

การประยุกต์ใช้เทคนิคนิวโร-ฟิซชีสำหรับการป้องกันด้วยรีเลย์ระยะทาง

นายสนม สายชุมดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2552

**APPLICATION OF NEURO-FUZZY TECHNIQUE FOR
DISTANCE RELAY PROTECTION**

Sanom Saichoomdee

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2009**

การประยุกต์ใช้เทคนิคนิวโร-ฟิชชีสำหรับการป้องกันด้วยรีเลย์ระยะทาง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ

(ผศ. ดร.เผด็จ เฝ้าละอ)

กรรมการ

(อ. ดร.วิโรจน์ แสงชงทอง)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สนม สายขุมดี : การประยุกต์ใช้เทคนิคนิวโร-ฟัซซีสำหรับการป้องกันด้วยรีเลย์ระยะทาง
(APPLICATION OF NEURO-FUZZY TECHNIQUE FOR DISTANCE RELAY
PROTECTION) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันท์ อุ่นศิริไทย์, 245 หน้า.

รีเลย์ระยะทางที่ใช้ป้องกันสายส่งไฟฟ้าตามปกติจะทำงาน โดยการวัดค่าอิมพีแดนซ์ในสายส่งไฟฟ้า เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบไฟฟ้า ผลของฟอลต์อิมพีแดนซ์หรือการจ่ายกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนไป ซึ่งอาจเป็นสาเหตุการโอเวอร์รีชหรืออันเดอร์รีชของรีเลย์ระยะทาง ซึ่งส่งผลให้รีเลย์ระยะทางทำงานผิดพลาด ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้เทคนิคนิวโร-ฟัซซีสำหรับการป้องกันด้วยรีเลย์ระยะทางในการป้องกันสายส่งไฟฟ้า เนื่องจากระบบนิวโร-ฟัซซีมีความยืดหยุ่นต่อการแยกแยะลักษณะของฟอลต์ที่เกิดขึ้น ถึงแม้ว่าสถานะต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไป โดยการจำลองฟอลต์ที่เกิดขึ้นกับสายส่งไฟฟ้า มีค่าของฟอลต์อิมพีแดนซ์ไม่คงที่ และระยะทางการเกิดฟอลต์บนสายส่งไฟฟ้า จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลอง คือ แรงดัน กระแส มุมแรงดันและมุมกระแสของบัส ไปเรียนรู้และปรับปรุงให้นิวโร-ฟัซซีทำงานถูกต้องแม่นยำสูงมากขึ้น

งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่านิวโร-ฟัซซีสามารถป้องกันสายส่งไฟฟ้าได้ โดยผลการทดสอบการป้องกันสายส่งไฟฟ้าเมื่อเกิดฟอลต์ในกรณีต่าง ๆ มีเปอร์เซ็นต์ขั้นต่ำดังนี้ กรณีสามเฟสฟอลต์นิวโร-ฟัซซีทำงานถูกต้องในการป้องกันสายส่งไฟฟ้า 96.97 เปอร์เซ็นต์ กรณีสองเฟสฟอลต์นิวโร-ฟัซซีทำงานถูกต้องในการป้องกันสายส่งไฟฟ้า 91.77 เปอร์เซ็นต์ กรณีสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์นิวโร-ฟัซซีทำงานถูกต้องในการป้องกันสายส่งไฟฟ้า 97.40 เปอร์เซ็นต์ และกรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์นิวโร-ฟัซซีทำงานถูกต้องในการป้องกันสายส่งไฟฟ้า 83.12 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

SANOM SAICHOOMDEE : APPICATION OF NEURO-FUZZY

TECHNIQUE FOR DISTANCE RELAY PROTECTION.

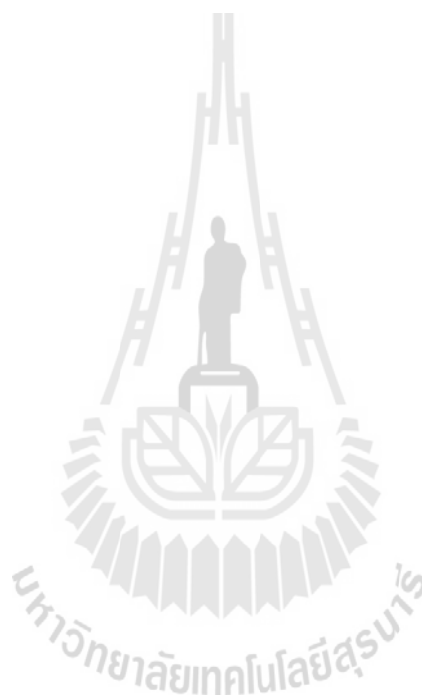
THESIS ADVISOR : ASST. PROF. ANANT OONSIVILAI, Ph.D., 245 PP.

NEURO-FUZZY/DISTANCE PROTECTION/RELAYING

The distance relays for transmission line protection usually operates based on the measured transmission line impedance. When a fault occurs in power system, resulting in fault impedance or generator current with impedance changed. This could be the cause of underreaching or overreaching behaviors of distance relay, which results in distance relay malfunction. Therefore, this research presents the application of neuro-fuzzy technique for distance relay protection for transmission line. Neuro-fuzzy has a flexible manner of identifying the fault that has occurred, thus suitable for changing conditions in power systems. The fault simulation of the transmission line based on the uncertainty of fault impedance and distance of fault on transmission line, form the parameters for voltage, current, voltage angle and current angle of the bus. The result will then be used for learning and for thus adjustments to the neuro-fuzzy technique. Thus, future neuro-fuzzy shall operate with heightened accuracy and precision.

This research shows that neuro-fuzzy is suitable for transmission line protection. The results has minimum percentages are tested on the fault transmission line protection in the following cases; cases of three phase fault, neuro-fuzzy operated correctly in 96.97 percentage of transmission line protection. In cases of double line fault, neuro-fuzzy operated correctly in 91.77 percentage of transmission line protection.

In cases of double line to ground fault, neuro-fuzzy operated correctly in 97.40 percentage of transmission line protection, and in cases of single line to ground fault, neuro-fuzzy operated correctly in 83.12 percentage of transmission line protection, respectively.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2009

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินการวิจัยจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันท์ อุ่นศิริวิไลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือ ผู้วิจัยจนสามารถดำรงชีวิตในมหาวิทยาลัยได้อย่างเป็นปกติและมีความสุขตลอดมา

ขอบพระคุณอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำความรู้ทางด้านวิชาการอย่าง ดียิ่งตลอดมา

ขอบคุณ คุณวุฒิกิจ ผลชู คุณพงษ์ศักดิ์ พิลาถ้ำ และคุณสิทธิชัย บุญแสง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต 3 ภาค 2 นครราชสีมา ที่ได้ให้คำปรึกษาด้านระบบไฟฟ้ากำลังอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย ให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือกับผู้วิจัยเป็นอย่างดี

ขอบคุณ คุณอัญชุลี รักด่านกลาง คุณภัทรวรรณ สิทธิกวินกุล คุณจริยาพร ศรีวิไลลักษณ์ และคุณพิทยา ดิกล้ำ ที่ได้ช่วยตรวจทานวิทยานิพนธ์และช่วยติดต่อประสานงานกับฝ่ายต่าง ๆ ให้กับ ผู้วิจัยเป็นอย่างดี

ขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ให้กำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีต และ ปัจจุบัน ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงครอบครัวสายซุมดี และครอบครัวกาวินตะคุ ที่ให้ความรัก การอบรมเลี้ยงดู คอยส่งเสริมการศึกษา คอยให้กำลังใจและรวมไปถึงสิ่งดี ๆ แก่ผู้วิจัย จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

สนม สายซุมดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฑ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 ปรัชญาของรณกรรม.....	4
1.7 เนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	11
2 การคำนวณค่ากระแสฟอลต์และการทำงานของรีเลย์ระยะทาง	1
2.1 กล่าวนำ.....	12
2.2 การคำนวณฟอลต์.....	12
2.2.1 การคำนวณฟอลต์กรณีหนึ่งเฟสลงกราวด์ฟอลต์.....	13
2.2.2 การคำนวณฟอลต์กรณีสองเฟสฟอลต์.....	16
2.2.3 การคำนวณฟอลต์กรณีเฟสกับเฟสลงกราวด์ฟอลต์.....	17
2.2.4 การคำนวณฟอลต์กรณีสามเฟสฟอลต์.....	19
2.3 การทำงานของรีเลย์ระยะทาง.....	20
2.3.1 คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทาง.....	23
2.3.2 แผนภาพอิมพีแดนซ์.....	24

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4	รีเลย์แบบระยะทางกับระบบไฟฟ้า 3 เฟส.....	26
2.2.1	สามเฟสฟอลต์.....	27
2.2.2	สองเฟสฟอลต์.....	27
2.2.3	สองเฟสลงกราวด์ฟอลต์.....	28
2.2.4	เฟสลงกราวด์ฟอลต์.....	29
2.5	การเปรียบเทียบรีเลย์แบบระยะทาง.....	30
2.6	โซนการป้องกันของรีเลย์ระยะทาง.....	32
2.6	สรุป.....	32
3	นิวโร-ฟัซซี.....	33
3.1	กล่าวนำ.....	33
3.2	ทฤษฎีฟัซซีเซต.....	33
3.3	การแทนข้อมูลในฟัซซีเซต.....	34
3.4	ฟังก์ชันสมาชิก.....	36
3.5	เครือข่ายประสาทเทียม.....	41
3.5.1	การเรียนรู้แบบแพร่กลับ.....	45
3.5.2	กระบวนการเรียนรู้แบบแพร่กลับของเครือข่ายประสาทเทียม.....	45
3.6	ระบบอนุมานฟัซซี.....	55
3.7	นิวโร-ฟัซซี.....	57
3.7.1	โครงสร้างของ ANFIS.....	58
3.7.2	การเรียนรู้ของ ANFIS.....	61
3.8	สรุป.....	62
4	การจำลองฟอลต์และการเรียนรู้ของนิวโร-ฟัซซี	
	เพื่อใช้สำหรับการป้องกันสายส่งไฟฟ้า.....	63
4.1	กล่าวนำ.....	63
4.2	การจำลองการเกิดฟอลต์.....	63
4.2.1	การจำลองฟอลต์ภายใต้ระบบไฟฟ้ากำลัง 2 แหล่งจ่าย.....	63

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3	การประยุกต์ใช้ระบบนิวโร-ฟิซชี.....	81
4.3.1	ระบบนิวโร-ฟิซชีสำหรับสามเฟสฟอลต์.....	83
4.3.2	ระบบนิวโร-ฟิซชีสำหรับสองเฟสฟอลต์.....	83
4.3.1	ระบบนิวโร-ฟิซชีสำหรับสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์.....	84
4.3.2	ระบบนิวโร-ฟิซชีสำหรับเฟสลงกราวด์ฟอลต์.....	84
4.4	สรุป.....	85
5	การจำลองการป้องกันสายส่งไฟฟ้าด้วยระบบนิวโร-ฟิซชี.....	128
5.1	กล่าวนำ.....	86
5.2	ผลการจำลองการป้องกันสายส่งไฟฟ้าด้วยระบบนิวโร-ฟิซชี.....	86
5.2.1	ผลการจำลองการป้องกันสายส่งกรณีสามเฟสฟอลต์.....	87
5.2.1	ผลการจำลองการป้องกันสายส่งกรณีสองเฟสฟอลต์.....	97
5.2.1	ผลการจำลองการป้องกันสายส่งกรณีสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์.....	107
5.2.1	ผลการจำลองการป้องกันสายส่งกรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์.....	117
5.3	สรุป.....	127
6	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	128
6.1	สรุป.....	128
6.2	ข้อเสนอแนะ.....	129
	รายงานอ้างอิง.....	130
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ชุดข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้ระบบนิวโร-ฟิซชี.....	132
	ภาคผนวก ข. ชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบระบบ-ฟิซชี.....	173
	ภาคผนวก ค. โปรแกรม Malab สำหรับระบบนิวโร-ฟิซชี.....	218
	ภาคผนวก ง. โปรแกรม Malab/Simulink สำหรับการจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง.....	220
	ภาคผนวก จ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	228
	ประวัติผู้เขียน.....	245

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	การคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทาง..... 8
2.1	ประเภทของการเกิดฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งไฟฟ้า..... 12
2.2	ความถี่ของการเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้า..... 13
4.1	ข้อมูลที่ใช้เป็นชุดสอนสำหรับระบบนิวโร-ฟิชชี..... 71
4.2	ตัวอย่างบางส่วนที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสามเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 2$ โอห์ม..... 73
4.3	ตัวอย่างบางส่วนที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 7$ โอห์ม..... 74
4.4	ตัวอย่างบางส่วนที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 2$ โอห์ม..... 75
4.5	ตัวอย่างบางส่วนที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 7$ โอห์ม..... 76
4.6	ตัวอย่างบางส่วนที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 2$ โอห์ม..... 77
4.7	ตัวอย่างบางส่วนที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสามเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 7$ โอห์ม..... 78
4.8	ตัวอย่างบางส่วนที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีเฟสกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 2$ โอห์ม..... 79
4.9	ตัวอย่างบางส่วนที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีเฟสกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 7$ โอห์ม..... 80
5.1	ข้อมูลที่ใช้เป็นชุดทดสอบในระบบไฟฟ้า..... 86
5.2	ผลการคำนวณบางส่วนของชุดทดสอบสำหรับระบบนิวโร-ฟิชชี กรณีสามเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 5$ โอห์ม..... 87
5.3	ผลการคำนวณบางส่วนของชุดทดสอบสำหรับระบบนิวโร-ฟิชชี กรณีสามเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 10$ โอห์ม..... 88
5.4	ผลเอาที่พหุบางส่วนจากระบบนิวโร-ฟิชชีในการทดสอบด้วยชุดทดสอบ กรณีสามเฟสฟอลต์เมื่อ..... 90
5.5	การทำงานของ NF1_3PH สำหรับสามเฟสฟอลต์..... 92
5.6	การทำงานของ NF2_3PH สำหรับสามเฟสฟอลต์..... 94
5.7	การทำงานของ NF3_3PH สำหรับสามเฟสฟอลต์..... 96

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.8 ผลการคำนวณบางส่วนของชุดทดสอบสำหรับระบบนิวโร-ฟuzzy กรณีสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 5$ โอห์ม.....	97
5.9 ผลการคำนวณบางส่วนของชุดทดสอบสำหรับระบบนิวโร-ฟuzzy กรณีสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 10$ โอห์ม.....	98
5.10 ผลเอาที่พหุบางส่วนของระบบนิวโร-ฟuzzy ในการทดสอบด้วยชุดทดสอบ กรณีสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์.....	99
5.11 การทำงานของ NF1_2PH สำหรับสองเฟสฟอลต์.....	100
5.12 การทำงานของ NF2_2PH สำหรับสองฟอลต์.....	102
5.13 การทำงานของ NF3_2PH สำหรับสองฟอลต์.....	104
5.14 ผลการคำนวณบางส่วนของชุดทดสอบสำหรับระบบนิวโร-ฟuzzy กรณีสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 5$ โอห์ม.....	107
5.15 ผลการคำนวณบางส่วนของชุดทดสอบสำหรับระบบนิวโร-ฟuzzy กรณีสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 10$ โอห์ม.....	108
5.16 ผลเอาที่พหุบางส่วนของระบบนิวโร-ฟuzzy ในการทดสอบด้วยชุดทดสอบ กรณีสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ.....	109
5.17 การทำงานของ NF1_2PHG สำหรับสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์.....	110
5.18 การทำงานของ NF2_2PHG สำหรับสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์.....	112
5.19 การทำงานของ NF3_2PHG สำหรับสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์.....	114
5.20 ผลการคำนวณบางส่วนของชุดทดสอบสำหรับระบบนิวโร-ฟuzzy กรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 5$ โอห์ม.....	117
5.21 ผลการคำนวณบางส่วนของชุดทดสอบสำหรับระบบนิวโร-ฟuzzy กรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 10$ โอห์ม.....	118
5.22 ผลเอาที่พหุบางส่วนของระบบนิวโร-ฟuzzy ในการทดสอบด้วยชุดทดสอบ กรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ.....	119

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.34 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 1e-6$ โอห์ม.....	207
ข.35 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 5$ โอห์ม.....	208
ข.36 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 10$ โอห์ม.....	209
ข.37 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 15$ โอห์ม.....	210
ข.38 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 20$ โอห์ม.....	211
ข.39 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 25$ โอห์ม.....	212
ข.40 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 30$ โอห์ม.....	213
ข.41 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 35$ โอห์ม.....	214
ข.42 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 40$ โอห์ม.....	215
ข.43 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 45$ โอห์ม.....	216
ข.44 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 50$ โอห์ม.....	217
จ.1 บล็อกไดอะแกรมใช้สร้างแบบจำลองและแสดงผล.....	133
จ.2 บล็อกไดอะแกรมใช้สร้างแบบจำลองและแสดงผล.....	134
จ.3 พารามิเตอร์แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับพร้อมอิมพีแดนซ์ภายใน.....	135
จ.4 พารามิเตอร์สายส่งแบบสามเฟส.....	136
จ.5 หม้อกระแสและหม้อแปลงแรงดัน.....	137
จ.6 พารามิเตอร์ฟอลต์แบบสามเฟส.....	138

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	โครงสร้างของนิวโร-ฟิชซีในการป้องกันสายส่งไฟฟ้า..... 3
1.2	โครงสร้างของประสาทเทียมในรีเลย์ระยะทางในการป้องกันสายส่ง..... 5
1.3	สถาปัตยกรรมของเครือข่ายประสาทเทียม..... 5
1.4	ไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบที่ทำการจำลอง..... 7
1.5	โครงสร้างเครือข่ายประสาทเทียมแบบย้อนกลับ..... 9
1.6	โครงสร้างของเครือข่ายประสาทเทียมแบบย้อนกลับหลัง สำหรับป้องกันสายส่งไฟฟ้า..... 10
1.7	แยกแยะสัญญาณอินพุตที่เข้าเครือข่ายประสาทเทียมแบบย้อนกลับหลัง..... 11
2.1	เฟสลงกราวด์ฟอลต์..... 13
2.2	สองเฟสฟอลต์..... 16
2.3	สองเฟสลงกราวด์ฟอลต์..... 17
2.4	สามเฟสฟอลต์..... 19
2.5	ขอบเขตการเกิดฟอลต์บนแผนภาพอิมพีแดนซ์..... 21
2.6	ระบบไฟฟ้าขณะสภาวะปกติ..... 21
2.7	ระบบไฟฟ้าขณะเกิดฟอลต์ที่ระยะ d..... 22
2.8	คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบต่าง ๆ..... 23
2.9	การป้องกันโดยรีเลย์ระยะทาง..... 24
2.10	แผนภาพอิมพีแดนซ์..... 25
2.11	ผลของความต้านทานอาร์คบนแผนภาพอิมพีแดนซ์..... 26
2.12	วงจรส่วนประกอบสมมาตรการลัดวงจร A-B-C..... 27
2.13	วงจรส่วนประกอบสมมาตรการลัดวงจร B-C..... 27
2.14	วงจรส่วนประกอบสมมาตรการลัดวงจร B-C-G..... 28
2.15	วงจรส่วนประกอบสมมาตรการลัดวงจร A-G..... 29
2.16	การเปรียบเทียบโดยใช้ขนาด..... 31

สารบัญญรูป (ต่อ)

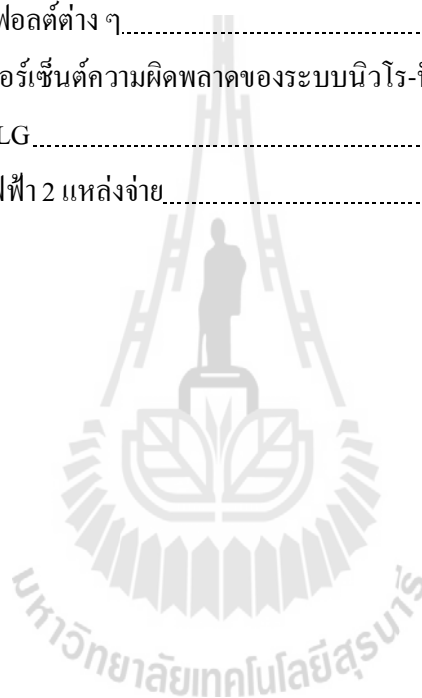
รูปที่	หน้า
2.17 การเปรียบเทียบโดยใช้เฟส.....	31
3.1 เซ็ตคนสูงแบบชัดเจน.....	35
3.2 เซ็ตคนสูงแบบฟัซซี.....	35
3.3 เซ็ตคนสูงแบบฟัซซี มี 3 ตัวแปรฟัซซี.....	36
3.4 ฟังก์ชันสมาชิกแบบรูปสามเหลี่ยม.....	37
3.5 ฟังก์ชันสมาชิกแบบรูปสี่เหลี่ยมคางหมู.....	38
3.6 ฟังก์ชันสมาชิกแบบซิกมอยด์.....	39
3.7 ฟังก์ชันสมาชิกแบบรูปประฆังคว่ำ.....	40
3.8 ฟังก์ชันสมาชิกแบบรูปเกาส์เซียน.....	41
3.9 ชีวิตวิทยาของสมอง.....	42
3.10 แบบจำลองนิวนอรอล.....	43
3.11 ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดต่าง ๆ.....	44
3.12 การทำงานของเครือข่ายประสามเทียมแบบแพร่กลับ.....	45
3.13 โครงสร้างเครือข่ายประสามเทียมแบบหลายชั้น.....	46
3.14 ส่วนประกอบวินิจฉัยฟัซซี.....	56
3.15 โครงสร้าง ANFIS.....	58
4.1 ระบบไฟฟ้าที่เชื่อมกันด้วยสายส่งไฟฟ้า.....	64
4.2 วงจรสมมูลสามเฟสพอลต์ที่แสดงผลของพอลต์อิมพีแดนซ์.....	64
4.3 วงจรสมมูลสองเฟสพอลต์ที่แสดงผลของพอลต์อิมพีแดนซ์.....	66
4.4 วงจรสมมูลกรณีเฟสลงกราวด์พอลต์ที่แสดงผลของพอลต์อิมพีแดนซ์.....	68
4.5 ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่ายสำหรับการคำนวณหาพอลต์.....	70
4.6 กำหนดโซนในการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังที่ทดสอบ.....	72
4.7 ตัวอย่างของนิวโร-ฟัซซี.....	81
5.1 เปรียบเทียบความถูกต้องของการทำงานของ NF2_3PH ที่จุดเกิดพอลต์ต่าง ๆ.....	91

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2	
เปรียบเทียบความถูกต้องของการทำงานของ NF3_3PH ที่จุดเกิดฟอลต์ต่าง ๆ.....	93
5.3	
ความเปรียบเทียบความถูกต้องของการทำงานของ NF3_3PH ที่จุดเกิดฟอลต์ต่าง ๆ.....	95
5.4	
กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของระบบนิวโร-ฟิชซี NF1_3PH - NF3_3PH.....	96
5.5	
เปรียบเทียบความถูกต้องของการทำงานของ NF2_2PH ที่จุดเกิดฟอลต์ต่าง ๆ.....	101
5.6	
เปรียบเทียบความถูกต้องของการทำงานของ NF3_2PH ที่จุดเกิดฟอลต์ต่าง ๆ.....	103
5.7	
ความเปรียบเทียบความถูกต้องของการทำงานของ NF3_2PH ที่จุดเกิดฟอลต์ต่าง ๆ.....	105
5.8	
กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของระบบนิวโร-ฟิชซี NF1_2PH - NF3_2PH.....	106
5.9	
เปรียบเทียบความถูกต้องของการทำงานของ NF2_2PHG ที่จุดเกิดฟอลต์ต่าง ๆ.....	111
5.10	
เปรียบเทียบความถูกต้องของการทำงานของ NF3_2PHG ที่จุดเกิดฟอลต์ต่าง ๆ.....	113
5.11	
ความเปรียบเทียบความถูกต้องของการทำงานของ NF3_2PHG ที่จุดเกิดฟอลต์ต่าง ๆ.....	115
5.12	
กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของระบบนิวโร-ฟิชซี NF1_2PHG - NF3_2PG.....	116
5.13	
เปรียบเทียบความถูกต้องของการทำงานของ NF2_SLG ที่จุดเกิดฟอลต์ต่าง ๆ.....	121

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.14	
เปรียบเทียบความถูกต้องของการทำงานของ NF3_SLG ที่จุดเกิดฟอลต์ต่าง ๆ.....	123
5.15	
ความเปรียบเทียบความถูกต้องของการทำงานของ NF3_SLG ที่จุดเกิดฟอลต์ต่าง ๆ.....	125
5.16	
กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของระบบนิวโร-พีซี NF1_SLG - NF3_SLG.....	126
ง.1	
แบบจำลองระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย.....	137



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

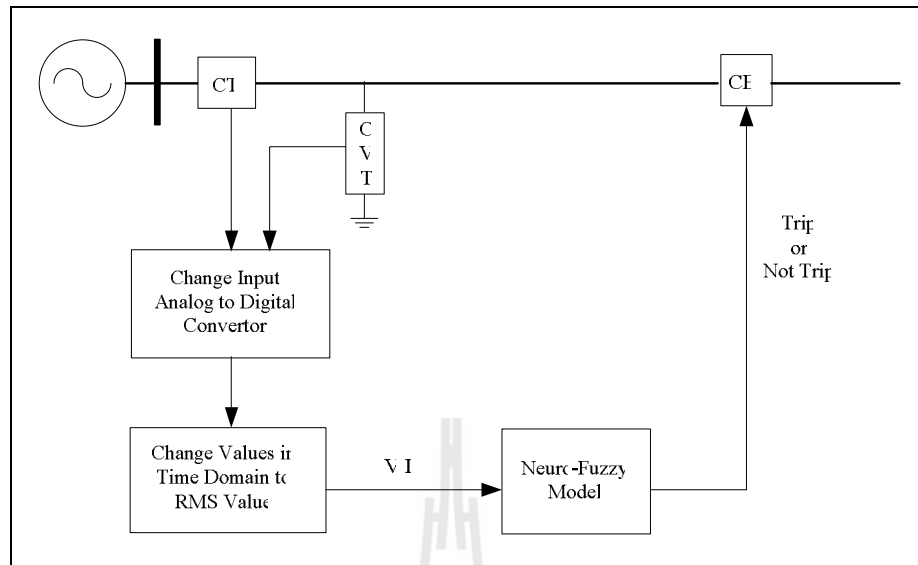
ระบบไฟฟ้ากำลังการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจัดว่าเป็นส่วนสำคัญในระบบ เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นกับระบบสายส่งไฟฟ้าย่อมมีผลต่อผู้ใช้ไฟฟ้าด้วยเช่นกัน ฟอลต์ที่เกิดขึ้นมาจากหลายสาเหตุ เช่น อาจเกิดจากคน สัตว์ หรือธรรมชาติ ดังนั้นเพื่อป้องกันและลดความเสียหายที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องมีระบบป้องกันสายส่งไฟฟ้าที่ดี ในปัจจุบันระบบการป้องกันสายส่งไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมคือการใช้รีเลย์ระยะทาง (distance relay) รีเลย์ระยะทางจะทำงานตามค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างตำแหน่งที่ติดตั้งรีเลย์กับตำแหน่งที่เกิดฟอลต์บนสายส่งไฟฟ้า เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของความยาวสายส่งไฟฟ้ามีค่าคงที่ ดังนั้นเมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นบนสายส่งไฟฟ้าค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งไฟฟ้าจะมีค่าลดต่ำลง รีเลย์ระยะทางในปัจจุบันยังไม่สามารถที่จะตรวจจับฟอลต์ที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้องและสมบูรณ์ที่สุด เนื่องจากตัวรีเลย์เองได้ตอบสนองต่อค่าพารามิเตอร์นอกเหนือจากค่าอิมพีแดนซ์ เช่น ค่าแอมพลิจูดกระแส ค่าความต้านทานการลัดวงจรและกราวด์ รวมถึงลักษณะของระบบไฟฟ้าสามเฟสด้วย แม้ว่าจะได้มีการออกแบบรีเลย์ระยะทางมาในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อใช้การป้องกันก็ยังไม่สามารถที่จะตรวจจับฟอลต์ที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด เพราะรีเลย์ระยะทางแต่ละแบบก็ยังคงมีข้อดีข้อเสียของตัวเอง จึงทำให้การป้องกันสายส่งไฟฟ้าที่สมบูรณ์แบบนั้นเป็นไปได้ยาก นอกจากนี้ฟอลต์ที่เกิดขึ้นยังส่งผลกระทบต่อการทำงานของรีเลย์ระยะทาง ซึ่งการเกิดฟอลต์นี้ตอบสนองต่อพารามิเตอร์ที่มีค่าไม่คงที่รวมอยู่ด้วย เช่น ค่าความต้านทานของการลัดวงจรที่เกิดขึ้น ค่าความต้านทานอนุกรมในตัวเสาของสายส่งไฟฟ้ารวมไปถึงค่าความต้านทานของระบบกราวด์ (ground) เป็นต้น ทำให้การประมาณค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงของสายส่งไฟฟ้าทำได้ยาก จึงทำให้เกิดเหตุการณ์ที่เรียกว่า โอเวอร์รีช (over reach) และอันเดอร์รีช (under reach) สามารถอธิบายได้ดังนี้

- โอเวอร์รีช คือ เมื่อเกิดฟอลต์อยู่นอกโซนป้องกัน (โซนการป้องกันที่ 1) แต่รีเลย์ระยะทางกลับพิจารณาอิมพีแดนซ์ว่าที่เกิดขึ้นอยู่ในโซนป้องกันจึงสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงาน

- อันเดอร์รีช คือ เมื่อเกิดฟอลต์อยู่ในโซนป้องกัน (โซนการป้องกันที่ 1) แต่รีเลย์ระยะทางไม่ทำงานเนื่องจากรีเลย์ระยะทางพิจารณาว่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นอยู่นอกโซนป้องกัน

ในปัจจุบันรีเลย์ระยะทางยังคงอาศัยหลักการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งไฟฟ้าโดยที่รีเลย์ระยะทางจะได้รับการปรับตั้งด้วยค่าชดเชยคงที่จากผลของเหตุการณ์ที่เกิดโอเวอร์รีชและอันเดอร์รีชที่ทำให้รีเลย์ไม่มีความยืดหยุ่นในการป้องกันเมื่อฟอลต์ที่ตอบสนองต่อค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นซึ่งมีค่าไม่คงที่รวมอยู่ด้วย

ปัจจุบันได้มีการนำระบบนิวโร-ฟัซซี (neuro-fuzzy) มาใช้ในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อนต่าง ๆ ในทางด้านวิศวกรรมหลายประเภท สำหรับการป้องกันสายส่งไฟฟ้าก็ได้มีการนำนิวโร-ฟัซซีมาใช้ทดสอบเป็นรีเลย์ระยะทาง โดยมีโครงสร้างการใช้งานเหมือนรีเลย์ระยะทางแบบทั่วไป แตกต่างกันในส่วนของกระบวนการประมวลผลซึ่งมีการใช้สมการที่แตกต่างกันดังรูปที่ 1.1 ระบบนิวโร-ฟัซซีไม่ได้ใช้พื้นฐานทางไฟฟ้าในส่วนของกำหนัดแต่จะใช้วิธีการกำหนัดที่มีรูปแบบและกระบวนการเรียนรู้ของนิวโร-ฟัซซี ด้วยเหตุที่นิวโร-ฟัซซีมีความยืดหยุ่นในตัวของนิวโร-ฟัซซีเองทำให้นิวโร-ฟัซซีได้รับความสนใจและศึกษาอย่างมาก นอกจากนี้ยังสามารถใช้นิวโร-ฟัซซีในการเรียนรู้และจดจำรูปแบบของฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบและรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงสถานะในระบบไฟฟ้าได้ นิวโร-ฟัซซียังมีความสามารถแยกแยะสัญญาณอินพุตได้ดีถึงแม้ว่าสัญญาณอินพุตจะมีความผิดเพี้ยนและมีสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วย จากข้อดีของนิวโร-ฟัซซีนี้ทำให้รีเลย์ระยะทางสามารถป้องกันสายส่งไฟฟ้าได้ถูกต้องสูงขึ้น (โซนการป้องกันที่ 1) และยังสามารถนำไปใช้ร่วมกับการป้องกันแบบระยะทางตามปกติซึ่งจะช่วยให้การป้องกันสายส่งไฟฟ้ามีความถูกต้องแม่นยำสูงขึ้น รูปแบบการแสดงผลในงานวิจัยนี้จะแสดงผล โดยการจำลองเหตุการณ์การเกิดฟอลต์ขึ้นกับระบบไฟฟ้าในสถานะต่าง ๆ และดูผลตอบการทำงานของนิวโร-ฟัซซีในการป้องกันสายส่งไฟฟ้า



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของนิวโร-ฟัซซีในการป้องกันสายส่งไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.2.1 เพื่อให้ได้ความรู้ความเข้าใจหลักการทำงานพื้นฐานของรีเลย์ระยะทาง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาเหตุการณ์การเกิดฟอลต์บนสายส่งไฟฟ้า
- 1.2.3 เพื่อศึกษาและนำนิวโร-ฟัซซีมาประยุกต์ใช้ในการตรวจจับและป้องกันฟอลต์บนสายส่งไฟฟ้า
- 1.2.4 เพื่อพัฒนาวิธีการป้องกันฟอลต์บนสายส่งไฟฟ้า

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.3.1 อิมพีแดนซ์ลวดวงจรมีค่าเป็นความต้านทานเท่านั้น
- 1.3.2 ในช่วงเวลาที่วิเคราะห์ฟอลต์โหลดมีค่าคงที่
- 1.3.3 ไม่พิจารณาอุณหภูมิของหม้อแปลง
- 1.3.4 ไม่คิดผลของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า
- 1.3.5 ไม่พิจารณาตัวชดเชยกำลังรีแอกทีฟ
- 1.3.6 ไม่พิจารณาผลของอุณหภูมิและปรากฏการณ์ทางผิว (skin effect) ที่มีต่อความต้านทานและความเหนี่ยวนำของสายส่งไฟฟ้ากำลัง
- 1.3.7 ใช้นิวโร-ฟัซซีในการตรวจจับและป้องกันฟอลต์บนสายส่งไฟฟ้า

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

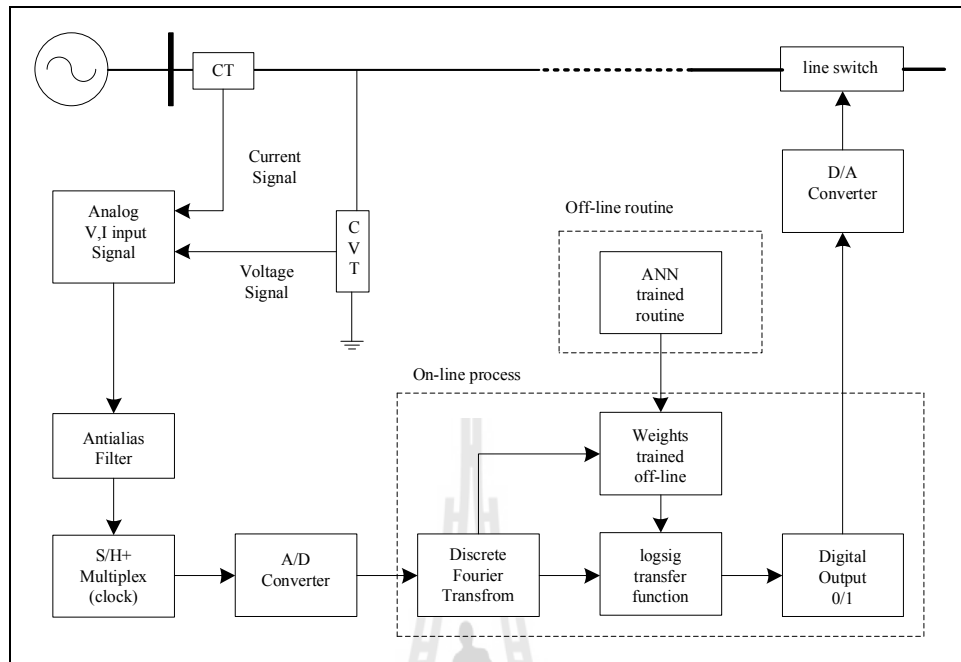
- 1.4.1 จำลองเหตุการณ์การเกิดฟอลต์ที่เกิดบนสายส่งไฟฟ้าแบบ
 - 1.4.1.1 สามเฟสฟอลต์
 - 1.4.1.2 สองเฟสฟอลต์
 - 1.4.1.3 สองเฟสลงกราวด์ฟอลต์
 - 1.4.1.4 เฟสลงกราวด์ฟอลต์
- 1.4.2 นำค่าพารามิเตอร์ที่จำลองเหตุการณ์เกิดฟอลต์ชนิดเฟสลงกราวด์ฟอลต์ที่เกิดบนสายส่งไฟฟ้าได้เข้าระบบนิเว-พีชชีเพื่อจำลองการทำงานของนิเว-พีชชีสำหรับการป้องกันรีเลย์ด้วยระยะทางต้องมีความแม่นยำในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าไม่น้อยกว่า 80 เปอร์เซ็นต์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

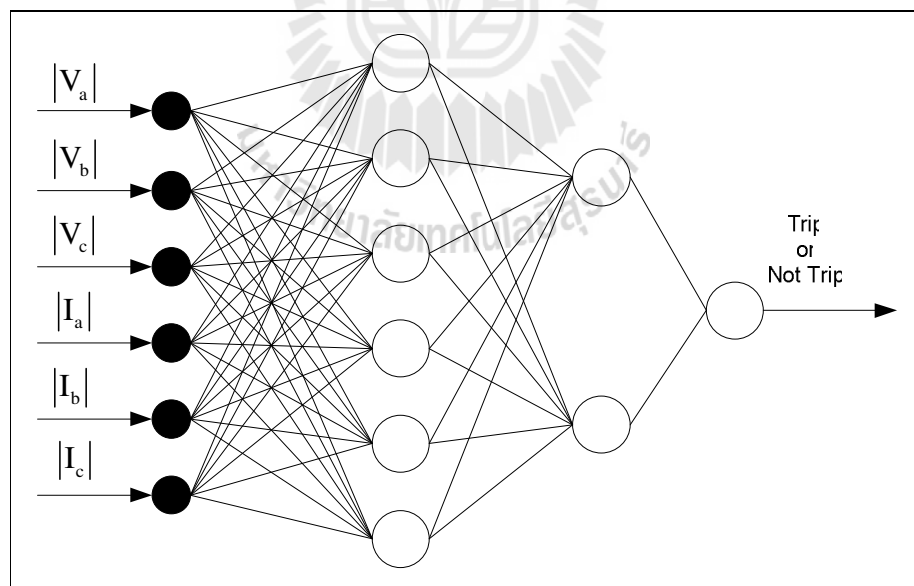
- 1.5.1 สามารถนำเสนอแนวคิดในการพัฒนารีเลย์ระยะทางแนวทางใหม่ในการป้องกันสายส่งไฟฟ้า
- 1.5.2 ทำให้การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น
- 1.5.3 ได้เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยเรื่องการประยุกต์ใช้เทคนิคนิเว-พีชชีสำหรับการป้องกันด้วยรีเลย์ระยะทางในที่ประชุมวิชาการหรือวารสารวิชาการ

1.6 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทคนิคการประยุกต์ใช้เครือข่ายประสาทเทียมในรีเลย์ระยะทาง สำหรับการป้องกันสายส่งไฟฟ้า (Coury and Jorge, 1998) การทำงานของรีเลย์ระยะทางที่ใช้ป้องกันสายส่งไฟฟ้าตามปกติ นั้นจะอาศัยการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่ปรากฏขึ้นในสายส่งไฟฟ้าเมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบไฟฟ้านั้น ฟอลต์อิมพีแดนซ์ หรือการจ่ายกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะส่งผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ปรากฏ เปลี่ยนไป ซึ่งอาจเป็นสาเหตุของการเกิดโอเวอร์ริชหรืออันเดอร์ริชของรีเลย์ ด้วยเหตุนี้การปรับตั้งค่าของรีเลย์ให้ทำงานได้ถูกต้องได้ยาก จึงได้นำเสนอถึงการประยุกต์ใช้เครือข่ายประสาทเทียมในการป้องกันสายส่งไฟฟ้า เนื่องจากเครือข่ายประสาทเทียมมีความยืดหยุ่นต่อการแยกแยะลักษณะฟอลต์แบบต่าง ๆ ถึงแม้ว่าสถานะของระบบไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นได้ทำการประยุกต์ใช้เครือข่ายประสาทเทียมเพื่อป้องกันสายส่งไฟฟ้าโดยการจำลองฟอลต์ที่เกิดขึ้นกับสายส่งที่สถานะต่าง ๆ เช่น ระบบบนสายส่งไฟฟ้าที่เกิดฟอลต์และขนาดฟอลต์อิมพีแดนซ์แล้วนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปทำการสอนและปรับปรุงเครือข่ายประสาทเทียม



รูปที่ 1.2 โครงสร้างของประสาทเทียมในรีเลย์ระยะทางในการป้องกันสายส่งไฟฟ้า



รูปที่ 1.3 สถาปัตยกรรมของเครือข่ายประสาทเทียม

อินพุต

$$V_j = F \left[\sum_{k=1}^N w_{jk} X_k \right] \quad (1.1)$$

โดยที่ $j = 1, \dots, J$

$k = 1, \dots, N$

เมื่อ V คือ เวกเตอร์ของชั้นซ่อน
 w คือ ค่าน้ำหนักปรับปรุง
 X คือ เวกเตอร์ของอินพุต
 N คือ จำนวนอินพุต
 $F[.]$ คือ ฟังก์ชันกระตุ้น (activate function)

เอาต์พุต

$$Y_i = F \left[\sum_{m=1}^j w_{im} V_m \right] \quad (1.2)$$

ฟังก์ชันกระตุ้นเป็นแบบลอจิสติกซิกมอยด์ (logistic sigmoid) เนื่องจากเป็นฟังก์ชันแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้ในแบ็คพรอพะเกชัน (back propagation) ซึ่งมีลักษณะการส่งถ่ายค่าของอินพุตที่มีช่วง $(-\alpha, +\alpha)$ ไปเป็นเอาต์พุตที่มีช่วง $(0, +1)$

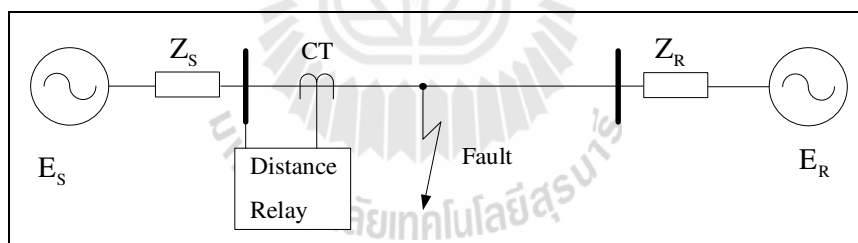
$$F[.] = \text{logsig}(n,b) = \frac{1}{1+e^{-(n+b)}} \quad (1.3)$$

การหาค่าความผิดพลาดพิจารณาจากค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองที่น้อยที่สุดว่าน้อยจนยอมรับได้แล้วหรือไม่มีทางหาค่าที่น้อยกว่านี้ได้อีกจากหลักการหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองโดยหาผลรวมของผลต่างของค่าเป้าหมายกับค่าผลลัพธ์ทุก ๆ หน่วยในชั้นผลลัพธ์สำหรับทุก ๆ ชุดข้อมูลสำหรับการสอน (training pattern) แล้วหาค่ารากของกำลังสองของผลรวมดังกล่าวซึ่งจะเป็นการประมาณค่าความผิดพลาดทั้งหมด แล้วหารด้วยจำนวนชุดที่ใช้สอนทั้งหมด ซึ่งจะได้ค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดจากการสอน

$$E[w] = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{itagr})^2 \quad (1.4)$$

- เมื่อ w เป็นดัชนีมีค่าอยู่ในขอบเขตจำนวนชุดของข้อมูลอินพุต
 i มีค่าอยู่ในขอบเขตจำนวนของผลลัพธ์
 $E[w]$ แทนค่าความผิดพลาดของชุดการสอนที่ w
 Y_i เป็นค่าเป้าหมาย (target) สำหรับผลลัพธ์ที่ i ในชุดการสอนที่ w
 Y_{itagr} เป็นผลลัพธ์ที่ได้ สำหรับลำดับที่ i ในชุดการสอนที่ w

เทคนิคการทดสอบแบบจำลองของดิจิทัลรีเลย์ระยะทางโดยการใช้ Matlab และ Simulink (Cheng W. et al., 2005) อธิบายการจำลองและทดสอบดิจิทัลรีเลย์ระยะทางสำหรับการป้องกันสายส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้ Matlab และ Simulink จำลองรายละเอียดของโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังและจำลองการเกิดฟอลต์ ซึ่งเทคนิคหนึ่งในการจำลองผลสภาพแวดล้อม สำหรับการออกแบบและประเมินผลอัลกอริทึมของรีเลย์ การทำงานพื้นฐานของดิจิทัลรีเลย์ระยะทาง ซึ่งระบบไฟฟ้ากำลังที่ทำการทดสอบและจำลองผลการทำงานของรีเลย์ระยะทางดังแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 ไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบที่ทำการจำลอง

ตารางที่ 1.1 การคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทาง

ประเภทของฟอลต์	สมการที่ใช้ในการคำนวณ
AG	$V_A/(I_A + 3kI_0)$
BG	$V_B/(I_B + 3kI_0)$
CG	$V_C/(I_C + 3kI_0)$
AB หรือ ABG	$(V_A - V_B)/(I_A - I_B)$
BC หรือ BCG	$(V_B - V_C)/(I_B - I_C)$
CA หรือ CAG	$(V_C - V_A)/(I_C - I_A)$

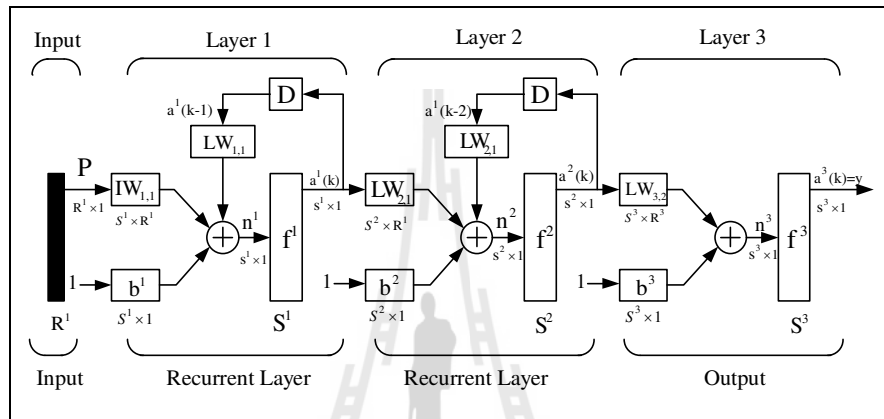
เมื่อ	A,B,C	คือ	ลำดับเฟส
	G	คือ	กราวด์
	V	คือ	ขนาดของแรงดันไฟฟ้า
	I	คือ	ขนาดของกระแสไฟฟ้า
	Z_0	คือ	อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์
	Z_1	คือ	อิมพีแดนซ์ลำดับบวก
	k	คือ	$(Z_0 - Z_1)/Z_1$
	I_0	คือ	กระแสไฟฟาลำดับศูนย์

การหาค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าทำได้จากการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่องแบบเต็มคลื่น (discrete fourier transform) ดังสมการที่ (1.5)

$$X = \frac{N}{2} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-j2\pi k/N} \quad (1.5)$$

เมื่อ	N	คือ	จำนวนตัวอย่างในหนึ่งคาบเวลา
	x_k	คือ	พารามิเตอร์ของระบบที่ต้องการคำนวณหาเฟสเซอร์ในการจำลอง

เทคนิคการการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโดยประยุกต์ใช้เครือข่ายประสาทเทียมแบบย้อนกลับหลัง (Saichoomdee S., et al., 2009; Oonsivilai A. and Saichoomdee A., 2009) ได้นำเสนอวิธีการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโดยใช้เครือข่ายประสาทเทียมแบบย้อนกลับหลัง เครือข่ายประสาทเทียมแบบย้อนกลับหลังเป็นเครือข่ายที่มีการเชื่อมต่อภายในระหว่างนิวรอนในรูปแบบการย้อนกลับ พิจารณาส่วนต่าง ๆ ของเครือข่ายแบบย้อนกลับแสดงตามรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 โครงสร้างเครือข่ายประสาทเทียมแบบย้อนกลับ

ในรูปที่ 1.5 แสดงถึงโครงสร้างเครือข่ายประสาทเทียมแบบย้อนกลับมีอินพุต P เป็นอินพุตของเครือข่าย $a^1(k)$ เป็นเอาต์พุตของชั้นซ่อนที่หนึ่ง และเป็นอินพุตของชั้นซ่อนที่สอง $a^2(k)$ เป็นเอาต์พุตของชั้นซ่อนที่สอง และเป็นเอาต์พุตของชั้นข้อมูลด้านออก และ $a^3(k)$ เป็นเอาต์พุตของเครือข่ายโดยมีฟังก์ชันของชั้นซ่อนที่หนึ่ง (f^1) ฟังก์ชันของชั้นซ่อนที่สอง (f^2) และฟังก์ชันของชั้นเอาต์พุต (f^3) เป็นฟังก์ชันกระตุ้น ซึ่งค่าเอาต์พุตของชั้นซ่อนที่หนึ่ง ค่าเอาต์พุตของชั้นซ่อนที่สอง และเอาต์พุตของเครือข่าย สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$a^1(k) = f^1(IW_{1,1}P + LW_{1,1}a^1(k-1) + b^1) \quad (1.6)$$

$$a^2(k) = f^2(LW_{2,1}a^1(k) + LW_{2,1}a^2(k-1) + b^2) \quad (1.7)$$

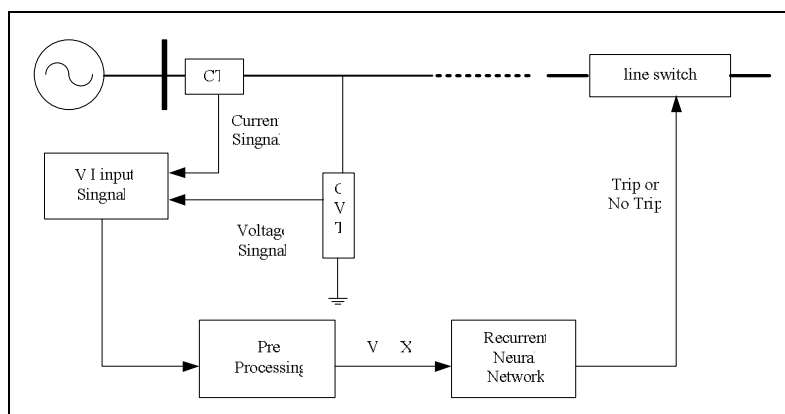
$$a^3(k) = f^3(LW_{3,2}a^2(k) + b^3) \quad (1.8)$$

โดยที่	$IW_{1,1}$	คือ	ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างชั้นข้อมูลอินพุตและชั้นซ่อนที่หนึ่ง
	$LW_{2,1}$	คือ	ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างชั้นซ่อนที่หนึ่ง และชั้นซ่อนที่สอง
	$LW_{3,2}$	คือ	ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างชั้นซ่อนที่สอง และชั้นข้อมูลเอาต์พุต
	b^1	คือ	ค่าไบแอสในชั้นซ่อนที่หนึ่ง
	b^2	คือ	ค่าไบแอสในชั้นซ่อนที่สอง
	b^3	คือ	ค่าไบแอสในชั้นเอาต์พุต

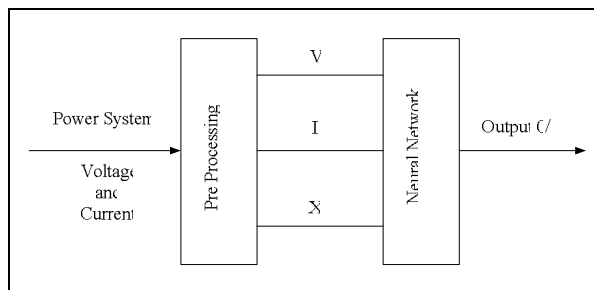
จะใช้ Neural Network Toolbox ในโปรแกรม Malab ฝึกสอนเครือข่ายประสาทเทียมแบบย้อนกลับหลัง โดยใช้อัลกอริทึมการลดลงของเกรเดียน (gradient descent algorithm) โดยมีฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นซ่อนเป็นฟังก์ชันแทนเจนต์ซิกมอยด์ (tansigmoid) ซึ่งแสดงในสมการที่ (1.9)

$$f[.] = \text{logsig}(n,b) = \frac{1}{1 + e^{-(n+b)}} \quad (1.9)$$

ในรูปที่ 1.6 แสดงโครงสร้างของเครือข่ายประสาทเทียมแบบย้อนกลับหลังสำหรับป้องกันสายส่งไฟฟ้ารูปที่ 1.7 แสดงการแยกแยะชุดข้อมูลของสัญญาณอินพุตที่เข้าเครือข่ายประสาทเทียมแบบย้อนกลับหลัง มี 3 อินพุต ได้แก่ V, I และ X โดยที่ V คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้า I คือ ขนาดของกระแสไฟฟ้า และ X คือ รีแอกแตนซ์ ซึ่งได้จากการวัดเมื่อเกิดฟอลต์บนสายส่งไฟฟ้า เอาต์พุตได้จากเครือข่ายประสาทเทียมแบบย้อนกลับคือค่า 0 กับ 1 ถ้าเอาต์พุตเป็น 1 เซอร์กิตเบรกเกอร์จะทำการสั่งปลดวงจรออกและถ้าเอาต์พุตเป็น 0 เซอร์กิตเบรกเกอร์จะไม่ปลดวงจรออก



รูปที่ 1.6 โครงสร้างของเครือข่ายประสาทเทียมแบบย้อนกลับหลังสำหรับป้องกันสายส่งไฟฟ้า



รูปที่ 1.7 แยกแยะสัญญาณอินพุตที่เข้าเครือข่ายประสาทเทียมแบบย้อนกลับหลัง

1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บท และ 5 ภาคผนวก *บทที่ 1* เป็นบทนำกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย ปรัชญาหรือทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยที่ปรัชญาหรือทฤษฎีดังกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันสายส่งไฟฟ้า การจำลองดิจิทัลรีเลย์ระยะทาง การประยุกต์ใช้เทคนิคชาญฉลาดในการป้องกันสายส่งไฟฟ้า เป็นต้น รวมทั้งแนะนำเนื้อหาเบื้องต้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ในส่วนบทอื่น ๆ ประกอบด้วยเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 2 เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงศึกษาการคำนวณค่ากระแสฟอลต์และรูปแบบของฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้าและหลักการการทำงานของรีเลย์ระยะทาง

บทที่ 3 เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีของฟuzzyลอจิก กระบวนการเรียนรู้ของเครือข่ายประสาทเทียมและระบบนิเว-ฟuzzy

บทที่ 4 เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงผลการจำลองฟอลต์ของระบบไฟฟ้า จากนั้นนำพารามิเตอร์ที่ได้เป็นชุดข้อมูลตัวอย่างไปเข้าสู่กระบวนการเรียนรู้ทางระบบนิเว-ฟuzzy

บทที่ 5 เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการทดสอบและผลการทดสอบที่ได้จากการประมวลผลด้วยของนิเว-ฟuzzyและยังได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการทำงานของนิเว-ฟuzzyสำหรับการป้องกันสายส่งไฟฟ้า

บทที่ 6 เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงนำเสนอผลสรุปและข้อเสนอแนะต่าง ๆ

ภาคผนวก ก. ชุดข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้ของระบบนิเว-ฟuzzy

ภาคผนวก ข. ชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบระบบนิเว-ฟuzzy

ภาคผนวก ค. รายละเอียดโปรแกรม Matlab สำหรับระบบนิเว-ฟuzzy

ภาคผนวก ง. รายละเอียดโปรแกรม Matlab/Simulink สำหรับจำลองระบบไฟฟ้า

ภาคผนวก จ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทที่ 2

การคำนวณค่ากระแสฟอลต์ และการทำงานของรีเลย์ระยะทาง

2.1 กล่าวนำ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและนำเสนอการประยุกต์ใช้ระบบนิวโร-ฟิชซีในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโดยใช้ระบบนิวโร-ฟิชซี การวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษาการคำนวณค่ากระแสฟอลต์และรูปแบบของฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้าและหลักการทำงานของรีเลย์ระยะทาง หลังจากนั้นจะทำการศึกษานิวโร-ฟิชซีและนำนิวโร-ฟิชซีมาประยุกต์ใช้ในการป้องกันสายส่งไฟฟ้า

2.2 การคำนวณฟอลต์

ในระบบไฟฟ้ากำลังการเกิดฟอลต์นั้นสามารถแบ่งการเกิดฟอลต์ได้เป็น 4 ประเภท คือ เฟสลงกราวด์ฟอลต์สองเฟสฟอลต์ สองเฟสลงกราวด์ฟอลต์ และสามเฟสฟอลต์ (ชวลิต ดำรงรัตน์, 2547; ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์, 2551; ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์, 2551; Saadat H., 2004) การคำนวณฟอลต์แต่ละประเภทรุ่นสามารถคำนวณได้ดังหัวข้อที่ 2.2.1 หัวข้อที่ 2.2.2 หัวข้อที่ 2.2.3 และในหัวข้อที่ 2.2.4

สถิติของการเกิดฟอลต์ในส่วนต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง (ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์, 2551) แสดงดังตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ประเภทของการเกิดฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งไฟฟ้า

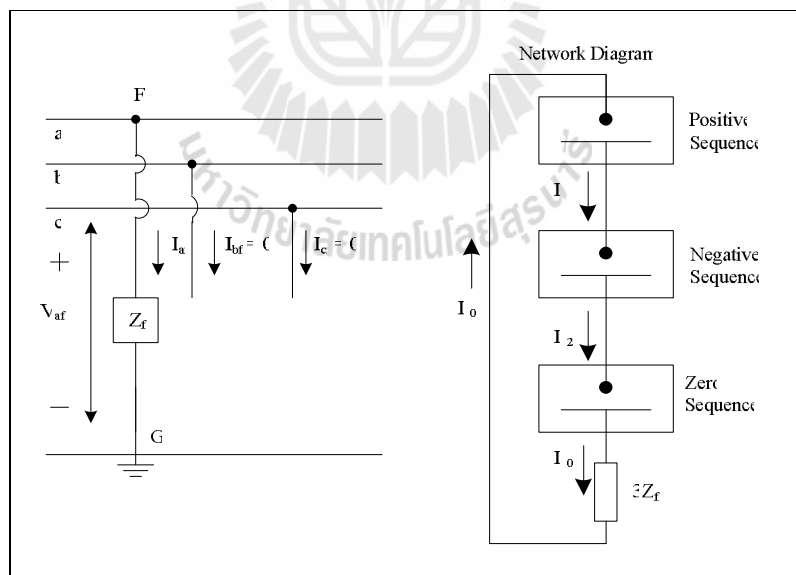
ประเภทของฟอลต์	เปอร์เซ็นต์ของฟอลต์ที่เกิดขึ้น
เฟสลงกราวด์ฟอลต์	85
สองเฟสฟอลต์	8
สองเฟสลงกราวด์ฟอลต์	5
สามเฟสฟอลต์	2
รวม	100

ตารางที่ 2.2 ความถี่ของการเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้า

อุปกรณ์ไฟฟ้า	เปอร์เซ็นต์ของฟอลต์ที่เกิดขึ้น
อุปกรณ์ควบคุม	50
สายเคเบิล	10
สวิตช์เกียร์	15
หม้อแปลงกำลัง	12
CTs และ VTs	2
สายส่งพาดอากาศ	3
อื่น ๆ	8
รวม	100

2.2.1 การคำนวณฟอลต์กรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์

ฟอลต์ประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อสายส่งไฟฟ้าสายใดสายหนึ่งของระบบไฟฟ้าเกิดการลัดวงจรลงกราวด์



รูปที่ 2.1 เฟสลงกราวด์ฟอลต์

โดยที่	I_{a0}	คือ	กระแสส่วนประกอบอันดับศูนย์ของเฟส a
	I_{a1}	คือ	กระแสส่วนประกอบอันดับบวกของเฟส b
	I_{a2}	คือ	กระแสส่วนประกอบอันดับลบของเฟส c
	Z_0	คือ	อิมพีแดนซ์ส่วนประกอบอันดับศูนย์
	Z_1	คือ	อิมพีแดนซ์ส่วนประกอบอันดับบวก
	Z_2	คือ	อิมพีแดนซ์ส่วนประกอบอันดับลบ
	Z_f	คือ	ฟอลต์อิมพีแดนซ์
	V_a	คือ	แรงดันไฟฟ้าเฟส a
	V_b	คือ	แรงดันไฟฟ้าเฟส b
	V_c	คือ	แรงดันไฟฟ้าเฟส c
	I_{af}	คือ	กระแสฟอลต์ของเฟส a
	I_{bf}	คือ	กระแสฟอลต์ของเฟส b
	I_{cf}	คือ	กระแสฟอลต์ของเฟส c

เงื่อนไขที่ใช้ในการคำนวณ

$$V_a = 0 \quad (2.1)$$

$$Z_f = 0 \quad (2.2)$$

$$I_b = I_c = 0 \quad (2.3)$$

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{I_a}{3} \quad (2.4)$$

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f} \quad (2.5)$$

กระแสไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.6)

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

แรงดันไฟฟ้าคำนวณได้จากสมการที่ (2.7)

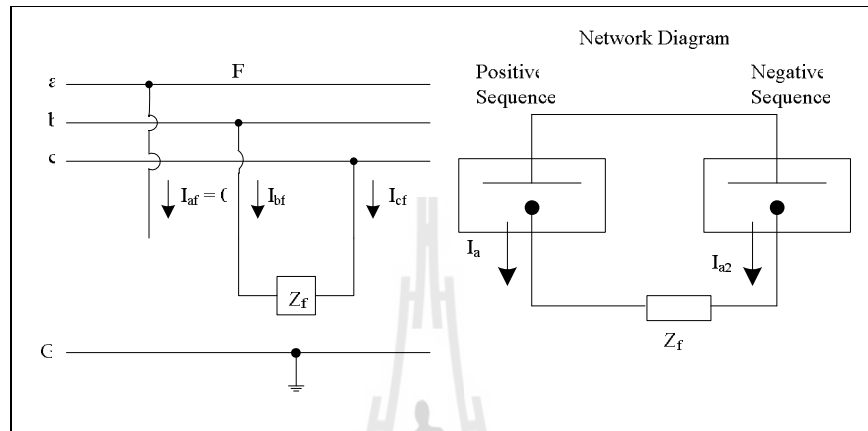
$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_f \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

เมื่อ V_{a0} คือ แรงดันส่วนประกอบอันดับศูนย์ของเฟส a
 V_{a1} คือ แรงดันส่วนประกอบอันดับบวกของเฟส a
 V_{a2} คือ แรงดันส่วนประกอบอันดับลบของเฟส a

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

2.2.2 การคำนวณฟอลต์กรณีสองเฟสฟอลต์

ฟอลต์ประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อสายส่งไฟฟ้าสองสายของระบบไฟฟ้าเกิดการลัดวงจรถึงกัน



รูปที่ 2.2 สองเฟสฟอลต์

เงื่อนไขที่ใช้ในการคำนวณ

$$V_c = V_b - Z_f I_b \quad (2.9)$$

$$I_b + I_c = 0 \quad (2.10)$$

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \quad (2.11)$$

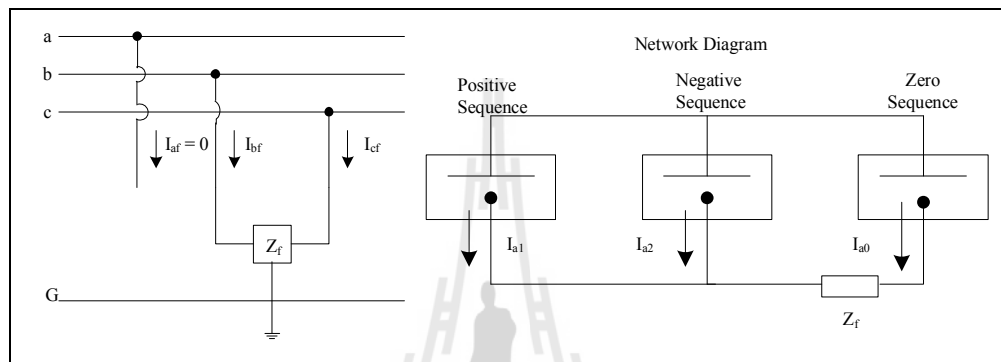
สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$V_{a1} = V_{a2} + Z_f I_{a1} \quad (2.13)$$

2.2.3 การคำนวณฟอลต์กรณีสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์

ฟอลต์ประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อสายส่งไฟฟ้าสองสายของระบบไฟฟ้าการเกิดลัดวงจรลงกราวด์พร้อมกัน



รูปที่ 2.3 สองเฟสลงกราวด์ฟอลต์

เงื่อนไขที่ใช้ในการคำนวณ

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \quad (2.14)$$

$$V_b = V_c = 0 \quad (2.15)$$

$$I_f = I_b + I_c \quad (2.16)$$

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$V_{a0} = V_{a1} = V_{a2} = \frac{V_a}{3} \quad (2.18)$$

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + \frac{Z_2(Z_0 + 3Z_f)}{Z_1 + Z_2 + Z_f}} \quad (2.19)$$

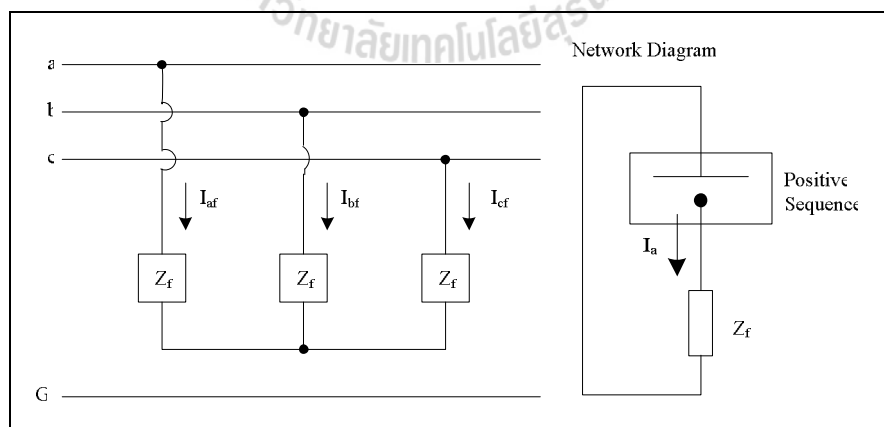
$$I_{a0} = -I_{a1} \frac{Z_0 + 3Z_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (2.20)$$

$$I_{a2} = -I_{a1} \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (2.21)$$

$$I_{a0} = -\frac{V_{a0}}{Z_0} ; I_{a2} = -\frac{V_{a2}}{Z_2} \quad (2.22)$$

2.2.4 การคำนวณฟอลต์กรณีสามเฟสฟอลต์

ฟอลต์ประเภทนี้เกิดขึ้นจากสายส่งไฟฟ้าทั้งสามสายของระบบเกิดการลัดวงจรพร้อมกัน



รูปที่ 2.4 สามเฟสฟอลต์

เงื่อนไขที่ใช้ในการคำนวณ

$$V_a = V_b = V_c = 0 \quad (2.23)$$

$$Z_f = 0 \quad (2.24)$$

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

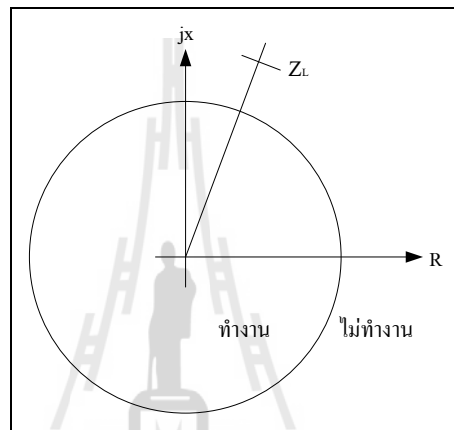
$$I_{a0} = I_{a2} = 0 \quad (2.25)$$

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f} \quad (2.26)$$

2.3 การทำงานของรีเลย์ระยะทาง

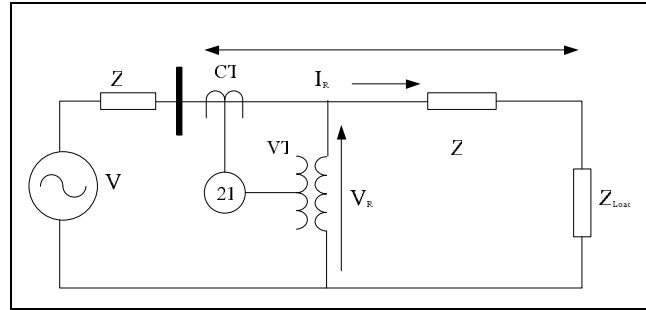
การป้องกันสายส่งไฟฟ้า นิยมใช้รีเลย์ระยะทางในการป้องกันมากกว่าใช้รีเลย์กระแสเกิน (ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์, 2551; ธนัชชัย กุลสุวรรณิชพงษ์, 2551; Anderson P. M., 1999) เนื่องจากรีเลย์ระยะทางมีความสามารถในการแยกแยะฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าดีกว่า ทั้งนี้ผลของการที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์เชื่อมต่อบนระบบไฟฟ้าทำให้ค่าและทิศทางของกระแสเปลี่ยนแปลงไป รีเลย์ระยะทางจะทำงานโดยไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่ในระบบไฟฟ้า แต่จะทำงานขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างตำแหน่งติดตั้งของรีเลย์กับตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ขึ้นบนสายส่งไฟฟ้า รีเลย์ระยะทางจะหาตำแหน่งของฟอลต์โดยการตอบสนองต่อค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์พิจารณาจากการเปรียบเทียบค่ากระแสที่รีเลย์พิจารณากับค่าแรงดันที่รีเลย์วัดได้ที่ตำแหน่งติดตั้งรีเลย์ อิมพีแดนซ์ที่พิจารณานี้อาจจะรวมถึงค่าของอิมพีแดนซ์ลวดวงจรและค่าอิมพีแดนซ์ของระบบบกราวด์ โดยรีเลย์จะทำงานต่อเมื่อค่าอิมพีแดนซ์ที่พิจารณานี้ต่ำกว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้ตั้งค่าไว้ หมายถึงฟอลต์ที่เกิดขึ้นอยู่ในโซนการป้องกัน

ในสภาวะปกติรีเลย์จะพิจารณาอิมพีแดนซ์เป็นอิมพีแดนซ์ของสายส่งไฟฟ้ารวมกับโหลด ดังรูปที่ 2.6 เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์พิจารณาจะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งไฟฟ้าจาก ตำแหน่งที่ติดตั้งรีเลย์ถึงจุดเกิดฟอลต์ดังรูปที่ 2.7 สามารถเขียนโชนการเกิดฟอลต์ลงบนแผนภาพ อิมพีแดนซ์ได้ดังรูปที่ 2.5 โดยวงกลมเป็นคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบอิมพีแดนซ์ ที่ใช้หลักการเปรียบเทียบขนาดของสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับรีเลย์ โชนการเกิดฟอลต์ที่อยู่ใน วงกลมรีเลย์จะทำงานและหากอยู่นอกวงกลมรีเลย์จะไม่ทำงาน



รูปที่ 2.5 โชนการเกิดฟอลต์บนแผนภาพอิมพีแดนซ์

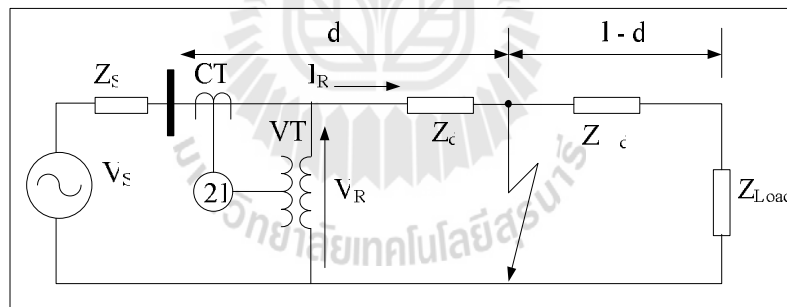
รีเลย์ระยะทางทำงานโดยการเปรียบเทียบอิมพีแดนซ์ด้วยการพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่ รีเลย์ระยะทางพิจารณากับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งติดตั้งรีเลย์ระยะทางเอาไว้ การเปรียบเทียบนี้ พิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งไฟฟ้าจากตำแหน่งที่ติดตั้งรีเลย์จนถึงตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร หากค่าของอิมพีแดนซ์ที่พิจารณาได้มีค่ามากกว่าที่ตั้งไว้หมายความว่าเกิดการลัดวงจรนั้นเกิดขึ้นนอก โชนการป้องกันของรีเลย์ หรือระบบไฟฟ้ายังอยู่ในสภาวะปกติที่ส่งผลให้รีเลย์ไม่ทำงาน ถ้าค่า อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์พิจารณามีค่าต่ำกว่าที่ตั้งไว้หมายความว่าเกิดการลัดวงจรภายในโชนป้องกันของ รีเลย์ซึ่งส่งผลให้รีเลย์ทำงานโดยมีหลักการวิเคราะห์ดังนี้



รูปที่ 2.6 ระบบไฟฟ้าขณะสภาวะปกติ

ในรูปที่ 2.6 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางพิจารณาขณะระบบไฟฟ้าอยู่ในสภาวะปกติสามารถหาได้จากสมการที่ (2.27)

$$Z_R = \frac{V_R}{I_R} = Z_1 + Z_{Load} \quad (2.27)$$



รูปที่ 2.7 ระบบไฟฟ้าขณะเกิดฟอลต์ที่ระยะ d

จากรูปที่ 2.7 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางพิจารณาขณะระบบไฟฟ้าอยู่ในสภาวะเกิดฟอลต์บนสายส่งไฟฟ้าสามารถหาได้จากสมการที่ (2.28)

$$Z_R = \frac{V_R}{I_R} = Z_d \quad (2.28)$$

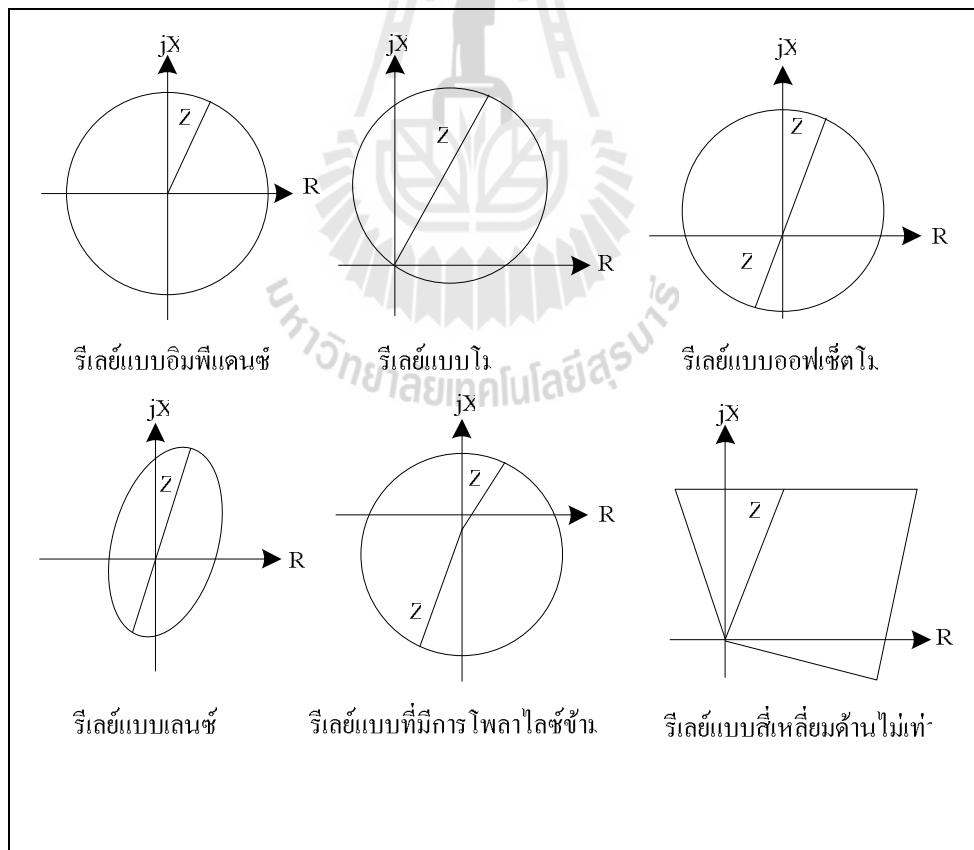
เงื่อนไขในการทำงานของรีเลย์ดังสมการที่ (2.29)

$$Z_d < Z_{pick} \quad (2.29)$$

โดย Z_{pick} คือ Pick up setting ของรีเลย์

2.3.1 คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทาง

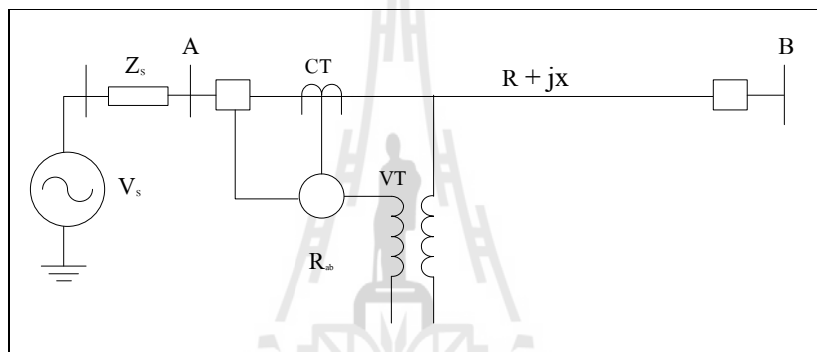
การตรวจสอบฟอลต์ที่เกิดขึ้นว่าอยู่ในโซนการป้องกันหรือนอกโซนการป้องกัน จะใช้การเปรียบเทียบมุมเฟสของสัญญาณที่เป็นอินพุตให้กับชุดเปรียบเทียบสัญญาณมุมเฟส ซึ่งได้จากปริมาณไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณอินพุตให้กับรีเลย์ระยะทาง หลักการดังกล่าวทำให้เกิดคุณลักษณะการทำงานแบบต่าง ๆ ของรีเลย์ระยะทางดังรูปที่ 2.8 โดยแต่ละแบบก็จะใช้กับระบบที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.8 คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบต่าง ๆ

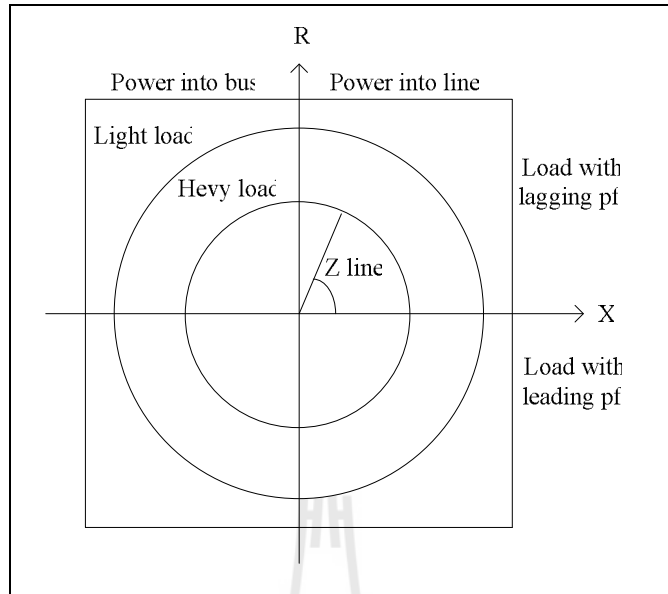
2.3.2 แผนภาพอิมพีแดนซ์

การทำงานของรีเลย์ระยะทางนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นอินพุต ได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า มุมระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้างดรูปที่ 2.9 ส่วนในทางปฏิบัตินั้น การวิเคราะห์พอลต์ที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณี จากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นอินพุตเหล่านี้จะวิเคราะห์ได้ยากเนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามกรณีของพอลต์ที่เกิดขึ้น ดังนั้น การวิเคราะห์การทำงานของรีเลย์ระยะทางจะนำแผนภาพอิมพีแดนซ์มาใช้ โดยแผนภาพอิมพีแดนซ์ จะแสดงค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกที่รีเลย์พิจารณา



รูปที่ 2.9 การป้องกันโดยรีเลย์ระยะทาง

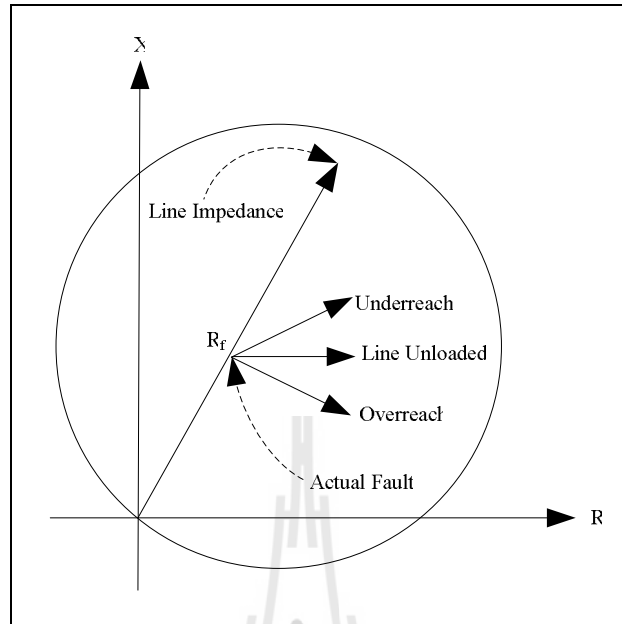
เมื่อทำการกำหนดจุดที่แทนค่าอิมพีแดนซ์ต่าง ๆ ลงบนแผนภาพอิมพีแดนซ์แล้ว สามารถพิจารณาอิมพีแดนซ์เป็นเฟสเซอร์ของแรงดัน โดยมีกระแสเป็นเฟสเซอร์อ้างอิง เมื่อทำการกำหนดให้ขนาดของกระแสและแรงดันคงที่ แต่ค่าของตัวประกอบกำลังเปลี่ยนไป จะทำให้กระแส โหลดค่าหนึ่งจะมีวิถี (locus) ของอิมพีแดนซ์ซึ่งสามารถแทนได้ในรูปวงกลมดังรูป สำหรับกรณีที่มี โหลดขนาดเล็ก (light load) กระแสจะมีค่าน้อย วิถีของอิมพีแดนซ์จะแทนด้วยวงกลมที่มีรัศมีใหญ่ กว่ากรณีที่มีโหลดมีขนาดใหญ่ (heavy load) กระแสโหลดมีค่ามาก เมื่อกำหนดให้ตัวประกอบกำลัง ของโหลดมีค่าคงที่วิถีของอิมพีแดนซ์จะแทนด้วยเส้นตรงที่ผ่านจุดกำเนิด



รูปที่ 2.10 แผนภาพอิมพีแดนซ์

จากรูปที่ 2.10 บริเวณฝั่งขวาของแผนภาพอิมพีแดนซ์ คือ บริเวณที่กำลังไฟฟ้าไหลเข้าสายส่งไฟฟ้า บริเวณฝั่งซ้ายของแผนภาพอิมพีแดนซ์ คือ บริเวณที่กำลังไฟฟ้าไหลเข้าบัส บริเวณฝั่งบนของแผนภาพอิมพีแดนซ์ คือ บริเวณที่โหลดมีค่าตัวประกอบกำลังแบบล่าช้า บริเวณฝั่งล่าง ของแผนภาพอิมพีแดนซ์ คือ บริเวณที่โหลดมีค่าตัวประกอบกำลังแบบนำหน้า

ผลของความต้านทานที่เกิดขึ้นขณะเกิดการลัดวงจร เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบใดก็ตามมักจะมีความต้านทานระหว่างจุดที่เกิดการลัดวงจรเสมอ เช่น ในกรณีลัดวงจรระหว่างเฟสจะมีความต้านทานลัดวงจรระหว่างตัวนำแรงสูง กรณีเกิดการลัดวงจรลงกราวด์ ความต้านทานลัดวงจรระหว่างตัวนำด้านแรงสูงกับวัตถุที่มีศักย์เท่ากับกราวด์หรือความต้านทานเสา เป็นต้น ลักษณะของความต้านทานลัดวงจรจะไม่มีค่าคงที่ ในระหว่างที่มีกระแสลัดวงจรไหลอยู่ในช่วงแรก ๆ ของการเกิดลัดวงจรจะมีความต้านทานน้อย แต่เมื่อการลัดวงจรรานออกไปจะทำให้ความต้านทานลัดวงจรมีค่ามาก ผลกระทบของความต้านทานลัดวงจรต่อรีเลย์ระยะทาง คือ ทำให้รีเลย์ระยะทางพิจารณาตำแหน่งของการเกิดฟอลต์ผิดพลาด ถ้าหากขนาดของความต้านทานลัดวงจรมีขนาดใหญ่จะทำให้รีเลย์ระยะทางพิจารณาอิมพีแดนซ์ปรากฏอยู่นอกโซนการป้องกันส่งผลให้มีความไม่น่าเชื่อถือของรีเลย์ระยะทาง



รูปที่ 2.11 ผลของความต้านทานลัดวงจรบนแผนภาพอิมพีแดนซ์

2.4 รีเลย์ระยะทางกับระบบไฟฟ้า 3 เฟส

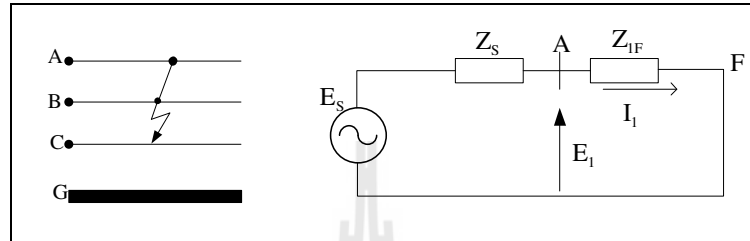
ในระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่ได้มีการต่อลงกราวด์นั้น การลัดวงจรที่สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งหมด มีอยู่ 10 รูปแบบ คือ

- สามเฟสฟอลต์ 1 รูปแบบ ได้แก่ A-B-C
- สองเฟสฟอลต์ 3 รูปแบบ ได้แก่ A-B, B-C, C-A
- สองเฟสฟอลต์ 3 รูปแบบ ได้แก่ A-B-G, B-C-G, C-A-G
- เฟสลกราวด์ฟอลต์ 3 รูปแบบ ได้แก่ A-G, B-G, C-G

จากการลัดวงจรทั้ง 10 รูปแบบ ทำให้สมการที่ใช้ในการคำนวณเกี่ยวกับฟอลต์แตกต่างกันไปตามรูปแบบของฟอลต์ที่เกิดขึ้น ดังนั้นการคำนวณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่รีเลย์มองเห็นก็มีความแตกต่างกันตามลักษณะการลัดวงจร จึงจำเป็นต้องใช้รีเลย์ระยะทางหลาย ๆ ตัวในทางปฏิบัติ โดยรีเลย์แต่ละตัวจะถูกจัดการให้พิจารณาค่ากระแสและแรงดันที่แตกต่างกันเพื่อใช้ในการพิจารณา ระยะทางของจุดที่ติดตั้งรีเลย์กับจุดที่เกิดการลัดวงจรได้อย่างถูกต้อง สำหรับการลัดวงจรทั้งหมด 10 รูปแบบเพื่อให้มีการตั้งค่าอิมพีแดนซ์สำหรับรีเลย์ทั้งหมดที่เป็นไปได้ในทางเดียวกันจึงได้มีการใช้หลักการ คือ การเกิดการลัดวงจรทุกรูปแบบที่เป็นไปได้แรงดันและกระแสอินพุตที่ใช้ป้อนให้กับรีเลย์ตัวที่เหมาะสมจะต้องทำให้รีเลย์ตัวนั้นสามารถพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ลำดับวงได้

2.4.1 สามเฟสฟอลต์

เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบสามเฟสพิจารณาการลัดวงจรระหว่างเฟส A เฟส B และเฟส C สามารถเขียนวงจรส่วนประกอบสมมาตรการลัดวงจรดังรูปที่ 2.12 การลัดวงจรแบบนี้จะมีโครงข่ายมูลฐานลำดับบวกเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 2.12 วงจรส่วนประกอบสมมาตรการลัดวงจร A-B-C

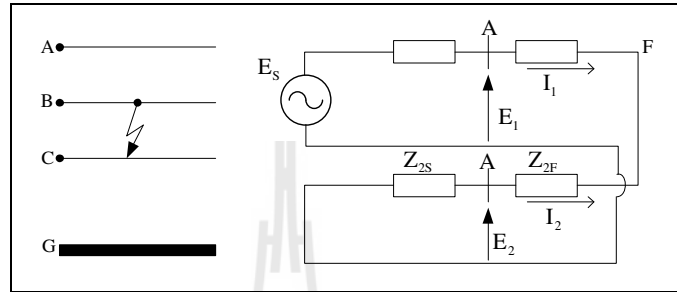
สมการที่นำไปใช้ คือ

$$\frac{E_A - E_B}{I_A - I_B} = \frac{E_B - E_C}{I_B - I_C} = \frac{E_C - E_A}{I_C - I_A} = Z_{IF} \quad (2.30)$$

จากสมการที่ (2.31). ในกรณีการลัดวงจรระหว่างเฟสสามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกได้โดยการวัดผลต่างของแรงดันเฟสสองสายที่เกิดจากการลัดวงจรต่อผลต่างของกระแสในสองเฟสนั้น

2.4.2 สองเฟสฟอลต์

เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบสองเฟสพิจารณาการลัดวงจรระหว่างเฟส B กับเฟส C สามารถเขียนวงจรส่วนประกอบสมมาตรการลัดวงจรดังรูปที่ 2.13 การลัดวงจรแบบนี้จะมีโครงข่ายมูลฐานลำดับบวก และ โครงข่ายมูลฐานลำดับลบต่อขนานกัน



รูปที่ 2.13 วงจรส่วนประกอบสมมาตรการลัดวงจร B-C

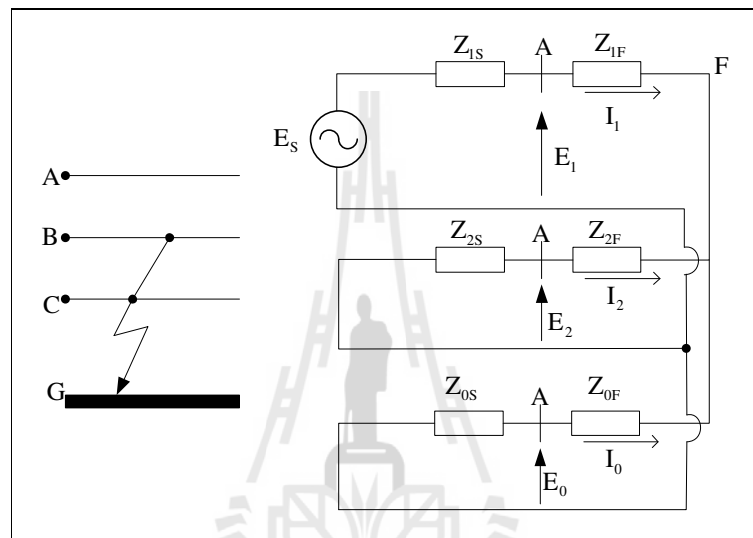
สมการที่นำไปใช้ คือ

$$\frac{E_B - E_C}{I_B - I_C} = Z_{1F} \quad (2.31)$$

จากสมการที่ (2.31). ในกรณีการลัดวงจรระหว่างเฟสสามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกได้โดยการวัดผลต่างของแรงดันเฟสสองสายที่เกิดจากการลัดวงจรต่อผลต่างของกระแสในสองเฟสนั้น

2.4.3 สองเฟสลงกราวด์โฟลต์

เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบสองเฟสลงกราวด์พิจารณาการลัดวงจรระหว่างเฟส B เฟส C และ G สามารถเขียนวงจรส่วนประกอบสมมาตรการลัดวงจรดังรูปที่ 2.14 การลัดวงจรแบบนี้จะมีโครงข่ายมูลฐานลำดับบวก โครงข่ายมูลฐานลำดับลบและโครงข่ายมูลฐานลำดับลบต่อขนานกัน



รูปที่ 2.14 วงจรส่วนประกอบสมมาตรการลัดวงจร B-C-G

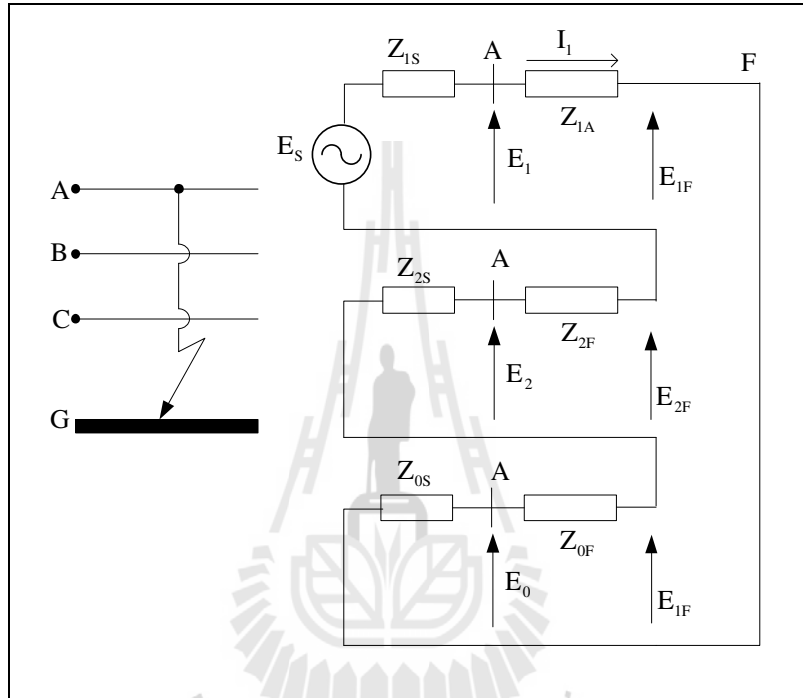
สมการที่นำไปใช้ คือ

$$\frac{E_B - E_C}{I_B - I_C} = Z_{1F} \quad (2.32)$$

จากสมการที่ (2.32) ในกรณีการลัดวงจรระหว่างเฟสสามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกได้โดยการวัดผลต่างของแรงดันเฟสของสายที่เกิดจากการลัดวงจรต่อผลต่างของกระแสในสองเฟสนั้น

2.4.4 เฟสลงกราวด์โฟลต์

เมื่อเกิดการลัดวงจรแบบเฟสลงกราวด์พิจารณาการลัดวงจรระหว่างเฟส A และ G สามารถเขียนวงจรส่วนประกอบสมมาตรการลัดวงจรดังรูปที่ 2.15 การลัดวงจรแบบนี้จะมีโครงข่ายมูลฐานลำดับบวก โครงข่ายมูลฐานลำดับลบและโครงข่ายมูลฐานลำดับลต่อนุกรมกัน



รูปที่ 2.15 วงจรส่วนประกอบสมมาตรการลัดวงจร A-G

สมการที่ใช้นำไปใช้คือ

$$I'_A = I_A + \left(\frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \right) I_A \quad (2.33)$$

$$I'_A = I_A + mI_0 \quad (2.34)$$

$$\frac{E_A}{I'_A} = Z_{1F} \quad (2.35)$$

รีเลย์ระยะทางสามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกได้โดยใช้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้ถูกชดเชยแล้ว โดยทั่วไปค่า m ที่นิยมใช้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 2.5 สำหรับสายส่งไฟฟ้าแบบพาดอากาศ

2.5 การเปรียบเทียบของรีเลย์ระยะทาง

รีเลย์ระยะทางทั่วไปจะมีความทำงานโดยวัดค่าการเปลี่ยนแปลงระหว่างกรณีสภาวะปกติและกรณีสภาวะที่เกิดฟอลต์โดยการเปรียบเทียบสัญญาณขาเข้าเป็นอินพุตมากกว่า 1 สัญญาณซึ่งมีการเปรียบเทียบจะแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือ การเปรียบเทียบโดยใช้เฟสและการเปรียบเทียบโดยใช้ขนาด

สมการทั่วไปที่ใช้ในการเปรียบเทียบกำหนดให้ S_1 และ S_2 เป็นสัญญาณอินพุตที่เข้าสู่ระบบการเปรียบเทียบโดยให้

$$S_1 = k_1 A + k_2 B \quad (2.36)$$

$$S_2 = k_3 A + k_4 B \quad (2.37)$$

โดย A คือ แรงดันที่วัดได้จากรีเลย์ ($A \angle \theta$)

B คือ กระแสที่วัดได้จากรีเลย์ ($B \angle \phi$)

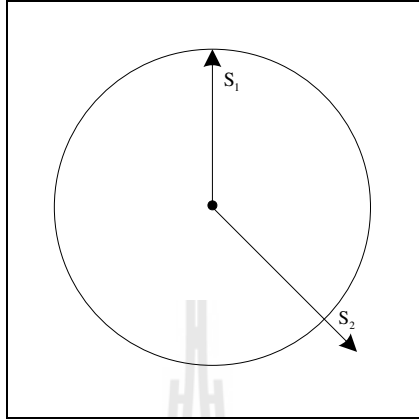
k_1, k_2, k_3, k_4 เป็นค่าคงที่

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$S_1 = |S_1| e^{j\theta_1} \quad (2.38)$$

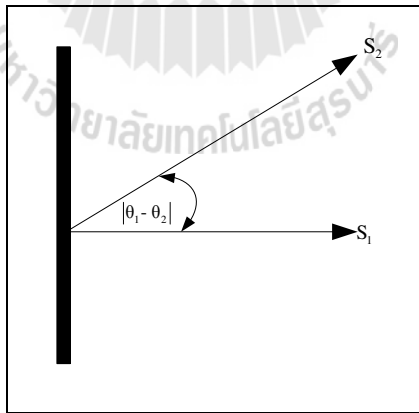
$$S_2 = |S_2| e^{j\theta_2} \quad (2.39)$$

การเปรียบเทียบโดยใช้ขนาด



รูปที่ 2.16 การเปรียบเทียบโดยใช้ขนาด

จากรูปที่ 2.16 เงื่อนไขที่ใช้ในการส่งสัญญาณเพื่อทำคัตวงจร (trip signal) คือ $|S_1| > |S_2|$
และจุดเริ่มต้นการทำงาน (threshold operating) คือ $|S_1| > |S_2|$
การเปรียบเทียบโดยใช้เฟส



รูปที่ 2.17 การเปรียบเทียบโดยใช้เฟส

จากรูปที่ 2.17 เงื่อนไขการส่งสัญญาณคัตวงจรคือ $|\theta_1 - \theta_2| > 90^\circ$ และจุดเริ่มต้นการทำงาน
คือ $|\theta_1 - \theta_2| = 90^\circ$

2.6 โชนกการป้องกันของรีเลย์ระยะทาง

ในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าด้วยรีเลย์ระยะทาง จะมีการแบ่งโชนกป้องกันออกเป็น 3 ส่วน เพื่อให้สามารถป้องกันสายส่งไฟฟ้าได้ตลอดทั้งสายและเป็นการป้องกันสำรอง (back-up protection) การแบ่งการโชนกป้องกันสามารถทำได้ดังนี้

โชนก 1 กำหนดที่ 85 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ของความยาวสายส่งไฟฟ้าที่จะป้องกัน ทำงานทันที โดยไม่มีการหน่วงเวลาเมื่อเกิดการลัดวงจรในโชนกการป้องกัน

โชนก 2 กำหนดที่ 120 ถึง 150 เปอร์เซ็นต์ ของความยาวสายส่งไฟฟ้าที่จะป้องกัน ทำงานเป็นการป้องกันสำรองให้กับรีเลย์โชนก 1 โดยมีการหน่วงเวลา 0.3 วินาที

โชนก 3 กำหนดบริเวณไปถึง 150 เปอร์เซ็นต์ ของความยาวสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ยาวที่สุดเส้น ถัดไปทำงานเป็นการป้องกันสำรองให้กับรีเลย์โชนก 1 และรีเลย์โชนก 2 โดยมีการหน่วงเวลา 1 วินาที

2.7 สรุป

การศึกษาการป้องกันสายส่งไฟฟ้าที่เกิดฟอลต์นั้น เริ่มต้นจากการศึกษาคำนวณฟอลต์ และรูปแบบฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้าซึ่งฟอลต์ที่เกิดขึ้นนั้นมีอยู่ 4 ชนิด คือ สามเฟสฟอลต์ สองเฟสฟอลต์ สองเฟสลงกราวด์ฟอลต์และเฟสลงกราวด์ฟอลต์ จากนั้นศึกษาการทำงานของรีเลย์ระยะทางที่ใช้สำหรับป้องกันสายส่งไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

บทที่ 3

ระบบนิวโร-ฟัซซี

3.1 กล่าวนำ

การคำนวณแบบอ่อน (soft computing) เป็นรูปแบบการคำนวณที่ได้รับความนิยมในงานทางด้านสร้างระบบชาญฉลาด (intelligence system) เพื่อแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อน และยังได้นำมาใช้ในการแก้ปัญหาที่มีความไม่แน่นอนของสถานะแวดล้อม ที่มีการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ และข้อมูลอยู่ตลอดเวลา เป็นระบบที่สามารถปรับตัวให้เรียนรู้ปัญหาในสถานะแวดล้อมที่มีความไม่แน่นอนต่าง ๆ ซึ่งการประมวลผลกับสถานะแวดล้อมที่มีความไม่แน่นอนต่าง ๆ ซึ่งมีองค์ประกอบของการคำนวณแบบอ่อนเป็นการผสมผสานการทำงานของระบบชาญฉลาดหลายชนิดเข้าด้วยกันประกอบไปด้วย การหาเหตุผลโดยประมาณ (approximate reasoning) การคำนวณเชิงวิวัฒนาการ (evolutionary computation) ระบบอนุมานฟัซซี (fuzzy inference system) และเครือข่ายประสาทเทียม (neural network) ซึ่งในระบบชาญฉลาดแต่ละชนิดก็มีจุดเด่นเฉพาะตัว ตัวอย่างระบบชาญฉลาดแบบผสมผสาน (hybrid intelligence system) เช่น นิวโร-ฟัซซี (neuro-fuzzy) ก็เป็นการทำงานร่วมกันของเครือข่ายประสาทเทียม ซึ่งมีความสามารถในการเรียนรู้ชุดข้อมูล และปรับตัวของระบบตามสถานะแวดล้อมที่มีความไม่แน่นอน และความสามารถของระบบอนุมานฟัซซี ซึ่งทำงานในลักษณะการนำเสนอองค์ความรู้ (knowledge representation) จากฐานความรู้ (knowledge base) แล้วนำองค์ความรู้นั้นมาประกอบการตัดสินใจ

3.2 ทฤษฎีฟัซซีเซต

ฟัซซีลอจิกถูกพัฒนาขึ้นโดย Zadeh (1965) พยายามทำให้ระบบมีความฉลาดเหมือนมนุษย์ (intelligent system) ที่สามารถพิจารณาและวิเคราะห์แก้ไขปัญหาต่าง ๆ ได้โดยใช้องค์ความรู้ หลักเหตุผลและปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ มาประกอบการพิจารณาและวิเคราะห์หาคำตอบของปัญหาที่เหมาะสมที่สุด (optimal) และยังสามารถนำมาใช้ในการอธิบายระบบที่มีความไม่ชัดเจนหรือมีความคลุมเครือ ฟัซซีเซตนั้นมีรากฐานมาจากทฤษฎีเซต โดยค่าความเป็นสมาชิกของข้อมูลมีหลากหลายระดับซึ่งอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ซึ่งแตกต่างจากค่าของความเป็นสมาชิกของเซตชัดเจนที่มีค่า 0 และ 1 เพียงเท่านั้น ทฤษฎีฟัซซีเซตได้ถูกพัฒนาและนำไปใช้ในงานหลายด้านอย่างกว้างขวาง ตัวอย่างเช่น งานทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ งานทางด้านระบบการควบคุม หรือ งานทางด้านการจัดกลุ่มข้อมูล เป็นต้น

ในกรณีที่เป็นเซตชัดเจน (crisp set) การระบุถึงความเป็นสมาชิกของเซตจะมีเพียง การเป็นสมาชิกในเซต แทนด้วยค่าระดับความเป็นสมาชิกด้วย 1 และการไม่เป็นสมาชิกในเซต แทนด้วยระดับค่าความเป็นสมาชิกด้วย 0 แต่ในฟัซซีเซตการระบุถึงการเป็นสมาชิกในเซตจะแสดงระดับความเป็นสมาชิกที่มีลักษณะต่อเนื่องอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ถ้ากำหนดให้ U เป็นเซตเอกภพสัมพัทธ์ และ x เป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A และฟัซซี $A \subseteq U$ สามารถกล่าวได้ว่า $x \in U$ สำหรับฟัซซีเซต กำหนด $\mu_A(x)$ เป็นฟังก์ชันสมาชิก (membership function) ของ x ในฟัซซีเซต A สามารถเขียนความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังสมการที่ (3.1)

$$A = \{(x, \mu_A(x)); x \in U\} \quad (3.1)$$

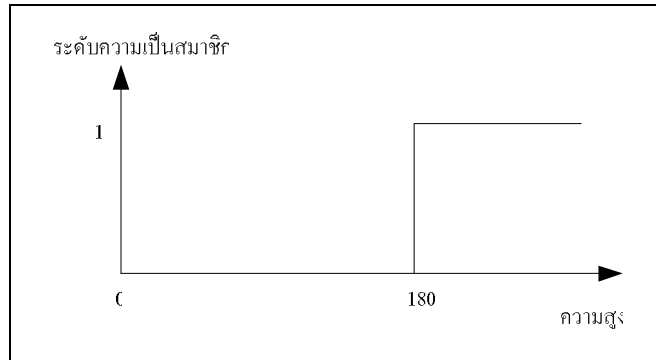
ตัวแปรทางภาษา (linguistic Variable) คือ ตัวแปรฟัซซี (fuzzy variable) ของระบบซึ่งจะให้ค่าเป็นคำพูดที่มีความหมายตามต้องการ ตัวอย่างเช่น ถ้ากำหนดให้ “ความสูงของคน” เป็นตัวแปรฟัซซีและถ้ากำหนดค่าตัวแปรของเซตเป็น {เตี้ย, ปานกลาง, สูง} เรียกเซตของค่าตัวแปรเหล่านี้ว่าค่าตัวแปรฟัซซี นอกจากนี้ตัวแปรฟัซซีแต่ละตัวแปรอาจจะต้องเพิ่มส่วนขยาย (hedges) เพื่อปรับให้ค่าตัวแปรฟัซซีให้มีความยืดหยุ่นมากยิ่งขึ้น เช่น คำว่า “เตี้ยมาก” หรือ “ค่อนข้างสูง” เป็นต้น คำพูดที่ว่า “มาก” หรือ “ค่อนข้าง” เป็นส่วนขยายของตัวแปรฟัซซี

3.3 การแทนข้อมูลในฟัซซีเซต

การแทนข้อมูลในฟัซซีเซต จะอธิบายโดยการเปรียบเทียบกับเซตชัดเจน เช่น ความสูงของคนเป็นตัวแปรฟัซซีมีค่าอยู่ในช่วง 150 ถึง 180 เซนติเมตร กำหนดให้เซต A เป็นเซตของคนที่สูง ดังนั้นเซต A ในกรณีของระบบเซตชัดเจนจะต้องมีการกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน เพื่อเป็นตัวระบุว่าข้อมูลจะเป็นสมาชิกของเซตใด สมมติกำหนดให้ค่าจุดเริ่มการเปลี่ยนให้มีค่าเท่ากับ 170 เซนติเมตรกล่าวคือ ถ้าคนใดมีความสูงมากกว่าหรือเท่ากับ 180 เซนติเมตร จะระบุว่าคนนั้นเป็นคนสูง สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันสมาชิกได้ดังสมการที่ (3.2)

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 180 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.2)$$

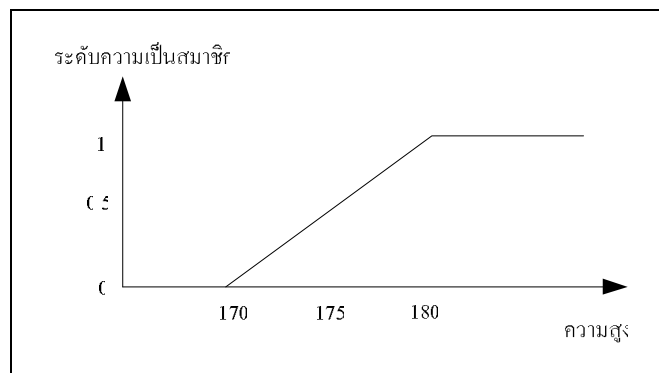
โดยที่ x คือ ความสูงของคน จากสมการที่ (3.2) สามารถอธิบายความเป็นสมาชิกของเซตชัดเจนได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เช็ดคนสูงแบบชัดเจน

จากรูปที่ 3.1 คนที่มีความสูงตั้งแต่ 180 เซนติเมตรขึ้นไปเท่านั้น จึงจะระบุได้ว่าเป็นที่คนสูง มีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 นอกจากนี้ระบุว่าเป็นคนเตี้ยทั้งหมด มีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0 ความเป็นจริงนั้นคนที่มีความสูง 179.9 เซนติเมตร ก็มีความสูงใกล้เคียงกับคนที่สูง 180 เซนติเมตร มากแต่ก็ยังระบุว่าเป็นคนเตี้ย จากปัญหานี้สามารถอธิบายโดยฟัซซีเซตที่มีฟังก์ชันสมาชิกสอดคล้อง ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่าการอธิบายโดยใช้เซตชัดเจนได้ดังแสดงสมการที่ (3.3)

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{1}{10}(x-170) & 170 \leq x \leq 180 \\ 1 & x \geq 180 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.3)$$

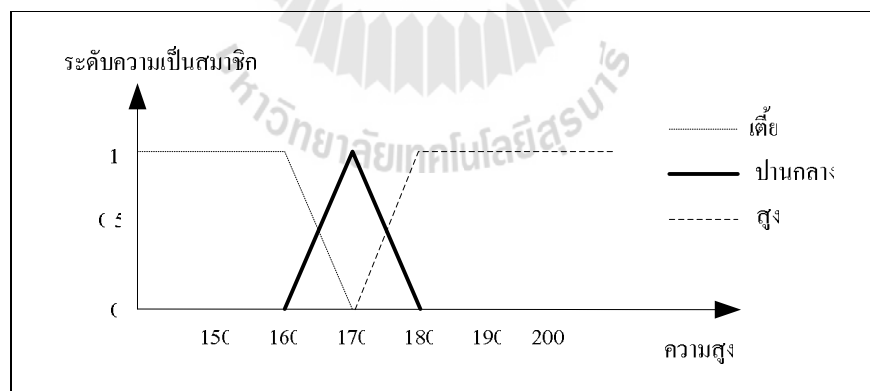


รูปที่ 3.2 เช็ดคนสูงแบบฟัซซี

ในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 แสดงระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรฟuzzyก็จะมีค่าต่อเนื่องในช่วง 0 ถึง 1 เช่น คนที่มีความสูง 175 เซนติเมตร ก็จะระบุว่าเป็นคนสูงเช่นเดียวกัน แต่จะมีระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรฟuzzyคนสูงเท่ากับ 0.5 ถ้าเปรียบเทียบกับเซตชัดเจนคนที่มีความสูง 175 เซนติเมตร จะมีระดับความเป็นสมาชิกของเซตคนสูงเท่ากับ 0 ทั้งที่มีความสูงน้อยกว่า 180 เซนติเมตร อยู่เพียงเล็กน้อย

3.4 ฟังก์ชันสมาชิก

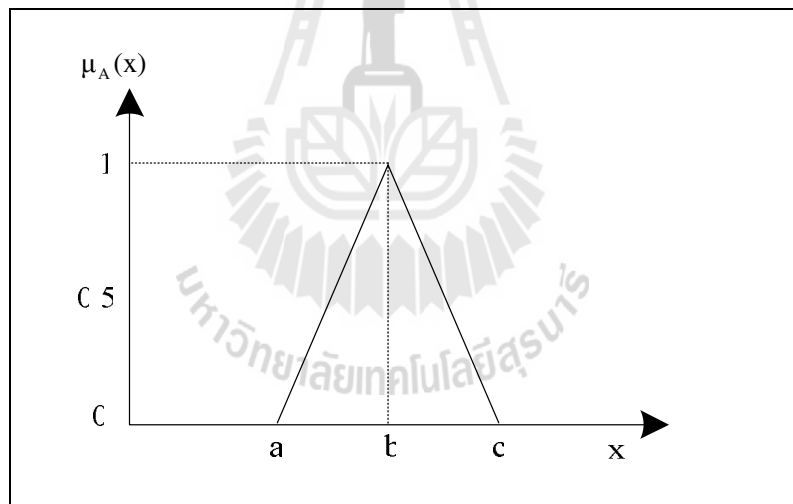
เมื่อพิจารณาคูสมบัตินี้ของฟuzzyเซตจากรูปที่ 3.2 แกนแนวนอนจะแทนขอบเขตของฟuzzyเซต ส่วนในแกนแนวตั้งจะแทนค่าระดับความเป็นสมาชิก ในรูปที่ 3.2 จะมีตัวแปรฟuzzyตัวแปรเดียวคือ ตัวแปรฟuzzyของคนสูง เพื่อให้ครอบคลุมกลุ่มประชากรที่ทำการศึกษได้ทำการเพิ่มตัวแปรฟuzzyอีกสองตัวแปรคือ ตัวแปรฟuzzyของคนเตี้ย และตัวแปรฟuzzyของคนที่มีความสูงปานกลาง ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งในกรณีนี้ขอบเขตของตัวแปรฟuzzyที่ครอบคลุมประชากรทั้งหมดที่ทำการศึกษา จะเรียกขอบเขตของตัวแปรนี้ว่าเซตเอกภพสัมพัทธ์ และในแต่ละตัวแปรฟuzzyก็จะมีขอบเขตของตัวแปรฟuzzyเอง อย่างเช่น ตัวแปรฟuzzyของคนเตี้ยจะมีขอบเขตอยู่ในช่วง 0 ถึง 170 เซนติเมตร ตัวแปรฟuzzyของคนที่มีความสูงปานกลางจะมีขอบเขตอยู่ในช่วง 160 ถึง 180 เซนติเมตร และตัวแปรฟuzzyของคนสูงจะมีค่าตั้งแต่ 180 เซนติเมตรขึ้นไป



รูปที่ 3.3 เซตคนสูงแบบฟuzzy มี 3 ตัวแปรฟuzzy

ฟังก์ชันสมาชิกมีหลากหลายแบบที่ใช้ประมาณระดับความเป็นสมาชิกของแต่ละตัวแปรฟัซซี เช่น ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยม และฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ใช้ประมาณระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรฟัซซีเป็นแบบเชิงเส้น ฟังก์ชันสมาชิกซิกมอยด์ ฟังก์ชันสมาชิกรูปประฆังคว่ำ และฟังก์ชันสมาชิกเกาส์เซียน ใช้ประมาณระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรฟัซซีเป็นแบบต่อเนื่อง เป็นต้น

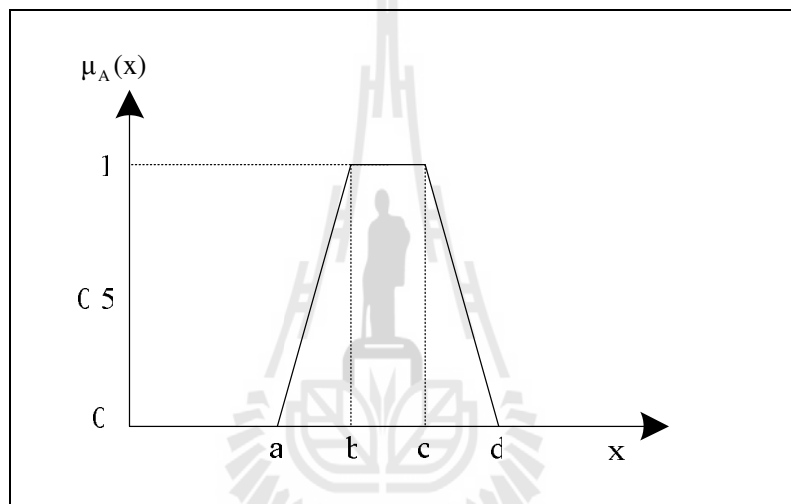
ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยม (triangular membership function) นิยมใช้กันมากในระบบควบคุมที่ใช้ฟัซซีเซต ตัวแปรฟัซซีที่กำหนดโดยฟังก์ชันนี้จะต้องมีค่าที่เหมาะสมที่สุดเพียงค่าเดียวที่ทำให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกเท่ากับหนึ่ง ส่วนค่าอื่นจะมีระดับความเป็นสมาชิกลดลงไปเรื่อย ๆ เมื่อ ยิ่งห่างจากค่าระดับความเป็นสมาชิกเท่ากับหนึ่งมากขึ้น ในตัวอย่างของตัวแปรความสูง ตัวแปรฟัซซีสูงปานกลาง มีฟังก์ชันสมาชิกเป็นแบบรูปสามเหลี่ยม ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยมมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 พารามิเตอร์ คือ a , b และ c ถ้ากำหนดให้ a , b และ c เป็นจำนวนจริงใด ๆ และกำหนดให้ $a \leq b \leq c$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการของฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยมได้ดังสมการที่ (3.4)



รูปที่ 3.4 ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยม

$$\text{triangle}(x;a,b,c) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & c \leq x \end{cases} \quad (3.4)$$

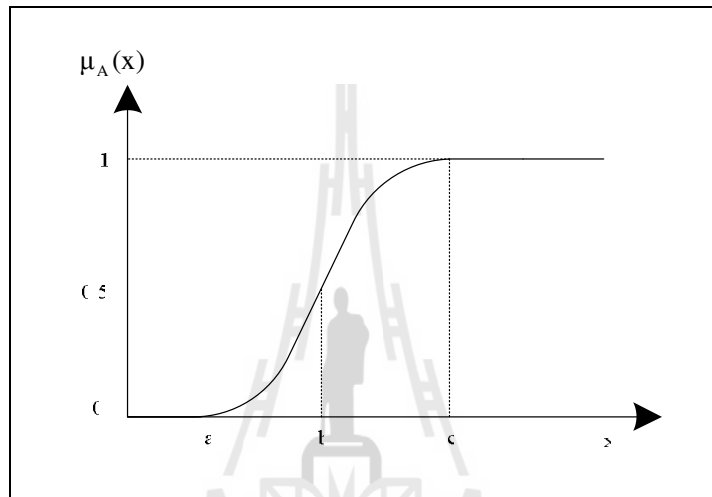
ฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal membership function) เป็นฟังก์ชันสมาชิกที่กำหนดด้วยสมการรูปสี่เหลี่ยมคางหมู นิยมใช้กันมากในระบบควบคุมที่ใช้ฟัซซีเซต ฟังก์ชันสมาชิกที่กำหนดด้วยสมการรูปสี่เหลี่ยมคางหมูจะต้องมีช่วงของค่าที่เหมาะสมมากที่สุดอยู่ในกลุ่มหนึ่งที่ทำให้ระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรฟัซซีเซตนั้น ๆ นอกจากนั้นจะมีระดับความเป็นสมำนี้น้อยลงเรื่อย ๆ เมื่อยิ่งห่างจากข้อมูลกลุ่ม ฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมามีพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ คือ a b c และ d ถ้ากำหนดให้ a b c และ d เป็นจำนวนจริงใด ๆ และกำหนดให้ $a \leq b \leq c \leq d$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการของฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมูได้ดังสมการที่ (3.5)



รูปที่ 3.5 ฟังก์ชันแบบรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

$$\text{trapezoid}(x;a,b,c) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x \leq d \\ 0 & d \leq x \end{cases} \quad (3.5)$$

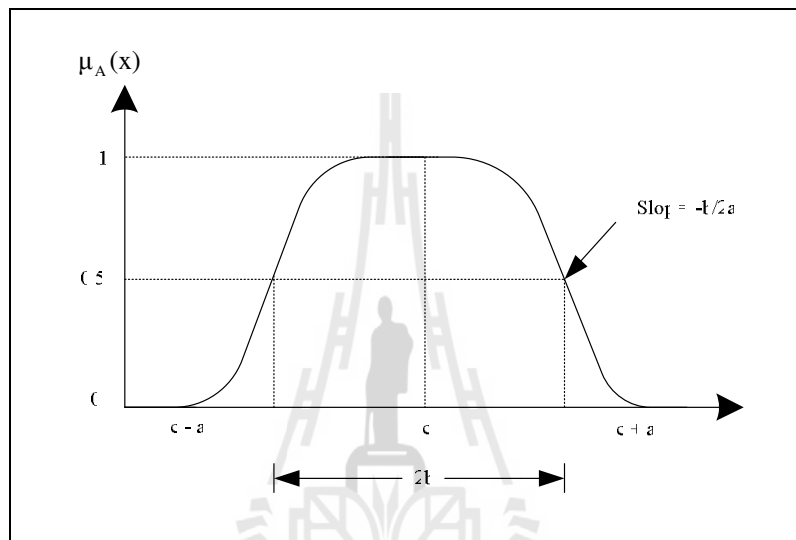
ฟังก์ชันสมาชิกแบบซิกมอยด์ (sigmoid membership function) เป็นฟังก์ชันสมาชิกที่มีรูปร่างคล้ายตัวเอส ฟังก์ชันสมาชิกแบบซิกมอยด์เป็นฟังก์ชันสมาชิกที่กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างขอบเขตไปยังพิสัยแบบไม่เป็นเชิงเส้น ฟังก์ชันสมาชิกแบบซิกมอยด์มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 พารามิเตอร์ คือ a , b และ c ถ้ากำหนดให้ a , b และ c เป็นจำนวนจริงใด ๆ และกำหนดให้ $a \leq b \leq c$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการฟังก์ชันสมาชิกซิกมอยด์ได้ดังสมการที่ (3.6)



รูปที่ 3.6 ฟังก์ชันสมาชิกแบบซิกมอยด์

$$\text{sigmoid}(x;a,b,c) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ 2\left(\frac{x-a}{c-a}\right)^2 & a \leq x \leq b \\ 1-2\left(\frac{x-a}{c-a}\right)^2 & b \leq x \leq c \\ 1 & x \geq c \end{cases} \quad (3.6)$$

ฟังก์ชันสมาชิกแบบรูประฆังคว่ำ (bell membership function) เป็นฟังก์ชันสมาชิกที่มีคุณสมบัติของข้อมูลคล้ายกับฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบรูปสามเหลี่ยม แต่ข้อมูลของขอบเขตที่แปลงไปพิสัยมีความสัมพันธ์ในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ฟังก์ชันสมาชิกแบบรูประฆังคว่ำมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 พารามิเตอร์ คือ a , b และ c ถ้ากำหนดให้ a , b และ c เป็นจำนวนจริงใด ๆ ดังนั้นฟังก์ชันสมาชิกแบบรูประฆังคว่ำสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.7)

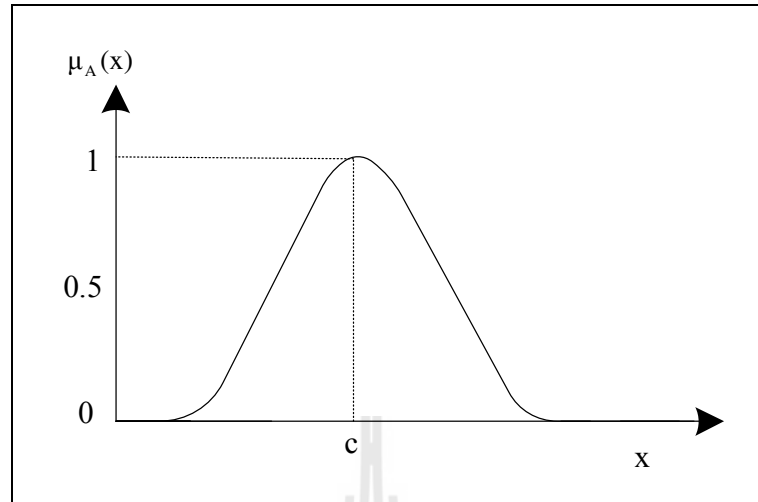


รูปที่ 3.7 ฟังก์ชันสมาชิกแบบรูประฆังคว่ำ

$$\text{bell}(x;a,b,c) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x-c}{a} \right)^2 \right]^b} \quad (3.7)$$

ฟังก์ชันสมาชิกแบบเกาส์เซียน (gaussian membership function) ฟังก์ชันสมาชิกแบบเกาส์เซียนมีทั้งหมด 2 พารามิเตอร์ คือ c และ σ กำหนดให้ c เป็นค่าจุดศูนย์กลาง และ σ เป็นความกว้างของฟังก์ชันสมาชิกแบบเกาส์เซียน ดังนั้นสามารถเขียนสมการฟังก์ชันสมาชิกแบบเกาส์เซียนได้ดังสมการที่ (3.8)

$$\text{gaussian}(x;c,\sigma) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.8)$$



รูปที่ 3.8 ฟังก์ชันสมาชิกแบบรูปเกาส์เซียน

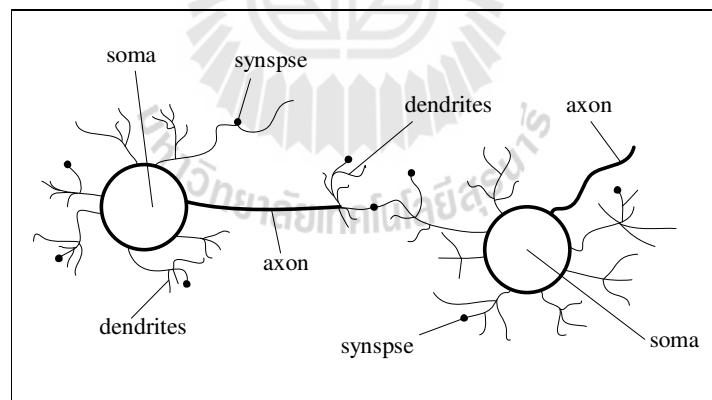
3.5 เครือข่ายประสาทเทียม

เครือข่ายประสาทเทียมได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยอาศัยหลักการทำงานของสมองมนุษย์ ดังนั้นความเข้าใจในคุณลักษณะทางกายภาพและเชิงพฤติกรรมขององค์ประกอบต่าง ๆ ในสมองจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งสมองประกอบด้วยหน่วยประมวลผลพื้นฐานที่เรียกว่าเซลล์ประสาท (neuron) ที่มีการเชื่อมโยงกันเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเซลล์ประสาทแต่ละเซลล์ก็คือ หน่วยประมวลผลอย่างง่ายซึ่งรับสัญญาณและรวมสัญญาณที่ถูกส่งมาจากเซลล์ประสาทส่วนอื่น ๆ แต่ละเซลล์ประสาทในสมองของมนุษย์มีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อนประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ได้แก่

1. โซมา (soma) คือตัวเซลล์ประสาทมีหน้าที่ในการรวมสัญญาณที่เข้ามาในเซลล์ประสาทจากเดนไดรต์
2. เดนไดรต์ (dendrite) คือ เส้นใยบาง ๆ ที่เซลล์ประสาทให้มีหน้าที่รับสัญญาณไฟฟ้าเข้าสู่เซลล์ประสาทแต่ละเซลล์ประสาทจะมีเดนไดรต์จำนวนมากจัดตัวมีลักษณะเหมือนกิ่งไม้ โดยที่เดนไดรต์จะแตกสาขาเข้าไปยังเซลล์ประสาทอื่นที่อยู่รอบ ๆ โซมา เพื่อรับสัญญาณจากเซลล์ประสาทอื่น ๆ ในสมอง
3. แอกซอน (axon) คือ สายส่งสัญญาณขนาดยาวและใหญ่ที่ของเซลล์ประสาทใช้เส้นทางผ่านสัญญาณไปยังเซลล์ประสาทอื่น ๆ ส่วนปลายแอกซอนจะแตกออกเป็นสาขาย่อย ๆ โดยที่ส่วนปลายของแต่ละสาขามีลักษณะเป็นปม และอยู่ใกล้จนเกือบสัมผัสกับปลายของเดนไดรต์ของเซลล์ประสาทอื่น

ที่บริเวณรอยต่อระหว่างปลายแอกซอนกับปลายเดนไดรต์ จะเรียกว่าไซแนปส์ (synapse) สัญญาณไฟฟ้าที่ถูกส่งมาถึงปลายแอกซอนจะกระตุ้นให้เกิดการส่งผ่านของสัญญาณในเชิงเคมีผ่านไซแนปส์ สัญญาณเชิงเคมีดังกล่าวจะถูกเดนไดรต์ที่อนุমানเป็นสัญญาณไฟฟ้าเคมีเข้าสู่เซลล์ประสาท เมื่อผลรวมของระดับสัญญาณสูงถึงจุดเปลี่ยนที่จะไปกระตุ้นเซลล์ประสาท ในตัวเซลล์ประสาทจะให้กำเนิดศักย์กระทำ (action potential) แต่ถ้าผลรวมของระดับสัญญาณสูงไม่ถึงระดับจุดเปลี่ยน สัญญาณที่มีอยู่ก็จะสลายไปอย่างรวดเร็ว และไม่ทำให้เกิดการกระตุ้นใด ๆ ดังนั้นคุณลักษณะที่สำคัญของไซแนปส์ คือ ความสามารถของสัญญาณที่ถูกส่งผ่านไปซึ่งขึ้นอยู่กับการยึดติดของการเชื่อมต่อ โดยสัญญาณนี้อาจจะมีสภาพเป็นสัญญาณกระตุ้น (excitatory) หรือเป็นสัญญาณหยุดยั้ง (inhibitory) อย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้

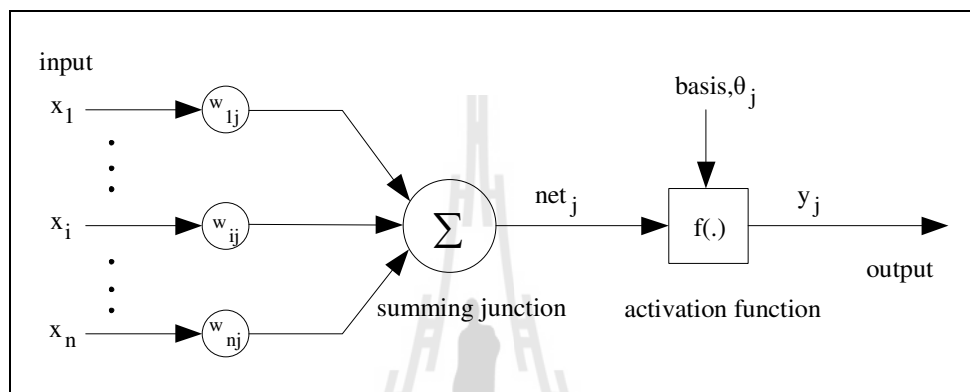
สิ่งที่สำคัญของเครือข่ายประสาทเทียม คือ การจำลองไซแนปส์ ในการจำลองไซแนปส์ถ้าค่าน้ำหนักนี้มีขนาดใหญ่มาก สัญญาณจะส่งผ่านรอยต่อไซแนปส์ได้มาก ถ้าหากค่าน้ำหนักนี้มีขนาดเล็กก็หมายความว่าสัญญาณจะส่งผ่านรอยต่อไซแนปส์ได้น้อย นอกจากนั้นการเป็นค่าบวกหรือเป็นค่าลบของค่าน้ำหนักก็มีความหมายเช่นกัน คือถ้าค่าน้ำหนักมีค่าเป็นบวกสัญญาณจะเป็นสัญญาณกระตุ้น แต่ถ้าหากค่าน้ำหนักมีค่าเป็นลบสัญญาณจะเป็นสัญญาณหยุดยั้ง ดังนั้นจากที่ได้กล่าวมากระบวนการประมวลผลของเครือข่ายประสาทเทียมจะอาศัยหลักการประมวลผลของสมอง



รูปที่ 3.9 ชีวิตวิทยาของสมอง

การทำงานแบบนี้มีข้อดี คือ ไม่จำเป็นต้องทราบถึงรูปแบบกระบวนการคำนวณที่แน่นอน แต่ให้เป็นหน้าที่ของกระบวนการเรียนรู้ ในการทำหน้าที่สร้างรูปแบบการคำนวณที่สอดคล้องและใกล้เคียงกับการคำนวณหาค่าที่ถูกต้องขึ้นมา โดยการปรับปรุค่าที่อยู่ภายในหน่วยย่อย หรือ ค่าที่บริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างหน่วยย่อยเหล่านี้ว่าจะให้ค่าสัญญาณอินพุตที่เข้ามามีความสำคัญเท่าไร

เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในทางคอมพิวเตอร์ จึงจำเป็นสร้างหน่วยประมวลผลซึ่งมีลักษณะคล้ายเซลล์ประสาท โดยให้แต่ละหน่วยประกอบด้วยสัญญาณอินพุตที่การคูณกับค่าน้ำหนัก เพื่อระบุค่าระดับความสำคัญของสัญญาณอินพุตนั้น ๆ ภายในจะมีการประมวลผลโดยส่วนแรกจะนำสัญญาณอินพุตที่การคูณกับค่าน้ำหนักทั้งหมดมารวมกัน จากนั้นนำสัญญาณที่รวมได้ไปแทนค่าในฟังก์ชันกระตุ้น (activation function) แล้วจะได้สัญญาณเอาต์พุตออกมาในขั้นตอนสุดท้าย



รูปที่ 3.10 แบบจำลองของนิวรอล

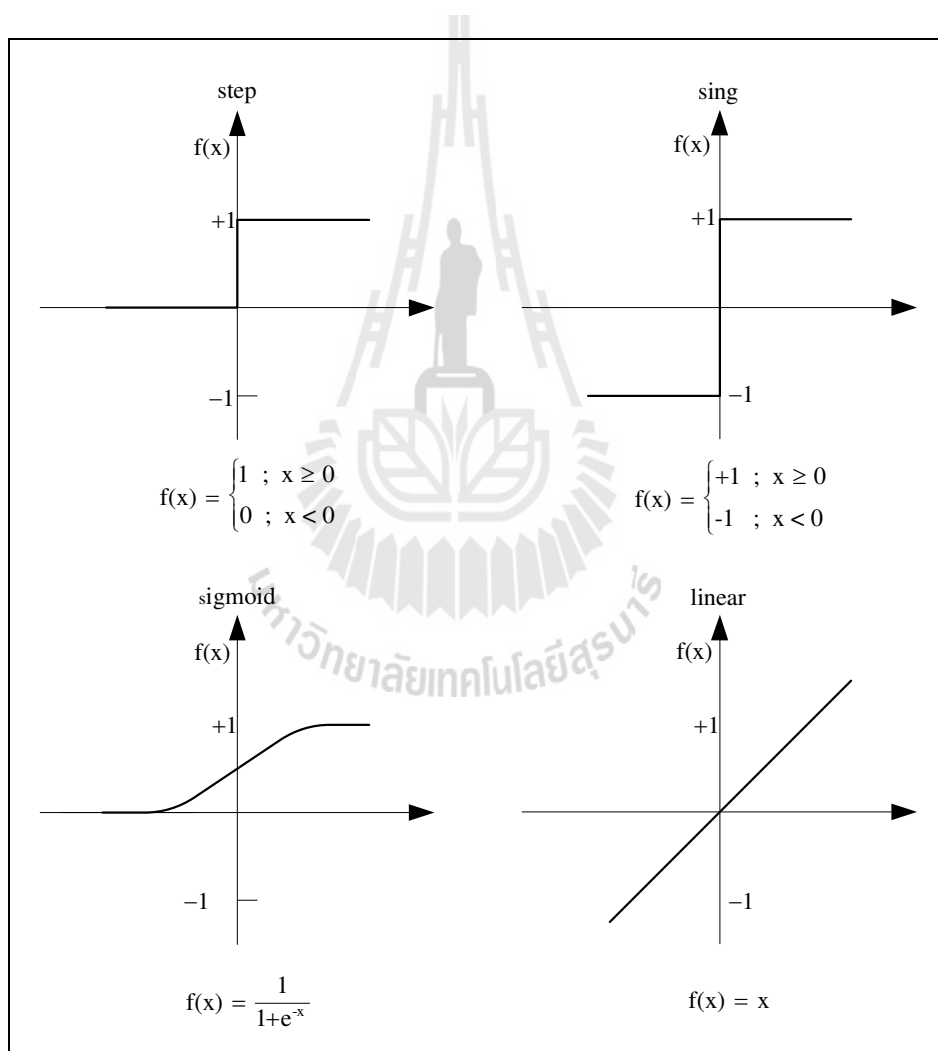
แบบจำลองของนิวรอลในรูปที่ 3.10 สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$net_j = \sum_{i=1}^n x_i w_{ij} \quad (3.9)$$

$$y_j = f(net_j + \theta_j) \quad (3.10)$$

เมื่อ	x_i	คือ	สัญญาณอินพุต
	y_j	คือ	สัญญาณเอาต์พุต
	w_{ij}	คือ	ค่าน้ำหนักจากอินพุต i ไปยังนิวรอล j
	θ_j	คือ	ค่าไบแอสที่นิวรอล j
	$f(.)$	คือ	ฟังก์ชันกระตุ้น
	net_j	คือ	ผลรวมของผลคูณระหว่างค่าน้ำหนักกับสัญญาณอินพุต

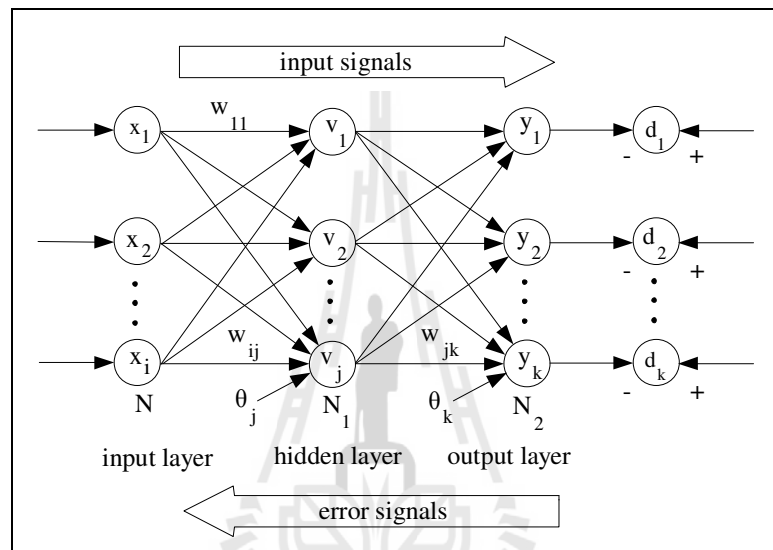
ฟังก์ชันกระตุ้นที่นิยมใช้ คือ ฟังก์ชันแบบขั้นบันได (step function) ฟังก์ชันเครื่องหมาย (sign function) ฟังก์ชันซิกมอยด์ (sigmoid function) และฟังก์ชันเชิงเส้น (linear function) (Negnevitsky, 2002) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยที่ฟังก์ชันกระตุ้นแบบขั้นบันได และแบบเครื่องหมาย เรียกว่าฮาร์ดลิมิต (hard limit function) ซึ่งนิยมใช้สำหรับงานที่แบ่งแยกประเภท (classification) และการจดจำแบบอย่าง (pattern recognition) ฟังก์ชันซิกมอยด์นิยมใช้สำหรับเครือข่ายประสาทเทียม ที่มีการเรียนรู้แบบแพร่กลับ (back-propagation learning) โดยขอบเขตของเอาต์พุตอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 และฟังก์ชันเชิงเส้นใช้สำหรับการประมาณค่าเชิงเส้น



รูปที่ 3.11 ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดต่างๆ

3.5.1 การเรียนรู้แบบแพร่กลับ

การเรียนรู้ของเครือข่ายประสาทเทียมด้วยวิธีการแพร่กลับค่าความคลาดเคลื่อนนั้น ประกอบด้วยกระบวนการสำคัญ สองกระบวนการ คือ การป้อนสัญญาณอินพุตแบบไปข้างหน้า (feed forward) และแพร่กลับค่าความคลาดเคลื่อนย้อนกลับหลัง (feedback) ในลักษณะแบบชั้น (layer) ต่อชั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.12

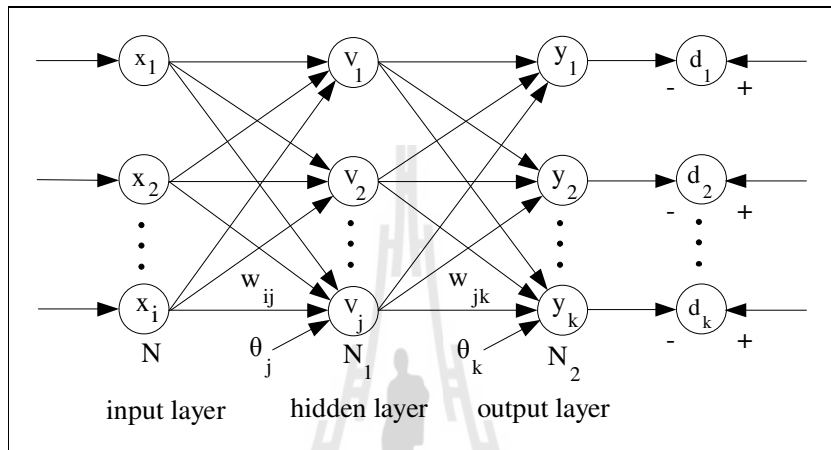


รูปที่ 3.12 การทำงานของเครือข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับ

3.5.2 กระบวนการเรียนรู้แบบแพร่กลับของเครือข่ายประสาทเทียม

เครือข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (multi layer neural network) เครือข่ายแบบนี้จะมีลักษณะแบ่งออกเป็นชั้น (layer) ซึ่งจะประกอบไปด้วยชั้นของอินพุต (input layer) ชั้นของเอาต์พุต (output layer) และชั้นซ่อน (hidden layer) ซึ่งการกำหนดจำนวนชั้นของชั้นซ่อนจะแตกต่างกันไปตามความซับซ้อนของการคำนวณที่ใช้ กล่าวคือยิ่งการคำนวณซับซ้อนมากก็ต้องมีชั้นของชั้นซ่อนมากขึ้น ข้อมูลที่รับเข้ามาทางชั้นอินพุตนั้นจะถูกผ่านไปให้แต่ละหน่วยประมวลผลที่อยู่ในชั้นเดียวกันเพื่อทำการประมวลผลและสัญญาณเหล่านี้จะถูกส่งผ่านไปเรื่อย ๆ สู่ออกไปซึ่งจะมีการให้ค่าความสำคัญของอินพุตที่รับเข้ามาจากหน่วยต่าง ๆ แตกต่างกันไปและสัญญาณจะถูกส่งต่อระหว่างชั้นไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งไปถึงชั้นของเอาต์พุตซึ่งจะส่งผลลัพธ์ที่ได้ออกมาโดยการปรับค่าน้ำหนักของอินพุต โดยวิธีการเรียนรู้ (learning) โดยวิธีการเรียนรู้ก็คือการนำข้อมูลที่ทราบผลลัพธ์แล้วมาใช้เป็นอินพุตและเปรียบเทียบค่าเอาต์พุตที่ได้กับผลลัพธ์เพื่อหาค่าความผิดพลาด

จากนั้นจึงนำค่าความผิดพลาดที่ได้มาทำการปรับปรุงค่าน้ำหนัก (weight) ภายในเครือข่ายประสาทเทียมซึ่งวิธีการปรับปรุงค่าน้ำหนักนั้นขึ้นอยู่กับวิธีการเรียนรู้ที่เลือกใช้ ซึ่งวิธีการเรียนรู้นั้นมีหลายรูปแบบขึ้นกับการออกแบบโครงสร้างภายในของเครือข่ายประสาทเทียมและประเภทของงานที่นำไปใช้



รูปที่ 3.13 โครงสร้างเครือข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น

กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในรูปที่ 3.13 มีความหมายดังนี้

เมื่อ $i = 1, 2, \dots, N$

$j = 1, 2, \dots, N_1$

$k = 1, 2, \dots, N_2$

โดยที่ x_i คือ สัญญาณอินพุตที่เข้าสู่ชั้นอินพุตไปยังนิวรอน i

i คือ นิวรอนในชั้นอินพุต

j คือ นิวรอนในชั้นซ่อน

k คือ นิวรอนในชั้นเอาต์พุต

N คือ จำนวนนิวรอนทั้งหมดในชั้นอินพุต

N_1 คือ จำนวนนิวรอนทั้งหมดในชั้นซ่อน

N_2 คือ จำนวนนิวรอนทั้งหมดในชั้นเอาต์พุต

v_j คือ เอาต์พุตจากชั้นซ่อน

y_k คือ เอาต์พุตจากชั้นเอาต์พุต

d_k คือ เอาต์พุตที่ต้องการ

w_{ij}	คือ	ค่าน้ำหนักที่เชื่อมต่อระหว่างชั้นอินพุตกับชั้นซ่อนจาก นิวรอน i ไปยังนิวรอน j
w_{jk}	คือ	ค่าน้ำหนักที่เชื่อมต่อระหว่างชั้นซ่อนกับชั้นเอาต์พุตจาก นิวรอน j ไปยังนิวรอน k
θ_j	คือ	ค่าไบแอสสำหรับชั้นซ่อนที่นิวรอน j
θ_k	คือ	ค่าไบแอสสำหรับชั้นเอาต์พุตที่นิวรอน k

จากรูปที่ 3.13 สัญญาณอินพุต x_i จะเคลื่อนจากชั้นอินพุตไปยังนิวรอนทุกตัวในชั้นซ่อน โดยมีค่าน้ำหนัก w_{ij} เชื่อมต่อระหว่างชั้นอินพุตกับชั้นซ่อน จากนั้นชั้นซ่อนจะคำนวณเอาต์พุต v_j เพื่อเป็นสัญญาณอินพุตให้กับชั้นเอาต์พุตถัดไป โดยเชื่อมต่อกันด้วยค่าน้ำหนัก w_{jk} จนได้สัญญาณเอาต์พุตของเครือข่ายประสาทเทียม y_k ในระหว่างการเรียนรู้ของสัญญาณเอาต์พุตเหล่านี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาต์พุตที่ต้องการ d_k เพื่อคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน (error) สำหรับกระบวนการแพร่กลับ จากนั้นค่าน้ำหนักของทุกชั้นจะถูกปรับปรุงค่าให้เหมาะสม สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (3.11) และสมการที่ (3.12) ตามลำดับ

$$w_{jk}(n+1) = w_{jk}(n) + \Delta w_{jk}(n) \quad (3.11)$$

$$w_{ij}(n+1) = w_{ij}(n) + \Delta w_{ij}(n) \quad (3.12)$$

โดยที่	$w_{jk}(n+1)$	คือ	ค่าน้ำหนักจากชั้นซ่อนไปยังชั้นเอาต์พุตหลังปรับปรุงค่า
	$w_{jk}(n)$	คือ	ค่าน้ำหนักจากชั้นซ่อนไปยังชั้นเอาต์พุตก่อนปรับปรุงค่า
	$\Delta w_{jk}(n)$	คือ	ค่าน้ำหนักปรับแก้จากชั้นซ่อนไปยังชั้นเอาต์พุต
	$w_{ij}(n+1)$	คือ	ค่าน้ำหนักจากชั้นอินพุตไปยังชั้นซ่อนหลังปรับปรุงค่า
	$w_{ij}(n)$	คือ	ค่าน้ำหนักจากชั้นอินพุตไปยังชั้นซ่อนก่อนปรับปรุงค่า
	$\Delta w_{ij}(n)$	คือ	ค่าน้ำหนักปรับปรุงจากชั้นอินพุตไปยังชั้นซ่อน
	n	คือ	จำนวนรอบ

การปรับปรุงค่าน้ำหนักและค่าไบแอสของเครือข่ายประสาทเทียม ในกระบวนการเรียนรู้แบบแพร่กลับจะใช้วิธีการลดลงของเกรเดียน (gradient descent method) โดยที่ค่าน้ำหนักปรับปรุงจากชั้นอินพุตไปยังชั้นซ่อน $\Delta w_{jk}(n)$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.13)

$$\Delta w_{jk}(n) = -\eta_1 \frac{\partial E(n)}{\partial w_{jk}(n)} \quad (3.13)$$

เมื่อ η_1 คือ อัตราการเรียนรู้ (learning rate) และ $E(n)$ คือ ค่าฟังก์ชันประเมิน ที่เกิดจากผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อน (sum square error) ซึ่งแสดงดังสมการที่ (3.14)

$$E(n) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{N_s} (e_k(n))^2 \quad (3.14)$$

โดยที่

$$e_k(n) = d e_k(n) - y_k(n) \quad (3.15)$$

จากสมการที่ (3.13) ใช้หลักการของกฎลูกโซ่ (chain rule) จะได้ดังสมการที่ (3.16)

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{jk}(n)} = \frac{\partial E(n)}{\partial e_k(n)} \cdot \frac{\partial e_k(n)}{\partial y_k(n)} \cdot \frac{\partial y_k(n)}{\partial \text{net}_k(n)} \cdot \frac{\partial \text{net}_k(n)}{\partial w_{jk}(n)} \quad (3.16)$$

โดยที่ $\text{net}_k(n)$ ผลรวมของผลคูณระหว่างค่าน้ำหนักระหว่างชั้นซ่อนและชั้นเอาต์พุตกับสัญญาณอินพุตจากชั้นซ่อนแสดงได้ดังสมการที่ (3.17)

$$\text{net}_k(n) = \sum_{j=1}^{N_i} w_{jk} v_j \quad (3.17)$$

ดังนั้นเอาต์พุต

$$y_k(n) = f(\text{net}_k(n)) \quad (3.18)$$

เมื่อ $f(\cdot)$ คือ ฟังก์ชันกระตุ้นจากสมการที่ (3.18) และทางด้านขวาของสมการสามารถหาได้ดังนี้

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_k(n)} = e_k(n) \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial e_k(n)}{\partial y_k(n)} = -1 \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial y_k(n)}{\partial \text{net}_k(n)} = f'(\text{net}_k(n)) \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial \text{net}_k(n)}{\partial w_{jk}(n)} = v_j(n) \quad (3.22)$$

นำสมการที่ (3.19) สมการที่ (3.20) สมการที่ (3.21) และสมการที่ (3.22) แทนลงในสมการที่ (3.16) จะได้

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{jk}(n)} = -e_k(n) \cdot f'(\text{net}_k(n)) \cdot v_j(n) \quad (3.23)$$

ดังนั้นค่าน้ำหนักปรับปรุงจากสมการที่ (3.13) คือ

$$\Delta w_{jk}(n) = \eta_1 \cdot e_k(n) \cdot f'(\text{net}_k(n)) \cdot v_j(n) \quad (3.24)$$

$$\Delta w_{jk}(n) = \eta_1 \cdot \delta_k(n) \cdot v_j(n) \quad (3.25)$$

นั่นคือ

$$\delta_k(n) = e_k(n) \cdot f'(net_k(n)) \quad (3.26)$$

หรือ

$$\delta_k(n) = (d_k(n) - y_k(n)) \cdot f'(net_k(n)) \quad (3.27)$$

ในลักษณะเดียวกันค่าน้ำหนัก $\Delta w_{jk}(n)$ สามารถหาได้ดังนี้

$$\Delta w_{jk} = -\eta_2 \frac{\partial E(n)}{\partial w_{jk}(n)} \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{jk}(n)} = \frac{\partial E(n)}{\partial v_j(n)} \cdot \frac{\partial v_j(n)}{\partial net_j(n)} \cdot \frac{\partial net_j(n)}{\partial w_{jk}(n)} \quad (3.29)$$

โดยที่ net_j คือ ผลรวมของผลคูณระหว่างค่าน้ำหนักระหว่างชั้นอินพุตและชั้นซ่อนกับสัญญาณอินพุตจากชั้นอินพุตซึ่งอธิบายได้ด้วยสมการที่ (3.30)

$$net_j(n) = \sum_{i=1}^N w_{ij} \cdot x_i \quad (3.30)$$

เอาต์พุตจากชั้นซ่อนจะได้

$$v_j(n) = .f(net_j(n)) \quad (3.31)$$

จากสมการที่ (3.29) ทางด้านขวาของสมการสามารถหาได้ดังนี้

$$\frac{\partial E(n)}{\partial v_j(n)} = \sum_k e_k(n) \cdot \frac{\partial e_k(n)}{\partial v_j(n)} \quad (3.32)$$

โดยที่

$$\frac{\partial e_k(n)}{\partial v_j(n)} = \frac{\partial e_k(n)}{\partial \text{net}_k(n)} \cdot \frac{\partial \text{net}_k(n)}{\partial v_j(n)} \quad (3.33)$$

พิจารณาสมการที่ (3.15) และสมการที่ (3.18) จะได้ดังสมการที่ (3.34)

$$e_k(n) = d_k(n) - f(\text{net}_k(n)) \quad (3.34)$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{\partial e_k(n)}{\partial \text{net}_k(n)} = -f'(\text{net}_k(n)) \quad (3.35)$$

และจากสมการที่ (3.17) จะได้

$$\frac{\partial \text{net}_k(n)}{\partial v_j(n)} = w_{jk}(n) \quad (3.36)$$

แทนสมการที่ (3.35) และสมการที่ (3.36) ลงในสมการที่ (3.33) จะได้

$$\frac{\partial e_k(n)}{\partial v_j(n)} = -f'(\text{net}_k(n)) \cdot w_{jk}(n) \quad (3.37)$$

แทนสมการที่ (3.37) ลงในสมการที่ (3.32) จะได้

$$\frac{\partial E(n)}{\partial v_j(n)} = -\sum_k e_k(n) \cdot f'(\text{net}_k(n)) \cdot w_{jk}(n) \quad (3.38)$$

จากสมการที่ (3.30) และ (3.37) จะได้

$$\frac{\partial v_j(n)}{\partial \text{net}_j(n)} = f'(\text{net}_j(n)) \quad (3.39)$$

$$\frac{\partial \text{net}_j(n)}{\partial w_{ij}(n)} = x_i(n) \quad (3.40)$$

แทนสมการที่ (3.38) สมการที่ (3.39) และสมการที่ (3.40) ลงในสมการที่ (3.29) จะได้ว่า

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{ij}(n)} = -\sum_k e_k(n) \cdot f'(\text{net}_k(n)) \cdot w_{jk}(n) \cdot f'(\text{net}_j(n)) \cdot x_i(n) \quad (3.41)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3.28) จะได้

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{ij}(n)} = -\eta_2 \sum_k e_k(n) \cdot f'(\text{net}_k(n)) \cdot w_{jk}(n) \cdot f'(\text{net}_j(n)) \cdot x_i(n) \quad (3.42)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.26) จะได้

$$\Delta w_{ij}(n) = \eta_2 \sum_k \delta_k(n) \cdot w_{jk}(n) \cdot f'(\text{net}_j(n)) \cdot x_i(n) \quad (3.43)$$

$$\Delta w_{ij}(n) = \eta_2 \delta_j(n) \cdot x_i(n) \quad (3.44)$$

$$\delta_j(n) = \sum_k \delta_k(n) \cdot w_{jk}(n) \cdot f'(\text{net}_j(n)) \quad (3.45)$$

สำหรับการปรับค่าไบแอสของชั้นซ่อนและชั้นเอาต์พุตสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (3.46) และสมการที่ (3.47) ตามลำดับ

$$\theta_j(n+1) = \theta_j(n) + \Delta\theta_j(n) \quad (3.46)$$

$$\theta_k(n+1) = \theta_k(n) + \Delta\theta_k(n) \quad (3.47)$$

เมื่อ $\Delta\theta_j(n) = \eta_3 \delta_j(n)$ และ $\Delta\theta_k(n) = \eta_4 \delta_k(n)$

โดยที่ η_1 , η_2 , η_3 และ η_4 คือ อัตราการเรียนรู้ เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (3.20) และ (3.45) ซึ่งเป็นสมการหาค่าความคลาดเคลื่อน δ_k และ δ_j ตามลำดับ การคำนวณหาค่าดังกล่าวจำเป็นต้องรู้ค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันกระตุ้น ฟังก์ชันกระตุ้นควรมีคุณลักษณะที่สำคัญ คือ ต้องเป็นฟังก์ชันต่อเนื่องสามารถหาอนุพันธ์ได้ ในการคำนวณถ้าต้องการให้รวดเร็วยิ่งขึ้น ฟังก์ชันกระตุ้นที่เลือกใช้ควรมีความง่ายต่อการคำนวณ (Fausett, 1994) ตัวอย่างของฟังก์ชันกระตุ้นที่นิยมใช้มากที่สุดสำหรับการเรียนรู้แบบแพร่กลับ คือ ฟังก์ชันแบบซิกมอยด์ซึ่งเป็นฟังก์ชันต่อเนื่องที่สามารถหาอนุพันธ์ได้ และมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ขอบเขตเอาต์พุตอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 อนุพันธ์ของฟังก์ชันกระตุ้นแบบซิกมอยด์แสดงได้ดังสมการที่ (3.48)

$$f'(x) = f(x)(1 - f(x)) \quad (3.48)$$

ดังนั้นการคำนวณค่า δ_k และ δ_j จากสมการที่ (3.20) และ (3.45) ตามลำดับนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (3.49) และ (3.50) ดังนี้คือ

$$\delta_k(n) = (d_k(n) - y_k(n)) \cdot f(\text{net}_k(n)) \cdot [1 - f(\text{net}_k(n))] \quad (3.49)$$

นั่นคือ

$$\delta_k(n) = (d_k(n) - y_k(n)) \cdot y_k(n) \cdot (1 - y_k(n)) \quad (3.50)$$

และ

$$\delta_j(n) = \sum_k \delta_k(n) \cdot w_{jk}(n) \cdot f(\text{net}_j(n)) \cdot [1 - f(\text{net}_j(n))] \quad (3.51)$$

$$\delta_j(n) = \sum_k \delta_k(n) \cdot w_{jk}(n) \cdot v_j(n) \cdot (1 - w_{jk}(n)) \quad (3.52)$$

กระบวนการเรียนรู้แบบแพร่กลับของเครือข่ายประสาทเทียมมี 7 ขั้นตอนสามารถอธิบายโดยสรุปได้ดังนี้คือ

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของเครือข่ายประสาทเทียม

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าเอาต์พุตจากชั้นซ่อน

$$v_j(n) = f(\text{net}_j(n)) = \frac{1}{1 + \exp(-\text{net}_j(n))}$$

โดยที่

$$\text{net}_j(n) = \sum_{i=1}^N w_{ij} \cdot x_i + \theta_j \quad \text{เมื่อ } j = 1, 2, 3 \dots N_1$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าเอาต์พุตจากชั้นของเอาต์พุต

$$y_k(n) = f(\text{net}_k(n)) = \frac{1}{1 + \exp(-\text{net}_k(n))}$$

โดยที่

$$\text{net}_k(n) = \sum_{i=1}^N w_{ik} \cdot v_i + \theta_k \quad \text{เมื่อ } k = 1, 2, 3 \dots N_2$$

ขั้นตอนที่ 4 ปรับปรุงค่าน้ำหนักจากชั้นซ่อน ไปยังชั้นเอาต์พุต

$$w_{jk}(n+1) = w_{jk}(n) + \Delta w_{jk}(n)$$

โดยที่

$$\Delta w_{jk}(n) = \eta_1 \cdot \delta_k + v_{jk} \quad \text{และ } \delta_k = (d_k(n) - y_k(n)) \cdot y_k(n) \cdot (1 - y_k(n))$$

ขั้นตอนที่ 5 ปรับปรุงค่าน้ำหนักจากในชั้นอินพุต ไปยังชั้นซ่อน

$$w_{ij}(n+1) = w_{ij}(n) + \Delta w_{ij}(n)$$

โดยที่

$$\Delta w_{jk}(n) = \eta_2 \cdot \delta_j + x_i \quad \text{และ } \delta_j = \sum_k \delta_k \cdot w_{jk} \cdot v_j(n) \cdot (1 - v_j(n))$$

ขั้นตอนที่ 6 ปรับปรุงค่าไบแอสในชั้นซ่อนและในชั้นเอาต์พุต

$$\theta_j(n+1) = \theta_j(n) + \eta_3 \delta_j(n)$$

$$\theta_k(n+1) = \theta_k(n) + \eta_4 \delta_k(n)$$

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดกระบวนการเรียนรู้ ถ้ายังไม่เข้าเงื่อนไขให้เพิ่มจำนวนรอบแล้ววนกลับไปขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนที่ 5 และขั้นตอนที่ 6 ทำซ้ำ ๆ จนกว่าจะเข้าเงื่อนไขการหยุดกระบวนการเรียนรู้

3.6 ระบบอนุมานฟัซซี

ระบบอนุมานฟัซซีหรือรู้จักกันในชื่อ ระบบฐานกฎฟัซซี (fuzzy rule based system) โดยทั่วไปแล้วระบบอนุมานฟัซซีจะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.14 ระบบอนุมานฟัซซีประกอบด้วย 5 ส่วน ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

1. ฐานกฎ (rule base) กำหนดกฎฟัซซี ถ้า (if) จากนั้น (then) เป็นการแปลงการเรียนรู้ของมนุษย์ โดยใช้การแสดงผลและผลซึ่งอยู่ในรูปของตัวแปรทางภาษา โดยการผสมโครงสร้างของกฎพื้นฐาน คือ ถ้า (if) มีข้อมูลอินพุต (antecedent) จากนั้น (then) หาค่าเอาต์พุตของฟัซซี (consequent)
2. ฐานข้อมูล (data base) กำหนดฟังก์ชันสมาชิกของฟัซซีเซตที่ใช้ในกฎเกณฑ์ฟัซซีโดยที่ฐานกฎกับฐานข้อมูลรวมกันเราจะเรียกว่าฐานความรู้ (knowledge base) จะใช้ในการแบ่งช่วง และกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรที่ใช้และเงื่อนไขหรือกฎต่าง ๆ ที่ใช้ในการตัดสินใจ
3. การเชื่อมต่อการทำฟัซซี (fuzzification interface) เปลี่ยนค่าอินพุตเป็นระดับของค่าทางภาษาโดยกระบวนการทำฟัซซี (fuzzification) เป็นกระบวนการกำหนดค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่ใช้โดยการแทนตัวแปรแบบฟัซซีด้วยฟังก์ชันสมาชิก
4. การตัดสินใจ (decision making unit) ทำการวินิจฉัยจากกฎโดยกระบวนการตัดสินใจ ใช้การดำเนินการเชื่อมต่อแบบ AND หรือ OR จากนั้นใช้การอนุมาน โดยการรวมกฎเข้าด้วยกันและใช้การทำฟัซซีในการหาค่าเอาต์พุตของระบบซึ่งวิธีการอนุมานมี 2 แบบ คือ การเลือกค่าสูงสุดต่ำสุด และวิธีเลือกค่าสูงสุดการคูณ
5. การเชื่อมต่อการทำดีฟัซซี (defuzzification interface) จะเปลี่ยนผลฟัซซีของการวินิจฉัยเป็นค่าเอาต์พุตโดยกระบวนการทำฟัซซี เป็นกระบวนการแปลงผลการตัดสินใจแบบฟัซซีให้เป็นตัวเลข โดยใช้ยูเนียนลอจิก (union logical) ของฟังก์ชันสมาชิกของผลลัพธ์

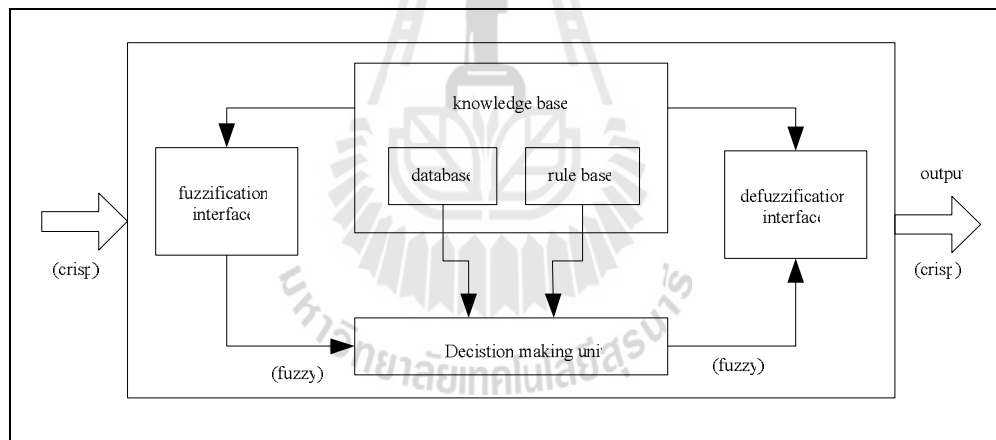
ซึ่งโดยทั่วไปฐานกฎและฐานข้อมูลรวมกันเรียกว่าฐานความรู้ซึ่งขั้นตอนการทำงานของ การอนุมานฟัซซี มีดังนี้

1. การทำฟัซซี (fuzzification) เป็นส่วนของการเปรียบเทียบค่าของอินพุตกับฟังก์ชันความ เป็นสมาชิกเพื่อกำหนดเป็นค่าตัวแปรฟัซซี

2. การประเมินค่ากฎของฟัซซี (fuzzy rule evaluation) เป็นการคำนวณค่าจากกฎเพื่อรวมค่า ความเป็นสมาชิกของส่วนเงื่อนไขของกฎแต่ละตัวซึ่งค่าที่ได้เรียกว่าค่าความเข้มแข็งของการกระตุ้น (firing strength) ของกฎ

3. การรวมกฎ (aggregation) เป็นการรวมเอาต์พุตของกฎทุก ๆ กฎซึ่งเป็นการนำฟังก์ชัน ความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตของแต่ละกฎมารวมกัน

4. การทำดีฟัซซี (defuzzification) ขั้นตอนสุดท้ายของอนุมานฟัซซี คือการแปลงค่าผลรวม ของเอาต์พุตซึ่งอยู่ในรูปของฟัซซีเซตไปเป็นค่าตัวเลข มีวิธีการที่ได้รับความนิยม เช่น การเลือก ค่าสูงสุดของสมาชิกในฟังก์ชันกั วิธีการหาจุดศูนย์กลาง และวิธีการหาค่าน้ำหนักเฉลี่ย



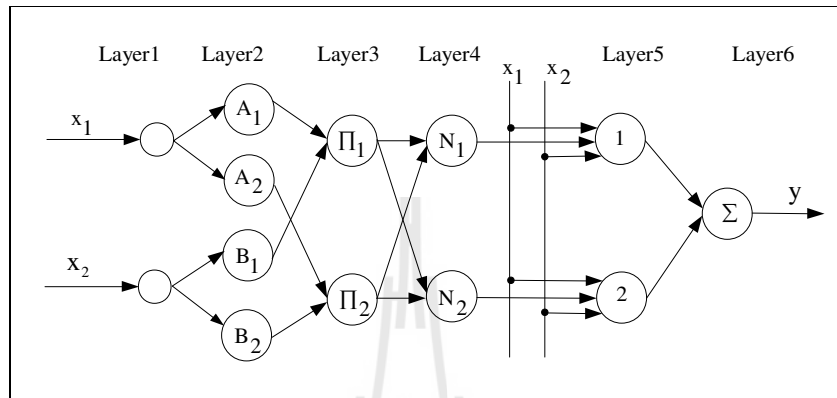
รูปที่ 3.14 ส่วนประกอบระบบอนุมานฟัซซี

3.7 นิวโร-ฟัซซี

เครือข่ายประสาทเทียมและฟัซซีลอจิกเป็นเทคนิคสำหรับสร้างระบบชาญฉลาด ซึ่งเมื่อทำการออกแบบให้ทำงานร่วมกันจะทำให้ระบบชาญฉลาดทั้งสองทำงานในลักษณะส่งเสริมซึ่งกันและกัน (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552; Negnevitsky, 2002) โดยเครือข่ายประสาทเทียมมีคุณสมบัติเด่นทางการเรียนรู้จากข้อมูลที่เป็นข้อมูลอินพุต ส่วนฟัซซีลอจิกมีข้อดีทางการให้เหตุผลผลอย่างไรก็ตามฟัซซีลอจิกก็มีจุดอ่อนในส่วนของการเรียนรู้และการปรับตัวของระบบให้เข้ากับสภาพแวดล้อมของปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น แม้ว่าเครือข่ายประสาทเทียมมีจุดเด่นในด้านการเรียนรู้และการปรับตัวเองให้เข้ากับสภาพแวดล้อมของปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น แต่ก็มีจุดอ่อนในด้านคำนวณที่มีลักษณะซับซ้อน ทำให้ผู้ใช้ไม่สามารถเข้าถึงกระบวนการคำนวณภายในทำให้กระบวนการนำเสนอความรู้แก่ผู้ใช้ทำได้ไม่ดี การผสมผสานการทำงานของเครือข่ายประสาทเทียมและฟัซซีลอจิกภายใต้ชื่อนิวโร-ฟัซซี ทำให้ระบบชาญฉลาดเกิดการผสมผสานการทำงานในส่วนการนำเสนอองค์ความรู้จากนั้นนำองค์ความรู้เหล่านั้นมาอนุมานประกอบการตัดสินใจ อีกทั้งทำให้ระบบชาญฉลาดสามารถเรียนรู้และสามารถปรับตัวในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ขององค์ความรู้เหล่านั้นได้ ระบบอนุมานนิวโร-ฟัซซีแบบปรับตัวได้ (adaptive neuro-fuzzy inference system หรือ ANFIS) เป็นเครือข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นที่ทำงานเสมือนเป็นระบบอนุมานฟัซซี ซึ่งทำให้ระบบชาญฉลาดสามารถเรียนรู้และสามารถทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของกฎ ในโครงสร้างของ ANFIS ประกอบไปด้วยชั้นของอินพุต ชั้นซ่อนและของชั้นเอาต์พุต ซึ่งแทนฟังก์ชันกัสมาชิกและกฎฟัซซีตามลำดับ โดยที่จำนวนโหนดของกฎฟัซซีจะมีจำนวนเท่ากับ k^x เมื่อ k แทนการแบ่งจำนวนฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตและ x แทนจำนวนอินพุตที่เข้าระบบ

3.7.1 โครงสร้างของ ANFIS

โครงสร้างของ ANFIS ประกอบไปด้วยเครือข่ายแบบไปข้างหน้ามีทั้งหมด 6 ชั้น ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 โครงสร้าง ANFIS

โครงสร้างของเครือข่ายเป็นแบบจำลองฟuzzyแบบซุกเกโนอันดับหนึ่ง ในตัวอย่างนี้ กำหนดให้มีอินพุต 2 อินพุต คือ x_1 และ x_2 มีเอาต์พุต 1 เอาต์พุต คือ y ในแต่ละตัวแปรจะมีค่าตัวแปรฟuzzy 2 ค่า ตัวแปรเอาต์พุตจะเป็นสมการโพลิโนเมียลอันดับหนึ่ง ระบบ ANFIS จะประกอบไปด้วยกฎทั้งหมด 2 ข้อดังนี้

กฎข้อที่ 1

ถ้า x_1 คือ A_1

และ x_2 คือ B_1

จากนั้น $y = f_1(x_1, x_2) = k_{10} + k_{11}x_1 + k_{12}x_2$

กฎข้อที่ 2

ถ้า x_1 คือ A_2

และ x_2 คือ B_2

จากนั้น $y = f_2(x_1, x_2) = k_{20} + k_{21}x_1 + k_{22}x_2$

กำหนดให้ x_1 และ x_2 เป็นตัวแปรอินพุตที่มีค่าฟuzzy คือ A_1 และ A_2 สำหรับ x_1 และ B_1 และ B_2 สำหรับ x_2 ค่า k_{10} , k_{11} และ k_{12} เป็นพารามิเตอร์ของกฎข้อที่ 1 สามารถอธิบายการทำงานของ ANFIS ในแต่ละชั้นได้ดังนี้

ชั้นที่ 1 ชั้นอินพุตทำหน้าที่รับข้อมูลอินพุตจากภายนอกระบบผ่านเข้าสู่ชั้นต่อไป

$$y_i^1 = x_i^1 \quad (3.53)$$

กำหนดให้ y_i^1 และ x_i^1 เป็นอินพุตและเอาต์พุตของนิวรอนตัวที่ i ของชั้นที่ 1

ชั้นที่ 2 ชั้นการทำพีชคณิตแต่ละชั้นนิวรอนในชั้นนี้มีหน้าที่การทำพีชคณิตโดยฟังก์ชันสมาชิกมีรูปร่างเป็นรูปประฆังคว่ำมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$y_i^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_i^2 - a_i}{c_i} \right)^{b_i}} \quad (3.54)$$

กำหนดให้ x_i^2 และ y_i^2 เป็นอินพุตและเอาต์พุตของนิวรอนตัวที่ i ในชั้นที่ 2 a_i , b_i และ c_i เป็นพารามิเตอร์จุดศูนย์กลาง ความกว้างและความชันของรูปทรงระฆังคว่ำของฟังก์ชันสมาชิกของนิวรอนตัวที่ i พารามิเตอร์ในชั้นนี้เราเรียกว่าพรีมิสพารามิเตอร์ (premise parameter)

ชั้นที่ 3 ชั้นกฎของพีชคณิตนิวรอนกฎนี้จะรับอินพุตจากนิวรอนการทำพีชคณิตซึ่งเป็นส่วนของ if แล้วทำการหารระดับผลลัพธ์ของส่วน then อินพุตในส่วน of จะถูกประมวลผลรวมกันด้วยการปฏิบัติการคูณมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$y_i^3 = \prod_{j=1}^k x_{ji}^3 \quad (3.55)$$

กำหนดให้ x_{ji}^3 คืออินพุตจากนิวรอน j ในชั้นที่ 2 ไปยังนิวรอน i ในชั้นที่ 3 และเป็นเอาต์พุตจากนิวรอนกฎ i ของชั้นที่ 3 ตัวอย่างเช่น $y_{iii}^3 = \mu_{A1} \times \mu_{B1}$ โดยที่ μ_{A1} และ μ_{B1} เป็นระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตในเงื่อนไข if

ชั้นที่ 4 ชั้นการทำให้เป็นบรรทัดฐาน (normalization layer) แต่ละนิวรอลจะแทนแต่ละกฎของระบบอินพุตของนิวรอลในชั้นนี้จะรับมาจากทุกนิวรอลกฎในชั้นก่อนหน้าและทำการคำนวณค่าบรรทัดฐานความเข้มแข็งของการกระตุ้น (normalized firing strength) ของกฎนั้น ๆ ค่าบรรทัดฐานของการกระตุ้นนี้เป็นอัตราส่วนของเอาต์พุตของนิวรอลกฎนั้น ๆ ต่อผลรวมของเอาต์พุตของนิวรอลกฎทั้งหมด ค่าดังกล่าวที่แสดงควมมีส่วนร่วมของกฎนั้น ๆ ต่อค่าเอาต์พุตสุดท้ายของระบบค่าเอาต์พุตของนิวรอลในชั้นนี้สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$y_i^4 = \frac{x_{ji}^4}{\sum_{j=1}^n x_{ji}^4} \quad (3.56)$$

$$y_i^4 = \frac{\mu_i}{\sum_{j=1}^n \mu_j} \quad (3.57)$$

$$y_i^4 = \bar{\mu}_i \quad (3.58)$$

กำหนดให้ x_{ji}^4 คืออินพุตจากนิวรอล j ในชั้นที่ 4 ไปยังนิวรอล i ในชั้นที่ 4 และ n เป็นจำนวนของนิวรอลกฎทั้งหมด เช่น

$$y_{N_1}^4 = \frac{\mu_1}{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4} \quad (3.59)$$

$$y_{N_1}^4 = \bar{\mu}_1 \quad (3.60)$$

ชั้นที่ 5 ชั้นทำการดีฟัซซีแต่ละนิวรอลจะรับอินพุตมาจากนิวรอลในชั้นที่ 4 รวมถึง x_1 และ x_2 ด้วย ค่าเอาต์พุตของการทำดีฟัซซีในแต่ละนิวรอลจะได้ดังนี้

$$y_i^5 = x_i^5 [k_{i0} + k_{i1}x_1 + k_{i2}x_2] \quad (3.61)$$

$$y_i^5 = \bar{\mu}_i [k_{i0} + k_{i1}x_1 + k_{i2}x_2] \quad (3.62)$$

กำหนดให้ x_i^5 คือ อินพุตจากเอาต์พุตในชั้นที่ 4 และ y_i^5 คือ เอาต์พุตของการทำดีฟัซซีของนิรอล i ค่า k_{i0} k_{i1} และ k_{i2} เป็นค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองฟัซซีแบบซูเกโนของนิรอล i ค่าพารามิเตอร์ในชั้นนี้จะเรียกว่าคอนซีควันพารามิเตอร์ (consequent parameter)

ชั้นที่ 6 ชั้นผลรวมมีนิรอลเพียงนิรอลเดียวทำหน้าที่ในการคำนวณผลรวมของการทำดีฟัซซีของนิรอลในชั้นการทำดีฟัซซีและให้ค่าเอาต์พุตสุดท้ายของระบบดังนี้

$$y = \sum_{i=1}^n x_i^6 \quad (3.63)$$

$$y = \sum_{i=1}^n \bar{\mu}_i [k_{i0} + k_{i1}x_1 + k_{i2}x_2] \quad (3.64)$$

3.7.2 การเรียนรู้ของ ANFIS

การเรียนรู้ของ ANFIS จะเรียนรู้โดยการใช้อัลกอริทึมการเรียนรู้แบบผสมผสาน (hybrid learning algorithm) โดยเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างอัลกอริทึมการประมาณค่ากำลังสองน้อยที่สุด และอัลกอริทึมการลดลงของเกรเดียน โดยขั้นแรกของการทำงานคือการกำหนดค่าเริ่มต้นของฟังก์ชันกระตุ้นให้กับสมาชิกของนิรอล (membership neuron) แต่ละตัว จากนั้นฟังก์ชันจะจัดศูนย์กลางของนิรอลที่เชื่อมต่อกับอินพุต x จะกำหนดความกว้างและความชันเพื่อให้สมาชิกของนิรอลเกิดการทับซ้อนกัน อัลกอริทึมสำหรับการเรียนรู้ของ ANFIS ในแต่ละรอบของการทำงานจะประกอบด้วยช่วง ไปข้างหน้า (forward pass) และช่วงการ ไปข้างหลัง (backward pass) โดยในส่วนไปข้างหน้ามีการนำเข้าข้อมูลสำหรับเรียนรู้ของอินพุตแล้ว ไปทำการคำนวณเอาต์พุตในแต่ละชั้น และทำการปรับปรุงเอาต์พุตจะใช้อัลกอริทึม การประมาณค่ากำลังสองน้อยที่สุด ในการปรับปรุงค่าเอาต์พุต จากการที่ ANFIS ใช้การอนุมานตามรูปแบบของซูเกโน เอาต์พุต y ที่ได้จึงเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น ในส่วนการป้อนกลับจะใช้อัลกอริทึมการแพร่กลับ (back propagation algorithm) ซึ่งมีการส่งค่าความคลาดเคลื่อนกลับมาแล้วทำการปรับปรุงค่าของพารามิเตอร์ของอินพุต (antecedent parameter)

3.8 สรุป

การสร้างระบบชาวนฉลาดแบบผสมผสาน โดยการผสมผสานการทำงานของระบบชาวนฉลาดทั้งสองเข้าด้วยกัน คือ เครือข่ายประสาทเทียมและฟิชชันลอจิก ทำให้ระบบชาวนฉลาดแบบผสมผสานนี้สามารถนำเสนอองค์ความรู้ที่มานุกรมประกอบการตัดสินใจ อีกทั้งทำให้ระบบชาวนฉลาดแบบผสมผสานสามารถเรียนรู้และปรับตัวเองในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ขององค์ความรู้ที่ได้รับ ให้ใกล้เคียงกระบวนการคิดหรือความสามารถตัดสินใจของมนุษย์มากที่สุด



บทที่ 4

การจำลองฟอลต์และการเรียนรู้ของนิวโร-ฟัซซี เพื่อใช้สำหรับการป้องกันสายส่งไฟฟ้า

4.1 กล่าวนำ

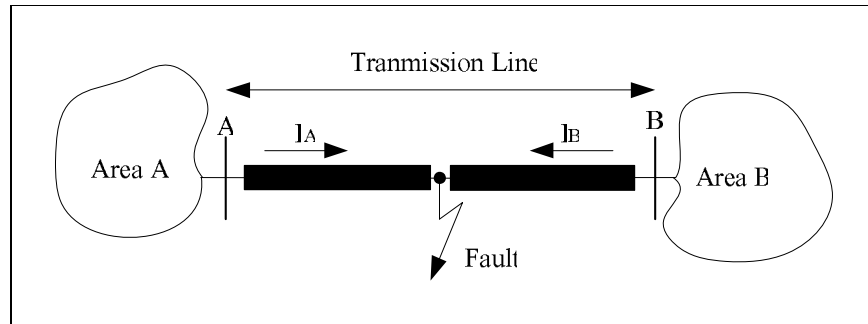
งานวิจัยนี้ใช้ระบบนิวโร-ฟัซซีในการป้องกันสายส่งไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องทำการหาตัวอย่างสำหรับการเรียนรู้ของระบบนิวโร-ฟัซซี การหาตัวอย่างสำหรับการเรียนรู้ทำได้จากการจำลองการเกิดฟอลต์บนสายส่งไฟฟ้าของระบบทดสอบโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink ซึ่งพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลอง คือ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า จะนำไปใช้เป็นชุดข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ของนิวโร-ฟัซซี

4.2 การจำลองการเกิดฟอลต์

ระบบที่ใช้ในการจำลองการเกิดฟอลต์ในเบื้องต้นเป็นระบบขนาดเล็ก ในงานวิจัยใช้ระบบสองแหล่งจ่าย การหาตัวอย่างสำหรับการเรียนรู้ของนิวโร-ฟัซซีทำได้โดยการจำลองเหตุการณ์การเกิดฟอลต์บนสายส่งไฟฟ้าของระบบทดสอบ ในงานวิจัยนี้จะใช้ระบบขนาดเล็กสาเหตุที่ต้องแสดงโดยใช้ระบบขนาดเล็กนี้ก็เพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์ผลของการป้องกันสายส่งไฟฟ้าและยังแสดงปัญหาที่เกิดขึ้นสำหรับการป้องกันสายส่งไฟฟ้าอีกด้วย

4.2.1 การจำลองฟอลต์ภายใต้ระบบไฟฟ้ากำลัง 2 แหล่งจ่าย

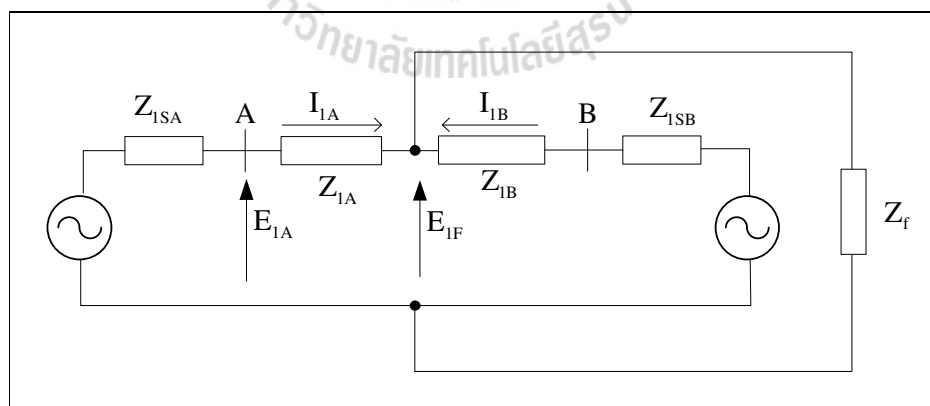
ระบบที่ใช้ในการจำลองการเกิดฟอลต์นี้จะอาศัยระบบขนาดเล็กซึ่งเปรียบได้ว่ามีระบบไฟฟ้า 2 ระบบที่เชื่อมกันด้วยสายส่งไฟฟ้าซึ่งมีระบบการป้องกัน สาเหตุที่ใช้ระบบขนาดเล็กนี้ก็เพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์ผลของการป้องกันสายส่งไฟฟ้าและยังแสดงปัญหาที่เกิดขึ้นในการป้องกันสายส่งไฟฟ้างดรูปที่ 4.1 คือ ผลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าจากทั้ง 2 ระบบ และค่าความต้านทานขณะเกิดฟอลต์ (fault resistance)



รูปที่ 4.1 ระบบไฟฟ้าที่เชื่อมกันด้วยสายส่งไฟฟ้า

โดยฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้ารีเลย์ระยะทางมีโอกาสตรวจจับฟอลต์ผิดพลาดได้ง่ายเมื่อพิจารณาผลของฟอลต์อิมพีแดนซ์เนื่องจากรีเลย์ระยะทางจะรับค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวก โดยเป็นค่าอัตราส่วนของผลต่างของแรงดันเฟสของสายที่เกิดการลัดวงจรต่อผลต่างของกระแสในเฟสนั้นการจำลองเหตุการณ์การเกิดฟอลต์บนสายส่งไฟฟ้านั้นจะทำการจำลอง คือ สามเฟสฟอลต์ (A-B-C) สองเฟสฟอลต์ (B-C) และเฟสลงกราวด์ฟอลต์ (A-G) ฟอลต์แต่ละแบบที่เกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้าดังกล่าวสามารถแสดงการคำนวณประกอบได้ดังนี้

กรณีเกิดสามเฟสฟอลต์ (A-B-C) สามารถแสดงการคำนวณประกอบ โดยอาศัยวงจรดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 วงจรสมมูลสามเฟสฟอลต์ที่แสดงผลของฟอลต์อิมพีแดนซ์

สมการที่ใช้คำนวณคือ

$$E_{1F} = E_{1A} - Z_{1A} I_{1A} \quad (4.1)$$

$$E_F = E_A - Z_{1A} I_{1A} \quad (4.2)$$

แต่จาก

$$E_F = Z_F (I_{1A} + I_{1B}) \quad (4.3)$$

และ

$$I_A = I_{1A} \quad (4.4)$$

$$I_B = I_{1B} \quad (4.5)$$

$$I_A + I_B = (I_{1A} + I_{1B}) \quad (4.6)$$

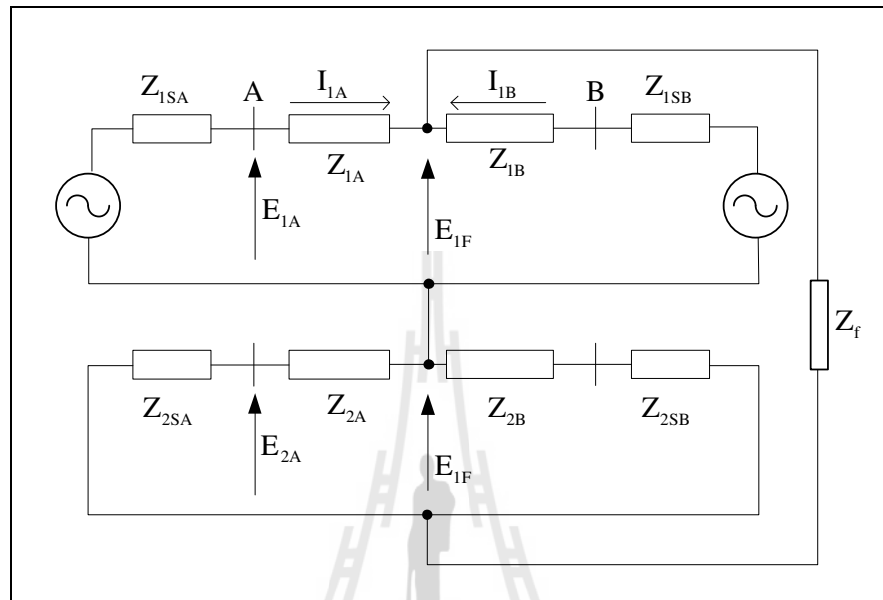
ดังนั้นจะได้

$$E_F = Z_F (I_A + I_B) \quad (4.7)$$

$$E_A = Z_{1A} I_{1A} + Z_F (I_A + I_B) \quad (4.8)$$

$$\frac{E_A}{I_{1A}} = Z_{1A} + Z_F \left(\frac{I_A + I_B}{I_{1A}} \right) \quad (4.9)$$

กรณีเกิดสองเฟสฟอลต์ (B-C) สามารถแสดงการคำนวณประกอบโดยอาศัย
วงจรดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 วงจรสมมูลสองเฟสฟอลต์ที่แสดงผลของฟอลต์อิมพีแดนซ์

สมการที่ใช้คำนวณคือ

$$E_{1F} = E_{1A} - Z_{1A} I_{1A} \quad (4.10)$$

$$E_{2F} = E_{2A} - Z_{2A} I_{2A} \quad (4.11)$$

นำสมการที่ (4.10) และสมการที่ (4.11) มารวมการจะได้

$$E_F = E_A - Z_{1A} (I_{1A} + I_{2A}) \quad (4.12)$$

แต่จาก

$$E_F = Z_F(I_{1A} + I_{1B}) \quad (4.13)$$

และ

$$I_{1A} + I_{1B} = I_{2A} + I_{2B} \quad (4.14)$$

$$I_A = I_{1A} + I_{2A} \quad (4.15)$$

$$I_B = I_{1B} + I_{2B} \quad (4.16)$$

$$I_A + I_B = (I_{1A} + I_{1B}) \quad (4.17)$$

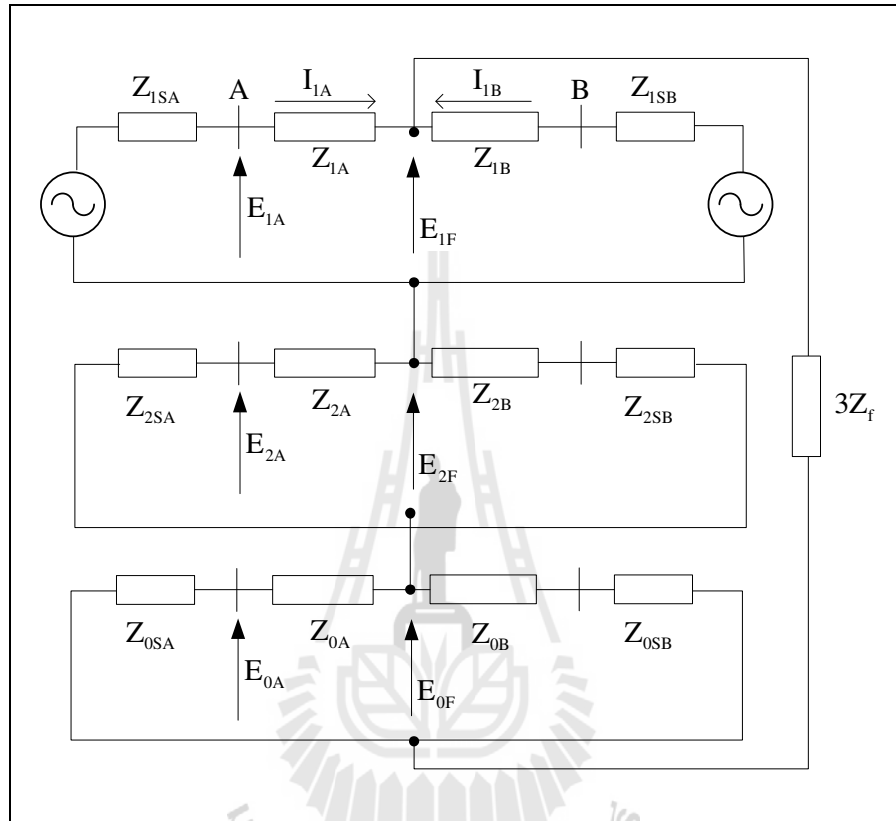
ดังนั้นจะได้

$$E_F = Z_F(I_A + I_B) \quad (4.18)$$

$$E_A = Z_{1A}(I_{1A} + I_{2A}) + Z_F(I_A + I_B) \quad (4.19)$$

$$\frac{E_A}{I_{1A} + I_{2A}} = Z_{1A} + Z_F \left(\frac{I_A + I_B}{I_{1A} + I_{2A}} \right) \quad (4.20)$$

กรณีเฟสลงกราวด์โฟลต์ (A-G) สามารถแสดงการคำนวณประกอบโดยอาศัย
วงจรดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 วงจรสมมูลกรณีเฟสลงกราวด์โฟลต์ที่แสดงผลของโฟลต์อิมพีแดนซ์

สมการที่ใช้คำนวณคือ

$$E_{1F} = E_{1A} - Z_{1A} I_{1A} \quad (4.21)$$

$$E_{2F} = E_{2A} - Z_{2A} I_{2A} \quad (4.22)$$

$$E_{0F} = E_{0A} - Z_{0A} I_{0A} \quad (4.23)$$

นำสมการที่ (4.21) สมการที่ (4.22) และสมการที่ (4-23) มารวมการจะได้

$$E_F = E_A - Z_{1A}(I_{1A} + I_{2A}) - Z_{0A}I_{0A} \quad (4.24)$$

$$E_F = E_A - Z_{1A} \left(I_A + \frac{Z_{0A} - Z_{1A}}{Z_{1A}} I_{0A} \right) \quad (4.25)$$

$$E_F = E_A - Z_{1A}(I_A + mI_{0A}) \quad (4.26)$$

แต่จาก

$$E_F = 3Z_F(I_{1A} + I_{1B}) \quad (4.27)$$

และ

$$I_{1A} + I_{1B} = I_{2A} + I_{2B} = I_{0A} + I_{0B} \quad (4.28)$$

$$I_A = I_{1A} + I_{2A} + I_{0A} \quad (4.39)$$

$$I_B = I_{1B} + I_{2B} + I_{0B} \quad (4.30)$$

และ

$$I_A + I_B = 3(I_{1A} + I_{1B}) \quad (4.31)$$

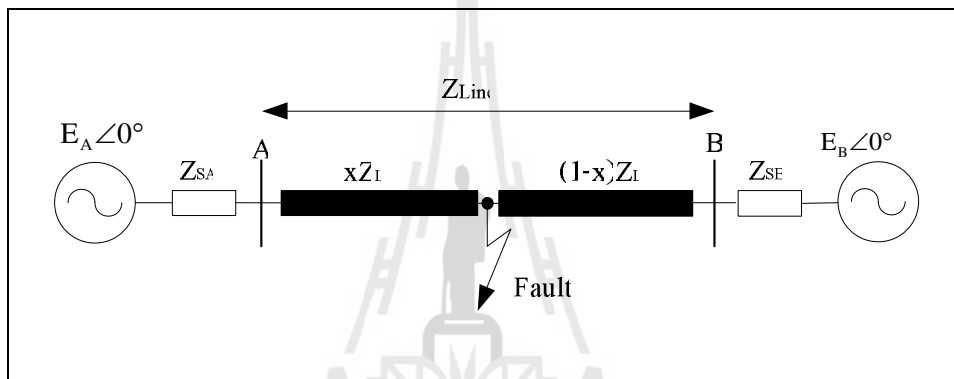
ดังนั้นจะได้

$$E_F = Z_F(I_A + I_B) \quad (4.32)$$

$$E_A = Z_{1A}(I_A + mI_{0A}) + Z_F(I_A + I_B) \quad (4.33)$$

$$\frac{E_A}{I_A + mI_{0A}} = Z_{1A} + Z_F \left(\frac{I_A + I_B}{I_A + mI_{0A}} \right) \quad (4.34)$$

รูปที่ 4.5 เป็นระบบทดสอบที่ใช้ในการจำลองฟอลต์แบบต่าง ๆ ซึ่งคำนวณจากการใช้โปรแกรม Matlab/Simulink



รูปที่ 4.5 ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่ายสำหรับการคำนวณหาฟอลต์

โดยค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ทำการจำลอง

- E_A คือ แรงดันของระบบที่ A มีค่าเท่ากับ $115 \angle 0^\circ$ กิโลโวลต์
- E_B คือ แรงดันของระบบที่ B มีค่าเท่ากับ $115 \angle 0^\circ$ กิโลโวลต์
- Z_A คือ อิมพีแดนซ์ของระบบที่ A โดยมีค่า
 $Z_1 = 0.00499 + j0.03384$ เปอรฺ์ยูนิท $Z_0 = 0.00425 + j0.0369$ เปอรฺ์ยูนิท
- Z_B คือ อิมพีแดนซ์ของระบบที่ B โดยมีค่า
 $Z_1 = 0.00499 + j0.03384$ เปอรฺ์ยูนิท $Z_0 = 0.00425 + j0.0369$ เปอรฺ์ยูนิท
- Z_L คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่งไฟฟ้าที่มีความยาว 100 กิโลเมตร
โดยมีค่าอิมพีแดนซ์ของสาย
 $Z_1 = 0.085811 + j0.36204$ เปอรฺ์ยูนิท/กิโลเมตร
 $Z_0 = 0.254850 + j1.42230$ เปอรฺ์ยูนิท/กิโลเมตร

อัตราส่วนหม้อแปลงแรงดัน 115000 : 110 อัตราส่วนหม้อแปลงกระแส = 2000 : 5

ในการเตรียมชุดข้อมูลสำหรับระบบนิเวศ-ฟิชชี่นั้นต้องทำการกำหนดค่าและสถานะต่าง ๆ ให้ครอบคลุมกับความเป็นไปที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้านี้ ดังตารางที่ 4.1 การกำหนดค่าต่าง ๆ มีดังนี้

- ระยะที่เกิดฟอลต์บนสายส่งไฟฟ้า
- ความต้านทานการลัดวงจร

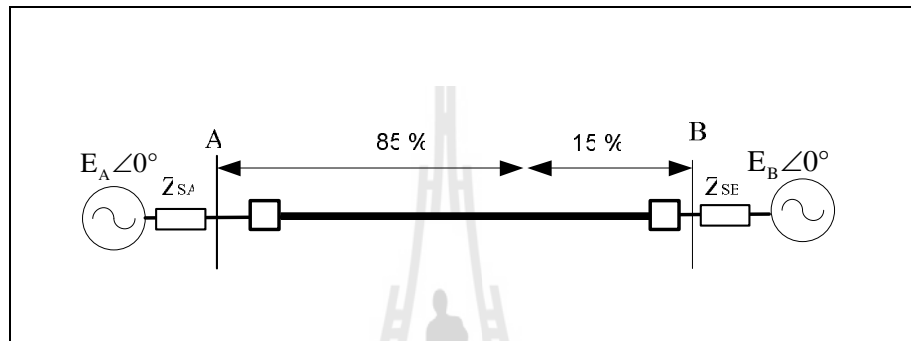
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลที่ใช้เป็นชุดสอนสำหรับระบบนิเวศ-ฟิชชี่

ชนิดของการเกิดฟอลต์	ตำแหน่งของการเกิดฟอลต์ (เปอร์เซ็นต์)	ความต้านทานของฟอลต์ (โอห์ม)
สามเฟสฟอลต์(A-B-C)	x = 0,5,10,15,20,25,30,35, 40,45,50,55,60,65,70,75, 80,85,90,95,100	$R_f = 2,7,12, 17,22,27,32,37,$ 42 , 47
เกิดสองเฟสฟอลต์ (B-C)		
สองเฟสลงกราวด์ฟอลต์(B-C-G)		
เฟสลงกราวด์ฟอลต์ (A-G)		

จากตารางที่ 4.1 การที่กำหนดค่าต่าง ๆ นั้นทำให้ได้จำนวนข้อมูลเมื่อเกิดเหตุการณ์การเกิดฟอลต์แบบต่าง ๆ บนสายส่งไฟฟ้าดังนี้

- กรณีสามเฟสฟอลต์ได้จำนวนข้อมูล 210 ชุด หรือ 210 ตัวอย่าง
- กรณีสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์ได้จำนวนข้อมูล 210 ชุด หรือ 210 ตัวอย่าง
- กรณีสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์ได้จำนวนข้อมูล 210 ชุด หรือ 210 ตัวอย่าง
- กรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์ได้จำนวนข้อมูล 210 ชุด หรือ 210 ตัวอย่าง

สำหรับการเรียนรู้ของระบบนิเวศ-ฟิซซีในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าในระบบที่ทดสอบจะกำหนดให้ทำการป้องกันที่ 85 เปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งไฟฟ้า โดยเมื่อเกิดฟอลต์บนสายส่งไฟฟ้าภายในระยะ 85 เปอร์เซ็นต์ของสายส่งไฟฟ้า จะกำหนดให้รีเลย์ทำงานโดยมีสัญญาณหรือสัญลักษณ์เป็นลอจิก “1” แต่ถ้าเกิดขึ้นนอกโซนป้องกัน (เกิน 85 เปอร์เซ็นต์) กำหนดให้รีเลย์ไม่ทำงานกำหนดให้สัญญาณหรือสัญลักษณ์เป็นลอจิก “0”



รูปที่ 4.6 กำหนดโซนในการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังที่ทดสอบ



การคำนวณหาค่าต่าง ๆ จะใช้โปรแกรม Matlab ในการคำนวณเนื่องจากต้องทำการคำนวณค่าหลายค่าและหลายตัวอย่างบางส่วนของผลที่ได้จากการคำนวณแสดงดังนี้

กรณีสามเฟสโหลดตัวอย่างบางส่วนของผลที่ได้จากการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างบางส่วนที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสามเฟสโหลดเมื่อ $R_f = 2$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	24.11	24.25	24.11	63.58	63.51	63.74
5	24.50	24.50	24.57	61.05	61.00	61.29
10	36.19	36.22	36.26	45.14	45.10	45.38
15	42.60	42.65	42.68	39.42	39.37	39.64
20	47.96	47.98	48.02	34.97	34.93	35.17
25	52.37	52.42	52.45	31.43	31.37	31.61
30	56.07	56.06	56.18	28.54	28.48	28.66
35	59.20	59.18	59.30	26.12	26.06	26.23
40	61.87	61.84	61.98	24.07	24.02	24.17
45	64.18	64.15	64.28	22.31	22.27	22.41
50	66.20	66.17	66.29	20.78	20.75	20.88
55	67.97	67.99	68.03	19.44	19.41	19.54
60	69.56	69.56	69.61	18.26	18.23	18.35
65	70.99	70.93	71.09	17.22	17.19	17.27
70	72.28	72.22	72.38	16.27	16.24	16.31
75	73.47	73.40	73.56	15.41	15.39	15.44
80	74.57	74.53	74.64	14.61	14.60	14.64
85	75.60	75.55	75.69	13.89	13.87	13.90
90	76.61	76.55	76.67	13.20	13.19	13.20
95	77.60	77.57	77.66	12.55	12.55	12.53
100	78.65	78.58	78.73	11.92	11.91	11.87

ตารางที่ 4.3 ตัวอย่างบางส่วนที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสามเฟสโหลดเมื่อ $R_f = 7$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	60.85	60.75	60.76	45.76	45.70	45.73
5	60.35	60.30	60.31	44.51	44.48	44.50
10	60.12	60.11	60.12	35.53	35.53	35.55
15	61.61	61.47	61.58	31.87	31.82	31.82
20	63.33	63.32	63.34	28.78	28.77	28.79
25	65.24	65.09	65.24	26.25	26.20	26.20
30	67.00	67.00	67.02	24.03	24.03	24.04
35	68.74	68.69	68.77	22.16	22.15	22.15
40	70.36	70.29	70.39	20.53	20.51	20.51
45	71.88	71.78	71.91	19.09	19.06	19.06
50	73.29	73.20	73.32	17.80	17.78	17.77
55	74.60	74.52	74.64	16.64	16.62	16.62
60	75.85	75.76	75.92	15.59	15.56	15.56
65	77.06	76.94	77.11	14.62	14.60	14.59
70	78.20	78.14	78.24	13.71	13.69	13.69
75	79.35	79.25	79.41	12.86	12.84	12.83
80	80.49	80.43	80.53	12.03	12.01	12.00
85	81.67	81.58	81.74	11.22	11.20	11.19
90	82.93	82.81	83.00	10.40	10.37	10.36
95	84.28	84.24	84.30	9.52	9.51	9.50
100	85.85	85.72	85.90	8.58	8.56	8.55

กรณีการเกิดสองเฟสฟอลต์ตัวอย่างบางส่วนของผลที่ได้จากการคำนวณแสดง
ดังตารางที่ 4.4 และ ตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 ตัวอย่างบางส่วนที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 2$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.68	29.25	29.25	0.00	55.17	55.18
5	93.92	30.91	30.91	0.00	53.02	53.02
10	93.90	45.55	45.55	0.00	39.22	39.23
15	93.85	51.34	51.34	0.00	34.25	34.25
20	93.86	56.00	56.00	0.00	30.42	30.41
25	93.93	59.73	59.73	0.00	27.30	27.30
30	93.92	62.77	62.77	0.00	24.78	24.78
35	93.95	65.27	65.27	0.00	22.69	22.69
40	93.91	67.49	67.49	0.00	20.90	20.90
45	93.92	69.43	69.43	0.00	19.37	19.37
50	93.92	71.02	71.02	0.00	18.04	18.04
55	93.92	72.41	72.41	0.00	16.89	16.88
60	93.90	73.74	73.74	0.00	15.84	15.84
65	93.85	74.73	74.73	0.00	14.95	14.95
70	93.91	75.77	75.77	0.00	14.11	14.11
75	93.89	76.75	76.75	0.00	13.34	13.34
80	93.93	77.43	77.43	0.00	12.69	12.68
85	93.86	78.28	78.28	0.00	12.02	12.02
90	93.91	78.99	78.99	0.00	11.42	11.43
95	93.88	79.51	79.51	0.00	10.87	10.86
100	93.85	80.06	80.06	0.00	10.32	10.29

ตารางที่ 4.5 ตัวอย่างบางส่วนที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 7$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.89	41.49	41.49	0.00	39.57	39.57
5	93.91	42.64	42.64	0.00	38.50	38.50
10	93.90	51.98	51.98	0.00	30.74	30.74
15	93.89	56.22	56.22	0.00	27.55	27.55
20	93.90	59.82	59.82	0.00	24.90	24.90
25	93.89	62.84	62.84	0.00	22.69	22.69
30	93.87	65.47	65.47	0.00	20.79	20.79
35	93.93	67.66	67.66	0.00	19.18	19.18
40	93.88	69.58	69.58	0.00	17.77	17.77
45	93.97	71.31	71.31	0.00	16.52	16.52
50	93.88	72.92	72.92	0.00	15.38	15.38
55	93.89	74.25	74.25	0.00	14.39	14.39
60	93.88	75.43	75.43	0.00	13.49	13.49
65	93.88	76.62	76.62	0.00	12.64	12.64
70	93.93	77.74	77.74	0.00	11.85	11.85
75	93.87	78.77	78.77	0.00	11.10	11.10
80	93.89	79.77	79.77	0.00	10.39	10.39
85	93.93	80.73	80.73	0.00	9.69	9.69
90	93.89	81.77	81.77	0.00	8.97	8.97
95	93.89	82.87	82.87	0.00	8.22	8.22
100	93.93	84.15	84.15	0.00	7.39	7.40

กรณีสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์ตัวอย่างบางส่วนของผลที่ได้จากการคำนวณแสดงได้
ดังตารางที่ 4.6 และตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 ตัวอย่างบางส่วนที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 2$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.68	29.25	29.25	0.00	55.17	55.18
5	93.92	30.91	30.91	0.00	53.02	53.02
10	93.90	45.55	45.55	0.00	39.22	39.23
15	93.85	51.34	51.34	0.00	34.25	34.25
20	93.86	56.00	56.00	0.00	30.42	30.41
25	93.93	59.73	59.73	0.00	27.30	27.30
30	93.92	62.77	62.77	0.00	24.78	24.78
35	93.95	65.27	65.27	0.00	22.69	22.69
40	93.91	67.49	67.49	0.00	20.90	20.90
45	93.92	69.43	69.43	0.00	19.37	19.37
50	93.92	71.02	71.02	0.00	18.04	18.04
55	93.92	72.41	72.41	0.00	16.89	16.88
60	93.90	73.74	73.74	0.00	15.84	15.84
65	93.85	74.73	74.73	0.00	14.95	14.95
70	93.91	75.77	75.77	0.00	14.11	14.11
75	93.89	76.75	76.75	0.00	13.34	13.34
80	93.93	77.43	77.43	0.00	12.69	12.68
85	93.86	78.28	78.28	0.00	12.02	12.02
90	93.91	78.99	78.99	0.00	11.42	11.43
95	93.88	79.51	79.51	0.00	10.87	10.86
100	93.85	80.06	80.06	0.00	10.32	10.29

ตารางที่ 4.7 ตัวอย่างบางส่วนที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสลงกราวด์โฟลต์เมื่อ $R_f = 7$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.89	41.49	41.49	0.00	39.57	39.57
5	93.91	42.64	42.64	0.00	38.50	38.50
10	93.90	51.98	51.98	0.00	30.74	30.74
15	93.89	56.22	56.22	0.00	27.55	27.55
20	93.90	59.82	59.82	0.00	24.90	24.90
25	93.89	62.84	62.84	0.00	22.69	22.69
30	93.87	65.47	65.47	0.00	20.79	20.79
35	93.93	67.66	67.66	0.00	19.18	19.18
40	93.88	69.58	69.58	0.00	17.77	17.77
45	93.97	71.31	71.31	0.00	16.52	16.52
50	93.88	72.92	72.92	0.00	15.38	15.38
55	93.89	74.25	74.25	0.00	14.39	14.39
60	93.88	75.43	75.43	0.00	13.49	13.49
65	93.88	76.62	76.62	0.00	12.64	12.64
70	93.93	77.74	77.74	0.00	11.85	11.85
75	93.87	78.77	78.77	0.00	11.10	11.10
80	93.89	79.77	79.77	0.00	10.39	10.39
85	93.93	80.73	80.73	0.00	9.69	9.69
90	93.89	81.77	81.77	0.00	8.97	8.97
95	93.89	82.87	82.87	0.00	8.22	8.22
100	93.93	84.15	84.15	0.00	7.39	7.40

กรณีการเกิดเฟสลงกราวด์ฟอลต์ตัวอย่างบางส่วนของผลที่ได้จากการคำนวณ แสดงดังตารางที่ 4.8 และตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.8 ตัวอย่างบางส่วนที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์ เมื่อ $R_f = 2$ โอห์ม

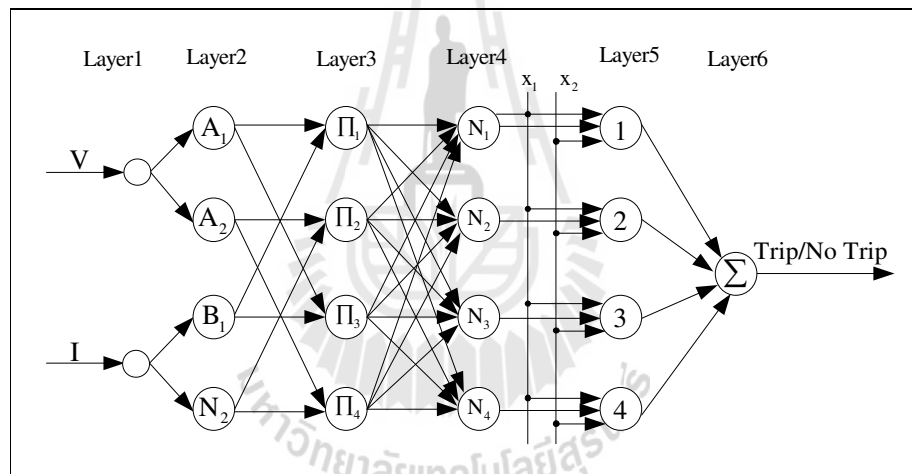
ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	22.74	98.86	94.67	62.25	2.39	2.39
5	23.63	98.39	94.66	57.70	2.19	2.19
10	46.45	96.35	94.41	34.61	1.16	1.16
15	54.70	95.69	94.42	28.36	0.87	0.87
20	60.53	95.48	94.23	24.01	0.67	0.67
25	64.84	95.10	94.09	20.84	0.51	0.51
30	68.18	94.82	94.13	18.44	0.38	0.38
35	70.82	94.75	94.09	16.53	0.27	0.27
40	72.96	94.59	93.99	15.00	0.18	0.17
45	74.71	94.40	94.02	13.75	0.09	0.09
50	76.17	94.26	93.99	12.71	0.00	0.00
55	77.39	94.23	93.90	11.83	0.09	0.09
60	78.47	94.05	93.89	11.08	0.18	0.18
65	79.35	93.94	93.92	10.45	0.27	0.27
70	80.16	93.78	93.89	9.91	0.38	0.38
75	80.81	93.66	93.74	9.45	0.51	0.51
80	81.34	93.58	93.64	9.08	0.67	0.67
85	81.78	93.23	93.65	8.80	0.87	0.87
90	82.11	93.02	93.48	8.62	1.16	1.16
95	82.30	92.50	93.24	8.59	1.61	1.61
100	82.29	91.57	93.31	8.85	2.39	2.39

ตารางที่ 4.9 ตัวอย่างบางส่วนที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์ เมื่อ $R_f = 7$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	59.01	98.20	92.45	46.15	1.77	1.77
5	57.86	97.84	92.70	43.86	1.66	1.66
10	59.91	96.30	93.54	29.65	1.00	1.00
15	63.55	95.78	93.75	25.00	0.77	0.77
20	66.84	95.39	93.84	21.57	0.60	0.60
25	69.66	95.08	93.85	18.96	0.46	0.46
30	71.99	94.93	93.78	16.89	0.35	0.35
35	74.04	94.66	93.92	15.25	0.25	0.25
40	75.68	94.57	93.89	13.88	0.16	0.16
45	77.14	94.38	93.93	12.76	0.08	0.08
50	78.38	94.24	93.92	11.80	0.00	0.00
55	79.47	94.16	93.79	10.96	0.08	0.08
60	80.44	94.12	93.85	10.25	0.16	0.16
65	81.29	93.90	93.88	9.64	0.25	0.25
70	82.11	93.83	93.73	9.08	0.35	0.35
75	82.84	93.66	93.71	8.59	0.46	0.46
80	83.55	93.47	93.72	8.15	0.60	0.60
85	84.30	93.16	93.92	7.76	0.77	0.77
90	85.05	92.93	93.86	7.38	1.00	1.00
95	86.01	92.41	94.12	7.01	1.31	1.31
100	87.37	91.66	94.44	6.55	1.77	1.77

4.3 การประยุกต์ใช้ระบบนิวโร-ฟัซซี

ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ระบบนิวโร-ฟัซซีแบบ ANFIS ที่มีการเรียนรู้แบบผสมระหว่างการประมาณค่ากำลังสองน้อยที่สุดและอัลกอริทึมลดลงของเกรเดียนเรียนรู้ประกอบไปด้วยช่วงไปข้างหน้าและช่วงแพร่กลับในช่วงไปข้างหน้า อินพุตรูปแบบจะถูกป้อนให้กับระบบทำการคำนวณค่าเอาต์พุตของระบบค่าเอาต์พุตจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับเป้าหมาย เพื่อคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนตามหลักการของอัลกอริทึมการเรียนรู้แบบแพร่กลับ อัลกอริทึมในการเรียนรู้แบบแพร่กลับเป็นการเรียนรู้แบบชี้หน้า คือ ชุดข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้ชุดข้อมูลสำหรับการเรียนรู้เป็นแบบรู้ผลลัพธ์ของข้อมูลอินพุตที่แน่นอน หรืออาจเปรียบเป็นว่าสัญญาณเอาต์พุตของรีเลย์ เป็นลอจิก “1” สำหรับข้อมูลที่ได้จากฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระยะ 85 เปอร์เซ็นต์ของสายส่งไฟฟ้า (ในโซนการป้องกัน) แต่ถ้าข้อมูลที่ได้เกิดจากฟอลต์นอกโซนป้องกันสัญญาณที่ออกจากรีเลย์เป็น ลอจิก “0” ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ตัวอย่างของนิวโร - ฟัซซี

ในส่วนของการประยุกต์ใช้ระบบนิวโร-ฟัซซีนั้น ไม่มีกฎเกณฑ์ที่แน่นอนในการหารูปแบบระบบนิวโร-ฟัซซีที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ดีโดยทั่วไปได้มีข้อเสนอแนะในการออกแบบแบ่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพของนิวโร-ฟัซซีเพิ่มขึ้นด้วย

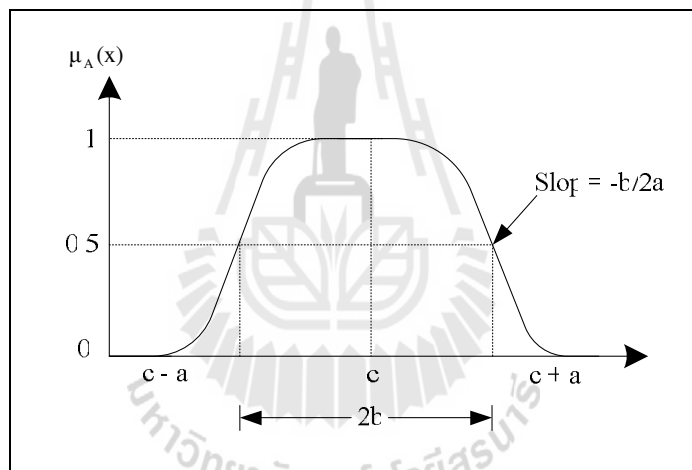
ดังนั้นการประยุกต์ใช้นิวโร-ฟัซซีนั้นอาจต้องมีการทดสอบหรือลองถูกลองผิดก่อนจะต้องประยุกต์ใช้นิวโร-ฟัซซีขนาดเล็กก่อนแล้วนำไปผ่านกระบวนการเรียนรู้ถ้าเรียนรู้สำเร็จก็สามารถนำไปใช้ได้ แต่ถ้าการเรียนรู้ไม่สำเร็จต้องออกแบบแบ่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตให้เพิ่มขึ้น

สำหรับระบบนิเวศ-พืชที่ได้ผ่านกระบวนการเรียนรู้แล้วสำเร็จนั้นต้องนำไปทดสอบกับชุดทดสอบอีกครั้งเพื่อดูประสิทธิภาพของนิเวศ-พืชอีกครั้งก่อน

ชั้นของอินพุต เป็นชั้นของสัญญาณขาเข้า ในงานวิจัยนี้ใช้ขนาดของแรงดันไฟฟ้าและขนาดของกระแสไฟฟ้าเป็นพารามิเตอร์อินพุต

ชั้นของเอาต์พุต เป็นชั้นสัญญาณขาออก ในงานวิจัยนี้เป็นสัญญาณของรีเลย์คือทริป (trip) หรือไม่ทริป (no trip)

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบรูปประฆังคว่ำ (bell membership function) เป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่มีคุณสมบัติของข้อมูลคล้ายกับฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบรูปสามเหลี่ยมแต่ข้อมูลของโดเมนที่แปลงไปยังเรนจ์จะมีความสัมพันธ์ในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบรูปประฆังคว่ำสามารถกำหนดได้ดังสมการที่ (4.35)



รูปที่ 4.8 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบรูปประฆังคว่ำ

$$\text{bell}(x;a,b,c) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x-c}{a} \right)^2 \right]^b} \quad (4.35)$$

โดยกำหนดให้ a_i , b_i และ c_i เป็นพารามิเตอร์จุดศูนย์กลาง ความกว้างและความชันของทรงรูปประฆังคว่ำของฟังก์ชันสมาชิก

สำหรับการประยุกต์ใช้ ANFIS จะใช้โปรแกรม Matlab เนื่องจาก Matlab เป็นโปรแกรมที่มีฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่เป็นประโยชน์แก่การประยุกต์ใช้โปรแกรมและยังมีกล่องเครื่องมือ (toolbox) ของนิวโร-ฟัซซีด้วย

4.3.1 ระบบนิวโร-ฟัซซีสำหรับสามเฟสฟอลต์

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอระบบนิวโร-ฟัซซีสำหรับฟอลต์สามเฟสฟอลต์ มีทั้งหมด 3 แบบเพื่อเป็นการเปรียบเทียบภายใต้ตัวอย่างเดียวกัน ระบบนิวโร-ฟัซซีสำหรับสามเฟสฟอลต์ที่นำเสนอมีดังนี้ โดยนิวโร-ฟัซซีแบบที่ 1 สำหรับสามเฟสฟอลต์แทนด้วย NF1_3PH นิวโร-ฟัซซีแบบที่ 2 สำหรับสามเฟสฟอลต์แทนด้วย NF2_3PH และนิวโร-ฟัซซีแบบที่ 3 สำหรับสามเฟสฟอลต์แทนด้วย NF3_3PH

1. NF1_3PH มีจำนวนฟังก์ชันสมาชิก 3 ฟังก์ชันสมาชิกและมีอินพุต 3 อินพุต
คือ $\text{Input} = [V_A \ I_A \ V_A/I_A]$

2. NF2_3PH มีจำนวนฟังก์ชันสมาชิก 4 ฟังก์ชันสมาชิกและมีอินพุต 4 อินพุต
คือ $\text{Input} = [V_A \ V_B \ V_C \ V_A/I_A]$

3. NF3_3PH มีจำนวนฟังก์ชันสมาชิก 4 ฟังก์ชันสมาชิกและมีอินพุต 4 อินพุต
คือ $\text{Input} = [V_A \ I_A \ I_B \ I_C]$

หลังจากการใช้โปรแกรม Matlab ในการเรียนรู้ของนิวโร-ฟัซซีแต่ละแบบ จะได้ค่าผลรวมกำลังสองผิดพลาดน้อยที่สุดตามลำดับดังนี้ 0.1775, 0.1957 และ 0.0605

4.3.2 ระบบนิวโร-ฟัซซีสำหรับสองเฟสฟอลต์

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอระบบนิวโร-ฟัซซีสำหรับฟอลต์สองเฟสฟอลต์ มีทั้งหมด 3 แบบเพื่อเป็นการเปรียบเทียบภายใต้ตัวอย่างเดียวกัน ระบบนิวโร-ฟัซซีสำหรับสองเฟสฟอลต์ที่นำเสนอมีดังนี้ โดยนิวโร-ฟัซซีแบบที่ 1 สำหรับสองเฟสฟอลต์แทนด้วย NF1_2PH นิวโร-ฟัซซีแบบที่ 2 สำหรับสองเฟสฟอลต์แทนด้วย NF2_2PH และนิวโร-ฟัซซีแบบที่ 3 สำหรับสองเฟสฟอลต์แทนด้วย NF3_2PH

1. NF1_2PH มีจำนวนฟังก์ชันสมาชิก 3 ฟังก์ชันสมาชิกและมีอินพุต 3 อินพุต
คือ $\text{Input} = [V_B \ I_B \ V_B/I_B]$

2. NF2_2PH มีจำนวนฟังก์ชันสมาชิก 4 ฟังก์ชันสมาชิกและมีอินพุต 4 อินพุต
คือ $\text{Input} = [I_A \ I_B \ I_C \ V_A/I_A]$

3. NF3_2PH มีจำนวนฟังก์ชันสมาชิก 4 ฟังก์ชันสมาชิกและมีอินพุต 4 อินพุต
คือ $\text{Input} = [V_A \ I_A \ I_B \ I_C]$

หลังจากการใช้โปรแกรม Matlab ในการเรียนรู้ของนิวโร-ฟัซซีแต่ละแบบ จะได้ค่าผลรวมกำลังสองผิดพลาดน้อยที่สุดตามลำดับดังนี้ 0.1773, 0.1958 และ 0.0607

4.3.3 ระบบนิวโร-พีชชีสำหรับสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอระบบนิวโร-พีชชีสำหรับสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์ มีทั้งหมด 3 แบบเพื่อเป็นการเปรียบเทียบภายใต้ตัวอย่างเดียวกัน ระบบนิวโร-พีชชีที่จะนำเสนอมีดังนี้ โดยที่นิวโร-พีชชีแบบที่ 1 สำหรับสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์แทนด้วย NF1_2PHG นิวโร-พีชชีแบบที่ 2 สำหรับสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์แทนด้วย NF2_2PHG และนิวโร-พีชชีแบบที่ 3 สำหรับสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์แทนด้วย NF3_2PHG

1. NF1_2PHG มีจำนวนฟังก์ชันสมาชิก 4 ฟังก์ชันสมาชิกและมีอินพุต 4 อินพุต
คือ $\text{Input} = [V_A \ V_B \ V_C \ V_A/I_A]$

2. NF2_2PHG มีจำนวนฟังก์ชันสมาชิก 4 ฟังก์ชันสมาชิกและมีอินพุต 4 อินพุต
คือ $\text{Input} = [I_A \ I_B \ I_C \ V_A/I_A]$

3. NF3_2PHG มีจำนวนฟังก์ชันสมาชิก 4 ฟังก์ชันสมาชิกและมีอินพุต 4 อินพุต
คือ $\text{Input} = [V_A \ I_A \ I_B \ I_C]$

หลังจากการใช้โปรแกรม Matlab ในการเรียนรู้ของนิวโร-พีชชีแต่ละแบบ จะได้ค่าผลรวมกำลังสองผิดพลาดน้อยที่สุดตามลำดับดังนี้ 0.1753, 0.1458 และ 0.0907

4.3.4 ระบบนิวโร-พีชชีสำหรับเฟสลงกราวด์ฟอลต์

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอระบบนิวโร-พีชชีสำหรับเฟสลงกราวด์ฟอลต์ มี 3 รูปแบบเพื่อเป็นการเปรียบเทียบภายใต้ตัวอย่างเดียวกัน ระบบนิวโร-พีชชีที่นำเสนอมีดังนี้โดยนิวโร-พีชชีแบบที่ 1 สำหรับเฟสลงกราวด์ฟอลต์แทนด้วย NF1_SLG นิวโร-พีชชีแบบที่ 2 สำหรับเฟสลงกราวด์ฟอลต์แทนด้วย NF2_SLG และนิวโร-พีชชีแบบที่ 3 สำหรับเฟสลงกราวด์ฟอลต์แทนด้วย NF3_SLG

1. NF1_SLG มีจำนวนฟังก์ชันสมาชิก 3 ฟังก์ชันสมาชิกและมีอินพุต 4 อินพุต
คือ $\text{Input} = [V_A \ I_A \ V_A/I_A]$

2. NF2_SLG มีจำนวนฟังก์ชันสมาชิก 3 ฟังก์ชันสมาชิกและมีอินพุต 4 อินพุต
คือ $\text{Input} = [V_A \ I_A \ \cos(\theta_v - \theta_i)]$

3. NF3_SLG มีจำนวนฟังก์ชันสมาชิก 4 ฟังก์ชันสมาชิกและมีอินพุต 4 อินพุต
คือ $\text{Input} = [V_A \ I_A \ I_B \ I_C]$

หลังจากการใช้โปรแกรม Matlab ในการเรียนรู้ของนิวโร-พีชชีแต่ละแบบ จะได้ค่าผลรวมกำลังสองผิดพลาดน้อยที่สุดตามลำดับดังนี้ 0.21875, 0.210484 และ 0.0729

4.4 สรุป

ในการหาชุดตัวอย่างสำหรับการเรียนรู้ของระบบนิวโร-ฟัซซี การหาตัวอย่างสำหรับการเรียนรู้ทำได้จากการจำลองเหตุการณ์การเกิดฟอลต์บนสายส่งไฟฟ้าของระบบทดสอบ โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink จากการจำลองเหตุการณ์การเกิดฟอลต์บนสายส่งไฟฟ้า พารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลอง คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าและขนาดของกระแสไฟฟ้า นำไปใช้เป็นชุดตัวอย่างในการเรียนรู้ของระบบนิวโร-ฟัซซี ในส่วนของการประยุกต์ใช้ระบบนิวโร-ฟัซซีสำหรับฟอลต์แต่ละแบบนั้นการเลือกตัวแปรอินพุตที่จะเข้าไปในระบบนิวโร-ฟัซซีนั้นการเลือกตัวแปรอินพุตต้องเลือกตัวแปรที่มีลักษณะเด่น งานวิจัยนี้ได้ใช้ขนาดของแรงดันและขนาดของกระแสไฟฟ้าเป็นชุดข้อมูลในการเรียนรู้ของระบบนิวโร-ฟัซซีในการป้องกันสายส่งไฟฟ้า



บทที่ 5

การจำลองการป้องกันสายส่งไฟฟ้า ด้วยระบบนิวโร-ฟิชชี

5.1 กล่าวนำ

เมื่อได้ระบบนิวโร-ฟิชชีที่เหมาะสมแล้วขั้นตอนต่อไปคือการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบนิวโร-ฟิชชี การทดสอบจะทำโดยการใช้ชุดข้อมูลที่สร้างขึ้นเพื่อการทดสอบ โดยเฉพาะ ข้อมูลทดสอบที่ใช้ต้องไม่ซ้ำกับข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้ของระบบนิวโร-ฟิชชี เพื่อเป็นการแสดงประสิทธิภาพของนิวโร-ฟิชชี ในงานวิจัยนี้จะแสดงให้เห็นว่านิวโร-ฟิชชีสามารถป้องกันสายส่งไฟฟ้าได้

5.2 ผลการจำลองการป้องกันสายส่งไฟฟ้าด้วยระบบนิวโรฟิชชี

การทดสอบจะเริ่มการจำลองเหตุการณ์การเกิดฟอลต์กับระบบไฟฟ้าบนสายส่งไฟฟ้ามีความยาว 100 เฟอร์เซ็นต์ ซึ่งมีการตั้งการป้องกันโซนที่ 1 ที่ระยะ 0-85 เฟอร์เซ็นต์ แล้วนำข้อมูลที่ได้ออกไปทดสอบกับระบบนิวโร-ฟิชชี ความถูกต้องในการทำงานดูได้จากการเปรียบเทียบผลตอบกับผลที่ได้จากระบบนิวโร-ฟิชชี ข้อมูลที่เป็นชุดทดสอบนั้นมีทั้งหมด 231 ชุดซึ่งไม่ซ้ำกับชุดข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้ดังกล่าวในหัวข้อที่ 4.2.1 สำหรับข้อมูลที่ใช้เป็นชุดทดสอบแสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลที่ใช้เป็นชุดทดสอบในระบบไฟฟ้า

ชนิดของการเกิดฟอลต์	ตำแหน่งของการเกิดฟอลต์ (เฟอร์เซ็นต์)	ความต้านทานของฟอลต์ (โอห์ม)
สามเฟสฟอลต์ (A-B-C)	x = 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35,	$R_f = 1e-6, 5, 10, 15, 20,$
เกิดสองเฟสฟอลต์ (B-C)	40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75,	25, 30, 35, 40, 45, 50
สองเฟสลงกราวด์ฟอลต์ (B-C-G)	80, 85, 90, 95, 100	
เฟสลงกราวด์ฟอลต์ (A-G)		

5.2.1 ผลการจำลองการป้องกันสายส่งไฟฟ้ากรณีสามเฟสฟอลต์

บางส่วนของค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณสำหรับใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบนิวโร-ฟิชชีแสดงดังตารางที่ 5.2 และตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 ผลการคำนวณบางส่วนของชุดทดสอบสำหรับระบบนิวโร-ฟิชชีกรณีสามเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 5$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	0.03	0.11	0.04	68.72	67.56	70.42
5	3.91	3.92	3.89	65.77	64.80	67.21
10	28.41	28.43	28.53	47.86	47.24	48.82
15	37.04	37.08	37.11	41.53	41.05	42.36
20	43.66	43.66	43.76	36.71	36.33	37.39
25	48.90	48.88	49.02	32.90	32.56	33.46
30	53.14	53.18	53.22	29.78	29.47	30.33
35	56.66	56.68	56.75	27.22	26.95	27.70
40	59.62	59.64	59.70	25.05	24.81	25.49
45	62.14	62.16	62.23	23.21	22.99	23.61
50	64.32	64.34	64.40	21.62	21.42	21.99
55	66.23	66.19	66.33	20.24	20.06	20.56
60	67.90	67.86	67.99	19.02	18.85	19.32
65	69.38	69.33	69.48	17.94	17.78	18.21
70	70.70	70.67	70.77	16.97	16.83	17.24
75	71.87	71.87	71.96	16.10	15.96	16.36
80	72.95	72.93	73.02	15.32	15.19	15.57
85	73.94	73.88	74.00	14.62	14.49	14.84
90	74.79	74.80	74.89	13.96	13.85	14.19
95	75.62	75.59	75.68	13.37	13.26	13.58
100	76.24	76.42	76.47	12.83	12.72	13.03

ตารางที่ 5.3 ผลการคำนวณบางส่วนของชุดทดสอบสำหรับระบบนิวโร-ฟิชชี
กรณีสามเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 10$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	50.01	49.90	49.90	52.66	52.56	52.57
5	49.61	49.55	49.55	50.96	50.91	50.93
10	51.77	51.67	51.73	39.49	39.44	39.44
15	54.54	54.49	54.57	35.00	34.96	34.99
20	57.44	57.36	57.46	31.40	31.36	31.37
25	60.14	60.12	60.18	28.42	28.40	28.42
30	62.64	62.58	62.68	25.95	25.92	25.94
35	64.89	64.81	64.92	23.85	23.82	23.83
40	66.91	66.81	66.95	22.04	22.01	22.02
45	68.71	68.69	68.73	20.45	20.44	20.46
50	70.37	70.29	70.43	19.08	19.05	19.05
55	71.88	71.79	71.94	17.84	17.82	17.82
60	73.26	73.22	73.31	16.72	16.71	16.71
65	74.56	74.51	74.60	15.71	15.70	15.70
70	75.80	75.70	75.85	14.79	14.78	14.76
75	76.96	76.96	76.97	13.92	13.91	13.91
80	78.13	78.03	78.20	13.11	13.10	13.08
85	79.29	79.24	79.32	12.32	12.31	12.29
90	80.50	80.45	80.54	11.54	11.53	11.51
95	81.81	81.79	81.85	10.73	10.72	10.70
100	83.33	83.30	83.35	9.86	9.85	9.83

สำหรับผลเอาต์พุตบางส่วนที่ได้จากการจำลองการป้องกันสายส่งไฟฟ้าด้วย
นิวโร-ฟัซซีสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ผลเอาต์พุตบางส่วนจากระบบนิวโร-ฟัซซีในการทดสอบด้วยชุดทดสอบ

กรณีสามเฟสพอลต์

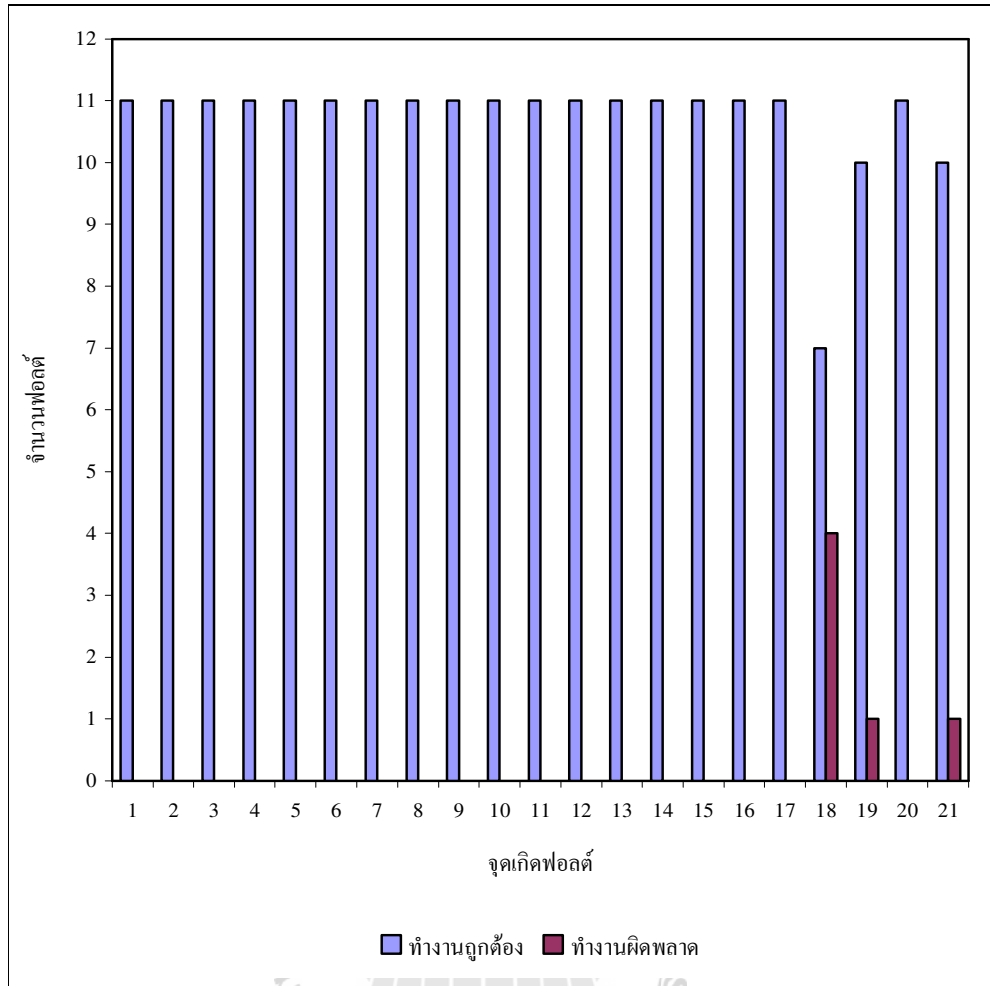
Distance	Desire-Trip	NF1_3PH	NF2_3PH	NF3_3PH
0	1	1	1	1
5	1	1	1	1
10	1	1	1	1
15	1	1	1	1
20	1	1	1	1
25	1	1	1	1
30	1	1	1	1
35	1	1	1	1
40	1	1	1	1
45	1	1	1	1
50	1	1	1	1
55	1	1	1	1
60	1	1	1	1
65	1	1	1	1
70	1	1	1	1
75	1	1	1	1
80	1	1	1	1
85	1	0	1	1
90	0	0	0	0
95	0	0	0	0
100	0	0	0	0

สำหรับในส่วนนี้เป็นการแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของระบบนิวโร-พีชซีในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าเมื่อเกิดสามเฟสฟอลต์

ตารางที่ 5.5 การทำงานของ NF1_3PH สำหรับสามเฟสฟอลต์

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ผลการทำงาน (จำนวนตัวอย่าง)		ผลการทำงาน (เปอร์เซ็นต์)	
	ถูกต้อง	ผิดพลาด	ถูกต้อง	ผิดพลาด
0	11	0	100.00	0.00
5	11	0	100.00	0.00
10	11	0	100.00	0.00
15	11	0	100.00	0.00
20	11	0	100.00	0.00
25	11	0	100.00	0.00
30	11	0	100.00	0.00
35	11	0	100.00	0.00
40	11	0	100.00	0.00
45	11	0	100.00	0.00
50	11	0	100.00	0.00
55	11	0	100.00	0.00
60	11	0	100.00	0.00
65	11	0	100.00	0.00
70	11	0	100.00	0.00
75	11	0	100.00	0.00
80	11	0	100.00	0.00
85	7	4	63.64	36.36
90	10	1	90.91	9.09
95	11	0	100.00	0.00
100	10	1	90.91	9.09

จากตารางที่ 5.5 สามเฟสฟอลต์ นิวโร-พีชซีแบบที่หนึ่ง NF1_3PH ทำงานถูกต้อง 225 ตัวอย่าง หรือ 97.40 เปอร์เซ็นต์ จากจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 231 ตัวอย่าง

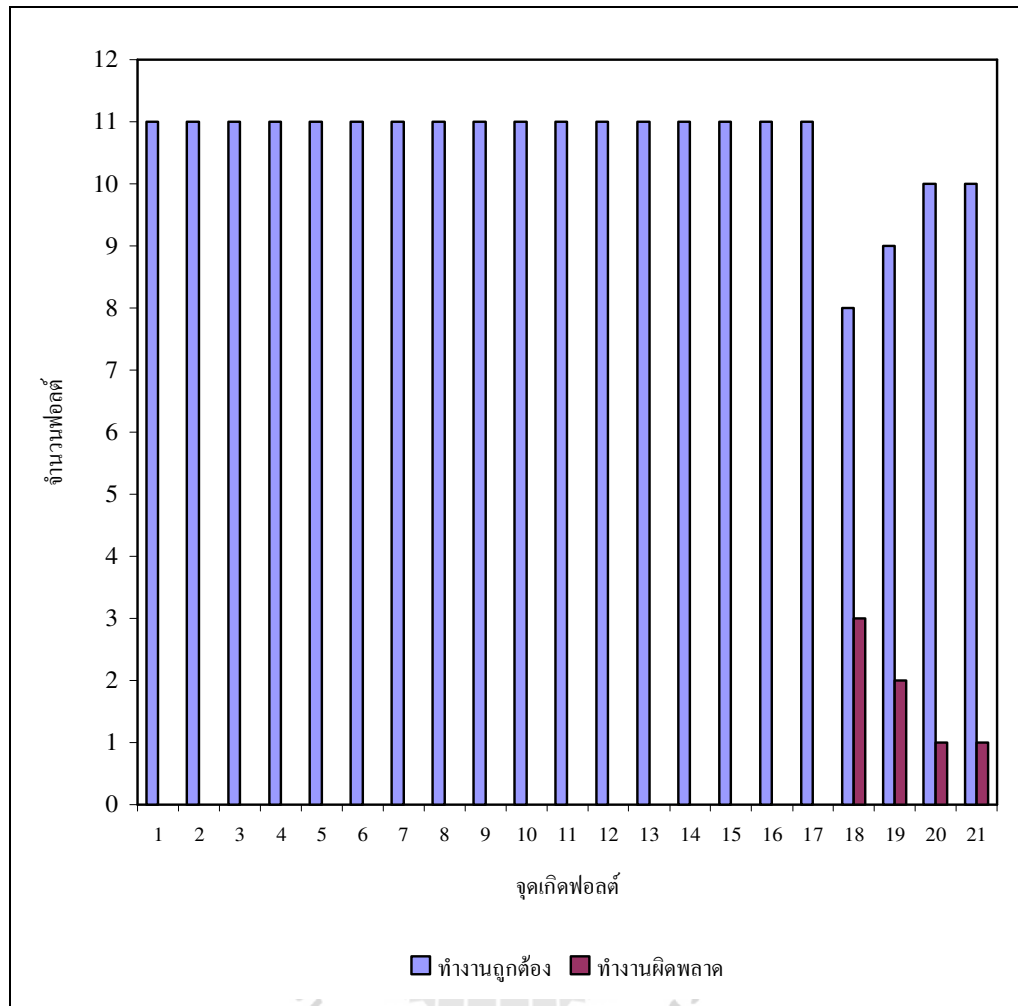


รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบความถูกต้องของการทำงานของ NF1_3PH ที่จุดเกิดฟอลต์ต่าง ๆ

ตารางที่ 5.6 การทำงานของ NF2_3PH สำหรับสามเฟสฟอลต์

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ผลการทำงาน (จำนวนตัวอย่าง)		ผลการทำงาน (เปอร์เซ็นต์)	
	ถูกต้อง	ผิดพลาด	ถูกต้อง	ผิดพลาด
0	11	0	100.00	0.00
5	11	0	100.00	0.00
10	11	0	100.00	0.00
15	11	0	100.00	0.00
20	11	0	100.00	0.00
25	11	0	100.00	0.00
30	11	0	100.00	0.00
35	11	0	100.00	0.00
40	11	0	100.00	0.00
45	11	0	100.00	0.00
50	11	0	100.00	0.00
55	11	0	100.00	0.00
60	11	0	100.00	0.00
65	11	0	100.00	0.00
70	11	0	100.00	0.00
75	11	0	100.00	0.00
80	11	0	100.00	0.00
85	8	3	72.73	27.27
90	9	2	81.82	18.18
95	10	1	90.91	9.09
100	10	1	90.91	9.09

จากตารางที่ 5.6 สามเฟสฟอลต์ นิวโร-พีซีแบบที่สอง NF2_3PH ทำงานถูกต้อง 224 ตัวอย่าง หรือ 96.97 เปอร์เซ็นต์ จากจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 231 ตัวอย่าง

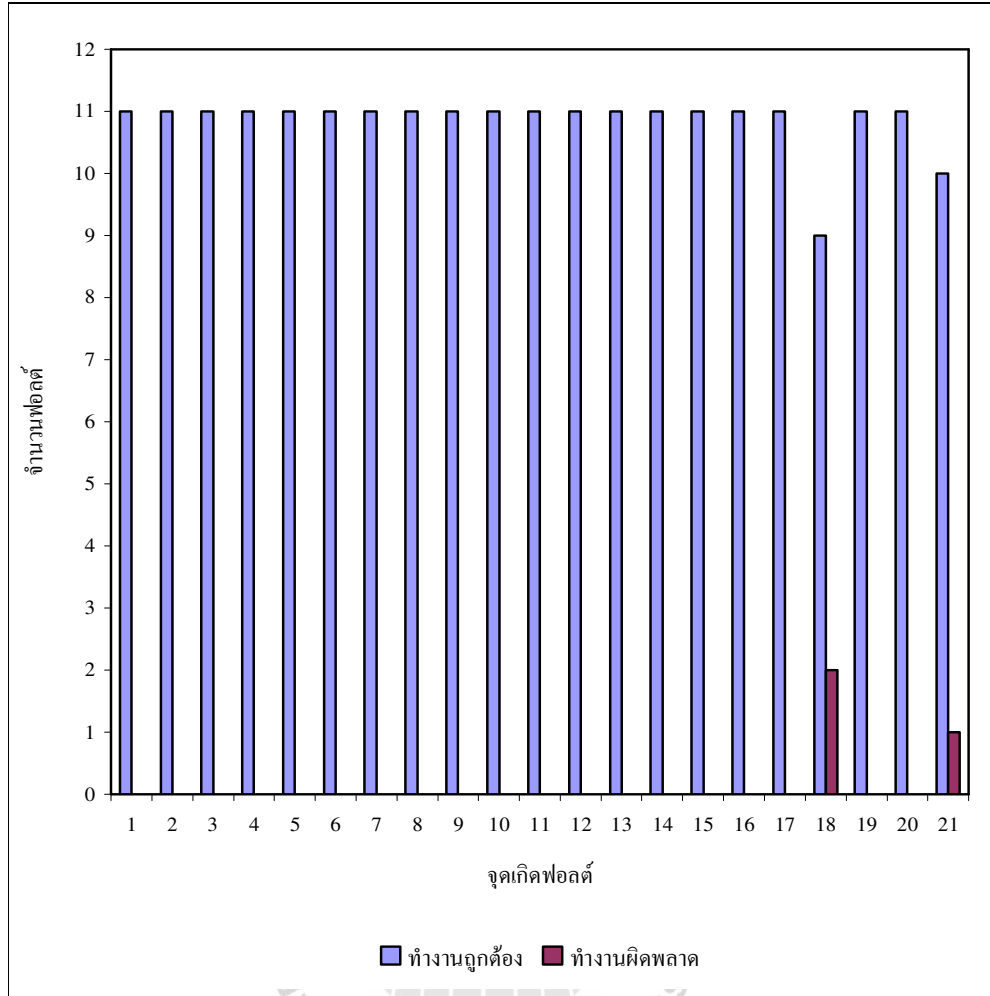


รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบความถูกต้องของการทำงานของ NF2_3PH ที่จุดเกิดฟอดด์ต่าง ๆ

ตารางที่ 5.7 การทำงานของ NF3_3PH สำหรับสามเฟสฟอลต์

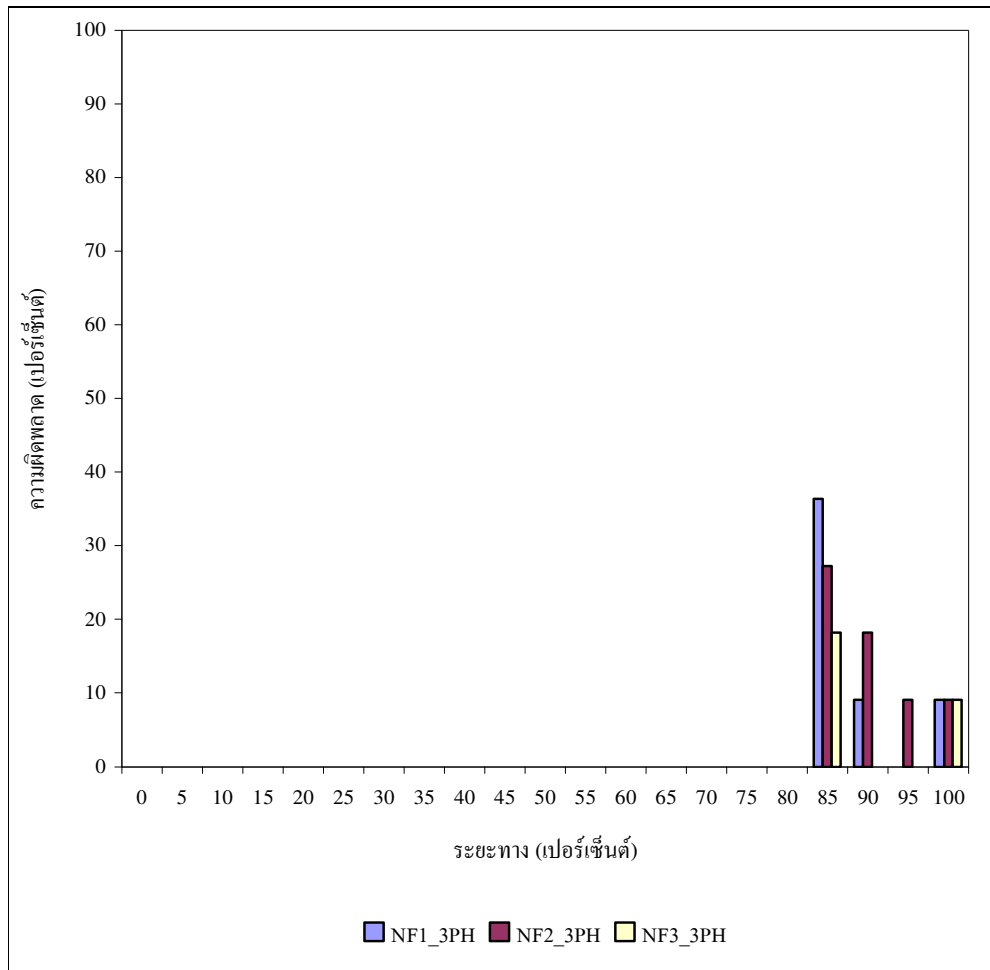
ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ผลการทำงาน (จำนวนตัวอย่าง)		ผลการทำงาน (เปอร์เซ็นต์)	
	ถูกต้อง	ผิดพลาด	ถูกต้อง	ผิดพลาด
0	11	0	100.00	0.00
5	11	0	100.00	0.00
10	11	0	100.00	0.00
15	11	0	100.00	0.00
20	11	0	100.00	0.00
25	11	0	100.00	0.00
30	11	0	100.00	0.00
35	11	0	100.00	0.00
40	11	0	100.00	0.00
45	11	0	100.00	0.00
50	11	0	100.00	0.00
55	11	0	100.00	0.00
60	11	0	100.00	0.00
65	11	0	100.00	0.00
70	11	0	100.00	0.00
75	11	0	100.00	0.00
80	11	0	100.00	0.00
85	9	2	81.82	18.18
90	11	0	100.00	0.00
95	11	0	100.00	0.00
100	10	1	90.91	9.09

จากตารางที่ 5.7 สามเฟสฟอลต์ นิวโร-พีชชีแบบที่สาม NF3_3PH ทำงานถูกต้อง
228 ตัวอย่าง หรือ 98.70 เปอร์เซ็นต์ จากจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 231 ตัวอย่าง



รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบความถูกต้องของการทำงานของ NF3_3PH ที่จุดเกิดฟอลต์ต่าง ๆ

จากผลการจำลอง NF1_3PH, NF2_3PH และ NF3_3PH สามารถนำมาเขียนเป็นกราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ระยะทางต่าง ๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของระบบนิวโร-ฟิชชี
NF1_3PH - NF3_3PH

จากรูปที่ 5.4 จะเห็นว่าระบบนิวโร-ฟิชชี NF1_3PH, NF2_3PH และ NF3_3PH แต่ละแบบมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ระยะต่างๆ ไม่ต่างกันมากนักที่ฐานข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้เดียวกัน

5.2.2 ผลการจำลองการป้องกันสายส่งกรณีสองเฟสฟอลต์

บางส่วนของค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณสำหรับใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบนิวโร-ฟิชชีแสดงดังตารางที่ 5.8 และตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.8 ผลการคำนวณบางส่วนของชุดทดสอบสำหรับระบบนิวโร-ฟิชชี

กรณีสองเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 5$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.90	46.97	46.95	0.00	59.79	59.79
5	93.91	47.35	46.80	0.00	57.35	57.35
10	93.83	54.35	51.68	0.00	41.72	41.72
15	93.86	58.29	55.53	0.00	36.24	36.23
20	93.92	61.58	59.01	0.00	32.00	32.00
25	93.99	64.45	61.95	0.00	28.68	28.68
30	93.93	66.96	64.64	0.00	25.97	25.97
35	93.92	69.00	66.88	0.00	23.70	23.70
40	93.92	70.91	68.74	0.00	21.85	21.85
45	93.96	72.36	70.52	0.00	20.21	20.21
50	93.92	73.84	71.92	0.00	18.83	18.83
55	93.95	75.07	73.21	0.00	17.64	17.64
60	93.89	76.12	74.42	0.00	16.56	16.56
65	93.91	77.04	75.49	0.00	15.61	15.61
70	93.90	77.93	76.43	0.00	14.79	14.79
75	93.90	78.75	77.24	0.00	14.03	14.03
80	93.94	79.33	78.10	0.00	13.34	13.35
85	93.92	80.07	78.74	0.00	12.72	12.72
90	93.91	80.70	79.35	0.00	12.16	12.17
95	93.89	81.26	79.93	0.00	11.65	11.65
100	93.92	81.66	80.54	0.01	11.18	11.17

ตารางที่ 5.9 ผลการคำนวณบางส่วนของคุณดทดสอบสำหรับระบบนิวโร-ฟิชชี

กรณีสองเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 10$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	94.01	31.62	31.62	0.00	45.61	45.61
5	93.82	33.69	33.69	0.00	44.17	44.17
10	93.90	47.24	47.24	0.00	34.20	34.21
15	93.95	52.66	52.66	0.00	30.33	30.33
20	93.93	57.07	57.07	0.00	27.15	27.15
25	93.89	60.51	60.51	0.00	24.63	24.64
30	93.88	63.52	63.52	0.00	22.47	22.47
35	93.91	65.98	65.98	0.00	20.65	20.66
40	93.90	68.24	68.24	0.00	19.05	19.05
45	93.94	70.00	70.00	0.00	17.71	17.71
50	93.91	71.60	71.60	0.00	16.51	16.51
55	93.86	73.09	73.09	0.00	15.43	15.43
60	93.90	74.33	74.33	0.00	14.47	14.47
65	93.92	75.50	75.50	0.00	13.60	13.60
70	93.88	76.51	76.51	0.00	12.80	12.80
75	93.91	77.52	77.52	0.00	12.04	12.04
80	93.91	78.45	78.45	0.00	11.34	11.33
85	93.90	79.32	79.32	0.00	10.66	10.66
90	93.95	80.23	80.23	0.00	9.97	9.98
95	93.87	81.22	81.22	0.00	9.27	9.27
100	93.92	82.35	82.35	0.00	8.51	8.51

ผลของเอาต์พุตบางส่วนที่ได้จากการจำลองการป้องกันสายส่งไฟฟ้าด้วยระบบ
นิวโร-ฟัซซี่สามารถแสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.10 ผลเอาต์พุตบางส่วนของระบบนิวโร-ฟัซซี่ในการทดสอบด้วยชุดทดสอบ

กรณีสองเฟสฟอลต์

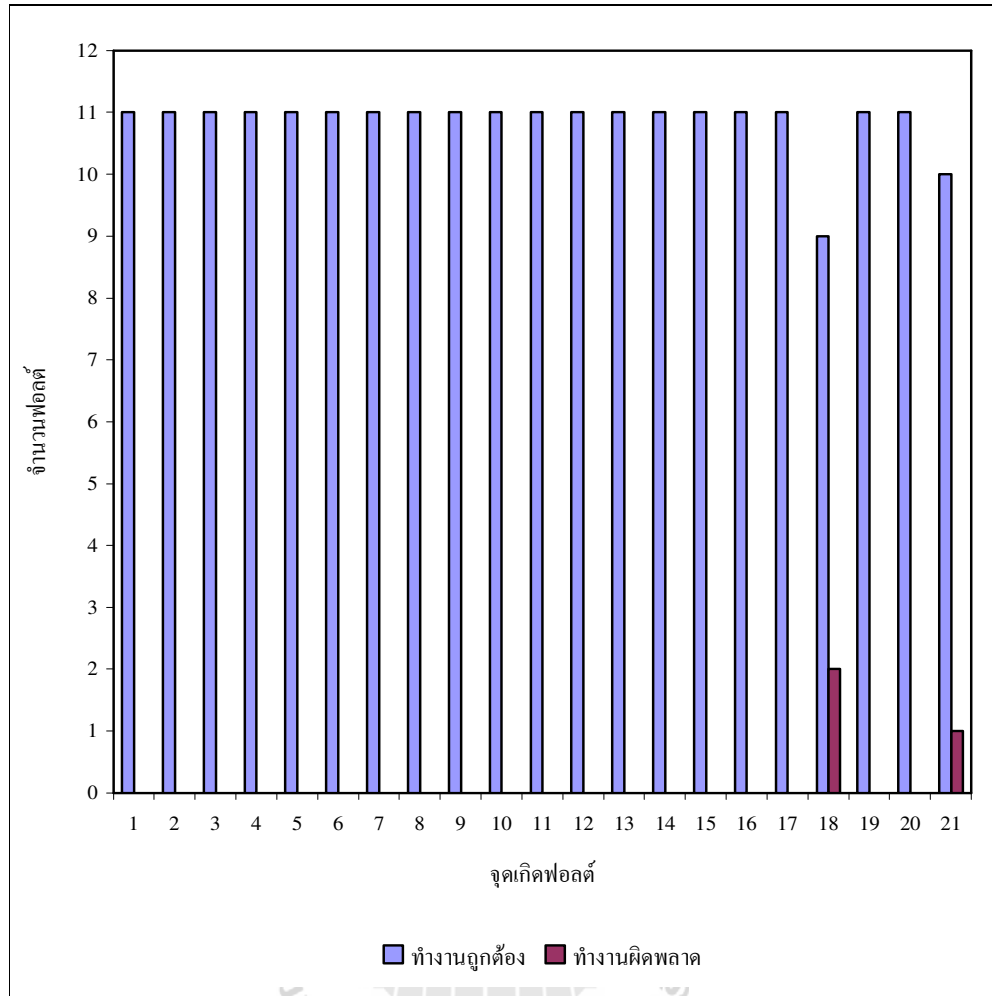
Distance	Desire-Trip	NF1_2PH	NF2_2PH	NF3_2PH
0	1	1	1	1
5	1	1	1	1
10	1	1	1	1
15	1	1	1	1
20	1	1	1	1
25	1	1	1	1
30	1	1	1	1
35	1	1	1	1
40	1	1	1	1
45	1	1	1	1
50	1	1	1	1
55	1	1	1	1
60	1	1	1	1
65	1	1	1	1
70	1	1	1	1
75	1	1	1	1
80	1	1	1	1
85	1	0	1	1
90	0	0	0	0
95	0	0	0	0
100	0	0	0	0

สำหรับในส่วนนี้เป็นการแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของระบบนิวโร-ฟิชซีในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าเมื่อเกิดสองเฟสฟอลต์

ตารางที่ 5.11 การทำงานของนิวโร-ฟิชซี NF1_2PH สำหรับสองเฟสฟอลต์

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ผลการทำงาน (จำนวนตัวอย่าง)		ผลการทำงาน (เปอร์เซ็นต์)	
	ถูกต้อง	ผิดพลาด	ถูกต้อง	ผิดพลาด
0	11	0	100.00	0.00
5	11	0	100.00	0.00
10	11	0	100.00	0.00
15	11	0	100.00	0.00
20	11	0	100.00	0.00
25	11	0	100.00	0.00
30	11	0	100.00	0.00
35	11	0	100.00	0.00
40	11	0	100.00	0.00
45	11	0	100.00	0.00
50	11	0	100.00	0.00
55	11	0	100.00	0.00
60	11	0	100.00	0.00
65	11	0	100.00	0.00
70	11	0	100.00	0.00
75	11	0	100.00	0.00
80	11	0	100.00	0.00
85	9	2	81.82	18.18
90	11	0	100.00	0.00
95	11	0	100.00	0.00
100	10	1	90.91	9.09

จากตารางที่ 5.11 สองเฟสฟอลต์ นิวโร-ฟิชซีแบบที่หนึ่ง NF1_2PH ทำงานถูกต้อง 228 ตัวอย่าง หรือ 98.70 เปอร์เซ็นต์ จากจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 231 ตัวอย่าง

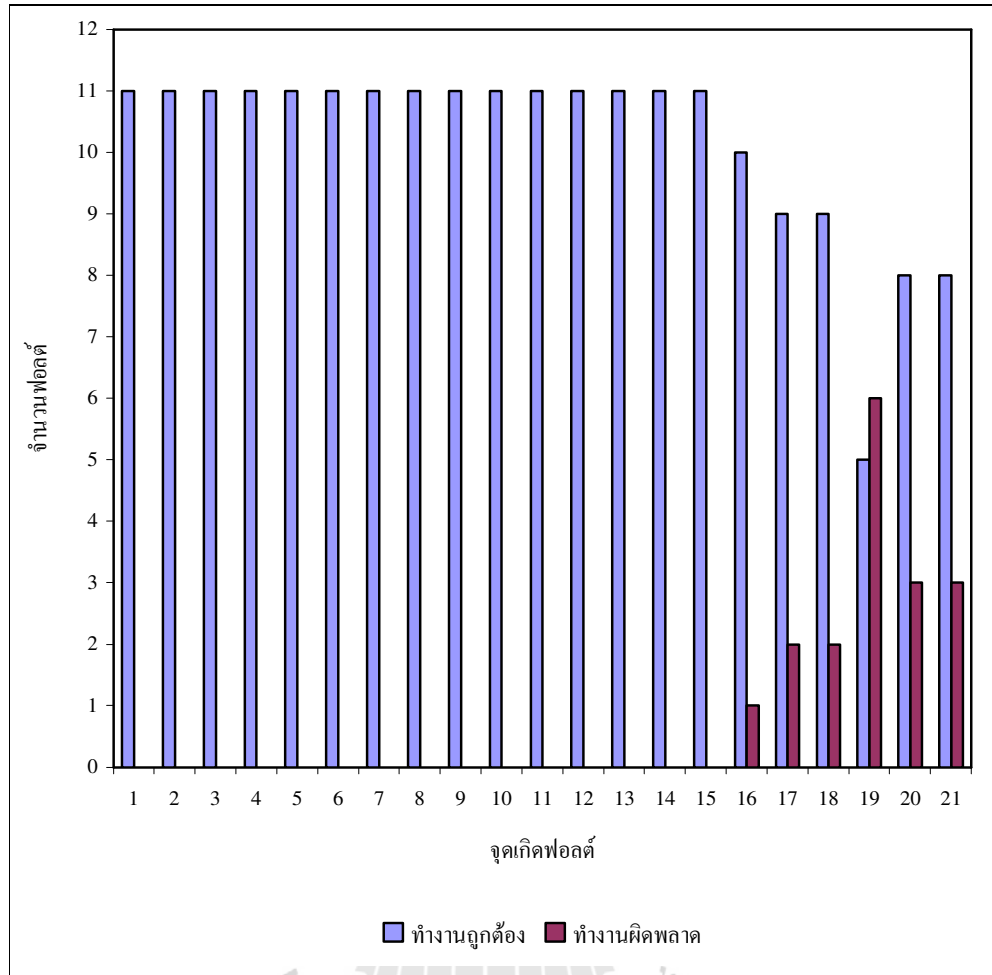


รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบความถูกต้องของการทำงานของ NF1_2PH ที่จุดเกิดฟอลต์ต่าง ๆ

ตารางที่ 5.12 การทำงานของ NF2_2PH สำหรับสองเฟสฟอลต์

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ผลการทำงาน (จำนวนตัวอย่าง)		ผลการทำงาน (เปอร์เซ็นต์)	
	ถูกต้อง	ผิดพลาด	ถูกต้อง	ผิดพลาด
0	11	0	100.00	0.00
5	11	0	100.00	0.00
10	11	0	100.00	0.00
15	11	0	100.00	0.00
20	11	0	100.00	0.00
25	11	0	100.00	0.00
30	11	0	100.00	0.00
35	11	0	100.00	0.00
40	11	0	100.00	0.00
45	11	0	100.00	0.00
50	11	0	100.00	0.00
55	11	0	100.00	0.00
60	11	0	100.00	0.00
65	11	0	100.00	0.00
70	11	0	100.00	0.00
75	10	1	90.91	9.09
80	9	2	81.82	18.18
85	9	2	81.82	18.18
90	5	6	45.45	54.55
95	8	3	72.73	27.27
100	8	3	72.73	27.27

จากตารางที่ 5.12 สองเฟสฟอลต์ นิวโร-พีชชีแบบที่หนึ่ง NF2_3PH ทำงานถูกต้อง 214 ตัวอย่าง หรือ 92.64 เปอร์เซ็นต์ จากจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 231 ตัวอย่าง

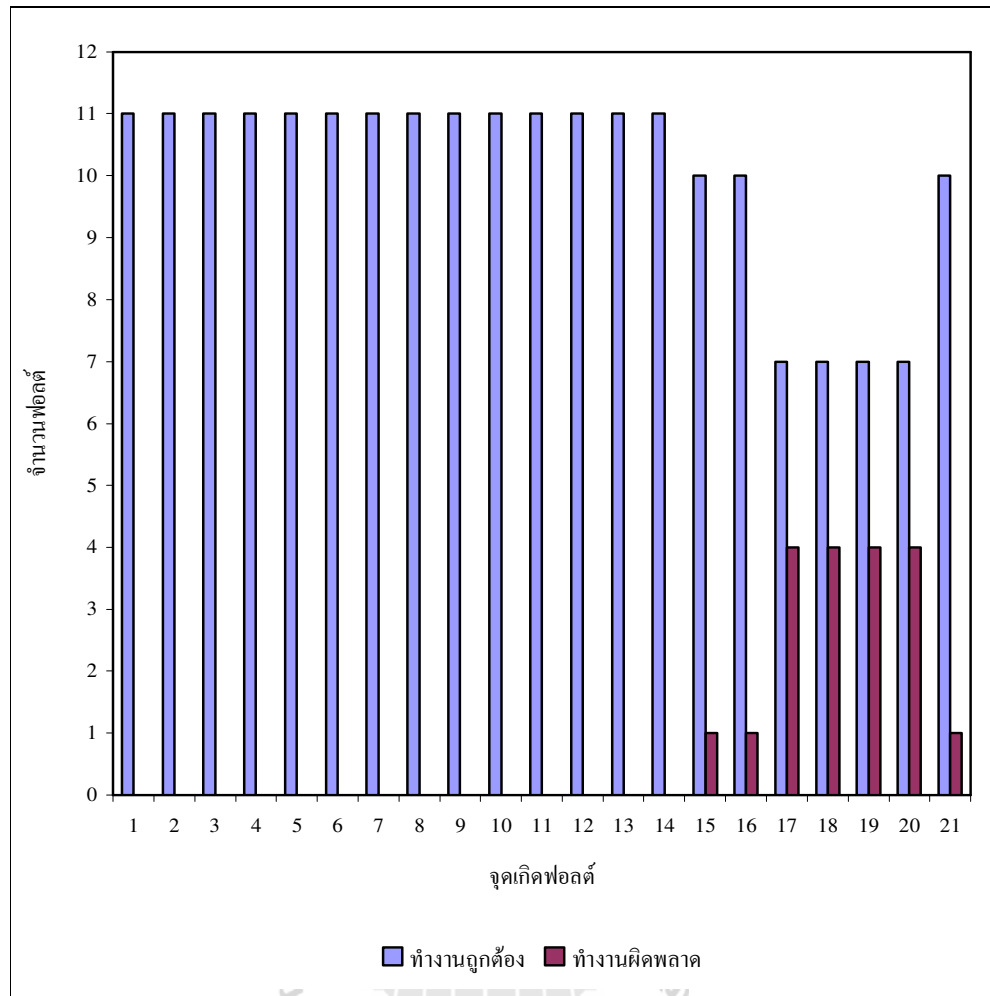


รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบความถูกต้องของการทำงานของ NF2_2PH ที่จุดเกิดพอลต์ต่างๆ

ตารางที่ 5.13 การทำงานของ NF3_2PH สำหรับสองเฟสฟอลต์

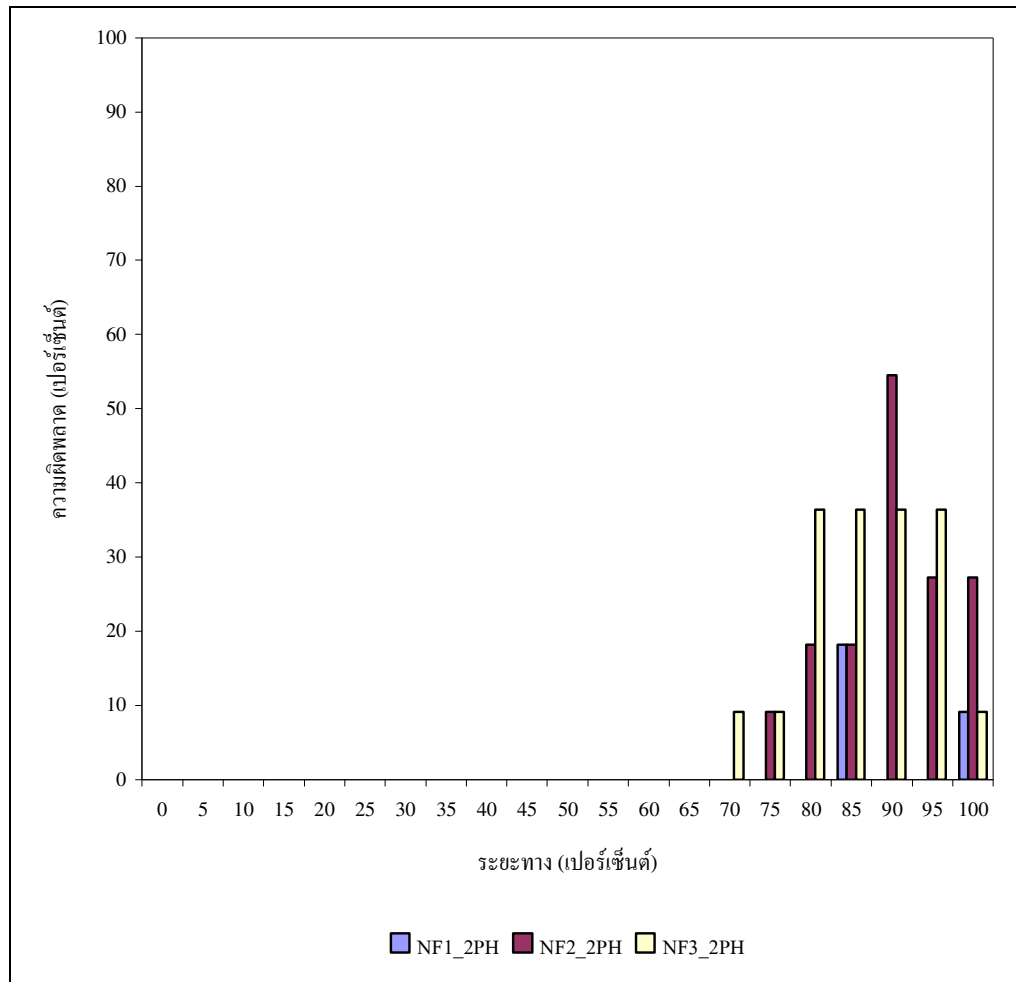
ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ผลการทำงาน (จำนวนตัวอย่าง)		ผลการทำงาน (เปอร์เซ็นต์)	
	ถูกต้อง	ผิดพลาด	ถูกต้อง	ผิดพลาด
0	11	0	100.00	0.00
5	11	0	100.00	0.00
10	11	0	100.00	0.00
15	11	0	100.00	0.00
20	11	0	100.00	0.00
25	11	0	100.00	0.00
30	11	0	100.00	0.00
35	11	0	100.00	0.00
40	11	0	100.00	0.00
45	11	0	100.00	0.00
50	11	0	100.00	0.00
55	11	0	100.00	0.00
60	11	0	100.00	0.00
65	11	0	100.00	0.00
70	10	1	90.91	9.09
75	10	1	90.91	9.09
80	7	4	63.64	36.36
85	7	4	63.64	36.36
90	7	4	63.64	36.36
95	7	4	63.64	36.36
100	10	1	90.91	9.09

จากตารางที่ 5.13 สองเฟสฟอลต์ นิวโร-พีชชีแบบที่หนึ่ง NF3_3PH ทำงานถูกต้อง 212 ตัวอย่าง หรือ 91.77 เปอร์เซ็นต์ จากจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 231 ตัวอย่าง



รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบความถูกต้องของการทำงานของ NF3_2PH ที่จุดเกิดฟอลต์ต่าง ๆ

จากผลการจำลอง NF1_2PH, NF2_2PH และ NF3_2PH สามารถนำมาเขียนเป็นกราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ระยะทางต่าง ๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 5.8 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของระบบนิวโร-ฟuzzy
NF1_2PH - NF3_2PH

จากรูปที่ 5.8 จะเห็นว่าระบบนิวโร-ฟuzzy NF1_2PH, NF2_2PH และ NF3_2PH แต่ละแบบมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ระยะต่าง ๆ ไม่ต่างกันมากนักที่ฐานข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้เดียวกัน

5.2.3 ผลการจำลองการป้องกันสายส่งกรณีสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์

บางส่วนของค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณสำหรับใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบนิวโร-ฟิชชีแสดงดังตารางที่ 5.14 และตารางที่ 5.15

ตารางที่ 5.14 ผลการคำนวณบางส่วนของชุดทดสอบสำหรับระบบนิวโร-ฟิชชีกรณีสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 5$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	99.85	0.00	0.00	2.39	65.88	70.01
5	99.15	6.23	6.06	2.10	62.37	65.86
10	96.36	36.29	35.16	0.94	43.33	44.95
15	95.81	44.92	43.52	0.68	37.31	38.64
20	95.36	51.13	49.73	0.51	32.78	33.89
25	95.09	55.87	54.52	0.38	29.27	30.23
30	94.87	59.67	58.32	0.28	26.44	27.30
35	94.68	62.73	61.48	0.20	24.11	24.88
40	94.52	65.28	64.10	0.13	22.16	22.86
45	94.38	67.45	66.31	0.06	20.51	21.16
50	94.30	69.32	68.19	0.00	19.09	19.69
55	94.14	70.91	69.87	0.06	17.85	18.41
60	94.03	72.33	71.31	0.13	16.76	17.29
65	93.90	73.56	72.59	0.20	15.80	16.30
70	93.79	74.65	73.73	0.28	14.96	15.43
75	93.62	75.64	74.73	0.38	14.19	14.64
80	93.43	76.50	75.64	0.51	13.51	13.93
85	93.16	77.22	76.52	0.68	12.89	13.28
90	92.79	77.91	77.21	0.94	12.34	12.72
95	92.10	78.47	77.83	1.40	11.84	12.21
100	90.80	78.84	78.29	2.39	11.43	11.81

ตารางที่ 5.15 ผลการคำนวณบางส่วนของคุณทดสอบสำหรับระบบนิวโร-ฟิชชี
กรณีสองเฟสลงกราวด์โฟลต์เมื่อ $R_f = 10$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	97.66	47.50	50.45	1.94	51.00	54.07
5	97.40	49.05	47.83	1.75	48.21	52.12
10	95.91	59.85	46.00	0.87	34.30	38.91
15	95.48	63.54	50.01	0.64	30.04	34.05
20	95.16	66.40	54.04	0.48	26.79	30.26
25	94.92	68.77	57.63	0.36	24.18	27.21
30	94.74	70.78	60.75	0.27	22.04	24.71
35	94.58	72.53	63.44	0.19	20.23	22.62
40	94.44	74.07	65.77	0.12	18.68	20.84
45	94.33	75.53	67.75	0.06	17.34	19.33
50	94.20	76.74	69.57	0.00	16.16	17.98
55	94.10	77.83	71.20	0.06	15.10	16.79
60	93.99	78.87	72.65	0.12	14.15	15.73
65	93.88	79.84	73.97	0.19	13.29	14.77
70	93.73	80.76	75.19	0.27	12.50	13.90
75	93.61	81.66	76.32	0.36	11.77	13.10
80	93.44	82.54	77.41	0.48	11.08	12.33
85	93.21	83.40	78.51	0.64	10.43	11.60
90	92.92	84.28	79.66	0.87	9.81	10.85
95	92.48	85.29	80.88	1.24	9.23	10.07
100	91.74	86.27	82.58	1.94	8.73	9.08

สำหรับผลเอาต์พุตบางส่วนที่ได้จากการจำลองการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโดยระบบ
นิวโร-ฟัซซีสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.16 ผลเอาต์พุตบางส่วนของระบบนิวโร-ฟัซซีในการทดสอบด้วยชุดทดสอบ
กรณีสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์

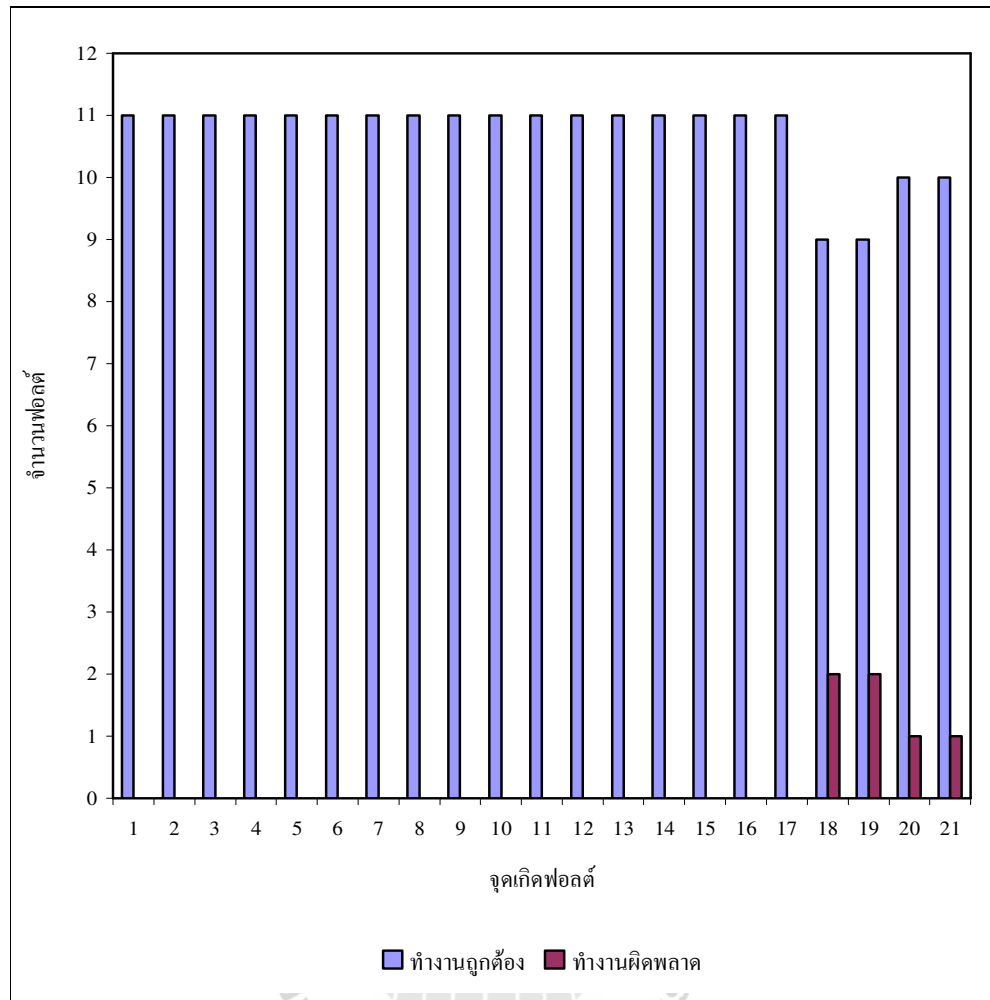
Distance	Desire-Trip	NF1_2PHG	NF2_2PHG	NF3_2PHG
0	1	1	1	1
5	1	1	1	1
10	1	1	1	1
15	1	1	1	1
20	1	1	1	1
25	1	1	1	1
30	1	1	1	1
35	1	1	1	1
40	1	1	1	1
45	1	1	1	1
50	1	1	1	1
55	1	1	1	1
60	1	1	1	1
65	1	1	1	1
70	1	1	1	1
75	1	1	1	1
80	1	1	0	0
85	1	0	0	0
90	0	0	0	0
95	0	0	0	0
100	0	0	0	0

สำหรับในส่วนนี้เป็นการแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของระบบนิวโร-ฟิชซีในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าเมื่อเกิดสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์

ตารางที่ 5.17 การทำงานของ NF1_2PHG สำหรับสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ผลการทำงาน (จำนวนตัวอย่าง)		ผลการทำงาน (เปอร์เซ็นต์)	
	ถูกต้อง	ผิดพลาด	ถูกต้อง	ผิดพลาด
0	11	0	100.00	0.00
5	11	0	100.00	0.00
10	11	0	100.00	0.00
15	11	0	100.00	0.00
20	11	0	100.00	0.00
25	11	0	100.00	0.00
30	11	0	100.00	0.00
35	11	0	100.00	0.00
40	11	0	100.00	0.00
45	11	0	100.00	0.00
50	11	0	100.00	0.00
55	11	0	100.00	0.00
60	11	0	100.00	0.00
65	11	0	100.00	0.00
70	11	0	100.00	0.00
75	11	0	100.00	0.00
80	11	0	100.00	0.00
85	9	2	81.82	18.18
90	9	2	81.82	18.18
95	10	1	90.91	9.09
100	10	1	90.91	9.09

จากตารางที่ 5.17 สองเฟสลงกราวด์ฟอลต์ นิวโร-ฟิชซีแบบที่หนึ่ง NF1_2PHG ทำงานถูกต้อง 225 ตัวอย่าง หรือ 97.40 เปอร์เซ็นต์ จากจำนวนตัวอย่าง 231 ตัวอย่าง

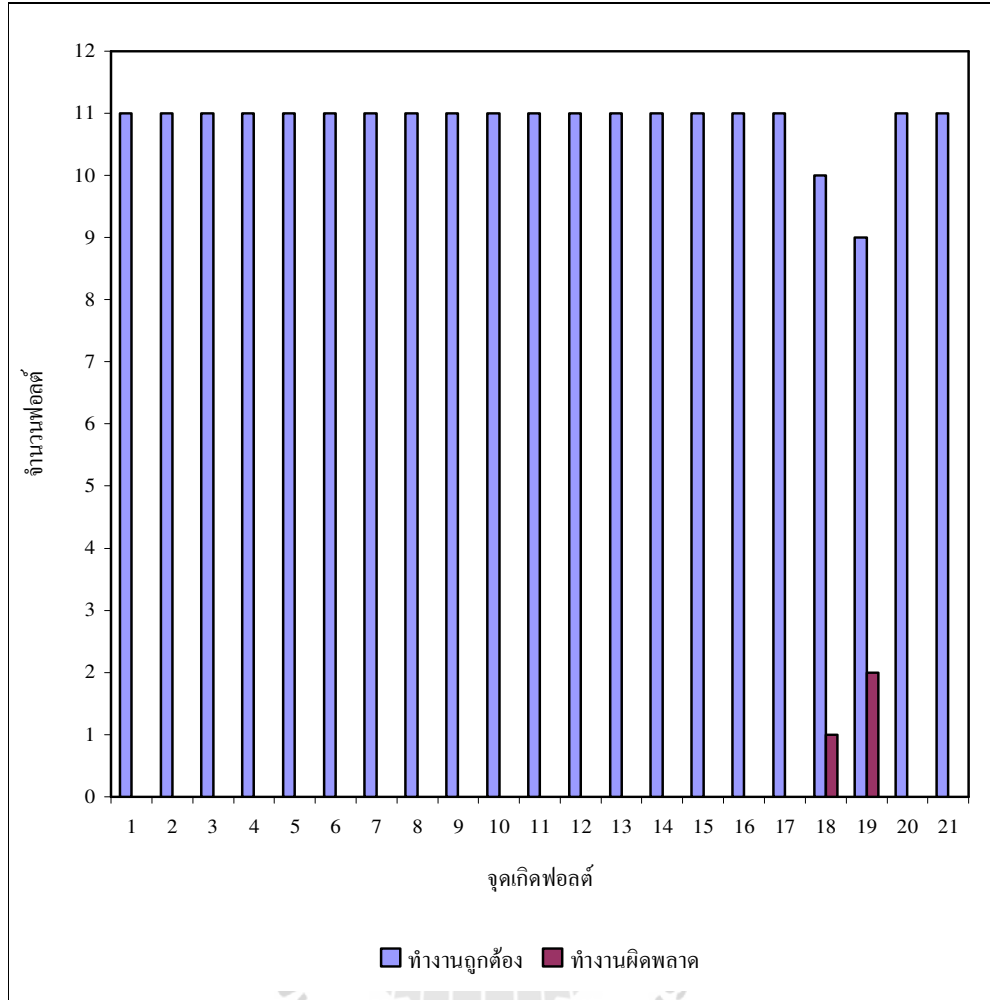


รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบความถูกต้องของการทำงานของ NF1_2PHG ที่จุดเกิดฟอลต์ต่าง ๆ

ตารางที่ 5.18 การทำงานของ NF2_2PHG สำหรับสองเฟสลงกรวด์ฟอลต์

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ผลการทำงาน (จำนวนตัวอย่าง)		ผลการทำงาน (เปอร์เซ็นต์)	
	ถูกต้อง	ผิดพลาด	ถูกต้อง	ผิดพลาด
0	11	0	100.00	0.00
5	11	0	100.00	0.00
10	11	0	100.00	0.00
15	11	0	100.00	0.00
20	11	0	100.00	0.00
25	11	0	100.00	0.00
30	11	0	100.00	0.00
35	11	0	100.00	0.00
40	11	0	100.00	0.00
45	11	0	100.00	0.00
50	11	0	100.00	0.00
55	11	0	100.00	0.00
60	11	0	100.00	0.00
65	11	0	100.00	0.00
70	11	0	100.00	0.00
75	11	0	100.00	0.00
80	11	0	100.00	0.00
85	10	1	90.91	9.09
90	9	2	81.82	18.18
95	11	0	100.00	0.00
100	11	0	100.00	0.00

จากตารางที่ 5.18 สองเฟสลงกรวด์ฟอลต์ นิวโร-พีซซีแบบที่สอง NF2_2PHG ทำงานถูกต้อง 228 ตัวอย่าง หรือ 98.70 เปอร์เซ็นต์ จากจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 231 ตัวอย่าง

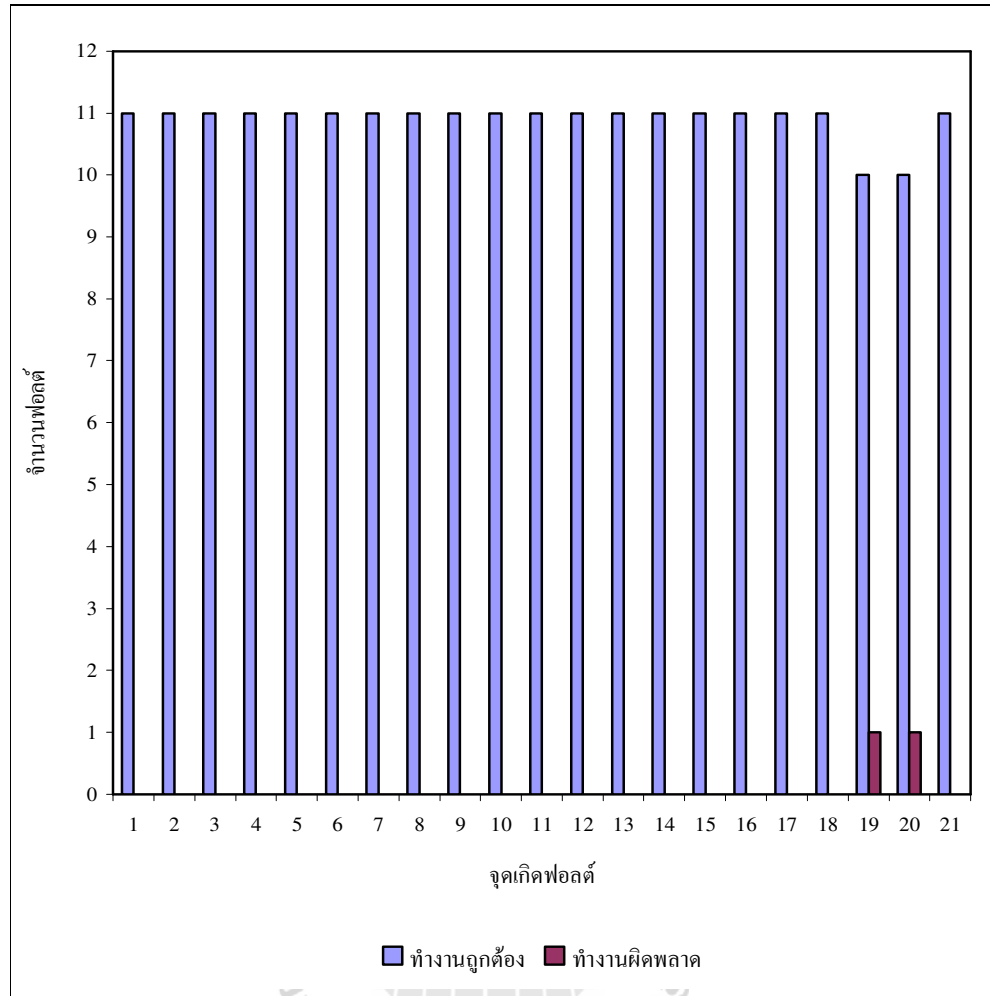


รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบความถูกต้องการทำงานของ NF2_2PHG ที่จุดเกิดฟอลต์ต่าง ๆ

ตารางที่ 5.19 การทำงานของ NF3_2PHG สำหรับสองเฟสลงกรวด์ฟอลต์

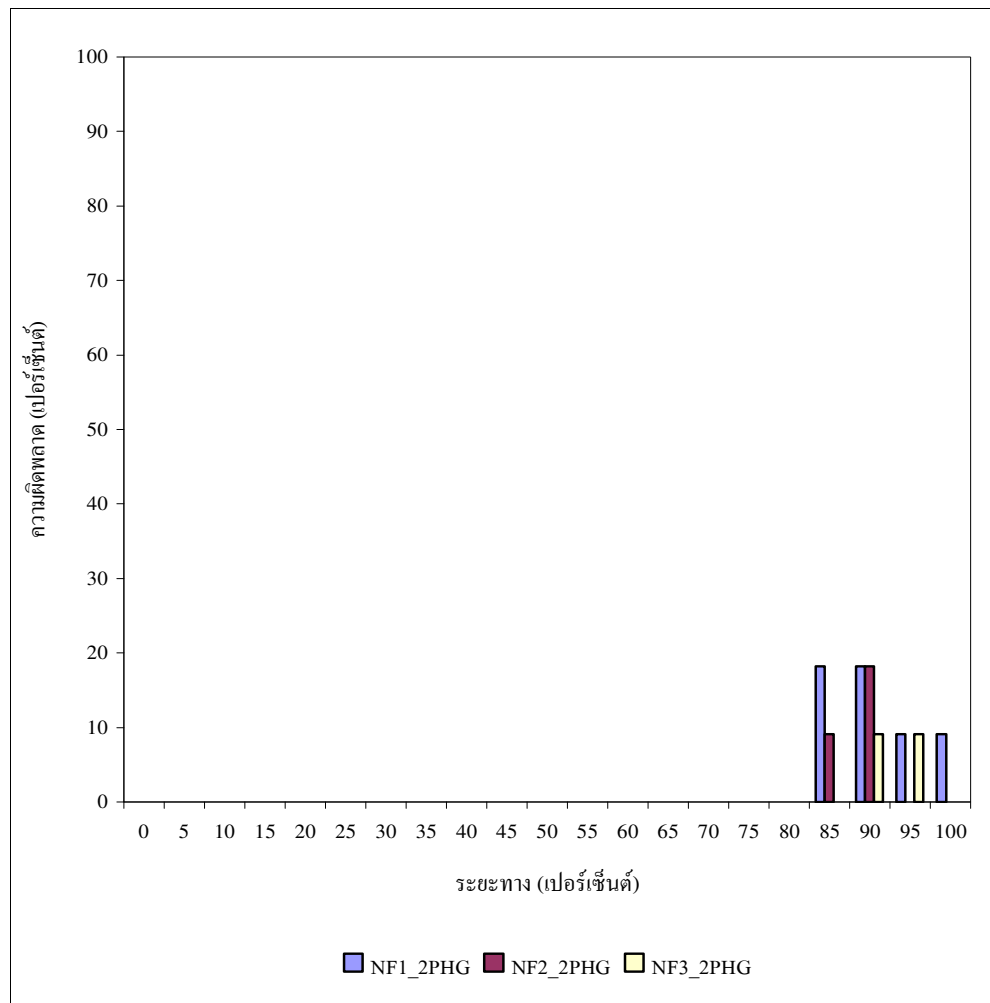
ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ผลการทำงาน (จำนวนตัวอย่าง)		ผลการทำงาน (เปอร์เซ็นต์)	
	ถูกต้อง	ผิดพลาด	ถูกต้อง	ผิดพลาด
0	11	0	100.00	0.00
5	11	0	100.00	0.00
10	11	0	100.00	0.00
15	11	0	100.00	0.00
20	11	0	100.00	0.00
25	11	0	100.00	0.00
30	11	0	100.00	0.00
35	11	0	100.00	0.00
40	11	0	100.00	0.00
45	11	0	100.00	0.00
50	11	0	100.00	0.00
55	11	0	100.00	0.00
60	11	0	100.00	0.00
65	11	0	100.00	0.00
70	11	0	100.00	0.00
75	11	0	100.00	0.00
80	11	0	100.00	0.00
85	11	0	100.00	0.00
90	10	1	90.91	9.09
95	10	1	90.91	9.09
100	11	0	100.00	0.00

จากตารางที่ 5.19 สองเฟสลงกรวด์ฟอลต์ นิวโร-พีซีแบบที่สาม NF3_2PHG ทำงานถูกต้อง 229 ตัวอย่าง หรือ 99.13 เปอร์เซ็นต์ จากจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 231 ตัวอย่าง



รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบความถูกต้องของการทำงานของ NF3_2PHG ที่จุดเกิดฟอลต์ต่าง ๆ

จากผลการจำลองการป้องกันสายส่งไฟฟ้ากรณีการเกิดสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์ ระบบนิวโร-ฟิชชี NF1_2PHG, NF2_2PHG และ NF3_2PHG สามารถนำมาเขียนเป็นกราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ระยะทางต่าง ๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 5.12 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของระบบนิวโร-ฟิชชี NF1_2PHG - NF3_2PHG

จากรูปที่ 5.12 จะเห็นว่าระบบนิวโร-ฟิชชี NF1_2PHG, NF2_2PHG และ NF3_2PHG แต่ละแบบมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ระยะต่าง ๆ ไม่ต่างกันมากนักที่ฐานข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้เดียวกัน

5.2.4 ผลการจำลองการป้องกันสายส่งกรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์

บางส่วนของค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณสำหรับใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบนิวโร-ฟิชชีแสดงดังตารางที่ 5.20 และตารางที่ 5.21

ตารางที่ 5.20 ผลการคำนวณบางส่วนของชุดทดสอบสำหรับระบบนิวโร-ฟิชชี

กรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์ เมื่อ $R_f = 5$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	47.95	98.66	92.88	52.51	2.01	2.01
5	47.10	98.25	93.20	49.43	1.87	1.87
10	54.47	96.36	93.90	31.79	1.07	1.07
15	59.78	95.82	93.93	26.46	0.82	0.82
20	64.13	95.41	93.98	22.64	0.63	0.63
25	67.54	95.13	94.00	19.79	0.48	0.48
30	70.33	94.87	94.02	17.58	0.36	0.36
35	72.57	94.75	93.95	15.81	0.26	0.26
40	74.46	94.58	93.95	14.38	0.17	0.17
45	76.03	94.41	93.79	13.19	0.08	0.08
50	77.37	94.30	93.93	12.20	0.00	0.00
55	78.55	94.23	93.91	11.34	0.08	0.08
60	79.57	94.03	93.95	10.62	0.17	0.17
65	80.45	93.91	93.90	9.99	0.26	0.26
70	81.22	93.88	93.77	9.44	0.36	0.36
75	81.93	93.71	93.72	8.97	0.48	0.48
80	82.57	93.48	93.68	8.56	0.63	0.63
85	83.19	93.21	93.69	8.21	0.82	0.82
90	83.82	92.84	93.79	7.92	1.07	1.07
95	84.53	92.42	93.80	7.67	1.43	1.43
100	85.53	91.55	94.03	7.46	2.02	2.02

ตารางที่ 5.21 ผลการคำนวณบางส่วนของชุดทดสอบสำหรับระบบนิวโร-ฟิชซี
กรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์ เมื่อ $R_f = 10$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	69.77	97.36	92.20	38.20	1.46	1.46
5	68.55	97.31	92.43	36.65	1.39	1.39
10	66.99	96.10	93.27	26.48	0.89	0.89
15	68.81	95.68	93.56	22.75	0.70	0.70
20	70.87	95.36	93.64	19.88	0.55	0.55
25	72.86	95.12	93.70	17.62	0.43	0.43
30	74.63	94.91	93.74	15.80	0.33	0.33
35	76.20	94.74	93.71	14.31	0.24	0.24
40	77.62	94.52	93.85	13.09	0.15	0.15
45	78.83	94.43	93.82	12.03	0.08	0.08
50	79.94	94.31	93.81	11.13	0.00	0.00
55	80.94	94.13	93.87	10.35	0.08	0.08
60	81.86	93.98	93.88	9.66	0.15	0.15
65	82.70	93.87	93.93	9.05	0.24	0.24
70	83.49	93.73	93.93	8.50	0.33	0.33
75	84.25	93.57	93.93	8.00	0.43	0.43
80	84.98	93.46	93.81	7.52	0.55	0.55
85	85.85	93.16	94.00	7.06	0.70	0.70
90	86.75	92.97	94.00	6.59	0.89	0.89
95	87.87	92.54	94.25	6.07	1.13	1.13
100	89.35	92.02	94.58	5.41	1.46	1.46

สำหรับผลเอาต์พุตบางส่วนที่ได้จากการจำลองการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโดยระบบนิเวโร-พีชชีสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.22

ตารางที่ 5.22 ผลเอาต์พุตบางส่วนของระบบนิเวโร-พีชชีในการทดสอบด้วยชุดทดสอบกรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์

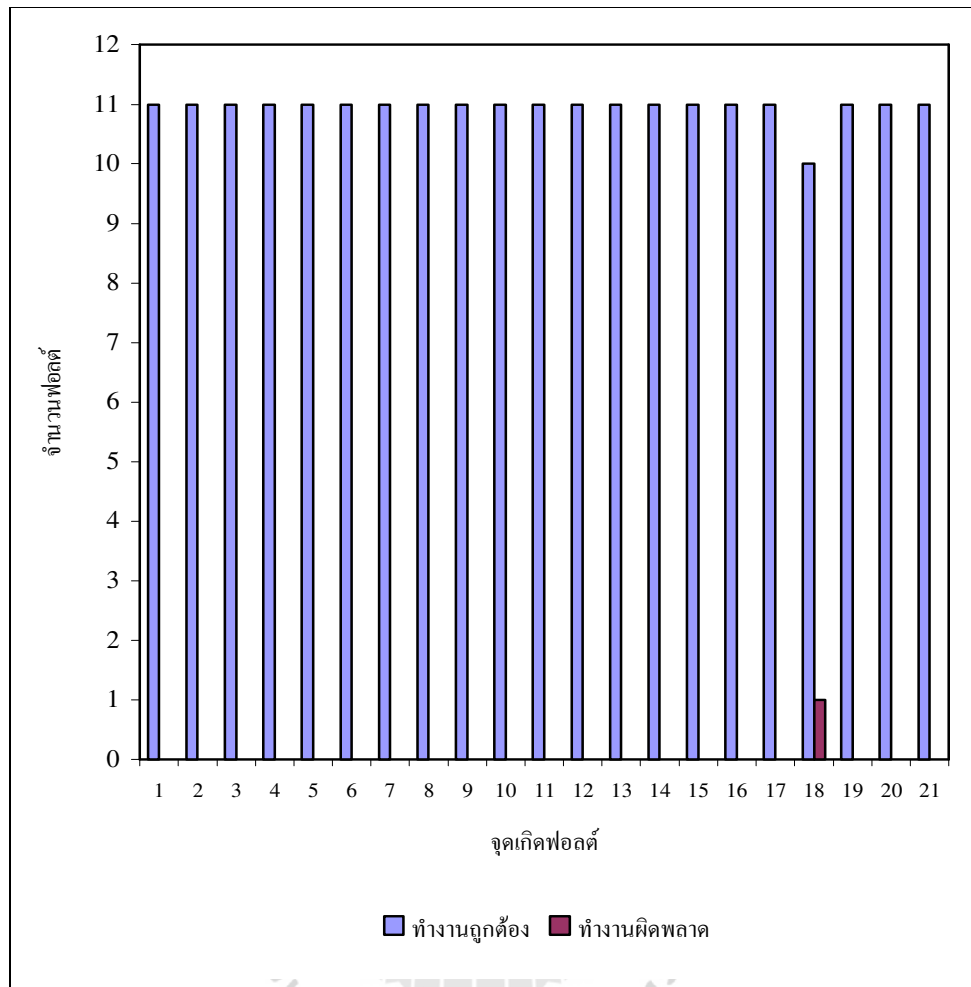
Distance	Desire-Trip	NF1_SLG	NF2_SLG	NF3_SLG
0	1	1	1	1
5	1	1	1	1
10	1	1	1	1
15	1	1	1	1
20	1	1	1	1
25	1	1	1	1
30	1	1	1	1
35	1	1	1	1
40	1	1	1	1
45	1	1	1	1
50	1	1	1	1
55	1	1	1	1
60	1	1	1	1
65	1	1	1	1
70	1	1	1	1
75	1	1	0	1
80	1	1	0	1
85	1	0	0	1
90	0	0	0	0
95	0	0	0	0
100	0	0	0	0

สำหรับในส่วนนี้เป็นการแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของระบบนิเวศ-พืชซีในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าเมื่อเกิดสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์

ตารางที่ 5.23 การทำงานของ NF1_SLG สำหรับเฟสลงกราวด์ฟอลต์

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ผลการทำงาน (จำนวนตัวอย่าง)		ผลการทำงาน (เปอร์เซ็นต์)	
	ถูกต้อง	ผิดพลาด	ถูกต้อง	ผิดพลาด
0	11.00	0.00	100.00	0.00
5	10.00	1.00	90.91	9.09
10	11.00	0.00	100.00	0.00
15	11.00	0.00	100.00	0.00
20	11.00	0.00	100.00	0.00
25	11.00	0.00	100.00	0.00
30	11.00	0.00	100.00	0.00
35	11.00	0.00	100.00	0.00
40	11.00	0.00	100.00	0.00
45	11.00	0.00	100.00	0.00
50	11.00	0.00	100.00	0.00
55	11.00	0.00	100.00	0.00
60	11.00	0.00	100.00	0.00
65	11.00	0.00	100.00	0.00
70	11.00	0.00	100.00	0.00
75	11.00	0.00	100.00	0.00
80	11.00	0.00	100.00	0.00
85	9.00	2.00	81.82	18.18
90	3.00	8.00	27.27	72.73
95	6.00	5.00	54.55	45.45
100	7.00	4.00	63.64	36.36

จากตารางที่ 5.23 สองเฟสลงกราวด์ฟอลต์ นิเวศ-พืชซีแบบที่สาม NF1_SLG ทำงานได้ถูกต้อง 211 ตัวอย่าง หรือ 91.34 เปอร์เซ็นต์ จากจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 231 ตัวอย่าง

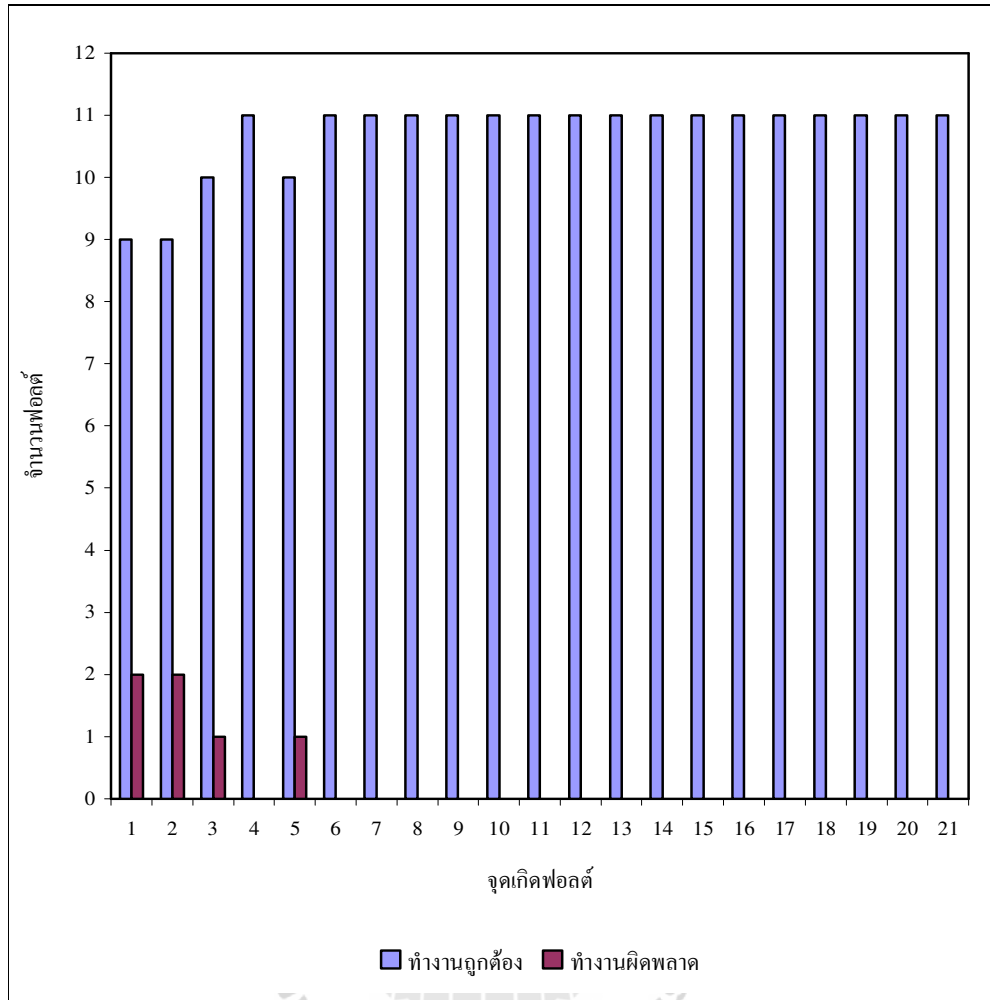


รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบความถูกต้องการทำงานของ NF1_SLG ที่จุดเกิดฟอลต์ต่าง ๆ

ตารางที่ 5.24 การทำงานของ NF2_SLG สำหรับเฟสลงกราวด์ฟอลต์

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ผลการทำงาน (จำนวนตัวอย่าง)		ผลการทำงาน (เปอร์เซ็นต์)	
	ถูกต้อง	ผิดพลาด	ถูกต้อง	ผิดพลาด
0	11.00	0.00	100.00	0.00
5	11.00	0.00	100.00	0.00
10	10.00	1.00	90.91	9.09
15	10.00	1.00	90.91	9.09
20	10.00	1.00	90.91	9.09
25	10.00	1.00	90.91	9.09
30	10.00	1.00	90.91	9.09
35	10.00	1.00	90.91	9.09
40	10.00	1.00	90.91	9.09
45	10.00	1.00	90.91	9.09
50	10.00	1.00	90.91	9.09
55	10.00	1.00	90.91	9.09
60	10.00	1.00	90.91	9.09
65	10.00	1.00	90.91	9.09
70	10.00	1.00	90.91	9.09
75	10.00	1.00	90.91	9.09
80	8.00	3.00	72.73	27.27
85	5.00	6.00	45.45	54.55
90	5.00	6.00	45.45	54.55
95	5.00	6.00	45.45	54.55
100	7.00	4.00	63.64	36.36

จากตารางที่ 5.24 เฟสลงกราวด์ฟอลต์ นิวโร-พีชชีแบบที่สาม NF2_SLG ทำงานได้
ถูกต้อง 198 ตัวอย่าง หรือ 83.12 เปอร์เซ็นต์ จากจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 231 ตัวอย่าง

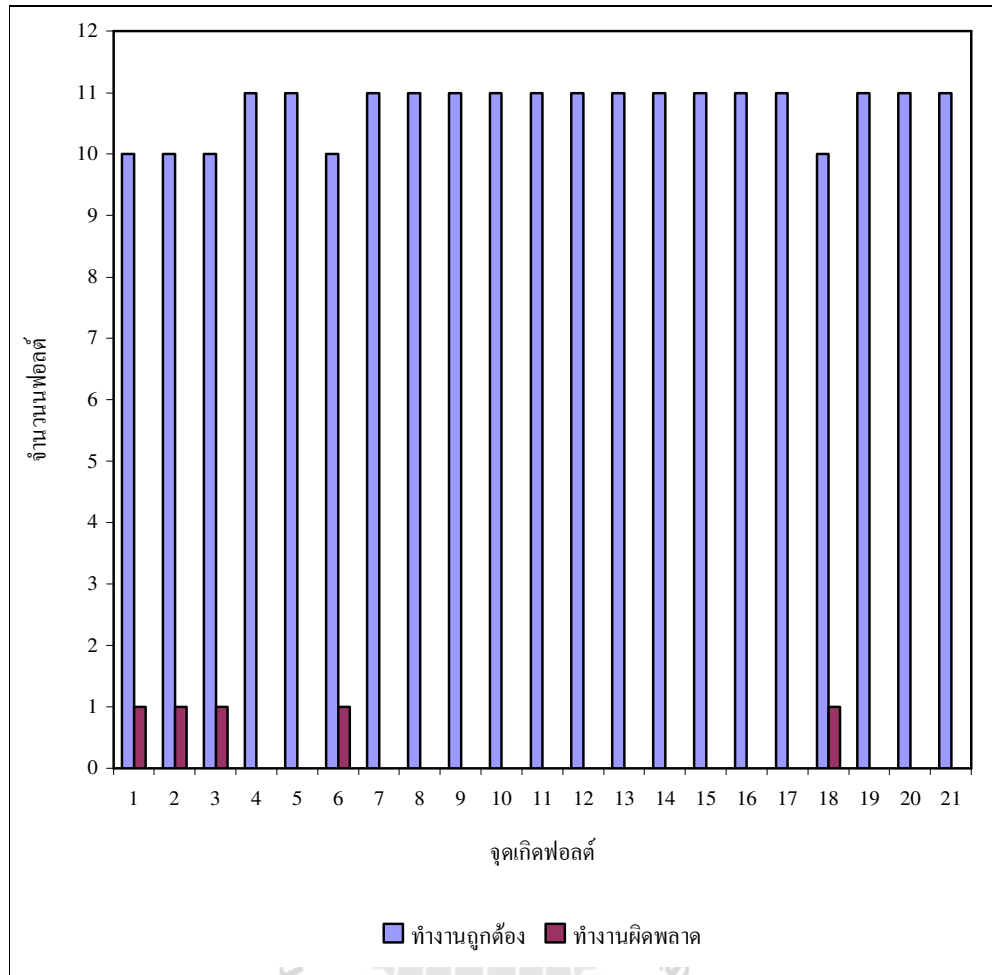


รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบความถูกต้องของการทำงานของ NF2_SLG ที่จุดเกิดฟอลต์ต่างๆ

ตารางที่ 5.25 การทำงานของ NF3_SLG สำหรับเฟสลงกราวด์ฟอลต์

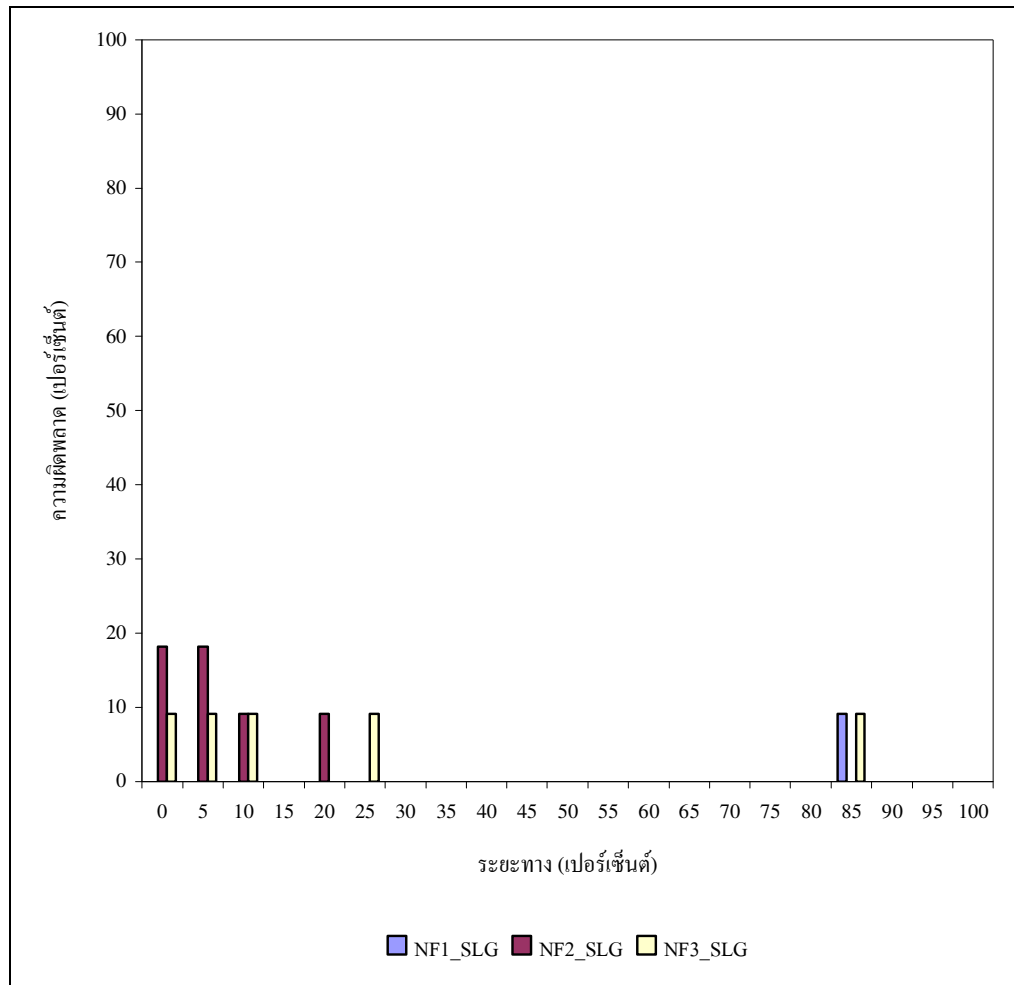
ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ผลการทำงาน (จำนวนตัวอย่าง)		ผลการทำงาน (เปอร์เซ็นต์)	
	ถูกต้อง	ผิดพลาด	ถูกต้อง	ผิดพลาด
0	10.00	1.00	90.91	9.09
5	11.00	0.00	100.00	0.00
10	10.00	1.00	90.91	9.09
15	11.00	0.00	100.00	0.00
20	11.00	0.00	100.00	0.00
25	11.00	0.00	100.00	0.00
30	11.00	0.00	100.00	0.00
35	11.00	0.00	100.00	0.00
40	11.00	0.00	100.00	0.00
45	11.00	0.00	100.00	0.00
50	11.00	0.00	100.00	0.00
55	11.00	0.00	100.00	0.00
60	11.00	0.00	100.00	0.00
65	11.00	0.00	100.00	0.00
70	11.00	0.00	100.00	0.00
75	11.00	0.00	100.00	0.00
80	11.00	0.00	100.00	0.00
85	11.00	0.00	100.00	0.00
90	11.00	0.00	100.00	0.00
95	11.00	0.00	100.00	0.00
100	11.00	0.00	100.00	0.00

จากตารางที่ 5.25 เฟสลงกราวด์ฟอลต์ นิวโร-พีชชีแบบที่สาม NF3_SLG ทำงานได้
ถูกต้อง 229 ตัวอย่าง หรือ 99.19 เปอร์เซ็นต์ จากจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 231 ตัวอย่าง



รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบความถูกต้องของการทำงานของ NF3_SLG ที่จุดเกิดฟอลต์ต่างๆ

จากผลการจำลอง NF1_SLG, NF2_SLG และ NF3_SLG สามารถนำมาเขียนเป็นกราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ระยะทางต่าง ๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 5.16 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของระบบนิวโร-ฟuzzy
NF1_SLG - NF3_SLG

จากรูปที่ 5.16 จะเห็นว่าระบบนิวโร-ฟuzzy NF1_SLG, NF2_SLG และ NF3_SLG แต่ละแบบมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ระยะต่าง ๆ ไม่ต่างกันมากนักที่ฐานข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้เดียวกัน

5.3 สรุป

การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบนิวโร-ฟิชซีว่ามีประสิทธิภาพเพียงใดการที่จะทดสอบทำโดยการใช้ชุดข้อมูลที่สร้างขึ้นมาเพื่อทดสอบโดยเฉพาะ ข้อมูลทดสอบที่ใช้ต้องไม่ซ้ำกับข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้ของระบบนิวโร-ฟิชซี จากการจำลองระบบนิวโร-ฟิชซีแต่ละแบบมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ระยะต่าง ๆ ไม่แตกต่างกันมากนักที่ฐานข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้เดียวกัน จากการทดสอบนิวโร-ฟิชซีสามารถทำการป้องกันสายส่งไฟฟ้าได้ดังนี้

- การป้องกันสายส่งไฟฟ้ากรณีเกิดสามเฟสฟอลต์ สามเฟสฟอลต์นิวโร-ฟิชซีแบบที่หนึ่ง NF1_3PH ทำงานถูกต้อง 97.40 เปอร์เซ็นต์ สามเฟสฟอลต์นิวโร-ฟิชซีแบบที่สอง NF2_3PH ทำงานถูกต้อง 96.97 เปอร์เซ็นต์ และสามเฟสฟอลต์นิวโร-ฟิชซีแบบที่สาม NF3_3PH ทำงานถูกต้อง 98.70 เปอร์เซ็นต์

- การป้องกันสายส่งไฟฟ้ากรณีเกิดสองเฟสฟอลต์ สองเฟสฟอลต์นิวโร-ฟิชซีแบบที่หนึ่ง NF1_2PH ทำงานถูกต้อง 98.70 เปอร์เซ็นต์ สองเฟสฟอลต์นิวโร-ฟิชซีแบบที่สอง NF2_2PH ทำงานถูกต้อง 92.64 เปอร์เซ็นต์ และสองเฟสฟอลต์นิวโร-ฟิชซีแบบที่สาม NF3_2PH ทำงานถูกต้อง 91.77 เปอร์เซ็นต์

- การป้องกันสายส่งไฟฟ้ากรณีเกิดสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์ สองเฟสลงกราวด์ฟอลต์นิวโร-ฟิชซีแบบที่หนึ่ง NF1_2PHG ทำงานถูกต้อง 97.40 เปอร์เซ็นต์ สองเฟสลงกราวด์ฟอลต์นิวโร-ฟิชซีแบบที่สอง NF2_2PHG ทำงานถูกต้อง 98.70 เปอร์เซ็นต์ และสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์นิวโร-ฟิชซีแบบที่สาม NF3_2PHG ทำงานถูกต้อง 99.13 เปอร์เซ็นต์

- การป้องกันสายส่งไฟฟ้ากรณีเกิดเฟสลงกราวด์ฟอลต์ เฟสลงกราวด์ฟอลต์นิวโร-ฟิชซีแบบที่หนึ่ง NF1_SLG ทำงานถูกต้อง 91.34 เปอร์เซ็นต์ เฟสลงกราวด์ฟอลต์นิวโร-ฟิชซีแบบที่สอง NF2_SLG ทำงานถูกต้อง 83.12 เปอร์เซ็นต์ และเฟสลงกราวด์ฟอลต์นิวโร-ฟิชซีแบบที่สาม NF3_SLG ทำงานถูกต้อง 99.13 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

จากผลการจำลองที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่าระบบนิวโร-ฟิชชีสามารถทำหน้าที่เป็นรีเลย์แบบหนึ่งและมีประสิทธิภาพแม้ยังถูกต้องที่ดีทำหน้าที่ในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าได้โดยสรุปได้ดังนี้

- การป้องกันสายส่งไฟฟ้ากรณีเกิดสามเฟสฟอลต์ สามเฟสฟอลต์นิวโร-ฟิชชีแบบที่หนึ่ง NF1_3PH มีอินพุต $\text{Input} = [V_A \ I_A \ V_A./I_A]$ ทำงานถูกต้อง 97.40 เปอร์เซ็นต์ สามเฟสฟอลต์นิวโร-ฟิชชีแบบที่สอง NF2_3PH มีอินพุต $\text{Input} = [V_A \ V_B \ V_C \ V_A./I_A]$ ทำงานถูกต้องในการป้องกันสายส่งไฟฟ้า 96.97 เปอร์เซ็นต์ สามเฟสฟอลต์นิวโร-ฟิชชีแบบที่สาม NF3_3PH มีอินพุต $\text{Input} = [V_A \ I_A \ I_B \ I_C]$ ทำงานถูกต้อง 98.70 เปอร์เซ็นต์

- การป้องกันสายส่งไฟฟ้ากรณีเกิดสองเฟสฟอลต์ สองเฟสฟอลต์นิวโร-ฟิชชีแบบที่หนึ่ง NF1_2PH มีอินพุต $\text{Input} = [V_B \ I_B \ V_B./I_B]$ ทำงานถูกต้อง 98.70 เปอร์เซ็นต์ สองเฟสฟอลต์นิวโร-ฟิชชีแบบที่สอง NF2_2PH มีอินพุต $\text{Input} = [I_A \ I_B \ I_C \ V_A./I_A]$ ทำงานถูกต้องในการป้องกันสายส่งไฟฟ้า 92.64 เปอร์เซ็นต์ และสองเฟสฟอลต์นิวโร-ฟิชชีแบบที่สาม NF3_2PH มีอินพุต $\text{Input} = [V_A \ I_A \ I_B \ I_C]$ ทำงานถูกต้อง 91.77 เปอร์เซ็นต์

- การป้องกันสายส่งไฟฟ้ากรณีเกิดสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์ สองเฟสลงกราวด์ฟอลต์นิวโร-ฟิชชีแบบที่หนึ่ง NF1_2PHG มีอินพุต $\text{Input} = [V_A \ V_B \ V_C \ V_A./I_A]$ ทำงานถูกต้อง 97.40 เปอร์เซ็นต์ สองเฟสลงกราวด์ฟอลต์นิวโร-ฟิชชีแบบที่สอง NF2_2PHG มีอินพุต $\text{Input} = [I_A \ I_B \ I_C \ V_A./I_A]$ ทำงานถูกต้อง 98.70 เปอร์เซ็นต์ และสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์นิวโร-ฟิชชีแบบที่สาม NF3_2PHG มีอินพุต $\text{Input} = [V_A \ I_A \ I_B \ I_C]$ ทำงานถูกต้อง 99.13 เปอร์เซ็นต์

- การป้องกันสายส่งไฟฟ้ากรณีเกิดเฟสลงกราวด์ฟอลต์ เฟสลงกราวด์ฟอลต์นิวโร-ฟิชชีแบบที่หนึ่ง NF1_SLG มีอินพุต $\text{Input} = [V_A \ I_A \ V_A./I_A]$ ทำงานถูกต้อง 91.34 เปอร์เซ็นต์ เฟสลงกราวด์ฟอลต์นิวโร-ฟิชชีแบบที่สอง NF2_SLG มีอินพุต $\text{Input} = [V_A \ I_A \ \cos(\theta_v - \theta_i)]$ ทำงานถูกต้อง 83.12 เปอร์เซ็นต์ และเฟสลงกราวด์ฟอลต์นิวโร-ฟิชชีแบบที่สาม NF3_SLG มีอินพุต $\text{Input} = [V_A \ I_A \ I_B \ I_C]$ ทำงานถูกต้อง 99.13 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นจากผลการจำลองที่ผ่านมาสามารถเลือกโมดูลระบบนิวโร-ฟิชชีที่ใช้ในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าได้ดังนี้

- การป้องกันสายส่งไฟฟ้ากรณีเกิดสามเฟสฟอลต์เลือกโมดูลสามเฟสฟอลต์ นิวโร-ฟิชชีแบบที่สาม NF3_3PH การป้องกันสายส่งไฟฟ้ากรณีเกิดสองเฟสฟอลต์เลือกโมดูลสองเฟสฟอลต์ นิวโร-ฟิชชีแบบที่หนึ่ง NF1_2PH การป้องกันสายส่งไฟฟ้ากรณีเกิดสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์เลือกโมดูลสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์นิวโร-ฟิชชีแบบที่สาม NF3_2PHG และการป้องกันสายส่งไฟฟ้ากรณีเกิดเฟสลงกราวด์ฟอลต์เลือกโมดูลเฟสลงกราวด์ฟอลต์นิวโร-ฟิชชีแบบที่สาม NF3_SLHG

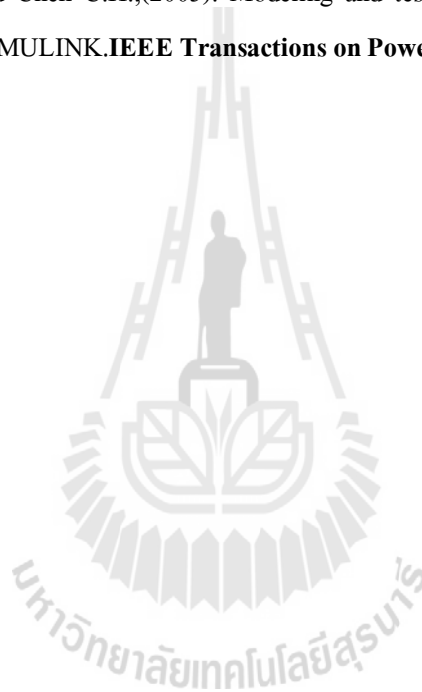
6.2 ข้อเสนอแนะ

ระบบนิวโร-ฟิชชีมีความสามารถในการตัดสินใจฟอลต์ที่เกิดขึ้นได้ดี แต่ก็ยังไม่สามารถป้องกันระบบไฟฟ้าได้สมบูรณ์ ความสามารถหรือประสิทธิภาพของระบบนิวโร-ฟิชชีขึ้นอยู่กับฐานข้อมูลที่ใช้สำหรับการเรียนรู้ระบบว่ามีครบถ้วนมากน้อยเพียงใด ในกรณีที่มีฐานข้อมูลมากและมีลักษณะเด่นนั้นจะทำให้ระบบนิวโร-ฟิชชีทำงานมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น แต่ถ้าใช้ฐานข้อมูลที่มีจำนวนมากเกินไปก็อาจทำให้ใช้เวลาในการเรียนรู้ของระบบนิวโร-ฟิชชีให้เพิ่มยาวนานขึ้น ระบบนิวโร-ฟิชชีใช้ได้เฉพาะงานหรือกรณีที่ระบบนิวโร-ฟิชชีได้เรียนรู้เท่านั้น ยังไม่สามารถนำไปใช้กับงานหรือกรณีอื่นได้โดยไม่ต้องเรียนรู้ใหม่ได้ หมายความว่าระบบนิวโร-ฟิชชีหนึ่งจะใช้ได้กับงานได้มากแค่ไหนขึ้นกับการเรียนรู้ ดังนั้นเมื่อต้องการนำระบบนิวโร-ฟิชชีไปป้องกันสายส่งไฟฟ้ากำลังอีกระบบหนึ่ง ต้องทำการเรียนรู้ระบบใหม่ทั้งหมด ด้วยเหตุผลนี้ระบบนิวโร-ฟิชชียังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายในการป้องกันระบบไฟฟ้า

รายการอ้างอิง

- ชวลิต คำรงค์รัตน์ (2547). เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชา การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง. สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา.
- ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ (2551). การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: จี.บี.พี เซ็นเตอร์ จำกัด.
- ชนัดชัย กุลสุวรรณิชพงษ์ (2551). เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชา รีเลย์และการป้องกัน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- อาทิตย์ ศรีแก้ว (2552). ปัญญาเชิงคำนวณ. พิมพ์ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Anderson P.M. (1999). **Power system protection**. McGraw-Hill.
- Coury, D. V. and Jorge, D. C., (1998). Artificial neural network approach to distance protection of transmission lines. 13(1). **IEEE Transactions on Power Delivery** :102-108.
- Fausett, L. (1994). **Fundamentals of neural networks architectures, algorithms, and application**. New Jersey : Prentice Hall.
- Saadat.H (2004). **Power system analysis 2rd**. McGraw-Hill.
- Jang, J.S.R. (1996). Input Selection for ANFIS Learning. **Proceedings of the Fifth IEEE International Conference**. New Orleans, LA, September. 8-16 :1493 - 1499.
- Jang, J.S.R. (1993). ANFIS : Adaptive - Network - Based Fuzzy Inference System. **IEEE Transactions on System. Man and Cybernetics**. 23(3) : 665-685.
- Martin T., Howard B. Demuth, M. (1996). **Neural Network Design**, Oklahoma State University
- Negnevitsky, M. (2002). **A guide to intelligent systems**. Addison-Wesley.
- Part-Enander, E. and Sjoberg, A. (1999). **The MATLAB 5 handbook**. England: Addison-Wesley.
- Qi, W., Swift, G.W., McLaren, P.G., Castro, A.V. (1996). An artificial neural network application to distance protection. **Intelligent Systems Applications to Power Systems. International Conference**. Orlando, FL 28, January -2 February : 226-230.
- Saichoomdee, S., Oonsivilai, A., Marungsri, B., Kulworawanichpong, T. and Pao-La-Or, P. (2009). Distance Transmission Lines Protection Based on Recurrent Neural Network **STISWB**. : 266 - 269.

- Oonsivilai, A. and Saichoomdee, S.,(2009). Appliaance of Recurrent Neural Network toward Distance Transmission Lines Protection.**TENCON 2009 IEEE Region 10 Conference**. 23-26 January, Singapore :1-4.
- Oonsivilai, A., Saichoomdee, S., (2009).Distance Transmission Lines Protection Based on Radial Basis Function Neural Network **WASET**. 13(60) : 81-84.
- Warwick, K., Ekwue, A. and Aggarwal, R. (1997). **Artificial intelligence techniques in power System**. London : Institution of Electrical Engineers.
- Wu, L.C., Liu, C.W. and Chen C.H.,(2005). Modeling and testing of a digital distance relay using MATLAB/SIMULINK.**IEEE Transactions on Power Delivery** : 253 - 259.





ภาคผนวก ก

ชุดข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้ของระบบนิเวศ-พืช

ตารางที่ ก.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสามเฟสโหลดเมื่อ $R_f = 2$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	24.11	24.25	24.11	63.58	63.51	63.74
5	24.50	24.50	24.57	61.05	61.00	61.29
10	36.19	36.22	36.26	45.14	45.10	45.38
15	42.60	42.65	42.68	39.42	39.37	39.64
20	47.96	47.98	48.02	34.97	34.93	35.17
25	52.37	52.42	52.45	31.43	31.37	31.61
30	56.07	56.06	56.18	28.54	28.48	28.66
35	59.20	59.18	59.30	26.12	26.06	26.23
40	61.87	61.84	61.98	24.07	24.02	24.17
45	64.18	64.15	64.28	22.31	22.27	22.41
50	66.20	66.17	66.29	20.78	20.75	20.88
55	67.97	67.99	68.03	19.44	19.41	19.54
60	69.56	69.56	69.61	18.26	18.23	18.35
65	70.99	70.93	71.09	17.22	17.19	17.27
70	72.28	72.22	72.38	16.27	16.24	16.31
75	73.47	73.40	73.56	15.41	15.39	15.44
80	74.57	74.53	74.64	14.61	14.60	14.64
85	75.60	75.55	75.69	13.89	13.87	13.90
90	76.61	76.55	76.67	13.20	13.19	13.20
95	77.60	77.57	77.66	12.55	12.55	12.53
100	78.65	78.58	78.73	11.92	11.91	11.87

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสามเฟสโหลดเมื่อ $R_f = 7$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	60.85	60.75	60.76	45.76	45.70	45.73
5	60.35	60.30	60.31	44.51	44.48	44.50
10	60.12	60.11	60.12	35.53	35.53	35.55
15	61.61	61.47	61.58	31.87	31.82	31.82
20	63.33	63.32	63.34	28.78	28.77	28.79
25	65.24	65.09	65.24	26.25	26.20	26.20
30	67.00	67.00	67.02	24.03	24.03	24.04
35	68.74	68.69	68.77	22.16	22.15	22.15
40	70.36	70.29	70.39	20.53	20.51	20.51
45	71.88	71.78	71.91	19.09	19.06	19.06
50	73.29	73.20	73.32	17.80	17.78	17.77
55	74.60	74.52	74.64	16.64	16.62	16.62
60	75.85	75.76	75.92	15.59	15.56	15.56
65	77.06	76.94	77.11	14.62	14.60	14.59
70	78.20	78.14	78.24	13.71	13.69	13.69
75	79.35	79.25	79.41	12.86	12.84	12.83
80	80.49	80.43	80.53	12.03	12.01	12.00
85	81.67	81.58	81.74	11.22	11.20	11.19
90	82.93	82.81	83.00	10.40	10.37	10.36
95	84.28	84.24	84.30	9.52	9.51	9.50
100	85.85	85.72	85.90	8.58	8.56	8.55

ตารางที่ ก.3 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสามเฟสพอลต์เมื่อ $R_f = 12$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	75.44	75.41	75.43	33.10	33.10	33.11
5	75.11	74.98	75.07	32.48	32.43	32.47
10	73.55	73.44	73.54	27.38	27.34	27.37
15	73.66	73.54	73.66	25.06	25.02	25.04
20	74.12	74.07	74.13	23.02	23.00	23.02
25	74.85	74.78	74.83	21.24	21.22	21.22
30	75.65	75.64	75.67	19.65	19.64	19.65
35	76.59	76.48	76.60	18.25	18.23	18.23
40	77.52	77.40	77.55	16.99	16.96	16.96
45	78.47	78.35	78.47	15.83	15.81	15.81
50	79.41	79.29	79.42	14.78	14.76	14.76
55	80.33	80.22	80.38	13.81	13.78	13.78
60	81.26	81.18	81.29	12.89	12.87	12.87
65	82.21	82.08	82.24	12.04	12.01	12.01
70	83.12	83.07	83.15	11.21	11.19	11.19
75	84.09	83.98	84.15	10.41	10.39	10.39
80	85.08	84.96	85.13	9.62	9.60	9.60
85	86.09	85.99	86.15	8.82	8.80	8.80
90	87.16	87.11	87.18	8.00	7.99	7.99
95	88.30	88.21	88.36	7.14	7.12	7.12
100	89.51	89.41	89.58	6.21	6.19	6.19

ตารางที่ ก.4 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสามเฟสพอลต์เมื่อ $R_f = 17$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	82.02	81.83	81.97	25.40	25.35	25.39
5	81.72	81.62	81.71	24.99	24.97	24.99
10	80.45	80.27	80.42	21.73	21.68	21.72
15	80.27	80.17	80.27	20.14	20.12	20.14
20	80.40	80.27	80.40	18.71	18.68	18.70
25	80.69	80.58	80.71	17.41	17.38	17.40
30	81.12	81.03	81.13	16.22	16.20	16.21
35	81.65	81.54	81.67	15.13	15.11	15.12
40	82.20	82.19	82.22	14.12	14.11	14.12
45	82.82	82.82	82.84	13.19	13.18	13.19
50	83.48	83.44	83.52	12.32	12.31	12.32
55	84.17	84.12	84.19	11.50	11.49	11.50
60	84.86	84.81	84.90	10.72	10.71	10.71
65	85.57	85.52	85.62	9.97	9.96	9.96
70	86.34	86.24	86.34	9.24	9.23	9.23
75	87.07	87.04	87.08	8.52	8.52	8.52
80	87.84	87.80	87.87	7.81	7.80	7.80
85	88.66	88.56	88.69	7.09	7.08	7.08
90	89.48	89.43	89.47	6.35	6.34	6.34
95	90.34	90.26	90.35	5.58	5.56	5.56
100	91.19	91.14	91.24	4.76	4.75	4.75

ตารางที่ ก.5 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสามเฟสพอลต์เมื่อ $R_f = 22$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	85.37	85.31	85.37	20.43	20.42	20.44
5	85.21	85.11	85.21	20.16	20.14	20.16
10	84.22	84.18	84.21	17.82	17.81	17.82
15	84.07	83.95	84.08	16.66	16.64	16.66
20	84.07	83.97	84.11	15.58	15.55	15.58
25	84.26	84.11	84.26	14.58	14.55	14.57
30	84.52	84.38	84.51	13.64	13.62	13.63
35	84.86	84.70	84.87	12.78	12.75	12.76
40	85.25	85.14	85.25	11.95	11.93	11.94
45	85.69	85.57	85.72	11.18	11.16	11.17
50	86.15	86.07	86.21	10.45	10.43	10.44
55	86.65	86.65	86.65	9.74	9.74	9.74
60	87.20	87.15	87.21	9.07	9.06	9.06
65	87.77	87.68	87.78	8.42	8.40	8.41
70	88.34	88.23	88.38	7.78	7.76	7.77
75	88.91	88.89	88.91	7.14	7.13	7.13
80	89.53	89.41	89.60	6.51	6.49	6.50
85	90.14	90.06	90.20	5.86	5.85	5.86
90	90.78	90.67	90.86	5.21	5.20	5.20
95	91.42	91.33	91.49	4.53	4.52	4.53
100	92.07	91.96	92.14	3.83	3.82	3.82

ตารางที่ ก.6 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสามเฟสพอลต์เมื่อ $R_f = 27$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	87.36	87.37	87.36	17.04	17.04	17.04
5	87.25	87.24	87.24	16.83	16.83	16.83
10	86.55	86.46	86.57	15.04	15.03	15.05
15	86.39	86.33	86.42	14.13	14.12	14.13
20	86.40	86.29	86.43	13.27	13.26	13.27
25	86.50	86.38	86.53	12.46	12.44	12.46
30	86.67	86.59	86.68	11.70	11.69	11.70
35	86.92	86.79	86.97	10.98	10.96	10.98
40	87.21	87.10	87.26	10.29	10.27	10.29
45	87.53	87.50	87.56	9.63	9.62	9.63
50	87.92	87.81	87.97	9.01	8.99	9.00
55	88.32	88.22	88.36	8.40	8.39	8.39
60	88.74	88.66	88.77	7.81	7.80	7.81
65	89.18	89.07	89.24	7.24	7.22	7.23
70	89.63	89.53	89.71	6.67	6.66	6.66
75	90.11	90.02	90.15	6.11	6.10	6.10
80	90.58	90.55	90.59	5.54	5.54	5.54
85	91.07	91.03	91.11	4.97	4.97	4.97
90	91.57	91.52	91.61	4.40	4.39	4.39
95	92.07	91.95	92.16	3.81	3.80	3.80
100	92.56	92.46	92.64	3.19	3.18	3.19

ตารางที่ ก.7 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสามเฟสพอลต์เมื่อ $R_f = 32$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	88.69	88.61	88.68	14.59	14.59	14.60
5	88.71	88.47	88.69	14.44	14.41	14.44
10	88.11	87.99	88.12	13.00	12.98	12.99
15	87.96	87.83	88.01	12.24	12.22	12.24
20	88.00	87.81	88.01	11.54	11.51	11.53
25	88.02	87.88	88.07	10.86	10.84	10.86
30	88.13	88.08	88.16	10.21	10.20	10.21
35	88.33	88.23	88.38	9.59	9.58	9.59
40	88.56	88.48	88.59	9.00	8.99	9.00
45	88.85	88.73	88.86	8.44	8.42	8.43
50	89.14	89.06	89.14	7.89	7.88	7.88
55	89.44	89.37	89.48	7.35	7.34	7.35
60	89.78	89.72	89.82	6.83	6.83	6.83
65	90.15	90.08	90.18	6.32	6.32	6.32
70	90.52	90.44	90.56	5.82	5.81	5.82
75	90.90	90.82	90.95	5.32	5.31	5.31
80	91.29	91.20	91.36	4.81	4.81	4.81
85	91.69	91.60	91.76	4.31	4.30	4.31
90	92.09	91.98	92.17	3.80	3.79	3.79
95	92.48	92.39	92.56	3.27	3.26	3.27
100	92.86	92.76	92.97	2.74	2.73	2.73

ตารางที่ ก.8 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสามเฟสพอลต์เมื่อ $R_f = 37$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	89.59	89.45	89.66	12.75	12.73	12.76
5	89.48	89.46	89.54	12.61	12.60	12.62
10	89.10	89.05	89.14	11.40	11.40	11.41
15	89.03	88.96	89.04	10.78	10.77	10.78
20	89.03	88.90	89.07	10.18	10.16	10.18
25	89.09	88.95	89.13	9.60	9.58	9.60
30	89.19	89.08	89.22	9.04	9.03	9.04
35	89.34	89.29	89.33	8.50	8.50	8.50
40	89.52	89.42	89.59	7.99	7.97	7.99
45	89.72	89.73	89.73	7.48	7.48	7.48
50	89.97	89.96	89.99	7.00	7.00	7.00
55	90.25	90.16	90.31	6.53	6.52	6.53
60	90.53	90.47	90.58	6.06	6.05	6.06
65	90.83	90.76	90.88	5.60	5.60	5.60
70	91.14	91.06	91.19	5.15	5.14	5.15
75	91.46	91.37	91.52	4.70	4.69	4.70
80	91.78	91.69	91.86	4.25	4.24	4.25
85	92.11	92.01	92.19	3.79	3.79	3.79
90	92.43	92.35	92.52	3.33	3.33	3.33
95	92.76	92.66	92.84	2.87	2.86	2.86
100	93.08	92.97	93.17	2.39	2.38	2.39

ตารางที่ ก.9 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสามเฟสพอลต์เมื่อ $R_f = 42$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	90.24	90.16	90.23	11.31	11.31	11.31
5	90.18	90.13	90.18	11.19	11.19	11.20
10	89.85	89.82	89.89	10.16	10.16	10.17
15	89.81	89.76	89.80	9.62	9.61	9.62
20	89.80	89.77	89.80	9.09	9.09	9.09
25	89.86	89.75	89.90	8.59	8.58	8.59
30	89.93	89.91	89.95	8.10	8.09	8.10
35	90.07	89.98	90.12	7.63	7.62	7.63
40	90.22	90.19	90.24	7.17	7.16	7.17
45	90.42	90.33	90.46	6.72	6.71	6.72
50	90.62	90.53	90.67	6.29	6.28	6.29
55	90.84	90.77	90.89	5.86	5.85	5.86
60	91.08	91.00	91.14	5.44	5.43	5.44
65	91.33	91.26	91.38	5.03	5.02	5.03
70	91.60	91.51	91.66	4.62	4.61	4.62
75	91.87	91.81	91.90	4.21	4.20	4.20
80	92.14	92.04	92.22	3.80	3.79	3.80
85	92.41	92.31	92.50	3.39	3.38	3.38
90	92.69	92.59	92.77	2.97	2.96	2.97
95	92.97	92.86	93.05	2.55	2.54	2.55
100	93.23	93.18	93.25	2.12	2.12	2.12

ตารางที่ ก.10 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสามเฟสพอลต์เมื่อ $R_f = 47$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	90.74	90.59	90.78	10.17	10.15	10.17
5	90.66	90.56	90.77	10.06	10.05	10.07
10	90.44	90.31	90.51	9.16	9.15	9.17
15	90.39	90.34	90.40	8.68	8.67	8.68
20	90.41	90.27	90.45	8.22	8.20	8.22
25	90.43	90.36	90.48	7.77	7.76	7.77
30	90.50	90.48	90.52	7.33	7.33	7.33
35	90.62	90.57	90.65	6.91	6.90	6.91
40	90.76	90.71	90.79	6.49	6.49	6.49
45	90.92	90.84	90.98	6.09	6.08	6.09
50	91.10	90.99	91.18	5.70	5.69	5.70
55	91.28	91.20	91.36	5.31	5.30	5.31
60	91.50	91.42	91.56	4.93	4.92	4.93
65	91.71	91.62	91.79	4.55	4.55	4.55
70	91.93	91.84	92.02	4.18	4.17	4.18
75	92.16	92.07	92.26	3.80	3.80	3.80
80	92.39	92.31	92.50	3.43	3.42	3.43
85	92.63	92.53	92.74	3.06	3.05	3.06
90	92.87	92.78	92.96	2.68	2.67	2.68
95	93.10	93.04	93.18	2.29	2.29	2.29
100	93.32	93.32	93.34	1.90	1.90	1.90

ตารางที่ ก.11 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสพอลต์เมื่อ $R_f = 2$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.68	29.25	29.25	0.00	55.17	55.18
5	93.92	30.91	30.91	0.00	53.02	53.02
10	93.90	45.55	45.55	0.00	39.22	39.23
15	93.85	51.34	51.34	0.00	34.25	34.25
20	93.86	56.00	56.00	0.00	30.42	30.41
25	93.93	59.73	59.73	0.00	27.30	27.30
30	93.92	62.77	62.77	0.00	24.78	24.78
35	93.95	65.27	65.27	0.00	22.69	22.69
40	93.91	67.49	67.49	0.00	20.90	20.90
45	93.92	69.43	69.43	0.00	19.37	19.37
50	93.92	71.02	71.02	0.00	18.04	18.04
55	93.92	72.41	72.41	0.00	16.89	16.88
60	93.90	73.74	73.74	0.00	15.84	15.84
65	93.85	74.73	74.73	0.00	14.95	14.95
70	93.91	75.77	75.77	0.00	14.11	14.11
75	93.89	76.75	76.75	0.00	13.34	13.34
80	93.93	77.43	77.43	0.00	12.69	12.68
85	93.86	78.28	78.28	0.00	12.02	12.02
90	93.91	78.99	78.99	0.00	11.42	11.43
95	93.88	79.51	79.51	0.00	10.87	10.86
100	93.85	80.06	80.06	0.00	10.32	10.29

ตารางที่ ก.12 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสพอลต์เมื่อ $R_f = 7$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.89	41.49	41.49	0.00	39.57	39.57
5	93.91	42.64	42.64	0.00	38.50	38.50
10	93.90	51.98	51.98	0.00	30.74	30.74
15	93.89	56.22	56.22	0.00	27.55	27.55
20	93.90	59.82	59.82	0.00	24.90	24.90
25	93.89	62.84	62.84	0.00	22.69	22.69
30	93.87	65.47	65.47	0.00	20.79	20.79
35	93.93	67.66	67.66	0.00	19.18	19.18
40	93.88	69.58	69.58	0.00	17.77	17.77
45	93.97	71.31	71.31	0.00	16.52	16.52
50	93.88	72.92	72.92	0.00	15.38	15.38
55	93.89	74.25	74.25	0.00	14.39	14.39
60	93.88	75.43	75.43	0.00	13.49	13.49
65	93.88	76.62	76.62	0.00	12.64	12.64
70	93.93	77.74	77.74	0.00	11.85	11.85
75	93.87	78.77	78.77	0.00	11.10	11.10
80	93.89	79.77	79.77	0.00	10.39	10.39
85	93.93	80.73	80.73	0.00	9.69	9.69
90	93.89	81.77	81.77	0.00	8.97	8.97
95	93.89	82.87	82.87	0.00	8.22	8.22
100	93.93	84.15	84.15	0.00	7.39	7.40

ตารางที่ ก.13 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 12$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.96	59.53	59.53	0.01	28.64	28.64
5	93.91	60.03	60.03	0.00	28.14	28.13
10	93.90	63.52	63.52	0.00	23.70	23.70
15	93.90	65.64	65.64	0.00	21.68	21.68
20	93.89	67.68	67.68	0.01	19.92	19.92
25	93.90	69.46	69.46	0.00	18.40	18.40
30	93.90	71.16	71.16	0.00	17.02	17.02
35	93.91	72.72	72.72	0.01	15.80	15.82
40	93.90	74.21	74.21	0.00	14.68	14.68
45	93.85	75.56	75.56	0.00	13.69	13.69
50	93.89	76.78	76.78	0.00	12.77	12.77
55	93.88	77.92	77.92	0.00	11.93	11.93
60	93.88	78.92	78.92	0.00	11.15	11.15
65	93.90	80.00	80.00	0.00	10.40	10.40
70	93.94	80.95	80.95	0.00	9.69	9.69
75	93.85	81.94	81.94	0.00	9.01	9.01
80	93.89	82.94	82.94	0.00	8.32	8.32
85	93.86	83.96	83.96	0.00	7.63	7.63
90	93.90	85.11	85.11	0.00	6.91	6.91
95	93.92	86.22	86.22	0.00	6.16	6.16
100	93.89	87.50	87.50	0.00	5.35	5.35

ตารางที่ ก.14 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 17$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.85	69.30	69.30	0.00	22.00	22.00
5	93.92	69.54	69.54	0.00	21.64	21.64
10	93.92	71.28	71.28	0.00	18.79	18.79
15	93.95	72.46	72.46	0.00	17.42	17.42
20	93.90	73.73	73.73	0.00	16.18	16.18
25	93.88	74.84	74.84	0.00	15.07	15.07
30	93.87	76.02	76.02	0.00	14.03	14.03
35	93.88	77.13	77.13	0.00	13.09	13.09
40	93.92	78.16	78.16	0.00	12.22	12.22
45	93.90	79.21	79.21	0.00	11.41	11.41
50	93.90	80.18	80.18	0.00	10.65	10.65
55	93.91	81.03	81.03	0.00	9.95	9.95
60	93.91	82.01	82.01	0.00	9.27	9.27
65	93.92	82.78	82.78	0.00	8.63	8.63
70	93.91	83.74	83.74	0.00	7.99	7.99
75	93.88	84.67	84.67	0.00	7.37	7.37
80	93.88	85.42	85.42	0.00	6.76	6.76
85	93.93	86.38	86.38	0.00	6.12	6.12
90	93.88	87.29	87.29	0.00	5.49	5.49
95	93.90	88.26	88.26	0.01	4.82	4.82
100	93.85	89.25	89.25	0.00	4.11	4.11

ตารางที่ ก.15 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสพอลต์เมื่อ $R_f = 22$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.91	75.10	75.10	0.00	17.69	17.69
5	93.93	75.07	75.07	0.00	17.45	17.45
10	93.87	76.32	76.32	0.00	15.42	15.42
15	93.90	77.07	77.07	0.00	14.41	14.41
20	93.93	77.89	77.89	0.00	13.47	13.47
25	93.90	78.69	78.69	0.00	12.61	12.61
30	93.90	79.53	79.53	0.00	11.80	11.80
35	93.91	80.32	80.32	0.00	11.05	11.05
40	93.89	81.20	81.20	0.00	10.33	10.33
45	93.91	81.88	81.88	0.00	9.68	9.68
50	93.91	82.75	82.75	0.00	9.03	9.03
55	93.89	83.53	83.53	0.00	8.42	8.42
60	93.89	84.19	84.19	0.00	7.85	7.85
65	93.89	84.95	84.95	0.00	7.28	7.28
70	93.89	85.77	85.77	0.00	6.72	6.72
75	93.89	86.51	86.51	0.00	6.17	6.17
80	93.89	87.28	87.28	0.00	5.62	5.62
85	93.91	88.01	88.01	0.00	5.07	5.07
90	93.91	88.73	88.73	0.00	4.50	4.50
95	93.85	89.51	89.51	0.00	3.92	3.92
100	93.88	90.37	90.37	0.00	3.31	3.31

ตารางที่ ก.16 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสพอลต์เมื่อ $R_f = 27$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.90	78.72	78.72	0.00	14.75	14.75
5	93.93	78.78	78.78	0.00	14.57	14.57
10	93.89	79.60	79.60	0.00	13.02	13.02
15	93.92	80.18	80.18	0.00	12.23	12.23
20	93.88	80.81	80.81	0.00	11.48	11.48
25	93.88	81.36	81.36	0.00	10.79	10.79
30	93.92	82.02	82.02	0.00	10.12	10.12
35	93.89	82.73	82.73	0.00	9.49	9.49
40	93.93	83.30	83.30	0.00	8.90	8.90
45	93.88	84.04	84.04	0.00	8.33	8.33
50	93.93	84.60	84.60	0.00	7.79	7.79
55	93.89	85.30	85.30	0.00	7.26	7.26
60	93.91	85.87	85.87	0.00	6.76	6.76
65	93.88	86.58	86.58	0.00	6.26	6.26
70	93.91	87.21	87.21	0.00	5.76	5.76
75	93.90	87.85	87.85	0.00	5.28	5.28
80	93.90	88.49	88.49	0.00	4.79	4.79
85	93.87	89.09	89.09	0.00	4.30	4.30
90	93.88	89.76	89.76	0.00	3.80	3.80
95	93.91	90.41	90.41	0.00	3.29	3.29
100	93.86	91.21	91.21	0.00	2.76	2.76

ตารางที่ ก.17 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสพอลต์เมื่อ $R_f = 32$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.90	81.22	81.22	0.00	12.63	12.63
5	93.89	81.24	81.24	0.00	12.49	12.49
10	93.88	81.98	81.98	0.00	11.24	11.24
15	93.89	82.32	82.32	0.00	10.60	10.60
20	93.93	82.84	82.84	0.00	9.97	9.97
25	93.91	83.30	83.30	0.00	9.40	9.40
30	93.88	83.86	83.86	0.00	8.84	8.84
35	93.88	84.45	84.45	0.00	8.30	8.30
40	93.94	84.95	84.95	0.00	7.79	7.79
45	93.90	85.57	85.57	0.00	7.29	7.29
50	93.92	86.04	86.04	0.00	6.82	6.82
55	93.88	86.60	86.60	0.00	6.36	6.36
60	93.89	87.16	87.16	0.00	5.91	5.91
65	93.93	87.61	87.61	0.00	5.47	5.47
70	93.90	88.27	88.27	0.00	5.03	5.03
75	93.88	88.80	88.80	0.00	4.60	4.60
80	93.86	89.38	89.38	0.00	4.16	4.16
85	93.88	89.94	89.94	0.00	3.72	3.72
90	93.89	90.49	90.49	0.00	3.28	3.28
95	93.87	91.06	91.06	0.00	2.83	2.83
100	93.87	91.58	91.58	0.00	2.36	2.36

ตารางที่ ก.18 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 37$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.82	82.99	82.99	0.00	11.05	11.05
5	93.89	83.06	83.06	0.00	10.92	10.92
10	93.90	83.58	83.58	0.00	9.88	9.88
15	93.92	83.95	83.95	0.00	9.33	9.33
20	93.90	84.39	84.39	0.00	8.81	8.81
25	93.94	84.82	84.82	0.00	8.30	8.30
30	93.90	85.21	85.21	0.00	7.83	7.83
35	93.89	85.78	85.78	0.00	7.36	7.36
40	93.92	86.13	86.13	0.00	6.91	6.91
45	93.91	86.70	86.70	0.00	6.47	6.47
50	93.88	87.17	87.17	0.00	6.06	6.06
55	93.91	87.54	87.54	0.00	5.65	5.65
60	93.89	88.11	88.11	0.00	5.24	5.24
65	93.90	88.56	88.56	0.00	4.85	4.85
70	93.91	89.07	89.07	0.00	4.45	4.45
75	93.94	89.52	89.52	0.00	4.06	4.06
80	93.90	90.02	90.02	0.00	3.67	3.67
85	93.90	90.50	90.50	0.00	3.28	3.28
90	93.92	90.90	90.90	0.00	2.88	2.88
95	93.87	91.39	91.39	0.00	2.48	2.48
100	93.93	91.96	91.96	0.00	2.06	2.06

ตารางที่ ก.19 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 42$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.92	84.32	84.32	0.00	9.80	9.80
5	93.89	84.37	84.37	0.00	9.70	9.70
10	93.89	84.87	84.87	0.00	8.80	8.80
15	93.90	85.28	85.28	0.00	8.32	8.32
20	93.88	85.65	85.65	0.00	7.87	7.87
25	93.93	85.91	85.91	0.00	7.43	7.43
30	93.89	86.39	86.39	0.00	7.01	7.01
35	93.91	86.76	86.76	0.00	6.60	6.60
40	93.89	87.17	87.17	0.00	6.20	6.20
45	93.90	87.54	87.54	0.00	5.82	5.82
50	93.90	88.00	88.00	0.00	5.44	5.44
55	93.90	88.34	88.34	0.00	5.07	5.07
60	93.92	88.75	88.75	0.00	4.71	4.71
65	93.90	89.26	89.26	0.00	4.35	4.35
70	93.90	89.64	89.64	0.00	3.99	3.99
75	93.90	90.11	90.11	0.00	3.64	3.64
80	93.89	90.43	90.43	0.00	3.29	3.29
85	93.89	90.98	90.98	0.00	2.93	2.93
90	93.86	91.34	91.34	0.00	2.57	2.57
95	93.87	91.75	91.75	0.00	2.20	2.20
100	93.91	92.18	92.18	0.00	1.83	1.83

ตารางที่ ก.20 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 47$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.90	85.44	85.44	0.00	8.81	8.81
5	93.92	85.46	85.46	0.00	8.71	8.71
10	93.87	85.88	85.88	0.00	7.94	7.94
15	93.87	86.28	86.28	0.00	7.52	7.51
20	93.90	86.49	86.49	0.00	7.11	7.11
25	93.89	86.82	86.82	0.00	6.73	6.73
30	93.92	87.14	87.14	0.00	6.35	6.35
35	93.88	87.49	87.49	0.00	5.98	5.98
40	93.90	87.94	87.94	0.00	5.62	5.62
45	93.88	88.32	88.32	0.00	5.27	5.27
50	93.91	88.56	88.56	0.00	4.93	4.93
55	93.88	89.03	89.03	0.00	4.60	4.60
60	93.95	89.32	89.32	0.00	4.26	4.26
65	93.88	89.79	89.79	0.00	3.94	3.94
70	93.90	90.17	90.17	0.00	3.61	3.61
75	93.90	90.58	90.58	0.00	3.29	3.29
80	93.91	90.86	90.86	0.00	2.97	2.97
85	93.86	91.31	91.31	0.00	2.64	2.64
90	93.88	91.61	91.61	0.00	2.32	2.32
95	93.88	92.05	92.05	0.00	1.98	1.98
100	93.92	92.37	92.37	0.00	1.65	1.65

ตารางที่ ก.21 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 2$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	99.11	22.93	24.10	2.26	61.47	64.52
5	98.57	26.24	22.03	2.00	57.91	61.30
10	96.22	46.36	35.35	0.92	40.12	43.15
15	95.65	52.68	43.21	0.67	34.69	37.28
20	95.27	57.39	49.30	0.50	30.62	32.82
25	95.02	61.18	54.04	0.38	27.43	29.37
30	94.79	64.22	57.89	0.28	24.84	26.55
35	94.61	66.65	61.14	0.20	22.69	24.20
40	94.47	68.80	63.79	0.13	20.89	22.26
45	94.33	70.62	66.07	0.06	19.35	20.59
50	94.25	72.26	67.96	0.00	18.02	19.18
55	94.12	73.67	69.66	0.06	16.85	17.92
60	94.00	74.94	71.14	0.13	15.82	16.83
65	93.90	76.08	72.43	0.20	14.90	15.85
70	93.74	77.04	73.68	0.28	14.07	14.96
75	93.60	78.01	74.72	0.38	13.32	14.17
80	93.58	78.98	75.64	0.50	12.64	13.45
85	93.18	79.69	76.56	0.67	12.02	12.77
90	92.80	80.45	77.42	0.92	11.44	12.14
95	92.23	81.17	78.23	1.35	10.94	11.53
100	91.04	81.75	79.14	2.26	10.57	10.89

ตารางที่ ก.22 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสลงกราวด์พอลต์เมื่อ $R_f = 7$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	96.82	58.02	61.69	1.72	44.52	47.24
5	96.70	58.92	59.35	1.58	42.28	45.94
10	95.71	66.32	54.01	0.83	30.65	35.71
15	95.35	69.04	55.99	0.62	27.06	31.59
20	95.08	71.17	58.62	0.47	24.29	28.27
25	94.86	72.95	61.27	0.35	22.05	25.56
30	94.69	74.51	63.73	0.26	20.18	23.30
35	94.55	75.96	65.91	0.19	18.59	21.40
40	94.40	77.12	67.99	0.12	17.19	19.73
45	94.27	78.23	69.81	0.06	15.97	18.29
50	94.17	79.29	71.43	0.00	14.89	17.03
55	94.07	80.25	72.92	0.06	13.91	15.89
60	93.99	81.28	74.20	0.12	13.04	14.89
65	93.87	82.07	75.54	0.19	12.21	13.95
70	93.76	82.89	76.76	0.26	11.45	13.08
75	93.62	83.74	77.93	0.35	10.74	12.27
80	93.46	84.55	79.09	0.47	10.06	11.49
85	93.24	85.39	80.29	0.62	9.40	10.71
90	93.01	86.37	81.48	0.83	8.77	9.92
95	92.65	87.29	82.97	1.15	8.15	9.03
100	92.14	88.31	84.90	1.72	7.59	7.91

ตารางที่ ก.23 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 12$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	95.48	72.85	76.81	1.28	32.64	34.33
5	95.47	72.96	75.32	1.20	31.29	33.80
10	95.24	76.14	68.85	0.72	23.61	28.40
15	95.03	77.66	68.51	0.55	21.09	25.75
20	94.86	78.96	69.09	0.42	19.15	23.46
25	94.69	79.95	70.17	0.33	17.53	21.46
30	94.56	80.90	71.39	0.24	16.17	19.74
35	94.44	81.74	72.68	0.18	14.97	18.23
40	94.33	82.53	73.97	0.11	13.91	16.89
45	94.24	83.26	75.21	0.06	12.96	15.69
50	94.14	83.98	76.41	0.00	12.09	14.61
55	94.05	84.65	77.58	0.06	11.29	13.63
60	93.94	85.33	78.70	0.11	10.55	12.71
65	93.88	86.09	79.72	0.18	9.86	11.87
70	93.77	86.75	80.81	0.24	9.19	11.05
75	93.67	87.31	81.98	0.33	8.54	10.25
80	93.52	88.01	83.10	0.42	7.92	9.47
85	93.38	88.74	84.25	0.55	7.32	8.67
90	93.20	89.42	85.57	0.72	6.71	7.81
95	93.01	90.19	87.03	0.95	6.12	6.86
100	92.87	91.21	88.56	1.28	5.52	5.73

ตารางที่ ก.24 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสลงกราวด์พอลต์เมื่อ $R_f = 17$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	94.80	79.67	83.38	1.00	25.22	26.31
5	94.85	79.66	82.42	0.95	24.38	26.03
10	94.87	81.17	77.35	0.62	19.01	22.89
15	94.77	82.14	76.48	0.49	17.10	21.12
20	94.65	83.00	76.36	0.38	15.59	19.49
25	94.54	83.75	76.70	0.30	14.34	18.02
30	94.45	84.43	77.28	0.22	13.27	16.70
35	94.35	85.06	78.00	0.16	12.33	15.50
40	94.27	85.68	78.79	0.10	11.49	14.42
45	94.17	86.19	79.67	0.05	10.71	13.42
50	94.10	86.75	80.52	0.00	10.00	12.50
55	94.02	87.24	81.43	0.05	9.33	11.65
60	93.94	87.76	82.32	0.10	8.70	10.84
65	93.86	88.32	83.18	0.16	8.11	10.07
70	93.75	88.74	84.18	0.22	7.52	9.32
75	93.69	89.31	85.07	0.30	6.97	8.58
80	93.58	89.78	86.10	0.38	6.42	7.84
85	93.47	90.33	87.12	0.49	5.89	7.07
90	93.36	91.01	88.12	0.61	5.37	6.26
95	93.26	91.60	89.31	0.78	4.82	5.38
100	93.26	92.40	90.42	1.00	4.25	4.39

ตารางที่ ก.25 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสลงกราวด์พอลต์เมื่อ $R_f = 22$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	94.47	83.44	86.69	0.81	20.41	21.14
5	94.51	83.44	86.05	0.77	19.85	20.97
10	94.58	84.11	82.33	0.53	15.88	18.92
15	94.58	84.83	81.37	0.43	14.37	17.66
20	94.49	85.43	81.06	0.34	13.13	16.45
25	94.43	86.02	81.07	0.27	12.11	15.32
30	94.34	86.61	81.33	0.21	11.23	14.28
35	94.28	87.04	81.79	0.15	10.44	13.31
40	94.19	87.47	82.35	0.10	9.72	12.41
45	94.14	87.92	82.94	0.05	9.08	11.57
50	94.06	88.34	83.60	0.00	8.47	10.78
55	93.98	88.75	84.30	0.05	7.90	10.03
60	93.92	89.16	85.01	0.10	7.36	9.32
65	93.86	89.57	85.73	0.15	6.85	8.63
70	93.79	90.08	86.42	0.21	6.35	7.95
75	93.72	90.40	87.27	0.27	5.86	7.28
80	93.64	90.82	88.09	0.34	5.39	6.59
85	93.56	91.27	88.93	0.43	4.92	5.89
90	93.47	91.86	89.72	0.53	4.45	5.16
95	93.45	92.38	90.58	0.66	3.96	4.37
100	93.44	92.98	91.43	0.81	3.43	3.53

ตารางที่ ก.26 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสลงกราวด์พอลต์เมื่อ $R_f = 27$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	94.27	85.73	88.60	0.67	17.09	17.60
5	94.31	85.71	88.14	0.65	16.68	17.48
10	94.41	86.04	85.35	0.47	13.62	16.00
15	94.42	86.50	84.56	0.38	12.38	15.06
20	94.36	87.07	84.14	0.31	11.37	14.12
25	94.33	87.47	84.07	0.24	10.49	13.22
30	94.26	87.90	84.20	0.19	9.73	12.37
35	94.21	88.29	84.47	0.14	9.05	11.57
40	94.16	88.65	84.86	0.09	8.44	10.81
45	94.09	89.14	85.22	0.04	7.89	10.09
50	94.05	89.37	85.78	0.00	7.35	9.40
55	93.98	89.73	86.33	0.04	6.85	8.75
60	93.93	90.07	86.89	0.09	6.38	8.11
65	93.86	90.42	87.50	0.14	5.93	7.49
70	93.80	90.76	88.13	0.19	5.49	6.88
75	93.74	91.10	88.78	0.24	5.06	6.27
80	93.70	91.49	89.41	0.31	4.64	5.65
85	93.60	91.92	90.09	0.38	4.22	5.01
90	93.58	92.37	90.72	0.46	3.80	4.35
95	93.55	92.82	91.39	0.56	3.35	3.66
100	93.56	93.30	92.03	0.67	2.87	2.94

ตารางที่ ก.27 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 32$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	94.17	87.29	89.77	0.58	14.69	15.05
5	94.18	87.21	89.47	0.56	14.36	14.96
10	94.29	87.40	87.33	0.41	11.93	13.81
15	94.29	87.76	86.66	0.34	10.89	13.06
20	94.26	88.09	86.32	0.28	10.01	12.31
25	94.22	88.51	86.17	0.22	9.26	11.58
30	94.19	88.83	86.23	0.17	8.60	10.87
35	94.17	89.23	86.34	0.13	8.01	10.18
40	94.09	89.55	86.64	0.08	7.47	9.53
45	94.05	89.83	86.99	0.04	6.97	8.90
50	94.01	90.13	87.37	0.00	6.50	8.30
55	93.97	90.49	87.75	0.04	6.07	7.72
60	93.90	90.81	88.22	0.08	5.65	7.15
65	93.86	91.01	88.78	0.13	5.23	6.59
70	93.83	91.31	89.27	0.17	4.84	6.03
75	93.76	91.62	89.82	0.22	4.46	5.48
80	93.69	91.93	90.39	0.28	4.08	4.92
85	93.66	92.30	90.90	0.34	3.69	4.34
90	93.63	92.64	91.46	0.41	3.30	3.75
95	93.63	93.03	91.97	0.49	2.90	3.14
100	93.69	93.51	92.41	0.58	2.46	2.51

ตารางที่ ก.28 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสลงกราวด์พอลต์เมื่อ $R_f = 37$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	94.09	88.42	90.53	0.51	12.87	13.12
5	94.11	88.30	90.34	0.49	12.60	13.05
10	94.19	88.37	88.70	0.37	10.60	12.11
15	94.20	88.63	88.14	0.31	9.72	11.50
20	94.03	88.98	87.78	0.25	8.97	10.88
25	94.18	89.28	87.63	0.20	8.31	10.25
30	94.16	89.52	87.67	0.16	7.72	9.65
35	94.11	89.87	87.75	0.12	7.19	9.06
40	94.05	90.10	88.01	0.08	6.70	8.49
45	94.02	90.36	88.27	0.04	6.26	7.94
50	93.99	90.63	88.58	0.00	5.84	7.40
55	93.94	90.89	88.94	0.04	5.44	6.88
60	93.89	91.20	89.29	0.08	5.06	6.37
65	93.87	91.45	89.69	0.12	4.69	5.86
70	93.79	91.71	90.16	0.16	4.34	5.36
75	93.76	91.96	90.61	0.20	3.98	4.85
80	93.73	92.26	91.03	0.25	3.63	4.34
85	93.69	92.54	91.51	0.31	3.28	3.82
90	93.67	92.85	91.95	0.37	2.93	3.29
95	93.68	93.25	92.30	0.43	2.55	2.75
100	93.70	93.67	92.61	0.51	2.16	2.19

ตารางที่ ก.29 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 42$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	94.05	89.19	91.09	0.45	11.44	11.63
5	94.06	89.10	90.95	0.44	11.21	11.57
10	94.15	89.12	89.65	0.33	9.53	10.77
15	94.15	89.30	89.20	0.28	8.77	10.26
20	94.11	89.53	88.92	0.23	8.11	9.72
25	94.13	89.86	88.73	0.19	7.53	9.18
30	94.11	90.12	88.72	0.15	7.01	8.66
35	94.07	90.32	88.84	0.11	6.53	8.14
40	94.02	90.64	88.97	0.07	6.09	7.64
45	94.01	90.81	89.20	0.03	5.68	7.14
50	93.97	91.04	89.47	0.00	5.30	6.66
55	93.92	91.26	89.78	0.03	4.94	6.19
60	93.89	91.61	90.00	0.07	4.60	5.72
65	93.85	91.84	90.36	0.11	4.26	5.26
70	93.80	92.06	90.75	0.15	3.93	4.81
75	93.78	92.21	91.18	0.19	3.60	4.34
80	93.76	92.55	91.48	0.23	3.28	3.88
85	93.73	92.81	91.86	0.28	2.96	3.41
90	93.71	93.10	92.22	0.33	2.63	2.92
95	93.70	93.34	92.62	0.39	2.28	2.44
100	93.73	93.77	92.79	0.45	1.92	1.94

ตารางที่ ก.30 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีสองเฟสลงกราวด์พอลต์เมื่อ $R_f = 47$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	94.01	89.76	91.54	0.40	10.28	10.45
5	94.04	89.77	91.34	0.39	10.11	10.38
10	94.09	89.71	90.35	0.30	8.66	9.69
15	94.09	89.86	89.98	0.25	7.99	9.24
20	94.10	90.04	89.75	0.21	7.41	8.78
25	94.10	90.29	89.59	0.17	6.89	8.31
30	94.06	90.49	89.60	0.13	6.41	7.84
35	94.23	90.80	89.66	0.10	5.99	7.38
40	94.01	90.91	89.79	0.07	5.58	6.93
45	94.02	91.26	89.88	0.03	5.22	6.48
50	93.97	91.42	90.09	0.00	4.86	6.04
55	93.91	91.59	90.40	0.03	4.53	5.62
60	93.89	91.81	90.66	0.07	4.20	5.19
65	93.86	92.03	90.94	0.10	3.89	4.77
70	93.83	92.21	91.28	0.13	3.59	4.35
75	93.79	92.53	91.52	0.17	3.29	3.92
80	93.81	92.66	91.93	0.21	2.99	3.50
85	93.74	92.90	92.25	0.26	2.69	3.07
90	93.74	93.19	92.51	0.30	2.38	2.63
95	93.74	93.42	92.82	0.35	2.06	2.19
100	93.74	93.80	92.97	0.40	1.72	1.75

ตารางที่ ก.31 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีเฟสลงกรวดด์พอลต์เมื่อ $R_f = 2$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.68	66.59	29.25	0.00	55.17	55.18
5	93.92	65.98	30.91	0.00	53.02	53.02
10	93.90	65.62	45.55	0.00	39.22	39.23
15	93.85	67.14	51.34	0.00	34.25	34.25
20	93.86	68.85	56.00	0.00	30.42	30.41
25	93.93	70.48	59.73	0.00	27.30	27.30
30	93.92	72.08	62.77	0.00	24.78	24.78
35	93.95	73.59	65.27	0.00	22.69	22.69
40	93.91	74.87	67.49	0.00	20.90	20.90
45	93.92	76.00	69.43	0.00	19.37	19.37
50	93.92	77.10	71.02	0.00	18.04	18.04
55	93.92	78.14	72.41	0.00	16.89	16.88
60	93.90	78.96	73.74	0.00	15.84	15.84
65	93.85	79.96	74.73	0.00	14.95	14.95
70	93.91	80.68	75.77	0.00	14.11	14.11
75	93.89	81.34	76.75	0.00	13.34	13.34
80	93.93	82.21	77.43	0.00	12.69	12.68
85	93.86	82.83	78.28	0.00	12.02	12.02
90	93.91	83.58	78.99	0.00	11.42	11.43
95	93.88	84.40	79.51	0.00	10.87	10.86
100	93.85	85.32	80.06	0.00	10.32	10.29

ตารางที่ ก.32 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีเฟสลงกรวด์พอลต์เมื่อ $R_f = 7$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.89	90.61	41.49	0.00	39.57	39.57
5	93.91	89.65	42.64	0.00	38.50	38.50
10	93.90	84.36	51.98	0.00	30.74	30.74
15	93.89	83.21	56.22	0.00	27.55	27.55
20	93.90	82.70	59.82	0.00	24.90	24.90
25	93.89	82.63	62.84	0.00	22.69	22.69
30	93.87	82.77	65.47	0.00	20.79	20.79
35	93.93	83.15	67.66	0.00	19.18	19.18
40	93.88	83.62	69.58	0.00	17.77	17.77
45	93.97	84.04	71.31	0.00	16.52	16.52
50	93.88	84.49	72.92	0.00	15.38	15.38
55	93.89	85.08	74.25	0.00	14.39	14.39
60	93.88	85.72	75.43	0.00	13.49	13.49
65	93.88	86.25	76.62	0.00	12.64	12.64
70	93.93	86.76	77.74	0.00	11.85	11.85
75	93.87	87.41	78.77	0.00	11.10	11.10
80	93.89	88.06	79.77	0.00	10.39	10.39
85	93.93	88.79	80.73	0.00	9.69	9.69
90	93.89	89.60	81.77	0.00	8.97	8.97
95	93.89	90.51	82.87	0.00	8.22	8.22
100	93.93	91.48	84.15	0.00	7.39	7.40

ตารางที่ ก.33 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีเฟสลงกรวดด์พอลต์เมื่อ $R_f = 12$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.96	96.81	59.53	0.01	28.64	28.64
5	93.91	96.31	60.03	0.00	28.14	28.13
10	93.90	92.06	63.52	0.00	23.70	23.70
15	93.90	90.69	65.64	0.00	21.68	21.68
20	93.89	89.79	67.68	0.01	19.92	19.92
25	93.90	89.35	69.46	0.00	18.40	18.40
30	93.90	89.07	71.16	0.00	17.02	17.02
35	93.91	88.91	72.72	0.01	15.80	15.82
40	93.90	88.89	74.21	0.00	14.68	14.68
45	93.85	89.02	75.56	0.00	13.69	13.69
50	93.89	89.20	76.78	0.00	12.77	12.77
55	93.88	89.47	77.92	0.00	11.93	11.93
60	93.88	89.90	78.92	0.00	11.15	11.15
65	93.90	90.18	80.00	0.00	10.40	10.40
70	93.94	90.62	80.95	0.00	9.69	9.69
75	93.85	91.12	81.94	0.00	9.01	9.01
80	93.89	91.55	82.94	0.00	8.32	8.32
85	93.86	92.09	83.96	0.00	7.63	7.63
90	93.90	92.47	85.11	0.00	6.91	6.91
95	93.92	93.06	86.22	0.00	6.16	6.16
100	93.89	93.61	87.50	0.00	5.35	5.35

ตารางที่ ก.34 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีเฟสลงกรวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 17$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.85	98.32	69.30	0.00	22.00	22.00
5	93.92	97.87	69.54	0.00	21.64	21.64
10	93.92	94.87	71.28	0.00	18.79	18.79
15	93.95	93.83	72.46	0.00	17.42	17.42
20	93.90	92.99	73.73	0.00	16.18	16.18
25	93.88	92.57	74.84	0.00	15.07	15.07
30	93.87	92.16	76.02	0.00	14.03	14.03
35	93.88	91.90	77.13	0.00	13.09	13.09
40	93.92	91.80	78.16	0.00	12.22	12.22
45	93.90	91.74	79.21	0.00	11.41	11.41
50	93.90	91.79	80.18	0.00	10.65	10.65
55	93.91	92.01	81.03	0.00	9.95	9.95
60	93.91	92.07	82.01	0.00	9.27	9.27
65	93.92	92.41	82.78	0.00	8.63	8.63
70	93.91	92.54	83.74	0.00	7.99	7.99
75	93.88	92.75	84.67	0.00	7.37	7.37
80	93.88	93.19	85.42	0.00	6.76	6.76
85	93.93	93.39	86.38	0.00	6.12	6.12
90	93.88	93.79	87.29	0.00	5.49	5.49
95	93.90	94.12	88.26	0.01	4.82	4.82
100	93.85	94.47	89.25	0.00	4.11	4.11

ตารางที่ ก.35 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีเฟสลงกรวดด์โฟลด์เมื่อ $R_f = 22$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.91	98.44	75.10	0.00	17.69	17.69
5	93.93	98.25	75.07	0.00	17.45	17.45
10	93.87	95.96	76.32	0.00	15.42	15.42
15	93.90	95.13	77.07	0.00	14.41	14.41
20	93.93	94.47	77.89	0.00	13.47	13.47
25	93.90	94.08	78.69	0.00	12.61	12.61
30	93.90	93.69	79.53	0.00	11.80	11.80
35	93.91	93.50	80.32	0.00	11.05	11.05
40	93.89	93.27	81.20	0.00	10.33	10.33
45	93.91	93.34	81.88	0.00	9.68	9.68
50	93.91	93.18	82.75	0.00	9.03	9.03
55	93.89	93.21	83.53	0.00	8.42	8.42
60	93.89	93.39	84.19	0.00	7.85	7.85
65	93.89	93.49	84.95	0.00	7.28	7.28
70	93.89	93.53	85.77	0.00	6.72	6.72
75	93.89	93.68	86.51	0.00	6.17	6.17
80	93.89	93.84	87.28	0.00	5.62	5.62
85	93.91	94.04	88.01	0.00	5.07	5.07
90	93.91	94.31	88.73	0.00	4.50	4.50
95	93.85	94.56	89.51	0.00	3.92	3.92
100	93.88	94.64	90.37	0.00	3.31	3.31

ตารางที่ ก.36 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีเฟสลงกรวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 27$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.90	98.21	78.72	0.00	14.75	14.75
5	93.93	98.02	78.78	0.00	14.57	14.57
10	93.89	96.42	79.60	0.00	13.02	13.02
15	93.92	95.71	80.18	0.00	12.23	12.23
20	93.88	95.19	80.81	0.00	11.48	11.48
25	93.88	94.93	81.36	0.00	10.79	10.79
30	93.92	94.54	82.02	0.00	10.12	10.12
35	93.89	94.25	82.73	0.00	9.49	9.49
40	93.93	94.17	83.30	0.00	8.90	8.90
45	93.88	93.98	84.04	0.00	8.33	8.33
50	93.93	93.98	84.60	0.00	7.79	7.79
55	93.89	93.93	85.30	0.00	7.26	7.26
60	93.91	94.01	85.87	0.00	6.76	6.76
65	93.88	93.99	86.58	0.00	6.26	6.26
70	93.91	94.03	87.21	0.00	5.76	5.76
75	93.90	94.13	87.85	0.00	5.28	5.28
80	93.90	94.23	88.49	0.00	4.79	4.79
85	93.87	94.41	89.09	0.00	4.30	4.30
90	93.88	94.49	89.76	0.00	3.80	3.80
95	93.91	94.58	90.41	0.00	3.29	3.29
100	93.86	94.56	91.21	0.00	2.76	2.76

ตารางที่ ก.37 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีเฟสลงกรวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 32$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.90	97.94	81.22	0.00	12.63	12.63
5	93.89	97.86	81.24	0.00	12.49	12.49
10	93.88	96.45	81.98	0.00	11.24	11.24
15	93.89	96.07	82.32	0.00	10.60	10.60
20	93.93	95.55	82.84	0.00	9.97	9.97
25	93.91	95.31	83.30	0.00	9.40	9.40
30	93.88	95.01	83.86	0.00	8.84	8.84
35	93.88	94.71	84.45	0.00	8.30	8.30
40	93.94	94.56	84.95	0.00	7.79	7.79
45	93.90	94.39	85.57	0.00	7.29	7.29
50	93.92	94.38	86.04	0.00	6.82	6.82
55	93.88	94.36	86.60	0.00	6.36	6.36
60	93.89	94.32	87.16	0.00	5.91	5.91
65	93.93	94.41	87.61	0.00	5.47	5.47
70	93.90	94.34	88.27	0.00	5.03	5.03
75	93.88	94.42	88.80	0.00	4.60	4.60
80	93.86	94.45	89.38	0.00	4.16	4.16
85	93.88	94.47	89.94	0.00	3.72	3.72
90	93.89	94.53	90.49	0.00	3.28	3.28
95	93.87	94.58	91.06	0.00	2.83	2.83
100	93.87	94.67	91.58	0.00	2.36	2.36

ตารางที่ ก.38 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีเฟสลงกรวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 7$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.82	97.82	82.99	0.00	11.05	11.05
5	93.89	97.57	83.06	0.00	10.92	10.92
10	93.90	96.57	83.58	0.00	9.88	9.88
15	93.92	96.13	83.95	0.00	9.33	9.33
20	93.90	95.72	84.39	0.00	8.81	8.81
25	93.94	95.39	84.82	0.00	8.30	8.30
30	93.90	95.26	85.21	0.00	7.83	7.83
35	93.89	94.93	85.78	0.00	7.36	7.36
40	93.92	94.89	86.13	0.00	6.91	6.91
45	93.91	94.65	86.70	0.00	6.47	6.47
50	93.88	94.60	87.17	0.00	6.06	6.06
55	93.91	94.64	87.54	0.00	5.65	5.65
60	93.89	94.51	88.11	0.00	5.24	5.24
65	93.90	94.52	88.56	0.00	4.85	4.85
70	93.91	94.47	89.07	0.00	4.45	4.45
75	93.94	94.49	89.52	0.00	4.06	4.06
80	93.90	94.52	90.02	0.00	3.67	3.67
85	93.90	94.55	90.50	0.00	3.28	3.28
90	93.92	94.65	90.90	0.00	2.88	2.88
95	93.87	94.70	91.39	0.00	2.48	2.48
100	93.93	94.55	91.96	0.00	2.06	2.06

ตารางที่ ก.39 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีเฟสลงกรวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 42$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.92	97.50	84.32	0.00	9.80	9.80
5	93.89	97.41	84.37	0.00	9.70	9.70
10	93.89	96.51	84.87	0.00	8.80	8.80
15	93.90	96.01	85.28	0.00	8.32	8.32
20	93.88	95.71	85.65	0.00	7.87	7.87
25	93.93	95.53	85.91	0.00	7.43	7.43
30	93.89	95.24	86.39	0.00	7.01	7.01
35	93.91	95.07	86.76	0.00	6.60	6.60
40	93.89	94.94	87.17	0.00	6.20	6.20
45	93.90	94.86	87.54	0.00	5.82	5.82
50	93.90	94.72	88.00	0.00	5.44	5.44
55	93.90	94.76	88.34	0.00	5.07	5.07
60	93.92	94.69	88.75	0.00	4.71	4.71
65	93.90	94.59	89.26	0.00	4.35	4.35
70	93.90	94.60	89.64	0.00	3.99	3.99
75	93.90	94.56	90.11	0.00	3.64	3.64
80	93.89	94.69	90.43	0.00	3.29	3.29
85	93.89	94.54	90.98	0.00	2.93	2.93
90	93.86	94.65	91.34	0.00	2.57	2.57
95	93.87	94.65	91.75	0.00	2.20	2.20
100	93.91	94.57	92.18	0.00	1.83	1.83

ตารางที่ ก.40 ตัวอย่างที่ใช้ในการเรียนรู้กรณีเฟสลงกรวด์พอลต์เมื่อ $R_f = 47$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B		V_A	V_B	
0	93.90	97.24	0	93.90	97.24	0
5	93.92	97.10	5	93.92	97.10	5
10	93.87	96.48	10	93.87	96.48	10
15	93.87	95.99	15	93.87	95.99	15
20	93.90	95.80	20	93.90	95.80	20
25	93.89	95.59	25	93.89	95.59	25
30	93.92	95.38	30	93.92	95.38	30
35	93.88	95.25	35	93.88	95.25	35
40	93.90	94.99	40	93.90	94.99	40
45	93.88	94.88	45	93.88	94.88	45
50	93.91	94.91	50	93.91	94.91	50
55	93.88	94.75	55	93.88	94.75	55
60	93.95	94.74	60	93.95	94.74	60
65	93.88	94.66	65	93.88	94.66	65
70	93.90	94.61	70	93.90	94.61	70
75	93.90	94.55	75	93.90	94.55	75
80	93.91	94.64	80	93.91	94.64	80
85	93.86	94.59	85	93.86	94.59	85
90	93.88	94.64	90	93.88	94.64	90
95	93.88	94.55	95	93.88	94.55	95
100	93.92	94.54	100	93.92	94.54	100



ชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบระบบนิเวศ-พืช

ตารางที่ ข.1 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสามเฟสโหลดเมื่อ $R_f = 1e-6$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	0.03	0.11	0.04	68.72	67.56	70.42
5	3.91	3.92	3.89	65.77	64.80	67.21
10	28.41	28.43	28.53	47.86	47.24	48.82
15	37.04	37.08	37.11	41.53	41.05	42.36
20	43.66	43.66	43.76	36.71	36.33	37.39
25	48.90	48.88	49.02	32.90	32.56	33.46
30	53.14	53.18	53.22	29.78	29.47	30.33
35	56.66	56.68	56.75	27.22	26.95	27.70
40	59.62	59.64	59.70	25.05	24.81	25.49
45	62.14	62.16	62.23	23.21	22.99	23.61
50	64.32	64.34	64.40	21.62	21.42	21.99
55	66.23	66.19	66.33	20.24	20.06	20.56
60	67.90	67.86	67.99	19.02	18.85	19.32
65	69.38	69.33	69.48	17.94	17.78	18.21
70	70.70	70.67	70.77	16.97	16.83	17.24
75	71.87	71.87	71.96	16.10	15.96	16.36
80	72.95	72.93	73.02	15.32	15.19	15.57
85	73.94	73.88	74.00	14.62	14.49	14.84
90	74.79	74.80	74.89	13.96	13.85	14.19
95	75.62	75.59	75.68	13.37	13.26	13.58
100	76.24	76.42	76.47	12.83	12.72	13.03

ตารางที่ ข.2 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสามเฟสโหลดเมื่อ $R_f = 5$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	50.01	49.90	49.90	52.66	52.56	52.57
5	49.61	49.55	49.55	50.96	50.91	50.93
10	51.77	51.67	51.73	39.49	39.44	39.44
15	54.54	54.49	54.57	35.00	34.96	34.99
20	57.44	57.36	57.46	31.40	31.36	31.37
25	60.14	60.12	60.18	28.42	28.40	28.42
30	62.64	62.58	62.68	25.95	25.92	25.94
35	64.89	64.81	64.92	23.85	23.82	23.83
40	66.91	66.81	66.95	22.04	22.01	22.02
45	68.71	68.69	68.73	20.45	20.44	20.46
50	70.37	70.29	70.43	19.08	19.05	19.05
55	71.88	71.79	71.94	17.84	17.82	17.82
60	73.26	73.22	73.31	16.72	16.71	16.71
65	74.56	74.51	74.60	15.71	15.70	15.70
70	75.80	75.70	75.85	14.79	14.78	14.76
75	76.96	76.96	76.97	13.92	13.91	13.91
80	78.13	78.03	78.20	13.11	13.10	13.08
85	79.29	79.24	79.32	12.32	12.31	12.29
90	80.50	80.45	80.54	11.54	11.53	11.51
95	81.81	81.79	81.85	10.73	10.72	10.70
100	83.33	83.30	83.35	9.86	9.85	9.83

ตารางที่ ข.3 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสามเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 10$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	71.12	71.00	71.03	37.44	37.39	37.42
5	68.55	70.50	70.64	36.62	36.56	36.60
10	69.28	69.15	69.22	30.33	30.28	30.29
15	69.68	69.59	69.65	27.54	27.52	27.52
20	70.52	70.37	70.52	25.18	25.13	25.14
25	71.54	71.45	71.52	23.11	23.09	23.09
30	72.64	72.58	72.68	21.31	21.29	21.30
35	73.82	73.71	73.85	19.74	19.71	19.72
40	74.98	74.85	75.01	18.34	18.31	18.31
45	76.11	76.00	76.13	17.08	17.05	17.05
50	77.21	77.10	77.24	15.93	15.91	15.91
55	78.29	78.18	78.30	14.89	14.87	14.86
60	79.33	79.24	79.35	13.92	13.90	13.90
65	80.36	80.28	80.39	13.01	12.99	12.99
70	81.38	81.33	81.41	12.15	12.13	12.13
75	82.42	82.32	82.49	11.33	11.30	11.30
80	83.48	83.44	83.51	10.51	10.50	10.49
85	84.59	84.53	84.62	9.70	9.68	9.68
90	85.77	85.66	85.81	8.86	8.84	8.84
95	87.02	86.92	87.07	7.98	7.96	7.96
100	88.39	88.29	88.44	7.02	7.00	7.00

ตารางที่ ข.4 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสามเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 15$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	79.90	79.83	79.88	28.05	28.03	28.05
5	79.67	79.43	79.61	27.60	27.52	27.58
10	78.16	78.11	78.14	23.72	23.71	23.72
15	78.07	78.00	78.07	21.90	21.88	21.90
20	78.30	78.18	78.29	20.27	20.24	20.26
25	78.70	78.64	78.70	18.80	18.79	18.80
30	79.26	79.15	79.29	17.48	17.45	17.47
35	79.88	79.85	79.88	16.27	16.26	16.27
40	80.59	80.50	80.61	15.18	15.16	15.17
45	81.32	81.20	81.36	14.17	14.15	14.16
50	82.08	81.95	82.12	13.24	13.21	13.22
55	82.85	82.72	82.88	12.36	12.33	12.34
60	83.64	83.50	83.65	11.53	11.51	11.51
65	84.41	84.39	84.38	10.72	10.72	10.72
70	85.22	85.14	85.26	9.96	9.95	9.95
75	86.04	85.98	86.08	9.21	9.20	9.20
80	86.91	86.85	86.91	8.46	8.45	8.45
85	87.81	87.72	87.81	7.71	7.70	7.70
90	88.73	88.59	88.78	6.94	6.92	6.92
95	89.67	89.55	89.75	6.13	6.11	6.11
100	90.66	90.56	90.74	5.26	5.24	5.25

ตารางที่ ข.5 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสามเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 20$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	84.23	84.19	84.22	22.18	22.17	22.18
5	84.08	83.89	84.06	21.87	21.83	21.87
10	82.96	82.82	82.96	19.22	19.19	19.22
15	82.81	82.61	82.81	17.92	17.88	17.91
20	82.81	82.74	82.81	16.71	16.69	16.70
25	83.04	82.91	83.01	15.61	15.58	15.60
30	83.33	83.21	83.36	14.59	14.56	14.58
35	83.73	83.62	83.76	13.64	13.61	13.63
40	84.20	84.07	84.23	12.75	12.73	12.74
45	84.70	84.61	84.71	11.92	11.91	11.91
50	85.23	85.15	85.26	11.14	11.12	11.13
55	85.80	85.70	85.86	10.39	10.37	10.39
60	86.40	86.28	86.44	9.68	9.66	9.67
65	87.00	86.91	87.05	8.99	8.97	8.98
70	87.65	87.54	87.66	8.31	8.30	8.30
75	88.30	88.18	88.32	7.65	7.63	7.64
80	88.94	88.89	88.98	6.98	6.97	6.97
85	89.63	89.56	89.69	6.31	6.29	6.30
90	90.34	90.28	90.38	5.62	5.61	5.61
95	91.05	90.98	91.11	4.90	4.89	4.90
100	91.77	91.68	91.85	4.16	4.15	4.15

ตารางที่ ข.6 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสามเฟสโหลดเมื่อ $R_f = 25$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	86.71	86.58	86.72	18.26	18.24	18.27
5	86.54	86.50	86.54	18.02	18.02	18.03
10	85.77	85.60	85.79	16.06	16.03	16.06
15	85.61	85.46	85.63	15.06	15.03	15.05
20	85.59	85.49	85.60	14.11	14.10	14.11
25	85.69	85.60	85.74	13.24	13.22	13.24
30	85.91	85.83	85.90	12.41	12.40	12.41
35	86.18	86.12	86.18	11.63	11.63	11.63
40	86.51	86.42	86.55	10.90	10.89	10.90
45	86.90	86.79	86.91	10.20	10.19	10.20
50	87.28	87.24	87.32	9.53	9.53	9.53
55	87.73	87.70	87.73	8.89	8.89	8.89
60	88.18	88.14	88.22	8.27	8.27	8.27
65	88.69	88.58	88.71	7.67	7.66	7.66
70	89.18	89.10	89.20	7.07	7.06	7.07
75	89.69	89.58	89.76	6.49	6.47	6.48
80	90.23	90.14	90.25	5.89	5.89	5.89
85	90.75	90.68	90.80	5.30	5.29	5.29
90	91.30	91.22	91.36	4.69	4.68	4.69
95	91.85	91.78	91.89	4.07	4.06	4.06
100	92.39	92.27	92.49	3.42	3.41	3.42

ตารางที่ ข.7 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสามเฟสโหลดเมื่อ $R_f = 30$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	88.22	88.14	88.25	15.48	15.47	15.49
5	88.15	87.99	88.17	15.31	15.28	15.31
10	87.51	87.49	87.51	13.74	13.74	13.74
15	87.43	87.25	87.47	12.94	12.91	12.94
20	87.38	87.31	87.42	12.17	12.16	12.17
25	87.47	87.37	87.50	11.45	11.43	11.45
30	87.63	87.48	87.67	10.76	10.74	10.76
35	87.83	87.72	87.86	10.11	10.09	10.10
40	88.07	87.99	88.11	9.48	9.47	9.48
45	88.38	88.28	88.40	8.88	8.87	8.88
50	88.68	88.65	88.71	8.30	8.29	8.30
55	89.03	89.01	89.04	7.74	7.74	7.74
60	89.42	89.34	89.43	7.20	7.19	7.19
65	89.81	89.71	89.85	6.66	6.65	6.66
70	90.20	90.09	90.28	6.13	6.12	6.13
75	90.61	90.57	90.64	5.61	5.60	5.60
80	91.03	90.98	91.08	5.08	5.08	5.08
85	91.47	91.39	91.54	4.55	4.54	4.55
90	91.91	91.84	91.95	4.02	4.01	4.01
95	92.33	92.22	92.44	3.47	3.46	3.46
100	92.76	92.67	92.84	2.90	2.89	2.90

ตารางที่ ข.8 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสามเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 35$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	89.26	89.13	89.33	13.43	13.41	13.44
5	89.19	89.13	89.17	13.28	13.27	13.28
10	88.76	88.60	88.79	11.99	11.97	12.00
15	88.71	88.50	88.72	11.33	11.30	11.33
20	88.65	88.51	88.68	10.68	10.66	10.68
25	88.70	88.57	88.74	10.06	10.05	10.06
30	88.82	88.73	88.82	9.47	9.46	9.47
35	88.96	88.94	88.96	8.91	8.90	8.91
40	89.20	89.07	89.21	8.37	8.35	8.36
45	89.39	89.40	89.40	7.84	7.84	7.84
50	89.67	89.59	89.72	7.33	7.32	7.33
55	89.96	89.88	90.01	6.84	6.83	6.84
60	90.26	90.20	90.29	6.35	6.34	6.35
65	90.58	90.52	90.61	5.87	5.87	5.87
70	90.91	90.84	90.97	5.40	5.39	5.40
75	91.26	91.18	91.31	4.93	4.92	4.93
80	91.60	91.52	91.67	4.46	4.45	4.46
85	91.96	91.90	92.00	3.98	3.98	3.98
90	92.31	92.21	92.40	3.50	3.50	3.50
95	92.66	92.57	92.74	3.02	3.01	3.01
100	93.01	92.89	93.10	2.52	2.51	2.51

ตารางที่ ข.9 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสามเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 40$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	89.98	89.97	89.98	11.84	11.85	11.85
5	89.94	89.83	89.99	11.72	11.71	11.73
10	89.59	89.49	89.65	10.63	10.62	10.63
15	89.54	89.46	89.52	10.05	10.04	10.05
20	89.54	89.38	89.58	9.50	9.48	9.50
25	89.57	89.46	89.63	8.97	8.95	8.97
30	89.67	89.57	89.71	8.45	8.44	8.45
35	89.80	89.72	89.84	7.96	7.95	7.96
40	89.97	89.89	90.02	7.47	7.47	7.48
45	90.16	90.13	90.17	7.01	7.00	7.01
50	90.39	90.28	90.46	6.56	6.54	6.56
55	90.62	90.60	90.64	6.11	6.11	6.11
60	90.88	90.81	90.93	5.67	5.67	5.67
65	91.15	91.07	91.20	5.24	5.24	5.24
70	91.43	91.36	91.48	4.82	4.81	4.82
75	91.71	91.63	91.79	4.39	4.38	4.39
80	92.01	91.94	92.05	3.97	3.96	3.96
85	92.29	92.22	92.38	3.54	3.53	3.54
90	92.59	92.48	92.71	3.11	3.10	3.11
95	92.89	92.78	92.98	2.67	2.66	2.67
100	93.16	93.09	93.25	2.22	2.21	2.22

ตารางที่ ข.10 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสามเฟสโหลดเมื่อ $R_f = 45$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	90.55	90.46	90.56	10.59	10.59	10.60
5	90.49	90.39	90.55	10.49	10.48	10.49
10	90.23	90.18	90.23	9.54	9.53	9.54
15	90.19	90.10	90.19	9.03	9.03	9.03
20	90.19	90.07	90.22	8.55	8.54	8.55
25	90.21	90.21	90.20	8.07	8.07	8.07
30	90.31	90.23	90.34	7.62	7.61	7.62
35	90.41	90.41	90.41	7.18	7.18	7.18
40	90.57	90.48	90.61	6.75	6.74	6.75
45	90.73	90.65	90.79	6.33	6.32	6.33
50	90.92	90.84	90.98	5.92	5.91	5.92
55	91.13	91.06	91.16	5.52	5.51	5.52
60	91.34	91.27	91.39	5.12	5.12	5.12
65	91.57	91.48	91.64	4.73	4.72	4.73
70	91.81	91.72	91.89	4.34	4.34	4.34
75	92.06	91.97	92.13	3.96	3.95	3.96
80	92.30	92.21	92.39	3.57	3.56	3.57
85	92.55	92.45	92.66	3.18	3.17	3.18
90	92.81	92.70	92.90	2.79	2.78	2.79
95	93.04	92.98	93.12	2.39	2.38	2.39
100	93.29	93.28	93.30	1.99	1.98	1.98

ตารางที่ ข.11 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสามเฟสโหลดเมื่อ $R_f = 50$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	90.96	90.85	91.02	9.58	9.57	9.59
5	90.90	90.90	90.92	9.48	9.48	9.49
10	90.74	90.62	90.75	8.65	8.64	8.65
15	90.69	90.56	90.74	8.20	8.19	8.20
20	90.66	90.65	90.68	7.76	7.76	7.76
25	90.71	90.69	90.73	7.34	7.34	7.34
30	90.79	90.71	90.85	6.93	6.93	6.94
35	90.90	90.79	90.97	6.54	6.53	6.54
40	91.02	90.94	91.08	6.15	6.14	6.15
45	91.17	91.09	91.22	5.77	5.76	5.77
50	91.33	91.26	91.38	5.39	5.39	5.39
55	91.52	91.40	91.59	5.03	5.02	5.03
60	91.69	91.65	91.74	4.66	4.66	4.67
65	91.89	91.81	91.98	4.31	4.30	4.31
70	92.10	92.01	92.19	3.95	3.95	3.95
75	92.31	92.22	92.41	3.60	3.59	3.60
80	92.53	92.43	92.63	3.24	3.24	3.24
85	92.74	92.66	92.83	2.89	2.88	2.89
90	92.95	92.90	93.03	2.53	2.52	2.53
95	93.18	93.16	93.19	2.16	2.16	2.16
100	93.38	93.38	93.38	1.79	1.79	1.79

ตารางที่ ข.12 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสองเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 1e-6$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.90	46.95	46.95	0.00	59.79	59.79
5	93.91	46.80	46.80	0.00	57.35	57.35
10	93.83	51.68	51.68	0.00	41.72	41.72
15	93.86	55.53	55.53	0.00	36.24	36.23
20	93.92	59.01	59.01	0.00	32.00	32.00
25	93.99	61.95	61.95	0.00	28.68	28.68
30	93.93	64.64	64.64	0.00	25.97	25.97
35	93.92	66.88	66.88	0.00	23.70	23.70
40	93.92	68.74	68.74	0.00	21.85	21.85
45	93.96	70.52	70.52	0.00	20.21	20.21
50	93.92	71.92	71.92	0.00	18.83	18.83
55	93.95	73.21	73.21	0.00	17.64	17.64
60	93.89	74.42	74.42	0.00	16.56	16.56
65	93.91	75.49	75.49	0.00	15.61	15.61
70	93.90	76.43	76.43	0.00	14.79	14.79
75	93.90	77.24	77.24	0.00	14.03	14.03
80	93.94	78.10	78.10	0.00	13.34	13.35
85	93.92	78.74	78.74	0.00	12.72	12.72
90	93.91	79.35	79.35	0.00	12.16	12.17
95	93.89	79.93	79.93	0.00	11.65	11.65
100	93.92	80.54	80.54	0.01	11.18	11.17

ตารางที่ ข.13 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสองเฟสโหลดเมื่อ $R_f = 5$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	94.01	31.62	31.62	0.00	45.61	45.61
5	93.82	33.69	33.69	0.00	44.17	44.17
10	93.90	47.24	47.24	0.00	34.20	34.21
15	93.95	52.66	52.66	0.00	30.33	30.33
20	93.93	57.07	57.07	0.00	27.15	27.15
25	93.89	60.51	60.51	0.00	24.63	24.64
30	93.88	63.52	63.52	0.00	22.47	22.47
35	93.91	65.98	65.98	0.00	20.65	20.66
40	93.90	68.24	68.24	0.00	19.05	19.05
45	93.94	70.00	70.00	0.00	17.71	17.71
50	93.91	71.60	71.60	0.00	16.51	16.51
55	93.86	73.09	73.09	0.00	15.43	15.43
60	93.90	74.33	74.33	0.00	14.47	14.47
65	93.92	75.50	75.50	0.00	13.60	13.60
70	93.88	76.51	76.51	0.00	12.80	12.80
75	93.91	77.52	77.52	0.00	12.04	12.04
80	93.91	78.45	78.45	0.00	11.34	11.33
85	93.90	79.32	79.32	0.00	10.66	10.66
90	93.95	80.23	80.23	0.00	9.97	9.98
95	93.87	81.22	81.22	0.00	9.27	9.27
100	93.92	82.35	82.35	0.00	8.51	8.51

ตารางที่ ข.14 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสองเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 10$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.92	53.64	53.64	0.00	32.42	32.43
5	93.90	54.15	54.15	0.00	31.70	31.70
10	93.90	59.32	59.32	0.00	26.25	26.25
15	93.93	62.07	62.07	0.00	23.84	23.84
20	93.90	64.62	64.62	0.00	21.78	21.78
25	93.92	66.84	66.84	0.00	20.01	20.01
30	93.91	68.91	68.91	0.00	18.45	18.44
35	93.91	70.72	70.72	0.00	17.07	17.07
40	93.93	72.37	72.37	0.00	15.85	15.85
45	93.87	73.86	73.86	0.00	14.76	14.76
50	93.91	75.21	75.21	0.00	13.77	13.77
55	93.91	76.43	76.43	0.00	12.87	12.87
60	93.89	77.53	77.53	0.00	12.04	12.04
65	93.88	78.64	78.64	0.00	11.25	11.25
70	93.89	79.67	79.67	0.00	10.51	10.51
75	93.89	80.68	80.68	0.00	9.79	9.79
80	93.90	81.78	81.78	0.00	9.08	9.08
85	93.91	82.82	82.82	0.00	8.37	8.37
90	93.86	83.84	83.84	0.00	7.66	7.66
95	93.92	85.00	85.00	0.00	6.89	6.89
100	93.90	86.37	86.37	0.00	6.05	6.05

ตารางที่ ข.15 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสองเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 15$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.89	66.12	66.12	0.00	24.30	24.30
5	93.87	66.29	66.29	0.00	23.88	23.88
10	93.84	68.60	68.60	0.00	20.56	20.56
15	93.90	70.04	70.04	0.00	18.97	18.97
20	93.88	71.58	71.58	0.00	17.53	17.52
25	93.92	72.89	72.89	0.00	16.27	16.27
30	93.96	74.26	74.26	0.00	15.11	15.12
35	93.91	75.47	75.47	0.00	14.09	14.09
40	93.90	76.66	76.66	0.00	13.14	13.14
45	93.92	77.82	77.82	0.00	12.25	12.25
50	93.92	78.91	78.91	0.00	11.44	11.44
55	93.90	79.84	79.84	0.00	10.69	10.69
60	93.88	80.84	80.84	0.00	9.97	9.97
65	93.92	81.79	81.79	0.00	9.28	9.28
70	93.88	82.75	82.75	0.00	8.61	8.61
75	93.91	83.60	83.60	0.00	7.97	7.97
80	93.93	84.58	84.58	0.00	7.31	7.31
85	93.93	85.51	85.51	0.00	6.66	6.66
90	93.87	86.52	86.52	0.00	6.00	6.00
95	93.90	87.55	87.55	0.01	5.29	5.29
100	93.91	88.66	88.66	0.00	4.54	4.54

ตารางที่ ข.16 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสองเฟสโหลดดีเมื่อ $R_f = 20$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.84	73.02	73.02	0.00	19.21	19.21
5	93.85	73.17	73.17	0.00	18.94	18.94
10	93.88	74.52	74.52	0.00	16.64	16.64
15	93.87	75.42	75.42	0.00	15.52	15.52
20	93.89	76.42	76.42	0.00	14.45	14.45
25	93.89	77.36	77.36	0.00	13.50	13.50
30	93.91	78.24	78.24	0.00	12.62	12.61
35	93.87	79.25	79.25	0.00	11.79	11.79
40	93.91	80.09	80.09	0.00	11.03	11.03
45	93.91	80.90	80.90	0.00	10.31	10.31
50	93.92	81.79	81.79	0.00	9.63	9.63
55	93.92	82.57	82.57	0.00	8.99	8.99
60	93.89	83.40	83.40	0.00	8.37	8.37
65	93.92	84.24	84.24	0.00	7.77	7.77
70	93.88	85.05	85.05	0.00	7.18	7.18
75	93.92	85.85	85.85	0.00	6.60	6.60
80	93.91	86.55	86.55	0.00	6.04	6.04
85	93.89	87.45	87.45	0.00	5.45	5.45
90	93.88	88.28	88.28	0.00	4.86	4.85
95	93.91	89.14	89.14	0.00	4.24	4.24
100	93.89	90.08	90.08	0.00	3.59	3.59

ตารางที่ ข.17 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสองเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 25$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.88	77.47	77.47	0.00	15.83	15.84
5	93.86	77.45	77.45	0.00	15.62	15.62
10	93.90	78.37	78.37	0.00	13.90	13.90
15	93.93	79.10	79.10	0.01	13.02	13.02
20	93.92	79.68	79.68	0.00	12.22	12.22
25	93.85	80.38	80.38	0.00	11.47	11.47
30	93.88	81.19	81.19	0.00	10.74	10.74
35	93.95	81.85	81.85	0.00	10.06	10.06
40	93.89	82.50	82.50	0.00	9.44	9.44
45	93.89	83.28	83.28	0.00	8.82	8.82
50	93.93	83.93	83.93	0.00	8.25	8.25
55	93.90	84.56	84.56	0.00	7.70	7.70
60	93.90	85.34	85.34	0.00	7.15	7.15
65	93.91	86.01	86.01	0.00	6.63	6.63
70	93.94	86.59	86.59	0.00	6.12	6.12
75	93.90	87.28	87.28	0.00	5.61	5.61
80	93.89	88.06	88.06	0.00	5.09	5.09
85	93.88	88.76	88.76	0.00	4.58	4.58
90	93.91	89.47	89.47	0.00	4.05	4.05
95	93.95	90.15	90.15	0.00	3.51	3.51
100	93.89	90.94	90.94	0.00	2.95	2.95

ตารางที่ ข.18 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสองเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 30$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.89	80.32	80.32	0.00	13.41	13.41
5	93.91	80.38	80.38	0.00	13.25	13.25
10	93.90	81.04	81.04	0.00	11.90	11.90
15	93.92	81.61	81.61	0.00	11.19	11.19
20	93.91	82.09	82.09	0.00	10.53	10.53
25	93.93	82.61	82.61	0.00	9.91	9.91
30	93.89	83.26	83.26	0.00	9.31	9.31
35	93.94	83.79	83.79	0.00	8.74	8.74
40	93.91	84.41	84.41	0.00	8.20	8.20
45	93.91	84.90	84.90	0.00	7.69	7.69
50	93.91	85.55	85.55	0.00	7.18	7.18
55	93.92	86.09	86.09	0.00	6.70	6.70
60	93.91	86.68	86.68	0.00	6.22	6.22
65	93.93	87.21	87.21	0.00	5.76	5.76
70	93.91	87.88	87.88	0.00	5.30	5.30
75	93.91	88.36	88.36	0.00	4.85	4.85
80	93.91	88.95	88.95	0.00	4.40	4.40
85	93.88	89.64	89.64	0.00	3.94	3.94
90	93.88	90.24	90.24	0.00	3.47	3.47
95	93.90	90.86	90.86	0.00	3.00	3.00
100	93.88	91.47	91.47	0.00	2.51	2.51

ตารางที่ ข.19 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสองเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 35$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.88	82.34	82.34	0.00	11.63	11.63
5	93.94	82.35	82.35	0.00	11.50	11.50
10	93.89	83.00	83.00	0.00	10.38	10.38
15	93.87	83.40	83.40	0.00	9.80	9.80
20	93.90	83.82	83.82	0.00	9.24	9.24
25	93.91	84.32	84.32	0.00	8.71	8.71
30	93.89	84.76	84.76	0.00	8.20	8.20
35	93.90	85.26	85.26	0.00	7.71	7.71
40	93.93	85.80	85.80	0.00	7.23	7.23
45	93.91	86.15	86.15	0.00	6.79	6.79
50	93.90	86.76	86.76	0.00	6.34	6.34
55	93.90	87.26	87.26	0.00	5.91	5.91
60	93.93	87.69	87.69	0.00	5.49	5.49
65	93.89	88.17	88.17	0.00	5.08	5.08
70	93.89	88.75	88.75	0.00	4.67	4.67
75	93.84	89.13	89.13	0.00	4.27	4.27
80	93.92	89.72	89.72	0.00	3.86	3.86
85	93.89	90.31	90.31	0.00	3.44	3.44
90	93.88	90.81	90.81	0.00	3.03	3.03
95	93.88	91.39	91.39	0.00	2.61	2.61
100	93.93	91.81	91.81	0.00	2.17	2.17

ตารางที่ ข.20 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสองเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 40$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.84	83.89	83.89	0.00	10.27	10.27
5	93.85	83.92	83.92	0.00	10.15	10.15
10	93.93	84.45	84.45	0.00	9.20	9.20
15	93.88	84.80	84.80	0.00	8.70	8.70
20	93.92	85.10	85.10	0.00	8.22	8.22
25	93.91	85.51	85.51	0.00	7.76	7.76
30	93.87	85.97	85.97	0.00	7.32	7.32
35	93.97	86.42	86.42	0.00	6.88	6.88
40	93.91	86.73	86.73	0.00	6.47	6.47
45	93.90	87.22	87.22	0.00	6.06	6.06
50	93.90	87.69	87.69	0.00	5.67	5.67
55	93.90	88.10	88.10	0.00	5.29	5.29
60	93.89	88.58	88.58	0.00	4.91	4.91
65	93.88	89.01	89.01	0.00	4.54	4.53
70	93.89	89.46	89.46	0.00	4.17	4.17
75	93.89	89.88	89.88	0.00	3.80	3.80
80	93.88	90.33	90.33	0.00	3.43	3.43
85	93.87	90.81	90.81	0.00	3.06	3.06
90	93.88	91.21	91.21	0.00	2.69	2.69
95	93.90	91.74	91.74	0.00	2.30	2.30
100	93.86	92.07	92.07	0.00	1.92	1.92

ตารางที่ ข.21 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสองเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 45$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.83	85.09	85.09	0.00	9.18	9.18
5	93.90	85.04	85.04	0.00	9.08	9.08
10	93.90	85.54	85.54	0.00	8.26	8.26
15	93.87	85.88	85.88	0.00	7.82	7.82
20	93.94	86.16	86.16	0.00	7.40	7.40
25	93.90	86.54	86.54	0.00	6.99	6.99
30	93.88	86.85	86.85	0.00	6.60	6.60
35	93.87	87.19	87.19	0.00	6.22	6.22
40	93.89	87.57	87.57	0.00	5.84	5.84
45	93.92	87.93	87.93	0.00	5.48	5.48
50	93.88	88.33	88.33	0.00	5.13	5.13
55	93.90	88.80	88.80	0.00	4.77	4.77
60	93.96	89.12	89.12	0.00	4.43	4.43
65	93.91	89.59	89.59	0.00	4.09	4.09
70	93.90	89.93	89.93	0.00	3.76	3.76
75	93.90	90.33	90.33	0.00	3.42	3.42
80	93.90	90.78	90.78	0.00	3.09	3.09
85	93.93	91.12	91.12	0.00	2.75	2.75
90	93.88	91.55	91.55	0.00	2.41	2.41
95	93.90	92.00	92.00	0.00	2.06	2.06
100	93.85	92.39	92.39	0.00	1.72	1.72

ตารางที่ ข.22 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสองเฟสฟอลต์เมื่อ $R_f = 50$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	93.92	85.93	85.93	0.00	8.30	8.29
5	93.86	86.01	86.01	0.00	8.22	8.22
10	93.86	86.47	86.47	0.00	7.48	7.48
15	93.94	86.72	86.72	0.00	7.09	7.09
20	93.88	87.05	87.05	0.00	6.72	6.72
25	93.88	87.25	87.25	0.00	6.36	6.36
30	93.93	87.60	87.60	0.00	6.00	6.00
35	93.91	87.93	87.93	0.00	5.66	5.66
40	93.93	88.27	88.27	0.00	5.32	5.32
45	93.90	88.57	88.57	0.00	4.99	4.99
50	93.89	88.91	88.91	0.00	4.67	4.67
55	93.88	89.37	89.37	0.00	4.35	4.35
60	93.91	89.67	89.67	0.00	4.04	4.04
65	93.90	90.04	90.04	0.00	3.73	3.73
70	93.93	90.31	90.31	0.00	3.42	3.42
75	93.91	90.66	90.66	0.00	3.11	3.11
80	93.90	91.03	91.03	0.00	2.81	2.80
85	93.92	91.46	91.46	0.00	2.49	2.49
90	93.82	91.88	91.88	0.00	2.19	2.19
95	93.89	92.19	92.19	0.00	1.87	1.87
100	93.87	92.50	92.50	0.00	1.55	1.55

ตารางที่ ข.23 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสองเฟสลงกราวด์โฟลด์เมื่อ $R_f = 1e-6$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	99.85	0.00	0.00	2.39	65.88	70.01
5	99.15	6.23	6.06	2.10	62.37	65.86
10	96.36	36.29	35.16	0.94	43.33	44.95
15	95.81	44.92	43.52	0.68	37.31	38.64
20	95.36	51.13	49.73	0.51	32.78	33.89
25	95.09	55.87	54.52	0.38	29.27	30.23
30	94.87	59.67	58.32	0.28	26.44	27.30
35	94.68	62.73	61.48	0.20	24.11	24.88
40	94.52	65.28	64.10	0.13	22.16	22.86
45	94.38	67.45	66.31	0.06	20.51	21.16
50	94.30	69.32	68.19	0.00	19.09	19.69
55	94.14	70.91	69.87	0.06	17.85	18.41
60	94.03	72.33	71.31	0.13	16.76	17.29
65	93.90	73.56	72.59	0.20	15.80	16.30
70	93.79	74.65	73.73	0.28	14.96	15.43
75	93.62	75.64	74.73	0.38	14.19	14.64
80	93.43	76.50	75.64	0.51	13.51	13.93
85	93.16	77.22	76.52	0.68	12.89	13.28
90	92.79	77.91	77.21	0.94	12.34	12.72
95	92.10	78.47	77.83	1.40	11.84	12.21
100	90.80	78.84	78.29	2.39	11.43	11.81

ตารางที่ ข.24 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสองเฟสลงกราวด์โฟลด์เมื่อ $R_f = 5$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	97.66	47.50	50.45	1.94	51.00	54.07
5	97.40	49.05	47.83	1.75	48.21	52.12
10	95.91	59.85	46.00	0.87	34.30	38.91
15	95.48	63.54	50.01	0.64	30.04	34.05
20	95.16	66.40	54.04	0.48	26.79	30.26
25	94.92	68.77	57.63	0.36	24.18	27.21
30	94.74	70.78	60.75	0.27	22.04	24.71
35	94.58	72.53	63.44	0.19	20.23	22.62
40	94.44	74.07	65.77	0.12	18.68	20.84
45	94.33	75.53	67.75	0.06	17.34	19.33
50	94.20	76.74	69.57	0.00	16.16	17.98
55	94.10	77.83	71.20	0.06	15.10	16.79
60	93.99	78.87	72.65	0.12	14.15	15.73
65	93.88	79.84	73.97	0.19	13.29	14.77
70	93.73	80.76	75.19	0.27	12.50	13.90
75	93.61	81.66	76.32	0.36	11.77	13.10
80	93.44	82.54	77.41	0.48	11.08	12.33
85	93.21	83.40	78.51	0.64	10.43	11.60
90	92.92	84.28	79.66	0.87	9.81	10.85
95	92.48	85.29	80.88	1.24	9.23	10.07
100	91.74	86.27	82.58	1.94	8.73	9.08

ตารางที่ ข.25 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสองเฟสลงกราวด์โฟลด์เมื่อ $R_f = 10$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	95.89	68.28	72.33	1.43	36.70	38.79
5	95.88	68.64	70.50	1.34	35.08	38.03
10	95.40	73.01	63.86	0.76	26.06	31.12
15	95.14	74.89	64.10	0.58	23.20	27.96
20	94.94	76.41	65.29	0.44	20.99	25.30
25	94.76	77.66	66.84	0.34	19.17	23.04
30	94.59	78.74	68.51	0.25	17.62	21.12
35	94.49	79.80	70.08	0.18	16.30	19.46
40	94.36	80.71	71.64	0.12	15.12	18.00
45	94.26	81.57	73.09	0.06	14.08	16.71
50	94.17	82.39	74.45	0.00	13.13	15.56
55	94.06	83.19	75.74	0.06	12.26	14.52
60	93.97	83.95	76.96	0.12	11.47	13.56
65	93.87	84.70	78.12	0.18	10.72	12.68
70	93.76	85.39	79.30	0.25	10.01	11.83
75	93.63	86.14	80.43	0.34	9.34	11.03
80	93.51	86.88	81.59	0.44	8.69	10.24
85	93.30	87.61	82.85	0.58	8.05	9.43
90	93.13	88.43	84.15	0.76	7.43	8.59
95	92.87	89.26	85.69	1.03	6.82	7.63
100	92.63	90.33	87.41	1.43	6.23	6.48

ตารางที่ ข.26 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสองเฟสลงกราวด์โฟลด์เมื่อ $R_f = 15$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	95.02	77.46	81.30	1.09	27.78	29.07
5	95.05	77.47	80.18	1.04	26.78	28.73
10	95.01	79.51	74.50	0.65	20.63	24.89
15	94.88	80.69	73.73	0.51	18.51	22.82
20	94.73	81.66	73.82	0.40	16.85	20.96
25	94.58	82.50	74.38	0.31	15.48	19.30
30	94.48	83.25	75.17	0.23	14.31	17.84
35	94.37	83.93	76.09	0.17	13.28	16.52
40	94.28	84.59	77.05	0.11	12.36	15.35
45	94.20	85.31	77.97	0.05	11.53	14.29
50	94.12	85.81	79.02	0.00	10.75	13.30
55	94.03	86.36	80.03	0.05	10.04	12.39
60	93.94	86.95	80.99	0.11	9.37	11.54
65	93.86	87.48	81.99	0.17	8.73	10.74
70	93.78	88.10	82.93	0.23	8.12	9.96
75	93.64	88.62	84.00	0.31	7.53	9.20
80	93.55	89.19	85.04	0.40	6.96	8.44
85	93.43	89.88	86.07	0.51	6.40	7.66
90	93.31	90.42	87.31	0.65	5.84	6.82
95	93.18	91.23	88.48	0.84	5.28	5.90
100	93.11	92.15	89.74	1.09	4.70	4.85

ตารางที่ ข.27 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสองเฟสลงกราวด์โฟลด์เมื่อ $R_f = 20$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	94.59	82.22	85.57	0.87	22.12	22.95
5	94.62	82.24	84.83	0.84	21.48	22.75
10	94.70	83.17	80.59	0.56	17.02	20.35
15	94.64	83.97	79.66	0.45	15.36	18.93
20	94.55	84.60	79.42	0.36	14.01	17.57
25	94.46	85.23	79.55	0.28	12.91	16.32
30	94.39	85.84	79.89	0.21	11.96	15.18
35	94.31	86.36	80.43	0.15	11.12	14.12
40	94.22	86.85	81.08	0.10	10.36	13.16
45	94.14	87.32	81.78	0.05	9.66	12.26
50	94.08	87.77	82.50	0.00	9.02	11.42
55	93.99	88.23	83.27	0.05	8.42	10.64
60	93.92	88.68	84.05	0.10	7.84	9.89
65	93.83	89.13	84.84	0.15	7.30	9.16
70	93.79	89.56	85.65	0.21	6.77	8.46
75	93.70	90.11	86.43	0.28	6.27	7.76
80	93.61	90.57	87.31	0.36	5.77	7.05
85	93.52	90.96	88.30	0.45	5.27	6.32
90	93.44	91.57	89.16	0.56	4.78	5.55
95	93.35	92.12	90.17	0.70	4.27	4.73
100	93.39	92.80	91.08	0.87	3.72	3.83

ตารางที่ ข.28 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสองเฟสลงกราวด์โฟลด์เมื่อ $R_f = 25$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	94.34	84.98	87.93	0.72	18.30	18.87
5	94.37	84.91	87.44	0.70	17.82	18.73
10	94.48	85.37	84.30	0.49	14.45	17.06
15	94.47	85.90	83.46	0.40	13.10	16.01
20	94.41	86.47	83.06	0.32	12.01	14.99
25	94.36	86.94	83.02	0.25	11.08	14.00
30	94.31	87.39	83.19	0.19	10.27	13.08
35	94.23	87.84	83.51	0.14	9.56	12.22
40	94.17	88.29	83.91	0.09	8.92	11.41
45	94.10	88.64	84.45	0.05	8.31	10.64
50	94.05	89.01	85.00	0.00	7.76	9.92
55	93.99	89.38	85.59	0.05	7.24	9.23
60	93.93	89.75	86.21	0.09	6.74	8.56
65	93.86	90.22	86.79	0.14	6.27	7.92
70	93.80	90.49	87.54	0.19	5.80	7.28
75	93.73	90.86	88.23	0.25	5.35	6.64
80	93.66	91.34	88.88	0.32	4.92	6.00
85	93.58	91.70	89.68	0.40	4.47	5.34
90	93.52	92.16	90.41	0.49	4.03	4.65
95	93.51	92.64	91.14	0.60	3.57	3.92
100	93.52	93.20	91.82	0.72	3.07	3.15

ตารางที่ ข.29 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสองเฟสลงกราวด์โฟลด์เมื่อ $R_f = 30$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	94.21	86.74	89.36	0.61	15.57	15.98
5	94.23	86.69	89.00	0.59	15.21	15.87
10	94.34	86.89	86.64	0.43	12.55	14.61
15	94.37	87.23	85.94	0.36	11.43	13.80
20	94.32	87.69	85.55	0.29	10.51	12.98
25	94.27	88.10	85.43	0.23	9.71	12.19
30	94.22	88.50	85.49	0.18	9.02	11.43
35	94.18	88.90	85.66	0.13	8.40	10.70
40	94.10	89.25	85.98	0.08	7.83	10.01
45	94.08	89.53	86.37	0.04	7.30	9.35
50	94.02	89.90	86.77	0.00	6.82	8.71
55	93.98	90.20	87.24	0.04	6.36	8.10
60	93.93	90.56	87.71	0.08	5.92	7.51
65	93.88	90.82	88.28	0.13	5.49	6.93
70	93.81	91.21	88.79	0.18	5.09	6.35
75	93.74	91.45	89.45	0.23	4.68	5.77
80	93.68	91.80	90.03	0.29	4.28	5.19
85	93.66	92.15	90.60	0.36	3.89	4.59
90	93.61	92.56	91.18	0.43	3.49	3.97
95	93.58	93.01	91.73	0.52	3.07	3.33
100	93.63	93.50	92.19	0.61	2.61	2.67

ตารางที่ ข.30 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสองเฟสลงกราวด์โฟลด์เมื่อ $R_f = 35$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	94.11	88.00	90.27	0.53	13.54	13.83
5	94.13	87.94	90.02	0.52	13.25	13.75
10	94.24	88.06	88.17	0.38	11.10	12.74
15	94.25	88.30	87.60	0.32	10.15	12.08
20	94.23	88.72	87.20	0.26	9.36	11.41
25	94.18	88.99	87.12	0.21	8.66	10.75
30	94.15	89.35	87.10	0.16	8.05	10.10
35	94.14	89.63	87.23	0.12	7.50	9.48
40	94.06	89.89	87.52	0.08	6.99	8.88
45	94.04	90.17	87.80	0.04	6.52	8.30
50	94.00	90.48	88.11	0.00	6.09	7.74
55	93.95	90.73	88.52	0.04	5.67	7.19
60	93.91	91.00	88.93	0.08	5.28	6.66
65	93.85	91.28	89.37	0.12	4.89	6.13
70	93.82	91.55	89.82	0.16	4.52	5.61
75	93.76	91.83	90.32	0.21	4.16	5.09
80	93.72	92.12	90.81	0.26	3.80	4.56
85	93.68	92.47	91.28	0.32	3.44	4.02
90	93.65	92.86	91.71	0.38	3.07	3.46
95	93.64	93.15	92.22	0.46	2.68	2.89
100	93.67	93.57	92.59	0.53	2.27	2.31

ตารางที่ ข.31 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสองเฟสลงกราวด์โฟลด์เมื่อ $R_f = 40$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	94.06	88.89	90.91	0.47	11.97	12.19
5	94.07	88.83	90.72	0.46	11.73	12.12
10	94.16	88.86	89.29	0.34	9.93	11.27
15	94.17	89.04	88.82	0.29	9.13	10.72
20	94.18	89.33	88.50	0.24	8.43	10.15
25	94.15	89.64	88.33	0.19	7.82	9.59
30	94.11	89.85	88.38	0.15	7.27	9.03
35	94.07	90.11	88.48	0.11	6.77	8.49
40	94.04	90.37	88.65	0.07	6.32	7.96
45	94.00	90.63	88.88	0.04	5.90	7.45
50	93.97	90.88	89.14	0.00	5.50	6.94
55	93.93	91.12	89.47	0.04	5.12	6.45
60	93.89	91.45	89.75	0.07	4.77	5.97
65	93.85	91.61	90.19	0.11	4.42	5.49
70	93.81	91.94	90.51	0.15	4.08	5.01
75	93.78	92.13	90.96	0.19	3.74	4.54
80	93.74	92.48	91.29	0.24	3.42	4.05
85	93.72	92.68	91.76	0.29	3.08	3.56
90	93.70	93.00	92.13	0.35	2.74	3.06
95	93.68	93.29	92.53	0.41	2.38	2.55
100	93.71	93.73	92.74	0.47	2.00	2.04

ตารางที่ ข.32 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสองเฟสลงกราวด์โฟลด์เมื่อ $R_f = 45$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	94.03	89.57	91.35	0.42	10.72	10.89
5	94.04	89.47	91.23	0.41	10.52	10.83
10	94.12	89.50	90.07	0.31	8.99	10.09
15	94.12	89.64	89.70	0.26	8.29	9.62
20	93.99	89.83	89.45	0.22	7.67	9.14
25	94.08	90.09	89.32	0.18	7.12	8.64
30	94.06	90.32	89.30	0.14	6.63	8.15
35	94.06	90.55	89.35	0.10	6.19	7.67
40	94.02	90.86	89.43	0.07	5.78	7.20
45	93.93	91.12	89.61	0.03	5.40	6.73
50	93.96	91.31	89.84	0.00	5.03	6.28
55	93.92	91.51	90.12	0.03	4.68	5.83
60	93.88	91.67	90.48	0.07	4.35	5.39
65	93.83	91.93	90.76	0.10	4.03	4.96
70	93.82	92.16	91.07	0.14	3.72	4.52
75	93.79	92.43	91.37	0.18	3.41	4.08
80	93.77	92.59	91.79	0.22	3.10	3.64
85	93.74	92.84	92.13	0.26	2.79	3.20
90	93.72	93.11	92.45	0.31	2.47	2.74
95	93.74	93.39	92.73	0.37	2.14	2.28
100	93.74	93.75	92.94	0.42	1.79	1.82

ตารางที่ ข.33 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีสองเฟสลงกราวด์โฟลด์เมื่อ $R_f = 50$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	94.00	90.05	91.73	0.38	9.70	9.84
5	94.02	90.07	91.57	0.37	9.54	9.78
10	94.06	89.99	90.70	0.29	8.21	9.13
15	94.07	90.12	90.36	0.24	7.59	8.72
20	94.09	90.32	90.12	0.20	7.04	8.29
25	94.07	90.49	90.03	0.16	6.55	7.85
30	94.02	90.69	90.03	0.13	6.10	7.42
35	94.02	90.90	90.06	0.09	5.69	6.98
40	94.00	91.10	90.18	0.06	5.32	6.56
45	93.97	91.30	90.33	0.03	4.96	6.14
50	93.95	91.56	90.46	0.00	4.63	5.72
55	93.91	91.69	90.75	0.03	4.31	5.32
60	93.89	91.89	91.00	0.06	4.00	4.91
65	93.85	92.10	91.26	0.10	3.70	4.51
70	93.86	92.32	91.54	0.13	3.41	4.11
75	93.81	92.53	91.82	0.16	3.13	3.71
80	93.78	92.75	92.10	0.20	2.84	3.30
85	93.75	92.99	92.40	0.24	2.55	2.90
90	93.75	93.25	92.63	0.29	2.25	2.48
95	93.75	93.50	92.88	0.33	1.95	2.06
100	93.75	93.81	93.05	0.38	1.62	1.65

ตารางที่ ข.34 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีเฟสลงกราวด์โฟลด์เมื่อ $R_f = 1e-6$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	0.00	98.06	96.30	66.58	2.55	2.55
5	7.41	97.86	96.07	61.31	2.32	2.32
10	43.26	96.01	95.01	35.92	1.20	1.20
15	52.69	95.57	94.74	29.23	0.90	0.90
20	59.11	95.38	94.65	24.68	0.68	0.68
25	63.77	94.95	94.28	21.37	0.52	0.52
30	67.33	94.88	94.40	18.86	0.39	0.39
35	70.08	94.70	94.23	16.90	0.28	0.28
40	72.31	94.13	93.89	15.32	0.18	0.18
45	74.11	94.38	94.10	14.04	0.09	0.09
50	75.64	94.24	94.08	12.97	0.00	0.00
55	76.93	94.40	94.28	12.07	0.09	0.09
60	78.00	94.09	94.02	11.31	0.18	0.18
65	78.89	93.82	93.67	10.67	0.28	0.28
70	79.68	93.64	93.69	10.13	0.39	0.39
75	80.30	93.50	93.41	9.68	0.52	0.52
80	80.81	93.71	93.61	9.33	0.68	0.68
85	81.19	93.56	93.71	9.07	0.90	0.90
90	81.44	92.89	93.06	8.93	1.20	1.20
95	81.38	92.93	93.14	8.99	1.68	1.68
100	80.85	92.00	92.44	9.43	2.55	2.55

ตารางที่ ข.35 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 5$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	47.95	98.66	92.88	52.51	2.01	2.01
5	47.10	98.25	93.20	49.43	1.87	1.87
10	54.47	96.36	93.90	31.79	1.07	1.07
15	59.78	95.82	93.93	26.46	0.82	0.82
20	64.13	95.41	93.98	22.64	0.63	0.63
25	67.54	95.13	94.00	19.79	0.48	0.48
30	70.33	94.87	94.02	17.58	0.36	0.36
35	72.57	94.75	93.95	15.81	0.26	0.26
40	74.46	94.58	93.95	14.38	0.17	0.17
45	76.03	94.41	93.79	13.19	0.08	0.08
50	77.37	94.30	93.93	12.20	0.00	0.00
55	78.55	94.23	93.91	11.34	0.08	0.08
60	79.57	94.03	93.95	10.62	0.17	0.17
65	80.45	93.91	93.90	9.99	0.26	0.26
70	81.22	93.88	93.77	9.44	0.36	0.36
75	81.93	93.71	93.72	8.97	0.48	0.48
80	82.57	93.48	93.68	8.56	0.63	0.63
85	83.19	93.21	93.69	8.21	0.82	0.82
90	83.82	92.84	93.79	7.92	1.07	1.07
95	84.53	92.42	93.80	7.67	1.43	1.43
100	85.53	91.55	94.03	7.46	2.02	2.02

ตารางที่ ข.36 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 10$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	69.77	97.36	92.20	38.20	1.46	1.46
5	68.55	97.31	92.43	36.65	1.39	1.39
10	66.99	96.10	93.27	26.48	0.89	0.89
15	68.81	95.68	93.56	22.75	0.70	0.70
20	70.87	95.36	93.64	19.88	0.55	0.55
25	72.86	95.12	93.70	17.62	0.43	0.43
30	74.63	94.91	93.74	15.80	0.33	0.33
35	76.20	94.74	93.71	14.31	0.24	0.24
40	77.62	94.52	93.85	13.09	0.15	0.15
45	78.83	94.43	93.82	12.03	0.08	0.08
50	79.94	94.31	93.81	11.13	0.00	0.00
55	80.94	94.13	93.87	10.35	0.08	0.08
60	81.86	93.98	93.88	9.66	0.15	0.15
65	82.70	93.87	93.93	9.05	0.24	0.24
70	83.49	93.73	93.93	8.50	0.33	0.33
75	84.25	93.57	93.93	8.00	0.43	0.43
80	84.98	93.46	93.81	7.52	0.55	0.55
85	85.85	93.16	94.00	7.06	0.70	0.70
90	86.75	92.97	94.00	6.59	0.89	0.89
95	87.87	92.54	94.25	6.07	1.13	1.13
100	89.35	92.02	94.58	5.41	1.46	1.46

ตารางที่ ข.37 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 15$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	79.01	96.68	92.31	28.84	1.11	1.11
5	78.19	96.51	92.30	28.02	1.06	1.06
10	75.32	95.81	93.05	21.86	0.73	0.73
15	75.63	95.52	93.28	19.28	0.59	0.59
20	76.50	95.25	93.43	17.18	0.48	0.48
25	77.52	95.08	93.53	15.43	0.38	0.38
30	78.62	94.74	93.64	14.00	0.29	0.29
35	79.67	94.63	93.73	12.77	0.21	0.21
40	80.66	94.54	93.75	11.71	0.14	0.14
45	81.59	94.35	93.80	10.80	0.07	0.07
50	82.44	94.28	93.77	10.00	0.00	0.00
55	83.27	94.16	93.80	9.29	0.07	0.07
60	84.08	93.99	93.90	8.65	0.14	0.14
65	84.82	93.94	93.80	8.06	0.21	0.21
70	85.57	93.78	93.83	7.52	0.29	0.29
75	86.31	93.65	93.88	7.00	0.38	0.38
80	87.08	93.48	93.95	6.50	0.48	0.48
85	87.95	93.27	94.07	5.99	0.59	0.59
90	88.87	93.03	94.24	5.45	0.73	0.73
95	89.96	92.74	94.38	4.83	0.90	0.90
100	91.20	92.40	94.67	4.10	1.11	1.11

ตารางที่ ข.38 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 20$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	83.71	95.95	92.43	22.91	0.88	0.88
5	83.12	95.92	92.56	22.40	0.85	0.85
10	80.45	95.54	92.99	18.30	0.61	0.61
15	80.28	95.25	93.15	16.45	0.51	0.51
20	80.63	95.01	93.42	14.88	0.41	0.41
25	81.12	94.92	93.46	13.51	0.33	0.33
30	81.77	94.74	93.57	12.34	0.26	0.25
35	82.48	94.59	93.65	11.33	0.19	0.19
40	83.20	94.47	93.67	10.44	0.12	0.12
45	83.90	94.31	93.77	9.65	0.06	0.06
50	84.58	94.26	93.72	8.93	0.00	0.00
55	85.25	94.18	93.74	8.29	0.06	0.06
60	85.92	94.05	93.77	7.71	0.12	0.12
65	86.59	93.92	93.82	7.16	0.19	0.19
70	87.25	93.79	93.88	6.64	0.26	0.26
75	87.93	93.65	93.86	6.13	0.33	0.33
80	88.67	93.46	94.07	5.63	0.41	0.41
85	89.45	93.29	94.16	5.11	0.51	0.51
90	90.26	93.15	94.30	4.56	0.61	0.61
95	91.17	92.98	94.39	3.95	0.74	0.74
100	92.14	92.74	94.59	3.25	0.88	0.88

ตารางที่ ข.39 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 25$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	86.34	95.55	92.59	18.91	0.73	0.72
5	85.90	95.55	92.65	18.55	0.70	0.70
10	83.76	95.22	92.98	15.61	0.52	0.52
15	83.44	95.11	93.21	14.21	0.44	0.44
20	83.53	94.82	93.31	12.99	0.36	0.36
25	83.78	94.75	93.49	11.90	0.29	0.29
30	84.22	94.60	93.55	10.94	0.23	0.23
35	84.68	94.50	93.61	10.09	0.17	0.17
40	85.19	94.41	93.61	9.32	0.11	0.11
45	85.74	94.22	93.73	8.64	0.05	0.05
50	86.30	94.15	93.78	8.01	0.00	0.00
55	86.84	94.08	93.82	7.43	0.05	0.05
60	87.41	93.99	93.79	6.88	0.11	0.11
65	87.97	93.87	93.93	6.38	0.17	0.17
70	88.59	93.73	93.97	5.89	0.23	0.23
75	89.19	93.65	94.04	5.40	0.29	0.29
80	89.82	93.51	94.06	4.92	0.36	0.36
85	90.46	93.43	94.05	4.41	0.44	0.44
90	91.18	93.20	94.26	3.89	0.52	0.52
95	91.93	93.06	94.40	3.32	0.62	0.62
100	92.65	92.89	94.55	2.68	0.73	0.73

ตารางที่ ข.40 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 30$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	87.93	95.38	92.78	16.05	0.62	0.62
5	87.69	95.25	92.81	15.79	0.60	0.60
10	85.96	95.05	93.14	13.55	0.45	0.45
15	85.62	94.90	93.20	12.45	0.38	0.38
20	85.58	94.77	93.41	11.46	0.32	0.32
25	85.70	94.67	93.49	10.56	0.26	0.26
30	85.99	94.50	93.57	9.77	0.20	0.20
35	86.31	94.49	93.58	9.03	0.15	0.15
40	86.70	94.44	93.65	8.36	0.10	0.10
45	87.17	94.27	93.68	7.76	0.05	0.05
50	87.61	94.12	93.79	7.20	0.00	0.00
55	88.09	94.01	93.85	6.68	0.05	0.05
60	88.57	93.96	93.90	6.19	0.10	0.10
65	89.05	93.92	93.90	5.71	0.15	0.15
70	89.57	93.77	93.95	5.25	0.20	0.20
75	90.09	93.62	94.04	4.80	0.26	0.26
80	90.64	93.55	94.11	4.34	0.32	0.32
85	91.20	93.47	94.06	3.87	0.38	0.38
90	91.79	93.26	94.25	3.38	0.46	0.46
95	92.38	93.19	94.29	2.85	0.53	0.53
100	92.93	92.99	94.50	2.28	0.62	0.62

ตารางที่ ข.41 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 35$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	89.13	95.07	92.96	13.94	0.53	0.53
5	88.84	95.07	92.97	13.72	0.52	0.52
10	87.46	94.90	93.20	11.94	0.40	0.40
15	87.14	94.79	93.34	11.04	0.34	0.34
20	87.12	94.63	93.43	10.22	0.28	0.28
25	87.18	94.53	93.52	9.47	0.23	0.23
30	87.34	94.43	93.58	8.78	0.18	0.18
35	87.62	94.29	93.62	8.15	0.13	0.13
40	87.92	94.22	93.67	7.57	0.09	0.09
45	88.28	94.17	93.73	7.03	0.04	0.04
50	88.64	94.14	93.72	6.52	0.00	0.00
55	89.04	94.02	93.86	6.05	0.04	0.04
60	89.45	93.89	93.90	5.59	0.09	0.09
65	89.87	93.87	93.90	5.15	0.13	0.13
70	90.33	93.78	93.96	4.72	0.18	0.18
75	90.77	93.71	93.92	4.30	0.23	0.23
80	91.24	93.60	94.05	3.87	0.28	0.28
85	91.69	93.62	94.01	3.43	0.34	0.34
90	92.20	93.32	94.26	2.97	0.40	0.40
95	92.69	93.21	94.33	2.49	0.47	0.47
100	93.14	93.17	94.42	1.98	0.53	0.53

ตารางที่ ข.42 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 40$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	89.88	94.91	93.08	12.30	0.47	0.47
5	89.69	94.93	93.15	12.13	0.46	0.46
10	88.56	94.78	93.24	10.65	0.36	0.36
15	88.30	94.71	93.31	9.90	0.30	0.30
20	88.20	94.54	93.45	9.20	0.26	0.26
25	88.27	94.45	93.54	8.56	0.21	0.21
30	88.37	94.46	93.52	7.95	0.16	0.16
35	88.59	94.27	93.68	7.40	0.12	0.12
40	88.83	94.19	93.70	6.88	0.08	0.08
45	89.12	94.12	93.78	6.40	0.04	0.04
50	89.47	94.01	93.82	5.94	0.00	0.00
55	89.77	94.02	93.82	5.50	0.04	0.04
60	90.15	93.90	93.86	5.08	0.08	0.08
65	90.50	93.80	93.95	4.68	0.12	0.12
70	90.90	93.77	93.99	4.28	0.16	0.16
75	91.26	93.70	94.07	3.88	0.21	0.21
80	91.76	93.40	93.84	3.48	0.26	0.26
85	92.10	93.46	94.14	3.08	0.31	0.31
90	92.50	93.39	94.23	2.65	0.36	0.36
95	92.89	93.33	94.31	2.21	0.41	0.41
100	93.29	93.22	94.37	1.75	0.47	0.47

ตารางที่ ข.43 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีเฟสลงกราวด์ฟอลต์เมื่อ $R_f = 45$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	90.47	94.76	93.13	11.01	0.42	0.42
5	90.30	94.76	93.16	10.86	0.41	0.41
10	89.42	94.58	93.37	9.61	0.32	0.32
15	89.18	94.54	93.42	8.97	0.28	0.28
20	89.06	94.50	93.49	8.36	0.23	0.23
25	89.09	94.46	93.49	7.79	0.19	0.19
30	89.18	94.39	93.56	7.26	0.15	0.15
35	89.32	94.31	93.63	6.76	0.11	0.11
40	89.57	94.15	93.71	6.30	0.07	0.07
45	89.78	94.10	93.78	5.86	0.04	0.04
50	90.08	94.06	93.80	5.44	0.00	0.00
55	90.38	93.97	93.89	5.04	0.04	0.04
60	90.67	93.87	93.92	4.66	0.07	0.07
65	91.00	93.82	93.89	4.28	0.11	0.11
70	91.35	93.78	94.04	3.91	0.15	0.15
75	91.66	93.70	94.06	3.53	0.19	0.19
80	92.04	93.62	94.03	3.16	0.23	0.23
85	92.40	93.55	94.13	2.78	0.28	0.28
90	92.73	93.42	94.22	2.39	0.32	0.32
95	93.06	93.40	94.26	1.99	0.37	0.37
100	93.39	93.27	94.35	1.56	0.42	0.42

ตารางที่ ข.44 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบกรณีเฟสลงกราวด์โฟลด์เมื่อ $R_f = 50$ โอห์ม

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)			ขนาดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C
0	90.91	94.68	93.17	9.96	0.38	0.38
5	90.77	94.67	93.22	9.83	0.37	0.37
10	90.03	94.55	93.37	8.74	0.29	0.29
15	89.81	94.51	93.44	8.18	0.25	0.25
20	89.74	94.43	93.51	7.65	0.21	0.21
25	89.74	94.31	93.55	7.15	0.17	0.17
30	89.83	94.30	93.68	6.67	0.14	0.14
35	89.94	94.25	93.66	6.22	0.10	0.10
40	90.13	94.12	93.76	5.80	0.07	0.07
45	90.35	94.08	93.77	5.40	0.03	0.03
50	90.58	94.05	93.80	5.01	0.00	0.00
55	90.84	93.98	93.89	4.65	0.03	0.03
60	91.11	93.90	93.92	4.29	0.07	0.07
65	91.39	93.77	93.86	3.93	0.10	0.10
70	91.67	93.84	93.88	3.58	0.14	0.14
75	91.97	93.71	94.05	3.24	0.17	0.17
80	92.29	93.59	94.07	2.89	0.21	0.21
85	92.60	93.53	94.15	2.54	0.25	0.25
90	92.88	93.46	94.19	2.18	0.29	0.29
95	93.17	93.43	94.23	1.80	0.34	0.34
100	93.50	93.31	94.34	1.41	0.38	0.38



ภาคผนวก ค

โปรแกรม Malab สำหรับระบบนิเวศ-พืช

ส่วนการโปรแกรมนิวโร-ฟัซซี (Fuzzy logic Tool Box of Matlab) ที่ใช้ในงานวิจัย

% ส่วนของอินพุต

VA=[] ; % Phase A Voltage set

VB=[] ; % Phase B Voltage set

VC=[] ; % Phase C Voltage set

IA=[] ; % Phase A Current set

IB=[] ; % Phase B Current set

IC=[] ; % Phase C Current set

Input=[VA IA IB IC] ; % Input

Traget=[] ; %Target Output

% กำหนดค่าเริ่มต้น

trn_data=[Input Traget];

epoch_n=10000;

mf_n=[3 3 3 3];

step_size = 0.01;

error_goal = 0;

mf_type = str2mat('gbellmf','gbellmf','gbellmf','gbellmf');

% สร้างเมทริกกระบบอนุมานฟัซซี

in_fismat = genfis1(trn_data, mf_n, mf_type);

% การสอนระบบ

[trn_out_fismat trn_error step_size] = ...

anfis(trn_data, in_fismat, [epoch_n nan step_size nan nan], [1,1,1,1]);

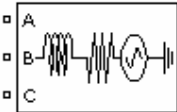
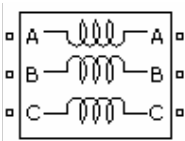

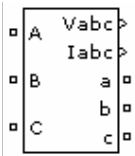

ภาคผนวก ง

โปรแกรม Malab/Simulink สำหรับการจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง


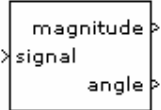


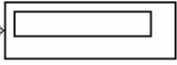
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โปรแกรม Matlab/Simulink เป็นโปรแกรมได้รับการพัฒนาและส่งเสริมการขายโดยบริษัท MathWorks โปรแกรม Matlab/Simulink ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับจำลองระบบแบบพลวัต โดยมีบล็อกไดอะแกรมใช้สร้างแบบจำลองและแสดงผลดังตารางที่ จ.1 และตารางที่ จ.2

ตารางที่ จ.1 บล็อกไดอะแกรมใช้สร้างแบบจำลองและแสดงผล

บล็อก	การใช้งาน
	แหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส
	อิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างเฟสแบบสามเฟส ใช้สร้างสายส่ง
	ฟอลต์แบบ 3 เฟส ใช้สร้างการลัดวงจรแบบต่าง ๆ
	เครื่องมือวัดกระแสและแรงดันแบบ 3 เฟส
	เครื่องมือวัดแรงดันแบบ 1 เฟส

ตารางที่ จ.2 บล็อกไดอะแกรมใช้สร้างแบบจำลองและแสดงผล


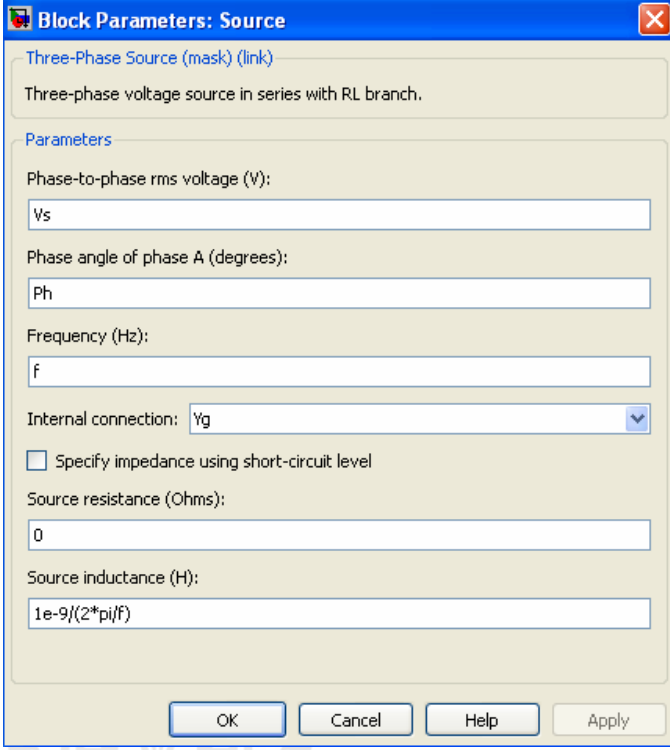
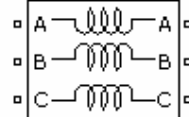
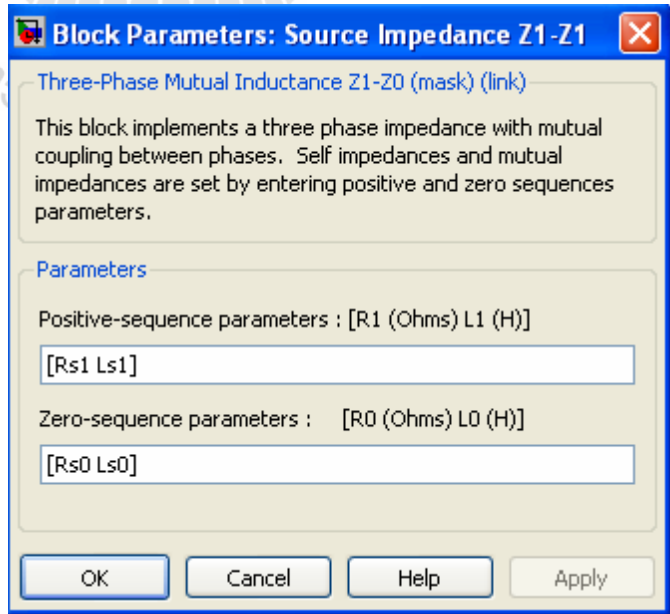
บล็อก	การใช้งาน
	เครื่องมือวัดกระแสแบบ 1 เฟส
	ฟูริเยร์ ใช้แปลงสัญญาณไซน์ให้เป็นปริมาณเชิงขั้วที่มีขนาดและมุม
	ตัวแปลงปริมาณเชิงขั้วให้เป็นปริมาณเชิงซ้อน
	Scope แสดงค่าเป็นรูปกราฟ
	Display แสดงค่าเป็นตัวเลข

การสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าโดย Matlab/Simulink ค่าพารามิเตอร์เป็นสิ่งจำเป็น โดยจะต้องมีการกำหนดตัวแปรใน M-file ให้โปรแกรมรับรู้ก่อน

แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับพร้อมกับอิมพีแดนซ์ภายใน ใช้บล็อกแหล่งกำเนิดแรงดันสามเฟสและบล็อกอิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างเฟสแบบสามเฟส ค่าพารามิเตอร์เป็นดังตารางที่

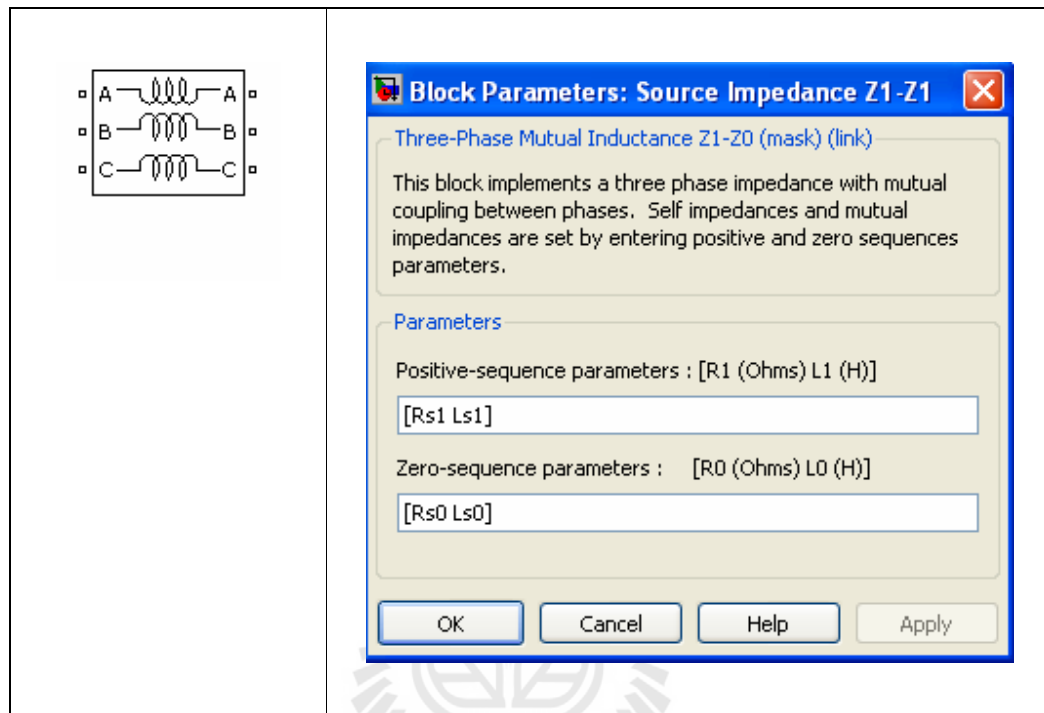
จ.3

ตารางที่ จ.3 พารามิเตอร์แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับพร้อมอิมพีแดนซ์ภายใน

สายส่งไฟฟ้าแบบสามเฟสใช้บล็อกอิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างเฟสแบบสามเฟสปารามิเตอร์เป็นตามตารางที่ จ.4

ตารางที่ จ.4 พารามิเตอร์สายส่งแบบสามเฟส



The image shows a circuit diagram of a three-phase mutual inductance block on the left and its parameter dialog box on the right. The diagram shows three phases (A, B, C) with mutual inductance between them. The dialog box is titled "Block Parameters: Source Impedance Z1-Z1" and contains the following text:

Three-Phase Mutual Inductance Z1-Z0 (mask) (link)

This block implements a three phase impedance with mutual coupling between phases. Self impedances and mutual impedances are set by entering positive and zero sequences parameters.

Parameters

Positive-sequence parameters : [R1 (Ohms) L1 (H)]

[Rs1 Ls1]

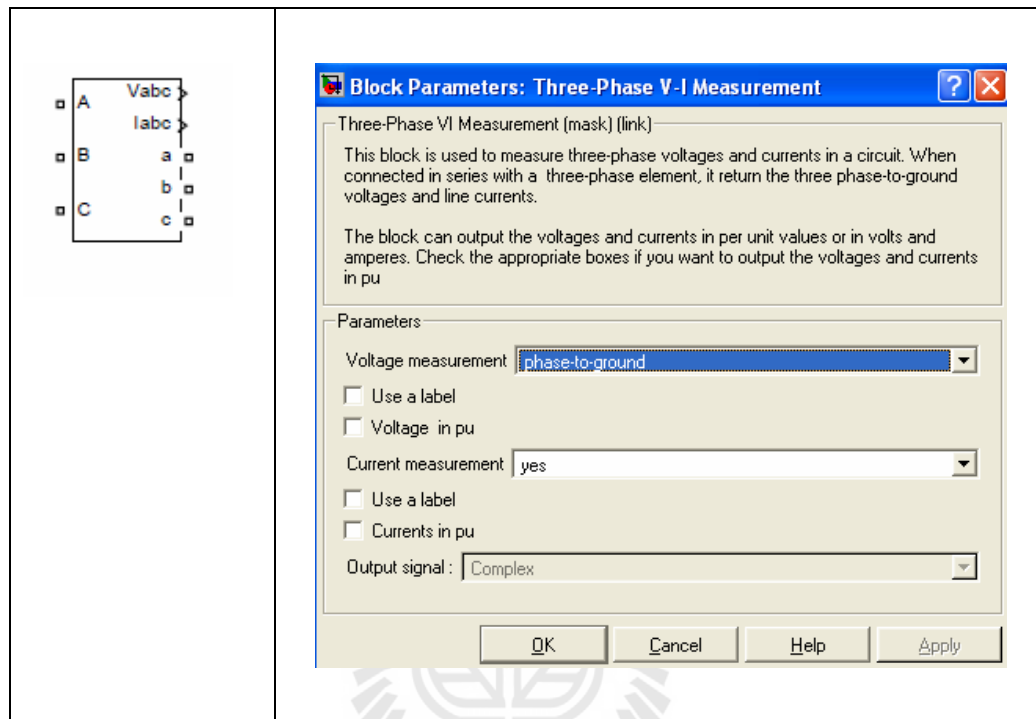
Zero-sequence parameters : [R0 (Ohms) L0 (H)]

[Rs0 Ls0]

Buttons: OK, Cancel, Help, Apply

การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงกระแสและหม้อแปลงแรงดันตารางที่ จ.5 พารามิเตอร์หม้อแปลง

ตาราง จ.5 หม้อกระแสและหม้อแปลงแรงดัน



การสร้างแบบจำลองฟอลต์ใช้บล็อกฟอลต์สามเฟสสามารถเลือกชนิดการเกิดฟอลต์และความต้านทานฟอลต์ได้ตามต้องการพารามิเตอร์เป็นดังตารางที่ จ.6

ตารางที่ จ.6 พารามิเตอร์ฟอลต์แบบสามเฟส

▣ A

▣ B

▣ C

Block Parameters: Fault ? X

Three-Phase Fault (mask) (link)

Use this block to program a fault (short-circuit) between any phase and the ground. You can define the fault timing directly from the dialog box or apply an external logical signal. If you check the 'External control' box , the external control input will appear.

Parameters

Phase A Fault

Phase B Fault

Phase C Fault

Fault resistances Ron (ohms):

Ground Fault

Ground resistance Rg (ohms):

External control of fault timing:

Transition status [1,0,1 ...]:

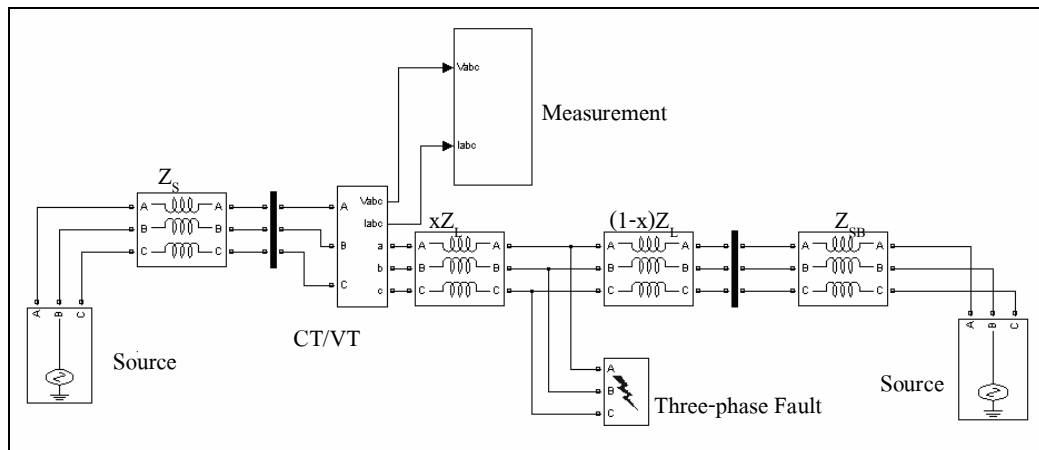
Transition times (s):

Snubbers resistance Rp (ohms):

Snubbers Capacitance Cp (Farad)

Measurements

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ จ.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย



ภาคผนวก จ

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB), 23-24 July 2009, Mahasarakham University, Thailand

Distance Transmission Lines Protection Based on Recurrent Neural Network

Saichoomdee, S. , Oonsivilai, A. , Marungsri, B. , Kulworawanichpong, T. and Pao-La-Or, P.

Alternative and Sustainable Energy Research Unit, Power and Control Research Group,
School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
111 University Street, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand
E-mail: saichoomdee@gmail.com, anant@sut.ac.th, bmsbvee@sut.ac.th ,
thanatch@sut.ac.th, padej@sut.ac.th,

Abstract

The adaptation of protective distance relay to determine the presence and location of faults in a transmission based on the measure of fixed settings such as line impedance has been achieved by the application of several different techniques. However, for the modern power systems a fast, accurate and robust technique for real-time purposes is required. In this paper, the application of recurrent neural network in transmission line protection is demonstrated. The method applies the power system using voltage and current signals to learn the hidden relationship existing in the input patterns. It is observed that the proposed technique is able to identify the precise fault direction more rapidly. System simulations studied show that the proposed approach is able to detect the direction of a fault on a transmission line swiftly and correctly, therefore suitable for the real-time purposes.

Keywords: recurrent neural network; distance protection; power system; relaying.

1. Introduction

Transmission line system is regarded with great importance in power system. Faults that occur frequently with transmission lines system, should affect electricity users. Faults, aforementioned may be caused by neither a single person, animal or natural occurrences. Thus to prevent and decrease damage that would happen, must systematically protect the transmission line system. Transmission line system using distance relay is very popular. In this current, using an intelligent system solves a problem in the remedy of power system widely. For example, dynamic load modeling [8], short term load forecasting [9], stability in power system [10] for transmission lines protection have been using neural network, could test by distance relay [5-6] neural network, electric base will not be used in calculation but, the path calculated will be used which is obtained by the format of learning or the ability to memorize of neural network; accompanied with flexibility in itself makes neural network very interesting. We can use neural network in learning and memorizing the

format of fault and the format of condition changing of power system. Although this might force relay, it protects transmission lines, with increasing precision (zone 1) and can be applied accompanied with distance prevention normally which, hypothetically will help testify the protection of transmission lines become much more accurate.

This paper proposed distance transmission lines protection based on recurrent neural network.

2. Neural Network

The system assembles a mode format from the human brain. The duty and the work of neural, be could built large-sized and could teach the system for the lead gone are usable, especially, the principle works of neural, will find the weight value in work system of neural, then the comparison output beg for neural, that get with target value that fix. If the value output is not equal to target value, the system of neural will find the value of the weight until it reaches the value of output, the new substitute value is equal to target value.



For the neural to be built give with the capability to learn. Must have input and output data to use in comparison. Inspires the use ordered pairs in training network [11-12].

2.1 Recurrent Neural Network

Recurrent network is the connections interval neural in feedback, recurrent neural network structure is shown in Fig 1.

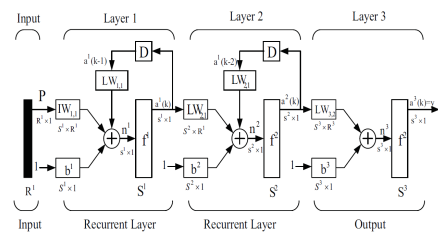


Fig.1: Recurrent neural network structure

Fig.1 Shows recurrent neural network structure; Input patterns have P_1, P_2, \dots, P_R , $a^1(k)$ to be output of hidden layer 1 and to be input of hidden layer 2, $a^2(k)$ to be input of hidden layer 2, $a^3(k)$ to be final output. Have f^1, f^2 and f^3 are transfer function, $a^1(k), a^2(k)$ and $a^3(k)$ can get from the algebraic equation as following could:

$$a^1(k) = f^1(IW_{1,1}P + LW_{1,1}a^1(k-1) + b^1) \tag{1}$$

$$a^2(k) = f^2(LW_{2,1}a^1(k) + LW_{2,1}a^2(k-1) + b^2) \tag{2}$$

$$a^3(k) = f^3(LW_{3,2}a^2(k) + b^3) \tag{3}$$

Whereas:

- $IW_{1,1}$; weights value connections between input layer with hidden layer 1
- $LW_{2,1}$; weights value connections between hidden layer 1 with hidden layer 2
- $LW_{3,2}$; weights value connections between hidden layer 1 with output layer
- b^1 ; bias value in hidden layer 1
- b^2 ; bias value in hidden layer 2
- b^3 ; bias value in output layer 3

Training neural network by gradient descent algorithm with tan sigmoid transfer function using neural network toolbox of matlab program [3]

$$f[.] = \text{logsig}(n, b) = \frac{1}{1 + e^{-(n+b)}} \tag{4}$$

Whereas:

- n ; summation output
- b ; bias adjust.

3. Application Recurrent Neural Network for Transmission Lines Protection

Fig.2 shows recurrent neural network for transmission lines protection structure. Fig. 3 the recurrent neural network for classifying the input patterns into expected categories. There are three input signals required at the input layer in recurrent neural network: V, I, and X. V is voltage, I is current, and X is apparent impedance, the measurement of the faulted transmission line. The output consists of recurrent neural network which has a continuous-value output in the region [0, 1]. Output 1 indicates tripping, 0 indicates non-tripping.

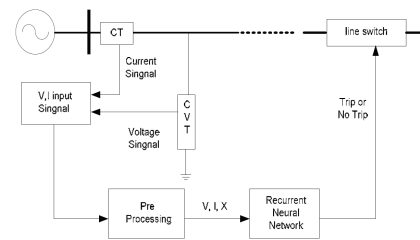


Fig.2: Recurrent neural network for transmission lines protection structure

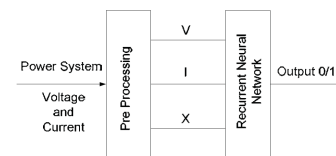


Fig.3: Input patterns classify of recurrent neural network



4. Simulation and Result

Training patterns and test patterns got from fault simulation on transmission line of power system study using MATLAB and SIMULINK. Fig.4 depicts the 115 kV, 50 Hz simulated system one-line diagram. The other related parameters of the simulated system are shown in Table 1.



Fig. 4: One-line diagram of simulation system

Table 1: The parameters of the simulation transmission system

<p>Bus 1 : Voltage 115 kV , 50 Hz Equivalent source impedance $Z_1 = 0.00499 + j0.03384$ p.u. /km $Z_0 = 0.00425 + j0.0369$ p.u. /km Length of transmission line: 100 km Line constant: $Z_1 = 0.085811 + j0.36204$ p.u./km $Z_0 = 0.25485 + j1.4223$ p.u./km Bus 2 : Load= 3.3+ j2.2 MVA</p>

The test will begin with fault occurrence simulation at the distance 0,20,40,60,80,84,88,92,96 and 100 % of the total line length. Every the distance fault occurrence has fault resistance 0.000001,5,10, 15, 20, 25,30,35,40 and 50 ohms respectively. Already lead the data has that go to test with the recurrent neural network. Zone 1 protection is 80 % of the total line length. Fig. 4 shows the phase A current waveform, and the phase A voltage waveform for the single phase to ground fault, the fault resistance is 10 ohms, at times 20 ms-60 ms. Some part calculations of pattern data tests for the recurrent neural network in case of fault resistance 5 ohms are shown in Table 2.

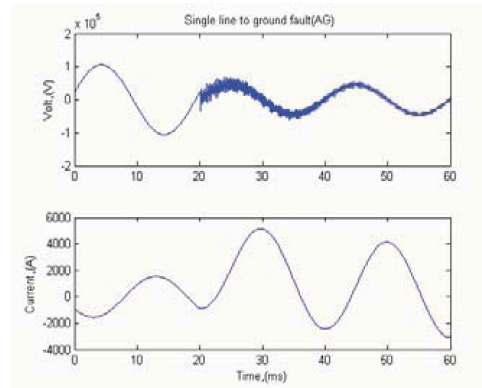


Fig .5: Voltage and current waveform a-g fault

Table 2: The pattern data tests in case of fault resistance 10 ohm

Distance (%)	Magnitude		Angle	
	VA	IA	VA	IA
0	114820.0	18635.00	-0.400	-8.612
20	114780.0	13840.00	-0.302	-19.739
40	114810.0	10910.00	-0.251	-22.768
60	114840.0	9108.50	-0.224	-22.813
80	114860.0	7996.70	-0.208	-22.112
84	114860.0	7844.70	-0.206	-22.055
88	114870.0	7718.50	-0.204	-22.064
92	114870.0	7621.60	-0.202	-22.149
96	114870.0	7559.00	-0.201	-22.314
100	114870.0	7537.70	-0.200	-22.544





Table 3: Accuracy transmission line protection

Distance (%)	Accuracy (%)	Error (%)
0	100	0
20	100	0
40	100	0
60	100	0
80	100	0
84	90	10
88	100	0
92	100	0
96	100	0
100	100	0

5. Conclusion

This paper analyzes recurrent neural network intelligent computational techniques application associated with protective distance relay for transmission line protection. Be the one method transmission line prevention, the back manages to apply recurrent neural network in transmission line prevention. From testing it is correct in 90 transmission line percentage preventions, from the data tests 100 all the data set tests. Thus, recurrent neural network with the ability to relay one type in transmission line prevention. Therefore recurrent neural network could be used as an effective tool for real-time digital relaying purposes. That might allow distance relay work more accuracy and precision.

6. References

- [1] Anderson P.M., Power System Protection, McGraw-Hill, 1999.
- [2] Warwick, K., Ekwue, A. and Aggarwal, R., Artificial Intelligence Techniques in Power System, London, Institution of Electrical Engineers, 1997.
- [3] Howard B. Demuth, Mark Beale, Neural Network Toolbox for Use with MATLAB, 1998.
- [4] Martin T. Hagan, Howard B. Demuth, Mark Beale, Neural Network Design, Oklahoma State University, 1996.
- [5] Qi W., Swift, G.W., McLaren, P.G., Castro, A.V., An Artificial Neural Network Application to Distance Protection, Intelligent System Application to Power Systems International Conference, pp. 226-230, 1996.
- [6] Coury, D. V. and Jorge, D. C., Artificial Neural Network Approach to Distance Protection of Transmission Lines, IEEE Transactions on Power Delivery, pp 102-108, 1998.
- [7] Wu, L.C., Liu, C.W. and Chen C.H., Modeling and Testing of a Digital Distance Relay Using MATLAB/SIMULINK, IEEE Transactions on Power Delivery, pp.253-259, 2005
- [8] Oonsivilai, A. and El-Hawary, M.E., Power System Dynamic Load Modeling Using Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System, In Proceedings of the IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 1217 - 1222, 1999.
- [9] Oonsivilai, A. and El-Hawary, M.E., Wavelet Neural Network Based Short Term Load Forecasting of Electric Power System Commercial Load, In Proceedings of the IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 1223 - 1228, 1999.
- [10] Oonsivilai, A. and El-Hawary, M.E., A Self-Organizing Fuzzy Power System Stabilizer. In Proceedings of the IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 197 - 200, 1999.
- [11] Oonsivilai, A., Boonwuitiwat, R., Kulworawanichpong, T. and Pao-La-Or, P., Artificial Neural Network Approach to Electric Field Approximation around Overhead Power Transmission Lines, EuroPes 2007. Spain.2007
- [12] Oonsivilai, R., and Oonsivilai, A., Probabilistic Neural Network Classification for Model β -Glucan Suspensions. Proceeding of the 7th WSEAS International Conference on Simulation, Modeling and Optimization, pp. 59-164, 2007.



Appliance of Recurrent Neural Network toward Distance Transmission Lines Protection

Anant Oonsivilai

Alternative and Sustainable Energy Research Unit,
Power and Control Research Group, School of Electrical
Engineering, Institute of Engineering, Suranaree
University of Technology, 111 University Street,
Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand
e-mail : anant@sut.ac.th

Sanom Saichoomdee

Alternative and Sustainable Energy Research Unit,
Power and Control Research Group, School of Electrical
Engineering, Institute of Engineering, Suranaree
University of Technology, 111 University Street,
Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand
e-mail : saichoomdee@gmail.com

Abstract—To determine the presence and location of faults in a transmission by the adaptation of protective distance relay based on the measurement of fixed settings as line impedance is achieved by several different techniques. Moreover, a fast, accurate and robust technique for real-time purposes is required for the modern power systems. The appliance of recurrent neural network in transmission line protection is demonstrated in this paper. The method applies the power system via voltage and current signals to learn the hidden relationship presented in the input patterns. It is experiential that the proposed technique is competent to identify the particular fault direction more speedily. System simulations studied show that the proposed approach is able to distinguish the direction of a fault on a transmission line swiftly and correctly, therefore suitable for the real-time purposes.

Keywords—recurrent neural network; feed-forward neural network ;transmission lines protection; relaying.

I. INTRODUCTION

Transmission line system is regarded with great importance in power system. Faults that occur frequently with transmission lines system, should affect electricity users. Faults, aforementioned may be caused by neither a single person, animal or natural occurrences. Thus to prevent and decrease damage that would happen, must systematically protect the transmission line system. Transmission line system using distance relay is very popular. Protective relaying is one of several features of power system design concerned with minimizing damage to equipment and interruptions to service when electrical failures occur. Distance relays are generally used for phase fault primary and back-up protection on sub-transmission lines, and on transmission lines where high-speed automatic reclosing is not necessary to maintain stability and where the short time delay for end-zone faults can be tolerated [1], [13].

Several distance relaying techniques have been expressed in several publications; where the presence and location of faults in a transmission. The fundamental principle is based on the measure of particular fixed settings, mainly the impedance at fundamental frequency between the relay location and the fault point [1], and [6]. By using modern digital signal.

processing methods, the distance relay techniques has been improved, particularly, the decision time which has been shortened [2], [13], [14], and [15].

In this context, using an intelligent system solves a problem in the remedy of power system widely. For example, dynamic load modeling [8], short term load forecasting [9], stability in power system [10] for transmission lines protection have been using neural network, could test by distance relay [5], and [6] neural network, electric base will not be used in calculation but, the path calculated will be used which is obtained by the format of learning or the ability to memorize of neural network; accompanied with flexibility in itself makes neural network very interesting. We can use neural network in learning and memorizing the format of fault and the format of condition changing of power system. Although this might force relay, it protects transmission lines, with increasing precision (zone1) and can be applied accompanied with distance prevention normally which, hypothetically will help testify the protection of transmission lines become much more accurate.

This paper proposed distance transmission lines protection based on recurrent neural network.

II. NEURAL NETWORK

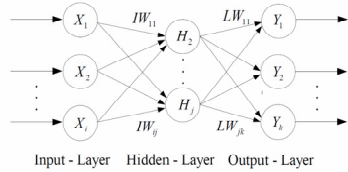
Artificial Neural Networks (ANN) or simply Neural Network (NN) are simplified to imitate central nervous system been motivated by the computing performed by human brain.

ANN is defined in [16] and [17] as a data processing system consisting of a large number of simple highly interconnected processing elements (artificial neuron) in architecture inspired by the structure of cerebral cortex of the brain. The duty and the work of neural, it could built large-sized and could teach the system for the lead gone are usable, especially, the principle works of neural, will find the weight value in work system of neural, then the comparison output beg for neural, that get with target value that fix. If the value output is not equal to target value, the system of neural will find the value of the weight until it reaches the value of output, the new substitute value is equal to target value. For the neural to be built give

with the capability to learn. Must have input and output data to use in comparison, inspires the use ordered pairs in training network [11],and [12].

A. Feed-forward Neural Networks

Feed-forward neural networks can be classified in a single layer or multilayer feed-forward neural networks. In this paper, only multilayer is considered. Multilayer FNN architecture comprises of input-layer(X); hidden-layer(H); and output-layer(Y); as shown in Fig. 1 [17].



X_i - input neurons; H_j - hidden neurons; Y_k - output neurons;
 IW_{ij} - input-hidden layer weights; LW_{jk} -hidden-output layer weights

Fig. 1 Multilayer Feed-forward neural network architecture

The FNN in Fig. 1 is based on connected neurons in a specified fashion which consists of n set input-layer (X); h set of hidden-layer (H) and o set of output-layer (Y). The hidden layer unit j receives input i through synaptic weights IW_{ij} , $i = 1, 2, \dots, n$. Unit j computes a function of the input signal X_i and the weights IW_{ij} , and passes its output in the next successive layer and the equations are as shown in (1) and (2) [16] and [17].

Towards the hidden layer

$$net_j(t) = \sum_{i=1}^n x_i(t)IW_{ij} + \theta_j$$

$$y_j(t) = f(net_j(t)) \tag{1}$$

Away from the hidden layer

$$net_k(t) = \sum_{j=1}^k y_j(t)LW_{jk} + \theta_k$$

$$y_k(t) = f(net_k(t)) \tag{2}$$

where,
 n is the number of inputs,
 f is the layer output function (of any differentiable type)
 θ_j and θ_k are the biases at the respective layers.

B. Recurrent Neural Network

Recurrent network is the connections interval neural in feedback; recurrent neural network structure is shown in Fig 1.This is possible by connecting output of one or more processing elements (PE) in the same or preceding layers. Fig.2 Shows recurrent neural network structure; Input patterns

have P_1, P_2, \dots, P_R , $a^l(k)$ to be output of hidden layer 1 and to be input of hidden layer 2, $a^2(k)$ to be input of hidden layer 2, $a^3(k)$ to be final output. Have f^1 , f^2 and f^3 are transfer function, $a^l(k), a^2(k)$ and $a^3(k)$ can get from the algebraic equation as following could:

$$a^1(k) = f^1(IW_{1,1}P + LW_{1,1}a^1(k-1) + b^1) \tag{3}$$

$$a^2(k) = f^2(LW_{2,1}a^1(k) + LW_{2,1}a^2(k-1) + b^2) \tag{4}$$

$$a^3(k) = f^3(LW_{3,2}a^2(k) + b^3) \tag{5}$$

Whereas:

- $IW_{1,1}$; weights value connections between input layer with hidden layer 1
- $LW_{2,1}$; weights value connections between hidden layer 1 with hidden layer 2
- $LW_{3,2}$;weights value connections between hidden layer 2 with output layer
- b^1 ; bias value in hidden layer 1
- b^2 ; bias value in hidden layer 2
- b^3 ; bias value in output layer 3

Training neural network by gradient descent algorithm with tan sigmoid transfer function using neural network toolbox of MATLAB software [3]

$$f[.] = \text{logsig}(n,b) = \frac{1}{1 + e^{-(n+b)}} \tag{6}$$

Whereas:

- n ; summation output
- b ; bias adjust.

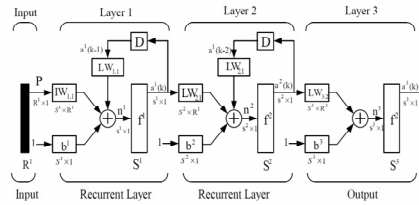


Fig.2 Recurrent neural network structure

III. APPLICATION OF RECURRENT NEURAL NETWORK IN TRANSMISSION LINE PROTECTION

Fig.3 shows recurrent neural network for transmission lines protection structure. Fig.4 the recurrent neural network for classifying the input patterns into expected categories. There are three input signals required at the input layer in recurrent neural network: V, I, and X. V is the voltage, I is the current,

and X is the apparent impedance, the measurement of the faulted transmission line. The output consists of recurrent neural network which has a continuous value output in the region $[0,1]$. Output 1 indicates tripping, 0 indicates non-tripping.

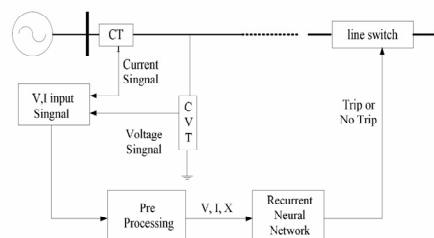


Fig.3 Recurrent neural network for transmission lines protection structure

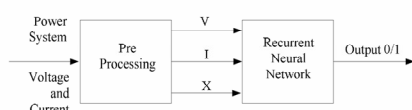


Fig.4 Input patterns classify of recurrent neural network

IV. SIMULATION AND RESULT

Training patterns and test patterns got from fault simulation on transmission line of power system study using MATLAB and SIMULINK. Fig.5 depicts the 115 kV, 50 Hz simulated system one-line diagram. The other related parameters of the simulated system are shown in Table I.



Fig.5. One-line diagram of simulation system

The test will begin with fault occurrence simulation at the distance 0, 20, 40,60,80,84,88,92,96 and 100 % of the total line length. Every the distance fault occurrence has fault resistance 0.000001,5,10, 15, 20, 25,30,35,40 and 50 ohms respectively. Already lead the data has that go to test with the recurrent neural network. Zone 1 protection is 80 % of the total line length. Fig. 6 shows the phase A current waveform, and the phase A voltage waveform for the single phase to ground fault, the fault resistance is 5 ohms, at times 20 ms - 60 ms. Some part calculations of pattern data tests for the recurrent neural network in case of fault resistance 5 ohms are shown in Table II. Accuracy transmissions line protections are show in Table III.

TABLE I
THE PARAMETERS OF THE SIMULATION TRANSMISSION SYSTEM

Bus 1:	Voltage 115 kV , 50 Hz
Equivalent source impedance	$Z1 = 0.00499 + j0.03384$ p.u. /km $Z0 = 0.00425 + j0.0369$ p.u. /km
Length of transmission line:	14.8 km
Line constant:	$Z1 = 0.085811 + j0.36204$ p.u./km $Z0 = 0.25485 + j1.4223$ p.u./km
Bus 2:	Load= 3.3+ j2.2 MVA

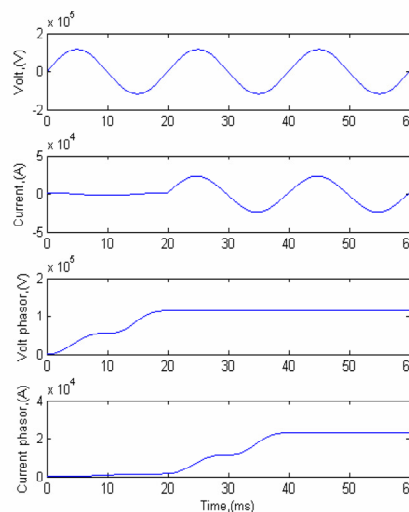


Fig 6. Voltage and current waveform a-g fault

TABLE II
THE PATTERN DATA TESTS IN CASE OF FAULT RESISTANCE 5- OHMS

DISTANCE	MAGNITUDE		ANGLE	
	VA	IA	VA	IA
%				
0	113160.0	80335.0	-1.1259	-34.3005
20	113180.0	73440.0	-0.9656	-38.6286
40	113220.0	68548.0	-0.8586	-41.5762
60	113250.0	65255.0	-0.7885	-43.6064
80	113270.0	63325.0	-0.7467	-44.9036
84	113280.0	63093.0	-0.7416	-45.0751
88	113280.0	62997.0	-0.7394	-45.1486
92	113280.0	62785.0	-0.7344	-45.3182
96	113280.0	62708.0	-0.7326	-45.3852
100	113280.0	62684.0	-0.7319	-45.4113

TABLE III
ACCURACY TRANSMISSION LINE PROTECTION

DISTANCE(%)	ACCURACY(%)	ERROR(%)
0	100	0
20	100	0
40	100	0
60	100	0
80	100	0
84	90	10
88	100	0
92	100	0
96	100	0
100	100	0

V. CONCLUSION

This paper analyzes and demonstrates the recurrent neural network intelligent computational technique application associated with protective distance relay for transmission line protection. The method used is such that, the power system uses voltage and current signals to learn the hidden relationship existing in the input patterns. It is observed that the recurrent neural networks have ability to identify the precise fault direction and more rapidly. This makes it suitable for the real-time purposes. From testing it is correct in 90 transmission line percentage preventions, from the data tests 100 all the data set tests. Thus, recurrent neural network with the ability to relay one type in transmission line prevention. Therefore recurrent neural network could be used as an effective tool for real-time digital relaying purposes. This might allow distance relay work more accuracy and precision.

REFERENCES

- [1] P.M. Anderson, *Power system protection*, McGraw-Hill, 1999.
- [2] K. Warwick, A. Ekwue and R. Aggarwal, *Artificial intelligence techniques in power System*, London, Institution of Electrical Engineers, 1997
- [3] H. B. Demuth, M. Beale, *Neural Network Toolbox for Use with MATLAB*, 1998.
- [4] M. T. Hagan, H. B. Demuth, M. Beale, *Neural Network Design*, Oklahoma State University, 1996.
- [5] W. Qi, G.W. Swift, P. G. McLaren, A. V. Castro, "An artificial neural network application to distance protection". International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, pp. 226-230, 1996.
- [6] D. V. Coury, D. C. Jorge, "Artificial neural network approach to distance protection of transmission lines". IEEE Transactions on Power Delivery, pp. 102-108, 1998.
- [7] L. Wu, C. Liu, C. Chen, "Modeling and testing of a digital distance relay using MATLAB/SIMULINK". IEEE Trans. on Power Delivery, pp.253-259, 2005.
- [8] A. Oonsivilai, and M.E El-Hawary, "Power system dynamic load modeling using adaptive-network-based fuzzy inference system Proceedings of the IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp 1217-1222, 1999.
- [9] A. Oonsivilai, and M.E. El-Hawary, "Wavelet neural network based short term load forecasting of electric power system commercial load". Proceedings of the IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 1223-1228, 1999.
- [10] A. Oonsivilai, and M. E. El-Hawary, "A self-organizing fuzzy power system stabilizer". Proceedings of the IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 197-200, Canada, 1999.
- [11] A. Oonsivilai, R. Boonwutiwiwat, T. Kulworawanichpong, and P. Pao-La-Or, "Artificial neural network approach to electric field approximation around overhead power transmission lines". EuroPes 2007.
- [12] R. Oonsivilai, and A. Oonsivilai, "Probabilistic neural network classification for Model β -Glucan Suspensions". Proceeding of the 7th WSEAS Int. Conf. on Simulation, Modeling and Optimization, pp. 159-164, 2007.
- [13] C. L. Wadhwa, *Electrical Power Systems*, Fourth Edition, New Age International, 2006.
- [14] A. G. Phadke and J. S. Thorp, *Computer Relaying for Power Systems*, John Wiley & Sons, Ltd. 1988.
- [15] A. A. Girgis and R. G. Brown, "Adaptive Kalman Filtering Computer Relaying: Fault Classification Using Voltage Models", *IEEE Transaction on Power Apparatus and System*, Vol. PAS-104, No. 5, pp. 1167-1177, May 1985.
- [16] S. Rajasekaran and G. A. Vijayalakshmi Pai, *Neural Networks, Fuzzy Logic, and Genetic Algorithms: Synthesis and Applications*, Prentice-Hal Ltd., 2003.
- [17] L. H. Tsoukalas, and A. U. R. Uhrig, *Fuzzy and neural in Engineering*, John Wiley and Sons, Inc., 1997.
- [18] S. Saichoomdee, A. Oonsivilai, B. Marungsri, T. Kulworawanichpong and P. Pao-La-Or, "Distance transmission lines protection based on recurrent neural network". International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being.(STISWB), pp. 266-269, 2009

Distance Transmission Line Protection Based on Radial Basis Function Neural Network

Anant Oonsivilai and Sanom Saichoomdee

Abstract— To determine the presence and location of faults in a transmission by the adaptation of protective distance relay based on the measurement of fixed settings as line impedance is achieved by several different techniques. Moreover, a fast, accurate and robust technique for real-time purposes is required for the modern power systems. The appliance of radial basis function neural network in transmission line protection is demonstrated in this paper. The method applies the power system via voltage and current signals to learn the hidden relationship presented in the input patterns. It is experiential that the proposed technique is competent to identify the particular fault direction more speedily. System simulations studied show that the proposed approach is able to distinguish the direction of a fault on a transmission line swiftly and correctly, therefore suitable for the real-time purposes.

Keywords— radial basis function neural network; transmission lines protection; relaying; power system.

I. INTRODUCTION

Transmission line system is regarded with great importance in power system. Faults that occur frequently with transmission lines system, should affect electricity users. Faults, aforementioned may be caused by neither a single person, animal or natural occurrences. Thus to prevent and decrease damage that would happen, must systematically protect the transmission line system. Transmission line system using distance relay is very popular. Protective relaying is one of several features of power system design concerned with minimizing damage to equipment and interruptions to service when electrical failures occur. Distance relays are generally used for phase fault primary and back-up protection on sub-transmission lines, and on transmission lines where high-speed automatic reclosing is not necessary to maintain stability and where the short time delay for end-zone faults can be tolerated [1], [13].

Several distance relaying techniques have been expressed in several publications; where the presence and location of faults

A. Oonsivilai, is with the Suranaree University of Technology, Department of electrical Engineering, Alternative and Sustainable Energy Research Unit, Power and Control Research Group, School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Street, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand (e-mail: anant@sut.ac.th).

S. Saichoomdee, is a research student at Suranaree University of Technology, Department of electrical Engineering, Alternative and Sustainable Energy Research Unit, Power and Control Research Group, School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Street, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand (e-mail: saichoomdee@gmail.com).

in a transmission. The fundamental principle is based on the measure of particular fixed settings, mainly the impedance at fundamental frequency between the relay location and the fault point [1], and [6]. By using modern digital signal processing methods, the distance relay techniques has been improved, particularly, the decision time which has been shortened [2], [13], [14], and [15].

In this context, using an intelligent system solves a problem in the remedy of power system widely. For example, dynamic load modeling [8], short term load forecasting [9], stability in power system [10] for transmission lines protection have been using neural network, could test by distance relay [5],[6],[21] and [22] neural network, electric base will not be used in calculation but, the path calculated will be used which is obtained by the format of learning or the ability to memorize of neural network; accompanied with flexibility in itself makes neural network very interesting. We can use neural network in learning and memorizing the format of fault and the format of condition changing of power system. Although this might force relay, it protects transmission lines, with increasing precision (zone1) and can be applied accompanied with distance prevention normally which, hypothetically will help testify the protection of transmission lines become much more accurate.

This paper proposed distance transmission lines protection based on radial basis function neural network.

II. NEURAL NETWORK

Artificial Neural Networks (ANN) or simply Neural Network (NN) are simplified to imitate central nervous system been motivated by the computing performed by human brain.

ANN is defined in [16] and [17] as a data processing system consisting of a large number of simple highly interconnected processing elements (artificial neuron) in architecture inspired by the structure of cerebral cortex of the brain. The duty and the work of neural, it could built large-sized and could teach the system for the lead gone are usable, especially, the principle works of neural, will find the weight value in work system of neural, then the comparison output beg for neural, that get with target value that fix. If the value output is not equal to target value, the system of neural will find the value of the weight until it reaches the value of output, the new substitute value is equal to target value. For the neural to be built give with the capability to learn. Must have input and output data to use in comparison, inspires the use ordered pairs in training network [11], and [12].

A. Feed-forward Neural Networks

Feed-forward neural networks can be classified in a single layer or multilayer feed-forward neural networks. In this paper, only multilayer is considered. Multilayer FNN architecture comprises of input-layer(X); hidden-layer (H); and output-layer(Y); as shown in Fig. 1 [17].

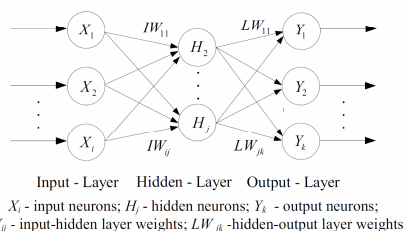


Fig. 1 Multilayer Feed-forward neural network architecture

The FNN in Fig. 1 is based on connected neurons in a specified fashion which consists of n set input-layer (X); h set of hidden-layer (H) and o set of output-layer (Y). The hidden layer unit j receives input i through synaptic weights IW_{ij} , $i = 1, 2, \dots, n$. Unit j computes a function of the input signal X_i and the weights IW_{ij} , and passes its output in the next successive layer and the equations are as shown in (1) and (2) [16] and [17].

Towards the hidden layer

$$net_j(t) = \sum_{i=1}^n x_i(t)IW_{ij} + \theta_j$$

$$y_j(t) = f(net_j(t)) \tag{1}$$

Away from the hidden layer

$$net_k(t) = \sum_{j=1}^h y_j(t)LW_{jk} + \theta_k$$

$$y_k(t) = f(net_k(t)) \tag{2}$$

where,
 n is the number of inputs,
 f is the layer output function (of any differentiable type)
 θ_j and θ_k are the biases at the respective layers.

B. Radial Basis Function Neural Network

Radial basis function neural network architecture consist of three layers: a input layer R^1 , an hidden radial basis layer of S^1 neurons, and an output linear layer of S^2 neurons show in Fig 2.

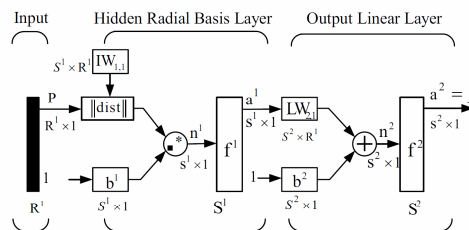


Fig.2 Radial basis function neural network architecture

The input P and the input weight $IW_{i,l}$, and produces a vector having S^1 elements. The elements are the distances between the input and $IW_{i,l}$ formed from the rows of the input weight, will replace the $dist$ and compute by euclidean norm, a^1 to be output of radial basis hidden layer and to be input of output linear layer, a^2 to be final output. Have f^1 is radial basis transfer function, and f^2 is linear transfer function. a^1, a^2 can get from the algebraic equation as following could:

$$a^1 = f^1(\|IW_{1,1} - P\|b^1) \tag{3}$$

$$a^2 = f^2(LW_{2,1}a^1 + b^2) \tag{4}$$

Whereas:

- $IW_{1,1}$; weights value connections between input layer with radial basis hidden layer
- $LW_{2,1}$; weights value connections between radial basis hidden layer with output linear layer
- b^1 ; bias value in radial basis hidden layer
- b^2 ; bias value in output linear layer

Training neural network by radial basis transfer function (f^1) with linear transfer function (f^2) using neural network toolbox of MATLAB software [3]

Radial basis transfer function (radbas)

$$f^1[.] = radbas(n, b) = e^{-(n^2b)} \tag{5}$$

Linear transfer function (purelin)

$$f^2[.] = a(n, b) = (n + b) \tag{6}$$

Whereas:

- n ; summation output
- b ; bias adjust.

III. APPLICATION OF RADIAL BASIS FUNCTION NETWORK IN TRANSMISSION LINE PROTECTION

Fig.3 shows radial basis function neural network for transmission lines protection structure. Fig.4 the radial basis function neural network for classifying the input patterns into expected categories. There are three input signals required at the input layer in radial basis function neural network: V, I, and X. V is the voltage, I is the current, and X is the apparent impedance, the measurement of the faulted transmission line. The output consists of radial basis network which has a continuous value output in the region [0,1]. Output 1 indicates tripping, 0 indicates non-tripping.

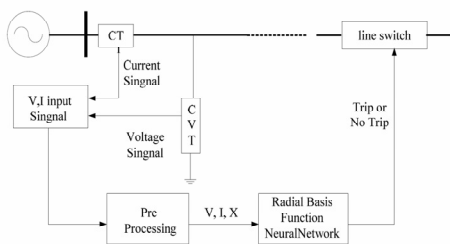


Fig.3 Radial basis function neural network for transmission lines protection structure

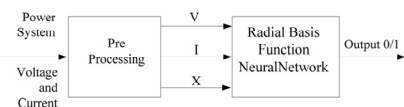


Fig.4 Input patterns classify of radial basis function neural network

IV. SIMULATION AND RESULT

Training patterns and test patterns got from fault simulation on transmission line of power system study using MATLAB and SIMULINK. Fig.5 depicts the 115 kV, 50 Hz simulated system one-line diagram. The other related parameters of the simulated system are shown in Table I.



Fig 5. One-line diagram of simulation system

The test will begin with fault occurrence simulation at the distance 0, 20, 40,60,80,84,88,92,96 and 100 % of the total line length. Every the distance fault occurrence has fault

resistance 0.000001,5,10, 15, 20, 25,30,35,40 and 50 ohms respectively. Already lead the data has that go to test with the radial basis neural network. Zone 1 protection is 80 % of the total line length. Fig. 6 shows the phase A-B-C current waveform, and the phase A-B-C voltage waveform for the three phase fault, the fault resistance is 5 ohms, at times 20ms - 60ms. Some part calculations of pattern data tests for the radial basis function neural network in case of fault resistance 5 ohms are shown in Table II. Accuracy transmissions line protections arc show in Table III.

TABLE II
THE PARAMETERS OF THE SIMULATION TRANSMISSION SYSTEM

Bus 1 :	Voltage 115 kV . 50 Hz
Equivalent source impedance	$Z1 = 0.00499 +j0.03384$ p.u. /km
	$Z0 = 0.00425 +j0.0369$ p.u. /km
Length of transmission line: 50 km	
Line constant:	$Z1 = 0.085811 +j0.36204$ p.u./km
	$Z0 = 0.25485 +j1.4223$ p.u./km
Bus 2 :	Load= 3.3+ j2.2 MVA

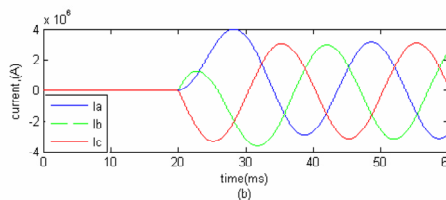
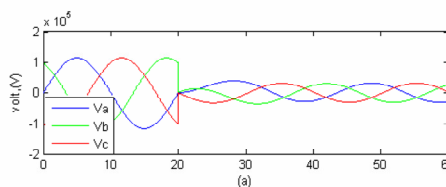


Fig 6. Voltage and current waveform A-B-C fault

TABLE II
THE PATTERN DATA TESTS IN CASE OF A-B-C FAULT
FAULT RESISTANCE 5-OHMS

DISTANCE	MAGNITUDE VOLTAGE			MAGNITUDE CURRENT		
	VA	VB	VC	IA	IB	IC
0	114760	114760	114760	30026	30026	30026
20	114680	114680	114680	19632	19632	19632
40	114750	114750	114750	13909	13909	13909
60	114810	114810	114810	10508	10508	10508
80	114850	114850	114850	8421	8421	8421
84	114860	114860	114860	8133	8133	8133
88	114860	114860	114860	7892	7892	7892
92	114870	114870	114870	7705	7705	7705
96	114870	114870	114870	7582	7582	7582
100	114870	114870	114870	7538	7538	7538

TABLE III
ACCURACY TRANSMISSION LINE PROTECTION

DISTANCE(%)	ACCURACY(%)	ERROR(%)
0	100	0
20	100	0
40	100	0
60	100	0
80	100	0
84	85	15
88	100	0
92	100	0
96	100	0
100	100	0

V. CONCLUSION

This paper analyzes and demonstrates the radial basis function neural network intelligent computational technique application associated with protective distance relay for transmission line protection. The method used is such that, the power system uses voltage and current signals to learn the hidden relationship existing in the input patterns. It is observed that the radial basis function neural network have ability to identify the precise fault direction and more rapidly. This makes it suitable for the real-time purposes. From testing it is correct in 85 transmission line percentage preventions, from the data tests 100 all the data set tests. Thus, radial basis function neural network with the ability to relay one type in transmission line prevention. Therefore radial basis function neural network could be used as an effective tool for real-time digital relaying purposes. This might allow distance relay work more accuracy and precision.

ACKNOWLEDGMENT

The financial support from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, is gratefully acknowledged.

REFERENCES

- [1] P.M. Anderson, *Power system protection*, McGraw-Hill, 1999.
- [2] K. Warwick, A. Ekwue and R. Aggarwal, *Artificial intelligence techniques in power System*, London, Institution of Electrical Engineers, 1997.
- [3] H. B. Demuth, M. Beale, *Neural Network Toolbox for Use with MATLAB*, 1998.
- [4] M. T. Hagan, H. B. Demuth, M. Beale, *Neural Network Design*, Oklahoma State University, 1996.
- [5] W. Qi, G.W. Swift, P. G. McLaren, A. V. Castro, "An artificial neural network application to distance protection". International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, pp. 226-230, 1996.
- [6] D. V. Coury, D. C. Jorge, "Artificial neural network approach to distance protection of transmission lines". IEEE Transactions on Power Delivery, pp. 102-108, 1998.
- [7] L. Wu, C. Liu, C. Chen, "Modeling and testing of a digital distance relay using MATLAB/SIMULINK". IEEE Trans. on Power Delivery, pp.253-259, 2005.
- [8] A. Oonsivilai, and M.E El-Hawary, "Power system dynamic load modeling using adaptive-network-based fuzzy inference system Proceedings of the IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp 1217-1222, 1999.
- [9] A. Oonsivilai, and M.E. El-Hawary, "Wavelet neural network based short term load forecasting of electric power system commercial load". Proceedings of the IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 1223-1228, 1999.
- [10] A. Oonsivilai, and M. E. El-Hawary. "A self-organizing fuzzy power system stabilizer". Proceedings of the IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 197-200, Canada, 1999.
- [11] A. Oonsivilai, R. Boonwitiwivat, T. Kulworawanichpong, and P. Pao-La-Or, "Artificial neural network approach to electric field approximation around overhead power transmission lines". EuroPes 2007.
- [12] R. Oonsivilai, and A. Oonsivilai, "Probabilistic neural network classification for Model β -Glucan Suspensions". Proceeding of the 7th WSEAS Int. Conf. on Simulation, Modeling and Optimization, pp. 159-164, 2007.
- [13] C. L. Wadhwa, *Electrical Power Systems*, Fourth Edition, New Age International, 2006.
- [14] A. G. Phadke and J. S. Thorp, *Computer Relaying for Power Systems*, John Wiley & Sons, Ltd. 1988.
- [15] A. A. Girgis and R. G. Brown, "Adaptive Kalman Filtering Computer Relaying: Fault Classification Using Voltage Models", *IEEE Transaction on Power Apparatus and System*, Vol. PAS-104, No. 5, pp. 1167-1177, May 1985.
- [16] S. Rajasekaran and G. A. Vijayalakshmi Pai, *Neural Networks, Fuzzy Logic, and Genetic Algorithms: Synthesis and Applications*, Prentice-Hal Ltd., 2003.
- [17] L. H. Tsoukalas, and A. U. R. Uhrig, *Fuzzy and neural in Engineering*, John Wiley and Sons, Inc., 1997.
- [18] A. Oonsivilai., and B. Marungsri, "Application of artificial intelligent technique for pratal discharges localization in oil insulating transformer". *WSEAS Transaction on Systems*., Issue 10, Vol 8, October, ISSN : 1109 - 2777, pp: 920 - 929, 2008
- [19] R. Oonsivilai, and A. Oonsivilai. "Apply a genetic algorithm to natural cheese product". Proceeding of the 8th WSEAS International conference on applied computer science (ACS'08). ISSN 1790 - 5109, pp: 269 - 274, 2008.
- [20] A. Oonsivilai., and R. Oonsivilai, "A genetic algorithm application in natural cheese products". *WSEAS Transaction on Systems*. Issue 1, Vol 8, January, ISSN : 1109 - 2777, pp:44-54., 2009
- [21] S. Saichoomdee, A. Oonsivilai ,B. Marungsri, T. Kulworawanichpong and P. Pao-La-Or. "Distance transmission lines protection based on recurrent neural network". International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB), pp. 266-269., 2009
- [22] A. Oonsivilai and S. Saichoomdee "Appliance of Recurrent Neural Network toward Distance Transmission Lines Protection". IEEE TENCON '2009/Singapore, 2009

Distance Transmission Line Protection Based on Radial Basis Function Neural Network

Anant Oonsivilai and Sanom Saichoomdee

Abstract—To determine the presence and location of faults in a transmission by the adaptation of protective distance relay based on the measurement of fixed settings as line impedance is achieved by several different techniques. Moreover, a fast, accurate and robust technique for real-time purposes is required for the modern power systems. The appliance of radial basis function neural network in transmission line protection is demonstrated in this paper. The method applies the power system via voltage and current signals to learn the hidden relationship presented in the input patterns. It is experiential that the proposed technique is competent to identify the particular fault direction more speedily. System simulations studied show that the proposed approach is able to distinguish the direction of a fault on a transmission line swiftly and correctly, therefore suitable for the real-time purposes.

Keywords—radial basis function neural network; transmission lines protection; relaying; power system

I. INTRODUCTION

TRANSMISSION line system is regarded with great importance in power system. Faults that occur frequently with transmission lines system, should affect electricity users. Faults, aforementioned may be caused by neither a single person, animal or natural occurrences. Thus to prevent and decrease damage that would happen, must systematically protect the transmission line system. Transmission line system using distance relay is very popular. Protective relaying is one of several features of power system design concerned with minimizing damage to equipment and interruptions to service when electrical failures occur. Distance relays are generally used for phase fault primary and back-up protection on sub-transmission lines, and on transmission lines where high-speed automatic reclosing is not necessary to maintain stability and where the short time delay for end-zone faults can be tolerated [1], [13].

Several distance relaying techniques have been expressed in several publications; where the presence and location of faults

A. Oonsivilai, is with the Suranaree University of Technology, Department of electrical Engineering, Alternative and Sustainable Energy Research Unit, Power and Control Research Group, School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Street, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand, (e-mail: anant@sut.ac.th).

S. Saichoomdee, is a research student at Suranaree University of Technology, Department of electrical Engineering, Alternative and Sustainable Energy Research Unit, Power and Control Research Group, School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Street, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand (e-mail: saichoomdee@gmail.com).

in a transmission. The fundamental principle is based on the measure of particular fixed settings, mainly the impedance at fundamental frequency between the relay location and the fault point [1], and [6]. By using modern digital signal processing methods, the distance relay techniques has been improved, particularly, the decision time which has been shortened [2], [13], [14], and [15].

In this context, using an intelligent system solves a problem in the remedy of power system widely. For example, dynamic load modeling [8], short term load forecasting [9], stability in power system [10] for transmission lines protection have been using neural network, could test by distance relay [5],[6],[21] and [22] neural network, electric base will not be used in calculation but, the path calculated will be used which is obtained by the format of learning or the ability to memorize of neural network; accompanied with flexibility in itself makes neural network very interesting. We can use neural network in learning and memorizing the format of fault and the format of condition changing of power system. Although this might force relay, it protects transmission lines, with increasing precision (zone1) and can be applied accompanied with distance prevention normally which, hypothetically will help testify the protection of transmission lines become much more accurate.

This paper proposed distance transmission lines protection based on radial basis function neural network.

II. NEURAL NETWORK

Artificial Neural Networks (ANN) or simply Neural Network (NN) are simplified to imitate central nervous system been motivated by the computing performed by human brain.

ANN is defined in [16] and [17] as a data processing system consisting of a large number of simple highly interconnected processing elements (artificial neuron) in architecture inspired by the structure of cerebral cortex of the brain. The duty and the work of neural, it could built large-sized and could teach the system for the lead gone are usable, especially, the principle works of neural, will find the weight value in work system of neural, then the comparison output beg for neural, that get with target value that fix. If the value output is not equal to target value, the system of neural will find the value of the weight until it reaches the value of output, the new substitute value is equal to target value. For the neural to be built give with the capability to learn. Must have input and output data to use in comparison, inspires the use ordered pairs in training network [11], and [12].

A. Feed-forward Neural Networks

Feed-forward neural networks can be classified in a single layer or multilayer feed-forward neural networks. In this paper, only multilayer is considered. Multilayer FNN architecture comprises of input-layer(X); hidden-layer (H); and output-layer(Y); as shown in Fig. 1 [17].

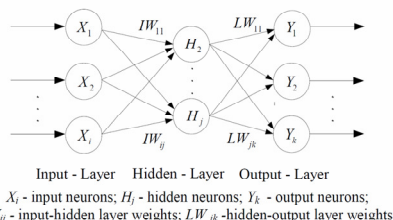


Fig. 1 Multilayer Feed-forward neural network architecture

The FNN in Fig. 1 is based on connected neurons in a specified fashion which consists of n set input-layer (X); h set of hidden-layer (H) and o set of output-layer (Y). The hidden layer unit j receives input i through synoptic weights IW_{ij} , $i = 1, 2, \dots, n$. Unit j computes a function of the input signal X_i and the weights IW_{ij} , and passes its output in the next successive layer and the equations are as shown in (1) and (2) [16] and [17].

Towards the hidden layer

$$net_j(t) = \sum_{i=1}^n x_i(t)IW_{ij} + \theta_j$$

$$y_j(t) = f(net_j(t)) \tag{1}$$

Away from the hidden layer

$$net_k(t) = \sum_{j=1}^k y_j(t)LW_{jk} + \theta_k$$

$$y_k(t) = f(net_k(t)) \tag{2}$$

where,

- n is the number of inputs,
- f is the layer output function (of any differentiable type)
- θ_j and θ_k are the biases at the respective layers.

B. Radial Basis Function Neural Network

Radial basis function neural network architecture consist of three layers: a input layer R^1 , an hidden radial basis layer of S^1 neurons, and an output linear layer of S^2 neurons show in Fig 2.

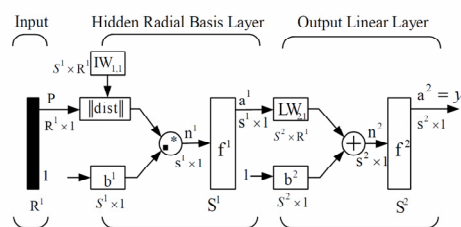


Fig. 2 Radial basis function neural network architecture

The input P and the input weight $IW_{1,1}$, and produces a vector having S^1 elements. The elements are the distances between the input and $IW_{1,1}$ formed from the rows of the input weight, will replace the $dist$ and compute by euclidean norm, a^1 to be output of radial basis hidden layer and to be input of output linear layer, a^2 to be final output. Have f^1 is radial basis transfer function, and f^2 is linear transfer function. a^1, a^2 can get from the algebraic equation as following could:

$$a^1 = f^1(\|IW_{1,1} - P\|b^1) \tag{3}$$

$$a^2 = f^2(LW_{2,1}a^1 + b^2) \tag{4}$$

Whereas:

- $IW_{1,1}$; weights value connections between input layer with radial basis hidden layer
- $LW_{2,1}$; weights value connections between radial basis hidden layer with output linear layer
- b^1 ; bias value in radial basis hidden layer
- b^2 ; bias value in output linear layer

Training neural network by radial basis transfer function (f^1) with linear transfer function (f^2) using neural network toolbox of MATLAB software [3]

Radial basis transfer function (radbas)

$$f^1[.] = radbas(n, b) = e^{-(n^2b)} \tag{5}$$

Linear transfer function (purelin)

$$f^2[.] = a(n, b) = (n + b) \tag{6}$$

Whereas:

- n ; summation output
- b ; bias adjust.

III. APPLICATION OF RADIAL BASIS FUNCTION NETWORK IN TRANSMISSION LINE PROTECTION

Fig.3 shows radial basis function neural network for transmission lines protection structure. Fig.4 the radial basis function neural network for classifying the input patterns into expected categories. There are three input signals required at the input layer in radial basis function neural network: V, I, and X. V is the voltage, I is the current, and X is the apparent impedance, the measurement of the faulted transmission line. The output consists of radial basis network which has a continuous value output in the region [0,1]. Output 1 indicates tripping, 0 indicates non-tripping.

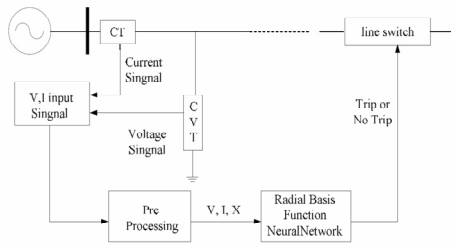


Fig. 3 Radial basis function neural network for transmission lines protection structure

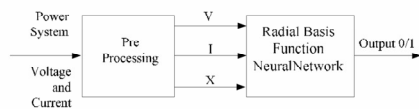


Fig. 4 Input patterns classify of radial basis function neural network

IV. SIMULATION AND RESULT

Training patterns and test patterns got from fault simulation on transmission line of power system study using MATLAB and SIMULINK. Fig.5 depicts the 115 kV, 50 Hz simulated system one-line diagram. The other related parameters of the simulated system are shown in Table I.



Fig. 5. One-line diagram of simulation system

The test will begin with fault occurrence simulation at the distance 0, 20, 40,60,80,84,88,92,96 and 100 % of the total line length. Every the distance fault occurrence has fault

resistance 0.00001,5,10, 15, 20, 25,30,35,40 and 50 ohms respectively. Already lead the data has that go to test with the radial basis neural network. Zone 1 protection is 80 % of the total line length. Fig. 6 shows the phase A-B-C current waveform, and the phase A-B-C voltage waveform for the three phase fault, the fault resistance is 5 ohms, at times 20ms - 60ms. Some part calculations of pattern data tests for the radial basis function neural network in case of fault resistance 5 ohms are shown in Table II. Accuracy transmissions line protections are show in Table III.

TABLE II
THE PARAMETERS OF THE SIMULATION TRANSMISSION SYSTEM

Bus 1:	Voltage 115 kV , 50 Hz
Equivalent source impedance	$Z1 = 0.00499 +j0.03384$ p.u./km
	$Z0 = 0.00425+j0.0369$ p.u./km
Length of transmission line: 50 km	
Line constant:	$Z1 = 0.085811+j0.36204$ p.u./km
	$Z0 = 0.25485+j1.4223$ p.u./km
Bus 2 :	Load= 3.3+ j2.2 MVA

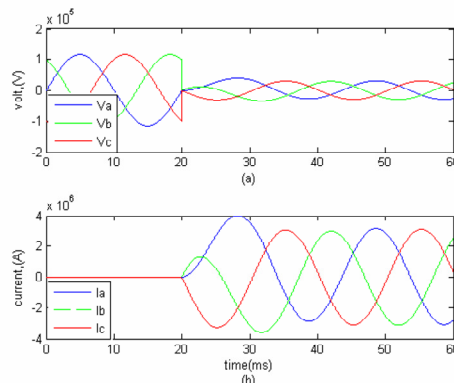


Fig. 6. Voltage and current waveform A-B-C fault

TABLE II
THE PATTERN DATA TESTS IN CASE OF A-B-C FAULT
FAULT RESISTANCE 5- OHMS

DISTANCE	MAGNITUDE VOLTAGE			MAGNITUDE CURRENT		
	%	VA	VB	VC	IA	IB
0	114760	114760	114760	30026	30026	30026
20	114680	114680	114680	19632	19632	19632
40	114750	114750	114750	13909	13909	13909
60	114810	114810	114810	10508	10508	10508
80	114850	114850	114850	8421	8421	8421
84	114860	114860	114860	8133	8133	8133
88	114860	114860	114860	7892	7892	7892
92	114870	114870	114870	7705	7705	7705
96	114870	114870	114870	7582	7582	7582
100	114870	114870	114870	7538	7538	7538

TABLE III
ACCURACY TRANSMISSION LINE PROTECTION

DISTANCE(%)	ACCURACY(%)	ERROR(%)
0	100	0
20	100	0
40	100	0
60	100	0
80	100	0
84	85	15
88	100	0
92	100	0
96	100	0
100	100	0

V. CONCLUSION

This paper analyzes and demonstrates the radial basis function neural network intelligent computational technique application associated with protective distance relay for transmission line protection. The method used is such that, the power system uses voltage and current signals to learn the hidden relationship existing in the input patterns. It is observed that the radial basis function neural network have ability to identify the precise fault direction and more rapidly. This makes it suitable for the real-time purposes. From testing it is correct in 85 transmission line percentage preventions, from the data tests 100 all the data set tests. Thus, radial basis function neural network with the ability to relay one type in transmission line prevention. Therefore radial basis function neural network could be used as an effective tool for real-time digital relaying purposes. This might allow distance relay work more accuracy and precision.

ACKNOWLEDGMENT

The financial support from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, is gratefully acknowledged.

REFERENCES

- [1] P.M. Anderson, *Power system protection*, McGraw-Hill, 1999.
- [2] K. Warwick, A. Ekwue and R. Aggarwal, *Artificial intelligence techniques in power System*, London, Institution of Electrical Engineers, 1997.
- [3] H. B. Demuth, M. Beale, *Neural Network Toolbox for Use with MATLAB*, 1998.
- [4] M. T. Hagan, H. B. Demuth, M. Beale, *Neural Network Design*, Oklahoma State University, 1996.
- [5] W. Qi, G.W. Swift, P. G. McLaren, A. V. Castro, "An artificial neural network application to distance protection". International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, pp. 226-230, 1996.
- [6] D. V. Coury, D. C. Jorge, "Artificial neural network approach to distance protection of transmission lines". IEEE Transactions on Power Delivery, pp. 102-108, 1998.
- [7] L. Wu, C. Liu, C. Chen, "Modeling and testing of a digital distance relay using MATLAB/SIMULINK". IEEE Trans. on Power Delivery, pp.253-259, 2005.
- [8] A. Oonsivilai, and M.E El-Hawary, "Power system dynamic load modeling using adaptive-network-based fuzzy inference system Proceedings of the IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp 1217-1222, 1999.
- [9] A. Oonsivilai, and M.E. El-Hawary, "Wavelet neural network based short term load forecasting of electric power system commercial load". Proceedings of the IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 1223-1228, 1999.
- [10] A. Oonsivilai, and M. E. El-Hawary, "A self-organizing fuzzy power system stabilizer". Proceedings of the IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 197-200, Canada, 1999.
- [11] A. Oonsivilai, R. Boonwitiwivat, T. Kulworawanichpong, and P. Pao-La-Or, "Artificial neural network approach to electric field approximation around overhead power transmission lines". EuroPes 2007.
- [12] R. Oonsivilai, and A. Oonsivilai, "Probabilistic neural network classification for Model β -Glucan Suspensions". Proceeding of the 7th WSEAS Int. Conf. on Simulation, Modeling and Optimization, pp. 159-164, 2007.
- [13] C. L. Wadhwa, *Electrical Power Systems*, Fourth Edition, New Age International, 2006.
- [14] A. G. Phadke and J. S. Thorp, *Computer Relaying for Power Systems*, John Wiley & Sons, Ltd, 1988.
- [15] A. A. Girgis and R. G. Brown, "Adaptive Kalman Filtering Computer Relaying: Fault Classification Using Voltage Models", *IEEE Transaction on Power Apparatus and System*, Vol. PAS-104, No. 5, pp. 1167-1177, May 1985.
- [16] S. Rajasekaran and G. A. Vijayalakshmi Pai, *Neural Networks, Fuzzy Logic, and Genetic Algorithms: Synthesis and Applications*, Prentice-Hal Ltd., 2003.
- [17] L. H. Tsoukalas, and A. U. R. Uhrig, *Fuzzy and neural in Engineering*, John Wiley and Sons, Inc., 1997.
- [18] A. Oonsivilai., and B. Marungsri, "Application of artificial intelligent technique for partial discharges localization in oil insulating transformer". *WSEAS Transaction on Systems*, Issue 10, Vol 8, October, ISSN : 1109 - 2777, pp: 920 -929,2008
- [19] R. Oonsivilai, and A. Oonsivilai. "Apply a genetic algorithm to natural cheese product". Proceeding of the 8th WSEAS International conference on applied computer science (ACS'08) ISSN 1790 - 5109, pp: 269 - 274, 2008.
- [20] A. Oonsivilai., and R. Oonsivilai, "A genetic algorithm application in natural cheese products". *WSEAS Transaction on Systems*, Issue 1, Vol 8, January, ISSN : 1109 - 2777, pp:44-54.,2009
- [21] S. Saichoomdee, A. Oonsivilai ,B. Marungsri, T. Kulworawanichpong and P. Pao-La-Or. "Distance transmission lines protection based on recurrent neural network". International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being(STISWB), pp. 266-269, .2009
- [22] A. Oonsivilai and S. Saichoomdee "Appliance of Recurrent Neural Network toward Distance Transmission Lines Protection". IEEE TENCON 2009/Singapore .2009

ประวัติผู้เขียน

นายสนม สายชุมดี เกิดเมื่อวันที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2526 ที่อำเภอนางรอง จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา จากโรงเรียนวัดสลักไถ่ ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนหนองงูเหลือมพิทยาคม ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ จากวิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ (วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2549 จากนั้นเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ขณะศึกษามีปรากฏดัง ภาคผนวก จ.