

การหาตำแหน่งของฟอลต์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

FAULT LOCATION DETECTION IN SUBSTATIONS
USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

พุฒิชจร บุญมี
PUTTIKHAJORN BUNME

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-9708-81-4

การหาตำแหน่งของฟอลต์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

**FAULT LOCATION DETECTION IN SUBSTATIONS
USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS**

พุทธิขจร บุญมี

PUTTIKHAJORN BUNME

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-9708-81-4

**FAULT LOCATION DETECTION IN SUBSTATIONS
USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS**

PUTTIKHAJORN BUNME

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

2004

ISBN 974-9708-81-4

COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาตำแหน่งของฟอลต์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้โครงข่าย ประสาทเทียม
นักศึกษา	นาย พุฒิจจร บุญมี
รหัสนักศึกษา	44061044
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. นิตศัน กฤษณจินดา
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร. สมชาติ จิริวิภากร

บทคัดย่อ

การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ทำได้โดยอาศัยสายส่งและหม้อแปลงในสถานีไฟฟ้า เมื่อมีเหตุการณ์ขัดข้องในระบบไฟฟ้าจนทำให้สายส่งและหม้อแปลงดังกล่าวทริป (Trip) ออกจากระบบการจ่ายไฟ และส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับตามมา พนักงานที่ศูนย์ควบคุมต้องใช้เวลาพอสมควรกว่าจะทราบว่าเกิดฟอลต์ขึ้นที่ใดในระบบไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อช่วยให้ข้อมูลเบื้องต้นกับพนักงานที่ศูนย์ควบคุม ทราบว่าเกิดฟอลต์ขึ้นที่ใดในสถานีไฟฟ้าเพื่อเป็นประโยชน์ในการตัดสินใจควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าในขณะที่เกิดฟอลต์ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการศึกษาเพื่อหาตำแหน่งฟอลต์ในสถานีไฟฟ้าโดยมีอินพุตเป็นสถานะของรีเลย์ป้องกัน (Relay Protection) และเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) ส่วนเอาต์พุตเป็นตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ได้แก่ สายส่ง, หม้อแปลง, Shunt Reactor, บัส, Generator และ Capacitor Bank โดยใช้ข้อมูลจริงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยสถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอกและไทรน้อย

Thesis Title	Fault Location Detection in Substations Using Artificial Neural Networks
Student	Mr. Puttikhajorn Bunme
Student ID.	44061044
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2004
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Nithad Krisnachinda
Thesis Coadvisor	Assist. Prof. Dr. Somchat Jiriwibhakorn

ABSTRACT

Transmission and distribution power energy of Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) is transferred by using transmission line and power transformer in substations. When the fault occurs in transmission line or power transformer, they will be outaged from the power systems. The operators at the dispatching control center must spend more time whether where is the fault occurs. For giving the fault occurs information to operators for system restoration. So this thesis presents the applications of ANNs in fault location detection. The inputs in this study are status data of relay protection and circuit breaker. The output is the location of fault occurring whether at the transmission line, power transformer, shunt reactor, bus bar, generator and capacitor bank. All data studied are obtained from Nong Chok and Sainoi substations.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยได้รับคำแนะนำ, คำปรึกษา และความเอาใจใส่ เป็นอย่างดี จาก รศ. นิทัศน์ กฤษณจินดา และ ผศ.ดร.สมชาติ จิรวินากร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุม วิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณท่านทั้งสองเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงสำหรับท่านคณาจารย์คณะวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ให้ความรู้ความเข้าใจในเนื้อหาวิชานับตั้งแต่เข้ารับการศึกษา เพื่อนำความรู้ที่ได้รับ มาประกอบการทำ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ชายชาญ โปธิสาร , คุณอรรรพพล เก่าพิทักษ์กุล , คุณพงษ์ศักดิ์ มากมิ่ง และคุณสิทธิโชค กิตติรักษ์ตระกูล ที่ได้ให้คำแนะนำปรึกษาและความช่วยเหลือในการทำ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

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

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

พุดิขจร บุญมี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายของปัญหา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	1
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา	2
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการศึกษา	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 การควบคุมระบบไฟฟ้าและการป้องกัน.....	4
2.1 ระบบ EGAT – SCADA.....	4
2.1.1 หลักการทำงานของ EGAT-SCADA.....	4
2.1.2 ส่วนประกอบของ EGAT-SCADA.....	5
2.1.3 การใช้งาน EGAT-SCADA บน PC.	8
2.2 รีเลย์ป้องกันระบบไฟฟ้า.....	10
2.2.1 ระบบป้องกันบัส (Bus Protection).....	11
2.2.2 ระบบป้องกันสายส่ง (Transmission Line Protection).....	14
2.2.3 ระบบป้องกันหม้อแปลง และชั้นที่รีแอคเตอร์ (Transformer and Shunt Reactor Protection)	27
2.2.4 ระบบป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Protection).....	30
2.2.5 ระบบป้องกัน C-Bank (Capacitor Bank Protection).....	33

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 เซอร์กิตเบรกเกอร์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูง	34
2.3.1 การทำงานและหน้าที่ของเซอร์กิตเบรกเกอร์.....	35
2.3.2 กระบวนการดับอาร์ก.....	36
2.3.3 ส่วนประกอบของเซอร์กิตเบรกเกอร์	41
2.3.4 ลักษณะของอาร์กในเซอร์กิตเบรกเกอร์.....	46
2.3.5 ชนิดของเซอร์กิตเบรกเกอร์.....	49
บทที่ 3 โครงข่ายประสาทเทียม	62
3.1 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม (Architectures of Neural Networks)	62
3.1.1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว (Single Layer Neural Network) ..	62
3.1.2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi Layer Neural Network) ..	63
3.1.3 โครงข่ายประสาทเทียมแบบแลตทิซ (Lattice Neural Network)	64
3.2 การกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก (Setting the Weights)	65
3.3 ประเภทของโครงข่ายประสาทเทียม.....	66
3.3.1 การเรียนรู้แบบควบคุม (Supervised Learning)	66
3.3.2 การเรียนรู้แบบอิสระ (Unsupervised Learning)	66
3.4 ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function)	67
3.5 พื้นฐานแนวคิดของโครงข่ายประสาทเทียม (Basis Algorithm of NNs)	70
3.6 ชนิดของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ศึกษา (Kinds of Neural Networks studied) ..	70
3.6.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Backpropagation NN) ..	71
3.6.2 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (Probabilistic Neural Network)	78
บทที่ 4 ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการวิจัย	83
4.1 รายละเอียดอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่นำมาวิจัย.....	83
4.1.1 รายละเอียดสถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอก.....	86
4.1.2 รายละเอียดสถานีไฟฟ้าแรงสูงไทรน้อย.....	89

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การหาตำแหน่งของพอลต์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม.....	91
5.1 การเตรียมข้อมูลฝึกสอนและทดสอบ.....	91
5.2 การหาตำแหน่งของพอลต์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูง.....	95
5.2.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (BP).....	96
5.2.2 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN).....	103
บทที่ 6 ผลการทดลอง	106
6.1 รูปแบบการนำเสนอ	106
6.1.1 สถานีไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ในการทดลอง.....	106
6.1.2 รูปแบบการนำเสนอผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่าง โครงข่ายประสาทเทียม.....	106
6.2 ผลการทดลองสถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอก.....	107
6.2.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (BP).....	107
6.2.2 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN)	110
6.3 ผลการทดลองสถานีไฟฟ้าแรงสูงไทรน้อย.....	112
6.3.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (BP).....	112
6.3.2 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN)	115
6.4 ผลการทดลองเปรียบเทียบค่าตอบจริงแต่ละสถานีไฟฟ้า.....	117
6.4.1 สถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอก.....	117
6.4.2 สถานีไฟฟ้าแรงสูงไทรน้อย.....	125
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	133
เอกสารอ้างอิง	137
ประวัติผู้เขียน	139

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ชนิดฟังก์ชันกระตุ้น	68
5.1 แสดงจำนวนข้อมูลอินพุต ของทั้งสอง Sub.....	93
5.2 แสดงจำนวนข้อมูลเอาต์พุต ของทั้งสอง Sub.....	93
5.3 แสดงตัวอย่างการเตรียมข้อมูล Input /Output ในรูปแบบ Binary	93
6.1 แสดงผลการทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (BP) NCO-Sub โดยแสดงค่าผิดพลาดในแต่ละ โครงสร้างของชุดข้อมูลฝึกสอน.....	107
6.2 แสดงปมประสาทที่ทำให้ได้ค่า % Error ต่ำสุดและเวลาที่ใช้แต่ละ โครงสร้างใน ANN แบบ BP NCO-Sub	108
6.3 แสดงผลการทดสอบ PNN NCO-Sub	110
6.4 แสดงผลการทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (BP) SNO-Sub โดยแสดงค่าผิดพลาดในแต่ละ โครงสร้างของชุดข้อมูลฝึกสอน.....	112
6.5 แสดงปมประสาทที่ทำให้ได้ค่า % Error ต่ำสุดและเวลาที่ใช้แต่ละ โครงสร้างใน ANN แบบ BP SNO-Sub	112
6.6 แสดงผลการทดสอบ PNN SNO-Sub.....	115
6.7 เปรียบเทียบเอาต์พุตระหว่าง โครงข่ายประสาทเทียมทั้งสองชนิดที่ 90 ชุดฝึกสอน.....	117
6.8 เปรียบเทียบเอาต์พุตระหว่าง โครงข่ายประสาทเทียมทั้งสองชนิดที่ 120 ชุดฝึกสอน	119
6.9 เปรียบเทียบเอาต์พุตระหว่าง โครงข่ายประสาทเทียมทั้งสองชนิดที่ 150 ชุดฝึกสอน.....	121
6.10 เปรียบเทียบเอาต์พุตระหว่าง โครงข่ายประสาทเทียมทั้งสองชนิดที่ 180 ชุดฝึกสอน.....	123
6.11 เปรียบเทียบเอาต์พุตระหว่าง โครงข่ายประสาทเทียมทั้งสองชนิดที่ 102 ชุดฝึกสอน	125
6.12 เปรียบเทียบเอาต์พุตระหว่าง โครงข่ายประสาทเทียมทั้งสองชนิดที่ 136 ชุดฝึกสอน	127
6.13 เปรียบเทียบเอาต์พุตระหว่าง โครงข่ายประสาทเทียมทั้งสองชนิดที่ 170 ชุดฝึกสอน.....	129
6.14 เปรียบเทียบเอาต์พุตระหว่าง โครงข่ายประสาทเทียมทั้งสองชนิดที่ 204 ชุดฝึกสอน.....	131

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงส่วนประกอบของระบบ EGAT – SCADA	6
2.2 แสดงเมนูหลักของ EGAT-SCADA บน PC.....	8
2.3 แสดง One line diagram ของ EGAT-SCADA บน PC.....	8
2.4 แสดงข้อมูลที่แสดงใน EGAT-SCADA	9
2.5 แสดง Function Close ใน EGAT-SCADA.....	10
2.6 แสดงการทำงานของ Voltage-differential relay เมื่อมีฟอลต์ภายนอกโซนป้องกัน.....	11
2.7 แสดงการทำงานของ Voltage-differential relay เมื่อมีฟอลต์ภายในโซนป้องกัน.....	12
2.8 แสดงงานหมุนของรีเลย์ป้องกันแบบ Multi – restraint	13
2.9 แสดงการทำงานของรีเลย์ป้องกันแบบ Multi – restraint	13
2.10 แสดงการทำงานของ High impedance-Voltage differential protection	14
2.11 แสดงหลักการทำงานของ Distance Relay	15
2.12 แสดงการ Co-Ordination ของ Time Step Distance	16
2.13 แสดง Logic การทำงานของ 500 kV Distance Relay LZ 96	19
2.14 แสดงหลักการทำงานของ 500 kV Directional earth fault Relay.....	20
2.15 แสดง Logic ของ Distance Relay LZ96	21
2.16 แสดงวงจร Echo and Reverse starter	21
2.17 แสดงการทำงานของ Directional Earth Fault	22
2.18 แสดงหลักการทำงานของ Line Differential relay.....	23
2.19 แสดงการส่งสัญญาณแต่ละข้างของ Line Differential relay	23
2.20 แสดง Module ของ Line Differential relay.....	26
2.21 แสดง Logic การ Comparison ของ Line Differential relay	27
2.22 การทำงานของ Transformer Differential Relay.....	28
2.23 แสดง Buchholz Relay ของหม้อแปลง.....	29
2.24 แสดง Sudden Pressure Relay ของหม้อแปลง	30
2.25 แสดงรีเลย์ป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	31
2.26 แสดง Unbalance Relay ของ C-Bank Protection.....	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.27 แสดงการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ร่วมกับอุปกรณ์อื่น.....	36
2.28 แสดงรูปคลื่นแรงดัน ก่อน, ระหว่าง และหลังลัดวงจร	37
2.29 การอาร์กเมื่อเบรกเกอร์ตัดกระแสลัดวงจร.....	38
2.30 แสดงปรากฏการณ์ในขณะปลดกระแส Inductive ต่ำ ๆ.....	38
2.31 แสดงปรากฏการณ์ในขณะปลดกระแส Capacitive	39
2.32 แสดงถึง Restriking voltage ของ Short line fault	40
2.33 ส่วนประกอบของเซอร์กิตเบรกเกอร์	42
2.34 แสดงส่วนต่าง ๆ ของ Interrupter แบบ Live tank และ Dead tank.....	43
2.35 แสดง Mechanism แบบ Solenoid Closing	44
2.36 กลไกแบบ Motor operated spring	45
2.37 กลไกแบบใช้ลม	45
2.38 แสดงกลไกเบรกเกอร์ใช้ไฮดรอลิก.....	46
2.39 แสดงส่วนประกอบของ ACB.	49
2.40 แสดงการดับอาร์ก ใน ACB.	50
2.41 แสดงการควบคุมการปลด – สับของ ABB	51
2.42 ส่วนประกอบของ B.OCB	52
2.43 แสดงส่วนประกอบของ M.OCB.....	53
2.44 การดับอาร์กใน M.OCB.....	53
2.45 Breakdown voltage และ Thermal conductivity ของ SF6 Gas.....	54
2.46 แสดงการทำงานของเบรกเกอร์ชนิด Double pressure.....	55
2.47 หลักการทำงานของเบรกเกอร์ชนิด Self – extinguishing	56
2.48 หลักการดับอาร์กของเบรกเกอร์ชนิด Puffer	57
2.49 แสดงรูปร่างของ Spiral electrodes	59
2.50 แสดงรูปร่างของอีเล็กโตรดชนิด Coil	60
2.51 โครงสร้างของ Vacuum interrupter	61
3.1 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว.....	63
3.2 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น.....	64
3.3 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแลตทิซ.....	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4	แบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมชนิด BP ที่มี 2 ชั้นซ่อน71
3.5	แบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น80
4.1	Single Line Diagram สถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอก (แสดงรีเลย์ป้องกัน).....85
4.2	Single Line Diagram สถานีไฟฟ้าแรงสูงไทรน้อย (แสดงรีเลย์ป้องกัน).....87
4.3	Single Line Diagram สถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอก (ไม่แสดงรีเลย์ป้องกัน).....88
4.4	Single Line Diagram สถานีไฟฟ้าแรงสูงไทรน้อย (ไม่แสดงรีเลย์ป้องกัน)90
5.1	แสดงโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่มีอินพุต,เอาต์พุตตามที่ใช้งาน.....94
5.2	Flow chart ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล95
5.3	แบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมชนิด BP ที่มี 2 ชั้นซ่อน96
5.4	Flow chart ขั้นตอน Back-propagation calculation.....100
5.5	Flow chart ของขั้นตอน Best round selection.....101
5.6	Flow chart ของขั้นตอน Best structure and best round selection.....102
5.7	แบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น103
5.8	Flow chart ขั้นตอนการฝึกสอน ANN ชนิด PNN105
6.1	กราฟแสดงการเกิด Error (ANN ตอบผิด)แต่ละชุดข้อมูลทดสอบ.....108
6.2	กราฟแสดงค่าผิดพลาดแต่ละ โครงสร้างของ ANN ชนิด BP NCO-Sub.....109
6.3	กราฟแสดงค่า ME ที่ต่ำสุดในแต่ละชุดข้อมูลฝึกสอน.....109
6.4	กราฟแสดงค่าผิดพลาดเทียบกับจำนวนรอบที่ฝึกสอน PNN NCO-Sub.....111
6.5	กราฟแสดงการเกิด Error (ANN ตอบผิด)แต่ละชุดข้อมูลทดสอบ113
6.6	กราฟแสดงค่าผิดพลาดแต่ละ โครงสร้างของ ANN ชนิด BP SNO-Sub113
6.7	กราฟแสดงค่า ME ที่ต่ำสุดในแต่ละชุดข้อมูลฝึกสอน.....113
6.8	กราฟแสดงค่าผิดพลาดเทียบกับจำนวนรอบที่ฝึกสอน PNN SNO-Sub.....115
6.9	กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งพอลต์ NCO-Sub (ชุดฝึกสอน 90 ชุด).....118
6.10	กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งพอลต์ NCO-Sub (ชุดฝึกสอน 120 ชุด).....120
6.11	กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งพอลต์ NCO-Sub (ชุดฝึกสอน 150 ชุด).....122

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.12 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งพอลต์ NCO-Sub (ชุดฝึกสอน 180 ชุด).....	124
6.13 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งพอลต์ SNO-Sub (ชุดฝึกสอน 102 ชุด).....	126
6.14 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งพอลต์ SNO-Sub (ชุดฝึกสอน 136 ชุด).....	128
6.15 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งพอลต์ SNO-Sub (ชุดฝึกสอน 170 ชุด).....	130
6.16 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งพอลต์ SNO-Sub (ชุดฝึกสอน 204 ชุด).....	132
7.1 กราฟแสดงค่าผิดพลาดของจำนวนชุดทดสอบในการระบุตำแหน่งพอลต์ที่จำนวนชุด ฝึกสอนต่างๆ กัน NCO-Sub.....	135
7.2 กราฟแสดงค่าผิดพลาดของจำนวนชุดทดสอบในการระบุตำแหน่งพอลต์ที่จำนวนชุด ฝึกสอนต่างๆ กัน SNO-Sub.....	136

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

การควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยระหว่างศูนย์ควบคุม (Control Center) กับสถานีไฟฟ้าแรงสูง ทำโดยการควบคุมระยะไกล (Remote Control) โดยใช้ระบบ SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) เมื่อมีเหตุการณ์ขัดข้องขึ้นที่สถานีไฟฟ้าจะมี Alarm signal จำนวนมากส่งไปที่ศูนย์ควบคุมทำให้พนักงานซึ่งเข้าเวรอยู่ในขณะนั้นต้องใช้เวลาและความชำนาญในการทำความเข้าใจว่าจะรู้ว่าเกิดฟอลต์ขึ้นที่ใด จึงทำให้เวลาในการนำระบบกลับสู่สภาวะปกติ (Restoration time) ไม่รวดเร็วเท่าที่ควรซึ่งอาจส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับต่อเนื่องขึ้นได้ การนำระบบกลับสู่สภาวะปกติให้รวดเร็วขึ้นสามารถทำได้โดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยระบุตำแหน่งของการเกิดฟอลต์เบื้องต้นให้แก่พนักงานที่ศูนย์ควบคุมว่าเกิดขึ้นที่ใดโดยอาจเป็นในสายส่ง, หรือหม้อแปลง ในแต่ละสถานีไฟฟ้า

1.2 ความมุ่งหมายของปัญหา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทดลองวิจัยศึกษาการนำโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network; ANN) มาประยุกต์ใช้ในการระบุตำแหน่งการเกิดฟอลต์ในสถานีไฟฟ้า เนื่องจากโครงข่ายประสาทเทียมสามารถเรียนรู้ฟังก์ชันต่อเนื่องแบบไม่เป็นเชิงเส้นได้อย่างแม่นยำใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่นำมาใช้ศึกษาได้แก่ Back Propagation (BP) และ Probabilistic Neural Network (PNN) โดยใช้สถานะของรีเลย์ป้องกัน และเซอร์กิตเบรกเกอร์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอกและไทรน้อยของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเป็นข้อมูลในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

จากการที่โครงข่ายประสาทเทียมมีความสามารถในการเรียนรู้ฟังก์ชันต่อเนื่องแบบไม่เชิงเส้นหลายชนิดได้อย่างแม่นยำ [1,2] โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้สถานะของรีเลย์และเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่สัมพันธ์กับอุปกรณ์เกิดฟอลต์ในสถานีไฟฟ้าเป็นข้อมูลในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะสามารถระบุตำแหน่งฟอลต์ได้อย่างแม่นยำมีค่าผิดพลาดต่ำสุด โดยใช้เวลาในการระบุตำแหน่งฟอลต์ได้อย่างรวดเร็ว

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

นำโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network; ANN) มาประยุกต์ใช้ในการระบุตำแหน่งการเกิดฟอลต์ในสถานีไฟฟ้า โครงข่ายประสาทเทียมที่นำมาใช้ศึกษาได้แก่ ชนิด Back Propagation และ Probabilistic Neural Network โดยให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้สถานะของรีเลย์ป้องกัน และเซอร์กิตเบรกเกอร์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอกและไทรน้อยของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ในสภาวะมีฟอลต์ตำแหน่งต่างๆ ได้แก่ บัส , สายส่ง, หม้อแปลง, Shunt reactor, Generator และ Capacitor Bank และทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว โดยใช้สถานะของรีเลย์ป้องกันรวมทั้งเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ไม่ได้อยู่ในชุดข้อมูลฝึกสอนเพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วว่าสามารถระบุตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้องและรวดเร็วเพียงใด

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆดังต่อไปนี้

1. ศึกษาระบบ SCADA ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
2. ศึกษาสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม
3. ศึกษาการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมชนิด Back Propagation
4. ศึกษาการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมชนิด Probabilistic Neural Network
5. ศึกษาระบบรีเลย์ป้องกันและเซอร์กิตเบรกเกอร์ของสถานีไฟฟ้าแรงสูง
6. การจัดเตรียมข้อมูลสถานะรีเลย์และเบรกเกอร์เพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้
7. ศึกษาการใช้งาน NEURAL NETWORK TOOLBOX ของโปรแกรม MATLAB
8. รวบรวมข้อมูลผลการฝึกสอนและทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมชนิด Back Propagation
9. รวบรวมข้อมูลผลการฝึกสอนและทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมชนิด Probabilistic Neural Network
10. เปรียบเทียบประสิทธิภาพและเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนและทดสอบระหว่างโครงข่ายประสาทเทียมทั้งสองชนิด

1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการศึกษา

ผลที่ได้รับโครงข่ายประสาทเทียมควรระบุตำแหน่งของการเกิดฟอลต์ได้อย่างแม่นยำทั้งสองชนิด เพื่อสามารถนำมาใช้ในการบอกตำแหน่งการเกิดฟอลต์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เพื่อประโยชน์ต่อการนำมาใช้ให้ข้อมูลต่อพนักงานที่ศูนย์ควบคุมในการวินิจฉัยระบบไฟฟ้าเมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้น

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อทราบวิธีและผลที่ได้จากงานวิจัยในการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการระบุตำแหน่งฟอลต์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูง เพื่อให้ข้อมูลเบื้องต้นแก่พนักงานกะในการตัดสินใจควบคุมการจ่ายไฟฟ้าในสภาวะเกิดฟอลต์
2. สามารถนำผลการศึกษาที่ได้มาเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีระบุตำแหน่งของฟอลต์ในสถานีไฟฟ้าโดยนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้งานร่วมกับระบบ EGAT-SCADA

บทที่ 2

การควบคุมระบบไฟฟ้าและการป้องกัน

ในปัจจุบันการควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าระหว่างศูนย์ควบคุมเขต (Regional Control Center) กับสถานีไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเป็นไปในลักษณะ การควบคุมระยะไกล (Substation Remote Control) โดยที่ศูนย์ควบคุมและสถานีไฟฟ้าจะติดตั้งระบบคอมพิวเตอร์ที่เป็นรูปแบบ SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) ไว้เพื่อเป็นประโยชน์ในการสั่งการจ่ายไฟฟ้าและรับข้อมูลสถานะของอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าต่าง ๆ ในสถานีไฟฟ้า สำหรับการป้องกันระบบไฟฟ้าอุปกรณ์ที่สำคัญหลักมีสองชนิดคือรีเลย์ป้องกันและ เซอร์กิตเบรกเกอร์ ดังนั้นบทนี้จึงเป็นการอธิบายหลักการของทั้ง EGAT-SCADA ,รีเลย์ป้องกัน และเซอร์กิตเบรกเกอร์อย่างสังเขปเพื่อเป็นทฤษฎีในการนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่อไป

2.1 ระบบ EGAT – SCADA [3]

ระบบ SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) ที่ใช้งานควบคุมการจ่ายไฟ ในสถานีไฟฟ้าและศูนย์ควบคุมการจ่ายไฟเขต ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (Electricity Generating Authority of Thailand :EGAT) เป็นระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นเองเป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมการจ่ายไฟฟ้า ให้ดียิ่งขึ้นแทนระบบควบคุมเดิม ที่ต้องใช้การควบคุมจากแผงควบคุม (Control Board) ซึ่งมีบางสถานีไฟฟ้าที่เป็นระบบ SCADA ของต่างประเทศ แต่ก็มีราคาติดตั้งสูงและใช้งานยาก

2.1.1 หลักการทำงานของ EGAT-SCADA

จากรูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของ EGAT – SCADA สามารถสรุปหลักการทำงานได้ ดังนี้

1. การรับส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ภายนอก (Communication to Input/Output Device)

ระบบ EGAT – SCADA จะมีรูปแบบการติดต่อ (Protocol) ระหว่างอุปกรณ์ภายนอกกับระบบ SCADA เรียกว่า RTU. โดย RTU. จะเก็บข้อมูลของอุปกรณ์สถานีไฟฟ้าต่างๆ เช่นสถานะของรีเลย์ป้องกันและเซอร์กิตเบรกเกอร์ อยู่ตลอดเวลา โดยการนำสัญญาณของอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าเหล่านั้นต่อเข้ากับ Terminal ของ RTU. เพื่อนำข้อมูลต่างๆที่ได้นี้ไปจัดเก็บไว้ในหน่วยความจำของ RTU. ซึ่งจะมีการแบ่งเป็นกลุ่มๆสำหรับข้อมูลแต่ละประเภทจากนั้นระบบ SCADA จะส่งสัญญาณไปยัง RTU. เพื่อนำข้อมูลเหล่านั้น มาเก็บยังฐานข้อมูลของ SCADA แล้วนำไปใช้งานกับกระบวนการอื่นๆต่อไป

2. นำข้อมูลจากฐานข้อมูลที่ได้รับจาก RTU. มาแสดงผล (Monitoring) เพื่อให้ผู้ควบคุมการจ่ายไฟฟ้าทราบถึงสถานการณ์ขณะนั้นๆหรือจะนำข้อมูลที่ได้มาทำการคำนวณเปรียบเทียบกับก่อนนำค่าที่ได้แสดงผล

3. นำข้อมูลจากฐานข้อมูลที่ได้รับจาก RTU. มาพิมพ์รายงาน (Reporting) เพื่อให้ผู้ควบคุมสามารถนำเอารายงานที่ได้เก็บไว้อ้างอิงในอนาคตต่อไป

4. นำข้อมูลจากฐานข้อมูลที่ได้รับจาก RTU. มาแสดงการเตือน (Alarming) โดยจะนำข้อมูลที่นำมาเปรียบเทียบกับ ข้อมูลที่มีการตั้งค่าเอาไว้ก่อน ในกรณีที่ระบบไม่เป็นไปตามที่ต้องการ ก็จะแสดงการเตือนด้วยเสียงและข้อความ เพื่อให้ผู้ควบคุมสามารถนำระบบสู่สภาพปกติได้ในทันที

5. นำข้อมูลจากฐานข้อมูลที่ได้จาก RTU. มาตัดสินใจในการควบคุม (Operator interaction)

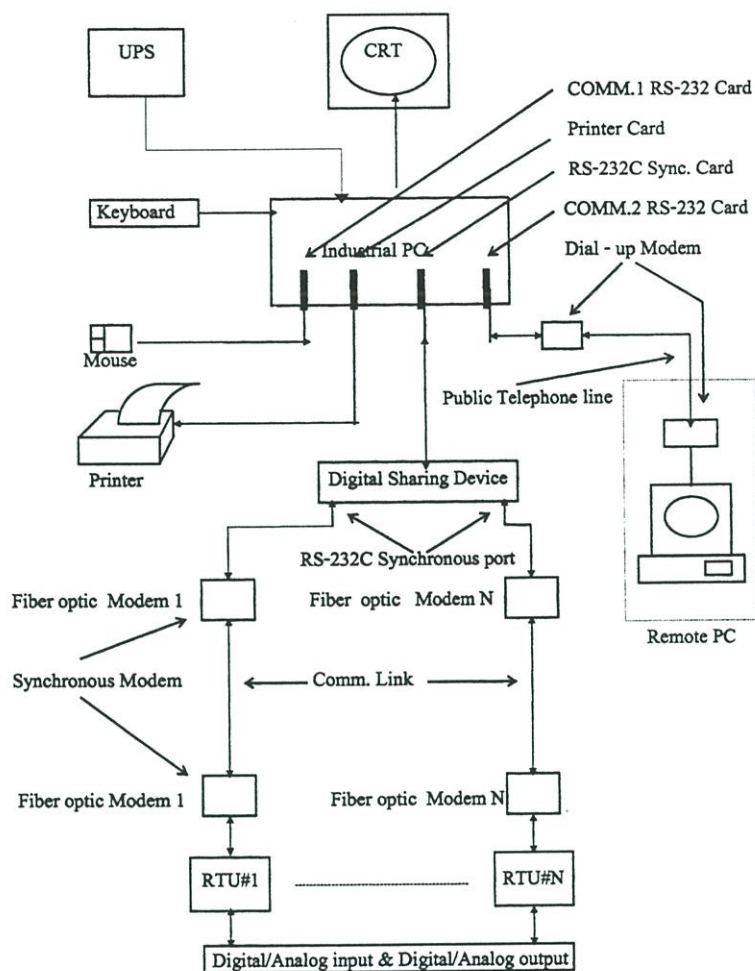
จากขั้นตอนการทำงานของระบบ EGAT SCADA จะเห็นได้ว่ามีข้อมูลจากสถานะของอุปกรณ์สถานีไฟฟ้า ได้แก่ เซอร์คิตเบรกเกอร์และรีเลย์ป้องกันจัดเก็บในรูปแบบ Real Time ซึ่งเราสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปผ่านการวิเคราะห์ด้วย ANN ได้

2.1.2 ส่วนประกอบของ EGAT-SCADA

1. PC. เป็นหัวใจของระบบ EGAT-SCADA ใช้สำหรับเก็บข้อมูลและ Software ของระบบ ซึ่งจะเป็นคอมพิวเตอร์มี CPU. รุ่น Pentium III ขึ้นไปและต้องมีส่วนประกอบอื่นๆ เพื่อร่วมในการทำงานดังนี้

- ขนาดของ RAM 128MB ขึ้นไป
- ที่ว่างบน Hard disk 40 GB ขึ้นไป
- VESA connector สำหรับ VGA หรือ Super VGA หรือ Connector ชนิดอื่นที่ใช้แทนได้
- Window NT. ขึ้นไป
- 2 Serial COMM. port
- 1 parallel port
- CDC.RS-232C Synchronous card หรือ MOXA RS-232C Sync. 4 ports สำหรับ RTU.

2. CRT. หรือ Screen Monitor เป็น VGA. ขึ้นไป ใช้สำหรับแสดงผลต่างๆของระบบ SCADA เพื่อให้ผู้ควบคุมได้รู้ถึงสภาพของระบบในขณะนั้น และยังทำหน้าที่แสดงข้อความที่ผู้ควบคุมส่งเข้าระบบ หรือระบบส่งข้อความให้กับผู้ควบคุมรับรู้เนื่องจากการใช้ Function ต่างๆ ทั้งนี้เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องขณะใช้งาน



รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของระบบ EGAT – SCADA

3. Key Board เป็นแบบ 101 Keys ที่มีใช้งานด้านคอมพิวเตอร์ทั่วไป โดย Key ต่างๆ สามารถใช้งานได้ทั้งเป็นเหมือน Key Board ธรรมดา หรือกำหนดให้ใช้งานพิเศษได้ในเวลาเดียวกัน ในที่นี้จะแบ่ง Key Board ออกตามการกำหนดเพื่อใช้งานพิเศษได้ 2 ประเภทคือ

- Display Key จะมีการกำหนดไว้ใน MMI. (Man Machine Interface) Database เป็นชนิด 0 กล่าวคือถ้าเมื่อไรก็ตามที่มีการกด Key ประเภทนี้ ระบบ EGAT-SCADA จะนำเอา Index ประจำ Key ซึ่งเป็นหมายเลขของภาพไปหาใน Display Database ว่ามีหรือไม่ ถ้ามี จะนำภาพนั้นขึ้นมาแสดงบน Screen

- Special Key จะมีการกำหนดไว้ใน MMI. Database เป็นชนิด 1 กล่าวคือถ้าเมื่อไรก็ตามที่มีการกด Key ประเภทนี้ ระบบ EGAT-SCADA จะนำเอา Index ซึ่งเป็นหมายเลขของ Function ไปเรียก Function ขึ้นมาทำงาน

4. Mouse ใช้สำหรับเลื่อน Cursor บน Screen ไปตามตำแหน่งต่างๆ ของอุปกรณ์ที่ต้องการกระทำเกี่ยวกับการใช้ Function ต่างๆของระบบ EGAT - SCADA และยังสามารถใช้สำหรับเรียก Function หรือ Display ต่างๆจาก Linkage Element ก็ได้ โดยจะต่อกับ Serial port COMM 1

5. Printer ใช้สำหรับพิมพ์รายงานแบบประจำชั่วโมง (Hourly Report) แบบประจำวัน (Daily Report) และแบบรายงานรวม (Summary Report) ที่ต้องการ เพื่อเก็บไว้เป็นเอกสารสำหรับอ้างอิงในอนาคตต่อไป โดยจะถูกต่อกับ Parallel Port

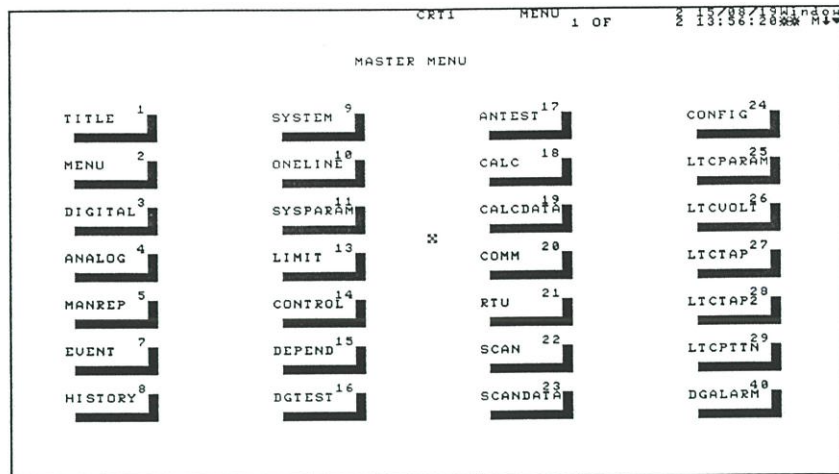
6. Digital Sharing Device เป็นอุปกรณ์สำหรับเพิ่ม Port การสื่อสารระหว่าง EGAT-SCADA กับ RTU. ซึ่งจะเพิ่มได้มากเท่าไรขึ้นอยู่กับความสามารถของอุปกรณ์ชนิดนี้ ในกรณีที่มี RTU. เพียง 1 ตัวก็ไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ชนิดนี้ก็ได้ โดยจะถูกต่อ CDC RS-232C Synchronous Card แต่ถ้า EGAT-SCADA ใช้ MOXA RS-232C Synchronous Card ก็ไม่จำเป็นต้องใช้ Digital Sharing Device เพราะ MOXA Card สามารถติดต่อสื่อสารถึง 4 Ports ต่อ 1 Card และยังสามารถใส่ใน PC. ได้ถึง 4 Cards

7. Modem เป็นตัวกลางใช้ติดต่อ กับ RTU. โดย Modem จะเป็นอุปกรณ์สำหรับแปลงสัญญาณคอมพิวเตอร์ของระบบ EGAT-SCADA เป็นสัญญาณสื่อสารผ่านระบบสื่อสารเพื่อส่งไปยัง Modem ของ RTU. ซึ่งจะแปลงสัญญาณสื่อสารกลับไปเป็นสัญญาณคอมพิวเตอร์สำหรับ RTU.

8. Remote Terminal Unit (RTU.) เป็นอุปกรณ์ที่นำเอาข้อมูลต่างๆ ของอุปกรณ์ในระบบการควบคุมมาเก็บไว้ จนกระทั่งมีการติดต่อขอข้อมูลเหล่านั้นจากระบบ EGAT-SCADA RTU. ก็ส่งข้อมูลผ่านระบบสื่อสารผ่าน Modem ให้ระบบ EGAT - SCADA จากนั้น RTU. ก็จะเก็บข้อมูลของอุปกรณ์ต่างๆต่อเพื่อรอการขอข้อมูลจากระบบ EGAT-SCADA ในครั้งต่อไป

9. Dial-up Modem เป็นตัวกลางใช้ติดต่อระหว่างระบบ EGAT-SCADA (Serial Port COMM.2) กับ Remote PC. โดย Modem จะแปลงสัญญาณคอมพิวเตอร์เป็นสัญญาณสื่อสารผ่านระบบสื่อสารสากลทั่วไปเพื่อส่งไปยัง Modem ของ Remote PC. ซึ่งจะแปลงสัญญาณสื่อสารกลับไปเป็นสัญญาณคอมพิวเตอร์

10. Remote PC. เป็นคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบ โดยสามารถกระทำได้เหมือน Local PC. ทุกอย่าง แต่มีข้อแม้ว่าการติดต่อเพื่อขอใช้งานนั้นผู้ขอจำเป็นจะต้องมีรหัสผ่าน (Password) มิฉะนั้นจะไม่สามารถติดต่อเข้าใช้งานได้ เพื่อความปลอดภัยในระบบควบคุม

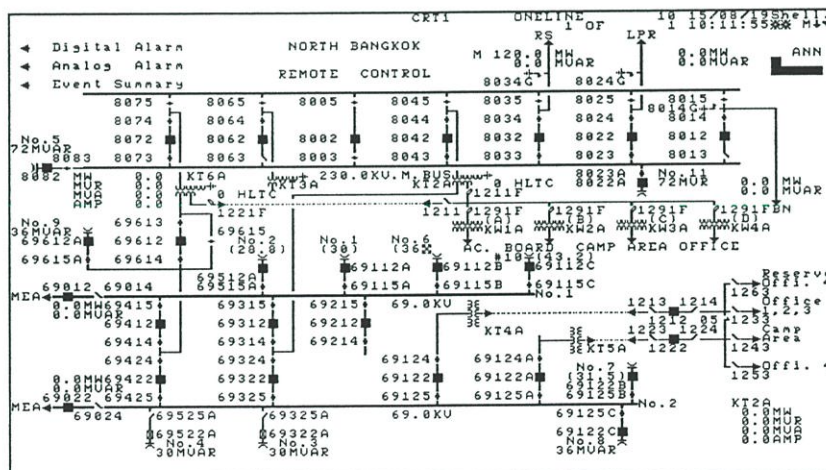


รูปที่ 2.2 แสดงเมนูหลักของ EGAT-SCADA บน PC.

2.1.3 การใช้งาน EGAT-SCADA บน PC.

บางครั้งระบบ EGAT-SCADA ในขณะที่ใช้งาน On-line อาจจะมีค่าบางอย่างไม่เหมาะสม หรือสถานะบางอย่างไม่ถูกต้อง หรือบางครั้งผู้ควบคุมการจ่ายไฟฟ้าต้องการใส่ข้อมูลที่จำเป็น บางอย่างให้กับระบบ หรือสั่งการควบคุมระบบ เพื่อทำให้ EGAT-SCADA มีประสิทธิภาพสูงสุด วิธีการต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นทั้งหมดเป็นการใช้งานพื้นฐาน ซึ่งมีหัวข้อสำคัญดังนี้

1. การเรียกรูปภาพ (Calling Display) เป็นการนำภาพที่ต้องการมาแสดงบนจอ Monitor เช่นเมนูหลัก ดังรูปที่ 2.2 , One line diagram รูปที่ 2.3 และ Event alarm เป็นต้น



รูปที่ 2.3 แสดง One line diagram ของ EGAT-SCADA บน PC.

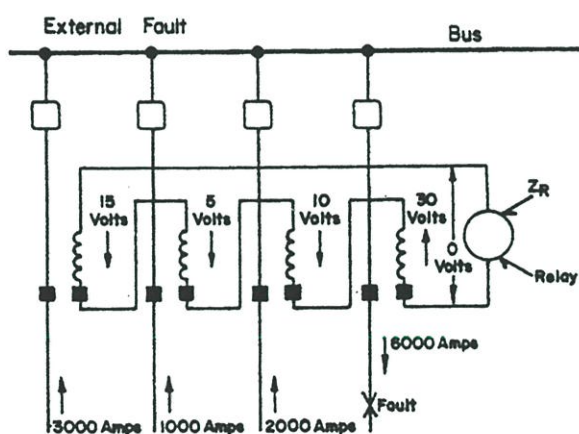
2.2.1 ระบบป้องกันบัส (Bus Protection) [8]

ระบบป้องกันบัสในปัจจุบันนิยมใช้รีเลย์ผลต่าง (Differential Relay) เนื่องจากมีความรวดเร็วในการทำงานสูงและเชื่อถือได้สูงด้วย แต่เนื่องจากบัสนั้นมีหลายวงจรรีเลย์ผลต่างที่นำมาใช้งานย่อมมีปัญหา เช่น ขณะเกิดฟอลต์ภายนอกโซนป้องกันย่อมมีกระแสไหลในแต่ละวงจรต่างระดับกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรที่เกิดฟอลต์นั้นมักจะมีกระแสไหลค่อนข้างสูง จนอาจทำให้เกิดการอิ่มตัว (Saturate) ของ Current Transformer (CT.) ซึ่งสามารถทำให้เกิดกระแสแตกต่างกันได้ และรีเลย์จะทำงานผิด (เมื่อ CT. อิ่มตัวแล้วทำให้เอาท์พุทที่ออกมาทางด้านทุติยภูมิของ CT. ลดลงหรือผิดไปจากค่าเป็นจริง)

เนื่องจากปัญหาดังกล่าวข้างต้น จึงมีวิธีที่นิยมนำรีเลย์ผลต่างไปใช้กับบัสอยู่ 3 วิธี คือ

1. Voltage-differential relaying with “linear couplers”

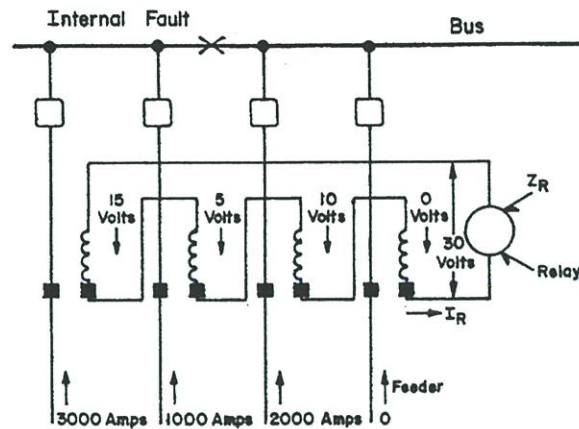
วิธีนี้เป็นการแก้ปัญหา CT. อิ่มตัวโดยใช้ CT. แบบแกนอากาศ (Air Core) ซึ่งเรียกว่า linear couplers CT. มีลักษณะคล้าย bushing CT. ต่างกันตรงที่ไม่มีแกนเหล็ก และมีจำนวนรอบด้านทุติยภูมิมากกว่าเท่านั้น ลักษณะด้านทุติยภูมิของ CT. ชนิดนี้เป็นเส้นตรง มีความชันของเส้นประมาณ 5 โวลต์ต่อ 1000 ampere-turn และสามารถที่จะ open circuit ด้านทุติยภูมิได้โดย CT. ไม่เกิดความเสียหาย



รูปที่ 2.6 แสดงการทำงานของ Voltage-differential relay เมื่อมีฟอลต์จากภายนอก

การป้องกันบัสโดยใช้ CT. แบบ Linear couplers ร่วมกับ Voltage relay แสดงดังรูปที่ 2.6 และ 2.7

โดยที่เอาด้านทุติยภูมิของ CT. ในเฟสเดียวกันของแต่ละสายป้อนต่ออนุกรมกันและต่อเข้ากับ voltage relay ในกรณีจ่ายโหลดปกติหรือมีฟอลต์ภายนอกโซนป้องกัน ผลรวมของแรงดันที่เป็น



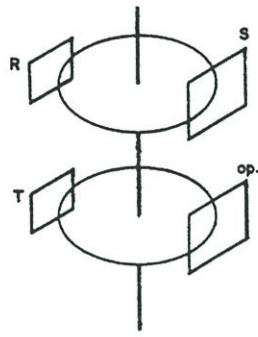
รูปที่ 2.7 แสดงการทำงานของ Voltage-differential relay เมื่อมีฟอลต์ภายในโซนป้องกัน

ค่าเหนี่ยวนำทางด้านทุติยภูมิจะมีค่าเป็นศูนย์ (ดังรูปที่ 2.6) แต่เมื่อเกิดบัสฟอลต์ขึ้น (ดังรูปที่ 2.7) ผลรวมของแรงดันที่เหนี่ยวนำทางด้านทุติยภูมิ จะมีแรงดันค่าหนึ่งตกคร่อม coil ของรีเลย์และจะทำให้รีเลย์ทำงานด้วยเวลาอันรวดเร็ว

การป้องกันบัสโดยวิธีนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะมีความเชื่อถือได้สูง และมีความเร็วในการทำงานสูง ใช้งานง่าย และสามารถตัดแปลงได้ง่ายเมื่อมีการจัดเรียงบัสเปลี่ยนไปอีกด้วย

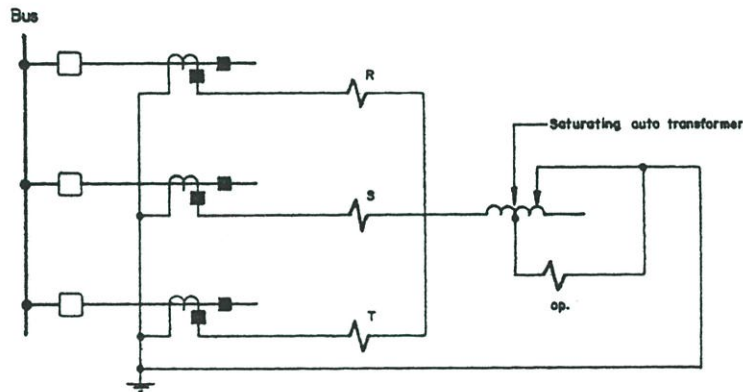
2. Multi – restraint , variable-percentage differential protection.

วิธีนี้ใช้กับ CT. ธรรมดาทั่วไป ซึ่งในกรณีที่เกิดฟอลต์ภายนอกโซนป้องกันอย่างรุนแรง CT. ก็จะอิ่มตัวได้ ดังนั้นรีเลย์ที่นำมาใช้จึงสลับซับซ้อนกว่าวิธีที่กล่าวแล้วในข้อ 1 ทั้งนี้เพื่อชดเชยกับคุณสมบัติของ CT. รีเลย์ดังกล่าวประกอบด้วย Restraint unit 3 ชุด (R , S , T) และ operating unit 1 ชุด รวมเป็น 4 ชุด สองชุดแรกจะวางในลักษณะเดียวกัน แต่อยู่บนจาน (Disc) เดียวกัน ส่วนอีกสองชุดก็จะวางในลักษณะเดียวกัน แต่อยู่บนจาน (Disc) อีกด้านหนึ่ง และจานทั้งสองอยู่บนแกนเดียวกัน (ดังรูปที่ 2.8) โดยมี moving contact ยึดอยู่ที่แกนนี้ด้วย Restraint unit จะทำให้เกิดแรงให้จานหมุนในทิศทาง “open tripping contact” ส่วน Operating unit ทำให้เกิดแรงให้จานหมุนในทิศทาง “Close tripping contact”



รูปที่ 2.8 แสดงงานหมุ่นของรีเลย์ป้องกันแบบ Multi – restraint

ลักษณะของ Variable percentage สามารถทำได้โดย Energize operating unit ผ่าน Built-in saturating autotransformer ซึ่งทำให้สามารถแก้ CT. error ได้โดยที่ในตอนเกิดกระแสฟอลต์ต่ำ ๆ คุณสมบัติของ CT. ยิ่งคืออยู่ percentage จะน้อยทำให้มีความไวสูงเมื่อเกิดฟอลต์ภายนอกอย่างรุนแรง

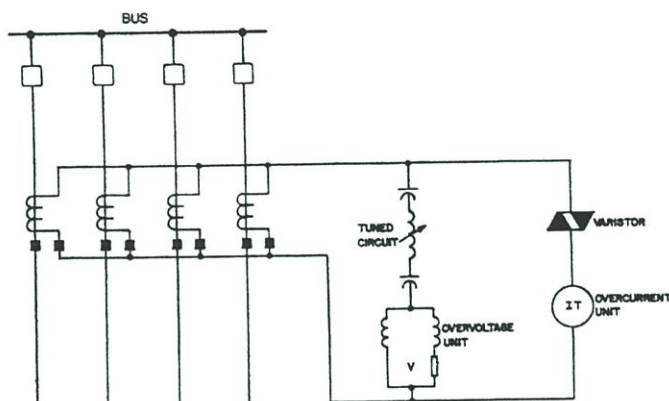


รูปที่ 2.9 แสดงการทำงานของรีเลย์ป้องกันแบบMulti – restraint

คุณสมบัติของ CT. เริ่มลดลง percentage ก็จะมากขึ้น ทำให้ความไวน้อยลงขณะเดียวกัน saturating autotransformer จะมีค่าความต้านทานสูง สำหรับกระแสเฟลอร์เรนเซียลต่ำ ๆ ทำให้กระแสซึ่งเกิดจาก CT. error หรือ CT. saturation สามารถผ่านไปยัง operating coil ได้เพียงจำนวนจำกัด แต่ถ้าเป็นฟอลต์ภายใน ซึ่งมีกระแสแตกต่างสูงมาก ๆ ค่าความต้านทานของ autotransformer จะลดลง เนื่องจากการอิ่มตัว กระแสจะสามารถผ่านไปยัง operating coil ได้ ข้อดีอีกประการหนึ่งก็คือ ส่วนประกอบที่เป็น DC. จะไม่สามารถผ่าน Saturate autotransformer ไปได้ ทำให้อิทธิพลของส่วนประกอบที่เป็น DC. ต่อ operating unit มีน้อยมาก

3. High impedance-Voltage differential protection

วิธีนี้ใช้กับ CT. ธรรมดา แต่หลีกเลี่ยงปัญหา error เนื่องจากคุณสมบัติของ CT. ที่ใช้ โดยการใช้ High impedance relay unit ต่อ ตามรูป 2.10 ซึ่งทำให้กระแส error ที่เกิดขึ้นไม่ไหลผ่าน operating coil ของรีเลย์ แต่จะไหลกลับอยู่ใน CT. โดยค่าความต้านทานทางด้านทุติยภูมิของ CT. ทุกตัวต้องต่ำมาก ๆ (CT. พวกนี้ได้แก่ bushing CT. เป็นต้น) CT. ทุกตัวที่ใช้ต้องมี turn ratio เท่ากัน และใช้งานที่ full winding (หรือ full tap) ด้วยห้ามใช้ Auxiliary CT. ในการ match ratio และเพื่อเป็นการลดความต้านทานระหว่าง CT. กับจุดต่อเข้ารีเลย์ จึงขนานด้านทุติยภูมิของ CT. ทุกตัวเข้าด้วยกัน และขนานกันใกล้ CT. ให้มากที่สุด ด้วยระยะทางที่ใกล้เคียงกันให้มากที่สุด



รูปที่ 2.10 แสดงการทำงานของ High impedance-Voltage differential protection

2.2.2 ระบบป้องกันสายส่ง (Transmission Line Protection) [6]

สายส่งเป็นอุปกรณ์ที่เกิดฟอลต์ได้มากที่สุดในระบบไฟฟ้า เนื่องจากมีระยะทางยาว ผ่านป่าเขา มีต้นไม้ซึ่งฟอลต์ที่พบมากที่สุดคือฟอลต์ลงดินรองมาคือ เฟสฟอลต์ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการป้องกันที่ดี และในระบบ Line ส่วนใหญ่เป็น Loop Line คือ Line ที่สามารถรับไฟมาได้ทั้งสองข้าง Relay ที่เราใช้ป้องกันมี

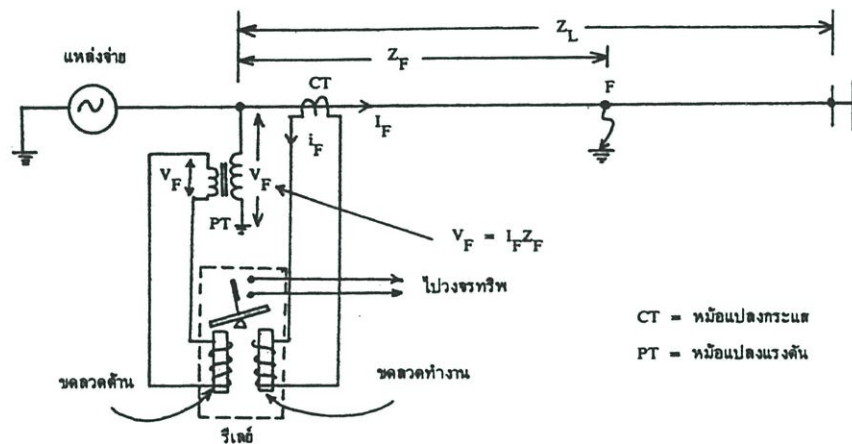
1. Distance Relay
2. Current differential Relay

1.Distance Relay

หลักการการทำงานของ Distance Relay

รีเลย์ทำงานด้วยปริมาณ 2 ปริมาณ คือ แรงดัน และกระแส จากรูปที่ 2.11 ซึ่งค่าทั้งสองจะไป Energized Coils แต่ละชุดคือ Coil ทำงานกับ Coil ด้าน ค่าแรงดัน (Voltage) จะให้ Coil ด้านทำงาน ค่ากระแสจะให้ Coil ทำงาน ซึ่งค่าที่ Relay ทำงานมาจากอัตราส่วน V / I ที่ต่ำกว่าค่า Set การ

ทำงานของ Relay ขณะที่เกิดฟอลต์ในสายส่งจะมีกระแสฟอลต์สูงไหลและแรงดันที่จุดฟอลต์จะต่ำลง แรงดันที่วัดได้จาก PT. หรือ VT. (Potential or Voltage Transformer) จะขึ้นกับระยะทางของ PT. กับจุดฟอลต์คือถ้าฟอลต์เกิดใกล้ PT. แรงดันที่ได้จะน้อยถึ ฟอลต์เกิดไกลแรงดันจะมาก ส่วนกระแสจะตรงข้ามกับแรงดันคือฟอลต์ใกล้กระแสจะมาก ฟอลต์ไกลกระแสจะน้อย อัตราส่วน V_F / I_F นี้คือค่า Impedance (Z_F) ซึ่งค่านี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทาง คือ ระยะทางมาก Impedance มาก ระยะทางน้อย Impedance น้อย ดังนั้นเราจึงเรียกรีเลย์นี้อีกอย่างว่า Distance Relay ซึ่งก็คือ Impedance Relay นั่นเอง



รูปที่ 2.11 แสดงหลักการการทำงานของ Distance Relay

Distance Relay แบ่งได้ 3 ประเภท ตามค่าที่ใช้วัดคือ

1. Impedance Relay วัดค่า Impedance (Z) ของสายส่ง เหมาะสำหรับใช้กับสายส่งยาวปานกลาง
2. Reactance Relay วัดค่า Reactance (X) ของสายส่ง เหมาะสำหรับใช้กับสายส่งขนาดสั้น เพราะสามารถคลุมค่า Arc Resistance ได้
3. MHO Type Relay วัดค่า Admittance (Y) เหมาะสำหรับใช้กับสายส่งยาว

Zone Setting ของ Distance Relay

เนื่องจากสายส่งแต่ละช่วงจะมีรีเลย์ของสถานีไฟฟ้าข้างเคียงเป็น Back up ดังนั้นรีเลย์แต่ละสถานีไฟฟ้า จะประกอบด้วย Relay 2-3 Zone เป็นอย่างน้อย ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนด Zone ป้องกันคือ

Zone 1 = 85% ของ Line Impedance ที่ป้องกัน

Zone 2 = 100% ของ Line Impedance ที่ป้องกัน + 50% Line Impedance ของ

Line ถัดไปที่สั้นที่สุด

Zone 3 = 100% ของ Line Impedance ที่ป้องกัน + 120% Line Impedance ของ Line ถัดไปที่ยาวที่สุด

Starting Zone \cong 130% Zone 3 (ถ้ามี Zone Starting) Zone 1 ที่ไม่ Set เต็ม 100% เนื่องจาก Error ของ Impedance ., CT. , PT. และจากตัว Relay เอง ซึ่งทำให้ Relay Over Reach ได้ คือ มองเลยออกไปจาก LINE ที่ป้องกันสำหรับเวลาในการทำงานมีดังนี้

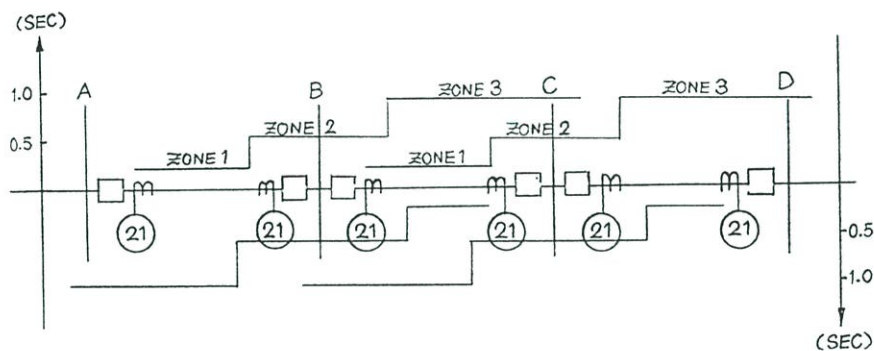
Zone 1 ทำงานในเวลาทันทีทันใด

Zone 2 ทำงานผ่าน Timer เวลา 0.5 วินาที (115 kV.) , 0.35 วินาที (230 kV.)

Zone 3 ทำงานผ่าน Timer เวลา 1.0 วินาที (115 kV., 230 kV.)

Zone 4 ทำงานผ่าน Timer เวลา 4.0 วินาที (115 kV.)

เขียนรูปแสดง Time Co-Ordination แบบ Step Time ของ Distance Relay ได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงการ Co-Ordination ของ Time Step Distance

การ Set ดังกล่าวข้างบนนี้ อาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการใช้งาน ของ Relay ต่อระบบ

ระบบป้องกันสายส่ง 230 kV. [6]

ในระบบ 230 kV. Distance Relay ที่ใช้ป้องกันสายส่งแบ่งการป้องกันเป็น 2 แบบคือ

1. Primary Relay
2. Back up Relay

Primary Relay

ใช้ป้องกันสายส่งให้ทำงานได้เร็วขึ้นกว่า Back up Relay เนื่องจาก Back up Relay Zone 1 ใช้ป้องกันแค่ 80 – 90% Line ถ้า ฟอลต์ เกิดขึ้นช่วงเลขออกไปจาก 80-90% Relay ทำงาน Trip Zone 2 ดังนั้นถ้าต้องการให้ Relay ทำงาน Trip ทันทีทันใดจึงใช้ระบบบริเลย์ซึ่งเรียกว่า Pilot Relay หรือ Carrier Relay มาใช้เพื่อให้ Trip ทันทีทันใดได้ตลอด 100% ของ Line

ข้อดีของการ Trip ด้วย High Speed พร้อม ๆ กันทั้ง 2 ด้าน เมื่อเกิด Line Fault ขึ้นนั้นมีดังนี้

1. ช่วยเพิ่ม Transient Stability ของระบบ
2. ลดความเสียหายที่เกิดในสายส่งให้น้อยลง
3. ทำให้สามารถใช้ระบบ High Speed Reclose ได้เพื่อให้ระบบกลับคืนสู่สภาวะปกติได้เร็ว

สำหรับ Setting ของ Pilot Relay หรือ Carrier Relay เรา Set Relay = Zone 2 ของ Phase Distance Relay ในชุด Back up เพื่อป้องกันการ ทำงาน Trip ผิดพลาด เกินความจำเป็น ถ้าใช้ Set = Zone 3 เพราะ Zone 3 มองไกลมีความไวในการทำงานสูงทำให้สัญญาณ Carrier ใช้ร่วมกันต้องมีความไวในการส่ง Blocking Signal สูงด้วย

ระบบ 230 kV. ที่ใช้ Carrier เราใช้ Directional Comparison Blocking Scheme ประกอบด้วยทั้ง Phase และ Ground Relay สำหรับ Phase to Phase และ 3 – Phase Fault ประกอบด้วย

(1) Phase Pilot Relay (21P) เป็น Distance Relay แบบเดียวกันกับ Back up Relay บางทีก็เป็นตัวเดียวกับ Distance Relay Zone 2

(2) Carrier Starting Relay (21S) ใช้ Distance Relay KD-41 หรือ KD-11

(3) Ground Pilot Relay ใช้ Directional O.C. Ground Carrier (67N) รีเลย์เป็นแบบ Instantaneous เมื่อเกิด Single Line to Ground Fault ในทิศทางด้าน Line ที่จะป้องกันแต่จะเห็นฟอลต์ไปไกลแค่ไหนไม่สามารถกำหนดได้ ขึ้นอยู่กับกระแสฟอลต์ในขณะนั้น

(4) Carrier Starting Relay สำหรับ Line to Ground Fault ใช้ Instantaneous Over Current Unit ในตัว Carrier Auxiliary Relay

Back up Relay ใช้ป้องกัน Line ที่ป้องกันและเป็นชุด Back up Line ที่ป้องกันและ Line ถัดไปซึ่งแบ่งได้ 3 Zone คือ Zone 1 , Zone 2 , Zone 3 ใช้ Distance Relay เป็นตัวป้องกันทั้ง Phase และ Ground ประกอบด้วย

- Phase Fault

ใช้ Relay Distance Relay ตัวละ Zone ป้องกัน 3 Phase ใน 1 ตัว

- Ground Fault

ใช้ Relay Ground Distance Relay 3 ตัว อาจเป็นตัวละ Zone คือ 1 , 2 , 3 และมี 3 เฟส อยู่ในตัวเดียวกันเช่น Relay SDG หรือตัวละเฟส (A , B , C) มี 3 Zone ในตัวเดียวกันเช่น Relay KDXG

ระบบป้องกันสายส่ง 500 kV. [7]

1. Primary Distance relay ชุดที่ 1 ซึ่งมี Distance relay type LZ96 กับ Directional Earth fault relay type PPX401 ใช้หลักการป้องกันแบบ Permissive Under reach transfer trip (PUTT) โดยร่วมกับระบบสื่อสารแบบ PLC. (Power line carrier)

2. Primary Distance relay ชุดที่ 2 ซึ่งมี Distance relay type LZ96 กับ Directional Earth fault relay PPX401 ใช้หลักการป้องกันแบบ Permissive Overreach transfer trip (POTT) โดยร่วมกับระบบสื่อสารแบบ Microwave (MW.)

3. Back up distance relay type LZ95 เป็นแบบ time delay ไม่มีการใช้ระบบ carrier และ Microwave เหมือนข้อ 1 และ 2

Primary Distance Relay ชุดที่ 1

ประกอบด้วย Distance relay และ Directional Earth fault type LZ96 และ PPX401 ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- Distance Relay LZ96

ใช้ป้องกัน Phase fault และ Ground fault รีเลย์เป็นแบบ Non-Switching ประกอบด้วย

1. Starting มี 4 Starting 3 ชุด ใช้กับ ฟอลต์ แบบ 1 phase และ 3 phase อีก 1 ชุดที่เหลือใช้กับ phase to phase fault การทำงานทำร่วมกับ Measuring แต่ถ้าทำงานไม่ร่วมกับ Measuring จะทำผ่าน Time t_4 จึง Trip เราจึงเรียกอีกชื่อว่า Zone 4 ได้เช่นกัน

2. Measurement มีการวัด 4 ชุด คือ 3 ชุด สำหรับฟอลต์แบบ 1 phase fault และ 3 phase fault อีก 1 ชุด ใช้กับ phase to phase fault

รีเลย์จะทำงาน Trip ได้เมื่อเกิด ฟอลต์ และรีเลย์ Starting กับ Measuring ทำงานทั้งคู่ถ้าอยู่ใน Zone .1 ก็ Trip ทันทีทันใด แต่ถ้า ฟอลต์ อยู่ใน Zone .2 ก็ Trip ด้วย Time T2 Fault ใน Zone.3 ก็ Trip ด้วย Time T3 แต่ถ้า ฟอลต์ อยู่ใน Zone.4 คือ Starting (Measuring ไม่ทำงาน) ทำงานจะ Trip ด้วย Time T4 การ SET Zone มี

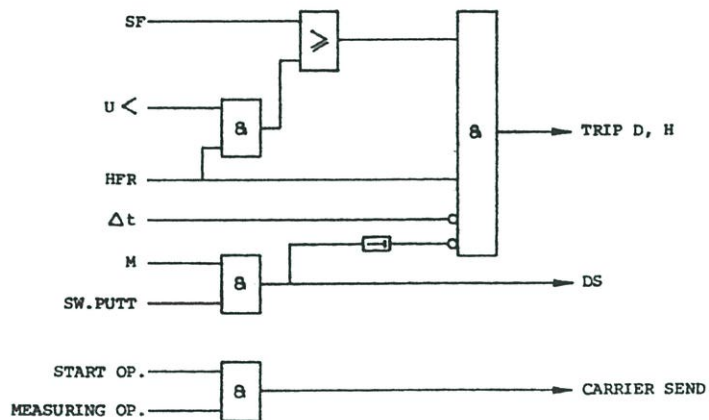
Zone.1 Set ไว้ = 60% ของ (500 kV. Line NCO – TTK)

เมื่อมี ฟอลต์ เกิดขึ้นในช่วง 80% รีเลย์จะ Trip ด้วยเวลาทันทีทันใด สำหรับในส่วน 20% ที่เหลือ ฟอลต์ ที่เกิดขึ้นจะ Clear Fault ด้วย Time Zone.2 หรือ Zone.3 หรือ Time T4 ซึ่งใช้ในการ Clear Fault เพื่อให้การ Clear เร็วขึ้นคือ Trip ออกทันทีทันใดจะใช้ Scheme พิเศษร่วมกับสัญญาณสื่อสารช่วย ในที่นี้ใช้ Scheme Permissive under reach Transfer Trip ร่วมกับ PLC. คือรีเลย์ทำงาน Trip ได้จาก Starting Forward ทำงานพร้อมทั้งรับ Carrier receive (HFR) รีเลย์สั่ง Trip ได้นอกจากนี้ยังมีวงจร $u < (Minimum Voltage)$ ช่วย Trip กรณีเป็น Weak infeed คือรีเลย์เห็น Voltage ต่ำและรับ HFR ก็สั่ง Trip ได้

สรุป รีเลย์ Trip ได้ 3 กรณี คือ

1. Starting + Measuring
2. HFR + Starting forward
3. HFR + Undervoltage

รีเลย์ส่ง carrier เมื่อ Starter operate + Measuring operated เขียนเป็น Logic ดังนี้



รูปที่ 2.13 แสดง Logic การทำงานของ 500 kV Distance Relay LZ96

Zone.2 SET ไว้ = 100% ของ (500 kV. Line NCO – TTK) + 80% หม้อแปลงที่ขนานกันที่ TTK รีเลย์ทำงานเมื่อเกิด ฟอลต์ ขึ้นและ Zone.1 ไม่ทำงาน Trip ผ่าน Time = 600 ms ใช้เป็น Back up ในการป้องกันสายส่ง

Zone.3 SET ไว้ = 100% ของ (500 kV. Line NCO – TTK) + 120% หม้อแปลงที่ขนานกันที่ TTK รีเลย์ใช้เป็น Back up เหมือน Zone.2 ทำงานผ่าน Time = 1.4 s

Zone.4 SET ได้ 2 ส่วน คือ

Forward Starting = 174% Zone.3

Reverse Starting = 30% Forward Starting

ทั้งนี้ ต้องคำนึงถึงการ SET Zone.4 ต้องไม่เข้าไปในเขต โหลด Zone.4 ทำงานผ่าน Time = 1.8 s

- Directional earth fault relay type PPX401 เป็นรีเลย์ใช้เพิ่มขึ้นมาเพื่อเสริมกับ LZ96 ใช้ในการตรวจจับ ฟอลต์ ที่เป็น High Impedance Earth Fault ซึ่ง Distance relay LZ96 ตรวจจับไม่ได้ รีเลย์ PPX401 ประกอบด้วย

Directional Zero Sequence O.C. relay และวงจร carrier logic ทำงานด้วยหลักการ “Directional comparisons scheme”

รีเลย์ SET การทำงาน คือ

1. PICK UP = 8% In = 160 A primary (CT – RATIO : 2000/1)
2. Time TB = 100 ms (Basic time)

รีเลย์ทำงานหลังจาก Time TB เพื่อให้รีเลย์ LZ96 ทำงานก่อน

3. Time TR = BLOCK ไม่ทำงาน (Reverse Time)

ใช้เป็น O.C. BACK UP แต่ไม่ใช้งานจึง BLOCK ไว้

เมื่อรีเลย์เห็น ฟอลต์ จะ Trip ได้ด้วยเงื่อนไข ดังนี้

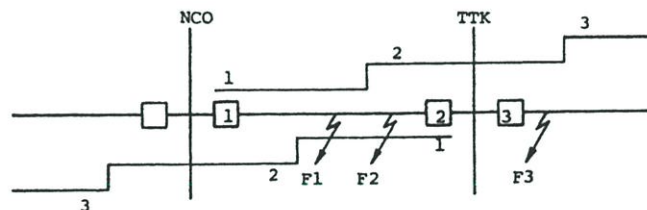
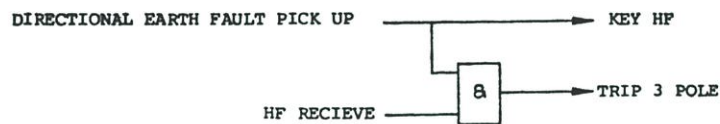
1. BREAKERS LINE CLOSE อยู่ ถ้า Breaker open อยู่ รีเลย์ DEF จะถูก BLOCK ไม่ให้ทำงาน

2. รีเลย์ Pick up เห็น ฟอลต์ ในทิศทางที่ป้องกัน + HF Receive

3. รีเลย์จะถูก BLOCK ระหว่างเกิด Single pole auto reclosing dead time จาก CONTACT

รีเลย์

4. รีเลย์เมื่อเห็น ฟอลต์ จะส่ง HF ไปยัง สถานี ตรงข้าม



รูปที่ 2.14 แสดงหลัก การทำงานของ 500 kV Directional earth fault relay

ตัวอย่าง

Fault at F1 : ที่ NCO และ TTK Trip Instantaneous ด้วย to (Operating time น้อยกว่า 20 ms) โดยทำงานไม่ขึ้นกับ Carrier

Fault at F2 : ที่ NCO Trip INST. จาก HF Receive + Start ส่วนที่ TTK Trip INST. ด้วยรีเลย์เอง

Fault at F3 : ที่ NCO Trip ด้วย Time Zone 2 ส่วนรีเลย์ที่ TTK BKR. No.2 ไม่เห็น ฟอลต์

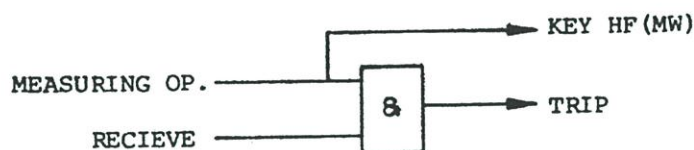
Primary relay ชุดที่ 2

ประกอบด้วย Distance relay และ Directional Earth Fault type LZ96 และ PPX401 ตามลำดับ

- Distance relay LZ96

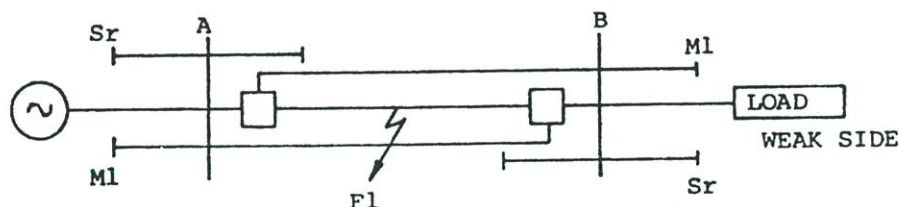
ลักษณะคุณสมบัติการทำงานเหมือนกับชุดที่ 1 แต่จะใช้ Scheme แบบ Permissive Overreach Transfer Trip (POTT) ร่วมกับระบบสื่อสารแบบ MW

Zone.1 SET 100% ของ (NCO – TTK) + 80% หม้อแปลงที่ขนานกันที่ TTK รีเลย์ทำงานเมื่อ Measuring operated + HF RECEIVE ดัง LOGIC ย่อ คือ



รูปที่ 2.15 แสดง Logic ของ Distance Relay LZ96

นอกจากนี้รีเลย์มีวงจร Echo และ Reverse starter (SR) ใช้กรณีระบบเป็นแบบ Weak infeed ดังอธิบายตามรูป



รูปที่ 2.16 แสดงวงจร Echo and Reverse starter

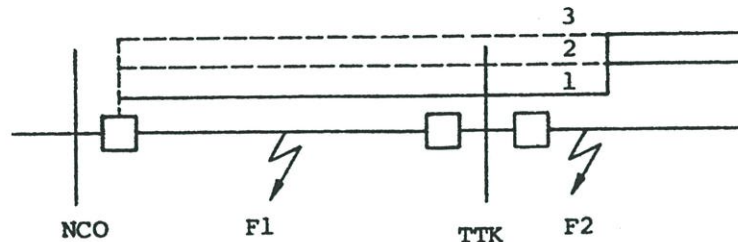
กรณีเกิดฟอลต์ในสายส่งจากสถานี AB รีเลย์ที่ A เห็น ฟอลต์ แต่ Trip ไม่ได้ต้องรอ HF จาก B ส่งมา เนื่องจาก B เป็นด้าน Weak รีเลย์ B ไม่เห็น ฟอลต์ เนื่องจากไม่ถึง Pick up ของรีเลย์ ทำให้ไม่ส่ง HF ไปที่ A ต้องอาศัยวงจรพิเศษ คือ Echo ช่วยส่ง นั่นคือ HF จาก A ส่งไป B ที่ B ตรวจสอบว่าไม่มี ฟอลต์ ด้านหลัง (SR ไม่ทำงาน) ก็จะส่ง HF สะท้อนกลับไป A A รับ HF มาสามารถ Trip ได้ ส่วนที่ B จะ Trip ได้จาก HF ที่รับจาก A และ Under voltage Phase Selection โดย SR ที่ B ต้องไม่ทำงาน หลักการทำงานใช้กับระบบสื่อสาร Microwave

Zone.2 Set เท่ากับ Zone.1 ทำงาน Trip ผ่าน Time = 0.6 s

Zone.3 Set เท่ากับ Zone.1 ทำงาน Trip ผ่าน Time = 1.4 s

Zone.4 Set เหมือน Primary ชุด 1 ทำงานผ่าน Time = 1.8 s

สำหรับ Directional Earth Fault หลักการทำงานเหมือน ชุด 1 แต่ใช้การสื่อสารแบบ MW แทน



รูปที่ 2.17 แสดงการทำงานของ Directional Earth Fault

ตัวอย่าง

Fault at F1 : TRIP ที่ NCO และ TTK ด้วย HF-Receive + Measuring แบบ INST

Fault at F2 : TRIP ที่ NCO ด้วย Time Zone.2

หรือถ้าเกิด ฟอลต์ ที่ F1 แต่ไม่ Trip ทันทีทันใดจะ Trip ด้วย Zone.2 , Zone.3 แทน

Back up distance relay

เป็นรีเลย์ type LZ 95 แบบ Switching มีการทำงานวัด ฟอลต์ เป็น Zone กล่าวคือ เมื่อมี ฟอลต์ เกิดขึ้น รีเลย์วัดว่าอยู่ใน Zone.1 หรือไม่ ถ้าใช่จะ Trip ออกทันทีแต่ถ้าอยู่ Zone.2 ก็จะ Switch ไป Zone.2 เมื่อถึง Time T2 ถ้าไม่ใช่ก็จะ Switch ไปวัด Zone.3 ถ้าไม่ใช่ถึง Time T3 ก็จะ Switch ไป Zone.4 อีก ถ้ามี ฟอลต์ จะ Trip ด้วย Time T4

รีเลย์ชุดนี้เป็น Back up ให้กับ LZ96 ชุดที่ 1 และ 2 Setting รีเลย์คือ

Zone.1 Set 80% (NCO – TTK)

Trip โดยผ่าน Time delay = 0.4 s เพื่อให้ชุด Primary LZ96 ชุดที่ 1 และ 2 ทำงานก่อน

Zone.2 Set 100% (NCO – TTK) + 80% หม้อแปลงที่ขนานกันที่ TTK

Trip โดยผ่าน Time = 0.8 s

Zone.3 Set 100% (NCO – TTK) + 120% หม้อแปลงที่ขนานกันที่ TTK

Trip โดยผ่าน Time = 1.6 s

Zone.4 หรือ Starting Zone SET เท่ากับ Starting Forward ของชุด Primary Trip ผ่าน

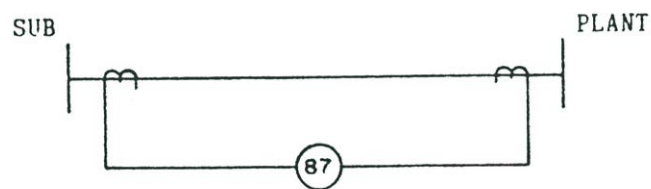
Time = 2.0 s

2. Current Differential Relay [6]

เนื่องจากระบบไฟฟ้าแรงดัน 230 kV. กรณีสายส่งระยะสั้นๆถ้าใช้รีเลย์แบบ Distance Relay ในการป้องกันมักประสบกับปัญหาจากแรงดันภายนอก เช่น Induce Voltage และค่าผิดพลาดกรณี High Impedance Fault ผลกระทบเหล่านี้ทำให้ระบบรีเลย์ป้องกันลดความน่าเชื่อถือลง เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวจึงใช้ระบบป้องกันซึ่งเรียกว่า Current Differential Relay มาใช้ร่วมกับ Fiber optic channel ใน Overhead Ground Wire ของสายส่ง มีข้อดีคือ Fiber optic จะไม่มีผลต่อแรงดันภายนอกที่เกิดจาก ฟอลต์ และมีความแม่นยำสูง

หลักการดำเนินงานเบื้องต้น

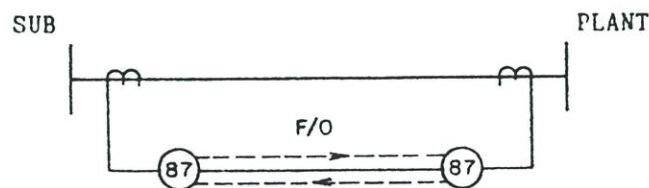
Current Differential Relay ใช้ป้องกันสายส่งระหว่างสถานีไฟฟ้า การทำงานคือเป็นการตรวจสอบกระแสเข้ากับออกให้เท่ากัน แต่เนื่องจากสายส่งที่ป้องกัน ยาวมากกว่า 1.7 km ขึ้นไป การที่จะลาก Cable CT. จากฝั่งใดฝั่งหนึ่งจะต้องใช้สาย CT. ยาวมาก ซึ่งจะทำให้เกิด Voltage Drop สูง ทางปฏิบัติจึงแก้ปัญหาโดยการติดตั้งรีเลย์ไว้ทั้งสองด้านแทน



รูปที่ 2.18 แสดงหลักการดำเนินงานของ Line Differential relay

ดังนั้นจึงต้องมีการส่งสัญญาณ CT. จากแต่ละข้าง ไปยังฝั่งตรงข้ามเพื่อ Check ว่า Current เข้า – ออก เป็นปกติ การส่งสัญญาณ CT. ของ รีเลย์ส่งเป็น 2 ลักษณะคือ

1. ส่งโดยแปลงเป็นสัญญาณ Audio Tone
2. แปลงเป็นสัญญาณแสงโดยใช้ ระบบสื่อสารแบบ Fiber Optic



รูปที่ 2.19 แสดงการส่งสัญญาณแต่ละข้างของ Line Differential relay

การใช้งาน

รีเลย์สามารถใช้งานกับสายส่งสั้น ๆ เช่น จากโรงไฟฟ้าไปยังสถานไกหรือระหว่างสถานีไฟฟ้าใกล้ ๆ เป็นต้น และสามารถใช้งานได้กับสายส่งยาวจนถึง 400 กิโลเมตร นอกจากนี้ยังใช้กับระบบแรงดันสูงจนถึง UHV.

ส่วนประกอบของรีเลย์

ตัวรีเลย์ประกอบด้วย module หลาย ๆ Module อยู่ใน rack ที่ประกอบเป็นโครงกว้าง 19 นิ้ว สูง 3 RU ซึ่งมีการเดินสายสำหรับการเพิ่มอุปกรณ์ต่อไปภายนอกหน้าเรียบร้อยแล้ว

รีเลย์สามารถใช้ Fiber optic interface สำหรับการต่อโดยตรงกับ fiber optic cable หรือจะใช้ Integral audio tone interface กับ carrier หรือไมโครเวฟก็ได้

การใช้รีเลย์กับ audio-tone จะต้องใช้ tone protection package เพิ่มขึ้นมาเพื่อป้องกันผลกระทบจาก transient ที่สถานีไฟฟ้า ตัว protection ที่ใช้จะป้องกัน high frequency transient , station ground mat rise ที่สูงถึง 2 kVrms แต่ปัจจุบันระบบไฟฟ้า 230 kV. เป็น Fiber optic interface

ลักษณะทั่วไปของรีเลย์

1. ความเร็วในการทำงาน
 - ที่ 30 เท่าของ pick – up เวลาทำงาน 10-22 ms.
 - ที่ 4 เท่าของ pick – up เวลาทำงาน 17-29 ms.
2. ใช้แต่กระแสน้อยในการทำงานไม่มีแรงดันมาเกี่ยวข้อง
3. สามารถใช้กับ CT. ที่มี Ratio ต่างกันได้
4. ไม่มีผลกระทบจากการสวิงของระบบ (Out-of-Step)
5. ใช้กับสายส่ง 2 ปลายหรือ 3 ปลายก็ได้
6. สามารถใช้กับ weak feed เพราะจะทำทั้งหมด เนื่องจากรีเลย์ที่ใดถึงค่า pick-up ก็จะทำให้รีเลย์ที่อื่น Trip ตามไปด้วย
7. มีวงจร High speed channel monitoring แสดงถึงผิดปกติเป็นพวก Indicator , alarm contact และเป็น input ให้กับ Trip decision logic
8. มีการ Set ค่า positive , negative และ Zero-sequence sensitivity แยกกัน
9. ใช้การเปรียบเทียบขนาดจริง ๆ ตั้งแต่ค่า pick-up น้อยจนถึง 5 เท่าของ pick-up หลังจาก 5 เท่าของ pick-up จะเปลี่ยนเป็นการใช้การเปรียบเทียบเฟส
10. ใช้วงจร SNR เพื่อลดผลจาก noise ที่มีต่อ audio-tone interface
11. สามารถปรับการหน่วงเวลาเป็นอิสระกัน เมื่อใช้กับสายส่ง 2 ปลาย หรือ 3 ปลาย
12. ใช้วงจร comparison แบบเดียวกัน เพื่อให้ได้เฟสเซอร์จริงของปริมาณ local และ remote

13. ใช้วงจร sequence network แบบเดียวกันเพื่อลดเฟส และขนาดที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมักเป็นปัญหาที่พบ
14. สามารถปรับและวัดค่าได้จาก Test point ข้างหน้ารีเลย์
15. สะดวกในการใช้กับ Communication channel
16. ตรงกับมาตรฐาน ANSI C37.90 และ IEC-255

การทำงานในแต่ละ Module

จากบล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานดังรูปที่ 2.20 กระแสโหลด หรือกระแส ฟอลต์ ทั้ง 3 เฟส คือ A , B , และ C จาก CT. หลักจะถูกส่งไปยังวงจร Transformation เพื่อเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน ป้อนให้กับ Sequence network วงจรนี้จะทำการเปลี่ยนกระแสทั้ง 3 เฟสเป็นแรงดันเพียงค่าเดียว นอกจากนั้นสัญญาณของ positive, negative และ zero sequence ยังสามารถปรับได้เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับระบบที่ใช้งานอยู่โดยปรับที่วงจรนี้

แรงดันที่ได้จาก Composite sequence network จะถูกป้อนให้กับวงจร modulator และวงจร Delay equalizer ต่อไป

ในวงจร modulator จะใช้เทคนิคที่เรียกว่า Pulse period modulation (PPM) ซึ่งค่า carried จะแปรผันอย่างต่อเนื่องกับการแปลงสัญญาณ amplitude โดยเทคนิค PPM นี้จะให้ความแม่นยำและความรวดเร็วในการเปรียบเทียบ สำหรับการ Trip แรงดันที่ได้จาก sequence network ที่แต่ละปลายของสายส่งจะถูกทำให้ปรากฏขึ้นอีกข้างของสายส่งด้วยเวลาที่น้อยที่สุด และมีความเพี้ยนน้อยที่สุด

แรงดันที่รับจาก Sequence network จะถูกส่งมาที่ modulator เพื่อเปลี่ยนเป็นสัญญาณ Pulse train และส่งต่อไปยัง Communication channel interface

จะเห็นว่าแรงดันส่วนหนึ่งจาก Sequence network ถูกส่งมายัง Delay equalizer ทั้งนี้เพื่อให้สัญญาณที่จะเปรียบเทียบ ทั้งที่ local และ remote ตรงกันเพราะสัญญาณ remote จากสถานีตรงข้ามเสียเวลาในการส่ง จึงต้องมีการหน่วงเวลาให้สัญญาณ local ส่งไปยัง Phasor comparison ซ้ำลง

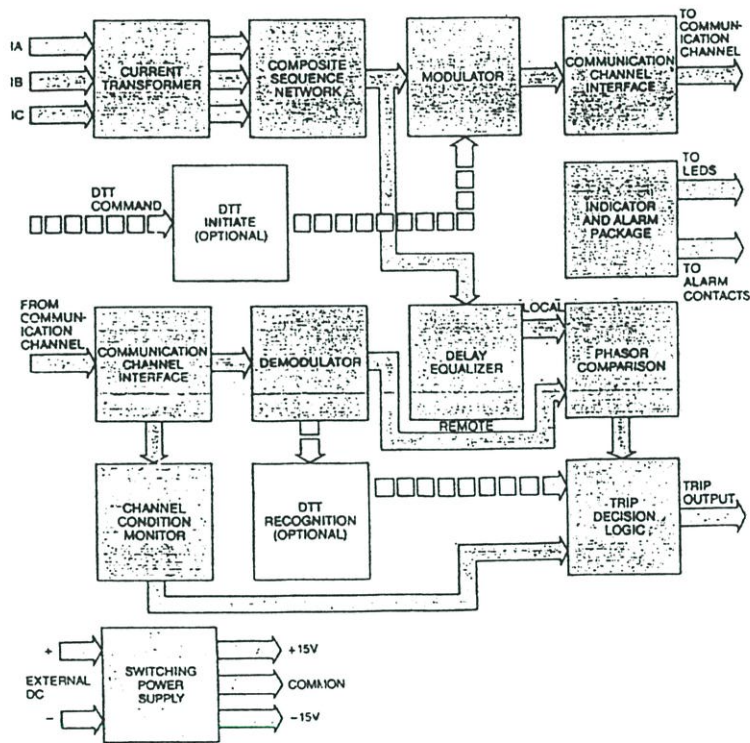
ส่วนสัญญาณจาก remote ที่รับจากสถานีตรงข้ามจะส่งเข้ามาที่ Communication channel interface แล้วส่งสัญญาณมายัง demodulator เพื่อทำการเปลี่ยนสัญญาณจาก PPM ไปเป็นขนาดถูกคลื่น เพื่อให้กับ Phasor Comparison ต่อไป

จะเห็นว่าทั้งการรับและส่งสัญญาณของรีเลย์จะต้องผ่าน Channel interface module ไม่ว่าจะ เป็น Fiber optic หรือ Tone interface เพราะจะเพิ่มเสถียรภาพและความง่ายให้กับรีเลย์ โดย Module นี้จะผลิตสัญญาณให้กับระบบทำให้สามารถต่อโดยตรงกับช่องสื่อสาร

Module นี้ประกอบด้วยตัวส่ง (Transmitter) , ตัวรับสัญญาณ (Receiver) และวงจรแสดง (Monitoring Circuitry) ข้อมูลของ channel จาก module นี้จะถูกป้อนให้กับวงจร Trip decision logic เพื่อทำการประมวลผลต่อไป

ทั้ง Tone interface และ Fiber optic interface จะผลิตสัญญาณ Carrier frequency ที่ 1.7 kHz และแยก channel ทั้งส่งและรับสัญญาณ

Fiber optic interface ประกอบด้วย fiber optic transmitter ที่เป็น Amplifier-diode combination ซึ่งเป็น Emitting diode หรือ LED เปล่งแสง ON กับ OFF ขึ้นกับช่วงเวลาของ PPM (Pulse period modulation) จาก Modulator circuit กับตัวรับสัญญาณที่เป็น photodiode ที่ให้สัญญาณ pulse ซึ่งจะถูกขยายด้วย Trans-impedance amplifier แล้วส่งต่อไปกับ Band pass amplifier ผ่านไปยัง Automatic gain control (AGC) เพื่อให้สัญญาณ Amplitude carrier ที่คงที่แก่ วงจร PPM demodulator



รูปที่ 2.20 แสดง Module ของ Line Differential relay

ในส่วนการทำงานของกระบวนการ comparison จะเกิดปริมาณ 2 ปริมาณ ที่ได้จากแรงดัน local และ remote คือ

1. ปริมาณ operating ซึ่งได้จากผลรวมของ vector แรงดัน local และ remote ดังสมการ

$$V_{op} = |\bar{V}_L + \bar{V}_H|$$

โดย V_{op} = The operating quantity

V_L = The local voltage

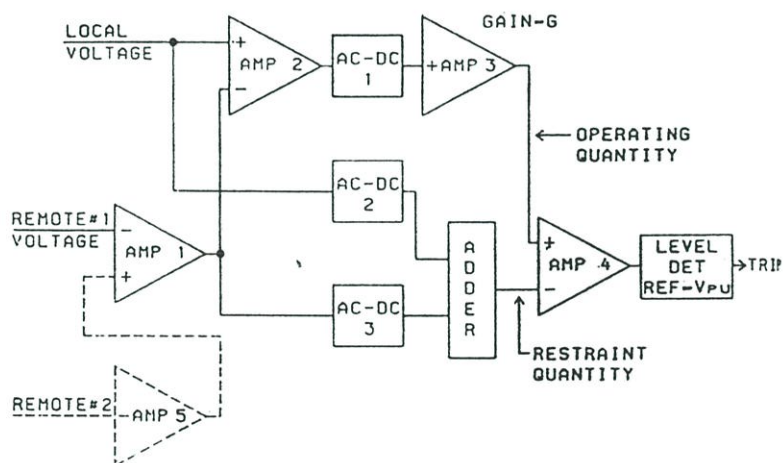
V_H = The remote voltage

2. ปริมาณ restraint ที่เกิดขึ้นจากการรวมทั้ง Local และ Remote voltage ด้วยขนาด (ไม่มีผลของ Phase angle เข้ามาเกี่ยวข้อง) ดังสมการ

$$V_{res} = |\bar{V}_L| + |\bar{V}_H|$$

โดย V_{res} = the restraint voltage

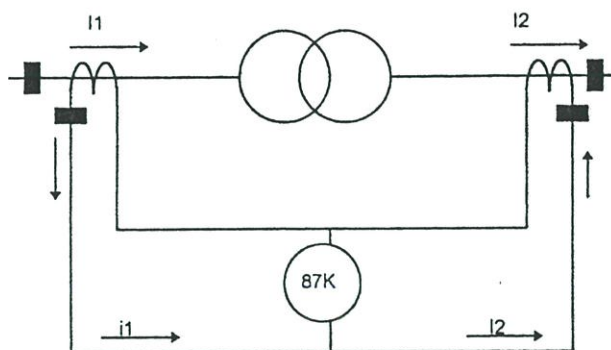
ผลของ Restraint voltage จะมีข้อตรงข้ามกับ Operating voltage ปริมาณทั้ง 2 คือ restraint และ operating จะรวมกันแล้วส่งให้ Level detector ซึ่งจะให้สัญญาณ Trip ถ้าผลที่ได้เกินค่า pick-up ที่ Set ไว้



รูปที่ 2.21 แสดง Logic การ Comparison ของ Line Differential relay

2.2.3 ระบบป้องกันหม้อแปลง และชั้นรีแอกเตอร์ (Transformer and Shunt Reactor Protection) [8]

Transformer differential relay หลักการทำงานใช้การตรวจกระแสเข้าและออกหม้อแปลงว่าสมดุลกัน ไม่เกิดกระแสผลต่างขึ้น ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การทำงานของ Transformer Differential Relay

การต่อ CT. จะกำหนด mark CT. โดยให้กระแสไหลผ่านอุปกรณ์ I1 และ I2 CT. I1 จะแปลงกระแส i_1 ออกมาที่มีทิศทางตามรูป ส่วน CT. I2 จะแปลงกระแส i_2 ออกมาซึ่งจะมีทิศทางตามกัน ในสภาวะปกติจะไม่มีกระแสผลต่างเกิดขึ้น ทำให้รีเลย์ไม่ทำงาน $i_1 + i_2 = 0$

แต่ถ้าเกิดฟอลต์ในเขตป้องกัน (ระหว่าง CT. ทั้งสอง) จะมีกระแส operating ไหล = $i_1 + i_2$ รีเลย์จะทำงานสั่งทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์ทั้งด้าน High side และ Low side ของหม้อแปลงเพื่อเคลียร์ฟอลต์

Over current high side ใช้เป็น back up ให้หม้อแปลงทั้ง ฟอลต์ และ overload โดย set = 150% ของ Maximum capacity ของหม้อแปลงมี time delay เมื่อเกิด fault low side = 2 seconds

Over current low side ใช้เป็น back up ให้หม้อแปลงทั้ง ฟอลต์ ด้าน low side และ overload ของหม้อแปลง โดย set = 150 % ของ Maximum capacity ของหม้อแปลงมี time delay เมื่อเกิด fault low side = 1.5 seconds

Over current ground back up 51 GB1 , GB2 ใช้ป้องกัน ขดลวด tertiary ของหม้อแปลง กรณีที่เกิด single line to ground fault ในระบบ ซึ่งจะมีกระแสไหลในขดลวด tertiary ถ้ากระแสที่เกิดขึ้นมากกว่า rated ขดลวด tertiary และไหลเป็นเวลานานจะทำให้ขดลวดเสียหายได้เราจึงใช้รีเลย์ชนิดนี้มาป้องกัน

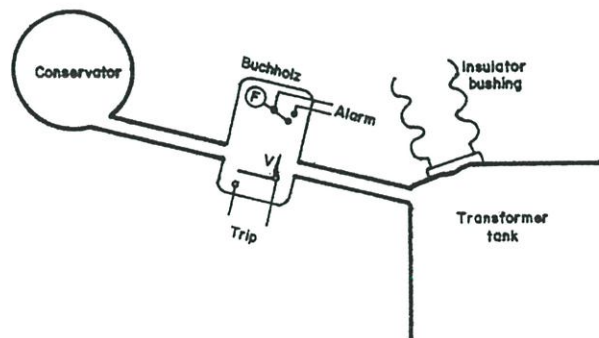
การ setting 51 GB1 set pickup 100% ของ minimum capacity ของขดลวด tertiary มี time delay แบบ long time inverse ซึ่ง set ป้องกัน ฟอลต์ ที่มีค่าน้อยและ set curve ต่ำกว่า damage curve ของขดลวด tertiary สำหรับ 51 GB2 set pickup 200 – 300% ของขดลวด tertiary และมี time delay แบบ very inverse ซึ่ง set ป้องกัน ฟอลต์ ที่มีค่าสูงและ set curve ต่ำกว่า damage curve ของขดลวด tertiary

บุคโฮลซรีเลย์ (Buchholz relay) เมื่อมี ฟอลต์ เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ในหม้อแปลง ซึ่งอาจเนื่องมาจากการ Short turn ของขดลวดและส่งผลให้เกิดการอาร์ก จนเกิดความร้อนสะสมขึ้นตรงบริเวณนั้นและในขดลวดด้วย ความร้อนดังกล่าวอาจสูงถึง 350°C จึงทำให้สารที่เป็นฉนวนทั้งแข็ง

และเหลว เช่น น้ำมันหรือฉนวนกระดาษ เริ่มแยกตัวออกและเกิดเป็นแก๊สติดไฟได้ เช่น ไฮโดรเจน, ไฮโดรคาร์บอน และคาร์บอนมอนนอกไซด์ แก๊สดังกล่าวนี้จะลอยผ่านน้ำมันหม้อแปลงขึ้นไปสะสมอยู่ตอนบนของหม้อแปลง ในลักษณะนี้จึงใช้บุคโฮลซ์รีเลย์ ป้องกันและตรวจจับแก๊สที่เกิดขึ้นดังกล่าว รีเลย์ชนิดนี้ใช้ได้กับหม้อแปลงที่มี Conservator tank เท่านั้น

จากรูปที่ 2.23 แสดงถึงตำแหน่งและลักษณะของการวางบุคโฮลซ์รีเลย์ในตัวหม้อแปลง เพื่อให้รีเลย์ทำงานได้ดีที่สุด จะต้องวางท่อที่ไปยัง Conservator tank ให้เอียงจากแนวระดับประมาณ 4 – 7 องศา ในบุคโฮลซ์รีเลย์จะมีลูกลอยซึ่งมีสวิตช์ชนิดปรอท (Mercury switch) ติดอยู่ และมีตุ้มน้ำหนัก (Counter balance weight) ถ่วงลูกลอยไว้ อีกด้านหนึ่ง ทั้งหมดนี้ปกติจะจมอยู่ในน้ำมัน น้ำหนักของลูกลอยจึงน้อย ตุ้มน้ำหนักหนักกว่าก็จะกระดกลูกลอยไว้ เมื่อค่อย ๆ มีแก๊สสะสมขึ้นและไปแทนที่น้ำมัน ระดับน้ำมันก็ต่ำลง เนื่องจากความดันของแก๊ส น้ำหนักลูกลอยจะเพิ่มขึ้นจนหนักกว่าตุ้มน้ำหนักอีกด้านหนึ่ง จึงกระดกให้สวิตช์ปรอททำงานและมีสัญญาณ alarm ส่งไปที่ Control room และศูนย์ควบคุม โดยทั่วไปปริมาณของแก๊ส ที่กำหนดสำหรับหม้อแปลง 10 MVA. ขึ้นไปอยู่ระหว่าง 220 – 280 ครม.³

ในกรณีที่เกิดฟอลต์อย่างรุนแรงที่ขดลวดของหม้อแปลงอาร์กที่เกิดขึ้น จะทำให้เกิดแก๊สอย่างมากมาย (มากกว่า 50 ซม.³/กิโลวัตต์วินาที) เป็น surge ในน้ำมันเคลื่อนไปดันใบพัด (Vane) กระดกครบวงจรไปสั่ง Trip เบรกเกอร์ของหม้อแปลงออก



รูปที่ 2.23 แสดง Buchholz Relay ของหม้อแปลง

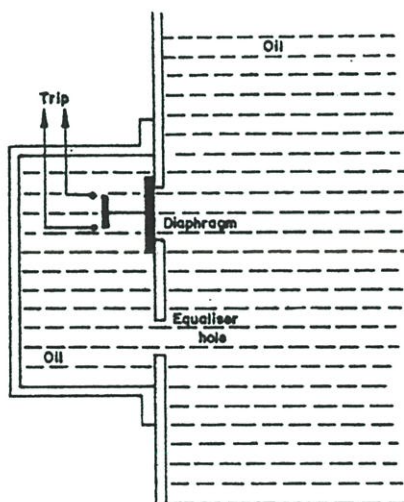
สาเหตุที่ทำให้ Buchholz alarm พอสรูปได้ดังนี้

1. ฉนวนต่างๆ เสียหาย เช่น หัก, หลุด, แตก
2. ฉนวนเสื่อมคุณภาพ
3. ข้อต่อต่างๆ หลุดหลวม
4. ขดลวดร้อนเกินไป (Overheat)
5. หม้อแปลงรั่วซึม ทำให้น้ำมันลดลง

สาเหตุที่ทำให้ Buchholz trip พอสรุปได้ดังนี้

1. บุขซึ่ง แตก , หัก
2. ฟอลต์ภายในระหว่างเฟส
3. Grounding Fault
4. ฟอลต์ภายในระหว่างขดลวด
5. ฟอลต์ระหว่าง tap ของขดลวด
6. น้ำมันหมด

Sudden Pressure relay ทำงานเมื่อมีอัตราการเพิ่มขึ้น ของความดันภายใน หม้อแปลง กล่าวคือ ขณะหม้อแปลงใช้งานตามปกติ ความดันใน Main Tank ของหม้อแปลงกับความดันภายในตัวรีเลย์จะเท่ากัน เนื่องจากน้ำมันสามารถไหลผ่านเข้า Equalizer Hole แต่เมื่อความดันหม้อแปลงมากขึ้นทันทีทันใดเมื่อมี Internal fault แรงต้านทานของ Equalizer Hole จะเพิ่มมากขึ้น ทำให้น้ำมันหรือแก๊สผ่านได้ช้า ความดันในตัวรีเลย์จะน้อยกว่าความดันในห้อง ทำให้เกิดแรงดันที่แผ่นไดอะแฟรมปิดวงจรเพื่อสั่ง trip เบรกเกอร์ของหม้อแปลง



รูปที่ 2.24 แสดง Sudden Pressure Relay ของหม้อแปลง

2.2.4 ระบบป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Protection) [10]

ระบบป้องกัน Generator Protection แบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ

1. Primary Relay

- Phase and/or Ground Fault in Stator (87G, 51G)
- Ground Fault in the Rotor (Field Winding, 64E)

Rotor Earth Fault Relay (64E) มีหน้าที่ป้องกัน Short Circuit ในด้าน Generator Field Circuit โดยจะ Detect Ground ที่เกิดขึ้นเพียง 1 จุดก่อนภายใน Field Winding รีเลย์ 64E จะทำงาน โดยมี Function เป็น Alarm เพื่อนำ Generator ลง (Shut Down) ดังนั้น รีเลย์ 64E จึงมีความจำเป็น เพราะถ้าเกิด Ground ขึ้น 2 จุดใน Field Winding Circuit จะทำให้ Field Winding เสียหายได้ โดยทั่วไปแล้วจะตั้ง Time Delay ประมาณ 1-5 วินาที ดังรูปที่ 2.25

Phase Overcurrent Relay (51V) มีหน้าที่ป้องกัน Phase Fault ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ภายนอก และในตัว Generator เอง โดยทำหน้าที่เป็นระบบป้องกันสำรอง (Back-up Protection) ดังนั้นจะ Setting ระบบป้องกันไว้ให้ทำงาน 130 ถึง 150% ของ Rating ของ Generator และมี Time Delay ประมาณ 1 ถึง 5 วินาที ดังรูปที่ 2.25

Negative Sequence Current Relay (46) มีหน้าที่ป้องกัน Unbalance Load ที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่าย ซึ่งจะมีผลทำให้เกิด Overheat ใน Rotor การ Setting จะ Set ให้ต่ำกว่าค่า Permissible I Characteristic ของ Rotor ดังรูปที่ 2.25 โดย

Step ที่ 1 ประมาณ 7% ของ Rating และมี Time Delay ประมาณ 2 ถึง 5 วินาที มีหน้าที่ เป็น Alarm Step

Step ที่ 2 ประมาณ 12-15% ของ Rating และมี Time Delay ประมาณ 1 ถึง 5 วินาที มีหน้าที่เป็น Trip Function โดยปลด Generator นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ดังนี้

1. Short Circuit (ยกเว้น 3 Phase Fault)
2. Open Circuit

Reverse Power Relay (32) มีหน้าที่ป้องกันในกรณีที่ Prime Mover (ส่วนใหญ่ด้าน Mechanical Part) ทำงานผิดปกติ ทำให้ Overheat ขึ้นที่ Turbine Blades การ Setting ส่วนใหญ่จะตั้งไว้ประมาณ 1-3% ของ Generator Capacity Rating ประเภท Steam Turbine และมี Time Delay หน่วงไว้ 1 ถึง 2 วินาที เพื่อไม่ให้ทำงานในช่วง Reverse Power Surges เช่น ขณะ Synchronize Generator

Loss of Excitation Relay (40) ส่วนใหญ่จะใช้กับ Large Synchronous Generator มีหน้าที่ป้องกัน Loss of Synchronism , Voltage Drop และ Overheat ที่ Rotor ในกรณีที่ Loss of DC. Supply ของ Excitor การตั้งค่าของรีเลย์ขึ้นอยู่กับ Capability Curve ของ Generator และมี Time Delay ประมาณ 2 ถึง 5 วินาที

Under/Over Frequency Relay (81) มีหน้าที่ป้องกัน Turbine Blade ของ Generator ชนิด Steam Turbine

2.2.5 ระบบป้องกัน C-Bank (Capacitor Bank Protection) [9]

การป้องกัน Overcurrent สำหรับ C-Bank ขนาดใหญ่ และ Voltage Rating สูงจะใช้ Overcurrent Relay และ Circuit Breaker เพื่อป้องกัน

- Over load ที่เกิดจาก Overvoltage และ Harmonics Currents
- ป้องกัน Line to Line หรือ Line to Ground Fault
- ป้องกัน Rack Fault (อาร์กข้ามระหว่าง Rack)

การป้องกัน Overload กรณีที่เป็น Bank ไม่ใหญ่มาก และมี Bank เดียวโดด ๆ จะ Set Relay ดังนี้

Current : $1.3 \times \text{Rated Current}$

Time Delay : 0.2 Sec.

หากมีหลาย Bank บน Bus เดียวกัน เนื่องจากมี Inrush สูง Delay Time ควรจะสูงขึ้น

การป้องกัน Short Circuit Faults ในกรณีที่ เป็น Bank ใหญ่ และมีหลาย Bank ขนานกัน จะต้องแยกการป้องกันระหว่าง Overload Load กับ Short Circuit

เมื่อเกิดลัดวงจรอุปกรณ์ป้องกันต้องตั้งเวลาให้เร็วที่สุด โดยปกติแล้ว Inrush Transient จะถูกหน่วงให้ลดลงมาประมาณ 4 เท่าของกระแสพิกัดภายใน 0.15 วินาที ดังนั้นจึงควรตั้งรีเลย์ดังนี้

Current : $4 \times \text{Rated Current}$

Time Delay : 0.15 Sec.

แต่ถ้าเป็น Unground Y Bank ที่ตั้งอยู่โดด ๆ เมื่อเกิด Line to Neutral Fault จะมีกระแสไหลไม่เกิน 3 เท่าของกระแสพิกัด ดังนั้นค่ากระแสตั้งรีเลย์ต้องไม่เกิน 3 เท่าด้วย

บางครั้งอาจจะใช้ Delay Time Overcurrent เป็นตัวป้องกัน Overload และ Instantaneous Unit ตั้งไว้ประมาณ 4 เท่าป้องกันลัดวงจร

การป้องกัน Rack Fault โดยปกติแล้วคาปาซิเตอร์ มักจะแยกแต่ละเฟสตั้งอยู่ห่างกัน ดังนั้นจึงมีโอกาสเพียงเกิดลัดวงจรข้ามระหว่าง Rack เพียงอนุกรมเดียว ลักษณะนี้จะมีกระแสลัดวงจรไม่สูงมาก ซึ่งจะต้องใช้เวลาจนกระทั่งอาร์กลามไปกลุ่มอนุกรมอื่นในเฟสเดียวกัน จึงมีกระแสสูงพอที่จะทำให้ Instantaneous Unit ทำงาน และจะทำให้เกิดความเสียหายมากทั้ง Rack และ คาปาซิเตอร์ ตัวคาปาซิเตอร์ที่อยู่ใกล้บริเวณอาร์กจะถูกอาร์กจนถึงทะลุหรือบุชซึ่งแตก พิวส์บางตัวของคาปาซิเตอร์ยูนิตอาจจะขาดทำให้ยูนิตที่เหลือในกลุ่มขนานเกิดแรงดันเกิน และอนุกรมอื่นที่อยู่ในเฟสเดียวกันก็ถูกแรงดันเกิน ซึ่งอาจจะทำให้ถึงระเบิดได้ ดังนั้น Instantaneous Overcurrent จึงไม่เหมาะที่จะใช้

การป้องกัน Rack Fault จึงมักจะใช้ Unbalance Relay ที่มีหน่วงเวลาประมาณ 0.3 – 0.5 วินาที สำหรับ Single Ungrounded Y Bank จะใช้ Unbalance Relay เป็นตัวจับแรงดันระหว่างนิว ทรอลกับดิน ค่าแรงดันดังกล่าวเมื่อมีลัดวงจรข้าม 1 อนุกรมจะเป็นไปตามสูตร

2.3.1 การทำงานและหน้าที่ของเซอร์กิตเบรกเกอร์

การใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อป้องกันระบบจ่ายไฟฟ้า โดยทำหน้าที่ตัดอุปกรณ์หรือสายส่งที่ผิดปกติออกจากวงจรการจ่ายไฟฟ้า ซึ่งจะสำเร็จได้ต้องอาศัยอุปกรณ์ต่าง ๆ ประกอบและทำงานร่วมกัน 4 อย่าง ดังนี้

Sensing device ได้แก่ Instrument transformer (CT , PT) เป็นอุปกรณ์ที่รับรู้ความผิดปกติทำหน้าที่คล้ายยามระวังเหตุ เมื่อมีเหตุการณ์ผิดปกติเกิดขึ้นในระบบ ก็จะส่งสัญญาณบอกเหตุมายัง Control relay

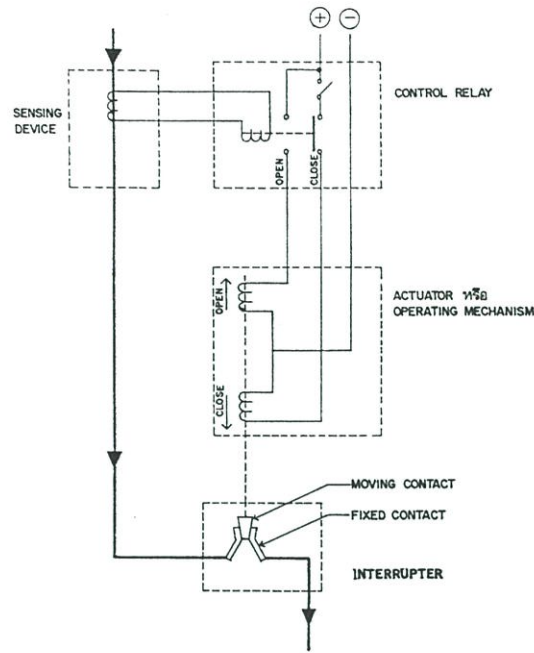
Control relay เช่น Overcurrent relay ,Distance relay จะรับสัญญาณผิดปกติจาก Sensing device พร้อมกับสั่งการไปยัง Actuator ให้ปฏิบัติการโต้ตอบต่อเหตุการณ์นั้นทันที

Actuator หรือ Operating mechanism ในเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็นกลไกควบคุมการทำงาน Interrupter ให้ปลดหรือสับตามความต้องการของ Control relay

Interrupter คือระบบชิ้นส่วนที่กระทำการเปิด – ปิด วงจรและดับอาร์กที่เกิดขึ้นขณะเปิดวงจร ประกอบด้วย Main contact และ Arc quenching device ซึ่งทำหน้าที่ดับอาร์กที่เกิดขึ้น

การประสานงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ เหล่านี้ เป็นไปคล้าย ๆ กับการปฏิบัติงานของหน่วยดับเพลิง เมื่อยามระวังเหตุบนหอคอย (เท่ากับ Sensing device) เห็นเพลิงไหม้ขึ้น ณ ที่ใด ก็จะแจ้งเหตุลงมายังผู้บังคับการ (เท่ากับ Control relay) ผู้บังคับการก็จะสั่งรถดับเพลิง (เท่ากับ Actuator) ออกไปยังที่เกิดเหตุ เมื่อถึงที่เกิดเหตุเจ้าหน้าที่ดับเพลิง (เท่ากับ Interrupter) ก็จะเข้าไปทำการดับไฟ (เท่ากับ Open contact) และบ้างก็ฉีดน้ำเข้าไปดับไฟ (เท่ากับ Arc quenching device) ให้ดับโดยเร็วที่สุด

เมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์เปลี่ยนสถานะจาก Close หรือ Trip จะมี Auxiliary contact ที่มีลักษณะการเปิด – ปิดวงจร พร้อมกับ Main Contact ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เราใช้ Auxiliary contact เหล่านี้ในการแสดงสถานะของเซอร์กิตเบรกเกอร์ว่าอยู่ตำแหน่ง Close หรือ Trip โดยเชื่อมต่อกับ RTU. ในระบบ EGAT - SCADA



รูปที่ 2.27 แสดงการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ร่วมกับอุปกรณ์อื่น

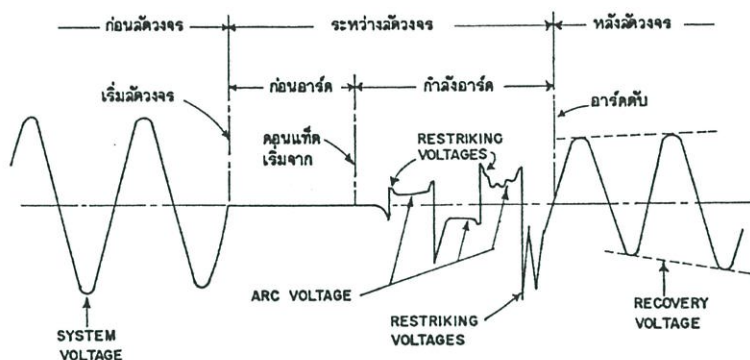
หน้าที่ของ Circuit breakers

- จะต้องสามารถกลับเข้าและนำกระแสเต็มพิกัดได้เป็นระยะเวลายาวนาน
- ต้องสามารถตัดกระแสไหลหรือเกินพิกัดได้ในสภาวะปกติ
- จะต้องสามารถตัดกระแสลัดวงจรสูง ๆ ออกจากระบบได้อย่างรวดเร็ว
- ในขณะที่อยู่ในตำแหน่งเปิดวงจร ช่องระหว่างหน้าสัมผัสต้องทนต่อแรงดันของระบบได้
- จะต้องสามารถรับเข้าขณะที่มี ฟลัด อยู่ได้ และปลดออกเพื่อ Clear fault ได้ในทันทีทันใด
- จะต้องสามารถปลดกระแสต่ำ ๆ ได้โดยไม่มีอันตราย เช่น Magnetizing current ของหม้อแปลงซึ่งเป็น Inductive หรือ Line charging current ซึ่งเป็น Capacitive
- จะต้องทนต่อผลที่เกิดจากการอาร์กที่หน้าสัมผัส แรงแม่เหล็กไฟฟ้า และความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสลัดวงจรไหลผ่าน

2.3.2 กระบวนการดับอาร์ก

เมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์เริ่มเปิดวงจร กระแสที่เคยไหลอยู่ก่อนที่หน้าสัมผัสจะเริ่มแยกจากกัน พยายามที่จะไหลต่อไปจึงทำให้เกิดอาร์ก การดับอาร์กกระแสสลับค่อนข้างจะง่ายกว่ากระแสตรง เพราะรูปคลื่นกระแสสลับจะผ่านแกนศูนย์สองครั้งในหนึ่งไซเคิล การตัดวงจรก็คือการป้องกันไม่ให้กระแสไหลได้อีกหลังจากที่เป็นศูนย์ ซึ่งจะสำเร็จได้ก็ต่อเมื่อความแข็งแรงไดอิเล็กตริกของทางที่อาร์กผ่านต้องสูงกว่า System recovery voltage ที่ตกคร่อมระหว่างหน้าสัมผัสซึ่งเป็น

ทางเดียวกันกับที่อาร์กผ่าน สรุปได้ว่าการดับอาร์กจะเป็นการแข่งขันกันระหว่างความแข็งแรงไดอิเล็กตริกกับ Recovery voltage ระหว่างช่องว่างหน้าสัมผัส หากความแข็งแรงไดอิเล็กตริกสูงกว่า อาร์กจะดับไปในที่สุดเมื่อกระแสเป็นศูนย์

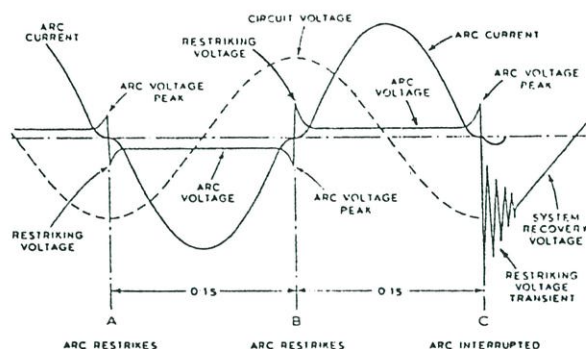


รูปที่ 2.28 แสดงรูปคลื่นแรงดัน ก่อน, ระหว่าง และหลังลัดวงจร

จากรูปที่ 2.28 แสดงรูปคลื่นแรงดัน เมื่อดูจากซ้ายไปขวาช่วงแรกเป็นระบบปกติก่อนที่จะมีการลัดวงจรช่วงต่อไปเมื่อระบบเกิดลัดวงจรแรงดันตกลงเป็นศูนย์ รีเลย์ป้องกันสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ เปิดวงจร เมื่อหน้าสัมผัสเริ่มจากกันจะเกิดอาร์กขึ้น ณ จุดนั้น จะมีแรงดันตกคร่อมอาร์ก ซึ่งค่อนข้างจะต่ำเรียกว่า Arc voltage หรือ Burning voltage

ก่อนที่กระแสลัดวงจรจะลดผ่านศูนย์ตามธรรมชาติ การระบายความร้อน และการ De-ionize ของตัวกลางจนวนบริเวณหน้าสัมผัสค่อนข้างจะมีอิทธิพลสูง ทำให้แรงดันอาร์กเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากค่าเฉลี่ยเพื่อดันให้กระแสเป็นศูนย์ ถ้า ณ จุดนี้การ De-ionize ไม่เพียงพอจะทำให้แรงดันอาร์กกระชอกขึ้นในทิศทางตรงข้าม เรียกว่า Restriking voltage ซึ่งจะช่วยให้อาร์กเพิ่มความรุนแรงขึ้นอีก กระแสลัดวงจรจะไหลได้อีก รอจนกระทั่ง กระแสผ่านศูนย์ ครั้งที่ 4 ซึ่ง Restriking voltage ขณะนั้นจะมีความถี่สูงและ Oscillate เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Transient recovery voltage (TRV.) และจะค่อย ๆ กลับเข้าสู่ Recovery voltage ในช่วงที่สาม

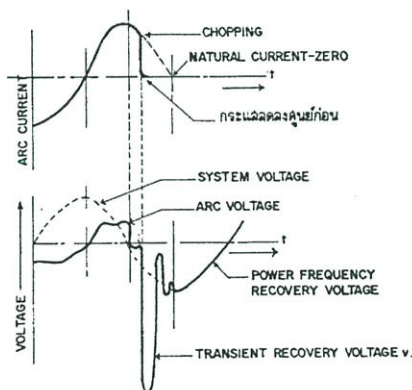
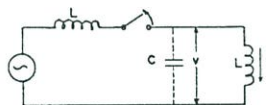
การดับอาร์กที่เกิดจากโหลดที่ Unity power factor จะทำได้ง่าย เพราะแรงดันของระบบ in phase กับกระแสลัดวงจร ในขณะที่กระแสผ่านศูนย์แรงดันจะเป็นศูนย์ด้วย ในระบบปกติจะมี Power factor ประมาณ 0.85 ถึง 0.9 แรงดันยังต่ำอยู่ในขณะกระแสศูนย์ แต่ในขณะที่ลัดวงจร Power factor จะต่ำกว่า เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือหม้อแปลง Power factor จะเกือบเป็นศูนย์ ถ้า ฟอลต์ห่างออกไปจะประมาณ 0.3 ซึ่งจะทำให้การดับอาร์กค่อนข้างจะลำบาก เพราะในขณะที่กระแสเป็นศูนย์แรงดันของระบบจะสูงสุด หรือประมาณ 0.95 เท่าของ Peak ซึ่งมีอิทธิพลต่อ Restriking voltage มาก



รูปที่ 2.29 การอาร์กเมื่อเบรกเกอร์ตัดกระแสลัดวงจร

การปลด – สับ โหลดปกติ การปลดโหลดปกติที่ Power factor สูง ๆ ไม่มีปัญหายุ่งยาก แต่การปลดสายส่งที่ไม่มีโหลดและปลดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มี Power factor ต่ำ ๆ เช่น Capacitor banks หรือ Shunt reactors กลับมีปัญหาเรื่อง Over voltage

การปลดกระแส Inductive ต่ำ ๆ เช่นการปลดหม้อแปลง No Load หรือ Shunt reactor เป็นต้น จะเกิดปัญหาใน Circuit breakers ชนิด force blast เนื่องจากเบรกเกอร์ดังกล่าวใช้แรงจากภายนอกผลักดันตัวกลางเข้าดับอาร์ก โดยแยกไม่ออกกว่าเป็นการปลดกระแสสูงหรือกระแสต่ำ เช่น Air blast circuit breakers ลักษณะเช่นนี้จะทำให้เมื่อปลดกระแสต่ำเกิด Current Chopping หมายถึง กระแสจะดับก่อน Current zero ดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 แสดงปรากฏการณ์ในขณะปลดกระแส Inductive ต่ำ ๆ

ในขณะที่เกิด Current Chopping พลังงานที่สะสมอยู่ในขดลวดจะเปลี่ยนไปประจุ Capacitance ของวงจรดัดสมการ

$$\frac{1}{2}Li^2 = \frac{1}{2}Cv^2 \quad \text{จูล} \quad (2.1)$$

$$v = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.2)$$

โดยที่ v = แรงดันตกคร่อมหม้อแปลง

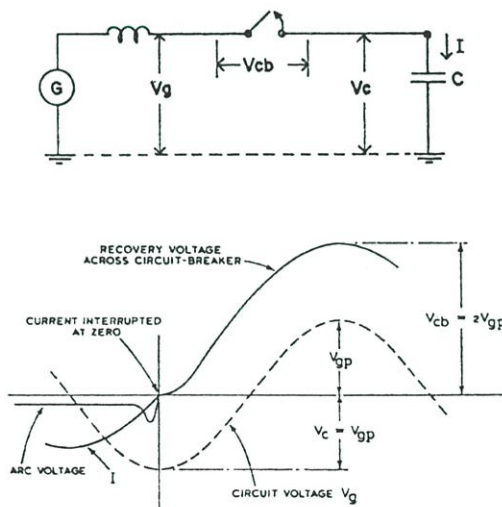
i = กระแสขณะหม้อแปลงไม่มีโหลด

L = Inductance ของหม้อแปลง

C = Capacitance ของวงจร

เนื่องจากค่า C ของวงจรมีค่าน้อยมาก จึงทำให้แรงดัน v ที่ปรากฏคร่อมเบรกเกอร์มีค่าสูงมากและมีความถี่สูง เรียกว่า Transient recovery voltage ซึ่งอาจจะสูงประมาณ 2.5 ถึง 3 เท่าของแรงดันปรกติ และจะเป็นอันตรายต่อทั้งตัวเบรกเกอร์เองและอุปกรณ์ข้างเคียง ซึ่งอาจจะทำให้เกิด Flashover ที่ Arcing horn ของหม้อแปลง เป็นสาเหตุทำให้เกิด ฟอลต์ ตามมา เรียกว่า Evolving fault และจะทำให้เกิด Restrike ที่ตัว Circuit breakers จำนวนหลายครั้ง

การปลดกระแส Capacitive เช่น การปลด Cable ยาว ๆ ที่ไม่มีโหลด หรือการปลด C-Bank ซึ่งกระแสจะ Lead voltage อยู่ 90 องศา ดังนั้นกระแสจะถูกดับเมื่อผ่านแกนศูนย์ ในขณะที่แรงดันอยู่ที่ตำแหน่งสูงสุด ดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 แสดงปรากฏการณ์ในขณะปลดกระแส Capacitive

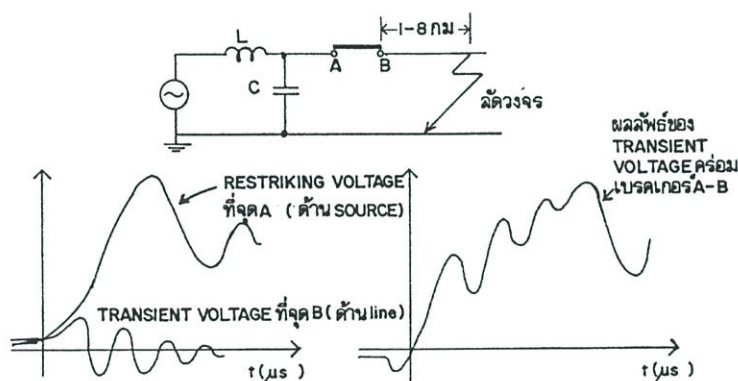
เมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์ดับกระแสที่จุดผ่านศูนย์ จะมี Charge ประจุอยู่ที่คาปาซิเตอร์เท่ากับ V_c หรือ V_{gp} และหลังจากนั้นแรงดันด้านแหล่งจ่ายก็จะเปลี่ยนแปลงตาม 50 Hz Oscillation ซึ่งจะทำให้แรงดันคร่อมเบรกเกอร์ V_{cb} คือ ผลต่างของ V_g และ V_c ซึ่งจะเท่ากับ 2 เท่าของ Peak ของแรงดันของวงจรเมื่อผ่านไปครึ่งไซเคิลและเนื่องจากอัตราการเพิ่มของ V_{cb} ก่อนข้างจะช้า จึงทำให้

เบรกเกอร์บางชนิดซึ่ง De-ionization ได้เร็ว เช่น Air blast circuit breakers สามารถทนได้ ทำให้ไม่เกิด Restrike แต่ใน Oil circuit breakers ซึ่งหน้าสัมผัสเพิ่งจะแยกจากกันเป็นระยะสั้นอาจทำให้ Restrike ได้

หาก Restrike เกิดที่จุดนี้ คาปาซิเตอร์หรือ Line จะ Discharge ผ่าน Inductance ของวงจรทำให้เกิด Oscillation ด้วยความถี่หลายร้อย Hz ถ้ากระแส Discharge ถูกตัดขาดได้ ภายในกระแสผ่านศูนย์ครั้งแรก แรงดันที่ประจุคาปาซิเตอร์ ซึ่งขณะนั้นกลับขั้วไปแล้วจะสูงประมาณ 2 เท่าของครั้งก่อนและในช่วงครึ่งไซเคิลต่อไป แรงดันตกคร่อมเบรกเกอร์จะสูงเป็น 3 เท่า ยิ่งเป็นโอกาสที่จะทำให้เกิด Restrike ได้สูงขึ้น ดังนั้น Circuit breakers ที่ Opening time ก่อนข้างช้า และอัตราการกลับคืนสภาพของ Dielectric strength ช้า จึงไม่ควรจะนำมาใช้ในกรณีเช่นนี้

การปลดกระแสลัดวงจร เบรกเกอร์ถูกออกแบบมาเพื่อทำหน้าที่ปลดกระแสลัดวงจรอยู่แล้ว แต่การลัดวงจรบางอย่างก่อนข้างที่จะมีผลกระทบต่อตัวเบรกเกอร์มาก

- การลัดวงจรในสายส่งระยะสั้น หมายถึงการลัดวงจรในสายส่งซึ่งมีระยะห่างจากตัวเบรกเกอร์ที่จะ Interrupt ประมาณ 1-8 กม. ซึ่งทำให้เกิด Restriking voltage transient คร่อมตัวเบรกเกอร์ด้วยความถี่สูงและมีอัตราการเพิ่มขึ้นมาก ดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 แสดงถึง Restriking voltage ของ Short line fault

เมื่อเบรกเกอร์ตัดกระแสลัดวงจร แรงดันด้านแหล่งจ่ายและด้านสายส่งจะ Oscillate เป็นอิสระไม่เกี่ยวกับกัน และผลลัพธ์ของ Transient recovery voltage คร่อมตัวเบรกเกอร์จะเป็น Vector sum ของแรงดันทั้งสอง

แรงดันด้านแหล่งจ่ายที่จุด A จะ Oscillate เหมือนเช่น Transient recovery voltage ปรกติที่ เคยกล่าวแล้วข้างต้น

แรงดันด้านสายส่งที่จุด B จะเป็นรูปฟันเลื่อยเนื่องจากเกิดคลื่นสะท้อนกลับไป-มา ที่จุด B ด้วยความเร็วแสง แต่เพราะไม่มี Driving source จึงค่อย ๆ ลดลงมาเป็นศูนย์

ผลลัพธ์ทำให้ Recover voltage เครื่องเบรกเกอร์ในช่วง Peak แรกมีความถี่สูงและมีความชันมาก ซึ่งอาจจะเกินความสามารถของการ Interrupt ของเบรกเกอร์ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่มี Load density สูง

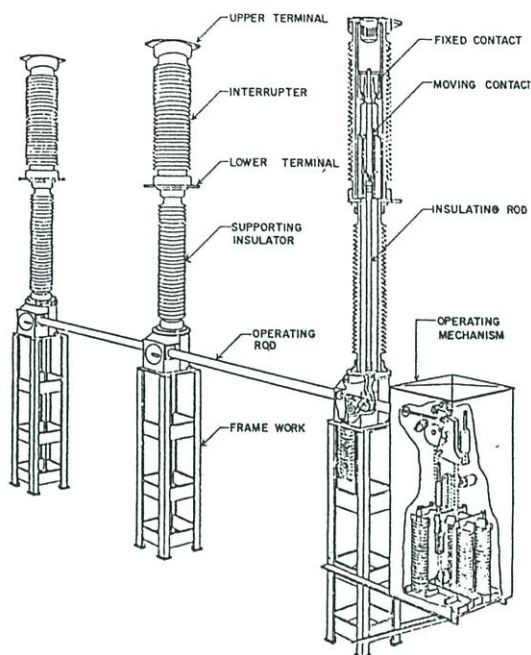
- Evolving faults ในขณะที่เบรกเกอร์ตัดกระแสลัดวงจร อาจเกิดปรากฏการณ์ต่อเนื่อง เช่น เกิด Over voltage ทำให้เกิด ฟลลด์ ที่จุดอื่นในบริเวณใกล้เคียงกัน ซึ่งในขณะนั้น กลไกการดับอาร์กทำงานอยู่ในช่วงกลาง ๆ หรือเกือบจะสิ้นสุดการทำงานอยู่แล้ว ซึ่งจะทำให้เบรกเกอร์บางชนิดโดยเฉพาะ OCB. ตกอยู่ในสภาพอันตราย กล่าวคือไม่สามารถ Interrupt fault ครั้งที่ 2 นี้ได้ ซึ่งพลังงานของอาร์กอาจจะทำลายห้องดับอาร์กให้ระเบิดได้ แต่สำหรับ ABB. แล้วอากาศอัดที่พ่นออกมาดับอาร์กจะคงที่และยาวนานพอที่จะสามารถ Interrupt evolving fault นี้ได้

ดังนั้นการเกิดลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากระแสสลับทำให้กระแสไฟฟ้าไหลมากผิดปกติ ในเฟสที่ลัดวงจรนั้น ปริมาณกระแสลัดวงจรมากเป็นหลายเท่าของกระแสปรกติในช่วงหนึ่งในสี่ของไซเคิล และหลังจากนั้นความสูงของคลื่นกระแสจะค่อย ๆ ลดลง คลื่นของกระแสลัดวงจรจะ Asymmetry กับแกนศูนย์ปรกติ ค่าของกระแสสูงสุดใน Loop แรก เรียกว่า Making current และค่า rms. ในขณะที่หน้าสัมผัสแยกจากกันเรียก Breaking current

แรงดันไฟฟ้า ที่ปรากฏพร้อมเบรกเกอร์ หลังจากกระแสเป็นศูนย์ ครั้งสุดท้ายเรียกว่า Recovery voltage ซึ่งจะประกอบด้วย Power frequency component และ High frequency component ส่วนที่เป็น High frequency เรียกว่า Transient recovery voltage (TRV.) ซึ่งอัตราการเพิ่มของมันจะขึ้นอยู่กับ Power factor ของระบบ และสภาวะขณะ Switching TRV. จะพยายาม Restrike อาร์ก ความสามารถของเบรกเกอร์ที่จะตัดกระแสลัดวงจรได้ดีขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มของ Dielectric strength ของ Gap ซึ่งจะต้องมากกว่าอัตราการเพิ่มของ TRV.

2.3.3 ส่วนประกอบของเซอร์กิตเบรกเกอร์

ดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้น ถึงการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ต่อไปจะอธิบายถึงส่วนประกอบของ Circuit breaker แต่ละส่วนซึ่งเซอร์กิตเบรกเกอร์ประกอบด้วย Circuit breaker poles , Supporting insulator , Operating rod และ Operating mechanism โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.33 ส่วนประกอบของเซอร์กิตเบรกเกอร์

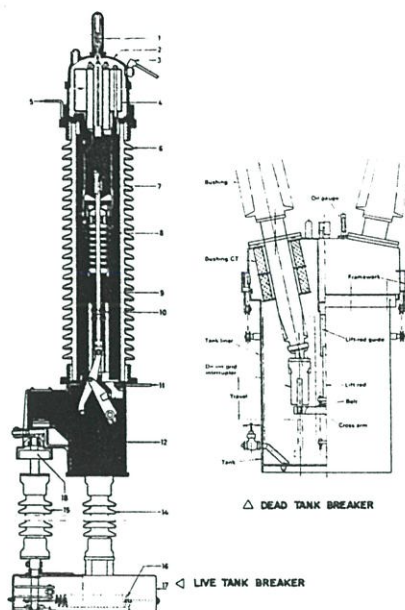
Circuit breakers poles หมายถึงส่วนของเบรกเกอร์ที่อยู่ในแต่ละเฟส เรียกว่า โพล (poles) ซึ่งประกอบด้วย

- ห้องดับอาร์ก (Interrupter) มีหน้าที่ดับอาร์กในขณะที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดกระแสไฟ ซึ่งภายในห้องจะประกอบด้วย Fixed contact และ Moving contact และภายในห้องบรรจุด้วยฉนวนที่ใช้ในการดับอาร์กส่วนประกอบอื่น ๆ ในห้องดับอาร์กจะแตกต่างกันออกไปตามชนิดของฉนวน เช่น หากใช้น้ำมันฉนวนห้องดับอาร์กจะเรียกว่า De-ion grid ซึ่งจะประกอบด้วยฉนวนหลาย ๆ ชั้น ที่ทำด้วยวัสดุที่ทนอาร์กได้และมีความแข็งแรงมาก วางเรียงกันและเจาะช่องเพื่อให้แก๊สที่เกิดจาก อาร์ก ไหลผ่าน ประกอบด้วยกระบอก Puffer ซึ่งทำหน้าที่อัดแก๊สผ่านหัวฉีดเพื่อดับอาร์ก

ห้องดับอาร์กจะห่อหุ้มด้วย Porcelain และจะต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแรงสูง โดยผ่าน Upper และ Lower terminal โดย Upper terminal จะต่อโดยตรงกับ Fixed contact ส่วน Moving contact จะถ่ายกระแสผ่าน Contact roller มาที่ Lower terminal ซึ่งห้องดับอาร์กดังกล่าวจะต้องยกให้สูงขึ้นจาก Ground potential โดยใช้ Supporting insulator เรียกว่า Live tank circuit breaker ดังรูปที่ 2.34

มีห้องดับอาร์กอีกชนิดหนึ่งซึ่งต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแรงสูง โดยผ่าน Bushing ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะทำให้สามารถยึดห้องดับ อาร์ก ติดกับ Bushing ได้ และห้องดับอาร์กสามารถห่อหุ้มได้ด้วยถังโลหะซึ่งติดกับ Ground potential เรียกว่า Dead tank circuit breaker

สำหรับ Dead tank circuit breaker จะมีข้อดีตรงที่สามารถใส่ Bushing current transformer ไว้ในตัวเบรกเกอร์ได้ ซึ่งจะประหยัดลงไปได้อีก ดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 แสดงส่วนต่าง ๆ ของ Interrupter แบบ Live Tank และ Dead Tank

- Supporting insulator หรือ Lower part คือส่วนที่เป็นฉนวนยกห้องดับอาร์ก ให้สูงขึ้น ภายในบรรจุด้วยฉนวนเช่นเดียวกับห้องดับอาร์ก และมีแท่งฉนวน (Insulating rod) ซึ่งด้านหนึ่งต่อกับ Moving contact และอีกด้านหนึ่งต่อกับกลไกควบคุมการทำงาน แท่งฉนวนนี้ทำหน้าที่ดึง Moving contact ให้เคลื่อนที่เพื่อปลด – สับเบรกเกอร์

- Operating rod คือ แท่งที่ใช้ต่อระหว่างโพลของเบรกเกอร์ เพื่อ Coupling การทำงานของแต่ละเฟสให้ปลด – สับ พร้อมกัน โดยใช้กลไกการทำงานเพียงชุดเดียว เรียกว่า Three poles operated circuit breaker

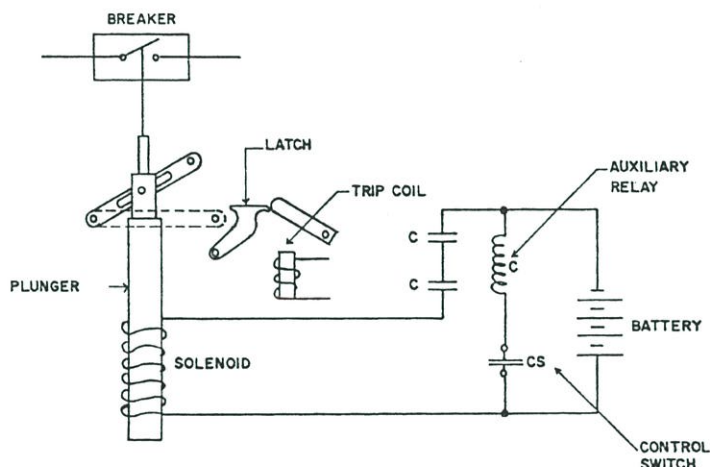
มีเบรกเกอร์บางชนิดซึ่งใช้กลไกการทำงานประจำแต่ละโพล โดยไม่ต้องมี Operating rod ที่ coupling ระหว่างโพล เรียกว่า Single pole circuit breaker ใช้สำหรับป้องกันสายส่ง 500 kV ซึ่งสถิติการฟลัดในสายส่งมักจะเป็น Single line to ground และเป็นแบบชั่วคราว ดังนั้นรีเลย์จะสั่งให้เบรกเกอร์ปลดเฉพาะโพลที่เกิดฟลัดเท่านั้นแล้ว reclose กลับเข้าไปใหม่ด้วยความเร็วสูง ซึ่งจะทำให้ระบบไฟฟ้าไม่หลุดจากการขนานและยังสามารถจ่ายไฟฟ้าได้อย่างมั่นคง

Single pole operated circuit breaker จะมีระบบ Pole disagreement หมายถึง ระบบป้องกันการปลด – สับ ไม่พร้อมกัน หากมีโพลใดโพลหนึ่งปลด – สับ ไม่พร้อมกัน จะทำให้เบรกเกอร์ trip ออกหมด

Operating mechanism กลไกควบคุมการทำงานของเบรกเกอร์ เป็นต้นกำลังที่ใช้ในการปลด – สับ เบรกเกอร์ โดยกลไกนี้จะต่อเข้ากับ moving contact โดยผ่าน insulating rod ซึ่งหน้าที่ของกลไกพอจะสรุปได้ดังนี้

- ก. จะต้องสับเบรกเกอร์ ได้อย่างรวดเร็วไม่ว่า making current จะสูงถึง rated capacity ก็ตาม
- ข. จะต้อง hold ให้เบรกเกอร์อยู่ในตำแหน่งสับได้ตลอดเวลาด้วย toggles หรือ latches จนกว่าจะมีสัญญาณ trip ส่งมา
- ค. จะต้องปลดออกได้ทันทีที่มีสัญญาณ trip
- ง. จะต้องทำ Autoreclose cycle ได้ตามที่ spec. กำหนด
- ชนิดของกลไกสับเบรกเกอร์ กลไกสับเบรกเกอร์ส่วนใหญ่ในปัจจุบันจะเป็นชนิดที่สะสมพลังงานไว้ใช้ในการสับ เช่น สะสมไว้ในสปริง แก๊ส หรือน้ำมันไฮดรอลิก เป็นต้น

ก. Solenoid closing mechanism



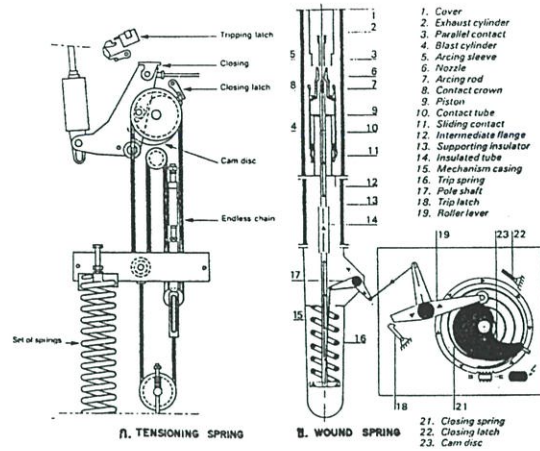
รูปที่ 2.35 แสดง Mechanism แบบ Solenoid Closing

ใช้กระแสตรงจากแบตเตอรี่หรือแปลงจากกระแสสลับมาป้อนขดลวด Solenoid ทำให้เกิดกำลังแม่เหล็กไฟฟ้าดูด plunger ซึ่งเชื่อมโยงกับ Mechanism linkage เมื่อ plunger ดึงให้เซอร์กิตเบรกเกอร์สับ จะถูก latch เกี้ยวไว้ให้อยู่ในตำแหน่งสับพร้อมกับยึดสปริงปลด เมื่อต้องการปลดจะให้ trip coil ปลด latch ออกสปริงปลดจะดึงเซอร์กิตเบรกเกอร์ให้อยู่ในตำแหน่งปลดได้

เนื่องจากขดลวด solenoid กินกระแสสูง จึงต้องใช้ Auxiliary relay ช่วยในการสับและเวลาที่ใช้ในการสับค่อนข้างช้าคือประมาณ 0.8 วินาที หรือ 40 ไซเคิล ไม่เหมาะสำหรับงานที่ต้องการ High speed closing ดังรูปที่ 2.35

ข. Motor operated spring closing mechanism ใช้มอเตอร์ยึดสปริงหรือไขลาน (charge) สปริง เพื่อสะสมพลังงานไว้ใช้ในการสับ ซึ่งสามารถทำโดยอัตโนมัติ คือใช้ลิมิตสวิตช์ควบคุม หรือ

อาจจะใช้มือหมุนก็ได้ การขีดยึดหรือ ไชลานสปริงจะผ่านเฟืองทดต่าง ๆ เพื่อผ่อนแรง ทุกครั้งที่มีการ สับเซอร์กิตเบรกเกอร์ กลไกขีดยึดสปริงจะทำงานทันทีเพื่อสะสมพลังงาน ในการสับครั้งต่อไป

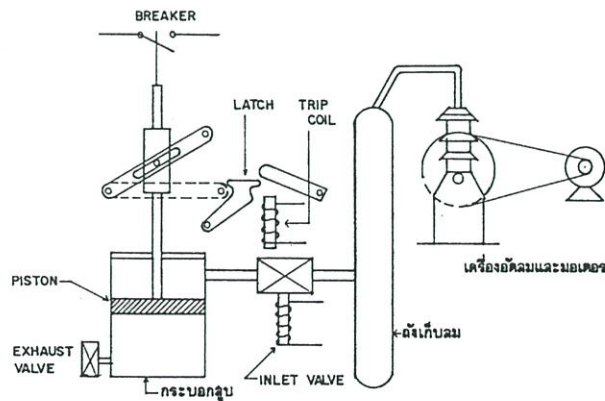


รูปที่ 2.36 กลไกแบบ Motor operated spring

ในการสับแต่ละครั้ง สปริงจะถูกปลดปล่อยพลังงานเพื่อดึง Mechanical linkage ของเซอร์กิตเบรกเกอร์พร้อมกับกวดอัด tripping spring ด้วย เมื่อต้องการปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ก็เพียงแค่ปลด tripping latch เพื่อ discharge tripping spring เท่านั้น

คุณลักษณะของ Operating mechanism ชนิดนี้ทำงานได้เร็วมากถึง 5 ไซเคิล หรือ 0.1 วินาที อาจจะนำไปใช้กับวงจร high speed automatic reclosing ได้ รายละเอียดดังรูปที่ 2.36

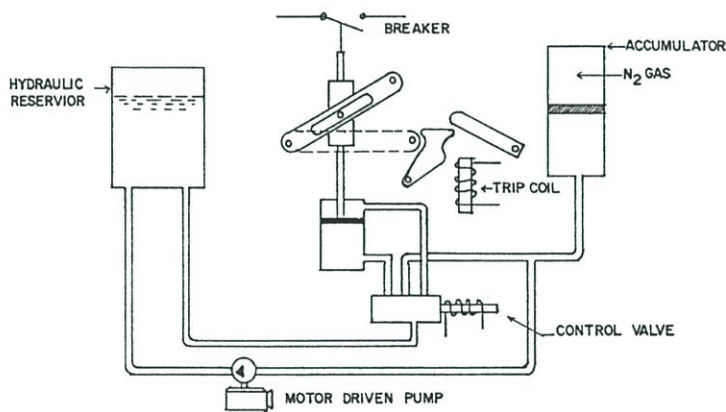
ก. Pneumatic operation ใช้กำลังลมด้วยเครื่องอัดอากาศ เพื่อดันให้ Operating mechanism ทำงาน ชนิดนี้เหมาะกับเซอร์กิตเบรกเกอร์แทบทุกประเภทโดยเฉพาะ Air blast circuit breaker เพราะใช้กำลังลมอัดในการดับอาร์กด้วย หลักการคือเปิด inlet valve ปล่อยลมอัดไปดันลูกสูบ ดังแสดงไว้ในรูป 2.37 ซึ่งก้านสูบต่อเชื่อมโยงกับหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์เมื่อลูกสูบถูกดันจะเคลื่อนตัวก้านสูบจะปิดหรือเปิดหน้าสัมผัสตามต้องการ



รูปที่ 2.37 กลไกแบบใช้ลม

ในกลไกที่ใช้ลมอัดสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ ขณะสับจะอัดสปริง trip ไว้ด้วยเพื่อปลดด้วยสปริงหรือบางชนิดอาจจะใช้ลมในการปลดเพราะต้องการให้ opening time สั้น ลมที่ใช้ในการทำงานของเบรกเกอร์ประมาณ 5 กก./ซม². และ opening time ของกลไกชนิดนี้ประมาณ 0.05 – 0.12 วินาที หรือ 3 – 8 ไซเคิล และให้กระทำ trip free ได้ กล่าวคือในขณะที่ Closing mechanism กำลังทำการ close อยู่ยังไม่เต็มที กลไกด้าน trip ก็สามารถ trip ออกได้โดยอิสระ และยังสามารถติดตั้งอุปกรณ์ลดการกระแทกจากกำลังลมได้โดยติดตั้ง throttle valve ไว้ ซึ่งทำหน้าที่ปรับกำลังลมให้เปิดน้อยขณะเริ่มสับ และเปิดลมให้มากขึ้นเมื่อต้องใช้แรงดันมากเมื่อสับเข้าเกือบจะเต็มที

ง. Hydraulic operation มีอุปกรณ์สำคัญคือปั้มน้ำมันไฮดรอลิก ซึ่งอัดน้ำมันได้ถึงประมาณ 340 กก./ซม². และให้น้ำมันนี้ไปอัดก๊าซไนโตรเจนที่อยู่ใน accumulator อีกต่อหนึ่ง จาก accumulator มีสายน้ำมันต่อไปยังกลไกด้านสับหน้าสัมผัสของ circuit breaker เมื่อเปิดวาล์วน้ำมันแก๊สไนโตรเจนที่มีอยู่ใน accumulator ก็จะแบ่งอัดน้ำมันให้ไปดันกลไกปิดหน้าสัมผัสอีกทอดหนึ่ง



รูปที่ 2.38 แสดงกลไกเบรกเกอร์ใช้ไฮดรอลิก

2.3.4 ลักษณะของอาร์กในเซอร์กิตเบรกเกอร์

อาร์กคือการ discharge ทางไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรด ในเซอร์กิตเบรกเกอร์อาร์กจะเกิดขึ้นในขณะที่เปิดวงจรที่มีกระแสไหล ซึ่งเซอร์กิตเบรกเกอร์จะต้องดับอาร์กให้ได้ภายในระยะเวลาอันสั้น โดยไม่เป็นอันตรายต่อตัวเบรกเกอร์และอุปกรณ์ข้างเคียง การดับอาร์กที่เป็นกระแสตรงจะยากกว่ากระแสสลับมาก เพราะกระแสสลับคลื่นของกระแสจะผ่านแกนศูนย์ 2 ครั้งใน 1 ไซเคิล อาร์กจะดับในขณะที่กระแสผ่านศูนย์นั่นเอง เทคนิคในการดับอาร์กอาจจะแบ่งได้เป็น 2 อย่างคือ

ก. การดับโดยทำให้เกิดความต้านทานของอาร์กสูง (High resistance interruption) จะสูงขึ้นเมื่อ voltage drop สูงขึ้น อาร์กจะดับถ้าแรงดันในระบบไม่สามารถที่จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมอาร์กสูง ๆ ได้ หลักการนี้มักจะใช้กับเซอร์กิตเบรกเกอร์ DC. และ Air circuit breaker ชนิด

AC. ซึ่งมี Interrupting capacity ต่ำ การทำให้ความต้านทานของอาร์กสูงขึ้น ทำโดยการเพิ่มความยาวของอาร์ก ซึ่งเทคนิคดังกล่าวจะพบในรายละเอียดต่อไป

ข. การดับโดยกระแสศูนย์ (Current zero interruption) อาร์กจะดับที่กระแสเป็นศูนย์ เนื่องจากลูกคลื่นกระแสสลับผ่านแกนศูนย์ และความแข็งแรงไดอิเล็กตริกของ contact gap เพิ่มขึ้น จนกระทั่งสามารถทนแรงดันคร่อมหน้าสัมผัสได้ หลักการดับอาร์กดังกล่าวใช้แพร่หลายทั่วไป

ขบวนการ Ionization สสารในโลกปรากฏอยู่ในสถานะต่าง ๆ กัน เช่น ของแข็ง ของเหลว แก๊ส โมเลกุลของสสารประกอบขึ้นด้วยอะตอม และอะตอมจะประกอบด้วยนิวเคลียส ซึ่งมีอิเล็กตรอนโคจรรอบ ๆ ปรกติแล้วโมเลกุลอะตอมจะมีประจุไฟฟ้าเป็นกลาง คือมีประจุบวกเท่ากับประจุลบและโมเลกุลของสสารสามารถแยกตัวออกเป็นไอออนได้ ซึ่งจะทำให้เกิดอนุภาคที่มีประจุ เช่น ไอออน หรือ อิเล็กตรอน

ถ้าเราบรรจุแก๊สลงในถังปิด แล้วค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิของแก๊สขึ้น โมเลกุลของแก๊สจะเคลื่อนไปทั่วทุกทิศทาง ยิ่งเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอีกโมเลกุลจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงและกระทบกัน จนกระทั่งอุณหภูมิสูงถึง $6,000^{\circ}\text{K}$ จะมีผลกระทบต่อแรงยึดเหนี่ยวภายในของอะตอมทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไป อะตอมจะมีประจุไฟฟ้าสุทธิซึ่งในขณะที่เกิด ionization สสารจะอยู่ในสถานะที่เป็นพลาสมา (Plasma) กล่าวคือประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าและมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า

การเกิด ionization ของแก๊สใน circuit breaker เนื่องจากสาเหตุดังนี้

- ก. การเกิดไอออนโดยความร้อน (Thermal ionization)
- ข. การเกิดไอออนโดยการชนของอนุภาค (Ionization by collision of particles)
- ค. การปล่อยอิเล็กตรอนจากหน้าสัมผัสเนื่องจากความร้อน (Thermal emission from surface of contacts)
- ง. การปล่อยอิเล็กตรอนจากหน้าสัมผัสเนื่องจากการพุ่งชนพื้นผิวด้วยอิเล็กตรอน (Secondary emission from surface contacts)
- จ. การปล่อยอิเล็กตรอนเนื่องจากสนามไฟฟ้า (Field emission from surface contacts)

การแตกตัวเป็นไอออนในแก๊ส (Ionization of gases) สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

- ก. Thermal ionization คือการเกิดไอออนของอะตอมของแก๊สที่มีผลจากความแปรปรวนของแก๊สจากไอความร้อน กล่าวคือ เมื่อแก๊สร้อนขึ้น โมเลกุลจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่อุณหภูมิประมาณ $6,000^{\circ}\text{K}$ จะทำให้เกิดความปั่นป่วนอย่างรุนแรงและชนซึ่งกันและกันทำให้แตกตัวออกเป็นไอออน
- ข. Ionization by collision เมื่อมีสนามไฟฟ้าจะทำให้โมเลกุลของแก๊สเคลื่อนที่ด้วยความเร็วชนกับอนุภาคอื่น และถ่ายเทพลังงานซึ่งกันและกัน ซึ่งพลังงานที่ได้รับเพิ่มอาจจะพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนแยกตัวจากอะตอม

- ค. Thermal emission from surface of contacts เมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์สับอยู่ หน้าสัมผัส จะสัมผัสกันแน่น เมื่อหน้าสัมผัสเริ่มแยกจากกัน แรงกระระหว่างหน้าสัมผัสลดลง ทำให้พื้นที่สัมผัสลดลงเหลือเพียงจุดเล็ก ๆ บนพื้นผิว กระแสจะพยายามไหลผ่านจุดดังกล่าวทำให้เกิดความหนาแน่นของกระแสสูง และบริเวณจุดนั้นจะเกิดความร้อนสูง และทำให้เกิดการปล่อยอิเล็กตรอนออกจาก contact เนื่องจากความร้อน
- ง. Secondary emission at contact surface เกิดจากการที่อิเล็กตรอนวิ่งด้วยความเร็วใน สนามไฟฟ้าที่อยู่ระหว่าง contact เมื่ออิเล็กตรอนวิ่งชนหน้าสัมผัส จะทำให้มีการปล่อย อิเล็กตรอนจากหน้าสัมผัสเนื่องจากการชนดังกล่าว
- จ. Field emission at contact surface ถ้าหน้าสัมผัสมี voltage gradient สูงมากกว่า 1000V/cm อิเล็กตรอนสามารถหลุดจาก contact ออกมาได้ ขณะหน้าสัมผัสเริ่มแยก ระยะห่างสั้นมากซึ่ง potential gradient จะสูงมาก (มากกว่า 1,000,000 V/cm) สามารถ breakdown gas ได้

De-ionization คือการดับของไอออน ทำให้แก๊สกลับสู่สภาพเดิมเพื่อทำให้อาร์กดับ มีหลายขบวนการ คือ

- ก. การรวมกลับ (Recombination) แก๊สเมื่อ ionized จะมีไอออนบวกและอิเล็กตรอน ซึ่ง ทั้ง 2 อย่างจะรวมตัวกลับบริเวณผิวของห้องดับอาร์ก
- ข. การนำความร้อน (Conducting of heat) การนำความร้อนออกจากอาร์กทำให้อุณหภูมิ ลดลง อุณหภูมิบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงจะเคลื่อนที่ไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำทำให้พลังงานจลน์ ของบริเวณแตกตัวลดลง

อาร์กใน Circuit breaker เมื่อหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์แยกจากกันในขณะที่มี กระแสไหล จะทำให้เกิดความร้อนสูงที่ผิวหน้าสัมผัส เนื่องจากความหนาแน่นของกระแสสูงขึ้น ขณะที่ไม่มีแรงกระระหว่างหน้าสัมผัส อิเล็กตรอนจะถูกปลดปล่อยออกจากผิวสัมผัส โดยความร้อน หรือขบวนการอื่น ๆ ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ทำให้แก๊สบริเวณหน้าสัมผัสเกิด ionized และ อยู่ในสถานะเป็นพลาสมาซึ่งนำไฟฟ้า ดังนั้นจึงเกิดอาร์กกระหว่างหน้าสัมผัสในขณะที่หน้าสัมผัสที่มี กระแสไหลเริ่มแยกจากกัน แรงดันตกคร่อมอาร์กจะ in phase กับกระแสอาร์ก แรงดันตกคร่อม อาร์กจะกลับทางไปพร้อมกับกระแสและกระแสไหลขึ้น หากอัตราการกลับคืนสภาพของไดอิเล็กตริก เร็วกว่าอัตราการกระแสไหลขึ้นของแรงดัน อาร์กจะดับที่กระแสศูนย์ การดับอาร์กใน circuit breaker ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการคือ

- ความเร็วของหน้าสัมผัส
- วัสดุที่ใช้ทำหน้าสัมผัส
- รูปแบบการไหลของตัวกลางดับอาร์ก
- อัตราการเพิ่มของ restriking voltage

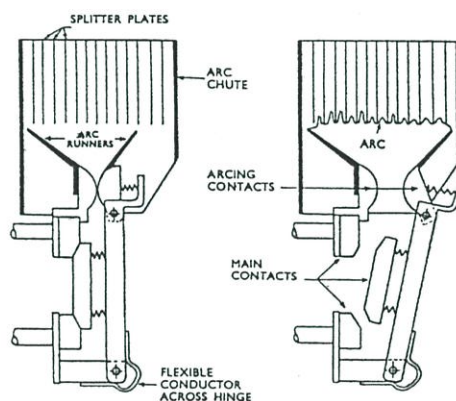
- อัตราคืนสภาพของไดอิเล็กตริกของตัวกลาง
- จังหวะที่หน้าสัมผัสแยกจากกันเมื่อเทียบกับแรงดันและกระแส

2.3.5 ชนิดของเซอร์กิตเบรกเกอร์

แบ่งตามตัวกลางฉนวนที่ใช้ในการดับอาร์ก คือ

- Air circuit breaker (ACB.) ใช้อากาศเป็นตัวกลางดับอาร์ก
- Air blast circuit breaker (ABB.) ใช้อากาศอัดฟันดับอาร์ก
- Oil circuit breaker (OCB.) ใช้น้ำมันหม้อแปลง
- Gas circuit breaker (GCB.) ใช้แก๊ส SF₆ เป็นตัวกลางดับอาร์ก
- Vacuum circuit breaker (VCB.) เป็นการดับอาร์กในห้องสุญญากาศ

1. Air circuit breaker (ACB.) อาศัยหลักการดับอาร์กแบบ High resistance interruption การดับอาร์กกระทำในบรรยากาศปรกติ ส่วนใหญ่มักจะใช้เป็น DC. breaker และ AC. breaker ที่มีแรงดันต่ำ ๆ ไม่เกิน 15 KV. ดังรูปโครงสร้าง ที่ 2.39

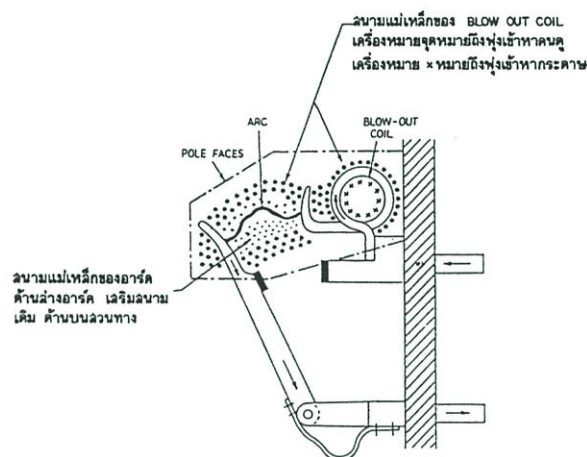


รูปที่ 2.39 แสดงส่วนประกอบของ ACB.

การทำงานของ ACB. เมื่อ contact เริ่มแยกจากกัน จะเกิดอาร์กที่ Arcing contact อาร์กจะเกาะไปตามส่วนโค้งของ Arc runners ขึ้นไปด้านบน ทำให้อาร์กยาวขึ้นเรื่อย ๆ และมีความต้านทานสูงขึ้น อาร์กจะวิ่งเข้าหา arc splitter ซึ่งเป็นแผ่นฉนวนทนความร้อนทำจากไฟเบอร์กลาส แผ่นดังกล่าวจะวางเรียงเป็นช่อง ๆ ตั้งฉากกับอาร์กทำหน้าที่สับอาร์กออกเป็นชิ้น ๆ และนำความร้อนออกจากอาร์ก เมื่ออาร์กยาวขึ้นความต้านทานก็สูงขึ้น แรงดันตกคร่อมอาร์กจะสูงขึ้นจนกระทั่งสูงกว่าแรงดันคร่อมหน้าสัมผัส ที่จุดนี้อาร์กจะดับ ดังรูปที่ 2.40

ในกรณีที่ต้องการจะเพิ่มสมรรถนะการตัดกระแสลัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ให้สูงขึ้น จะทำได้โดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าผลักอาร์กเข้าหา Arc chute ให้เร็วขึ้นเรียกว่า Magnetic blow out circuit breaker (MCB.)

ACB. ส่วนใหญ่จะใช้ในอาคาร เนื่องจากมีความปลอดภัยในด้านอัคคีภัยสามารถปลดกลับ ได้บ่อย ๆ ซ้ำ ๆ กันเพราะใช้อากาศรอบ ๆ เป็นตัวกลางดับอาร์กและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาน้อย มาก กลไกควบคุมการทำงานสามารถใช้ได้ทั้งระบบ solenoid , สปริง และลม

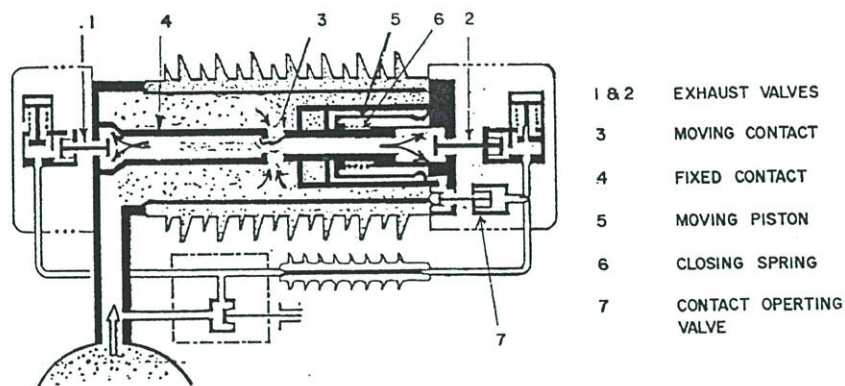


รูปที่ 2.40 แสดงการดับอาร์ก ใน ACB.

2. Air blast circuit breaker (ABB.) ใช้หลักการเดียวกันกับ Air circuit breaker ใน Low voltage air blast circuit breaker ห้องดับอาร์กจะอยู่ในบรรยากาศปรกติ และใช้วาล์วควบคุมพ่น อากาศอัดจากถังเก็บลมไปดับอาร์กโดยปรกติแล้วถังเก็บลมจะอยู่ด้านล่าง ดังนั้นเมื่อเปิดลมอัดให้ ไหลไปตามท่อที่จะถึงอาร์ก ทำให้เสียเวลา ใน High voltage breaker จึงพัฒนาให้ห้องดับอาร์ก เป็นห้องที่มีอากาศอัดประมาณ 30 กก/ชม.² และออกแบบให้วาล์วพ่นลมอยู่บนหัวเซอร์กิตเบรก เกอร์ เมื่อเปิดหน้าสัมผัสและเกิดอาร์กวาล์วพ่นลมจะเปิด อากาศอัดในห้องดับอาร์กถูกพ่นออกสู่ บรรยากาศโดยควบคุมให้ไหลผ่านอาร์กเพื่อให้ดับในที่สุด ห้องดับอาร์กชนิดอัดอากาศจะมีความ แข็งแรงได้อิเล็กตริกสูง จึงทำให้ช่องระหว่างหน้าสัมผัสสั้นลง ดังรูปที่ 2.41

ในการพ่นลมออกสู่บรรยากาศเพื่อดับอาร์ก เนื่องจากความดันแตกต่างกันมากอากาศอัดจะ ขยายตัวไปยังย่านความดันต่ำโดยความเร็วรูปเปอร์โซนิคทำให้เกิดเสียงดังคล้ายระเบิด ลมที่พ่น ผ่านแกนอาร์กด้วยความเร็วสูงจะนำความร้อนออกจากอาร์กอย่างรวดเร็ว และทำให้ลมใหม่เข้ามา แทนที่เป็นการ de-ionized ตัวกลางจนอย่างรวดเร็ว เมื่อกระแสผ่านศูนย์อาร์กจะดับ และ blast

valve จะปิดเพื่อสงวนลมไว้ใช้ในการปลดสับครั้งต่อไป การควบคุมการปลดสับขึ้นอยู่กับ การออกแบบของบริษัทผู้ผลิต แต่ส่วนใหญ่จะใช้ลมและสปริง



รูปที่ 2.41 แสดงการควบคุมการปลด - สับของ ABB

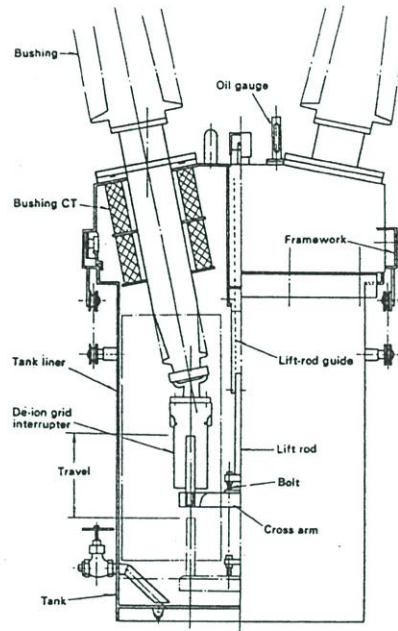
3. Oil Circuit breaker (OCB.) คือเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้น้ำมันฉนวนเป็นตัวกลางในการดับอาร์ก ซึ่งเป็นชนิดเดียวกันกับน้ำมันหม้อแปลง มีคุณลักษณะทั่วไปดังนี้

จุดวาบไฟ	(Flash point)	133°C
จุดลุกไหม้	(Burning point)	148°C
ความหนืด	(Viscosity)	57 Seconds
จุดเยือกแข็ง	(Freezing point)	-40°C

อาร์กที่เกิดขึ้นมีความร้อนสูงทำให้น้ำมันแตกตัวเกิดแก๊สร้อน แก๊สที่เกิดขึ้นจะขยายตัวในห้องดับอาร์กทำให้มีความดันสูง แก๊สดังกล่าวจะประกอบด้วยไฮโดรเจน 60 % และไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ 40% ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของแก๊สที่เกิดขึ้นในย่านของอาร์กกับน้ำมันรอบนอกสูงมาก ทำให้ฟองแก๊สไฮโดรเจนที่ลอยขึ้นนำเอาความร้อนออกจากอาร์กอย่างรวดเร็ว อาร์กจะถูก De-ionized และความแข็งแรงไดอิเล็กตริกของน้ำมันฉนวนบริเวณนั้นจะคืนสภาพดีขึ้นเรื่อย ๆ รอให้กระแสผ่านศูนย์อาร์กก็จะดับ การเกิดอาร์กแต่ละครั้งจะทำให้มีเขม่าคาร์บอนเกิดขึ้นจับอยู่ตามชิ้นส่วนของห้องดับอาร์ก เขม่าคาร์บอนจะทำให้คุณภาพของน้ำมันเสื่อมลง

Bulk oil circuit breaker (B.OCB) เป็นชนิด dead tank มีโครงสร้างเป็นถังโลหะใช้สำหรับบรรจุน้ำมัน ถ้าเป็นชนิดพิกัดแรงดันต่ำ เช่น 33 KV. ลงมาอาจจะใช้ 1 ถึง 3 เฟส ถ้าแรงดันไฟฟ้าสูงตั้งแต่ 69 KV. ขึ้นไปจะแยกถังละเฟส บนถังจะติด condenser bushing เฟสละ 2 ตัว de-ion grid จะติดอยู่ที่ปลายบุชซึ่งด้านล่างซึ่งมี fixed contact ติดอยู่ ส่วน moving contact จะติดอยู่บน cross arm โลหะ ซึ่งทั้งชุดจะมีแท่งฉนวนยึดอยู่ เพื่อยกให้เคลื่อนที่ขึ้นลง แท่งยก (lift rod) จะต่อเข้ากับชุดกลไกขับเคลื่อนโดยผ่าน operating pull rod ซึ่งมีระบบส่งกำลังเพื่อให้ contact lift rod

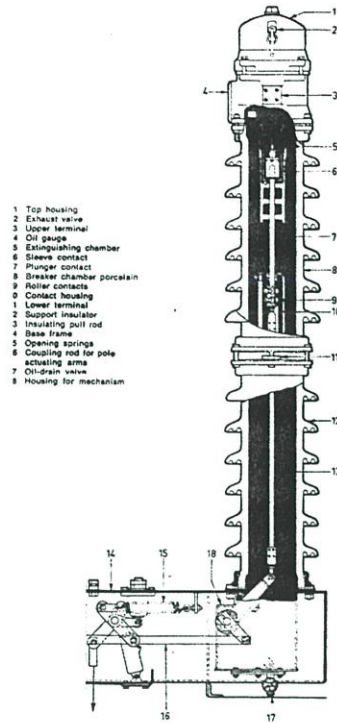
เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในแนวตั้งเพื่อปลดสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ ได้ฝาถังจะมี Bushing current transformer ติดอยู่ที่ทั้งสองด้าน สามารถประหยัด CT. ที่จะติดตั้งภายนอกถังได้ ส่วนใหญ่แล้ว B.OCB จะเป็นชนิด double break คือมี 2 interrupter ต่อเฟส ตามรูปที่ 2.42



รูปที่ 2.42 ส่วนประกอบของ B.OCB

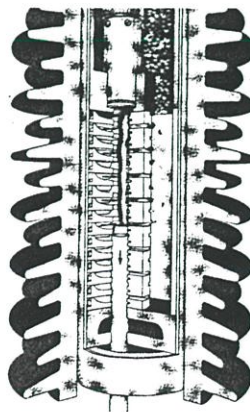
B.OCB ใช้น้ำมันมาก เช่น ขนาด 115 KV. 2000 A. ใช้น้ำมันถึง 6,000 ลิตร จึงทำให้มีรูปร่างใหญ่โต น้ำหนักมากและราคาแพง ที่สำคัญคือหากระเบิดจะติดไฟลุกไหม้เป็นอันตรายต่ออาคารและอุปกรณ์ข้างเคียง ในปัจจุบันจึงไม่นิยมใช้แล้ว B.OCB สามารถผลิตได้ถึง 380 KV. 7,500 MVA. โดยมี 4 – breakers ต่อเฟส

Minimum oil circuit breaker (M.OCB) เนื่องจาก bulk oil มีน้ำมันมาก จึงได้พยายามพัฒนาให้ใช้น้ำมันน้อยลง โดยให้ชุดดับอาร์กอยู่ใน porcelain housing แล้วยกให้สูงขึ้นด้วย supporting insulator เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดนี้จึงเป็น Live tank circuit breaker ใช้น้ำมันน้อยลงประมาณ 10 เท่า ตามรูปที่ 2.43



รูปที่ 2.43 แสดงส่วนประกอบของ M.OCB.

ห้องดับอาร์กของ M.OCB. ประกอบด้วยกระบอก Glass fiber-reinforce epoxy resin บรรจุอยู่ในห้อง porcelain ภายในมี de-ion grid ซึ่งทำด้วยฉนวนที่ทนอาร์กได้ ทำเป็นรูปจานกลมวางเรียงซ้อน ๆ กัน แต่ละชั้นจะเจาะร่องเพื่อเป็นทางให้แก่สัรอนพ่นออกด้านข้างและมีทางให้น้ำมันใหม่เข้าแทนที่ได้ดังรูปที่ 2.44 แก๊สที่พ่นออกมาจะลอยขึ้นไปบนห้องที่หัวเซอร์กิตเบรกเกอร์และออกสู่บรรยากาศต่อไป ลักษณะการดับอาร์กเช่นนี้เรียกว่า self generated cross blast system

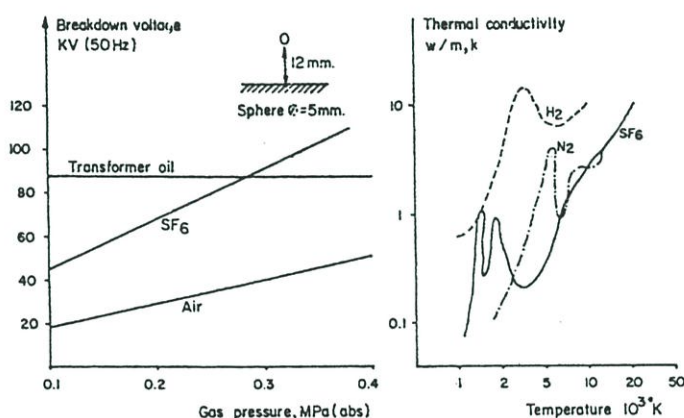


รูปที่ 2.44 การดับอาร์กใน M.OCB.

4. Gas circuit breaker (GCB.)

เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดนี้ใช้ SF₆ Gas (Sulphur hexafluoride gas) เป็นฉนวนในห้องดับอาร์กมีคุณสมบัติเป็นสารประกอบโพลีอะตอมิกโมเลกุลของกำมะถันและฟลูออรีนไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ ไม่ติดไฟ ไม่ช่วยให้ไฟติด เมื่อต่อปฏิกิริยาทางเคมีกับสารอื่น จะคงสภาพเดิมได้ ถึงแม้ทำให้ร้อนถึง 500°C ภายในถังปิดมิดปราศจาก ออกซิเจนและความชื้น

มีความหนาแน่น 5 เท่าของอากาศ ที่แรงดันบรรยากาศจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า 2.5 เท่าของอากาศ และจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเท่ากับน้ำมันหม้อแปลงที่ความดันอัดประมาณ 3 bar (3 เท่าบรรยากาศ) และสามารถนำความร้อนได้ดี



รูปที่ 2.45 Breakdown voltage และ Thermal conductivity ของ SF₆ Gas

SF₆ มี Breakdown voltage สูงเพราะสัมประสิทธิ์ไอออนในเซชันมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับอากาศ ทำให้อัตราการเพิ่มที่วิญญูของอิเล็กตรอนอิสระต่ำ ทั้งนี้เพราะ SF₆ มีคุณสมบัติเป็นแก๊สไฟฟ้าลบ (Electronegative gas) โมเลกุลของ SF₆ มีคุณสมบัติรับอิเล็กตรอนอิสระในสนามไฟฟ้าได้ กล่าวคืออิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากไอออนในเซชันจะไปเกาะอยู่บนโมเลกุลที่เป็นกลาง กลายเป็นไอออน ไอออนลบจะหนักและเคลื่อนไหวได้ช้าพลังงานที่ได้จากการเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดไอออนลบได้ จึงทำให้อัตราการเกิดหรือเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนอิสระถูกหน่วงให้ช้าลง อะวาลานซ์อิเล็กตรอนวิกฤติจึงเกิดได้ยาก การเกาะตัวของอิเล็กตรอนบนโมเลกุลกลายเป็นไอออนลบนี้เองเป็นแฟกเตอร์สำคัญที่ทำให้ SF₆ มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง ดังรูปที่ 2.45

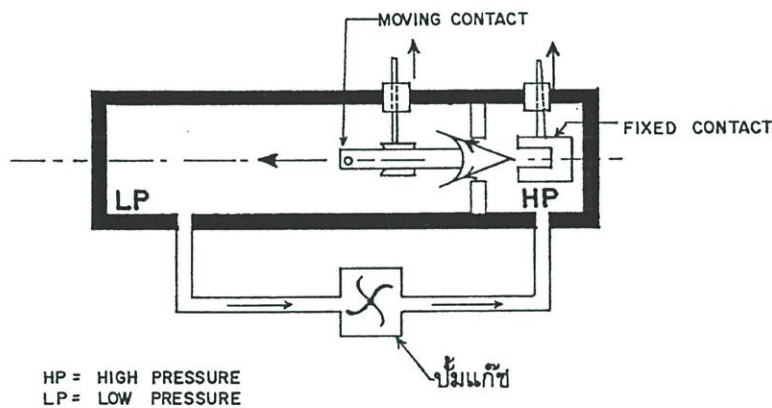
การใช้แก๊ส SF₆ เป็นฉนวนดับอาร์กใน GCB. เนื่องจากมี Breakdown voltage สูงเป็นสัดส่วนกับความดันอัด และมีอัตราการคืนสภาพไดอิเล็กตริกเร็วกว่าอากาศถึง 100 เท่า ประมาณ 200-400 kV. /micro second และมีคุณสมบัตินำความร้อนได้ดี

เมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดกระแส จะเกิดอาร์กขึ้น ระหว่างหน้าสัมผัสซึ่งอาร์กจะประกอบด้วย Conductive plasma อาจมีอุณหภูมิสูงถึง $20,000^{\circ}\text{K}$ และอยู่ในสภาพไอออนไนเซชันเต็มที่ แก๊สใหม่จำนวนหนึ่งจะถูกพ่นออกมาดับอาร์ก และ SF₆ สามารถนำความร้อนได้ดีมากในย่านอุณหภูมิดังกล่าว แก๊สจะลดความเป็นตัวนำไฟฟ้าอย่างรวดเร็วจนถึงย่านเป็นฉนวนเมื่ออุณหภูมิลดลงจาก $5,000^{\circ}\text{K}$ มาเป็น $1,500^{\circ}\text{K}$ และเส้นผ่าศูนย์กลางของอาร์กจะลดลงระหว่างที่เคลื่อน กระแสอาร์กลดลงผ่านศูนย์ เส้นผ่าศูนย์กลางจะลดลงมากเมื่อกระแสผ่านศูนย์และดับลงในที่สุด

ชนิดของ GCB.

ก. ชนิด Double pressure dead tank หรือ Gas blast type ภายใน interrupter จะอัดแก๊สด้วยความดันประมาณ 5 bar และจะมีแก๊สเก็บไว้ในห้องเก็บอีกต่างหากด้วยความดันสูง 15 bar เมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์ open แก๊สในห้องความดันสูงจะเป่าเข้าไปเพื่อดับอาร์ก ซึ่งจะทำให้ความดันในห้องดับอาร์กสูงขึ้น สวิตซ์ความดันจะสั่งให้ปั๊มแก๊สกลับไปยังห้องเก็บแก๊สแรงดันสูงเช่นเดิม กระบวนการดังกล่าวเป็นแบบวงจรปิดแก๊สไม่ได้ปล่อยทิ้งและไม่สัมผัสกับบรรยากาศภายนอกเลย

หลักการดังกล่าวเริ่มใช้ระยะเริ่มแรก มีข้อเสียคือแก๊สในห้องความดันสูงจะเป็นของเหลวที่ต่ำกว่า 10°C ซึ่งต้องใช้ heater อุ่นไว้และควบคุมอุณหภูมิด้วยสวิตซ์ควบคุมอุณหภูมิ ในปัจจุบันผู้ผลิตส่วนใหญ่จะหันมาผลิตชนิด puffer แทน ตามรูปที่ 2.46

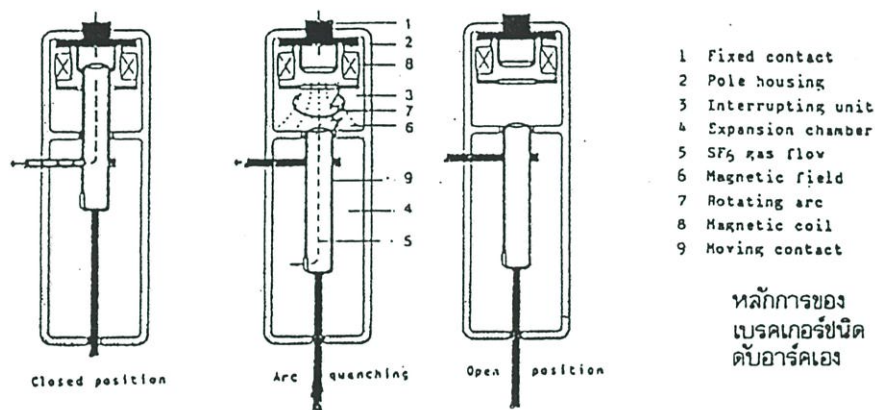


รูปที่ 2.46 แสดงการทำงานของเบรกเกอร์ชนิด Double pressure

GCB. ชนิด 2 แรงดันนี้ breaking time สั้นมากประมาณ 2 cycles เหมาะสำหรับใช้ในระบบที่ต้องการ Interrupting capacity สูง ๆ

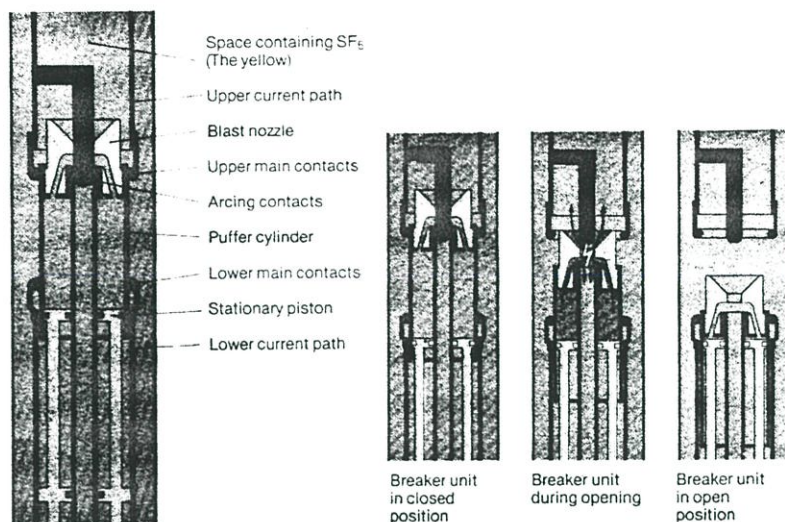
ข. ชนิด Single pressure แก๊สจะอัดด้วยความดันประมาณ 5 – 6 bars ในห้องดับอาร์กมี 2 แบบคือ

แบบ Self Extinguishing จากรูปที่ 2.47 เมื่อ moving contact เคลื่อนที่ออกจาก fixed contact กระแสลัดวงจรไหลผ่านขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า (8) และสร้างสนามแม่เหล็กขึ้น ทำให้อาร์กที่เกิดขึ้นหมุนและสัมผัสแก๊สโดยทั่วถึง แก๊สจะร้อนขึ้นและความดันในห้องดับอาร์ก (3) จะสูงขึ้น เนื่องจากแก๊สขยายตัว แก๊สในห้องดับอาร์กจะถูกพ่นผ่านอาร์กออกไปตามท่อลวงของ moving contact ตามแนวเส้นไขว่ปลา (5) อาร์กจะถูก de-ionized โดยแก๊สและดับลงเมื่อกระแสผ่านศูนย์ หลักการออกแบบของเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดนี้เรียกว่า self generated action กล่าวคือความดันในห้องดับอาร์กจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสอาร์กที่จะดับ เซอร์กิตเบรกเกอร์จะดับอาร์กได้ดีเมื่อตัดกระแสปริมาณมากและถ้ากระแสปริมาณน้อยจะทำให้ตัดกระแสได้เมื่อผ่านแกนศูนย์เหมาะสำหรับใช้ switching small inductive current ซึ่งต้องการกระแส chopping ต่ำ ๆ



รูปที่ 2.47 หลักการทำงานของเบรกเกอร์ชนิด Self-extinguishing

แบบ Puffer มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ puffer cylinder , arcing moving contact และ nozzle ซึ่งชิ้นส่วนทั้งสามยึดติดกัน โดยเคลื่อนที่ลงพร้อมกัน และอัดแก๊สในกระบอกเหนือ stationary piston เพื่อให้แก๊สพ่นผ่านหัวฉีดไปดับอาร์ก ชิ้นส่วนทั้งหมดประกอบอยู่ในห้องซึ่งมีแก๊สความดันอัดประมาณ 5 bar (0.5MPa) ที่ 20°C



รูปที่ 2.48 หลักการดับอาร์คของเบรกเกอร์ชนิด Puffer

เมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์อยู่ในตำแหน่ง close กระแสจะไหลผ่าน upper และ lower main contact เมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์ trip กลไกควบคุมการทำงานจะดึง moving contact และชุด puffer ลง แก๊ส ในกระบอก puffer จะถูกอัดให้มีความดันสูงขึ้น แก๊สยังไหลออกจาก nozzle ไม่ได้ เพราะ upper arcing contact อุดอยู่ เรียกว่าเกิด “clogging effect” ซึ่งจากผลดังกล่าวทำให้ความดันแก๊สสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อ nozzle เคลื่อนที่ลงจนกระทั่ง contact อุดต่อไปไม่ได้แต่อิทธิพลของอาร์คยังคงดันไม่ให้แก๊สพุ่งออกมาได้สะดวก จึงทำให้ความดันในห้อง puffer ยิ่งสูงขึ้นอีก จนกระทั่งกระแสจะลดลงมาเป็นศูนย์ Clogging effect ลดลง แก๊สจะถูกพุ่งออกมาผ่าน nozzle ไปยังอาร์คทั้งขึ้นและลง และนำความร้อนออกจากอาร์คทำให้แก๊สเปลี่ยนจากตัวนามาเป็นฉนวน ทำให้กระแสอาร์คดับลง ดังแสดงในรูปที่ 2.48

การออกแบบให้เกิด clogging ใน puffer type breaker อาจจะทำให้เป็นการผสมผสานกันระหว่างส่วนดีของ air blast กับ oil circuit breaker แก๊สในกระบอก puffer จะถูกอัดจนกระทั่งกระแสเข้าใกล้ศูนย์ Clogging effect ลดลงแก๊สจะถูกปล่อยพุ่งออกมาอย่างรวดเร็ว ซึ่งความดันอัดของแก๊สจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความรุนแรงของอาร์ค ทำให้อัตราการคืนสภาพไดอิเล็กตริกสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อกระแสใกล้ศูนย์ สามารถดับกระแสได้สูง และมี Chopping ที่กระแสต่ำ เพราะหลักการผสมระหว่าง blast piston กับ self blasting principle จึงทำให้มีส่วนดีดังนี้คือ

- เวลาที่ใช้ในการตัดกระแสสั้น (breaking time 2 cycles at 50 HZ.)
- Restrike free เมื่อตัดกระแสคาปาซิทีฟ
- Low chopping เมื่อตัดกระแสอินดักทีฟน้อย ๆ
- เวลาที่ใช้ในการตัดกระแสไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแส

ผลที่เกิดจากการแตกตัวของแก๊สในขบวนการดับอาร์ก ทำให้เกิดมีผงสีเทาซึ่งจะถูกดูดซึมด้วย absorbent ซึ่งเป็นสารเคมีที่บรรจุอยู่บนส่วนหัวของเซอร์กิตเบรกเกอร์ , ในปัจจุบัน puffer type อาจจะทำแบบเป็น live หรือ dead tank และพัฒนาจนถึง rated voltage 550 kV , breaking current 50 kA. , 4 breaks per phase และมีความเชื่อถือได้สูงที่สุดในปัจจุบัน

SF6 puffer ดีกว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดอื่น เพราะมี arc voltage ต่ำทำให้ความสึกหรอของหน้าสัมผัส วัสดุฉนวน และตัวกลางที่ใช้ในการดับอาร์ก มีน้อย ความสึกหรอดังกล่าวรวมกันเรียกว่า electrical endurance ซึ่งอาจจะแสดงออกในรูปของผลรวมของกระแสที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดเป็น kA. ในปัจจุบันเซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถตัดกระแส 40 kA. 12 ครั้ง แต่ถ้าตัดกระแสต่ำ ๆ จะตัดได้เป็นพัน ๆ ครั้ง เช่น 2kA. จำนวน 5,000 ครั้ง ซึ่งทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดดังกล่าวมีระยะเวลาใช้งานนานก่อนจะมีการ overhaul

5. Vacuum Circuit Breaker

ความดันภายในห้องดับอาร์กของเซอร์กิตเบรกเกอร์สูญญากาศประมาณ 5×10^{-4} torr (1 torr = ความดัน 1 มม.ปรอท) ซึ่งที่ความดันดังกล่าวระยะห่างเฉลี่ยระหว่างโมเลกุลของแก๊สยาวมาก จึงทำให้มีความแข็งแรงไดอิเล็กตริกสูง เหมาะที่จะใช้เป็นตัวกลางสำหรับดับอาร์ก

การเกิดอาร์กในสูญญากาศ เมื่อน้ำสัมผัสแยกจากกันในขณะที่มีกระแสไหล พื้นที่ของหน้าสัมผัสจะลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งเป็นเหตุให้ความหนาแน่นของกระแสที่จุดสัมผัสเพิ่มสูงขึ้น ความร้อน ณ จุดสัมผัสจะสูงมากจนทำให้เกิดไอโลหะระหว่างช่องหน้าสัมผัสและทำให้เกิดอาร์กระหว่างหน้าสัมผัสขึ้น กระแสอาร์กจะประกอบด้วยอิเล็กตรอน ไอออนของโลหะ และอะตอมเป็นกลาง (ไอโลหะ) ซึ่งจะทำให้เกิดจุดเรืองแสงบนผิวหน้าของ Cathode เรียกว่า Cathode spot ถ้าอาร์กมีลักษณะเป็นรูปกรวยบานออกไปด้าน Anode ซึ่งทำหน้าที่รับอนุภาคต่าง ๆ จาก Cathode จุดเรืองแสงบน Cathode จะเกิดมีจำนวนมากขึ้นหรือน้อยลงตามคลื่น Sinusoidal ซึ่งเป็นคลื่นกระแส เมื่อกระแสลดลงมาถึงศูนย์ จุดเรืองแสงจะดับและอาร์กจะดับในที่สุด ลักษณะของอาร์กที่เกิดขึ้นมี 2 ชนิดคือ

ก. ชนิดกระจาย (Diffuse arc) เมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดกระแสต่ำกว่า 10,000A. อาร์กจะอยู่ในรูปกระจาย กล่าวคือจะมี Cathode spot เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งแต่ละจุดจะนำกระแสประมาณ 100-200 A. ขนาดของจุดประมาณ 0.1 มม. แต่ละจุดจะเปล่งอิเล็กตรอน , อะตอม เป็นกลางและไอออนโลหะ ในอัตรา 100 : 10 : 1 ด้วยความเร็ว 10^6 ม./วินาที) : 1 (10^4 ม./วินาที) : 1 ซึ่งถ้า Cathode ทำด้วยทองแดงจะมีปริมาณอิเล็กตรอนที่เปล่งออกมาจาก Cathode ซึ่งมีประจุบวกจะเป็นตัวทำให้อิเล็กตรอนเป็นกลาง จึงทำให้ไม่มี Voltage drop บนผิวของ Anode จุดเรืองแสงบน Cathode ที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ด้วยอำนาจของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยความเร็ว 10 ม./วินาที ทำให้ความร้อนบนหน้าสัมผัสของ Cathode ลดลง ซึ่งไม่ทำให้เกิดความสึกหรอบนผิวหน้า Cathode มากนัก

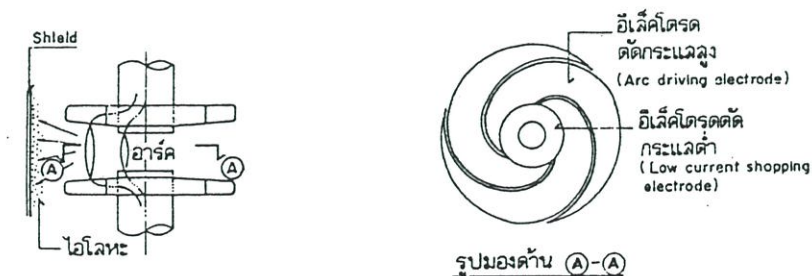
ข. ชนิดรวม (Concentrated arc) เมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดกระแสสูงกว่า 10,000 A. ล้ออาร์กจะรวมตัวกัน โดยเส้นผ่าศูนย์กลางล้ออาร์กเล็กลงและความต้านทานของอาร์กจะสูงขึ้น Arc voltage จะสูงขึ้นจากเดิมชนิดกระจาย 40-70 โวลต์ เป็น 100-200 โวลต์และอนุภาคต่าง ๆ เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของกระแส ซึ่งทำให้มีการชนซึ่งกันและกันในล้ออาร์ก ทำให้ไอออนที่เปล่งออกจาก Cathode ไปไม่ถึง Anode และขาดประจุที่จะทำให้อิเล็กตรอนเป็นกลางบริเวณ Anode จึงทำให้จุดเรืองแสงบน Anode ปรากฏขึ้นเรียกว่า Anode spots ทำความเสียหายแก่หน้าสัมผัสของ Anode และดับอาร์กยากขึ้น

การดับอาร์ก อาร์กชนิดกระจายจะดับได้ง่าย เพราะ Cathode spot จะมีปริมาณตามคลื่นกระแส เมื่อกระแสผ่านศูนย์กลางจุดเรืองแสงก็จะหายไปและอาร์กจะดับลง ความแข็งแรงของฉนวนที่จะกลับคืนภายหลังอาร์กดับขึ้นอยู่กับไอโลหะที่เหลืออยู่ระหว่างหน้าสัมผัส ไอโลหะเหล่านี้จะถูกดูดกลืนโดย Anode และ Arc shield ซึ่งเป็นโลหะ และการดูดกลืนไอโลหะจะกินเวลาไม่เกิน 10 ไมโครวินาที ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงของฉนวนที่บริเวณหน้าสัมผัสกลับคืนอย่างรวดเร็ว

เนื่องจากอาร์กชนิดกระจายสามารถดับได้ง่าย มักจะเกิดปัญหา Current chopping ก่อนกระแสผ่านศูนย์กลาง กล่าวคือ เมื่อกระแสลดลงจำนวนล้ออาร์กที่เกิดขึ้นก็จะลดลงจนกระทั่งเหลือล้อเดียว ซึ่งทำให้การเกิดของไอโลหะไม่พอที่จะให้กระแสต่ำ ๆ ไหลผ่านได้ อาร์กจึงดับก่อนกระแสผ่านศูนย์กลาง (Chopping) ซึ่งจะทำให้เกิด Overvoltage ก่อความเสียหายให้กับอุปกรณ์ข้างเคียง การแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยใช้โลหะที่ทำหน้าสัมผัส เป็นชนิดที่ให้ไอโลหะความดันสูง และมีการนำความร้อนต่ำ เช่นอัลลอยของทองแดงโครเมียม (Copper chrome alloy) ซึ่งจะทำให้ Chopping ที่กระแสต่ำประมาณ 10A.

การดับอาร์กที่กระแสสูงซึ่งเป็นอาร์กชนิดรวมค่อนข้างจะยาก เพราะมี Anode spots เกิดขึ้นตั้งแต่ 6 kA. ขึ้นไป และมีไอโลหะเกิดขึ้นมากมาย ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีป้องกันไม่ให้เกิดอาร์กชนิดรวม โดยการปรับปรุงรูปร่างหน้าสัมผัส ดังนี้

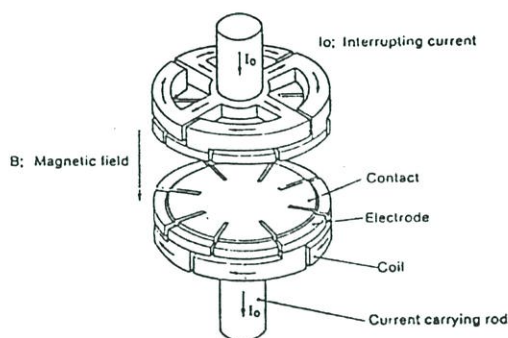
ก. ชนิดรูปก้นหอย (Spiral contact)



รูปที่ 2.49 แสดงรูปร่างของ Spiral electrodes

อาร์กจะเกาะใต้ไปตามขอบร่องที่เซาะเป็นรูปก้นหอย ทำให้อาร์กเคลื่อนเป็นแบบหมุนและเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามแนวรัศมี ทำให้อาร์กเปลี่ยนจากชนิดรวมเป็นชนิดกระจายได้ และสามารถตัดกระแสได้สูงกว่า 10 kA. โดยที่ไม่ทำให้เกิด Anode spots ตามรูปที่ 2.49

ข. ชนิด Coil electrodes



รูปที่ 2.50 แสดงรูปร่างของอิเล็กโตรดชนิด Coil

จากรูปที่ 2.50 กระแส (I_o) ซึ่งไหลเข้าไปในอิเล็กโตรดจะไหลผ่าน Coil ที่อยู่หลังอิเล็กโตรด ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามแนวแกน B จะทำให้อาร์กกระจายอย่างสม่ำเสมอ เต็มหน้าสัมผัส ทำให้แรงดันอาร์กต่ำ ความสึกหรอของหน้าสัมผัสน้อยลง และ Anode spots ไม่เกิด

โครงสร้างของอินเตอร์พเตอร์สูญญากาศ

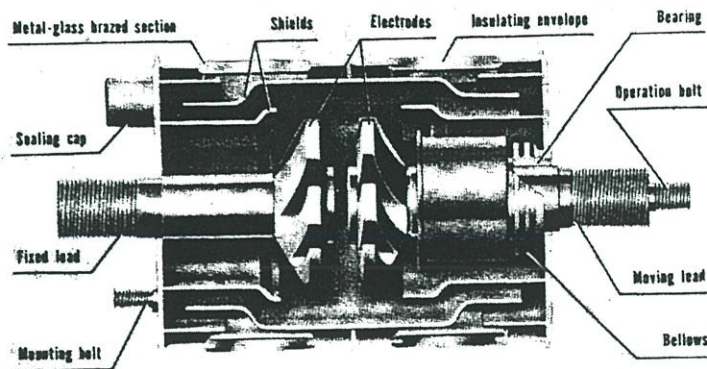
ประกอบด้วย

- Insulating envelope เป็นครอบเซรามิกหรือแก้วแข็งซึ่งใช้ทำหน้าที่เป็นห้องอินเตอร์พเตอร์ และทำหน้าที่ปิด Condensing shield ด้วย ความดันสูญญากาศภายใน Envelope ประมาณ 5×10^{-4} torrs

- Electrodes ทำหน้าที่เป็น Fixed , Moving contact ซึ่งจะมีรูปร่างต่าง ๆ กัน เช่น Butt contact , Spiral contact , Contrate (Cup) contact และ Coil electrodes ขึ้นอยู่กับขนาดกระแสที่จะดับหรือบริษัทผู้ผลิต , ระยะห่างระหว่างหน้าสัมผัสประมาณ 60 มม. ที่ 84 kV และวัสดุที่ใช้ทำหน้าสัมผัสอาจจะเป็น Copper bismuth alloy หรือ Copper chrome alloy ซึ่งมี Thermal strength สูง และให้อายุโหดมาก ไม่เกิดการเชื่อมติดของหน้าสัมผัส ชนิดหลัง Chopping ที่กระแสต่ำ

- Bellows ทำด้วย Stainless steel ทำหน้าที่ให้ Moving contact เคลื่อนที่ได้โดยที่ไม่ทำให้สูญเสียบรรยากาศภายในอินเตอร์พเตอร์

- Shield ทำด้วยทองแดง มีหน้าที่ให้อายุโหดที่เหลือเมื่ออาร์กดับแล้วจับและกลั่นตัว และป้องกันไม่ให้ผนังภายในของ Insulating envelope เป็นตัวนำเนื่องจากการเกาะจับของไอโลหะ



รูปที่ 2.51 โครงสร้างของ Vacuum interrupter

โดยสรุปแล้วปัจจุบัน Air blast circuit breaker มีแนวโน้มที่จะเลิกผลิตเพราะความยุ่งยากในการบำรุงรักษาระบบลม และการปลด-สับมีเสียงดัง ส่วน Oil circuit breaker ยังมีใช้บ้างเล็กน้อยในระบบแรงดันต่ำกว่า 69 kV ลงมา แต่นับวันจะถูกทดแทนด้วย Gas circuit breaker และ Vacuum circuit breaker โดยเฉพาะอย่างยิ่งพวกที่ต้องติดตั้งในอาคารและที่ต้องปลด - สับทุกวัน เช่น การปลด - สับ Capacitor หรือ Shunt reactor มักจะใช้ Vacuum switch แทน ซึ่งจะลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอย่างมาก

สำหรับ Circuit breaker ที่พิกัดแรงดันสูง เช่น ในย่าน EHV. และพิกัดการตัดกระแสลัดวงจรสูง ๆ มักจะนิยมใช้ Gas circuit breaker อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะ Puffer type เพราะ Performance characteristics ดีกว่าชนิดอื่น ๆ ในปัจจุบันกำลังมีการวิจัยและพัฒนาให้สามารถใช้กับพิกัดแรงดัน 1,150 kV และตัดกระแสลัดวงจรได้เกินกว่า 100 kA. ขึ้นไป

โดย Circuit breaker ที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอกและไทรน้อยล้วนเป็นชนิด Gas circuit breaker ทุกตัว แต่สำหรับกลไกการทำงานอาจต่างกันไปเช่น ไฮดรอลิก, นิวมติกและ สปริง

บทที่ 3

โครงข่ายประสาทเทียม

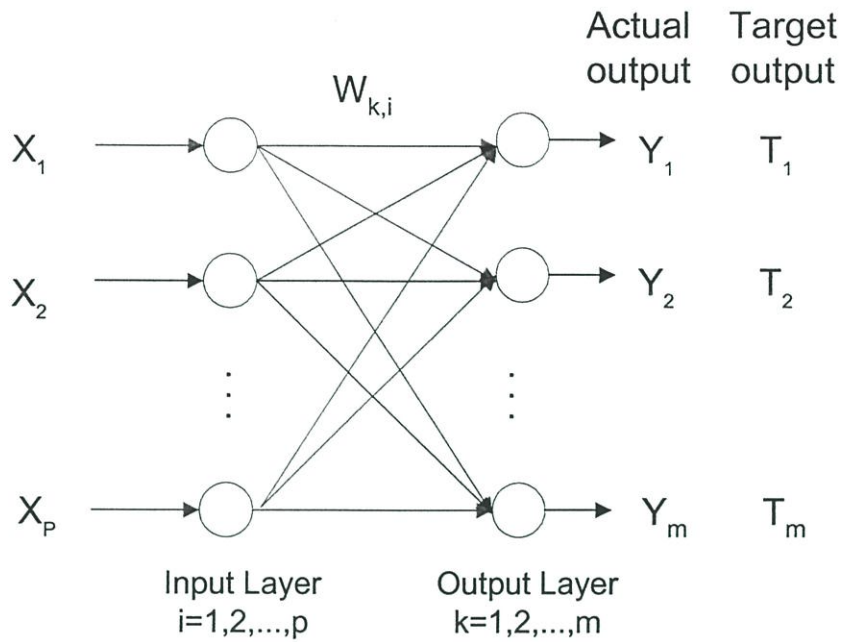
ในปัจจุบันได้มีการประยุกต์นำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในอุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ เช่น ระบบนักบินอัตโนมัติ (Auto pilot aircraft), เครื่องมือหาปลา (Sonar) ที่มีความฉลาดมากขึ้น และมีระบบความคิดที่มีการทำงานในลักษณะคล้ายกับมนุษย์ นักวิจัยด้านไฟฟ้ากำลังจึงมีแนวคิดที่ประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเข้ามาแก้ปัญหาเกี่ยวกับไฟฟ้ากำลังหลายปัญหาด้วยกัน เช่น ปัญหาไหลคโพลว์ (Load flow), การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้า (Load forecasting) และปัญหาการจ่ายโหลดอย่างมีประสิทธิภาพ (Economics load dispatch) เป็นต้น ในบทนี้เป็นการศึกษาหลักการของโครงข่ายประสาทเทียม โดยจะกล่าวถึงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม, ชนิดของการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม รวมไปถึงโครงข่ายประสาทเทียมชนิดต่างๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการวิจัย

3.1 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม (Architectures of Neural Networks) [13]

ในการสร้างเซลล์ประสาทเพียงหนึ่งเซลล์ โดยใช้แนวความคิดจากเซลล์ประสาทชีวภาพ ซึ่งการจะนำเซลล์ประสาทเทียมมาใช้งานได้นั้น ต้องใช้เซลล์ประสาทเทียมที่มีคุณลักษณะต่างๆ กัน (ค่าถ่วงน้ำหนักจะทำให้คุณสมบัติของเซลล์ประสาทเทียมแต่ละเซลล์มีคุณลักษณะแตกต่างกัน) มาเชื่อมต่อเซลล์ประสาทหลายๆ ตัวเข้าด้วยกันให้เกิดเป็นลักษณะของโครงข่ายเป็นชั้นๆ หรือที่เรียกว่า เลเยอร์ (Layer) ซึ่งเซลล์ประสาทแต่ละตัวที่อยู่ในชั้นเดียวกันจะไม่มี การเชื่อมต่อถึงกัน ประเภทของโครงสร้างการเชื่อมต่อโครงข่ายประสาทเทียม พอจะแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว (Single Layer Neural Network), โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi Layer Neural Network) และโครงข่ายประสาทเทียมแบบแลตทิซ (Lattice Neural Network) ซึ่งแต่ละชนิดก็มีคุณลักษณะเด่นที่แตกต่างกันไป

3.1.1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว (Single Layer Neural Network)

จะประกอบไปด้วยเซลล์ประสาทที่จัดเรียงตัวอยู่ในชั้นต่างๆ อันได้แก่ ชั้นอินพุต และชั้นเอาต์พุต สาเหตุที่จัดโครงสร้างแบบนี้เป็นแบบชั้นเดียว เนื่องมาจากนับชั้นเอาต์พุตเพียงชั้นเดียวเท่านั้นว่า เป็นชั้นของเซลล์ประสาท สำหรับชั้นอินพุตไม่พิจารณาเป็นชั้นของเซลล์ประสาทก็ เพราะเป็นชั้นที่ไม่มีการประมวลใดๆ จะทำหน้าที่เพียงแค่รับข้อมูลอินพุตเข้ามาและส่งต่อให้กับชั้นถัดไปเท่านั้น รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว

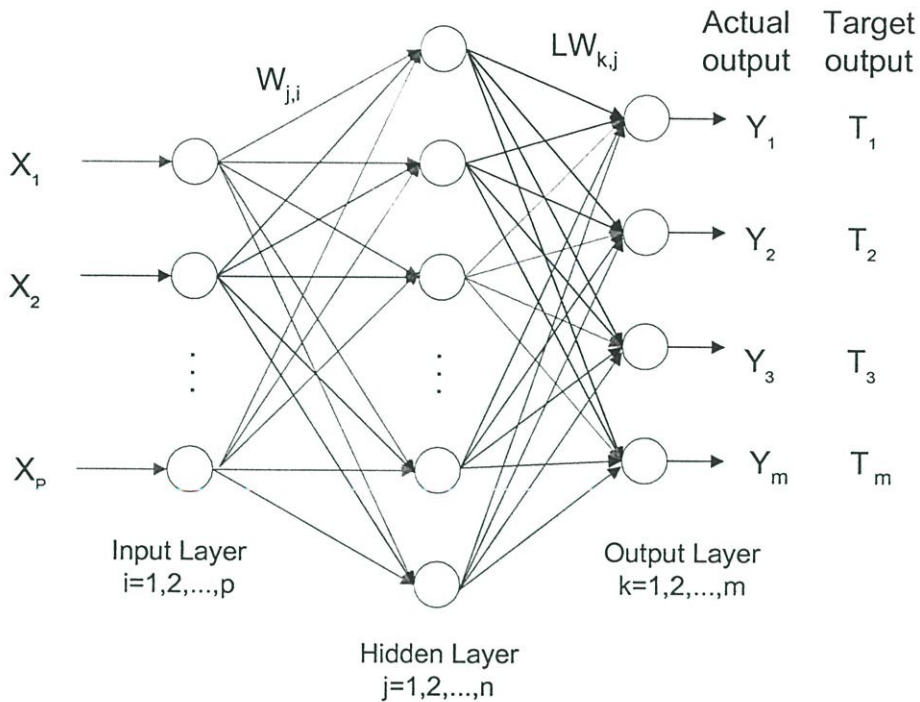


รูปที่ 3.1 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว

3.1.2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi Layer Neural Network)

สืบเนื่องมาจากในปี 1969 Minsky และ Seymour Papert ได้พิสูจน์ให้เห็นว่า โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียวมีข้อจำกัด ไม่สามารถนำมาใช้แก้ปัญหาต่างๆ ในบางกรณีได้ นักวิจัยจึงได้นำเสนอรูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น ซึ่งมีโครงสร้างประกอบขึ้นจากการจัดเรียงตัวของเซลล์ประสาทตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป (ไม่นับรวมชั้นอินพุต) โดยปกติโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นจะประกอบด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียวหลายๆ ตัวต่ออยู่ในโครงสร้างที่มีลำดับชั้นลดหลั่นกันลงไป โดยอยู่ในรูปของการทำงานที่ป้อนไปข้างหน้า (Feedforward) ซึ่งชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นอินพุตและชั้นเอาต์พุต เรียกว่า ชั้นซ่อน (Hidden Layer) ซึ่งชั้นซ่อนนี้เองที่เป็นตัวเพิ่มความสามารถให้แก่โครงข่าย ทั้งนี้จำนวนของชั้นซ่อนสามารถมีได้มากกว่า 1 ชั้น จำนวนของชั้นซ่อนและจำนวนของนิวรอนในแต่ละชั้นจะมีค่าไม่คงที่ แต่ละชั้นอาจจะมีจำนวนนิวรอนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งาน จะเป็นคำถามที่ว่าผู้พัฒนาจะต้องใช้จำนวนชั้นซ่อนเท่าใด และจำนวนนิวรอนต่อชั้นควรเป็นเท่าใด โดยปกติจะใช้ขบวนการตัดและพยายาม (Cut – and – Try Process) นั่นคือ ใช้นิวรอนให้เยอะๆ ไว้ก่อน แล้วค่อยๆ ลดลงมาจนได้จำนวนน้อยที่สุดที่โครงข่ายประสาทเทียมยังคงเรียนรู้ได้ โดยเทคนิคนี้จะเรียกว่า พรุนนิง (Pruning)

อีกวิธีหนึ่งที่จะทำให้แน่ใจว่า ตัวอย่างที่ใช้ในกระบวนการฝึกสอนโครงข่ายนั้นพอที่จะครอบคลุมข้อมูลทั้งหมดได้ ก็คือพยายามใช้ตัวอย่างที่มีจำนวนมากในการฝึกสอนโครงข่าย เพื่อที่ว่าความรู้ที่มากขึ้นจะเป็นข้อมูลในการสร้างผลตอบสนองของโครงข่ายได้ดีขึ้น

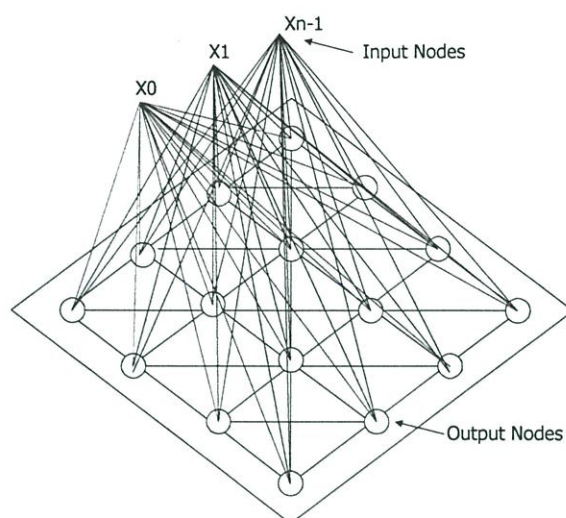


รูปที่ 3.2 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น

จากรูปที่ 3.5 ชุดข้อมูลเอาต์พุตที่ได้จากชั้นหนึ่งจะถูกส่งให้เป็นข้อมูลอินพุตสำหรับชั้นต่อไป โดยค่าเอาต์พุตในชั้นสุดท้ายซึ่งก็คือ เอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าความผิดพลาดกับค่าเอาต์พุตที่ต้องการ (Target Output) ค่าความผิดพลาดที่คำนวณได้จะนำไปใช้ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักของโครงข่ายประสาทเทียมให้เปลี่ยนไปในทางที่ถูกต้องมากขึ้น

3.1.3 โครงข่ายประสาทเทียมแบบแลตทิซ (Lattice Neural Network)

โครงสร้างแบบแลตทิซนี้ อาจจะประกอบด้วยอาร์เรย์ (Array) ของนิวรอนเพียงมิติเดียว (One Dimension) หรือหลายมิติก็ได้ แต่ละนิวรอนจะรับข้อมูลจากโนดอินพุต มิติของโครงสร้างแบบแลตทิซ คือ มิติการจัดเรียงนิวรอน ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับมิติของรูปทรงได้ดังนี้ มิติเดียวสำหรับโครงสร้างแบบแลตทิซหมายถึง การจัดเรียงนิวรอนในแนวนอนหรือแนวตั้งอย่างเดียวหนึ่งเพียงแถวเดียว กรณี 2 มิติสำหรับโครงสร้างแลตทิซเป็นการจัดเรียงนิวรอนทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง และ 2 มิติสำหรับรูปทรงแสดงว่า รูปทรงนั้นมีทั้งความกว้างและความยาว รูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างโครงสร้างแบบ 2 มิติที่มีขนาดนิวรอน 4×4 นิวรอน



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแลตทิซ

ตัวอย่างของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีการจัดเรียงเช่นนี้ คือ โครงข่ายประสาทเทียมชนิด Self Organizing Maps ซึ่งจะมีโหนดคอมแพ็คติฟที่พวงเรียงกันระนาบสองมิติ การเชื่อมโยงภายในระหว่างนิวรอนในชั้นคอมแพ็คติฟมีการเชื่อมโยงอย่างทั่วถึง เมื่อโหนดคอมแพ็คติฟรับข้อมูลอินพุทจากชั้นอินพุทแล้ว จะนำข้อมูลไปประมวลผลหาโหนดที่เป็นตัวแทนอินพุท โดยเลือกโหนดที่ค่าอินพุทและค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมกับโหนดนั้นแตกต่างกันน้อยที่สุด และเรียกโหนดนี้ว่า โหนดชนะ (winner node) แล้วปรับค่าถ่วงน้ำหนักให้โหนดชนะและโหนดข้างเคียงที่อยู่ในขอบเขตพื้นที่ข้างเคียงที่กำหนดเท่านั้น

3.2 การกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก (Setting the Weights) [13]

โครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้น เมื่อสร้างเสร็จแต่ละเซลล์ประสาทที่สร้างขึ้นมานั้น จะไม่มีคุณลักษณะใดเลย เนื่องจากยังไม่มีกำหนดค่าซินแนปติกส์เฉพาะที่เหมาะสมกับงานที่ต้องการให้กับโครงข่ายประสาทเทียม จึงต้องมีการฝึกสอนเพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้นมีคุณลักษณะตามที่ต้องการ การฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียมจะกระทำโดยการปรับเปลี่ยนค่าซินแนปติกส์เฉพาะเพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมจดจำรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทกับเอาต์พุทได้ โดยในขั้นตอนแรกอาจกำหนดเป็นค่าสุ่มใดๆ (Random weight) ก่อนแล้วถึงปรับเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนักไปตามอัลกอริทึมสมมติฐานหลายๆ รอบจนกว่าจะได้เอาต์พุทของโครงข่ายประสาทเทียม เหมือนกับเอาต์พุทของโครงข่ายประสาทเทียมที่ต้องการ ในแง่ของความคิดพลาดที่ยอมรับได้

เนื่องจากการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักที่เป็นค่าสุ่มใดๆ โครงข่ายประสาทเทียมจึงยังไม่สามารถแสดงคุณลักษณะใดออกมา การฝึกสอนให้โครงข่ายก็คือ การปรับค่าถ่วงน้ำหนักทุกๆ จุดให้

สอดคล้องกับอินพุทหลายๆ แบบ เพื่อให้ได้เอาต์พุทตามความต้องการนั่นเอง การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะต้องบรรลุถึงกระบวนการเข้าใจพื้นฐานเสียก่อน คือ การเรียนรู้ในโครงข่ายประสาทเทียมนั้นก็มีขีดจำกัด ปัญหาต่างๆ ผู้ใช้คงต้องแก้ไขให้โครงข่ายประสาทเทียมก่อน แล้วนำผลนั้นไปอ้างอิงสำหรับการปรับปรุงค่าถ่วงน้ำหนัก หลังจากปรับจนได้ค่าผิดพลาดที่เอาต์พุทเทียบกับเอาต์พุทเป้าหมายน้อยลงเป็นที่พอใจแล้ว โครงข่ายประสาทเทียมนั้นก็พร้อมที่จะวิเคราะห์อินพุทและให้เอาต์พุทตามลักษณะตัวอย่างที่เคยเรียนรู้มา การเรียนรู้จะมีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักหลายๆ รอบ จนค่าถ่วงน้ำหนักสอดคล้องกับตัวอย่างหลายๆ ตัวอย่างแล้วจะสามารถให้เอาต์พุทได้ตามต้องการ พบว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้ตัวอย่างสำหรับการปรับสอนมากๆ โครงข่ายก็จะมีความแม่นยำสูงขึ้น แต่ก็ใช้เวลาในการปรับสอนเพิ่มขึ้นเช่นกัน

3.3 ประเภทของโครงข่ายประสาทเทียม [13]

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

3.3.1 การเรียนรู้แบบควบคุม (Supervised Learning)

การเรียนรู้วิธีนี้จะมีการกำหนดคู่ของการฝึกสอนระหว่างอินพุทกับเอาต์พุทที่ต้องการให้โครงข่ายประสาทเทียม ที่เรียกว่า เทรนนิงแพร์ (Training pairs) โครงข่ายประสาทเทียมจะถูกฝึกสอนไปตามจำนวนของคู่ที่ป้อน (จำนวนคู่ของอินพุทกับเอาต์พุทที่ต้องการให้โครงข่ายประสาทเทียมรู้จัก) เอาต์พุทที่คำนวณได้จากโครงข่ายประสาทเทียมจะถูกเปรียบเทียบกับสอดคล้องกับเป้าหมาย ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะถูกป้อนกลับไปยังโครงข่ายประสาทเทียมและเปลี่ยนแปลงค่าถ่วงน้ำหนักให้สอดคล้องกับอัลกอริทึม ที่ทำให้แนวโน้มของค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างเอาต์พุทกับเอาต์พุทเป้าหมายโดยเฉลี่ยมีค่าลดต่ำลง หลังจากฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมจะถูกทดสอบโดยให้เฉพาะค่าอินพุท แต่ไม่ให้ค่าเอาต์พุทที่ต้องการ และพิจารณาเอาต์พุทที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมใกล้เคียงกับค่าเอาต์พุทที่ถูกต้องหรือไม่

3.3.2 การเรียนรู้แบบอิสระ (Unsupervised Learning)

ถึงแม้ว่า อัลกอริทึมแบบควบคุม สามารถจะประยุกต์ใช้เพื่อปรับคุณลักษณะของโครงข่ายประสาทเทียมได้สำเร็จ แต่ก็ยังมีข้อด้อยอยู่ คือ โครงข่ายประสาทเทียมที่มีอัลกอริทึมแบบควบคุมเป็นไปอย่างแบบชีวภาพไม่ได้ และยากที่จะเชื่อได้ว่า กลไกการปรับสอนของสมองที่ต้องการการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ต้องการกับเอาต์พุทจริง โดยกระบวนการป้อนกลับไปแก้ไขคุณลักษณะของโครงข่ายประสาทเทียม และถ้าสมมุติว่า สมองมีกลไกเช่นนี้ ต้องมีผู้หาเอาต์พุทที่ต้องการเพื่อนำมาเป็นเป้าหมายตลอดเวลา และจะเอามาจากที่ใด กล่าวโดยสรุปก็คือ ต้องมีผู้คิดเป้าหมายให้กับโครงข่ายประสาทเทียมก่อน โครงข่ายประสาทเทียมไม่สามารถคิดและปรับ

คุณลักษณะได้ก่อนด้วยตนเอง ในทางตรงกันข้ามหากพิจารณาทารกแรกเกิดสมองของเขาสามารถจัดระบบเองได้อย่างไร การปรับสอนแบบอิสระที่สร้างขึ้นยังคงห่างไกลความเป็นไปได้ ที่จะมีลักษณะการปรับสอนแบบระบบของสมองจนกระทั่งมีการพัฒนาการ ปรับสอนแบบอิสระนี้ขึ้นราวปี 1984 โดยโคโฮเนน (Kohonen) และคณะได้เสนอแนวคิดการปรับสอนแบบไม่ต้องการเป้าหมาย ไม่มีการตัดสินใจด้วยเหตุผลในอุดมคติมาก่อน ชุดของการปรับสอนจะมีเพียงอินพุทเวกเตอร์เท่านั้น อัลกอริทึมปรับสอนจะเปลี่ยนแปลงค่าถ่วงน้ำหนักของโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อสร้างเอาต์พุทที่มีความมั่นคง ถ้าเอาต์พุทมีการเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยโครงข่ายประสาทเทียมก็ยังสามารถบอกได้ว่าคือเอาต์พุทตัวเดิม การฝึกสอนวิธีนี้จะไม่สามารถแก้ปัญหาที่ซับซ้อนได้ ดังนั้นจึงนิยมใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบนี้กับงานง่ายๆ ประเภทการเปรียบเทียบเอกลักษณ์รูปแบบที่สัมพันธ์กันระหว่างอินพุทและเอาต์พุท ที่ถูกกำหนดโดยโครงข่ายประสาทเทียม

3.4 ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function)

ฟังก์ชันกระตุ้นหรือหนังสือบางเล่มเรียกว่า ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) เป็นตัวกำหนดค่าเอาต์พุท ฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมมีอยู่หลายชนิด ดังแสดงในตารางที่ 3.1 เราอาจแบ่งฟังก์ชันกระตุ้นพื้นฐานออกได้เป็น 3 ชนิดคือ

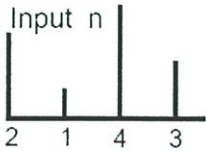

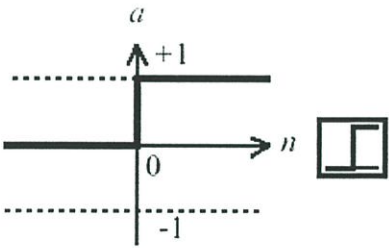
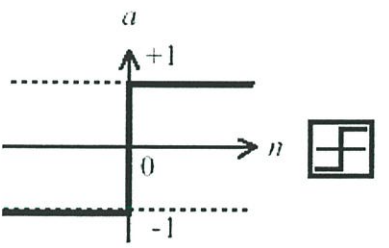
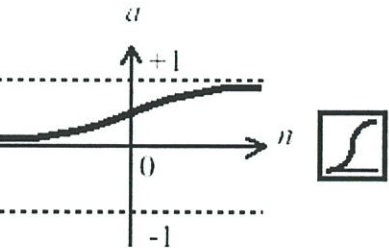
1. ฟังก์ชันเชรชโฮลด์ (Threshold function หรือ Hard limit function หรือ Step function)
2. ฟังก์ชันเชิงเส้นอิ่มตัว (Saturating Linear Function หรือ Piecewise-Linear Function)
3. ฟังก์ชันซิกมอยด์ (Sigmoid function)

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

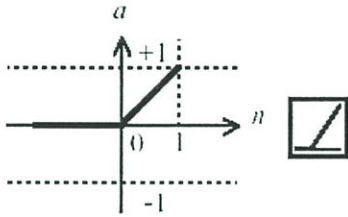
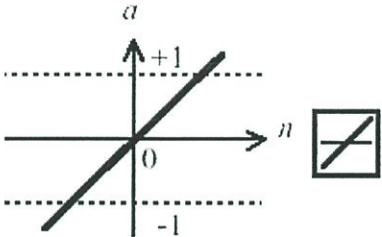
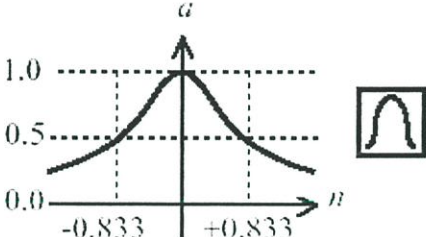
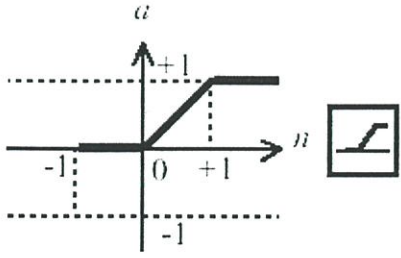
โดยทั่วไปฟังก์ชันกระตุ้นจะจำกัดช่วงเอาต์พุทอยู่ตั้งแต่ 0 ถึง 1 ในการประยุกต์ใช้งานบางกรณีอาจมีความจำเป็นต้องใช้ฟังก์ชันที่ได้ค่าออกมานอกเหนือช่วงดังกล่าว เช่นต้องการเอาต์พุทอยู่ในช่วงตั้งแต่ -1 ถึง $+1$ สำหรับการพิจารณาเลือกใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแบบใดนั้นนับถึงปัจจุบันยังไม่มีข้อกำหนดที่แน่นอน แต่อาจจะพิจารณาจากองค์ประกอบดังต่อไปนี้

1. ความเป็นเชิงเส้น หรือไม่เชิงเส้น
2. ลักษณะของข้อมูลอินพุท
3. ขอบเขตที่ต้องการและลักษณะของข้อมูลเอาต์พุท

ตารางที่ 3.1 ชนิดฟังก์ชันกระตุ้น [14]

ชนิดฟังก์ชันกระตุ้น	สมการฟังก์ชันกระตุ้น
<p style="text-align: center;">Competitive activation function</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>Input n</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Output a</p>  </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-left: 20px;">C</div> </div>	$a(n_i) = \begin{cases} 1; & i = i^* \\ 0; & i \neq i^* \end{cases}$ <p style="text-align: center;">when</p> $n_{i^*} \geq n_i, \forall i$ $i^* \leq i, \forall n_i = n_{i^*}$
<p style="text-align: center;">Hard limit activation function</p> <div style="text-align: center;">  </div>	$a(n) = \begin{cases} 1 & \text{if } n \geq 0 \\ 0 & \text{if } n < 0 \end{cases}$
<p style="text-align: center;">Symmetric hard limit activation function</p> <div style="text-align: center;">  </div>	$a(n) = \begin{cases} 1 & \text{if } n \geq 0 \\ -1 & \text{if } n < 0 \end{cases}$
<p style="text-align: center;">Log sigmoid activation function</p> <div style="text-align: center;">  </div>	$a(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}}$

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

ชนิดฟังก์ชันกระตุ้น	สมการฟังก์ชันกระตุ้น
<p data-bbox="372 379 713 405">Positive linear activation function</p> 	$a(n) = \begin{cases} n & \text{if } n \geq 0 \\ 0 & \text{if } n \leq 0 \end{cases}$
<p data-bbox="412 724 673 750">Linear activation function</p> 	$a(n) = n$
<p data-bbox="382 1106 703 1131">Radial basis activation function</p> 	$a(n) = e^{-n^2}$
<p data-bbox="357 1487 724 1513">Saturation linear activation function</p> 	$a(n) = \begin{cases} 0 & n \leq -1 \\ n & \text{if } -1 \leq n \leq 1 \\ 1 & n \geq 1 \end{cases}$

3.5 พื้นฐานแนวคิดของโครงข่ายประสาทเทียม (Basis Algorithm of NNs)

ก่อนที่จะกล่าวถึงโครงข่ายประสาทเทียมในแต่ละชนิด มีพารามิเตอร์บางตัวที่ต้องทำความเข้าใจเสียก่อน ในโครงข่ายประสาทเทียม ข้อมูลหรือตัวอย่าง (sample) ถูกแยกย่อยเข้าไปในชุดฝึกสอน (Training set), ชุดตรวจสอบ (Validation set) และชุดทดสอบ (Test set) ความแตกต่างระหว่างชุดย่อยเหล่านี้มีความสำคัญมาก แต่ชุดตรวจสอบ และทดสอบถูกทำให้สับสน ซึ่ง Ripley ได้เขียนอธิบายไว้ในหนังสือ [17] ในหน้า 354 อธิบายได้ตามนี้

ชุดฝึกสอน (Training set) :

ชุดของตัวอย่างใช้เพื่อเรียนรู้ว่ามีพารามิเตอร์ของการแบ่งประเภทเหมาะสม

ชุดตรวจสอบ (Validation set) :

ชุดของตัวอย่างใช้ปรับพารามิเตอร์ของการแยกประเภท สำหรับตัวอย่างที่เลือกจำนวนของชั้นซ่อนในโครงข่ายประสาทเทียม

ชุดทดสอบ (Test set) :

ชุดของตัวอย่างใช้ประเมินพารามิเตอร์ของการแยกประเภทที่ระบุไว้

หัวข้อถัดไปจะขอกกล่าวถึงพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งเป็นโครงข่ายประสาทเทียมที่มีอยู่ในโปรแกรม MATLAB/ Neural Network Toolbox [14]

3.6 ชนิดของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ศึกษา (Kinds of Neural Networks studied)

ในปัจจุบันมีชนิดของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นจำนวนมาก ไม่มีใครรู้อย่างแน่นอนว่ามีอยู่จำนวนเท่าไร ชนิดใหม่ถูกสร้างขึ้นทุกๆ สัปดาห์ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการรวบรวมบางวิธีที่รู้จักกันโดยส่วนมาก

สองชนิดหลักของโครงข่ายคือ ป้อนไปข้างหน้าและป้อนกลับ

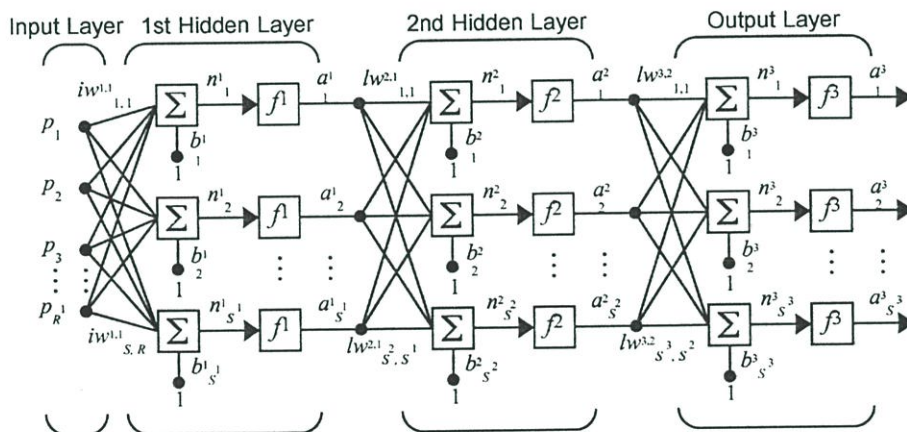
1. ในโครงข่ายประสาทเทียมป้อนไปข้างหน้า (feedforward NNs) การเชื่อมโยงระหว่างโนดไม่อยู่ในรอบหมุนเวียน(วัฏจักร) โครงข่ายประสาทเทียมป้อนไปข้างหน้าโดยส่วนมาก ทำให้เกิดการตอบสนองที่อินพุตอย่างรวดเร็ว โครงข่ายประสาทเทียมป้อนไปข้างหน้าสามารถฝึกสอนโดยใช้ชนิดต่างๆ ของวิธีเกี่ยวกับตัวเลขปกติที่มีประสิทธิภาพ
2.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

ในหัวข้อถัดไปจะขอกล่าวถึงรายละเอียดเฉพาะ โครงข่ายประสาทเทียมชนิดที่นำมาใช้ใน
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เท่านั้น

3.6.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-propagation NN)

โครงสร้าง

โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-propagation neural network : BP) ประกอบด้วยนิวโรนเซลล์ที่เรียงกันอยู่มากกว่า 2 ชั้นกล่าวคือ มีได้ตั้งแต่ 3 ชั้นขึ้นไป ซึ่งประกอบด้วย ชั้นอินพุต (Input layer), ชั้นซ่อน (Hidden layer) และ ชั้นเอาต์พุต (Output layer) ลักษณะของโครงข่ายชนิดนี้เป็นโครงข่ายที่ป้อนไปข้างหน้า โดยมีการเชื่อมโยงในแต่ละชั้นแบบต่อถึงกันหมด นั่นคือ ทุกๆ นิวรอนในชั้นอินพุตจะส่งสัญญาณไปยังทุกๆ นิวรอนในชั้นซ่อนชั้นแรก และทุกๆ นิวรอนในชั้นซ่อนชั้นแรกจะส่งสัญญาณไปยังทุกๆ นิวรอนในชั้นถัดไปจนในที่สุดทุกๆ นิวรอนในชั้นซ่อนสุดท้ายจะส่งสัญญาณไปยังทุกๆ นิวรอนในชั้นเอาต์พุต จากรูปที่ 3.7 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายที่มี 3 ชั้น



รูปที่ 3.4 แบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมชนิด BP ที่มี 2 ชั้นซ่อน [14]

รูปที่ 3.7 แสดงโครงข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ชั้นซ่อน มีอินพุต R ชุด, นิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เท่ากับ S^1 และ S^2 และมีเอาต์พุต S^3 ชุด สมาชิกของอินพุตเวกเตอร์ P แต่ละตัวจะถูกเชื่อมเข้ากับนิวรอนแต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 ด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก W^1 (เรียกว่า Input weight, $IW^{1,1}$) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด $S^1 \times R$ และเวกเตอร์ a^1 ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของชั้นซ่อนที่ 1 และมีขนาด S^1 จะเป็นอินพุตของชั้นซ่อนที่ 2 สมาชิกแต่ละตัวของเวกเตอร์ a^1 ก็จะถูกเชื่อมเข้ากับนิวรอนแต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 ด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก W^2 (เรียกว่า Layer weight, $LW^{2,1}$) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด $S^2 \times S^1$ เช่นเดียวกันกับชั้นซ่อนที่ 1 เวกเตอร์ a^2 ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของชั้นซ่อนที่ 2 และมีขนาด S^2 จะเป็นอินพุตของชั้นซ่อนเอาต์พุต สมาชิกแต่ละตัวของเวกเตอร์ a^2 จะถูกเชื่อมเข้ากับนิวรอนแต่ละตัวใน

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

แนวคิด [13]

ขั้นตอนการฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ จะสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนด้วยกัน คือ ป้อนข้อมูลอินพุตไปข้างหน้า, แพร่ค่าย้อนกลับของค่าผิดพลาดที่เกี่ยวข้อง และปรับค่าถ่วงน้ำหนัก

ระหว่างป้อนไปข้างหน้า จะเริ่มต้นด้วยการนำค่าอินพุตที่ได้รับจากชั้นอินพุตมาคำนวณหาผลรวมที่ได้รับในแต่ละนิวรอน แล้วจึงส่งผลลัพธ์ที่ได้ส่งต่อไปยังชั้นช่อนที่ 1 แต่ละนิวรอนในชั้นช่อนที่ 1 จะทำการคำนวณด้วยฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นนั้น แล้วจึงส่งผลลัพธ์ที่ได้ส่งต่อไปยังชั้นช่อนที่อยู่ถัดไป ในชั้นช่อนที่ 2 แต่ละนิวรอนในชั้นช่อนที่ 2 จะทำการคำนวณด้วยฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นนั้น จากนั้นส่งผลลัพธ์ที่ได้ส่งต่อไปยังชั้นถัดไป สุดท้าย แต่ละนิวรอนในชั้นเอาต์พุตจะทำการคำนวณด้วยฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นเอาต์พุต เพื่อหาค่าตอบหรือผลตอบสนองของโครงข่ายสำหรับ แต่ละรูปแบบข้อมูลที่ป้อนให้ ทิศทางการไหลของข้อมูลเหล่านี้จะเป็นลักษณะเคลื่อนไปข้างหน้าจากชั้นของอินพุต ผ่านชั้นของนิวรอนเซลล์ภายในไปสู่ชั้นเอาต์พุต วิธีการคำนวณของโครงข่ายลักษณะนี้ จึงมีชื่อตามลักษณะดังกล่าวว่า forward-propagation

ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการคำนวณแบบ backward-propagation สำหรับขั้นตอนนี้จะเป็นการนำผลลัพธ์ที่ได้จากเอาต์พุตของโครงข่ายมาเปรียบเทียบกับเอาต์พุตเป้าหมายเพื่อคำนวณค่าผิดพลาดที่เกี่ยวข้อง แล้วค่าผลต่างระหว่างเอาต์พุตของโครงข่ายกับเอาต์พุตเป้าหมายที่ได้จากโครงข่ายจะถูกส่งถอยหลังกลับมายังชั้นช่อนที่ 2 และส่งต่อไปยังนิวรอนต่างๆ ภายในชั้นช่อนที่ 2 แต่ละโนดจะได้รับค่าผิดพลาดเพียงบางส่วนขึ้นอยู่กับว่านิวรอนเซลล์นั้นเป็นตัวที่ส่งผลมากหรือน้อยไปสู่เอาต์พุตนั้น เพื่อปรับค่าถ่วงน้ำหนักระหว่างชั้นเอาต์พุตกับชั้นช่อนที่ 2 กระบวนการของการส่งค่าความผิดพลาดกลับมานั้นจะทำซ้ำกับชั้นถัดลงมาอีกจนกระทั่งทุกโนดในโครงข่ายได้รับส่วนแบ่งค่าความผิดพลาดนั้น

ขั้นตอนสุดท้ายจะนำค่าผิดพลาดที่ได้มาใช้ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักจะเปลี่ยนแปลงไปมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของค่าความผิดพลาดที่ได้รับ กระบวนการจะกลับไปทำซ้ำในขั้นตอนแรกจนกระทั่งค่าผิดพลาดที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าผิดพลาดต่ำสุดที่กำหนดไว้ ต่อไปเป็นรายละเอียดของการทำงานในแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. แพร่ค่าป้อน ไปข้างหน้า (Forward-propagation)

เมื่อข้อมูลอินพุตปรากฏบนชั้นอินพุต ($P_R, R = 1, \dots, R$) สัญญาณจากชั้นอินพุตทั้งหมดจะถูกส่งมาตามสายเชื่อมโยงไปยังนิวรอนเซลล์ในชั้นถัดไป แต่ละนิวรอนในชั้นช่อนที่ 1 ถูก

เชื่อมโยงด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก ($iw_{S^1,R}^{1,1} = S^1 = 1, \dots, S^1$) จะทำการคำนวณสัญญาณอินพุทของนิวรอนเซลล์ในชั้นช่อนที่ 1 ได้จากสมการ

$$net_{S^1} = b_{S^1} + \sum_{R=1}^R iw_{S^1,R}^{1,1} P_R \quad (3.1)$$

ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นเพื่อคำนวณสัญญาณเอาต์พุท (a^1) ในชั้นช่อนที่ 1

$$a^1 = f(net_{S^1}) \quad (3.2)$$

เมื่อ สัญญาณเอาต์พุท (a^1) ในชั้นช่อนที่ 1 เอาต์พุทที่ได้ส่งต่อไปยังชั้นช่อนที่ 2 โดยแต่ละนิวรอนในชั้นช่อนที่ 2 ถูกเชื่อมโยงด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก ($lw_{S^2,S^1}^{2,1} = S^2 = 1, \dots, S^2$) จะทำการคำนวณสัญญาณอินพุทของนิวรอนเซลล์ในชั้นช่อนที่ 2 ได้จากสมการ

$$net_{S^2} = b_{S^2} + \sum_{S^1=1}^{S^1} lw_{S^2,S^1}^{2,1} a^1 \quad (3.3)$$

ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นเพื่อคำนวณสัญญาณเอาต์พุท (a^2) ในชั้นช่อนที่ 2

$$a^2 = f(net_{S^2}) \quad (3.4)$$

เมื่อ สัญญาณเอาต์พุท (a^2) ในชั้นช่อนที่ 2 เอาต์พุทที่ได้ส่งต่อไปยังชั้นเอาต์พุท โดยแต่ละนิวรอนในชั้นเอาต์พุท ถูกเชื่อมโยงด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก ($lw_{S^3,S^2}^{3,2} = S^3 = 1, \dots, S^3$) จะทำการคำนวณสัญญาณอินพุทของนิวรอนเซลล์ในชั้นเอาต์พุท ได้จากสมการ

$$net_{S^3} = b_{S^3} + \sum_{S^2=1}^{S^2} lw_{S^3,S^2}^{3,2} a^2 \quad (3.5)$$

ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นเพื่อคำนวณสัญญาณเอาต์พุต (a^3) ในชั้นเอาต์พุต

$$a^3 = f(\text{net}_{S^3}) \quad (3.6)$$

2. แพร่ค่าย้อนกลับของค่าผิดพลาด (Back-propagation of error)

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

$$\delta^3 = (t^3 - a^3) f'(\text{net}_{S^3}) \quad (3.7)$$

คำนวณค่าถ่วงน้ำหนักที่เกี่ยวข้อง (ใช้เพื่อปรับปรุ้ค่าถ่วงน้ำหนัก $lw_{S^3, S^2}^{3,2}$ หลังจากนั้น) โดยที่ α คือ อัตราการเรียนรู้ (Learning rate)

$$\Delta lw_{S^3, S^2}^{3,2} = \alpha \delta^3 a^2 \quad (3.8)$$

คำนวณค่าไบอัส (bias) ที่เกี่ยวข้อง (ใช้เพื่อปรับปรุ้ $b_{S^3}^3$ หลังจากนั้น)

$$\Delta b_{S^3}^3 = \alpha \delta^3 \quad (3.9)$$

และส่ง δ^3 ไปที่ชั้นซ่อนที่ 2

ในแต่ละนิวรอนของชั้นซ่อนที่ 2 สัญญาณค่าผิดพลาดที่ชั้นซ่อนที่ 2 หาได้จากสมการ

$$\delta^2 = \sum_{S^3=1}^{S^3} \delta^3 lw_{S^3, S^2}^{3,2} f'(\text{net}_{S^2}) \quad (3.10)$$

คำนวณค่าถ่วงน้ำหนักที่เกี่ยวข้อง (ใช้เพื่อปรับปรุ้ค่าถ่วงน้ำหนัก $lw_{S^2, S^1}^{2,1}$ หลังจากนั้น)

$$\Delta lw_{S^2, S^1}^{2,1} = \alpha \delta^2 a^1 \quad (3.11)$$

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

$$\Delta b_{S^2}^2 = \alpha \delta^2 \quad (3.12)$$

และส่ง δ^2 ไปที่ชั้นชอนที่ 1

ในแต่ละนิเวรอนของชั้นชอนที่ 1 สัญญาค่าผิดพลาดที่ชั้นชอนที่ 1 หาได้จากสมการ

$$\delta^1 = \sum_{S^2=1}^{S^2} \delta^2 lw_{S^2, S^1}^{2,1} f'(net_{S^1}) \quad (3.13)$$

คำนวณค่าถ่วงน้ำหนักที่เกี่ยวข้อง (ใช้เพื่อปรับปรุงค่าถ่วงน้ำหนัก $iw_{S^1, R}^{1,1}$ หลังจากนี้)

$$\Delta iw_{S^1, R}^{1,1} = \alpha \delta^1 P_R \quad (3.14)$$

คำนวณค่าไบอัส (bias) ที่เกี่ยวข้อง (ใช้เพื่อปรับปรุง $b_{S^1}^1$ หลังจากนี้)

$$\Delta b_{S^1}^1 = \alpha \delta^1 \quad (3.15)$$

3. ขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัส

ถ้าหากมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้น ค่าผิดพลาดที่คำนวณได้จะถูกนำมาใช้ในการปรับน้ำหนักเพื่อให้โครงข่ายได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง การปรับน้ำหนักสำหรับแต่ละนิเวรอนในชั้นเอาต์พุท คำนวณได้จาก

$$lw_{S^3, S^2}^{3,2}(\text{new}) = lw_{S^3, S^2}^{3,2}(\text{old}) + \Delta lw_{S^3, S^2}^{3,2} \quad (3.16)$$

ส่วนการปรับน้ำหนักของชั้นซ่อนที่ 2 การทำงานจะเป็นเช่นเดียวกับสมการที่ 3.16 แต่ตัวแปรต่างๆ จะเป็นของชั้นซ่อนอยู่ สำหรับแต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$lw_{S^2, S^1}^{2,1}(\text{new}) = lw_{S^2, S^1}^{2,1}(\text{old}) + \Delta lw_{S^2, S^1}^{2,1} \quad (3.17)$$

สำหรับแต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1

$$iw_{S^1, R}^{1,1}(\text{new}) = iw_{S^1, R}^{1,1}(\text{old}) + \Delta iw_{S^1, R}^{1,1} \quad (3.18)$$

การปรับค่าถ่วงน้ำหนักจะปรับทีละชั้นจากชั้นเอาต์พุทกลับไปยังชั้นอินพุท เมื่อเสร็จสิ้นก็จะกลับสู่ส่วนของป้อนไปข้างหน้าอีกครั้ง เพื่อหาค่าเอาต์พุทของโครงข่ายใหม่มาเปรียบเทียบกับค่าเอาต์พุทเป้าหมาย และดำเนินการปรับค่าถ่วงน้ำหนักในส่วนของแพร่ค่าย้อนกลับเช่นนี้ สลับกันไป โดยวัฏจักรของการคำนวณหาความผิดพลาดและการปรับน้ำหนักจะคงดำเนินต่อไปจนกระทั่งค่าความผิดพลาดต่ำกว่าที่กำหนดไว้ค่าหนึ่งแล้วจึงหยุดกระบวนการ ค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้จะเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับทุกคู่ของอินพุทและค่าเป้าหมาย ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ การคำนวณหาความผิดพลาดรวมของตัวอย่าง หาได้จากค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดยกกำลังสอง (Mean-square error, MSE) ระหว่างคำตอบที่แท้จริง (t_i^3) กับผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียม (a_i^3) ในสมการ (3.19)

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i^3 - a_i^3)^2 \quad (3.19)$$

โดยที่ N = จำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอน

ในขั้นตอนการปรับน้ำหนักที่กล่าวมาข้างต้น เป็นหลักการพื้นฐานแต่ลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสของการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิด Feed-forward Neural Networks โดยใช้ Neural Network Toolbox นั้นมีอยู่หลายวิธี อาทิเช่น Levenberg-Maquardt

algorithm, Resilient Backpropagation, Conjugate Gradient เป็นต้น แต่ละวิธีก็จะมีประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการฝึกสอนแตกต่างกัน ตามที่ระบุไว้ใน Neural Network Toolbox User's Guide นั้น Levenberg-Maquardt algorithm มีประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการฝึกสอนสูงที่สุดในการศึกษาจึงได้นำเอาลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสวิธีนี้มาใช้ โดยมีลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส ดังสมการที่ 3.20

$$x_{(new)} = x_{(old)} + \Delta x = x_{(old)} + [J^T \cdot J + \alpha I]^{-1} \cdot J^T \cdot e \quad (3.20)$$

โดยที่ x	คือ ค่าถ่วงน้ำหนัก(w) และค่าไบแอส (b)
J	คือ จาโคเบียนเมตริกซ์ (Jacobian matrix) ของอนุพันธ์ ของค่าผิดพลาด(แต่ละค่า) ต่อค่า x (แต่ละค่า)
J^T	คือ Transpose matrix ของ J
e	คือ เมตริกซ์ของค่าผิดพลาด (Error) ระหว่างคำตอบ (Target, t^3) กับค่าที่โครงข่ายประสาทเทียมคำนวณได้ (Answer, a^3)
I	คือ Identity matrix
α	คือ อัตราการเรียนรู้ (Learning rate)

จาโคเบียนเมตริกซ์ของค่าถ่วงน้ำหนัก (W) ดังสมการ

$$J(w) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial W_{1,1}} & \frac{\partial e_1}{\partial W_{1,2}} & \dots & \frac{\partial e_1}{\partial W_{1,s^2}} \\ \frac{\partial e_2}{\partial W_{2,1}} & \frac{\partial e_2}{\partial W_{2,2}} & \dots & \frac{\partial e_2}{\partial W_{2,s^2}} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial e_{s^3}}{\partial W_{s^3,1}} & \frac{\partial e_{s^3}}{\partial W_{s^3,2}} & \dots & \frac{\partial e_{s^3}}{\partial W_{s^3,s^2}} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$\text{จาโคเบียนเมตริกซ์ของค่าไบแอส (b)} \quad J(\mathbf{b}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial b_1} \\ \frac{\partial e_2}{\partial b_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial e_{s^3}}{\partial b_{s^3}} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$\text{เมตริกซ์ของค่าผิดพลาด} \quad \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_{s^3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1^3 - a_1^3 \\ t_2^3 - a_2^3 \\ \vdots \\ t_{s^3}^3 - a_{s^3}^3 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

โครงข่ายประสาทเทียมที่ฝึกสอนด้วยกฎการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับนั้น จะมีจำนวนนิวรอนในชั้นข้อมูลอินพุต และชั้นข้อมูลเอาต์พุตคงที่ซึ่งเท่ากับจำนวนของอินพุต และเอาต์พุตของปัญหานั้นเอง ส่วนจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนนั้นสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมและไม่มีจำนวนที่เป็นสูตรสำเร็จ ดังนั้นในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจึงต้องมีการปรับเปลี่ยนจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน เพื่อให้หาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ให้ค่าผิดพลาดระหว่างระหว่างค่าตอบที่แท้จริงกับผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียมต่ำที่สุด (มีประสิทธิภาพสูงที่สุด) จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนนอกจากจะมีผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมแล้ว ยังมีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนอีกด้วย โครงข่ายที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนน้อย จะใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยกว่าโครงข่ายที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนมาก เมื่อฝึกสอนด้วยเงื่อนไขเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตาม ไม่สามารถสรุปได้ว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนมากจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนน้อย

3.6.2 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (Probabilistic Neural Network)

หลายๆ ประโยชน์(ข้อดี) ของโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ได้มีการกระตุ้นความพยายามเพื่อแยกประเภทด้วยวิธีเบย์เซียน (Bayesian) เข้าไปสู่แบบจำลองทั่วไป โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) มีโครงสร้างโดยใช้ความคิดจากทฤษฎีความน่าจะเป็นการแบ่งประเภท (Classical probability theory) เช่น การแบ่งประเภทของเบย์เซียน (Bayesian) และ ตัววิเคราะห์แบ่งประเภทสำหรับฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (probability density functions : PDFs) เพื่อทำเป็นรูปแบบให้กับโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับรูปแบบการแบ่งประเภท โครงข่าย

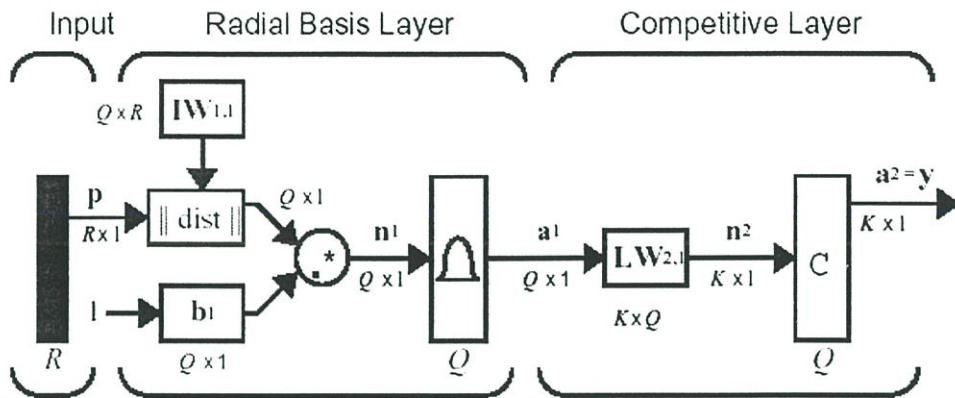
ประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นถูกใช้อย่างประสบความสำเร็จเกี่ยวกับการแก้ปัญหาหลากหลาย กลุ่มของปัญหาการแบ่งประเภท ถึงแม้ว่า โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นยังไม่เคย ประเมินอย่างเต็มที่ที่จะเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น ถ้าโครงข่ายประสาทเทียมชนิดนี้ปฏิบัติตาม คุณสมบัติ โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นอาจจะปรากฏเป็นวิธีของการเลือกสำหรับ ปัญหาการแบ่งประเภทที่แตกต่างมากมาย

โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นมีข้อดีหรือประโยชน์หลักดังนี้

1. การฝึกสอนอย่างรวดเร็ว การฝึกสอนซ้ำๆ ที่ใช้เวลาเป็นวันหรือสัปดาห์ของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (BP) ถูกแทนที่โดยการเรียนรู้หรือฝึกสอนที่น้อยกว่า ในชุดฝึกสอน
2. ข้อมูลฝึกสอนเพียงพอ โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นถูกรับประกันเพื่อเข้าสู่ การแยกประเภทด้วยบายนเซียน (Bayesian) ทั้งที่การตัดสินใจตามความพอใจที่ซับซ้อน สัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์ฝึกสอนและการแบ่งประเภท เหล่านี้ไม่สามารถรับประกันด้วย โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (BP)
3. แนวคิดโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นยอมให้ข้อมูลเพิ่มหรือลบจากชุด ฝึกสอนปราศจากการฝึกสอนใหม่ทีนานเกินไป ในขณะที่การแก้ไข (การเปลี่ยนแปลง) ใดๆ ของชุดฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (BP) โดยทั่วไปจะต้อง ทำซ้ำในกระบวนการฝึกสอนทั้งหมด
4. การเรียนรู้ โครงข่ายมีความสามารถเรียนรู้สลับซับซ้อนสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์ฝึกสอน และการแบ่งประเภทที่ถูกต้องเหล่านั้น
5. หลักการทั่วไป อินพุตที่คล้ายกัน แต่ไม่เหมือนกัน ในชุดฝึกสอนเหล่านั้นจะมีกำหนด ขอบเขตภายในเพื่อแบ่งประเภทอย่างเหมาะสม ดังนั้น ข้อผิดพลาดหรือ การฝึกสอนไม่ สมบูรณ์หรือข้อมูลอินพุตที่ไม่เหมาะสมจะไม่มีผลกระทบต่อความถูกต้องของการแบ่ง ประเภท

โครงสร้าง

โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (Probabilistic neural network : PNN) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย ชั้นอินพุต (Input layer), ชั้นซ่อนหรือบางครั้งเรียกว่า ชั้นฐานรัศมี (Radial basis layer) และ ชั้นเอาต์พุตหรือบางครั้งเรียกว่าชั้นคอมแพติทิฟ (Competitive layer) ลักษณะของโครงข่ายชนิดนี้เป็นโครงข่ายที่ป้อนไปข้างหน้า โดยมีการเชื่อมโยงในแต่ละชั้น แบบต่อถึงกันหมด นั่นคือ ทุกๆ นิวรอนในชั้นอินพุตจะส่งสัญญาณไปยังทุกๆ นิวรอนในชั้น ฐานรัศมี และทุกๆ นิวรอนในชั้นฐานรัศมีจะส่งสัญญาณไปยังทุกๆ นิวรอนในชั้นเอาต์พุต จากรูปที่ 3.8 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น



รูปที่ 3.5 แบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น [14]

รูปที่ 3.8 แสดงโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น มีอินพุต R ชุด, นิวรอนในชั้นฐานรัศมี เท่ากับ Q และมีเอาต์พุต K ชุด สมาชิกของอินพุตเวกเตอร์ P แต่ละตัวจะถูกเชื่อมเข้ากับนิวรอนแต่ละนิวรอนในชั้นฐานรัศมีด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก W^1 (เรียกว่า Input weight, $IW^{1,1}$) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด $Q \times R$ และเวกเตอร์ a^1 เป็นผลลัพธ์ของชั้นฐานรัศมี โดยมีขนาด Q จะเป็นอินพุตของชั้นคอมแพ็คทิฟหรือชั้นเอาต์พุต สมาชิกแต่ละตัวของเวกเตอร์ a^1 จะถูกเชื่อมเข้ากับนิวรอนแต่ละนิวรอนในชั้นคอมแพ็คทิฟ ด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก W^2 (เรียกว่า Layer weight, $LW^{2,1}$) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด $K \times Q$ เช่นเดียวกันกับชั้นฐานรัศมี โดยที่ เวกเตอร์ a^2 ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด K จะเป็นผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียม

แนวคิด [13]

ขั้นตอนของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นที่มีอยู่ในโปรแกรม MATLAB/Neural Network Toolbox สามารถอธิบายได้ ดังนี้

จากรูปที่ 3.8 เมื่อข้อมูลอินพุตปรากฏบนชั้นอินพุต ($P_R, R = 1, \dots, R$) สัญญาณจากชั้นอินพุตทั้งหมดจะถูกส่งมาตามสายเชื่อมโยงไปยังนิวรอนเซลล์ในชั้นถัดไป ในช่วงรอบแรกๆ แต่ละนิวรอนในชั้นฐานรัศมี ถูกเชื่อมโยงด้วยค่าถ่วงน้ำหนักที่อยู่ ในชั้นฐานรัศมี ($iw_{Q,R}^{1,1} = Q = N$) ขณะนั้น จะทำการคำนวณสัญญาณเอาต์พุตของนิวรอนเซลล์ในชั้นฐานรัศมี (a^1) ได้จากสมการ

$$a_Q^1 = \exp\left(-\frac{\|P_R - iw_{Q,R}^{1,1}\|^2}{2\sigma_Q^2}\right) \quad (3.24)$$

จากสมการที่ 3.31 สามารถนำมาเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$a^1 = \exp\left(-\sqrt{\sum_{R=1}^R (iw_{Q,R}^{1,1} - P_R)^2 * b_Q^1}\right)^2 \quad (3.25)$$

$$\text{โดยที่ } b_Q^1 = \frac{\sqrt{-\ln(0.5)}}{\text{spread}} = \frac{0.8326}{\text{spread}}$$

spread คือ ค่ากระจายของฟังก์ชันกระตุ้นชนิดฐานรัศมี (พิจารณาตามตารางที่ 3.1)

เมื่อ สัญญาเอาต์พุต (a^1) ในชั้นฐานรัศมี เอาต์พุตที่ได้ส่งต่อไปยังชั้นเอาต์พุต โดยแต่ละนิวรอนในชั้นเอาต์พุต ถูกเชื่อมโยงด้วยค่าถ่วงน้ำหนักที่อยู่ในชั้นเอาต์พุต ($lw_{K,Q}^{2,1}$) จะทำการคำนวณสัญญาอินพุตของนิวรอนเซลล์ในชั้นเอาต์พุต ได้จากสมการ

$$net_K = \sum_{K=1}^K lw_{K,Q}^{2,1} a_Q^1 \quad (3.26)$$

ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นเพื่อคำนวณสัญญาเอาต์พุต (a^2) ในชั้นเอาต์พุต

$$a^2 = f(net_K) \quad (3.27)$$

ดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้นว่า ค่าไบอัส (bias) ที่เกี่ยวข้องของ (b_Q^1) จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขตามค่าการกระจายตามฟังก์ชันกระตุ้นชนิดฐานรัศมี ในขณะที่ค่าถ่วงน้ำหนัก $iw_{Q,R}^{1,1}$

$$iw_{Q,R}^{1,1} = iw_{Q,R}^{1,1} + \alpha(p_R - iw_{Q,R}^{1,1}) \quad (3.28)$$

ในแต่ละนิวรอนของชั้นเอาต์พุต ค่าผิดพลาดของโครงข่ายจะเป็นผลต่างระหว่างเอาต์พุตเป้าหมายกับเอาต์พุตของโครงข่าย ($t^2 - a^2$) ค่าผิดพลาดที่ได้จะถูกส่งกลับเข้ามายังโครงข่ายใน

รูปของสัญญาณค่าผิดพลาด (error signal) การหาสัญญาณค่าผิดพลาดที่ชั้นเอาต์พุต หาได้จากสมการ

$$\delta^2 = (t^2 - a^2) f'(net_k) \quad (3.29)$$

การคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักที่เกี่ยวข้อง (ใช้เพื่อปรับค่าถ่วงน้ำหนัก $lw_{k,q}^{2,1}$ หลังจากนี้) การปรับน้ำหนักสำหรับแต่ละนิวรอนในชั้นเอาต์พุต คำนวณได้จาก

$$\Delta lw_{k,q}^{2,1} = \alpha \delta^2 a_q^1 \quad (3.30)$$

$$lw_{k,q}^{2,1} = lw_{k,q}^{2,1} + \Delta lw_{k,q}^{2,1} \quad (3.31)$$

การปรับค่าถ่วงน้ำหนักจะปรับโดยเพิ่มจำนวนรอบค่ากระจายของฟังก์ชันกระตุ้นชนิดฐานรีคมี (*spread*) ที่ละรอบ และดำเนินการปรับค่าไบอัสและค่าถ่วงน้ำหนักเช่นนี้ ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งหมดจำนวนรอบที่ฝึกสอนก็จะหยุดการฝึกสอน

บทที่ 4

ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการวิจัย

สถานีไฟฟ้าที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่สถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอกและไทรน้อย ที่มีระบบแรงดันไฟฟ้าสูงสุดทั้งสองสถานีเป็น 500 kV. เนื่องจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย มีสายส่งที่สำคัญใช้ระดับแรงดันนี้เพื่อรับพลังงานไฟฟ้ามาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะทางภาคเหนือและโรงไฟฟ้าราชบุรีทางภาคตะวันตกของประเทศมาส่งให้โหลดส่วนใหญ่ที่อยู่ในเขตกรุงเทพและปริมณฑล โดยสถานีไฟฟ้าแรงสูงทั้งสองแห่งทำหน้าที่เป็นสถานีหลักปลายทางเพื่อแปลงแรงดันลงเป็น 230 kV เพื่อส่งต่อไปยังสถานีอื่นๆในเขตนครหลวง ดังนั้นจึงนับได้ว่าสถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอกและสถานีไฟฟ้าแรงสูงไทรน้อย มีความสำคัญสูงมีจำนวนอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าเช่น สายส่ง, หม้อแปลง และ เซอร์คิตเบรกเกอร์ อยู่เป็นจำนวนมาก โดยมีจำนวนใกล้เคียงกันทั้งสองสถานี โดยรายละเอียดอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าของแต่ละสถานีจะได้มีการนำเสนอต่อไป

4.1 รายละเอียดอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่นำมาวิจัย [5]

จากรูปที่ 4.1, 4.2 เป็นตัวอย่างแสดง Single Line Diagram อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอกและไทรน้อย โดยมีสัญลักษณ์แทนเซอร์คิตเบรกเกอร์และรีเลย์ป้องกันสามารถอธิบายหลักการอย่างสังเขปได้ ดังนี้

1. เซอร์คิตเบรกเกอร์ ใช้เครื่องหมายสี่เหลี่ยม และเขียนกำกับด้วยตัวเลขตั้งแต่ 4 ถึง 6 หลัก เช่น 90412

- ตัวเลขสองตัวหน้า แสดงถึงระดับแรงดัน (Voltage)

90 แสดงถึงระดับแรงดัน 500 kV

80 แสดงถึงระดับแรงดัน 230 kV

70 แสดงถึงระดับแรงดัน 115 kV

69 แสดงถึงระดับแรงดัน 69 kV

22 แสดงถึงระดับแรงดัน 22 kV

- ตัวเลขตัวที่ 3 แสดงถึงตำแหน่งหรือที่ตั้ง (Bay) เช่น 90412 แสดงว่าอยู่ Bay ที่ 4

- ตัวเลขตัวที่ 4 แสดงถึงตำแหน่งหรือที่ตั้งแถว (Row) เช่น 90412 แสดงว่าอยู่ Row ที่ 1

- ตัวเลขตัวที่ 5 แสดงชนิดของอุปกรณ์ หมายเลข 2 แสดงว่าเป็นเซอร์คิตเบรกเกอร์ เลข 1, 3, 4, 4, 5, 6 และ 7 เป็นไบมีด (Disconnecting Switch) ทั้งนี้เซอร์คิตเบรกเกอร์ที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอกและไทรน้อยทั้งหมดใช้หลักการดับอาร์กด้วยฉนวนที่เป็น SF₆ Gas

2. รีเลย์ป้องกัน (Relay Protection) ใช้เครื่องหมายวงกลม และมีตัวเลขและอักษรอยู่ภายใน ซึ่งเป็นสัญลักษณ์ใช้แทน Relay ชนิดต่าง ๆ ดังนี้

- 87B : Bus Differential Relay เป็นรีเลย์ป้องกันการเกิดฟอลต์ที่บัส โดยอาศัยหลักการของกระแสไหลเข้าย่อมเท่ากับกระแสไหลออกจากบัสในสภาวะปกติแต่ถ้ามีฟอลต์ขึ้นที่บัส กระแสส่วนหนึ่งจะลกราวด์หรือไหลไปเฟสอื่นทำให้รีเลย์ทำงานสั่งทรูปเซอร์กิตเบรกเกอร์ทุกตัวที่ติดบัส ซึ่งเป็นหลักการตามฟังก์ชันการทำงานมาตรฐานของรีเลย์ชนิดนี้

- 21P : Primary Distance Relay เป็นรีเลย์ป้องกันสายส่งโดยพิจารณาการเกิดฟอลต์จากรยะทางซึ่งใช้หลักการคำนวณหาอิมพีแดนซ์ของสายส่งโดยนำเอาแรงดันมาหารด้วยกระแสและนำค่าอิมพีแดนซ์ที่คำนวณได้ไปเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์เฉพาะของสายส่งก็จะทราบระยะทาง ถ้าอยู่ในขอบเขตการป้องกัน ก็สั่งทรูปเซอร์กิตเบรกเกอร์ต้นทางและปลายทางออก โดยจะใช้ระบบสื่อสารเข้ามาประกอบเพื่อให้การทรูปเป็นไปอย่างรวดเร็วเช่น ไมโครเวฟ , เส้นใยแก้วนำแสง , Power Line Carrier

- 21BU : Back up Distance Relay ใช้หลักการเดียวกับ 21P แต่ไม่มีการนำระบบสื่อสารเข้ามาใช้ร่วมในการสั่งทรูปหรือบล็อก

- 87L : Line Current Differential Relay เป็นรีเลย์ป้องกันสายส่งที่ใช้หลักการกระแสทั้งสองด้านของสายส่งย่อมเท่ากันทั้งขนาดและมุมเฟสในสภาพปกติ แต่ถ้ามีฟอลต์เกิดขึ้นในสายส่งจะทำให้กระแสด้านปลายทางของสายส่งเกิดต่างเฟสกันกับกระแสต้นทาง ทั้งนี้การส่งข้อมูลมาเปรียบเทียบกันนั้นใช้ระบบสื่อสารเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Optic) เข้ามาช่วย

- 87K : Transformer Current Differential Relay เป็นรีเลย์ป้องกันการเกิดฟอลต์ในหม้อแปลง โดยอาศัยหลักการแตกต่างของกระแสเช่นเดียวกับ Bus Differential Relay เมื่อรีเลย์ชนิดนี้ทำงานจะสั่งทรูปเซอร์กิตเบรกเกอร์ทั้ง High Side และ Low side ของหม้อแปลงเพื่อขจัดฟอลต์

- 86X : Transformer Lockout Relay เป็นรีเลย์ป้องกันการเกิดฟอลต์ในหม้อแปลงโดยใช้หลักการต่างๆ เช่นการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของแรงดันน้ำมันใน Main Tank ของหม้อแปลงได้แก่ Sudden Pressure Relay , Pressure Relief Relay และ หลักการความเร็วจากการกระฉอกของน้ำมันกับการเกิด Gas สะสมเมื่อมีการ ARC ของ Winding ได้แก่ Buchholz Relay เมื่อ รีเลย์ 86X ทำงานจะสั่งทรูปเบรกเกอร์เช่นเดียวกับ 87K

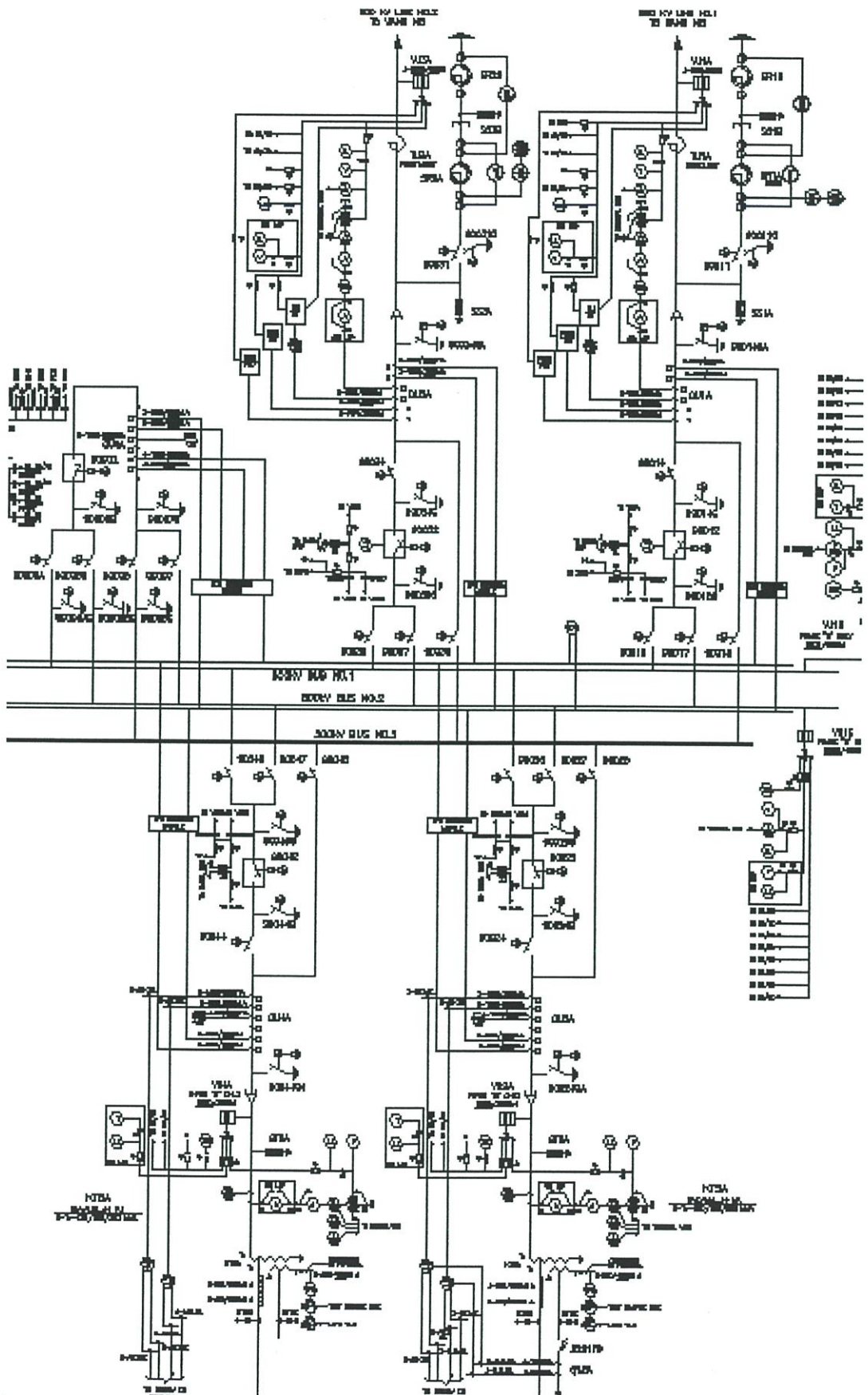
- 51C : Capacitor Bank Over Current Relay เป็นรีเลย์ป้องกันการเกิดฟอลต์ใน Capacitor Bank โดยหลักการเกิดกระแสเกินจากสภาวะปกติเมื่อมีกระแสฟอลต์ โดยสั่งทรูปเบรกเกอร์ของ C-Bank เฉพาะ Step ที่เกิดฟอลต์

- 60C : Capacitor Bank Unbalance Relay เป็นรีเลย์ป้องกันการเกิด Unbalance เนื่องจาก Capacitor Unit มีค่าแต่ละ Branch ไม่เท่ากัน มากกว่าที่ออกแบบไว้ซึ่งถ้าเป็นเช่นนี้ต่อไปจะทำให้ Capacitor ชำรุดไปเรื่อย ๆ โดยสั่งทรูปเบรกเกอร์ของ C-Bank Step ที่เกิด Unbalance เท่านั้น

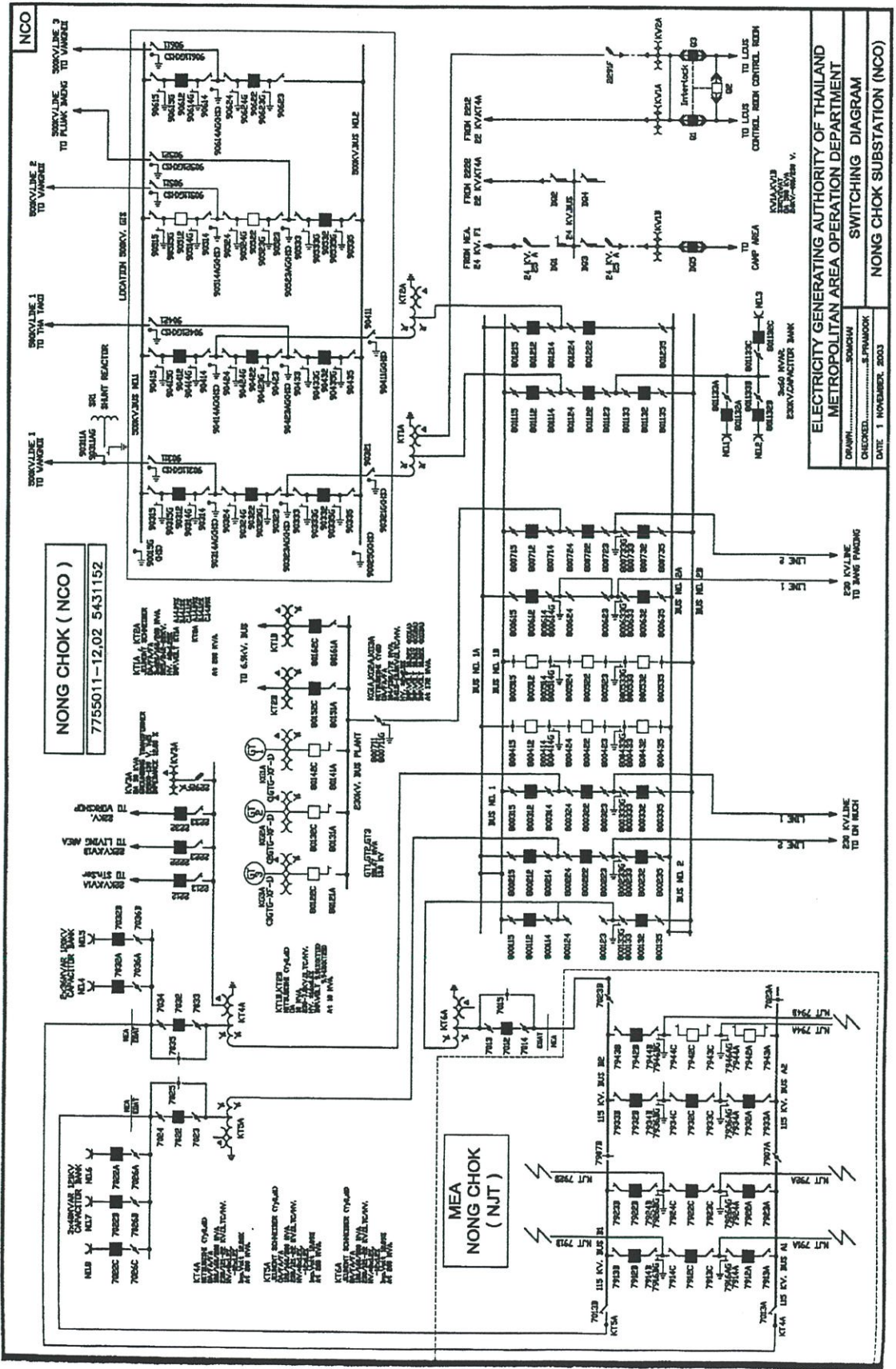
4.1.1 รายละเอียดสถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอก (Nong Chok ; NCO-Substation) [4]

อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอกมีระดับแรงดัน 3 ระดับได้แก่ 115 kV, 230 kV และ 500 kV 115 และ 230 kV มีลักษณะเป็น Switchyard อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าติดตั้งอยู่กลางแจ้ง (Conventional Type) แต่สำหรับ 500 kV เป็น GIS. (Gas Insulated Substation) ติดตั้งในอาคาร โดยมีรายละเอียดจำนวนอุปกรณ์ดังนี้

- การจัดบัส (Bus arrangement) จัดบัสตามระดับแรงดันเป็น
 - 500 kV GIS. Breaker and a Half Substation ,
 - 230 kV Conventional Type Switchyard Breaker and a Half Substation
 - 115 kV Conventional Type Switchyard Double Main Bus and Double Breaker Substation
 - สายส่ง (Transmission Line) มีจำนวนสายส่งทั้งหมด 9 สายส่ง
 - 500 kV Line to วังน้อย (Wang Noi : WN) 3 lines, ท่าตะโก (Tha Tako) 1 line, ปลูกแดง (Pluak Daeng : PDG) 1 line
 - 230 kV Line to บางปะกง (Bang Pakong) 2 lines, อ่อนนุช (On Nuch : ON) 2 lines
 - หม้อแปลง (Transformer) มีหม้อแปลง 5 ชุด
 - 500/230 kV 3 x 200 MVA Auto Transformer 2 sets
 - 230/115 kV 200 MVA Auto Transformer 3 sets
 - ชั้นที่รีแอกเตอร์ (Shunt Reactor) : 72.5 MVAR 1 set
 - คาปาซิเตอร์แบงก์ (Capacitor Bank) มีทั้งหมด 8 steps
 - 230 kV 60 MVAR 3 sets
 - 115 kV 48 MVAR 5 sets
 - เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) : Gas Turbine 150 MVA 3 sets
 - เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) 49 sets
 - รีเลย์ป้องกัน (Relay protection) 63 sets
- ทั้งนี้จำนวนอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอกตามรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 Single Line Diagram สถานีไฟฟ้าแรงสูง 10KV (แสดงรีเลย์ป้องกัน)



รูปที่ 4.3 Single Line Diagram สถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอก (ไม่แสดงรีเลย์ป้องกัน) [4]

4.1.2 รายละเอียดสถานียไฟฟ้าแรงสูงไทรน้อย (Sainoi ; SNO-Substation) [4]

อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าในสถานียไฟฟ้าแรงสูงไทรน้อยมีระดับแรงดัน 3 ระดับเช่นเดียวกับหนองจอกได้แก่ 115 kV, 230 kV และ 500 kV 115 และ 230 kV มีลักษณะเป็น Switchyard อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าติดตั้งอยู่กลางแจ้ง (Conventional Type) แต่สำหรับ 500 kV เป็น GIS. (Gas Insulated Substation) ติดตั้งในอาคาร โดยมีรายละเอียดจำนวนอุปกรณ์ดังนี้

- การจัดบัส (Bus arrangement) มีการจัดบัสตามระดับแรงดันได้แก่
 - 500 kV GIS. Double Main and Transfer Bus Single Breaker Substation
 - 230 kV Conventional Type Switchyard Breaker and a Half Substation
 - 115 kV Conventional Type Switchyard Double Breaker Substation
- สายส่ง (Transmission Line) จำนวนสายส่งทั้งหมดมี 20 สายส่ง ดังนี้
 - 500 kV Line to จอมบึง (Chom Bung : CBG) 3 lines, วังน้อย (Wang Noi : WN) 3 lines
 - 230 kV Line to อ่างทอง 2 (Ang Thong-2 : AT2) 2 lines, รังสิต (Rang Sit : RS) 2 lines, บางกอกน้อย (Bangkok Noi : BN) 2 lines, บ้านโป่ง 2 (Ban Pong-2 : BP2) 2 lines
 - 115 kV Line to การไฟฟ้าภูมิภาค (PEA) 2 lines
- หม้อแปลง (Transformer) มีหม้อแปลงจำนวน 5 ชุด
 - 500/230 kV 3 x 250 MVA Auto Transformer 3 sets
 - 230/115 kV 300 MVA Auto Transformer 2 sets
- คาปาซิเตอร์แบงก์ (Capacitor Bank) มีทั้งหมด 7 steps
 - 230 kV 72 MVAR 2 sets
 - 115 kV 48 MVAR 5 sets
- เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) มีจำนวนทั้งสิ้น 56 sets
- รีเลย์ป้องกัน (Relay protection ที่ใช้ในการป้องกันอุปกรณ์จ่ายไฟ) มีจำนวน 74 sets

ทั้งนี้จำนวนอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าของสถานียไฟฟ้าแรงสูงไทรน้อยตามรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็น Single Line Diagram แสดงจำนวนอุปกรณ์จ่ายไฟทั้งหมด

บทที่ 5

การหาตำแหน่งของฟอลต์ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

เมื่อมีเหตุการณ์ขัดข้อง (Fault) ขึ้นที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงจะมี Alarm Signal จำนวนมาก ส่งผ่าน Remote Terminal Unit (RTU.) ไปที่คอมพิวเตอร์ของศูนย์ควบคุม พนักงานที่เข้าเวรในขณะนั้นต้องใช้เวลาและความชำนาญในการทำความเข้าใจ เพื่อวิเคราะห์การเกิดฟอลต์ว่าเกิดขึ้นที่ใด ทำให้เวลาในการนำระบบกลับคืน (Restoration Time) เป็นไปได้ไม่เร็วเท่าที่ควร เช่นเมื่อเกิดฟอลต์ในสายส่งที่สำคัญอาจทำให้เกิดไฟดับขึ้นได้เนื่องจากไม่สามารถจ่ายโหลดได้เพียงพอ

วิธีที่จะทำให้เวลาในการนำระบบกลับคืนเป็นไปอย่างรวดเร็วขึ้น คือการนำโครงข่ายประสาทเทียม (ANN.) มาช่วยให้ข้อมูลในการตัดสินใจกับพนักงานกะที่ศูนย์ควบคุม ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมมีความสามารถในการเรียนรู้ฟังก์ชันต่อเนื่องแบบไม่เชิงเส้นหลายชนิดได้อย่างแม่นยำภายในขอบเขตข้อมูลที่เรียนรู้ งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back Propagation Learning) และชนิดความน่าจะเป็น (Probabilistic Neural Networks) ในการเรียนรู้สถานะของรีเลย์ป้องกันและเซอร์กิตเบรกเกอร์ ในขณะเกิดฟอลต์และสามารถระบุได้ว่าฟอลต์เกิดขึ้นที่ใด โดยใช้ข้อมูลอุปกรณ์จ่ายไฟที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอก (Nong Chok Substation ; NCO-Sub) และสถานีไฟฟ้าแรงสูงไทรน้อย (Sai Noi Substation ; SNO-Sub) มาเป็นตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

5.1 การเตรียมข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบ

ข้อมูลที่ใช้ฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม ได้มาจากสถานะของรีเลย์ป้องกันและเซอร์กิตเบรกเกอร์ในระบบ EGAT-SCADA ซึ่งมีรูปแบบเหมือนเลขฐานสอง (Binary) คือ “0” และ “1” เป็นอินพุต (Input) กรณีรีเลย์ “0” หมายถึงการที่รีเลย์ไม่มีการทำงาน (Operate) ถ้า “1” หมายถึงรีเลย์ทำงานสั่งทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์ และถ้าเป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ “0” หมายถึง เซอร์กิตเบรกเกอร์อยู่ในสถานะหน้าสัมผัสปิด (Close) จ่ายไฟอยู่เป็นปกติ ถ้า “1” แสดง ถึงเซอร์กิตเบรกเกอร์หน้าสัมผัสเปิด (Open) หรือถูกสั่งให้ทริป (Trip) จากรีเลย์ป้องกัน ในส่วนของข้อมูลที่เป็นเอาต์พุต (Output) ที่นำมาพิจารณา ได้แก่การที่อุปกรณ์จ่ายไฟได้แก่บัส (Bus), สายส่ง (Transmission Line), หม้อแปลง (Transformer), ชั้นที่รีแอกเตอร์ (Shunt Reactor), เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) และคาปาซิเตอร์แบงก์ (Capacitor Bank) ทริปออกจากระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยมีความสัมพันธ์กับอินพุตโดยตรง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

ข้อมูลอินพุทและเอาต์พุทสถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอก

1. ข้อมูลอินพุททั้งหมดสำหรับเอาต์พุทหนึ่งชุดประกอบด้วยจำนวนข้อมูล 112 ข้อมูล แบ่งเป็น

- สถานะเซอร์กิตเบรกเกอร์ จำนวน 49 ข้อมูล
 - สถานะรีเลย์ป้องกัน จำนวน 63 ข้อมูล
2. ข้อมูลเอาต์พุทที่สัมพันธ์กับอินพุททั้งหมดมี 6 ตำแหน่งของการเกิดฟอลต์ ดังนี้
- ฟอลต์ที่บัส
 - ฟอลต์ที่สายส่ง
 - ฟอลต์ที่หม้อแปลง
 - ฟอลต์ที่ Shunt Reactor
 - ฟอลต์ที่คาปาซิเตอร์แบงก์
 - ฟอลต์ที่ Generator

เอาต์พุทที่พิจารณานำมาใช้ในการสอน โครงข่ายประสาทดเทียมจำนวน 180 ชุดแบ่งตาม ลักษณะข้อมูลที่ได้รับจาก EGAT-SCADA ดังนี้

- เมื่อสถานะของรีเลย์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ขาดหาย 1 สัญญาณ 90 ข้อมูล ซึ่งทางปฏิบัติอาจเป็นไปได้เนื่องจากอาจมีรีเลย์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ไม่ทำงานตามปกติ โดยอาจชำรุดขัดข้อง หรือการส่งสัญญาณจากอุปกรณ์ไปยัง EGAT – SCADA ขัดข้อง

- สถานะของรีเลย์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์เกิน 1 สัญญาณ 90 ข้อมูล

สำหรับเอาต์พุทที่ใช้ทดสอบ โครงข่ายประสาทดเทียมมี 25 ข้อมูล ที่สถานะของรีเลย์และ เซอร์กิตเบรกเกอร์ครบสมบูรณ์ รายละเอียดดังตารางที่ 5.1 และ 5.2 แสดงจำนวนอินพุทและเอาต์พุท

ข้อมูลอินพุทและเอาต์พุทสถานีไฟฟ้าแรงสูงไทรน้อย

1. ข้อมูลอินพุททั้งหมดสำหรับเอาต์พุทหนึ่งชุด ประกอบด้วยจำนวนข้อมูล 130 ข้อมูล แบ่งเป็น

- สถานะเซอร์กิตเบรกเกอร์ จำนวน 56 ข้อมูล
 - สถานะรีเลย์ป้องกัน จำนวน 74 ข้อมูล
2. ข้อมูลเอาต์พุทที่สัมพันธ์กับอินพุททั้งหมดมี 4 ตำแหน่งของการเกิดฟอลต์ ดังนี้
- ฟอลต์ที่บัส
 - ฟอลต์ที่สายส่ง
 - ฟอลต์ที่หม้อแปลง
 - ฟอลต์ที่คาปาซิเตอร์แบงก์

เอาต์พุทที่พิจารณานำมาใช้ในการสอน โครงข่ายประสาทดเทียมจำนวน 204 ชุดแบ่งตาม ลักษณะข้อมูลที่ได้รับจาก EGAT-SCADA ดังนี้

การทรานส์ฟอร์มข้อมูล (Transform)

เนื่องจากอินพุตสถานะรีเลย์และเซอร์กิตเบรกเกอร์ มีจำนวนมากถึง 112 และ 130 อินพุต ในทางปฏิบัติจึงเป็นเรื่องยากที่จะใช้จำนวนอินพุตมากเช่นนั้นฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียม เพื่อเป็นการลดเวลาในการฝึกสอนจึงมีการทรานส์ฟอร์ม (Transform) โดยจัดกลุ่มข้อมูลอินพุตออกเป็น 28 กลุ่ม ๆ ละ 4 อินพุตย่อย แล้วทำการแปลงจากเลขฐานสองเป็นฐานสิบ จะได้อินพุตใหม่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 15 ทั้งหมด 28 อินพุต แล้วจึงนำไปสอน โครงข่ายประสาทเทียมต่อไป ซึ่งสามารถลดเวลาในการสอนได้เป็นอย่างมาก ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมมีดังนี้

กรณีเอาต์พุตเป็นการเกิดฟอลต์ที่บัสบาร์ 500 kV Bus No.1 สถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอก จะได้อินพุตสถานะของรีเลย์และเซอร์กิตเบรกเกอร์ดังนี้

1. 87B1-1 : Bus Differential Relay ชุดที่ 1 ของ 500 kV บัส 1 ทำงาน สั่งทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์ติดบัสทุกตัวซึ่งได้แก่เลขฐานสองตำแหน่งที่ 89 ตามตัวอย่างด้านล่าง
2. 87B1-2 : Bus Differential Relay ชุดที่ 2 ของ 500 kV บัส 1 ทำงาน สั่งทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์ติดบัสทุกตัวซึ่งได้แก่เลขฐานสองตำแหน่งที่ 91 ตามตัวอย่างด้านล่าง
3. 500 kV Circuit Breaker ที่ติดบัส 1 ทุกตัวทริปซึ่งได้แก่เลขฐานสองตำแหน่งที่ 1, 5, 8 และ 11 ตามตัวอย่างด้านล่าง

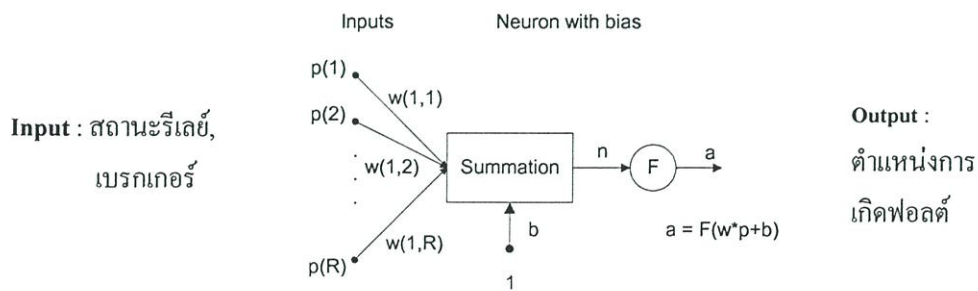
จะได้ชุดข้อมูลอินพุตเลขฐานสองจำนวน 112 ข้อมูลดังนี้

“1000 1001 0010 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 1010 0000 0000 0000 0000 0000”

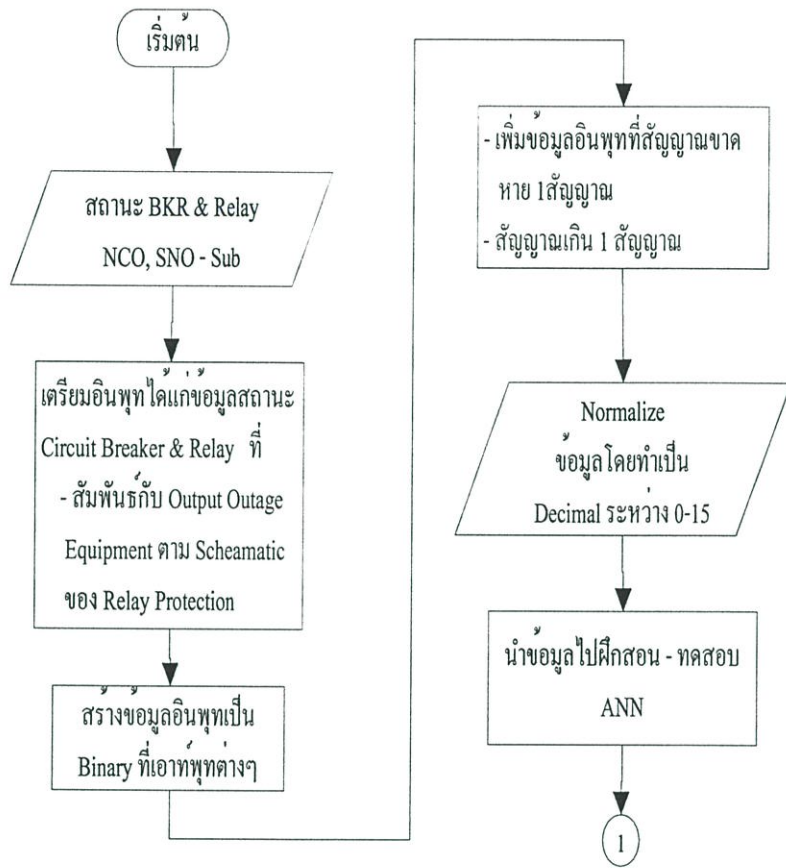
เมื่อทำการ Normalize จะได้อินพุตเป็นเลขฐานสิบจำนวน 28 ข้อมูลดังนี้

“8 9 2 0”

อย่างไรก็ตามข้อเสียของการทรานส์ฟอร์มข้อมูลวิธีนี้จะทำให้ความสำคัญของตำแหน่งบิตเปลี่ยนไปกล่าวคือเมื่อเป็นเลขฐานสองความสำคัญแต่ละบิตเท่ากัน แต่เมื่อทรานส์ฟอร์มเป็นเลขฐานสิบแล้วจะมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละบิต ทั้งนี้ลักษณะ โครงสร้างของ โครงข่ายประสาทเทียม ตามรูปที่ 5.1 และรายละเอียดขั้นตอนการเตรียมข้อมูลตาม Flow hart รูปที่ 5.2



รูปที่ 5.1 แสดง โครงสร้าง โครงข่ายประสาทเทียมที่มีอินพุต,เอาต์พุตตามที่ใช้งาน



รูปที่ 5.2 Flow chart ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล

5.2 การหาตำแหน่งของฟอลต์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูง

จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 เกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของโครงข่ายประสาทดัดเทียมว่าโครงข่ายประสาทดัดเทียมมีแนวคิดเลียนแบบการทำงานของสมองชีวภาพ โดยเรียนรู้และศึกษาการทำงานของสมองชีวภาพเพื่อกำหนดแนวทางสำหรับการสร้างแบบจำลองขึ้นมา แล้วพยายามสมมติฐานลักษณะการทำงาน โดยจำลองเป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่มีลักษณะเดียวกันแล้วดำเนินการคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์ ถ้าหากโครงข่ายสามารถคำนวณฟังก์ชันในบางลักษณะที่กำเนิดความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตในโครงข่าย สิ่งสำคัญที่ทำให้การคำนวณถูกต้องนั้นจำเป็นต้องมีการฝึกสอนโครงข่าย เพราะฉะนั้นก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทดัดเทียมจำเป็นต้องมีการฝึกสอนเสียก่อน

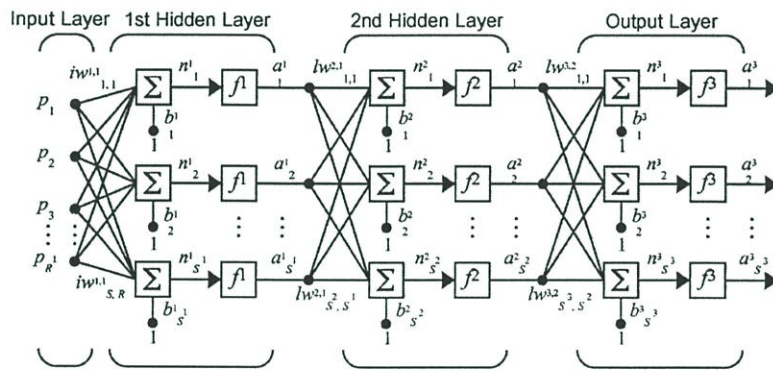
การฝึกสอน (Training) เป็นลักษณะที่จะพยายามให้โครงข่ายประสาทดัดเทียมมีความรู้ในลักษณะที่เราต้องการ โดยในลักษณะการฝึกสอนของโครงข่ายประสาทดัดเทียม จะเป็นการป้อนชุดอินพุตให้โครงข่ายและพยายามปรับค่าถ่วงน้ำหนักทุกๆ จุดให้สอดคล้องกับอินพุตหลายๆ แบบ เพื่อให้ได้เอาต์พุต เป้าหมายตามที่ต้องการ ในส่วนของวิทยานิพนธ์นี้มีแนวความคิดในการนำเอาข้อมูลที่ได้

จากสถานะของรีเลย์และเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่สัมพันธ์กับตำแหน่งของการเกิดฟอลต์มาเป็นข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอน (Training pattern) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้และข้อมูลทดสอบ (Test pattern) เป็นส่วนที่ใช้ในการหาประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม

จุดมุ่งหมายการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมในวิทยานิพนธ์นี้คือ ฝึกสอนเพื่อให้ได้เอาต์พุตที่ต้องการคือ ตำแหน่งของฟอลต์ที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า ซึ่งจะมีขั้นตอนการฝึกสอนและทดสอบแยกตามชนิดโครงข่ายประสาทเทียมดังนี้

5.2.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (BP)

เป็นโครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งในสองชนิดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ซึ่งมีอยู่ในโปรแกรม MATLAB/ Neural Network Toolbox [14] ดังแสดงโครงสร้างได้ในรูปที่ 5.3 เอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดนี้สามารถหาได้ตามสมการที่ 5.1



รูปที่ 5.3 แบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมชนิด BP ที่มี 2 ชั้นซ่อน [14]

$$o / P_{ANN} = f^3(LW^{3,2} * f^2(LW^{2,1} * f^1(IW^{1,1} * p + b^1) + b^2) + b^3) \tag{5.1}$$

- โดยที่ $IW^{1,1}$ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างชั้นข้อมูลอินพุตกับชั้นซ่อนที่ 1
- $LW^{2,1}$ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างชั้นซ่อนที่ 1 กับชั้นซ่อนที่ 2
- $LW^{3,2}$ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างชั้นซ่อนที่ 2 กับชั้นเอาต์พุต
- b^1, b^2 คือ ค่าไบแอสในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2
- b^3 คือ ค่าไบแอสในชั้นเอาต์พุต
- f^1, f^2 , คือ ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดล็อกซิกมอยด์ (Log-sigmoid)
- f^3 คือ ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดเชิงเส้น (linear)
- $P = [P_1, P_2, \dots, P_r]$ คือ เวกเตอร์อินพุตของโครงข่าย

จำนวนโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นชนิด Feed-forward Neural Networks ที่มีชั้นซ่อน (Hidden layer) 2 ชั้น โดยกำหนดให้ในชั้นซ่อนที่ 1 มีจำนวนนิวรอน (Neurons) ในชั้นซ่อนมากกว่าชั้นซ่อนที่ 2 เป็นจำนวน 1 นิวรอน และมีการปรับจำนวนของนิวรอนในชั้นซ่อนเพิ่มขึ้น เพื่อให้เมตริกซ์ของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสมีขนาดใหญ่เพียงพอในการคำนวณผลลัพธ์ (a) ให้มีค่าใกล้เคียงกับคำตอบที่แท้จริง (t) มากที่สุด โดยเริ่มฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เท่ากับ 2 – 1 ตามลำดับและเพิ่มจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นซ่อนขึ้นทีละ 1 นิวรอนจนถึง 10 – 9 เพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกเอาโครงสร้างที่มีค่าผิดพลาดของชุดข้อมูลทดสอบต่ำที่สุดไปใช้งาน

ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function)

ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) หรือฟังก์ชันกระตุ้น (Activation Function) ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแบบ BP เป็นชนิด Log-sigmoid ในชั้นซ่อนที่ 1, 2 ดังแสดงในสมการที่ 5.2 และ Linear transfer function ในชั้นเอาต์พุตดังแสดงในสมการที่ 5.3

$$a(n) = \frac{1}{1 + e^{-kn}} \quad (5.2)$$

$$a(n) = n \quad (5.3)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ที่แสดงถึงความชัน (Slope) ของฟังก์ชันถ่ายโอนซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ความชันเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นค่าพื้นฐานของ Neural Network Toolbox

ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม

ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมภายหลังจากการเรียนรู้ สามารถวัดได้จากค่าของเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ย (Mean Error ; ME) ของข้อมูลที่นำมาทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมเป็นเกณฑ์ดังสมการที่ 5.4 โดยในกรณีที่โครงข่ายประสาทเทียมสามารถระบุตำแหน่งพอลต์ได้ถูกต้องหมดค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยของคำตอบชุดนั้นจะเท่ากับ 0 % หากระบุตำแหน่งพอลต์ไม่ถูกต้องค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของคำตอบชุดนั้นจะเป็นตามสมการดังนี้

$$ME = \frac{\text{จำนวนชุดคำตอบที่ผิด}}{\text{จำนวนชุดข้อมูลทดสอบทั้งหมด}} \times 100 \% \quad (5.4)$$

ค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส

การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้วิธีการเลือกค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสแบบสุ่ม (คำสั่ง “ `net.inputWeights{1,1}.initFcn = 'rands';` ” และ “ `net.biases{1}.initFcn = 'rands';` ” [14]) เพื่อให้การฝึกสอนในแต่ละรอบมีทิศทางการลู่เข้าหาคำตอบแตกต่างกันออกไป

การปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส

ลำดับขั้นตอน (Algorithm) การปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิด Feed-forward Neural Networks โดยใช้ Neural Network Toolbox นั้นมีอยู่หลายวิธี แต่ตามที่ระบุไว้ใน Neural Network Toolbox User's Guide นั้น Levenberg-Maquardt algorithm (`trainlm`) [14] มีประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการฝึกสอนสูงที่สุด

ในขณะที่ทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแต่ละรอบ กำหนดให้มีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสเป็นจำนวน 500 ครั้ง (epoch) และในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสแต่ละ epoch จะทำการคำนวณหาค่าผิดพลาดของคำตอบของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบแต่ละชุด

จำนวนรอบของการฝึกสอน

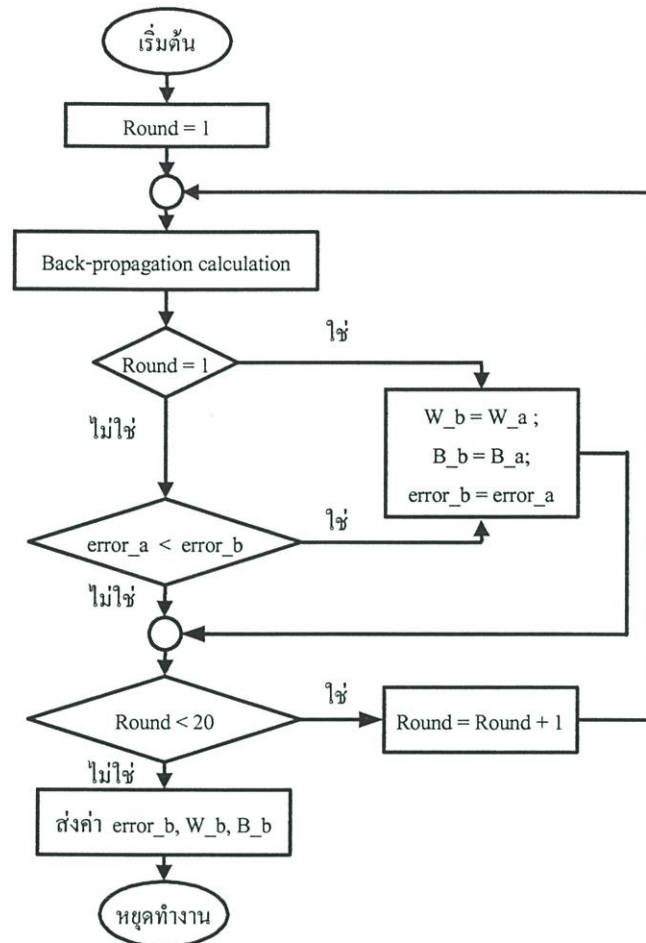
เนื่องจากการศึกษานี้ได้กำหนดวิธีการเลือกค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสเป็นการเลือกแบบสุ่ม จำนวนรอบของการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมในแต่ละโครงสร้างของโครงข่ายนั้นจะต้องเพียงพอให้เกิดการลู่เข้าค่าดังกล่าวอย่างทั่วถึง จึงกำหนดจำนวนรอบของการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมในแต่ละโครงสร้างไว้ที่ 20 รอบต่อโครงสร้าง เพื่อเปรียบเทียบการฝึกสอนที่ได้ค่าผิดพลาดเฉลี่ย (ME) แตกต่างกันแต่ละโครงสร้างสำหรับใช้เป็นข้อมูลในการเลือกรอบการฝึกสอนที่มีค่าผิดพลาดเฉลี่ย (ME) ต่ำที่สุดใน 20 รอบไปใช้งาน

ขั้นตอนการฝึกสอน

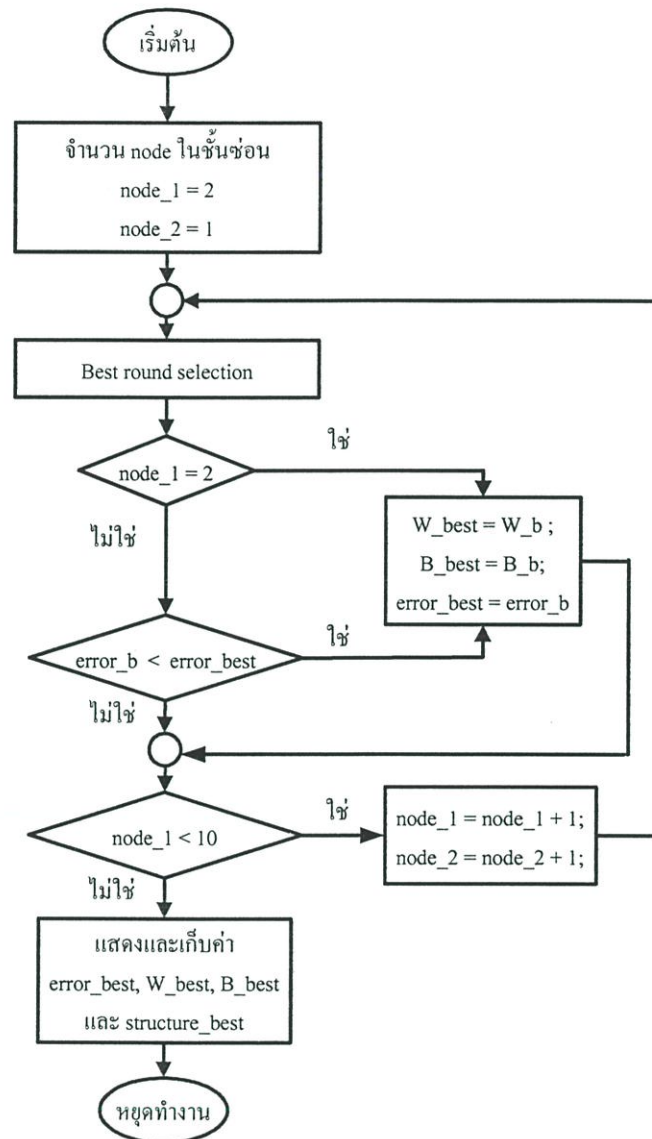
ในขั้นตอนแรกของการฝึกสอน จะเป็นการเตรียมข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนและทดสอบ เมื่อได้ข้อมูลจากการเตรียมสถานะของรีเลย์และเซอร์กิตเบรกเกอร์ ที่เป็นไปตามความสัมพันธ์กับอุปกรณ์ที่เกิดฟอลต์ ทั้งนี้รายละเอียดตาม ข้อ 5.1 โดยข้อมูลดังกล่าวจะถูกจัดให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ ที่มีจำนวนหลักเท่ากับตัวแปรอินพุตบวกกับจำนวนของตัวแปรเอาต์พุต และมีจำนวนแถวเท่ากับจำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอน รวมกับข้อมูลทดสอบ ในกรณีของสถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอก จะใช้ข้อมูลฝึกสอนที่เป็นเมตริกซ์ขนาด 28×180 และข้อมูลทดสอบที่เป็นเมตริกซ์ขนาด 28×25 ส่วนสถานีไฟฟ้าแรงสูงไทรน้อย จะใช้ข้อมูลฝึกสอนที่เป็นเมตริกซ์ขนาด 32×238 และข้อมูลทดสอบที่เป็นเมตริกซ์ขนาด 32×34 จากนั้นนำเมตริกซ์ที่ได้ไปฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

เมื่อกำหนดเงื่อนไขต่างๆในการฝึกสอนตามที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว ก็เริ่มทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ ซึ่งมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 5.4-5.6 โดยรูปที่ 5.4 เป็นขั้นตอน Back-propagation calculation ซึ่งเป็นการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสและคำนวณหาค่าผิดพลาดของคำตอบของข้อมูลทดสอบเป็นจำนวน 500 epoch และเลือกเอาค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสที่ทำให้คำตอบของข้อมูลทดสอบมีค่าผิดพลาดน้อยที่สุดเก็บไว้เพื่อเปรียบเทียบกับรอบการฝึกสอนอื่นๆในขั้นตอน Best round selection (รูปที่ 5.4) ซึ่งจะทำการซ้ำในขั้นตอน Back-propagation calculation จำนวน 20 รอบ และเลือกเอาค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสที่ทำให้คำตอบของข้อมูลทดสอบมีค่าผิดพลาดน้อยที่สุดของทุกรอบการฝึกสอนเก็บไว้เพื่อเปรียบเทียบกับรอบการฝึกสอนในโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบอื่นๆในขั้นตอน Best structure and best round selection (รูปที่ 5.6) ซึ่งจะทำการฝึกสอนในขั้นตอน Best round selection ซ้ำโดยเริ่มจากโครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 ตั้งแต่ 2 – 1 นิวรอนไปจนถึง 10 – 9 นิวรอน ตามลำดับและเลือกเอาค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสที่ทำให้คำตอบของข้อมูลทดสอบมีค่าผิดพลาดน้อยที่สุดของทุกรอบการฝึกสอนและทุกโครงสร้างสำหรับการฝึกสอนในแต่ละเงื่อนไขเก็บไว้เพื่อนำไปใช้งาน

โดยผลการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมแบบ BP สำหรับสถานีไฟฟ้าทั้งสองแห่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจโดยจะนำเสนอรายละเอียดในบทที่ 6



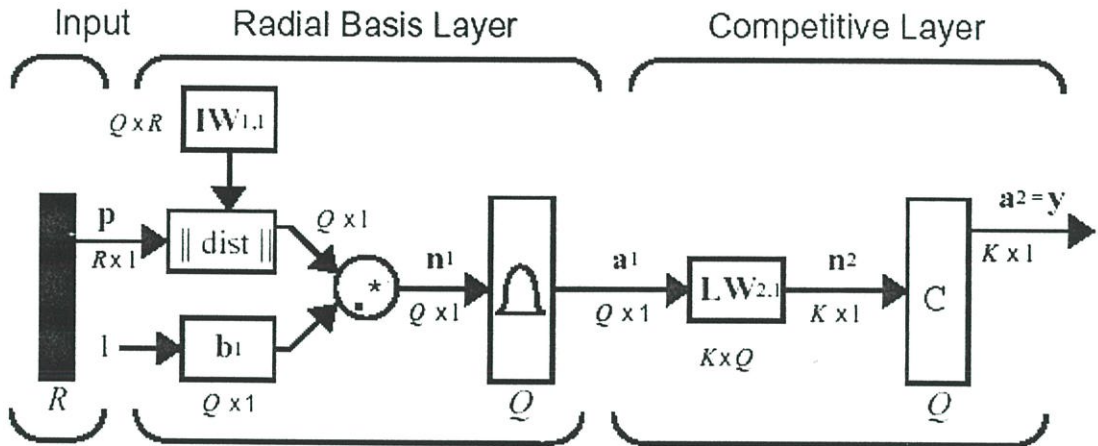
รูปที่ 5.5 Flow chart ของขั้นตอน Best round selection



รูปที่ 5.6 Flow chart ของขั้นตอน Best structure and best round selection

5.2.2 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN)

โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (Probabilistic neural network : PNN) ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 5.7 เอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถหาได้ตามสมการที่ 5.10



รูปที่ 5.7 แบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น [14]

เอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถหาได้ดังนี้

$$o / p_{ANN} = f^4 \left(LW_{2,1} * \exp \left(- \frac{\|p - w_j\|^2}{\sigma_j^2} \right) \right) \quad (5.10)$$

โดยที่

w_j คือ เวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนักในชั้นซ่อน

σ_j คือ ค่ากระจายค่าคงที่ (ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าไบอัส $b = \frac{0.8326}{Spread}$) ในชั้นฐานรัศมี

f^4 คือ ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดคอมแพทิทีฟ (competitive)

$LW_{2,1}$ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างชั้นฐานรัศมีกับชั้นเอาต์พุต

$P = [P_1, P_2, \dots, P_R]$ คือ เวกเตอร์อินพุตของโครงข่าย

จำนวนโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายที่ใช้ จะประกอบไปด้วยจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นดังนี้ สถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอกในชั้นอินพุทมี 112 นิวรอนในชั้นฐานรัศมีขึ้นกับจำนวนรอบของการฝึกสอน-ทดสอบตามตาราง 6.3 และในชั้นเอาต์พุทมี 1 นิวรอน ซึ่งค่าเอาต์พุทของโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 1 ถึง 25 ซึ่งจะมีค่าสัมพันธ์กับตำแหน่งของอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าที่เกิดฟอลต์สำหรับสถานีไฟฟ้าแรงสูงไทรน้อย ชั้นอินพุทมี 130 นิวรอนในชั้นฐานรัศมีขึ้นกับรอบของการฝึกสอน-ทดสอบตามตาราง 6.6 และในชั้นเอาต์พุทมี 1 นิวรอน เช่นเดียวกัน

ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function)

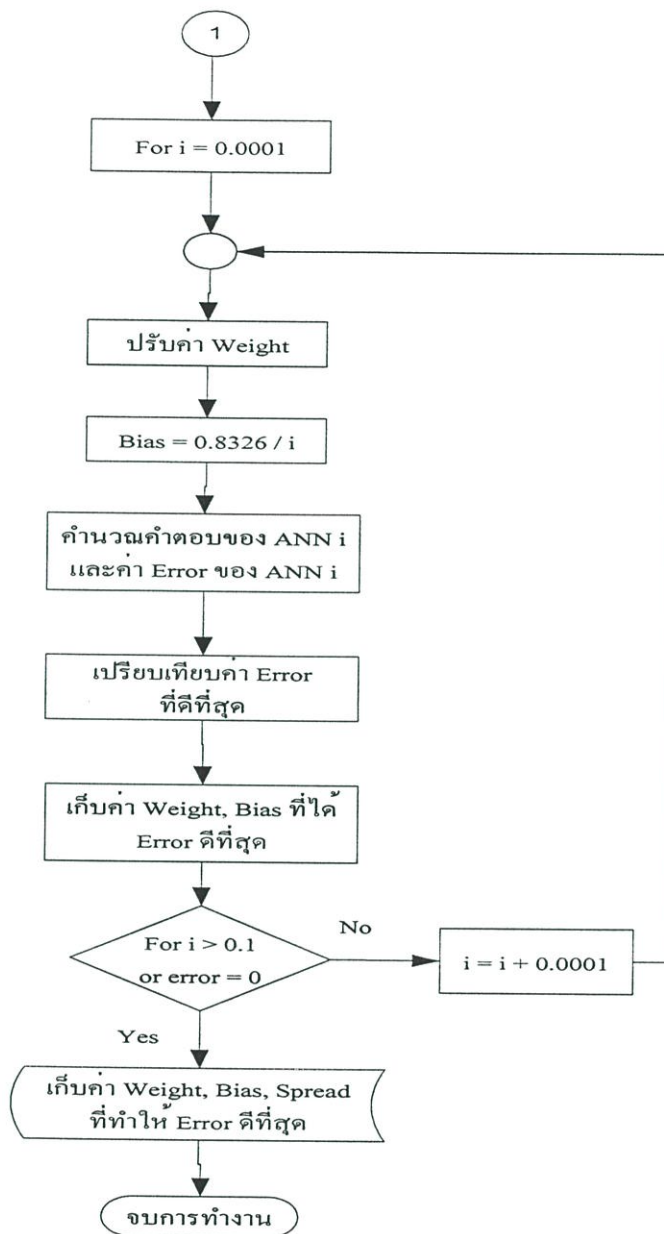
ส่วนฟังก์ชันกระตุ้นที่อยู่ในชั้นฐานรัศมีจะใช้ชนิดฐานรัศมี (Radial basis) ชั้นเอาต์พุทจะใช้ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดคอมแพติทิฟ (Competitive)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม

ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมหลังจากการเรียนรู้ สามารถวัดได้จากค่าของเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ย (Mean Error ; ME) ดังสมการที่ 5.3 เช่นเดียวกับ BP

ขั้นตอนการฝึกสอน

ระหว่างการฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น, จะเริ่มต้นด้วยการสุ่มค่าถ่วงน้ำหนัก (Random initial weight) และเพิ่มค่ากระจายค่าคงที่ (Increase spread) ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าไบอัส ($b = \frac{0.8326}{Spread}$) [14] ในชั้นฐานรัศมี ให้กับโครงสร้างเริ่มต้นของโครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งรอบการฝึกสอนจะมีการสุ่มค่าถ่วงน้ำหนักและปรับเปลี่ยนค่ากระจายค่าคงที่โดยเริ่มต้นที่ 0.0001 เพื่อกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ย (ME) ของชุด ข้อมูลทดสอบที่ดีที่สุด จากนั้นทำการเพิ่มค่ากระจายค่าคงที่ในชั้นซ่อนเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.0001 จนถึง 0.1 (เพื่อหาโครงข่ายของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด) หรือจนกว่าค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ย (ME) เท่ากับ 0 แล้วหยุดการฝึกสอน ตาม Flow chart รูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 Flow chart ขั้นตอนการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิด PNN

บทที่ 6

ผลการทดลอง

บทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองซึ่งได้จากการทดสอบ โคร่งข่ายประสาทเทียม ด้วยชุดข้อมูลอินพุตสถานะของรีเลย์และเซอร์กิตเบรกเกอร์ ที่สัมพันธ์กับเอาต์พุต โดยเป็นการเกิดฟอลต์ที่อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าต่างๆ ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอกและไทรน้อยจำนวน 25 และ 34 ข้อมูลตามลำดับ เพื่อทดสอบการทำงาน โดยผลที่ได้และรูปแบบในการนำเสนอแสดงดังรายละเอียดต่อไปนี้

6.1 รูปแบบการนำเสนอ

6.1.1 สถานีไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ในการทดลอง

สถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอก

การฝึกสอน โคร่งข่ายประสาทเทียมทั้งชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (BP) ชนิดความน่าจะเป็น (PNN) เพื่อระบุตำแหน่งของการเกิดฟอลต์ โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ Notebook ยี่ห้อ IBM รุ่น Thinkpad T23 หน่วยประมวลผลกลางแพนเทียมทรี 1 GHz หน่วยความจำ 128 MB จากนั้นจึงนำโคร่งข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอน (ชุดที่มีค่า ME ต่ำที่สุด) มาทดสอบด้วยข้อมูลทดสอบที่โคร่งข่ายประสาทเทียมไม่เคยเรียนรู้มาก่อน โดยผลการทดสอบแสดงอยู่ในตารางที่ 6.1 – 6.6 และรูปที่ 6.1 – 6.8

สถานีไฟฟ้าแรงสูงไทรน้อย

การฝึกสอน โคร่งข่ายประสาทเทียมทั้งชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (BP) ชนิดความน่าจะเป็น (PNN) เพื่อระบุตำแหน่งของการเกิดฟอลต์ โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ Notebook ยี่ห้อ IBM รุ่น Thinkpad T23 หน่วยประมวลผลกลางแพนเทียมทรี 1 GHz หน่วยความจำ 128 MB เครื่องเดียวกับที่กล่าวข้างต้น จากนั้นจึงนำโคร่งข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอน (ชุดที่มีค่า ME ต่ำที่สุด) มาทดสอบด้วยข้อมูลทดสอบ ที่โคร่งข่ายประสาทเทียมไม่เคยเรียนรู้มาก่อน โดยผลการทดสอบแสดงอยู่ในตารางที่ 6.4 – 6.6 และรูปที่ 6.5 – 6.8

6.1.2 รูปแบบการนำเสนอผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างโคร่งข่ายประสาทเทียม

การแสดงผลการทดลองของสถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอกจะนำเสนออยู่ในรูปแบบตาราง โดยแต่ละตารางเรียงตามจำนวนข้อมูลฝึกสอนคือ 90 , 120 , 150 และ 180 ชุด ตามลำดับ ในตาราง จะทำการเปรียบเทียบระหว่าง ค่าตอบจริงจากฟังก์ชันการทำงานของรีเลย์ป้องกันกับค่าตอบที่ได้จากโคร่งข่ายประสาทเทียมทั้งสองชนิด ดังแสดงอยู่ในตารางที่ 6.7 – 6.10 และรูปที่ 6.9 – 6.12

ในขณะที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงโทรน้อยจะนำเสนออยู่ในรูปแบบตารางเช่นเดียวกัน โดยแต่ละตารางเรียงตามจำนวนข้อมูลฝึกสอนคือ 102 , 136 , 170 และ 204 ชุด ตามลำดับ ในตารางจะทำการเปรียบเทียบระหว่าง ค่าตอบจริงจากฟังก์ชันการทำงานของรีเลย์ป้องกันกับค่าตอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมทั้งสองชนิด ดังแสดงอยู่ในตารางที่ 6.11 – 6.14 และรูปที่ 6.13 – 6.16

6.2 ผลการทดลองสถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอก

6.2.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (BP)

ตารางที่ 6.1 แสดงผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (BP) NCO-Sub โดยแสดงค่าผิดพลาดในแต่ละ โครงสร้างของชุดข้อมูลฝึกสอน

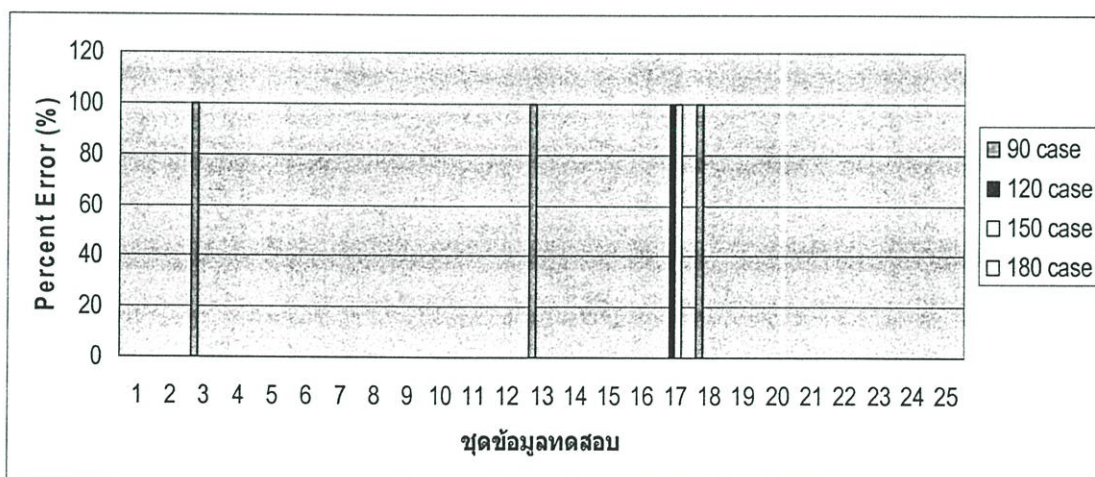
จำนวนข้อมูล ฝึกสอน (ชุด)	% Mean Error (ME)ของผลทดสอบจากข้อมูลทดสอบ 25 ชุด ตามจำนวนโครงสร้างของ ANN 9 แบบ									
	2-1*	3-2	4-3	5-4	6-5	7-6	8-7	9-8	10-9	
90	32	16	12	20	16	28	20	16	36	
120	28	20	16	20	20	4	12	20	20	
150	32	20	8	12	8	12	8	8	4	
180	40	20	0	4	8	4	0	4	4	

* : 2-1 คือจำนวนปมประสาทในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

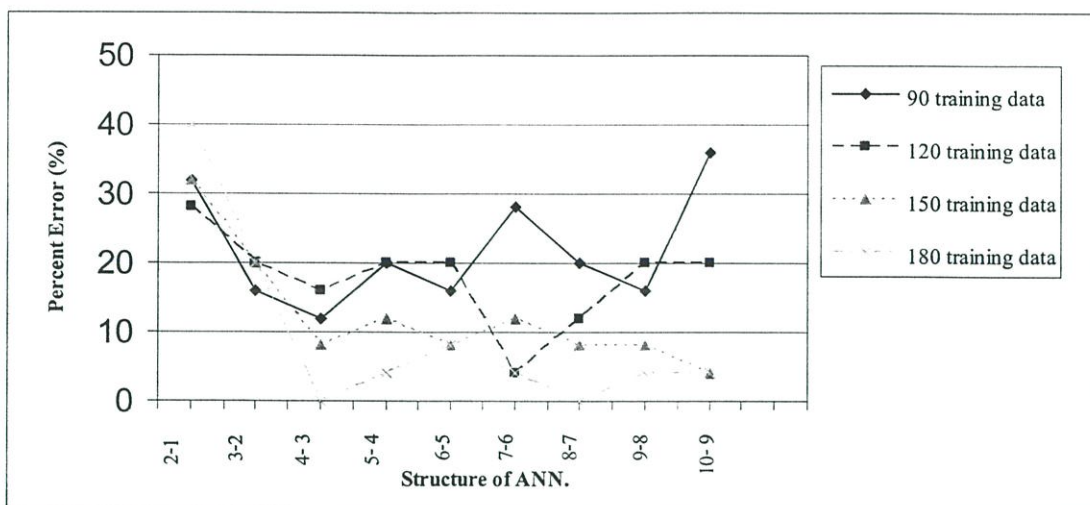
ตารางที่ 6.2 แสดงปมประสาทที่ทำให้ได้ค่า % Error ต่ำสุดและเวลาที่ใช้

แต่ละโครงสร้างใน ANN แบบ BP NCO-Sub

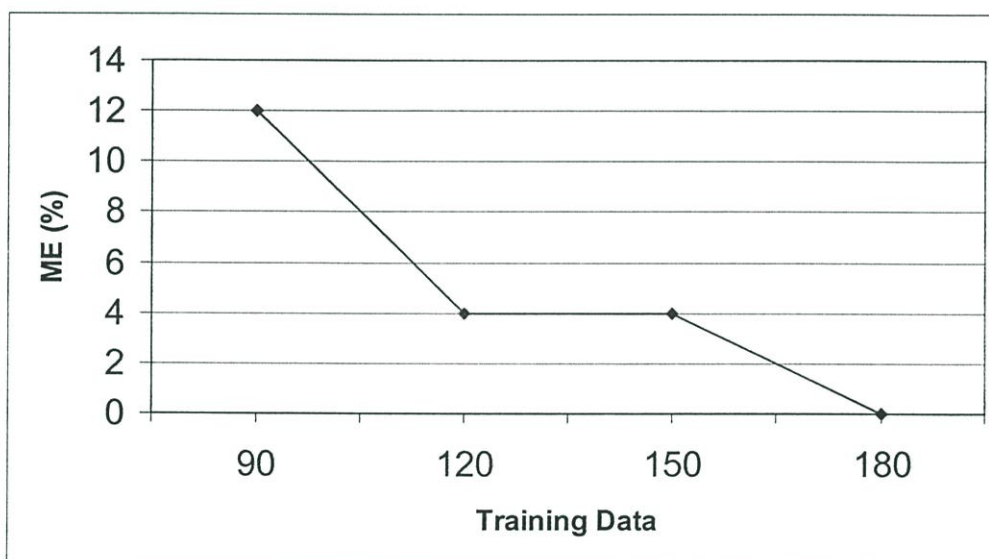
จำนวนข้อมูล ฝึกสอน (ชุด)	เวลาที่ใช้ สอน (นาที)	จำนวนปม ประสาทในชั้น ซ่อน1-2	% Error ต่ำสุดของผล การทดสอบ
90	2.39	4-3	12
120	7.55	7-6	4
150	8.54	10-9	4
180	3.15	4-3	0



รูปที่ 6.1 กราฟแสดงการเกิด Error (ANN ตอบผิด)แต่ละชุดข้อมูลทดสอบ



รูปที่ 6.2 กราฟแสดงค่าผิดพลาดแต่ละ โครงสร้างของ ANN ชนิด BP NCO-Sub



รูปที่ 6.3 กราฟแสดงค่า ME ที่ต่ำสุดในแต่ละชุดข้อมูลฝึกสอน

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.1 ถึง 6.2 และรูปที่ 6.1-6.3 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้
การระบุตำแหน่งพอลต์

1. โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการฝึกสอนผ่านไป 500 ครั้ง ชุดข้อมูลฝึกสอน 90 ชุด พบว่าโครงข่ายประสาทเทียมชนิด BP ระบุตำแหน่งพอลต์โดย ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 12 % ค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 36 %
2. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 120 ชุด สามารถ ระบุตำแหน่งพอลต์โดย ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 4 % ค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 28 %

3. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด สามารถ ระบุตำแหน่งพอลต์โดย ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 4 % ค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 32 %
4. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 180 ชุด สามารถ ระบุตำแหน่งพอลต์โดย ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % ค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 40 %

จากการนำเหตุการณ์เกิดพอลต์ 25 เหตุการณ์มาทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการฝึกสอนผ่านไป 500 ครั้ง ของแต่ละชุดข้อมูลฝึกสอนพบว่าเมื่อจำนวนชุดของข้อมูลที่ฝึกสอนมากขึ้นทำให้คำตอบมีความแม่นยำมากขึ้น แต่ผลการทดสอบบางกรณีไม่เป็นตามหลักการข้างต้น เช่น การสุ่มทดสอบครั้งที่ 1 ของชุดข้อมูลทดสอบ 180 ชุด มีค่าผิดพลาดสูงสุดถึง 40 % มีสาเหตุจากการสุ่มค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสเป็นค่าตั้งต้นของโปรแกรม จึงทำให้ได้ผลดังกล่าว แต่เมื่อการทดสอบครั้งต่อไปพบว่าผลที่ได้ปกติ สำหรับโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ค่าผิดพลาดของคำตอบมีค่าต่ำสุดคือ โครงสร้าง 4-3 และ 8-7 ซึ่งมีค่าผิดพลาดเป็น 0

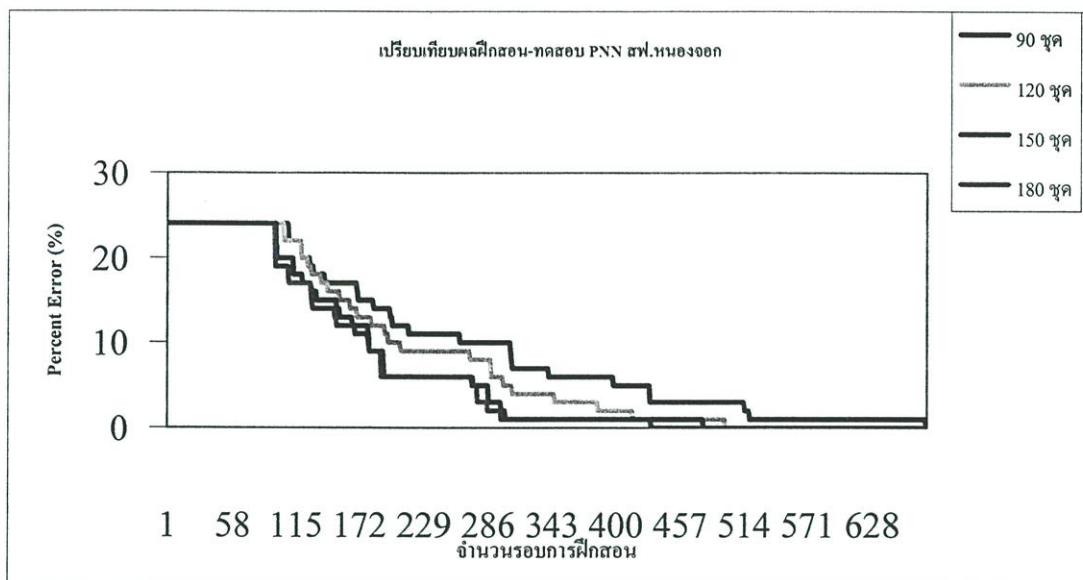
เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

โครงข่ายประสาทเทียมใช้เวลาในการฝึกสอน ในชุดข้อมูลฝึกสอน 180 ชุดที่ได้ค่าผิดพลาดต่ำสุดเป็น 0 ใช้เวลา 3.15 นาที ในโครงสร้าง 4-3 ซึ่งก็นับว่าเร็วพอสมควร

6.2.2 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN)

ตารางที่ 6.3 แสดงผลการทดสอบ PNN NCO-Sub

จำนวนข้อมูลฝึกสอน (ชุด)	รอบการฝึกสอน-ทดสอบ	เวลาที่ใช้ (นาที)	ค่า Error ต่ำสุด
90	675	2.155	0
120	497	1.834	0
150	477	1.830	0
180	431	1.767	0



รูปที่ 6.4 กราฟแสดงค่าผิดพลาดเทียบกับจำนวนรอบที่ฝึกสอน PNN NCO-Sub

จากผลการทดลองตารางที่ 6.3 และรูปที่ 6.4 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

การระบุตำแหน่งฟอลต์

1. โครงข่ายประสาทเทียมชนิด PNN ระบุตำแหน่งฟอลต์ได้โดยที่ชุดข้อมูลฝึกสอน 90, 120, 150 และ 180 ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % แต่จะใช้จำนวนรอบต่างกันของแต่ละชุดข้อมูลที่ฝึกสอนกว่าจะได้ค่าผิดพลาดเป็น 0 %
2. ที่จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 90 ชุด โครงข่ายประสาทเทียมใช้รอบการฝึกสอน 675 รอบ ค่าผิดพลาดจึงลดลงเป็น 0 %
3. ที่จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 120 ชุด โครงข่ายประสาทเทียมใช้รอบการฝึกสอน 497 รอบ ค่าผิดพลาดจึงลดลงเป็น 0 %
4. ที่จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 150 ชุด โครงข่ายประสาทเทียมใช้รอบการฝึกสอน 477 รอบ ค่าผิดพลาดจึงลดลงเป็น 0 %
5. ที่จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 180 ชุด โครงข่ายประสาทเทียมใช้รอบการฝึกสอน 431 รอบ ค่าผิดพลาดจึงลดลงเป็น 0 %

จากการนำเหตุการณ์เกิดฟอลต์ 25 เหตุการณ์มาทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมชนิด PNN ของแต่ละชุดข้อมูลฝึกสอนพบว่า PNN มีความแม่นยำสูงโดยทุกชุดข้อมูลฝึกสอนจะได้ค่าผิดพลาดต่ำสุดเป็น 0% มีเพียงจำนวนรอบของการฝึกสอนจะต่างกัน

เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

โครงข่ายประสาทเทียมชนิด PNN ใช้เวลาในการฝึกสอน ในชุดข้อมูลฝึกสอน 180 ชุดที่ได้ค่าผิดพลาดต่ำสุดเป็น 0 ใช้เวลา 1.767 นาที นับว่าเร็วมาก

6.3 ผลการทดลองสถานีไฟฟ้าแรงสูงไทรน้อย

6.3.1 โครงข่ายประสาทยูนิฟิเคชันเพอร์คัลแบ็ค (BP) -

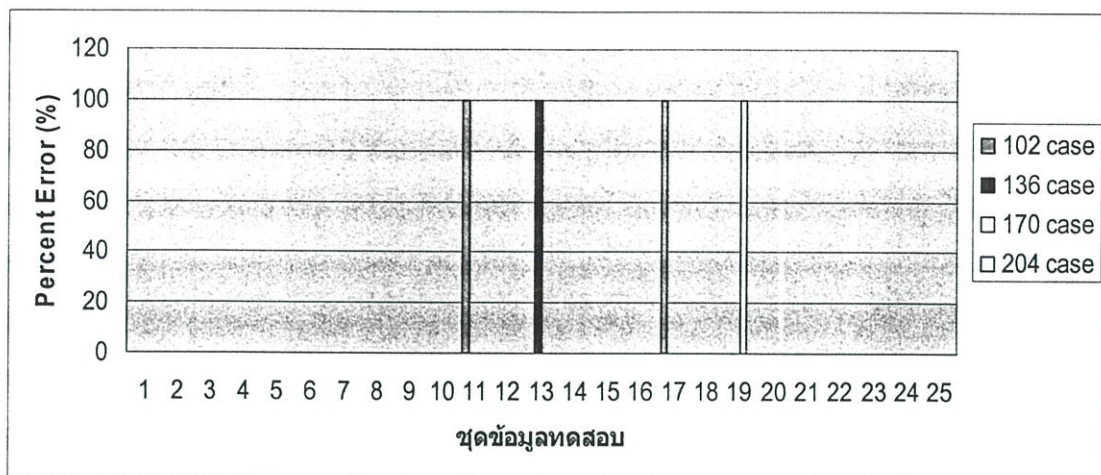
ตารางที่ 6.4 แสดงผลการทดสอบโครงข่ายประสาทยูนิฟิเคชันเพอร์คัลแบ็ค (BP) SNO-Sub โดยแสดงค่าผิดพลาดในแต่ละโครงสร้างของชุดข้อมูลฝึกสอน

จำนวนข้อมูลฝึกสอน (ชุด)	% Error ของผลทดสอบจากข้อมูลทดสอบ 34 ชุด ตามจำนวนโครงสร้างของ ANN 9 แบบ								
	2-1*	3-2	4-3	5-4	6-5	7-6	8-7	9-8	10-9
102	35.29	17.65	20.59	20.59	23.53	14.71	8.82	20.59	11.76
136	14.71	23.53	11.76	14.71	8.82	5.88	2.94	2.94	11.76
170	26.47	11.76	2.94	5.88	2.94	2.94	5.88	2.94	5.88
204	20.59	0.00	0.00	2.94	0.00	0.00	0.00	0.00	5.88

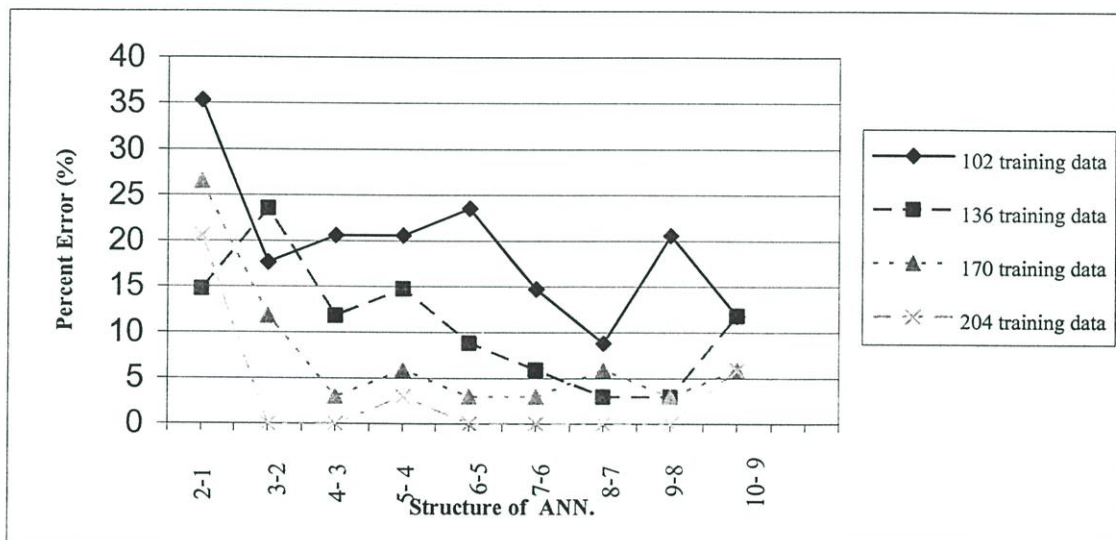
* : 2-1 คือจำนวนปมประสาทในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.5 แสดงปมประสาทที่ทำให้ได้ค่า % Error ต่ำสุดและเวลาที่ใช้แต่ละโครงสร้างใน ANN แบบ BP SNO-Sub

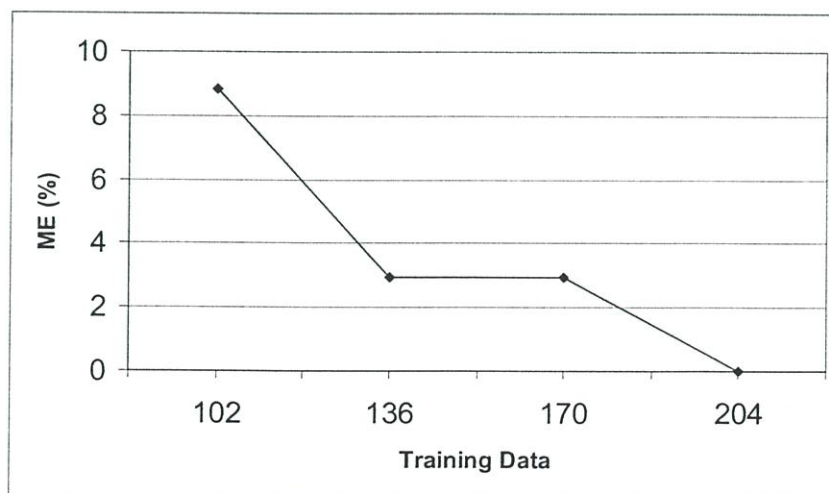
จำนวนข้อมูลฝึกสอน (ชุด)	เวลาที่ใช้สอน (นาท)	จำนวนปมประสาทในชั้นซ่อน 1-2	% Error ต่ำสุดของผลการทดสอบ
102	41.21	8-7	8.82
136	56.33	8-7	2.94
170	14.20	4-3	2.94
204	9.66	3-2	0.00



รูปที่ 6.5 กราฟแสดงการเกิด Error (ANN ตอบผิด)แต่ละชุดข้อมูลทดสอบ



รูปที่ 6.6 กราฟแสดงค่าผิดพลาดแต่ละโครงสร้างของ ANN ชนิด BP SNO-Sub



รูปที่ 6.7 กราฟแสดงค่า ME ที่ต่ำสุดในแต่ละชุดข้อมูลฝึกสอน

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.4 ถึง 6.5 และรูปที่ 6.5-6.6 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

การระบุตำแหน่งฟอลต์

1. โครงข่ายประสาทดเทียมที่ได้รับการฝึกสอนผ่านไป 500 ครั้ง ชุดข้อมูลฝึกสอน 102 ชุด พบว่าโครงข่ายประสาทดเทียมชนิด BP ระบุตำแหน่งฟอลต์โดย ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 8.82 % ค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 35.29 %
2. โครงข่ายประสาทดเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 136 ชุด สามารถ ระบุตำแหน่งฟอลต์โดย ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 2.94 % ค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 23.53 %
3. โครงข่ายประสาทดเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 170 ชุด สามารถ ระบุตำแหน่งฟอลต์โดย ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 2.94 % ค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 26.47 %
4. โครงข่ายประสาทดเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลฝึกสอน 204 ชุด สามารถ ระบุตำแหน่งฟอลต์โดย ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % ค่าผิดพลาดสูงสุด (Max error) เท่ากับ 20.59 %

จากการนำเหตุการณ์เกิดฟอลต์ 34 เหตุการณ์มาทดสอบโครงข่ายประสาทดเทียมที่ได้รับการฝึกสอนผ่านไป 500 ครั้ง ของแต่ละชุดข้อมูลฝึกสอนพบว่าเมื่อจำนวนชุดของข้อมูลที่ฝึกสอนมากขึ้นทำให้คำตอบมีความแม่นยำมากขึ้น แต่ผลการทดสอบบางกรณีไม่เป็นตามหลักการข้างต้น เช่น การสุ่มทดสอบครั้งที่ 1 ของชุดข้อมูลทดสอบ 204 ชุด มีค่าผิดพลาดสูงสุดถึง 20.59 % มีสาเหตุจากการสุ่มค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสเป็นค่าตั้งต้นของโปรแกรม จึงทำให้ได้ผลดังกล่าวแต่เมื่อการทดสอบครั้งต่อไปพบว่าผลที่ได้ปกติ สำหรับโครงสร้างของโครงข่ายประสาทดเทียมที่ค่าผิดพลาดของคำตอบมีค่าต่ำสุดคือ โครงสร้าง 3-2, 4-3, 6-5, 7-6, 8-7, และ 9-8

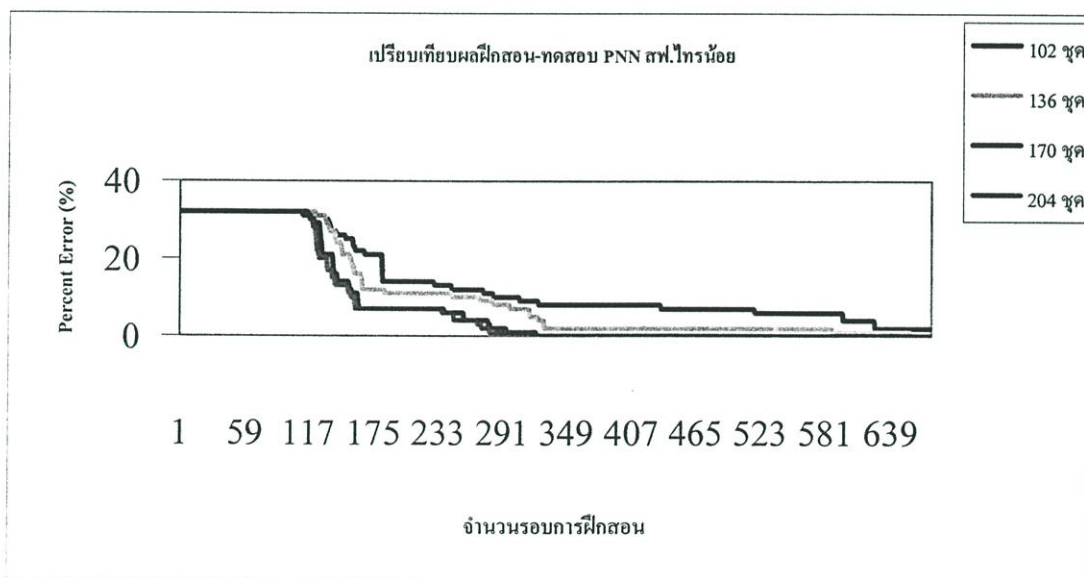
เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

โครงข่ายประสาทดเทียมใช้เวลาในการฝึกสอน ในชุดข้อมูลฝึกสอน 204 ชุดที่ได้ค่าผิดพลาดต่ำสุดเป็น 0 ใช้เวลา 9.66 นาที ในโครงสร้าง 3-2

6.3.2 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN)

ตารางที่ 6.6 แสดงผลการทดสอบ PNN SNO-Sub

จำนวนข้อมูล ฝึกสอน (ชุด)	รอบการ ฝึกสอน- ทดสอบ	เวลาที่ใช้ (นาที)	ค่า Error ต่ำสุด
102	731	2.445	0
136	657	2.437	0
170	322	1.335	0
204	318	1.483	0



รูปที่ 6.8 กราฟแสดงค่าผิดพลาดเทียบกับจำนวนรอบที่ฝึกสอน PNN SNO-Sub

จากผลการทดลองตารางที่ 6.6 และรูปที่ 6.8 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

การระบุตำแหน่งฟอลต์

1. โครงข่ายประสาทดัดเทียมชนิด PNN ระบุตำแหน่งฟอลต์ได้โดยที่ชุดข้อมูลฝึกสอน 102, 136, 170 และ 204 ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min error) เท่ากับ 0 % แต่จะใช้จำนวนรอบต่างกันของแต่ละชุดข้อมูลที่ฝึกสอนกว่าจะได้ค่าผิดพลาดเป็น 0 %
2. ที่จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 102 ชุด โครงข่ายประสาทดัดเทียมใช้รอบการฝึกสอน 731 รอบค่าผิดพลาดจึงลดลงเป็น 0 %
3. ที่จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 136 ชุด โครงข่ายประสาทดัดเทียมใช้รอบการฝึกสอน 657 รอบค่าผิดพลาดจึงลดลงเป็น 0 %
4. ที่จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 170 ชุด โครงข่ายประสาทดัดเทียมใช้รอบการฝึกสอน 322 รอบค่าผิดพลาดจึงลดลงเป็น 0 %
5. ที่จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน 204 ชุด โครงข่ายประสาทดัดเทียมใช้รอบการฝึกสอน 318 รอบค่าผิดพลาดจึงลดลงเป็น 0 %

จากการนำเหตุการณ์เกิดฟอลต์ 34 เหตุการณ์มาทดสอบโครงข่ายประสาทดัดเทียมชนิด PNN ของแต่ละชุดข้อมูลฝึกสอนพบว่า PNN มีความแม่นยำสูงโดยทุกชุดข้อมูลฝึกสอนจะได้ค่าผิดพลาดต่ำสุดเป็น 0% มีเพียงจำนวนรอบของการฝึกสอนจะต่างกัน

เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

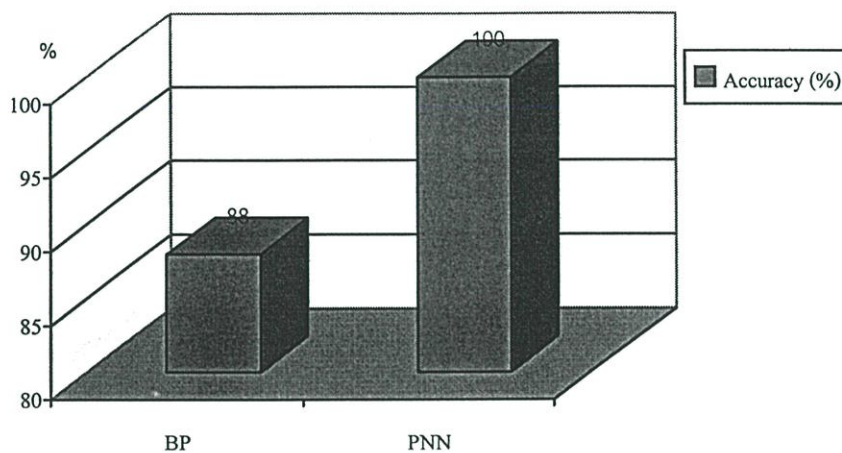
โครงข่ายประสาทดัดเทียมชนิด PNN ใช้เวลาในการฝึกสอน ในชุดข้อมูลฝึกสอน 170 ชุดที่ได้ค่าผิดพลาดต่ำสุดเป็น 0 ใช้เวลา 1.335 นาที นับว่าเร็วมาก

6.4 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับค่าตอบจริงแต่ละสถานีไฟฟ้า

6.4.1 สถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอก

ตารางที่ 6.7 เปรียบเทียบเอาต์พุตระหว่างโครงข่ายประสาทเทียมทั้งสองชนิดที่ 90 ชุดฝึกสอน

Outage Equipment NCO-Substation	Output ของ ANN	
	BP	PNN
1.500 kV BUS 1	500 kV BUS 1	500 kV BUS 1
2.500 kV BUS 2	500 kV BUS 2	500 kV BUS 2
3.230 kV BUS 1A	500 kV BUS 2	230 kV BUS 1A
4.230 kV BUS 2A	230 kV BUS 2A	230 kV BUS 2A
5.230 kV BUS 1B	230 kV BUS 1B	230 kV BUS 1B
6.230 kV BUS 2B	230 kV BUS 2B	230 kV BUS 2B
7.500 kV Line to WN#1	500 kV Line to WN#1	500 kV Line to WN#1
8.500 kV Line to WN#2	500 kV Line to WN#2	500 kV Line to WN#2
9.500 kV Line to WN#3	500 kV Line to WN#3	500 kV Line to WN#3
10.500 kV Line to WN#4	500 kV Line to WN#4	500 kV Line to WN#4
11.500 kV Line to TTK#1	500 kV Line to TTK#1	500 kV Line to TTK#1
12.230 kV Line to BPK#1	230 kV Line to BPK#1	230 kV Line to BPK#1
13.230 kV Line to BPK#2	230 kV Line to ON#1	230 kV Line to BPK#2
14.230 kV Line to ON#1	230 kV Line to ON#1	230 kV Line to ON#1
15.230 kV Line to ON#2	230 kV Line to ON#2	230 kV Line to ON#2
16.Transformer KT1A	Transformer KT1A	Transformer KT1A
17.Transformer KT2A	Transformer KT2A	Transformer KT2A
18.Transformer KT4A	Transformer KT2A	Transformer KT4A
19.Transformer KT5A	Transformer KT5A	Transformer KT5A
20.Transformer KT6A	Transformer KT6A	Transformer KT6A
21.Shunt Reactor SR1	Shunt Reactor SR1	Shunt Reactor SR1
22.230 kV C-Bank step 1	230 kV C-Bank step 1	230 kV C-Bank step 1
23.230 kV C-Bank step 2	230 kV C-Bank step 2	230 kV C-Bank step 2
24.230 kV C-Bank step 3	230 kV C-Bank step 3	230 kV C-Bank step 3
25.115 kV C-Bank step 4	115 kV C-Bank step 4	115 kV C-Bank step 4



รูปที่ 6.9 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งพอลต์ NCO-Sub (ชุดฝึกสอน 90 ชุด)

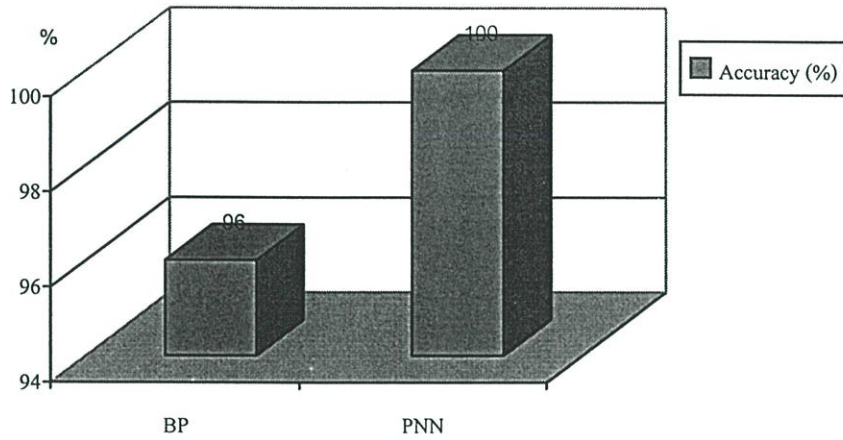
จากผลการทดลองตารางที่ 6.7 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

การระบุตำแหน่งพอลต์

1. โครงข่ายประสาทเทียมชนิด BP ระบุตำแหน่งพอลต์ ผิดพลาด 3 ชุด จากชุดทดสอบ 25 ชุด
2. โครงข่ายประสาทเทียมชนิด PNN ระบุตำแหน่งพอลต์ ได้ถูกต้องหมด

ตารางที่ 6.8 เปรียบเทียบเอาต์พุตระหว่างโครงข่ายประสาทย่อยที่เชื่อมทั้งสองชนิดที่ 120 ชุดฝึกสอน

Outage Equipment NCO-Substation	Output ของ ANN	
	BP	PNN
1.500 kV BUS 1	500 kV BUS 1	500 kV BUS 1
2.500 kV BUS 2	500 kV BUS 2	500 kV BUS 2
3.230 kV BUS 1A	230 kV BUS 1A	230 kV BUS 1A
4.230 kV BUS 2A	230 kV BUS 2A	230 kV BUS 2A
5.230 kV BUS 1B	230 kV BUS 1B	230 kV BUS 1B
6.230 kV BUS 2B	230 kV BUS 2B	230 kV BUS 2B
7.500 kV Line to WN#1	500 kV Line to WN#1	500 kV Line to WN#1
8.500 kV Line to WN#2	500 kV Line to WN#2	500 kV Line to WN#2
9.500 kV Line to WN#3	500 kV Line to WN#3	500 kV Line to WN#3
10.500 kV Line to WN#4	500 kV Line to WN#4	500 kV Line to WN#4
11.500 kV Line to TTK#1	500 kV Line to TTK#1	500 kV Line to TTK#1
12.230 kV Line to BPK#1	230 kV Line to BPK#1	230 kV Line to BPK#1
13.230 kV Line to BPK#2	230 kV Line to BPK#2	230 kV Line to BPK#2
14.230 kV Line to ON#1	230 kV Line to ON#1	230 kV Line to ON#1
15.230 kV Line to ON#2	230 kV Line to ON#2	230 kV Line to ON#2
16.Transformer KT1A	Transformer KT1A	Transformer KT1A
17.Transformer KT2A	<i>Transformer KT1A</i>	Transformer KT2A
18.Transformer KT4A	Transformer KT4A	Transformer KT4A
19.Transformer KT5A	Transformer KT5A	Transformer KT5A
20.Transformer KT6A	Transformer KT6A	Transformer KT6A
21.Shunt Reactor SR1	Shunt Reactor SR1	Shunt Reactor SR1
22.230 kV C-Bank step 1	230 kV C-Bank step 1	230 kV C-Bank step 1
23.230 kV C-Bank step 2	230 kV C-Bank step 2	230 kV C-Bank step 2
24.230 kV C-Bank step 3	230 kV C-Bank step 3	230 kV C-Bank step 3
25.115 kV C-Bank step 4	115 kV C-Bank step 4	115 kV C-Bank step 4



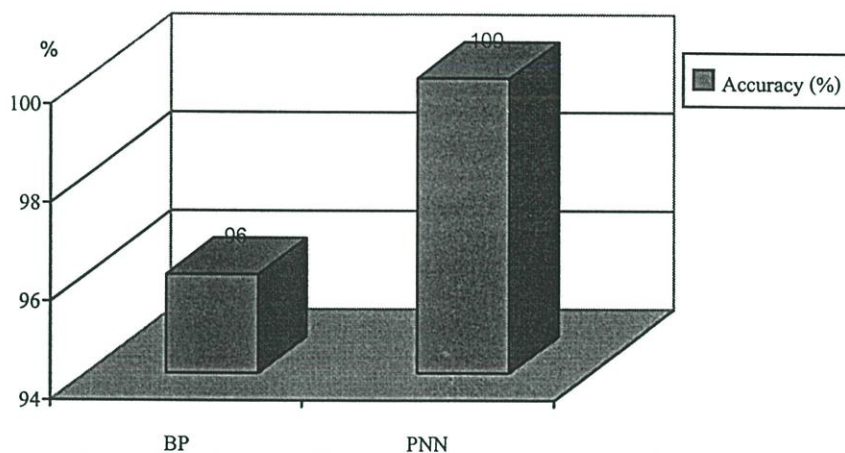
รูปที่ 6.10 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งพอลต์ NCO-Sub (ชุดฝึกสอน 120 ชุด)

จากผลการทดลองตารางที่ 6.8 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้
การระบุตำแหน่งพอลต์

1. โครงข่ายประสาทเทียมชนิด BP ระบุตำแหน่งพอลต์ ผิดพลาด 1 ชุด จากชุดทดสอบ 25 ชุด
2. โครงข่ายประสาทเทียมชนิด PNN ระบุตำแหน่งพอลต์ ได้ถูกต้องหมด

ตารางที่ 6.9 เปรียบเทียบเอาต์พุตระหว่างโครงข่ายประสาทย่อยทั้งหมดทั้งสองชนิดที่ 150 ชุดฝึกสอน

Outage Equipment NCO-Substation	Output ของ ANN	
	BP	PNN
1.500 kV BUS 1	500 kV BUS 1	500 kV BUS 1
2.500 kV BUS 2	500 kV BUS 2	500 kV BUS 2
3.230 kV BUS 1A	230 kV BUS 1A	230 kV BUS 1A
4.230 kV BUS 2A	230 kV BUS 2A	230 kV BUS 2A
5.230 kV BUS 1B	230 kV BUS 1B	230 kV BUS 1B
6.230 kV BUS 2B	230 kV BUS 2B	230 kV BUS 2B
7.500 kV Line to WN#1	500 kV Line to WN#1	500 kV Line to WN#1
8.500 kV Line to WN#2	500 kV Line to WN#2	500 kV Line to WN#2
9.500 kV Line to WN#3	500 kV Line to WN#3	500 kV Line to WN#3
10.500 kV Line to WN#4	500 kV Line to WN#4	500 kV Line to WN#4
11.500 kV Line to TTK#1	500 kV Line to TTK#1	500 kV Line to TTK#1
12.230 kV Line to BPK#1	230 kV Line to BPK#1	230 kV Line to BPK#1
13.230 kV Line to BPK#2	230 kV Line to BPK#2	230 kV Line to BPK#2
14.230 kV Line to ON#1	230 kV Line to ON#1	230 kV Line to ON#1
15.230 kV Line to ON#2	230 kV Line to ON#2	230 kV Line to ON#2
16.Transformer KT1A	Transformer KT1A	Transformer KT1A
17.Transformer KT2A	<i>Transformer KT4A</i>	Transformer KT2A
18.Transformer KT4A	Transformer KT4A	Transformer KT4A
19.Transformer KT5A	Transformer KT5A	Transformer KT5A
20.Transformer KT6A	Transformer KT6A	Transformer KT6A
21.Shunt Reactor SR1	Shunt Reactor SR1	Shunt Reactor SR1
22.230 kV C-Bank step 1	230 kV C-Bank step 1	230 kV C-Bank step 1
23.230 kV C-Bank step 2	230 kV C-Bank step 2	230 kV C-Bank step 2
24.230 kV C-Bank step 3	230 kV C-Bank step 3	230 kV C-Bank step 3
25.115 kV C-Bank step 4	115 kV C-Bank step 4	115 kV C-Bank step 4



รูปที่ 6.11 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งพอลต์ NCO-Sub (ชุดฝึกสอน 150 ชุด)

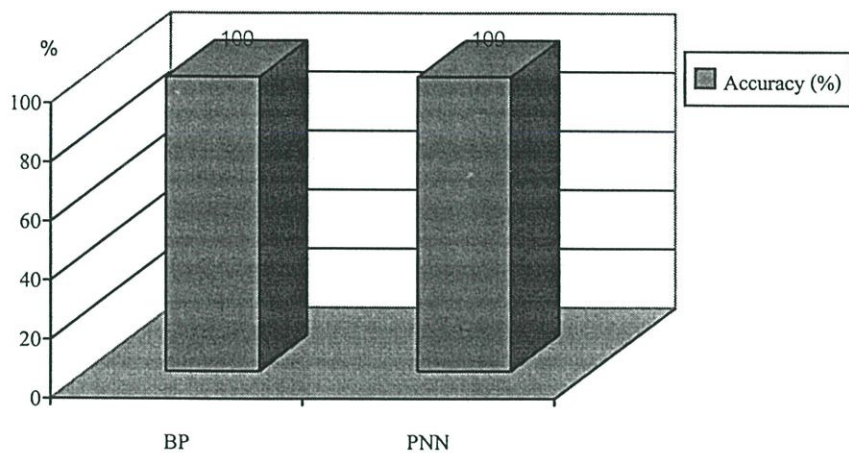
จากผลการทดลองตารางที่ 6.9 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

การระบุตำแหน่งพอลต์

1. โครงข่ายประสาทเทียมชนิด BP ระบุตำแหน่งพอลต์ ผิดพลาด 1 ชุด จากชุดทดสอบ 25 ชุด
2. โครงข่ายประสาทเทียมชนิด PNN ระบุตำแหน่งพอลต์ ได้ถูกต้องหมด

ตารางที่ 6.10 เปรียบเทียบเอาต์พุตระหว่างโครงข่ายประสาทยุติทั้งสองชนิดที่ 180 ชุดฝึกสอน

Outage Equipment NCO-Substation	Output ของ ANN	
	BP	PNN
1.500 kV BUS 1	500 kV BUS 1	500 kV BUS 1
2.500 kV BUS 2	500 kV BUS 2	500 kV BUS 2
3.230 kV BUS 1A	230 kV BUS 1A	230 kV BUS 1A
4.230 kV BUS 2A	230 kV BUS 2A	230 kV BUS 2A
5.230 kV BUS 1B	230 kV BUS 1B	230 kV BUS 1B
6.230 kV BUS 2B	230 kV BUS 2B	230 kV BUS 2B
7.500 kV Line to WN#1	500 kV Line to WN#1	500 kV Line to WN#1
8.500 kV Line to WN#2	500 kV Line to WN#2	500 kV Line to WN#2
9.500 kV Line to WN#3	500 kV Line to WN#3	500 kV Line to WN#3
10.500 kV Line to WN#4	500 kV Line to WN#4	500 kV Line to WN#4
11.500 kV Line to TTK#1	500 kV Line to TTK#1	500 kV Line to TTK#1
12.230 kV Line to BPK#1	230 kV Line to BPK#1	230 kV Line to BPK#1
13.230 kV Line to BPK#2	230 kV Line to BPK#2	230 kV Line to BPK#2
14.230 kV Line to ON#1	230 kV Line to ON#1	230 kV Line to ON#1
15.230 kV Line to ON#2	230 kV Line to ON#2	230 kV Line to ON#2
16.Transformer KT1A	Transformer KT1A	Transformer KT1A
17.Transformer KT2A	Transformer KT2A	Transformer KT2A
18.Transformer KT4A	Transformer KT4A	Transformer KT4A
19.Transformer KT5A	Transformer KT5A	Transformer KT5A
20.Transformer KT6A	Transformer KT6A	Transformer KT6A
21.Shunt Reactor SR1	Shunt Reactor SR1	Shunt Reactor SR1
22.230 kV C-Bank step 1	230 kV C-Bank step 1	230 kV C-Bank step 1
23.230 kV C-Bank step 2	230 kV C-Bank step 2	230 kV C-Bank step 2
24.230 kV C-Bank step 3	230 kV C-Bank step 3	230 kV C-Bank step 3
25.115 kV C-Bank step 4	115 kV C-Bank step 4	115 kV C-Bank step 4



รูปที่ 6.12 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งพอลต์ NCO-Sub (ชุดฝึกสอน 180 ชุด)

จากผลการทดลองตารางที่ 6.10 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

การระบุตำแหน่งพอลต์

1. โครงข่ายประสาทเทียมชนิด BP ระบุตำแหน่งพอลต์ ได้ถูกต้องหมดจากชุดทดสอบ 25 ชุด
2. โครงข่ายประสาทเทียมชนิด PNN ระบุตำแหน่งพอลต์ ได้ถูกต้องหมด

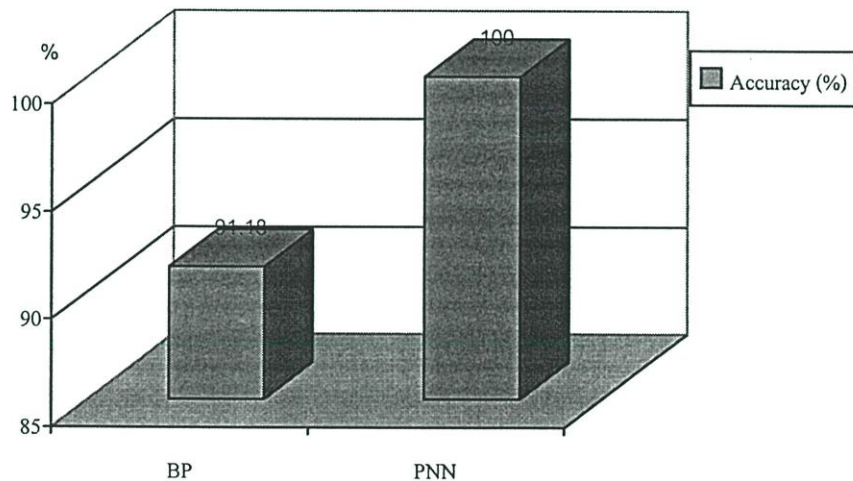
6.4.2 สถานีไฟฟ้าแรงสูงไทรน้อย

ตารางที่ 6.11 เปรียบเทียบเอาต์พุตระหว่างโครงข่ายประสาทเทียมทั้งสองชนิดที่ 102 ชุดฝึกสอน

Outage Equipment SNO-Substation	Output ของ ANN	
	BP	PNN
1.500 kV BUS 1	500 kV BUS 1	500 kV BUS 1
2.500 kV BUS 2	500 kV BUS 2	500 kV BUS 2
3.230 kV BUS 1	230 kV BUS 1	230 kV BUS 1
4.230 kV BUS 2	230 kV BUS 2	230 kV BUS 2
5.115 kV BUS 1	115 kV BUS 1	115 kV BUS 1
6.115 kV BUS 2	115 kV BUS 2	115 kV BUS 2
7.500 kV Line to WN#1	500 kV Line to WN#1	500 kV Line to WN#1
8.500 kV Line to WN#2	500 kV Line to WN#2	500 kV Line to WN#2
9.500 kV Line to WN#3	500 kV Line to WN#3	500 kV Line to WN#3
10.500 kV Line to CBG#1	500 kV Line to CBG#1	500 kV Line to CBG#1
11.500 kV Line to CBG#2	500 kV Line to CBG#3	500 kV Line to CBG#2
12.500 kV Line to CBG#3	500 kV Line to CBG#3	500 kV Line to CBG#3
13.230 kV Line to RS#1	230 kV Line to RS#1	230 kV Line to RS#1
14.230 kV Line to RS#2	230 kV Line to RS#2	230 kV Line to RS#2
15.230 kV Line to BN#1	230 kV Line to BN#1	230 kV Line to BN#1
16.230 kV Line to BN#2	230 kV Line to BN#2	230 kV Line to BN#2
17.230 kV Line to BP2#1	230 kV Line to BP2#2	230 kV Line to BP2#1
18.230 kV Line to BP2#2	230 kV Line to BP2#2	230 kV Line to BP2#2
19.230 kV Line to AT2#1	230 kV Line to AT2#1	230 kV Line to AT2#1
20.230 kV Line to AT2#2	230 kV Line to AT2#2	230 kV Line to AT2#2
21.115 kV Line to PEA#1	115 kV Line to PEA#1	115 kV Line to PEA#1
22.115 kV Line to PEA#2	115 kV Line to PEA#2	115 kV Line to PEA#2
23.Transformer KT1A	Transformer KT1A	Transformer KT1A
24.Transformer KT2A	Transformer KT2A	Transformer KT2A

ตารางที่ 6.11 ต่อ

Outage Equipment SNO-Substation	Output ของ ANN	
	BP	PNN
25. Transformer KT5A	Transformer KT5A	Transformer KT5A
26. Transformer KT6A	Transformer KT6A	Transformer KT6A
27. Transformer KT7A	Transformer KT7A	Transformer KT7A
28. 115 kV C-Bank step 1	115 kV C-Bank step 1	115 kV C-Bank step 1
29. 115 kV C-Bank step 2	115 kV C-Bank step 2	115 kV C-Bank step 2
30. 115 kV C-Bank step 3	115 kV C-Bank step 3	115 kV C-Bank step 3
31. 115 kV C-Bank step 4	115 kV C-Bank step 4	115 kV C-Bank step 4
32. 115 kV C-Bank step 5	115 kV C-Bank step 5	115 kV C-Bank step 5
33. 230 kV C-Bank step 6	230 kV C-Bank step 6	230 kV C-Bank step 6
34. 230 kV C-Bank step 7	<i>230 kV C-Bank step 6</i>	230 kV C-Bank step 7



รูปที่ 6.13 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งฟอลต์ SNO-Sub (ชุดฝึกสอน 102 ชุด)

จากผลการทดลองตารางที่ 6.11 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

การระบุตำแหน่งฟอลต์

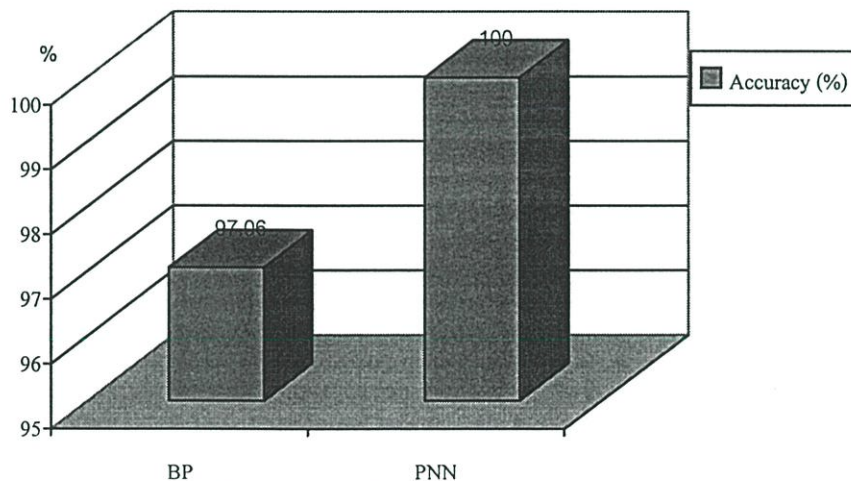
1. โครงข่ายประสาทยูนิท BP ระบุตำแหน่งฟอลต์ ผิดพลาด 3 ชุดจากชุดทดสอบ 34 ชุด
2. โครงข่ายประสาทยูนิท PNN ระบุตำแหน่งฟอลต์ ได้ถูกต้องหมด

ตารางที่ 6.12 เปรียบเทียบเอาต์พุตระหว่างโครงข่ายประสาทเทียมนทั้งสองชนิดที่ 136 ชุดฝึกสอน

Outage Equipment SNO-Substation	Output ของ ANN	
	BP	PNN
1.500 kV BUS 1	500 kV BUS 1	500 kV BUS 1
2.500 kV BUS 2	500 kV BUS 2	500 kV BUS 2
3.230 kV BUS 1	230 kV BUS 1	230 kV BUS 1
4.230 kV BUS 2	230 kV BUS 2	230 kV BUS 2
5.115 kV BUS 1	115 kV BUS 1	115 kV BUS 1
6.115 kV BUS 2	115 kV BUS 2	115 kV BUS 2
7.500 kV Line to WN#1	500 kV Line to WN#1	500 kV Line to WN#1
8.500 kV Line to WN#2	500 kV Line to WN#2	500 kV Line to WN#2
9.500 kV Line to WN#3	500 kV Line to WN#3	500 kV Line to WN#3
10.500 kV Line to CBG#1	500 kV Line to CBG#1	500 kV Line to CBG#1
11.500 kV Line to CBG#2	500 kV Line to CBG#2	500 kV Line to CBG#2
12.500 kV Line to CBG#3	500 kV Line to CBG#3	500 kV Line to CBG#3
13.230 kV Line to RS#1	230 kV Line to CBG#3	230 kV Line to RS#1
14.230 kV Line to RS#2	230 kV Line to RS#2	230 kV Line to RS#2
15.230 kV Line to BN#1	230 kV Line to BN#1	230 kV Line to BN#1
16.230 kV Line to BN#2	230 kV Line to BN#2	230 kV Line to BN#2
17.230 kV Line to BP2#1	230 kV Line to BP2#2	230 kV Line to BP2#1
18.230 kV Line to BP2#2	230 kV Line to BP2#2	230 kV Line to BP2#2
19.230 kV Line to AT2#1	230 kV Line to AT2#1	230 kV Line to AT2#1
20.230 kV Line to AT2#2	230 kV Line to AT2#2	230 kV Line to AT2#2
21.115 kV Line to PEA#1	115 kV Line to PEA#1	115 kV Line to PEA#1
22.115 kV Line to PEA#2	115 kV Line to PEA#2	115 kV Line to PEA#2
23.Transformer KT1A	Transformer KT1A	Transformer KT1A
24.Transformer KT2A	Transformer KT2A	Transformer KT2A

ตารางที่ 6.12 ต่อ

Outage Equipment SNO-Substation	Output ของ ANN	
	BP	PNN
25. Transformer KT5A	Transformer KT5A	Transformer KT5A
26. Transformer KT6A	Transformer KT6A	Transformer KT6A
27. Transformer KT7A	Transformer KT7A	Transformer KT7A
28. 115 kV C-Bank step 1	115 kV C-Bank step 1	115 kV C-Bank step 1
29. 115 kV C-Bank step 2	115 kV C-Bank step 2	115 kV C-Bank step 2
30. 115 kV C-Bank step 3	115 kV C-Bank step 3	115 kV C-Bank step 3
31. 115 kV C-Bank step 4	115 kV C-Bank step 4	115 kV C-Bank step 4
32. 115 kV C-Bank step 5	115 kV C-Bank step 5	115 kV C-Bank step 5
33. 230 kV C-Bank step 6	230 kV C-Bank step 6	230 kV C-Bank step 6
34. 230 kV C-Bank step 7	230 kV C-Bank step 7	230 kV C-Bank step 7



รูปที่ 6.14 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งฟอลต์ SNO-Sub (ชุดฝึกสอน 136 ชุด)

จากผลการทดลองตารางที่ 6.12 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

การระบุตำแหน่งฟอลต์

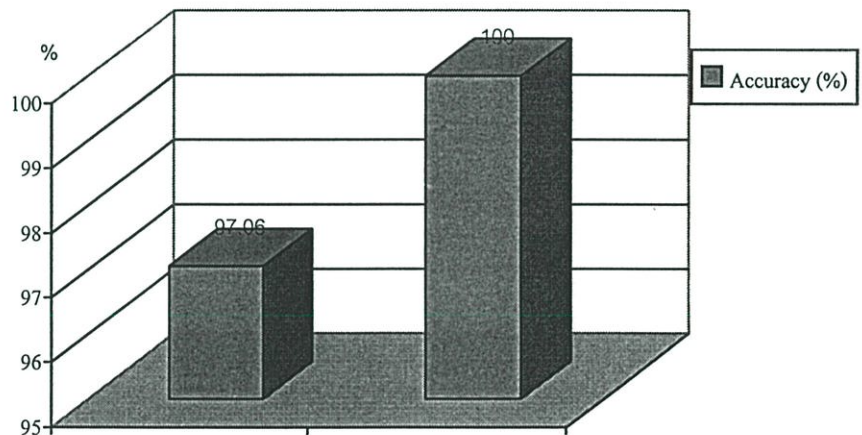
1. โครงข่ายประสาทยูนิท BP ระบุตำแหน่งฟอลต์ ผิดพลาด 1 ชุด จากชุดทดสอบ 34 ชุด
2. โครงข่ายประสาทยูนิท PNN ระบุตำแหน่งฟอลต์ ได้ถูกต้องหมด

ตารางที่ 6.13 เปรียบเทียบเอาต์พุตระหว่างโครงข่ายประสาทย่อยทั้งหมดทั้งสองชนิดที่ 170 ชุดฝึกสอน

Outage Equipment SNO-Substation	Output ของ ANN	
	BP	PNN
1.500 kV BUS 1	500 kV BUS 1	500 kV BUS 1
2.500 kV BUS 2	500 kV BUS 2	500 kV BUS 2
3.230 kV BUS 1	230 kV BUS 1	230 kV BUS 1
4.230 kV BUS 2	230 kV BUS 2	230 kV BUS 2
5.115 kV BUS 1	115 kV BUS 1	115 kV BUS 1
6.115 kV BUS 2	115 kV BUS 2	115 kV BUS 2
7.500 kV Line to WN#1	500 kV Line to WN#1	500 kV Line to WN#1
8.500 kV Line to WN#2	500 kV Line to WN#2	500 kV Line to WN#2
9.500 kV Line to WN#3	500 kV Line to WN#3	500 kV Line to WN#3
10.500 kV Line to CBG#1	500 kV Line to CBG#1	500 kV Line to CBG#1
11.500 kV Line to CBG#2	500 kV Line to CBG#2	500 kV Line to CBG#2
12.500 kV Line to CBG#3	500 kV Line to CBG#3	500 kV Line to CBG#3
13.230 kV Line to RS#1	230 kV Line to RS#1	230 kV Line to RS#1
14.230 kV Line to RS#2	230 kV Line to RS#2	230 kV Line to RS#2
15.230 kV Line to BN#1	230 kV Line to BN#1	230 kV Line to BN#1
16.230 kV Line to BN#2	230 kV Line to BN#2	230 kV Line to BN#2
17.230 kV Line to BP2#1	230 kV Line to BP2#1	230 kV Line to BP2#1
18.230 kV Line to BP2#2	230 kV Line to BP2#2	230 kV Line to BP2#2
19.230 kV Line to AT2#1	<i>230 kV Line to BP2#2</i>	230 kV Line to AT2#1
20.230 kV Line to AT2#2	230 kV Line to AT2#2	230 kV Line to AT2#2
21.115 kV Line to PEA#1	115 kV Line to PEA#1	115 kV Line to PEA#1
22.115 kV Line to PEA#2	115 kV Line to PEA#2	115 kV Line to PEA#2
23. Transformer KT1A	Transformer KT1A	Transformer KT1A
24. Transformer KT2A	Transformer KT2A	Transformer KT2A

ตารางที่ 6.13 ต่อ

Outage Equipment SNO-Substation	Output ของ ANN	
	BP	PNN
25. Transformer KT5A	Transformer KT5A	Transformer KT5A
26. Transformer KT6A	Transformer KT6A	Transformer KT6A
27. Transformer KT7A	Transformer KT7A	Transformer KT7A
28. 115 kV C-Bank step 1	115 kV C-Bank step 1	115 kV C-Bank step 1
29. 115 kV C-Bank step 2	115 kV C-Bank step 2	115 kV C-Bank step 2
30. 115 kV C-Bank step 3	115 kV C-Bank step 3	115 kV C-Bank step 3
31. 115 kV C-Bank step 4	115 kV C-Bank step 4	115 kV C-Bank step 4
32. 115 kV C-Bank step 5	115 kV C-Bank step 5	115 kV C-Bank step 5
33. 230 kV C-Bank step 6	230 kV C-Bank step 6	230 kV C-Bank step 6
34. 230 kV C-Bank step 7	230 kV C-Bank step 7	230 kV C-Bank step 7



รูปที่ 6.15 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งฟอลต์ SNO-Sub (ชุดฝึกสอน 170 ชุด)

จากผลการทดลองตารางที่ 6.13 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้
การระบุตำแหน่งฟอลต์

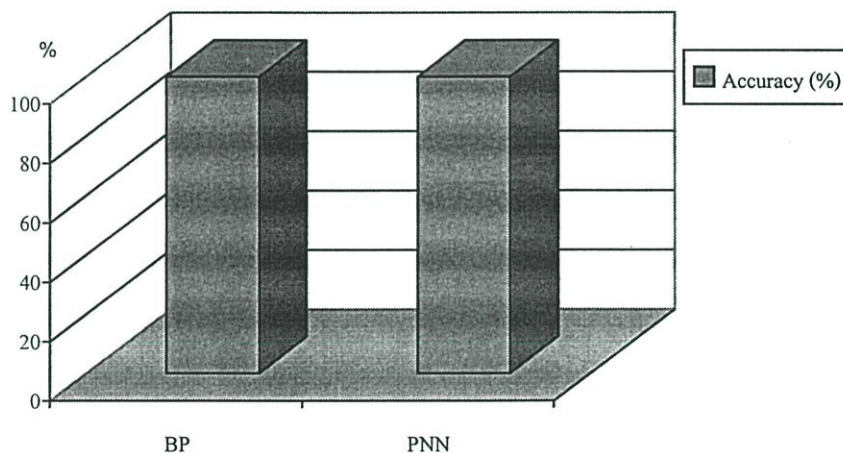
1. โครงข่ายประสาทยูนิท BP ระบุตำแหน่งฟอลต์ ผิดพลาด 1 ชุด จากชุดทดสอบ 34 ชุด
2. โครงข่ายประสาทยูนิท PNN ระบุตำแหน่งฟอลต์ ได้ถูกต้องหมด

ตารางที่ 6.14 เปรียบเทียบเอาต์พุตระหว่างโรงจ่ายประสาทดัดแปลงทั้งสองชนิดที่ 204 ชุดฝึกสอน

Outage Equipment SNO-Substation	Output ของ ANN	
	BP	PNN
1.500 kV BUS 1	500 kV BUS 1	500 kV BUS 1
2.500 kV BUS 2	500 kV BUS 2	500 kV BUS 2
3.230 kV BUS 1	230 kV BUS 1	230 kV BUS 1
4.230 kV BUS 2	230 kV BUS 2	230 kV BUS 2
5.115 kV BUS 1	115 kV BUS 1	115 kV BUS 1
6.115 kV BUS 2	115 kV BUS 2	115 kV BUS 2
7.500 kV Line to WN#1	500 kV Line to WN#1	500 kV Line to WN#1
8.500 kV Line to WN#2	500 kV Line to WN#2	500 kV Line to WN#2
9.500 kV Line to WN#3	500 kV Line to WN#3	500 kV Line to WN#3
10.500 kV Line to CBG#1	500 kV Line to CBG#1	500 kV Line to CBG#1
11.500 kV Line to CBG#2	500 kV Line to CBG#2	500 kV Line to CBG#2
12.500 kV Line to CBG#3	500 kV Line to CBG#3	500 kV Line to CBG#3
13.230 kV Line to RS#1	230 kV Line to RS#1	230 kV Line to RS#1
14.230 kV Line to RS#2	230 kV Line to RS#2	230 kV Line to RS#2
15.230 kV Line to BN#1	230 kV Line to BN#1	230 kV Line to BN#1
16.230 kV Line to BN#2	230 kV Line to BN#2	230 kV Line to BN#2
17.230 kV Line to BP2#1	230 kV Line to BP2#1	230 kV Line to BP2#1
18.230 kV Line to BP2#2	230 kV Line to BP2#2	230 kV Line to BP2#2
19.230 kV Line to AT2#1	230 kV Line to AT2#1	230 kV Line to AT2#1
20.230 kV Line to AT2#2	230 kV Line to AT2#2	230 kV Line to AT2#2
21.115 kV Line to PEA#1	115 kV Line to PEA#1	115 kV Line to PEA#1
22.115 kV Line to PEA#2	115 kV Line to PEA#2	115 kV Line to PEA#2
23.Transformer KT1A	Transformer KT1A	Transformer KT1A
24.Transformer KT2A	Transformer KT2A	Transformer KT2A

ตารางที่ 6.14 ต่อ

Outage Equipment SNO-Substation	Output ของ ANN	
	BP	PNN
25. Transformer KT5A	Transformer KT5A	Transformer KT5A
26. Transformer KT6A	Transformer KT6A	Transformer KT6A
27. Transformer KT7A	Transformer KT7A	Transformer KT7A
28. 115 kV C-Bank step 1	115 kV C-Bank step 1	115 kV C-Bank step 1
29. 115 kV C-Bank step 2	115 kV C-Bank step 2	115 kV C-Bank step 2
30. 115 kV C-Bank step 3	115 kV C-Bank step 3	115 kV C-Bank step 3
31. 115 kV C-Bank step 4	115 kV C-Bank step 4	115 kV C-Bank step 4
32. 115 kV C-Bank step 5	115 kV C-Bank step 5	115 kV C-Bank step 5
33. 230 kV C-Bank step 6	230 kV C-Bank step 6	230 kV C-Bank step 6
34. 230 kV C-Bank step 7	230 kV C-Bank step 7	230 kV C-Bank step 7



รูปที่ 6.16 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งฟอลต์ SNO-Sub (ชุดฝึกสอน 204 ชุด)

จากผลการทดลองตารางที่ 6.14 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้
การระบุตำแหน่งฟอลต์

1. โครงข่ายประสาทยูนิท BP ระบุตำแหน่งฟอลต์ได้ถูกต้องทั้งหมด จากชุดทดสอบ 34 ชุด
2. โครงข่ายประสาทยูนิท PNN ระบุตำแหน่งฟอลต์ ได้ถูกต้องหมด

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยการหาตำแหน่งฟอลต์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้ศึกษาวิจัยและมีขั้นตอนตามที่ได้นำเสนอมาแล้วนั้น สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ที่มาของแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย เนื่องจากการควบคุมการจ่ายไฟฟ้าที่ศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าและสถานีไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ใช้ระบบคอมพิวเตอร์ควบคุม (EGAT-SCADA) เมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้นที่อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้าเช่น ที่สายส่ง หรือหม้อแปลง จะมี Alarm Signal จำนวนมากส่งไปที่ EGAT-SCADA ทั้งที่สถานีไฟฟ้าและศูนย์ควบคุมพนักงานที่เข้าเวรต้องใช้เวลาในการสรุป Alarm Signal เหล่านั้น กว่าจะทราบว่าเกิดฟอลต์ที่ใดต้องใช้เวลาพอสมควร

ดังนั้นถ้ามีการนำสถานะของรีเลย์ป้องกันและเซอร์กิตเบรกเกอร์มาเป็นข้อมูลอินพุทให้โครงข่ายประสาทเทียมได้เรียนรู้และช่วยระบุตำแหน่งฟอลต์ว่าเป็นที่ใดในสถานีไฟฟ้า ก็จะช่วยลดเวลาในการนำระบบไฟฟ้ากลับสู่สภาวะปกติได้

2. ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการวิจัย ได้นำข้อมูลรีเลย์ป้องกันและเซอร์กิตเบรกเกอร์สถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอกและไทรน้อยมาทำการศึกษาวิจัยเนื่องจากสถานีไฟฟ้าทั้งสองแห่งเป็นสถานีไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่รับพลังงานไฟฟ้ามาจากโรงไฟฟ้าหลักทางตอนเหนือและตะวันตกของประเทศ มีสายส่งระดับแรงดันหลักที่ใช้ส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าหลายสายส่งอีกทั้งมีหม้อแปลงขนาดใหญ่หลายชุดซึ่งขนาดและจำนวนอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าของทั้งสองสถานีมีขนาดและจำนวนใกล้เคียงกัน

3. การเตรียมข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา ข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะประกอบไปด้วย ชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบ โดยมีอินพุทเป็นสถานะรีเลย์ป้องกันและเซอร์กิตเบรกเกอร์ เอาต์พุทเป็นอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า โดยที่ข้อมูลอินพุทสัมพันธ์กับเอาต์พุทตามฟังก์ชันการทำงานของรีเลย์ป้องกัน ข้อมูลขั้นแรกจะอยู่ในรูปแบบเลขฐานสองแต่เนื่องจากมีจำนวนอินพุทมากในทางปฏิบัติทำให้ยากแก่การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม จึงได้ทำการนอร์มัลไลซ์ให้เป็นเลขฐานสิบแล้วจึงนำไปฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

4. ชนิดของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พิจารณาเลือกใช้โครงข่ายประสาทเทียมสองชนิดได้แก่

4.1 ชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (BP) โดยใช้ Levenberg-Marquardt algorithm ซึ่งมีประสิทธิภาพในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและไบแอสเหมาะสมกับจำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอนที่มีอยู่จำกัด

4.2 ชนิดความน่าจะเป็น (PNN) ซึ่งมีความรวดเร็วในการฝึกสอนสูง เพื่อนำมาเปรียบเทียบผลที่ได้ทั้งนี้เพื่อนำข้อมูลมาพิจารณาเลือกใช้ชนิดของโครงข่ายประสาทเทียมในการระบุพอลต์ต่อไป

5. การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมโดยกลุ่มของข้อมูลอินพุตที่ต่างกันสองกลุ่มได้แก่ กลุ่มแรกเป็นข้อมูลอินพุตสถานะของรีเลย์และเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีการขาดหายของสัญญาณ 1 สัญญาณ กลุ่มที่สองเป็นการเกินของสัญญาณอินพุต 1 สัญญาณ สำหรับชุดทดสอบเป็นชุดที่มีการครบถ้วนถูกต้องของสัญญาณอินพุต

โดยสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในงานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

5.1 ปริมาณของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบในปัญหาที่มีความซับซ้อนและมีขอบเขตในการเรียนรู้มากนั้น นอกจากจะต้องใช้ข้อมูลฝึกสอนที่มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอแล้วยังจำเป็นต้องมีจำนวนข้อมูลฝึกสอนที่เพียงพอจึงจะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วมีประสิทธิภาพสูง ส่วนปริมาณของข้อมูลทดสอบจะใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว

5.2 ค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส การเลือกค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสแบบสุ่มจะทำให้มีการฝึกสอนแต่ละรอบมีทิศทางการลู่ออกค่าตอบแตกต่างกัน

5.3 จำนวนครั้งของการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส จำนวนครั้งของการปรับค่าดังกล่าวจะต้องมากเพียงพอ เพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมสามารถคำนวณหาผลลัพธ์ (a) ได้ใกล้เคียงกับค่าตอบที่แท้จริง (t) มากที่สุด

5.4 จำนวนรอบของการฝึกสอน เนื่องจากวิธีการเลือกค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสเป็นการเลือกแบบสุ่ม จำนวนรอบของการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมในแต่ละโครงสร้างของโครงข่ายนั้นจะต้องเพียงพอให้เกิดการลู่ค่าดังกล่าวอย่างทั่วถึง

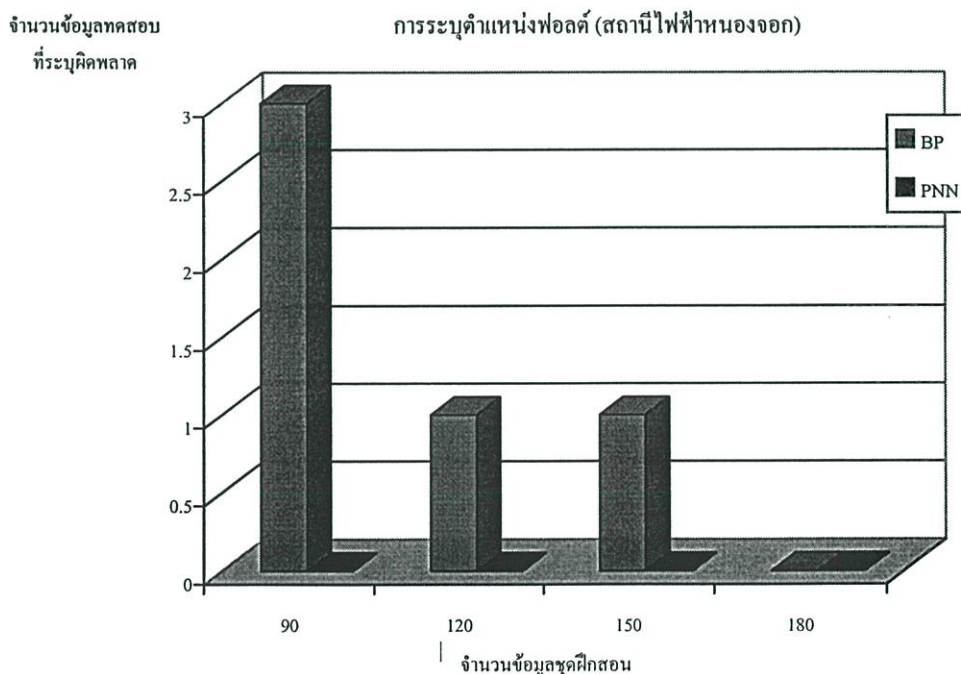
5.5 จำนวนโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องปรับเปลี่ยนจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนของโครงข่ายชนิดแพร่ค่าย้อนกลับเพื่อให้เมตริกซ์ของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสมีขนาดใหญ่เพียงพอในการคำนวณผลลัพธ์ (a) ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าตอบที่แท้จริง (t) มากที่สุด โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นมีโครงสร้างเดียวไม่มีการปรับโครงสร้าง

5.6 ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน เนื่องจากปัญหาที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นปัญหาชนิดที่เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องแบบไม่เชิงเส้นและมีความซับซ้อนมาก จึงเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน Log-sigmoid ซึ่งเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนที่สามารถหาอนุพันธ์ได้ในชั้นซ่อนทั้ง 2 ชั้นและฟังก์ชันถ่ายโอน Linear ในชั้นข้อมูลเอาต์พุต ในโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ สำหรับ

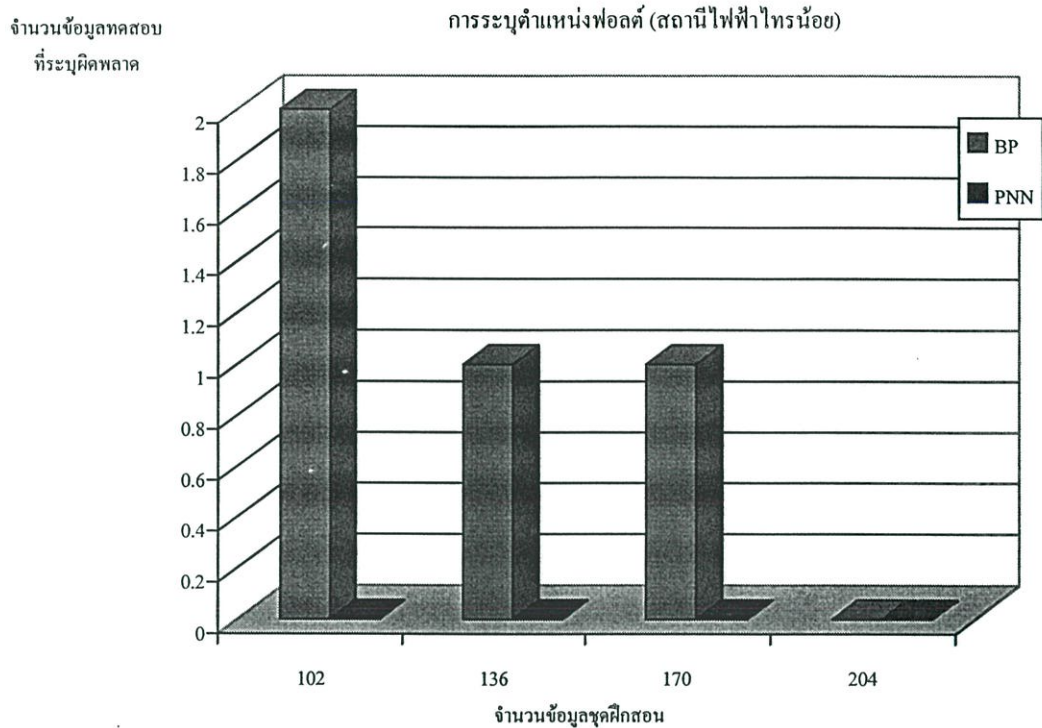
โครงข่ายประสาทยูนิฟิเคชันความน่าจะเป็นใช้ฟังก์ชันแบบฐานรศมีและแบบคอมแพ็คทีฟในชั้นฐานรศมีและชั้นเอาต์พุตตามลำดับ

6. ผลการทดสอบ เมื่อนำโครงข่ายประสาทยูนิฟิเคชันที่ผ่านการฝึกสอนสำหรับการระบุตำแหน่งฟอลต์ ของสถานีไฟฟ้าแรงสูง มาทดสอบด้วยชุดข้อมูลทดสอบ ผลการทดสอบพบว่าโครงข่ายประสาทยูนิฟิเคชันทั้งชนิดแพร่ค่าย้อนกลับและฐานรศมีให้คำตอบในการระบุตำแหน่งฟอลต์อยู่ในระดับดีและดีมากตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 7.1 และ 7.2 ค่าผิดพลาดของคำตอบที่ได้ต่ำสุดคือ 0% โดยเมื่อจำนวนรอบของการฝึกสอนมากขึ้น โครงข่ายประสาทยูนิฟิเคชันสามารถเรียนรู้ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โครงข่ายประสาทยูนิฟิเคชันความน่าจะเป็นจะใช้เวลาในการฝึกสอนและทดสอบน้อยกว่าชนิดแพร่ค่าย้อนกลับซึ่งผลอันนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพัฒนาระบบ EGAT-SCADA ได้เป็นอย่างดีเพราะต้องการทั้งความถูกต้องรวดเร็วในการนำระบบกลับสู่สภาวะปกติ

แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากการฝึกสอนโครงข่ายประสาทยูนิฟิเคชันใช้ข้อมูลที่เป็นลักษณะข้อมูลที่มีอินพุตเป็นการขาดและเกินของสัญญาณสถานะของรีเลย์และเซอร์กิตเบรกเกอร์ ส่วนข้อมูลการทดสอบเป็นข้อมูลที่มีอินพุตถูกต้องครบถ้วน จึงทำให้ต้องจัดเตรียมข้อมูลจำนวนมากในการฝึกสอนเพื่อให้โครงข่ายประสาทยูนิฟิเคชันเรียนรู้ได้อย่างครอบคลุมทั่วถึง ซึ่งในทางกลับกันถ้านำข้อมูลที่ครบถ้วนถูกต้อง ไปฝึกสอนและนำข้อมูลที่ขาดเกิน ไปทดสอบ จำนวนข้อมูลที่จัดเตรียมจะน้อยกว่าซึ่งเห็นควรได้รับการค้นคว้าวิจัยต่อไป



รูปที่ 7.1 กราฟแสดงค่าผิดพลาดของจำนวนชุดทดสอบในการระบุตำแหน่งฟอลต์ที่จำนวนชุดฝึกสอนต่างๆ กัน NCO-Sub



รูปที่ 7.2 กราฟแสดงค่าผิดพลาดของจำนวนชุดทดสอบในการระบุตำแหน่งฟอลต์ที่จำนวนชุดฝึกสอนต่างๆ กัน SNO-Sub

7. สิ่งที่ควรได้รับการพัฒนาต่อไป

7.1 พัฒนานำไปสร้างโปรแกรมใช้งานเข้ากับระบบ EGAT-SCADA เพื่อให้การทดสอบเป็นแบบ On-line โดยนำข้อมูลอินพุทของสถานีรีเลย์และเบรกเกอร์มาจาก RTU. หลังจากเสร็จการฝึกสอนแบบ Off-line แล้วเพื่อเป็นเครื่องมือช่วยให้ข้อมูลการควบคุมจ่ายไฟฟ้าแก่พนักงานที่เข้าเวรที่สถานีไฟฟ้าและศูนย์ควบคุม

7.2 พัฒนาขั้นตอนการเตรียมข้อมูลฝึกสอนให้มีความรวดเร็วขึ้น เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนเป็นข้อค้อยของโครงข่ายประสาทเทียม เมื่อนำไปใช้ในการควบคุมการจ่ายไฟฟ้า

7.3 นำหลักการนี้ไปใช้วิเคราะห์การขัดข้องของเซอร์กิตเบรกเกอร์จาก Alarm signal เพื่อเป็นประโยชน์ในด้านการบำรุงรักษาได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชายชาญ โพรธิสาร “ การคำนวณหาค่าช่วงเวลาตัดกระแสวิกฤตของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้
โครงข่ายประสาทเทียม” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546
- [2] อรรถพล เง่าพิทักษ์กุล “การแปลงเวฟเส้นและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับ วิเคราะห์ฟอลต์
ในสายส่ง” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย,
สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547
- [3] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. คู่มือการใช้งานระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมสถานี
ไฟฟ้าแรงสูง. ปี 2539
- [4] ฝ่ายปฏิบัติการเขตนครหลวง. Substation Switching Diagram. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย,
ไทย, 1 มกราคม 2547
- [5] กองวิชาการปฏิบัติการอุปกรณ์ระบบส่ง , ฝ่ายควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า. คู่มือประกอบการใช้
Switching Diagram. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2 กุมภาพันธ์ 2531
- [6] แผนกระบบรีเลย์ 2 , กองระบบรีเลย์, ฝ่ายบำรุงรักษาระบบส่ง. เอกสารประกอบการบรรยาย
ระบบรีเลย์ป้องกันสายส่งและบัส. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- [7] แผนกระบบรีเลย์ 1 , กองระบบรีเลย์, ฝ่ายบำรุงรักษาระบบส่ง. 500 kV Relay Protection
System. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- [8] กองควบคุมเขตจ่ายกระแสไฟฟ้า , ฝ่ายควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า. Bus and Transformer
Protection. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- [9] คณะกรรมการวิชาการเขต 2 สาขาไฟฟ้า. Power Capacitor. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- [10] IEEE Thailand Section Relay Protection for Industrial Power System
- [11] คณะกรรมการวิชาการเขต 2 สาขาไฟฟ้า. Power Circuit Breaker. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่ง
ประเทศไทย
- [12] วรรัตน์ ภัทรอมรกุล, รศ. ดร. มนต์ สัจวรศิลป์. คู่มือการใช้ MATLAB ฉบับสมบูรณ์.
พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ Info press, เมษายน 2543.
- [13] Fausett Laurene. Fundamentals of Neural Networks. Englewood Cliffs, New Jersey :
Prentice Hall International, Inc. 1994.
- [14] H. Demuth and M. Beale. Neural Network Toolbox User’s Guide. The Math Works, Inc.
March 2001.

- [15] Prof. Leslie Smith. [Online]. Available : <ftp://ftp.sas.com/pub/neural/FAQ.html>. 1996.
- [16] C. M. Bishop. *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford : Oxford University Press. 1995.
- [17] B. D. Ripley. *Pattern Recognition and Neural Networks*. Cambridge : Cambridge University Press. 1996.
- [18] S. Chen, C. F. N. Cowan and P. M. Grant. “**Orthogonal Least Squares Learning Algorithm for Radial Basis Function Networks.**” *IEEE Trans. Neural Network*, 1991. pp. 302-309.
- [19] P. D. Wasserman. *Advanced Methods in Neural Computing*. New York : Van Nostrand Reinhold. 1993.
- [20] Robert J. Schalkoff. “**Artificial Neural Networks**” The McGRAW-HILL Companies, Inc. 1997
- [21] Kevin Warwick. “**Artificial Intelligence Techniques in Power System**” The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom 1997.
- [22] Louis A. Wehenkel. “**Automatic Learning Techniques in Power System**” Kluwer Academic Publishers 1998.
- [23] Hong-Tzer Yang , Wen-Yeou Chang , Ching-Lien Huang “**A New Neural Networks Approach to On-line Fault Section Estimation Using Information of Protective Relays and Circuit Breaker**” , *IEEE Transactions on Power Delivery* , Vol. 9 , No. 1 , January 1994 , page 220 – 229.
- [24] A.P. Alves da Silva , A.H.F. Insfran , “ **Neural Network for Fault Location in Substations**” , *IEEE Transactions on Power Delivery* , Vol. 11 , No. 1 , January 1996 , page 234 – 239.

ประวัติผู้เขียน

นายพุฒิจจร บุญมี เกิดเมื่อวันที่ 28 เมษายน 2511 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษา
อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีโทรคมนาคม จากสถาบันเทคโนโลยี พระจอม
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2533

เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทในปี 2544 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีผลงานวิชาการตีพิมพ์ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าระหว่าง
ศึกษาปริญญาโท 1 บทความคือ วิศวกรรมลาดกระบังจำนวน 1 เรื่อง

ผลงานทางวิชาการ

1. พุฒิจจร บุญมี, มารุต ดันติเดชามงคล, สมชาติ จิรีวิภากร, นิทัศน์ กฤษณจินดา, “การหาฟอลต์ใน
สถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอกโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม.” , วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 20, ฉบับที่
1, มีนาคม 2546 , หน้า 64-66.