



วิทยานิพนธ์

การพัฒนาโปรแกรมโดยใช้ Matlab/Simulink เป็นฐานสำหรับการวิเคราะห์
พฤติกรรมของรีเลย์ระยะทางแบบโมระหว่างขณะที่เกิดฟอลต์สำหรับ
เงื่อนไขฟอลต์และระบบไฟฟ้าแบบต่างๆ

DEVELOPMENT OF MATLAB/SIMULINK BASED PROGRAM FOR THE
ANALYSIS ON THE BEHAVIOR OF MHO DISTANCE RELAY DURING
VARYING FAULTS AND SYSTEM CONDITIONS

นายฤชชัย คชวัฒน์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2549



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การพัฒนาโปรแกรมโดยใช้ Matlab/Simulink เป็นฐานสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของรีเลย์ระยะทางแบบโมระหว่างขณะที่เกิดฟอลต์สำหรับเงื่อนไขฟอลต์และระบบไฟฟ้าแบบต่างๆ

Development of Matlab/Simulink Based Program for the Analysis on the Behavior of Mho Distance Relay during Varying Faults and System Conditions

นามผู้วิจัย นายฤชชัย คชวัฒน์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(รongศาสตราจารย์สันติ อัสวศรีพงษ์ศรี, M.Eng. Sc.)

กรรมการ

(อาจารย์คุณุย์พิเชษฐ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์, Ph.D.)

กรรมการ

(อาจารย์ชูเกียรติ การะเกตุ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์ชูเกียรติ การะเกตุ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รongศาสตราจารย์วินัย อัจจงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาโปรแกรมโดยใช้ Matlab/Simulink เป็นฐานสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของรีเลย์
ระยะทางแบบโมระหว่างขณะที่เกิดฟอลต์สำหรับเงื่อนไขฟอลต์และระบบไฟฟ้าแบบต่างๆ

Development of Matlab/Simulink Based Program for the Analysis on the Behavior of Mho
Distance Relay during Varying Faults and System Conditions

โดย

นายฤชชัย คชวัฒน์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2549

ISBN 974-16-1940-5

อุษชัย คชวัฒน์ 2549: การพัฒนาโปรแกรมโดยใช้ Matlab/Simulink เป็นฐานสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของรีเลย์ระยะทางแบบโมระหว่างขณะที่เกิดฟอลต์สำหรับเงื่อนไขฟอลต์และระบบไฟฟ้าแบบต่างๆ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ปรธานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์สันติ อัสวศรีพงษ์ธร, M.Eng. Sc. 121 หน้า
ISBN 974-16-1940-5

วิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงการพัฒนาโปรแกรมโดยใช้ Matlab/Simulink เป็นฐานสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของรีเลย์ระยะทางแบบโมระหว่างขณะที่เกิดฟอลต์ สำหรับเงื่อนไขฟอลต์และระบบไฟฟ้าแบบต่างๆ โดยการสร้างแบบจำลองของ อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟในระบบไฟฟ้ากำลัง หม้อแปลงลดกระแสและหม้อแปลงลดแรงดันที่ตำแหน่งจุดติดตั้งรีเลย์ ชนิดของฟอลต์ที่มีความต้านทานอาร์คและไม่มี ความต้านทานอาร์ค และตำแหน่งของฟอลต์บนไลนที่ต้องการป้องกันแบบจำลองขององค์ประกอบต่างๆ เหล่านี้มีอยู่ในโปรแกรมซึ่งเป็นงานวิจัยใหม่ที่สร้างขึ้นมา โดยพารามิเตอร์ต่างๆ สามารถกำหนดได้ในโปรแกรม สัญญาณรูปคลื่นกระแสและแรงดันแบบสามเฟสจะถูกป้อนให้กับแบบจำลอง CT และ VT ที่มีคุณลักษณะเป็นเชิงเส้น เอาท์พุทที่ได้นำมาเป็นอินพุทให้กับรีเลย์ระยะทางแบบโมหลายเฟส ที่สร้างขึ้นโดยใช้หลักการเปรียบเทียบมุมของสัญญาณอินพุท การเปรียบเทียบมุมแบ่งชนิดของการโพลาลิซซ์ได้ 4 ชนิด คือ โพลาลิซซ์ตัวเองและโพลาลิซซ์ข้าม ทั้งแบบใช้หน่วยความจำและไม่ใช้หน่วยความจำ เงื่อนไขฟอลต์ที่ศึกษาเป็นการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของฟอลต์และชนิดของฟอลต์ (A-B-C, B-C, A-G และ B-C-G) ที่คิดผลของความต้านทานอาร์คและไม่คิดความต้านทานอาร์ค ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของโหลด โปรแกรมที่พัฒนาสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาพฤติกรรมของรีเลย์ระยะทางแบบโม สำหรับการเปลี่ยนแปลงของระบบไฟฟ้ากำลังทุกเงื่อนไขที่คาดว่ามีโอกาสเป็นไปได้ ผลการวิเคราะห์จะอยู่ในเทอมของค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็น หรือในรูปของกราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโม ผลที่ได้สามารถนำไปใช้แสดงว่า ชนิดของฟอลต์ ความต้านทานฟอลต์ และตำแหน่งของฟอลต์ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของระบบไฟฟ้าและโหลด มีผลต่อการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมอย่างไร การไฟฟ้าสามารถนำผลลัพธ์ของการวิเคราะห์นี้ไปใช้เพื่อหาค่าเซตตั้งที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนแปลงของระบบไฟฟ้ากำลังทุกเงื่อนไขที่คาดว่ามีโอกาสเป็นไปได้ อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

Ruchuchai Kochawat 2006: Development of Matlab/Simulink Based Program for the Analysis on the Behavior of Mho Distance Relay during Varying Faults and System Conditions. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Santi Asawasripongton, M.Eng. Sc. 121 pages.
ISBN 974-16-1940-5

This thesis describes development of Matlab/Simulink based program for the analysis on the behavior of Mho Distance Relay during varying faults and system conditions. Power system source impedance, current transformer and voltage transformer at relay location, types of fault with or without arc resistance and location of fault on the protected line are modeled. The modeling of these components within a Matlab/Simulink environment represent new work. An actual transmission network with either one or two equivalent sources is modeled together with a to be protected transmission line. Parameters of the transmission network under some prescribed network fault conditions are used for simulation in the Matlab/Simulink based program. Accurate three phase currents and voltages levels present on the network are fed into simple linear models of current and voltage transformers. The output of the instruments model are fed into a multiphase mho distance relay being modeled by phase angle comparators. Phase angle comparators are classified into 4 types of polarization techniques including: Self-polarised and Cross-polarised either with or with out memory polarization. Network fault conditions include varying fault location and varying types of faults (A-B-C, B-C, A-G and B-C-G) with or without arc resistances are modeled together with varying loading conditions. The developed program can be used to extensively analyse the behavior of mho distance relays for a full range of expected power system contingencies. Results of the analysis are given in terms of the values of the impedances seen by the relay or in graphical presentation of the mho distance characteristics. The results can be used to illustrate how types of faults, fault resistances, fault location under varying system and loading conditions can influence the performance of mho distance relay. A utility may use the result of the analysis to find an optimum setting for a full range of expected power system contingencies.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์สันติ อัสวศรีพงศ์ธร ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนให้คำปรึกษาแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ขอกราบขอบพระคุณ ดร.ศุภชัยพิเชษฐ์ ฤกษ์ปริดาพงศ์ กรรมการที่ปรึกษาวิชาเอก ดร.ชูเกียรติ การะเกตุ กรรมการที่ปรึกษาวิชารอง และ รองศาสตราจารย์ ดร. วรางค์รัตน์ จันทสาโร อาจารย์ผู้แทนจากบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ได้อนุมัติให้ข้าพเจ้าลาศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตแห่งนี้ และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต 2 (ภาคกลาง) จ.ชลบุรี ที่คอยให้ความช่วยเหลือระหว่างที่ข้าพเจ้าลาศึกษาต่อ

ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ชี้แนะ และสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้

ศุภชัย คชวัฒน์

พฤษภาคม 2549

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(17)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
หลักการของรีเลย์ระยะทาง	4
คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทาง	7
การตั้งค่าการทำงานของรีเลย์ระยะทาง	11
ผลของความต้านทานฟอลต์และโหลดในสายส่งต่อรีเลย์ระยะทาง	13
โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของรีเลย์ระยะทาง	14
คุณลักษณะการทำงานในสถานะพลวัตของรีเลย์ระยะทางแบบโม	15
โปรแกรม Matlab/Simulink	15
อุปกรณ์และวิธีการ	17
อุปกรณ์	17
วิธีการ	17
การวิเคราะห์หาปริมาณไฟฟ้า ณ จุดติดตั้งรีเลย์เพื่อนำมาสร้างเป็นสัญญาณอินพุตให้กับแบบจำลองของรีเลย์ระยะทาง	18
การวิเคราะห์หาคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซ์แบบต่าง ๆ	26
การสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Matlab/Simulink	38
เงื่อนไขสำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมของรีเลย์ระยะทางแบบโม	48
ผลและวิจารณ์	56
ผล	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
วิจารณ์	115
สรุปและข้อเสนอแนะ	118
สรุป	118
ข้อเสนอแนะ	119
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	120
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	121

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณอินพุตให้กับรีเลย์ระยะทาง	7
2	ตัวอย่างบล็อกใน Simulink สำหรับสร้างแบบจำลอง	16
3	ปริมาณไฟฟ้า ณ จุดติดตั้งรีเลย์กรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)	20
4	ปริมาณไฟฟ้า ณ จุดติดตั้งรีเลย์กรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C)	22
5	แรงดันโพลาลิซซ์ที่เกิดจากฟอลต์แบบต่างๆ	38
6	พารามิเตอร์แหล่งกำเนิดแรงดันสามเฟสพร้อมอิมพีแดนซ์ภายใน	39
7	พารามิเตอร์ไลน์แบบสามเฟส	40
8	พารามิเตอร์หม้อแปลงทดกระแสและหม้อแปลงทดแรงดัน	41
9	พารามิเตอร์ฟอลต์แบบสามเฟส	42
10	เงื่อนไขสำหรับใช้วิเคราะห์หาอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น	49
11	เงื่อนไขสำหรับใช้วิเคราะห์ผลของกระแสไหลกลับและความต้านทานฟอลต์ต่อค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น	51
12	เงื่อนไขสำหรับใช้วิเคราะห์หากราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโม	53
13	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย	57
14	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย	58
15	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย	59
16	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย	60
17	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -60^\circ$)	62

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
18	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -60^\circ$)	63
19	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -60^\circ$)	64
20	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -60^\circ$)	65
21	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -30^\circ$)	66
22	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -30^\circ$)	67
23	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -30^\circ$)	68
24	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -30^\circ$)	69
25	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 0^\circ$)	70
26	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 0^\circ$)	71
27	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 0^\circ$)	72
28	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 0^\circ$)	73
29	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 30^\circ$)	74

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
30	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 30^\circ$)	75
31	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 30^\circ$)	76
32	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 30^\circ$)	77
33	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 60^\circ$)	78
34	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 60^\circ$)	79
35	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 60^\circ$)	80
36	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -60^\circ$)	81
37	ผลของกระแสไหลและความต้านทานฟอลต์ต่อค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทาง มองเห็น กรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)	83
38	ผลของกระแสไหลและความต้านทานฟอลต์ต่อค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทาง มองเห็น กรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C)	84
39	ผลของกระแสไหลและความต้านทานฟอลต์ต่อค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทาง มองเห็น กรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)	85
40	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 0.000001$)	87
41	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 40$)	88

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
42	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 0.000001$)	89
43	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 40$)	90
44	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหลังรีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($I - x = 0.1, R_f = 40$)	91
45	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 0.000001$)	92
46	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 40$)	93
47	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 0.000001$)	94
48	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 40$)	95
49	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหลังรีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($I - x = 0.1, R_f = 40$)	96
50	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 0.000001$)	97
51	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 40$)	98
52	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 0.000001$)	99
53	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 40$)	100

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
54	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหลังรีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($I - x = 0.1, R_f = 40$)	101
55	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 0.000001$)	103
56	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 40$)	104
57	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 0.000001$)	105
58	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 40$)	106
59	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 0.000001$)	107
60	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 40$)	108
61	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 0.000001$)	109
62	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 40$)	110
63	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 0.000001$)	111
64	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 40$)	112
65	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 0.000001$)	113

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
66	ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 40$)	114
67	รีเลย์ที่นำมาใช้หาระยะทาง สำหรับเงื่อนไขฟอลต์แบบต่าง ๆ	115
68	สรุปกราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพล่าไลซ์จาก หน่วยความจำ	117

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ขอบเขตการเกิดฟอลต์บนแผนภาพอิมพีแดนซ์	4
2	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็น	5
3	คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบต่าง ๆ	8
4	หลักการเปรียบเทียบมุมของสัญญาณของรีเลย์ระยะทางแบบโม	9
5	คุณลักษณะการทำงานในรูปแผนภาพแรงดันของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลाइซ์ด้วยตัวมันเอง	10
6	คุณลักษณะการทำงานในรูปแผนภาพแรงดันของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลाइซ์ข้าม	11
7	โซนการป้องกันของรีเลย์ระยะทางกรณีจ่ายไฟแบบ Radial Line	12
8	รูปแบบการใช้งานรีเลย์ระยะทางกับระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย	13
9	แผนภาพอิมพีแดนซ์แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นขณะเกิดฟอลต์ผ่าน R_f	14
10	การเปลี่ยนรูปร่างจากคุณลักษณะการทำงานในสภาวะพลวัตสู่คุณลักษณะการทำงานในสภาวะคงตัว	15
11	วงจรสมมูลที่ใช้วิเคราะห์หาปริมาณไฟฟ้า ณ จุดติดตั้งรีเลย์เพื่อนำมาสร้างเป็นสัญญาณอินพุตให้กับแบบจำลองของรีเลย์ระยะทาง	18
12	วงจรเฟสซีแควนซ์บวกกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส	19
13	วงจรเฟสซีแควนซ์บวกขนานกับวงจรเฟสซีแควนซ์ลบกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C)	21
14	โลกส์อิมพีแดนซ์สำหรับ $\frac{V_{AB}}{I_{AB}}, \frac{V_{BC}}{I_{BC}}, \frac{V_{CA}}{I_{CA}}$ กรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส	24
15	วงจรเฟสซีแควนซ์บวก วงจรเฟสซีแควนซ์ลบ และวงจรเฟสซีแควนซ์ศูนย์ต่ออนุกรมกัน กรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน	25
16	แผนภาพเส้นเดี่ยวกรณีเกิดฟอลต์ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย	27
17	คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลाइซ์ด้วยตัวมันเองเมื่อเกิดฟอลต์ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย	27
18	แผนภาพเส้นเดี่ยวกรณีเกิดฟอลต์ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย	28

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
19	คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซ์ด้วยตัวมันเอง เมื่อเกิดฟอลต์ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย	28
20	แผนภาพเส้นเคียวกรณีเกิดฟอลต์ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย	29
21	แผนภาพเส้นเคียวกรณีเกิดฟอลต์ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย	29
22	แผนภาพสามเฟสและเวกเตอร์แรงดันของระบบ กรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย	30
23	วงจรเฟสซีเควนซ์บวกและวงจรเฟสซีเควนซ์ลบต่อขนานกันกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย	30
24	คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซ์ข้าม เมื่อเกิดฟอลต์ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย	31
25	แผนภาพสามเฟสและเวกเตอร์แรงดันของระบบ กรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย	32
26	วงจรเฟสซีเควนซ์บวกและวงจรเฟสซีเควนซ์ลบต่อขนานกันกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย	32
27	คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซ์ข้าม เมื่อเกิดฟอลต์ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย	33
28	คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซ์ข้าม เมื่อเกิดฟอลต์ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย	35
29	วงจรเฟสซีเควนซ์บวกและวงจรเฟสซีเควนซ์ลบต่อขนานกันกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย	36
30	คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซ์ข้าม เมื่อเกิดฟอลต์ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย	37
31	แบบจำลองหม้อแปลงทดกระแสและหม้อแปลงทดแรงดัน	40
32	แบบจำลองฟอลต์	41
33	ขั้นตอนการสร้างสัญญาณอินพุตให้กับรีเลย์ระยะทาง	43

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
34	43
35	44
36	45
37	46
38	47
39	48
40	50
41	50
42	52
43	54
44	54
45	55
46	55
47	57
48	58
49	59
50	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
51	โลกัสมิทินแดนซ์ที่รีเลี่ยมองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -60^\circ$)	62
52	โลกัสมิทินแดนซ์ที่รีเลี่ยมองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -60^\circ$)	63
53	โลกัสมิทินแดนซ์ที่รีเลี่ยมองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -60^\circ$)	64
54	โลกัสมิทินแดนซ์ที่รีเลี่ยมองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -60^\circ$)	65
55	โลกัสมิทินแดนซ์ที่รีเลี่ยมองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -30^\circ$)	66
56	โลกัสมิทินแดนซ์ที่รีเลี่ยมองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -30^\circ$)	67
57	โลกัสมิทินแดนซ์ที่รีเลี่ยมองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -30^\circ$)	68
58	โลกัสมิทินแดนซ์ที่รีเลี่ยมองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -30^\circ$)	69
59	โลกัสมิทินแดนซ์ที่รีเลี่ยมองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 0^\circ$)	70
60	โลกัสมิทินแดนซ์ที่รีเลี่ยมองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 0^\circ$)	71
61	โลกัสมิทินแดนซ์ที่รีเลี่ยมองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 0^\circ$)	72
62	โลกัสมิทินแดนซ์ที่รีเลี่ยมองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 0^\circ$)	73

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
63	โลกัสมิพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 30^\circ$)	74
64	โลกัสมิพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 30^\circ$)	75
65	โลกัสมิพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 30^\circ$)	76
66	โลกัสมิพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 30^\circ$)	77
67	โลกัสมิพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 60^\circ$)	78
68	โลกัสมิพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 60^\circ$)	79
69	โลกัสมิพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 60^\circ$)	80
70	โลกัสมิพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G) ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 60^\circ$)	81
71	ผลของกระแสไหลและความต้านทานฟอลต์ต่อค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น กรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)	83
72	ผลของกระแสไหลและความต้านทานฟอลต์ต่อค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น กรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C)	84
73	ผลของกระแสไหลและความต้านทานฟอลต์ต่อค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น กรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)	85
74	กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 0.000001$)	87

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
75 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 40$)	88
76 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 0.000001$)	89
77 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 40$)	90
78 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($1 - x = 0.1, R_f = 40$)	91
79 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 0.000001$)	92
80 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 40$)	93
81 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 0.000001$)	94
82 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 40$)	95
83 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($1 - x = 0.1, R_f = 40$)	96
84 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 0.000001$)	97
85 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 40$)	98
86 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 0.000001$)	99

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
87 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 40$)	100
88 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($1 - x = 0.1, R_f = 40$)	101
89 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 0.000001$)	103
90 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 40$)	104
91 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 0.000001$)	105
92 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 40$)	106
93 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้า รีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 0.000001$)	107
94 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 40$)	108
95 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 0.000001$)	109
96 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 40$)	110
97 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 0.000001$)	111
98 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 40$)	112

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
99	กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 0.000001$)	113
100	กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 40$)	114

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

V_{FP}	=	แรงดันขณะเกิดฟอลต์ทางด้านปฐมภูมิ
I_{FP}	=	กระแสขณะเกิดฟอลต์ทางด้านปฐมภูมิ
Z_P	=	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นทางด้านปฐมภูมิ
V_R, V_a	=	แรงดันที่รีเลย์มองเห็นทางด้านทุติยภูมิ
I_R, I_a	=	กระแสที่รีเลย์มองเห็นทางด้านทุติยภูมิ
Z_R	=	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นทางด้านทุติยภูมิ
VT	=	หม้อแปลงทดแรงดัน
CT	=	หม้อแปลงทดกระแส
VTR	=	<i>VT Ratio</i> (อัตราทดแรงดัน)
CTR	=	<i>CT Ratio</i> (อัตราทดกระแส)
K_N	=	Residual Compensation Factor (สัมประสิทธิ์ชดเชยการลัดวงจรลงดิน)
Z_{LO}, Z_{OL}	=	อิมพีแดนซ์ซีควนซ์ศูนย์ของสายส่ง
Z_{LI}, Z_{IL}	=	อิมพีแดนซ์ซีควนซ์บวกของสายส่ง
I_{RN}, I_N	=	Residual Current
$\bar{V}_{polarised}$	=	แรงดันที่รีเลย์นำมาใช้เปรียบเทียบ
\bar{V}	=	แรงดันที่ป้อนให้กับรีเลย์
\bar{I}	=	กระแสที่ป้อนให้กับรีเลย์
\bar{Z}	=	อิมพีแดนซ์เซตตั้งของรีเลย์
\bar{Z}_S	=	อิมพีแดนซ์ที่อยู่ด้านหลังรีเลย์เมื่อมองจากจุดเกิดฟอลต์
\bar{Z}_F	=	อิมพีแดนซ์จากรีเลย์ไปยังจุดเกิดฟอลต์
R_f, R_f	=	Fault Resistance (ความต้านทานฟอลต์)
Z_x	=	อิมพีแดนซ์จากแหล่งจ่าย A ไปยังจุดเกิดฟอลต์
Z_y	=	อิมพีแดนซ์จากแหล่งจ่าย B ไปยังจุดเกิดฟอลต์
Z'	=	อิมพีแดนซ์จากรีเลย์ไปยังจุดเกิดฟอลต์
Z_{ISA}, Z_{ISB}	=	อิมพีแดนซ์ซีควนซ์บวกของแหล่งจ่าย A, B
Z_{OSA}, Z_{OSB}	=	อิมพีแดนซ์ซีควนซ์ศูนย์ของแหล่งจ่าย A, B
δ	=	Load Angle

การพัฒนาโปรแกรมโดยใช้ Matlab/Simulink เป็นฐานสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรม
ของรีเลย์ระยะทางแบบโมระหว่างขณะที่เกิดฟอลต์สำหรับเงื่อนไขฟอลต์
และระบบไฟฟ้าแบบต่างๆ

Development of Matlab/Simulink Based Program for the Analysis on the
Behavior of Mho Distance Relay during Varying Faults
and System Conditions

คำนำ

การป้องกันสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีอยู่ 2 วิธีการหลักๆ ได้แก่ การป้องกันโดยใช้รีเลย์วัดค่าผลต่างของกระแส และการป้องกันโดยใช้รีเลย์ระยะทาง ซึ่งเป็นระบบป้องกันหลักที่มีความสำคัญต่อการจ่ายไฟเป็นอย่างมาก เพราะเป็นระบบสายส่งที่ต้องจ่ายไฟให้กับสถานีไฟฟ้าย่อยและผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่ หากระบบป้องกันมีการออกแบบหรือตั้งค่าการทำงานไม่ถูกต้อง จะทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง ความเข้าใจในหลักการทำงานของรีเลย์ระยะทาง จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับวิศวกรของการไฟฟ้า เพื่อจะได้สามารถออกแบบ ตั้งค่าการทำงาน และวิเคราะห์หาสาเหตุการเกิดฟอลต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ปัญหาที่พบคือ ยิ่งนับวันความต้องการในการใช้ไฟฟ้ามักเพิ่มขึ้น ทำให้การไฟฟ้าต้องสร้างสถานีไฟฟ้าและสายส่งเพื่อรองรับความต้องการดังกล่าว ส่งผลให้รูปแบบการจ่ายไฟมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ดังนั้นผู้ที่ดูแลเกี่ยวข้องกับงานด้านรีเลย์และอุปกรณ์ป้องกัน จึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ ออกแบบแก้ไข ตั้งค่าการทำงานของรีเลย์ ให้รองรับกับสภาพการจ่ายไฟดังกล่าวอยู่ตลอดเวลา และในบางสถานการณ์รีเลย์มีการทำงานผิดพลาดโดยไม่ทราบสาเหตุ อันเนื่องมาจากระบบไฟฟ้าที่ซับซ้อนขึ้น ส่งผลกระทบต่อการทำงานของรีเลย์ ดังนั้นหากมีเครื่องมือที่สามารถจำลองระบบไฟฟ้าและการทำงานของรีเลย์ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ดังกล่าว จะเป็นประโยชน์ต่อการไฟฟ้าเป็นอย่างยิ่ง

โปรแกรม Matlab/Simulink สามารถสร้างแบบจำลองทางระบบไฟฟ้ากำลัง และจำลองเหตุการณ์ เพื่อวัดค่ากระแสและแรงดัน ณ จุดต่างๆ ได้ทุกสถานการณ์ของการเกิดฟอลต์ โดย

ปริมาณไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เหมือนกับปริมาณไฟฟ้าที่ได้จากหม้อแปลงทดกระแส และหม้อแปลงทดแรงดัน ที่ป้อนให้กับรีเลย์ ดังนั้นถ้าเราทราบหลักการของรีเลย์ ก็สามารที่จะสร้างแบบจำลองลงในโปรแกรม แล้วทำการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของรีเลย์ ภายใต้งื่อนไขต่าง ๆ ได้ตามความต้องการ เหมือนกับใช้งานอยู่ในระบบไฟฟ้าจริง

ในงานวิจัยนี้จึงเป็นการมุ่งเน้นพัฒนาโปรแกรมโดยใช้ Matlab/Simulink สร้างแบบจำลองทางระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อใช้เป็นฐานสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของรีเลย์ระยะทางแบบโมซึ่งสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์กับระบบจริงของการไฟฟ้า และจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้ที่ได้ศึกษาและเป็นแนวทางในการพัฒนาโปรแกรมต่อไป

วัตถุประสงค์

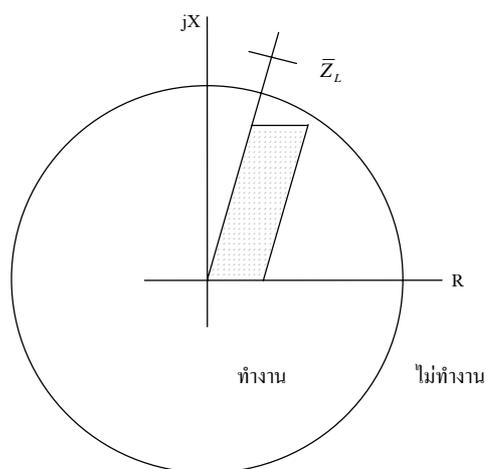
1. เพื่อเข้าใจหลักการทำงานพื้นฐานของรีเลย์ระยะทาง
2. เพื่อเข้าใจกราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซ์ด้วยตัวมันเอง รีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซ์ข้าม และรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซ์จากหน่วยความจำ
3. เพื่อสามารถใช้โปรแกรม Matlab/Simulink สร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้า หม้อแปลง ทดกระแส หม้อแปลงลดแรงดัน ฟอลต์ และรีเลย์ระยะทาง ได้
4. เพื่อเข้าใจพฤติกรรมของรีเลย์ระยะทางแบบโม ระหว่างขณะที่เกิดฟอลต์สำหรับเงื่อนไขฟอลต์และระบบไฟฟ้าแบบต่างๆ

การตรวจเอกสาร

หลักการของรีเลย์ระยะทาง

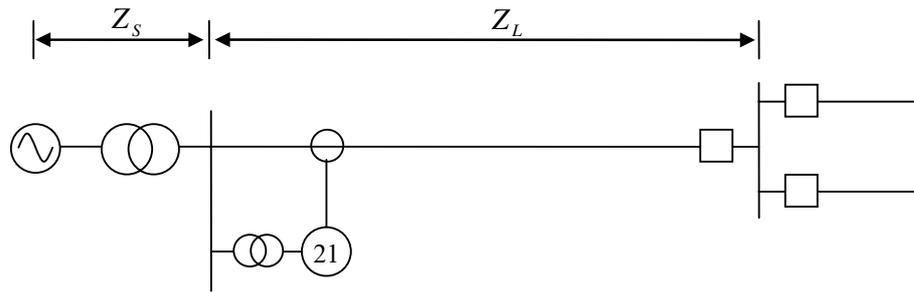
สันติ (2526) รีเลย์ระยะทางหาตำแหน่งของฟอลต์โดยการตอบสนองต่อค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์วัดได้ จากการเปรียบเทียบค่ากระแสที่รีเลย์มองเห็น กับค่าแรงดันที่รีเลย์วัดได้ ณ จุดติดตั้งรีเลย์ รีเลย์ระยะทางมีอยู่หลายรูปแบบ เช่น รีเลย์แบบคานสมดุล รีเลย์แบบถ่วงเหนี่ยวน้ำหนัก หรืออาจเป็นสแตติกรีเลย์ ที่ประกอบด้วยวงจรเปรียบเทียบขนาด (Magnitude Comparator) หรือวงจรเปรียบเทียบมุม (Phase Comparator) อิมพีแดนซ์ที่วัดได้ อาจรวมค่าอิมพีแดนซ์ของอาร์ค และอิมพีแดนซ์ของดิน โดยรีเลย์จะทำงานเมื่ออิมพีแดนซ์ที่วัดได้ต่ำกว่าอิมพีแดนซ์เซตตั้ง ซึ่งหมายถึงฟอลต์ที่เกิดขึ้นอยู่ในเขตที่ต้องการป้องกัน ปลายสุดของเขตที่ต้องการป้องกันเรียกว่า จุดสมดุล (Balance Point) และระยะทางจากรีเลย์ถึงจุดสมดุลเรียกว่ารีช (Reach)

GEC Alsthom (1997) ในสภาวะการจ่ายไฟปกติ รีเลย์มองเห็นอิมพีแดนซ์เป็นอิมพีแดนซ์ของสายส่งร่วมกับโหลด ดังภาพที่ 2 (ง) เมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้น อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นจะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งจากรีเลย์ถึงจุดเกิดฟอลต์ ดังภาพที่ 2 (ค) สามารถเขียนขอบเขตของการเกิดฟอลต์บนแผนภาพอิมพีแดนซ์ได้ดังภาพที่ 1 โดยวงกลมเป็นคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบอิมพีแดนซ์ แบบดั้งเดิมที่ใช้หลักการเปรียบเทียบขนาดของสัญญาณอินพุต ที่ป้อนให้กับรีเลย์ ถ้าขอบเขตการเกิดฟอลต์อยู่ภายในวงกลมรีเลย์จะทำงาน และหากอยู่นอกวงกลมรีเลย์จะไม่ทำงาน

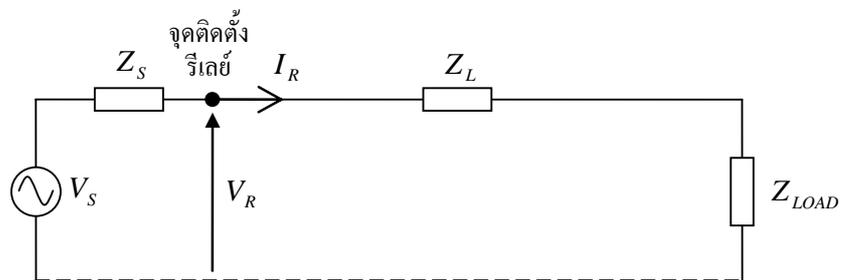


ภาพที่ 1 ขอบเขตการเกิดฟอลต์บนแผนภาพอิมพีแดนซ์

ที่มา: GEC Alsthom Measurement Ltd. (1997)

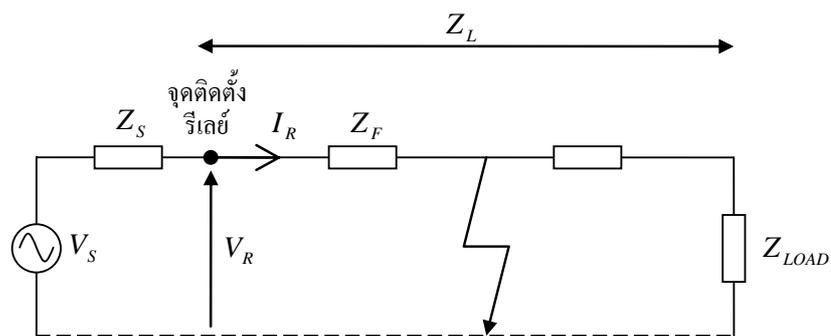


2 (ก) แผนภาพเส้นเดียว



$$\text{อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็น } Z_R = \frac{V_R}{I_R} = Z_L + Z_{LOAD}$$

2 (ข) กรณีจ่ายไฟปกติ



$$\text{อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็น } Z_R = \frac{V_R}{I_R} = Z_F$$

2 (ค) กรณีเกิดฟอลต์

ภาพที่ 2 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็น

ที่มา: GEC Alsthom Measurement Ltd. (1997)

จากภาพที่ 2 รีเลย์จะทำงานเมื่อ $Z_F < Z_{SETTING}$ ถ้าแรงดันที่ป้อนให้กับรีเลย์ (V_R) มากขึ้นจะมีลักษณะด้านการทำงาน (Restraint) แต่ถ้ากระแสที่ป้อนให้กับรีเลย์มากขึ้นจะมีลักษณะยิ่งเพิ่มการทำงาน (Operate) ดังนั้น $V_R = V_{RESTRAINT}$ และ $I_R = I_{OPERATE}$

ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ทางด้านปฐมภูมิและอิมพีแดนซ์ทางด้านทุติยภูมิ

จากภาพที่ 2 (ก) ปริมาณไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณอินพุตป้อนให้กับรีเลย์ระยะทางคือแรงดันและกระแสทางด้านทุติยภูมิ ดังนั้นอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นจะเป็นอิมพีแดนซ์ทางด้านทุติยภูมิซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Z_R = \frac{V_R}{I_R} = \frac{V_{FP} / VT \text{ Ratio}}{I_{FP} / CT \text{ Ratio}} = Z_P \times \frac{CT \text{ Ratio}}{VT \text{ Ratio}} \quad (1)$$

V_{FP} คือ แรงดันขณะเกิดฟอลต์ทางด้านปฐมภูมิ

I_{FP} คือ กระแสขณะเกิดฟอลต์ทางด้านปฐมภูมิ

Z_P คือ อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นทางด้านปฐมภูมิ

V_R คือ แรงดันที่รีเลย์มองเห็นทางด้านทุติยภูมิ

I_R คือ กระแสที่รีเลย์มองเห็นทางด้านทุติยภูมิ

Z_R คือ อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นทางด้านทุติยภูมิ

$VT \text{ Ratio}$ คือ อัตราการทดแรงดัน

$CT \text{ Ratio}$ คือ อัตราการทดกระแส

ปริมาณไฟฟ้าที่ถูกต้องสำหรับใช้เป็นอินพุตให้กับรีเลย์ระยะทาง

GEC Alstom (1997) ปริมาณไฟฟ้าที่ถูกต้องสำหรับใช้เป็นอินพุตให้กับรีเลย์ระยะทางเมื่อเกิดฟอลต์แบบต่าง ๆ สรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณอินพุตให้กับรีเลย์ระยะทาง

Fault	$V_{RESTRAINT}$	$I_{OPERATE}$
A-B	$V_A - V_B$	$I_A - I_B$
B-C	$V_B - V_C$	$I_B - I_C$
C-A	$V_C - V_A$	$I_C - I_A$
A-E	V_A	$I_A + K_N I_{RN}$
B-E	V_B	$I_B + K_N I_{RN}$
C-E	V_C	$I_C + K_N I_{RN}$

ที่มา: GEC Alstom Measurement Ltd. (1997)

โดย $K_N = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{3Z_{L1}}$ คือ Residual Compensation Factor

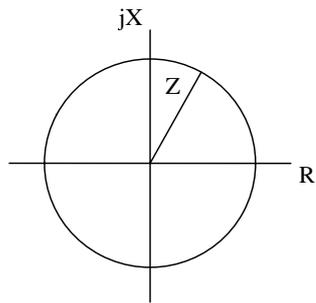
Z_{L0} คือ อิมพีแดนซ์ซีเควนซ์ศูนย์ของสายส่ง

Z_{L1} คือ อิมพีแดนซ์ซีเควนซ์บวกของสายส่ง

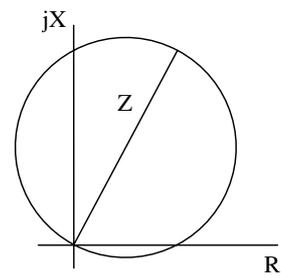
$I_{RN} = I_A + I_B + I_C$ คือ Residual Current

คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทาง

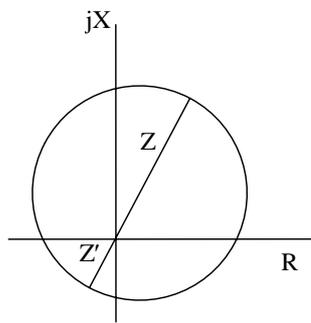
วิธีการตรวจสอบว่าฟอลต์ที่เกิดขึ้นอยู่ในขอบเขตการทำงานหรือไม่นั้น จะใช้หลักการเปรียบเทียบมุมของสัญญาณที่ป้อนให้กับชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบมุม ซึ่งได้จากปริมาณไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณอินพุตให้กับรีเลย์ระยะทาง หลักการดังกล่าว ทำให้เกิดคุณลักษณะการทำงานแบบต่าง ๆ เช่น ภาพที่ 3 (ก) รีเลย์แบบอิมพีแดนซ์ (Impedance) 3 (ข) รีเลย์แบบโม (Mho) 3 (ค) รีเลย์แบบออฟเซตโม (Offset mho) 3 (ง) รีเลย์แบบที่มีการโพลาไรซ์ข้าม (Cross-polarised mho) 3 (จ) รีเลย์แบบเลนซ์ (Lenticular) 3 (ฉ) รีเลย์แบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Quadrilateral) โดยแต่ละแบบก็จะใช้กับระบบไฟฟ้าที่แตกต่างกัน



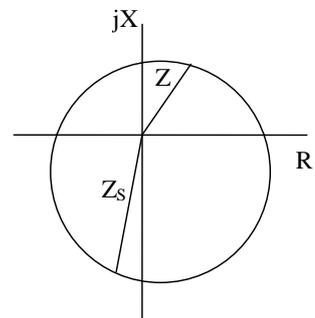
3 (ก)



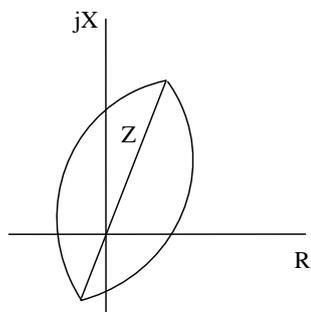
3 (ข)



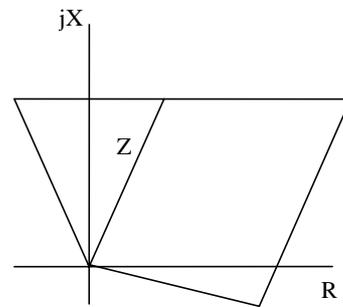
3 (ค)



3 (ง)



3 (จ)



3 (ฉ)

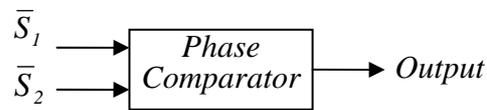
ภาพที่ 3 คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบต่าง ๆ

ที่มา: GEC Alsthom Measurement Ltd. (1997)

ชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบมุมของสัญญาณของรีเลย์ระยะทางแบบโม

GEC Alsthom (1987) รีเลย์ระยะทางแบบโมทำงานโดยอาศัยหลักการเปรียบเทียบมุมของสัญญาณ 2 สัญญาณโดยไม่สนใจขนาด ดังแสดงในภาพที่ 4 และมีเงื่อนไขการทำงานตามสมการที่ (2)

$$90^\circ < \angle \bar{S}_1 - \angle \bar{S}_2 < 270^\circ \quad (2)$$



$$\bar{S}_1 = \bar{V}_{polarised}$$

$$\bar{S}_2 = \bar{V} - \bar{I}\bar{Z}$$

$\bar{V}_{polarised}$ คือ แรงดันที่รีเลย์นำมาใช้เปรียบเทียบ

\bar{V} คือ แรงดันที่ป้อนให้กับรีเลย์

\bar{I} คือ กระแสที่ป้อนให้กับรีเลย์

\bar{Z} คือ อิมพีแดนซ์เซตติงของรีเลย์

ภาพที่ 4 หลักการเปรียบเทียบมุมของสัญญาณของรีเลย์ระยะทางแบบโม

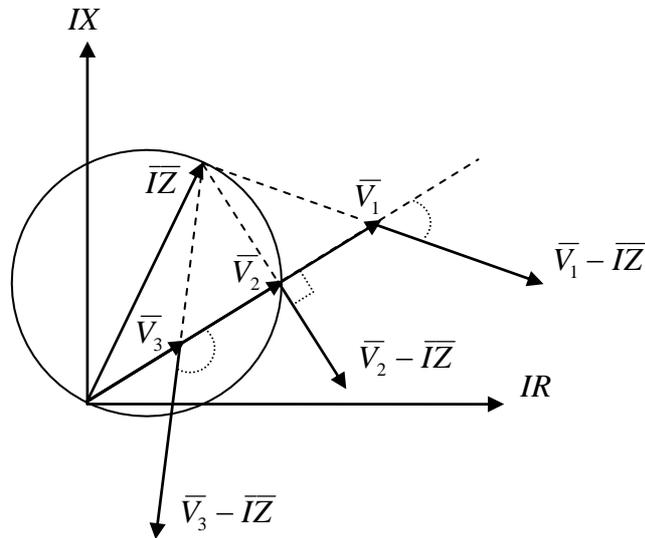
รีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาไรซ์ด้วยตัวมันเอง (Self-Polarised Mho Distance Relay)

GEC Alsthom (1997) สัญญาณแรงดันที่นำมาใช้เปรียบเทียบ (\bar{S}_1) จะเป็นตัวเดียวกันกับแรงดันที่ป้อนให้กับรีเลย์ ดังนั้นสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบมุม จะเป็นไปตามสมการที่ (3) และ (4) ทำให้เกิดเป็นคุณลักษณะการทำงานรูปวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางอยู่บนแนวเส้นตรง $\bar{I}\bar{Z}$ ส่วนของเส้นรอบวงผ่านจุดกำเนิด ดังภาพที่ 5 โดย \bar{V}_1 , \bar{V}_2 และ \bar{V}_3 แทนแรงดันที่เกิดจากฟอลต์นอกโซน พอดีโซนและในโซน ตามลำดับ

$$\bar{S}_1 = \bar{V} \quad (3)$$

$$\bar{S}_2 = \bar{V} - \bar{I}\bar{Z} \quad (4)$$

จากสมการ (3) ถ้าแรงดันที่ป้อนให้กับรีเลย์เป็นศูนย์ รีเลย์ไม่สามารถคำนวณหามุมของสัญญาณได้ รีเลย์จะทำงานผิดพลาดในกรณีเกิดฟอลต์ใกล้รีเลย์ จึงมีการแก้ปัญหาโดยการเปลี่ยนแรงดันโพลาลิซ์มาใช้แรงดันของเฟสที่ไม่ได้เกิดฟอลต์แทนเรียกว่า การโพลาลิซ์ข้าม



ภาพที่ 5 คุณสมบัติการทำงานในรูปแบบแผนภาพแรงดันของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มี การโพลาลิซ์ด้วยตัวมันเอง

ที่มา: GEC Alsthom Measurement Ltd. (1997)

รีเลย์ระยะทางแบบโมที่มี การโพลาลิซ์ข้าม (Cross-Polarised Mho Distance Relay)

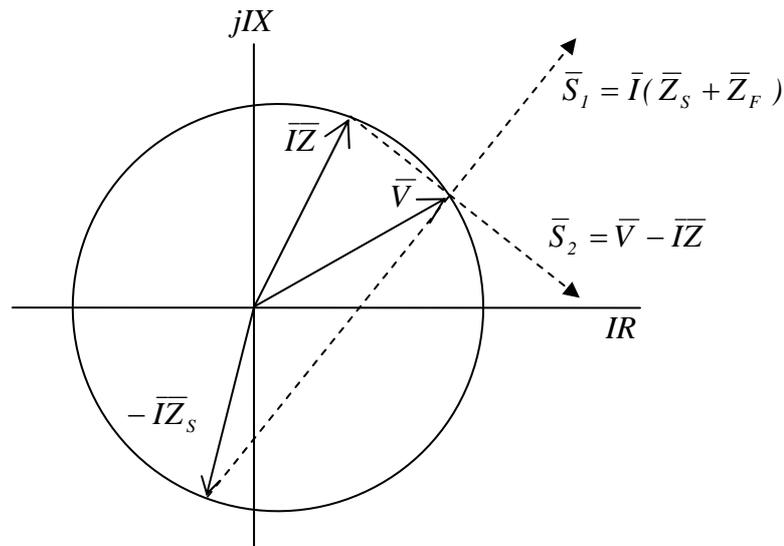
GEC Alsthom (1997) สัญญาณแรงดันที่นำมาใช้เปรียบเทียบ (\bar{S}_1) จะเป็นแรงดันของเฟสที่ไม่ได้เกิดฟอลต์ที่มีทิศทางเดียวกันกับแรงดันที่ป้อนให้กับรีเลย์ ดังนั้นสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบมุม เป็นไปตามสมการที่ (5) และ (6) ทำให้เกิดเป็นคุณสมบัติการทำงานในภาพที่ 6

$$\bar{S}_1 = \bar{I}(\bar{Z}_S + \bar{Z}_F) \quad (5)$$

$$\bar{S}_2 = \bar{V} - \bar{I}\bar{Z} \quad (6)$$

\bar{Z}_S คือ อิมพีแดนซ์รวมที่อยู่ด้านหลังรีเลย์เมื่อมองจากจุดเกิดฟอลต์

\bar{Z}_F คือ อิมพีแดนซ์จริงจากรีเลย์ถึงจุดเกิดฟอลต์



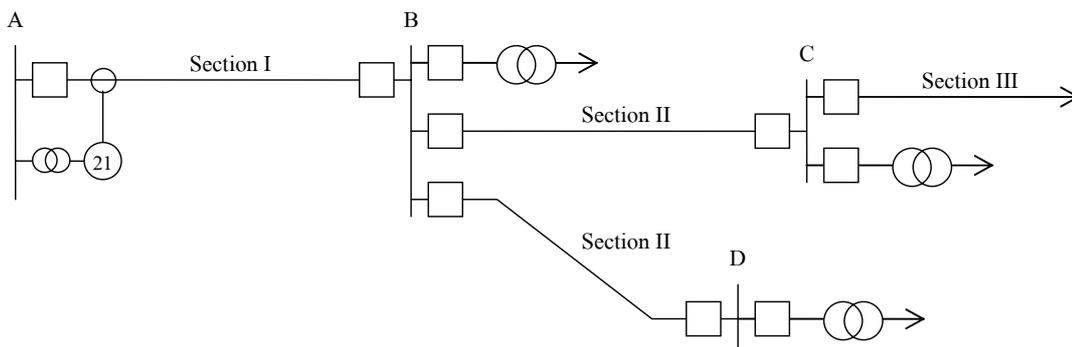
ภาพที่ 6 คุณลักษณะการทำงานในรูปแผนภาพแรงดันของรีเลย์ระยะทางแบบโม
ที่มีการโพลาลิซ์ข้าม

ที่มา: GEC Alsthom Measurement Ltd. (1997)

ในกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) จะทำให้แรงดันทุกเฟสเป็นศูนย์หมด ทำให้ไม่มีแรงดันมาโพลาลิซ์ จึงแก้ปัญหาโดยการนำแรงดันก่อนเกิดฟอลต์ จำนวน 10 ลูกคลื่นสัญญาณจากหน่วยความจำของรีเลย์มาทำการโพลาลิซ์ เรียกว่า รีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซ์จากหน่วยความจำ (Memory-Polarised Mho Distance Relay)

การตั้งค่าการทำงานของรีเลย์ระยะทาง

กองออกแบบสถานีไฟฟ้า (2546) กำหนดหลักเกณฑ์ทั่วไปในการตั้งค่าการทำงานของรีเลย์ป้องกันของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในส่วนของรีเลย์ระยะทางกรณีจ่ายไฟแบบ Radial Line ดังภาพที่ 7 ไว้ดังนี้



ภาพที่ 7 โชนกการป้องกันของรีเลย์ระยะทางกรณีจ่ายไฟแบบ Radial Line
ที่มา: กองออกแบบสถานีไฟฟ้า ฝ่ายออกแบบสถานีและสายส่ง กฟภ. (2546)

โชนกการทำงาน

Zone 1 = 80% of Line Impedance Section I

Zone 2 = 100% of Line Impedance Section I + 50% of Line Impedance Section II

(Shortest Line)

ทั้งนี้ต้องมากกว่า 120% of Line Impedance Section I

Zone 3 = 100% of Line Impedance Section I + 120% of Line Impedance Section II

(Longest Line)

ทั้งนี้ต้องมากกว่า 100% of Line Impedance Section (I+II) + 25% of Line Impedance Section III

แต่ต้องไม่เกิน 100% of Line Impedance Section I + 80% of Transformer at

Remote end

เวลาการทำงาน

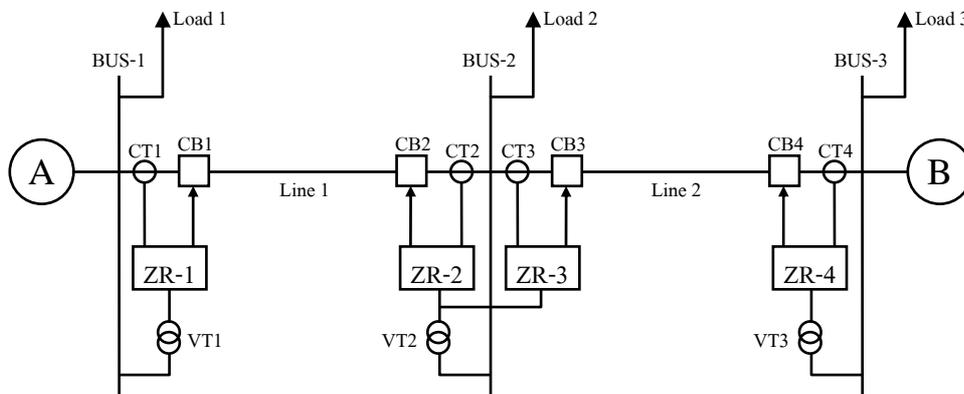
Zone 1 = ทันทีทันใด

Zone 2 = 300 ms

Zone 3 = 600 ms

ผลของความต้านทานฟอลต์และ โหลดในสายส่งต่อรีเลย์ระยะทาง

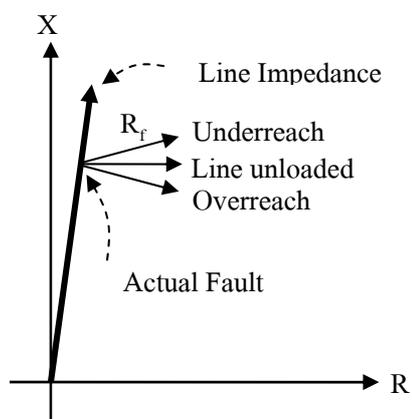
จากภาพที่ 8 แสดงระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย และสายส่ง 2 โคน์ เชื่อมต่อระหว่างบัส 4 บัส โดยสายส่งทั้งสองมีรีเลย์ระยะทาง (ZR-1, ZR-2, ZR-3 และ ZR-4) เป็นอุปกรณ์ป้องกันหลัก กรณีเกิดฟอลต์ขึ้นที่โคน์ 1 กระแสฟอลต์จะไหลมาจากแหล่งจ่าย A และ B จึงต้องมีการติดตั้งเบรกเกอร์ (CB1 และ CB2) ที่ปลายทั้งสองข้างของโคน์ 1 เพื่อตัดวงจรที่เกิดปัญหาออกจากระบบ การวัดค่าอิมพีแดนซ์จะคำนึงถึงเครื่องหมายตามทิศทางการมองของรีเลย์ด้วย เช่น รีเลย์ ZR-1 มองจากบัส 1 ไปยังบัส 2 ส่วนรีเลย์ ZR-2 มองจากบัส 2 ไปยังบัส 1



ภาพที่ 8 รูปแบบการใช้งานรีเลย์ระยะทางกับระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย

ที่มา: Department of Electrical Engineering, Texas A&M University. (2004)

อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์วัดได้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางระหว่างรีเลย์กับจุดที่เกิดฟอลต์ ถ้าฟอลต์มีความต้านทานฟอลต์ (Fault Resistance, R_f) อยู่ด้วย อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์วัดได้จะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ของไลน์บวกกับ R_f ดังแสดงในภาพที่ 9 กรณีเกิดฟอลต์ในโคน์ที่ไม่มีกระแสไหล R_f จะถูกบวกเพิ่มเข้าไปในทิศทางขนานกับแกน R (ค่ารีแอกแตนซ์คงที่) แต่ถ้าในโคน์มีกระแสไหล เวกเตอร์ของ R_f จะเคลื่อนไปในทิศทางที่ค่ารีแอกแตนซ์มากขึ้นหรืออาจจะน้อยลง ซึ่งขึ้นอยู่กับทิศทางกระแสไหลของกำลังไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ ระยะทางที่รีเลย์วัดได้อาจใกล้หรือไกลกว่าระยะทางที่เกิดขึ้นจริง เรียกว่าเกิด Overreach และ Underreach ตามลำดับ



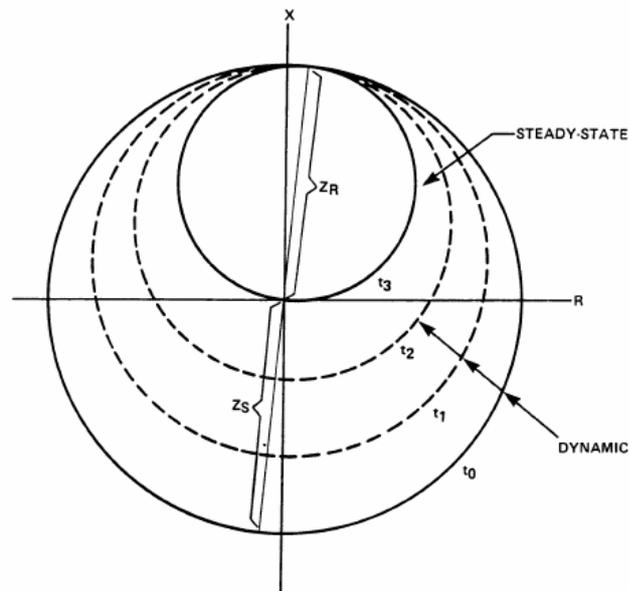
ภาพที่ 9 แผนภาพอิมพีแดนซ์แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นขณะเกิดฟอลต์ผ่าน R_f
ที่มา: Department of Electrical Engineering, Texas A&M University. (2004)

โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของรีเลย์ระยะทาง

จิรศักดิ์ (2541) ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของรีเลย์ระยะทาง โดยใช้โปรแกรม DELPHI Client/Server Suite version 3.0 ทำงานโดยการป้อนข้อมูลของระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น ระดับแรงดัน อิมพีแดนซ์ของสายส่ง อิมพีแดนซ์ของระบบ เป็นต้น ภายใต้ระบบไฟฟ้าที่สร้างขึ้น เมื่อสมมติตำแหน่งของฟอลต์ โปรแกรมจะคำนวณหาอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็น โดยใช้แรงดันและกระแสก่อนและหลังการเกิดฟอลต์ โดยอิมพีแดนซ์ค่านี้นำได้จากการหารเฟสเซอร์แรงดันด้วยกระแส แล้วนำไปเปรียบเทียบกับคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ที่เก็บไว้ ถ้าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นอยู่ในขอบเขตการป้องกันรีเลย์จะทำงาน อีกทั้งโปรแกรมยังสามารถคำนวณหาขอบเขตของการเกิดฟอลต์เมื่อมีความต้านทานฟอลต์ (R_f) ซึ่งผลของการพัฒนาโปรแกรมทำให้สามารถทราบถึงข้อจำกัด และปัญหาการใช้งานรีเลย์แต่ละชนิด และทำให้เลือกใช้รีเลย์ได้อย่างเหมาะสม

คุณลักษณะการทำงานในสภาวะพลวัตของรีเลย์ระยะทางแบบโม

Wilkinson and Mathews (n.d.) ได้อธิบายคุณลักษณะการทำงานในสภาวะพลวัต ของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่ใช้แรงดันของเฟสที่เกิดฟอลต์มาทำการโพลาลายซ์ และใช้หน่วยความจำในวงจรโพลาลายซ์ โดยคุณลักษณะการทำงานในสภาวะพลวัตจะเริ่มต้นเหมือนกับว่าเป็นวงกลมที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ถูกกำหนดโดยอิมพีแดนซ์สมมูลที่อยู่ทางด้านหลังของรีเลย์ และจะหดตัวเป็นวงกลมโมในสภาวะคงตัวเมื่อการทำงานของหน่วยความจำสิ้นสุดลง คุณลักษณะการทำงานในสภาวะพลวัตระหว่างช่วงที่มีการทำงานโดยใช้หน่วยความจำ สามารถครอบคลุมความต้านฟอลต์ (R_f) ได้มากกว่าคุณลักษณะการทำงานในสภาวะคงตัว ดังในภาพที่ 10



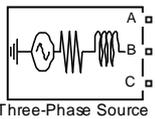
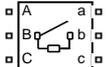
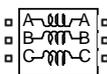
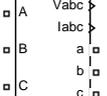
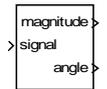
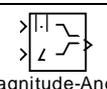
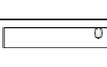
ภาพที่ 10 การเปลี่ยนรูปร่างจากคุณลักษณะการทำงานในสภาวะพลวัตสู่คุณลักษณะการทำงานในสภาวะคงตัว

ที่มา: Wilkinson and Mathews (n.d.)

โปรแกรม Matlab/Simulink

Simulink เป็นโปรแกรมที่ทำงานร่วมกับโปรแกรม Matlab ได้รับการพัฒนาและส่งเสริมการขายโดยบริษัท MathWorks โปรแกรม Matlab/Simulink ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับจำลองระบบแบบพลวัต โดยมีบล็อกไดอะแกรมใช้สร้างแบบจำลองและแสดงผล ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวอย่างบล็อกใน Simulink สำหรับสร้างแบบจำลอง

บล็อก	การใช้งาน
 <p>Three-Phase Source</p>	แหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส
 <p>Three-Phase Breaker</p>	เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบ 3 เฟส
 <p>Three-Phase Mutual Inductance Z1-Z0</p>	อิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างเฟสแบบสามเฟส ใช้สร้างไลน์
 <p>Three-Phase Fault</p>	ฟอลต์แบบ 3 เฟส ใช้สร้างการลัดวงจรแบบต่าง ๆ
 <p>Three-Phase V-I Measurement</p>	เครื่องมือวัดกระแสและแรงดันแบบ 3 เฟส
 <p>Voltage Measurement</p>	เครื่องมือวัดแรงดันแบบ 1 เฟส
 <p>Current Measurement</p>	เครื่องมือวัดกระแสแบบ 1 เฟส
 <p>Fourier</p>	ฟูเรียร์ ใช้แปลงสัญญาณไซน์ให้เป็นปริมาณเชิงขั้วที่มีขนาดและมุม
 <p>Magnitude-Angle to Complex</p>	ตัวแปลงปริมาณเชิงขั้วให้เป็นปริมาณเชิงซ้อน
 <p>Scope</p>	Scope แสดงค่าเป็นรูปกราฟ
 <p>Display</p>	Display แสดงค่าเป็นตัวเลข

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

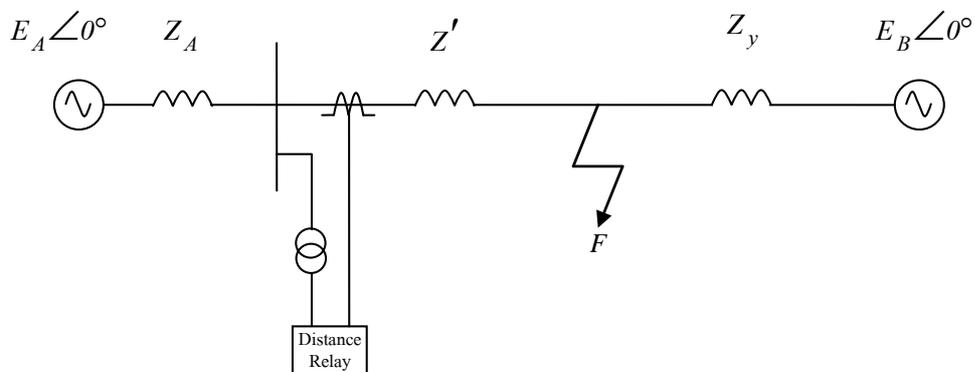
1. ไมโครคอมพิวเตอร์ Pentium 4 CPU 1.60 GHz พร้อมหน่วยความจำ 512 MB
2. ระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows XP Professional
3. โปรแกรม Matlab/Simulink Version 7.0
4. Microsoft Office Professional Edition 2003

วิธีการ

1. วิเคราะห์หาปริมาณไฟฟ้า ณ จุดติดตั้งรีเลย์เพื่อนำมาสร้างเป็นสัญญาณอินพุตให้กับแบบจำลองของรีเลย์ระยะทาง
2. วิเคราะห์หากราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซ์ด้วยตัวมันเอง รีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซ์ข้าม และรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซ์จากหน่วยความจำ เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองของรีเลย์ดังกล่าว
3. สร้างแบบจำลอง ระบบไฟฟ้า หม้อแปลงทดกระแส หม้อแปลงทดแรงดัน ฟอลต์ และรีเลย์ระยะทางแบบโม ในโปรแกรม Matlab/Simulink
4. สร้างเงื่อนไขฟอลต์และระบบไฟฟ้าแบบต่าง ๆ เพื่อค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น แล้วนำค่าที่ได้ไปพล็อตลงในแผนภาพอิมพีแดนซ์โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel
5. สร้างเงื่อนไขฟอลต์และระบบไฟฟ้าแบบต่าง ๆ เพื่อผลของกระแสไหล และความต้านทานฟอลต์ ต่อค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น แล้วนำค่าที่ได้ไปพล็อตลงในแผนภาพอิมพีแดนซ์โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel
6. สร้างเงื่อนไขฟอลต์และระบบไฟฟ้าแบบต่าง ๆ เพื่อดูกราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโม แล้วนำค่าที่ได้ไปพล็อตลงในแผนภาพแรงดันโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel

**การวิเคราะห์หาปริมาณไฟฟ้า ณ จุดติดตั้งรีเลย์เพื่อนำมาสร้างเป็นสัญญาณอินพุตให้กับ
แบบจำลองของรีเลย์ระยะทาง**

สันติ (2526) การวิเคราะห์หาปริมาณไฟฟ้าที่ถูกต้อง ณ จุดติดตั้งรีเลย์ เพื่อใช้เป็นสัญญาณอินพุตให้กับรีเลย์ระยะทาง จะใช้วงจรสมมูลที่มี 2 แหล่งจ่าย สำหรับวิเคราะห์ตามภาพที่ 11 โดยสมมติว่าทั้งสองแหล่งจ่ายมีแรงดันเท่ากันและมีมุมเฟสเหมือนกัน ($E_A \angle 0^\circ = E_B \angle 0^\circ$) กำหนดให้ตำแหน่งของฟอลต์อยู่ที่ด้านหน้าของรีเลย์ วิเคราะห์จากฟอลต์ 3 ชนิด ได้แก่ ฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) ฟอลต์ 2 เฟส (B-C) และ ฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)



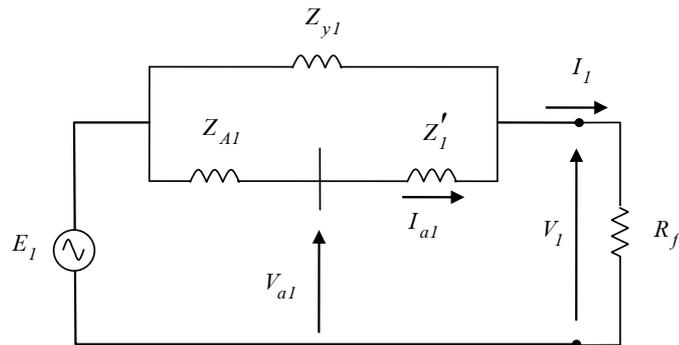
ภาพที่ 11 วงจรสมมูลที่ใช้วิเคราะห์หาปริมาณไฟฟ้า ณ จุดติดตั้งรีเลย์เพื่อนำมาสร้างเป็นสัญญาณอินพุตให้กับแบบจำลองของรีเลย์ระยะทาง

ที่มา: สันติ (2526)

ให้	V_a	แทน	แรงดันที่รีเลย์มองเห็น
	I_a	แทน	กระแสที่รีเลย์มองเห็น
	Z_x	แทน	อิมพีแดนซ์จากแหล่งจ่าย A ไปยังจุดเกิดฟอลต์
	Z_y	แทน	อิมพีแดนซ์จากแหล่งจ่าย B ไปยังจุดเกิดฟอลต์
	Z'	แทน	อิมพีแดนซ์จากรีเลย์ไปยังจุดเกิดฟอลต์
	$Z = \frac{Z_x Z_y}{Z_x + Z_y}$	แทน	อิมพีแดนซ์รวมทั้งหมดที่มองจากจุดเกิดฟอลต์
	R_f	แทน	ความต้านทานฟอลต์ หรือ ความต้านทานการลัดวงจร

1. การวิเคราะห์หาปริมาณไฟฟ้ากรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)

การคำนวณจะแทนด้วยวงจรเฟสซีแควนซ์บวก ดังภาพที่ 12 สามารถคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นได้ดังนี้



ภาพที่ 12 วงจรเฟสซีแควนซ์บวกกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)

$$Z'_{x1} = Z_{A1} + Z'_1$$

$$Z_1 = \frac{Z'_{x1} Z_{y1}}{Z'_{x1} + Z_{y1}}$$

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1 + R_f} = \frac{I}{K}$$

$$I_{al} = \frac{Z_{y1}}{Z'_{x1} + Z_{y1}} I_1 = C_1 I_1 = \frac{C_1}{K}$$

$$V_1 = I_1 R_f = \frac{R_f}{K}$$

$$V_{al} = I_{al} Z'_1 + V_1 = \frac{C_1 Z'_1}{K} + \frac{R_f}{K} = \frac{C_1 Z'_1 + R_f}{K}$$

ตารางที่ 3 ปริมาณไฟฟ้า ณ จุดติดตั้งรีเลย์กรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)

กระแส	แรงดัน
$I_{a1} = \frac{I}{K} C_1$	$V_{a1} = \frac{I}{K} (C_1 Z'_1 + R_f)$
$I_{a2} = 0$	$V_{a2} = 0$
$I_{a0} = 0$	$V_{a0} = 0$
$I_A = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = \frac{I}{K} C_1$	$V_A = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = \frac{I}{K} (C_1 Z'_1 + R_f)$
$I_B = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} = \frac{a^2}{K} C_1$	$V_B = V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2} = \frac{a^2}{K} (C_1 Z'_1 + R_f)$
$I_C = I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2} = \frac{a}{K} C_1$	$V_C = V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2} = \frac{a}{K} (C_1 Z'_1 + R_f)$
$I_{AB} = \frac{(1-a^2)}{K} C_1$	$V_{AB} = \frac{(1-a^2)}{K} (C_1 Z'_1 + R_f)$
$I_{BC} = \frac{(a^2-a)}{K} C_1$	$V_{BC} = \frac{(a^2-a)}{K} (C_1 Z'_1 + R_f)$
$I_{CA} = \frac{(a-1)}{K} C_1$	$V_{CA} = \frac{(a-1)}{K} (C_1 Z'_1 + R_f)$

ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็น

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A} = \frac{(C_1 Z'_1 + R_f) / K}{C_1 / K} = Z'_1 + \frac{R_f}{C_1}$$

$$Z_B = \frac{V_B}{I_B} = \frac{a^2 (C_1 Z'_1 + R_f) / K}{a^2 C_1 / K} = Z'_1 + \frac{R_f}{C_1}$$

$$Z_C = \frac{V_C}{I_C} = \frac{a (C_1 Z'_1 + R_f) / K}{a C_1 / K} = Z'_1 + \frac{R_f}{C_1}$$

$$Z_{AB} = \frac{V_{AB}}{I_{AB}} = \frac{(1-a^2) (C_1 Z'_1 + R_f) / K}{(1-a^2) C_1 / K} = Z'_1 + \frac{R_f}{C_1}$$

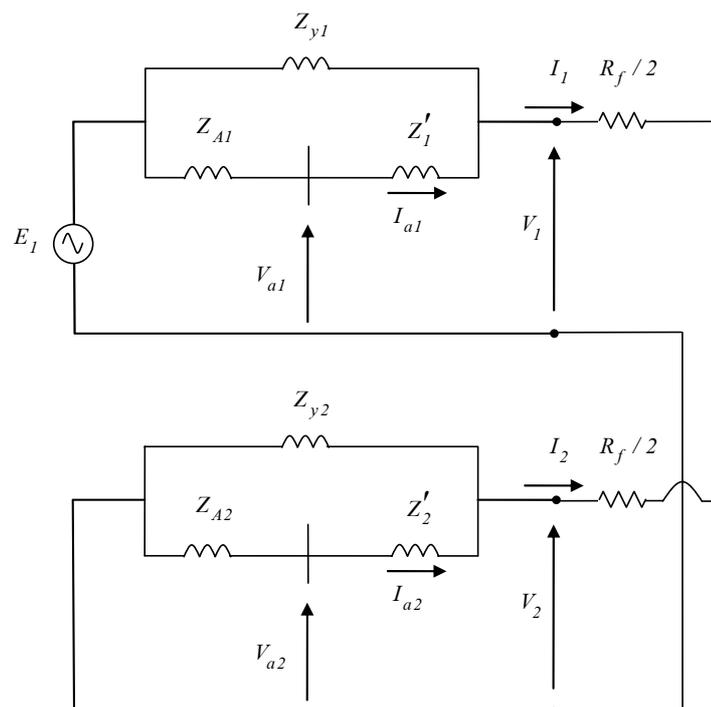
$$Z_{BC} = \frac{V_{BC}}{I_{BC}} = \frac{(a^2-a) (C_1 Z'_1 + R_f) / K}{(a^2-a) C_1 / K} = Z'_1 + \frac{R_f}{C_1}$$

$$Z_{CA} = \frac{V_{CA}}{I_{CA}} = \frac{(a-1) (C_1 Z'_1 + R_f) / K}{(a-1) C_1 / K} = Z'_1 + \frac{R_f}{C_1}$$

จะเห็นได้ว่ากรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส อัตราส่วนของ $\frac{V_A}{I_A}, \frac{V_B}{I_B}, \frac{V_C}{I_C}$ และ $\frac{V_{AB}}{I_{AB}}, \frac{V_{BC}}{I_{BC}}, \frac{V_{CA}}{I_{CA}}$ มีค่าเหมือนกันหมด คือ $Z'_1 + \frac{R_f}{C_1}$ หากไม่คิด R_f ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์วัดได้ก็คืออิมพีแดนซ์ของสายส่ง Z'_1

2. การวิเคราะห์หาปริมาณไฟฟ้ากรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C)

การคำนวณจะแทนด้วยวงจรเฟสซีเควนซ์บวกขนานกับวงจรเฟสซีเควนซ์ลบ ดังภาพที่ 13 สามารถคำนวณหาอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นได้ดังนี้



ภาพที่ 13 วงจรเฟสซีเควนซ์บวกขนานกับวงจรเฟสซีเควนซ์ลบ
กรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C)

$$\begin{aligned}
Z'_{x1} &= Z_{A1} + Z'_1 \\
Z_1 &= \frac{Z_{x1}Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} = Z_2 = \frac{Z_{x2}Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}} \\
I_1 &= \frac{E_1}{Z_1 + Z_2 + R_f} = \frac{E_1}{2Z_1 + R_f} = \frac{I}{K} = -I_2 \\
I_{a1} &= \frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} I_1 = C_1 I_1 = \frac{C_1}{K} \\
I_{a2} &= -I_{a1} = -C_1 / K \\
V_1 &= I_1 \frac{R_f}{2} - I_2 \frac{R_f}{2} - I_2 Z_2 = I_1 R_f + I_1 Z_1 = \frac{I}{K} (Z_1 + R_f) \\
V_2 &= -I_2 Z_2 = I_1 Z_1 = Z_1 / K \\
V_{a1} &= I_{a1} Z'_1 + V_1 = \frac{C_1 Z'_1}{K} + \frac{Z_1 + R_f}{K} = \frac{I}{K} (C_1 Z'_1 + Z_1 + R_f) \\
V_{a2} &= I_{a2} Z'_1 + V_2 = -\frac{C_1 Z'_1}{K} + \frac{Z_1}{K} = \frac{I}{K} (-C_1 Z'_1 + Z_1)
\end{aligned}$$

ตารางที่ 4 ปริมาณไฟฟ้า ณ จุดติดตั้งรีเลย์กรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C)

กระแส	แรงดัน
$I_{a1} = \frac{I}{K} C_1$	$V_{a1} = \frac{I}{K} (C_1 Z'_1 + Z_1 + R_f)$
$I_{a2} = -I_{a1}$	$V_{a2} = \frac{I}{K} (-C_1 Z'_1 + Z_1)$
$I_{a0} = 0$	$V_{a0} = 0$
$I_A = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0$	$V_A = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = \frac{I}{K} (2Z_1 + R_f)$
$I_B = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2}$ $= (a^2 - a) I_{a1}$ $= \frac{(a^2 - a)}{K} C_1$	$V_B = V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2}$ $= \frac{a^2}{K} (C_1 Z'_1 + Z_1 + R_f) + \frac{a}{K} (-C_1 Z'_1 + Z_1)$ $= \frac{I}{K} [(a^2 - a) C_1 Z'_1 - Z_1 + a^2 R_f]$
$I_C = I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2}$ $= (a - a^2) I_{a1}$ $= \frac{(a - a^2)}{K} C_1$	$V_C = V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2}$ $= \frac{a}{K} (C_1 Z'_1 + Z_1 + R_f) + \frac{a^2}{K} (-C_1 Z'_1 + Z_1)$ $= \frac{I}{K} [-(a^2 - a) C_1 Z'_1 - Z_1 + a R_f]$
$I_{AB} = -\frac{(a^2 - a)}{K} C_1$	$V_{AB} = \frac{I}{K} [-(a^2 - a) C_1 Z'_1 + 3Z_1 + (1 - a^2) R_f]$
$I_{BC} = \frac{2(a^2 - a)}{K} C_1$	$V_{BC} = \frac{I}{K} [2(a^2 - a) C_1 Z'_1 + (a^2 - a) R_f]$
$I_{CA} = \frac{(a - a^2)}{K} C_1$ $= -\frac{(a^2 - a)}{K} C_1$	$V_{CA} = \frac{I}{K} [-(a^2 - a) C_1 Z'_1 - 3Z_1 + (a - 1) R_f]$

ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็น

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A} = \frac{(2Z_1 + R_f)/K}{0} = \infty$$

$$Z_B = \frac{V_B}{I_B} = \frac{[(a^2 - a)C_1 Z_1' - Z_1 + a^2 R_f]/K}{(a^2 - a)C_1/K} = Z_1' - \frac{Z_1}{(a^2 - a)C_1} + \frac{a^2 R_f}{(a^2 - a)C_1}$$

$$Z_C = \frac{V_C}{I_C} = \frac{[-(a^2 - a)C_1 Z_1' - Z_1 + a R_f]/K}{-(a^2 - a)C_1/K} = Z_1' + \frac{Z_1}{(a^2 - a)C_1} - \frac{a R_f}{(a^2 - a)C_1}$$

$$Z_{AB} = \frac{V_{AB}}{I_{AB}} = \frac{[-(a^2 - a)C_1 Z_1' + 3Z_1 + (1 - a^2)R_f]/K}{-(a^2 - a)C_1/K} = Z_1' - \frac{j\sqrt{3}Z_1}{C_1} - \frac{a R_f}{C_1}$$

$$Z_1 = \frac{Z_{x1} Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}}; C_1 = \frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}}; \Rightarrow \frac{Z_1}{C_1} = \frac{Z_{x1} Z_{y1}}{Z_{y1}} = Z_{x1}$$

$$Z_{AB} = Z_1' - j\sqrt{3}Z_{x1} - \frac{a R_f}{C_1}$$

$$Z_{BC} = \frac{V_{BC}}{I_{BC}} = \frac{[2(a^2 - a)C_1 Z_1' + (a^2 - a)R_f]/K}{2(a^2 - a)C_1/K} = Z_1' + \frac{R_f}{2C_1}$$

$$Z_{CA} = \frac{V_{CA}}{I_{CA}} = \frac{[-(a^2 - a)C_1 Z_1' - 3Z_1 + (a - 1)R_f]/K}{-(a^2 - a)C_1/K} = Z_1' + \frac{j\sqrt{3}Z_1}{C_1} - \frac{R_f}{a C_1}$$

$$= Z_1' + j\sqrt{3}Z_{x1} - \frac{a^2 R_f}{C_1}$$

จะเห็นว่ากรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส อัตราส่วนของ $\frac{V_A}{I_A}, \frac{V_B}{I_B}, \frac{V_C}{I_C}$ ไม่สามารถนำมาใช้

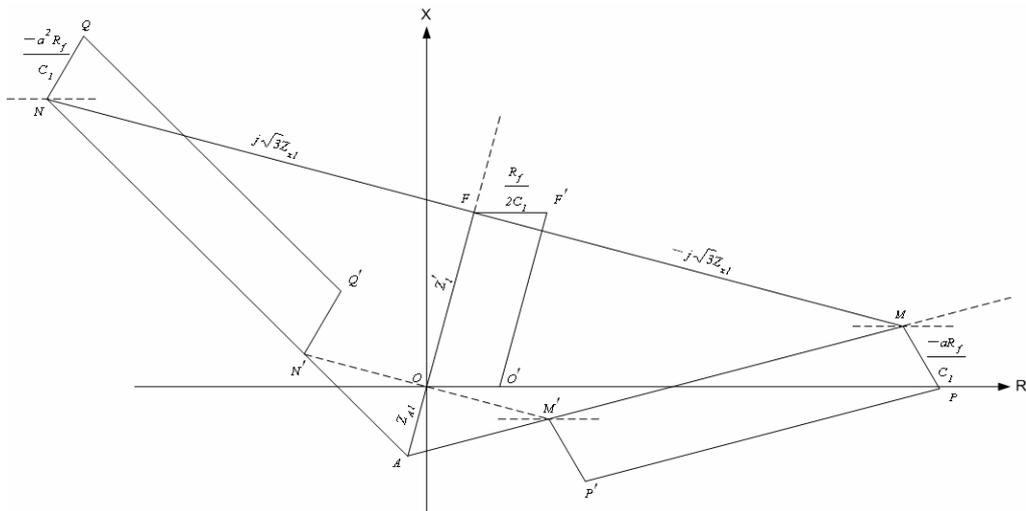
งานได้ เนื่องจาก $\frac{V_A}{I_A}$ เป็นค่าอนันต์ ส่วนที่เหลือมีค่าค่อนข้างซับซ้อน แต่สำหรับอัตราส่วนของ

$\frac{V_{AB}}{I_{AB}}, \frac{V_{BC}}{I_{BC}}, \frac{V_{CA}}{I_{CA}}$ เมื่อนำมาเขียนลงในแผนภาพอิมพีแดนซ์ สามารถวาดล็อกอิมพีแดนซ์ได้ตาม

ภาพที่ 14 โดยรูปสี่เหลี่ยม $OFF'O'$ เป็นล็อกอิมพีแดนซ์ของ $\frac{V_{BC}}{I_{BC}}$, รูปสี่เหลี่ยม $MMPP'$

เป็นล็อกอิมพีแดนซ์ของ $\frac{V_{AB}}{I_{AB}}$ และรูปสี่เหลี่ยม $NNQQ'$ เป็นล็อกอิมพีแดนซ์ของ $\frac{V_{CA}}{I_{CA}}$ ซึ่ง

แสดงให้เห็นว่าเมื่อเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C) อัตราส่วนของ $\frac{V_{BC}}{I_{BC}}$ สามารถนำมาใช้งานได้



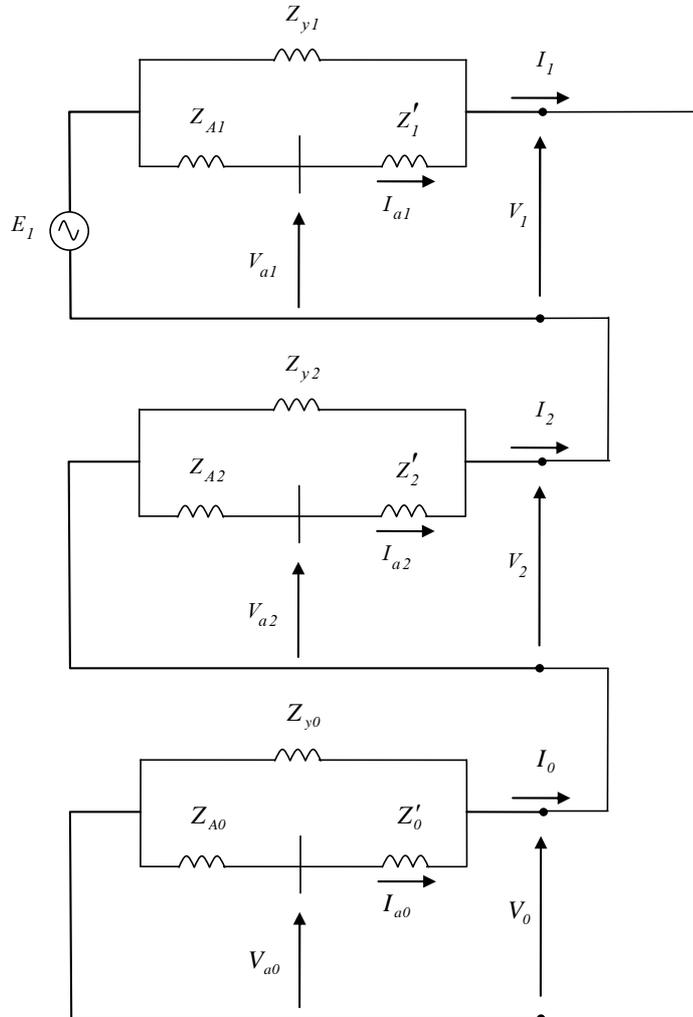
ภาพที่ 14 โลกัสมิพีแดนซ์สำหรับ $\frac{V_{AB}}{I_{AB}}, \frac{V_{BC}}{I_{BC}}, \frac{V_{CA}}{I_{CA}}$ กรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส

3. การวิเคราะห์หาปริมาณไฟฟ้ากรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)

การคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นจะมีวงจรเฟสซีแควนซ์ศูนย์มาเกี่ยวข้องซึ่งจะซับซ้อนมาก ในการวิเคราะห์จะแตกต่างจากที่ผ่านมา โดยจะพิจารณาจากวงจรเฟสซีแควนซ์บวก วงจรเฟสซีแควนซ์ลบ และวงจรเฟสซีแควนซ์ศูนย์ ต่อกันโดยยังไม่คิดผลของ R_f ดังภาพที่ 15

$$\begin{aligned}
 \sum V &= 0 \\
 V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} &= I_{a1}Z'_1 + I_{a2}Z'_2 + I_{a0}Z'_0 \\
 V_A &= 2I_{a1}Z'_1 + I_{a0}Z'_0 \\
 &= Z'_1(2I_{a1} + I_{a0} + \frac{I_{a0}Z'_0}{Z'_1} - I_{a0}) \\
 &= Z'_1(2I_{a1} + I_{a0} + I_{a0} \frac{Z'_0 - Z'_1}{Z'_1}) \\
 &= Z'_1(I_A + I_N \frac{Z'_0 - Z'_1}{3Z'_1}) \\
 &= Z'_1(I_A + I_N K_N) \\
 Z'_1 &= \frac{V_A}{(I_A + I_N K_N)}
 \end{aligned}$$

จะเห็นว่าเมื่อเกิดฟอลต์เฟส A ลงดิน ถ้าจะให้รีเลย์มองเห็นอิมพีแดนซ์ที่ถูกต้อง กระแสที่เข้ารีเลย์ต้องเป็น $I_A + I_N K_N$ โดยที่ K_N คือสัมประสิทธิ์ชดเชยการลัดวงจรลงดิน (Residual Compensation Factor)



ภาพที่ 15 วงจรเฟสซีเควนซ์บวก วงจรเฟสซีเควนซ์ลบ และวงจรเฟสซีเควนซ์ศูนย์ ต่ออนุกรมกัน กรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน

จากการวิเคราะห์หาปริมาณไฟฟ้า ณ จุดติดตั้งรีเลย์ทั้งสามกรณี สรุปได้ว่า รีเลย์ระยะทาง จะมองเห็นอิมพีแดนซ์ในขณะเกิดฟอลต์แล้วเป็นอิมพีแดนซ์ของไลน์ได้นั้น ต้องออกแบบสัญญาณ อินพุตที่ป้อนให้กับรีเลย์ระยะทางเป็น 2 ชุด ได้แก่ รีเลย์เฟสและรีเลย์กราวด์ เพื่อให้มองเห็นระยะทางได้ถูกต้องเมื่อเกิดฟอลต์แบบเฟสฟอลต์และกราวด์ฟอลต์ตามลำดับ โดยทั้งสองชุดนี้ต้องแยก ออกเป็นเฟสอีกชุดละ 3 เฟส ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{รีเลย์เฟส AB} & \quad Z_{AB} = \frac{V_{AB}}{I_{AB}} \\
 \text{รีเลย์เฟส BC} & \quad Z_{BC} = \frac{V_{BC}}{I_{BC}} \\
 \text{รีเลย์เฟส CA} & \quad Z_{CA} = \frac{V_{CA}}{I_{CA}} \\
 \text{รีเลย์กราวด์ A} & \quad Z_A = \frac{V_A}{I_A + I_N K_N} \\
 \text{รีเลย์กราวด์ B} & \quad Z_B = \frac{V_B}{I_B + I_N K_N} \\
 \text{รีเลย์กราวด์ C} & \quad Z_C = \frac{V_C}{I_C + I_N K_N}
 \end{aligned}$$

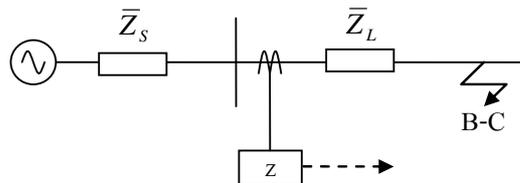
การวิเคราะห์หาคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซ์แบบต่าง ๆ

รีเลย์ระยะทางแบบโมที่ศึกษา เพื่อที่จะนำมาสร้างแบบจำลอง แบ่งเป็น 3 ชนิด ได้แก่ รีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซ์ด้วยตัวมันเอง รีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซ์ข้าม และรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซ์จากหน่วยความจำ ทำงานโดยอาศัยหลักการเปรียบเทียบมุมของสัญญาณอินพุตของชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบมุมระหว่าง S_1 และ S_2 โดย S_1 เป็นแรงดันที่นำมาใช้เปรียบเทียบหรือเรียกว่าการโพลาลิซ์ ซึ่งต้องทำการวิเคราะห์หาแรงดันดังกล่าวในขณะที่เกิดฟอลต์แบบต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปสมการของปริมาณไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณอินพุตให้กับรีเลย์ระยะทาง แล้วนำมาวาดกราฟคุณลักษณะการทำงานลงบนแผนภาพแรงดัน

การวิเคราะห์จะพิจารณากรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส กำหนดให้ตำแหน่งของฟอลต์อยู่ทางด้านหน้าและด้านหลังรีเลย์ ภายใต้งานระบบไฟฟ้า 1 และ 2 แหล่งจ่าย โดยพิจารณาที่รีเลย์เฟส BC สมการที่วิเคราะห์ได้ เมื่อนำไปวาดกราฟคุณลักษณะการทำงานเวกเตอร์ S_1 และ S_2 ต้องตรงกับมุมของสัญญาณอินพุตของชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบมุมที่วัดได้ในโปรแกรม

1. การวิเคราะห์หาคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลाइซ์ด้วยตัวมันเอง

1.1 กรณีเกิดฟอลต์ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย

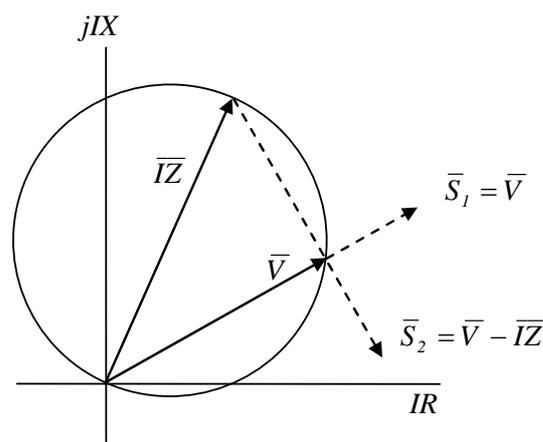


ภาพที่ 16 แผนภาพเส้นเดียวกรณีเกิดฟอลต์ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย

จากภาพที่ 16 เมื่อเกิดฟอลต์ แรงดันโพลาลाइซ์ก็คือแรงดันที่ป้อนให้กับรีเลย์ และกระแสฟอลต์มีทิศทางเดียวกันกับกระแสที่ป้อนให้กับรีเลย์ ดังนั้นสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบมุม เป็นไปตามสมการที่ (7) และ (8) เขียนคุณลักษณะการทำงานในรูปแผนภาพแรงดันได้ดังภาพที่ 17

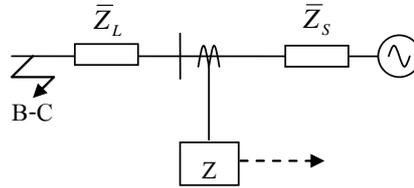
$$\bar{S}_1 = \bar{V}_{BC} \quad (7)$$

$$\bar{S}_2 = \bar{V}_{BC} - \bar{I}_{BC} \bar{Z} \quad (8)$$



ภาพที่ 17 คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลाइซ์ด้วยตัวมันเอง เมื่อเกิดฟอลต์ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย

1.2 กรณีเกิดฟอลต์ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย

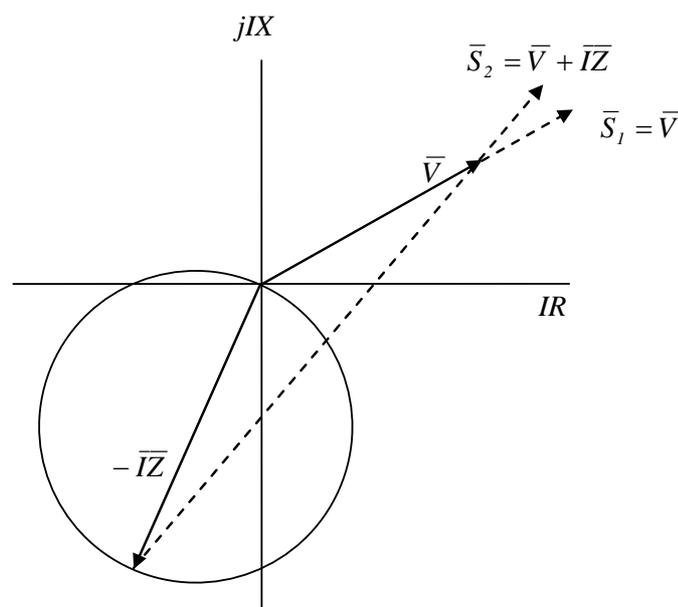


ภาพที่ 18 แผนภาพเส้นเดียวกรณีเกิดฟอลต์ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย

จากภาพที่ 18 เมื่อเกิดฟอลต์ แรงดันโวลตาไลซ์ก็คือแรงดันที่ป้อนให้กับรีเลย์ แต่กระแสฟอลต์มีทิศทางตรงข้ามกับกระแสที่ป้อนให้กับรีเลย์ ดังนั้นสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบมุม เป็นไปตามสมการที่ (9) และ (10) เขียนคุณลักษณะการทำงานในรูปแผนภาพแรงดันได้ดังภาพที่ 19

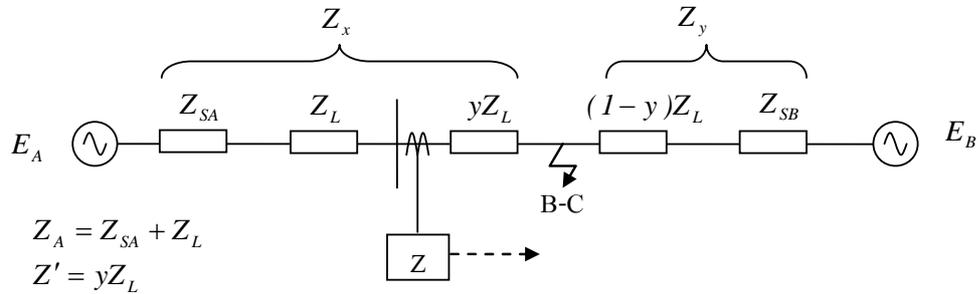
$$\bar{S}_1 = \bar{V}_{BC} \quad (9)$$

$$\bar{S}_2 = \bar{V}_{BC} - (-\bar{I}_{BC}\bar{Z}) \quad (10)$$



ภาพที่ 19 คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโวลตาไลซ์ด้วยตัวมันเอง เมื่อเกิดฟอลต์ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย

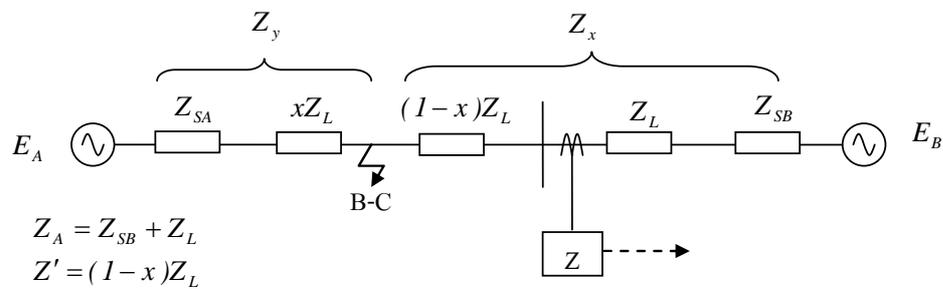
1.3 กรณีเกิดฟอลต์ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย



ภาพที่ 20 แผนภาพเส้นเดียวกรณีเกิดฟอลต์ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย

จากภาพที่ 20 เมื่อเกิดฟอลต์ แรงดันโพลาร์ไลซ์คือแรงดันที่ป้อนให้กับรีเลย์ และกระแสฟอลต์มีทิศทางเดียวกันกับกระแสที่ป้อนให้กับรีเลย์ ดังนั้นสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบมุม จะเหมือนกับสมการที่ (7) และ (8)

1.4 กรณีเกิดฟอลต์ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย



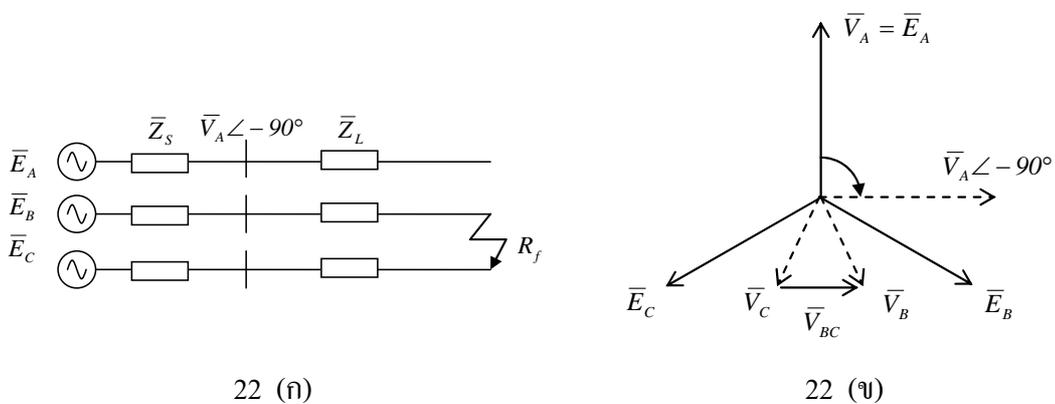
ภาพที่ 21 แผนภาพเส้นเดียวกรณีเกิดฟอลต์ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย

จากภาพที่ 21 เมื่อเกิดฟอลต์ แรงดันโพลาร์ไลซ์คือแรงดันที่ป้อนให้กับรีเลย์ แต่กระแสฟอลต์มีทิศทางตรงข้ามกับกระแสที่ป้อนให้กับรีเลย์ ดังนั้นสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบมุม จะเหมือนกับสมการที่ (9) และ (10)

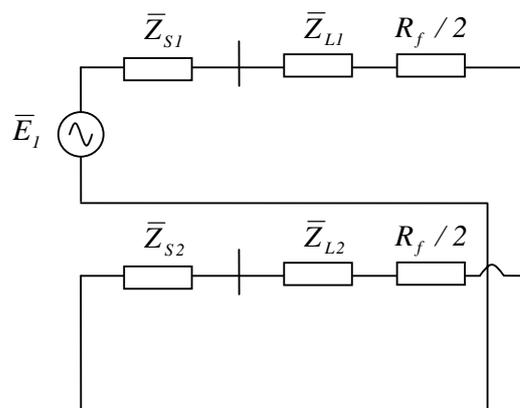
2. การวิเคราะห์หาคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซ์ข้าม

2.1 กรณีเกิดฟอลต์ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย

เมื่อเกิดฟอลต์ แรงดันโพลาลิซ์ คือ $\bar{V}_A \angle -90^\circ$ ซึ่งจะกลายเป็นสัญญาณที่มีทิศทางเดียวกับ \bar{V}_{BC} อธิบายโดยภาพที่ 22 (ก) แผนภาพสามเฟส และภาพที่ 22 (ข) เวกเตอร์แรงดันของระบบ สามารถวิเคราะห์หาสมการของแรงดันโพลาลิซ์ได้จากวงจรเฟสซีเควนซ์บวกและวงจرفาสซีเควนซ์ลบ ต่อขนานกัน ดังภาพที่ 23



ภาพที่ 22 แผนภาพสามเฟสและเวกเตอร์แรงดันของระบบ กรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย



ภาพที่ 23 วงจรเฟสซีเควนซ์บวกและวงจرفาสซีเควนซ์ลบต่อขนานกัน กรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย

ในสถานะที่ไม่เกิดโหลด $\bar{V}_A \angle -90^\circ = \bar{E}_A \angle -90^\circ \propto \bar{E}_{BC}$

$$Z_{S1} = Z_{S2}$$

$$Z_{L1} = Z_{L2}$$

$$E_1 = I_1(2Z_S + 2Z_L + R_f)$$

$$E_2 = 0,$$

$$E_B = a^2 E_1$$

$$E_C = a E_1$$

$$I_B = a^2 I_1 - a I_1$$

$$I_C = a I_1 - a^2 I_1$$

$$E_{BC} = (a^2 - a) E_1$$

$$I_{BC} = 2(a^2 - a) I_1$$

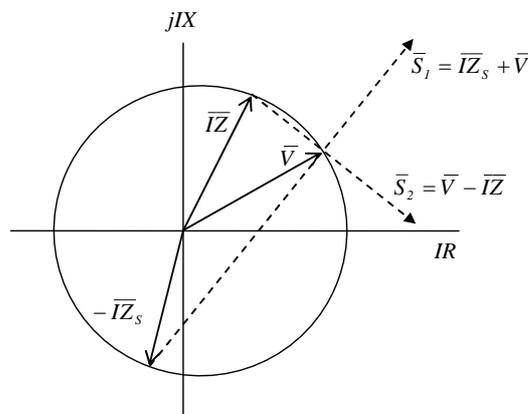
$$\frac{E_{BC}}{I_{BC}} = \frac{E_1}{2I_1} = Z_S + Z_L + \frac{R_f}{2}$$

$$\begin{aligned} E_{BC} &= I_{BC} \left(Z_S + Z_L + \frac{R_f}{2} \right) = I_{BC} Z_S + I_{BC} \left(Z_L + \frac{R_f}{2} \right) \\ &= I_{BC} Z_S + V_{BC} \end{aligned}$$

ดังนั้นสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบกับมุม เป็นไปตามสมการที่ (11) และ (12) เขียนคุณลักษณะการทำงานในรูปแบบแผนภาพแรงดันได้ดังภาพที่ 24

$$\bar{S}_1 = \bar{V}_A \angle -90^\circ \propto \bar{I}_{BC} \bar{Z}_S + \bar{V}_{BC} \quad (11)$$

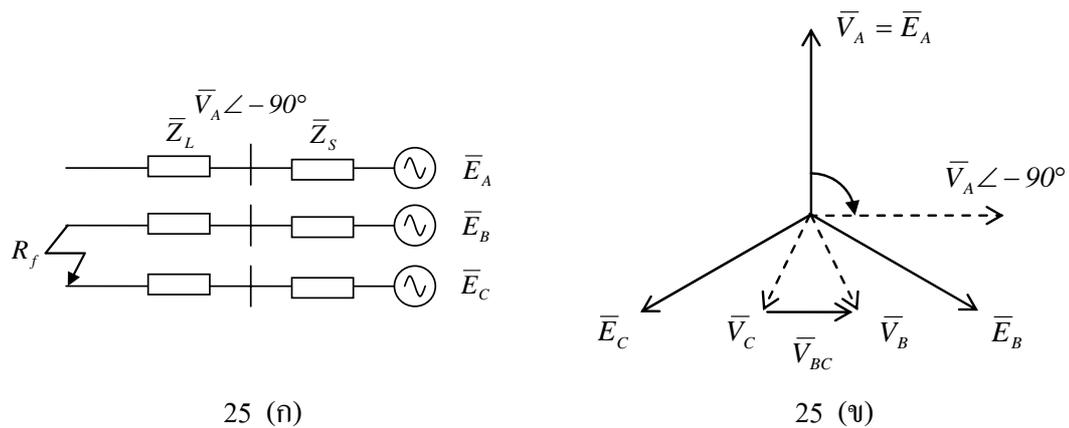
$$\bar{S}_2 = \bar{V}_{BC} - \bar{I}_{BC} \bar{Z} \quad (12)$$



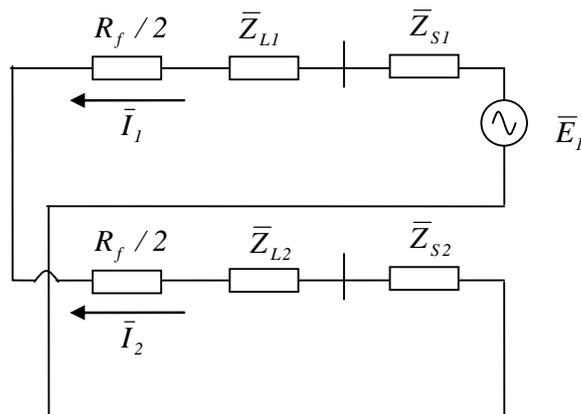
ภาพที่ 24 คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพล่าไลซ์ข้าม
เมื่อเกิดฟลัดต์ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย

2.2 กรณีเกิดฟอลต์ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย

เมื่อเกิดฟอลต์ แรงดันโพลาลายส์ คือ $\bar{V}_A \angle -90^\circ$ ซึ่งจะกลายเป็นสัญญาณที่มีทิศทางเดียวกับ \bar{V}_{BC} อธิบายโดยภาพที่ 25 (ก) แผนภาพสามเฟส และภาพที่ 25 (ข) เวกเตอร์แรงดันของระบบ สามารถวิเคราะห์หาสมการของแรงดันโพลาลายส์ได้จากวงจรเฟสซีเควนซ์บวกและวงจรเฟสซีเควนซ์ลบต่อขนานกัน ดังภาพที่ 26



ภาพที่ 25 แผนภาพสามเฟสและเวกเตอร์แรงดันของระบบ กรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหลังรีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย

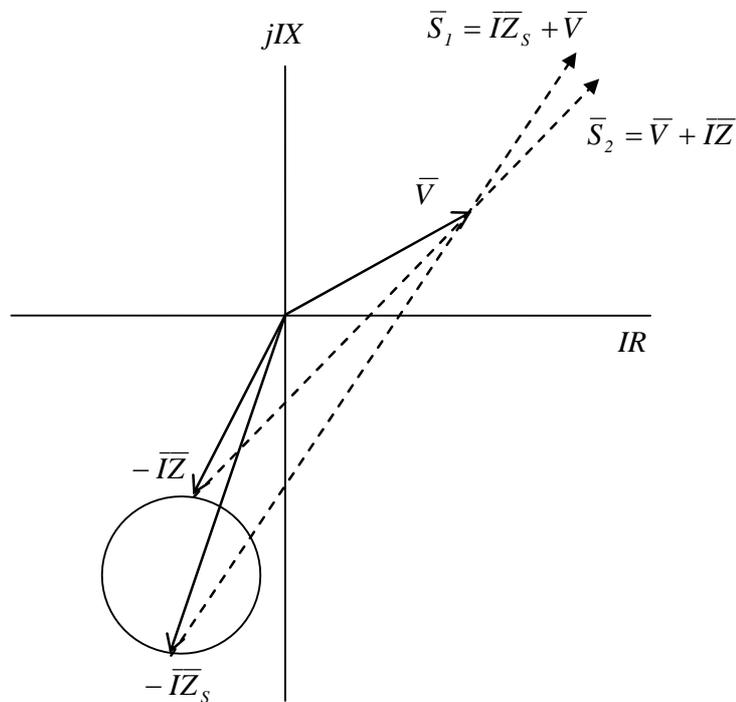


ภาพที่ 26 วงจรเฟสซีเควนซ์บวกและวงจรเฟสซีเควนซ์ลบต่อขนานกัน กรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหลังรีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย

การคำนวณหาแรงดันโพล่าไลซ์ มีวิธีการเหมือนกับกรณีเกิดฟอลต์ด้านหน้า แต่กระแสฟอลต์จะมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสที่ป้อนให้กับรีเลย์ ดังนั้นสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบมุม เป็นไปตามสมการที่ (13) และ (14) เขียนคุณลักษณะการทำงานในรูปแผนภาพแรงดันได้ดังภาพที่ 27

$$\bar{S}_1 = \bar{V}_A \angle -90^\circ \propto \bar{I}_{BC} \bar{Z}_S + \bar{V}_{BC} \quad (13)$$

$$\bar{S}_2 = \bar{V}_{BC} - (-\bar{I}_{BC} \bar{Z}) \quad (14)$$



ภาพที่ 27 คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพล่าไลซ์ข้าม เมื่อเกิดฟอลต์ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย

2.3 กรณีเกิดฟอลต์ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย

สามารถวิเคราะห์หาสมการของแรงดันโพล่าไลซ์ได้จากวงจรเฟสซีแควนซ์บวก และวงจรเฟสซีแควนซ์ลบต่อขนานกัน เหมือนในภาพที่ 13

$$\text{กำหนดให้ } Z_1 = \frac{Z_{x1}Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} = Z_2 = \frac{Z_{x2}Z_{y2}}{Z_{x2} + Z_{y2}}$$

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1 + Z_2 + R_f} = \frac{E_1}{2Z_1 + R_f} = \frac{I}{K} = -I_2$$

$$I_{a1} = \frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}} I_1 = C_1 I_1 = \frac{C_1}{K}$$

$$I_{a2} = -I_{a1} = -C_1 / K$$

$$I_B = a^2 I_{a1} + a I_{a2} = (a^2 - a) I_{a1} = (a^2 - a) \frac{C_1}{K}$$

$$I_C = a I_{a1} + a^2 I_{a2} = (a - a^2) I_{a1} = (a - a^2) \frac{C_1}{K}$$

$$I_{BC} = 2(a^2 - a) \frac{C_1}{K}$$

$$E_1 = I_1 (Z_1 + Z_2 + R_f) = \frac{I}{K} (Z_1 + Z_2 + R_f)$$

$$E_B = a^2 E_1$$

$$E_C = a E_1$$

$$E_{BC} = (a^2 - a) E_1 = \frac{(a^2 - a)}{K} (Z_1 + Z_2 + R_f)$$

$$\frac{E_{BC}}{I_{BC}} = \frac{\frac{(a^2 - a)}{K} (Z_1 + Z_2 + R_f)}{2(a^2 - a) \frac{C_1}{K}} = \frac{Z_1 + Z_2 + R_f}{2C_1}$$

$$= \frac{2Z_1 + R_f}{2C_1} = \frac{Z_1}{C_1} + \frac{R_f}{2C_1}$$

$$= \frac{\frac{Z_{x1}Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}}}{\frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}}} + \frac{R_f}{2 \frac{Z_{y1}}{Z_{x1} + Z_{y1}}} = Z_{x1} + \frac{(Z_{x1} + Z_{y1})R_f}{2Z_{y1}}$$

$$= Z_{SA} + Z_L + yZ_L + \frac{(Z_{x1} + Z_{y1})R_f}{2Z_{y1}}$$

$$= (Z_{SA} + Z_L) + \left(yZ_L + \frac{(Z_{SA} + 2Z_L + Z_{SB})R_f}{2(Z_{SB} + (1-y)Z_L)} \right)$$

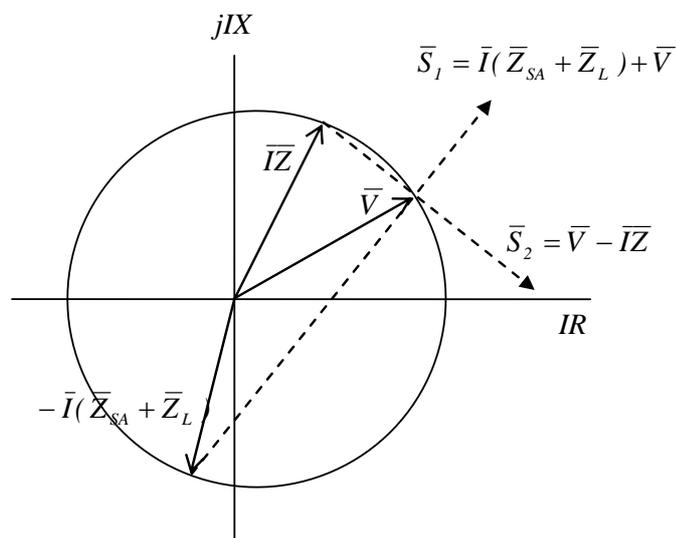
$$E_{BC} = I_{BC} \left[(Z_{SA} + Z_L) + \left(yZ_L + \frac{(Z_{SA} + 2Z_L + Z_{SB})R_f}{2(Z_{SB} + (1-y)Z_L)} \right) \right]$$

$$= I_{BC} (Z_{SA} + Z_L) + V_{BC}$$

ดังนั้นสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบกับมุม เป็นไปตามสมการ
ที่ (15) และ (16) เขียนคุณลักษณะการทำงานในรูปแบบแผนภาพแรงดันได้ดังภาพที่ 28

$$\begin{aligned}\bar{S}_1 &= \bar{V}_A \angle -90^\circ = \bar{E}_A \angle -90^\circ \propto \bar{E}_{BC} \\ &= \bar{I}_{BC} \left[(\bar{Z}_{SA} + \bar{Z}_L) + \left(y\bar{Z}_L + \frac{(\bar{Z}_{SA} + 2\bar{Z}_L + \bar{Z}_{SB})R_f}{2(\bar{Z}_{SB} + (1-y)\bar{Z}_L)} \right) \right] \\ &= \bar{I}_{BC}(\bar{Z}_{SA} + \bar{Z}_L) + \bar{V}_{BC}\end{aligned}\quad (15)$$

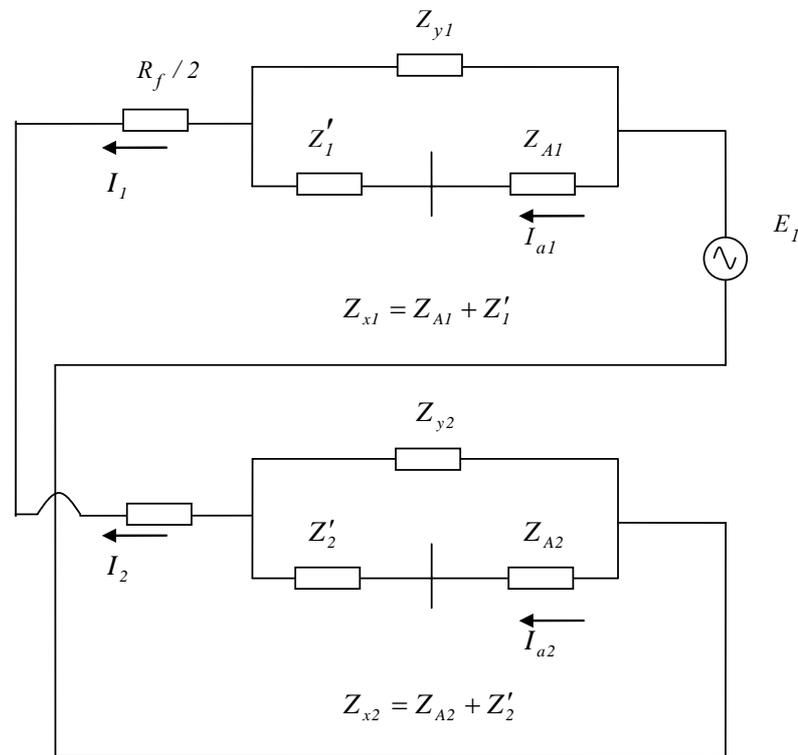
$$\bar{S}_2 = \bar{V}_{BC} - \bar{I}_{BC}\bar{Z}\quad (16)$$



ภาพที่ 28 คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซซ์ข้าม เมื่อเกิดฟอลต์
ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย

2.4 กรณีเกิดฟอลต์ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย

สามารถวิเคราะห์หาสมการของแรงดันโพลาลิซซ์ได้จากวงจรเฟสซีแควนซ์บวก
และวงจรเฟสซีแควนซ์ลบต่อขนานกัน ดังภาพที่ 29

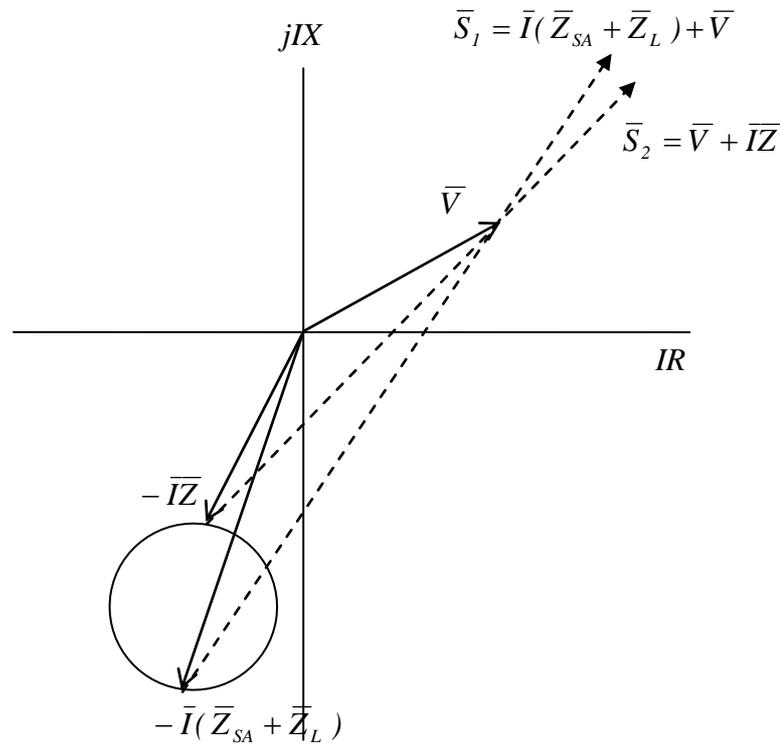


ภาพที่ 29 วงจรเฟสซีเควนชั้ววงและวงจรเฟสซีเควนชั้วลต่อขนานกันกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส
ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย

การคำนวณหาแรงดันโพลาร์ไลซ์ มีวิธีการเหมือนกับกรณีเกิดฟอลต์ด้านหน้า แต่
กระแสฟอลต์จะมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสที่ป้อนให้กับรีเลย์ ดังนั้นสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับ
ชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบมุม เป็นไปตามสมการที่ (17) และ (18) เขียนคุณลักษณะการทำงานใน
รูปแผนภาพแรงดันได้ดังภาพที่ 30

$$\begin{aligned} \bar{S}_1 &= \bar{V}_A \angle -90^\circ = \bar{E}_A \angle -90^\circ \propto \bar{E}_{BC} \\ &= \bar{I}_{BC} \left[(\bar{Z}_{SA} + \bar{Z}_L) + \left(y\bar{Z}_L + \frac{(\bar{Z}_{SA} + 2\bar{Z}_L + \bar{Z}_{SB})R_f}{2(\bar{Z}_{SB} + (1-y)\bar{Z}_L)} \right) \right] \\ &= \bar{I}_{BC} (\bar{Z}_{SA} + \bar{Z}_L) + \bar{V}_{BC} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\bar{S}_2 = \bar{V}_{BC} - (-\bar{I}_{BC} \bar{Z}) \quad (18)$$



ภาพที่ 30 คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพล่าไลซ์ข้าม เมื่อเกิดฟอลต์ ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย

3. การวิเคราะห์หาคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพล่าไลซ์จากหน่วย หน่วยความจำ

การโพล่าไลซ์จากหน่วยความจำจะนำเอาแรงดันโพล่าไลซ์ขณะก่อนเกิดฟอลต์ 10 ไซเคิล มาเป็นสัญญาณอินพุตให้กับชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบมุม (S_7) สามารถแบ่งการโพล่าไลซ์ออกได้ อีก 4 ลักษณะ ได้แก่

การโพล่าไลซ์ด้วยตัวมันเองแบบไม่ใช้หน่วยความจำ (Self-Polarised without Memory)

การโพล่าไลซ์ด้วยตัวมันเองแบบใช้หน่วยความจำ (Self-Polarised with Memory)

การโพล่าไลซ์ข้ามแบบไม่ใช้หน่วยความจำ (Cross-Polarised without Memory)

การโพล่าไลซ์ข้ามแบบใช้หน่วยความจำ (Cross-Polarised with Memory)

การวิเคราะห์หาคุณลักษณะการทำงานจะใช้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย กิตฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) 2 เฟส (B-C) และ 1 เฟสลงดิน (A-G) โดยไม่คิดผลของโหลด พิจารณาที่รีเลย์ BC BC และ A ตามลำดับ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แรงดันโพลาร์ไลซ์ที่เกิดจากฟอลต์แบบต่างๆ

เงื่อนไข รีเลย์	Fault BC (พิจารณาที่รีเลย์ BC)	Fault ABC (พิจารณาที่รีเลย์ BC)	Fault AG (พิจารณาที่รีเลย์ A)
Self- polarised w/o Memory	$\bar{S}_I = \bar{V}_{BC}$	$\bar{S}_I = \bar{V}_{BC}$	$\bar{S}_I = \bar{V}_A$
Self- polarised w/ Memory	$\bar{S}_I = \bar{V}_{BC_prefault} = \bar{E}_{BC}$ $\bar{E}_{BC} = \bar{I}_{BC}\bar{Z}_S + \bar{V}_{BC}$	$\bar{S}_I = \bar{V}_{BC_prefault} = \bar{E}_{BC}$ $\bar{E}_{BC} = \bar{I}_{BC}\bar{Z}_S + \bar{V}_{BC}$	$\bar{S}_I = \bar{V}_{A_prefault} = \bar{E}_A$ $\bar{E}_A = (\bar{I}_A + \bar{K}_N\bar{I}_N)\bar{Z}_S + \bar{V}_A$
Cross- polarised w/o Memory	$\bar{S}_I = -j\bar{V}_A = -j\bar{E}_A \propto \bar{E}_{BC}$ $\bar{E}_{BC} = \bar{I}_{BC}\bar{Z}_S + \bar{V}_{BC}$	$\bar{S}_I = -j\bar{V}_A \propto \bar{V}_{BC}$	$\bar{S}_I = j\bar{V}_{BC} = j\bar{E}_{BC} \propto \bar{E}_A$ $\bar{E}_A = (\bar{I}_A + \bar{K}_N\bar{I}_N)\bar{Z}_S + \bar{V}_A$
Cross- polarised w/ Memory	$\bar{S}_I = -j\bar{V}_{A_prefault} \propto \bar{V}_{BC_prefault}$ $\bar{V}_{BC_prefault} = \bar{E}_{BC}$ $\bar{E}_{BC} = \bar{I}_{BC}\bar{Z}_S + \bar{V}_{BC}$	$\bar{S}_I = -j\bar{V}_{A_prefault}$ $-j\bar{V}_{A_prefault} \propto \bar{V}_{BC_prefault}$ $\bar{V}_{BC_prefault} = \bar{E}_{BC}$ $\bar{E}_{BC} = \bar{I}_{BC}\bar{Z}_S + \bar{V}_{BC}$	$\bar{S}_I = j\bar{V}_{BC_prefault}$ $j\bar{V}_{BC_prefault} \propto \bar{V}_{A_prefault}$ $\bar{V}_{A_prefault} = \bar{E}_A$ $\bar{E}_A = (\bar{I}_A + \bar{K}_N\bar{I}_N)\bar{Z}_S + \bar{V}_A$

หมายเหตุ \bar{Z}_S คือ อิมพีแดนซ์รวมทั้งหมดที่อยู่หลังรีเลย์เมื่อมองจากจุดเกิดฟอลต์

การสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Matlab/Simulink

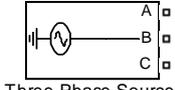
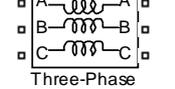
การสร้างแบบจำลองในโปรแกรม ค่าพารามิเตอร์เป็นสิ่งจำเป็น โดยจะต้องมีการกำหนดตัวแปรใน M-file ให้โปรแกรมรับรู้ก่อน

1. การสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้า

1.1 แหล่งกำเนิดแรงดันสามเฟสพร้อมอิมพีแดนซ์ภายใน

ใช้บล็อกแหล่งกำเนิดแรงดันสามเฟส และบล็อกอิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างเฟสแบบสามเฟส ค่าพารามิเตอร์เป็นดังตารางที่ 6

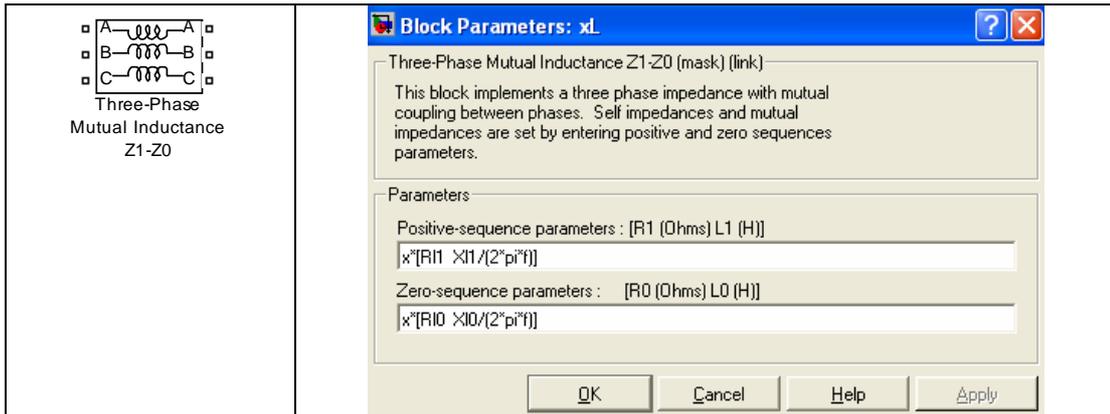
ตารางที่ 6 พารามิเตอร์แหล่งกำเนิดแรงดันสามเฟสพร้อมอิมพีแดนซ์ภายใน

 <p>Three-Phase Source</p>	<p>Block Parameters: Three-Phase Source</p> <p>Three-Phase Source (mask) (link) Three-phase voltage source in series with RL branch.</p> <p>Parameters</p> <p>Phase-to-phase rms voltage (V): VsA</p> <p>Phase angle of phase A (degrees): PhA</p> <p>Frequency (Hz): f</p> <p>Internal connection: Yg</p> <p><input type="checkbox"/> Specify impedance using short-circuit level</p> <p>Source resistance (Ohms): 0</p> <p>Source inductance (H): $1e-9/(2 \cdot \pi \cdot f)$</p> <p>OK Cancel Help Apply</p>
 <p>Three-Phase Mutual Inductance Z1-Z0</p>	<p>Block Parameters: Three-Phase Mutual Inductance Z1-Z0</p> <p>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.</p> <p>Parameters</p> <p>Positive-sequence parameters : [R1 (Ohms) L1 (H)] [RsA1 XsA1/(2*pi*f)]</p> <p>Zero-sequence parameters : [R0 (Ohms) L0 (H)] [RsA0 XsA0/(2*pi*f)]</p> <p>OK Cancel Help Apply</p>

1.2 ไลน์แบบสามเฟส

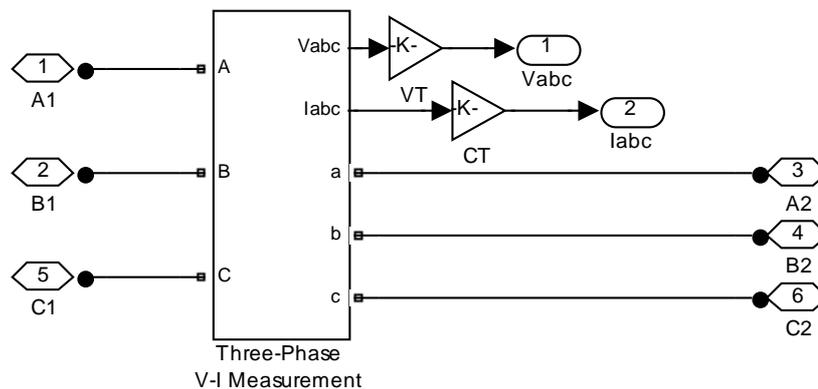
ใช้บล็อกอิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างเฟสแบบสามเฟส พารามิเตอร์เป็นตามตารางที่ 7

ตารางที่ 7 พารามิเตอร์ไลน์แบบสามเฟส



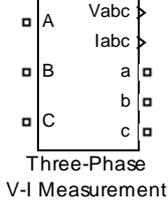
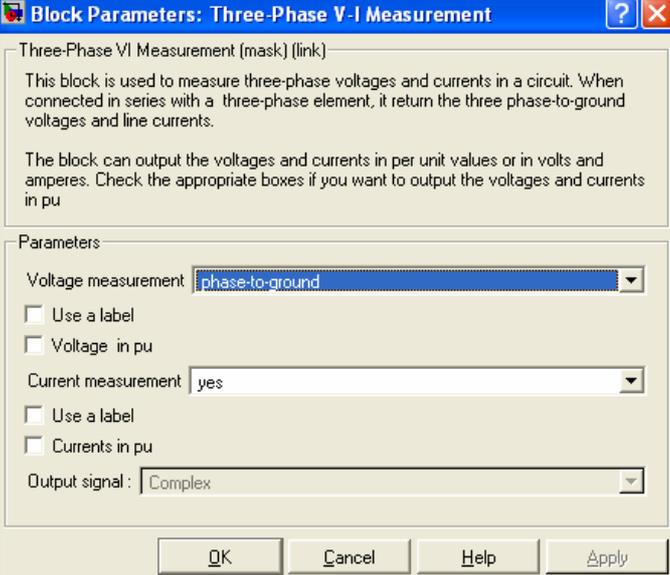
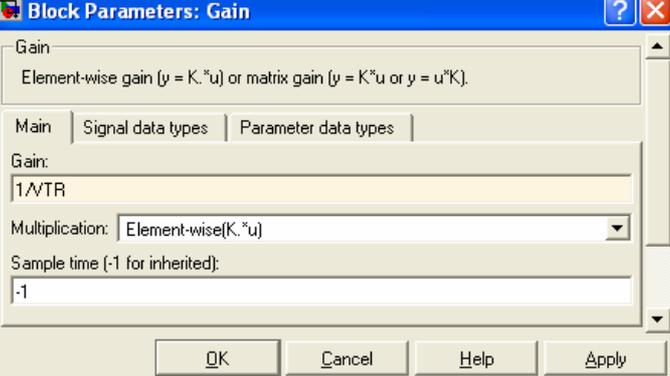
2. การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงทศกระแสและหม้อแปลงทดแรงดัน

ใช้บล็อกเครื่องวัดสามเฟสพร้อมบล็อกเกน เพื่อแปลงค่าจากด้านแรงสูงให้อยู่ทางด้านแรงต่ำ ดังภาพที่ 31 ค่าพารามิเตอร์เป็นดังตารางที่ 8



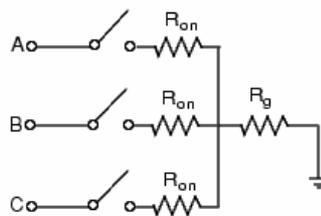
ภาพที่ 31 แบบจำลองหม้อแปลงทศกระแสและหม้อแปลงทดแรงดัน

ตารางที่ 8 พารามิเตอร์หม้อแปลงทกระแสและหม้อแปลงทดแรงดัน

 <p>Three-Phase V-I Measurement</p>	
 <p>Gain</p>	

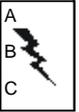
3. การสร้างแบบจำลองฟอลต์

ใช้บล็อกฟอลต์สามเฟส สามารถเลือกชนิดการเกิดฟอลต์และความต้านทานฟอลต์ได้ตามต้องการ ดังภาพที่ 32 พารามิเตอร์เป็นดังตารางที่ 9



ภาพที่ 32 แบบจำลองฟอลต์

ตารางที่ 9 พารามิเตอร์พอลต์แบบสามเฟส



Three-Phase Fault

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 R_{on} (ohms) :

Ground Fault

Ground resistance R_g (ohms) :

External control of fault timing :

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

Transition times (s):

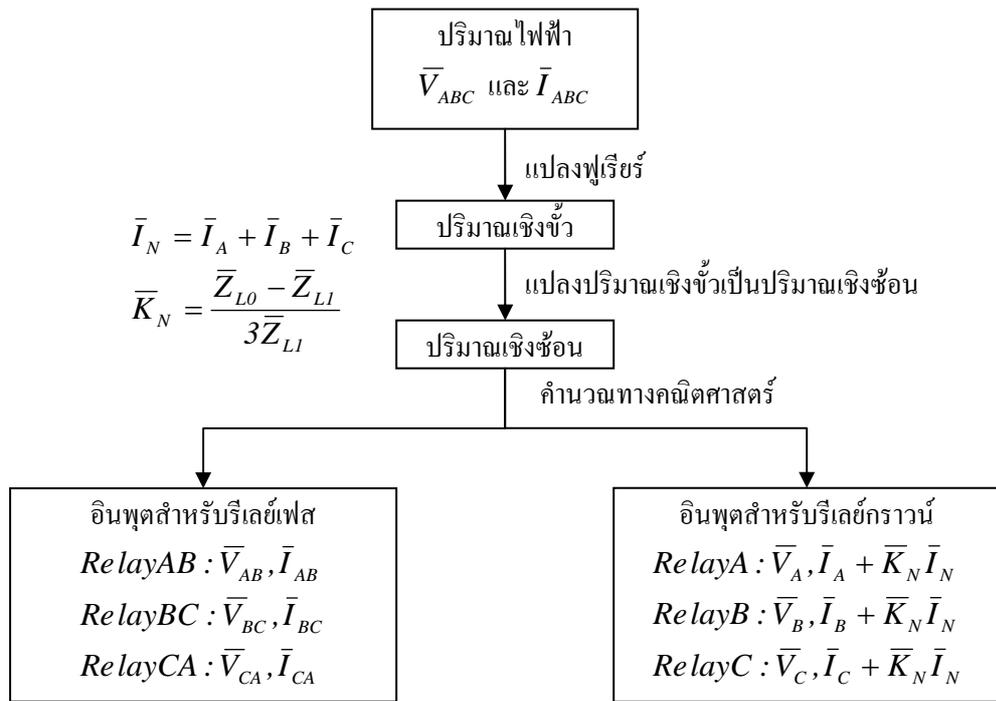
Snubbers resistance R_p (ohms) :

Snubbers Capacitance C_p (Farad)

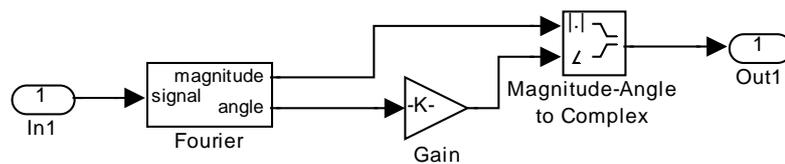
Measurements None

4. การสร้างแบบจำลองรีเลย์ระยะทาง

4.1 การสร้างสัญญาณอินพุตให้กับรีเลย์ระยะทาง มีขั้นตอนดังภาพที่ 33

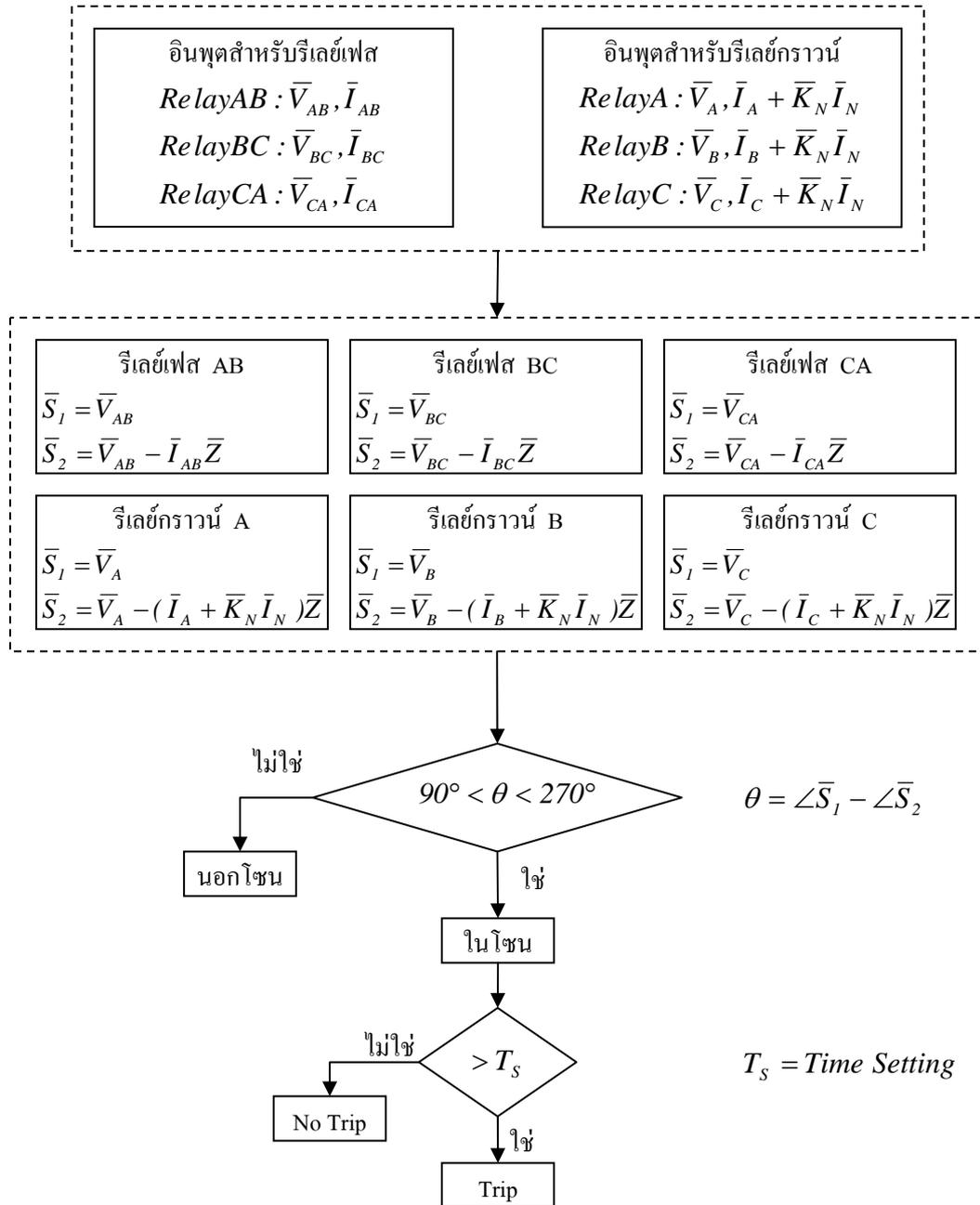


ภาพที่ 33 ขั้นตอนการสร้างสัญญาณอินพุตให้กับรีเลย์ระยะทาง



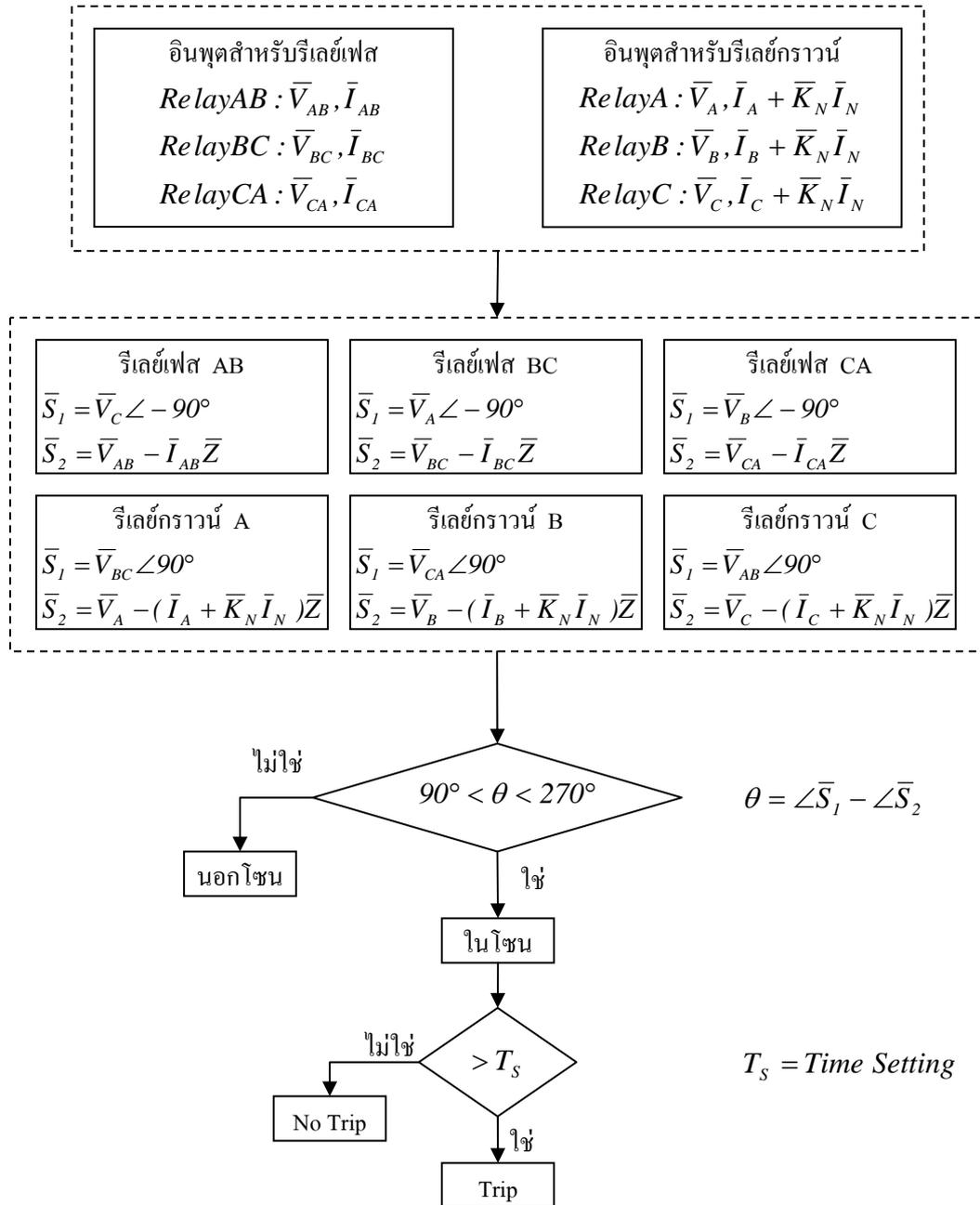
ภาพที่ 34 แบบจำลองการแปลงสัญญาณไซน์เป็นปริมาณเชิงซ้อน

4.2 การสร้างชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบมุมของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลाइซ์ด้วยตัวมันเอง มีขั้นตอนดังภาพที่ 35



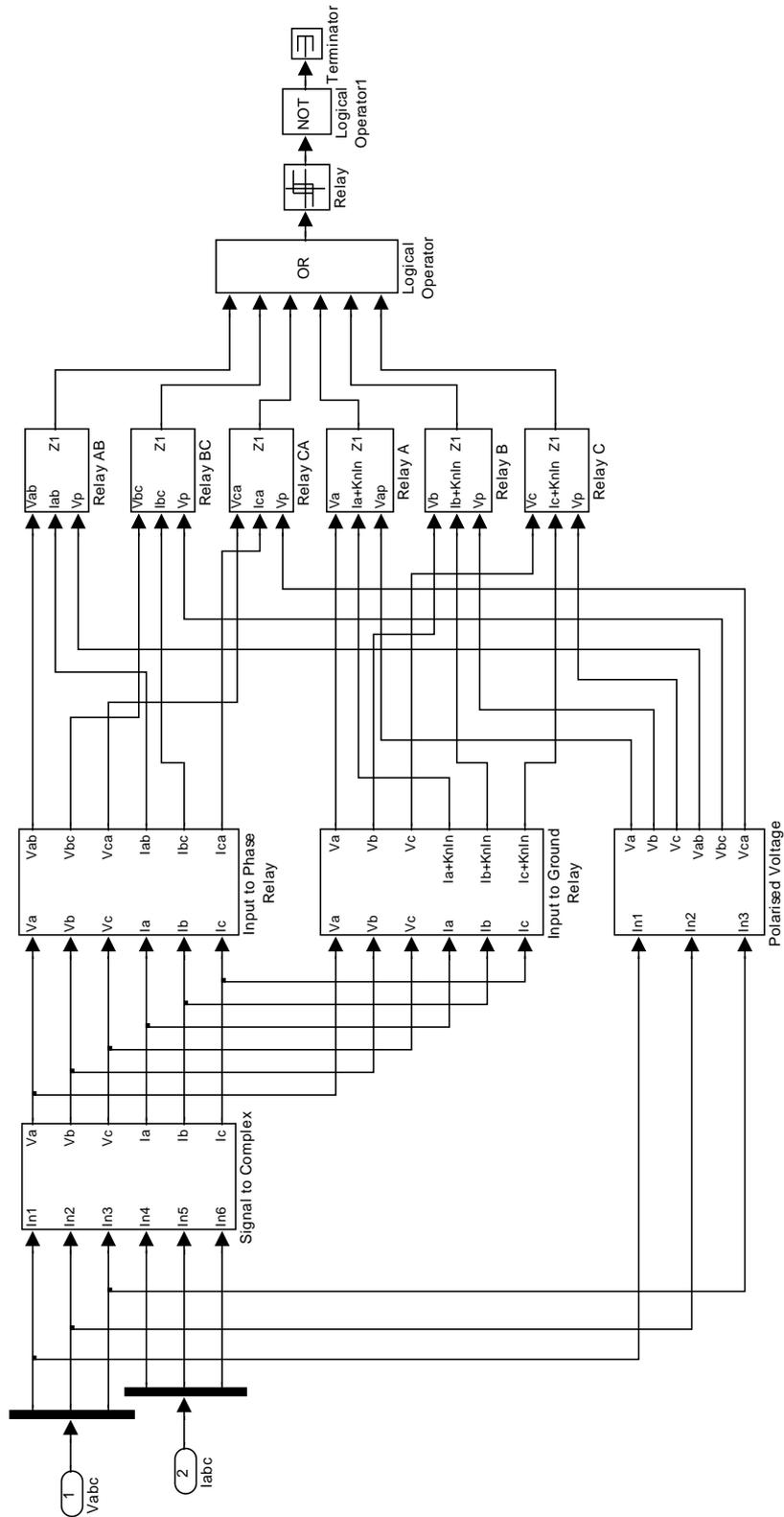
ภาพที่ 35 ขั้นตอนการสร้างชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบมุมของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลाइซ์ด้วยตัวมันเอง

4.3 การสร้างชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบมุมของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพล่าไลซ์ข้าม มีขั้นตอนดังภาพที่ 36



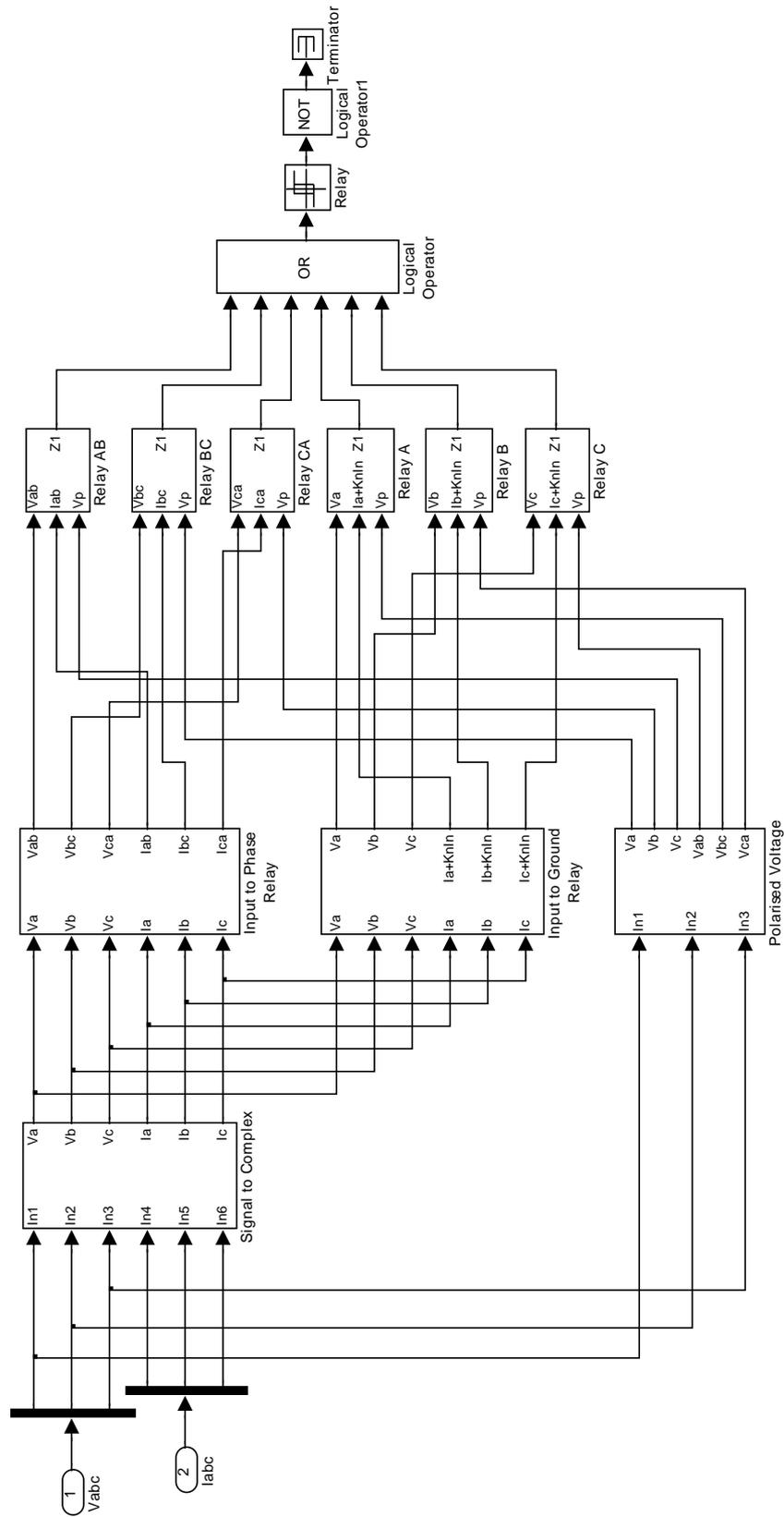
ภาพที่ 36 ขั้นตอนการสร้างชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบมุมของรีเลย์ระยะทางแบบ โมที่มีการ โพล่าไลซ์ข้าม

4.4 แบบจำลองรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีกรโปลาไลซ์ด้วยตัวมันเอง



ภาพที่ 37 แบบจำลองรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีกรโปลาไลซ์ด้วยตัวมันเอง

4.5 แบบจำลองรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพล่าไลซ์ข้าม

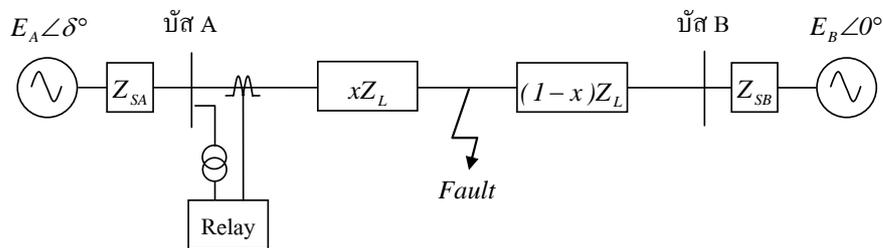


ภาพที่ 38 แบบจำลองรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มี การโพล่าไลซ์ข้าม

เงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของรีเลย์ระยะทางแบบโม

1. เงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์หาอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น

ระบบไฟฟ้าพร้อมค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์เป็นดังภาพที่ 39 และมีเงื่อนไขตามตารางที่ 10 โดยแบบจำลองที่ใช้รันโปรแกรมกรณีตำแหน่งฟอลต์อยู่ด้านหน้าแสดงในภาพที่ 40 ถึง 41



$$Z_{ISA} = 0.1Z_{IL}$$

$$Z_{OSA} = 3Z_{IL}$$

$$VTR = 3500 / 1$$

$$CTR = 320 / 1$$

$$kV = 400$$

$$Z_{IL} = 10 + j110 \Omega \text{ pri.}$$

$$= 0.91 + j10.06 \Omega \text{ sec.}$$

$$Z_{oL} = 3Z_{IL}$$

$$Z_{ISB} = Z_{ISA}$$

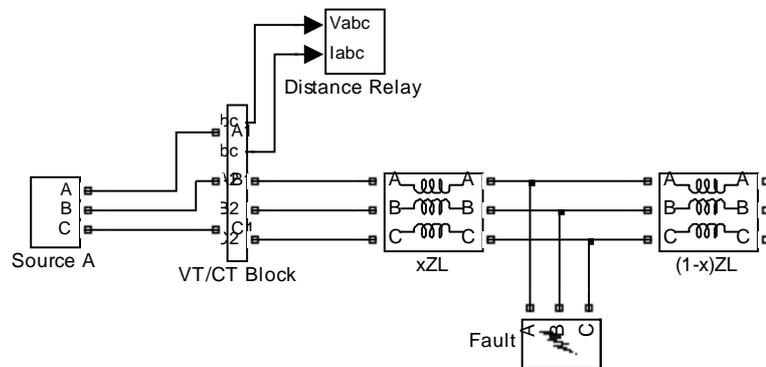
$$Z_{OSB} = Z_{OSA}$$

ภาพที่ 39 ระบบไฟฟ้าสำหรับใช้วิเคราะห์หาอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น

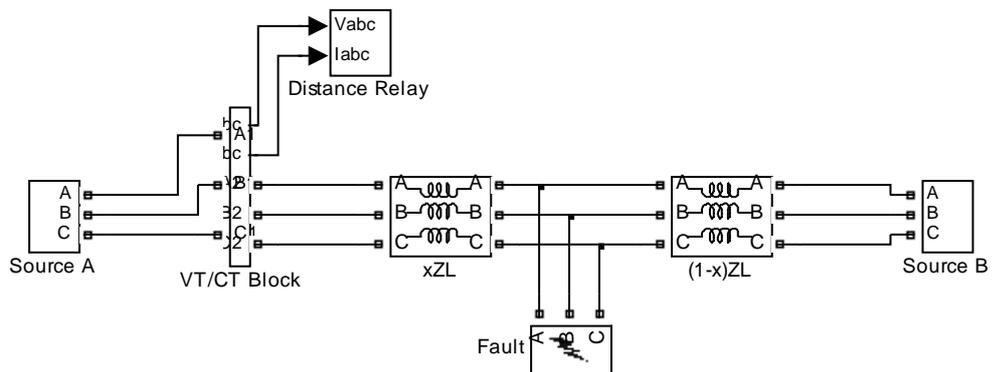
ที่มา: Roberts *et al.* (1993)

ตารางที่ 10 เงื่อนไขสำหรับใช้วิเคราะห์หาอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น

ระบบไฟฟ้า	พอลต์	ตำแหน่งพอลต์
1 แหล่งจ่าย ($\delta = 0^\circ$)	พอลต์ 3 เฟส (A-B-C)	ด้านหน้ารีเลย์
	พอลต์ 2 เฟส (B-C)	$x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$ ($R_f = 0$)
	พอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)	$x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$ ($R_f = 10$)
	พอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G)	
2 แหล่งจ่าย ($\delta = -60^\circ$)	พอลต์ 3 เฟส (A-B-C)	ด้านหน้ารีเลย์
	พอลต์ 2 เฟส (B-C)	$x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$ ($R_f = 0$)
	พอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)	$x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$ ($R_f = 10$)
	พอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G)	
2 แหล่งจ่าย ($\delta = -30^\circ$)	พอลต์ 3 เฟส (A-B-C)	ด้านหน้ารีเลย์
	พอลต์ 2 เฟส (B-C)	$x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$ ($R_f = 0$)
	พอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)	$x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$ ($R_f = 10$)
	พอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G)	
2 แหล่งจ่าย ($\delta = 0^\circ$)	พอลต์ 3 เฟส (A-B-C)	ด้านหน้ารีเลย์
	พอลต์ 2 เฟส (B-C)	$x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$ ($R_f = 0$)
	พอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)	$x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$ ($R_f = 10$)
	พอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G)	
2 แหล่งจ่าย ($\delta = 30^\circ$)	พอลต์ 3 เฟส (A-B-C)	ด้านหน้ารีเลย์
	พอลต์ 2 เฟส (B-C)	$x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$ ($R_f = 0$)
	พอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)	$x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$ ($R_f = 10$)
	พอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G)	
2 แหล่งจ่าย ($\delta = 60^\circ$)	พอลต์ 3 เฟส (A-B-C)	ด้านหน้ารีเลย์
	พอลต์ 2 เฟส (B-C)	$x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$ ($R_f = 0$)
	พอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)	$x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$ ($R_f = 10$)
	พอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G)	



ภาพที่ 40 แบบจำลองระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย สำหรับใช้วิเคราะห์หาอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็น



ภาพที่ 41 แบบจำลองระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย สำหรับใช้วิเคราะห์หาอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็น

2. เงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์ผลของกระแสโหลดและความต้านทานฟอลต์ต่อค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น

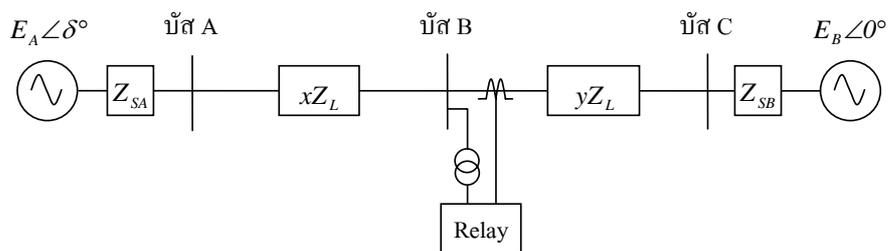
ระบบไฟฟ้าพร้อมค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์เหมือนกันกับ เงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์หาอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น แต่ตำแหน่งของฟอลต์จะกำหนดตายตัวที่บริเวณปลายไลน์ที่ต้องการป้องกัน ในที่นี้คิดที่ 85% ของไลน์ ($x = 0.85$) โดยมีเงื่อนไขดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 เงื่อนไขสำหรับใช้วิเคราะห์ผลของกระแสโหลดและความต้านทานฟอลต์ต่อค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น

ฟอลต์	δ (องศา)	R_f (โอห์มด้านแรงสูง)
ฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)	-60	0.000001, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
	-30	0.000001, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
	0	0.000001, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
	30	0.000001, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
	60	0.000001, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
ฟอลต์ 2 เฟส (B-C)	-60	0.000001, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
	-30	0.000001, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
	0	0.000001, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
	30	0.000001, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
	60	0.000001, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
ฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)	-60	0.000001, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
	-30	0.000001, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
	0	0.000001, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
	30	0.000001, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
	60	0.000001, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50

3. เงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์หากราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโม

ระบบไฟฟ้าพร้อมค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์เป็นดังภาพที่ 42 และมีเงื่อนไขตามตารางที่ 12 โดยแบบจำลองที่ใช้รันโปรแกรมกรณีตำแหน่งฟอลต์อยู่ด้านหน้าและด้านหลังแสดงในภาพที่ 43 ถึง 46



$$Z_{ISA} = 0.1Z_{IL}$$

$$Z_{OSA} = 3Z_{IL}$$

$$VTR = 3500 / 1$$

$$CTR = 320 / 1$$

$$kV = 400$$

$$Z_{IL} = 10 + j110 \Omega \text{ pri.}$$

$$= 0.91 + j10.06 \Omega \text{ sec.}$$

$$Z_{OL} = 3Z_{IL}$$

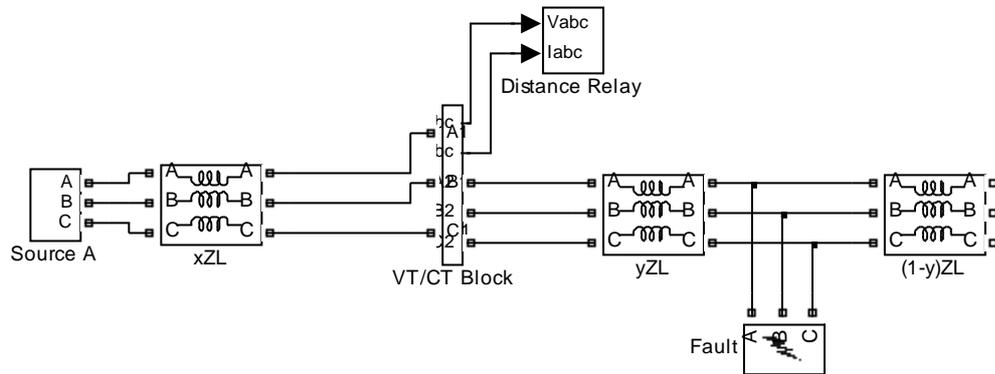
$$Z_{ISB} = Z_{ISA}$$

$$Z_{OSB} = Z_{OSA}$$

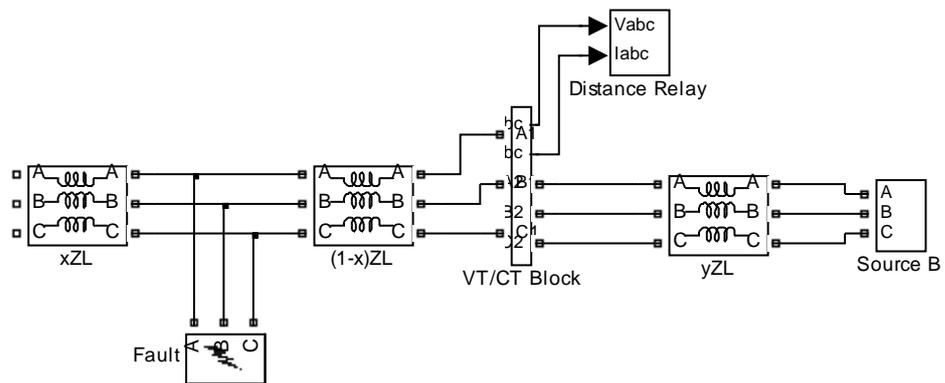
ภาพที่ 42 ระบบไฟฟ้าสำหรับใช้วิเคราะห์หากราฟคุณลักษณะการทำงานของ

ตารางที่ 12 เงื่อนไขสำหรับใช้วิเคราะห์หากกราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโม

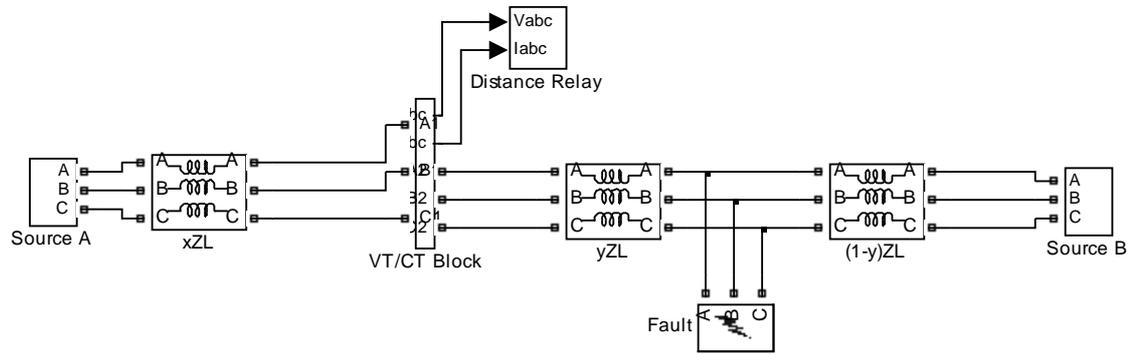
ระบบไฟฟ้า	พอลต์	ตำแหน่งพอลต์
1 แหล่งจ่าย	พอลต์ 3 เฟส (A-B-C)	ด้านหน้ารีเลย์ $y = 0.01$, $R_f = 0.000001$
		ด้านหน้ารีเลย์ $y = 0.01$, $R_f = 40$
		ด้านหน้ารีเลย์ $y = 0.8$, $R_f = 0.000001$
		ด้านหน้ารีเลย์ $y = 0.8$, $R_f = 40$
		ด้านหลังรีเลย์ $(1-x) = 0.1$, $R_f = 40$
	พอลต์ 2 เฟส (B-C)	ด้านหน้ารีเลย์ $y = 0.01$, $R_f = 0.000001$
		ด้านหน้ารีเลย์ $y = 0.01$, $R_f = 40$
		ด้านหน้ารีเลย์ $y = 0.8$, $R_f = 0.000001$
		ด้านหน้ารีเลย์ $y = 0.8$, $R_f = 40$
		ด้านหลังรีเลย์ $(1-x) = 0.1$, $R_f = 40$
	พอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)	ด้านหน้ารีเลย์ $y = 0.01$, $R_f = 0.000001$
		ด้านหน้ารีเลย์ $y = 0.01$, $R_f = 40$
		ด้านหน้ารีเลย์ $y = 0.8$, $R_f = 0.000001$
		ด้านหน้ารีเลย์ $y = 0.8$, $R_f = 40$
		ด้านหลังรีเลย์ $(1-x) = 0.1$, $R_f = 40$
2 แหล่งจ่าย	พอลต์ 3 เฟส (A-B-C)	ด้านหน้ารีเลย์ $y = 0.01$, $R_f = 0.000001$
		ด้านหน้ารีเลย์ $y = 0.01$, $R_f = 40$
		ด้านหน้ารีเลย์ $y = 0.8$, $R_f = 0.000001$
		ด้านหน้ารีเลย์ $y = 0.8$, $R_f = 40$
	พอลต์ 2 เฟส (B-C)	ด้านหน้ารีเลย์ $y = 0.01$, $R_f = 0.000001$
		ด้านหน้ารีเลย์ $y = 0.01$, $R_f = 40$
		ด้านหน้ารีเลย์ $y = 0.8$, $R_f = 0.000001$
		ด้านหน้ารีเลย์ $y = 0.8$, $R_f = 40$
	พอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)	ด้านหน้ารีเลย์ $y = 0.01$, $R_f = 0.000001$
		ด้านหน้ารีเลย์ $y = 0.01$, $R_f = 40$
		ด้านหน้ารีเลย์ $y = 0.8$, $R_f = 0.000001$
		ด้านหน้ารีเลย์ $y = 0.8$, $R_f = 40$



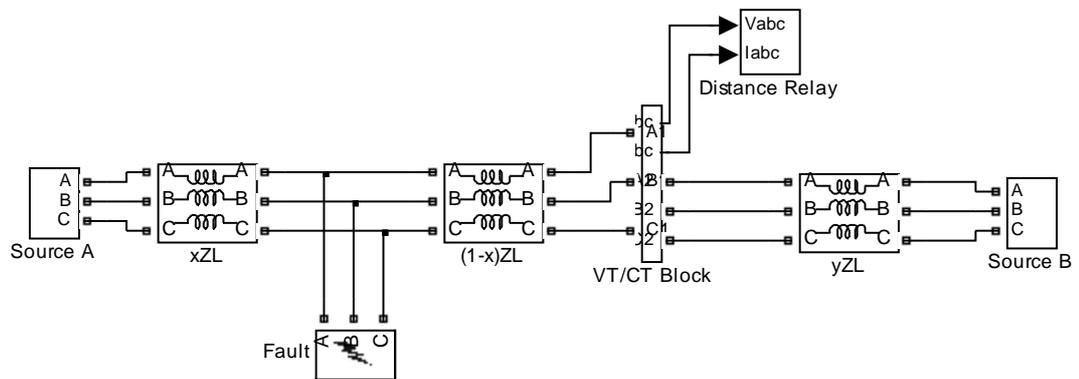
ภาพที่ 43 แบบจำลองระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย กรณีเกิดฟอลต์ด้านหน้ารีเลย์



ภาพที่ 44 แบบจำลองระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย กรณีเกิดฟอลต์ด้านหลังรีเลย์



ภาพที่ 45 แบบจำลองระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย กรณีเกิดฟอลต์ด้านหน้ารีเลย์



ภาพที่ 46 แบบจำลองระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย กรณีเกิดฟอลต์ด้านหลังรีเลย์

ผลและวิจารณ์

ผล

1. อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นระหว่างขณะที่เกิดฟอลต์สำหรับเงื่อนไขฟอลต์และระบบไฟฟ้าแบบต่าง ๆ

1.1 เงื่อนไขระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย

ก. กรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) ผลที่ได้จากโปรแกรมแสดงในตารางที่ 13 วาดโลกต์อิมพีแดนซ์ได้ดังในภาพที่ 47 จะเห็นได้ว่า รีเลย์ทั้ง 6 ชุด มองเห็นอิมพีแดนซ์เท่ากัน ถ้าไม่มี R_f รีเลย์มองเห็นอิมพีแดนซ์อยู่บนแนวอิมพีแดนซ์ของไลน์ กรณีมี R_f รีเลย์จะมองเห็นความต้านทานเพิ่มขึ้น 10 โอห์ม เท่ากันทุก ๆ ตำแหน่งของการเกิดฟอลต์

ข. กรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C) ผลที่ได้จากโปรแกรมแสดงในตารางที่ 14 วาดโลกต์อิมพีแดนซ์ได้ดังในภาพที่ 48 จะเห็นได้ว่า ถ้าไม่มี R_f รีเลย์เฟส BC มองเห็นอิมพีแดนซ์อยู่บนแนวอิมพีแดนซ์ของไลน์ กรณีมี R_f รีเลย์จะมองเห็นความต้านทานเพิ่มขึ้น 5 โอห์ม เท่ากันทุก ๆ ตำแหน่งของการเกิดฟอลต์

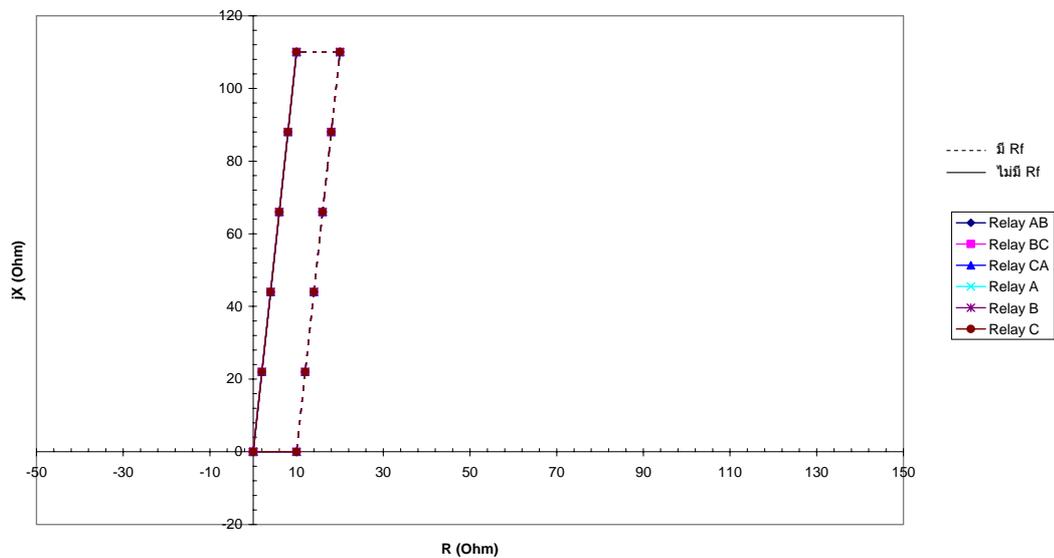
ค. กรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G) ผลที่ได้จากโปรแกรมแสดงในตารางที่ 15 วาดโลกต์อิมพีแดนซ์ได้ดังในภาพที่ 49 จะเห็นได้ว่า ถ้าไม่มี R_f รีเลย์กราวด์ A มองเห็นอิมพีแดนซ์อยู่บนแนวอิมพีแดนซ์ของไลน์ กรณีมี R_f รีเลย์จะมองเห็นความต้านทานเพิ่มขึ้น 6 โอห์ม เท่ากันทุก ๆ ตำแหน่งของการเกิดฟอลต์

ง. กรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G) ผลที่ได้จากโปรแกรมแสดงในตารางที่ 16 วาดโลกต์อิมพีแดนซ์ได้ดังในภาพที่ 50 จะเห็นได้ว่า ถ้าไม่มี R_f รีเลย์ BC B และ C มองเห็นอิมพีแดนซ์อยู่บนแนวอิมพีแดนซ์ของไลน์ กรณีมี R_f รีเลย์ B มองเห็นรีแอกแตนซ์ลดลง รีเลย์ C มองเห็นความต้านทานเพิ่มขึ้น รีเลย์ BC มองเห็นเป็นอิมพีแดนซ์ของไลน์ (R_f ไม่มีผล)

ตารางที่ 13 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)

ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย

ระยะ x	รีเลย์ AB		รีเลย์ BC		รีเลย์ CA		รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C	
	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X
ไม่มี Rf	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.20	2.00	22.00	2.00	22.00	2.00	22.00	2.00	22.00	2.00	22.00	2.00
	0.40	4.00	44.00	4.00	44.00	4.00	44.00	4.00	44.00	4.00	44.00	4.00
	0.60	6.00	66.00	6.00	66.00	6.00	66.00	6.00	66.00	6.00	66.00	6.00
	0.80	8.00	88.00	8.00	88.00	8.00	88.00	8.00	88.00	8.00	88.00	8.00
	1.00	10.00	110.00	10.00	110.00	10.00	110.00	10.00	110.00	10.00	110.00	10.00
มี Rf	1	20.00	110.00	20.00	110.00	20.00	110.00	20.00	110.00	20.00	110.00	20.00
	0.80	18.00	88.00	18.00	88.00	18.00	88.00	18.00	88.00	18.00	88.00	18.00
	0.60	16.00	66.00	16.00	66.00	16.00	66.00	16.00	66.00	16.00	66.00	16.00
	0.40	14.00	44.00	14.00	44.00	14.00	44.00	14.00	44.00	14.00	44.00	14.00
	0.20	12.00	22.00	12.00	22.00	12.00	22.00	12.00	22.00	12.00	22.00	12.00
	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00



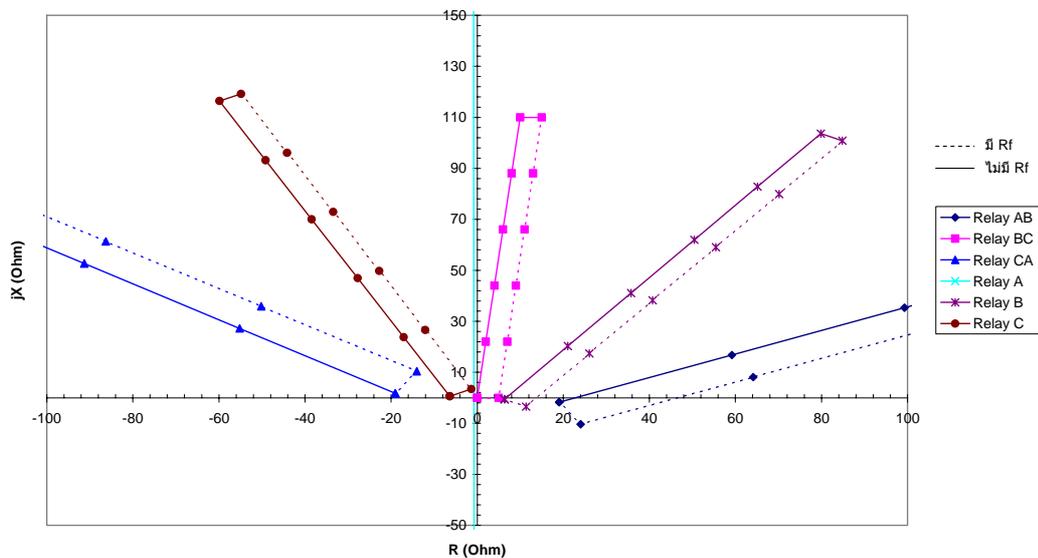
ภาพที่ 47 โลกัสมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)

ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย

ตารางที่ 14 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C)

ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย

ระยะ x	รีเลย์ AB		รีเลย์ BC		รีเลย์ CA		รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C		
	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	
ไม่มี Rf	0	19.05	-1.73	0.00	0.00	-19.05	1.73	-0.1816	1.92E+17	6.35	-0.58	-6.35	0.58
	0.20	59.16	16.80	2.00	22.00	-55.16	27.20	-1.634	1.72E+18	21.05	20.27	-17.05	23.73
	0.40	99.26	35.34	4.00	44.00	-91.26	52.66	0.1556	-1.6E+17	35.75	41.11	-27.75	46.89
	0.60	139.40	53.88	6.00	66.00	-127.40	78.12	18.66	-2.1E+17	50.46	61.96	-38.46	70.04
	0.80	179.50	72.41	8.00	88.00	-163.50	103.60	615.9	-6.9E+18	65.16	82.80	-49.16	93.20
	1.00	219.60	90.95	10.00	110.00	-199.60	129.10	154	-1.7E+18	79.86	103.60	-59.86	116.40
มี Rf	1	224.60	82.29	15.00	110.00	-194.60	137.70	33.29	-3.7E+17	84.86	100.80	-54.86	119.20
	0.80	184.50	63.75	13.00	88.00	-158.50	112.20	76.98	-8.6E+17	70.16	79.92	-44.16	96.08
	0.60	144.40	45.22	11.00	66.00	-122.40	86.78	615.9	-6.9E+18	55.46	59.07	-33.46	72.93
	0.40	104.30	26.68	9.00	44.00	-86.26	61.32	1.72E+17	3.45E+17	40.75	38.23	-22.75	49.77
	0.20	64.16	8.14	7.00	22.00	-50.16	35.86	-154	1.72E+18	26.05	17.38	-12.05	26.62
	0.00	24.05	-10.39	5.00	0.00	-14.05	10.39	1.08E+17	1.08E+17	11.35	-3.46	-1.35	3.46

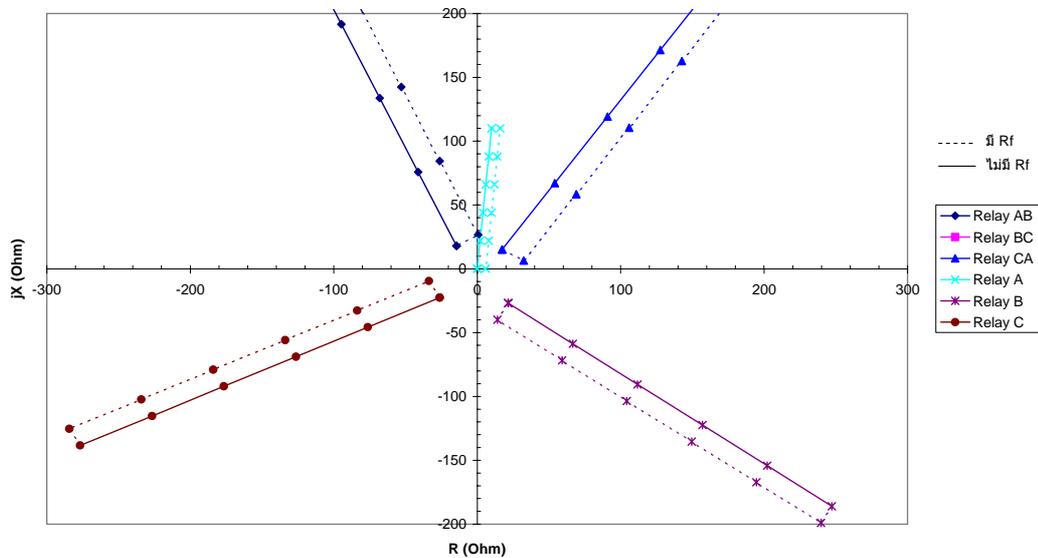


ภาพที่ 48 โลกัสมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C)

ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย

ตารางที่ 15 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย

ระยะ x	รีเลย์ AB		รีเลย์ BC		รีเลย์ CA		รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C		
	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	
ไม่มี Rf	0	-14.38	17.94	-2.3E+17	2.08E+16	17.38	15.06	0.00	0.00	21.57	-26.92	-26.07	-22.59
	0.20	-41.13	75.83	-6.9E+17	6.24E+16	54.13	67.17	2.00	22.00	66.70	-58.75	-76.20	-45.75
	0.40	-67.89	133.70	-1.1E+18	1.04E+17	90.89	119.30	4.00	44.00	111.80	-90.58	-126.30	-68.92
	0.60	-94.64	191.60	-1.6E+18	1.46E+17	127.60	171.40	6.00	66.00	157.00	-122.40	-176.50	-92.09
	0.80	-121.40	249.50	-2.1E+18	1.87E+17	164.40	223.50	8.00	88.00	202.10	-154.20	-226.60	-115.30
	1.00	-148.10	307.40	-2.5E+18	2.29E+17	201.10	275.60	10.00	110.00	247.20	-186.10	-276.70	-138.40
มี Rf	1	-133.10	316.00	-2.5E+18	3.54E+17	216.10	267.00	16.00	110.00	239.70	-199.10	-284.20	-125.40
	0.80	-106.40	258.20	-2.1E+18	3.12E+17	179.40	214.80	14.00	88.00	194.60	-167.20	-234.10	-102.30
	0.60	-79.64	200.30	-1.6E+18	2.7E+17	142.60	162.70	12.00	66.00	149.50	-135.40	-184.00	-79.10
	0.40	-52.89	142.40	-1.1E+18	2.29E+17	105.90	110.60	10.00	44.00	104.30	-103.60	-133.80	-55.93
	0.20	-26.13	84.49	-6.9E+17	1.87E+17	69.13	58.51	8.00	22.00	59.20	-71.74	-83.70	-32.76
	0.00	0.62	26.60	-2.3E+17	1.46E+17	32.38	6.40	6.00	0.00	14.07	-39.91	-33.57	-9.60

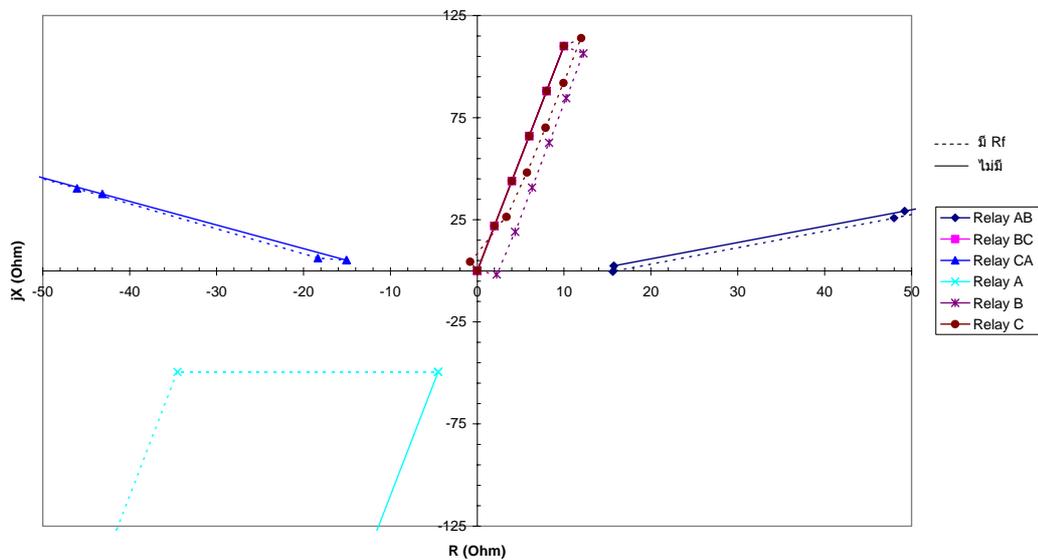


ภาพที่ 49 โลกัสมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย

ตารางที่ 16 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G)

ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย

ระยะ x	รีเลย์ AB	รีเลย์ BC	รีเลย์ CA	รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C					
				R	X	R	X	R	X				
ไม่มี Rf	0	15.73	2.41	0.00	0.00	-15.04	5.21	-4.50	-49.50	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.20	49.20	29.23	2.00	22.00	-43.13	37.62	-11.50	-126.50	2.00	22.00	2.00	22.00
	0.40	82.67	56.04	4.00	44.00	-71.21	70.03	-18.50	-203.50	4.00	44.00	4.00	44.00
	0.60	116.10	82.86	6.00	66.00	-99.30	102.40	-25.50	-280.50	6.00	66.00	6.00	66.00
	0.80	149.60	109.70	8.00	88.00	-127.40	134.90	-32.50	-357.50	8.00	88.00	8.00	88.00
	1.00	183.10	136.50	10.00	110.00	-155.50	167.30	-39.50	-434.50	10.00	110.00	10.00	110.00
มี Rf	1	181.20	133.10	10.00	110.00	-157.80	170.50	-69.50	-434.50	12.24	106.50	11.98	113.90
	0.80	147.80	106.20	8.00	88.00	-129.80	138.10	-62.50	-357.50	10.25	84.57	9.94	91.97
	0.60	114.40	79.43	6.00	66.00	-101.80	105.60	-55.50	-280.50	8.28	62.65	7.87	70.04
	0.40	81.11	52.61	4.00	44.00	-73.86	73.09	-48.50	-203.50	6.32	40.79	5.73	48.16
	0.20	47.98	25.83	2.00	22.00	-46.05	40.38	-41.50	-126.50	4.37	19.10	3.38	26.41
	0.00	15.61	-0.37	0.00	0.00	-18.33	6.26	-34.50	-49.50	2.25	-1.78	-0.82	4.48



ภาพที่ 50 โลกซ์อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (A-G)

ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย

1.2 เงื่อนไขระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย แบ่งออกเป็น 5 ระบบย่อย ได้แก่ ระบบไฟฟ้าที่ $\delta = -60^\circ, -30^\circ, 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ สามารถอธิบายผลโดยรวมได้ดังนี้

ก. กรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) ผลที่ได้จากโปรแกรมแสดงในตารางที่ 17 21 25 29 และ 33 วาดลอกซ์อิมพีแดนซ์ได้ดังในภาพที่ 51 55 59 63 และ 67 จะเห็นได้ว่า รีเลย์ ทั้ง 6 ชุด ที่ตำแหน่งฟอลต์ใด ๆ ผลของ R_f จะทำให้รีเลย์มองเห็นรีแอกแตนซ์เพิ่มขึ้นเมื่อ δ เป็นลบ รีเลย์มองเห็นรีแอกแตนซ์ลดลงเมื่อ δ เป็นบวก และรีเลย์มองเห็นรีแอกแตนซ์เท่าเดิมเมื่อ δ เป็นศูนย์

ข. กรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C) ผลที่ได้จากโปรแกรมแสดงในตารางที่ 18 22 26 30 และ 34 วาดลอกซ์อิมพีแดนซ์ได้ดังในภาพที่ 52 56 60 64 และ 68 จะเห็นได้ว่า ถ้าไม่มี R_f รีเลย์เฟส BC มองเห็นอิมพีแดนซ์อยู่บนแนวอิมพีแดนซ์ของไลน์ และจะมองเห็นรีแอกแตนซ์ เพิ่มขึ้นเมื่อ δ เป็นลบ มองเห็นรีแอกแตนซ์ลดลงเมื่อ δ เป็นบวก และมองเห็นรีแอกแตนซ์เท่า เดิมเมื่อ δ เป็นศูนย์ โดยผลของ R_f จะมีมากขึ้นเมื่อตำแหน่งของฟอลต์อยู่ไกล ๆ

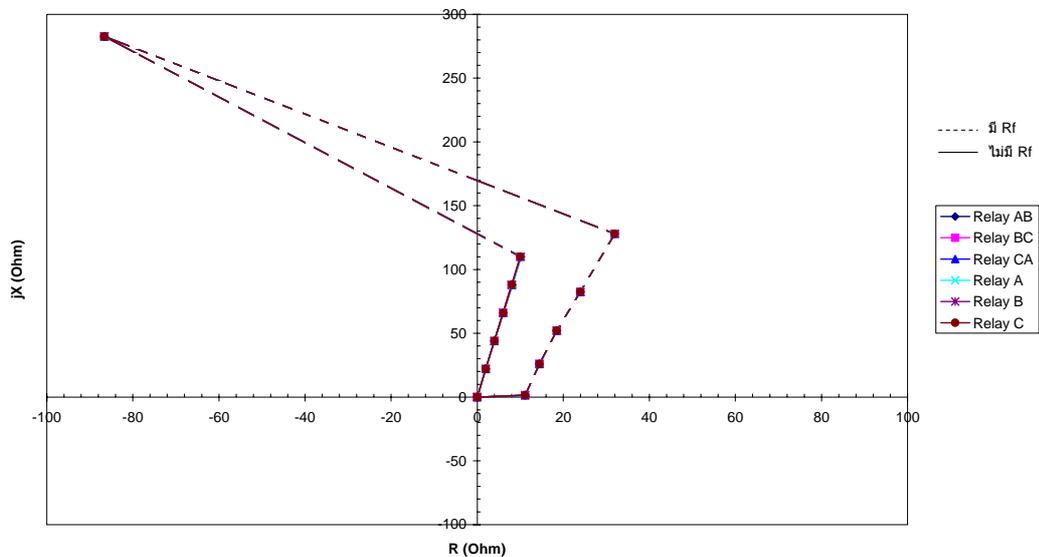
ค. กรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G) ผลที่ได้จากโปรแกรมแสดงในตารางที่ 19 23 27 31 และ 35 วาดลอกซ์อิมพีแดนซ์ได้ดังในภาพที่ 53 57 61 65 และ 69 จะเห็นได้ว่า ถ้า ไม่มี R_f รีเลย์กราวด์ A มองเห็นอิมพีแดนซ์อยู่บนแนวอิมพีแดนซ์ของไลน์ และจะมองเห็นรี แอกแตนซ์เพิ่มขึ้นเมื่อ δ เป็นลบ มองเห็นรีแอกแตนซ์ลดลงเมื่อ δ เป็นบวก และมองเห็นรีแอก แตนซ์เท่าเดิมเมื่อ δ เป็นศูนย์ โดยผลของ R_f จะมีมากขึ้นเมื่อตำแหน่งของฟอลต์อยู่ไกล ๆ

ง. กรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G) ผลที่ได้จากโปรแกรมแสดงในตารางที่ 20 24 28 32 และ 36 วาดลอกซ์อิมพีแดนซ์ได้ดังในภาพที่ 54 58 62 66 และ 70 จะเห็นได้ว่า
 รีเลย์ BC มองเห็นเป็นอิมพีแดนซ์ของไลน์อย่างเดียว (R_f ไม่มีผล)
 รีเลย์ B มองเห็นรีแอกแตนซ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อ δ เพิ่มขึ้น
 รีเลย์ C มองเห็นรีแอกแตนซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและค่อย ๆ ลดลงเมื่อ δ ลดลง

ตารางที่ 17 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)

ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -60^\circ$)

ระยะ x	รีเลย์ AB		รีเลย์ BC		รีเลย์ CA		รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C	
	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X
ไม่มี Rf 0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.20	2.00	22.00	2.00	22.00	2.00	22.00	2.00	22.00	2.00	22.00	2.00	22.00
0.40	3.99	44.00	4.01	44.01	4.01	44.00	4.00	43.99	3.99	44.01	4.01	44.01
0.60	5.99	65.99	6.04	66.02	6.04	65.96	6.01	65.97	6.01	66.02	6.06	65.99
0.80	8.14	87.87	7.96	88.08	8.23	88.13	8.26	87.97	7.99	87.93	8.08	88.19
1.00	10.20	110.00	10.00	110.00	10.09	110.20	10.20	110.10	10.10	109.90	9.99	110.10
มี Rf 1	-86.55	282.60	-86.64	282.70	-86.56	282.70	-86.53	282.70	-86.60	282.60	-86.62	282.70
0.80	31.97	128.10	32.01	128.00	31.93	128.00	31.93	128.00	32.01	128.00	31.97	128.00
0.60	23.96	82.44	23.98	82.42	23.95	82.42	23.95	82.43	23.97	82.44	23.97	82.41
0.40	18.53	52.14	18.51	52.11	18.50	52.14	18.51	52.15	18.53	52.12	18.49	52.12
0.20	14.47	25.93	14.47	25.93	14.46	25.93	14.46	25.93	14.47	25.93	14.46	25.93
0.00	11.14	1.41	11.14	1.41	11.14	1.41	11.14	1.41	11.14	1.41	11.14	1.41

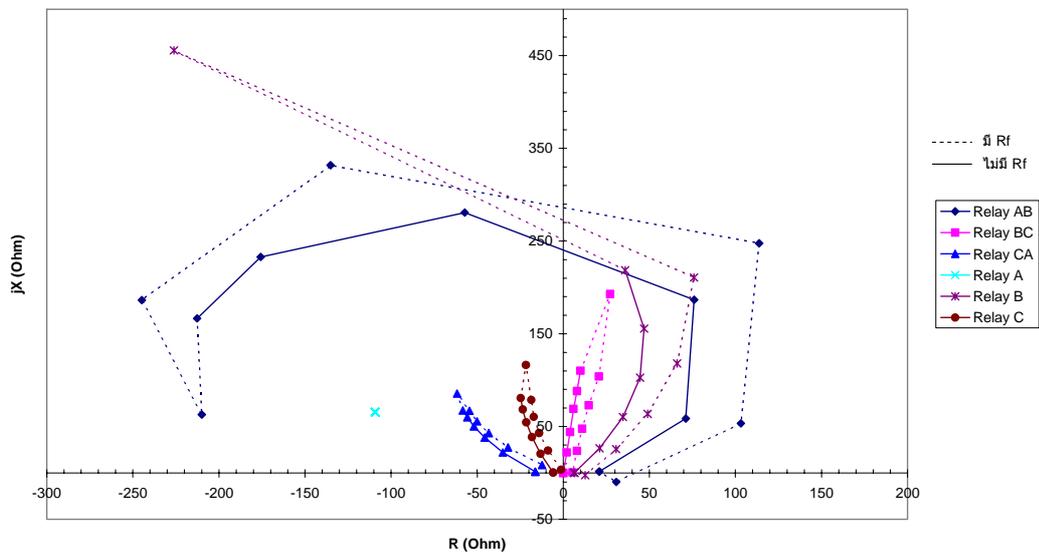


ภาพที่ 51 โลกัสมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)

ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -60^\circ$)

ตารางที่ 18 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -60^\circ$)

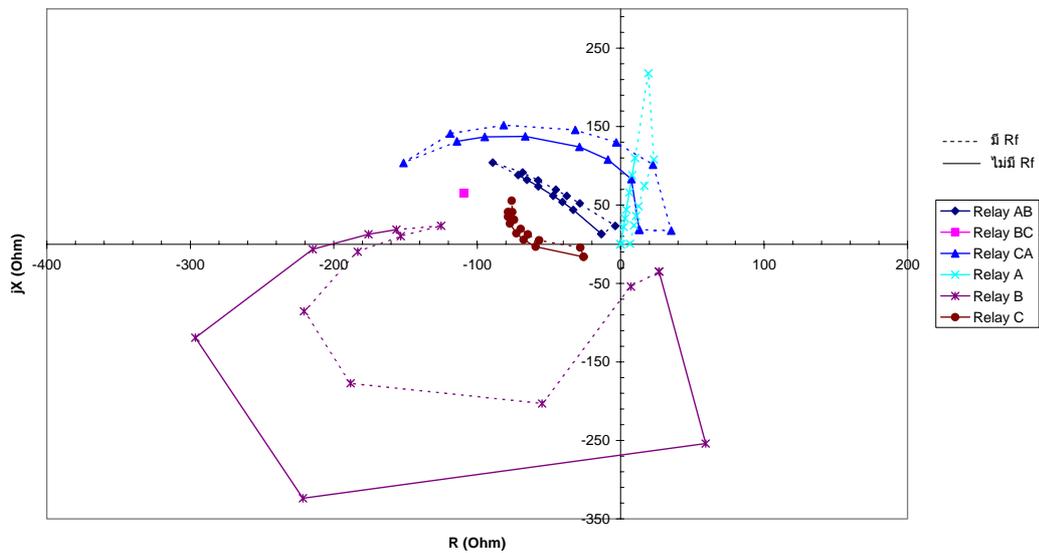
ระยะ x	รีเลย์ AB		รีเลย์ BC		รีเลย์ CA		รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C		
	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	
ไม่มี Rf	0	20.90	1.40	0.00	0.00	-16.26	1.30	-109.30	65.39	6.39	0.06	-5.88	0.23
	0.20	71.18	58.50	2.00	22.00	-35.16	22.16	-109.30	65.39	21.11	26.56	-13.24	20.66
	0.40	76.05	186.80	4.00	44.00	-45.63	38.09	-109.30	65.39	34.61	60.23	-18.20	38.62
	0.60	-57.25	280.80	6.03	68.98	-51.86	50.24	-109.30	65.39	44.62	102.80	-21.44	54.40
	0.80	-175.70	232.90	7.98	88.13	-55.75	59.90	-109.10	65.64	46.96	155.70	-23.49	68.51
	1.00	-212.70	166.60	9.98	110.10	-58.36	67.38	-109.10	65.63	35.95	218.50	-24.69	80.78
มี Rf	1	-210.00	62.90	27.23	192.90	-61.70	85.66	-109.40	65.39	-226.10	455.60	-21.69	116.30
	0.80	-244.80	186.30	20.74	104.10	-54.48	67.04	-109.20	65.41	75.92	210.70	-18.54	78.71
	0.60	-135.20	331.90	14.82	73.01	-50.01	55.53	-109.30	65.39	66.12	118.00	-17.16	60.44
	0.40	113.80	247.70	11.04	47.53	-43.25	42.95	-109.30	65.39	49.00	63.58	-14.03	42.96
	0.20	103.20	53.46	8.03	23.68	-32.07	27.55	-109.30	65.39	30.68	25.55	-8.90	24.19
	0.00	30.81	-9.73	5.40	0.54	-12.29	8.49	-109.30	65.39	12.79	-2.59	-1.17	3.41



ภาพที่ 52 โลกัสมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -60^\circ$)

ตารางที่ 19 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -60^\circ$)

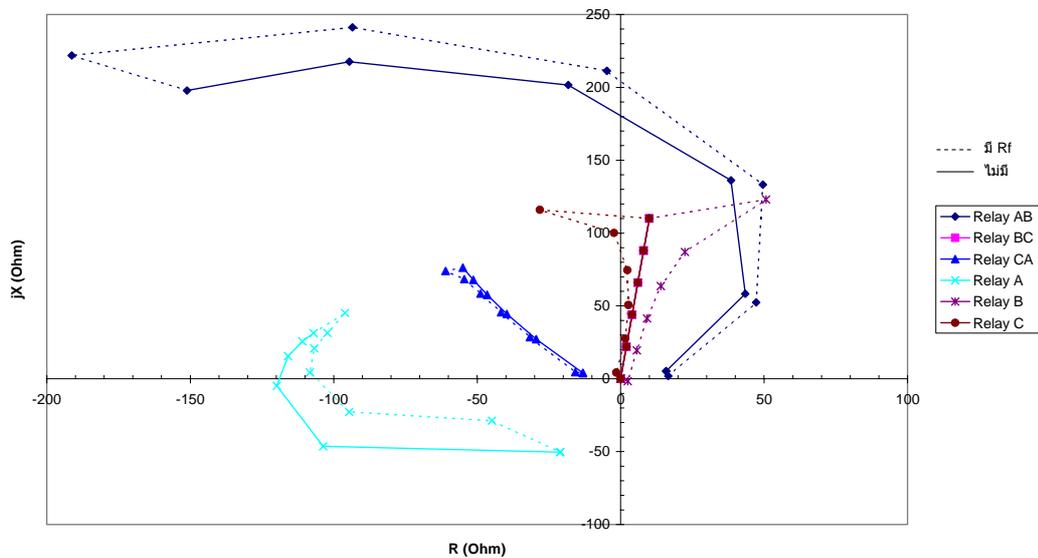
ระยะ x	รีเลย์ AB		รีเลย์ BC		รีเลย์ CA		รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C		
	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	
ไม่มี Rf	0	-13.47	13.29	-109.30	65.39	12.97	18.64	0.00	0.00	26.79	-34.89	-25.78	-16.01
	0.20	-33.03	43.80	-109.30	65.39	7.57	83.29	2.00	22.00	59.23	-254.10	-59.27	-3.08
	0.30	-40.60	53.89	-109.30	65.39	-8.79	107.80	3.00	33.00	-221.50	-323.70	-67.64	5.79
	0.40	-47.05	61.89	-109.30	65.39	-28.67	124.10	4.00	44.00	-296.40	-119.00	-72.63	13.79
	0.60	-57.39	73.74	-109.30	65.39	-66.50	137.50	6.00	66.00	-214.70	-6.41	-77.19	26.30
	0.80	-65.28	82.06	-109.30	65.39	-94.78	136.80	8.00	88.00	-175.80	12.75	-78.47	34.99
	1.00	-71.47	88.21	-109.30	65.39	-114.10	131.20	10.00	110.00	-156.30	18.60	-78.53	41.14
มี Rf	1	-89.13	104.00	-109.30	65.39	-151.30	103.70	19.31	218.00	-125.10	23.54	-75.98	55.45
	0.80	-68.31	91.62	-109.30	65.39	-118.70	141.10	23.14	108.10	-153.30	10.39	-75.48	41.13
	0.60	-57.57	81.49	-109.30	65.39	-81.48	151.80	16.60	74.71	-183.30	-9.44	-74.28	31.34
	0.40	-45.20	69.46	-109.30	65.39	-31.63	145.60	12.49	48.37	-220.70	-85.33	-69.61	19.51
	0.30	-37.57	61.72	-109.30	65.39	-3.04	129.80	10.81	36.07	-188.20	-177.30	-64.71	12.49
	0.20	-28.49	52.12	-109.30	65.39	22.57	101.50	9.29	24.09	-54.73	-202.90	-56.87	5.13
	0.00	-3.79	23.24	-109.30	65.39	35.25	17.40	6.52	0.69	7.15	-53.87	-28.14	-4.16



ภาพที่ 53 โลกซ์อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -60^\circ$)

ตารางที่ 20 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -60^\circ$)

ระยะ x	รีเลย์ AB		รีเลย์ BC		รีเลย์ CA		รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C		
	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	
ไม่มี Rf	0	15.84	5.22	0.00	0.00	-13.15	3.89	-21.05	-50.37	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.20	43.42	58.32	2.00	22.00	-29.46	27.23	-103.70	-46.33	2.00	22.00	2.00	22.00
	0.40	38.49	136.20	4.00	44.00	-39.67	44.47	-119.80	-4.80	4.00	44.00	4.00	44.00
	0.60	-18.23	201.60	6.00	66.00	-46.53	57.63	-115.90	15.57	6.00	66.00	6.00	66.00
	0.80	-94.57	217.60	8.00	88.00	-51.39	67.96	-110.90	25.64	8.00	88.00	8.00	88.00
	1.00	-151.10	197.80	10.00	110.00	-54.98	76.28	-107.00	31.30	10.00	110.00	10.00	110.00
มี Rf	1	-191.30	221.90	10.00	110.00	-61.01	73.95	-96.07	45.15	50.70	123.10	-28.17	116.00
	0.80	-93.47	241.20	8.00	88.00	-54.54	68.44	-102.20	31.44	22.39	87.07	-2.30	100.10
	0.60	-4.79	211.40	6.00	66.00	-48.79	58.52	-106.80	20.93	14.01	63.68	2.34	74.63
	0.40	49.52	133.20	4.00	44.00	-41.67	45.63	-108.30	4.26	9.21	41.37	2.74	50.64
	0.20	47.22	52.43	2.00	22.00	-31.59	28.62	-94.58	-22.77	5.66	19.45	1.66	27.51
	0.00	16.60	1.90	0.00	0.00	-15.81	4.58	-44.89	-28.75	2.50	-1.62	-1.52	4.29

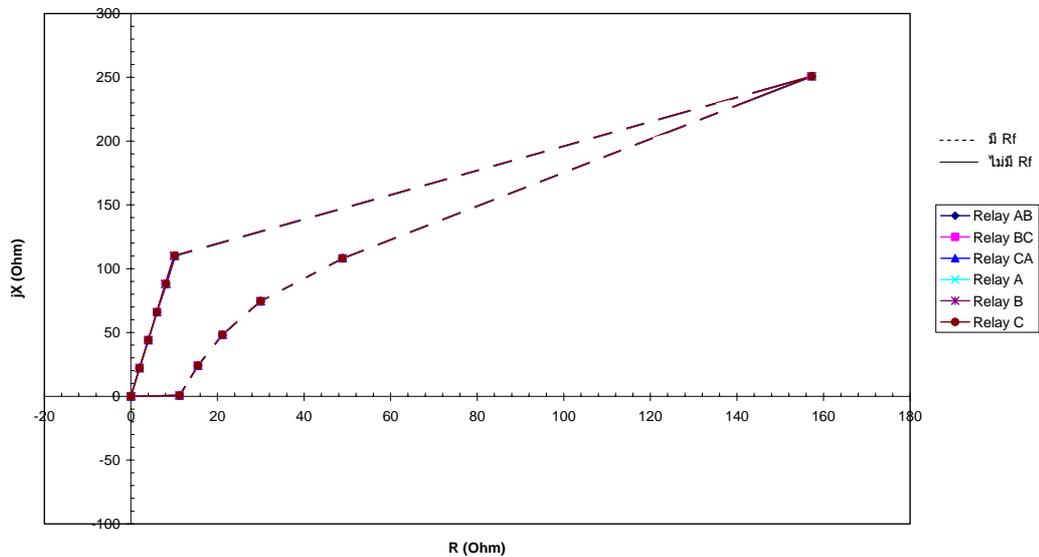


ภาพที่ 54 โลกัสมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -60^\circ$)

ตารางที่ 21 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)

ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -30^\circ$)

ระยะ x	รีเลย์ AB		รีเลย์ BC		รีเลย์ CA		รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C	
	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X
ไม่มี Rf	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.20	2.01	22.00	2.00	22.00	2.00	22.00	2.01	22.00	2.00	22.00	2.00
	0.40	4.00	43.99	4.01	44.02	4.03	44.00	4.06	43.98	4.00	44.01	4.03
	0.60	6.00	65.99	6.00	65.99	6.00	65.99	6.00	65.98	6.00	65.99	6.00
	0.80	7.97	87.90	8.01	88.15	8.21	87.99	8.12	87.88	7.92	88.04	8.16
	1.00	10.00	110.00	10.05	110.20	10.22	110.00	10.13	109.90	9.96	110.10	10.18
มี Rf	1	157.40	250.70	157.20	250.80	157.40	250.90	157.50	250.80	157.30	250.70	157.30
	0.80	48.96	108.10	48.90	108.10	48.90	108.20	48.94	108.20	48.94	108.10	48.88
	0.60	30.01	74.51	29.96	74.47	29.95	74.53	29.98	74.54	30.00	74.48	29.94
	0.40	21.18	48.23	21.17	48.22	21.17	48.24	21.18	48.24	21.18	48.22	21.16
	0.20	15.52	24.00	15.51	24.01	15.51	24.01	15.52	24.01	15.51	24.00	15.51
	0.00	11.23	0.65	11.23	0.65	11.23	0.65	11.23	0.65	11.23	0.65	11.23

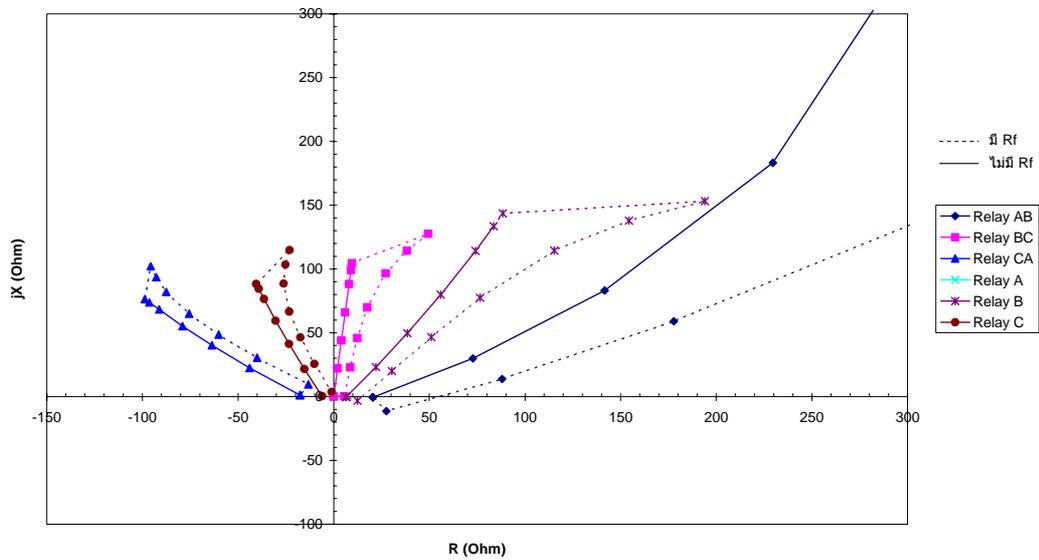


ภาพที่ 55 โลกัสมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)

ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -30^\circ$)

ตารางที่ 22 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -30^\circ$)

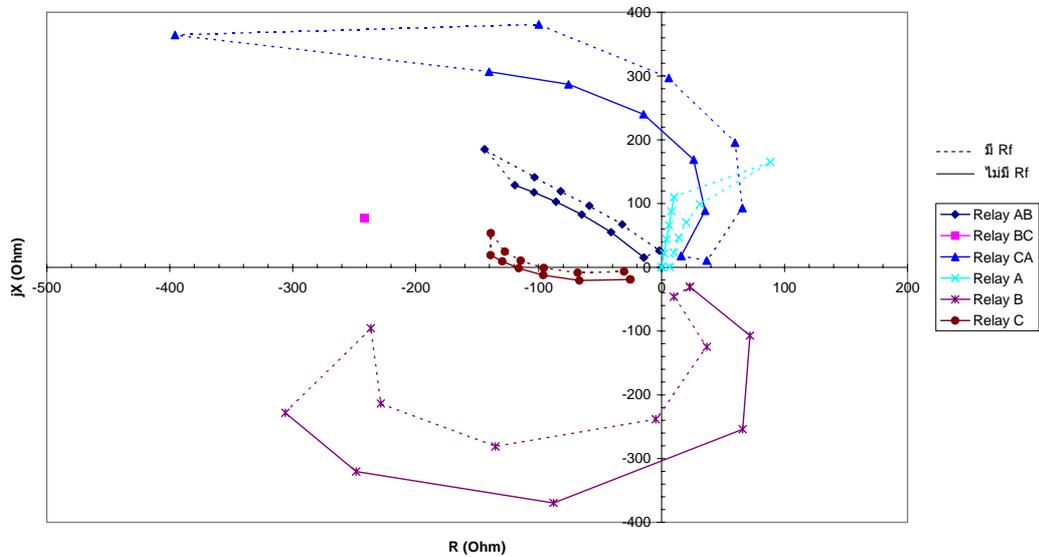
ระยะ x	รีเลย์ AB		รีเลย์ BC		รีเลย์ CA		รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C		
	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	
ไม่มี Rf	0	20.40	-0.57	0.00	0.00	-17.62	1.18	-241.30	77.39	6.46	-0.27	-6.15	0.34
	0.20	72.75	29.95	2.00	22.00	-43.93	22.44	-241.30	77.39	22.06	23.18	-15.39	21.65
	0.40	141.60	83.10	4.00	44.01	-63.70	40.23	-241.40	77.39	38.56	49.70	-23.39	41.32
	0.60	229.60	183.20	6.00	66.00	-79.00	55.22	-241.30	77.39	55.94	79.82	-30.34	59.49
	0.80	317.60	384.00	7.99	88.11	-91.21	68.34	-241.40	78.18	74.18	114.20	-36.45	76.56
	0.90	328.70	551.40	9.02	99.12	-96.37	73.81	-241.40	77.65	83.59	133.50	-39.18	84.44
	0.95	312.10	652.80	9.54	104.50	-98.77	76.43	-241.40	77.59	88.37	143.50	-40.49	88.23
มี Rf	0.95	37280.00	59610.00	49.45	127.50	-95.64	102.20	-241.20	77.39	194.10	153.10	-23.04	114.80
	0.90	1811.00	1194.00	38.27	114.30	-92.75	93.52	-241.20	77.38	154.40	137.90	-25.23	103.40
	0.80	725.80	432.40	27.19	96.56	-87.54	81.99	-241.20	77.38	115.30	114.40	-26.21	88.58
	0.60	330.30	152.30	17.50	69.86	-75.62	64.96	-241.40	77.39	76.46	77.42	-23.22	66.66
	0.40	177.80	58.97	12.33	45.95	-60.19	48.53	-241.40	77.39	51.10	46.63	-17.47	46.40
	0.20	88.05	13.82	8.60	22.91	-40.10	30.41	-241.30	77.39	30.48	20.02	-10.05	25.61
	0.00	27.49	-11.45	5.50	0.27	-13.27	9.57	-241.30	77.39	12.44	-3.33	-1.08	3.60



ภาพที่ 56 โลกัสมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -30^\circ$)

ตารางที่ 23 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -30^\circ$)

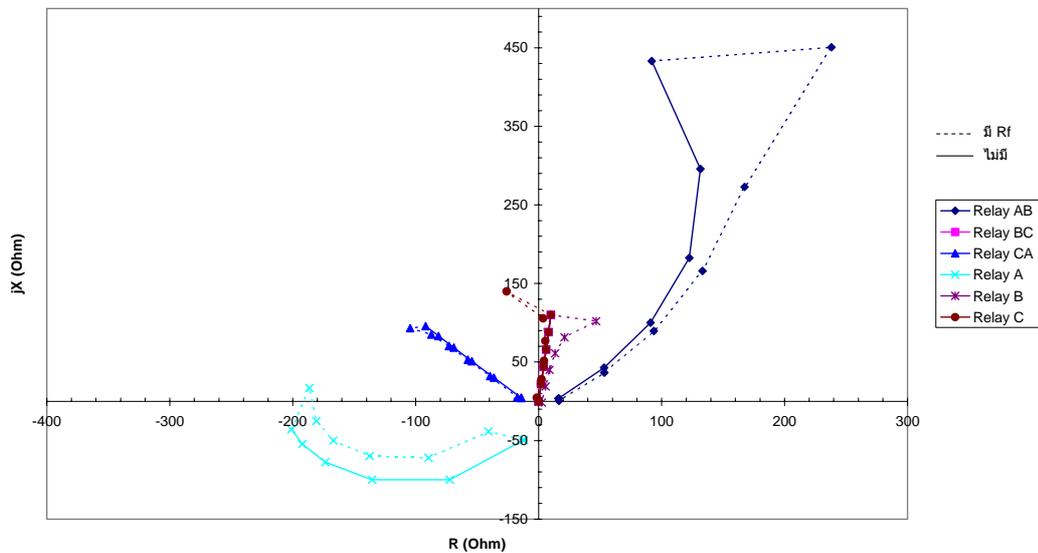
ระยะ x	รีเลย์ AB		รีเลย์ BC		รีเลย์ CA		รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C		
	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	
ไม่มี Rf	0	-14.55	15.29	-241.30	77.39	15.86	17.62	0.00	0.00	22.94	-30.87	-25.44	-19.17
	0.20	-41.08	55.02	-241.30	77.39	35.34	88.72	2.00	22.00	71.80	-107.20	-66.76	-20.61
	0.40	-65.03	82.81	-241.30	77.39	26.02	168.90	4.00	44.00	65.88	-253.90	-96.16	-12.37
	0.60	-85.90	102.80	-241.30	77.39	-14.72	240.10	6.00	66.00	-87.84	-369.70	-116.10	-1.43
	0.80	-103.90	117.60	-241.30	77.39	-75.68	287.10	8.00	88.00	-248.50	-320.30	-129.60	9.34
	1.00	-119.40	128.80	-241.30	77.39	-140.30	306.90	10.00	110.00	-306.00	-228.30	-139.00	19.03
มี Rf	1	-144.00	185.20	-241.30	77.39	-395.70	364.40	88.52	165.20	-236.60	-95.45	-138.90	53.40
	0.80	-103.40	141.20	-241.30	77.39	-99.96	381.10	31.29	98.69	-228.30	-213.50	-127.40	24.60
	0.60	-82.03	119.40	-241.30	77.39	5.82	297.00	19.92	70.72	-135.30	-281.20	-114.60	10.51
	0.40	-58.79	96.63	-241.30	77.39	59.60	195.40	14.06	46.37	-4.75	-238.40	-95.75	-0.93
	0.20	-32.09	67.35	-241.30	77.39	65.80	93.17	9.95	23.12	36.79	-124.70	-68.29	-8.61
	0.00	-1.82	26.20	-241.30	77.39	36.69	10.61	6.63	0.34	9.85	-46.20	-30.54	-6.64



ภาพที่ 57 โลกัสมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -30^\circ$)

ตารางที่ 24 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -30^\circ$)

ระยะ x	รีเลย์ AB		รีเลย์ BC		รีเลย์ CA		รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C		
	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	
ไม่มี Rf	0	16.23	3.73	0.00	0.00	-14.20	4.27	-12.25	-49.32	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.20	53.19	42.91	2.00	22.00	-36.38	30.09	-72.20	-99.84	2.00	22.00	2.00	22.00
	0.40	91.03	100.10	4.00	44.00	-54.28	51.06	-135.50	-99.73	4.00	44.00	4.00	44.00
	0.60	122.50	182.60	6.00	66.00	-69.03	68.45	-173.50	-77.53	6.00	66.00	6.00	66.00
	0.80	131.60	295.80	8.00	88.00	-81.40	83.09	-192.20	-54.42	8.00	88.00	8.00	88.00
	1.00	92.00	433.10	10.00	110.00	-91.91	95.59	-201.00	-35.71	10.00	110.00	10.00	110.00
มี Rf	1	238.10	450.60	10.00	110.00	-104.50	93.07	-186.50	16.78	46.80	102.10	-26.05	140.00
	0.80	167.40	272.90	8.00	88.00	-87.30	84.79	-180.80	-25.12	21.05	81.30	3.65	105.50
	0.60	133.20	165.90	6.00	66.00	-73.03	70.35	-167.00	-49.96	13.40	61.00	5.43	76.67
	0.40	93.73	89.58	4.00	44.00	-57.56	53.00	-137.60	-69.68	8.92	40.03	4.37	51.64
	0.20	53.43	36.54	2.00	22.00	-39.47	31.96	-89.56	-72.16	5.55	18.87	2.43	28.05
	0.00	16.50	0.48	0.00	0.00	-17.29	4.97	-40.79	-38.37	2.49	-1.74	-1.41	4.55

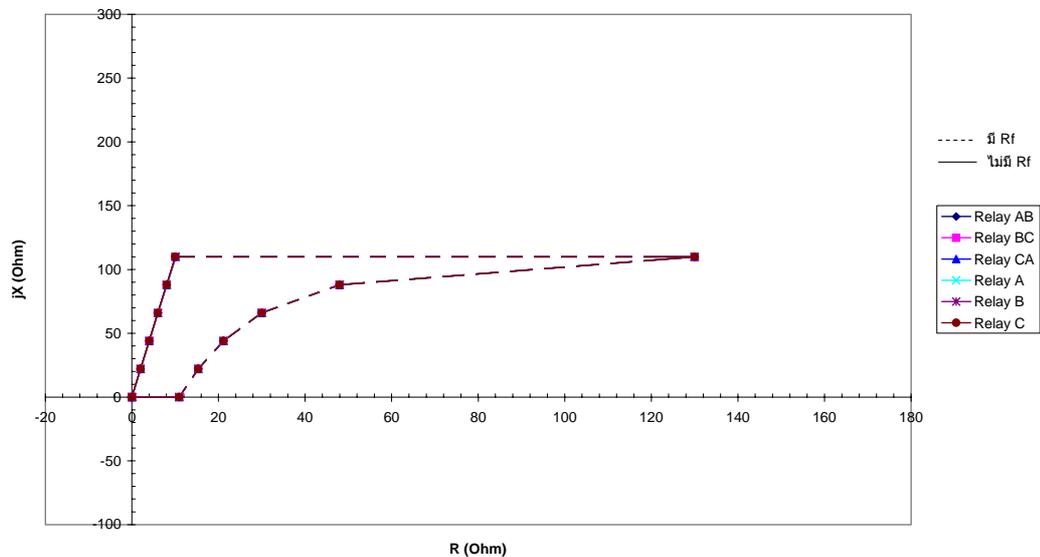


ภาพที่ 58 โลกัสมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -30^\circ$)

ตารางที่ 25 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)

ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 0^\circ$)

ระยะ x	รีเลย์ AB	รีเลย์ BC	รีเลย์ CA	รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C				
				R	X	R	X	R	X			
ไม่มี Rf	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.20	2.00	22.00	2.00	22.00	2.00	22.00	2.00	22.00	2.00	22.00	2.00
	0.40	4.00	44.00	4.00	44.00	4.00	44.00	4.00	44.00	4.00	44.00	4.00
	0.60	6.01	65.99	6.00	65.98	5.99	66.00	6.00	66.00	6.01	65.98	5.99
	0.80	8.02	87.98	8.04	88.03	8.07	87.99	8.05	87.97	8.01	88.01	8.07
	1.00	10.21	110.00	10.02	109.90	10.10	110.10	10.20	110.10	10.12	109.90	10.01
มี Rf	1	130.00	110.00	130.00	110.00	130.00	110.00	130.00	110.00	130.00	110.00	130.00
	0.80	48.02	87.97	47.98	87.96	47.98	88.00	48.00	88.00	48.00	87.95	47.96
	0.60	29.99	66.00	30.00	66.01	30.00	66.00	30.00	66.00	30.00	66.00	30.00
	0.40	21.14	44.00	21.14	44.00	21.14	44.00	21.14	44.00	21.14	44.00	21.14
	0.20	15.33	22.00	15.33	22.00	15.33	22.00	15.33	22.00	15.33	22.00	15.33
	0.00	10.91	0.00	10.91	0.00	10.91	0.00	10.91	0.00	10.91	0.00	10.91



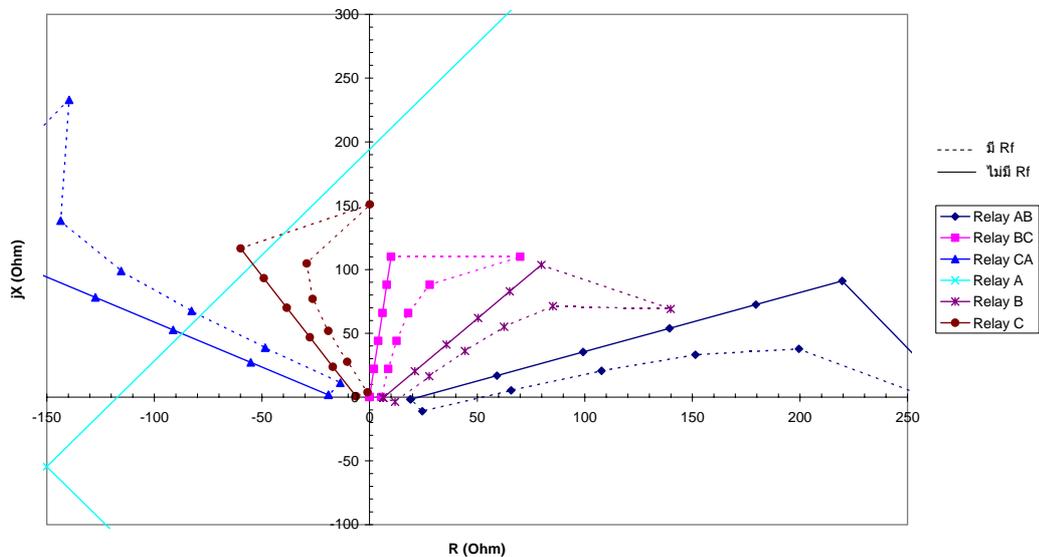
ภาพที่ 59 โลกัสมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)

ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 0^\circ$)

ตารางที่ 26 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C)

ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 0^\circ$)

ระยะ x	รีเลย์ AB		รีเลย์ BC		รีเลย์ CA		รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C		
	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	
ไม่มี Rf	0	19.05	-1.73	0.00	0.00	-19.05	1.73	2.88E+16	-4.4E+16	6.35	-0.58	-6.35	0.58
	0.20	59.16	16.80	2.00	22.00	-55.16	27.20	1.54E+17	-6.7E+16	21.05	20.27	-17.05	23.73
	0.40	99.26	35.34	4.00	44.00	-91.26	52.66	-4.9E+17	4.36E+16	35.75	41.11	-27.75	46.89
	0.60	139.40	53.88	6.00	66.00	-127.40	78.12	-2.4E+17	1.07E+17	50.46	61.96	-38.46	70.04
	0.80	179.50	72.41	8.00	88.00	-163.50	103.60	-8.9E+17	-1E+18	65.16	82.80	-49.16	93.20
	1.00	219.60	90.95	10.00	110.00	-199.60	129.10	-3.4E+17	8.65E+16	79.86	103.60	-59.86	116.40
มี Rf	1	279.60	-12.97	70.00	110.00	-139.60	233.00	-2E+17	4.16E+17	139.90	69.01	0.14	151.00
	0.80	199.50	37.77	28.00	88.00	-143.50	138.20	-4.4E+17	-2.9E+17	85.16	71.26	-29.16	104.70
	0.60	151.40	33.09	18.00	66.00	-115.40	98.91	-8.7E+17	1.33E+17	62.46	55.03	-26.46	76.97
	0.40	107.80	20.49	12.57	44.00	-82.69	67.51	-9.2E+16	-2E+17	44.33	36.16	-19.18	51.84
	0.20	65.82	5.26	8.67	22.00	-48.49	38.74	-2.5E+17	-4.5E+16	27.72	16.42	-10.39	27.58
	0.00	24.51	-11.18	5.46	0.00	-13.60	11.18	3.74E+16	1.32E+16	11.81	-3.73	-0.90	3.73

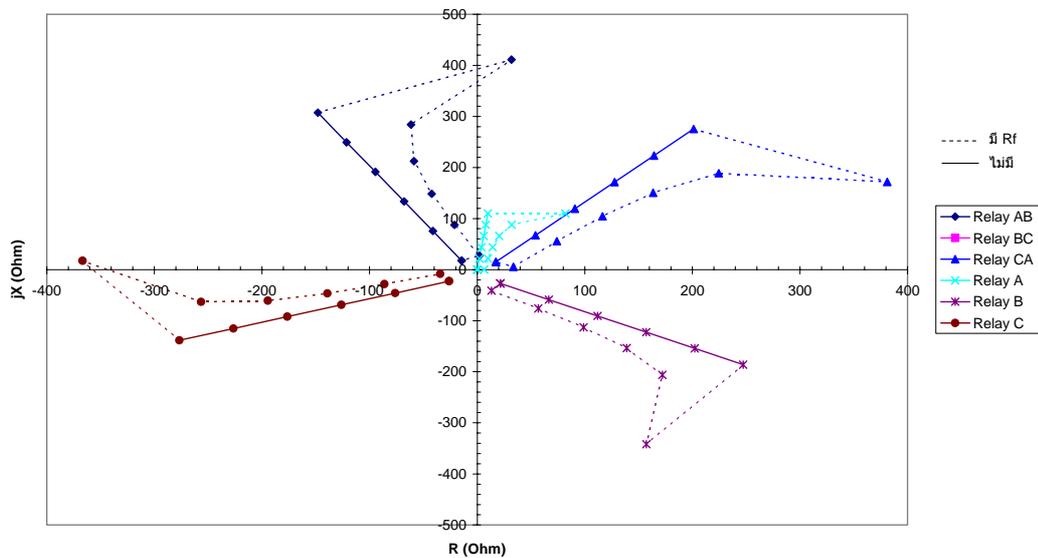


ภาพที่ 60 โลกัสมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C)

ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 0^\circ$)

ตารางที่ 27 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 0^\circ$)

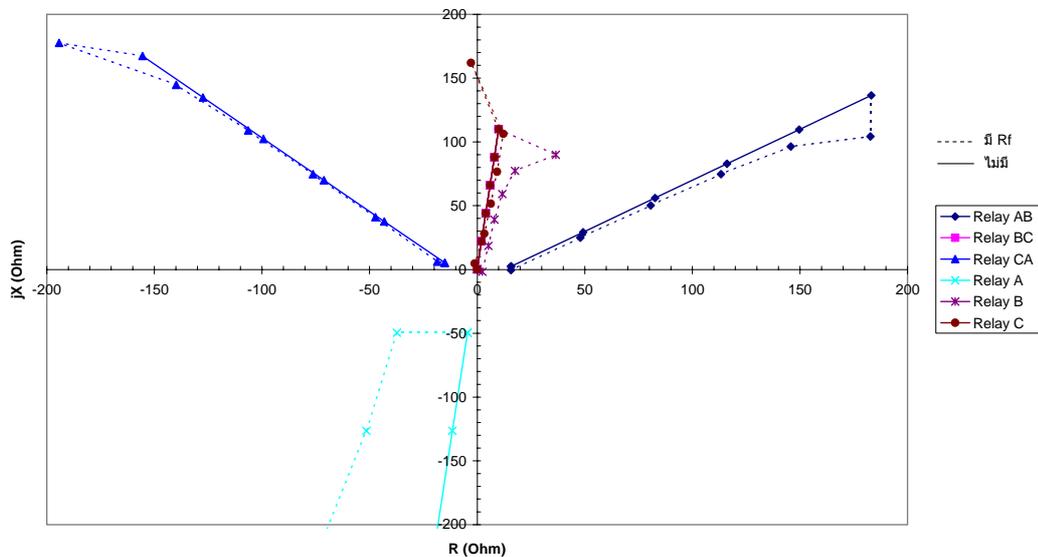
ระยะ x	รีเลย์ AB		รีเลย์ BC		รีเลย์ CA		รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C		
	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	
ไม่มี Rf	0	-14.38	17.94	-2.3E+17	1.68E+16	17.38	15.06	0.00	0.00	21.57	-26.92	-26.07	-22.59
	0.20	-41.13	75.83	-7.9E+17	9.02E+16	54.13	67.17	2.00	22.00	66.70	-58.75	-76.20	-45.75
	0.40	-67.89	133.70	-1.1E+18	9.47E+16	90.89	119.30	4.00	44.00	111.80	-90.58	-126.30	-68.92
	0.60	-94.64	191.60	-1.6E+18	2.92E+17	127.60	171.40	6.00	66.00	157.00	-122.40	-176.50	-92.09
	0.80	-121.40	249.50	-1.4E+18	7.18E+16	164.40	223.50	8.00	88.00	202.10	-154.20	-226.60	-115.30
	1.00	-148.10	307.40	-1.6E+18	2.39E+17	201.10	275.60	10.00	110.00	247.20	-186.10	-276.70	-138.40
มี Rf	1	31.85	411.30	-1.5E+18	9.9E+17	381.10	171.70	82.00	110.00	157.20	-341.90	-366.70	17.45
	0.80	-61.39	284.10	-1.5E+18	2.93E+17	224.40	188.90	32.00	88.00	172.10	-206.20	-256.60	-63.30
	0.60	-58.64	212.40	-1.6E+18	6.42E+17	163.60	150.60	20.40	66.00	139.00	-153.60	-194.50	-60.92
	0.40	-42.17	148.60	-1.1E+18	2.92E+17	116.60	104.40	14.29	44.00	98.97	-112.80	-139.20	-46.66
	0.20	-21.13	87.38	-7.8E+17	2.68E+17	74.13	55.62	10.00	22.00	56.70	-76.07	-86.20	-28.43
	0.00	1.99	27.39	-2.3E+17	1.54E+17	33.74	5.61	6.55	0.00	13.38	-41.09	-34.25	-8.41



ภาพที่ 61 โลกัสมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 0^\circ$)

ตารางที่ 28 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 0^\circ$)

ระยะ x	Rf	รีเลย์ AB		รีเลย์ BC		รีเลย์ CA		รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C	
		R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X
ไม่มี Rf	0	15.73	2.41	0.00	0.00	-15.04	5.21	-4.50	-49.50	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.20	49.20	29.23	2.00	22.00	-43.13	37.62	-11.50	-126.50	2.00	22.00	2.00	22.00
	0.40	82.67	56.04	4.00	44.00	-71.21	70.03	-18.50	-203.50	4.00	44.00	4.00	44.00
	0.60	116.10	82.86	6.00	66.00	-99.30	102.40	-25.50	-280.50	6.00	66.00	6.00	66.00
	0.80	149.60	109.70	8.00	88.00	-127.40	134.90	-32.50	-357.50	8.00	88.00	8.00	88.00
	1.00	183.10	136.50	10.00	110.00	-155.50	167.30	-39.50	-434.50	10.00	110.00	10.00	110.00
มี Rf	1	182.70	104.30	10.00	110.00	-194.30	177.60	-399.50	-434.50	36.55	89.87	-2.83	162.00
	0.80	145.70	96.38	8.00	88.00	-139.80	144.80	-152.50	-357.50	17.54	77.32	12.14	106.30
	0.60	113.30	74.73	6.00	66.00	-106.40	109.00	-97.50	-280.50	11.69	59.08	9.24	76.61
	0.40	80.61	50.23	4.00	44.00	-76.26	74.73	-69.93	-203.50	8.06	39.06	6.31	51.58
	0.20	47.91	24.79	2.00	22.00	-47.27	40.93	-51.50	-126.50	5.18	18.44	3.38	28.09
	0.00	15.70	-0.52	0.00	0.00	-18.57	6.15	-37.23	-49.50	2.41	-1.83	-1.17	4.73

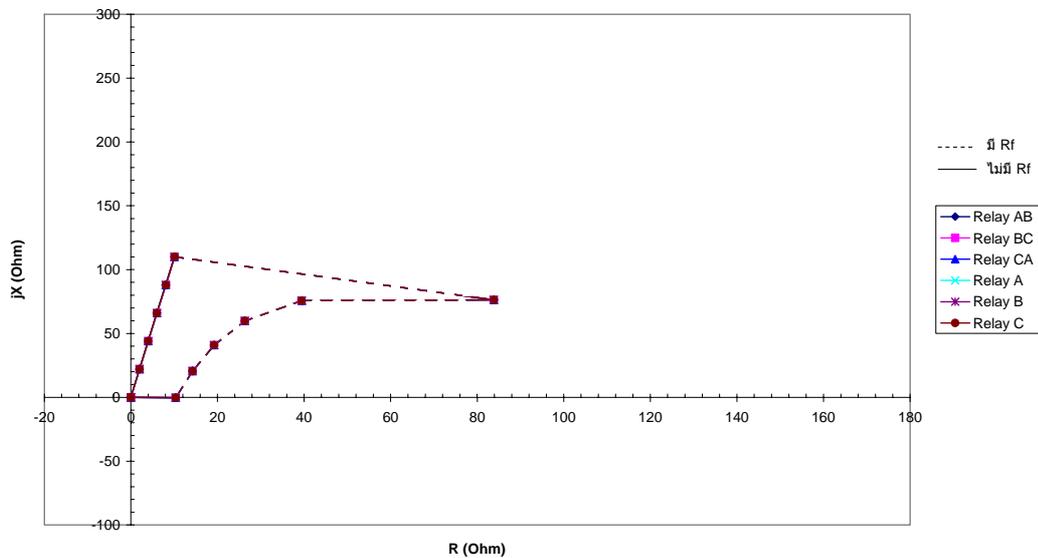


ภาพที่ 62 โลกัสมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 0^\circ$)

ตารางที่ 29 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)

ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 30^\circ$)

ระยะ x	รีเลย์ AB		รีเลย์ BC		รีเลย์ CA		รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C	
	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X
ไม่มี Rf	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.20	2.00	22.00	2.00	22.00	2.00	22.00	2.00	22.00	2.00	22.00	2.00
	0.40	4.02	44.01	4.00	43.98	3.99	44.01	4.00	44.02	4.02	43.99	3.99
	0.60	6.04	66.01	6.01	65.97	5.98	66.01	6.01	66.03	6.04	65.98	5.98
	0.80	8.01	88.05	8.11	88.02	8.03	87.94	7.99	87.99	8.07	88.07	8.09
	1.00	10.06	110.00	10.06	110.10	10.13	110.00	10.11	110.00	10.04	110.00	10.11
มี Rf	1	83.82	76.38	83.84	76.42	83.86	76.39	83.84	76.37	83.82	76.41	83.86
	0.80	39.49	75.66	39.44	75.70	39.51	75.72	39.51	75.68	39.45	75.67	39.47
	0.60	26.34	59.89	26.34	59.89	26.34	59.89	26.34	59.89	26.34	59.89	26.34
	0.40	19.22	40.81	19.22	40.81	19.22	40.81	19.22	40.81	19.22	40.81	19.22
	0.20	14.27	20.51	14.27	20.52	14.27	20.52	14.27	20.51	14.27	20.52	14.27
	0.00	10.36	-0.36	10.36	-0.36	10.36	-0.36	10.36	-0.36	10.36	-0.36	10.36

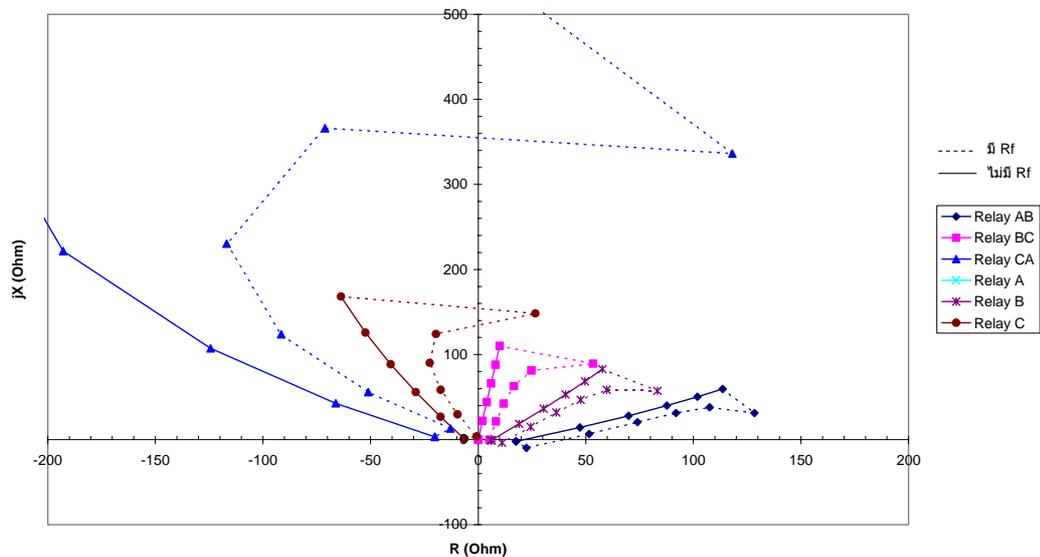


ภาพที่ 63 โลกัสมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)

ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 30^\circ$)

ตารางที่ 30 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 30^\circ$)

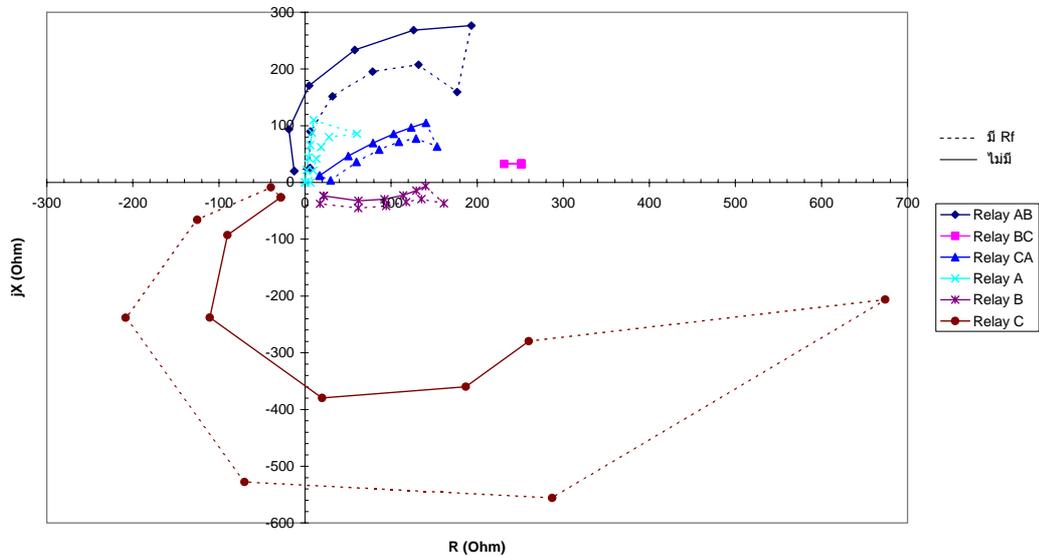
ระยะ x	รีเลย์ AB		รีเลย์ BC		รีเลย์ CA		รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C		
	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	
ไม่มี Rf	0	17.54	-2.02	0.00	0.00	-20.16	3.12	251.30	32.61	6.11	-0.78	-6.40	0.90
	0.20	47.25	14.16	2.00	22.00	-66.16	42.58	251.30	32.61	19.04	18.52	-17.51	26.78
	0.40	69.90	28.09	4.00	44.00	-124.30	107.30	251.30	32.61	30.44	36.42	-28.96	55.83
	0.60	87.66	40.08	6.00	66.00	-192.80	221.60	251.30	32.61	40.57	53.05	-40.64	88.60
	0.80	101.90	50.43	8.00	88.00	-242.60	435.90	251.30	32.61	49.59	68.52	-52.34	125.80
	1.00	113.60	59.42	10.00	110.00	-128.00	799.50	251.30	32.61	57.67	82.95	-63.76	168.20
มี Rf	1	128.40	31.17	53.44	89.07	118.10	336.20	251.30	32.61	83.33	57.32	26.59	148.20
	0.80	107.50	38.05	24.79	81.24	-71.15	366.10	251.30	32.61	59.76	58.44	-19.55	124.20
	0.60	91.97	31.18	16.60	62.74	-116.90	230.40	251.30	32.61	47.64	46.78	-22.53	90.25
	0.40	74.02	20.40	11.84	42.31	-91.51	123.80	251.30	32.61	36.29	31.86	-17.40	58.41
	0.20	51.60	6.72	8.29	21.21	-51.11	55.91	251.30	32.61	24.31	14.93	-9.56	29.62
	0.00	22.41	-9.89	5.28	-0.20	-12.89	12.87	251.30	32.61	11.12	-3.77	-0.68	3.74



ภาพที่ 64 โลกัสมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 30^\circ$)

ตารางที่ 31 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 30^\circ$)

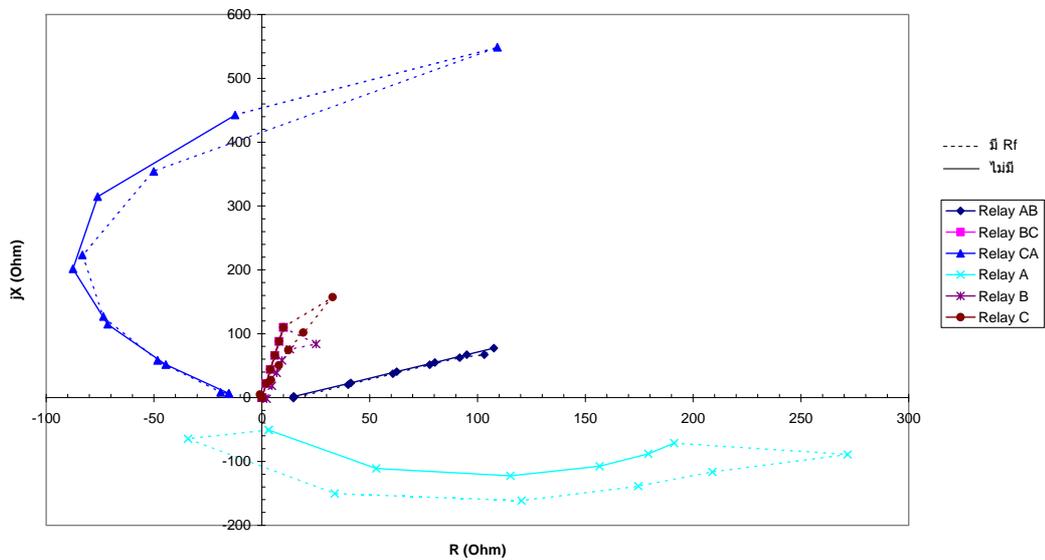
ระยะ x	รีเลย์ AB	รีเลย์ BC	รีเลย์ CA	รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C					
				R	X	R	X	R	X				
ไม่มี Rf	0	-12.42	20.20	251.30	32.61	17.07	12.42	0.00	0.00	21.56	-23.44	-28.14	-26.23
	0.20	-18.76	93.64	251.30	32.61	50.32	46.72	2.00	22.00	61.95	-32.31	-89.96	-92.53
	0.40	4.88	170.90	251.30	32.61	78.89	69.72	4.00	44.00	92.36	-29.51	-110.60	-237.90
	0.60	57.78	233.50	251.30	32.61	103.00	85.62	6.00	66.00	114.00	-22.35	19.74	-379.50
	0.80	126.20	268.70	251.30	32.61	123.40	96.91	8.00	88.00	129.20	-14.19	186.70	-359.90
	1.00	193.30	276.60	251.30	32.61	140.60	105.10	10.00	110.00	140.10	-6.34	259.80	-279.70
มี Rf	1	176.60	159.50	251.30	32.61	153.50	63.58	60.35	86.05	161.40	-36.77	674.00	-206.10
	0.80	131.80	207.60	251.30	32.61	129.00	77.49	27.88	80.05	135.20	-29.16	287.10	-555.80
	0.60	78.55	195.40	251.30	32.61	109.00	71.59	18.61	62.13	117.50	-34.41	-70.18	-527.70
	0.40	31.95	151.90	231.30	32.61	86.19	58.01	13.35	42.00	94.32	-41.36	-208.40	-238.10
	0.20	6.18	90.06	251.30	32.61	59.77	36.44	9.51	21.07	61.72	-45.15	-125.10	-65.60
	0.00	5.64	25.75	251.30	32.61	29.64	3.68	6.31	-0.24	17.35	-37.38	-39.57	-8.43



ภาพที่ 65 โลกัสมอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 30^\circ$)

ตารางที่ 32 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 30^\circ$)

ระยะ x	ไม่มี Rf	รีเลย์ AB		รีเลย์ BC		รีเลย์ CA		รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C	
		R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X
0	0	14.74	1.64	0.00	0.00	-15.29	6.55	3.16	-50.72	0.00	0.00	0.00	0.00
0.20		41.21	23.03	2.00	22.00	-44.58	51.80	53.02	-111.20	2.00	22.00	2.00	22.00
0.40		62.60	40.44	4.00	44.00	-71.49	114.90	115.30	-122.50	4.00	44.00	4.00	44.00
0.60		80.24	54.88	6.00	66.00	-87.55	201.70	156.60	-107.50	6.00	66.00	6.00	66.00
0.80		95.05	67.05	8.00	88.00	-76.11	314.70	179.30	-88.19	8.00	88.00	8.00	88.00
1.00		107.60	77.45	10.00	110.00	-12.39	442.60	191.20	-71.36	10.00	110.00	10.00	110.00
1	1	103.20	66.99	10.00	110.00	109.20	548.90	271.60	-89.32	25.20	83.94	32.80	157.40
0.80		91.71	62.51	8.00	88.00	-50.15	354.40	208.90	-116.50	13.02	75.43	19.18	101.70
0.60		77.88	51.53	6.00	66.00	-83.24	223.40	174.60	-138.90	9.41	58.20	12.28	74.43
0.40		60.82	37.42	4.00	44.00	-73.49	127.00	120.40	-161.40	6.89	38.62	7.89	50.48
0.20		39.98	20.06	2.00	22.00	-48.35	58.17	33.75	-150.30	4.66	18.24	4.20	27.61
0.00		14.63	-0.93	0.00	0.00	-19.10	8.09	-34.23	-64.42	2.31	-1.88	-0.87	4.75

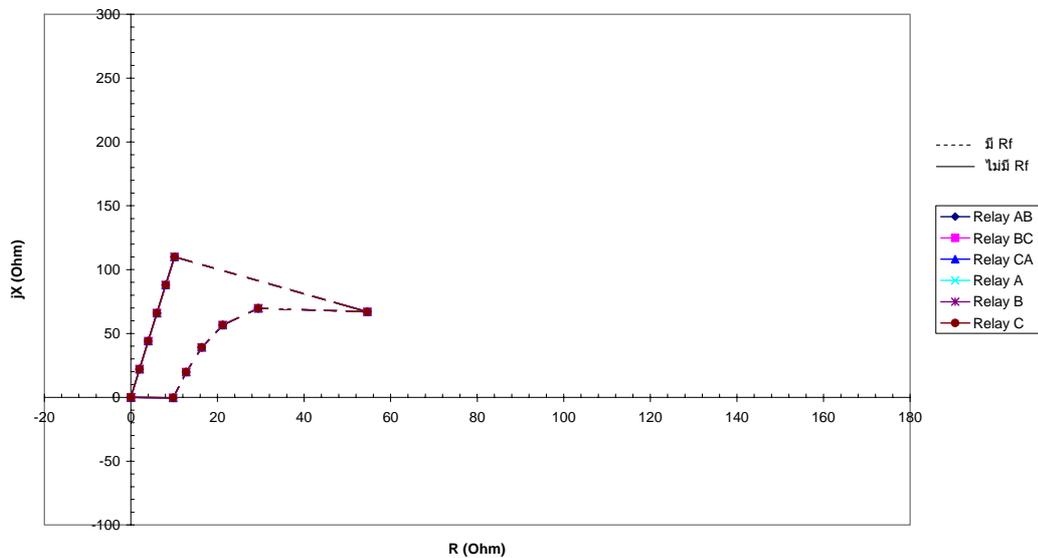


ภาพที่ 66 โลกัอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 30^\circ$)

ตารางที่ 33 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)

ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 60^\circ$)

ระยะ x	รีเลย์ AB		รีเลย์ BC		รีเลย์ CA		รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C	
	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X
ไม่มี Rf	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.20	2.00	22.00	2.00	22.00	2.00	22.00	2.00	22.00	2.00	22.00	2.00
	0.40	4.03	44.00	3.99	43.98	3.99	44.02	4.02	44.02	4.02	43.98	3.98
	0.60	6.01	65.98	6.00	65.99	6.01	66.00	6.02	65.99	6.00	65.98	6.00
	0.80	8.00	88.03	8.08	88.04	8.04	87.96	8.00	87.99	8.04	88.06	8.08
	1.00	10.04	110.00	10.12	110.00	10.09	110.00	10.05	110.00	10.08	110.10	10.12
มี Rf	1	54.64	67.01	54.63	67.02	54.64	67.02	54.64	67.01	54.63	67.02	54.64
	0.80	29.43	69.72	29.42	69.74	29.45	69.73	29.44	69.72	29.42	69.73	29.44
	0.60	21.21	56.58	21.21	56.58	21.22	56.57	21.21	56.57	21.21	56.58	21.22
	0.40	16.38	39.07	16.39	39.07	16.38	39.07	16.38	39.07	16.39	39.07	16.39
	0.20	12.78	19.77	12.78	19.77	12.78	19.77	12.78	19.77	12.78	19.77	12.78
	0.00	9.74	-0.42	9.74	-0.42	9.74	-0.42	9.74	-0.42	9.74	-0.42	9.74

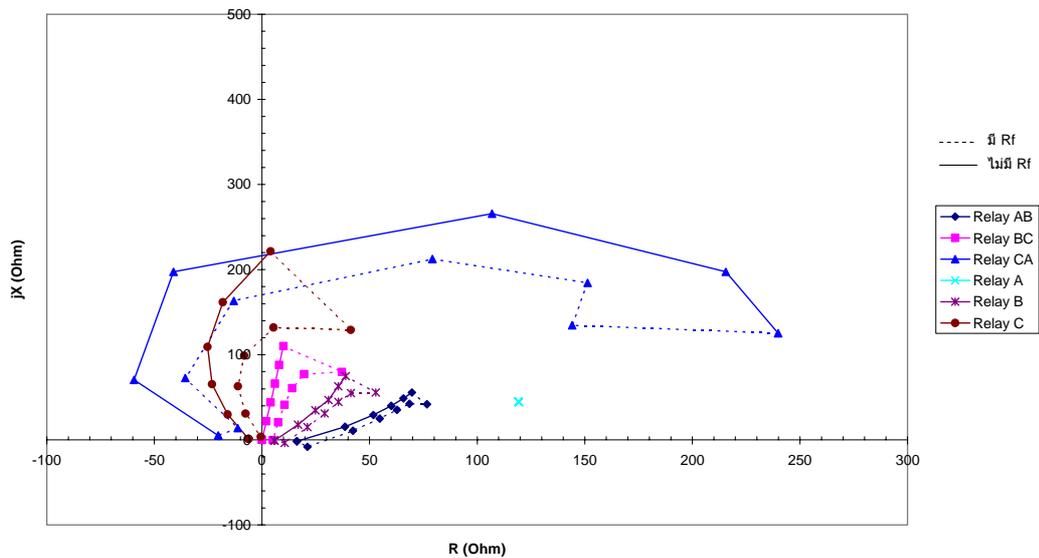


ภาพที่ 67 โลกัสมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)

ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 60^\circ$)

ตารางที่ 34 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 60^\circ$)

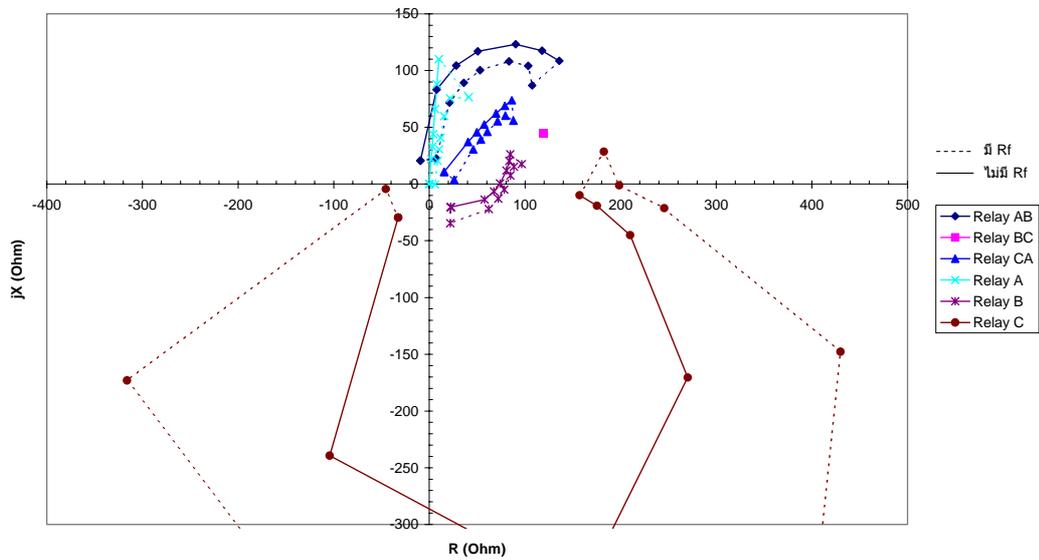
ระยะ x	รีเลย์ AB		รีเลย์ BC		รีเลย์ CA		รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C		
	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	
ไม่มี Rf	0	16.23	-1.66	0.00	0.00	-20.30	5.14	119.30	44.61	5.82	-0.84	-6.28	1.21
	0.20	38.59	15.45	2.00	22.00	-59.47	70.37	119.30	44.61	16.75	17.93	-15.97	29.93
	0.40	51.77	29.23	4.00	44.00	-41.16	197.40	119.30	44.61	24.87	34.70	-23.17	65.49
	0.60	60.10	40.06	6.00	66.00	106.90	265.80	119.30	44.61	30.93	46.95	-25.31	109.20
	0.80	65.70	48.64	8.00	88.00	215.50	197.50	119.30	44.61	35.47	62.96	-18.23	161.70
	1.00	69.64	55.54	10.00	110.00	239.80	125.40	119.30	44.61	38.87	74.85	4.00	221.70
มี Rf	1	76.73	41.84	37.09	79.89	144.10	134.60	119.30	44.61	52.85	55.64	41.22	129.10
	0.80	68.58	42.37	19.59	77.22	151.30	184.50	119.30	44.61	41.33	55.05	5.36	132.10
	0.60	62.74	35.41	14.04	60.68	79.20	212.50	119.30	44.61	35.48	44.69	-8.28	98.87
	0.40	54.75	24.92	10.48	41.24	-13.10	163.30	119.30	44.61	29.13	31.06	-11.13	63.04
	0.20	42.32	10.66	7.60	20.73	-35.64	72.78	119.30	44.61	21.11	14.95	-7.58	30.91
	0.00	21.14	-8.15	5.04	-0.30	-11.22	13.84	119.30	44.61	10.54	-3.52	-0.48	3.63



ภาพที่ 68 โลกัสมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 60^\circ$)

ตารางที่ 35 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 60^\circ$)

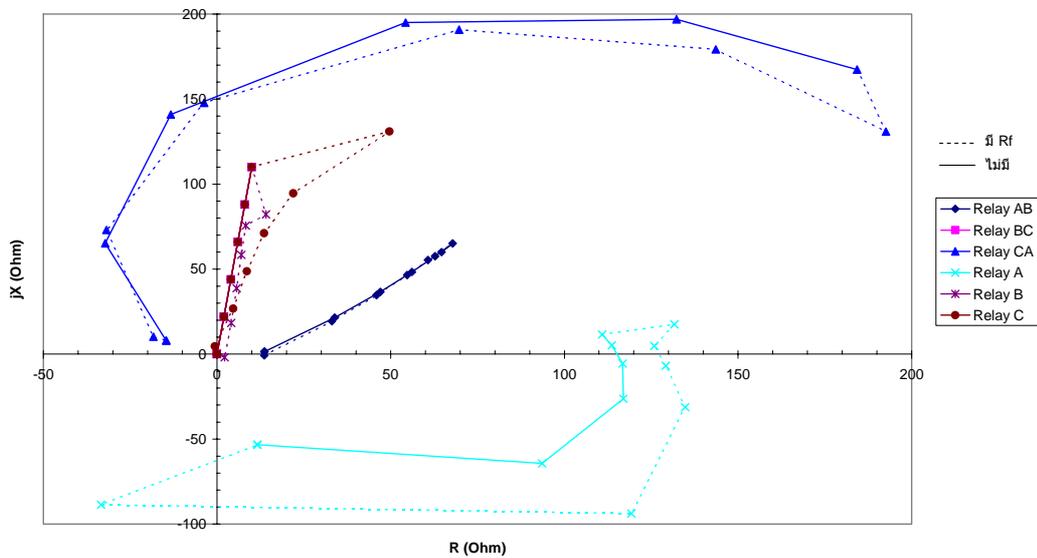
ระยะ x	รีเลย์ AB		รีเลย์ BC		รีเลย์ CA		รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C		
	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	
ไม่มี Rf	0	-9.39	20.68	119.30	44.61	15.64	10.65	0.00	0.00	22.47	-20.40	-32.64	-29.49
	0.20	7.57	83.29	119.30	44.61	40.39	37.13	2.00	22.00	57.74	-13.72	-104.10	-239.30
	0.30	28.08	104.40	119.30	44.61	49.65	45.69	3.00	33.00	67.57	-6.50	159.50	-358.30
	0.40	50.58	116.90	119.30	44.61	57.44	52.40	4.00	44.00	73.93	0.47	270.10	-170.50
	0.60	90.21	123.20	119.30	44.61	69.75	62.19	6.00	66.00	80.66	11.95	210.00	-45.02
	0.80	117.90	117.50	119.30	44.61	79.00	68.95	8.00	88.00	83.49	20.26	175.20	-19.16
1.00	135.90	108.50	119.30	44.61	86.20	73.87	10.00	110.00	84.67	26.31	157.10	-9.88	
มี Rf	1	107.50	86.93	119.30	44.61	87.82	55.77	41.24	76.49	96.57	17.60	182.50	28.53
	0.80	103.40	104.20	119.30	44.61	79.61	60.18	21.70	75.51	88.37	15.24	198.50	-1.19
	0.60	83.37	108.10	119.30	44.61	71.41	55.36	15.54	59.77	84.79	7.54	245.60	-21.28
	0.40	53.03	100.30	119.30	44.61	60.60	46.02	11.71	40.77	78.27	-4.82	429.80	-147.70
	0.30	36.19	89.19	119.30	44.61	53.86	39.27	10.13	30.74	72.06	-12.96	337.70	-899.70
	0.20	20.99	71.90	119.30	44.61	46.00	30.57	8.67	20.52	62.03	-22.11	-316.10	-173.10
	0.00	7.24	22.53	119.30	44.61	26.01	3.78	6.01	-0.33	21.90	-34.58	-45.55	-4.44



ภาพที่ 69 โลกัสมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 60^\circ$)

ตารางที่ 36 อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = -60^\circ$)

ระยะ x	รีเลย์ AB		รีเลย์ BC		รีเลย์ CA		รีเลย์ A		รีเลย์ B		รีเลย์ C		
	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	
ไม่มี Rf	0	15.84	5.22	0.00	0.00	-13.15	3.89	-21.05	-50.37	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.20	43.42	58.32	2.00	22.00	-29.46	27.23	-103.70	-46.33	2.00	22.00	2.00	22.00
	0.40	38.49	136.20	4.00	44.00	-39.67	44.47	-119.80	-4.80	4.00	44.00	4.00	44.00
	0.60	-18.23	201.60	6.00	66.00	-46.53	57.63	-115.90	15.57	6.00	66.00	6.00	66.00
	0.80	-94.57	217.60	8.00	88.00	-51.39	67.96	-110.90	25.64	8.00	88.00	8.00	88.00
	1.00	-151.10	197.80	10.00	110.00	-54.98	76.28	-107.00	31.30	10.00	110.00	10.00	110.00
มี Rf	1	-191.30	221.90	10.00	110.00	-61.01	73.95	-96.07	45.15	50.70	123.10	-28.17	116.00
	0.80	-93.47	241.20	8.00	88.00	-54.54	68.44	-102.20	31.44	22.39	87.07	-2.30	100.10
	0.60	-4.79	211.40	6.00	66.00	-48.79	58.52	-106.80	20.93	14.01	63.68	2.34	74.63
	0.40	49.52	133.20	4.00	44.00	-41.67	45.63	-108.30	4.26	9.21	41.37	2.74	50.64
	0.20	47.22	52.43	2.00	22.00	-31.59	28.62	-94.58	-22.77	5.66	19.45	1.66	27.51
	0.00	16.60	1.90	0.00	0.00	-15.81	4.58	-44.89	-28.75	2.50	-1.62	-1.52	4.29



ภาพที่ 70 โลกัสมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (B-C-G)
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($\delta = 60^\circ$)

2. ผลของกระแสไหลและความต้านทานฟอลต์ต่อค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น

2.1 กรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) ผลที่ได้จากโปรแกรมแสดงในตารางที่ 37 สามารถนำมาพล็อตกราฟลงในแผนภาพอิมพีแดนซ์ดังภาพที่ 71 สังเกตได้ว่า

กรณี δ เป็นศูนย์ เมื่อ R_f เพิ่มขึ้น รีเลย์จะมองเห็นความต้านทานเพิ่มขึ้น รีแอกแตนซ์คงที่

กรณี δ เป็นลบ เมื่อ R_f เพิ่มขึ้น รีเลย์จะมองเห็นความต้านทานและรีแอกแตนซ์เพิ่มขึ้นทั้งคู่ ยกเว้นกรณี $\delta = -60^\circ$ ความต้านทานและรีแอกแตนซ์จะเพิ่มขึ้นและลดลงตามภาพที่ 71

กรณี δ เป็นบวก เมื่อ R_f เพิ่มขึ้น รีเลย์จะมองเห็นความต้านทานเพิ่มขึ้น รีแอกแตนซ์ลดลง

2.2 กรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C) ผลที่ได้จากโปรแกรมแสดงในตารางที่ 38 สามารถนำมาพล็อตกราฟลงในแผนภาพอิมพีแดนซ์ดังภาพที่ 72 สังเกตได้ว่า

กรณี δ เป็นศูนย์ เมื่อ R_f เพิ่มขึ้น รีเลย์จะมองเห็นความต้านทานเพิ่มขึ้น รีแอกแตนซ์คงที่

กรณี δ เป็นลบ เมื่อ R_f เพิ่มขึ้น รีเลย์จะมองเห็นความต้านทานและรีแอกแตนซ์เพิ่มขึ้นทั้งคู่ ยกเว้นกรณี $\delta = -60^\circ$ ความต้านทานจะเพิ่มขึ้นแล้วก็ลดลงในขณะที่รีแอกแตนซ์จะเพิ่มขึ้นตามภาพที่ 72

กรณี δ เป็นบวก เมื่อ R_f เพิ่มขึ้น รีเลย์จะมองเห็นความต้านทานเพิ่มขึ้น รีแอกแตนซ์ลดลง

2.3 กรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G) ผลที่ได้จากโปรแกรมแสดงในตารางที่ 39 สามารถนำมาพล็อตกราฟลงในแผนภาพอิมพีแดนซ์ดังภาพที่ 73 สังเกตได้ว่า

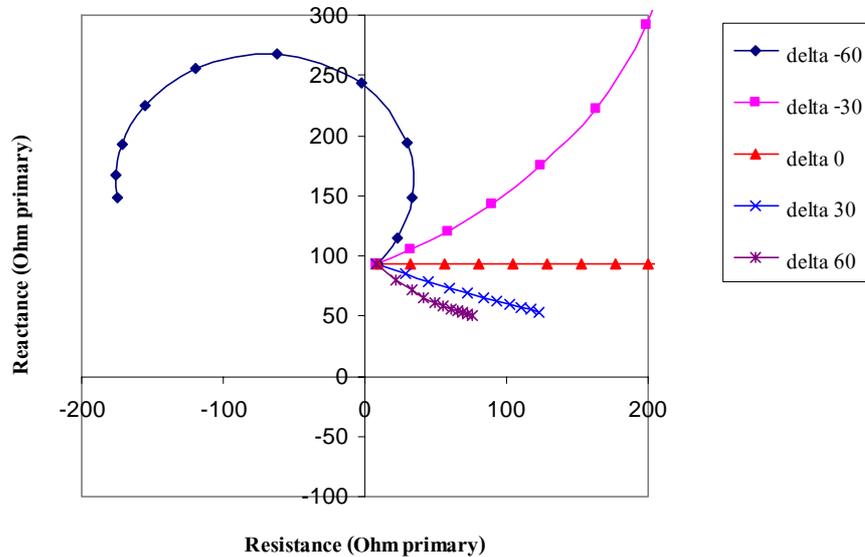
กรณี δ เป็นศูนย์ เมื่อ R_f เพิ่มขึ้น รีเลย์จะมองเห็นความต้านทานเพิ่มขึ้น รีแอกแตนซ์คงที่

กรณี δ เป็นลบ เมื่อ R_f เพิ่มขึ้น รีเลย์จะมองเห็นความต้านทานและรีแอกแตนซ์เพิ่มขึ้นทั้งคู่ ยกเว้นกรณี $\delta = -60^\circ$ ความต้านทานและรีแอกแตนซ์จะเพิ่มขึ้นและลดลงตามภาพที่ 73 ในลักษณะเดียวกันกับกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)

กรณี δ เป็นบวก เมื่อ R_f เพิ่มขึ้น รีเลย์จะมองเห็นความต้านทานเพิ่มขึ้น รีแอกแตนซ์ลดลง

ตารางที่ 37 ผลของกระแสไหลคและความต้านทานฟอลต์ต่อค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทาง
มองเห็น กรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)

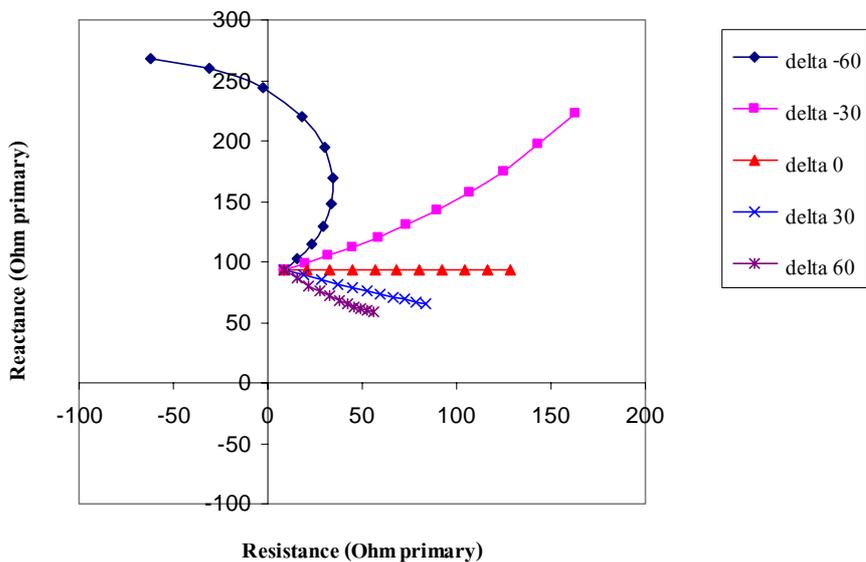
Rf	delta = -60		delta = -30		delta = 0		delta = 30		delta = 60	
	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X
0.000001	8.692	93.48	8.542	93.35	8.656	93.41	8.607	93.53	8.561	93.48
5	23.04	114.6	31.67	104.7	32.59	93.49	28.28	85.02	21.81	80.17
10	33.65	147.8	58.48	120.5	56.52	93.47	45.12	78.42	32.81	71.47
15	29.97	194.3	89.47	142.9	80.5	93.48	59.66	73.06	41.89	65.53
20	-2.823	243.4	124.7	175.3	104.5	93.47	72.32	68.73	49.39	61.28
25	-62.43	267.6	162.7	222.8	128.5	93.49	83.42	65.09	55.67	58.15
30	-120.1	255.7	199.3	292.6	152.5	93.5	93.26	62.04	60.95	55.83
35	-155.6	224.5	222.9	392.8	176.5	93.48	102	59.45	65.46	54.03
40	-171.1	193	209.7	526.3	200.5	93.5	109.8	57.24	69.35	52.61
45	-175.4	167.6	127.3	671.5	224.5	93.5	116.9	55.32	72.72	51.48
50	-174.4	148.4	-34.31	771.8	248.5	93.5	123.3	53.65	75.69	50.57



ภาพที่ 71 ผลของกระแสไหลคและความต้านทานฟอลต์ต่อค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น
กรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C)

ตารางที่ 38 ผลของกระแสไหลคและความต้านทานฟอลต์ต่อค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น กรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C)

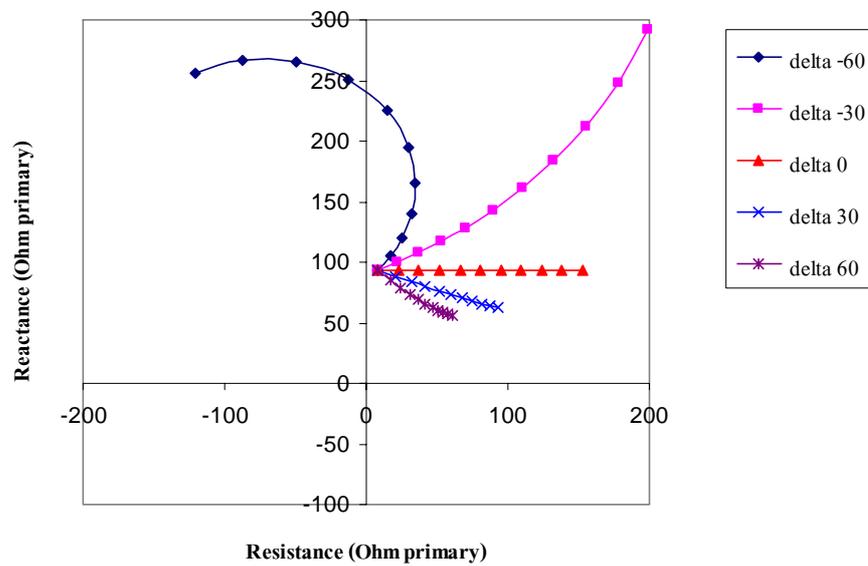
Rf	delta = -60		delta = -30		delta = 0		delta = 30		delta = 60	
	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X
0.000001	8.531	93.53	8.536	93.51	8.5	93.5	8.5	93.5	8.5	93.5
5	15.83	102.8	19.66	98.58	20.5	93.5	18.79	89.04	15.46	86.14
10	23.03	114.5	31.66	104.7	32.5	93.5	28.26	85.09	21.82	80.24
15	29.3	129.4	44.55	111.9	44.5	93.5	37.02	81.58	27.6	75.45
20	33.66	147.7	58.46	120.5	56.5	93.5	45.12	78.45	32.84	71.52
25	34.54	169.6	73.44	130.6	68.5	93.5	52.65	75.64	37.59	68.26
30	29.86	194.4	89.45	142.9	80.5	93.5	59.66	73.1	41.9	65.54
35	17.77	220.2	106.5	157.6	92.5	93.5	66.2	70.81	45.82	63.24
40	-2.765	243.4	124.6	175.3	104.5	93.5	72.32	68.73	49.4	61.29
45	-30.62	260.2	143.4	196.8	116.5	93.5	78.05	66.83	52.67	59.62
50	-62.37	267.7	162.7	222.9	128.5	93.5	83.43	65.1	55.66	58.17



ภาพที่ 72 ผลของกระแสไหลคและความต้านทานฟอลต์ต่อค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น กรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C)

ตารางที่ 39 ผลของกระแสโหลดและความต้านทานฟอลต์ต่อค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น กรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)

Rf	delta = -60		delta = -30		delta = 0		delta = 30		delta = 60	
	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X
0.000001	8.5	93.5	8.5	93.5	8.5	93.5	8.5	93.5	8.5	93.5
5	17.26	104.9	21.96	99.79	22.9	93.5	20.74	88.21	16.78	84.86
10	25.6	120.1	36.68	107.5	37.3	93.5	31.85	83.64	24.2	78.2
15	32.19	139.9	52.77	116.9	51.7	93.5	41.95	79.66	30.8	73
20	34.72	164.9	70.33	128.5	66.1	93.5	51.19	76.18	36.68	68.86
25	29.95	194.3	89.43	142.9	80.5	93.5	59.66	73.1	41.9	65.54
30	14.45	225	110	160.9	94.9	93.5	67.46	70.38	46.57	62.82
35	-13.09	251.1	132	183.4	109.3	93.5	74.66	67.95	50.74	60.59
40	-49.43	265.9	154.9	211.8	123.7	93.5	81.32	65.77	54.49	58.73
45	-87.43	266.6	177.9	247.6	138.1	93.5	87.51	63.82	57.88	57.16
50	-120.2	255.5	199.2	292.6	152.5	93.5	93.27	62.05	60.95	55.83



ภาพที่ 73 ผลของกระแสโหลดและความต้านทานฟอลต์ต่อค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น กรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G)

3. กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมฆะที่เกิดฟอลต์สำหรับเงื่อนไขฟอลต์ และระบบไฟฟ้าแบบต่างๆ

3.1 ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย

3.1.1 กรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) จากภาพที่ 74 ถึง 78 รีเลย์ระยะทางแบบโมฆะที่มีการโปลาไลซ์ข้าม (แบบไม่ใช้หน่วยความจำ) มีกราฟคุณลักษณะการทำงานเหมือนกันกับรีเลย์ระยะทางแบบโมฆะที่มีการโปลาไลซ์ด้วยตัวมันเอง (แบบไม่ใช้หน่วยความจำ) คือเป็นวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางอยู่บนแนวเส้นตรง \overline{IZ} ส่วนของเส้นรอบวงผ่านจุดกำเนิด ขนาดของวงกลมเล็กลงเมื่อตำแหน่งของฟอลต์อยู่ไกลจากรีเลย์มากขึ้น เมื่อ R_f เพิ่มขึ้น วงกลมจะมีขนาดเล็กลงและหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกาโดยมีจุดหมุนอยู่ที่จุดกำเนิด จุดปลายของ \overline{V} จะเคลื่อนออกจากวงกลม ทำให้ \overline{S}_1 และ \overline{S}_2 ทำมุมน้อยกว่า 90°

รีเลย์ระยะทางแบบโมฆะที่มีการโปลาไลซ์ด้วยตัวมันเองแบบใช้หน่วยความจำ มีกราฟคุณลักษณะการทำงานเหมือนกันกับ รีเลย์ระยะทางแบบโมฆะที่มีการโปลาไลซ์ข้ามแบบใช้หน่วยความจำ คือเป็นวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางอยู่บนแนวเส้นตรงที่ลากจากจุด $-\overline{IZ}_s$ ถึงจุด \overline{IZ} ขนาดของวงกลมเล็กลงเมื่อตำแหน่งของฟอลต์อยู่ไกลจากรีเลย์มากขึ้น เมื่อ R_f เพิ่มขึ้น วงกลมมีขนาดเล็กลงและหมุนรอบตัวมันเองในทิศทวนเข็มนาฬิกา จุดปลายของ \overline{V} จะเคลื่อนออกจากวงกลม ทำให้ \overline{S}_1 และ \overline{S}_2 ทำมุมน้อยกว่า 90°

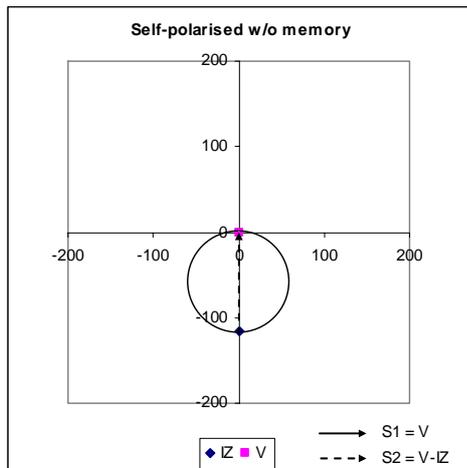
จากภาพที่ 78 เมื่อเกิดฟอลต์ด้านหลังรีเลย์ จุดปลายของ \overline{V} อยู่นอกวงกลมทำให้ \overline{S}_1 และ \overline{S}_2 ทำมุมน้อยกว่า 90° ไม่ว่าฟอลต์จะอยู่ที่ตำแหน่งใด ๆ ทางด้านหลังรีเลย์ จุดปลายของ \overline{V} อยู่นอกวงกลมเสมอ

3.1.2 กรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C) จากภาพที่ 79 ถึง 83 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ต่างกับกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) ตรงที่รีเลย์ระยะทางแบบโมฆะที่มีการโปลาไลซ์ข้ามแบบไม่ใช้หน่วยความจำ จะมีลักษณะการทำงานเหมือนกันกับ รีเลย์ระยะทางแบบโมฆะที่มีการโปลาไลซ์ข้ามแบบใช้หน่วยความจำและรีเลย์ระยะทางแบบโมฆะที่มีการโปลาไลซ์ด้วยตัวมันเองแบบใช้หน่วยความจำ

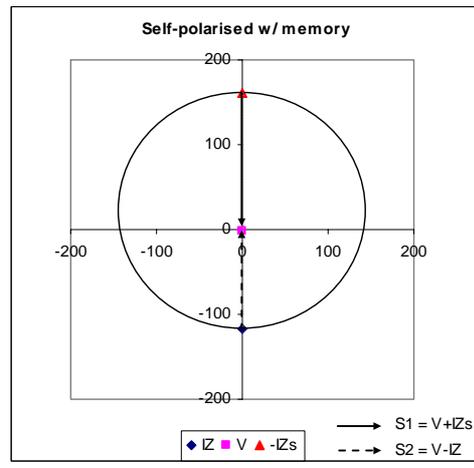
3.1.3 กรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G) จากภาพที่ 84 ถึง 88 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์เหมือนกันกับกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C)

ตารางที่ 40 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 0.000001$)

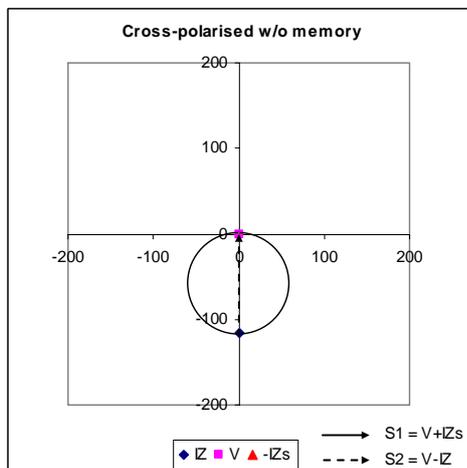
ระยะฟอลต์ (y)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay BC							
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem	
			R	X	R	X	R	X	R	X
0.01	0.000001	Iz V -Izs	0.0065 0.0004	-116.5000 -1.4560	0.0036 0.0005 -0.0049	-116.5000 -1.4560 160.2000	0.0038 0.0005	-116.5000 -1.4560	0.0038 0.0005 -0.0052	-116.5000 -1.4560 160.2000



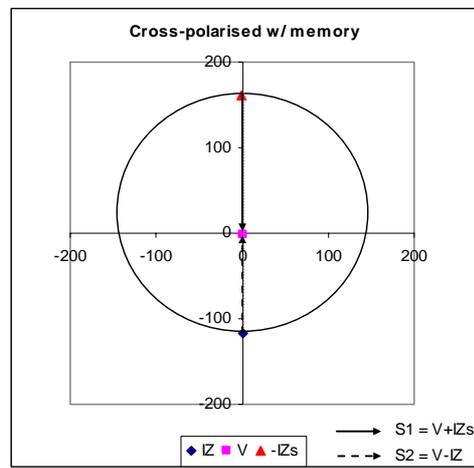
74 (ก)



74 (ข)



74 (ค)

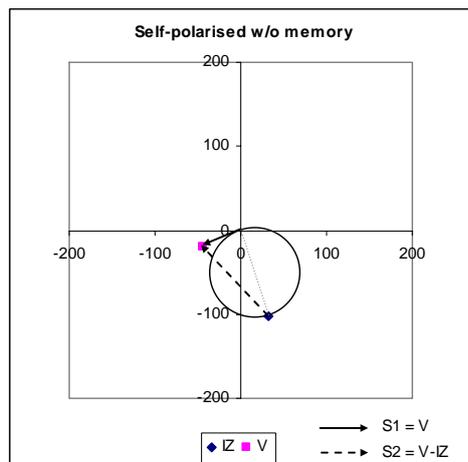


74 (ง)

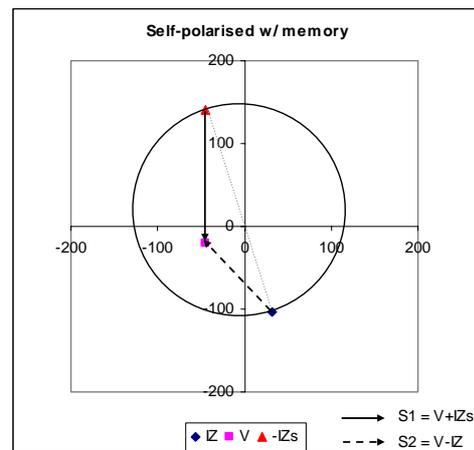
ภาพที่ 74 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 0.000001$)

ตารางที่ 41 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1
แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 40$)

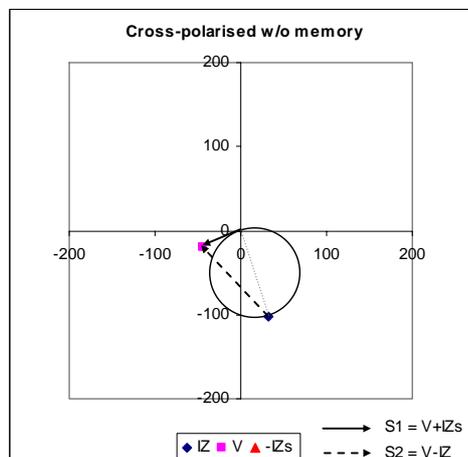
ระยะฟอลต์ (y)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay BC									
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem			
			R	X	R	X	R	X	R	X		
0.01	40	Iz V -Izs	32.4700 -44.6500	-102.9000 -20.1400	32.4700 -44.6500	-102.9000 -20.1400	32.4700 -44.6500	-102.9000 -20.1400	32.4700 -44.6500	-102.9000 -20.1400	32.4700 -44.6400	-102.9000 141.5000



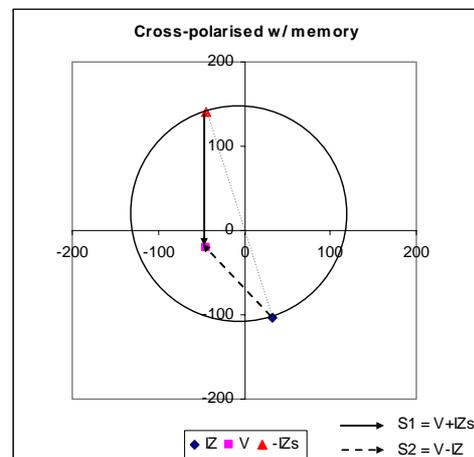
75 (ก)



75 (ข)



75 (ค)

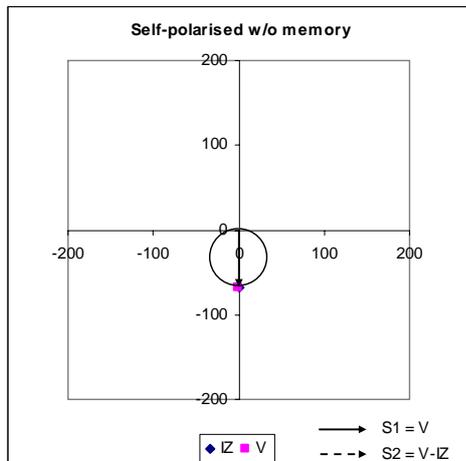


75 (ง)

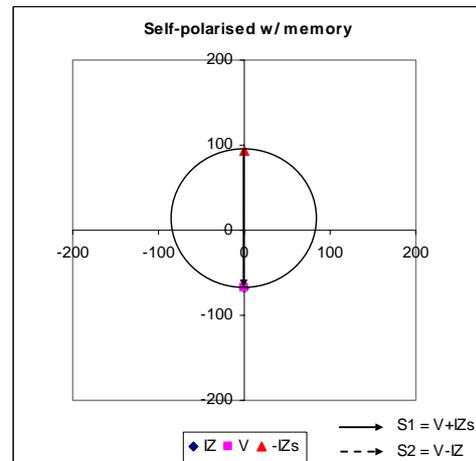
ภาพที่ 75 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้า
รีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 40$)

ตารางที่ 42 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1
แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 0.000001$)

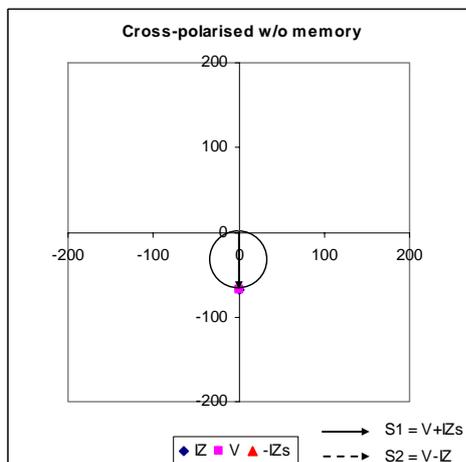
ระยะฟอลต์ (y)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay BC							
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem	
			R	X	R	X	R	X	R	X
0.8	0.000001	Iz V -Izs	0.0992 -0.0394	-68.0200 -68.0500	0.0844 0.0068 -0.1161	-67.9800 -68.0900 93.4700	0.0757 0.0072	-67.9700 -68.0500	0.0757 0.0072	-67.9700 -68.0500



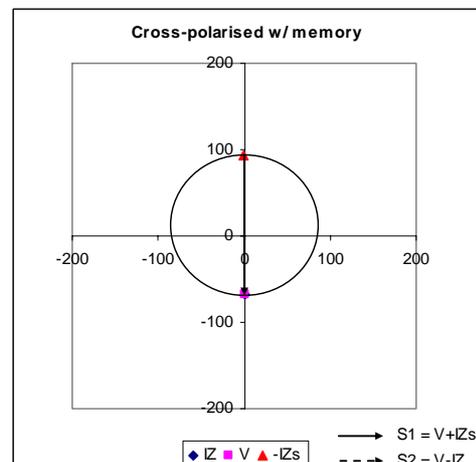
76 (ก)



76 (ข)



76 (ค)

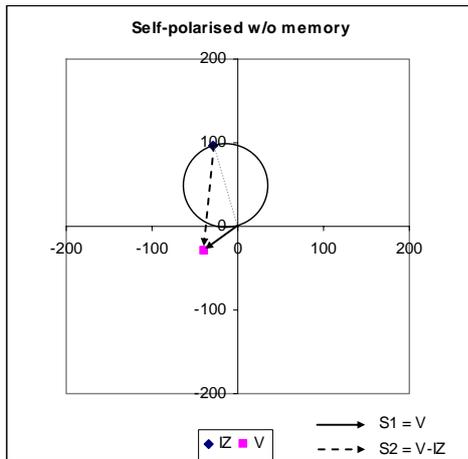


76 (ง)

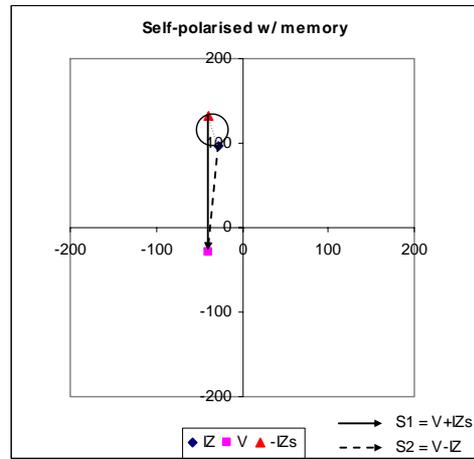
ภาพที่ 76 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้า
รีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 0.000001$)

ตารางที่ 44 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($1-x=0.1, R_f=40$)

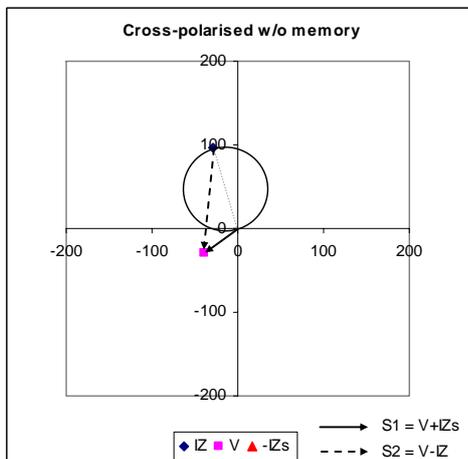
ระยะฟอลต์ (1-x)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay BC							
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem	
			R	X	R	X	R	X	R	X
0.1	40	IZ V -IZs	-28.2600 -38.8600	96.6100 -28.7800	-28.2600 -38.8600	96.6200 -28.7800	-28.2600 -38.8600	96.6100 -28.7800	-28.2600 -38.8600	96.6200 -28.7800



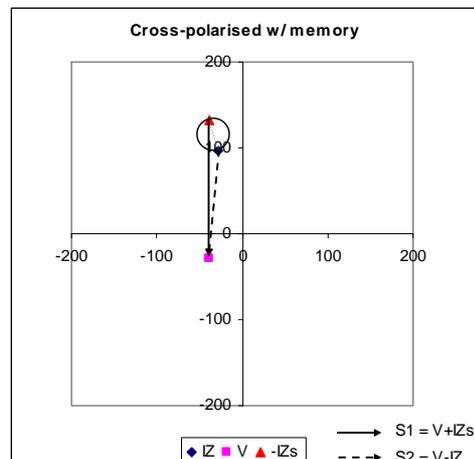
78 (ก)



78 (ข)



78 (ค)

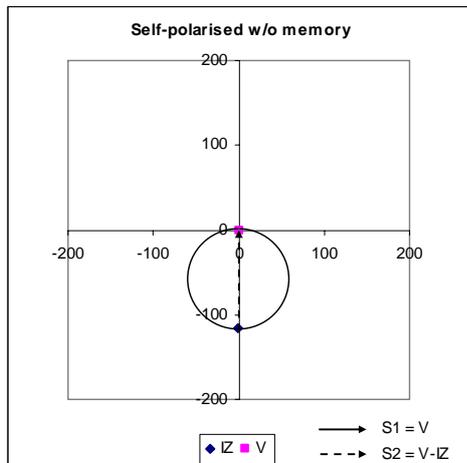


78 (ง)

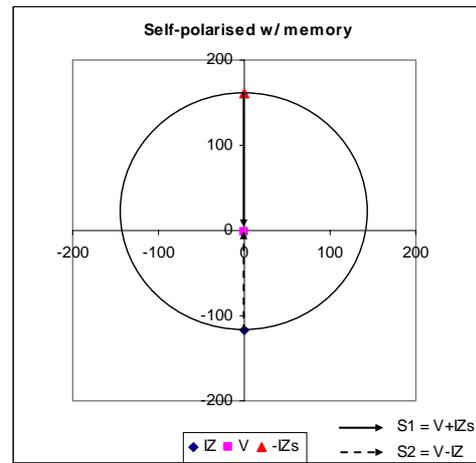
ภาพที่ 78 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($1-x=0.1, R_f=40$)

ตารางที่ 45 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 0.000001$)

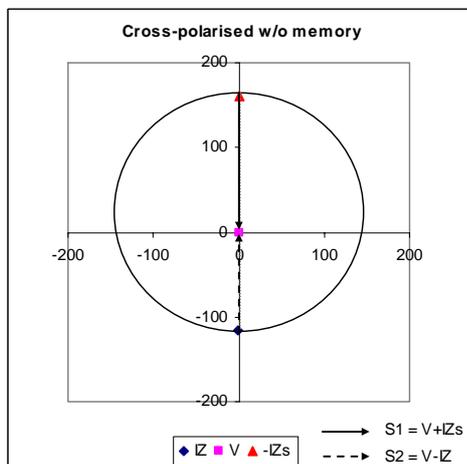
ระยะฟอลต์ (y)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay BC							
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem	
			R	X	R	X	R	X	R	X
0.01	0.000001	Iz V -Izs	-0.0011 0.0000	-116.5000 -1.4560	-0.0042 0.0001 0.0058	-116.5000 -1.4560 160.2000	-0.0017 0.0000 0.0024	-116.5000 -1.4560 160.2000	-0.0017 0.0000 0.0024	-116.5000 -1.4560 160.2000



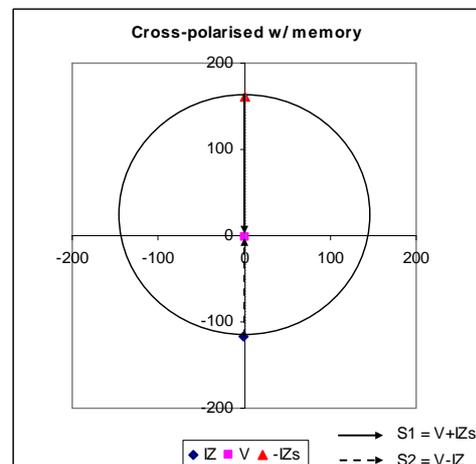
79 (ก)



79 (ข)



79 (ค)

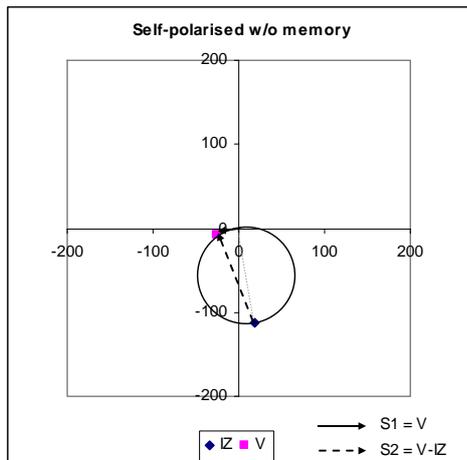


79 (ง)

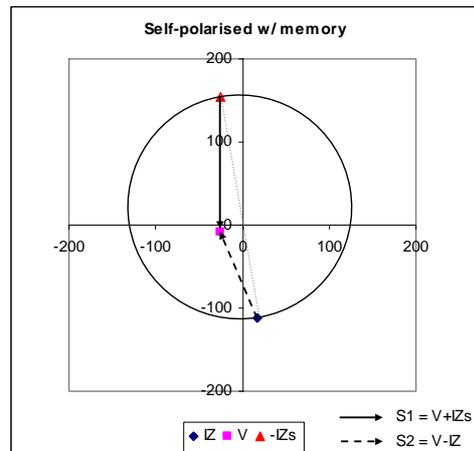
ภาพที่ 79 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 0.000001$)

ตารางที่ 46 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 40$)

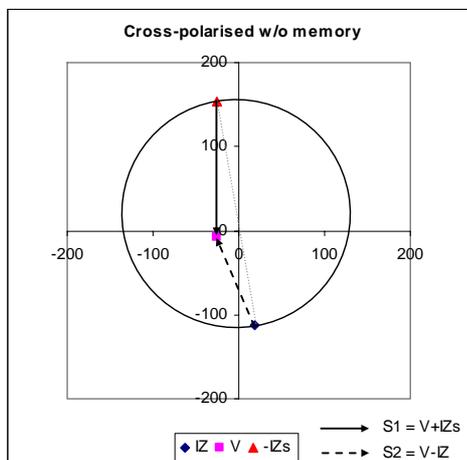
ระยะฟอลต์ (y)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay BC							
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem	
			R	X	R	X	R	X	R	X
0.01	40	Iz V -Izs	17.9100 -24.6400	-111.9000 -7.7310	17.9100 -24.6400 -24.6300	-111.9000 -7.7310 153.9000	17.9100 -24.6400 -24.6300	-111.9000 -7.7310 153.9000	17.9100 -24.6400 -24.6300	-111.9000 -7.7310 153.9000



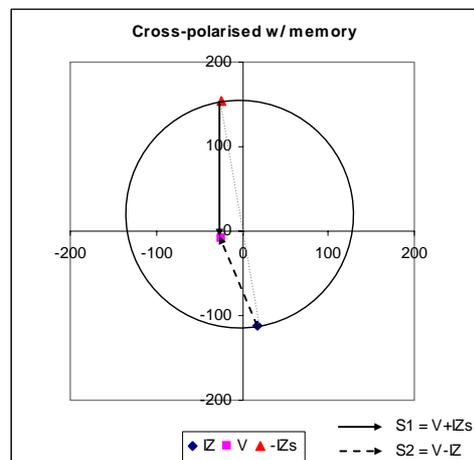
80 (ก)



80 (ข)



80 (ค)

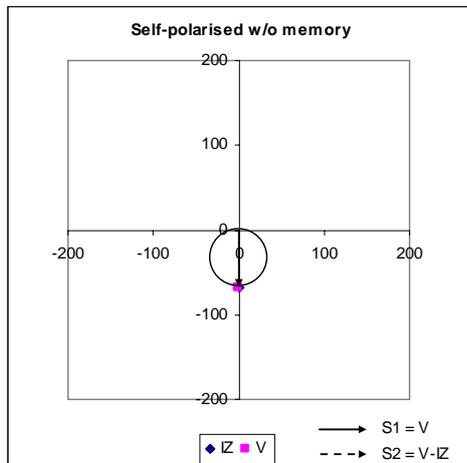


80 (ง)

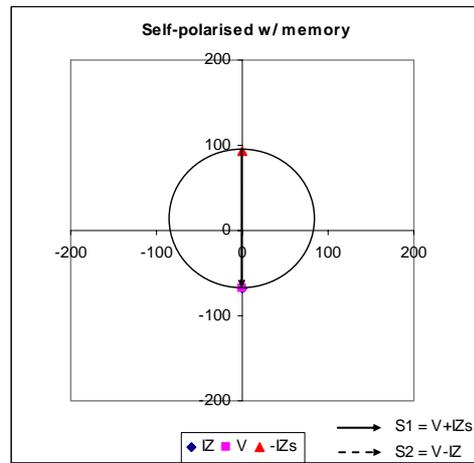
ภาพที่ 80 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 40$)

ตารางที่ 47 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 0.000001$)

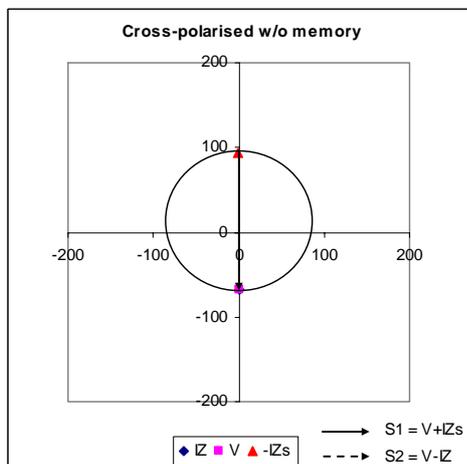
ระยะฟอลต์ (y)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay BC							
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem	
			R	X	R	X	R	X	R	X
0.8	0.000001	Iz V -Izs	0.0267 -0.0244	-68.0700 -68.0300	0.0048 -0.0010 -0.0066	-68.0500 -68.0500 93.5700	0.0302 0.0090 -0.0415	-68.0500 -68.0800 93.5700	0.0302 0.0090 -0.0415	-68.0500 -68.0800 93.5700



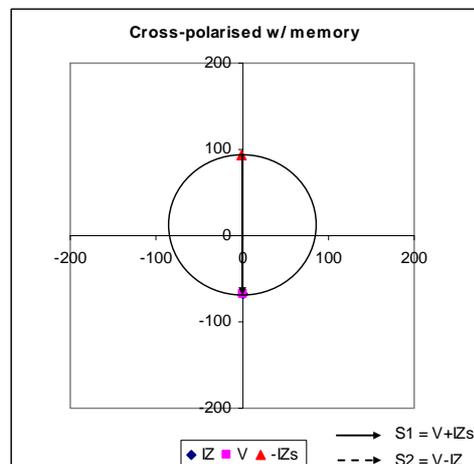
81 (ก)



81 (ข)



81 (ค)

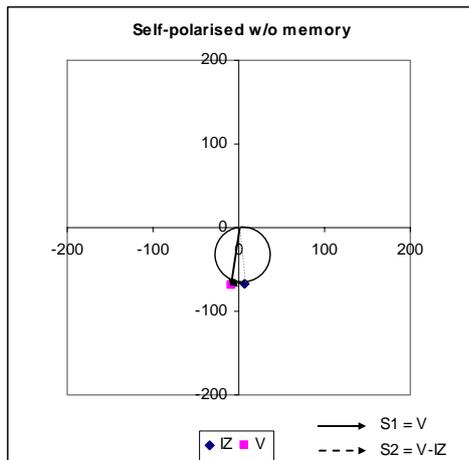


81 (ง)

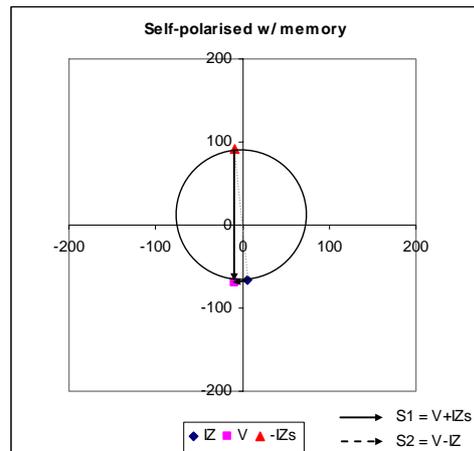
ภาพที่ 81 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 0.000001$)

ตารางที่ 48 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 40$)

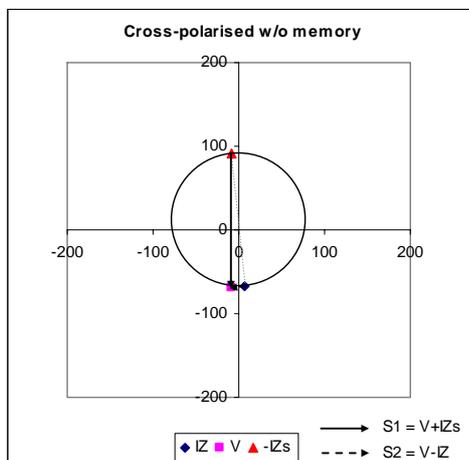
ระยะฟอลต์ (y)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay BC							
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem	
			R	X	R	X	R	X	R	X
0.8	40	Iz V -Izs	6.2900 -8.6500	-66.8800 -69.6700	6.2910 -8.6500	-66.8800 -69.6700	6.2920 -8.6230	-66.8900 -69.6600	6.2920 -8.6230	-66.8900 -69.6600



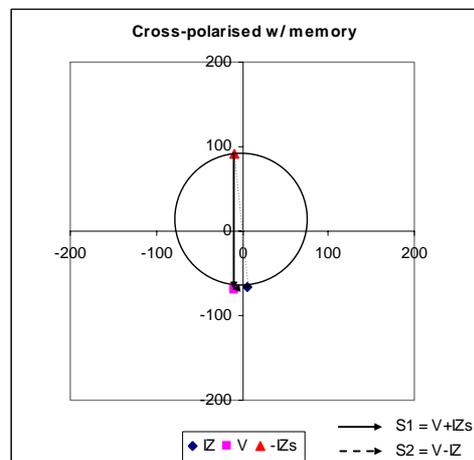
82 (ก)



82 (ข)



82 (ค)

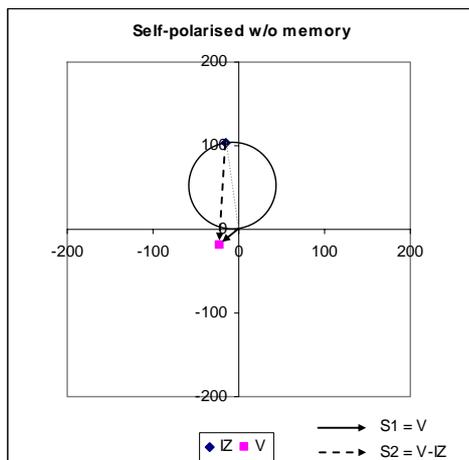


82 (ง)

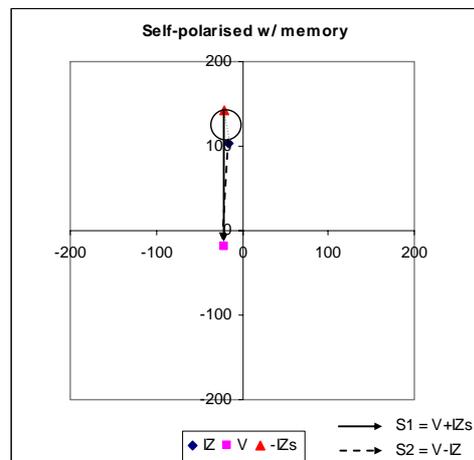
ภาพที่ 82 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 40$)

ตารางที่ 49 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($I-x=0.1, R_f=40$)

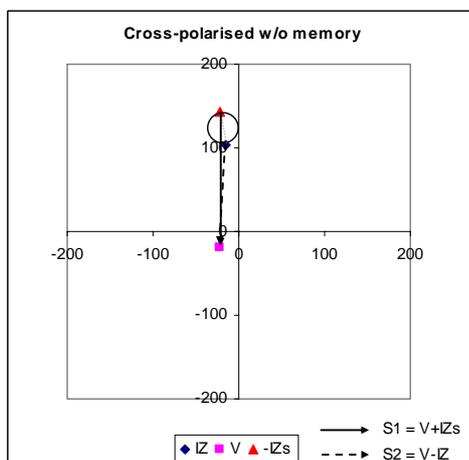
ระยะฟอลต์ (1-x)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay BC							
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem	
			R	X	R	X	R	X	R	X
0.1	40	Iz V -Izs	-15.4200 -21.2000	104.0000 -18.6100	-15.4200 -21.2000	104.0000 -18.6100	-15.4200 -21.2000	104.0000 -18.6100	-15.4200 -21.2000	104.0000 -18.6100



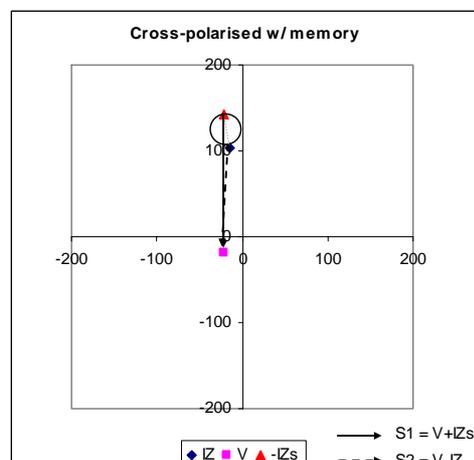
83 (ก)



83 (ข)



83 (ค)

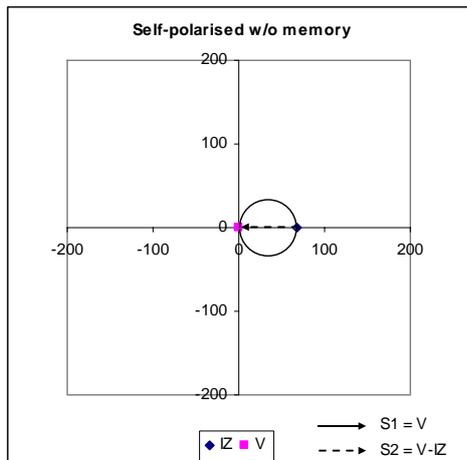


83 (ง)

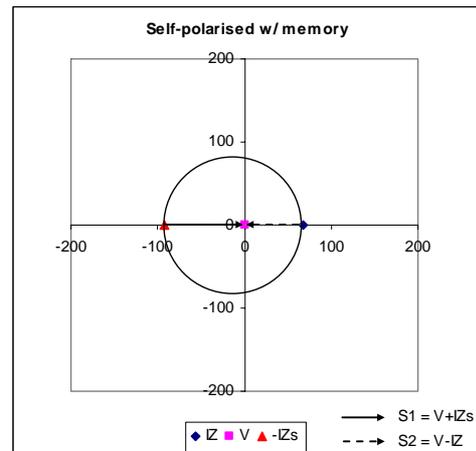
ภาพที่ 83 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($I-x=0.1, R_f=40$)

ตารางที่ 50 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบ
ไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 0.000001$)

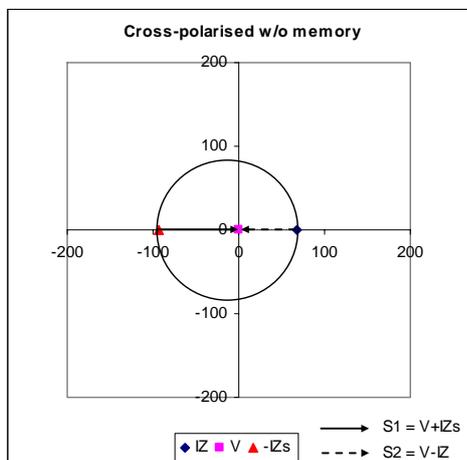
ระยะฟอลต์ (y)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay A							
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem	
			R	X	R	X	R	X	R	X
0.01	0.000001	Iz V -Izs	67.2600 0.8404	-0.0448 -0.0004	67.2500 0.8409 -92.4600	-0.0369 -0.0003 0.0507	67.2500 0.8406 -92.4700	-0.0534 0.0000 0.0734	67.2500 0.8409 -92.4600	-0.0369 -0.0003 0.0507



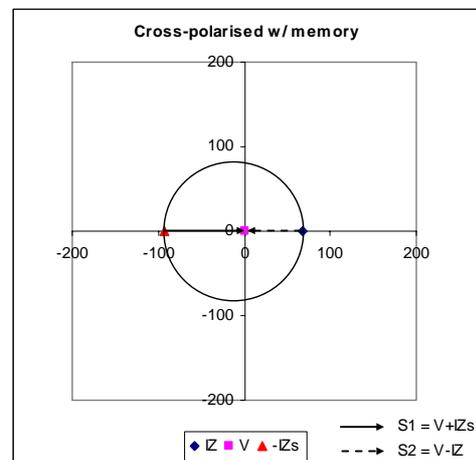
84 (ก)



84 (ข)



84 (ค)

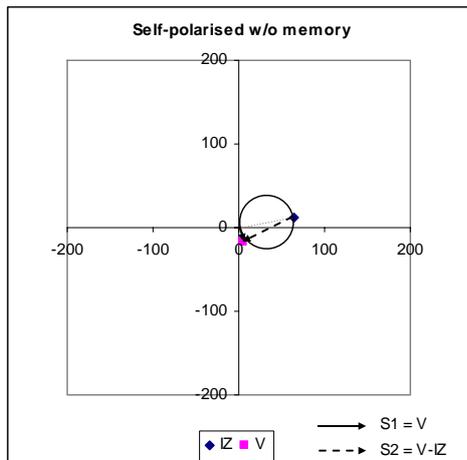


84 (ง)

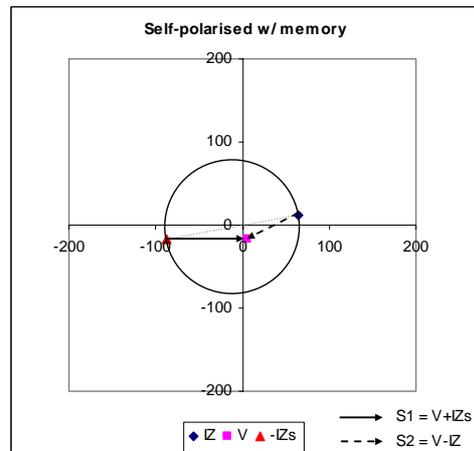
ภาพที่ 84 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน
ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 0.000001$)

ตารางที่ 51 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 40$)

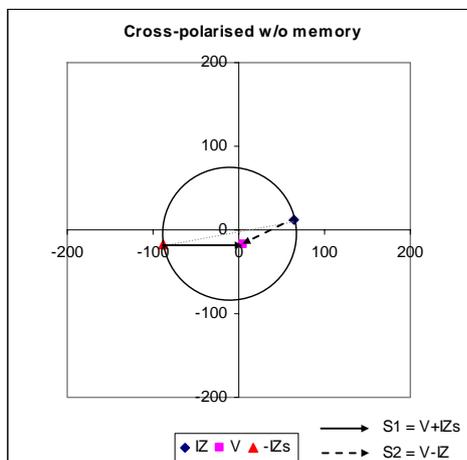
ระยะฟอลต์ (y)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay A							
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem	
			R	X	R	X	R	X	R	X
0.01	40	Iz V -Izs	63.7400 5.6700	12.2100 -16.7900	63.7400 5.6700 -87.6500	12.2100 -16.7900 -16.7900	63.7400 5.6700 -87.6500	12.2100 -16.7900 -16.7900	63.7400 5.6690 -87.6500	12.2100 -16.7900 -16.7900



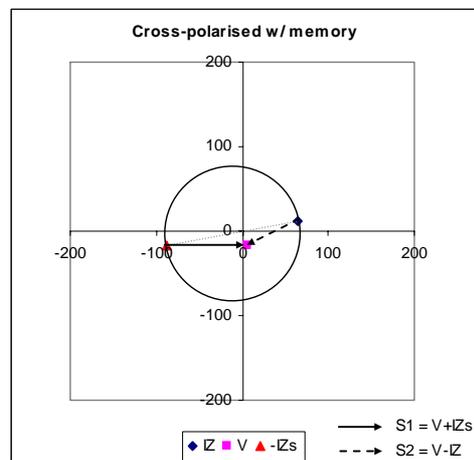
85 (ก)



85 (ข)



85 (ค)

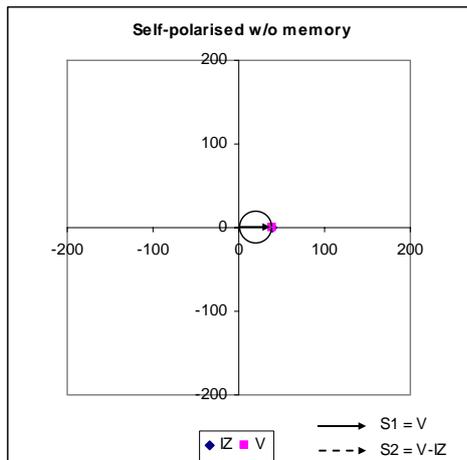


85 (ง)

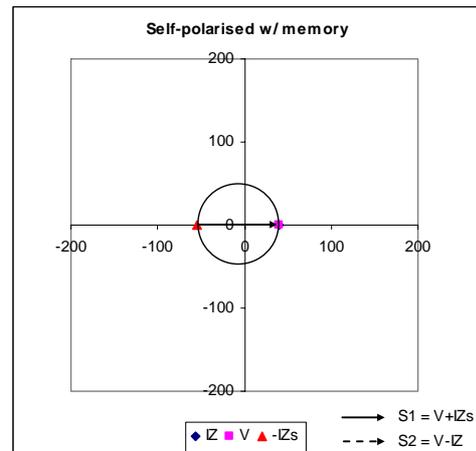
ภาพที่ 85 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 40$)

ตารางที่ 52 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 0.000001$)

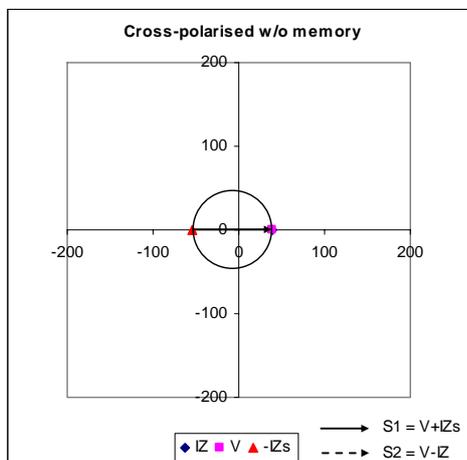
ระยะฟอลต์ (y)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay A							
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem	
			R	X	R	X	R	X	R	X
0.8	0.000001	Iz V -Izs	39.2800 39.3000	-0.0243 -0.0055	39.2900 39.2900 -54.0200	-0.0229 -0.0083 0.0315	39.2900 39.2800 -54.0300	-0.0156 -0.0016 0.0214	39.2900 39.2800 -54.0200	-0.0132 0.0026 0.0181



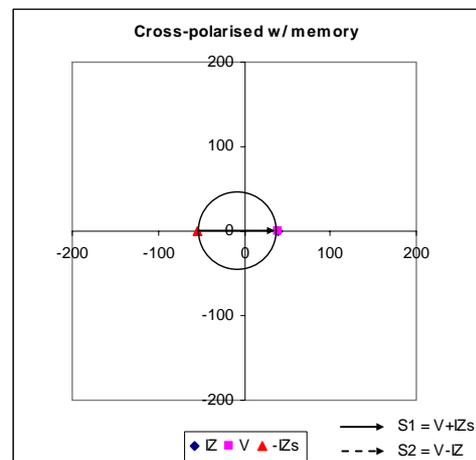
86 (ก)



86 (ข)



86 (ค)

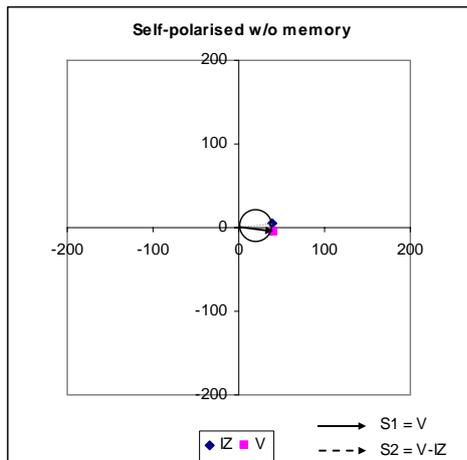


86 (ง)

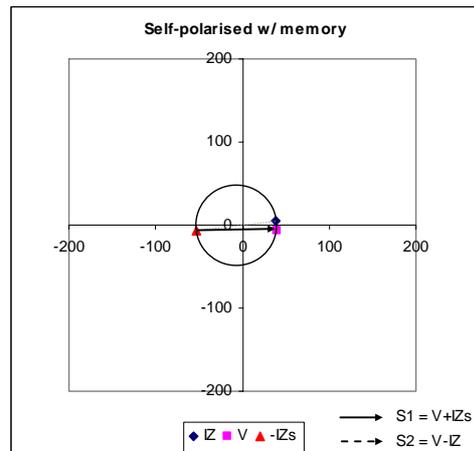
ภาพที่ 86 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 0.000001$)

ตารางที่ 53 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 40$)

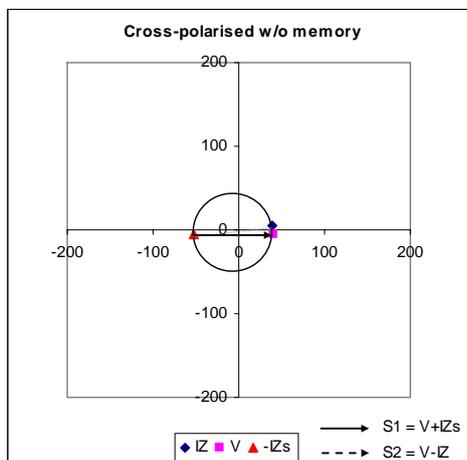
ระยะฟอลต์ (y)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay A							
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem	
			R	X	R	X	R	X	R	X
0.8	40	Iz V -Izs	38.4000 40.5200	4.3290 -5.9530	38.4000 40.5200 -52.8000	4.3290 -5.9530 -5.9530	38.4000 40.5200 -52.8000	4.3290 -5.9520 -5.9520	38.4000 40.5200 -52.8000	4.3290 -5.9530 -5.9530



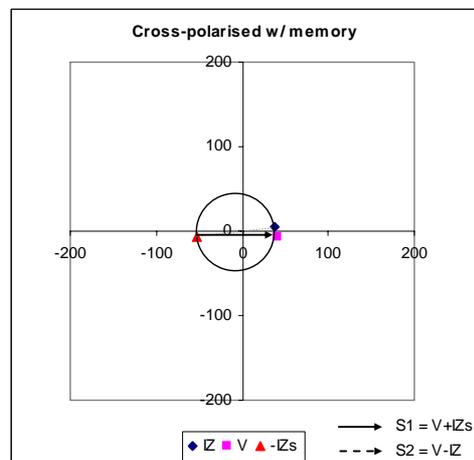
87 (ก)



87 (ข)



87 (ค)

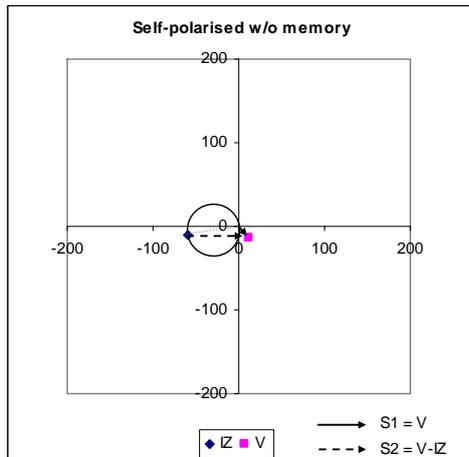


87 (ง)

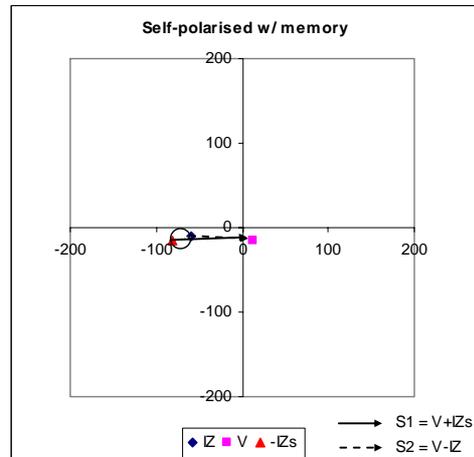
ภาพที่ 87 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 40$)

ตารางที่ 54 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($I-x=0.1, R_f=40$)

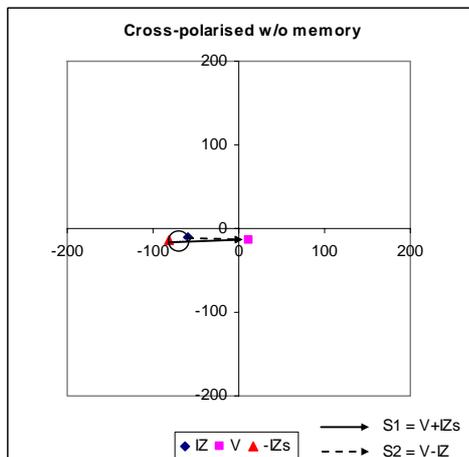
ระยะฟอลต์ (1-x)	Rf (โอห์ม Pri)	Element	Relay A							
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem	
			R	X	R	X	R	X	R	X
0.1	40	IZ V -IZs	-59.3400 11.7300	-10.5300 -14.4700	-59.3400 11.7300	-10.5300 -14.4700	-59.3400 11.7300	-10.5300 -14.4700	-59.3400 11.7300	-10.5300 -14.4700
			-81.5900	-14.4800	-81.5900	-14.4800	-81.5900	-14.4800	-81.5900	-14.4800



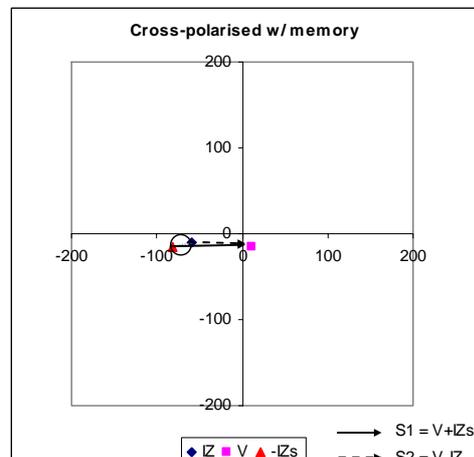
88 (ก)



88 (ข)



88 (ค)



88 (ง)

ภาพที่ 88 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหลังรีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 1 แหล่งจ่าย ($I-x=0.1, R_f=40$)

3.2 ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย

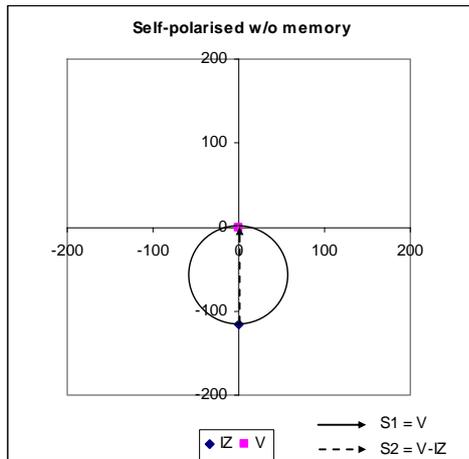
3.2.1 กรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) จากภาพที่ 89 ถึง 92 ผลที่ได้เหมือนกับ 3.1.1 ต่างกันตรงที่เมื่อ R_f มีค่าเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 90 และ 92) จุดปลายของ \bar{V} เคลื่อนออกจากวงกลมมากขึ้นกว่าเดิม ทำให้ \bar{S}_1 และ \bar{S}_2 ยิ่งทำมุมน้อยกว่าเดิมอีก

3.2.2 กรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส (B-C) จากภาพที่ 93 ถึง 96 ผลที่ได้เหมือนกับ 3.1.2 ต่างกันตรงที่เมื่อ R_f มีค่าเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 94 และ 96) จุดปลายของ \bar{V} เคลื่อนออกจากวงกลมมากขึ้นกว่าเดิม ทำให้ \bar{S}_1 และ \bar{S}_2 ยิ่งทำมุมน้อยกว่าเดิมอีก

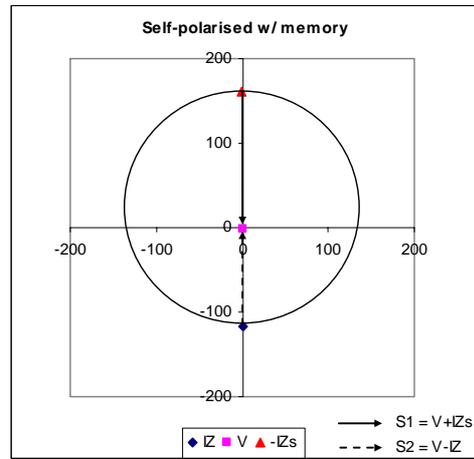
3.2.3 กรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (A-G) จากภาพที่ 97 ถึง 100 ผลที่ได้เหมือนกับ 3.1.3 ต่างกันตรงที่เมื่อ R_f มีค่าเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 98 และ 100) จุดปลายของ \bar{V} เคลื่อนออกจากวงกลมมากขึ้นกว่าเดิม ทำให้ \bar{S}_1 และ \bar{S}_2 ยิ่งทำมุมน้อยกว่าเดิมอีก

ตารางที่ 55 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 0.000001$)

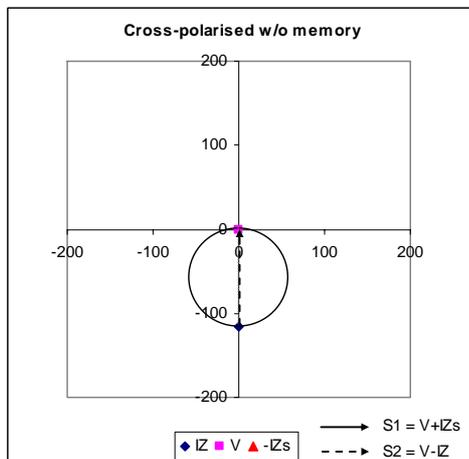
ระยะฟอลต์ (y)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay BC							
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem	
			R	X	R	X	R	X	R	X
0.01	0.000001	IZ V -IZs	0.0051 0.0006	-116.5000 -1.4560	0.0038 0.0005 -0.0052	-116.5000 -1.4560 160.2000	0.0064 0.0006	-116.5000 -1.4560	0.0038 0.0005 -0.0052	-116.5000 -1.4560 160.2000



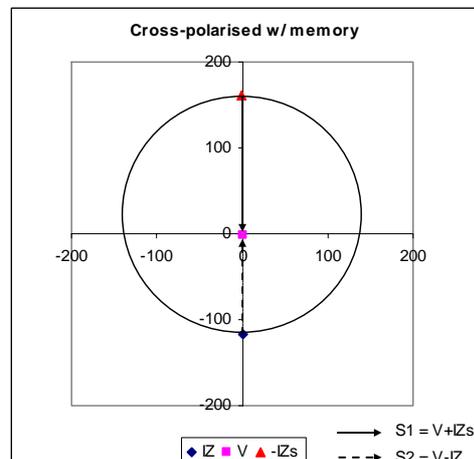
89 (ก)



89 (ข)



89 (ค)

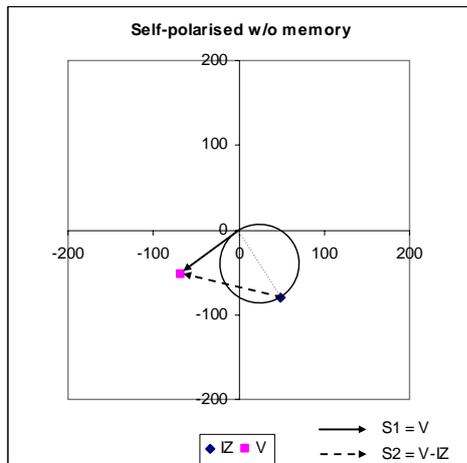


89 (ง)

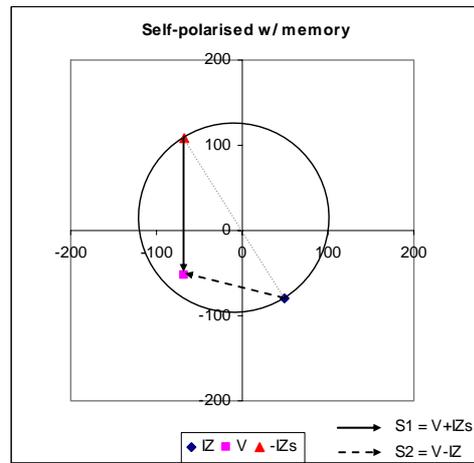
ภาพที่ 89 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 0.000001$)

ตารางที่ 56 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 40$)

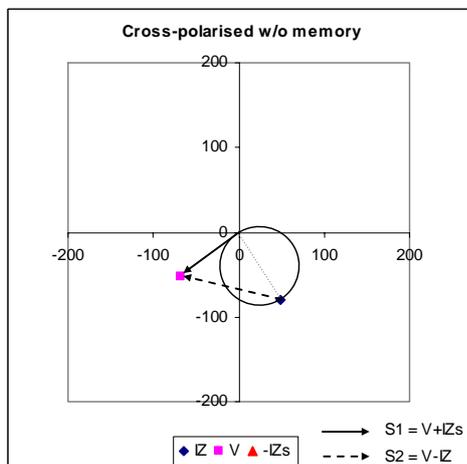
ระยะฟอลต์ (y)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay BC							
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem	
			R	X	R	X	R	X	R	X
0.01	40	IZ V -IZs	49.1900 -67.6400	-79.4900 -52.3300	49.1900 -67.6400	-79.4900 -52.3300	49.1900 -67.6400	-79.4900 -52.3300	49.1900 -67.6400	-79.4900 -52.3300
					-67.6400	109.3000				



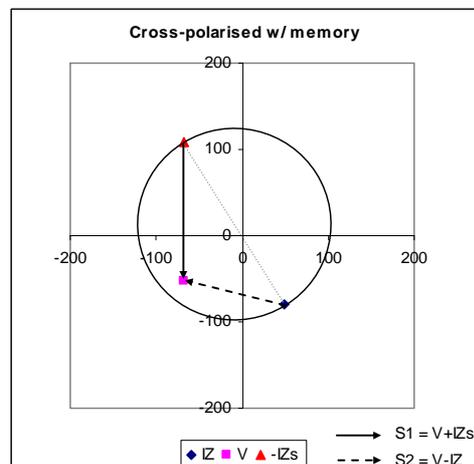
90 (ก)



90 (ข)



90 (ค)

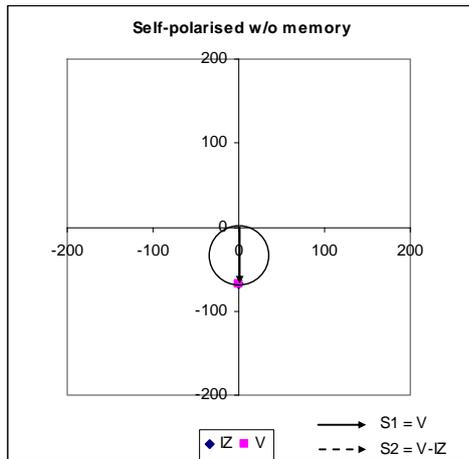


90 (ง)

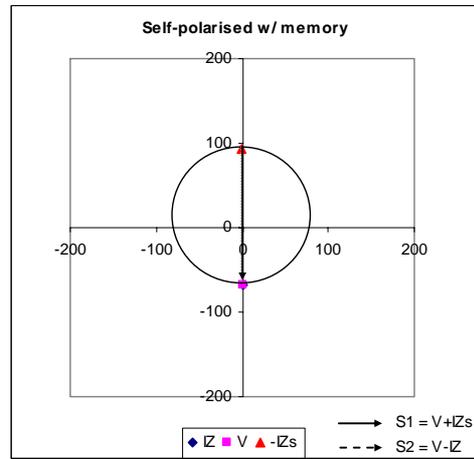
ภาพที่ 90 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 40$)

ตารางที่ 57 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 0.000001$)

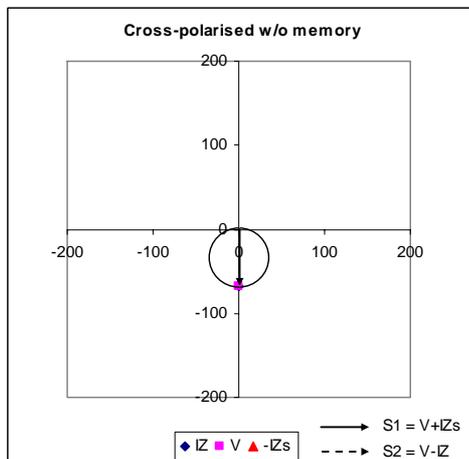
ระยะฟอลต์ (y)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay BC							
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem	
			R	X	R	X	R	X	R	X
0.8	0.000001	Iz V -Izs	0.0636 0.0211	-68.0300 -68.0200	0.0377 0.0186 -0.0518	-67.9800 -68.0600 93.4800	0.0451 0.0049	-67.9900 -68.0800	0.0729 -0.0073 -0.1003	-68.0200 -68.0300 93.5300



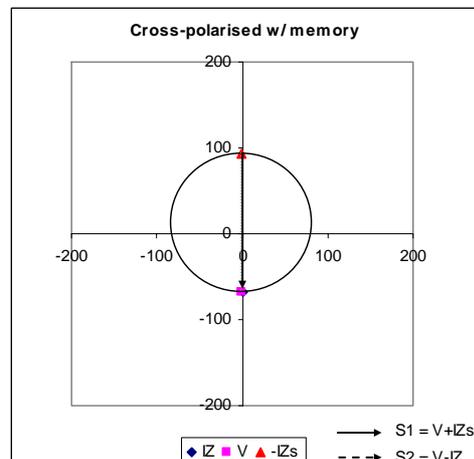
91 (ก)



91 (ข)



91 (ค)

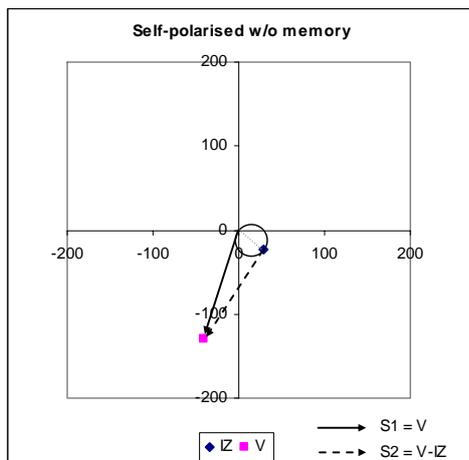


91 (ง)

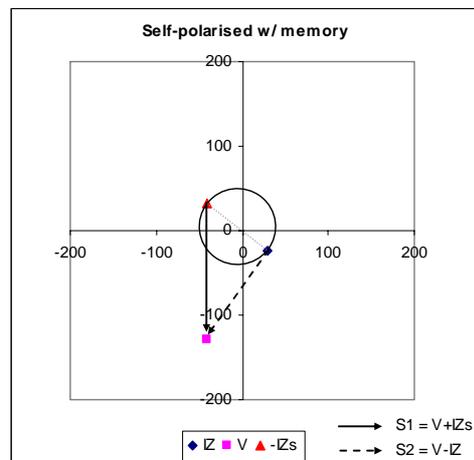
ภาพที่ 91 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 0.000001$)

ตารางที่ 58 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 40$)

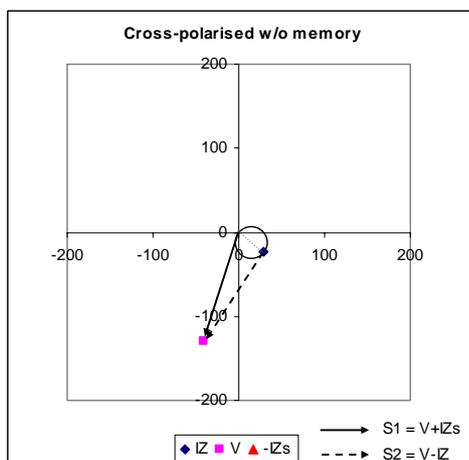
ระยะฟอลต์ (y)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay BC							
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem	
			R	X	R	X	R	X	R	X
0.8	40	IZ V -IZs	29.5400 -40.6100	-23.9100 -128.8000	29.5400 -40.6200	-23.9100 -128.8000 -40.6200 32.8700	29.5400 -40.6200	-23.9100 -128.8000	29.5400 -40.6200	-23.9100 -128.7000 -40.6200 32.8700



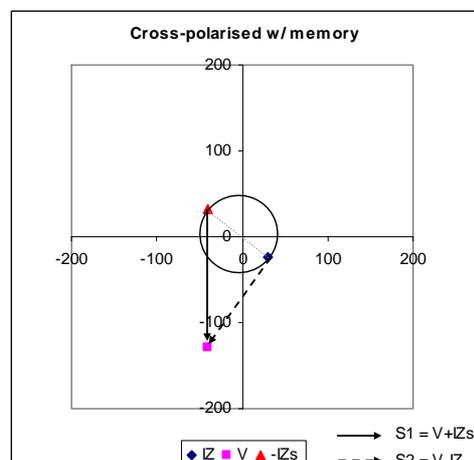
92 (ก)



92 (ข)



92 (ค)

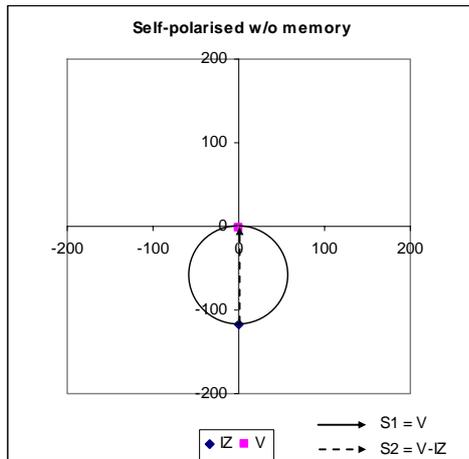


92 (ง)

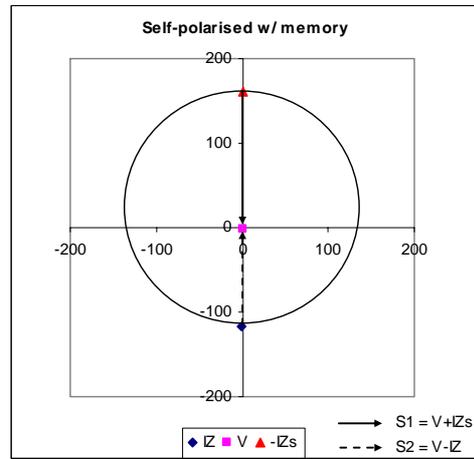
ภาพที่ 92 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 40$)

ตารางที่ 59 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 0.000001$)

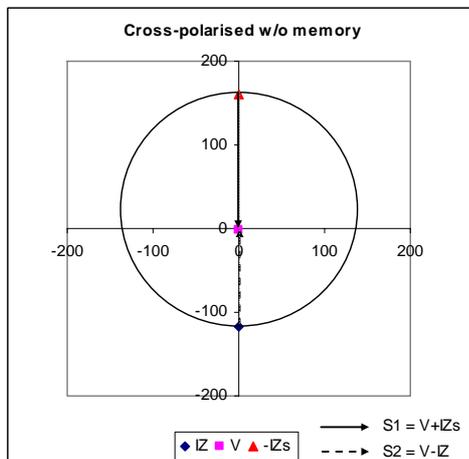
ระยะฟอลต์ (y)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay BC							
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem	
			R	X	R	X	R	X	R	X
0.01	0.000001	Iz V -Izs	-0.0018 0.0000	-116.5000 -1.4560	-0.0043 0.0001 0.0059	-116.5000 -1.4560 160.2000	-0.0031 0.0000 0.0043	-116.5000 -1.4560 160.2000	0.0475 -0.0005 -0.0653	-116.5000 -1.4560 160.1000



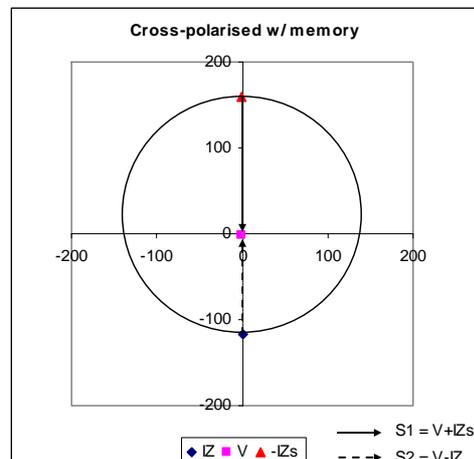
93 (ก)



93 (ข)



93 (ค)

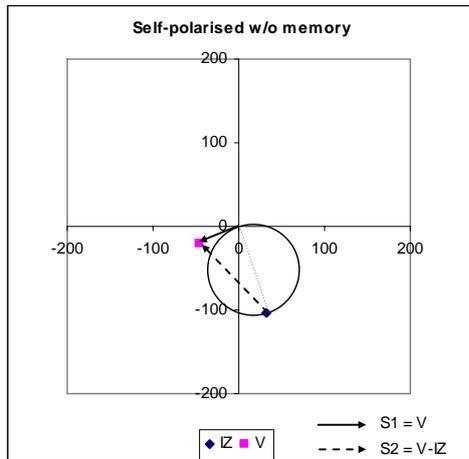


93 (ง)

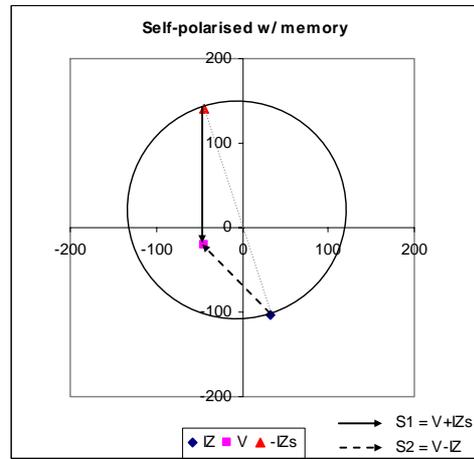
ภาพที่ 93 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 0.000001$)

ตารางที่ 60 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 40$)

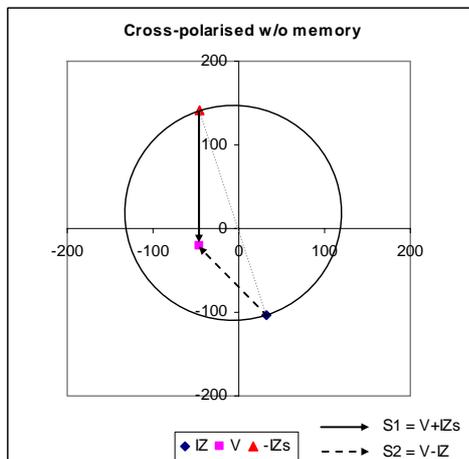
ระยะฟอลต์ (y)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay BC							
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem	
			R	X	R	X	R	X	R	X
0.01	40	Iz V -Izs	32.7000 -44.9600	-102.7000 -20.4100	32.7000 -44.9600	-102.7000 -20.4100	32.7000 -44.9600	-102.7000 -20.4100	32.7000 -44.9600	-102.7000 -20.4100



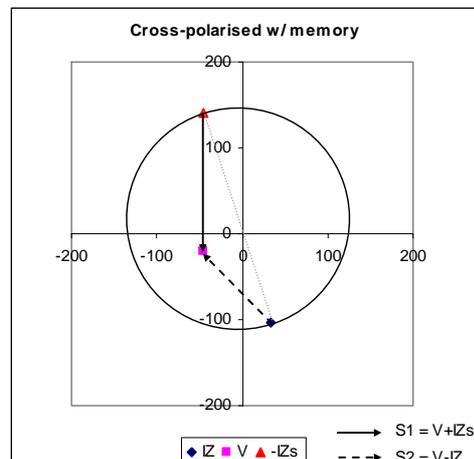
94 (ก)



94 (ข)



94 (ค)

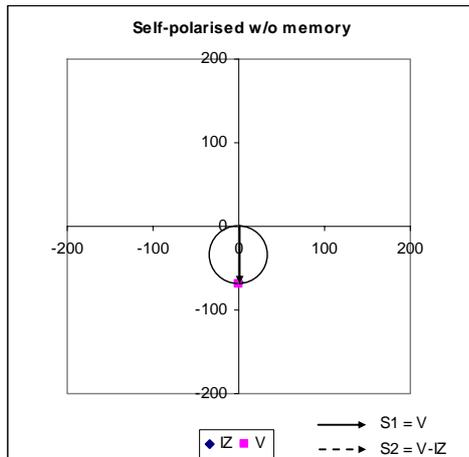


94 (ง)

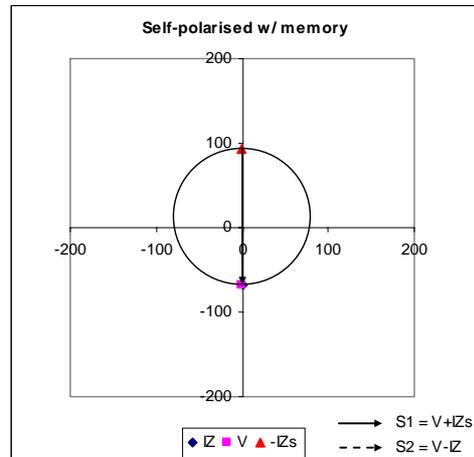
ภาพที่ 94 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 40$)

ตารางที่ 61 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 0.000001$)

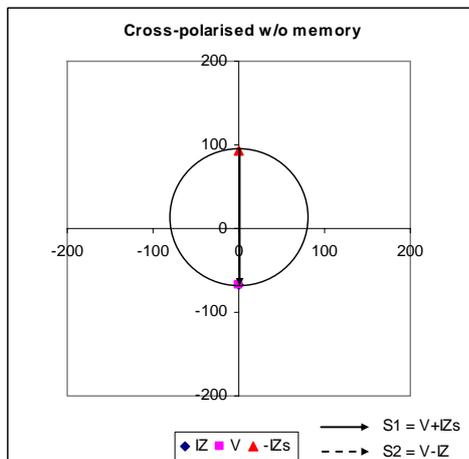
ระยะฟอลต์ (y)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay BC							
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem	
			R	X	R	X	R	X	R	X
0.8	0.000001	Iz V -Izs	0.0727 -0.0403	-68.0300 -68.1200	0.0654 -0.0004 -0.0899	-68.1300 -68.0600 93.6800	0.1177 0.0399 -0.1619	-68.0200 -68.0100 93.5200	0.1213 -0.0294 -0.1668	-68.0800 -68.0600 93.6000



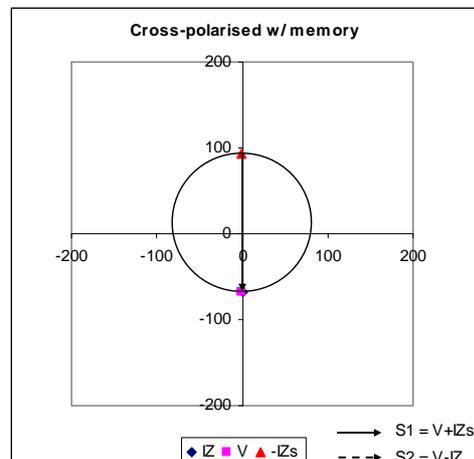
95 (ก)



95 (ข)



95 (ค)

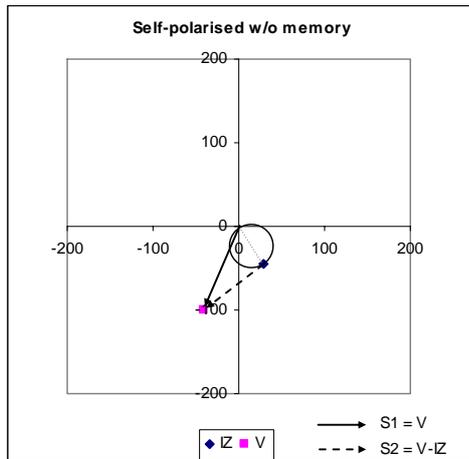


95 (ง)

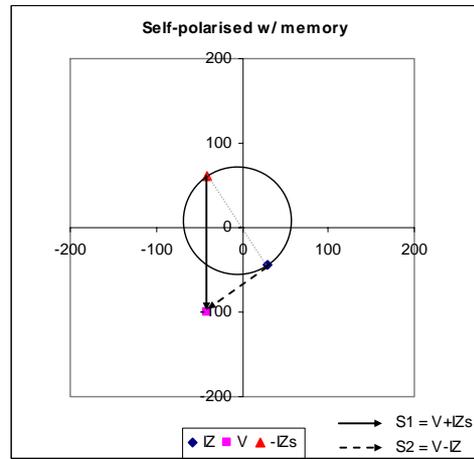
ภาพที่ 95 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 0.000001$)

ตารางที่ 62 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 40$)

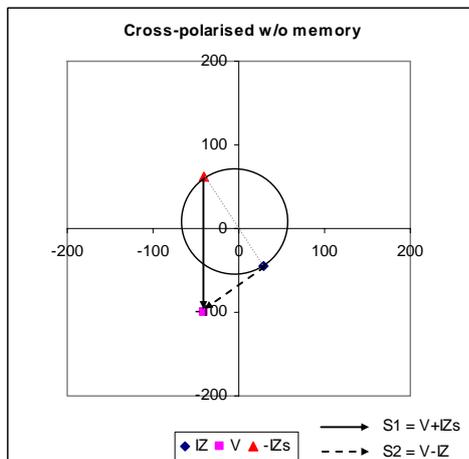
ระยะฟอลต์ (y)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay BC									
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem			
			R	X	R	X	R	X	R	X		
0.8	40	Iz V -Izs	29.3300 -40.3300	-44.8000 -100.0000	29.3300 -40.3200	-44.8000 -100.0000 -40.3200	29.3300 -40.3200	-44.8000 -100.0000 61.6100	29.3300 -40.3200	-44.8000 -100.0000 61.6100	29.3300 -40.3300	-44.8000 -100.0000 61.6100



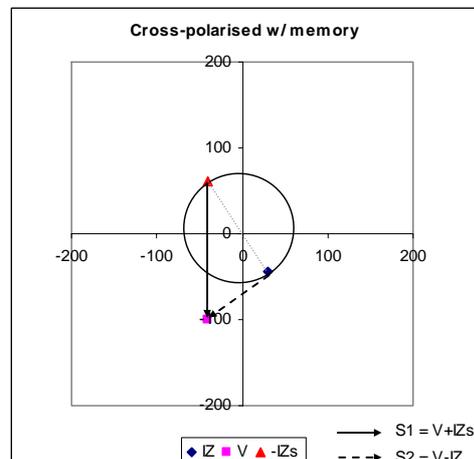
96 (ก)



96 (ข)



96 (ค)

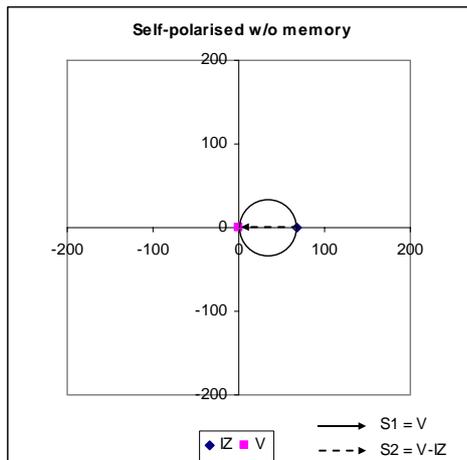


96 (ง)

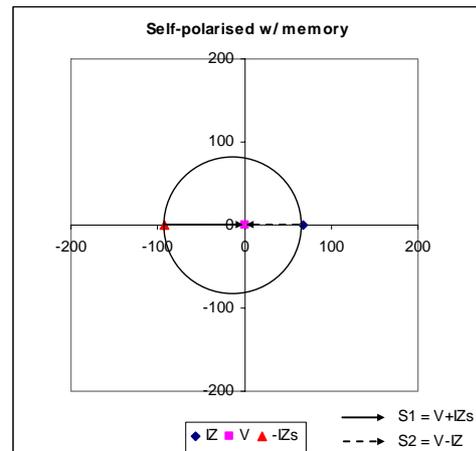
ภาพที่ 96 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 2 เฟส ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 40$)

ตารางที่ 63 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบ
ไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 0.000001$)

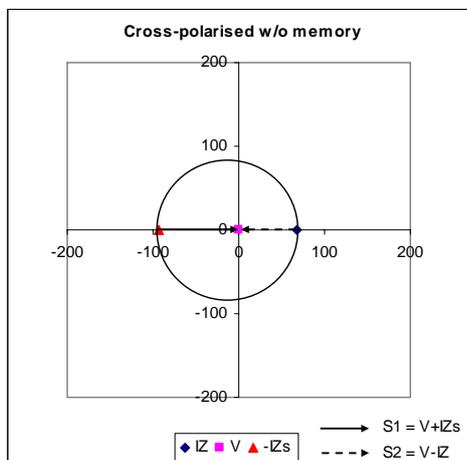
ระยะฟอลต์ (y)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay A							
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem	
			R	X	R	X	R	X	R	X
0.01	0.000001	Iz V -Izs	67.2600 0.8404	-0.0439 -0.0004	67.2500 0.8408	-0.0357 -0.0003	67.2600 0.8404	-0.0439 -0.0004	67.2800 0.8402	-0.0346 -0.0006



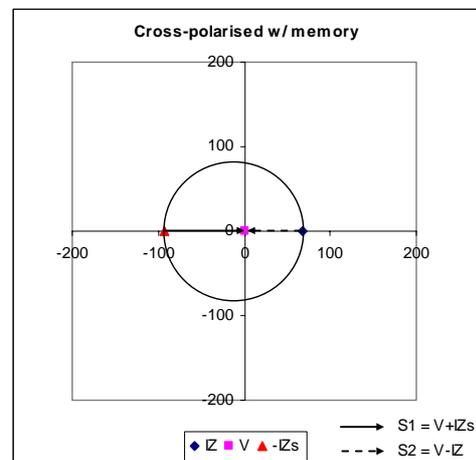
97 (ก)



97 (ข)



97 (ค)

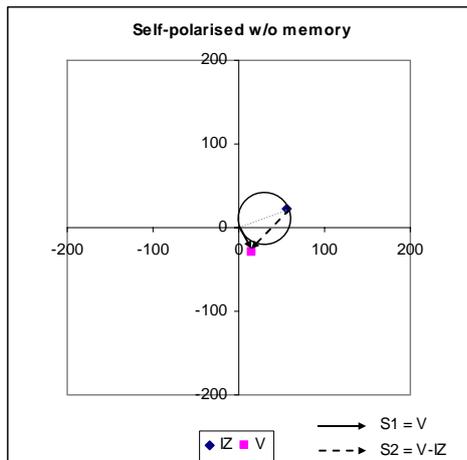


97 (ง)

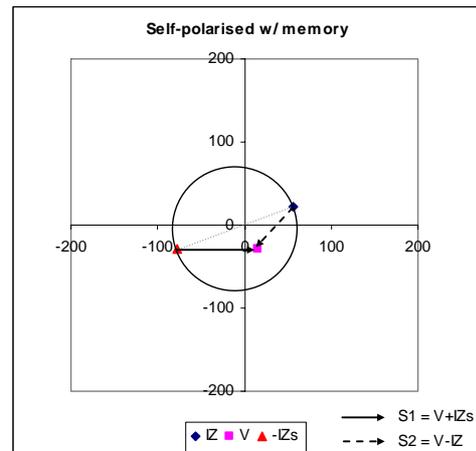
ภาพที่ 97 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน
ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 0.000001$)

ตารางที่ 64 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 40$)

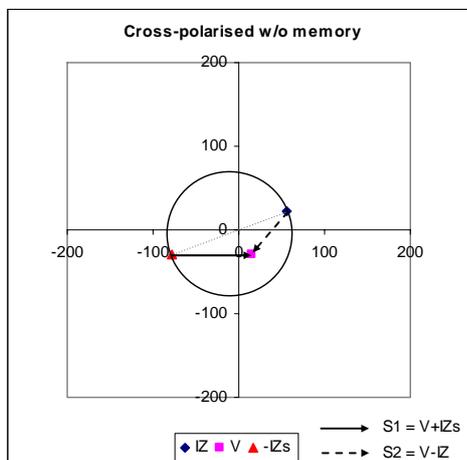
ระยะฟอลต์ (y)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay A							
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem	
			R	X	R	X	R	X	R	X
0.01	40	Iz V -Izs	56.7400 15.3000	21.5600 -29.6400	56.7400 15.3000 -78.0200	21.5600 -29.6400	56.7400 15.2900 -78.0200	21.5600 -29.6400	56.7400 15.3000 -78.0200	21.5600 -29.6400



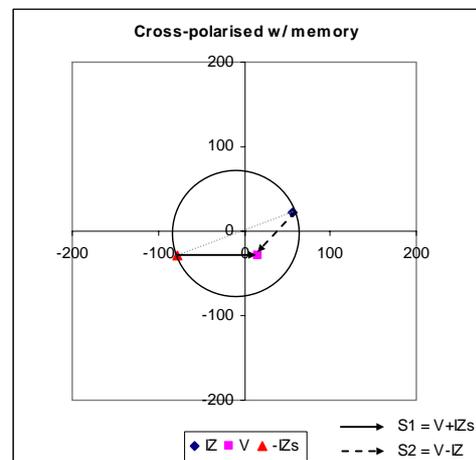
98 (ก)



98 (ข)



98 (ค)

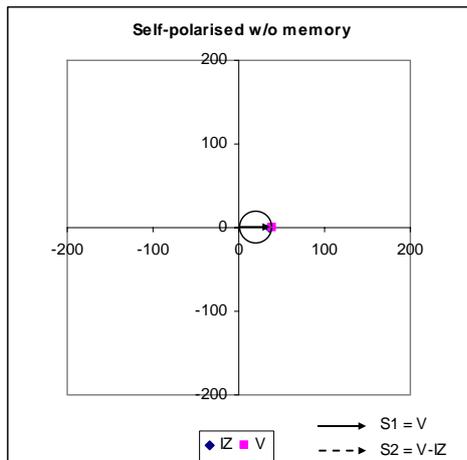


98 (ง)

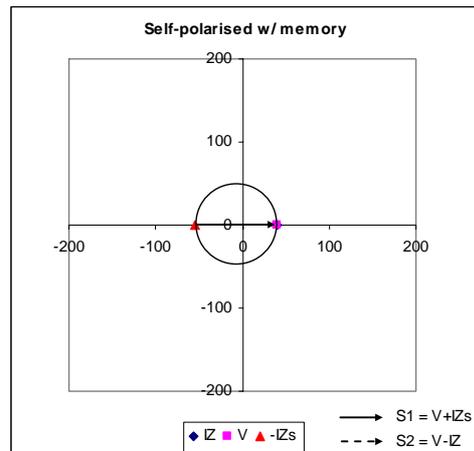
ภาพที่ 98 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.01, R_f = 40$)

ตารางที่ 65 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 0.000001$)

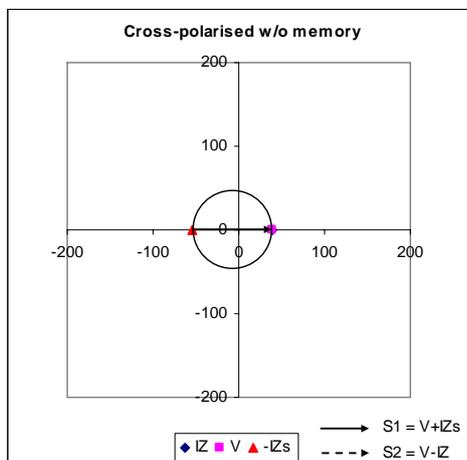
ระยะฟอลต์ (y)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay A							
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem	
			R	X	R	X	R	X	R	X
0.8	0.000001	Iz V -Izs	36.2900 39.2800	-0.0120 -0.0151	39.2800 39.3000 -54.0200	0.0080 -0.0226 -0.0109	39.2900 39.2800 -54.0300	-0.0153 0.0009 0.0210	39.2900 39.2800 -54.0300	-0.0283 0.0099 0.0389



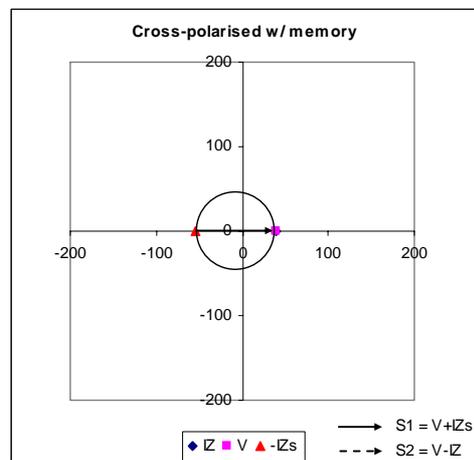
99 (ก)



99 (ข)



99 (ค)

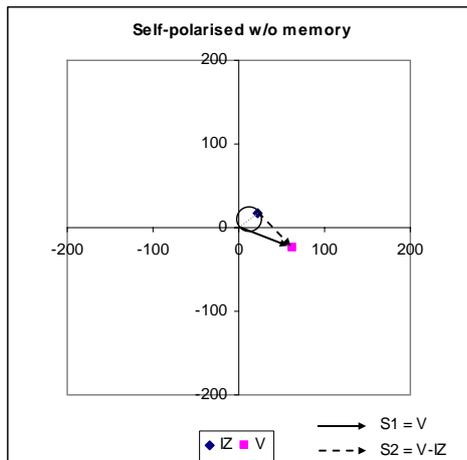


99 (ง)

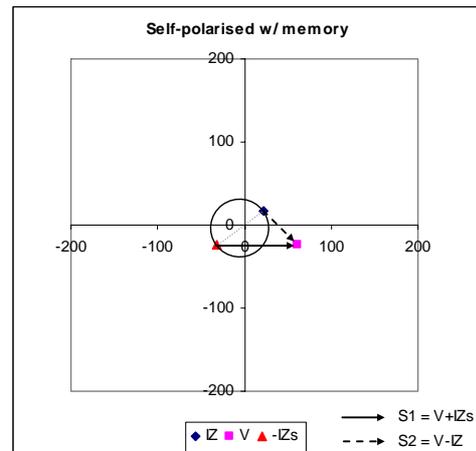
ภาพที่ 99 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 0.000001$)

ตารางที่ 66 ค่าที่ได้จากโปรแกรมกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน ด้านหน้ารีเลย์
ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 40$)

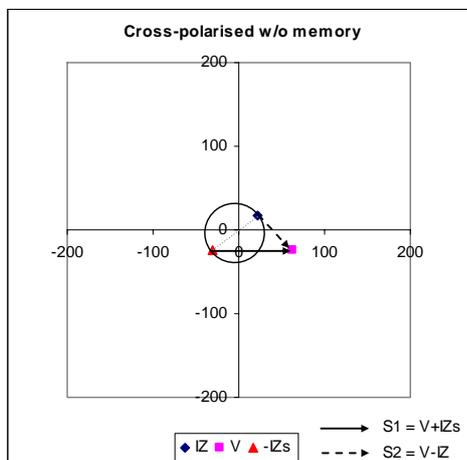
ระยะฟอลต์ (y)	Rf (โหม้ม Pri)	Element	Relay A							
			Self		Selfmem		Cross		Crossmem	
			R	X	R	X	R	X	R	X
0.8	40	Iz V -Izs	22.7900 61.9800	17.6900 -24.3200	22.7900 61.9800 -31.3300	17.6900 -24.3200 -24.3200	22.7900 61.9800 -31.3300	17.6900 -24.3200 -24.3200	22.7900 61.9800 -31.3300	17.6900 -24.3200 -24.3200



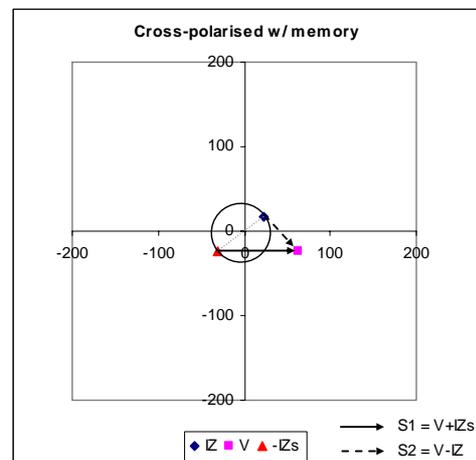
100 (ก)



100 (ข)



100 (ค)



100 (ง)

ภาพที่ 100 กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางกรณีเกิดฟอลต์ 1 เฟสลงดิน
ด้านหน้ารีเลย์ภายใต้ระบบไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย ($y = 0.8, R_f = 40$)

วิจารณ์

1. อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นระหว่างขณะที่เกิดฟอลต์สำหรับเงื่อนไขฟอลต์และระบบไฟฟ้าแบบต่าง ๆ

ผลที่ได้จากโปรแกรมจะเห็นได้ว่า เมื่อเกิดฟอลต์แบบต่าง ๆ โดยไม่คิดผลของ R_f รีเลย์ที่นำมาใช้หาระยะทางได้ เป็นดังตารางที่ 67 สอดคล้องตามทฤษฎีเรื่องการป้อนสัญญาณอินพุตให้กับรีเลย์ระยะทาง ซึ่งรีเลย์จะมองเห็นอิมพีแดนซ์ผิดเพี้ยนไปเมื่อมี R_f

ตารางที่ 67 รีเลย์ที่นำมาใช้หาระยะทาง สำหรับเงื่อนไขฟอลต์แบบต่าง ๆ

ฟอลต์	รีเลย์					
	AB	BC	CA	A	B	C
1. แบบ 3 เฟส (A-B-C)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2. แบบ 2 เฟส (B-C)		✓				
3. แบบ 1 เฟสลงดิน (A-G)				✓		
4. แบบ 2 เฟสลงดิน (B-C-G)		✓			✓	✓

โลโก้สมิทที่รีเลย์มองเห็นจากผล สามารถนำไปใช้เลือกชนิดของรีเลย์ระยะทางได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ จิรศักดิ์ (2541)

2. ผลของกระแสไหลและควมต้านทานฟอลต์ต่อค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็น

ผลของ R_f จะทำให้มีความต้านทานมากขึ้น ส่งผลให้รีเลย์ระยะทางมองเห็นอิมพีแดนซ์มากขึ้นกว่าเดิมเกิด Underreach ทั้งนี้ก็ไม่เสมอไปขึ้นอยู่กับขนาดของ R_f และ Load Angle (δ) ของระบบ จากภาพที่ 71 ถึง 73 แสดงให้เห็นว่า ถ้าทิศทางกระแสไหลของกระแสไหลคมีทิศทางเดียวกันกับกระแสฟอลต์ (δ เป็นบวก) ในขณะที่ R_f เพิ่มขึ้น ค่ารีแอกแตนซ์จะลดลง และจะลดลงมากขึ้นเมื่อ $\delta = 60^\circ$ ซึ่งหมายถึงกระแสไหลในทิศทางเดียวกับฟอลต์มากขึ้น ส่งผลให้รีเลย์ระยะทางมองเห็นอิมพีแดนซ์น้อยกว่าเดิมอีก เกิด Overreach

ผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดสอบคุณสมบัติของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซซ์ด้วยตัวมันเองต่อการเปลี่ยนแปลงของ Load Angle (δ) และความต้านทานฟอลต์ (R_f) ที่กล่าวไว้ในบทความของ J. Roberts et al. (1993)

3. กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมระหว่างขณะที่เกิดฟอลต์สำหรับเงื่อนไขฟอลต์และระบบไฟฟ้าแบบต่าง ๆ

โดยทั่วไปเราจะคุ้นเคยกับคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางในรูปของอิมพีแดนซ์บนแผนภาพ R - X ซึ่งในงานวิจัยนี้แสดงในรูปของแรงดันบนแผนภาพ IR - IX โดยขนาดของวงกลมจะเปลี่ยนไปตามเงื่อนไขของการเกิดฟอลต์เนื่องจากรีเลย์ที่ศึกษาใช้หลักการเปรียบเทียบมุมของสัญญาณ สามารถวาดกราฟคุณลักษณะการทำงานได้จากการวิเคราะห์หาสมการของสัญญาณที่เป็นอินพุตให้กับชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบมุม S_1 และ S_2 ที่แสดงไว้ในวิธีการ ทิศทางเวกเตอร์ที่ได้จากกราฟตรงกันกับค่ามุมของสัญญาณที่วัดได้ในแบบจำลอง

กราฟคุณลักษณะการทำงานที่ได้ตรงกับทฤษฎี คือรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซซ์ด้วยตัวมันเองเป็นวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางบนเส้นตรง \overline{IZ} ส่วนของเส้นรอบวงผ่านจุดกำเนิด ดังนั้นรีเลย์จะครอบคลุมความต้านทานฟอลต์ได้น้อย เงื่อนไขการทำงานคือ ถ้าฟอลต์ที่เกิดขึ้นอยู่นอกโซนการป้องกันจะทำให้ปลายของเวกเตอร์ \overline{V} อยู่นอกวงกลม จะทำให้สัญญาณ S_1 และ S_2 ทำมุมกันน้อยกว่า 90 องศา รีเลย์ไม่ทำงาน แต่ถ้าฟอลต์ที่เกิดขึ้นอยู่ในโซนการป้องกันจะทำให้ปลายของเวกเตอร์ \overline{V} อยู่ในวงกลม จะทำให้สัญญาณ S_1 และ S_2 ทำมุมกันมากกว่า 90 องศา รีเลย์ทำงาน ปัญหาของรีเลย์ชนิดนี้คือ เมื่อตำแหน่งของฟอลต์อยู่ใกล้รีเลย์และมี R_f น้อย ๆ ขนาดของสัญญาณ S_1 จะน้อยมาก ดังภาพที่ 74 (ก) 79 (ก) 84 (ก) 89 (ก) 93 (ก) และ 97 (ก) ทำให้รีเลย์คำนวณหามุมของสัญญาณได้ยาก รีเลย์อาจจะทำงานหรือไม่ทำงานสลับไปสลับมา ซึ่งเป็นการทำงานที่ผิดพลาดเนื่องจากฟอลต์อยู่ในโซนการป้องกัน

รีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซซ์ข้าม เป็นวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่บนเส้นตรงที่ลากจากจุด $-\overline{IZ}_S$ ถึง \overline{IZ} ครอบคลุมจุดกำเนิด ดังนั้นรีเลย์ชนิดนี้สามารถแก้ปัญหาการทำงานผิดพลาดเมื่อฟอลต์อยู่ใกล้รีเลย์ได้ อีกทั้งยังสามารถครอบคลุมความต้านทานฟอลต์ได้มากขึ้นด้วย แต่ก็มีปัญหาในกรณีที่ $\frac{Z_S}{Z_L}$ มีค่ามาก (ระบบไฟฟ้าที่มีสายส่งสั้น) เช่น $\frac{Z_S}{Z_L}$ มีค่าเท่ากับ

20 หรือ 30 จะทำให้ส่วนของเส้นตรง \overline{IZ}_S ยาวกว่า \overline{IZ} วงกลมจะค่อนข้างไปทาง \overline{IZ}_S ทำให้ขนาดของสัญญาณ \overline{S}_2 น้อยมาก ส่งผลให้รีเลย์อาจทำงานผิดพลาดได้เช่นกัน รีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซ์ข้าม จึงไม่เหมาะกับการป้องกันสายส่งระยะสั้น ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ระบบไฟฟ้าที่มี $\frac{Z_S}{Z_L} = 0.1$ ซึ่งสามารถใช้โปรแกรมวิเคราะห์หากราฟคุณลักษณะการทำงานภายใต้ระบบไฟฟ้าที่มี $\frac{Z_S}{Z_L}$ ค่าอื่น ๆ ได้ โดยการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลอง

จากผลที่ได้สามารถสรุปเรื่องการโพลาลิซ์จากหน่วยความจำได้ดังตารางที่ 68 คือ กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซ์ด้วยตัวมันเองแบบใช้หน่วยความจำเหมือนกับรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซ์ข้าม ทั้งแบบไม่ใช้หน่วยความจำและแบบใช้หน่วยความจำ ยกเว้นกรณีเกิดฟอลต์ 3 เฟส (A-B-C) คือ กราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซ์ข้ามแบบไม่ใช้หน่วยความจำ จะมีคุณลักษณะเป็นรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซ์ด้วยตัวมันเองแบบไม่ใช้หน่วยความจำ ซึ่งตรงกับทฤษฎีที่ได้วิเคราะห์ไว้

ตารางที่ 68 สรุปกราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาลิซ์จากหน่วยความจำ

ชนิดของรีเลย์	A-B-C	B-C	A-G
Self w/o Mem	Self-Polarised Mho	Self-Polarised Mho	Self-Polarised Mho
Self w/ Mem	Cross-Polarised Mho	Cross-Polarised Mho	Cross-Polarised Mho
Cross w/o Mem	Self-Polarised Mho	Cross-Polarised Mho	Cross-Polarised Mho
Cross w/ Mem	Cross-Polarised Mho	Cross-Polarised Mho	Cross-Polarised Mho

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

วิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม Matlab/Simulink สร้างแบบจำลอง อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟในระบบไฟฟ้ากำลัง หม้อแปลงทดกระแสและหม้อแปลงทดแรงดัน ณ ตำแหน่งจุดติดตั้งรีเลย์ชนิดของฟอลต์ที่มีความต้านทานอาร์คและไม่มีควมต้านทานอาร์ค ตำแหน่งฟอลต์บนไลน์ที่ต้องการป้องกัน และรีเลย์ระยะทางแบบโม 4 ชนิด ได้แก่ (1) รีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโปลาไลซ์ด้วยตัวมันเองแบบไม่ใช้หน่วยความจำ (2) รีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโปลาไลซ์ด้วยตัวมันเองแบบใช้หน่วยความจำ (3) รีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโปลาไลซ์ข้ามแบบไม่ใช้หน่วยความจำ (4) รีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโปลาไลซ์ข้ามแบบใช้หน่วยความจำ เพื่อนำไปใช้เป็นฐานสำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมของรีเลย์ระยะทางแบบโมระหว่างขณะที่เกิดฟอลต์ สำหรับเงื่อนไขฟอลต์และระบบไฟฟ้าแบบต่างๆ

เงื่อนไขฟอลต์ที่ศึกษาเป็นการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งฟอลต์ และชนิดของฟอลต์ (A-B-C, B-C, A-G และ B-C-G) ที่คิดผลของความต้านทานฟอลต์และไม่คิดความต้านทานฟอลต์ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของโหลด ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของรีเลย์ระยะทาง จะอยู่ในเทอมของค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็น และในรูปของกราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโม

ผลที่ได้ทำให้ทราบว่า ความต้านทานฟอลต์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้รีเลย์เกิด Underreach ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระแสโหลดที่ไหลในไลน์ด้วย หากกระแสโหลดอยู่ในทิศเดียวกับทิศทางที่รีเลย์ป้องกัน จะทำให้รีเลย์เกิด Overreach สำหรับผลที่ได้จากการวิเคราะห์พฤติกรรมของกราฟคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโปลาไลซ์แบบต่างๆ ทำให้ทราบว่า รีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโปลาไลซ์ข้ามสามารถครอบคลุมความต้านทานฟอลต์ได้มากกว่ารีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโปลาไลซ์ด้วยตัวมันเอง ซึ่งขนาดของวงกลมโมที่เขียนอยู่ในรูปแรงดันบนแผนภาพ IR-IX จะมีการเปลี่ยนแปลง เล็ก ใหญ่ ไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับตำแหน่งฟอลต์และความต้านทานฟอลต์

ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัยครั้งนี้ ทำให้ทราบว่า ชนิดของฟอลต์ ความต้านทานฟอลต์ และตำแหน่งของฟอลต์ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของระบบไฟฟ้าและโหลด มีผลต่อการทำงานของ

รีเลย์ระยะทางแบบโมอย่างไร การไฟฟ้าสามารถนำผลลัพธ์ของการวิเคราะห์นี้ไปใช้ เพื่อหาค่าเซต
ตั้งที่เหมาะสมสำหรับความไม่แน่นอนของระบบไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้น ได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ การสร้างแบบจำลองของหม้อแปลงทดกระแสและหม้อแปลงทดแรงดัน
เป็นแบบอุดมคติ ไม่ได้คำนึงถึงการอิ่มตัวของหม้อแปลง ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถเกิดเหตุการณ์นี้
ได้ ทำให้ค่าที่ได้ทางด้านทฤษฎีจะมีความคลาดเคลื่อน อาจทำให้พฤติกรรมของรีเลย์เปลี่ยนไป
การหาขนาดทางด้านทฤษฎีของหม้อแปลงทดกระแสและหม้อแปลงทดแรงดันในวิทยานิพนธ์นี้
ได้จากขนาดทางด้านปฐมภูมิหารด้วยอัตราทดกระแสหรืออัตราทดแรงดัน การหาขนาด
ทางด้านทฤษฎีที่ถูกต้อง จะต้องมีการคำนวณโดยใช้วงจรสมมูลที่คิดผลของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่ง
หลักการนี้เป็นอีกประเด็นหนึ่งที่ควรจะนำมาศึกษาและทำเป็นงานวิจัยต่อไป

สำหรับคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบอื่นๆ เช่น แบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า
ก็สามารถทำได้ โดยใช้หลักการเปรียบเทียบมุมของสัญญาณเช่นกัน สามารถสร้างเป็นไลบรารีของ
รีเลย์ระยะทางที่มีคุณลักษณะการทำงานแบบต่างๆ รวมถึงรีเลย์ชนิดอื่นๆ เก็บไว้ในโปรแกรม
Matlab/Simulink ซึ่งจะเป็ประโยชน์ในการสร้างแบบจำลอง เพื่อใช้วิเคราะห์ระบบไฟฟ้าใน
รูปแบบอื่นๆ ได้ต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กองออกแบบสถานีไฟฟ้า ฝ่ายออกแบบสถานีและสายส่ง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2546.

หลักเกณฑ์ทั่วไปในการตั้งค่าการทำงานของรีเลย์ป้องกันของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.

จรัสศักดิ์ เพ็ญวงษ์. 2541. โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของรีเลย์
ระยะทาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สันติ อัสวศรีพงษ์ศรี. 2526. รีเลย์ป้องกันกับการป้องกันระบบกำลัง. ครั้งที่ 1. สมาคมศูนย์วิชาการ
ไทย-ออสเตรเลีย.

Department of Electrical Engineering, Texas A&M University. 2004. **Impedance Relaying
Principle.** Power System Fault Analysis & Protection ELEN 459 Spring 2004. แหล่งที่
มา: http://eent1.tamu.edu/elen459/documents/MERIT_Chapter3_Section2_2004.pdf,
1 สิงหาคม 2548.

GEC Alstom Measurement Ltd. 1987. **Protective Relays Application Guide.** GEC Alstom
Measurement Ltd, Stafford, England.

GEC Alstom Measurement Ltd. 1997. **Analysis and Protection of Power System Course.
(Distance Protection: Basic Principles and Characteristics).** GEC Alstom
Measurement Ltd., Stafford, England.

Roberts, J., A. Guzman and E.O. Schweitzer, III. 1993. **$Z = V/I$ does not make a distance relay.**
Presented at 20th Annual Conference for Western Protective Relay, Spokane,
Washington. October 19-21, 1993.

Wilkinson, S.B. and C.A. Mathews, General Electric, n.d. **Dynamic Characteristics of Mho
Distance Relays.** GE Webpage - Publication GER-3742

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายอุษชัย คชวัฒน์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 11 พฤศจิกายน 2519
สถานที่เกิด	ชลบุรี
ประวัติการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกร ระดับ 5
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 2 (ภาคกลาง) จ.ชลบุรี