแสในรัช แม้ว่าจะมีอัตราส่วนขนาดของส่วนประกอบฮาร์โมนิกอันดับ 2 ต่อฮาร์โมนิกอันดับ 1 ของกระแสผลต่าง จะมีค่าค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากการตัดสินใจจะไม่ขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนของส่วนประกอบฮาร์โมนิกเพียงอย่างเดียว
- ในกรณีที่กระแสที่วัดได้ผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากการอิมิตัวของแกนเหล็กหม้อแปลงกระแส หลักการที่นำเสนอยังคงทำงานได้อยู่ ทั้งนี้ความถูกต้องในการทำงานจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการจดจำ และจำนวนข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ของระบบโครงข่ายประสาทเทียม

- ในกรณีที่เกิดฟอลต์ภายในชนิดที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง จนมีผลทำให้การใช้หลักการ Percentage Differential Current ไม่สามารถตรวจพบ แต่รีเลย์ที่นำเสนอสามารถตรวจพบได้ ซึ่งอาศัยการตรวจสอบความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของกระแสระหว่างด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิเทียบกับสภาวะก่อนการเกิดฟอลต์
- สามารถหาจุดที่เหมาะสมระหว่างความไวในการปลดวงจร (Sensitivity) และความถูกต้องในการตัดสินใจ (Reliability) ได้ดีกว่า นั้นหมายความว่าหลักการดังกล่าวจะทำงานได้อย่างรวดเร็วหากข้อมูลที่ผ่านการประมวลผลเบื้องต้นมีความชัดเจนว่าเกิดการฟอลต์ภายใน และในกรณีที่ไม่ชัดเจน การตัดสินใจจะขึ้นอยู่กับระดับความชัดเจน ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความเป็นสมาชิกที่ได้รับการปรับแต่งจากการเรียนรู้
- ลดความผิดพลาดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีของการตั้งค่าเซตคั้ง ที่ไม่เหมาะสมของค่าอัตราส่วนผลต่างกระแสต่อผลรวมกระแส (Percentage Differential Current) และค่าอัตราส่วนประกอบฮาร์โมนิกสำหรับการหน่วง (Harmonic Restraint) ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในรีเลย์ที่ใช้หลักการเดิม

เนื่องจากในการเรียนรู้ของฟัซซี่ลอจิกที่ปรับค่าพารามิเตอร์ได้ จะใช้เวลาค่อนข้างนาน ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของจำนวนกฎที่มีอยู่ถึง 243 กฎ ซึ่งในแต่ละกฎจะมีพารามิเตอร์ที่ต้องปรับปรุงถึง 2 ส่วนได้แก่ ฟรอมิสพารามิเตอร์ ซึ่งใช้ฟังก์ชันของค่าความเป็นสมาชิกเป็นชนิดซิกมอยด์ และในส่วนของคอนซีควันทพารามิเตอร์ ดังนั้นในงานทดลองนี้ การเรียนรู้อย่างยังไม่สิ้นสุด นั้นหมายความว่าระบบยังไม่เข้าสู่จุดค่าสุด (Global Optimum Point) และระบบสามารถเรียนรู้เพื่อที่จะปรับเข้าหาจุดที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดได้อีก

อย่างไรก็ตามเนื่องจากในการทดลองนี้ได้ทำการจำลองการทดสอบสำหรับกระแสฟอลต์ที่ไหลผ่านหม้อแปลงด้านเดียวซึ่งเป็นหม้อแปลงที่จ่ายโหลดปกติ ดังนั้นในการพัฒนาปรับปรุงต่อไป ควรทำการทดสอบการฟอลต์แบบกระแสไหลทั้งสองด้าน ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้กับหม้อแปลงที่ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Transformer) ในส่วนของการนำหลักการดังกล่าวไปพัฒนาให้อยู่ในรูปของ Hardware จำเป็นต้องคำนึงถึงความเร็วของตัวประมวลผล ทั้งนี้เนื่องจากในหลักการที่นำเสนอมีส่วนประมวลผลที่ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม ยกตัวอย่างเช่น ในส่วนของการชดเชยความผิดพลาดของรูปคลื่นอันเนื่องมาจากการอิมพัลส์ของหม้อแปลงกระแส ที่จะต้องคำนวณและประมวลผลการชดเชยออกมภายในระยะเวลา 1 ค่าสุ่ม (Sampling Time) สำหรับในการทดลองนี้คือเวลา 1 มิลลิวินาที ซึ่งหากต้องการความแม่นยำสูง ระบบโครงข่ายก็จำเป็นต้องออกแบบให้ใหญ่ขึ้นตาม นั้นหมายความว่าเวลาที่ใช้ในการประมวลผลย่อมมากตามไปด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] ABB Network Partner. 1996. **User's manual and technical description of SPAD346 C stabilized differential relay**, Finland
- [2] SEG. 1997 **User's manual and technical description of IRD1-T2 Transformer differential Protection relay**
- [3] GE 1997 **User's manual and technical description of DTP Transformer Protection relay**
- [4] J.-S. R. Jang, C.-T. Sun and E. Mizutani. 1997, **Neuro-Fuzzy and Soft Computing** : Preice-hall International Inc
- [5] Brandwajn V, Dommel H. W and Dommel I.I. 1982. "Matrix Representation of Three-Phase N-Winding Transformer for Steady-state and Transient Studies" IEEE Trans. on Power Apparatus and systems, Vol.PAS-01, No.6, 1369-1978
- [6] BPA 1987-1996, **Alternative Transient Program (ATP) rule book USA**
- [7] L. Prikler and Hans Kr. Hoidalen. 1998, **ATPDraw for Windows 3.1x/95/NT version 1.0 User's Manual**, SINTEF Energy Research, Trondheim, Norway
- [8] A. Narang and R. H. Brierley. 1994 "Topology based magnetic model for steady-state and transient studies for three phase core type transformers" IEEE Trans. on Power systems, Vol.9, No.3, 1337-1349
- [9] Xusheng Chen and S.S Venkata. 1997. "A Three phase three winding core-Type Transformer model for low-frequency transsient studies" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.12 , No.2 , 775-782
- [10] Patrick Bastard , Pierre Bertrand and Michel Meunier. 1994. "A Transformer medel for winding fault studies" IEEE Trans. on Power Delivery , Vol.9 , No.2 , 690-699
- [11] A.I Megahed. 2001. " A Model for simulating internal earth faults in transformer" IEE Developments in Power System Protection, No.479, 775-782
- [12] P. P. Buckle, K L Butler, N.D.R. Sarma and A. Kopp. 1999. "Simulation of Incipient Transformer Fault" IEEE Trans. on Power Delivery.
- [13] R.K Aggarwal and P Mao. 1998. " Digital simulation of the transient phenomena in high voltage power transformers with particular reference to accurate fault detection" IEE International conference on Simulation , No.457, 390-397

- [14] M. Kezunovic, C.W. Fromen and F. Phillips. 1994. "Experimental Evaluation of EMTP based current transformer models for protective relay transient study" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.9, No.1, 405-413
- [15] R. Flolker, SEL. "Determine current transformer suitability using EMTP model" SEL Inc. Pullman, WA, USA
- [16] Luis F. Perez, Alfred j. Flechsig, Jack L.Meador and Zoran Obradovic. 1994. "Training an artificial neural network to discriminate between magnetizing inrush and internal faults" IEEE Trans. on Power Delivery , Vol.9 ,No.1 ,434-441
- [17] P. Bertrand, E. Martin and M. Guillot. 1997. "Neural Networks, Amateur Technique for protection relay" IEE Conference Publication, No.483, 1.22.1-1.22.5
- [18] J. Pihler, B. Grcar and D. Dolinar. 1997. "Improved operation of Power transformer protection using artificial neural network" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.12 , No.3, 1128-1136

ภาคผนวก ก.

การคำนวณค่าพารามิเตอร์สำหรับโปรแกรม EMTP - ATP ที่ใช้ในงานวิจัย

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์สำหรับโปรแกรม BCTRAN, SATURA และ HYSDAT เพื่อสร้าง
แบบจำลองของหม้อแปลง A

ผลการทดสอบหม้อแปลง A (จาก EMTP rule book) เป็นดังต่อไปนี้

Power rating S/winding connection :	35.0 MVA/YNyn0
Voltage rating :	132.0 / 11.05 kV
Current rating :	153.08/1828.76 A
Positive Excitation losses (Open HV) :	18.112 kW
Positive Excitation current :	2.39 A
Positive Excitation voltage (Energized at rated voltage):	11.01 kV
Positive Short-circuit losses(Short LV) :	192.53 kW
Positive Short-circuit current (Energized at raged current) :	153.1 A
Positive Short-circuit voltage :	35.213 kV
Zero Excitation losses (Open HV) :	115.325 kW
Zero Excitation current :	500.0 A
Zero Excitation voltage :	1.183 kV
Zero Short-circuit losses(Short LV) :	8.825 kW
Zero Short-circuit current :	70. A
Zero Short-circuit voltage :	2.86 kV

จากรายงานผลการทดสอบ ผลของข้อมูลในการทดสอบหม้อแปลงแบบจ่ายกระแสกระตุ้น
จะใช้ในการป้อนให้กับการ์ดที่ 4 ของโปรแกรมย่อย BCTRAN

NW = 2 ทั้งนี้เนื่องจากเรามีขดลวดอยู่ 2 ขด

FREQ = 50.0 (Hz)

IEXPOS = 0.1316 (%)

เนื่องจากว่าในการทำ direct excitation test homopolar excitation test นั้นไม่ได้ทำใน
สถานะแรงดันปกติ ดังนั้นค่ากระแสกระตุ้นจึงต้องมีการปรับคั้งข้างล่างนี้

$$I_0 = 2.39 \times \frac{11.05}{11.01} = 2.4074 \text{ A}$$

จากนั้นทำให้อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์จะได้

$$IEXPOS = 2.4074 \times 10^{-3} \times \frac{\sqrt{3} \times 11.05}{35} \times 100 = 0.1316\%$$

$$SPOS = 35.0 \text{ (MVA)}$$

$$LEXPOS = 18.244 \text{ (kW)}$$

เนื่องจากว่าในการทำ direct excitation test นั้นไม่ได้ทำในสภาวะแรงดันปกติ ดังนั้นค่า Excitation Loss จึงต้องมีการปรับตั้งข้างล่างนี้

$$LEXPOS = 18.112 \times \left(\frac{11.05}{11.01} \right)^2 = 18.244 \text{ kW}$$

$$IEXZERO = 49.15 \text{ (\%)}$$

เนื่องจากว่าในการทำ Homopolar excitation test นั้นไม่ได้ทำในสภาวะแรงดันปกติ ดังนั้นค่ากระแสกระตุ้นลำดับศูนย์จึงต้องมีการปรับตั้งข้างล่างนี้

$$I_0 = \frac{500}{3} \times \frac{11.05}{\sqrt{3} \times 1.183} = 898.81 \text{ A}$$

จากนั้นทำให้อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์จะได้

$$IEXZERO = 898.81 \times 10^{-3} \times \frac{\sqrt{3} \times 11.05}{35} \times 100 = 49.15\%$$

$$SZERO = 35.0 \text{ (MV)}$$

$$LEXZERO = 3353.93 \text{ (kW)}$$

$$LEXZERO = 115.325 \times \left(\frac{11.05}{\sqrt{3} \times 1.183} \right)^2 = 3353.93 \text{ kW}$$

NP = 0 เนื่องจากเป็นหม้อแปลงชนิด 3 เฟส

IT = 2 เนื่องจากการทำ Excitation Test ได้ทำในด้านแรงต่ำ

IW = 2 เนื่องจาก magnetizing branch ควรจะต่อที่ทางด้านขดลวดแรงต่ำ

IP = -1 ซึ่งเราต้องการให้อาชีพุดของโปรแกรมอยู่ในรูปของ [A]-[R] และ [R]-[ωL]

สำหรับการ์ดที่ 5 เราจะข้อมูลทั่วไปจากโครงสร้างของหม้อแปลง ในการป้อนนั้น โปรแกรมจะกำหนดให้เริ่มป้อนจากขดลวดที่มีแรงดันสูงสุด:

K = 1 (HV-winding) ซึ่งหมายความว่าขดลวดชุดที่ 1 เป็นชุดที่มีแรงดันสูงสุด

VRAT1 = 76.21 (kV) เป็นค่าแรงดันเฟสกับกราวด์เนื่องจากหม้อแปลงต่อแบบ WYE ($132/\sqrt{3}$)

R1 = 1.369 สำหรับค่า R นั้น หากเราไม่ป้อน โปรแกรมก็จะทำการคำนวณภายในเองสำหรับค่าดังกล่าวได้มาจาก

$$R_{s,h} = \frac{1}{3} \times \left(\frac{192530.0}{153.1^2} \right) = 2.738 \Omega$$

$$\text{hence, } R_1 = \frac{1}{2} R_{s,h} = 1.369 \Omega$$

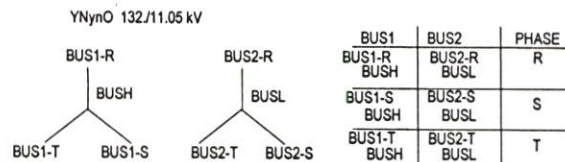
K = 2 (LV-winding) เป็นขดลวดที่มีแรงดันสูงเป็นลำดับต่อมา

VRAT2 = 6.38 (kV), เป็นค่าแรงดันเฟสกับกราวด์เนื่องจากหม้อแปลงต่อแบบ WYE ($11.05/\sqrt{3}$)

R2 = 0.00959 ซึ่งได้มาจาก

$$R_2 = R_1 \left(\frac{11.05}{132} \right)^2 = 0.00959 \Omega$$

ส่วนการกำหนดชื่อเทอร์มินอลของขดลวดจะเป็นดังต่อไปนี้



สำหรับการ์ดที่ 6 เราจะใช้ข้อมูลของการทดสอบหม้อแปลงแบบลัดวงจรมาป้อน ส่วนจำนวนการ์ดที่ต้องใช้สำหรับป้อนข้อมูลในส่วนนี้คือ A total of $NW \times (NW-1)/2 = 1$

I = 1

J = 2

P12 = 192.53 (kW) เนื่องจากการทำการทดสอบแบบลัดวงจรได้ทำในสภาวะปกติ

ZPOS12 = 26.691 (%) ได้มาจาก

$$ZPOS12 = \frac{35.213}{0.153} \times \frac{35/\sqrt{3}}{132^2} \times 100 = 26.691\%$$

SPOS = 35. (MVA)

ZZERO12 = 24.6213 (%) ได้มาจาก

$$ZZERO12 = 3 \times \frac{2860}{70} \times \frac{35}{132^2} \times 100 = 24.6213\%$$

SZERO = 35. (MVA)

ID= 0 หมายความว่าค่ารีแอกแตนซ์ลำดับศูนย์ (zero-sequence reactance) จะถูกคำนวณโดยอัตโนมัติ โดยการใช้ค่าความสูญเสียแบบมีภาระลำดับบวก (positive sequence load losses or short-circuit losses) ทั้งนี้เนื่องจากว่าเป็นหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด

IL = 1 หมายความว่าค่าความต้านทานของขดลวดจะถูกคำนวณโดยอัตโนมัติ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากใช้ค่าความสูญเสียแบบมีภาระลำดับบวก (Positive-sequence short-circuit losses) ทั้งนี้เนื่องจากเป็นหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด ส่วนค่าความต้านทานที่ได้ป้อนไว้ในการ์ดที่ 5 จะไม่นำมาคิด ดังนั้นเราจะได้ข้อมูลสำหรับการป้อนโปรแกรม BCTAN ดังต่อไปนี้

```
BEGIN NEW DATA CASE
ACCESS MODULE BCTAN
$ERASE
C |      FREQ|      IEXPOS|      SPOS|      LEXPOS|      IEXZERO|      SZERO|      LEXZERONPITIWIP
2 |      50. |      .1311 |      35. |      18.244 |      49.15 |      35. |      3353.93 0 2 2-1
C k|      VRAT|      R1| |bus1||bus2||bus1||bus2||bus1||bus2|
1 |      76.21|      |      BUS1_RBUSH BUS1_SBUSH BUS1_TBUSH
C k|      VRAT|      R2| |bus1||bus2||bus1||bus2||bus1||bus2|
2 |      6.38 |      |      BUS2_RBUSL BUS2_SBUSL BUS2_TBUSL
C | |      PIJ|      ZPOSIJ|      SPOS|      ZZEROIJ|      SHOMIDIL
1 2 |      192.53 |      26.691 |      35. |      24.6213 |      35. 0 1
BLANK CARD TERMINATE INPUT OF SHORT-CIRCUIT TEST DATA
$PUNCH
BLANK
BEGIN NEW DATA CASE
```

แต่อย่างไรก็ตามเมตริกซ์ที่ได้จากโปรแกรม BCTAN จะให้ผลของฟลักซ์แม่เหล็กในลักษณะที่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นในการที่ต้องการให้แบบจำลองหม้อแปลงมีการคำนึงถึงผลของความไม่เป็นเชิงเส้น สามารถทำได้โดยการต่อรีแอกเตอร์ที่เทอร์มินอล แต่ต้องแก้ไขค่าพารามิเตอร์ในส่วนของค่ากระแสกระตุ้นสำหรับโปรแกรม BCTAN

จากรายงานการทดสอบหม้อแปลง ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับบวก (LEXPOS) มีค่า 18.244 KW ที่แรงดัน 11.05 KV ดังนั้นในส่วน of ค่ากระแสกระตุ้นลำดับบวกของหม้อแปลง A ที่คิดเฉพาะค่าสูญเสียในแกนเหล็กจะเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$I_{cu,dir} \approx \frac{P_{ex,dir}}{\sqrt{3} \cdot U_{ex,dir}} \approx \frac{18.244KW}{\sqrt{3} \cdot 11.05KV} \approx 0.95A$$

$$IEXPOS = 0.95 \times \frac{\sqrt{3} \times 11.05KV}{35MVA} \times 100 = 0.051\%$$

โดยที่ $I_{cu,dir}$ คือค่ากระแสที่สูญเสียไปในแกนเหล็กจากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับบวก, $P_{ex,dir}$ คือค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับบวก และ $U_{ex,dir}$ คือค่าแรงดันกระตุ้นที่วัดได้จากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับบวกดังนั้น

และค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์ (LEXZERO) มีค่า 3353.93 KW ที่แรงดัน 6.37 KV ดังนั้นในส่วนของค่ากระแสกระตุ้นลำดับศูนย์ที่คิดเฉพาะค่าสูญเสียในแกนเหล็กจะเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$I_{cu,har} \approx \frac{P_{ex,har}}{3 \cdot U_{ex,har}} \approx \frac{3353.93KW}{3 \cdot 11.05 / \sqrt{3}KV} \approx 175.23A$$

$$IEXZERO = 175.23 \times 10^{-3} \times \frac{\sqrt{3} \times 11.05}{35} \times 100 = 9.582\%$$

โดยที่ $I_{cu,har}$ คือค่ากระแสที่สูญเสียไปในแกนเหล็กจากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์ $P_{ex,har}$ คือค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์ และ $U_{ex,har}$ คือค่าแรงดันกระตุ้นที่วัดได้จากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ต้องป้อนให้กับโปรแกรม BCTRAN ใหม่พร้อมทั้งเอาท์พุทเป็นดังนี้

```
C <++++> Cards punched by support routine on 14-Feb-00 23.38.18 <++++>
C ACCESS MODULE BCTRAN
C $ERASE
C C THREE PHASE 3LEGS TRANSFORMER REFERING TO BCTRAN MANUAL
C C      1      2      3      4      5      6      7
C C 34567890123456799012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678
C C |   FREQ|   IEXPOS|   SPOS|   LEXPOS|   IEXZERO|   SZERO|   LEXZERONPITIW
C C 2     50.    .0510    35.    18.244    9.58    35.    3353.93 0 2 2
C C K|   VRAT|   R1|| BUS1| BUS2| BUS1| BUS2| BUS1| BUS2|
C C 1    76.21          BUS1_R  BUS1_S  BUS1_T
C C K|   VRAT|   R2|| BUS1| BUS2| BUS1| BUS2| BUS1| BUS2|
C C 2     6.38          BUS2_R  BUS2_S  BUS2_T
C C | |   Pij|   ZPOSij|   SPOS|   ZZEROij|   SZEROIDIL|
C C 1 2   192.53  26.691    35.    24.6213    35. 0 1
C BLANK
$VINTAGE, 1,
1BUS2_R      4474.3522937706
2BUS2_S     -2218.976023356
              4474.3522937706
3BUS2_T     -2218.976023356
```

```

-2218.976023356
4474.3522937706

USE RL
$UNITS, 0.50E+02 , 0.
1BUS1_R      1.369233463069   .1122862197E7
2BUS2_R      0.0 93990.751529981
              .0095961038351 7868.5342443417
3BUS1_S      0.0 -552667.4916135
              0.0 -46266.85053601
              1.369233463069   .1122862197E7
4BUS2_S      0.0 -46266.85053601
              0.0 -3873.277869306
              0.0 93990.751529981
              .0095961038351 7868.5342443417
5BUS1_T      0.0 -552667.4916135
              0.0 -46266.85053601
              0.0 -552667.4916135
              0.0 -46266.85053601
              1.369233463069   .1122862197E7
6BUS2_T      0.0 -46266.85053601
              0.0 -3873.277869306
              0.0 -46266.85053601
              0.0 -3873.277869306
              0.0 93990.751529981
              .0095961038351 7868.5342443417

$VINTAGE, C,
$UNITS, -1.,-1.
USE RL

```

จากนั้นหาค่ารีแอกเตอร์ชนิดไม่เป็นเชิงเส้น และมีผลของฮิสเตอร์รีซิส (Type 96) มาต่อที่เทอร์มินอลของแบบจำลองหม้อแปลง ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้โปรแกรม SATURA และ HYSDAT รายละเอียดในการหาอินพุตสำหรับป้อนโปรแกรม SATURA เป็นดังต่อไปนี้

สำหรับข้อมูลที่จะต้องป้อนการ์ดที่ 4 จะเป็นค่าแรงดันฐาน (Base Voltage) กำลังไฟฟ้าฐาน (Base Power) และ ค่าความถี่

FREQ: คือ ค่าความถี่ที่ใช้งานของหม้อแปลง อยู่ในหน่วยเฮิรท์ จะมีค่าเท่ากับ 50 เฮิรท์

VBASE: คือ ค่าแรงดันฐานที่คิดต่อเฟสของอินพุตที่ป้อนอยู่ในหน่วยของกิโลโวลท์ มีค่าเท่ากับ $6.3566 \text{ KV} (11.01\text{KV} / \sqrt{3})$

SBASE: คือ ค่ากำลังไฟฟ้าฐานที่คิดต่อเฟสของอินพุตที่ป้อนอยู่ในหน่วยของเมกะโวลท์แอมป์ มีค่าเท่ากับ $11.666 \text{ MVA} (35\text{MVA} / 3)$

IPUNCH: เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุม ถ้ามีค่าเป็น 1 เอาท์พุตจะพิมพ์ค่าออกมา แต่ถ้าเป็นศูนย์ จะไม่มีเอาท์พุตพิมพ์ออกมา ในที่นี้ป้อน 1

KTHIRD: ถ้ามีค่าเป็น 0 เอาท์พุตที่ได้จะอยู่ในควอดแรนทแรก แต่ถ้ามีค่าเป็น 1 เอาท์พุตที่ได้จะอยู่ในควอดแรนทที่ 1 และ 3 ในที่นี้ป้อน 1

สำหรับข้อมูลที่ใช้ป้อนในการ์ดที่ 5 จะต้องป้อนค่ากระแส และแรงดันในแต่ละจุดบนเส้นโค้งของกระแสกระตุ้นต่อแรงดันกระตุ้น ($v_{rms} - i_{rms}$) โดยการป้อนจะต้องอยู่ในลักษณะของการป้อนค่าจากน้อยไปหามาก ค่ากระแสและแรงดันที่ป้อนจะต้องเป็นค่าเปอร์ยูนิตบนของค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้าฐานที่ได้ป้อนไว้ในการ์ดที่ 4 โดยจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

$$V_{base} = \frac{11.05KV}{\sqrt{3}} = 6.356KV$$

$$S_{base} = \frac{35MVA}{3} = 11.666MVA$$

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{V_{base}} = \frac{11.666MVA}{6.356KV} = 1.8287KA$$

ในส่วนของการแสดกระตุ้น (I_{ex}) เนื่องจากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นไม่ได้ทำในสภาวะปกติ คือกระทำที่แรงดัน 11.01 KV ดังนั้นค่ากระแสกระตุ้นจะต้องถูกปรับให้เป็นค่าในสภาวะปกติ และเนื่องจากกระแสกระตุ้นที่อ่านค่าได้จากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้น ซึ่งเป็นกระแสที่ประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ กระแสที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetizing Current, I_m) และกระแสที่สูญเสียไปในแกนเหล็ก (Core Loss Current, I_{cu}) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องประมาณค่ากระแสที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กเพื่อป้อนให้กับโปรแกรม จากผลการทดสอบของหม้อแปลงดังที่แสดงในตาราง 4.2 จะได้ค่า $I_{ex} = 2.39A$ $P_{ex} = 18.112KW$ และ $U_{ex} = 11.01KV$ ดังนั้นจุดบนเส้นโค้งกระแสกระตุ้น (Excitation Curve) ณ ที่แรงดัน 11.01KV จะมีค่ากระแสสร้างสนามแม่เหล็กดังต่อไปนี้

$$I_{ex} = 2.39 * \left(\frac{11.05}{11.01}\right) = 2.4074 A$$

$$P_{ex} = 18.112 * \left(\frac{11.05}{11.01}\right)^2 = 18.244 kW$$

$$I_{ex,w} \approx I_{ex} \text{ (harmonics neglected)}$$

$$I_{m,w} \approx \sqrt{I_{ex,w}^2 - I_{cu,w}^2}$$

$$I_{m,w} \approx \sqrt{I_{ex,w}^2 - \left(\frac{P_{ex,w}}{U_{ex,w}}\right)^2}$$

โดยที่ $I_{ex, w}$ คือ กระแสที่กระตุ้นขณะทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นต่อเฟส, $I_{cu, w}$ คือ ค่ากระแสที่สูญเสียไปในแกนเหล็กต่อเฟส, $P_{ex, w}$ คือ ค่ากำลังสูญเสียที่อ่านได้ต่อเฟส และ $U_{ex, w}$ คือ ค่าแรงดันกระตุ้นที่วัดได้ต่อเฟส, $I_{m, w}$ คือ ค่ากระแสที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กต่อเฟส ดังนั้น

$$I_{m, w} \approx \sqrt{2.4074^2 - \left(\frac{18.244 \text{ KW} / 3}{11.05 \text{ KV} / \sqrt{3}} \right)^2} = 2.2106 \text{ A}$$

หลังจากที่ได้ค่า $I_{m, w}$ กรอบทุกจุดการทำงานบนเส้นโค้งกระแสกระตุ้น (Excitation Curve) แล้ว ให้ปรับค่ากระแส และแรงดันที่สร้างสนามแม่เหล็กให้อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ โดยใช้สมการ $I_{RMS}(PU) = I_{RMS}(A) / I_{base}(A)$ และ $V_{RMS}(PU) = V_{RMS}(kV) / V_{base}(kV)$ โดยที่ข้อมูลอินพุตทั้งหมดที่จะนำไปป้อนให้กับโปรแกรม SATURA ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4

หลังจากนั้นนำค่า $U_{ex(Phase)}(PU)$ และ $I_{m, w}(PU)$ ป้อนเป็นอินพุตสำหรับโปรแกรมย่อย SATURA และเอาท์พุตที่ได้เป็นดังต่อไปนี้

```
C <++++> Cards punched by support routine on 08-Feb-00 19.25.10 <++++>
C SATURATION
C C FREQ | VBASE | SBASE | IPUNCH| KTHIRD|
C 50.0   6.3797 11.6666 1      1
C C Irms (pu) | Vrms (pu) |
C .7252      -3 .8235
C .8461      -3 .8823
C 1.2088     -3 1
C 2.6594     -3 1.0705
C 24.1771    -3 1.1352
C 72.5313    -3 1.1756
C
C          9999
-3.97890496E+02 -3.37617508E+01
-1.26985595E+02 -3.26015137E+01
-1.18918901E+01 -3.07434112E+01
-3.85899264E+00 -2.87187400E+01
-2.55765761E+00 -2.53385443E+01
-1.87549903E+00 -2.36498824E+01
1.87549903E+00 2.36498824E+01
2.55765761E+00 2.53385443E+01
3.85899264E+00 2.87187400E+01
1.18918901E+01 3.07434112E+01
1.26985595E+02 3.26015137E+01
3.97890496E+02 3.37617508E+01
          9999
```

จากนั้นเลือกจุดที่เกิดการอิ่มตัวที่ได้จากโปรแกรม SATURA มา 1 จุดเพื่อป้อนให้กับโปรแกรม HYSDAT ซึ่งใช้สำหรับสร้างเส้นโค้งที่มีผลของฮิสเตอร์รีซิส รายละเอียดของอินพุตที่จะต้องป้อนให้กับโปรแกรม HYSDAT สำหรับรีแอกเตอร์ที่นำมาต่อที่เทอร์มินอลของหม้อแปลง A และเอาท์พุต จะมีรายละเอียดดังข้างล่างนี้

```

C <++++> Cards punched by support routine on 08-Feb-00 19.40.25 <++++>
C HYSTERESIS
C $ERASE
C C ITYPE | LEVEL |
C      1      4
C C CURSAT| FLXSAT|
C 126.98  32.6
-4.76175000E+01 -3.18329412E+01
-3.17450000E+01 -3.16411765E+01
-1.42852500E+01 -3.09700000E+01
-6.34900000E+00 -3.02988235E+01
-2.38087500E+00 -2.97235294E+01
7.93625000E-01 -2.85729412E+01
2.77768750E+00 -2.72305882E+01
4.60302500E+00 -2.49294118E+01
5.55537500E+00 -2.10941176E+01
6.34900000E+00 -1.53411765E+01
7.93625000E+00 1.02594118E+01
8.72987500E+00 1.41905882E+01
1.11107500E+01 1.91764706E+01
1.42852500E+01 2.30117647E+01
1.73010250E+01 2.49294118E+01
2.26183125E+01 2.68470588E+01
3.09513750E+01 2.85729412E+01
4.24589375E+01 2.99152941E+01
5.55537500E+01 3.08741176E+01
7.93625000E+01 3.18329412E+01
1.26980000E+02 3.26000000E+01
1.74597500E+02 3.27917647E+01
          9999.

```

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์สำหรับโปรแกรม BCTAN, SATURA และ HYSDAT เพื่อสร้างแบบจำลองของหม้อแปลง B

ผลการทดสอบหม้อแปลง B (จาก บริษัท เอบีบี จำกัด Serial no. 56039) เป็นดังต่อไปนี้

- Power rating S/winding connection : 50.0 MVA/YNyn0
- Voltage rating : 115.0 / 23 kV
- Current rating : 251.02/1255.11A
- Positive Excitation losses (Open HV) : 22.18 kW
- Positive Excitation current : 0.922 A
- Positive Excitation voltage (Energized at rated voltage) : 23 kV
- Positive Short-circuit losses (Short LV) : 148.10 kW
- Positive Short-circuit current (Energized at raged current) : 251.07 A
- Positive Short-circuit voltage : 14.44 kV
- Zero Excitation losses (Open HV) : 221.0 kW
- Zero Excitation current : 200 A
- Zero Excitation voltage : 1.993 kV
- Zero Short-circuit losses (Short LV) : 345.0 kW

Zero Short-circuit current : 200.2 A

Zero Short-circuit voltage : 3.224 kV

จากผลการทดสอบหม้อแปลง ทำให้เราได้ข้อมูลที่ใช้ป้อนให้กับโปรแกรมย่อย BCTRAN สำหรับจำลองเป็นหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบ ดังต่อไปนี้

ผลของข้อมูลในการทดสอบหม้อแปลงแบบจ่ายกระแสกระตุ้น จะใช้ในการป้อนให้กับ การ์ดที่ 4 ของโปรแกรมย่อย BCTRAN

NW = 2 ทั้งนี้เนื่องจากเรามีขดลวดอยู่ 2 ขด

FREQ = 50.0 (Hz).

IEXPOS = 0.0735 (%).

เนื่องจากว่าในการทำ direct excitation test homopolar excitation test นั้นได้ทำในสภาวะ แรงดันปกติ ดังนั้น

$$I_o = 0.922 \text{ A} .$$

จากนั้นทำให้อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ทำได้

$$IEXPOS = 0.922 \times 10^{-3} \times \frac{\sqrt{3} \times 23.0}{50} \times 100 = 0.0735\% .$$

SPOS = 50.0 (MVA).

LEXPOS = 22.18 (kW).

เนื่องจากว่าในการทำ direct excitation test นั้นได้ทำในสภาวะแรงดันปกติ ดังนั้น

LEXPOS = 22.18 kW .

IEXZERO = 35.39 (%).

เนื่องจากว่าในการทำ Homopolar excitation test นั้นไม่ได้ทำในสภาวะแรงดันปกติ ดังนั้น ค่ากระแสกระตุ้นลำดับศูนย์จึงต้องมีการปรับตั้งข้างล่างนี้

$$I_o = \frac{200}{3} \times \frac{23.0}{\sqrt{3} \times 1.993} = 444.19 \text{ A}$$

จากนั้นทำให้อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ได้

$$IEXZERO = 444.19 \times 10^{-3} \times \frac{\sqrt{3} \times 23.0}{50} \times 100 = 35.39 \%$$

$$SZERO = 50.0 \text{ (MVA)}$$

$$LEXZERO = 9810.97 \text{ (kW)}$$

$$LEXZERO = 221.0 \times \left(\frac{23.0}{\sqrt{3} \times 1.993} \right)^2 = 9810.97 \text{ kW}$$

NP = 0 เนื่องจากเป็นหม้อแปลงชนิด 3 เฟส

IT = 2 เนื่องจากการทำ Excitation Test ได้ทำในด้านแรงต่ำ

IW = 2 เนื่องจาก magnetizing branch ควรจะต่อที่ทางด้านขดลวดแรงต่ำ

IP = -1 ซึ่งเราต้องการให้เอาที่พุดของโปรแกรมอยู่ในรูปของ [A]-[R] และ [R]-[ωL]

สำหรับการ์ดที่ 5 เราจะข้อมูลทั่วไปจากโครงสร้างของหม้อแปลง ในการป้อนนั้น

โปรแกรมจะกำหนดให้เริ่มป้อนจากขดลวดที่มีแรงดันสูงสุด:

K = 1 (HV-winding) ซึ่งหมายความว่าขดลวดขดที่ 1 เป็นขดที่มีแรงดันสูงสุด

VRAT1 = 66.39 (kV), เป็นค่าแรงดันเฟสกับกราวด์เนื่องจากหม้อแปลงต่อแบบ WYE ($115/\sqrt{3}$)

R1 = 0.391, สำหรับค่า R นั้น หากเราไม่ป้อน โปรแกรมก็จะทำการคำนวณภายในเอง สำหรับค่าดังกล่าวได้มาจาก

$$R_{sh} = \frac{1}{3} \times \left(\frac{148100}{251.07^2} \right) = 0.783 \Omega .$$

$$\text{hence, } R_1 = \frac{1}{2} R_{sh} = 0.391 \Omega .$$

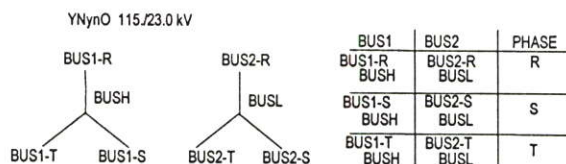
K = 2 (LV-winding) เป็นขดลวดที่มีแรงดันสูงเป็นลำดับต่อมา

VRAT2 = 13.279 (kV) เป็นค่าแรงดันเฟสกับกราวด์เนื่องจากหม้อแปลงต่อแบบ WYE ($23.0/\sqrt{3}$)

R2 = 0.0156 ซึ่งได้มาจาก

$$R_2 = R_1 \left(\frac{23.0}{115.0} \right)^2 = 0.0156 \Omega$$

ส่วนการกำหนดชื่อเทอร์มินอลของขดลวดจะเป็นดังต่อไปนี้



สำหรับการ์ดที่ 6 เราจะใช้ข้อมูลของการทดสอบหม้อแปลงแบบลัดวงจรมาป้อน ส่วนจำนวนการ์ดที่ต้องใช้สำหรับป้อนข้อมูลในส่วนนี้คือ $NW \times (NW-1)/2 = 1$

I = 1. ทำการจ่ายไฟที่ด้านขดลวดแรงสูง

J = 2. ขดลวดที่ทำการลัดวงจร คือขดลวดแรงต่ำ

P12 = 148.10 (kW) เนื่องจากการทำการทดสอบแบบลัดวงจรได้ทำในสภาวะปกติ

ZPOS12 = 12.557 (%) ได้มาจาก

$$ZPOS12 = \frac{14.44}{0.251} \times \frac{50/\sqrt{3}}{115^2} \times 100 = 12.557 \%$$

SPOS = 50.0 (MVA).

ZZERO12 = 18.265 (%) ได้มาจาก

$$ZZERO12 = 3 \times \frac{3224}{200.2} \times \frac{50}{115^2} \times 100 = 18.265\%$$

SZERO = 50.0 (MVA).

ID= 0 หมายความว่าค่ารีแอกแตนซ์ลำดับศูนย์ (zero-sequence reactance) จะถูกคำนวณโดยอัตโนมัติ โดยการใช้ค่าความสูญเสียแบบมีภาระลำดับบวก (positive sequence load losses or short-circuit losses) ทั้งนี้เนื่องจากว่าเป็นหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด

IL = 1, หมายความว่าค่าความต้านทานของขดลวดจะถูกคำนวณโดยอัตโนมัติ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากใช้ค่าความสูญเสียแบบมีภาระลำดับบวก (Positive-sequence short-circuit losses) ทั้งนี้เนื่องจากเป็นหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด ส่วนค่าความต้านทานที่ได้ป้อนให้ในการ์ดที่ 5 จะไม่นำมาคิด

ดังนั้นข้อมูลที่ใช้ในการป้อนให้กับโปรแกรม BCTran จะเป็นไปตามข้างล่างนี้

```
BEGIN NEW DATA CASE
ACCESS MODULE BCTran
$ERASE
C |   FREQ|   IEXPOS|   SPOS|   LEXPOS|   IEXZERO|   SZERO|   LEXZERONPITIWIPI
  2    50.   .0734    50.    22.180    35.39    50.   9810.97  0 2 2-1
C k|   VRAT|       R1| |bus1||bus2||bus1||bus2||bus1||bus2|
  1    66.39    BUS1_RBUSH  BUS1_SBUSH  BUS1_TBUSH
C k|   VRAT|       R2| |bus1||bus2||bus1||bus2||bus1||bus2|
  2    13.28    BUS2_RBUSL  BUS2_SBUSL  BUS2_TBUSL
C | |   PIJ|   ZPOSIJ|   SPOS|   ZZEROIJ|   SHOMIDIL
  1 2   148.10  12.557    50.    18.265    50.  0 1
```

BLANK CARD TERMINATE INPUT OF SHORT-CIRCUIT TEST DATA
 \$PUNCH
 BLANK
 BEGIN NEW DATA CASE

สำหรับหม้อแปลง B หากต้องการต่อรีแอกเตอร์ที่เทอร์มินอล ก็สามารถทำได้เช่นเดียวกัน
 วิธีที่หารีแอกเตอร์มาต่อที่เทอร์มินอลของหม้อแปลง A จากผลการทดสอบ ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จาก
 การทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับบวก (LEXPOS) มีค่า 22.18 KW ที่แรงดัน 23 KV ดังนั้นใน
 ส่วนของค่ากระแสกระตุ้นลำดับบวกที่คิดเฉพาะค่าสูญเสียในแกนเหล็กจะเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$I_{cu,dir} \approx \frac{P_{ex,dir}}{\sqrt{3} \cdot U_{ex,dir}} \approx \frac{22.18KW}{\sqrt{3} \cdot 23KV} \approx 0.556A$$

$$IEXPOS = 0.556 \times \frac{\sqrt{3} \times 23KV}{50MVA} \times 100 = 0.0442\%$$

และค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์ (LEXZERO) มี
 ค่า 9810.97 KW ที่แรงดัน 23 KV ดังนั้นในส่วนของค่ากระแสกระตุ้นลำดับศูนย์ที่คิดเฉพาะค่าสูญเสีย
 ในแกนเหล็กจะเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$I_{cu,har} \approx \frac{P_{ex,har}}{3 \cdot U_{ex,har}} \approx \frac{9810.97KW}{3 \cdot 23/\sqrt{3}KV} \approx 246.27A$$

$$IEXZERO = 246.27 \times 10^{-3} \times \frac{\sqrt{3} \times 23}{50} \times 100 = 19.621\% .$$

ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ต้องป้อนให้กับ โปรแกรม BCTTRAN ใหม่และเอาท์พุตเป็นดังนี้

```
C <++++> Cards punched by support routine on 11-Feb-02 18:26:36 <++++>
C ACCESS MODULE BCTRAN
C $ERASE
C C THREE PHASE 3LEGS TRANSFORMER REFERING TO BCTRAN MANUAL
C C This file we consider only core loss due to we have external reactor connect
C C 1 2 3 4 5 6 7
C C 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678
C C |   FREQ|   IEXPOS|   SPOS|   LEXPOS|   IEXZERO|   SZERO|   LEXZERONPITIW
C 2   50.   0.0460   50.   22.180   20.00   50.   9810.97 0 2 2
C C k|   VRAT|   R1| |bus1||bus2| |bus1||bus2| |bus1||bus2|
C 1   66.39   BUS1_R   BUS1_S   BUS1_T
C C k|   VRAT|   R2| |bus1||bus2| |bus1||bus2| |bus1||bus2|
C 2   13.28   BUS2_R   BUS2_S   BUS2_T
C C | |   PIJ|   ZPOSIJ|   SPOS|   ZZEROIJ|   SHOMIDIL
C 1 2 148.10 12.557   50.   18.265   50. 0 1
C BLANK
$VINTAGE, 1,
1BUS2_R 15920.431646575
```

```

2BUS2_S          -7933.259903853
                  15920.431646575
3BUS2_T          -7933.259903853
                  -7933.259903853
                  15920.431646575

USE RL
$UNITS, 0.50E+02 , 0.
1BUS1_R          .391662188406 .145060185999E7
2BUS2_R          0.0 290156.42396388
                  .015671207424 58040.02576051
3BUS1_S          0.0 -721862.2910348
                  0.0 -144395.2110168
                  .391662188406 .145060185999E7
4BUS2_S          0.0 -144395.2110168
                  0.0 -28883.39211181
                  0.0 290156.42396388
                  .015671207424 58040.02576051
5BUS1_T          0.0 -721862.2910348
                  0.0 -144395.2110168
                  0.0 -721862.2910348
                  0.0 -144395.2110168
                  .391662188406 .145060185999E7
6BUS2_T          0.0 -144395.2110168
                  0.0 -28883.39211181
                  0.0 -144395.2110168
                  0.0 -28883.39211181
                  0.0 290156.42396388
                  .015671207424 58040.02576051

$VINTAGE, -1,
$UNITS, -1.,-1.
USE RL

```

หลังจากนั้นทำการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ของ $U_{ex(Phase)}(PU)$ และ $I_{m,w}(PU)$ ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 ป้อนให้กับโปรแกรม SATURA ซึ่งจะได้ไฟล์ที่ใช้เป็นอินพุตและเอาท์พุตสำหรับโปรแกรมย่อย SATURA ดังต่อไปนี้

```

C <++++> Cards punched by support routine on 24-Mar-02 00.48.06 <++++>
C SATURATION
C C FREQ | VBASE | SBASE | IPUNCH| KTHIRD|
C 50.0 13.279 16.666 1 1
C C Irms (pu) | Vrms (pu) |
C 6.554309 -5 0.2
C 1.043283 -4 0.7
C 1.416907 -4 0.8
C 2.353886 -4 0.9
C 5.855433 -4 1
C 3.993400 -3 1.1
C 5.576000 -2 1.152
C 9999
-2.15424260E+02 -6.88625301E+01
-1.26538997E+01 -6.57541520E+01
-1.64453674E+00 -5.97765018E+01
-5.68708619E-01 -5.37988516E+01
-3.01624795E-01 -4.78212014E+01
-1.54313749E-01 -4.18435513E+01
-1.16334336E-01 -1.19553004E+01
1.16334336E-01 1.19553004E+01
1.54313749E-01 4.18435513E+01
3.01624795E-01 4.78212014E+01
5.68708619E-01 5.37988516E+01
1.64453674E+00 5.97765018E+01
1.26538997E+01 6.57541520E+01
2.15424260E+02 6.88625301E+01
C 9999

```

จากนั้นเลือกจุดที่เกิดการอ้อมตัวที่ได้จากโปรแกรม SATURA มา 1 จุดเพื่อป้อนให้กับโปรแกรม HYSDAT ซึ่งใช้สำหรับสร้างเส้นโค้งที่มีผลของฮิสเตอร์รีซิส รายละเอียดของอินพุตที่จะต้องป้อนให้กับโปรแกรม HYSDAT และเอาท์พุตที่ได้สำหรับรีแอกเตอร์ที่นำมาต่อที่เทอร์มินอลของหม้อแปลง B จะมีรายละเอียดดังข้างล่างนี้

```
C <++++> Cards punched by support routine on 24-Mar-02 00.49.33 <++++>
C HYSTERESIS
C $ERASE
C C ITYPE | LEVEL |
C      1      4
C C CURSAT| FLXSAT|
C 215.42 68.862
-8.07825000E+01 -6.72417176E+01
-5.38550000E+01 -6.68366471E+01
-2.42347500E+01 -6.54189000E+01
-1.07710000E+01 -6.40011529E+01
-4.03912500E+00 -6.27859412E+01
1.34637500E+00 -6.03555176E+01
4.71231250E+00 -5.75200235E+01
7.80897500E+00 -5.26591765E+01
9.42462500E+00 -4.45577647E+01
1.07710000E+01 -3.24056471E+01
1.34637500E+01 2.16712765E+01
1.48101250E+01 2.99752235E+01
1.88492500E+01 4.05070588E+01
2.42347500E+01 4.86084706E+01
2.93509750E+01 5.26591765E+01
3.83716875E+01 5.67098824E+01
5.25086250E+01 6.03555176E+01
7.20310625E+01 6.31910118E+01
9.42462500E+01 6.52163647E+01
1.34637500E+02 6.72417176E+01
2.15420000E+02 6.88620000E+01
2.96202500E+02 6.92670706E+01
9999.
```

ภาคผนวก ข.

ผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์จริงที่ใช้หลักการ Percentage Differential Current และ Harmonic Restraint

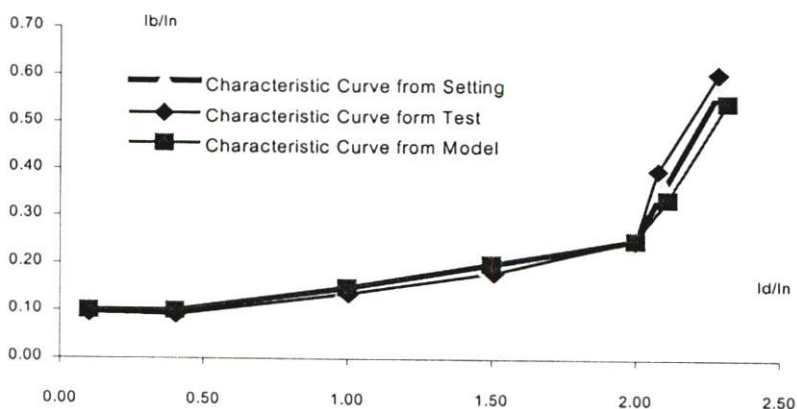
ผลการทดสอบความแม่นยำในการทำงาน (Pick up Test) และเวลาในการทำงาน (Operating Time Test) ของรีเลย์จริงเทียบกับแบบจำลองบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

โครงสร้างของรีเลย์ที่ใช้ในปัจจุบันได้ถูกจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ดังนั้นในส่วนนี้จึงเป็นส่วนในการทดสอบเปรียบเทียบการทำงานของแบบจำลองกับรีเลย์จริง โดยในการทดสอบได้ทำการทดสอบทั้งในส่วนของความแม่นยำในการทำงาน และเวลาในการทำงาน

Fix I1 Cal (Adjust I2) (Fix I1 as cal)	Adjust I2		
	Should be (A)	From Test (A)	From Model (A)
0.75	0.25	0.28	0.25
2.25	1.75	1.79	1.75
5.38	4.63	4.69	4.63
8.00	7.00	7.09	7.00
10.63	9.38	9.38	9.38
11.40	9.60	9.41	9.72
12.95	10.05	9.93	10.23

Calculation Data		Set Id2f/Id1f = 15		
I1 Cal Adjust Fix	I2 Cal Fix Adjust	Inject1	Operating time of Inject1	
		I1 *1.05 (Fix I2) (A)	From Test (ms)	From Model (ms)
0.75	0.25	0.79	50	19
2.25	1.75	2.36	49	19
5.38	4.63	5.64	42	19
8.00	7.00	8.40	40	19
10.63	9.38	11.16	39	19
11.40	9.60	11.97	38	19
12.95	10.05	13.60	37	19

Phase	Fix Id1f >	% Harmonic Id2f/Id1f Setting	Pick-up current		
			Should be (A)	From Test (A)	From Model (A)
B	0.505	20	0.101	0.106	0.103

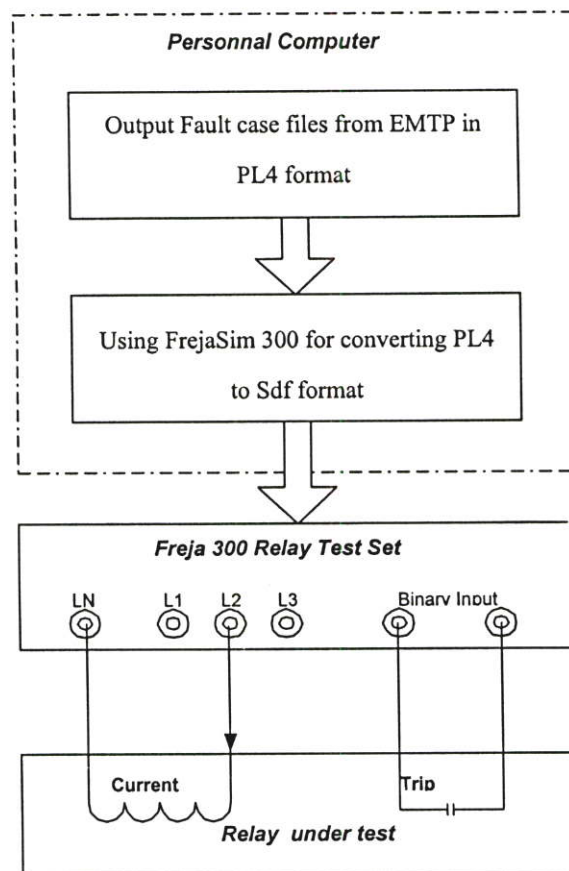


รูปที่ ข-1 แสดงผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์จริงเทียบกับแบบจำลอง

ในส่วนขอเวลาในการทำงานของแบบจำลองเทียบกับรีเลย์จริงนั้น จะต้องคำนึงถึงเวลาในการทำงานของ Tripping Contact ของรีเลย์จริงด้วย

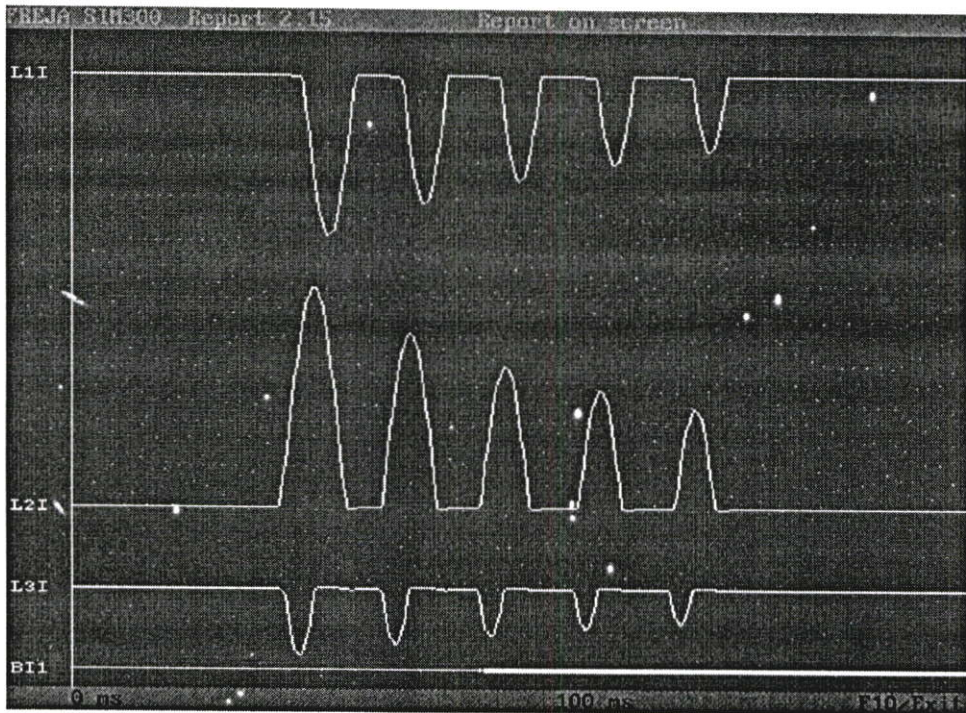
ผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์จริงต่อสภาวะผิดปกติต่างๆ ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง

ในการทดสอบการทำงานของรีเลย์จริงต่อสภาวะผิดปกติต่างๆ ที่เกิดขึ้น เช่น สภาวะอินรัช สภาวะการผิเคเพี้ยนของกระแสที่ได้จากหม้อแปลงกระแสอันเนื่องมาจากการอ้อมตัวในแกนเหล็กของหม้อแปลง ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้วิธี “Play Back” ดังรายละเอียดในรูปที่ ข-2

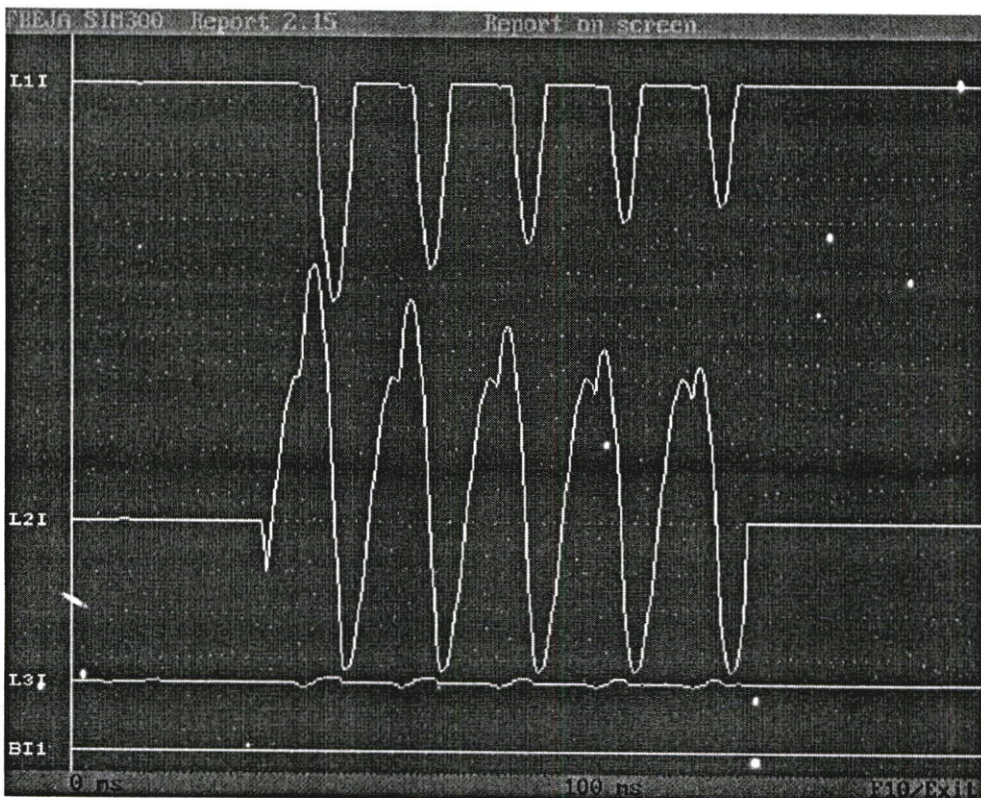


รูปที่ ข-2 แสดงวิธีทดสอบผลการทำงานของรีเลย์จริงต่อสภาวะผิดปกติต่างๆ โดยใช้วิธี “Play Back” โดยใช้เครื่องทดสอบ Freja 300 ร่วมกับ Freja SIM

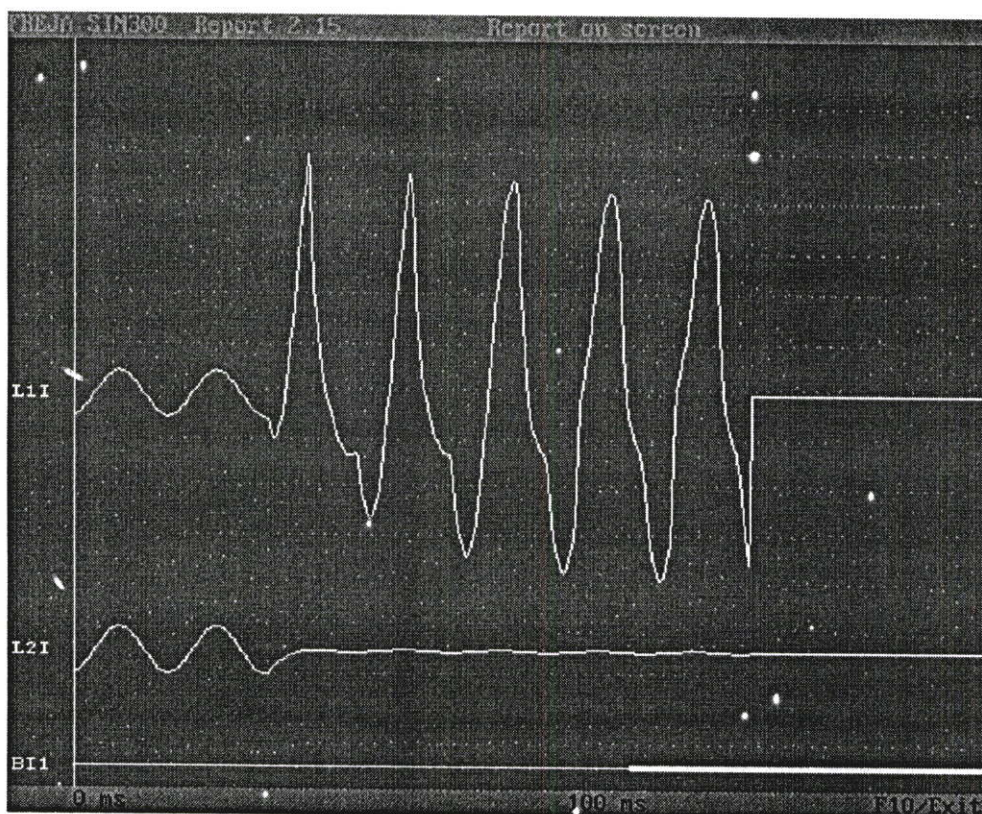
ในรูปที่ ข-2 แสดงวิธีทดสอบผลการทำงานของรีเลย์จริงต่อสภาวะผิดปกติต่างๆ โดยการ ใช้เครื่องทดสอบรีเลย์ชนิด 3 เฟส ร่วมกับโปรแกรมที่สามารถแปลงไฟล์ข้อมูลรูปคลื่นนามสกุล .PL4 ซึ่งได้จากการจำลองบนโปรแกรม ATP-EMTP ไปเป็นไฟล์นามสกุล .SDF ซึ่งเครื่องทดสอบ รีเลย์สามารถอ่านได้ ดังนั้นรูปที่ในสภาวะต่างๆก็จะถูกจ่ายเข้าไปในรีเลย์จริงตามรูปแบบข้อมูล นั้นๆ



รูปที่ ข-3 แสดงผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์จริงในกรณีสถานะอินรัช กรณีที่ Binrb 5



รูปที่ ข-4 แสดงผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์จริงในกรณีที่เกิดฟอลต์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดินในช่วงเริ่มจ่ายไฟ กรณีที่ Bie 2396



รูปที่ ข-5 แสดงผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์จริงในกรณีที่เกิดฟลด์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดินแบบมีผลการอิมตัวในแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแส กรณีที่ Bte24172

ในรูปที่ ข-3 นั้นได้แสดงผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์จริงในกรณีสภาวะอินรัช ซึ่งจะเห็นได้ว่ารีเลย์จริงที่ใช้ในปัจจุบันมีการทำงานผิดพลาด โดยการสั่งปลดวงจรในเวลาประมาณ 80 มิลลิวินาที

ในรูปที่ ข-4 ได้แสดงผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์จริงในกรณีที่เกิดฟลด์ภายใน ซึ่งเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดลงดินในช่วงเริ่มจ่ายไฟแบบมีค่าอิมพีแดนซ์สูง จนทำให้กระแสผลต่างที่วัดได้มีส่วนประกอบฮาร์มอนิกอันดับ 2 มากกว่าค่าเซตคั้งที่ตั้งไว้ รีเลย์จึงไม่สั่งปลดวงจรในกรณีดังกล่าว

ส่วนในรูปที่ ข-5 ได้แสดงผลการทดสอบการทำงานของรีเลย์จริงในกรณีที่เกิดฟลด์ภายในซึ่งเกิดการลัดวงจร ระหว่างขดลวดลงดินแบบมีผลการอิมตัวในแกนเหล็กของหม้อแปลงกระแส จนทำให้รูปคลื่นกระแสที่วัดได้เกิดการผิดเพี้ยน รีเลย์จึงชะลอการสั่งปลดวงจร จนกระทั่งถึงเวลาที่ 115 มิลลิวินาที

ภาคผนวก ก.

บทความและผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. **Transformer Differential Relay by Using Neural-Fuzzy System.**

V. Tipsuwanporn, A. Ekcheewanon, T. Suesut, J. Indra-payoong and A. Charean
2001 International conference control, automation and system (ICCAS 2001),
Korea, 17-21 October 2001

2. **รีเลย์ป้องกันหม้อแปลงโดยใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม**

เวคิน ปียรรัตน์, วิทยา ทิพย์สุวรรณพร, อภิสิทธิ์ เอกชีวานนท์, ฉนวน เอื้อการณ์ และ
อนุชิต เจริญ

การประชุมวิชาการของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ครั้งที่ 24,
22-24 พฤศจิกายน 2544.

ประวัติผู้เขียน

นายอภิสิทธิ์ เอกชีวานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 3 พฤษภาคม 2517 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2539

ปี 2539-ปัจจุบัน ได้เริ่มงานในตำแหน่งวิศวกรโครงการ บริษัทเอบีบี จำกัด ดูแลโครงการในส่วนของการจัดหา ออกแบบ และติดตั้งอุปกรณ์ทางด้านอุตสาหกรรม เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า ตู้ควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า มอเตอร์ เครื่องปรับความเร็วรอบ