



## ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบของรีเลย์ระยะทางดิจิทัลแบบโมห้ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะด้วยวิธี KU

The Design and Prototype Implementation of an Adaptive Mho Digital Distance Relay with KU Method

นามผู้วิจัย นายสุรเชษฐ เดชฟุ้ง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

( รองศาสตราจารย์ดฤณ แสงสุวรรณ, Ph.D. )

กรรมการ

( อาจารย์วินัย พุกกะวัน, Dr.Ing. )

กรรมการ

( รองศาสตราจารย์พิรุทธิ์ ชาญเศรษฐีกุล, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( รองศาสตราจารย์มงคล รักษาพัชรวงค์, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบของรีเลย์ระยะทางดิจิทัลแบบโมห์  
ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะด้วยวิธี KU

The Design and Prototype Implementation of  
An Adaptive Mho Digital Distance Relay with KU Method

โดย

นายสุรเชษฐ เเดชฟูง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2552



Surachet Dechphung 2009: The Design and Prototype Implementation of an Adaptive Mho Digital Distance Relay with KU Method. Doctor of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Trin Saengsuwan, Ph.D. 172 pages.

This research presents the adaptive mho distance relay to compensate during the phase to phase fault with fault resistance by KU method. Generally, mho distance relay is used widely in case of phase to phase fault with low resistance fault. But, The phase to phase fault with fault resistance (from a man, storm or animal) occasionally produce a trajectory of impedance outside the zone of the distance relay protection. Therefore, in this case, the distance relay will not give the trip command to the circuit breaker. This thesis presents an analysis of the adaptive of the mho distance relay to compensate during the phase to phase fault with fault resistance or called "KU Distance Relay". This new concept is simulated in the Matlab/Simulink and implemented using the Dspace (DS11104). The prototype adaptive distance relay has been tested in the laboratory using the relay equipment, Freja300.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

\_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ตฤณ แสงสุวรรณ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อ.ดร. วินัย พงศ์ชะวัน กรรมการที่ปรึกษาสาขาวิชาเอก และ รศ.ดร.พิรยัทธ์ ชาญเศรษฐิกุล กรรมการที่ปรึกษาสาขาวิชารอง ที่ได้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ก้องกิติ พุสวัตต์ ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอขอบแต่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

สุรเชษฐ เดชทุ่ง  
พฤศจิกายน 2551

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
สัญลักษณ์และคำย่อ	(14)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	8
อุปกรณ์	8
วิธีการ	8
ผลและการวิจารณ์	98
ผล	98
วิจารณ์	107
สรุปและข้อเสนอแนะ	109
สรุป	109
ข้อเสนอแนะ	112
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	113
ภาคผนวก	121
ภาคผนวก ก พารามิเตอร์ของวงจรทดสอบ IEEE 14 บิต	122
ภาคผนวก ข DSPACE รุ่น DS1104	127
ภาคผนวก ค เครื่องทดสอบปริเลย์ Freja 300	132
ภาคผนวก ง m-file ของรีเลย์ระยะทางแบบ โมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟ	
คุณลักษณะ	141
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	172

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สมการอิมพีแดนซ์ที่ใช้ในการคำนวณเมื่อเกิดฟอล์ทชนิดต่าง ๆ	24
2	ผลการจำลองรีเลย์ระยะทางที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink	28
3	ค่าเซตตั้งของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่ใช้ในการจำลอง	29
4	สมการที่ใช้ในการคำนวณในการฟอล์ทชนิด เฟส-เฟส และ เฟส-เฟส-ลงดิน	31
5	ผลการจำลองของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่ความต้านทานฟอล์ทเท่ากับ $0 \Omega$ ( $R_F = 0 \Omega$ )	33
6	ค่าความต้านทานของอิมพีแดนซ์สายส่งรวมกับค่าความต้านทานฟอล์ทในแต่ละเฟส ( $R_F/2=25 \Omega$ )	34
7	ผลการจำลองของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่ความต้านทานฟอล์ทต่อเฟสเท่ากับ $25 \Omega$ ( $R_F = 50/2 \Omega$ )	37
8	ผลการจำลองของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะที่ความ ต้านทานฟอล์ทต่อเฟสเท่ากับ $25 \Omega$ ( $R_F = 50/2 \Omega$ )	44
9	จำลองการทำงานของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อนำมาติดตั้งกับระบบสายส่งวงจร เดี่ยว 2 แหล่งจ่าย (เซตตั้งโซนตามหลักการดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1.1)	55
10	จำลองการทำงานของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อนำมาติดตั้งกับระบบสายส่งวงจร เดี่ยว 2 แหล่งจ่าย (โดยมีการเซตตั้งเพื่อชดเชยค่าความต้านทานฟอล์ทไว้ $25 \Omega$ และเซตตั้งโซนตามหลักการดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1.1)	64
11	จำลองการทำงานของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อนำมาติดตั้งกับระบบสายส่งวงจร เดี่ยว 2 แหล่งจ่าย (โดยมีการเซตตั้งเพื่อชดเชยค่าความต้านทานฟอล์ทไว้ $50 \Omega$ )	73
12	จุดที่เกิดฟอล์ทและเฟสที่เกิดฟอล์ทในวงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE	76
13	จำลองการทำงานของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะเมื่อ ติดตั้งกับวงจรทดสอบ 14 บัส ของ IEEE (โดยเซตตั้งเพื่อชดเชยค่า $R_{F \text{ Setting}}$ ไว้ $50 \Omega$ )	90
14	ผลการทดสอบของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่ปรับปรุงกราฟคุณลักษณะโดยเซตตั้ง ชดเชยค่าความต้านทานฟอล์ทไว้ $25 \Omega$ ในกรณีของการฟอล์ทแบบหนึ่งเฟส-ลงดิน	95

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
15	ผลการทดสอบของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ โดยเซต ตั้งชดเชยค่าความต้านทานฟอล์ทไว้ $25 \Omega$ ในกรณีของการฟอล์ทแบบเฟส-เฟส	96
16	ผลการจำลองของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่ไม่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ	100
17	ผลการจำลองของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ	101
18	ผลทดสอบของรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะที่สร้างขึ้น จาก DSPACE รุ่น DS11104 ร่วมกับเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300	105

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ไดอะแกรมแบบ R-X ของรีเลย์ระยะทาง SEL รุ่น 311	9
2	ไดอะแกรมแบบ R-X ของรีเลย์ระยะทาง SEL รุ่น 321	10
3	ไดอะแกรมแบบ R-X ของรีเลย์ระยะทาง ABB รุ่น REL-300 (MDAR)	10
4	ไดอะแกรมแบบ R-X ของรีเลย์ระยะทาง ASTOM (AREVA) รุ่น P445	11
5	ไดอะแกรมแบบ R-X ของรีเลย์ระยะทาง RFL รุ่น GARD8000, 8021	12
6	ไดอะแกรมแบบ R-X ของรีเลย์ระยะทาง SIEMENS รุ่น 7SA522	12
7	ไดอะแกรมแบบ R-X ของรีเลย์ระยะทาง ASTOM (AREVA) รุ่น LFZP (Series-L)	13
8	ตำแหน่งการติดตั้งรีเลย์ระยะทางเพื่อป้องกันสายส่งกำลังไฟฟ้า	13
9	ไดอะแกรมแบบ R-X ของอิมพีแดนซ์รีเลย์	14
10	ไดอะแกรมแบบ R-X ของแอดมิตแดนซ์รีเลย์หรือ โมห์รีเลย์	15
11	ไดอะแกรมแบบ R-X ของรีแอกแตนซ์รีเลย์	15
12	ไดอะแกรมแบบ R-X ของควอดริลเลเทอร์รีเลย์	16
13	เขตการป้องกันทั้ง 3 โชนของรีเลย์ระยะทาง	17
14	ฟอล์ทแบบ สามเฟส	17
15	วงจรสมมูลของฟอล์ทแบบ สามเฟส	17
16	ฟอล์ทแบบหนึ่งเฟสลงดิน	18
17	การเชื่อมต่อของวงจรในแต่ละซีแควนซ์เมื่อเกิดฟอล์ทแบบหนึ่งเฟสลงดิน	19
18	ฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส	21
19	วงจรสมมูลของฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส	21
20	ฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส-ลงดิน	22
21	วงจรสมมูลของฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส-ลงดิน	23
22	Mho Characteristic	24
23	ระบบสายส่งวงจรเดียวที่ใช้จำลองการทำงาน	26
24	วงจรในโปรแกรม Matlab/Simulink ที่ใช้จำลองการทำงาน	26
25	รีเลย์ระยะทางที่ใช้จำลองการทำงาน	27

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	ระบบสายส่งวงจรเดี่ยวที่ใช้จำลองการทำงาน	29
27	ลัดวงจรที่เฟส BC โดยมีความต้านทานฟอล์ท	30
28	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของฟอล์ทที่เฟส AB ที่ $R_{F(AB)} = 0 \Omega$ ในขอบโซน 1	31
29	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของฟอล์ทที่เฟส BC ที่ $R_{F(BC)} = 0 \Omega$ ในขอบโซน 2	32
30	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของฟอล์ทที่เฟส CA ที่ $R_{F(CA)} = 0 \Omega$ ในขอบโซน 3	32
31	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของฟอล์ทที่เฟส AB ที่ $R_{F(AB)} = 50 \Omega$ รวมกับอิมพีแดนซ์สายส่งในขอบโซน 1	35
32	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของฟอล์ทที่เฟส BC ที่ $R_{F(BC)} = 50 \Omega$ รวมกับอิมพีแดนซ์สายส่งในขอบโซน 2	36
33	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของฟอล์ทที่เฟส CA ที่ $R_{F(CA)} = 50 \Omega$ รวมกับอิมพีแดนซ์สายส่งในขอบโซน 3	37
34	การแบ่งครึ่งวงกลมของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์	38
35	การขยายโซนป้องกันออกไปทางด้านขวามือของแกน R	39
36	การขยายโซนป้องกันออกไปทางด้านขวามือของแกน R โดยมีค่าเท่ากับ $25 \Omega$	39
37	การสร้างโซนป้องกันใหม่ด้วยการลากเส้นที่ 1	40
38	การสร้างโซนป้องกันใหม่ด้วยการลากเส้นที่ 2	40
39	Flow Chart แสดงส่วนการตัดสินใจว่าจะมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะหรือไม่	41
40	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะเมื่อฟอล์ทที่เฟส AB ที่ $R_{F(AB)} = 50 \Omega$ รวมกับอิมพีแดนซ์สายส่งในขอบโซน 1	42
41	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะเมื่อฟอล์ทที่เฟส BC ที่ $R_{F(BC)} = 50 \Omega$ รวมกับอิมพีแดนซ์สายส่งในขอบโซน 2	42
42	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะเมื่อฟอล์ทที่เฟส CA ที่ $R_{F(CA)} = 50 \Omega$ รวมกับอิมพีแดนซ์สายส่งในขอบโซน 3	43
43	ลัดวงจรที่เฟส BC ในสายส่งวงจรเดี่ยว 2 แหล่งจ่ายโดยมีความต้านทานฟอล์ท	45
44	ผลของ $I_R$ ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงบนไดอะแกรม R-X เมื่อมีความต้านทานฟอล์ทเกิดขึ้นในขณะเกิดฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส	46





### สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
67	61
68	61
69	62
70	62
71	65
72	66
73	66
74	67

### สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
75	67
76	68
77	69
78	69
79	70
80	70
81	71
82	71

### สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
83	วงจรถดสอบ 14 บัสของ IEEE หรือ IEEE 14 BUS TEST CASE	75
84	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะตัวที่ 1 เมื่อฟอล์ทแบบ BC ที่ 10% ของความยาวสาย และ $R_{F(BC)} = 0 \Omega$ จำลองด้วยวงจรถดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่ $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$	76
85	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะตัวที่ 2 เมื่อฟอล์ทแบบ BC ที่ 90% ของความยาวสาย และ $R_{F(BC)} = 0 \Omega$ จำลองด้วยวงจรถดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่ $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$	77
86	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะตัวที่ 3 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 10% ของความยาวสาย และ $R_{F(AB)} = 0 \Omega$ จำลองด้วยวงจรถดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่ $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$	77
87	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะตัวที่ 12 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 90% ของความยาวสาย และ $R_{F(AB)} = 0 \Omega$ จำลองด้วยวงจรถดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่ $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$	78
88	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะตัวที่ 11 เมื่อฟอล์ทแบบ CA ที่ 10% ของความยาวสาย และ $R_{F(CA)} = 0 \Omega$ จำลองด้วยวงจรถดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่ $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$	78
89	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะตัวที่ 22 เมื่อฟอล์ทแบบ CA ที่ 90% ของความยาวสาย และ $R_{F(CA)} = 0 \Omega$ ต่อเฟส จำลองด้วยวงจรถดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่ $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$	79
90	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะตัวที่ 9 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 10% ของความยาวสาย และ $R_{F(AB)} = 0 \Omega$ จำลองด้วยวงจรถดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่ $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$	79
91	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะตัวที่ 5 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 90% ของความยาวสาย และ $R_{F(AB)} = 0 \Omega$ จำลองด้วยวงจรถดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่ $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$	80

### สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
92	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะตัวที่ 24 เมื่อฟอล์ทแบบ BC ที่ 10% ของความยาวสาย และ $R_{F(BC)} = 0 \Omega$ จำลองด้วยวงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่ $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$	80
93	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะตัวที่ 25 เมื่อฟอล์ทแบบ BC ที่ 90% ของความยาวสาย และ $R_{F(BC)} = 0 \Omega$ จำลองด้วยวงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่ $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$	81
94	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะตัวที่ 17 เมื่อฟอล์ทแบบ CA ที่ 10% ของความยาวสาย และ $R_{F(CA)} = 0 \Omega$ จำลองด้วยวงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่ $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$	81
95	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะตัวที่ 18 เมื่อฟอล์ทแบบ CA ที่ 90% ของความยาวสาย และ $R_{F(CA)} = 0 \Omega$ จำลองด้วยวงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่ $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$	82
96	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะตัวที่ 1 เมื่อฟอล์ทแบบ BC ที่ 10% ของความยาวสาย และ $R_{F(BC)} = 50 \Omega$ จำลองด้วยวงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่ $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$	83
97	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะตัวที่ 2 เมื่อฟอล์ทแบบ BC ที่ 90% ของความยาวสาย และ $R_{F(BC)} = 50 \Omega$ จำลองด้วยวงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่ $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$	83
98	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะตัวที่ 3 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 10% ของความยาวสาย และ $R_{F(AB)} = 50 \Omega$ จำลองด้วยวงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่ $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$	84
99	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะตัวที่ 12 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 90% ของความยาวสาย และ $R_{F(AB)} = 50 \Omega$ จำลองด้วยวงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่ $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$	84

### สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
100	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะตัวที่ 11 เมื่อฟอล์ทแบบ CA ที่ 10% ของความยาวสาย และ $R_{F(CA)} = 50 \Omega$ จำลองด้วยวงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่ $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$	85
101	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะตัวที่ 22 เมื่อฟอล์ทแบบ CA ที่ 90% ของความยาวสาย และ $R_{F(CA)} = 50 \Omega$ จำลองด้วยวงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่ $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$	85
102	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะตัวที่ 9 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 10% ของความยาวสาย และ $R_{F(AB)} = 50 \Omega$ จำลองด้วยวงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่ $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$	86
103	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะตัวที่ 5 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 90% ของความยาวสาย และ $R_{F(AB)} = 50 \Omega$ จำลองด้วยวงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่ $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$	86
104	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะตัวที่ 24 เมื่อฟอล์ทแบบ BC ที่ 10% ของความยาวสาย และ $R_{F(BC)} = 50 \Omega$ จำลองด้วยวงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่ $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$	87
105	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะตัวที่ 25 เมื่อฟอล์ทแบบ BC ที่ 90% ของความยาวสาย และ $R_{F(BC)} = 50 \Omega$ จำลองด้วยวงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่ $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$	87
106	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะตัวที่ 17 เมื่อฟอล์ทแบบ CA ที่ 10% ของความยาวสาย และ $R_{F(CA)} = 50 \Omega$ จำลองด้วยวงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่ $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$	88
107	ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะตัวที่ 18 เมื่อฟอล์ทแบบ CA ที่ 90% ของความยาวสาย และ $R_{F(CA)} = 50 \Omega$ จำลองด้วยวงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่ $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$	88
108	โปรแกรมใน Matlab/Simulink ที่บันทึกลงในฮาร์ดแวร์	91
109	บอร์ด DSPACE รุ่น DS11104	93

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
110	อินพุตและเอาต์พุตของ DSPACE รุ่น DS11104	94
111	เครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300	94
112	วงจรรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ใน Matlab/Simulink ที่ใช้ในการจำลอง	99
113	การทดสอบกับรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะที่สร้างขึ้นจาก DSPACE รุ่น DS11104 ร่วมกับเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300	103
114	แรงดันและกระแสที่ได้จากเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300 โดยผ่านรีเลย์ระยะทางที่สร้างขึ้นจาก DSPACE รุ่น DS11104 ที่อัตราการสุ่ม 1 kHz	104

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$Z$	=	อิมพีแดนซ์, โอห์ม
$V$	=	แรงดันไฟฟ้า, โวลต์
$I$	=	กระแสไฟฟ้า, แอมแปร์
$R$	=	ความต้านทาน, โอห์ม
$X$	=	รีแอกแตนซ์, โอห์ม
$D$	=	รีเลย์ระยะทาง
$Z_1$	=	ค่าเซตตั้งของอิมพีแดนซ์ที่โซน 1, โอห์ม
$Z_2$	=	ค่าเซตตั้งของอิมพีแดนซ์ที่โซน 2, โอห์ม
$Z_3$	=	ค่าเซตตั้งของอิมพีแดนซ์ที่โซน 3, โอห์ม
$\theta$	=	มุมของค่าอิมพีแดนซ์, องศา
$R$	=	รีเลย์
$A$	=	เฟส A
$B$	=	เฟส B
$C$	=	เฟส C
$N$	=	จุดนิวทรัล
$G$	=	จุดดิน
$E_a$	=	แรงดันไฟฟ้าที่เฟส A เทียบกับดิน, โวลต์
$E_b$	=	แรงดันไฟฟ้าที่เฟส B เทียบกับดิน, โวลต์
$E_c$	=	แรงดันไฟฟ้าที่เฟส C เทียบกับดิน, โวลต์
$E_1$	=	องค์ประกอบสมมาตรลำดับบวกของแรงดันไฟฟ้า, โวลต์
$E_2$	=	องค์ประกอบสมมาตรลำดับลบของแรงดันไฟฟ้า, โวลต์
$E_0$	=	องค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์ของแรงดันไฟฟ้า, โวลต์
$I_a$	=	กระแสไฟฟ้าที่เฟส A, แอมแปร์
$I_b$	=	กระแสไฟฟ้าที่เฟส B, แอมแปร์
$I_c$	=	กระแสไฟฟ้าที่เฟส C, แอมแปร์
$I_1$	=	องค์ประกอบสมมาตรลำดับบวกของกระแสไฟฟ้า, แอมแปร์
$I_2$	=	องค์ประกอบสมมาตรลำดับลบของกระแสไฟฟ้า, แอมแปร์
$I_0$	=	องค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์ของกระแสไฟฟ้า, แอมแปร์

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$E_{1f}$	=	องค์ประกอบสมมาตรลำดับบวกของแรงดันฟอลต์, โวลต์
$E_{2f}$	=	องค์ประกอบสมมาตรลำดับลบของแรงดันฟอลต์, โวลต์
$E_{0f}$	=	องค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์ของแรงดันฟอลต์, โวลต์
$Z_{1f}$	=	องค์ประกอบสมมาตรลำดับบวกของอิมพีแดนซ์ฟอลต์, โอห์ม
$Z_{2f}$	=	องค์ประกอบสมมาตรลำดับลบของอิมพีแดนซ์ฟอลต์, โอห์ม
$Z_{0f}$	=	องค์ประกอบสมมาตรลำดับศูนย์ของอิมพีแดนซ์ฟอลต์, โอห์ม
$a$	=	$1\angle 120^\circ$ หรือ $-0.5+j0.866$
$a^2$	=	$1\angle 240^\circ$ หรือ $-0.5-j0.866$
$m$	=	ตัวชดเชยกระแสเฟสซึ่งเป็นผลมาจากเฟสที่ไม่เกิดลัดวงจร
$Z_L$	=	อิมพีแดนซ์ของสายจากจุดที่ติดตั้งรีเลย์ถึงจุดเกิดฟอลต์, โอห์ม
$R_L$	=	ความต้านทานของสายจากจุดที่ติดตั้งรีเลย์ถึงจุดเกิดฟอลต์, โอห์ม
$X_L$	=	รีแอกแตนซ์ของสายจากจุดที่ติดตั้งรีเลย์ถึงจุดเกิดฟอลต์, โอห์ม
$R_F$	=	ความต้านทานฟอลต์, โอห์ม
*	=	ตำแหน่งของอิมพีแดนซ์ของฟอลต์ที่เฟส AB
o	=	ตำแหน่งของอิมพีแดนซ์ของฟอลต์ที่เฟส BC
□	=	ตำแหน่งของอิมพีแดนซ์ของฟอลต์ที่เฟส CA
$I_R$	=	กระแสไหลจากแหล่งจ่ายอีกด้านของรีเลย์ที่ใช้ตรวจจับฟอลต์, แอมแปร์
$R_{F \text{ Setting}}$	=	ค่าเซตตั้งเพื่อชดเชยความต้านทานฟอลต์, โอห์ม

## การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบของรีเลย์ระยะทางดิจิทัลแบบโมห์ ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะด้วยวิธี KU

### The Design and Prototype Implementation of an Adaptive Mho Digital Distance Relay with KU Method

#### คำนำ

รีเลย์ระยะทางมิใช่แพร่หลายในการป้องกันสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยจะตอบสนองค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างจุดที่ติดตั้งรีเลย์ และจุดที่เกิดฟอลต์ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ดังกล่าวก็คือ อัตราส่วนระหว่าง  $V/I$  ของความยาวสายส่งระหว่างรีเลย์และจุดที่เกิดฟอลต์ ค่าอิมพีแดนซ์ต่อระยะทางของสายส่งค่อนข้างจะคงที่ ในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าเมื่อเกิดลัดวงจรขึ้นในโซนป้องกัน รีเลย์ระยะทางจะป้องกันสายส่งกำลังไฟฟ้าด้วยการสั่งทรูปเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยตัดสายส่งจุดที่เกิดฟอลต์ออกจากระบบ รีเลย์ระยะทางส่วนมากจะมีโซนในการป้องกันอยู่ 3 โซน โดยในโซนที่ 1 และ 2 จะถูกปรับตั้งให้มีทิศทางในการป้องกันเป็นทิศทางเดียวกัน ส่วนในโซนที่ 3 นั้นจะสามารถปรับตั้งให้มีทิศทางในการป้องกันเป็นทิศทางเดียวกัน หรือสวนทางกับ โซน 1 และโซน 2 ก็ได้ การประยุกต์ใช้รีเลย์ระยะทางจะมีการตรวจจับฟอลต์ได้ทุกชนิด คือ สามเฟส, เฟส-เฟส, เฟส-เฟส-ลงดิน และเฟส-ลงดิน

ส่วนมากเราจะนิยมใช้รีเลย์ระยะทางแบบโมห์ (Mho Distance Relay) ในการป้องกันการฟอลต์ทุกชนิด แต่มักจะเกิดปัญหาในการตรวจจับฟอลต์ที่ผิดพลาด ซึ่งเกิดจากทางเดินของอิมพีแดนซ์ออกนอกโซนป้องกันเมื่อเกิดความต้านทานฟอลต์ (Fault Resistance) ขึ้นในขณะที่เกิดฟอลต์ ทำให้ทางเดินของอิมพีแดนซ์ซึ่งมีขนาดเพิ่มขึ้นตามขนาดของความต้านทานฟอลต์ และออกนอกโซนป้องกันมาทางด้านขวา ทำให้ระบบป้องกันเกิดความผิดพลาดแบบ รีเลย์คววทรูป แต่ไม่ทรูปและก่อให้เกิดความเสียหายกับสายส่งกำลังไฟฟ้า หรือในทางสถิติเรียกความคลาดเคลื่อนแบบนี้ว่า ความคลาดเคลื่อนแบบที่ 1 หรือ Type I error คือการที่เราปฏิเสธสมมติฐานหลัก ทั้งๆที่ควรจะยอมรับ แต่ถ้าเราใช้ ควอดริเลเทอรัลรีเลย์ (Quadrilateral Relay) ในการป้องกันฟอลต์ที่มีความต้านทานฟอลต์ รีเลย์แบบนี้จะมีการเซตตั้งเพื่อขยายโซนรองรับค่าความต้านทานฟอลต์ได้ ถ้ามีการเซตตั้งเพื่อรองรับค่าความต้านทานฟอลต์มากเกินไป ก็อาจจะทำให้กรณีของไม่เกิดฟอลต์แต่รีเลย์

ทริป หรือในทางสถิติเรียกว่า ความคลาดเคลื่อนแบบที่ 2 หรือ Type II error คือการที่เรายอมรับสมมติฐานหลัก ทั้งๆที่ควรจะปฏิเสธ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการแก้ปัญหาด้วยวิธีการซึ่งจะสามารถทำให้ลดการทำงานที่คลาดเคลื่อนหรือผิดพลาดของรีเลย์ระยะทางทั้ง 2 แบบ (Type I error และ Type II error) ซึ่งจะทำให้ค่าดัชนีต่าง ๆ ของการส่งจ่ายไฟฟ้าดีขึ้น เช่น SAIDI (System Average Interruption Duration Index) คือค่าดัชนีแสดงระยะเวลาที่ไฟฟ้าดับของระบบโดยเฉลี่ยต่อผู้ใช้ไฟฟ้า 1 ราย ในระยะเวลาหนึ่ง โดยทั่วไปในรอบ 1 ปี หรือ SAIDI เท่ากับ (ผลรวมของระยะเวลาที่ผู้ใช้ไฟฟ้าเกิดไฟฟ้าดับในหนึ่งปี) / (จำนวนผู้ใช้ไฟทั้งหมด) และ SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) คือค่าดัชนีความถี่ของการเกิดเหตุการณ์ ไฟฟ้าดับของระบบโดยเฉลี่ย ซึ่งหมายถึง ค่าเฉลี่ย จำนวนครั้งที่ผู้ใช้ไฟแต่ละรายเกิดไฟฟ้าดับในระยะเวลาหนึ่ง โดยทั่วไปคือ 1 ปี หรือ SAIFI เท่ากับ (ผลรวมของจำนวนครั้งที่ผู้ใช้ไฟฟ้าเกิดไฟฟ้าดับในหนึ่งปี) / (จำนวนผู้ใช้ไฟทั้งหมด) ซึ่งถ้าความคลาดเคลื่อนของรีเลย์ระยะทางในระบบป้องกันไฟฟ้ากำลังลดลง ก็จะทำให้ค่าของ SAIDI และ SAIFI ลดลงด้วย ซึ่งจะเป็นผลดีมากสำหรับผู้ใช้ไฟซึ่งเป็นลูกค้าของการไฟฟ้าทั้ง 3 แห่งของประเทศไทย คือ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) และการไฟฟ้านครหลวง (MEA)

งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการสร้างโซนป้องกันแบบปรับค่าได้ (Adaptive Mho Distance Relay) ขึ้นมาเพื่อรองรับปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งจะจำลองการเกิดเหตุการณ์ต่าง ๆ ด้วยการใช้โปรแกรมจำลอง (Simulator) โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ Matlab/Simulink และเขียน m-file เพื่อนำมาสร้างกราฟโซนป้องกันของรีเลย์ระยะทาง โดยมีการเก็บผลการจำลองในการสั่งทริปเมื่อเกิดฟอลต์ในทุกกรณี และนำโปรแกรมที่สร้างขึ้นใน Matlab/Simulink พร้อมกับผลที่ได้จากการจำลองนี้มาสร้างเป็นรีเลย์ตัวใหม่ขึ้น โดยใช้ DSPACE รุ่น DS11104 ซึ่งเป็นฮาร์ดแวร์ที่สามารถทำงานร่วมกับ Matlab/Simulink ได้เป็นอย่างดี พร้อมกับได้มีการทำการทดสอบรีเลย์ที่สร้างขึ้นใหม่กับเครื่องทดสอบรีเลย์รุ่น Freja300 โดยรีเลย์ที่สร้างขึ้นมาด้วยวิธีและแนวคิดใหม่นี้เรียกว่า “KU-Distance Relay”

## วัตถุประสงค์

1. ศึกษาวิธีระยะทางทุกชนิดที่มีการใช้งานตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันยี่ห้อต่าง ๆ ดังนี้ ยี่ห้อ ABB รุ่น REL-300 (MDAR), REL-501, REL-670, ยี่ห้อ GE รุ่น GCX, GCY, GCXY, GCXG, D30, D60, ยี่ห้อ AREVA รุ่น LFZP (Series-L), P430C/P437, P432/P439, P433/P435, P437, P443&P445, ยี่ห้อ RFL รุ่น GARD8000, 8021, ยี่ห้อ SEL รุ่น 311A, 321 ยี่ห้อ SIEMENS รุ่น 7SA510, 7SA511, 7SA513, 7SA518/519, 7SA522/7SA6 และ ยี่ห้อ TOSHIBA รุ่น GRZ100
2. จำลองเหตุการณ์ต่างๆ ทุกสถานะที่เกิดขึ้นกับรีเลย์ระยะทางด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink รวมถึงแนวความคิดใหม่ที่เกิดขึ้นกับรีเลย์ระยะทาง คือ การขยายโซนป้องกันเพื่อรองรับความต้านทานของฟอลต์ที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดฟอลต์ทุกชนิด คือ สามเฟส, เฟส-เฟส, เฟส-เฟส-ลงดิน และเฟส-ลงดิน
3. สร้างรีเลย์ระยะทางขึ้นมา โดยนำโปรแกรมที่สร้างขึ้นใน Matlab/Simulink พร้อมกับผลที่ได้จากการจำลองมาสร้างเป็นรีเลย์ตัวใหม่ขึ้น โดยใช้ DSPACE รุ่น DS11104 ซึ่งเป็นฮาร์ดแวร์ที่สามารถทำงานร่วมกับ Matlab/Simulink ได้เป็นอย่างดี พร้อมกับได้มีการทำการทดสอบรีเลย์ที่สร้างขึ้นใหม่กับเครื่องทดสอบรีเลย์รุ่น Freja300 เพื่อหาข้อดีข้อเสียของแนวคิดใหม่ที่นำมาสร้างรีเลย์และหาข้อดีข้อเสียของรีเลย์ตัวใหม่ที่สร้างขึ้น

## การตรวจเอกสาร

บทความวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างรีเลย์ระยะทางแบบดิจิทัลมีอยู่ 2 ส่วนหลัก ๆ คือ 1. การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 2. การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบจริง ซึ่งมีในส่วนของบริษัทเอกชน เช่น ABB, SIEMENS, AREVA และ TOSHIBA เป็นต้น ซึ่งยากที่จะสืบค้นข้อมูล เพราะข้อมูลดังกล่าวเป็นความลับในเชิงธุรกิจ แต่ในประเทศไทยยังไม่มี การสร้างเครื่องต้นแบบของรีเลย์ระยะทางแบบดิจิทัล ผู้วิจัยได้ทำการตรวจเอกสารซึ่งมีข้อมูลดังนี้

D. L. Waikar, A. C. Liew and S. Elangovan (1996) ได้ทำการวิจัยโดยสร้างรีเลย์ระยะทางแบบดิจิทัลขึ้น โดยใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8097 ของ Intel เขียนด้วยภาษา Assembly โดยทำให้รีเลย์ตัวที่ได้ทดลองและสร้างขึ้นมีความเร็วในการทำงานและความเที่ยงตรงที่สูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็ได้รีเลย์ระยะทางแบบดิจิทัลที่มีราคาถูกลง

M. M. Saha, K. Wikstrom and S. Lindahl (1997) ได้ทำการวิจัยโดยสร้างรีเลย์ระยะทางแบบดิจิทัลที่มีความเร็วสูงขึ้น โดยใช้ หลักการของ Fast Tripping algorithm กับ การฟลัดเทคนิคเฟส และ ชนิดคราวด์ รวมไปถึงการใช้บอร์ดของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ที่มีอัตราการสุ่มเป็น 1 ms และ โมดูลของไมโครโปรเซสเซอร์จะใช้แบบที่มีตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลอยู่ภายในถึง 10 ตัว

Yong Sheng and Steven M. Rovnyak (2004) ได้ทำการวิจัยและสร้างรีเลย์ระยะทางแบบดิจิทัลโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์และให้อัตราการสุ่มมีค่าเท่ากับ 1920 เฮิร์ตซ์ ( $H_z$ ) โดยใช้ หลักการของการตรวจจับอิมพีแดนซ์ในขณะที่เกิดฟลัดที่เรียกว่า Decision Tree-Based Methodology ซึ่งทำให้การทำงานของรีเลย์เร็วขึ้นเมื่อมีอิมพีแดนซ์เกิดขึ้นในขณะที่เกิดฟลัด

P. K. Dash, A. K. Pradhan, Ganapati Panda, and A. C. Liew (2000) ได้ทำการวิจัยในหัวข้อการ เซ็ตตั้งที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะของรีเลย์ระยะทางเพื่อใช้งานกับระบบสายส่ง FACTS โดยได้มีการนำเสนอสมการของอิมพีแดนซ์ของสายที่ตรวจจับได้ในขณะที่เกิดฟลัด และได้เสนอการคุณลักษณะแบบใหม่ที่ไม่มีในรูปทรงคณิตศาสตร์พื้นฐาน ที่สามารถชดเชยและรองรับค่าความต้านทานฟลัดได้เล็กน้อย โดยสามารถใช้กับวงจรที่มีความซับซ้อนได้

Naser Zamanan, Jan Sykulski and A. K. Al-Othman (2007) ได้ทำงานวิจัยในหัวข้อ การตรวจจับค่าอิมพีแดนซ์สูงเมื่อเกิดการอาร์คด้วยวิธี real coded genetic ซึ่งเป็นวิธีการตรวจจับความต้านทานฟอล์ทที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดฟอล์ท ด้วยการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ มุมเฟสของกระแสฟอล์ทจากสัญญาณของกระแสที่ตรวจวัดได้ โดยมีการจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

Abhishek Bansal and G. N. Pillai ได้ทำงานวิจัยในหัวข้อการตรวจจับอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูง โดยการใช้เทคนิคโครงข่ายระบบประสาทในการเรียนรู้ปริมาณเวกเตอร์ (Learning Vector Quantization (LVQ) Neural Network) หรือเป็นระบบผู้เชี่ยวชาญแบบหนึ่งที่ช่วยในการตรวจจับฟอล์ทแบบสภาวะปกติ และสภาวะของการเกิดความต้านทานฟอล์ท โครงข่ายดังกล่าวได้มีส่วนช่วยในการเรียนรู้ข้อมูลจากการจำลอง (Simulation) ของสายส่งวงจรเดียว การจำลองดังกล่าวได้ใช้ Matlab/Simulink ในการจำลอง

D. L. Waikar, A. C. Liew and S. Elangovan (1993) ได้ทำการออกแบบและสร้างรวมถึงการหาสมรรถนะของรีเลย์ระยะทางที่มีวิธีการทำงานใหม่ โดยใช้ไมโครคอลลทรลเลอร์ Intel 16-bit 8097 chip ซึ่งเป็นไมโครคอลลทรลเลอร์สมรรถนะสูงในตระกูล MCS-96 โดยมีอัตราการสุ่มที่ 600 เฮิร์ตซ์ ( $H_z$ ) ใช้ตัวแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล 12 บิตสองตัว โดยแยกเป็น Multiplexer ของแรงดัน 1 ชุด และกระแส 1 ชุด ซึ่งรีเลย์ที่ได้สร้างขึ้นดังกล่าวมีเสถียรภาพ และสมรรถนะในการทำงาน รวมถึงเวลาในการทำงานที่ไว จึงเหมาะสำหรับนำต้นแบบนี้ไปสร้างเป็นรีเลย์ระยะทางที่ใช้งานได้จริง

Y. Q. Xia, K. K. Li, and A. K. David (1993) ได้ทำงานวิจัยในหัวข้อรีเลย์ระยะทางที่ฉลาดสามารถทำงานตัวเดียวได้ โดยได้คำนวณและปรับปรุงกราฟคุณลักษณะของรีเลย์ระยะทาง เพื่อชดเชยความต้านทานฟอล์ทในขณะที่เกิดฟอล์ท โดยได้ทำการจำลองกับสายส่งที่มีแหล่งจ่าย 3 แหล่งจ่ายเพื่อให้ได้ทราบถึงความต้านทานฟอล์ทที่เปลี่ยนแปลงไปในกรณีของกระแสที่ไหลมาอีกด้านของจุดที่ติดตั้งรีเลย์ โดยงานวิจัยนี้มุ่งหวังให้เทคโนโลยีใหม่ที่คิดขึ้นนี้ มีการทำงานที่ดีกว่าในทุกด้านเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีเก่า และที่สำคัญราคาหรือต้นทุนต้องถูกกว่าเทคโนโลยีเก่า

M. M. Saha, K. Wikstrom and S. Lindahl ได้ทำการวิจัยในหัวข้อรีเลย์ระยะทางซึ่งมีการทำงานที่เร็วขึ้นด้วยการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ ได้มีแนวคิดในเรื่องการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะให้รีเลย์ระยะทางทำงานเร็วขึ้นและเพิ่มเสถียรภาพของระบบด้วยการติดตั้งคาปาซิ

สเตอร์อนุกรมเข้าไปในระบบเพื่อลดการสูญเสียของการส่งจ่าย ซึ่งถ้าระบบมีความมั่นคงแล้วรีเลย์ระยะทางก็สามารถทำงานได้ที่ความแม่นยำและความเร็วสูงสุด ซึ่งในงานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอแนวทางที่หลากหลายในการเลือกใช้วิธีการต่าง ๆ เพื่อให้รีเลย์ทำงานเร็วขึ้นและผิดพลาดน้อยลงนั่นเอง เช่น การนำชกิมบล็อกกิ้ง (Scheme Blocking) เข้ามาช่วยรีเลย์ทำงาน เป็นต้น

Y. Sheng and S. M. Rovnyak (2004) ได้ทำงานวิจัยในหัวข้อวิธีการตัดสินใจสำหรับการตรวจจับอิมพีแดนซ์ฟอลต์ที่มีค่าสูง การทดสอบได้ใช้โปรแกรม EMTP โดยได้มีการจำลองสถานการณ์ที่หลากหลาย เช่น กรณีของกระแสกระชาก (Inrush Current) กรณีของขมวดต่อคาปาซิเตอร์เข้าระบบ (Switching Capacitor) และมีอัตราการสุ่มมีค่าเท่ากับ 1920 เฮิร์ตซ์ ( $H_z$ ) โดยทำการทดสอบกับระบบที่มีความถี่ 60 เฮิร์ตซ์

Gang Li, Shengshi Zhu and Fenghai Sui (1999) ได้ทำงานวิจัยในหัวข้ออิมพีแดนซ์รีเลย์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะแบบโบว์ล (Bowl) และทำการเปรียบเทียบระหว่างโมห์รีเลย์ (Mho Relay) กับควอดริเลเทอรัลรีเลย์ (Quadrilateral Relay) และได้มีการจำลองเพื่อปรับปรุงกราฟคุณลักษณะเมื่อเกิดฟอลต์และมีความต้านทานฟอลต์ แนวคิดต่าง ๆ ก็ได้เป็นต้นแบบในการพัฒนารีเลย์ภายในสถาบัน Nanjing Automation Research Institute ประเทศจีน

A. Lazkano, J. Ruiz, L. A. Leturiondo, and E. Aramendi (2000) และคณะได้ทำงานวิจัยในหัวข้ออิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงเมื่อเกิดการอาร์คที่ใช้สำหรับวงจรสายส่งกำลังงานไฟฟ้าแบบ 3 สาย วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ก็คือ การเก็บข้อมูลของการตรวจจับอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงเมื่อเกิดการอาร์ค ตลอดเวลา 20 ปี เพื่อนำมาสร้างอุปกรณ์ตรวจจับอิมพีแดนซ์ดังกล่าว อิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงเมื่อเกิดการอาร์คนั้นเป็นสาเหตุของการเกิดความไม่สมดุลในขณะที่เกิดฟอลต์ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้รีเลย์ระยะทางทำงานผิดพลาดได้ โดยงานวิจัยนี้มีทั้งการคำนวณและการจำลองโดยได้ใช้เทคนิคการแยกฮาร์โมนิกส์ (Harmonics) เพื่อความเที่ยงตรงของการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายในขณะที่เกิดฟอลต์ด้วย

T. Saengsuwan (1999) ได้ทำการวิจัยในหัวข้อการจำลองรีเลย์ระยะทางด้วยโปรแกรม EMTP ซึ่งถือได้ว่าเป็นบทความวิจัยยุคแรก ๆ ที่ทำการจำลองด้วยการสร้างรีเลย์ระยะทางด้วยโปรแกรม EMTP และมีการนำมาทดสอบด้วยการจำลองกับวงจรที่มีความซับซ้อน

S. Dechphung and T. Saengsuwan (2007) ได้ทำการวิจัยในหัวข้อ การปรับปรุงกราฟ คุณลักษณะของรีเลย์ระยะทางแบบ โมห์ เพื่อลดเซชความต้านทานฟอล์ทในขณะที่เกิดฟอล์ท งานวิจัยนี้ได้มีการจำลองสถานะของการเกิดฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส ทั้งที่มีและไม่มี ความต้านทาน ฟอล์ทด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink รวมถึง ได้มีการเขียน โปรแกรม m-file เพื่อเก็บผลการทำงาน ของรีเลย์ในขณะที่เกิดฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส ในหลาย ๆ กรณี และมีการวาดรูปกราฟคุณลักษณะที่มี การปรับปรุงเปรียบเทียบกับกราฟคุณลักษณะที่ไม่มีการปรับปรุง การจำลองได้ทำการจำลอง เปรียบเทียบในกรณีของสายส่งวงจรเดี่ยว (Radial) ที่มีแหล่งจ่ายด้านเดียว และสายส่งวงจรเดี่ยวที่มี แหล่งจ่ายสองด้าน

สุรเชษฐ เดชฟุ้ง และ ตฤณ แสงสุวรรณ (2549) ได้ทำการวิจัยในหัวข้อการออกแบบและ สร้างเครื่องต้นแบบรีเลย์ชนิดดิจิทัลสำหรับการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 สองตัวทำหน้าที่เป็นดิจิทัลอินพุตและแอนาล็อกอินพุต โดยมีตัวแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัล 10 bit (10-bit Analog to Digital) ที่รับค่ามาจากแรงดันและกระแสทั้ง 3 เฟส ของรีเลย์ที่ผ่านการลดทอนสัญญาณมาแล้ว ส่วนตัวประมวลผลหลักได้ใช้ DSP เบอร์ TMS320C31 เป็นตัวคำนวณผลทางสมการคณิตศาสตร์

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการและวิจัยระบบไฟฟ้ากำลัง
  - 1.1 Digital oscilloscope
  - 1.2 เครื่องทดสอบปริเลย์ Freja-300
  - 1.3 ฮาร์ดแวร์ที่ใช้ร่วมกับ โปรแกรม Matlab รุ่น DSPACE11104
  - 1.4 ชุดจ่ายไฟกระแสตรงปรับค่าได้ พร้อม Signal Generator และ Digital Meter
  - 1.5 ชุดจ่ายไฟ 3 เฟส แบบปรับค่าได้
  - 1.6 PT และ CT
2. สำหรับการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า
  - 2.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
  - 2.2 โปรแกรม Matlab
  - 2.3 โปรแกรม EMTP

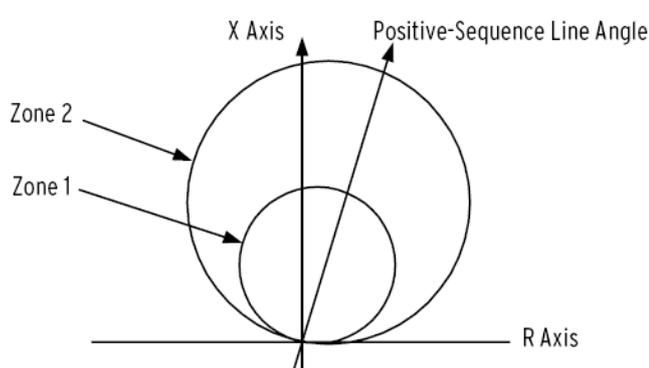
### วิธีการ

1. ศึกษาการทำงานของรีเลย์ระยะทางในหลายยี่ห้อ ว่ามีข้อดี-ข้อเสียอย่างไร และเปรียบเทียบเทคนิคการปรับตั้งกราฟคุณลักษณะเมื่อเกิดสถานะฟอลต์ที่ต่าง ๆ กันไป

1.1 ศึกษาการทำงานของรีเลย์ระยะทางในหลายยี่ห้อ ทุกรุ่นให้มากที่สุด ตั้งแต่ยุคแรกซึ่งเป็นรีเลย์ระยะทางแบบไฟฟ้ากล (Electromechanical), โซลิดสเตต (Solid State) และ ดิจิตอล (Digital) ตามลำดับ รวมไปถึงศึกษากราฟคุณลักษณะของรีเลย์ระยะทาง ทุกรุ่นทุกยี่ห้อนำมาเปรียบเทียบข้อดีข้อเสีย พร้อมหาข้อบกพร่องของรีเลย์ระยะทางแบบต่าง ๆ จากกราฟคุณลักษณะเพื่อนำไปสร้างแนวคิดในการสร้างกราฟคุณลักษณะแบบใหม่เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องดังกล่าว

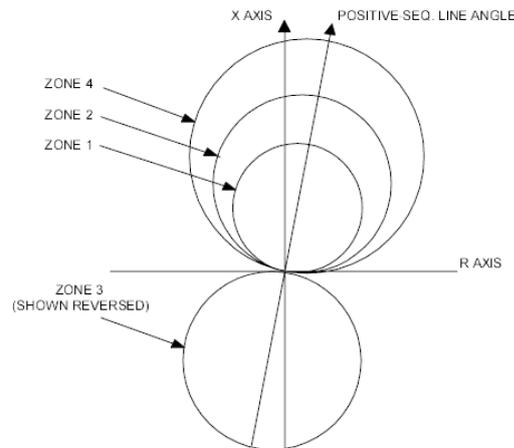
1.1.1 SEL รุ่น 311 A เป็นรีเลย์ของบริษัท Schweitzer Engineering Laboratories โดยมีรีเลย์กระแสเกินแบบรู้ทิศทาง (Directional Over Current Relay) และรีเลย์ระยะทางซึ่งใช้

ไดอะแกรมแบบ R-X ชนิดโมห์ป้องกันการเกิดฟอลต์ทุกชนิด มีโซนป้องกัน 2 โซนเท่านั้น โดยในโซนที่ 1 และ 2 จะถูกปรับตั้งให้มีทิศทางในการป้องกันเป็นทิศทางเดียวกัน รีเลย์รุ่นนี้มีอัตราการสุ่มของสัญญาณ (Sampling Rate) 16 ครั้ง/ลูกคลื่น (Time/Cycle) รีเลย์รุ่นนี้ไม่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะหรือไดอะแกรมแบบ R-X ซึ่งถ้าค่าความต้านทานฟอลต์ที่เกิดขึ้นในขณะฟอลต์ที่มีค่ามากพอจะทำให้ทางเดินของอิมพีแดนซ์ (Trajectory Impedance) เปลี่ยนไปและรีเลย์ทำงานผิดพลาดหรือออกนอกโซนป้องกันได้



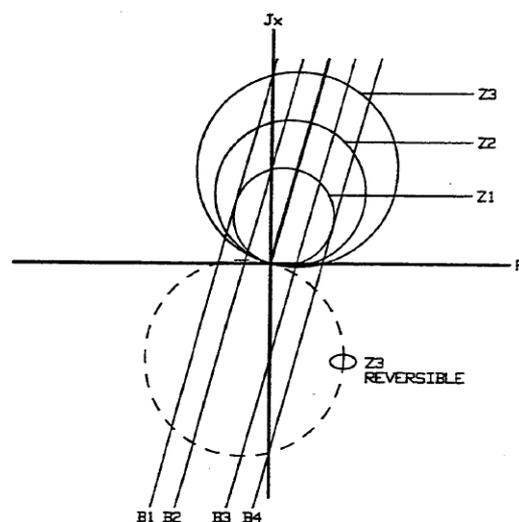
ภาพที่ 1 ไดอะแกรมแบบ R-X ของรีเลย์ระยะทาง SEL รุ่น 311A

**1.1.2 SEL รุ่น 321** เป็นรีเลย์ของบริษัท Schweitzer Engineering Laboratories โดยมีรีเลย์กระแสเกินแบบรู้ทิศทาง (Directional Over Current Relay) และรีเลย์ระยะทางซึ่งใช้ไดอะแกรมแบบ R-X ชนิดโมห์ป้องกันการเกิดฟอลต์ทุกชนิดโดยมีโซนป้องกัน 4 โซน โดยในโซนที่ 1, 2 และ 4 จะถูกปรับตั้งให้มีทิศทางในการป้องกันเป็นทิศทางเดียวกัน ส่วนในโซนที่ 3 นั้นจะสามารถปรับตั้งให้มีทิศทางในการป้องกันเป็นทิศทางเดียวกัน หรือสวนทางกับ โซน 1,2 และ 4 ก็ได้ รีเลย์รุ่นนี้เวลาในการทำงานอย่างรวดเร็วสุดอยู่ที่ประมาณ 20ms รีเลย์รุ่นนี้ไม่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะหรือไดอะแกรมแบบ R-X ซึ่งถ้าค่าความต้านทานฟอลต์ที่เกิดขึ้นในขณะฟอลต์ที่มีค่ามากพอจะทำให้ทางเดินของอิมพีแดนซ์เปลี่ยนไปและรีเลย์ทำงานผิดพลาดหรือออกนอกโซนป้องกันได้



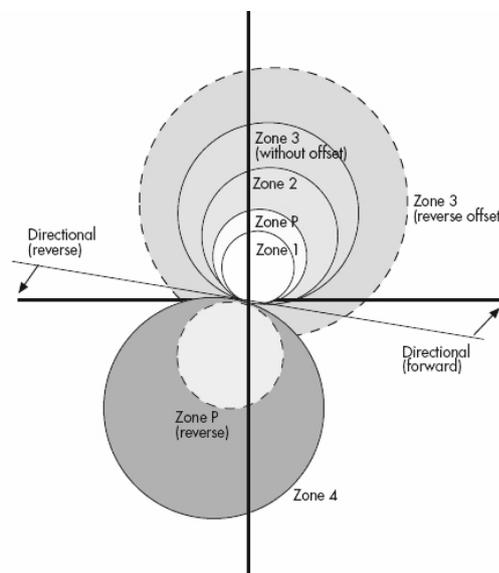
ภาพที่ 2 ไตอะแกรมแบบ R-X ของรีเลย์ระยะทาง SEL รุ่น 321

**1.1.3 ABB รุ่น REL-300 (MDAR)** เป็นของบริษัท ABB Automation ใช้ไตอะแกรมแบบ R-X ชนิดโมห์ป้องกันการเกิดฟอลต์ทุกชนิด โดยในโซนที่ 1 และ 2 จะถูกปรับตั้งให้มีทิศทางในการป้องกันเป็นทิศทางเดียวกัน ส่วนในโซนที่ 3 นั้นจะสามารถปรับตั้งให้มีทิศทางในการป้องกันเป็นทิศทางเดียวกัน หรือสวนทางกับ โซน 1 และ โซน 2 ก็ได้ รีเลย์รุ่นนี้ใช้ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital หรือ A/D) 7 ช่องแต่เลือกเข้าที่ละช่อง (Multiplex) ทำงานที่อัตราการสุ่มของสัญญาณ (Sampling Rate) 8 ครั้ง/ลูกคลื่น (Time/Cycle) โดยเวลาในการทำงานปกติอยู่ที่ประมาณ 22 mS และเวลาทำงานเร็วที่สุดอยู่ที่ 12-14 mS รีเลย์รุ่นนี้ไม่มีการปรับรูปกราฟคุณลักษณะหรือไตอะแกรมแบบ R-X ซึ่งถ้ามีค่าความต้านทานฟอลต์ที่เกิดขึ้นในขณะฟอลต์ที่มีค่ามากพอจะทำให้ทางเดินของอิมพีแดนซ์เปลี่ยนไปและรีเลย์ทำงานผิดโซนหรือออกนอกโซนป้องกันได้



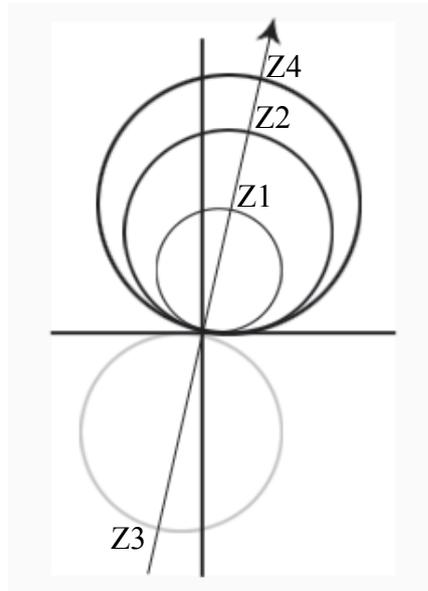
ภาพที่ 3 ไตอะแกรมแบบ R-X ของรีเลย์ระยะทาง ABB รุ่น REL-300 (MDAR)

**1.1.4 AREVA รุ่น P445** เป็นของบริษัท T&D Internationales Kontaktzentrum ใช้ไดอะแกรมแบบ R-X ชนิดโมห์ป้องกันการเกิดฟอล์ททุกชนิด โดยมีโซนป้องกัน 5 โซนจะถูกปรับตั้งให้มีทิศทางในการป้องกันเป็นทิศทางเดียวกัน หรือปรับตั้งให้มีทิศทางในการป้องกันเป็นทิศทางสวนกันก็ได้ รีเลย์รุ่นนี้เวลาในการทำงานปกติอยู่ที่ประมาณ 20-26 ms รีเลย์รุ่นนี้ไม่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะหรือไดอะแกรมแบบ R-X ซึ่งถ้ามีค่าความต้านทานฟอล์ทที่เกิดขึ้นในขณะที่ฟอล์ทที่มีค่ามากพอจะทำให้ทางเดินของอิมพีแดนซ์เปลี่ยนไปและรีเลย์ทำงานผิดโซนหรือออกนอกโซนป้องกันได้



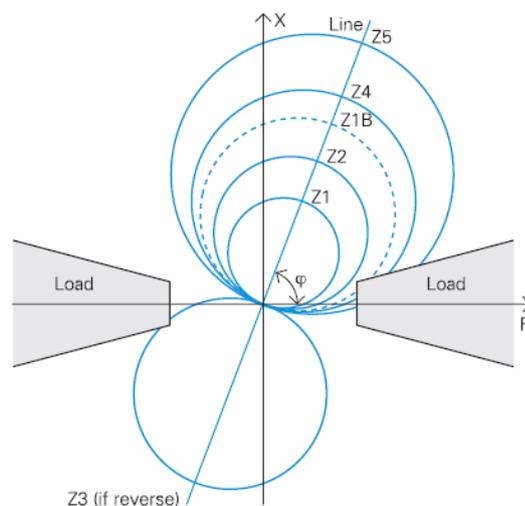
ภาพที่ 4 ไดอะแกรมแบบ R-X ของรีเลย์ระยะทาง ASTOM (AREVA) รุ่น P445

**1.1.5 RFL รุ่น GARD8000, 8021** เป็นของบริษัท RFL Electronics ใช้ไดอะแกรมแบบ R-X ชนิดโมห์ป้องกันการเกิดฟอล์ททุกชนิด โดยมีโซนป้องกัน 4 โซนจะถูกปรับตั้งให้มีทิศทางในการป้องกันเป็นทิศทางเดียวกัน หรือปรับตั้งให้มีทิศทางในการป้องกันเป็นทิศทางสวนกันก็ได้ รีเลย์รุ่นนี้ใช้อัตราการสุ่มของสัญญาณ 32 ครั้ง/ลูกคลื่น โดยเวลาในการทำงานปกติอยู่ที่ประมาณ 14.78 ms ที่ความถี่ 60 เฮิรตซ์ (Hz) รีเลย์รุ่นนี้ไม่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะหรือไดอะแกรมแบบ R-X ซึ่งถ้ามีค่าความต้านทานฟอล์ทที่เกิดขึ้นในขณะที่ฟอล์ทที่มีค่ามากพอจะทำให้ทางเดินของอิมพีแดนซ์ เปลี่ยนไปและรีเลย์ทำงานผิดโซนหรือออกนอกโซนป้องกันได้



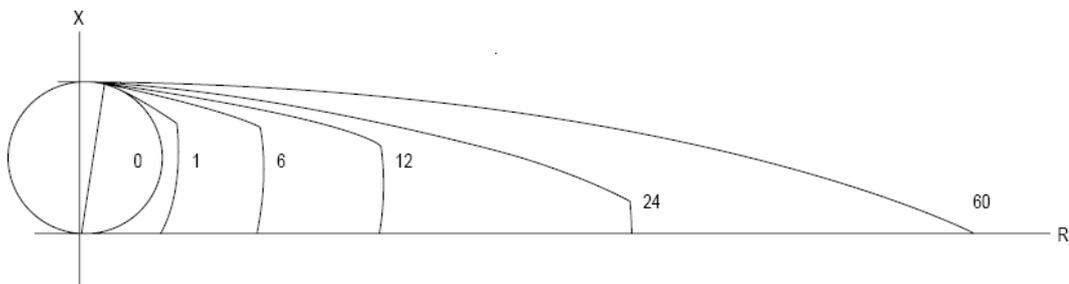
ภาพที่ 5 ไลอะแกรมแบบ R-X ของรีเลย์ระยะทาง RFL รุ่น GARD8000, 8021

**1.1.6 SIEMENS รุ่น 7SA522** ของบริษัท SIEMENS ใช้ไลอะแกรมแบบ R-X ชนิดโมห์ป้องกันการเกิดฟอลต์ทุกชนิดโดยมีโซนป้องกัน 6 โซน จะถูกปรับตั้งให้มีทิศทางในการป้องกันเป็นทิศทางเดียวกัน หรือปรับตั้งให้มีทิศทางในการป้องกันเป็นทิศทางสวนกันก็ได้ โดยเวลาในการทำงานปกติอยู่ที่ประมาณ 17 ms ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ รีเลย์รุ่นนี้ไม่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะหรือไลอะแกรมแบบ R-X ซึ่งถ้ามีค่าความต้านทานฟอลต์ที่เกิดขึ้นในขณะที่ฟอลต์ที่มีค่ามากพอจะทำให้ทางเดินของอิมพีแดนซ์ เปลี่ยนไปและรีเลย์ทำงานผิดโซนหรือออกนอกโซนป้องกันได้ แต่รีเลย์รุ่นนี้มีโซนของโหลดเพิ่มเข้ามาเพื่อแยกทางเดินอิมพีแดนซ์ (Trajectory of Impedance) ที่เกิดจากการแกว่งของโหลดหรือเพาเวอร์สวิง (Power Swing) ออกมาจากโซนป้องกัน



ภาพที่ 6 ไลอะแกรมแบบ R-X ของรีเลย์ระยะทาง SIEMENS รุ่น 7SA522

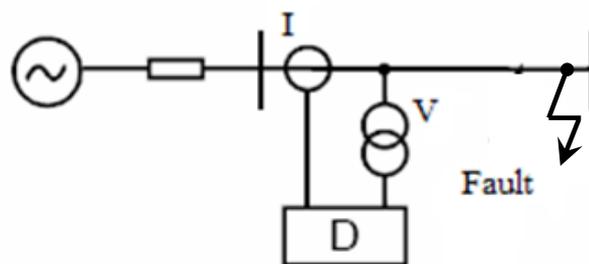
**1.1.7 AREVA รุ่น LFZP (Series-L)** เป็นของบริษัท T&D Internationales Kontaktzentrum ใช้ไดอะแกรมแบบ R-X ชนิดโมห์ป้องกันการเกิดฟอล์ททุกชนิด โดยมีโซนป้องกัน 5 โซน โดยสามารถเซตตั้งเพื่อชดเชยค่าความต้านทานฟอล์ทที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดฟอล์ทได้หลายค่าแต่การชดเชยดังกล่าวไม่ได้ปรับเปลี่ยนค่าอัตโนมัติ (Manual) ดังแสดงในภาพที่ 7 โดยเวลาในการทำงานปกติอยู่ที่ประมาณ 20 ms รีเลย์รุ่นนี้มีการปรับปรุกราฟคุณลักษณะหรือไดอะแกรมแบบ R-X เพื่อชดเชยทางเดินของอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนไปเนื่องจากค่าความต้านทานฟอล์ทที่เกิดขึ้นขณะเกิดฟอล์ทได้หรือมีชื่อเรียกอีกอย่างว่าเซพโมห์ (Shape Mho)



ภาพที่ 7 ไดอะแกรมแบบ R-X ของรีเลย์ระยะทาง ASTOM (AREVA) รุ่น LFZP (Series-L)

## 1.2 ผลการศึกษารีเลย์ระยะทาง สรุปได้ดังนี้

รีเลย์ระยะทางมิใช่แพร่หลายในการป้องกันสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยจะตอบสนองค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างจุดที่ติดตั้งรีเลย์และจุดที่เกิดฟอล์ท ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ดังกล่าวก็คือ อัตราส่วนระหว่าง  $V/I$  ของความยาวสายส่งระหว่างรีเลย์และจุดที่เกิดฟอล์ทนั่นเอง ( $Z=V/I$ ) ค่าอิมพีแดนซ์ต่อระยะทางของสายส่งค่อนข้างจะคงที่ ในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าเมื่อเกิดลัดวงจรขึ้นในโซนป้องกัน รีเลย์ระยะทางจะป้องกันสายส่งกำลังไฟฟ้าด้วยการสั่งทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยตัดสายส่งส่วนที่เกิดปัญหาออกจากระบบ

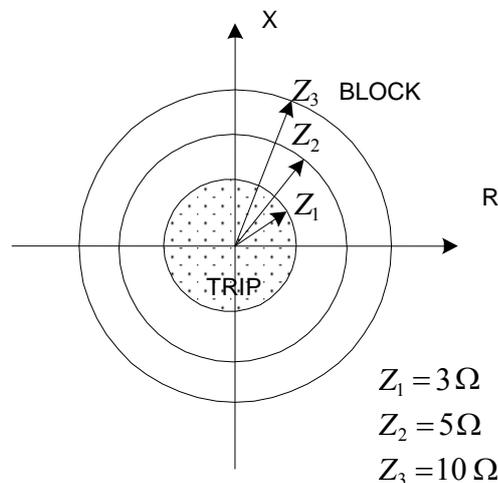


ภาพที่ 8 ตำแหน่งการติดตั้งรีเลย์ระยะทางเพื่อป้องกันสายส่งกำลังไฟฟ้า

รีเลย์ระยะทางส่วนมากจะมีโซนในการป้องกันอยู่ 3 โซน โดยในโซนที่ 1 และ 2 จะถูกปรับตั้งให้มีทิศทางในการป้องกันเป็นทิศทางเดียวกัน ส่วนในโซนที่ 3 นั้นจะสามารถปรับตั้งให้มีทิศทางในการป้องกันเป็นทิศทางเดียวกันหรือสวนทางกับโซน 1 และโซน 2 ก็ได้ การประยุกต์ใช้รีเลย์ระยะทางจะตรวจจับฟอลต์ ได้ทุกชนิด คือ สามเฟส (Three-Phase), เฟส-เฟส (Phase-Phase), เฟส-เฟส-ลงดิน (Phase-Phase-Ground) และเฟส-ลงดิน (Phase-Ground) ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

รีเลย์ระยะทางอาจจะแบ่งชนิดได้ตามลักษณะรูปร่างของเขตการทำงาน โดยทั่วไปรูปร่างของเขตป้องกันจะเป็นวงกลมเนื่องจากเป็นรีเลย์แบบไฟฟ้า-กล ที่มีสมการแรงบิดที่สร้างขอบเขตวงกลมสำหรับเขตป้องกันรีเลย์ 4 ชนิด ที่รู้จักกัน โดยทั่วไปมีลักษณะรูปร่างตามเขตป้องกันได้แก่

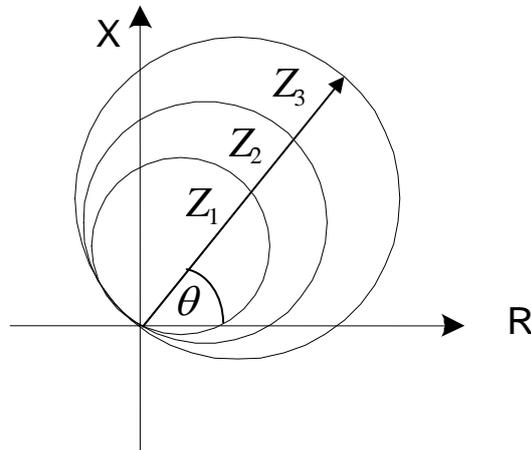
**1.2.1 อิมพีแดนซ์รีเลย์ (Impedance Relay)** เป็นรีเลย์ที่ไม่นำมุมเฟสระหว่างกระแสและแรงดันมาพิจารณาด้วยเหตุผลนี้ คุณลักษณะของอิมพีแดนซ์เมื่อวาดบนไดอะแกรมแบบ R-X มีลักษณะเป็นวงกลมเมื่อรัศมีคือค่าเซตติ้งมีหน่วยเป็น โอห์มและรีเลย์จะทำงานเมื่อค่าอิมพีแดนซ์ทั้งหมดต่ำกว่าค่าเซตติ้งนั้น คือ ทุกจุดในวงกลม



ภาพที่ 9 ไดอะแกรมแบบ R-X ของอิมพีแดนซ์รีเลย์

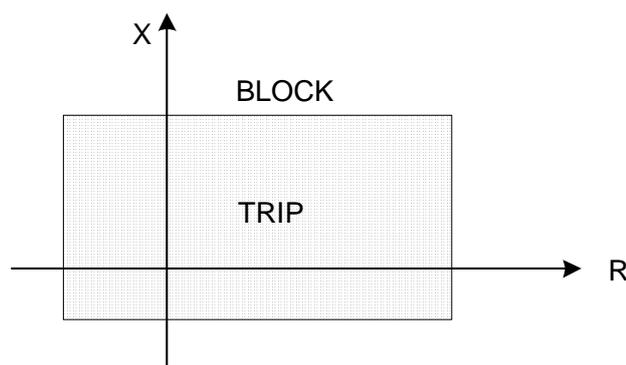
**1.2.2 แอดมิตแตนซ์รีเลย์หรือโมห์รีเลย์ (Admittance or Mho Relay)** คุณลักษณะของโมห์รีเลย์คือเส้นตรงบนไดอะแกรมแบบแอดมิตแตนซ์ คุณลักษณะของโมห์รีเลย์เมื่อวาดบนไดอะแกรมแบบ R-X คือ วงกลมที่เส้นรอบวงจะต้องผ่านจุดเริ่มต้นของแกนทั้งสอง คุณลักษณะของรีเลย์สามารถปรับได้โดยค่าอิมพีแดนซ์ (เส้นผ่าศูนย์กลางวงกลม) และมุม  $\theta$  (มุมอิมพีแดนซ์ของ

สายส่งหรือมุมระหว่างค่า  $Z$  กับแกน  $R$ ) และรีเลย์จะทำงานเมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของฟอลต์ที่อยู่ภายในกราฟคุณลักษณะของรีเลย์



ภาพที่ 10 ไลอะแกรมแบบ R-X ของแอดมิตแดนซ์รีเลย์หรือโมห์รีเลย์

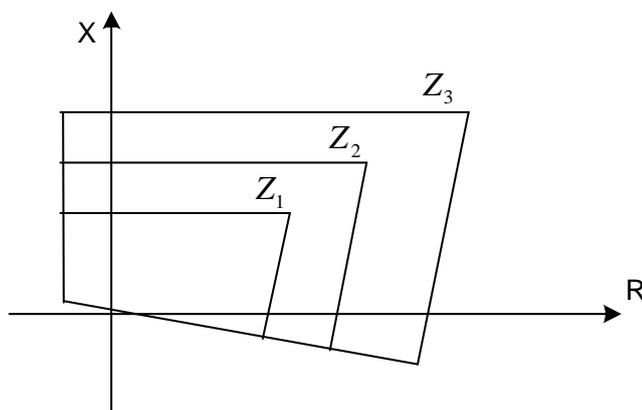
**1.2.3 รีแอคแตนซ์รีเลย์ (Reactance Relay)** การเซ็ทติงของรีแอคแตนซ์รีเลย์ถูกออกแบบให้วัดเฉพาะองค์ประกอบที่เป็นรีแอคทีฟของสายส่งที่ทำการป้องกัน องค์ประกอบดังกล่าวเป็นค่ารีแอคทีฟของอิมพีแดนซ์ของสายส่งและไม่เพิ่มขึ้นเมื่อมีค่าความต้านทานฟอลต์เกิดขึ้นในขณะฟอลต์ จึงไม่มีผลกระทบการตรวจจับฟอลต์รีเลย์ โดยคงวัดค่าเดิมของรีแอคแตนซ์ของสายส่งที่ทำการป้องกัน รีเลย์ชนิดนี้จึงใช้ในการป้องกันระยะสั้นและสายส่งที่พาดอยู่กับเสาไม้ได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 11 ไลอะแกรมแบบ R-X ของรีแอคแตนซ์รีเลย์

**1.2.4 ควอดริเลเทอรัลรีเลย์ (Quadrilateral Relay)** กราฟคุณลักษณะคล้ายกับรูปสี่เหลี่ยมคางหมู การเซ็ทติงของรีเลย์ชนิดนี้จะเซ็ทติงค่ารีแอคแตนซ์ มุม  $\theta$  (มุมอิมพีแดนซ์ของสาย

ส่ง) และค่าความต้านทานของฟอล์ทแบบหนึ่งเฟสลงดิน โดยเป็นการรวมข้อดีของรีแอกแตนซ์รีเลย์แบบกำหนดทิศทางและคุณลักษณะการควบคุมระยะของค่าความต้านทาน และนำมาประยุกต์ใช้กับการป้องกันฟอล์ทแบบลงดินของสายส่งระยะใกล้ถึงปานกลางได้ดี



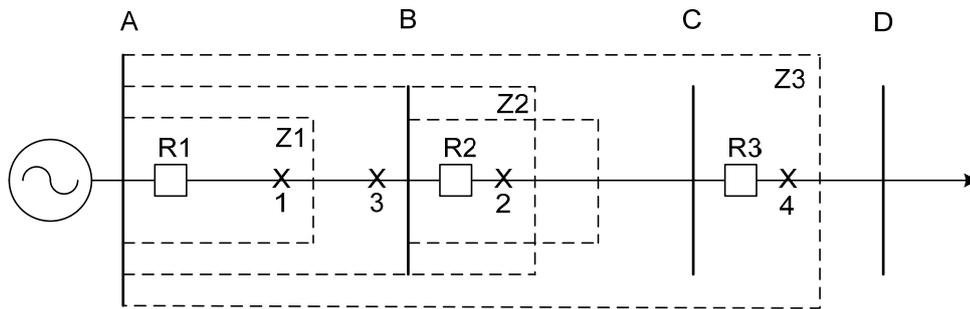
ภาพที่ 12 ไลอะแกรมแบบ R-X ของควอดริเลเทอร์รีเลย์

เขตของการป้องกัน (Zone of Protection) รีเลย์ระยะทางส่วนใหญ่จะแบ่งโซนป้องกันอย่างน้อย 3 โซน ซึ่งแต่ละโซนป้องกันจะถูกแยกแยะโดยการเซตตั้งขอบเขตการป้องกันและเวลาดังนี้

เขต 1 (Zone1) เซตตั้งไว้ที่ 85-90% ของการป้องกันสายส่งระหว่าง A-B ถ้าเราเซตตั้งที่ 100% จะทำให้รีเลย์มองเห็นไกลไป (Over reach) ในเขตป้องกันอื่นหรือมองเห็นล้ำเข้าไปในเขต 1 ของรีเลย์อีกตัวที่อยู่ติดกันหรือรีเลย์ตัวที่ 2 (R2) นั่นเองและเวลาทำงาน (Operating Time) เป็นแบบทำงานทันทีทันใดโดยไม่มีการหน่วงเวลา (Instantaneous)

เขต 2 (Zone2) เซตตั้งไว้ที่ 120-150% ของการป้องกันสายส่งระหว่าง A-B ทำงานเป็นการป้องกันสำรองให้กับรีเลย์เขต 1 และเวลาทำงานประมาณ 300 ms-500 ms โดยมีการหน่วงเวลาจากเขต 1

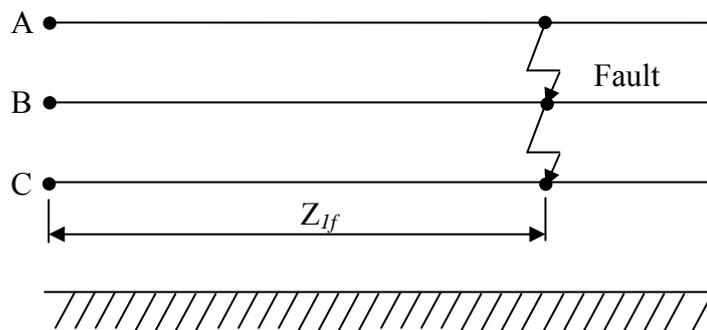
เขต 3 (Zone3) จะให้การป้องกันสำรองแก่สายส่งที่อยู่ถัดไปเท่ากับ 100% ของสายส่ง A-B บวกกับ 120-150% ของสายส่ง B-C และเวลาทำงานประมาณ 1 วินาที (1000 ms) โดยมีการหน่วงเวลาจากเขต 1



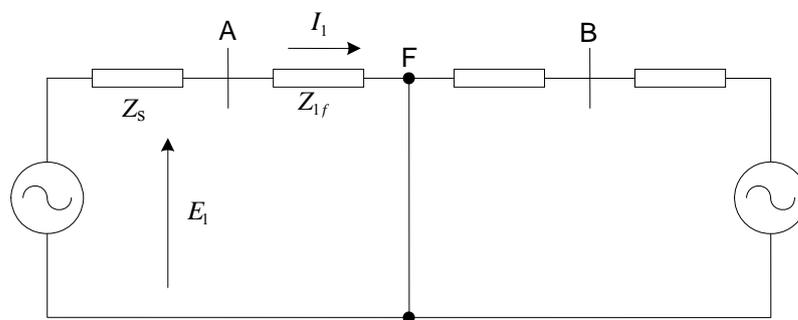
ภาพที่ 13 เขตการป้องกันทั้ง 3 โซนของรีเลย์ระยะทาง

1.3 ศึกษาชนิดของฟอลต์ว่ามีกี่ชนิด และรีเลย์ระยะทางชนิดไหนมีความเหมาะสมที่จะตรวจจับฟอลต์ชนิดใดเพื่อป้องกันสายส่งจากความเสียหาย การคำนวณฟอลต์แต่ละชนิดสำหรับการป้องกันด้วยรีเลย์ระยะทางมีดังนี้

1.3.1 ฟอลต์แบบ สามเฟส



ภาพที่ 14 ฟอลต์แบบ สามเฟส



ภาพที่ 15 วงจรสมมูลของฟอลต์แบบ สามเฟส

เมื่อเกิดลัดวงจรสามเฟสที่จุด F ดังในภาพที่ 14 จะสามารถแทนด้วยวงจรสมมูล ซึ่งจะมีเพียงวงจรซีควเอนซ์บวก (Positive Sequence Network) เท่านั้น ดังในภาพที่ 15

$$E_1 = E_a = Z_{1f} I_1 = Z_{1f} I_a$$

เมื่อ  $E_2 = E_0 = 0$  และ  $I_2 = I_0 = 0$

โดยที่  $E_a = E_0 + E_1 + E_2 = E_1$

$$E_b = E_0 + a^2 E_1 + a E_2 = a^2 E_1$$

$$E_c = E_0 + a E_1 + a^2 E_2 = a E_1$$

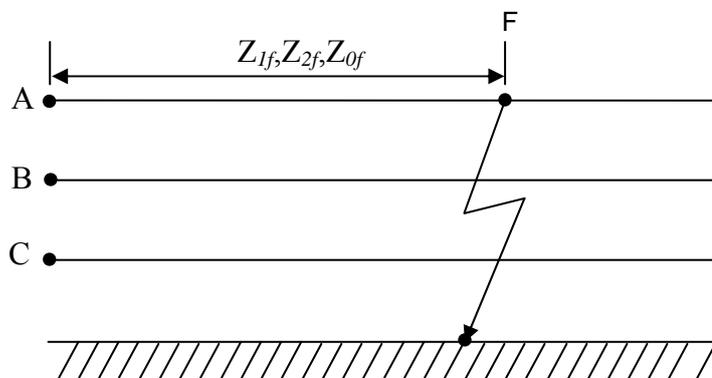
$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = I_1$$

$$I_b = I_0 + a^2 I_1 + a I_2 = a^2 I_1$$

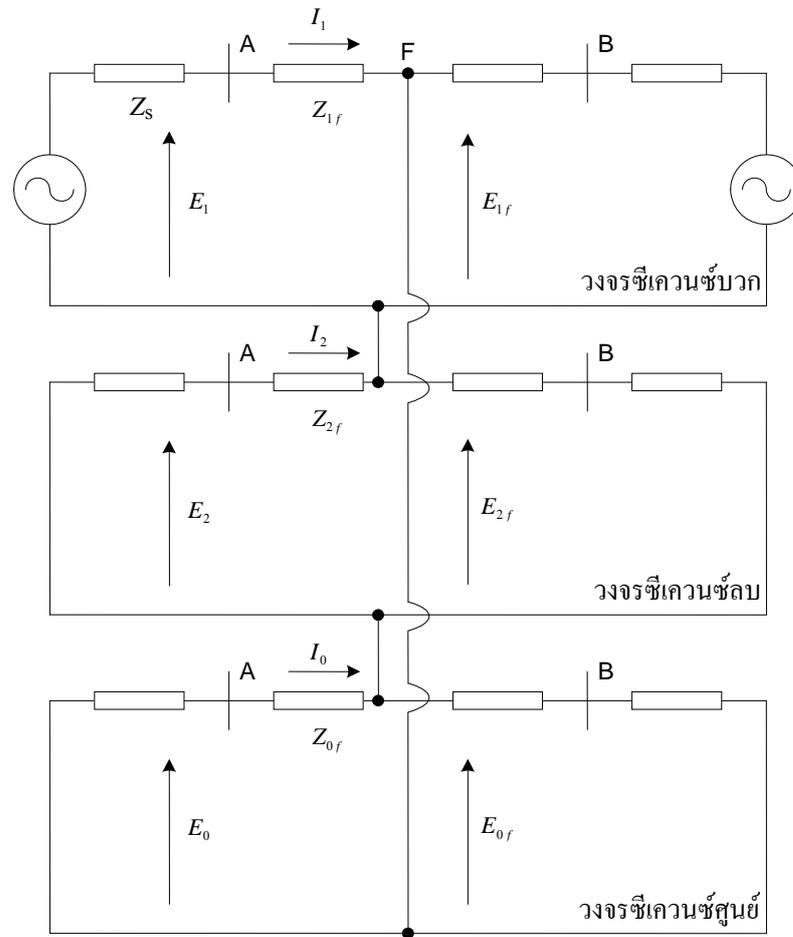
และ  $I_c = I_0 + a I_1 + a^2 I_2 = a I_1$

จะได้ว่า  $\frac{E_a - E_b}{I_a - I_b} = \frac{E_b - E_c}{I_b - I_c} = \frac{E_c - E_a}{I_c - I_a} = Z_{1f}$  (1)

### 1.3.2 ฟอลต์แบบหนึ่งเฟสลงดิน



ภาพที่ 16 ฟอลต์แบบหนึ่งเฟสลงดิน



ภาพที่ 17 การเชื่อมต่อของวงจรในแต่ละซีควเอนซ์เมื่อเกิดฟอลต์แบบ หนึ่งเฟสลงดิน

สำหรับการลัดวงจรที่เฟส A กับดินที่จุด F ในภาพที่ 16 จะสามารถแทนด้วยวงจรสมมูล ซึ่งมีทั้งวงจรซีควเอนซ์บวก (Positive Sequence Network), วงจรซีควเอนซ์ลบ (Negative Sequence Network) และวงจรซีควเอนซ์ศูนย์ (Zero Sequence Network) ต่ออนุกรมที่จุด F ดังในภาพที่ 17

จากภาพที่ 17 จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสดังนี้

$$E_{1f} = E_1 - Z_{1f}I_1$$

$$E_{2f} = E_2 - Z_{2f}I_2$$

$$E_{0f} = E_0 - Z_{0f}I_0$$

แรงดันที่เฟส A สามารถเขียนอยู่ในรูปองค์ประกอบสมมาตร ซึ่งจะมีค่าเป็นศูนย์ด้วยนั่นคือ

$$E_{af} = E_{1f} + E_{2f} + E_{0f} = 0$$

$$E_{af} = E_1 - Z_{1f}I_1 + E_2 - Z_{1f}I_2 + E_0 - Z_{0f}I_0 = 0$$

$$E_{af} = (E_0 + E_1 + E_2) - Z_{1f}(I_1 + I_2) - Z_{0f}I_0 = 0$$

$$E_{af} = E_a - Z_{1f}I_a - (Z_{0f} - Z_{1f})I_0 = 0$$

เมื่อ  $I_a = I_0 + I_1 + I_2$

กำหนดให้

$$I_a = I_a + \frac{Z_{0f} - Z_{1f}}{Z_{1f}} I_0$$

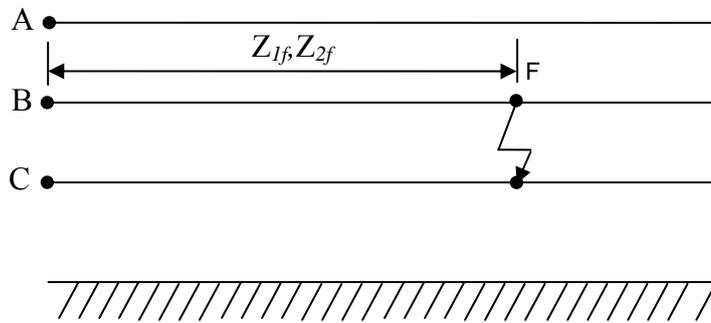
$$I_a = I_a + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} I_0 = I_a + mI_0$$

จะได้  $\frac{E_a}{I_a} = Z_{1f} = \frac{E_a}{I_a + mI_0}$  (2)

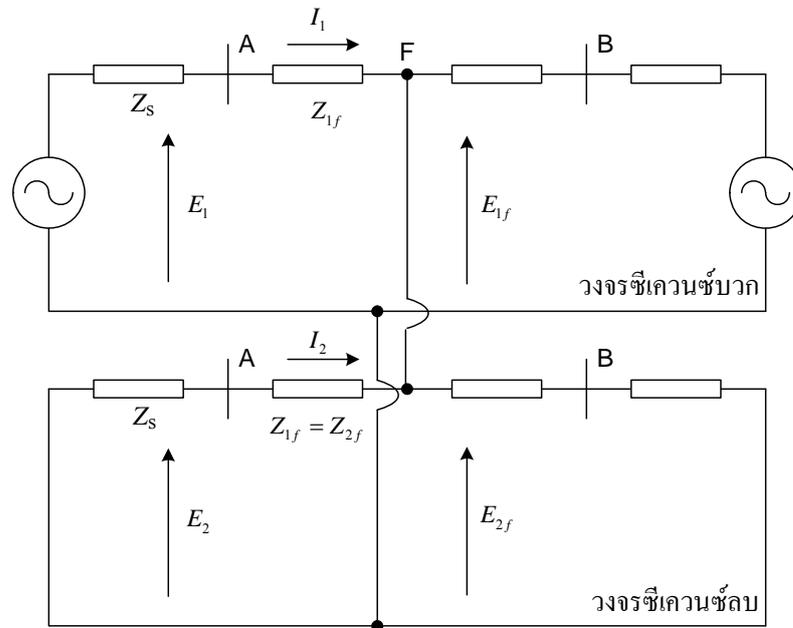
และ  $m = (Z_0 - Z_1)/Z_1$

เมื่อ  $m$  เป็นตัวชดเชยกระแสเฟส (Compensation Factor) ที่เป็นผลมาจากการเชื่อมต่อร่วม (Mutual Coupling) ระหว่างเฟสที่เกิดการลัดวงจรและเฟสที่ไม่เกิดการลัดวงจร

1.3.3 ฟอลต์แบบ เฟส-เฟส



ภาพที่ 18 ฟอลต์แบบ เฟส-เฟส



ภาพที่ 19 วงจรสมมูลของฟอลต์แบบ เฟส-เฟส

แรงดันที่จุด F สำหรับในวงจรซีเควนซ์บวกและวงจรซีเควนซ์ลบมีค่าเท่ากันดังนี้

$$E_{1f} = E_{2f} = E_1 - Z_{1f}I_1 = E_2 - Z_{2f}I_2$$

จัดรูปแบบใหม่ได้เป็น

$$\frac{E_1 - E_2}{I_1 - I_2} = Z_{1f}$$

จาก

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{a0} \\ E_{a1} \\ E_{a2} \end{bmatrix}$$

$$E_b = E_{a0} = a^2 E_{a1} + a E_{a2}$$

$$E_c = E_{a0} = a E_{a1} + a^2 E_{a2}$$

$$E_b - E_c = (a^2 - a)(E_{a1} - E_{a2}) = (a^2 - a)(E_1 - E_2)$$

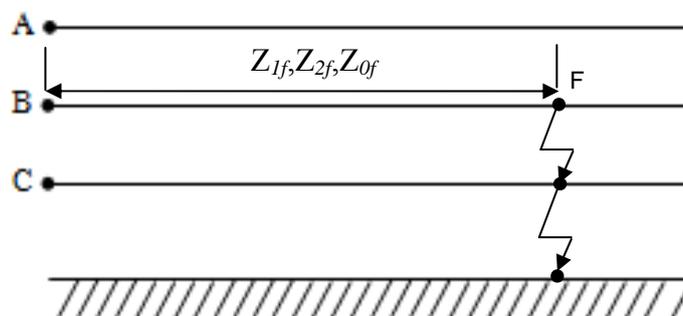
$$I_b - I_c = (a^2 - a)(I_1 - I_2)$$

$$\therefore \frac{E_b - E_c}{I_b - I_c} = \frac{E_1 - E_2}{I_1 - I_2} = Z_{1f}$$

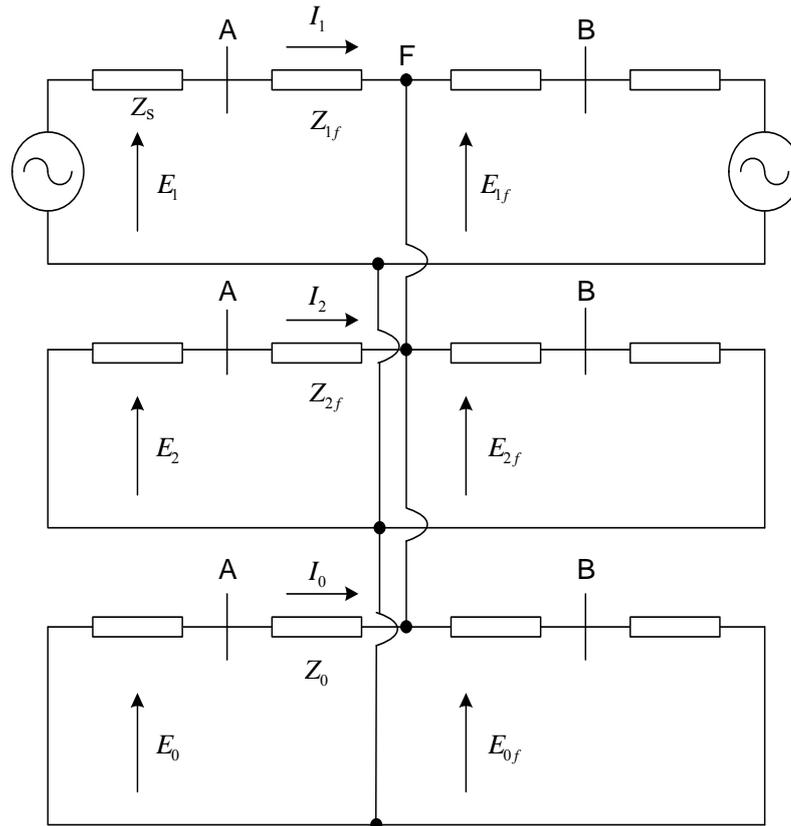
(3)

จากสมการที่ (3) จะพบว่าในกรณีที่เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟส เมื่อใช้แรงดันระหว่างเฟส ที่เกิดการลัดวงจรกับผลต่างของกระแสในสองเฟสนั้นจะสามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์ซีเควนซ์บวกได้

### 1.3.4 ฟอลต์แบบ เฟส-เฟส-ลงดิน



ภาพที่ 20 ฟอลต์แบบ เฟส-เฟส-ลงดิน



ภาพที่ 21 วงจรสมมูลของฟอลต์แบบ เฟส-เฟส-ลงดิน

เมื่อเกิดการลัดวงจรระหว่างเฟส B-C และลงดิน ที่จุด F ดังในภาพที่ 21 จะสามารถแทนด้วยวงจรสมมูล โดยมีทั้งซีเควนซ์บวก วงจรซีเควนซ์ลบ และวงจรซีเควนซ์ศูนย์ ต่อขนานที่จุด F ดังในภาพที่ 21

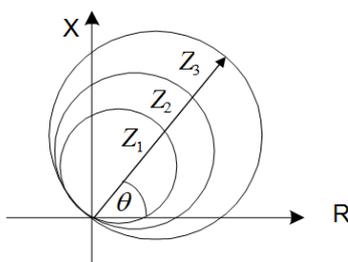
สมการที่ (3) ยังคงใช้ได้สำหรับรูปที่ 21 ดังนั้นสำหรับกรณีการลัดวงจรแบบนี้ เมื่อใช้แรงดันสายระหว่างเฟสที่ลัดวงจร กับผลต่างของกระแสในสองเฟสนั้น จะสามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์ซีเควนซ์บวกได้เช่นเดียวกัน ดังในสมการที่ (4)

$$\frac{E_b - E_c}{I_b - I_c} = \frac{E_1 - E_2}{I_1 - I_2} = Z_{1f} \tag{4}$$

## 2. จำลองการทำงานของรีเลย์โดยใช้คอมพิวเตอร์

2.1 นำการศึกษาในข้อ 1.1 ทำการจำลองในคอมพิวเตอร์ ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink เพื่อเปรียบเทียบว่าโปรแกรมที่มีข้อมูลของรีเลย์ระยะทางยี่ห้อมต่าง ๆ กับรีเลย์ที่ถูกเขียนโปรแกรมขึ้น โดยผู้ทำการวิจัยมีความใกล้เคียงกันหรือไม่และจะต้องปรับปรุงในส่วนใดบ้าง

จากการศึกษาพบว่ารีเลย์ระยะทางชนิดโมห์มีใช้กันมากในการป้องกันสายส่งจากการเกิดฟอลต์ในทุกกรณี คือ สามเฟส, เฟส-เฟส, เฟส-เฟส-ลงดิน และเฟส-ลงดิน



ภาพที่ 22 Mho Characteristic

รีเลย์ระยะทาง สามารถทำงานได้โดยอาศัยสัญญาณแรงดันและกระแสของแต่ละเฟสในการคำนวณเปรียบเทียบเพื่อให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งระยะทางจากจุดที่พิจารณาถึงจุดที่เกิดฟอลต์ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 รีเลย์จะทำงานเมื่อค่าอิมพีแดนซ์ที่ตรวจวัดได้ มีขนาดลดลงจนเข้าสู่ภายในขอบเขตคุณลักษณะของรีเลย์

ตารางที่ 1 สมการอิมพีแดนซ์ที่ใช้ในการคำนวณเมื่อเกิดฟอลต์ชนิดต่าง ๆ

ชนิดของฟอลต์	สมการอิมพีแดนซ์
A-B-C , A-B-C to G	$\frac{E_a}{I_a} = \frac{E_b}{I_b} = \frac{E_c}{I_c}$
A-B , A-B to G	$\frac{E_a - E_b}{I_a - I_b}$
B-C , B-C to G	$\frac{E_b - E_c}{I_b - I_c}$
C-A , C-A to G	$\frac{E_c - E_a}{I_c - I_a}$
A to G	$\frac{E_a}{I_a + mI_0}$
B to G	$\frac{E_b}{I_b + mI_0}$
C to G	$\frac{E_c}{I_c + mI_0}$

เมื่อ  $m$  คือ  $(Z_0 - Z_1)/Z_1$

เมื่อทราบถึงสมการที่ใช้ในคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของพอลท์ในแต่ละชนิดแล้วก็นำมา ออกแบบวงจรเพื่อทำการจำลองใน Matlab/Simulink พร้อมกับเขียน โปรแกรม m-file เพื่อสร้าง กราฟคุณลักษณะ R-X ของรีเลย์ทั้งสองชนิดที่ทำการจำลองรวมไปถึงการสร้างเส้นทางเดินของ อิมพีแดนซ์ในขณะที่เกิดพอลท์ด้วย ค่าสัญญาณแรงดัน และกระแสที่รีเลย์ระยะทางใช้ในการทำงาน จะพิจารณาที่ความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) ซึ่งเท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์ เท่านั้น โดยมีอัตราการ สุ่ม ( Sampling Rate) 1 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) ซึ่งใช้วิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์ (Fourier analysis) ในการ วิเคราะห์ โดยที่  $f(t)$  สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier series) ได้ดังสมการ (5)

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) \quad (5)$$

$$\text{เมื่อ } a_n = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t f(t) \cos(n\omega t) dt \quad (6)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t f(t) \sin(n\omega t) dt \quad (7)$$

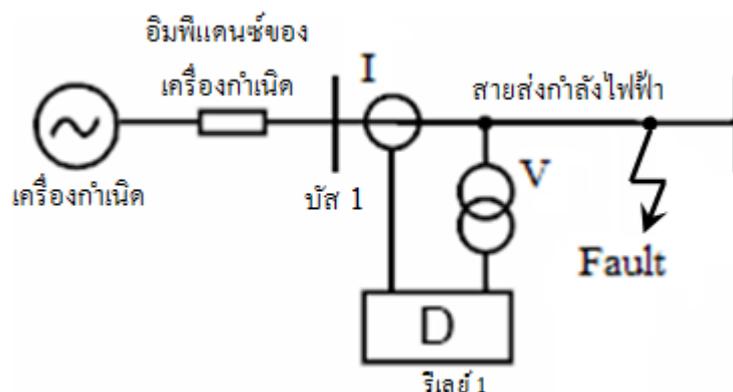
$$T = 1 / f_1 \quad (8)$$

เมื่อ  $f_1$  คือ ความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency)

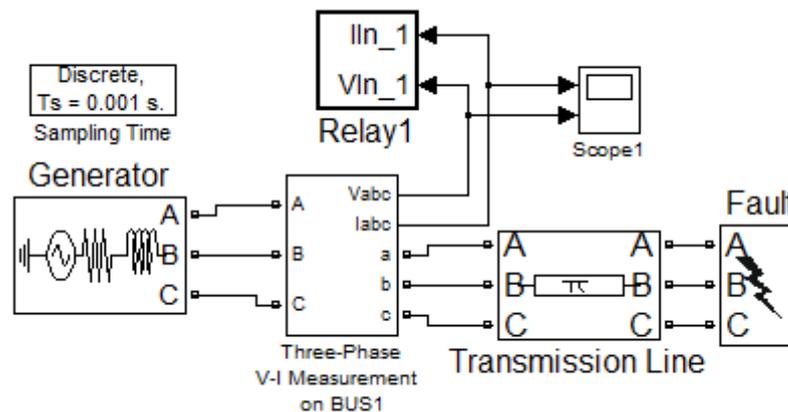
### 2.1.1 ทำการจำลองด้วยสายส่งวงจรเดียว

ระบบที่ใช้จำลองการทำงานสร้างขึ้นจากสายส่งวงจรเดียวดังในภาพที่ 23 และสร้างวงจร ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ดังในภาพที่ 24 โดยมีค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่ทำการจำลองคือ  $10.25+j31.42 \Omega$  และทำการเซตคั้งรีเลย์โดยมีค่าอิมพีแดนซ์ตามโซนต่าง ๆ ดังนี้ โซน 1 มีการเซตคั้ง ค่าของอิมพีแดนซ์ที่ 85% ของความยาวสายส่งคือ  $8.71+j26.69 \Omega$  (ทำงานที่เวลาทันทีทันใด), โซน 2 มีการเซตคั้งค่าของอิมพีแดนซ์ที่ 120% ของความยาวสายส่งคือ  $12.29+j37.68 \Omega$  (หน่วงเวลา ทำงาน 0.3 วินาที) และ โซน 3 มีการเซตคั้งค่าของอิมพีแดนซ์เพื่อจะให้การป้องกันสำรองแก่สายส่ง ที่อยู่ถัดไปคือ 100% ของสายส่งที่ติดตั้งรีเลย์บวกกับ 120% ของสายส่งชุดถัดไปในที่นี้ให้มี พารามิเตอร์และความยาวของสายเท่ากับสายส่งชุดแรกคั้งนั้นการเซตคั้งค่าของอิมพีแดนซ์ใน โซน 3 คือ  $22.54+j69.08 \Omega$  (หน่วงเวลาทำงาน 1 วินาที) การสร้างวงจรเพื่อใช้จำลองใน Matlab/Simulink

นั้นจะติดตั้งรีเลย์ระยะทางในที่นี้ใช้ชื่อว่ารีเลย์ 1 (Relay 1) ที่ใช้ในการพิจารณาที่ Bus1 ดังแสดงในภาพที่ 24 กำหนดให้เกิดฟอลท์ขึ้นในระบบ ที่เวลา 0.015 วินาที ทำการจำลองโดยมีอัตราการสุ่ม 1 กิโลเฮิร์ตซ์ และสมมุติให้เกิดฟอลท์ทุกชนิดดังในตารางที่ 1 และเก็บผลการทดลอง (การทริปของรีเลย์) ที่ได้จาก m-file บันทึกในตารางที่ 2



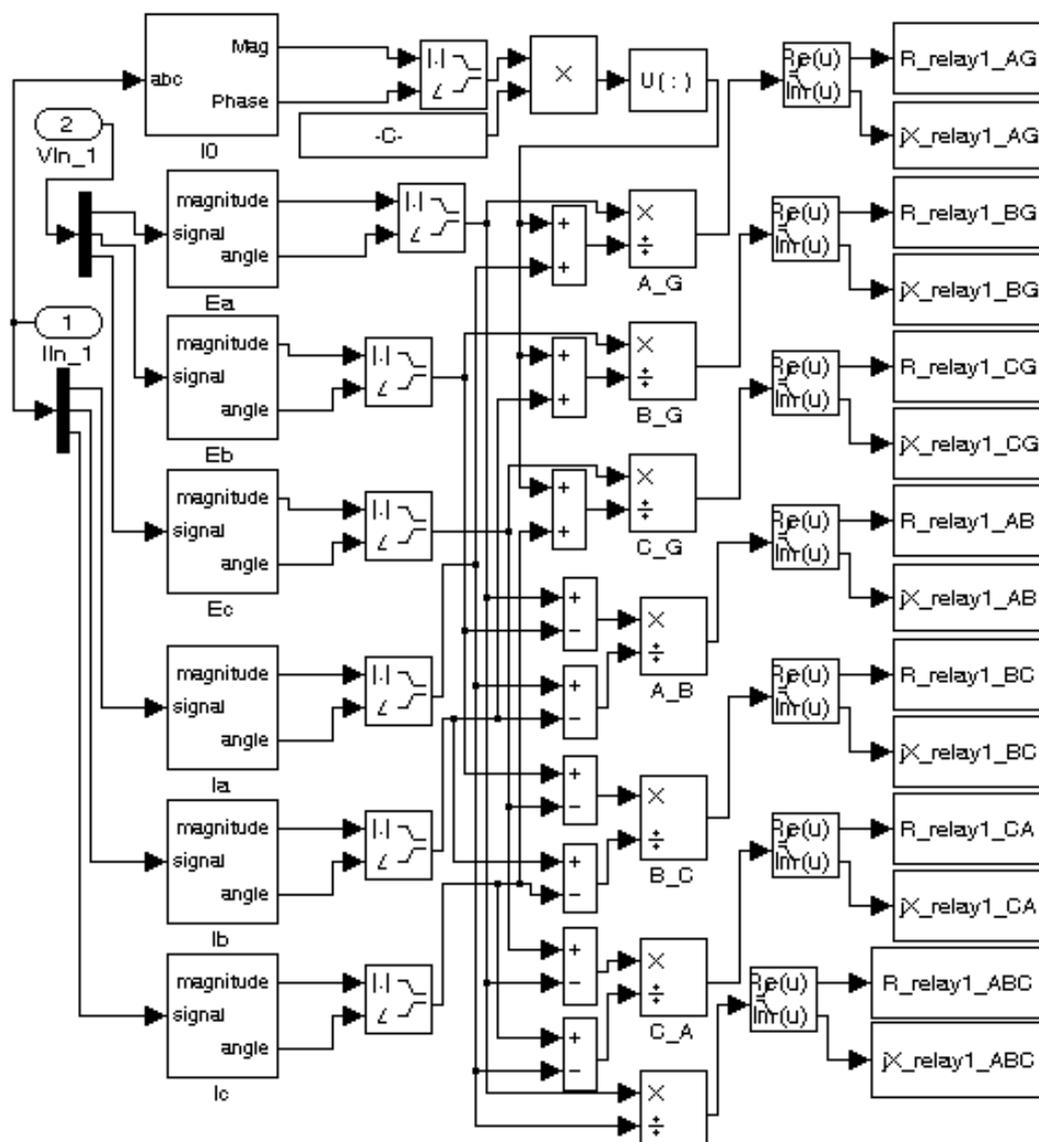
ภาพที่ 23 ระบบสายส่งวงจรเดี่ยวที่ใช้จำลองการทำงาน



ภาพที่ 24 วงจรในโปรแกรม Matlab/Simulink ที่ใช้จำลองการทำงาน

วงจรในโปรแกรม Matlab/Simulink ที่ใช้จำลองการทำงานของรีเลย์ระยะทางดังในภาพที่ 24 นั้นส่วนของรีเลย์ระยะทางที่ได้สร้างขึ้นจะอยู่ในบล็อกของ Relay 1 ซึ่งภายในของบล็อกดังกล่าวได้แสดงไว้ในภาพที่ 25 ซึ่งประกอบด้วยส่วนรับค่าแรงดันและกระแสที่รับมาจากเครื่องมือวัด 3 เฟสที่ติดตั้งไว้ที่บัส 1 หลังจากนั้นจะทำการใช้วิธีการวิเคราะห์หัพูเรียร์ เพื่อพิจารณาที่ความถี่มูลฐานซึ่งเท่ากับ 50 Hz เท่านั้น จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณตามสมการการเกิดฟอลท์แบบต่าง ๆ ดังใน

ตารางที่ 1 สรุบท้ายคือเอาค่าที่ได้จากการคำนวณเก็บไว้ในหน่วยความจำเพื่อนำไปใช้แสดงผลและวาดรูปกราฟคุณลักษณะ R-X และทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางต่อไป



ภาพที่ 25 รีเลย์ระยะทางที่ใช้จำลองการทำงาน

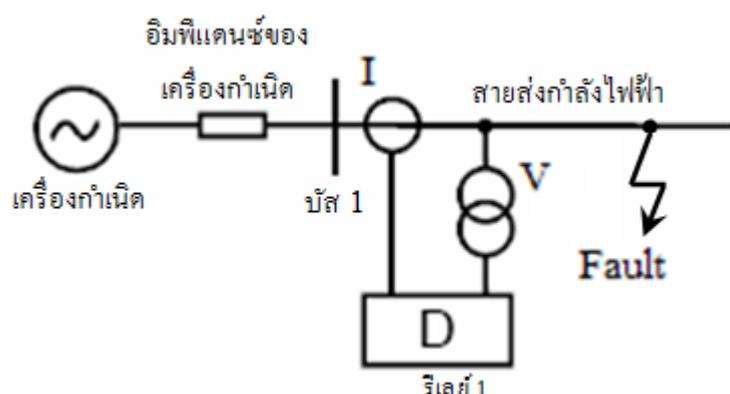
ตารางที่ 2 ผลการจำลองรีเลย์ระยะทางที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

ผลที่ได้ (เอาต์พุต)	ชนิดของฟอล์ทที่ใช้จำลอง ที่เลือกในกล่องเครื่องมือของ Simulink									
	ABC	AB	BC	CA	ABG	BCG	CAG	AG	BG	CG
ABC	ON									
AB		ON			ON					
BC			ON			ON				
CA				ON			ON			
ABG		ON			ON					
BCG			ON			ON				
CAG				ON			ON			
AG								ON		
BG									ON	
CG										ON

จากผลการจำลองในตารางที่ 2 พบว่ารีเลย์ระยะทางที่สร้างขึ้นในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ด้วยการสั่งให้เกิดฟอล์ทที่ขอบโซน 1 ซึ่งมีการเซตค่างของอิมพีแดนซ์ที่ 85% ของความยาวสายส่ง คือ  $8.71+j26.69 \Omega$  (ทำงานที่เวลาทันทีทันใด) และทำการจำลองการเกิดฟอล์ททุกชนิด สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามสมการที่ได้เขียนลงไปในบล็อก รีเลย์ 1 ( ภาพที่ 25) เช่น ถ้าจำลองในกรณีของฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส โดย ฟอล์ทที่เฟส C และ A ที่ขอบของการเซตค่างรีเลย์ที่โซน 1 เอาต์พุตสั่งทริปที่ได้จากการเขียน m-file จะมีคำสั่ง ON ในช่องที่มีการแรงเงา และพบว่าเราสามารถสร้างรีเลย์ระยะทางที่มีกราฟคุณลักษณะต่าง ๆ กันได้โดยเขียนสมการคณิตศาสตร์ลงใน m-file ของ Matlab ดังที่จะได้กล่าวต่อไป

## 2.1.2 จำลองรีเลย์ระยะทางชนิดโหม้ด้วยสายส่งวงจรเดี่ยว โดยไม่มีความต้านทาน ฟอล์ท

การจำลองจะใช้วงจรสายส่งดังแสดงในภาพที่ 26 แต่ทำการจำลองโดยเพิ่ม โชนป้องกันเป็น 3 โชน ทำการเซตตั้งรีเลย์โดยมีค่าอิมพีแดนซ์ตามโชนต่าง ๆ ดังนี้ โชน 1 มีการเซตตั้งค่าของอิมพีแดนซ์  $8.71+j26.69 \Omega$  (ทำงานที่เวลาทันทีทันใด) โชน 2 มีการเซตตั้งค่าของอิมพีแดนซ์  $12.29+j37.68 \Omega$  (หน่วงเวลาทำงาน 0.3 วินาที) และโชน 3 มีการเซตตั้งค่าของอิมพีแดนซ์  $22.54+j69.08 \Omega$  (หน่วงเวลาทำงาน 1 วินาที) โดยที่ตารางของการเซตตั้งที่แสดงค่าเซตตั้งในรูปแบบของโพลาร์ (Polar Form) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 หลังจากที่ได้ผลการจำลองแล้ว จะนำผลที่ได้ส่งไปยังโปรแกรม m-file เพื่อประมวลผลและสร้างกราฟทางเดินของอิมพีแดนซ์ต่อไป



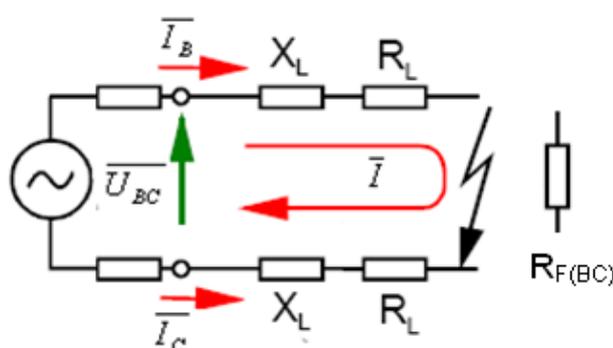
ภาพที่ 26 ระบบสายส่งวงจรเดี่ยวที่ใช้จำลองการทำงาน

ตารางที่ 3 ค่าเซตตั้งของรีเลย์ระยะทางชนิดโหม้ที่ใช้ในการจำลอง

	Z ( $\Omega$ )	Angle ( $^{\circ}$ )
Zone-1	28.08	71.92
Zone-2	39.64	71.92
Zone-3	72.67	71.92

โดยในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปในการศึกษาและวิเคราะห์การเกิดฟอล์ทชนิดเฟส-เฟส การวิเคราะห์จะหาสาเหตุของการตรวจจับฟอล์ทผิดพลาดไม่ว่าจะเป็นไปในกรณีของการตรวจจับฟอล์ทไม่พบ หรือการตรวจจับฟอล์ทพบแต่เกิดความคลาดเคลื่อนไม่ตรงกับโชนที่เกิดฟอล์ท ซึ่งเกิดจากมีค่าความต้านทานฟอล์ทเกิดขึ้นในขณะที่เกิดฟอล์ทชนิดเฟส-เฟสไม่ว่าความ

ต้านทานนั้นเกิดจาก สัตว์ กิ่งไม้ หรือความต้านทานของอากาศก็ตาม ซึ่งเป็นเหตุผลหลักที่ทำให้ทางเดินอิมพีแดนซ์ (Trajectory of Impedance) ขยายออกไปตามแนวแกน R ของ ไลอะแกรมแบบ R-X และถ้าค่าความต้านทานอาจมีมากพอที่จะทำให้ทางเดินอิมพีแดนซ์ออกนอกโซนป้องกัน ซึ่งความจริงจะต้องอยู่ใน โซนป้องกันทำให้คำสั่งทริปที่ออกจากรีเลย์เพื่อไปทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์ผิดพลาด และทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอแนวความคิดที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการขยายเขตป้องกันออกไปเมื่อรีเลย์มีการตรวจพบความต้านทานฟอล์ท ดังจะได้อธิบายโดยละเอียดต่อไป



ภาพที่ 27 ลัดวงจรที่เฟส BC โดยมีความต้านทานฟอล์ท

โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณให้พิจารณาจากภาพที่ 27 เกิดการลัดวงจรที่เฟส BC และมีความต้านทานฟอล์ทหรือ  $R_{F(BC)}$  เกิดขึ้นทำให้ค่าอิมพีแดนซ์รวมมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น ดังสมการซึ่งต่อเนื่องมาจากสมการที่ (3) และ (4) ต่อไปนี้

$$Z_{BC} = \frac{U_B - U_C}{I_B - I_C} \quad (9)$$

$$U_{BC} = U_B - U_C = 2(R_L \cdot I + jX_L \cdot I) + R_{F(BC)} I \quad (10)$$

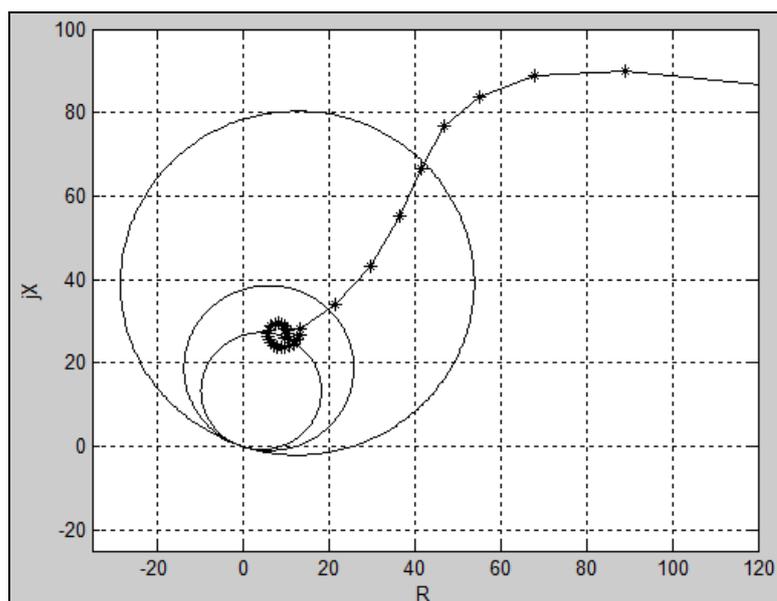
$$I_C = -I_B = I \quad (11)$$

$$Z_{BC} = \frac{2(R_L \cdot I + jX_L \cdot I) + R_{F(BC)} \cdot I}{2I} = R_L + jX_L + \frac{R_{F(BC)}}{2} \quad (12)$$

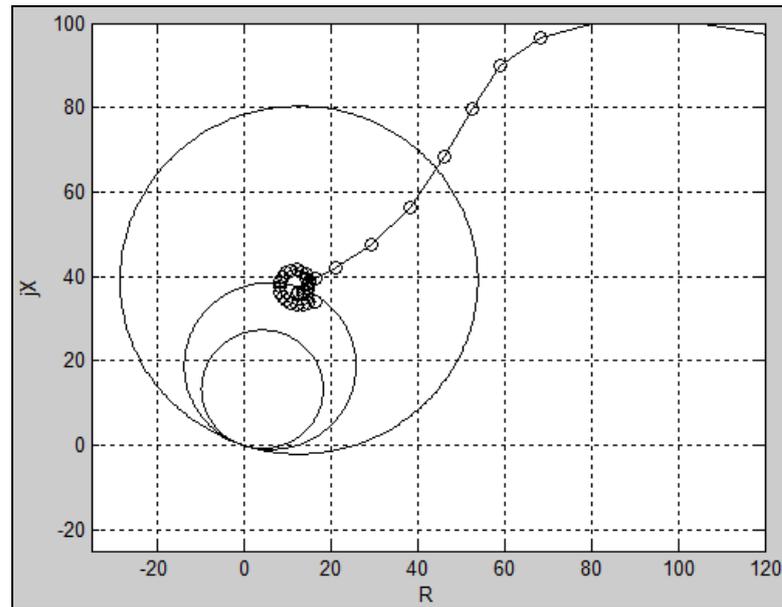
และสมการที่ใช้ในการคำนวณในการพอลัทชนิด เฟส-เฟส และ เฟส-เฟส-ลงดินในทุกกรณี ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4 ส่วนผลการจำลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 4 สมการที่ใช้ในการคำนวณในการพอลัทชนิด เฟส-เฟส และ เฟส-เฟส-ลงดิน

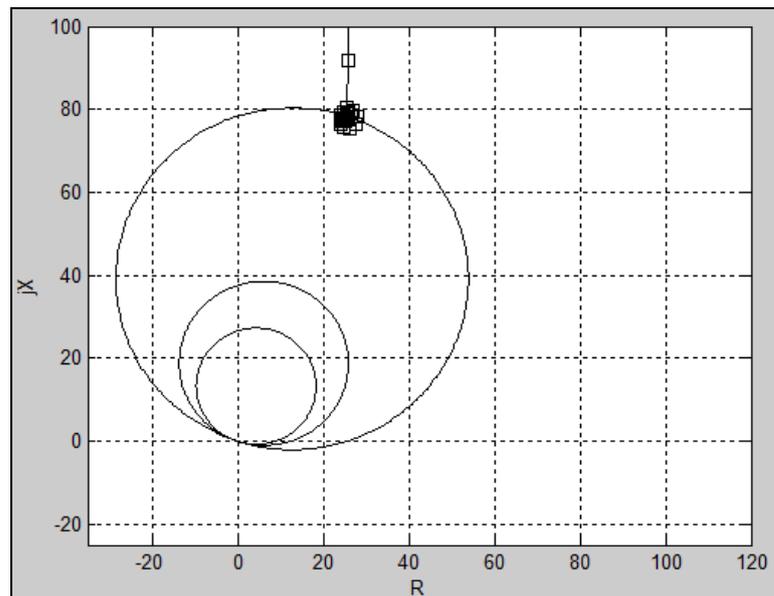
Type of Faults	Impedance Equations
AB, ABG	$\frac{E_a - E_b}{I_a - I_b}$
BC, BCG	$\frac{E_b - E_c}{I_b - I_c}$
CA, CAG	$\frac{E_c - E_a}{I_c - I_a}$



ภาพที่ 28 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของพอลัทที่เฟส AB ที่  $R_{F(AB)} = 0 \Omega$  ในขอบโซน 1



ภาพที่ 29 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของพอลท์ที่เฟส BC ที่  $R_{F(BC)} = 0 \Omega$  ในขอบโซน 2



ภาพที่ 30 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของพอลท์ที่เฟส CA ที่  $R_{F(CA)} = 0 \Omega$  ในขอบโซน 3

จากภาพที่ 28, 29 และ 30 เป็นรูปที่ได้จากการจำลองด้วย Matlab/Simulink ซึ่งเก็บผลไว้ในหน่วยความจำ แล้วนำไปวาดรูปด้วยการเขียน m-file ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ ซึ่งทำการจำลองโดยการทำให้เกิดพอลท์ที่เฟส A กับ B ในขอบโซน 1 B กับ C ในขอบโซน 2 และ C กับ A ในขอบโซน 3 ตามลำดับ โดยค่าความต้านทานพอลท์ที่ใส่ในกล่องเครื่องมือ (Tool Block) ของ พอลท์ ใน

Simulink มีค่าเท่ากับ  $0 \Omega$  ( $R_F = 0 \Omega$ ) ซึ่งหมายความว่าไม่มีค่าความต้านทานฟอล์ทเกิดขึ้นในขณะที่ฟอล์ทนั่นเอง พบว่ารีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่สร้างและจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink มีการทำงานและทางเดินของอิมพีแดนซ์ที่วิ่งเข้ามาในโซนป้องกัน ซึ่งเป็นไปตามสมการในตารางที่ 4 ส่วนคำสั่งทริปที่ได้จากเอาต์พุตของรีเลย์ที่เขียนจาก m-file แสดงไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการจำลองของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่ความต้านทานฟอล์ทเท่ากับ  $0 \Omega$  ( $R_F = 0 \Omega$ )

ผลที่ได้ (เอาต์พุต)	ชนิดของฟอล์ทที่ใช้จำลองและการเชื่อมต่อโซนป้องกัน ที่เลือกในกล่องเครื่องมือของ Simulink								
	AB,Z1	BC,Z1	CA,Z1	AB,Z2	BC,Z2	CA,Z2	AB,Z3	BC,Z3	CA,Z3
AB,Zone1	ON								
BC,Zone1		ON							
CA,Zone1			ON						
AB,Zone2				ON					
BC,Zone2					ON				
CA,Zone2						ON			
AB,Zone3							ON		
BC,Zone3								ON	
CA,Zone3									ON

จากผลการจำลองดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5 พบว่า ในขณะที่เกิดฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส รีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่สร้างขึ้นจาก Matlab /Simulink จะทำงานตามสมการการเกิดฟอล์ท คือ มีคำสั่งทริปออกมาที่เอาต์พุตของ m-file ตรงตามชนิดของฟอล์ทและตรงตามโซนที่เกิดฟอล์ท เช่น ถ้าจำลองในกรณีของฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส โดย ฟอล์ทที่เฟส C และ A ที่ 120% ของความยาวสาย หรือที่ขอบของการเชื่อมต่อรีเลย์ที่โซน 2 เอาต์พุตสั่งทริปที่ได้จากการเขียน m-file จะมีคำสั่ง ON ในช่องที่มีการแรเงา

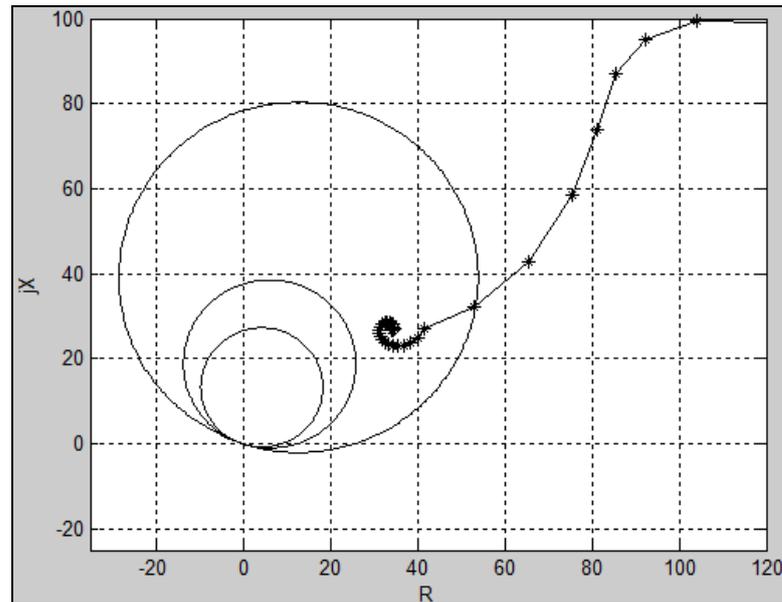
### 2.1.3 จำลองรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ด้วยสายส่งวงจรเดี่ยวโดยมีความต้านทาน ฟอล์ท

ทำการจำลองเหมือนในข้อ 2.1.2 แต่ทำการใส่ค่าความต้านทานฟอล์ทเข้าไปในกล่องเครื่องมือของ ฟอล์ท ใน Simulink โดยค่าความต้านทานของฟอล์ทระหว่างฟอล์ทชนิด เฟส-เฟส มีค่าเท่ากับ  $50 \Omega$  ( $R_F=50 \Omega$ ) ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นการเซตตั้งความต้านทานฟอล์ทที่สูงสุดของรีเลย์ยี่ห้อ SIEMENS รุ่น 7SA522 ที่เป็นไปตามมาตรฐานของ IEC, ANSI/IEEE, UL และ DIN โดยกำหนดค่าความต้านทานฟอล์ทสูงสุดดังกล่าวไว้  $250 \Omega$  ในกรณีของหม้อแปลงกระแส (CT) 1 A และ  $50 \Omega$  ถ้าหม้อแปลงกระแสเท่ากับ 5A ซึ่งในการทดสอบในงานวิจัยนี้จะทดสอบที่หม้อแปลงกระแส 5A จึงเลือกใช้ความต้านทานฟอล์ทสูงสุดในการจำลองเท่ากับ  $50 \Omega$  และค่าความต้านทานของอิมพีแดนซ์สายส่งรวมกับค่าความต้านทานฟอล์ทในแต่ละเฟส ( $R_F/2=25 \Omega$ ) แสดงไว้ในตารางที่ 6

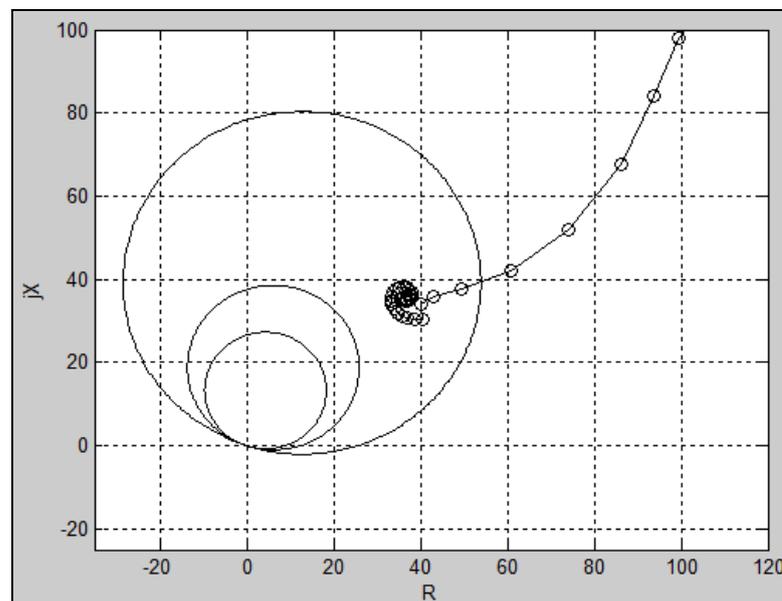
ตารางที่ 6 ค่าความต้านทานของอิมพีแดนซ์สายส่งรวมกับค่าความต้านทานฟอล์ทในแต่ละเฟส ( $R_F/2=25 \Omega$ )

	Z ของสายส่งที่ขอบโซน ( $\Omega$ )	Z ของสายส่งที่ขอบโซนรวมกับค่าความ ต้านทานฟอล์ท ( $\Omega$ )
Zone1	$8.71+j26.69=28.07 \angle 71.92^\circ$	$8.71+j26.69+25=33.71+j26.69=42.99 \angle 38.37^\circ$
Zone2	$12.29+j37.68=39.63 \angle 71.92^\circ$	$12.29+j37.68+25=37.29+j37.68=53.01 \angle 45.29^\circ$
Zone3	$22.54+j69.08=72.66 \angle 71.92^\circ$	$22.54+j69.08+25=47.54+j69.08=83.86 \angle 55.45^\circ$

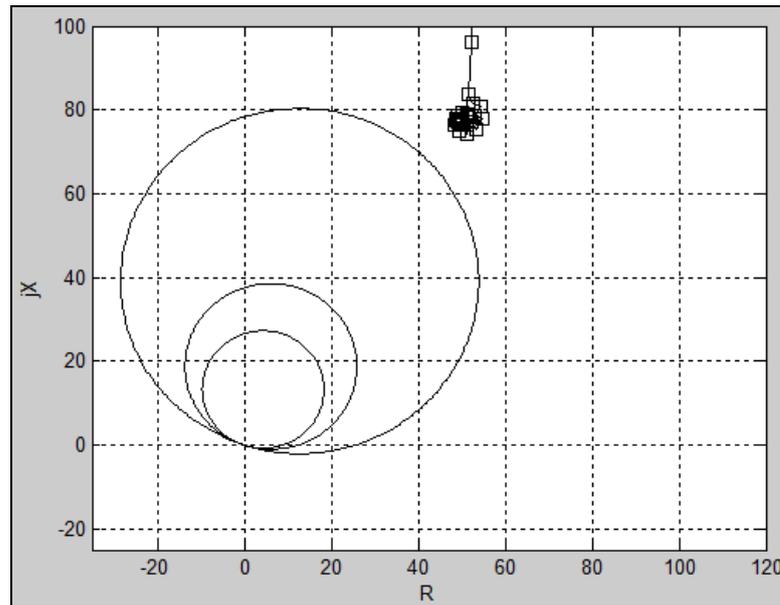
จากตารางที่ 6 เป็นค่าความต้านทานของสายที่เปลี่ยนไปเมื่อเกิดความต้านทานฟอล์ทขึ้นในขณะที่เกิดฟอล์ทแบบเฟส-เฟส โดยการจำลองจะใช้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ขอบของโซนทั้งนี้เพราะว่าถ้ามีความต้านทานเพิ่มขึ้นเล็กน้อยก็จะทำให้เห็นทางเดินของอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนไปออกนอกโซนป้องกันเดิมได้ชัดเจน จะเห็นว่าถ้าเพิ่มค่าความต้านทานฟอล์ทในกล่องเครื่องมือเข้าไป  $50 \Omega$  หรือ  $R_{F(\text{Phase to Phase})} = 50 \Omega$  ( $R_F/2=25 \Omega$ ) จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่ขอบโซนรวมกับค่าความต้านทานฟอล์ทที่มีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 6 และที่สำคัญคือมุมของอิมพีแดนซ์ที่ตรวจจับได้เปลี่ยนไป คือ มีค่าน้อยลงด้วยซึ่งถ้าค่าความต้านทานฟอล์ทที่ใส่เข้าไปในการจำลองมีค่ามากเท่าไรก็ยิ่งทำให้มุมเปลี่ยนไปโดยมีค่าน้อยลงกว่าเดิม



ภาพที่ 31 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของพอลท์ที่เฟส AB ที่  $R_{F(AB)} = 50 \Omega$  รวมกับอิมพีแดนซ์สายส่งใน  
ขอบโซน 1



ภาพที่ 32 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของพอลท์ที่เฟส BC ที่  $R_{F(BC)} = 50 \Omega$  รวมกับอิมพีแดนซ์สายส่งใน  
ขอบโซน 2



ภาพที่ 33 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของฟอล์ทที่เฟส CA ที่  $R_{F(CA)} = 50 \Omega$  รวมกับอิมพีแดนซ์สายส่งใน  
ขอบโซน 3

จากภาพที่ 31 32 และ 33 เป็นรูปที่ได้ จากการจำลองด้วย Matlab/Simulink ซึ่งเก็บผลไว้ในหน่วยความจำแล้วนำไปวาดรูปด้วยการเขียน m-file ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ ซึ่งทำการจำลองโดยการทำให้เกิดฟอล์ทที่เฟส A กับ B ในขอบ โซน 1 B กับ C ในขอบโซน 2 และ C กับ A ในขอบโซน 3 ตามลำดับ โดยค่าความต้านทานฟอล์ทที่ใส่ในกล่องเครื่องมือของฟอล์ท ใน Simulink มีค่าเท่ากับ  $50 \Omega$  ( $R_{F(\text{Phase to Phase})} = 50 \Omega$ ) ซึ่งหมายความว่าเมื่อมีค่าความต้านทานฟอล์ทเกิดขึ้น  $25 \Omega$  ต่อเฟสในขณะฟอล์ทนั่นเอง ซึ่งพบว่ารีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่สร้างและจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink มีการทำงานและทางเดินของอิมพีแดนซ์ที่วิ่งออกนอกโซนป้องกันโดยทางเดินอิมพีแดนซ์ที่ปรากฏจะมีการเปลี่ยนแปลงไปทั้งขนาดและทิศทาง ซึ่งเป็นไปตามสมการในตารางที่ 6 ในส่วนของค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่ขอบโซนรวมกับค่าความต้านทานฟอล์ท ส่วนคำสั่งทริปที่จากเอาต์พุตของรีเลย์ที่เขียนจาก m-file ได้แสดงไว้ในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการจำลองของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่ความต้านทานฟอล์ทต่อเฟสเท่ากับ 25  $\Omega$   
( $R_F = 50/2 \Omega$ )

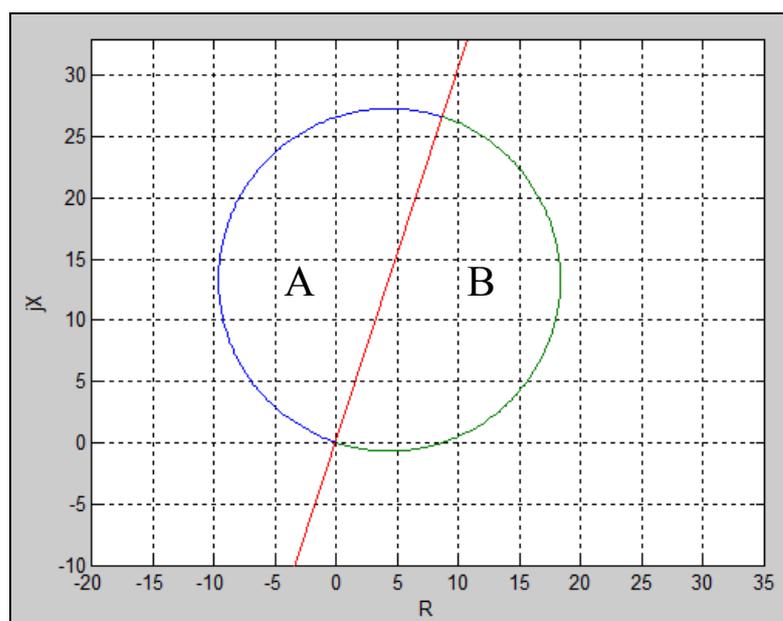
ผลที่ได้ (เอาต์พุต)	ชนิดของฟอล์ทที่ใช้จำลองและการเชื่อมต่อโซนป้องกัน ที่เลือกในกล่องเครื่องมือของ Simulink								
	AB,Z1	BC,Z1	CA,Z1	AB,Z2	BC,Z2	CA,Z2	AB,Z3	BC,Z3	CA,Z3
AB,Zone1									
BC,Zone1									
CA,Zone1									
AB,Zone2									
BC,Zone2									
CA,Zone2									
AB,Zone3	ON			ON					
BC,Zone3		ON			ON				
CA,Zone3			ON			ON			

จากผลการจำลองดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 7 พบว่าเมื่อมีความต้านทานฟอล์ทเกิดขึ้น ในขณะที่เกิดฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส รีเลย์ระยะทางชนิดโมห์จะทำงานโดยการสั่งทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์ผิดพลาด เช่น ถ้าจำลองในกรณีของฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส โดย ฟอล์ทที่เฟส B และ C ที่ 120% ของความยาวสายหรือที่ขอบของการเชื่อมต่อรีเลย์ที่โซน 2 เอาต์พุตสั่งทริปที่ได้จากการเขียน m-file จะไม่มีคำสั่ง ON ในช่องที่มีการแรงแต่จะไปมีคำสั่ง ON ในช่องของโซน 3 แทนเนื่องจากค่าความต้านทานฟอล์ทที่เกิดขึ้นจะไปรวมกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางชนิดโมห์มองเห็นไกลออกไปนั่นเอง

## 2.1.4 จำลองรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะด้วย สายส่งวงจรเดียวโดยมีความต้านทานพอลท์

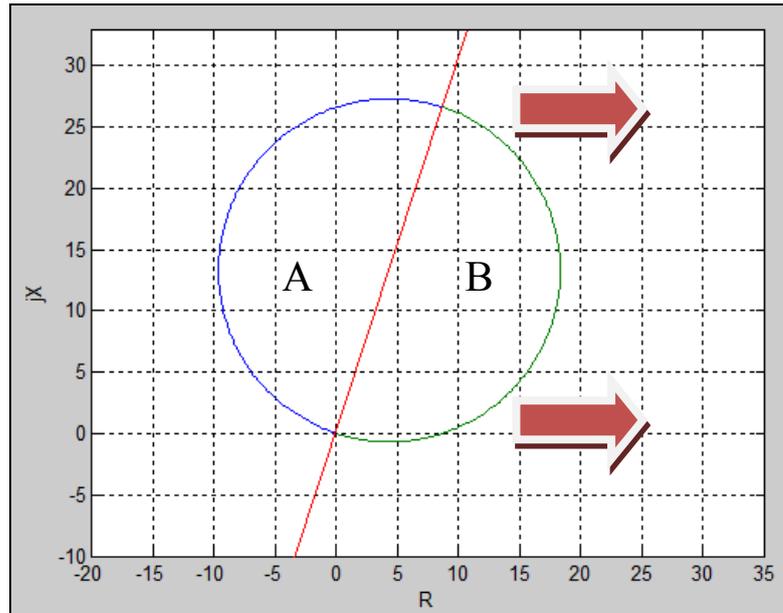
ทำการจำลองเหมือนในข้อ 2.1.3 แต่ได้ทำการเขียน m-file เพื่อปรับปรุงกราฟคุณลักษณะของโมห์ใหม่เพื่อรองรับความต้านทานพอลท์ที่เกิดขึ้นจากทางเดินของอิมพีแดนซ์ซึ่งมีขนาดเพิ่มขึ้นตามขนาดของความต้านทานพอลท์ และออกนอกโซนป้องกันมาทางด้านขวา รีเลย์จึงไม่มีคำสั่งทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์ทั้งที่จริง ๆ แล้วควรจะสั่งทริปเมื่อเกิดพอลท์ การปรับปรุงกราฟแสดงคุณลักษณะดังกล่าวจะมีชื่อเรียกว่า “KU Method” ซึ่งจะใช้วิธีการดังนี้

1. ใช้เส้นของอิมพีแดนซ์แบ่งครึ่งวงกลมของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ออกเป็น 2 ส่วน คือส่วน A และ B ดังแสดงในภาพที่ 34

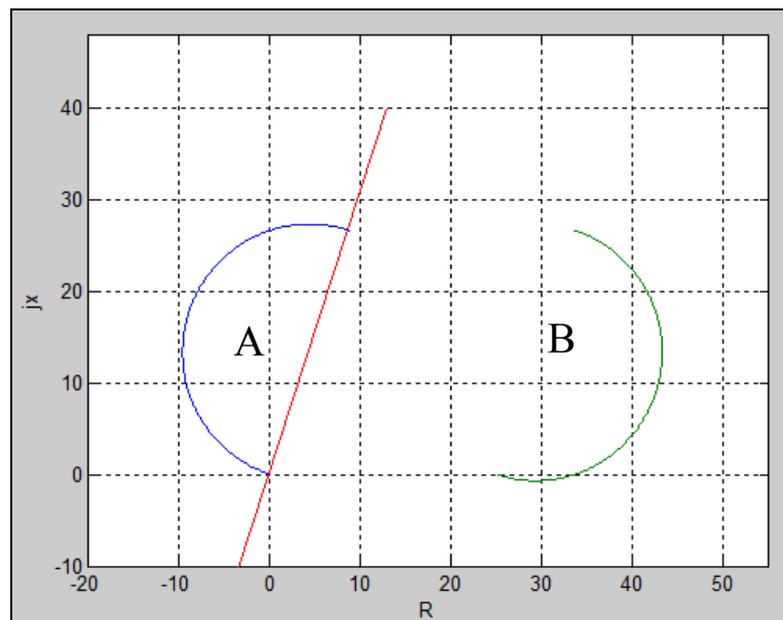


ภาพที่ 34 การแบ่งครึ่งวงกลมของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์

2. ถ้าได้มีการตรวจจับพบว่ามีความต้านทานฟอล์ทเกิดขึ้น ในขณะที่เกิดฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส หรือ เฟส-เฟส-ลงดิน ก็จะทำการขยายเขตป้องกันในส่วนของ B ที่ถูกแบ่งครึ่งออกไปตาม แนวแกน R ทางด้านขวามือ ซึ่งปริมาณที่ได้ขยายออกไปมีค่าเท่ากับค่าที่ได้เซตตั้งของ  $R_F/2$  ในที่นี้ ได้เซตตั้งให้  $R_F/2$  มีค่าเท่ากับ  $25 \Omega$  ดังแสดงในภาพที่ 35 และ 36

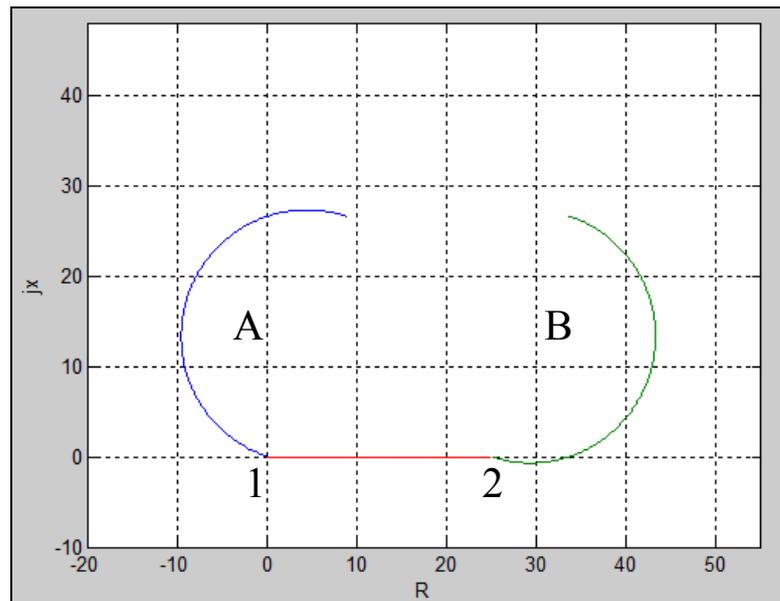


ภาพที่ 35 การขยายโซนป้องกันออกไปทางด้านขวามือของแกน R

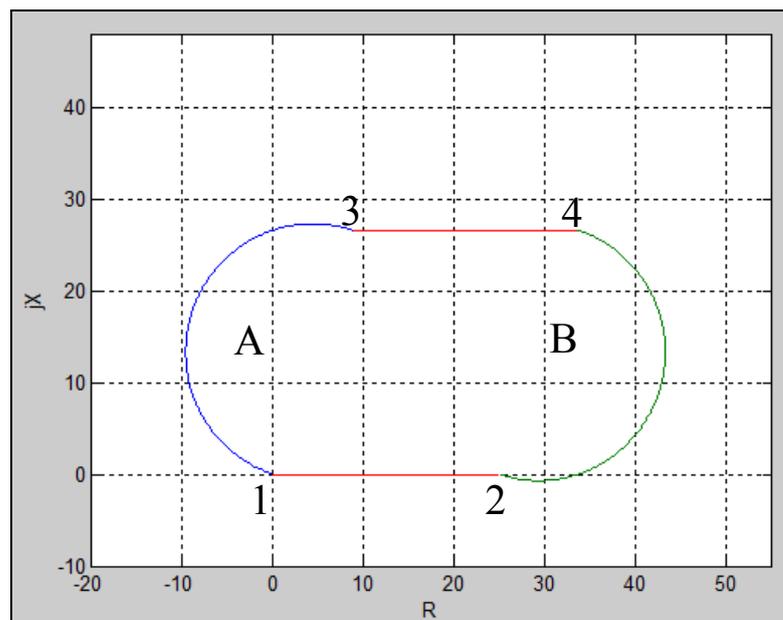


ภาพที่ 36 การขยายโซนป้องกันออกไปทางด้านขวามือของแกน R โดยมีค่าเท่ากับ  $25 \Omega$

3. ทำการลากเส้นตรง 2 เส้นเพื่อสร้างโซนป้องกันใหม่โดยเส้นที่ 1 เริ่มจาก Origin (จุด 1) ลากทับไปกับแนวแกน R โดยมีค่าเท่ากับ  $25 \Omega$  เพื่อไปบรรจบกับครึ่งวงกลม B (จุด 2) ดังแสดงในภาพที่ 37 และเส้นที่ 2 ลากจากค่าเซตตั้งของอิมพีแดนซ์ของสาย (จุด 3) ขนานไปตามแนวแกน R โดยมีค่าเท่ากับ  $25 \Omega$  เพื่อไปบรรจบกับครึ่งวงกลม B (จุด 4) ดังแสดงในภาพที่ 38

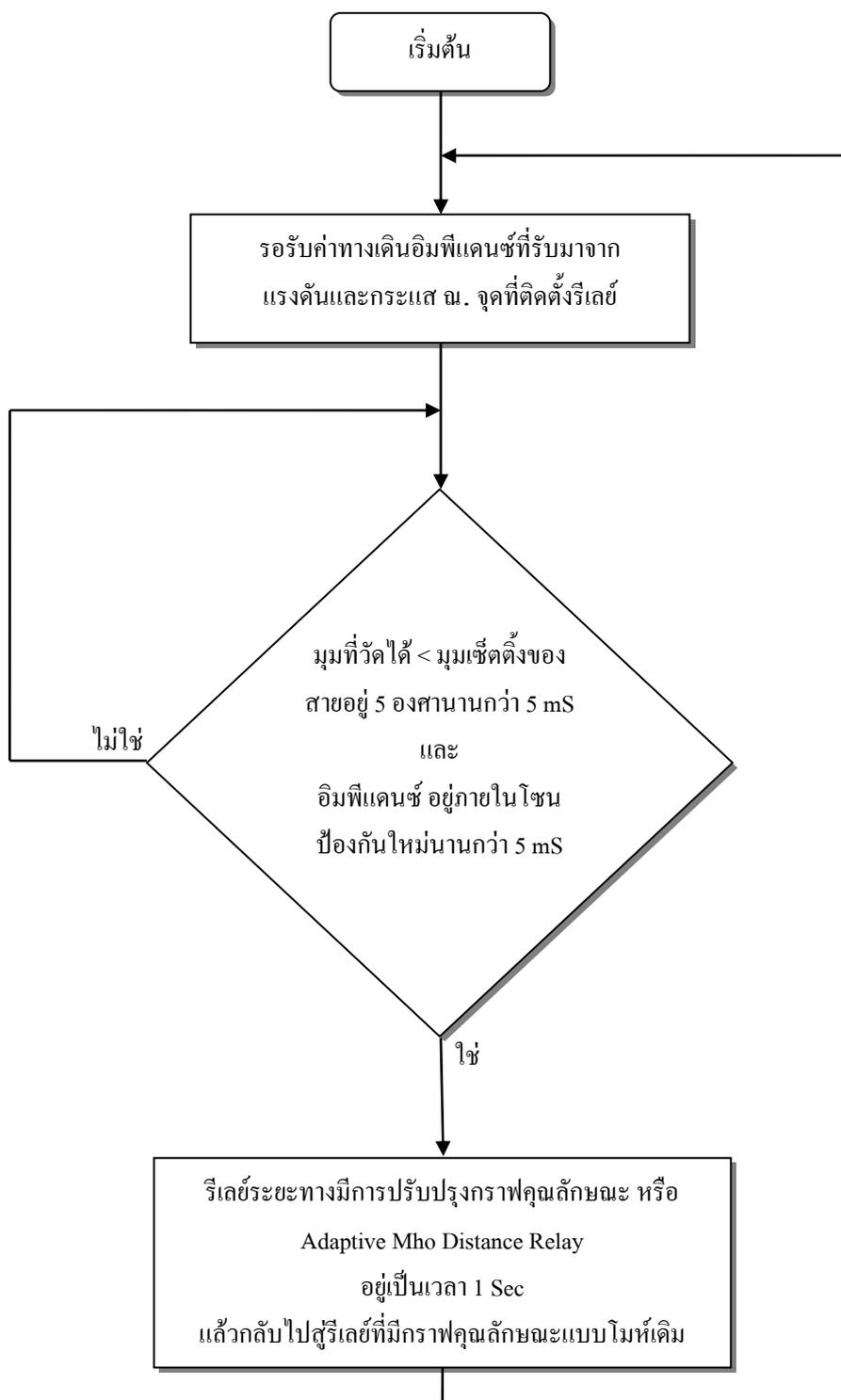


ภาพที่ 37 การสร้างโซนป้องกันใหม่ด้วยการลากเส้นที่ 1



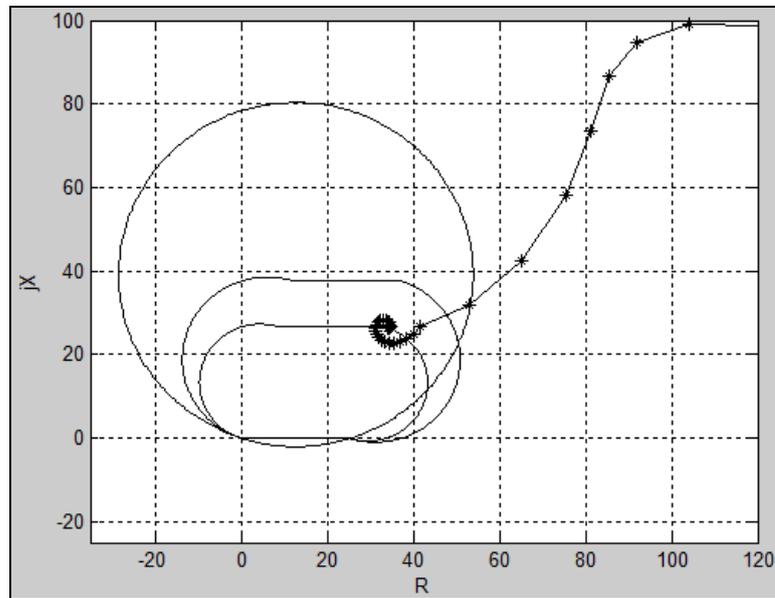
ภาพที่ 38 การสร้างโซนป้องกันใหม่ด้วยการลากเส้นที่ 1

ส่วนการตัดสินใจว่ารีเลย์ระยะทางชนิดโมห์จะมีการปรับปรุงคุณลักษณะ(Adaptive) หรือไม่และเมื่อใดขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังแสดงไว้ใน Flow Chart ต่อไปนี้

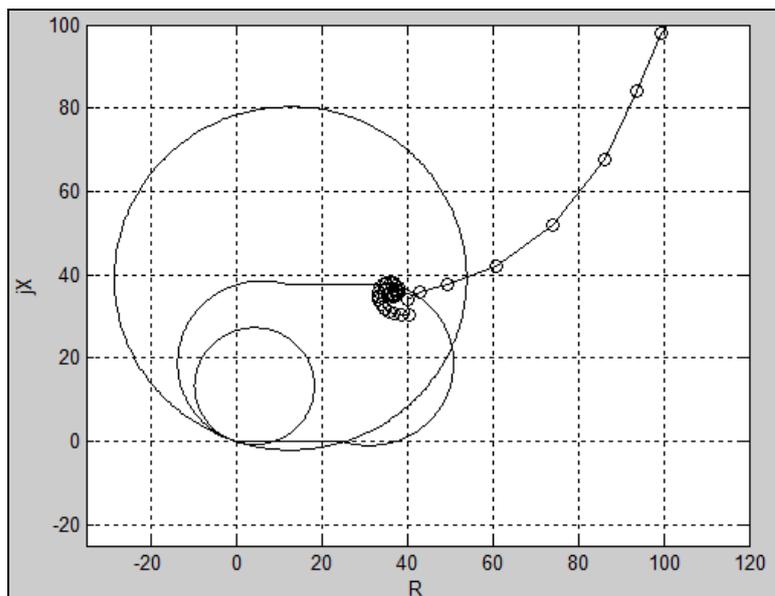


ภาพที่ 39 Flow Chart แสดงส่วนการตัดสินใจว่าจะมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะหรือไม่

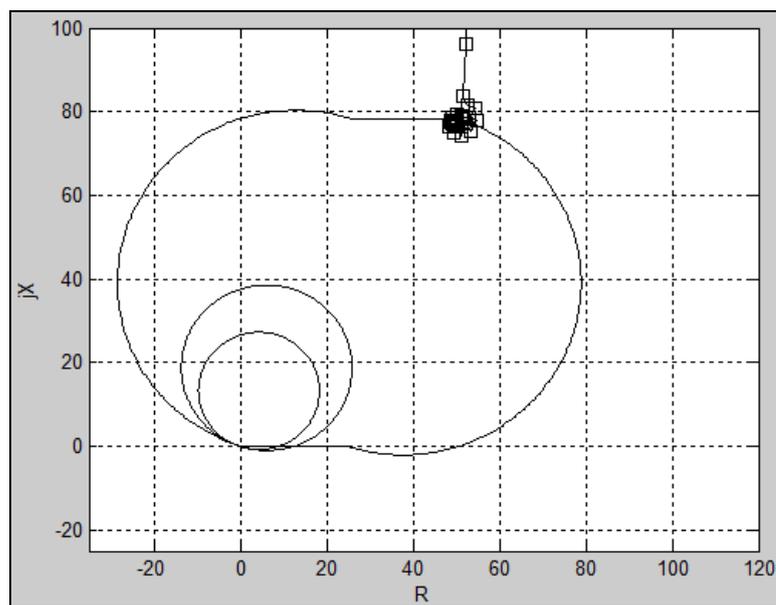
การปรับปรุงกราฟคุณลักษณะของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ดั่งเงื่อนไขในภาพที่ 39 จะเลือกทำการปรับปรุงในแต่ละโซนเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อต้องการให้โซนที่ไม่ได้ปรับปรุงเนื่องจากไม่ได้ตามเงื่อนไขของการปรับปรุงยังคงทำงานโดยใช้กราฟคุณลักษณะเดิมนั่นเอง



ภาพที่ 40 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะเมื่อพอลต์ที่เฟส AB ที่  $R_{F(AB)} = 50 \Omega$  ร่วมกับอิมพีแดนซ์สายส่งในขอบโซน 1



ภาพที่ 41 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะเมื่อพอลต์ที่เฟส BC ที่  $R_{F(BC)} = 50 \Omega$  ร่วมกับอิมพีแดนซ์สายส่งในขอบโซน 2



ภาพที่ 42 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะเมื่อ ฟอลต์ที่เฟส CA ที่  $R_{F(CA)} = 50 \Omega$  รวมกับอิมพีแดนซ์สายส่งในขอบโซน 3

จากภาพที่ 40, 41 และ 42 เป็นรูปที่ได้ข้อมูลที่ได้จำลองด้วย Matlab/Simulink ซึ่งเก็บผลไว้ในหน่วยความจำแล้วนำไปวาดรูปด้วยการเขียน m-file ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ ซึ่งทำการจำลองโดยการทำให้เกิดฟอลต์ที่เฟส A กับ B ในขอบโซน 1, B กับ C ในขอบโซน 2 และ C กับ A ในขอบโซน 3 ตามลำดับ โดยค่าความต้านทานฟอลต์ที่ใส่ในกล่องเครื่องมือของ ฟอลต์ ใน Simulink มีค่าเท่ากับ  $50 \Omega$  ซึ่งหมายความว่าเมื่อมีค่าความต้านทานฟอลต์เกิดขึ้น  $25 \Omega$  ต่อเฟสในขณะฟอลต์นั่นเอง ซึ่งพบว่ารีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่สร้างและจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink มีการทำงานรองรับทางเดินของอิมพีแดนซ์ที่วิ่งออกนอกโซนป้องกันเดิมซึ่งทางเดินอิมพีแดนซ์ที่ปรากฏจะมีการเปลี่ยนแปลงไปทั้งขนาดและทิศทาง ซึ่งเป็นไปตามสมการในตารางที่ 6 ในส่วนของค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่ขอบโซนรวมกับค่าความต้านทานฟอลต์ การขยายตามหลักการของ “KU Method” ดังในภาพที่ 40 ซึ่งมีการฟอลต์ที่ขอบโซน 1 และมีความต้านทานฟอลต์เกิดขึ้น  $25 \Omega$  ต่อเฟส ซึ่งแสดงให้เห็นว่า มีการขยายเพื่อรองรับค่าความต้านทานฟอลต์ที่เกิดขึ้นทั้งในโซน 1 และ 2 ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าหลักการนี้ต้องการให้โซนป้องกันหลักและการป้องกันสำรองยังคงทำงานได้เช่นเดียวกับรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ที่ไม่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ แต่โซน 3 ยังคงทำหน้าที่เป็นโซนป้องกันสำรองได้ปกติจึงไม่จำเป็นต้องมีการขยายโซนป้องกันเพื่อรองรับปัญหาที่เกิดขึ้น ส่วนในภาพที่ 41 นั้นมีการขยายเพียงโซน 2 เท่านั้นทั้งนี้เนื่องจากทางเดินของอิมพีแดนซ์ยังไม่ออกนอกโซน 3 ของรีเลย์แบบโมห์ที่ไม่มีการปรับปรุงกราฟ

คุณลักษณะดังกล่าว โชน 3 ยังคงทำหน้าที่เป็นโชนป้องกันสำรองได้ปกติจึงไม่จำเป็นต้องมีการขยายโชนป้องกันเพื่อรองรับปัญหาที่เกิดขึ้น ในภาพที่ 42 มีการปรับปรุงเฉพาะโชน 3 เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากโชน 3 เป็นโชนป้องกันเดียวที่อยู่ในเงื่อนไขของการปรับปรุงเพื่อรองรับความต้านทานฟอล์ทที่เกิดขึ้นในขณะฟอล์ท ส่วนคำสั่งทริปที่จากเอาต์พุตของรีเลย์ที่เขียนจาก m-file ได้แสดงไว้ในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลการจำลองของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะที่ความต้านทานฟอล์ทต่อเฟสเท่ากับ  $25 \Omega$  ( $R_F = 50/2 \Omega$ )

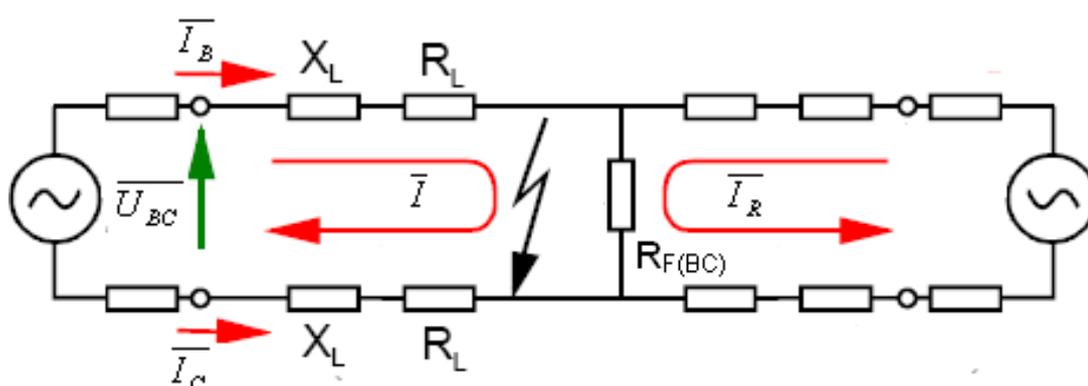
ผลที่ได้ (เอาต์พุต)	ชนิดของฟอล์ทที่ใช้จำลองและการเชื่อมต่อโชนป้องกัน ที่เลือกในกล่องเครื่องมือของ Simulink								
	AB,Z1	BC,Z1	CA,Z1	AB,Z2	BC,Z2	CA,Z2	AB,Z3	BC,Z3	CA,Z3
AB,Zone1	ON								
BC,Zone1		ON							
CA,Zone1			ON						
AB,Zone2				ON					
BC,Zone2					ON				
CA,Zone2						ON			
AB,Zone3							ON		
BC,Zone3								ON	
CA,Zone3									ON

จากผลการจำลองดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 8 พบว่าเมื่อมีความต้านทานฟอล์ทเกิดขึ้นในขณะที่เกิดฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส รีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะเพื่อชดเชยความต้านทานฟอล์ทที่เกิดขึ้น จะทำงานโดยการสั่งทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้อย่างถูกต้อง เช่น ถ้าจำลองในกรณีของฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส และมีความต้านทานฟอล์ทเกิดขึ้น  $25 \Omega$  ต่อเฟส โดยฟอล์ทที่เฟส B และ C ที่ 120% ของความยาวสายหรือที่ขอบของการเชื่อมต่อรีเลย์ที่โชน 2 เอาต์พุตสั่งทริปที่ได้จากการเขียน m-file จะมีคำสั่ง ON ในช่องที่มีการแรเงา (ซึ่งถ้าไม่มีการปรับปรุงกราฟ

คุณลักษณะก็จะไม่มีสถานะ ON เกิดขึ้นในช่องที่แรงขาของตารางนี้) ทำให้สามารถแก้ปัญหาคาทรูปที่ผิดพลาดได้ และเสถียรภาพโดยรวมของระบบป้องกันไฟฟ้ากำลังดีขึ้น รีเลย์ระยะทางแบบโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณสมบัติด้วยวิธีนี้เรียกว่า “KU-Distance Relay”

### 2.1.5 จำลองรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ด้วยสายส่งวงจรเดี่ยว 2 แหล่งจ่ายทั้งไม่เกิดและเกิดความต้านทานฟอล์ท

ทำการศึกษาการฟอล์ทที่มีกระแสเข้ามาที่จุดเกิดฟอล์ทสองด้าน ในสายส่งวงจรเดี่ยว 2 แหล่งจ่าย ทั้งการคำนวณและการจำลองใน โปรแกรม Matlab/Simulink เพื่อศึกษาความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับฟอล์ทเมื่อเกิดกระแสไหลมาทั้ง 2 ด้าน สาเหตุที่งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของการเกิดความต้านทานฟอล์ทในขณะที่เกิดฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส ขึ้น ในกรณีสายส่งวงจรเดี่ยว 2 แหล่งจ่ายก็เพราะต้องการทราบถึงการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและมุมของค่าอิมพีแดนซ์ที่ตรวจจับได้ของการเกิดฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส ที่มีความต้านทานฟอล์ทเกิดขึ้น หรือทางเดินของอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนไปเนื่องจากค่ากระแสที่ไหลมาอีกด้านผ่านความต้านทานฟอล์ทนั่นเอง และปรากฏการณ์ดังกล่าวจะมีผลต่อการเซตตั้งรีเลย์ระยะทางหรือไม่อย่างไร เพื่อจะได้ทำการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะและการเซตตั้งให้เหมาะสมกับการป้องกันสายส่งต่อไป



ภาพที่ 43 ลัดวงจรที่เฟส BC ในสายส่งวงจรเดี่ยว 2 แหล่งจ่ายโดยมีความต้านทานฟอล์ท

โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณให้พิจารณาจากภาพที่ 43 เกิดการลัดวงจรที่เฟส BC ในสายส่งวงจรเดี่ยว 2 แหล่งจ่ายและถ้ามีความต้านทานฟอล์ทหรือ  $R_f$  เกิดขึ้นทำให้ค่าอิมพีแดนซ์รวมมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นและมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของสายที่ตรวจจับได้ โดยสมการในการคำนวณซึ่งต่อเนื่องมาจากสมการที่ (3) ดังนี้

$$U_{BC} = 2(R_L \cdot I + jX_L \cdot I) + R_{F(BC)}(I + I_R) \quad (13)$$

จากภาพที่ 43 และสมการที่ (11)

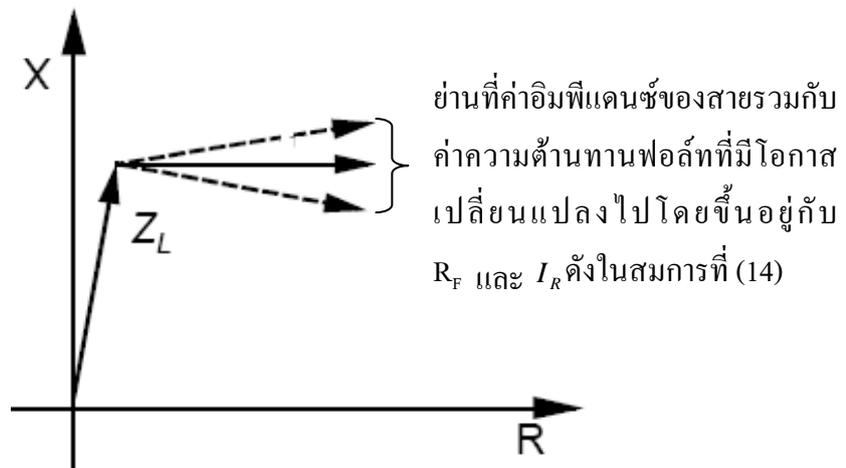
$$I_B = -I_C = I$$

ดังนั้น

$$I_B - I_C = 2I$$

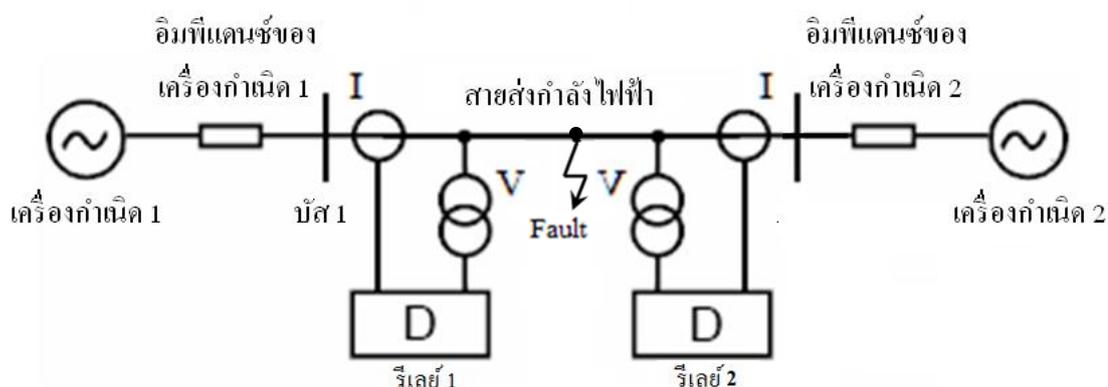
$$\therefore Z_{BC} = \frac{2(R_L \cdot I + jX_L \cdot I) + R_{F(BC)} \cdot (I + I_R)}{2I} = R_L + jX_L + \frac{R_{F(BC)}}{2} \left( \frac{I_R}{I} + 1 \right) \quad (14)$$

เมื่อ  $I_R$  คือ กระแสที่ไหลมาจากแหล่งจ่ายอีกด้านของรีเลย์ที่ใช้ตรวจจับฟอล์ท

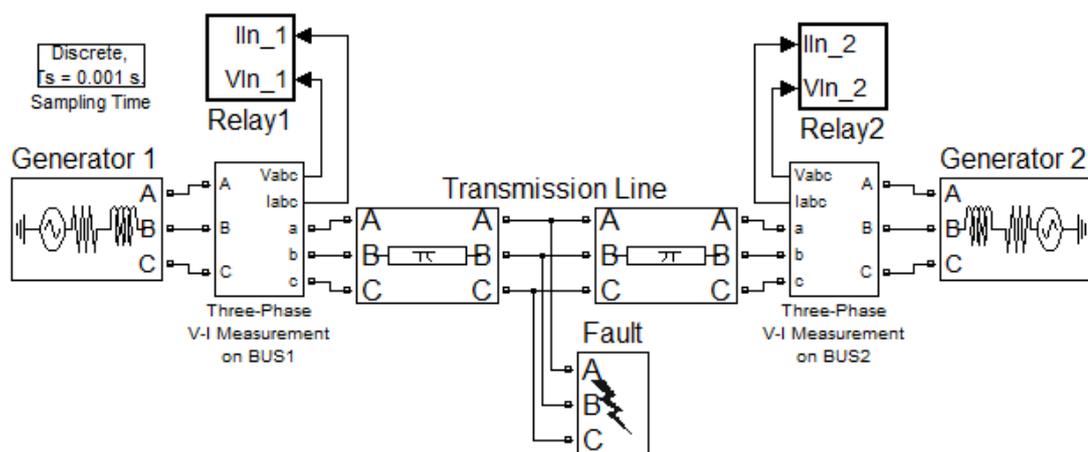


ภาพที่ 44 ผลของ  $I_R$  ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงบนไดอะแกรม R-X เมื่อมีความต้านทานฟอล์ทเกิดขึ้นในขณะเกิดฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส

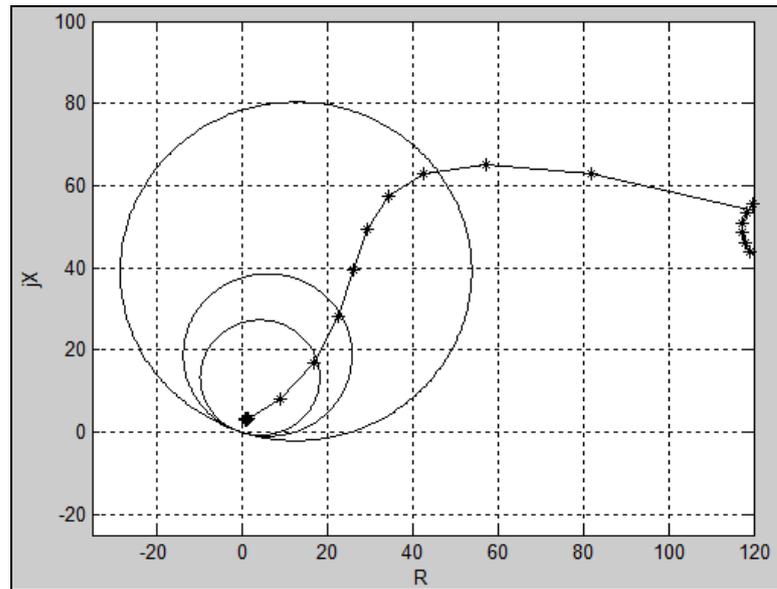
จากนั้นทำการจำลองด้วยการสร้างเงื่อนไขและบันทึกค่าลงในตารางที่ 11 โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink ดังที่ได้ใช้จำลองไว้ในหัวข้อ 2.1.2 แต่มีการเพิ่มแหล่งจ่ายที่มีค่าพารามิเตอร์เหมือนกันและรีเลย์ระยะทางที่มีคุณลักษณะในการทำงานรวมถึงมีค่าเซตตั้งเหมือนกัน เพิ่มเข้าไปอีกด้านจนเป็นสายส่งวงจรเส้นเดียวที่มี 2 แหล่งจ่าย ดังแสดงในภาพที่ 45



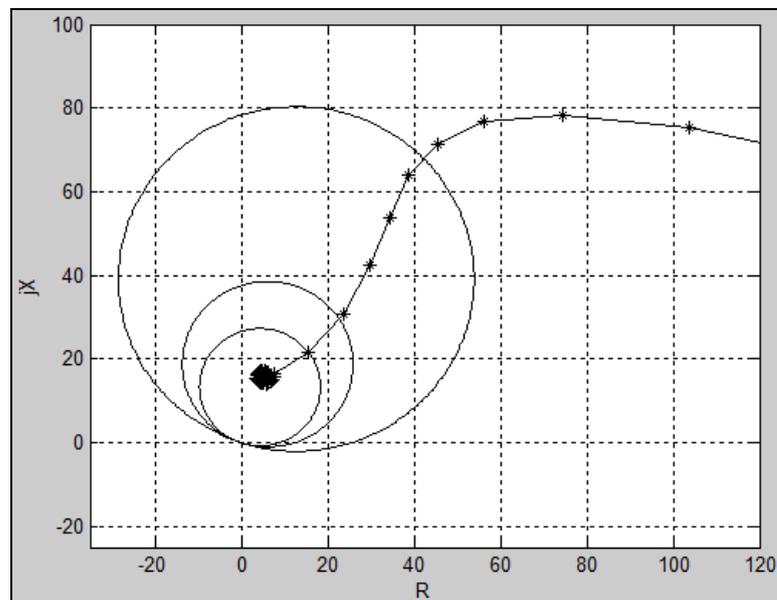
ภาพที่ 45 ระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่ายที่ใช้จำลองการทำงาน



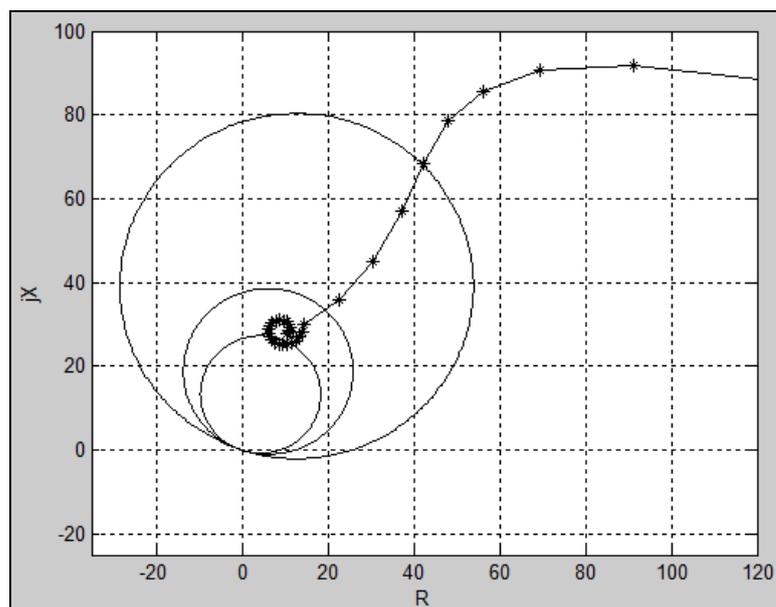
ภาพที่ 46 วงจรในโปรแกรม MATLAB/Simulink ที่ใช้จำลองการทำงานของสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย



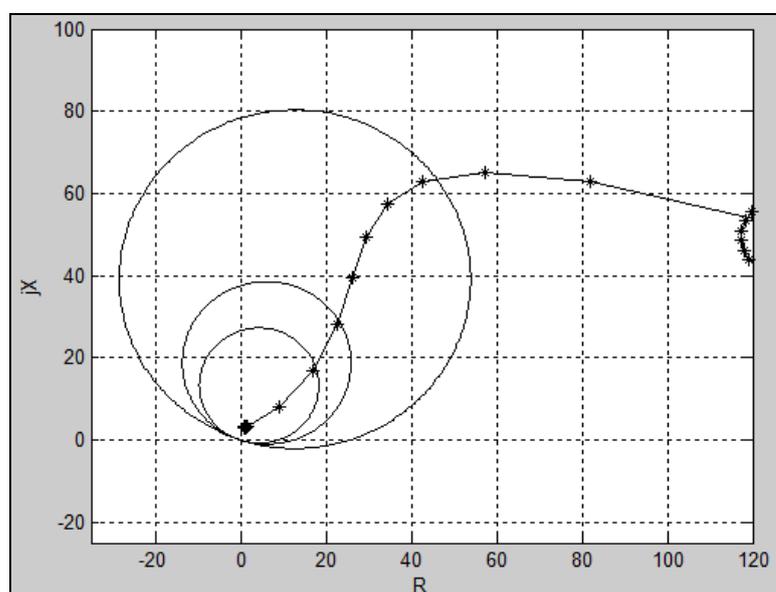
ภาพที่ 47 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ตัว 1 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 10% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 0 \Omega$  จำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย



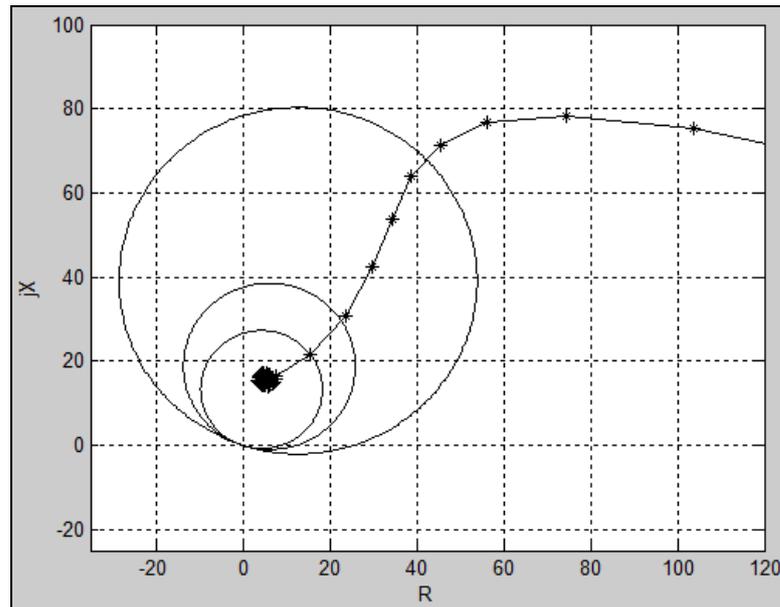
ภาพที่ 48 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ตัว 1 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 50% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 0 \Omega$  จำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย



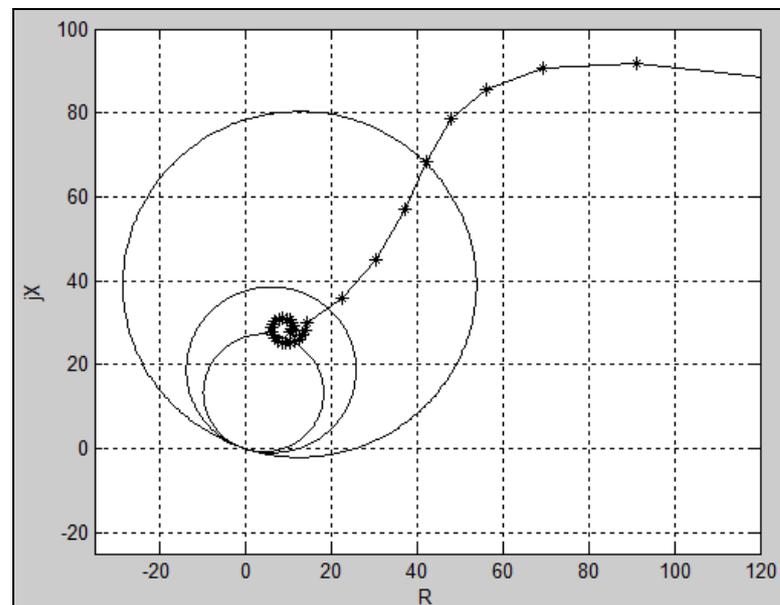
ภาพที่ 49 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ตัว 1 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 90% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 0 \Omega$  จำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย



ภาพที่ 50 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ตัว 2 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 10% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 0 \Omega$  จำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย

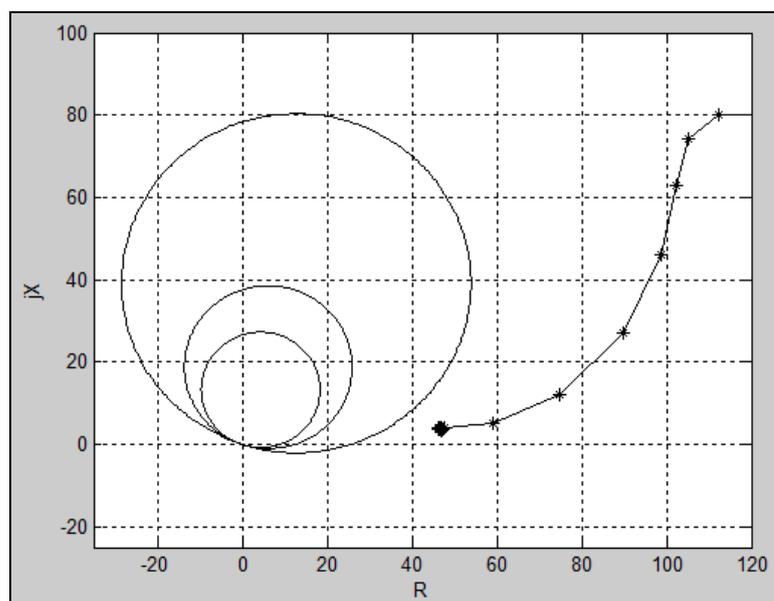


ภาพที่ 51 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ตัว 2 เมื่อฟอลต์แบบ AB ที่ 50% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 0 \Omega$  จำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย

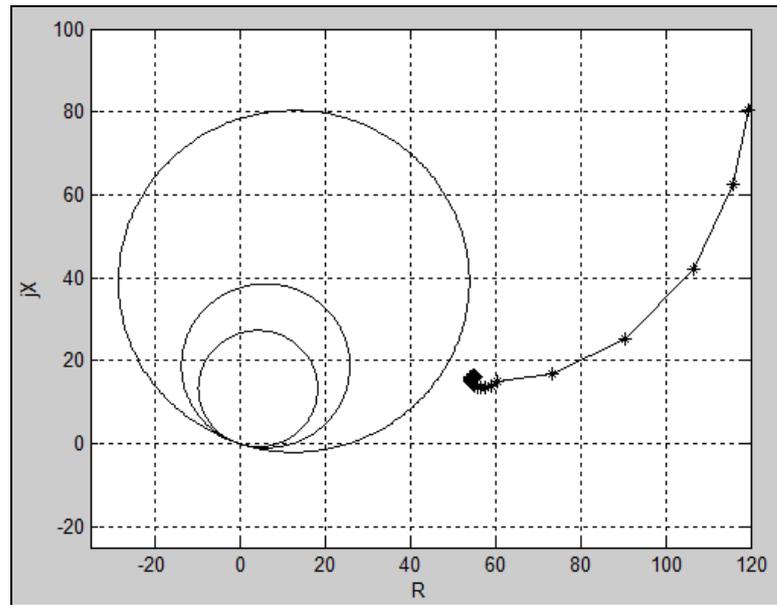


ภาพที่ 52 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ตัว 2 เมื่อฟอลต์แบบ AB ที่ 90% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 0 \Omega$  จำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย

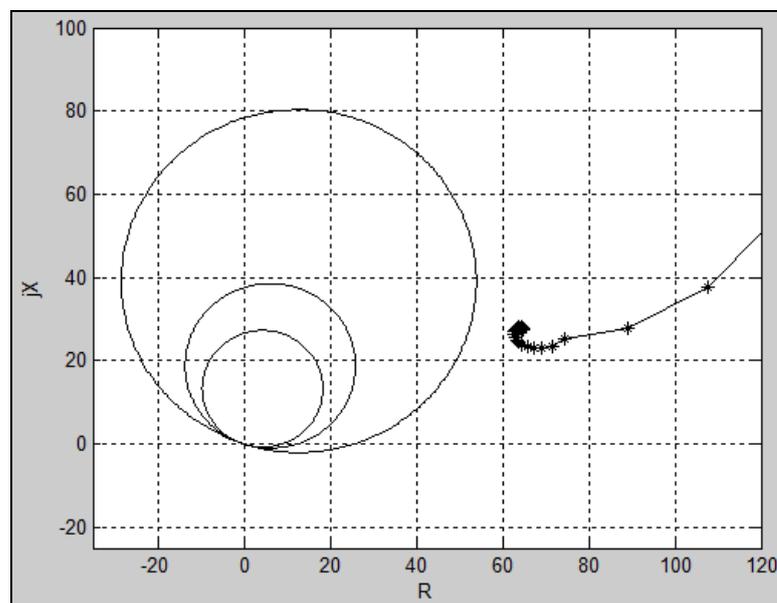
จากภาพที่ 47 ถึง 52 เป็นรูปที่ใช้ข้อมูลที่ได้จากการจำลองด้วย Matlab/Simulink ซึ่งเก็บผลไว้ในหน่วยความจำแล้วนำไปวาดรูปด้วยการเขียน m-file ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่ไม่มี การปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ ซึ่งทำการจำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย โดยการทำให้เกิดฟอล์ทที่เฟส A กับ B ในระหว่างความยาวของสายส่งจากบัส 1 ไปยัง บัส 2 คือ ฟอล์ทที่ 10% 50% และ 90% จากบัส 1 ตามลำดับ โดยค่าความต้านทานฟอล์ทที่ใส่ในกล่องเครื่องมือของ ฟอล์ท ใน Simulink มีค่าเท่ากับ  $0 \Omega$  ต่อเฟส ( $R_F = 0 \Omega$ ) ซึ่งหมายความว่าไม่มีค่าความต้านทานฟอล์ท เกิดขึ้นในขณะฟอล์ทนั่นเอง ซึ่งพบว่ารีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่สร้างและจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink มีการทำงานรองรับทางเดินของอิมพีแดนซ์ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (14) ทำให้เรา พบว่าเมื่อนำรีเลย์ระยะทางแบบโมห์มาใช้ในการป้องกันกับวงจรสายส่งเส้นเดียวที่มี 2 แหล่งจ่าย ถ้าไม่เกิดค่าความต้านทานฟอล์ทขึ้นในขณะที่เกิดฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส รีเลย์ระยะทางแบบนี้ก็จะทำ หน้าที่ป้องกันสายส่งได้ตามปกติเหมือนกับการใช้ในการป้องกันสายส่งวงจรเดียวที่มีเพียง แหล่งจ่ายเดียว



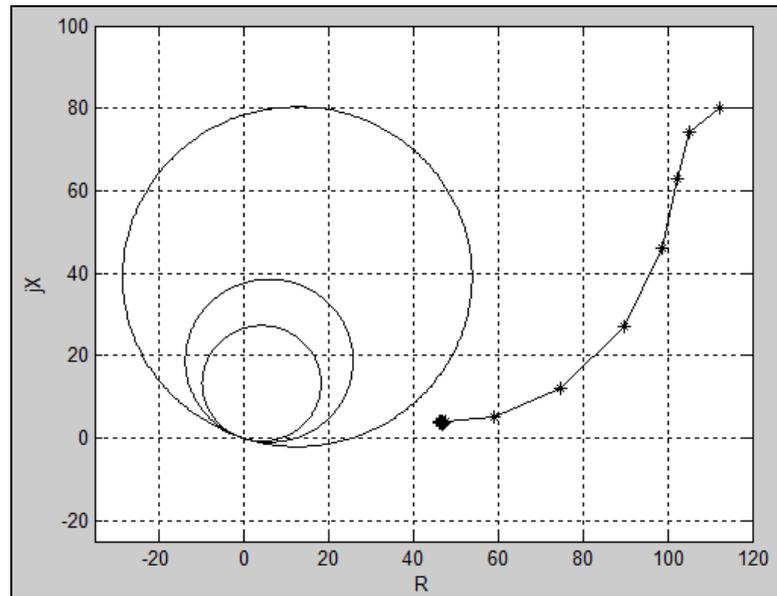
ภาพที่ 53 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ตัว 1 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 10% ของ ความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 50 \Omega$  จำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย



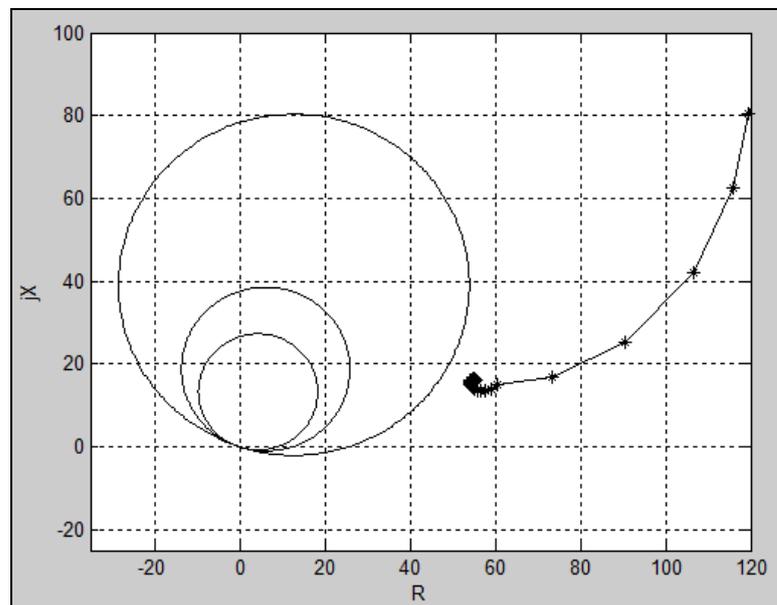
ภาพที่ 54 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ตัว 1 เมื่อฟอลต์แบบ AB ที่ 50% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 50 \Omega$  จำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดี่ยว 2 แหล่งจ่าย



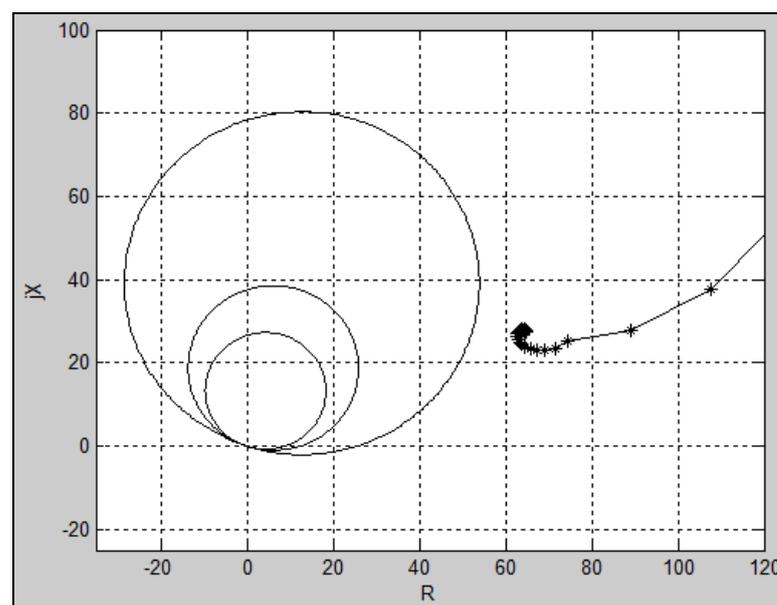
ภาพที่ 55 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ตัว 1 เมื่อฟอลต์แบบ AB ที่ 90% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 50 \Omega$  จำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดี่ยว 2 แหล่งจ่าย



ภาพที่ 56 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ตัว 2 เมื่อฟอลต์แบบ AB ที่ 10% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 50 \Omega$  จำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย



ภาพที่ 57 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ตัว 2 เมื่อฟอลต์แบบ AB ที่ 50% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 50 \Omega$  จำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย



ภาพที่ 58 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ตัว 2 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 90% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 50 \Omega$  จำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย

จากภาพที่ 53 ถึง 58 เป็นรูปที่ใช้ข้อมูลที่ได้จากการจำลองด้วย Matlab/Simulink ซึ่งเก็บผลไว้ในหน่วยความจำแล้วนำไปวาดรูปด้วยการเขียน m-file ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่ไม่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ ซึ่งทำการจำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย โดยการทำให้เกิดฟอล์ทที่เฟส A กับ B ในระหว่างความยาวของสายส่งจากบัส 1 ไปยัง บัส 2 คือ ฟอล์ทที่ 10% 50% และ 90% จากบัส 1 ตามลำดับ โดยค่าความต้านทานฟอล์ทระหว่างเฟสที่เกิดฟอล์ทมีค่า  $50 \Omega$  ในขณะฟอล์ท และพบว่ารีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่สร้างและจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink มีการเปลี่ยนแปลงทางเดินของอิมพีแดนซ์ทั้งขนาดและทิศทาง ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 14 มีผลทำให้รีเลย์ระยะทางเกิดความคลาดเคลื่อนหรือผิดพลาดในการป้องกันและทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าได้

ตารางที่ 9 จำลองการทำงานของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อนำมาติดตั้งกับระบบสายส่งวงจรเดี่ยว 2 แหล่งจ่าย (เซตตั้งโซนตามหลักการดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1.1)

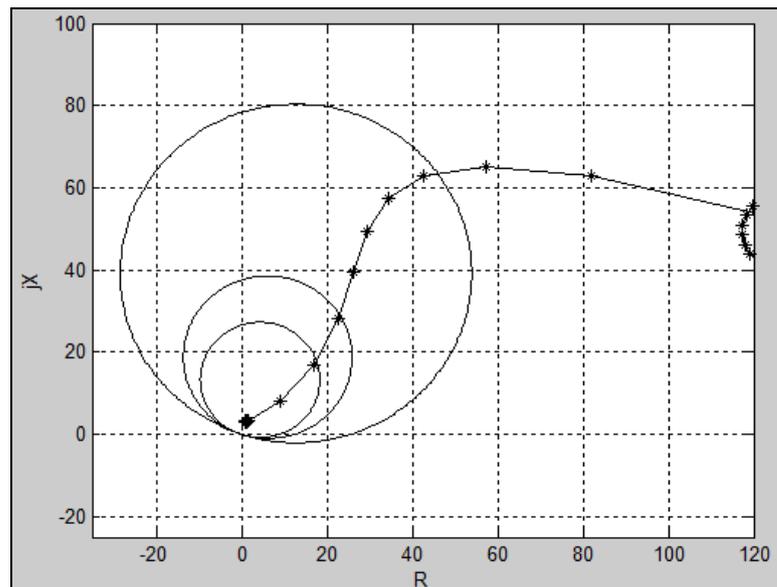
%ของความยาวสายด้านรีเลย์ 1	%ของความยาวสายด้านรีเลย์ 2	เฟสที่เกิดฟอล์ท	ความต้านทานฟอล์ท, $R_{F(\text{Phase to Phase})}$ ( $\Omega$ )	โซนที่สั่งทริปของรีเลย์ 1	โซนที่สั่งทริปของรีเลย์ 2
10	90	AB	0	1	2
50	50	AB	0	1	1
90	10	AB	0	2	1
10	90	BC	0	1	2
50	50	BC	0	1	1
90	10	BC	0	2	1
10	90	CA	0	1	2
50	50	CA	0	1	1
90	10	CA	0	2	1
10	90	AB	50	-	-
50	50	AB	50	-	-
90	10	AB	50	-	-
10	90	BC	50	-	-
50	50	BC	50	-	-
90	10	BC	50	-	-
10	90	CA	50	-	-
50	50	CA	50	-	-
90	10	CA	50	-	-

จากตารางที่ 9 พบว่าเมื่อเกิดฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส ที่ไม่มีความต้านทานฟอล์ท ( $R_F = 0 \Omega$ ) เกิดขึ้นในขณะฟอล์ท รีเลย์ระยะทางแบบโมห์ที่สร้างขึ้นจาก Matlab/Simulink ยังคงทำงานได้อย่างถูกต้องไม่มีปัญหาในการสั่งทริปนอกโซนแต่เมื่อเกิดความต้านทานฟอล์ทขึ้นในขณะที่เกิดฟอล์ท

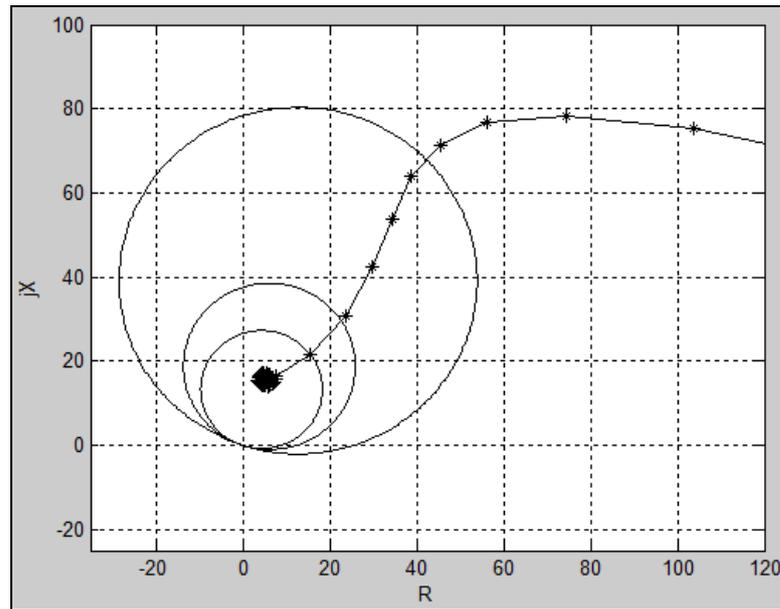
และมีกระแสที่ไหลมาจากแหล่งจ่ายอีกด้านของรีเลย์ที่ใช้ตรวจจับฟอล์ท ( $I_R$ ) นั้นจะทำให้ทางเดินอิมพีแดนซ์มีทิศทางที่เปลี่ยนไปและรีเลย์ระยะทางซึ่งทำหน้าที่ตรวจจับฟอล์ทที่ติดตั้งไว้ ณ จุดนั้นก็ทำงานผิดพลาดซึ่งเป็นปัญหาที่ใหญ่มากสำหรับระบบป้องกัน

### 2.1.6 จำลองรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะด้วยสายส่งวงจรเดี่ยว 2 แหล่งจ่ายทั้งไม่เกิดและเกิดความต้านทานฟอล์ท

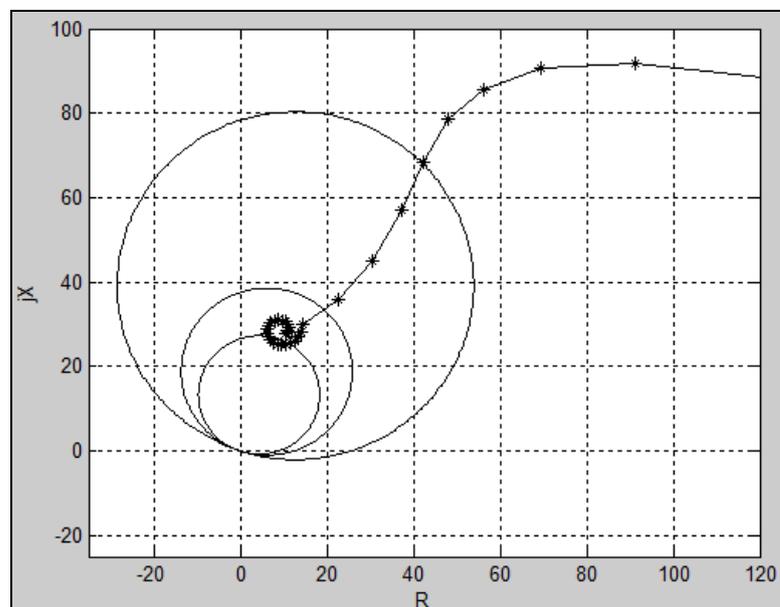
จากปัญหาที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการจำลองเหมือนในหัวข้อที่ 2.1.5 แต่เปลี่ยนจากรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์แบบธรรมดาเป็นรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์แบบที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะโดยมีการเซตคั้งเพื่อชดเชยค่าความต้านทานฟอล์ท ( $R_{F \text{ Setting}}$ ) ไว้  $25 \Omega$  แล้วนำค่าที่ได้มาบันทึกผลลงในตารางที่ 10



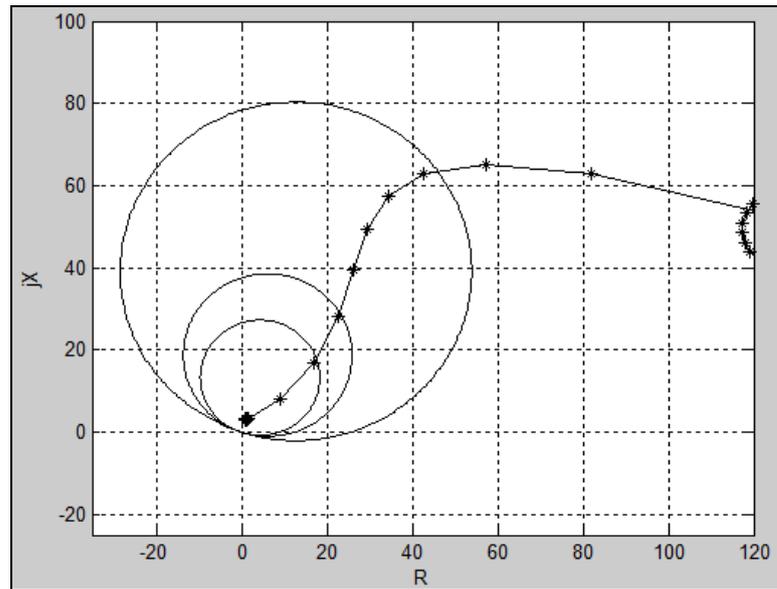
ภาพที่ 59 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะตัว 1 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 10% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 0 \Omega$  จำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดี่ยว 2 แหล่งจ่าย ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 25 \Omega$



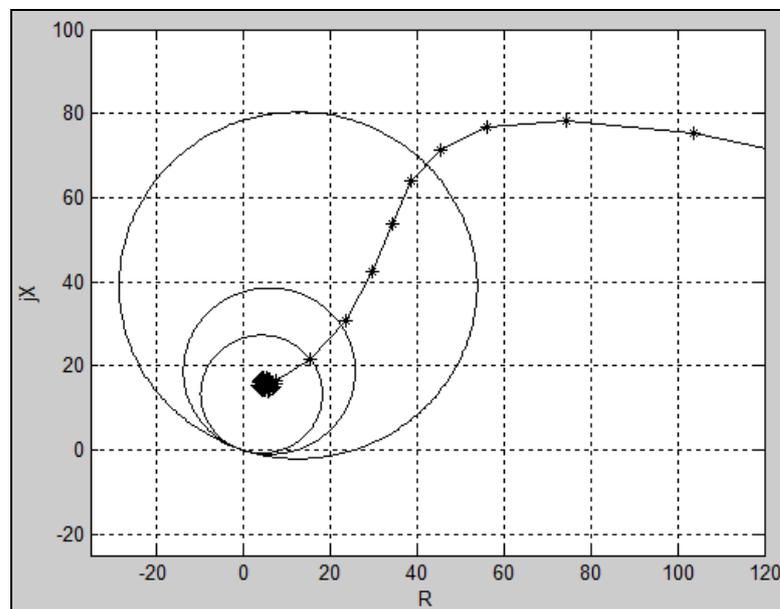
ภาพที่ 60 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัว 1 เมื่อฟอลต์แบบ AB ที่ 50% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 0 \Omega$  จำลองด้วย  
ระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 25 \Omega$



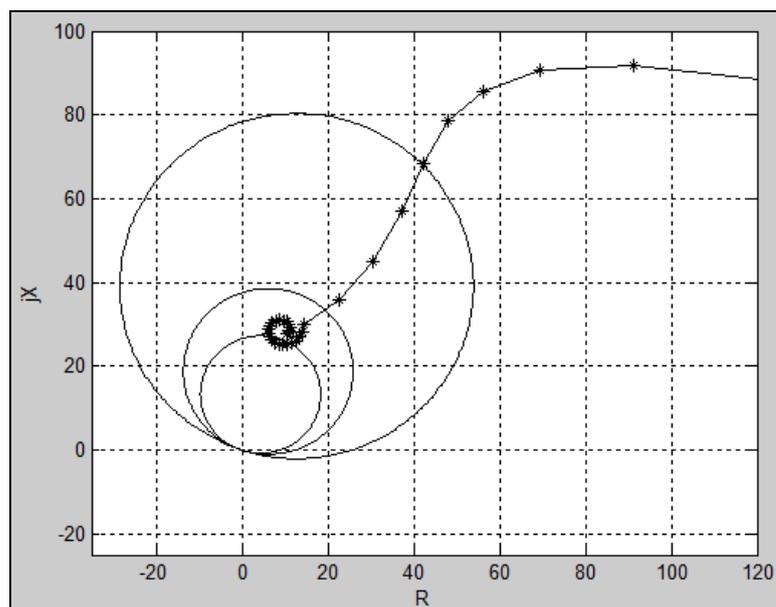
ภาพที่ 61 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัว 1 เมื่อฟอลต์แบบ AB ที่ 90% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 0 \Omega$  จำลองด้วย  
ระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 25 \Omega$



ภาพที่ 62 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัว 2 เมื่อฟอลต์แบบ AB ที่ 10% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 0 \Omega$  จำลองด้วย  
ระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 25 \Omega$

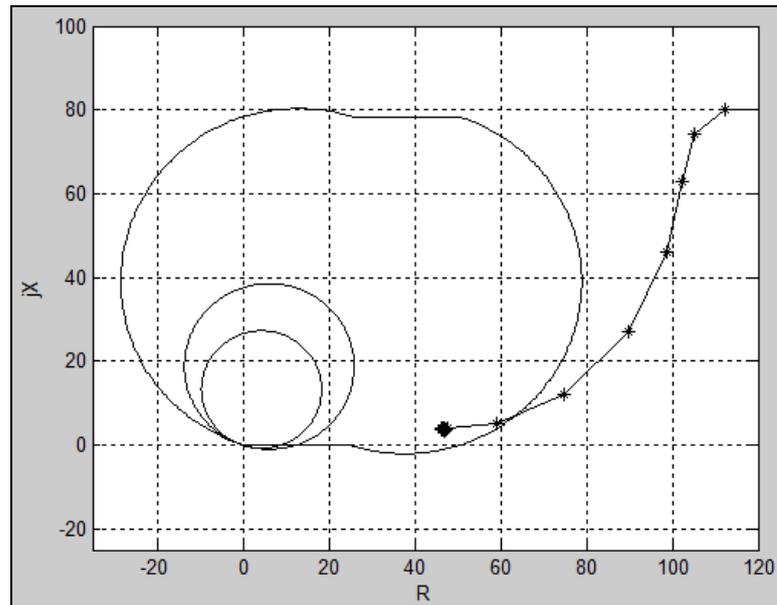


ภาพที่ 63 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัว 2 เมื่อฟอลต์แบบ AB ที่ 50% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 0 \Omega$  จำลองด้วย  
ระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย  $R_{F \text{ Setting}} = 25 \Omega$

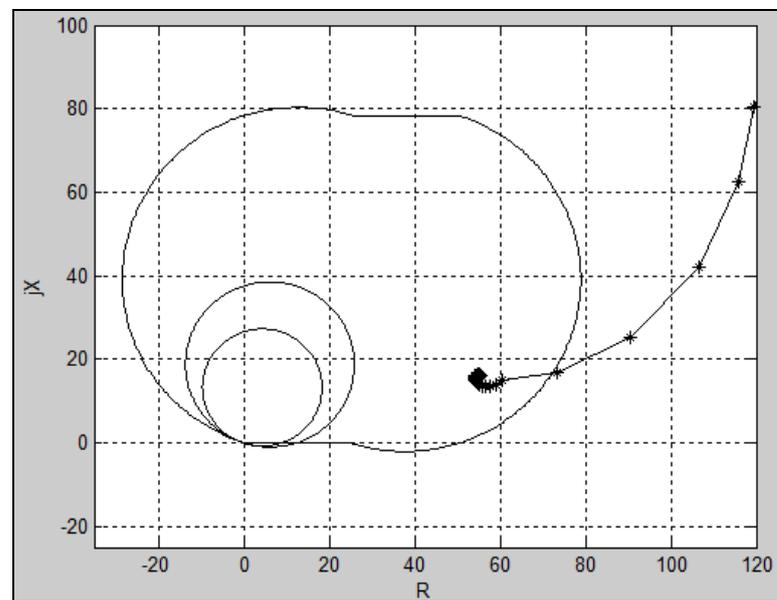


ภาพที่ 64 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ ตัว 2 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 90% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 0 \Omega$  จำลองด้วย ระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 25 \Omega$

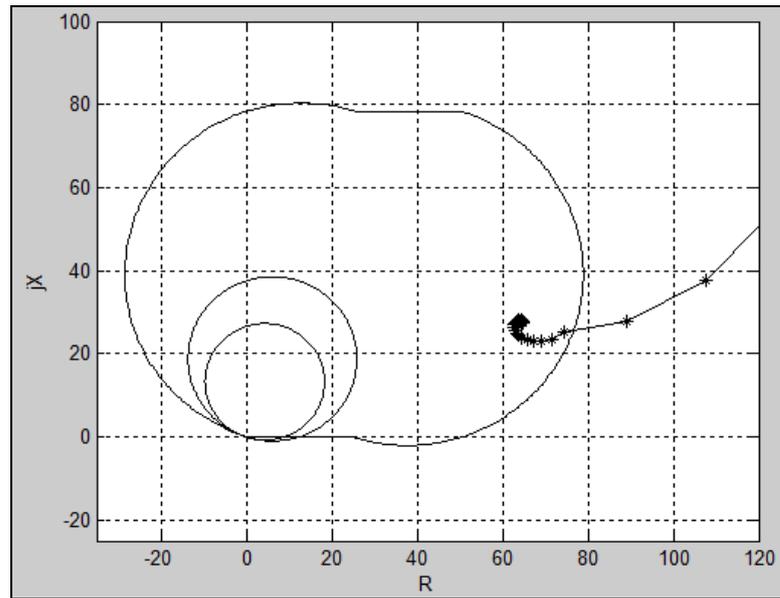
จากภาพที่ 59 ถึง 64 เป็นรูปที่ใช้ข้อมูลที่ได้จากการจำลองด้วย Matlab/Simulink ซึ่งเก็บผลไว้ในหน่วยความจำแล้วนำไปวาดรูปด้วยการเขียน m-file ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ ซึ่งทำการจำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย โดยการทำให้เกิดฟอล์ทที่เฟส A กับ B ในระหว่างความยาวของสายส่งจากบัส 1 ไปยัง บัส 2 คือ ฟอล์ทที่ 10% 50% และ 90% จากบัส 1 ตามลำดับ โดยค่าความต้านทานฟอล์ทที่ใส่ในกล่องเครื่องมือของ ฟอล์ท ใน Simulink มีค่าเท่ากับ  $0 \Omega$  ( $R_F = 0 \Omega$ ) ซึ่งหมายความว่าไม่มีค่าความต้านทานฟอล์ทเกิดขึ้นในขณะฟอล์ทนั่นเอง ซึ่งพบว่ารีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่สร้างและจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink มีการทำงานรองรับทางเดินของอิมพีแดนซ์ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (14) ทำให้เราพบว่าเมื่อนำรีเลย์ระยะทางแบบโมห์มาใช้ในการป้องกันกับวงจรสายส่งเส้นเดียวที่มี 2 แหล่งจ่าย ถ้าไม่เกิดค่าความต้านทานฟอล์ทขึ้นในขณะที่เกิดฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส รีเลย์ระยะทางแบบนี้ก็จะทำหน้าที่ป้องกันสายส่งได้ตามปกติโดยไม่ต้องมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะเหมือนกับการใช้ในการป้องกันสายส่งวงจรเดียวที่มีเพียงแหล่งจ่ายเดียว



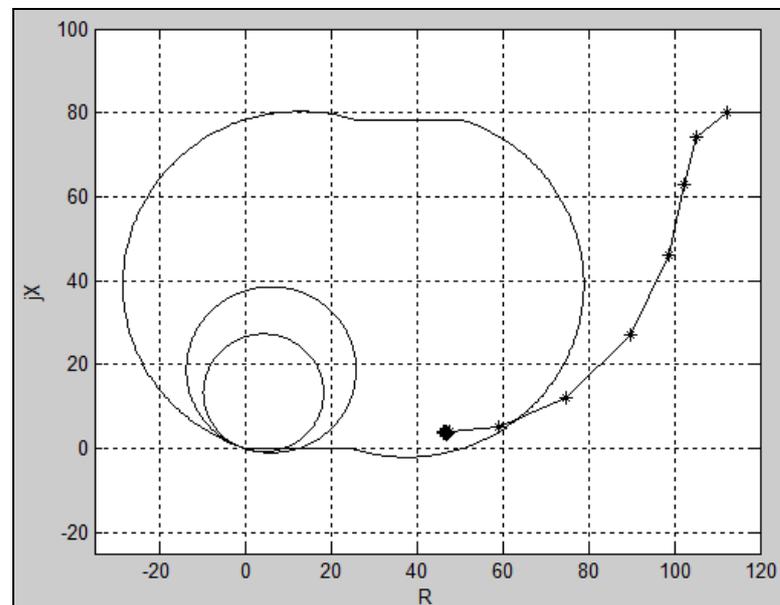
ภาพที่ 65 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะตัว 1 เมื่อฟอลต์แบบ AB ที่ 10% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 50 \Omega$  จำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 25 \Omega$



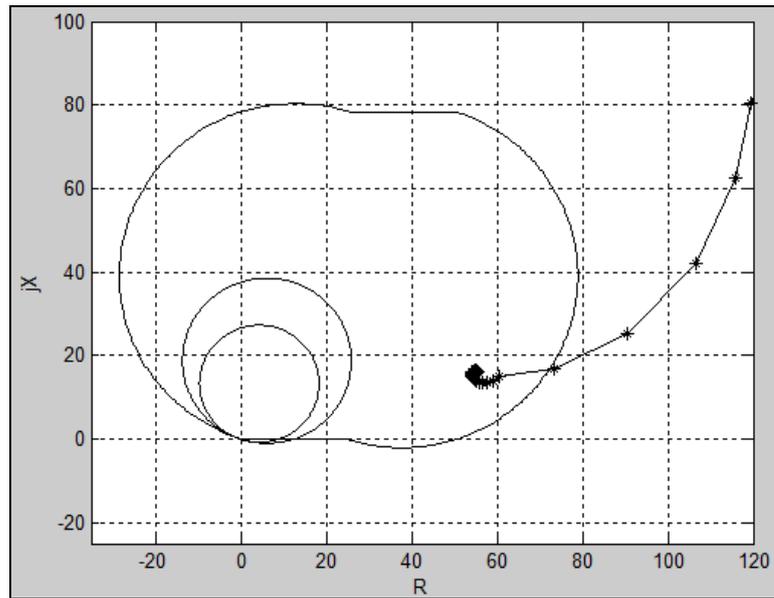
ภาพที่ 66 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะตัว 1 เมื่อฟอลต์แบบ AB ที่ 50% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 50 \Omega$  จำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 25 \Omega$



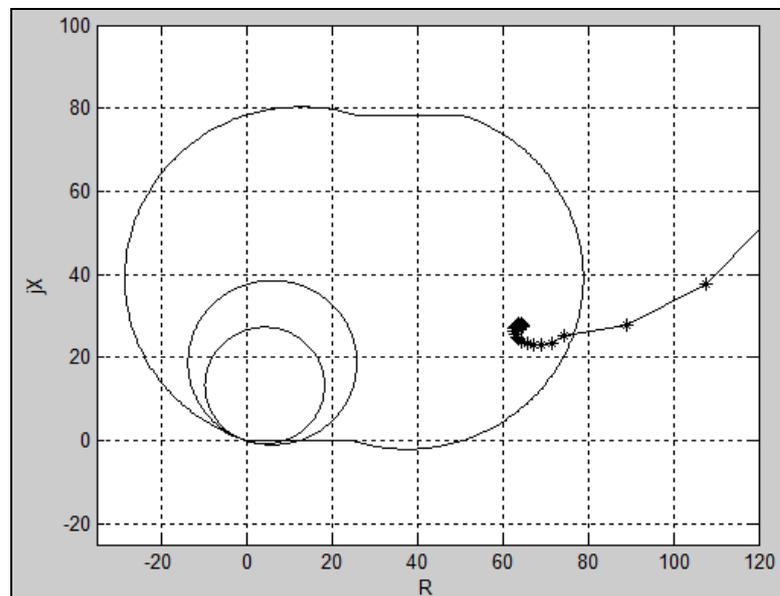
ภาพที่ 67 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัว 1 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 90% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 50 \Omega$  จำลองด้วย  
ระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 25 \Omega$



ภาพที่ 68 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัว 2 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 10% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 50 \Omega$  จำลองด้วย  
ระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 25 \Omega$



ภาพที่ 69 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะตัว 2 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 50% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 50 \Omega$  จำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 25 \Omega$



ภาพที่ 70 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะตัว 2 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 90% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 50 \Omega$  จำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 25 \Omega$

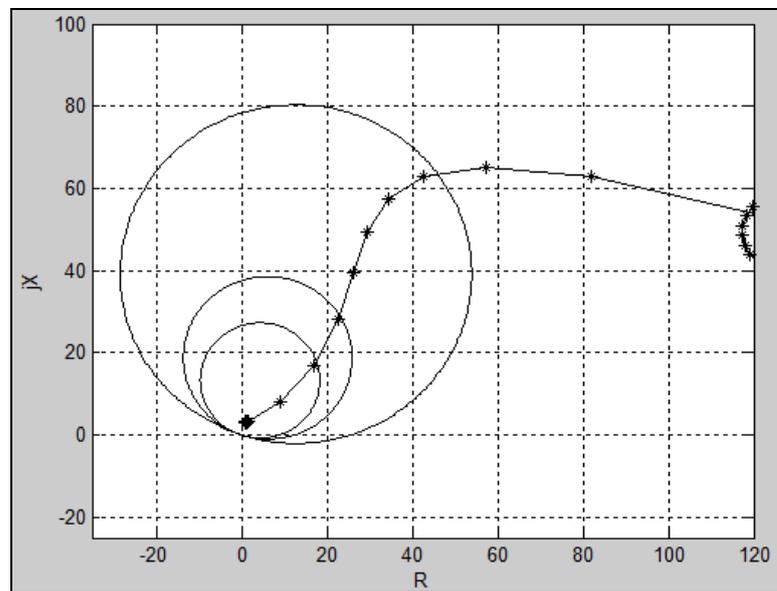
จากภาพที่ 65 ถึง 70 เป็นรูปที่ใช้ข้อมูลที่ได้จากการจำลองด้วย Matlab/Simulink ซึ่งเก็บผลไว้ในหน่วยความจำแล้วนำไปวาดรูปด้วยการเขียน m-file ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ ซึ่งทำการจำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย โดยการทำให้เกิดฟอล์ทที่เฟส A กับ B ในระหว่างความยาวของสายส่งจากบัส 1 ไปยัง บัส 2 คือ ฟอล์ทที่ 10% 50% และ 90% จากบัส 1 ตามลำดับ โดยค่าความต้านทานฟอล์ทระหว่างเฟสที่เกิดฟอล์ทมีค่า  $50 \Omega$  ( $R_F = 50/2 \Omega$ ) ในขณะที่ฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส และรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่สร้างและจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink มีการเปลี่ยนแปลงทางเดินของอิมพีแดนซ์ทั้งขนาดและทิศทาง ซึ่งนำไปตามสมการที่ (14) มีผลทำให้รีเลย์ระยะทางเกิดความคลาดเคลื่อนหรือผิดพลาดในการป้องกันและทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าได้ การใช้หลักการของ “KU Method” เพื่อรองรับความต้านทานฟอล์ทที่เกิดขึ้นในระหว่างฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส ในสายส่งวงจรเดียวที่มีแหล่งจ่าย 2 แหล่งจ่าย ถ้ามีการเซตตั้งความต้านทานฟอล์ทไว้ที่  $25 \Omega$  ( $R_{F \text{ Setting}} = 25 \Omega$ ) ไม่สามารถที่จะรองรับความต้านทานฟอล์ทที่เกิดขึ้นได้ทั้งนี้จากสมการที่ (14) ในเทอมของค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนไปคือ  $R_L + jX_L + \frac{R_F}{2} \left( \frac{I_R}{I} + 1 \right)$  ซึ่งในเทอมของความต้านทานฟอล์ทจะมีค่าเปลี่ยนไปคือค่าความต้านทานฟอล์ทจะน้อยที่สุดคือ 1 เท่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับในกรณีที่กระแสที่ไหลจากอีกด้านมีค่ามากน้อยเท่าใด จากเหตุผลดังกล่าวถ้าเราจะเซตตั้งค่าความต้านทานฟอล์ทของการป้องกันฟอล์ทเฟส-เฟสเมื่อเกิดความต้านทานฟอล์ทที่  $25 \Omega$  ต่อเฟส (1 เท่าของ  $R_F$ ) จึงจำเป็นต้องเซตตั้งค่าความต้านทานฟอล์ทไว้มากกว่าค่าความต้านทานฟอล์ท ( $R_F$ ) ดังที่จะได้กล่าวต่อไป ส่วนคำสั่งทริปที่จากเอาต์พุตของรีเลย์ที่เขียนจาก m-file ได้แสดงไว้ในตารางที่ 10

**ตารางที่ 10** จำลองการทำงานของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อนำมาติดตั้งกับระบบสายส่งวงจรเดี่ยว 2 แหล่งจ่าย (โดยมีการเซตคั้งเพื่อชดเชยค่าความต้านทานฟอล์ทไว้ 25  $\Omega$  และเซตคั้งโซนตามหลักการดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1.1)

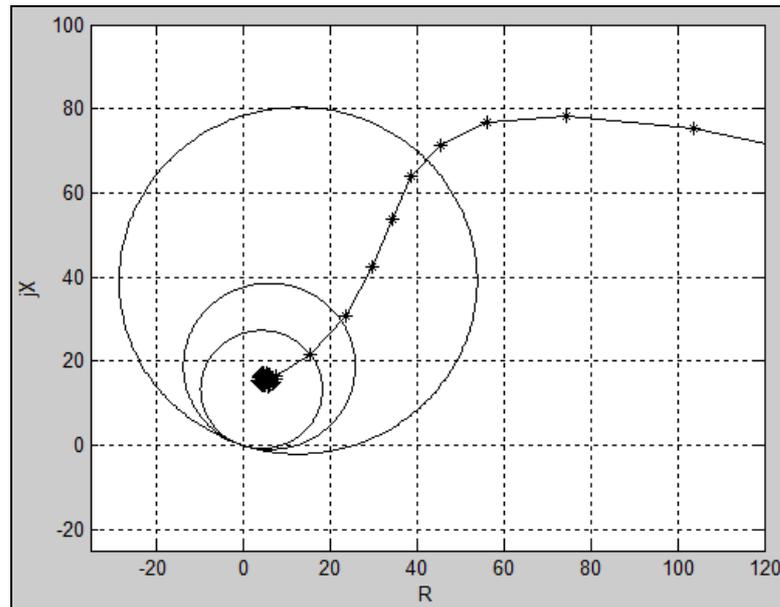
%ของความยาวสายด้านรีเลย์ 1	%ของความยาวสายด้านรีเลย์ 2	เฟสที่เกิดฟอล์ท	ความต้านทานฟอล์ท, $R_{F(\text{Phase to Phase})}$ ( $\Omega$ )	โซนที่สั่งทริปของรีเลย์ 1	โซนที่สั่งทริปของรีเลย์ 2
10	90	AB	0	1	2
50	50	AB	0	1	1
90	10	AB	0	2	1
10	90	BC	0	1	2
50	50	BC	0	1	1
90	10	BC	0	2	1
10	90	CA	0	1	2
50	50	CA	0	1	1
90	10	CA	0	2	1
10	90	AB	50	3	3
50	50	AB	50	3	3
90	10	AB	50	3	3
10	90	BC	50	3	3
50	50	BC	50	3	3
90	10	BC	50	3	3
10	90	CA	50	3	3
50	50	CA	50	3	3
90	10	CA	50	3	3

จากตารางที่ 10 พบว่าเมื่อมีการใส่ค่าเซตคั้งเพื่อชดเชยค่าความต้านทานฟอล์ทไว้ 25  $\Omega$  แล้วรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุณกราฟคุณลักษณะสามารถชดเชยโซนที่สั่งทริปได้ในระดับ

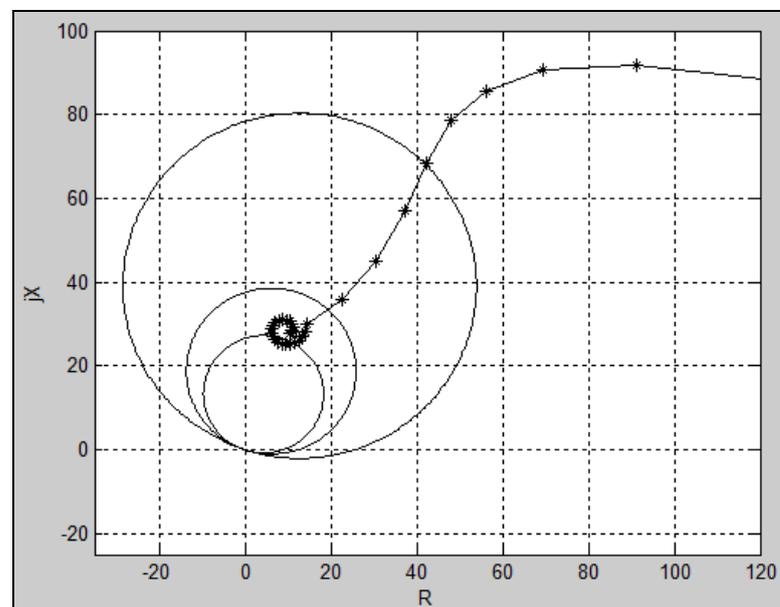
หนึ่ง คือสามารถชดเชยโชนที่สังทรูปโชน 1 และ โชน 2 มาเป็นโชนที่สังทรูปโชน 3 โดยค่าอิมพีแดนซ์ที่ตรวจจับได้จะเปลี่ยนไปตามสมการที่ (14) ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ซึ่งถือว่าเป็นการตรวจจับโชนที่คลาดเคลื่อน แต่ถ้าไม่มีการเซตคั้งเพื่อชดเชยความต้านทานพอลท์เมื่อเกิดความต้านทานพอลท์ขึ้นรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์จะไม่สามารถตรวจจับพอลท์พบในทุก ๆ โชน จากข้อมูลดังกล่าวถ้าเราเพิ่มค่าเซตคั้งเพื่อชดเชยค่าความต้านทานพอลท์เป็น  $50 \Omega$  เพื่อปรับให้รีเลย์รองรับค่าทางเดินของอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนไปตามสมการที่ (14) ดังที่ได้กล่าวไปแล้วแล้วทำการจำลองใหม่แล้วนำค่าที่ได้มาบันทึกผลลงในตารางที่ 11



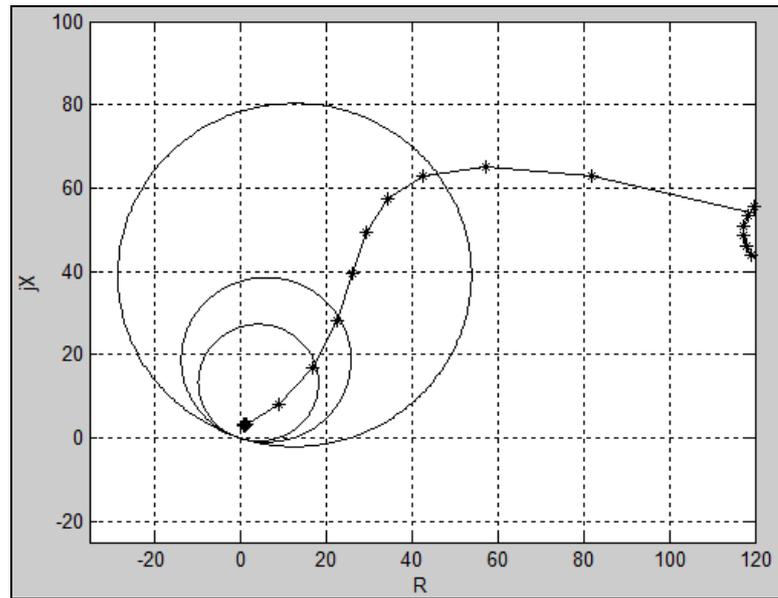
ภาพที่ 71 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะตัว 1 เมื่อพอลท์แบบ AB ที่ 10% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 0 \Omega$  จำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แห่องจ่าย ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



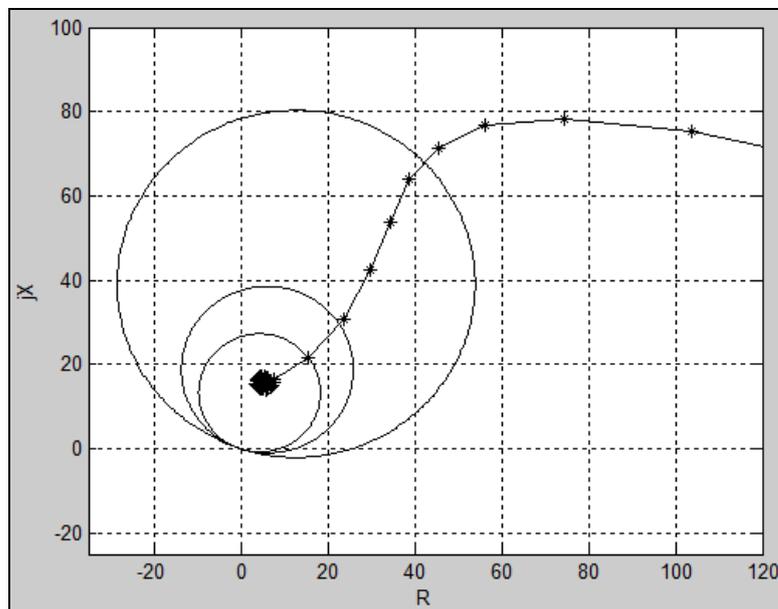
ภาพที่ 72 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัว 1 เมื่อฟอลต์แบบ AB ที่ 50% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 0 \Omega$  จำลองด้วย  
ระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



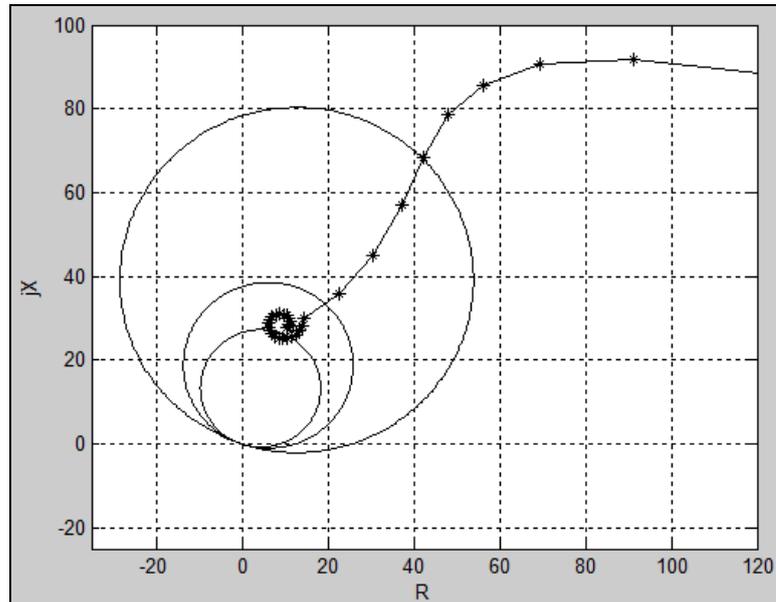
ภาพที่ 73 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัว 1 เมื่อฟอลต์แบบ AB ที่ 90% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 0 \Omega$  จำลองด้วย  
ระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



ภาพที่ 74 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัว 2 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 10% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 0 \Omega$  จำลองด้วย  
ระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$

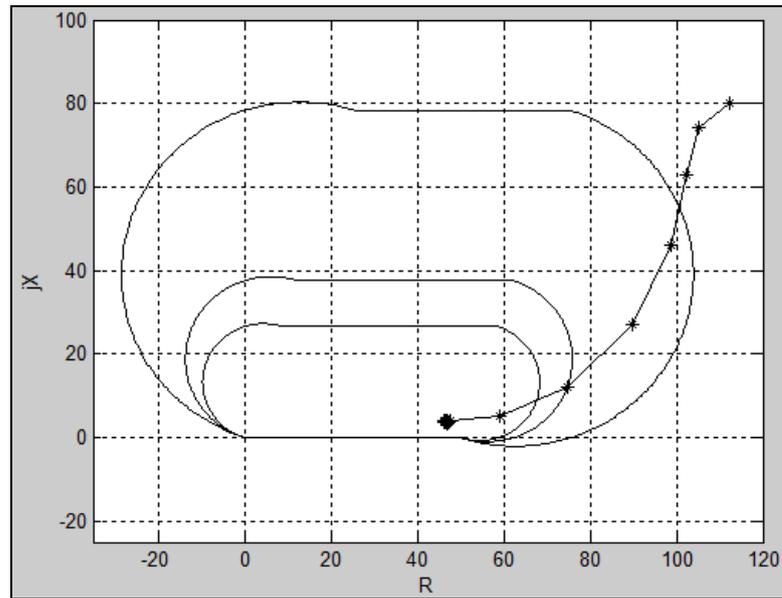


ภาพที่ 75 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัว 2 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 50% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 0 \Omega$  จำลองด้วย  
ระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$

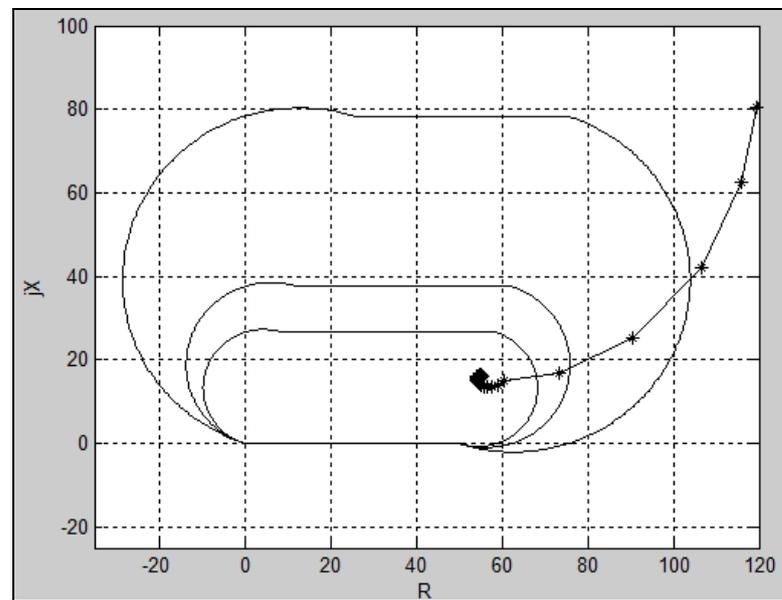


ภาพที่ 76 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ ตัว 2 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 90% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 0 \Omega$  จำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$

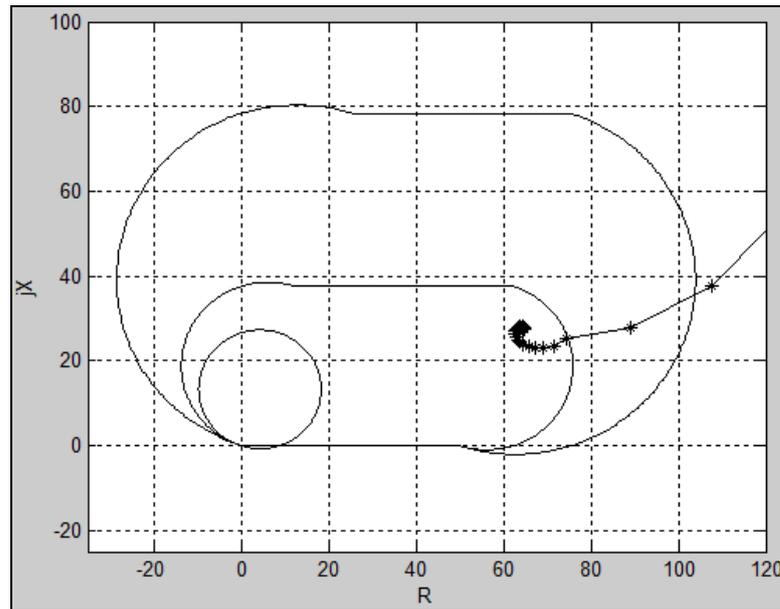
จากภาพที่ 71 ถึง 76 เป็นรูปที่ใช้ข้อมูลที่ได้จากการจำลองด้วย Matlab/Simulink ซึ่งเก็บผลไว้ในหน่วยความจำแล้วนำไปวาดรูปด้วยการเขียน m-file ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ ซึ่งทำการจำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย โดยการทำให้เกิดฟอล์ทที่เฟส A กับ B ในระหว่างความยาวของสายส่งจากบัส 1 ไปยัง บัส 2 คือ ฟอล์ทที่ 10% 50% และ 90% จากบัส 1 ตามลำดับ โดยค่าความต้านทานฟอล์ทที่ใส่ในกล่องเครื่องมือของ ฟอล์ท ใน Simulink มีค่าเท่ากับ  $0 \Omega$  ( $R_F = 0 \Omega$ ) ซึ่งหมายความว่าไม่มีค่าความต้านทานฟอล์ทเกิดขึ้นในขณะฟอล์ทนั่นเอง ซึ่งพบว่ารีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่สร้างและจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink มีการทำงานรองรับทางเดินของอิมพีแดนซ์ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (14) ทำให้เราพบว่าเมื่อนำรีเลย์ระยะทางแบบโมห์มาใช้ในการป้องกันกับวงจรสายส่งเส้นเดียวที่มี 2 แหล่งจ่าย ถ้าไม่เกิดค่าความต้านทานฟอล์ทขึ้นในขณะที่เกิดฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส รีเลย์ระยะทางแบบนี้ก็จะทำหน้าที่ป้องกันสายส่งได้ตามปกติโดยไม่ต้องมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะเหมือนกับการใช้ในการป้องกันสายส่งวงจรเดียวที่มีเพียงแหล่งจ่ายเดียว



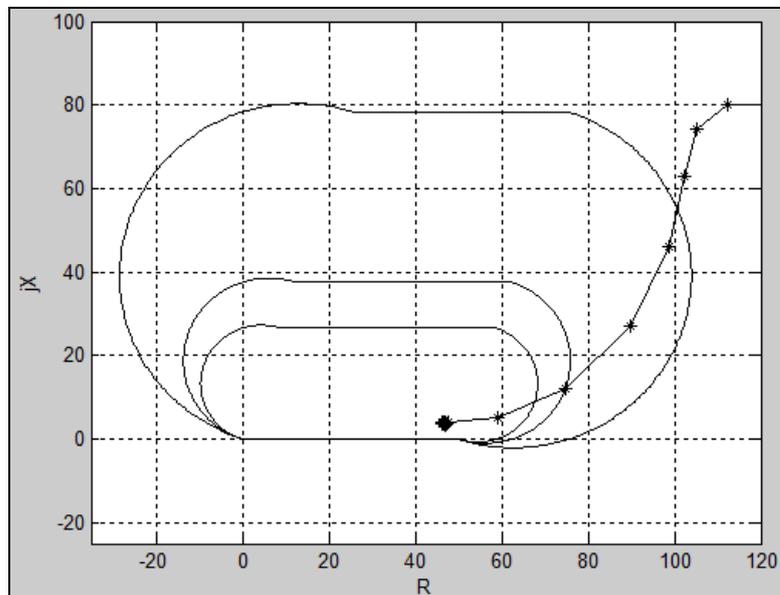
ภาพที่ 77 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัว 1 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 10% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 50 \Omega$  จำลองด้วย  
ระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



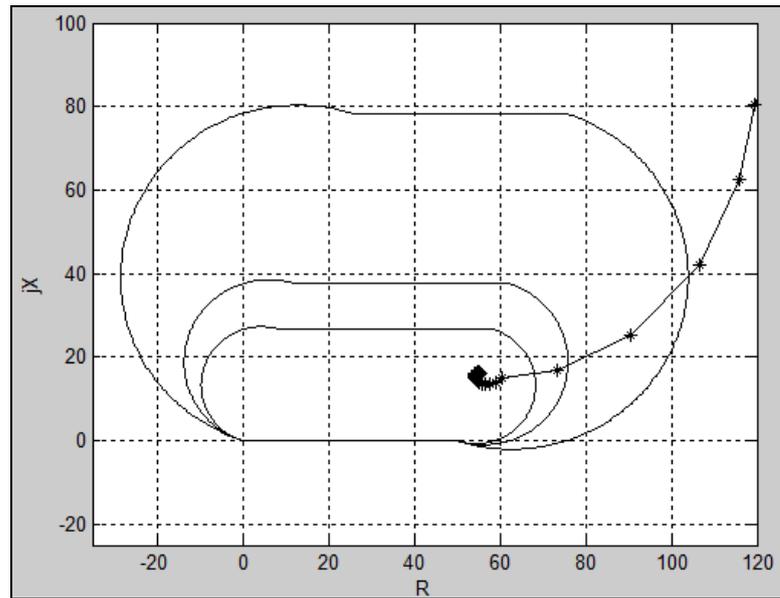
ภาพที่ 78 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัว 1 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 50% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 50 \Omega$  จำลองด้วย  
ระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



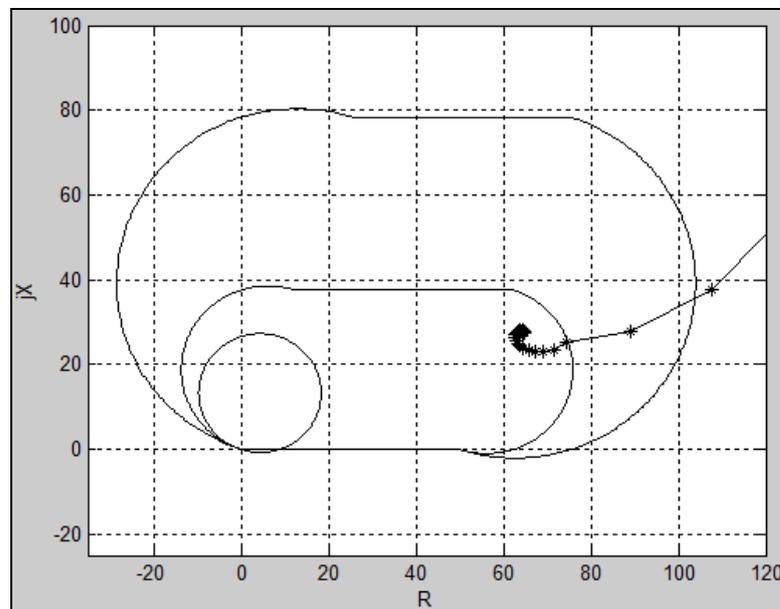
ภาพที่ 79 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัว 1 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 90% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 50 \Omega$  จำลองด้วย  
ระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แห่่งจ่าย ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



ภาพที่ 80 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัว 2 เมื่อฟอล์ทแบบ AB ที่ 10% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 50 \Omega$  จำลองด้วย  
ระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แห่่งจ่าย ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



ภาพที่ 81 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะตัว 2 เมื่อฟอลต์แบบ AB ที่ 50% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 50 \Omega$  จำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



ภาพที่ 82 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะตัว 2 เมื่อฟอลต์แบบ AB ที่ 90% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 50 \Omega$  จำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$

จากภาพที่ 77 ถึง 82 เป็นรูปที่ใช้ข้อมูลที่ได้จากการจำลองด้วย Matlab/Simulink ซึ่งเก็บผลไว้ในหน่วยความจำแล้วนำไปวาดรูปด้วยการเขียน m-file ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ ซึ่งทำการจำลองด้วยระบบสายส่งวงจรเดียว 2 แหล่งจ่าย โดยการทำให้เกิดฟอล์ทที่เฟส A กับ B ในระหว่างความยาวของสายส่งจากบัส 1 ไปยัง บัส 2 คือ ฟอล์ทที่ 10% 50% และ 90% จากบัส 1 ตามลำดับ โดยค่าความต้านทานฟอล์ทระหว่างเฟสที่ฟอล์ทมีค่า  $50 \Omega$  และรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่สร้างและจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink มีการเปลี่ยนแปลงทางเดินของอิมพีแดนซ์ทั้งขนาดและทิศทาง ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (14) มีผลทำให้รีเลย์ระยะทางเกิดความคลาดเคลื่อนหรือผิดพลาดในการป้องกันและทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าได้ การใช้หลักการของ “KU Method” เพื่อรองรับความต้านทานฟอล์ทที่เกิดขึ้นในระหว่างฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส ในสายส่งวงจรเดียวที่มีแหล่งจ่าย 2 แหล่งจ่าย ถ้ามีการเซตตั้งความต้านทานฟอล์ทไว้ที่  $50 \Omega$  ( $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$ ) สามารถที่จะรองรับความต้านทานฟอล์ทที่เกิดขึ้นได้ทั้งนี้จากสมการที่ (14) ในเทอมของค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนไปคือ  $R_L + jX_L + \frac{R_F}{2} \left( \frac{I_R}{I} + 1 \right)$  ซึ่งในเทอมของความต้านทานฟอล์ทจะมีค่าเปลี่ยนไปคือค่าความต้านทานฟอล์ทจะน้อยที่สุดคือ 1 เท่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับในกรณีที่กระแสที่ไหลจากอีกด้านมีค่ามากน้อยเท่าใด จากเหตุผลดังกล่าวถ้าเราจะเซตตั้งเพื่อชดเชยค่าความต้านทานฟอล์ทของการป้องกันฟอล์ท เฟส-เฟสเมื่อเกิดความต้านทานฟอล์ทที่  $50 \Omega$  เท่ากับ  $50 \Omega$  จึงเพียงพอที่จะรองรับค่าทางเดินของอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนไปได้ (ในการพิจารณาที่แหล่งจ่ายทั้ง 2 ด้านมีค่าพารามิเตอร์เหมือนกัน) ส่วนคำสั่งทริปที่ได้จากเอาต์พุตของรีเลย์ที่เขียนจาก m-file แสดงไว้ในตารางที่ 11

**ตารางที่ 11** จำลองการทำงานของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อนำมาติดตั้งกับระบบสายส่งวงจรเดี่ยว 2 แหล่งจ่าย (โดยมีการเชื่อมต่อเพื่อชดเชยค่าความต้านทานฟอล์ทไว้ 50  $\Omega$ )

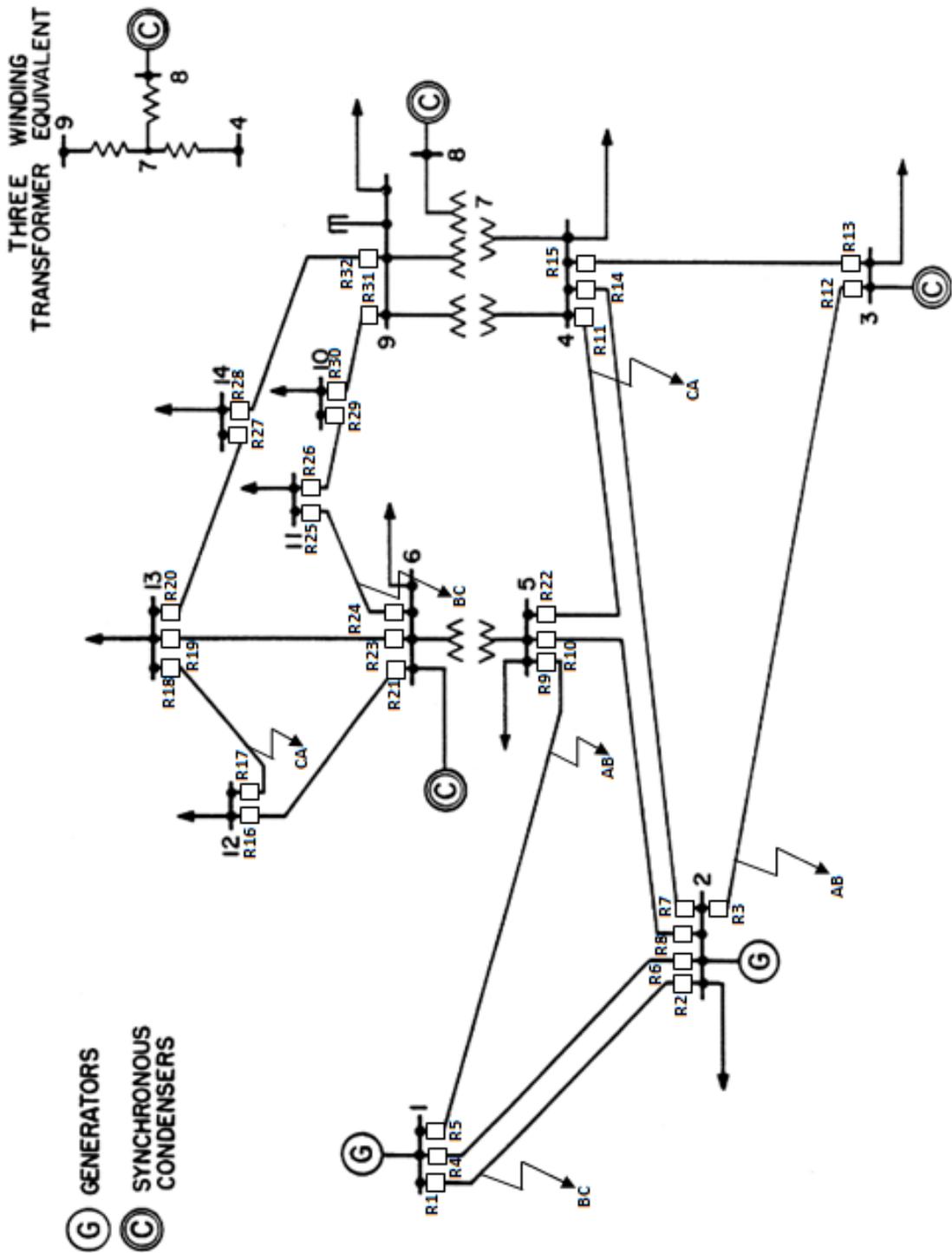
%ของความยาวสายด้านรีเลย์ 1	%ของความยาวสายด้านรีเลย์ 2	เฟสที่เกิดฟอล์ท	ความต้านทานฟอล์ท, $R_{F(\text{Phase to Phase})}$ ( $\Omega$ )	โซนที่ส่งโทริปของรีเลย์ 1	โซนที่ส่งโทริปของรีเลย์ 2
10	90	AB	0	1	2
50	50	AB	0	1	1
90	10	AB	0	2	1
10	90	BC	0	1	2
50	50	BC	0	1	1
90	10	BC	0	2	1
10	90	CA	0	1	2
50	50	CA	0	1	1
90	10	CA	0	2	1
10	90	AB	50	1	2
50	50	AB	50	1	1
90	10	AB	50	2	1
10	90	BC	50	1	2
50	50	BC	50	1	1
90	10	BC	50	2	1
10	90	CA	50	1	2
50	50	CA	50	1	1
90	10	CA	50	2	1

จากตารางที่ 11 พบว่าเมื่อมีการใส่ค่าเชื่อมต่อเพื่อชดเชยค่าความต้านทานฟอล์ทไว้ 50  $\Omega$  รีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะสามารถชดเชยโซนที่ส่งโทริปได้อย่างถูกต้องสมบูรณ์ โดยจะเห็นได้จากโซนที่ส่งโทริปของรีเลย์ทั้ง 2 ตัวทำงานส่งโทริปโซนเหมือนกับที่มี

ค่าความต้านทานฟอล์ทเท่ากับ  $0 \ \Omega$  จากผลการจำลองและจากสมการที่ (14) พบว่าการเพิ่มขนาดของค่าเซตคั้งเพื่อชดเชยค่าความต้านทานฟอล์ทให้เท่ากับค่าความต้านทานฟอล์ทระหว่างการเกิดฟอล์ท 2 เฟส ในกรณีของสายส่งวงจรเดียวที่มีแหล่งจ่าย 2 แหล่งจ่ายนั้น จะทำให้การชดเชยค่าความต้านทานฟอล์ทของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะเป็นไปได้อย่างถูกต้องสมบูรณ์ แต่ถ้าหากเซตคั้งเพื่อรองรับความต้านทานฟอล์ทมากเกินไปในขณะที่รีเลย์ทำงานด้วยการขยายโซนป้องกันก็อาจทำให้รีเลย์เห็นโหลดเป็นการฟอล์ทได้ดังนั้นในการเซตคั้งค่าความต้านทานฟอล์ทเพื่อชดเชยกรณีดังกล่าวจึงควรพิจารณาเป็นกรณีไป เพื่อให้ระบบป้องกันทำงานได้สมบูรณ์ที่สุด

### 2.1.7 จำลองรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะด้วยสายส่ง วงจรทดสอบ 14 บัส ของ IEEE (IEEE 14 BUS TEST CASE)

เมื่อออกแบบและทดสอบด้วยการจำลองใน Matlab/Simulink และ m-file จนได้รีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะหรือ Adaptive Mho Distance Relay ด้วยวิธี KU (“KU Method”) แล้ว ได้นำรีเลย์ดังกล่าวมาทดสอบกับวงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ซึ่งเป็นวงจรกำลังมาตรฐานของ IEEE เพื่อทดสอบว่ารีเลย์แนวคิดใหม่สามารถตอบสนองความต้องการในการแก้ไขปัญหาความต้านทานฟอล์ทที่เกิดขึ้นกับฟอล์ทชนิด เฟส-เฟส ได้ดีเพียงใด ซึ่งในภาพที่ 83 แสดงวงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE และจุดที่ติดตั้งรีเลย์ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ติดตั้งรีเลย์เพื่อทำการจำลองทั้งหมด 32 ตัวโดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรทดสอบได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดจุดที่เกิดฟอล์ทและเฟสที่เกิดฟอล์ทไว้ในภาพที่ 83 ด้วย และได้เขียนแสดงไว้ในตารางที่ 12

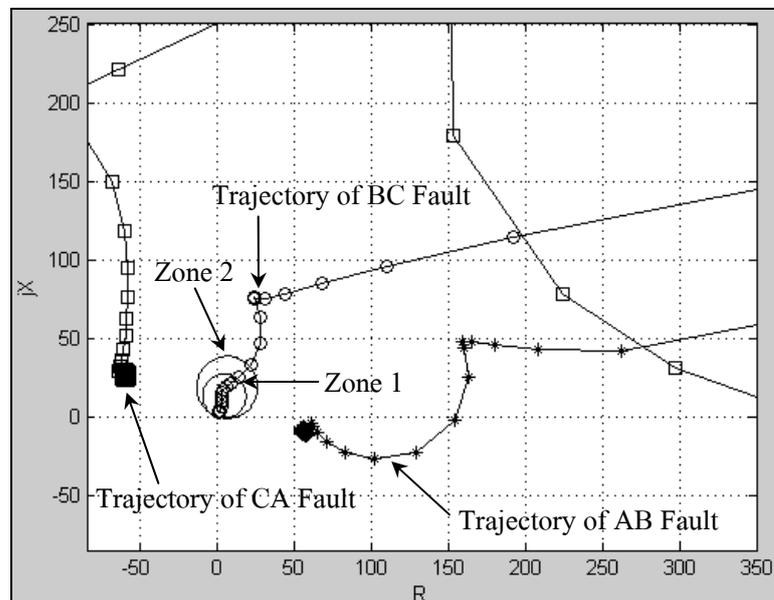


ภาพที่ 83 วงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE หรือ IEEE 14 BUS TEST CASE

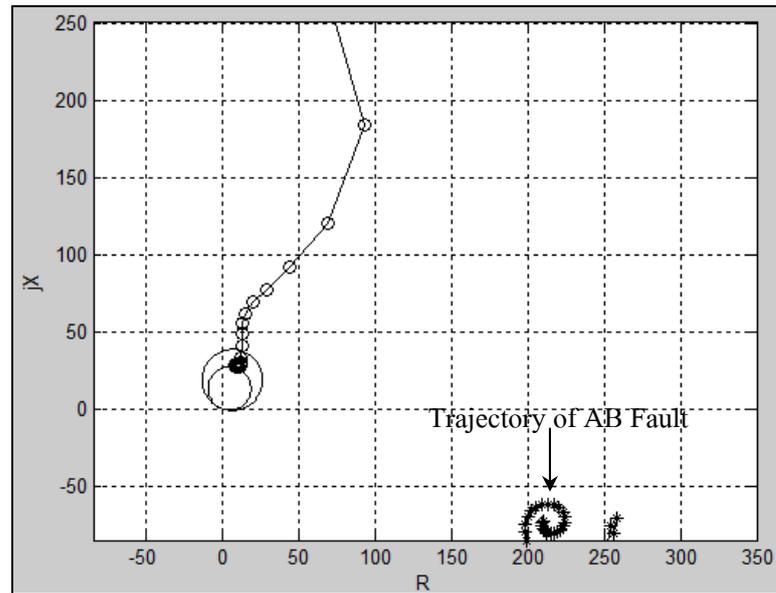
ตารางที่ 12 จุดที่เกิดฟอลต์และเฟสที่เกิดฟอลต์ในวงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE

จุดที่เกิดฟอลต์	เฟสที่เกิดฟอลต์
10% จาก BUS 1	BC
10% จาก BUS 2	AB
10% จาก BUS 4	CA
10% จาก BUS 5	AB
10% จาก BUS 6	BC
10% จาก BUS 12	CA

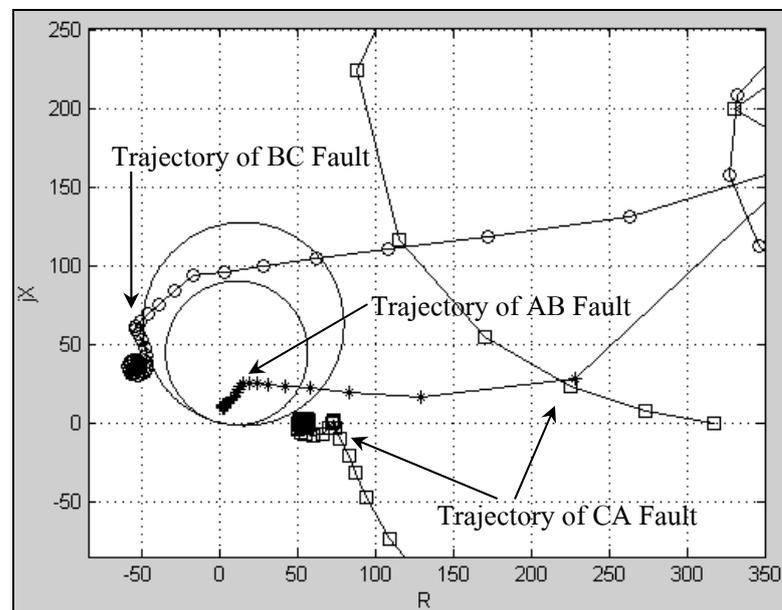
ทำการจำลองและเก็บผลของสถานะการทำงานของรีเลย์ระยะทางทุกตัวในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการเกิดฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่จุดต่าง ๆ ตามที่แสดงตำแหน่งของรีเลย์ดังแสดงในภาพที่ 83 แล้วบันทึกผลการจำลองที่ได้ลงในตารางที่ 13



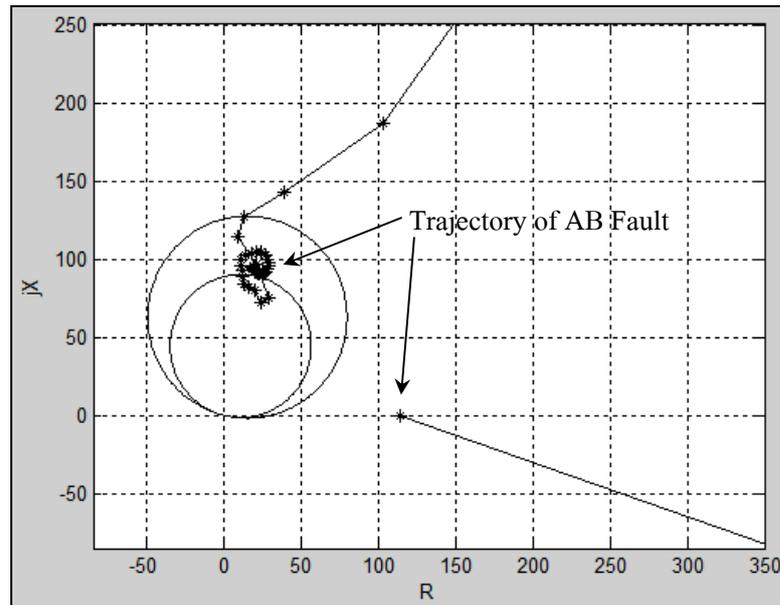
ภาพที่ 84 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะตัวที่ 1 เมื่อฟอลต์แบบ BC ที่ 10% ของความยาวสาย และ  $R_{F(BC)} = 0 \Omega$  จำลองด้วยวงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



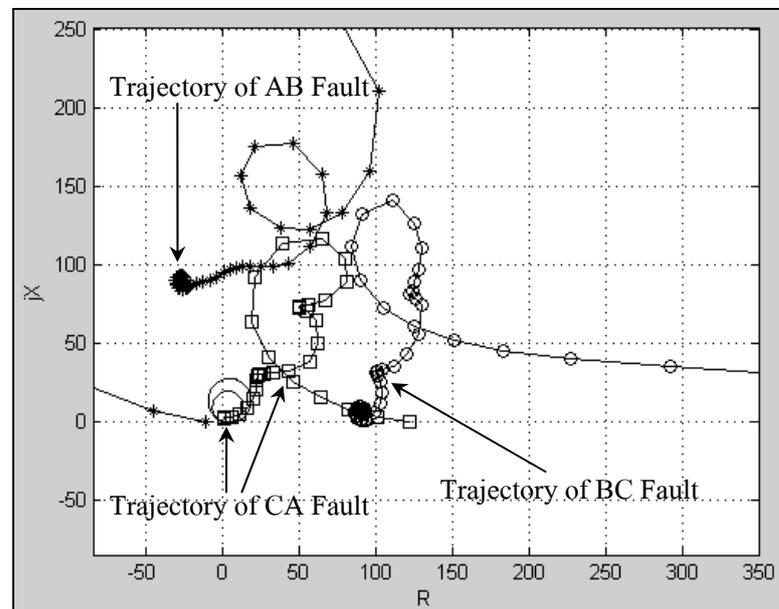
ภาพที่ 85 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิด โมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัวที่ 2 เมื่อฟอลต์แบบ BC ที่ 90% ของความยาวสาย และ  $R_{F(BC)} = 0 \Omega$  จำลองด้วย  
วงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



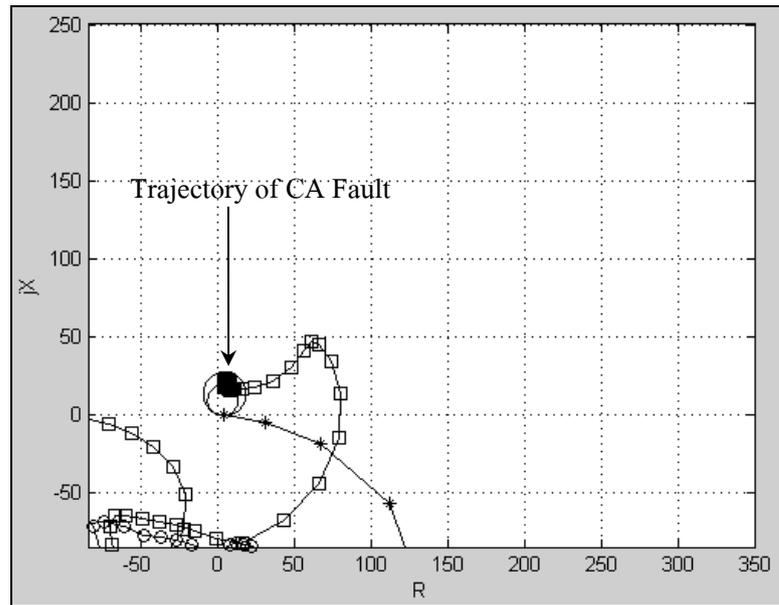
ภาพที่ 86 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิด โมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัวที่ 3 เมื่อฟอลต์แบบ AB ที่ 10% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 0 \Omega$  จำลองด้วย  
วงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



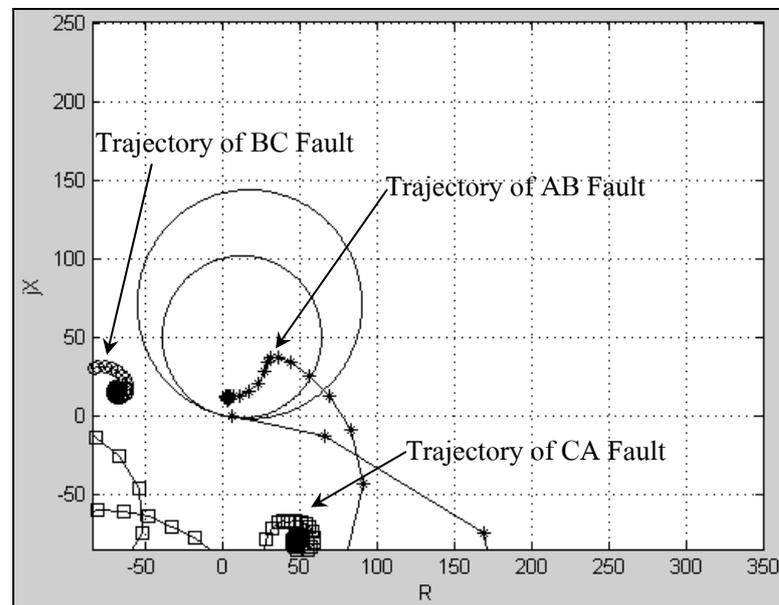
ภาพที่ 87 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัวที่ 12 เมื่อฟอลต์แบบ AB ที่ 90% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 0 \Omega$  จำลองด้วย  
วงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



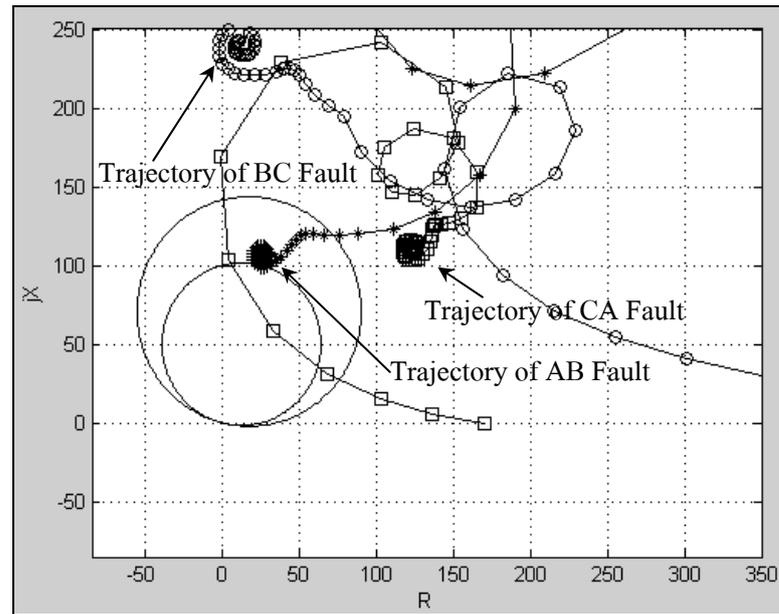
ภาพที่ 88 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัวที่ 11 เมื่อฟอลต์แบบ CA ที่ 10% ของความยาวสาย และ  $R_{F(CA)} = 0 \Omega$  จำลองด้วย  
วงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



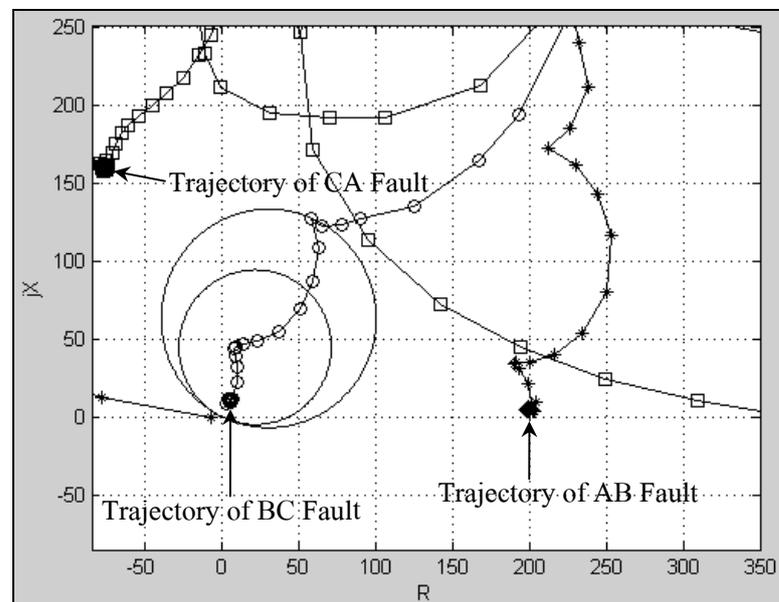
ภาพที่ 89 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัวที่ 22 เมื่อฟอลต์แบบ CA ที่ 90% ของความยาวสาย และ  $R_{F(CA)} = 0 \Omega$  จำลองด้วย  
วงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



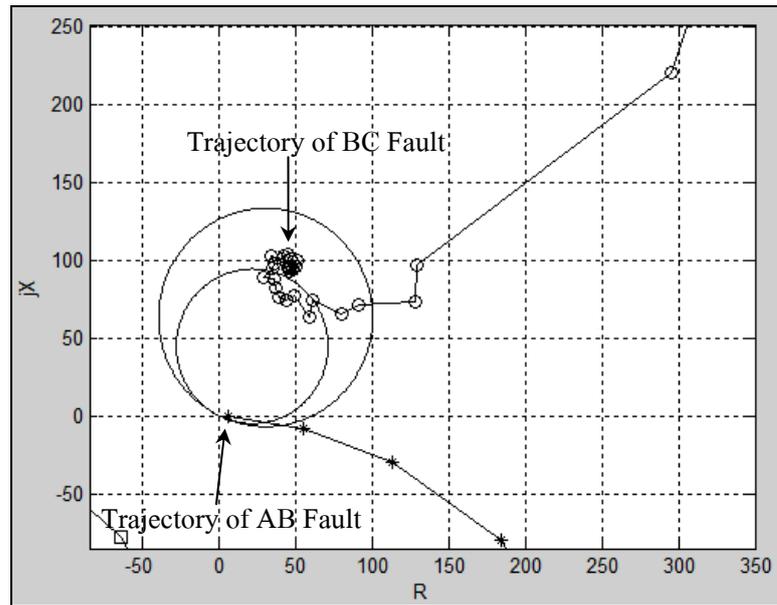
ภาพที่ 90 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัวที่ 9 เมื่อฟอลต์แบบ AB ที่ 10% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 0 \Omega$  จำลองด้วย  
วงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



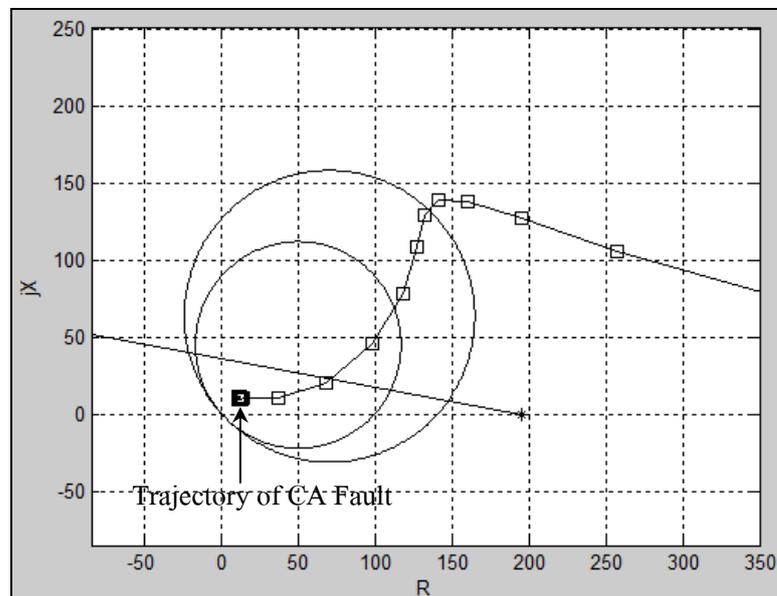
ภาพที่ 91 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัวที่ 5 เมื่อฟอลต์แบบ AB ที่ 90% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 0 \Omega$  จำลองด้วย  
วงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



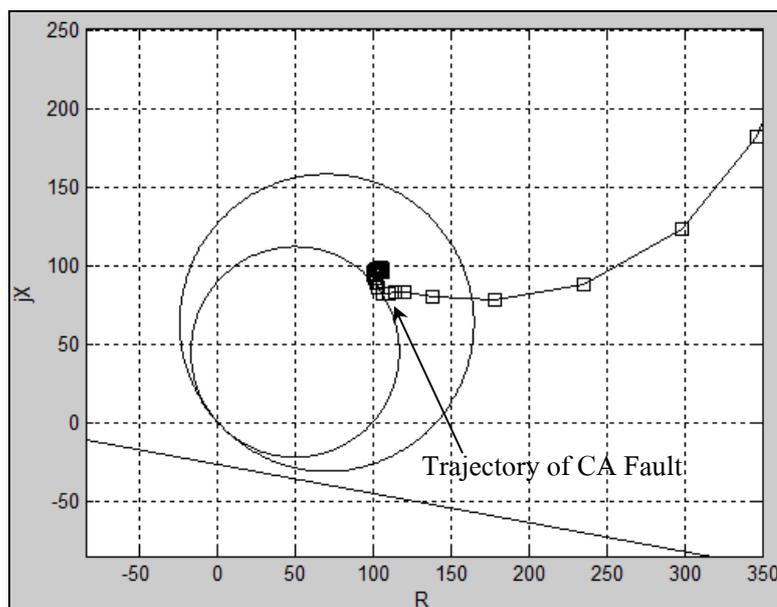
ภาพที่ 92 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัวที่ 24 เมื่อฟอลต์แบบ BC ที่ 10% ของความยาวสาย และ  $R_{F(BC)} = 0 \Omega$  จำลองด้วย  
วงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



ภาพที่ 93 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัวที่ 25 เมื่อฟอลต์แบบ BC ที่ 90% ของความยาวสาย และ  $R_{F(BC)} = 0 \Omega$  จำลองด้วย  
วงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$

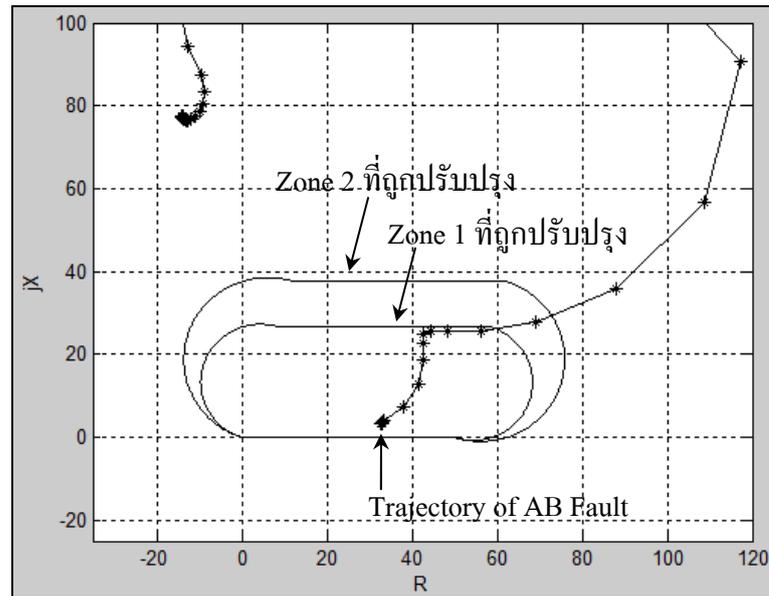


ภาพที่ 94 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัวที่ 17 เมื่อฟอลต์แบบ CA ที่ 10% ของความยาวสาย และ  $R_{F(CA)} = 0 \Omega$  จำลองด้วย  
วงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



ภาพที่ 95 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัวที่ 18 เมื่อฟอลต์แบบ CA ที่ 90% ของความยาวสาย และ  $R_{F(CA)} = 0 \Omega$  จำลองด้วย  
วงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$

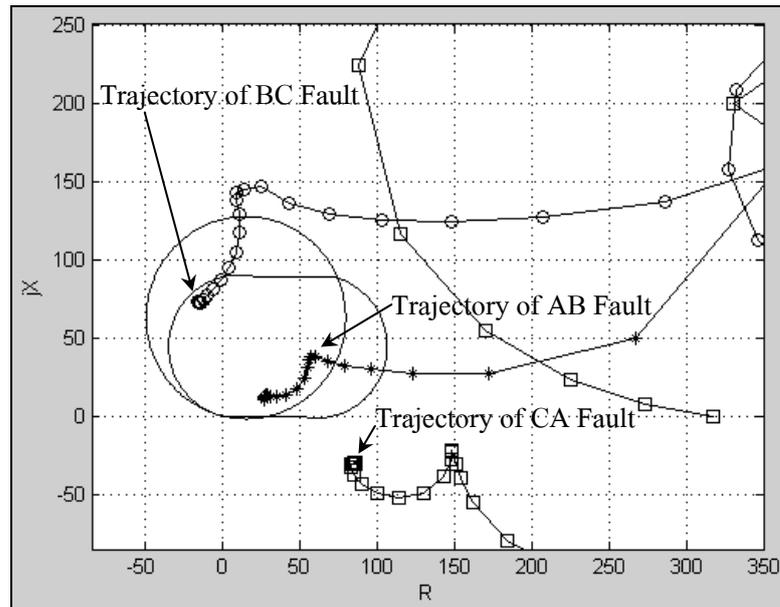
จากภาพที่ 84 ถึง 95 เป็นรูปที่ใช้ข้อมูลที่ได้จากการจำลองด้วย Matlab/Simulink ซึ่งเก็บผล  
ไว้ในหน่วยความจำแล้วนำไปวาดรูปด้วยการเขียน m-file ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการ  
ปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ ซึ่งทำการจำลองด้วยระบบสายส่งวงจรวจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE  
โดยการทำให้เกิดฟอลต์แบบ เฟส-เฟส ในระหว่างความยาวของสายส่งจากบัสไปยังอีกบัส คือที่  
10% จากบัสแรก และ 90% ของอีกบัสที่อยู่ตรงข้าม ตามลำดับ (ดูภาพที่ 83 ประกอบ) โดยค่าความ  
ต้านทานฟอลต์ที่ใส่ในกล่องเครื่องมือของ ฟอลต์ ใน Simulink มีค่าเท่ากับ  $0 \Omega$  ( $R_f = 0 \Omega$ ) ซึ่ง  
หมายความว่าไม่มีค่าความต้านทานฟอลต์เกิดขึ้นในขณะที่ฟอลต์นั่นเอง ซึ่งพบว่ารีเลย์ระยะทางชนิด  
โมห์ที่สร้างและจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink มีการทำงานรองรับทางเดินของอิมพีแดนซ์  
ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (14) ทำให้เราพบว่าเมื่อนำรีเลย์ระยะแบบโมห์มาใช้ในการป้องกันกับวงจรว  
จรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ถ้าไม่เกิดค่าความต้านทานฟอลต์ขึ้นในขณะที่เกิดฟอลต์แบบ เฟส-  
เฟส รีเลย์ระยะทางแบบนี้ก็จะทำหน้าที่ป้องกันสายส่งได้ตามปกติโดยไม่ต้องมีการปรับปรุงกราฟ  
คุณลักษณะเหมือนกับการใช้ในการป้องกันสายส่งวงจรเดี่ยวที่มีเพียงแหล่งจ่ายเดียว



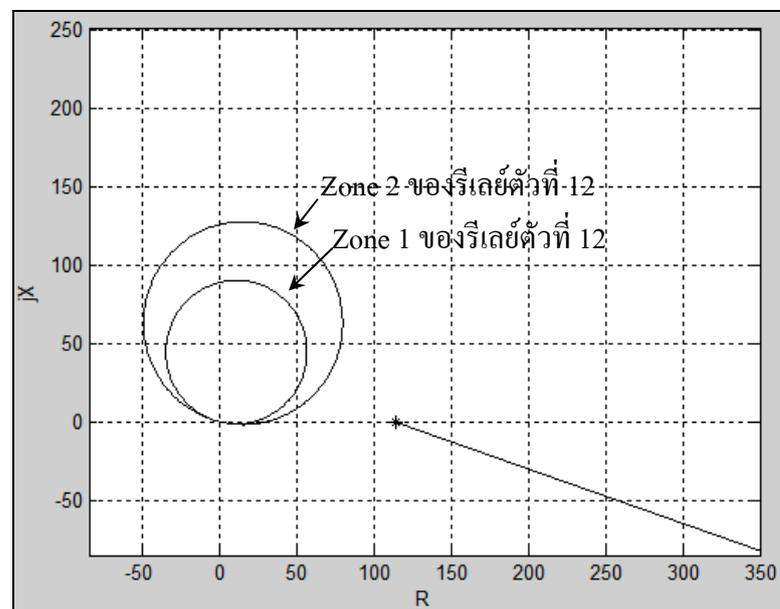
ภาพที่ 96 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
 ตัวที่ 1 เมื่อฟอลต์แบบ BC ที่ 10% ของความยาวสาย และ  $R_{F(BC)} = 50 \Omega$  จำลองด้วย  
 วงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



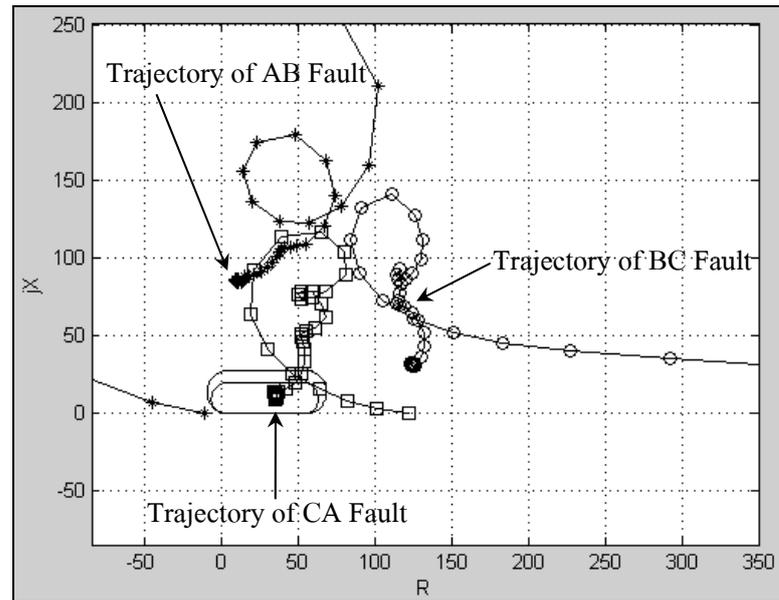
ภาพที่ 97 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
 ตัวที่ 2 เมื่อฟอลต์แบบ BC ที่ 90% ของความยาวสาย และ  $R_{F(BC)} = 50 \Omega$  จำลองด้วย  
 วงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



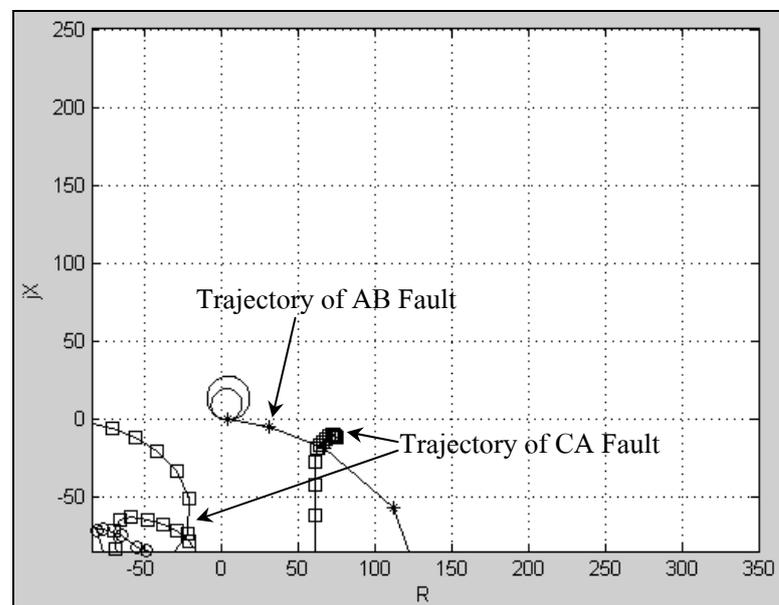
ภาพที่ 98 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัวที่ 3 เมื่อฟอลต์แบบ AB ที่ 10% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 50 \Omega$  จำลองด้วย  
วงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



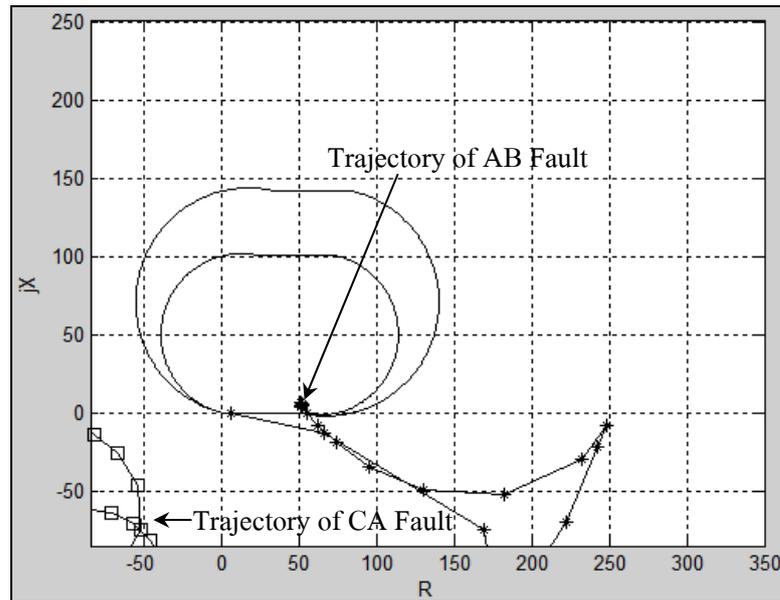
ภาพที่ 99 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัวที่ 12 เมื่อฟอลต์แบบ AB ที่ 90% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 50 \Omega$  จำลองด้วย  
วงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



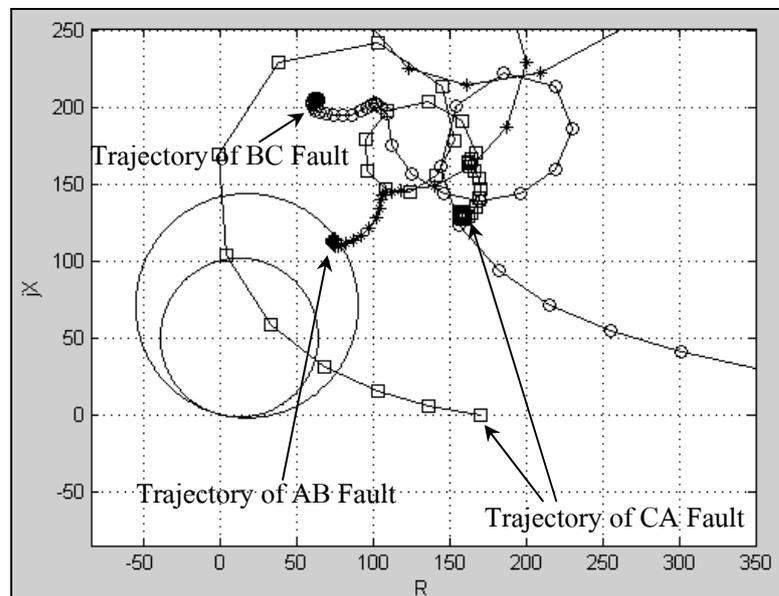
ภาพที่ 100 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิด โมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัวที่ 11 เมื่อฟอลต์แบบ CA ที่ 10% ของความยาวสาย และ  $R_{F(CA)} = 50 \Omega$  จำลองด้วย  
วงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



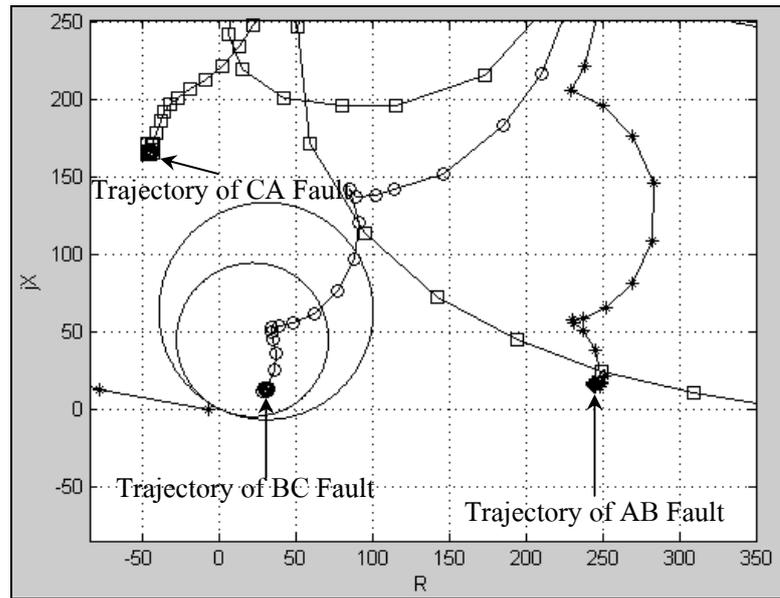
ภาพที่ 101 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิด โมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัวที่ 22 เมื่อฟอลต์แบบ CA ที่ 90% ของความยาวสาย และ  $R_{F(CA)} = 50 \Omega$  จำลองด้วย  
วงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



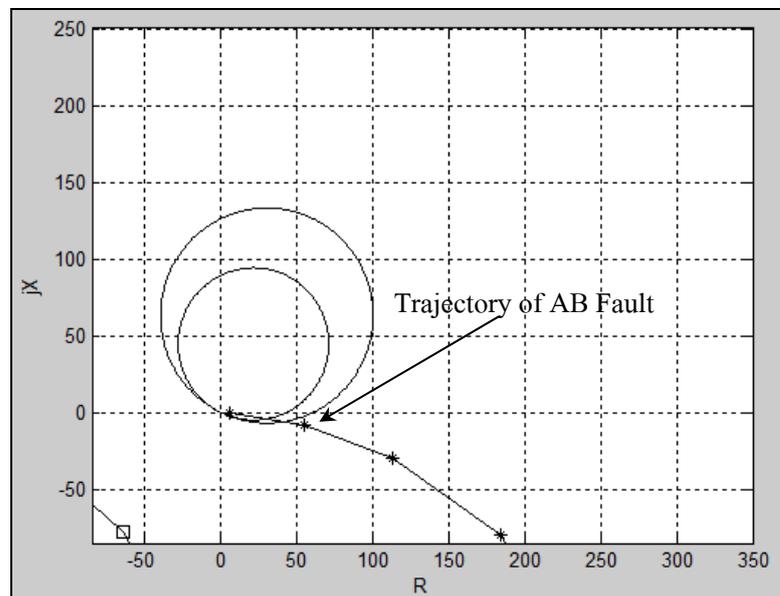
ภาพที่ 102 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิด โมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ ตัวที่ 9 เมื่อฟอลต์แบบ AB ที่ 10% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 50 \Omega$  จำลองด้วย วงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



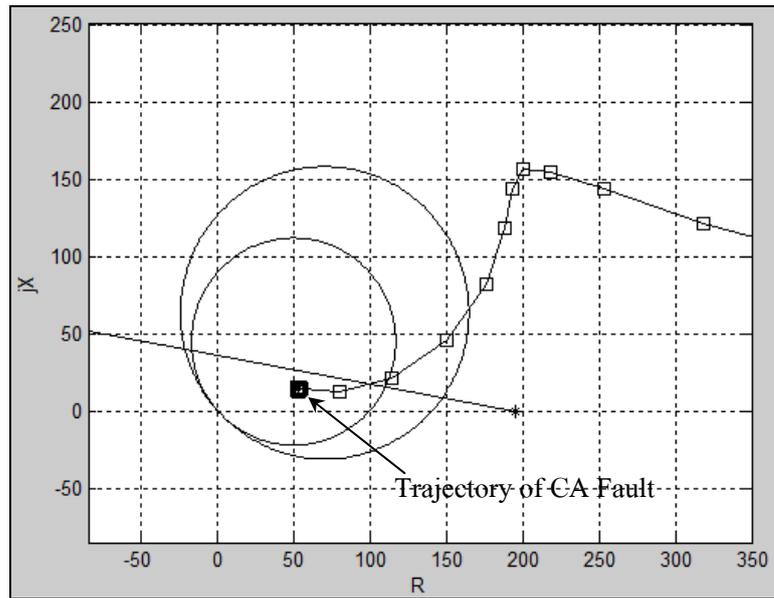
ภาพที่ 103 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิด โมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ ตัวที่ 5 เมื่อฟอลต์แบบ AB ที่ 90% ของความยาวสาย และ  $R_{F(AB)} = 50 \Omega$  จำลองด้วย วงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



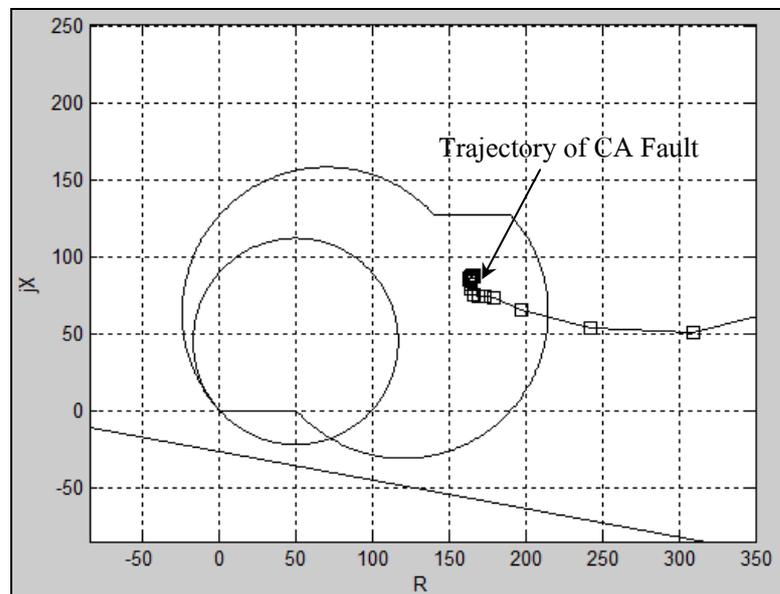
ภาพที่ 104 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัวที่ 24 เมื่อฟอลต์แบบ BC ที่ 10% ของความยาวสาย และ  $R_{F(BC)} = 50 \Omega$  จำลองด้วย  
วงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



ภาพที่ 105 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัวที่ 25 เมื่อฟอลต์แบบ BC ที่ 90% ของความยาวสาย และ  $R_{F(BC)} = 50 \Omega$  จำลองด้วย  
วงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



ภาพที่ 106 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัวที่ 17 เมื่อฟอลต์แบบ CA ที่ 10% ของความยาวสาย และ  $R_{F(CA)} = 50 \Omega$  จำลองด้วย  
วงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$



ภาพที่ 107 ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์เมื่อมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ  
ตัวที่ 18 เมื่อฟอลต์แบบ CA ที่ 90% ของความยาวสาย และ  $R_{F(CA)} = 50 \Omega$  จำลองด้วย  
วงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE ที่  $R_{F \text{ Setting}} = 50 \Omega$

จากภาพที่ 96 ถึง 107 เป็นรูปที่ใช้ข้อมูลที่ได้จากการจำลองด้วย Matlab/Simulink ซึ่งเก็บผลไว้ในหน่วยความจำแล้วนำไปวาดรูปด้วยการเขียน m-file ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ ซึ่งทำการจำลองด้วยระบบสายส่งวงจรทดสอบ 14 บัสของ IEEE โดยการทำให้เกิดฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส ในระหว่างความยาวของสายส่งจากบัสไปยังอีกบัส คือที่ 10% จากบัสแรก และ 90% ของอีกบัสที่อยู่ตรงข้าม ตามลำดับ (ดูภาพที่ 83 ประกอบ) โดยค่าความต้านทานฟอล์ทที่ใส่ในกล่องเครื่องมือของฟอล์ทใน Simulink มีค่าเท่ากับ  $50 \Omega$  ในขณะที่ฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส และรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่สร้างและจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink มีการเปลี่ยนแปลงทางเดินของอิมพีแดนซ์ทั้งขนาดและทิศทาง ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (14) มีผลทำให้รีเลย์ระยะทางเกิดความคลาดเคลื่อนหรือผิดพลาดในการป้องกันและทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าได้ การใช้หลักการของ “KU Method” เพื่อรองรับความต้านทานฟอล์ทที่เกิดขึ้นในระหว่างฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส สามารถที่จะรองรับความต้านทานฟอล์ทที่เกิดขึ้นได้ทั้งนี้จากสมการที่ (14) ในเทอมของค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนไปคือ  $R_L + jX_L + \frac{R_F}{2} \left( \frac{I_R}{I} + 1 \right)$  ซึ่งในเทอมของความต้านทานฟอล์ทจะมีค่าเปลี่ยนไปคือค่าความต้านทานฟอล์ทจะน้อยที่สุดคือ 1 เท่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับในกรณีที่กระแสที่ไหลจากอีกด้านมีค่าน้อยเท่าใด จากเหตุผลดังกล่าวถ้าเราจะเซตตั้งค่าความต้านทานฟอล์ทของการป้องกันฟอล์ท เฟส-เฟสเมื่อเกิดความต้านทานฟอล์ทที่  $50 \Omega$  เท่ากับ  $50 \Omega$  จึงเพียงพอที่จะรองรับค่าทางเดินของอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนไปได้ ส่วนคำสั่งทริปที่จากเอาต์พุตของรีเลย์ที่เขียนจาก m-file ได้แสดงไว้ในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 จำลองการทำงานของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะเมื่อติดตั้งกับวงจรทดสอบ 14 บัส ของ IEEE (โดยเซตคั้งเพื่อชดเชยค่า  $R_{F \text{ Setting}}$  ไว้ 50  $\Omega$ )

จุดที่ติดตั้งรีเลย์ และตำแหน่งที่เกิดฟอลต์	เฟสที่ เกิด ฟอลต์	$R_{F(\text{Phase to Phase})}$ ( $\Omega$ ) ที่ใส่ในกล่อง เครื่องมือใน Simulink	การตอบสนอง ของรีเลย์ ชนิดโมห์ทั่วไป	การตอบสนองของ รีเลย์ชนิดโมห์ ที่มีการปรับปรุง กราฟคุณลักษณะ
10% ของความยาวสาย จากบัส 1 (ติดตั้งรีเลย์ R1) ถึงบัส 2 (ติดตั้งรีเลย์ R2) (วงจร 1)	BC	0	R1_Zone1 R2_Zone2	-
		50	-	R1_Zone1 -
10% ของความยาวสาย จากบัส 2 (ติดตั้งรีเลย์ R3) ถึงบัส 3 (ติดตั้งรีเลย์ R12)	AB	0	R3_Zone1 R12_Zone2	-
		50	-	R3_Zone1 -
10% ของความยาวสาย จากบัส 4 (ติดตั้งรีเลย์ R11) ถึงบัส 5 (ติดตั้งรีเลย์ R22)	CA	0	R11_Zone1 R22_Zone2	-
		50	-	R11_Zone1 -
10% ของความยาวสาย จากบัส 5 (ติดตั้งรีเลย์ R9) ถึงบัส 1 (ติดตั้งรีเลย์ R5)	AB	0	R9_Zone1 R5_Zone2	-
		50	-	R9_Zone1 R5_Zone2
10% ของความยาวสาย จากบัส 6 (ติดตั้งรีเลย์ R24) ถึงบัส 11 (ติดตั้งรีเลย์ R25)	BC	0	R24_Zone1 R25_Zone2	-
		50	-	R24_Zone1 -
10% ของความยาวสาย จากบัส 12 (ติดตั้งรีเลย์ R17) ถึงบัส 13 (ติดตั้งรีเลย์ 18)	CA	0	R17_Zone1 R18_Zone2	-
		50	-	R17_Zone1 R18_Zone2

จากตารางที่ 13 ในการทดสอบด้วยการจำลองใน วงจรทดสอบ 14 บั๊ต ของ IEEE พบว่าเมื่อมีการใส่ค่าเซตตั้งเพื่อชดเชยค่าความต้านทานพอลท์ไว้ 50  $\Omega$  รีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะสามารถชดเชยโชนที่ลั้งทริปได้ดีในระดับหนึ่ง โดยจะเห็นได้จากโชนที่ลั้งทริปของรีเลย์ทั้ง 2 ตัวที่อยู่หัวและท้ายของแต่ละบั๊ตที่ทำการทดสอบการเกิดพอลท์ทำงานลั้งทริปโชนเหมือนกับในกรณีที่มีค่าความต้านทานพอลท์ระหว่างเฟสที่พอลท์เท่ากับ 0  $\Omega$  ยกเว้นในบางตัวซึ่งมีกระแสที่ไหลมาจากอีกด้านของรีเลย์หรือ  $I_R$  และมีผลทำให้ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ตัวนั้นหลุดนอกโชนป้องกันดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นในสมการที่ (14) และภาพที่ 43 แต่โดยรวมแล้วหลักการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะดังกล่าวก็ยังทำให้โชนป้องกันโชน 1 ของรีเลย์ทุกตัวซึ่งจะต้องลั้งทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์ออกทันทีทันใด ในกรณีที่เกิดการพอลท์พร้อมกับความต้านทานพอลท์ ก็ทำให้รีเลย์ระยะทางที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะยังคงทำงานได้ตรงตามวัตถุประสงค์

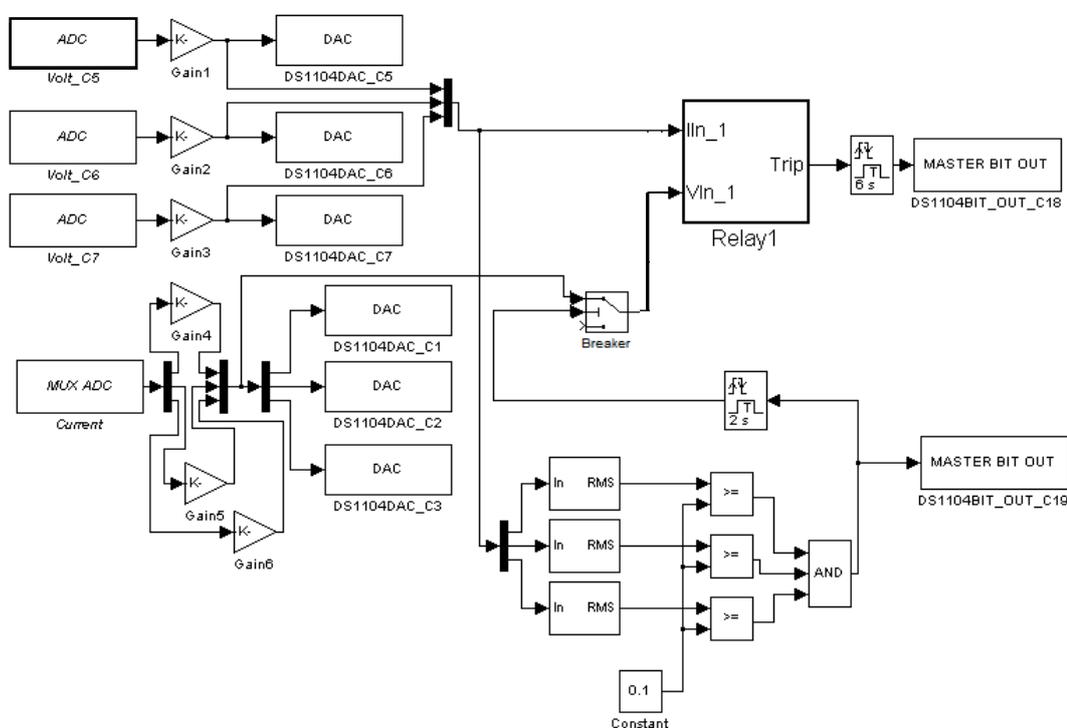
### 3. ศึกษารายละเอียดในส่วนของฮาร์ดแวร์

#### 3.1 ศึกษารายละเอียดเพื่อเลือกอุปกรณ์ที่จะใช้ในการสร้างรีเลย์ระยะทาง

ทางผู้วิจัยได้ศึกษาและเลือกอุปกรณ์ที่จะใช้ร่วมกับซอฟต์แวร์เพื่อให้ได้รีเลย์ระยะทางดีที่สุด ทั้งในด้านเสถียรภาพ ราคา ความเร็ว และสุดท้ายคือสามารถใช้งานหรือติดต่อกับซอฟต์แวร์ที่ได้เขียนขึ้นด้วยวิธีการจำลองได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกบอร์ด DSP Starter Kit TMS320C31 โดยเขียนโปรแกรมด้วย ภาษา C แต่ก็ติดปัญหาเรื่องความเร็วในการทำงานที่ค่อนข้างช้าของตัวบอร์ดซึ่งไม่สามารถตอบสนองกับงานที่ทำได้ หลังจากนั้นก็ได้ทดลองใช้บอร์ด USB6009 โดยเขียนโปรแกรมด้วย Labview โดยปัญหาที่เกิดกับอุปกรณ์นี้คือความมีเสถียรภาพของตัวบอร์ดค่อนข้างต่ำ และการเขียนโปรแกรมที่ยากไม่สามารถแปลงจากโปรแกรมจำลอง Matlab/Simulink มาได้โดยตรงทำให้โอกาสในการทำงานของรีเลย์มีโอกาสผิดพลาดในขั้นตอนของการแปลงภาษาค่อนข้างสูง งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้บอร์ด DSPACE รุ่น DS1104 ในการสร้างเป็นรีเลย์ต้นแบบขึ้นทั้ง ๆ ที่มีราคาสูงกว่าบอร์ดทั้งหมดที่ได้กล่าวไว้แล้ว ด้วยสาเหตุที่ว่า สามารถแปลงโปรแกรมที่ได้จำลองไว้ใน Matlab/Simulink ได้โดยมีการปรับเปลี่ยนเพียงเล็กน้อย เสถียรภาพและความเร็วในการทำงานที่สูง ใช้งานง่ายสามารถรับแรงดันและกระแสได้โดยตรงโดยไม่ต้องมีการแปลงซึ่งข้อดีในส่วนนี้สามารถลดค่าคลาดเคลื่อนของรีเลย์ระยะทางที่สร้างไปได้มาก

### 3.2 สร้างรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ

เมื่อทำการจำลองใน Matlab/Simulink ตามแนวคิดในหัวข้อ 2.1.4 จนได้ผลที่แน่ใจได้ว่า รีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะสามารถแก้ไขปัญหาคอมพิวเตอร์ที่ค้างหรือความถี่ที่ต่ำกว่าที่คิดไว้ ซึ่งได้นำโปรแกรมดังกล่าวลงในภาพที่ 108 บันทึกใส่ไปในฮาร์ดแวร์ ซึ่งในที่นี้ผู้วิจัยได้เลือกบอร์ด DSPACE รุ่น DS1104 ดังแสดงในภาพที่ 109 และ 110 เป็นอุปกรณ์ที่สามารถใช้ต่อร่วมกับคอมพิวเตอร์บุคคล ซึ่งสามารถแปลงไฟล์ Simulink แล้วโหลดข้อมูลเข้าไปในตัวของ DS1104 ได้ โดยมีการรับค่าแอนะล็อกทั้ง 6 ค่าซึ่งก็คือแรงดัน  $V_A$ ,  $V_B$  และ  $V_C$  กับกระแส  $I_A$ ,  $I_B$  และ  $I_C$  ตามลำดับ โดยค่าแอนะล็อกทั้งหมดนี้จะได้จากเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300 ดังแสดงในภาพที่ 111 ผ่านทางอินพุตและเอาต์พุตของ DSPACE รุ่น DS1104 และยังได้ใช้ดิจิทัลเอาต์พุตของ DSPACE รุ่น DS1104 ในการแสดงผลคำสั่งทริปของรีเลย์อีกด้วยทั้งนี้เพื่อบันทึกค่าที่ได้ในการทดสอบรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะลงในตารางต่อไป

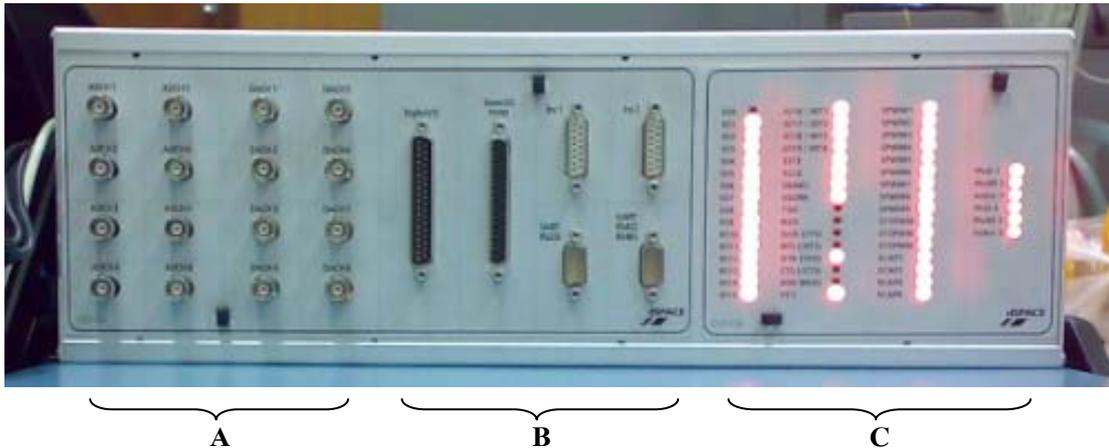


ภาพที่ 108 โปรแกรมใน Matlab/Simulink ที่บันทึกลงในฮาร์ดแวร์

จากภาพที่ 108 เป็นโปรแกรมใน Matlab/Simulink ที่บันทึกลงในฮาร์ดแวร์โดยมีแอนะล็อกอินพุต 6 ช่อง คือ ADC\_5, ADC\_6, และ ADC\_7 ซึ่งเป็นแอนะล็อกอินพุตแบบขนาน แทนด้วย Volt\_5, Volt\_6, และ Volt\_7 ทำหน้าที่รับสัญญาณแรงดันอินพุตทั้ง 3 เฟสจากเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300 ส่วนกระแสอินพุตซึ่งรับค่ามาจากเครื่องทดสอบรีเลย์ดังกล่าวเป็น แอนะล็อกอินพุตแบบอนุกรม (Multiplex) ซึ่งในภาพแทนด้วย Current ซึ่งก็คือ ADC\_1, ADC\_2, และ ADC\_3 จากในภาพจะมีตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก 6 ตัว คือ DAC\_1, DAC\_2, DAC\_3, DAC\_5, DAC\_6 และ DAC\_7 ตามลำดับ ทำหน้าที่ตรวจสอบสัญญาณแอนะล็อกอินพุตโดยส่งสัญญาณที่ผ่านการสุ่มสัญญาณ (Sampling) ไปแสดงผลยังเครื่องวัดสัญญาณแบบดิจิทัล (Digital Oscilloscope) กล่องเบรกเกอร์ (Breaker) ทำหน้าที่ตัดต่อสัญญาณกระแสที่เข้าไปยังกล่องของรีเลย์เปรียบได้กับคำสั่งเริ่มการปล่อยสัญญาณเข้าไปในตัวรีเลย์เพื่อเริ่มการตรวจจับฟอลต์ ดิจิตอลเอาต์พุตซึ่งแทนด้วย OUT\_C18 และ OUT\_C19 เป็นการแสดงผลการทำงานแบบดิจิทัลโดยแสดงสถานะผ่าน LED



ภาพที่ 109 บอร์ด DSPACE รุ่น DS1104



ภาพที่ 110 อินพุตและเอาต์พุตของ DSPACE รุ่น DS1104

ภาพที่ 108 คือ บอร์ด DSPACE รุ่น DS1104 ซึ่งติดตั้งไว้ที่เมนบอร์ด (Main Board) คอมพิวเตอร์บุคคททำหน้าที่เป็นส่วนหลักในการประมวลผลตามคำสั่ง หรือโปรแกรมที่เขียนไว้ใน Matlab/Simulink โดยมีการต่อสายสัญญาณมายังชุดรับอินพุตและเอาต์พุตของ DSPACE รุ่น DS1104 ดังแสดงในภาพที่ 109 ซึ่งประกอบด้วยส่วน A คืออินพุตและเอาต์พุตที่เป็นสัญญาณแอนะล็อก, B คือการติดต่อสื่อสารด้วยการผ่านพอร์ตต่าง ๆ (ซึ่งไม่ได้ใช้ในงานวิจัยนี้) และ C สัญญาณการแสดงผลเอาต์พุตแบบดิจิทัลซึ่งแสดงโดยใช้ LED



ภาพที่ 111 เครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300

### 3.3 รีเลย์ระยะทางแบบโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะทดสอบกับเครื่องทดสอบ รีเลย์ Freja300

ทำการทดสอบรีเลย์ระยะทางที่สร้างขึ้นจาก DSPACE รุ่น DS11104 กับเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300 ดังแสดงในภาพที่ 10 ซึ่งแสดงข้อมูลทางเทคนิคไว้ในภาคผนวก ค โดยทดสอบการเกิดฟอลต์ในทุกกรณีกับเครื่องทดสอบรีเลย์รุ่น Freja300 โดยจะเริ่มจากการทดสอบในกรณีของการฟอลต์แบบ เฟส-ลงดินซึ่งผลที่ได้จะแสดงไว้ในตารางที่ 14 และการฟอลต์แบบ เฟส-เฟสได้แสดงไว้ในตารางที่ 15

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะโดย  
เซตตั้งชดเชยค่าความต้านทานฟอลต์ไว้ 25  $\Omega$  ในกรณีของการฟอลต์แบบ เฟส-ลงดิน

ชนิด, โชนป้องกัน		การแสดงผลการฟอลต์					
		AG,Z1	BG,Z1	CG,Z1	AG,Z2	BG,Z2	CG,Z2
AG,Zone1	$R_{F(AG)} = 0 \Omega$	ON					
	$R_{F(AG)} = 25 \Omega$	ON					
BG,Zone1	$R_{F(BG)} = 0 \Omega$		ON				
	$R_{F(BG)} = 25 \Omega$		ON				
CG,Zone1	$R_{F(CG)} = 0 \Omega$			ON			
	$R_{F(CG)} = 25 \Omega$			ON			
AG,Zone2	$R_{F(AG)} = 0 \Omega$				ON		
	$R_{F(AG)} = 25 \Omega$				ON		
BG,Zone2	$R_{F(BG)} = 0 \Omega$					ON	
	$R_{F(BG)} = 25 \Omega$					ON	
CG,Zone2	$R_{F(CG)} = 0 \Omega$						ON
	$R_{F(CG)} = 25 \Omega$						ON

จากผลการทดสอบดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 14 สามารถเปรียบเทียบว่า ในขณะที่เกิดฟอลต์แบบ เฟส-ลงดินที่ไม่มีความต้านทานฟอลต์ และมีความต้านทานฟอลต์เกิดขึ้น ซึ่งค่า

อิมพีแดนซ์ที่ตรวจจับได้จะเปลี่ยนแปลงไปตามสมการที่ (15) ซึ่งเป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่ตรวจจับได้ในกรณีการเกิดฟอลต์ เฟส A-ลงดินและมีความต้านทานฟอลต์ ( $R_F$ ) เกิดขึ้นขณะเกิดฟอลต์ด้วยนั้น รีเลย์ระยะทางชนิด โมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะเพื่อชดเชยความต้านทานฟอลต์ที่สร้างขึ้นวิธี KU หรือ “KU Method” ดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น ผลการทดสอบการทำงานโดยทดสอบร่วมกับเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300 นั้น รีเลย์จะทำงานโดยการสั่งทรูปเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้อย่างถูกต้อง โดยเห็นได้จาก คำสั่ง ON เกิดขึ้นในโซนเดียวกันทั้งในกรณีที่ไม่มีความต้านทานและมีความต้านทานฟอลต์เกิดขึ้นในขณะเกิดฟอลต์ ทำให้สามารถแก้ปัญหาการทรูปผิดพลาดที่เกิดจากมีความต้านทานฟอลต์ในขณะที่เกิดฟอลต์ได้

$$Z_{AG} = \frac{E_a}{I_a + mI_0} + R_{F(PhaseToGround)} = R_L + jX_L + R_{F(PhaseToGround)} \quad (15)$$

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบของรีเลย์ระยะทางชนิด โมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะโดย เซ็ตตั้งชดเชยค่าความต้านทานฟอลต์ไว้ 25  $\Omega$  ในกรณีของการฟอลต์แบบเฟส-เฟส

ชนิด, โซนป้องกัน	การแสดงผลการฟอลต์					
	AB,Z1	BC,Z1	CA,Z1	AB,Z2	BC,Z2	CA,Z2
AB,Zone1	$R_{F(AB)} = 0 \Omega$	ON				
	$R_{F(AB)} = 50 \Omega$	ON				
BC,Zone1	$R_{F(BC)} = 0 \Omega$	ON				
	$R_{F(BC)} = 50 \Omega$	ON				
CA,Zone1	$R_{F(CA)} = 0 \Omega$		ON			
	$R_{F(CA)} = 50 \Omega$		ON			
AB,Zone2	$R_{F(AB)} = 0 \Omega$			ON		
	$R_{F(AB)} = 50 \Omega$			ON		
BC,Zone2	$R_{F(BC)} = 0 \Omega$				ON	
	$R_{F(BC)} = 50 \Omega$				ON	
CA,Zone2	$R_{F(CA)} = 0 \Omega$					ON
	$R_{F(CA)} = 50 \Omega$					ON

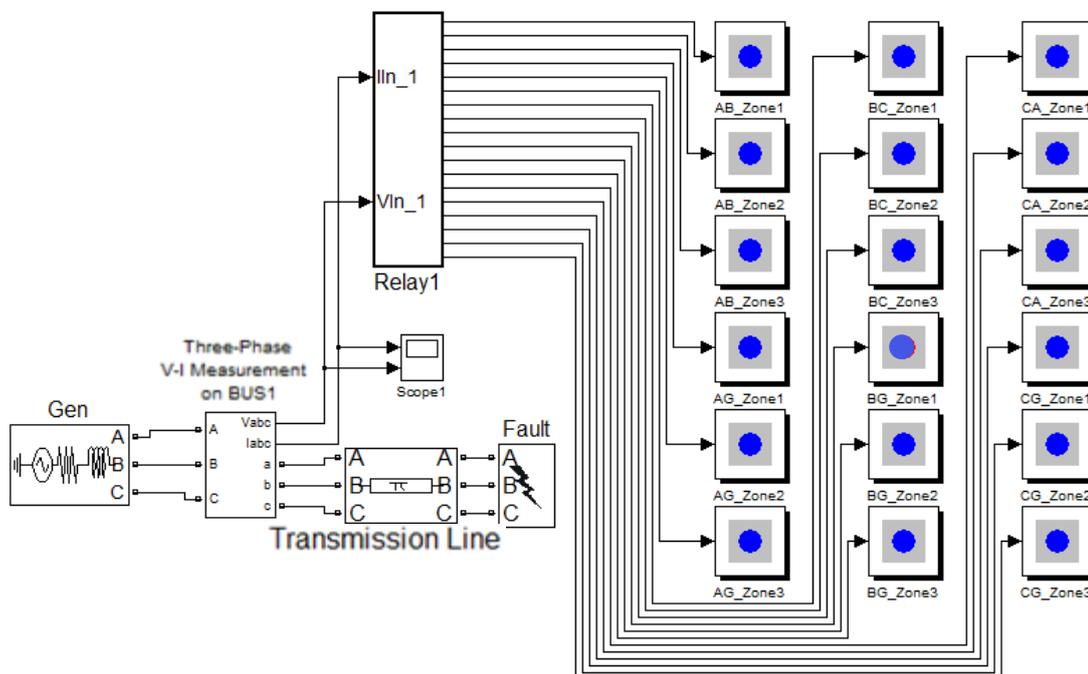
จากผลการทดสอบดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 15 สามารถเปรียบเทียบว่า ในขณะที่เกิดฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส ที่ไม่มีความต้านทานฟอล์ท และมีความต้านทานฟอล์ทเกิดขึ้น ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ที่ตรวจจับได้จะเปลี่ยนแปลงไปตามสมการที่ (14) รีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะเพื่อชดเชยความต้านทานฟอล์ทที่สร้างขึ้นโดยวิธี KU หรือ “KU Method” ดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น ผลการทดสอบการทำงานโดยทดสอบร่วมกับเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300 นั้นรีเลย์จะทำงานโดยการสั่งทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้อย่างถูกต้อง โดยเห็นได้จาก คำสั่ง ON เกิดขึ้นในโซนเดียวกันทั้งในกรณีที่ไม่มีความต้านทานและมีความต้านทานฟอล์ทเกิดขึ้น ในขณะที่เกิดฟอล์ท ทำให้สามารถสั่งทริปในโซนกับเวลาที่เหมือนกันทั้งสองกรณีดังกล่าว และแก้ปัญหาการสั่งทริปผิดพลาดที่เกิดจากความต้านทานฟอล์ทในขณะที่เกิดฟอล์ทซึ่งทำให้ทางเดินของอิมพีแดนซ์เปลี่ยนไปจากกรณีของการเกิดฟอล์ทแบบ เฟส-เฟสที่ไม่มีความต้านทานฟอล์ทเกิดขึ้นในขณะที่เกิดฟอล์ทได้

## ผลและวิจารณ์

### ผล

งานวิจัยนี้ได้แยกผลเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือในส่วนของผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม หรือ Simulation by Software และ อีกส่วนคือผลจากการสร้างรีเลย์จริงโดยใช้สร้างฮาร์ดแวร์ คือ บอร์ด DSPACE รุ่น DS11104 หรือ Implementation ซึ่งผลการวิจัยโดยรวมมีดังนี้

1. วงจรรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ที่จำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ดังในภาพที่ 112 โดยมีค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่ทำการจำลองคือ  $10.25+j31.42 \Omega$  และทำการเชื่อมต่อรีเลย์โดยมีค่าอิมพีแดนซ์ตามโซนต่าง ๆ ดังนี้ โซน 1 มีการเชื่อมต่อค่าของอิมพีแดนซ์ที่ 85% ของความยาวสายส่งคือ  $8.71+j26.69 \Omega$  (ทำงานที่เวลาทันทีทันใด) โซน 2 มีการเชื่อมต่อค่าของอิมพีแดนซ์ที่ 120% ของความยาวสายส่งคือ  $12.29+j37.68 \Omega$  (หน่วงเวลาทำงาน 0.3 วินาที) และโซน 3 มีการเชื่อมต่อค่าของอิมพีแดนซ์เพื่อจะให้การป้องกันสำรองแก่สายส่งที่อยู่ถัดไปคือ 100% ของสายส่งที่ติดตั้งรีเลย์บวกกับ 120% ของสายส่งชุดถัดไปในที่นี้ให้มีพารามิเตอร์และความยาวของสายเท่ากับสายส่งชุดแรกดังนั้นการเชื่อมต่อค่าของอิมพีแดนซ์ในโซน 3 คือ  $22.54+j69.08 \Omega$  (หน่วงเวลาทำงาน 1 วินาที) การสร้างวงจรเพื่อใช้จำลองใน Matlab/Simulink นั้นจะติดตั้งรีเลย์ระยะทางในที่นี้ใช้ชื่อว่ารีเลย์ 1 (Relay 1) ที่ใช้ในการพิจารณาที่ Bus1 กำหนดให้เกิดฟลัทซ์ขึ้นในระบบ ที่เวลา 0.015 วินาที ทำการจำลองโดยมีอัตราการสุ่ม 1 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งในวงจรการจำลองดังกล่าวได้ทำการจำลองสภาวะการเกิดฟลัทซ์ทั้งแบบ เฟส-เฟส และ เฟส-ลงดิน ที่ขอบโซน 1 และ ขอบโซน 2 ตามลำดับ และเก็บผลการทดลอง (การทริปของรีเลย์) ที่ได้จาก m-file และคิวิตอลเอาต์พุตใน Matlab/Simulink ซึ่งบอกชนิดของฟลัทซ์และโซนป้องกันที่ตรวจจับได้ (อยู่ด้านขวามือของรูป) บันทึกในตารางที่ 16 และ 17 ตามลำดับ



ภาพที่ 112 วงจรรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ใน Matlab/Simulink ที่ใช้ในการจำลอง

การเก็บผลการจำลองจะเก็บค่าทั้ง 2 กรณี กรณีแรกคือ เก็บจากการแสดงผลผ่านทางหน้าจอของวงจรรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ใน Matlab/Simulink ที่ใช้ในการจำลอง ในภาพที่ 112 กรณีที่สอง คือ เก็บผลการจำลองจากเอาต์พุตของ m-file แล้วนำมาเปรียบเทียบทั้ง 2 กรณี ผลปรากฏว่า มีค่าเหมือนกันทั้งสองกรณี ซึ่งที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าผลที่ได้จากหน้าจอของวงจรรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ใน Matlab/Simulink และ เอาต์พุตของ m-file มีที่มาของการวิเคราะห์แยกแยะวิธีการทำงาน (Algorithm) เหมือนกันแต่แยกออกเป็นคนละขบวนการนั่นเอง

ตารางที่ 16 ผลการจำลองของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่ไม่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ

ชนิด และ โซนป้องกัน	การแสดงผลการฟอลต์ (เอาต์พุต)											
	AB	BC	CA	AB	BC	CA	AG	BG	CG	AG	BG	CG
	Z1	Z1	Z1	Z2	Z2	Z2	Z1	Z1	Z1	Z2	Z2	Z2
AB,Zone1	$R_{F(AB)} = 0 \Omega$	ON										
	$R_{F(AB)} = 50 \Omega$											
BC,Zone1	$R_{F(BC)} = 0 \Omega$	ON										
	$R_{F(BC)} = 50 \Omega$											
CA,Zone1	$R_{F(CA)} = 0 \Omega$	ON										
	$R_{F(CA)} = 50 \Omega$											
AB,Zone2	$R_{F(AB)} = 0 \Omega$	ON										
	$R_{F(AB)} = 50 \Omega$											
BC,Zone2	$R_{F(BC)} = 0 \Omega$	ON										
	$R_{F(BC)} = 50 \Omega$											
CA,Zone2	$R_{F(CA)} = 0 \Omega$	ON										
	$R_{F(CA)} = 50 \Omega$											
AG,Zone1	$R_{F(AG)} = 0 \Omega$	ON										
	$R_{F(AG)} = 25 \Omega$											
BG,Zone1	$R_{F(BC)} = 0 \Omega$	ON										
	$R_{F(BC)} = 25 \Omega$											
CG,Zone1	$R_{F(CG)} = 0 \Omega$	ON										
	$R_{F(CG)} = 25 \Omega$											
AG,Zone2	$R_{F(AG)} = 0 \Omega$	ON										
	$R_{F(AG)} = 25 \Omega$											
BG,Zone2	$R_{F(BG)} = 0 \Omega$	ON										
	$R_{F(BG)} = 25 \Omega$											
CG,Zone2	$R_{F(CG)} = 0 \Omega$	ON										
	$R_{F(CG)} = 25 \Omega$											

ตารางที่ 17 ผลการจำลองของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ

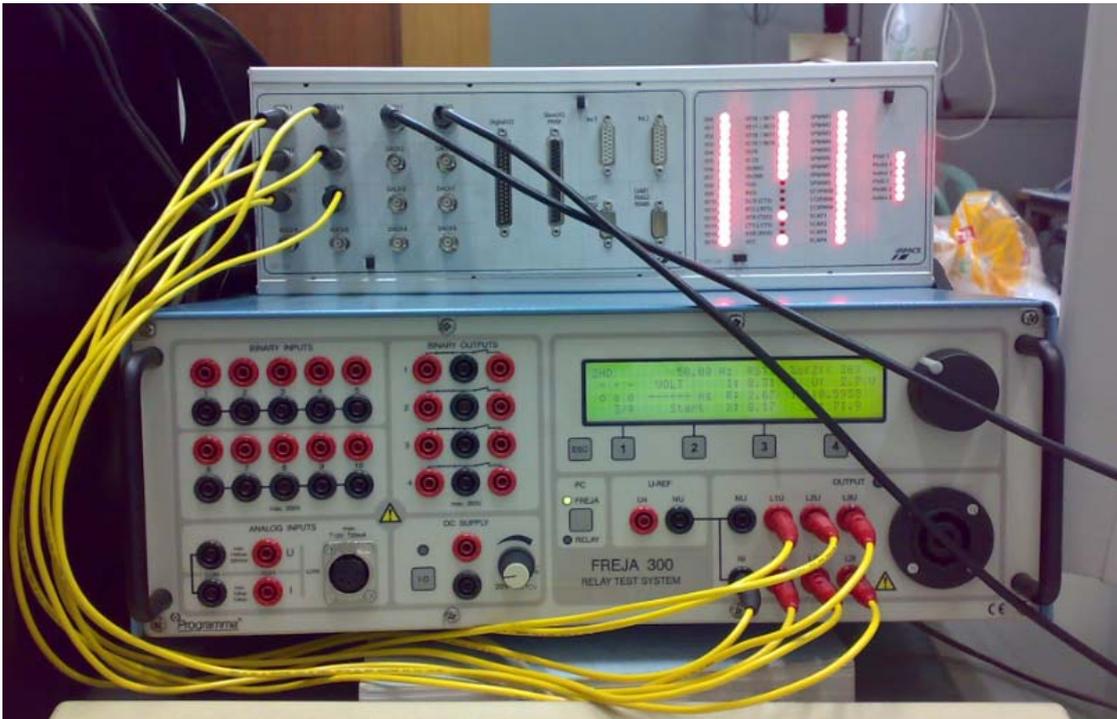
ชนิด และ โซนป้องกัน	การแสดงผลการฟอลต์ (เอาต์พุต)											
	AB	BC	CA	AB	BC	CA	AG	BG	CG	AG	BG	CG
	Z1	Z1	Z1	Z2	Z2	Z2	Z1	Z1	Z1	Z2	Z2	Z2
AB,Zone1	$R_{F(AB)} = 0 \Omega$	ON										
	$R_{F(AB)} = 50 \Omega$	ON										
BC,Zone1	$R_{F(BC)} = 0 \Omega$	ON										
	$R_{F(BC)} = 50 \Omega$	ON										
CA,Zone1	$R_{F(CA)} = 0 \Omega$			ON								
	$R_{F(CA)} = 50 \Omega$			ON								
AB,Zone2	$R_{F(AB)} = 0 \Omega$			ON								
	$R_{F(AB)} = 50 \Omega$			ON								
BC,Zone2	$R_{F(BC)} = 0 \Omega$			ON								
	$R_{F(BC)} = 50 \Omega$			ON								
CA,Zone2	$R_{F(CA)} = 0 \Omega$					ON						
	$R_{F(CA)} = 50 \Omega$					ON						
AG,Zone1	$R_{F(AG)} = 0 \Omega$					ON						
	$R_{F(AG)} = 25 \Omega$					ON						
BG,Zone1	$R_{F(BC)} = 0 \Omega$							ON				
	$R_{F(BC)} = 25 \Omega$							ON				
CG,Zone1	$R_{F(CG)} = 0 \Omega$									ON		
	$R_{F(CG)} = 25 \Omega$									ON		
AG,Zone2	$R_{F(AG)} = 0 \Omega$									ON		
	$R_{F(AG)} = 25 \Omega$									ON		
BG,Zone2	$R_{F(BG)} = 0 \Omega$									ON		
	$R_{F(BG)} = 25 \Omega$									ON		
CG,Zone2	$R_{F(CG)} = 0 \Omega$									ON		
	$R_{F(CG)} = 25 \Omega$									ON		

จากผลการจำลองดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 16 และ 17 สามารถเปรียบเทียบได้ว่า ในขณะที่เกิดฟอลต์แบบ เฟส-เฟส และ เฟส-ลงดินทุกกรณี ที่ไม่มีความต้านทานฟอลต์ และมีความต้านทานฟอลต์เกิดขึ้น ซึ่งถ้ามีความต้านทานฟอลต์เกิดขึ้นในขณะที่เกิดฟอลต์ทางเดินของอิมพีแดนซ์ที่ตรวจจับได้จะเปลี่ยนแปลงไปทั้งขนาดและทิศทาง รีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่ไม่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะเพื่อชดเชยความต้านทานฟอลต์จะเกิดความคลาดเคลื่อนหรือผิดพลาดในการป้องกันและทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าได้ โดยสังเกตได้จากมีคำสั่ง ON เกิดขึ้นในโซนที่แตกต่างกัน เช่น เกิดฟอลต์ในโซน 1 แต่เมื่อเกิดความต้านทานฟอลต์ที่มีค่ามากพอ รีเลย์ก็จะตรวจเจอฟอลต์เป็นโซน 2 เป็นต้น ส่วนรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะเพื่อชดเชยความต้านทานฟอลต์ที่สร้างขึ้นวิธี KU หรือ “KU Method” ดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น ผลการจำลองพบว่ารีเลย์ระยะทางจะทำงานโดยการสั่งทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้อย่างถูกต้อง โดยเห็นได้จาก คำสั่ง ON เกิดขึ้นในโซนเดียวกันทั้งในกรณีของไม่มีความต้านทานและมีความต้านทานฟอลต์เกิดขึ้นในขณะที่เกิดฟอลต์ ทำให้สามารถสั่งทริปใน โซนกับเวลาที่เหมือนกันทั้งสองกรณีดังกล่าว และแก้ปัญหาการสั่งทริปผิดพลาดที่เกิดจากความต้านทานฟอลต์ในขณะที่เกิดฟอลต์ซึ่งทำให้ทางเดินของอิมพีแดนซ์เปลี่ยนไปจากกรณีของการเกิดฟอลต์ที่ไม่มีมีความต้านทานฟอลต์เกิดขึ้นในขณะที่เกิดฟอลต์ได้

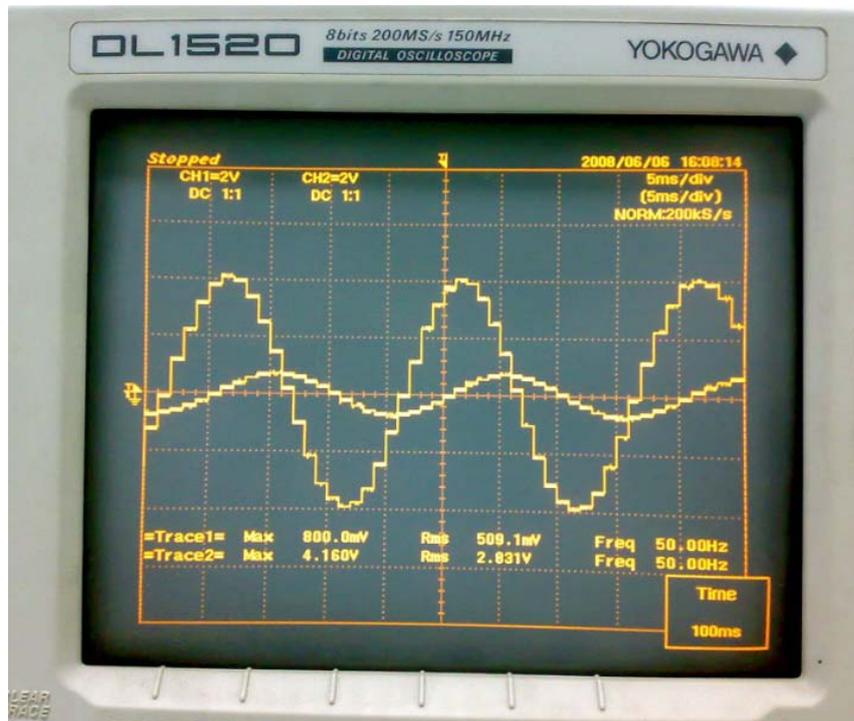
จากการทดสอบด้วยการจำลองในวงจรทดสอบ 14 บัส ของ IEEE ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว พบว่า รีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะด้วยวิธี KU สามารถชดเชยโซนที่สั่งทริปได้ดีในระดับหนึ่ง โดยจะเห็นได้จากโซนที่สั่งทริปของรีเลย์ทั้ง 2 ตัวที่อยู่หัวและท้ายของแต่ละบัสที่ทำการทดสอบการเกิดฟอลต์ทำงานสั่งทริปโซนเหมือนกับในกรณีที่มีค่าความต้านทานฟอลต์เท่ากับ  $0 \Omega$  ยกเว้นในบางตัวซึ่งมีกระแสที่ไหลมาจากอีกด้านของรีเลย์หรือ  $I_R$  และมีผลทำให้ทางเดินอิมพีแดนซ์ของรีเลย์ตัวนั้นหลุดนอกโซนป้องกันดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นในสมการที่ (14) และภาพที่ 43 ดังนั้นจึงต้องมีการเซตตั้งค่า  $R_F$  setting เพื่อชดเชยค่าความต้านทานฟอลต์ให้เหมาะสมในแต่ละตัว แต่โดยรวมแล้วหลักการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะดังกล่าวก็ยังทำให้โซนป้องกันโซน 1 ของรีเลย์ทุกตัวซึ่งจะต้องสั่งทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์ออกทันทีทันใด ในกรณีที่เกิดการฟอลต์พร้อมกับมีความต้านทานฟอลต์ ก็ทำให้รีเลย์ระยะทางที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะยังคงทำงานได้ตรงตามวัตถุประสงค์

2. การทดสอบกับรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะหรือ “KU-Distance Relay” ที่สร้างขึ้นจาก DSPACE รุ่น DS11104 ร่วมกับเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300 ดังในภาพที่ 112 และภาพแรงดันกับกระแสที่ได้จากเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300 โดยผ่านรีเลย์

ระยะทางที่สร้างขึ้นจาก DSPACE รุ่น DS11104 ที่อัตราการสุ่ม 1 kHz แสดงไว้ในภาพที่ 113 ซึ่งผลการทดสอบตรงตามทฤษฎีของรีเลย์ระยะทางชนิดที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะที่ได้คำนวณและจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งในการทดสอบดังกล่าวได้ทำการทดสอบสถานะการเกิดฟอล์ททั้งแบบ เฟส-เฟส และ เฟส-ลงดิน ซึ่งผลการทดสอบรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะที่สร้างขึ้น ได้แสดงไว้ในตารางที่ 18



ภาพที่ 113 การทดสอบกับรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะที่สร้างขึ้นจาก DSPACE รุ่น DS11104 ร่วมกับเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300



ภาพที่ 114 แรงดันและกระแสที่ได้จากเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300 โดยผ่านรีเลย์ระยะทางที่สร้างขึ้นจาก DSPACE รุ่น DS11104 ที่อัตราการสุ่ม 1 kHz

จากภาพที่ 114 เป็นภาพแรงดันและกระแสที่ได้จากเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300 โดยผ่านรีเลย์ระยะทางที่สร้างขึ้นจาก DSPACE รุ่น DS11104 ที่อัตราการสุ่ม 1 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) นั้นหมายถึงว่า ความถี่มูลฐานที่ใช้ในระบบ 50 เฮิร์ตซ์ (Fundamental Frequency) ใน 1 คาบของลูกคลื่นจะใช้เวลา 20 mS ( $1/T=1/50$ ) โดยมีอัตราการสุ่ม 1 กิโลเฮิร์ตซ์ จะมีการตรวจจับสัญญาณทุก 1 mS (1/1000 เฮิร์ตซ์) ดังนั้นใน 1 ลูกคลื่นของสัญญาณ 50 เฮิร์ตซ์ จะมีการตรวจจับสัญญาณ 20 ครั้ง โดยห่างกันครั้งละ 1 mS เราจึงเห็นสัญญาณแอนะล็อกเอาต์พุตที่ออกมาจาก DSPACE รุ่น DS11104 เป็นขั้น ๆ (Step) ดังในภาพ โดยสัญญาณดังกล่าวจะนำไปเข้า Relay1 ในภาพที่ 112 เพื่อนำไปสู่ขบวนการตรวจจับพอลต์ของรีเลย์ต่อไป

ตารางที่ 18 ผลทดสอบของรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะที่สร้างขึ้น  
จาก DSPACE รุ่น DS1104 ร่วมกับเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300

ชนิด และ โซนป้องกัน		การแสดงผลการฟอลต์											
		AB	BC	CA	AB	BC	CA	AG	BG	CG	AG	BG	CG
		Z1	Z1	Z1	Z2	Z2	Z2	Z1	Z1	Z1	Z2	Z2	Z2
AB,Zone1	$R_{F(AB)} = 0 \Omega$	ON											
	$R_{F(AB)} = 50 \Omega$	ON											
BC,Zone1	$R_{F(BC)} = 0 \Omega$	ON											
	$R_{F(BC)} = 50 \Omega$	ON											
CA,Zone1	$R_{F(CA)} = 0 \Omega$	ON											
	$R_{F(CA)} = 50 \Omega$	ON											
AB,Zone2	$R_{F(AB)} = 0 \Omega$	ON											
	$R_{F(AB)} = 50 \Omega$	ON											
BC,Zone2	$R_{F(BC)} = 0 \Omega$	ON											
	$R_{F(BC)} = 50 \Omega$	ON											
CA,Zone2	$R_{F(CA)} = 0 \Omega$	ON											
	$R_{F(CA)} = 50 \Omega$	ON											
AG,Zone 1	$R_{F(AG)} = 0 \Omega$	ON											
	$R_{F(AG)} = 25 \Omega$	ON											
BG,Zone1	$R_{F(BC)} = 0 \Omega$	ON											
	$R_{F(BC)} = 25 \Omega$	ON											
CG,Zone1	$R_{F(CG)} = 0 \Omega$	ON											
	$R_{F(CG)} = 25 \Omega$	ON											
AG,Zone 2	$R_{F(AG)} = 0 \Omega$	ON											
	$R_{F(AG)} = 25 \Omega$	ON											
BG,Zone2	$R_{F(BG)} = 0 \Omega$	ON											
	$R_{F(BG)} = 25 \Omega$	ON											
CG,Zone2	$R_{F(CG)} = 0 \Omega$	ON											
	$R_{F(CG)} = 25 \Omega$	ON											

จากผลการทดสอบรีเลย์ระยะทางแบบ โมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะที่สร้างขึ้น จาก DSPACE รุ่น DS11104 ร่วมกับเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300 ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 18 สามารถเปรียบเทียบได้ในขณะที่เกิดฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส และ เฟส-ลงดินทุกกรณี ที่ไม่มีความต้านทานฟอล์ท และมีความต้านทานฟอล์ทเกิดขึ้น ซึ่งถ้าไม่มีค่าความต้านทานฟอล์ทเกิดขึ้นใน ขณะที่เกิดฟอล์ท ทางเดินของอิมพีแดนซ์ที่ตรวจจับได้เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของสายเพียงอย่างเดียว รีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่สร้างขึ้นก็จะไม่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะเพื่อชดเชยความต้านทาน ฟอล์ทจึงทำงานได้แบบรีเลย์ชนิดโมห์ปกติ แต่ถ้ามีความต้านทานฟอล์ทเกิดขึ้นในขณะที่เกิดฟอล์ท ทางเดินของอิมพีแดนซ์ที่ตรวจจับได้เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของสายรวมกับค่าความต้านทานฟอล์ท ซึ่ง จะทำให้ทางเดินของอิมพีแดนซ์ที่ตรวจจับได้มีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและทิศทาง ซึ่งจะเกิด ความคลาดเคลื่อนหรือผิดพลาดในการป้องกันและทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าได้ ดังนั้นรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่สร้างขึ้นก็จะปรับปรุงกราฟคุณลักษณะเพื่อชดเชยความต้านทาน ด้วยวิธี KU หรือ “KU Method” ดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น ผลการทดลองพบว่ารีเลย์ระยะทางที่สร้าง ขึ้นด้วยวิธีนี้จะทำงานโดยการสั่งทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้อย่างถูกต้อง โดยเห็นได้จาก คำสั่ง ON เกิดขึ้นใน โชนเดียวกันทั้งในกรณีของ ไม่มีความต้านทานและมีความต้านทานฟอล์ทเกิดขึ้นใน ขณะที่เกิดฟอล์ท ทำให้สามารถสั่งทริปใน โชนกับเวลาที่เหมือนกันทั้งสองกรณีดังกล่าว และ แก้ปัญหาการสั่งทริปผิดพลาดที่เกิดจากความต้านทานฟอล์ทในขณะที่เกิดฟอล์ทซึ่งทำให้ทางเดิน ของอิมพีแดนซ์เปลี่ยนไปได้

## วิจารณ์

ในการศึกษานี้ได้แบ่งการวิจารณ์เป็นข้อ ๆ ดังนี้

1. การหาข้อมูลที่จะมาช่วยสนับสนุนงานวิจัยเป็นได้ยากมากเนื่องจากส่วนใหญ่เป็นความลับเชิงธุรกิจ จึงหาได้เฉพาะในส่วนของการทำงาน การเซตคั้ง กราฟคุณลักษณะ และในส่วนของฮาร์ดแวร์เท่านั้น แต่ในส่วนของซอฟต์แวร์หรือหลักการเขียน โปรแกรมเพื่อสร้างรีเลย์ระยะทางนั้นไม่สามารถที่จะสืบค้นได้ จึงทำให้งานวิจัยนี้ใช้เวลาในการทำงานถึง 5 ปีเต็ม

2. การทำงานในการสร้างซอฟต์แวร์ค่อนข้างใช้เวลาทำงานเยอะเนื่องจากการเขียนโปรแกรมมีความยุ่งยากซับซ้อนและจำนวนบรรทัดที่เยอะทำให้การตรวจหาจุดผิดเป็นไปได้ยาก ดังจะเห็นได้จาก m-file ของรีเลย์ระยะทาง 1 ตัว ที่แสดงไว้ในภาคผนวก ง ใช้คำสั่งในการเขียนโปรแกรมทั้งหมดประมาณ 587 บรรทัด

3. การทดสอบทางด้านซอฟต์แวร์มีข้อจำกัดในเรื่องหน่วยความจำในคอมพิวเตอร์หรือในตัวโปรแกรมของ Matlab/Simulink เองทำให้การคำนวณและจำลองในแต่ละครั้งก็จะไม่สามารถทำได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของโปรแกรมที่มีขนาดใหญ่มาก ๆ ซึ่งจะทำให้ใช้เวลาในการทำงานของโปรแกรมนานขึ้นไปอีก ตัวอย่างเช่น วงจรทดสอบ IEEE 14 BUS TEST CASE ซึ่งการรันโปรแกรมถ้าใช้คอมพิวเตอร์ที่มีความเร็วซีพียู (CPU) ต่ำและแรม (RAM) น้อยกว่า 1 GB จะใช้เวลาในการรันต่อครั้งเป็นชั่วโมงหรืออาจถึงหลายชั่วโมง แต่ถ้าเป็นคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นแรมไม่ต่ำกว่า 2 GB ก็สามารช่วยใช้เวลาในการจำลองโปรแกรมต่อครั้งสั้นลง

4. การทดสอบในด้านฮาร์ดแวร์มีข้อจำกัดในเรื่องเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300 ที่สามารถทำการทดสอบได้แค่ 2 โชนทำให้ผลที่ได้ในคุณสมบัติเล่มนี้จึงมีให้เห็นแค่ในโชน 2 เท่านั้น เนื่องจาก %Z (เปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ของความยาวสายโดยกำหนดที่เครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300) ซึ่งมีค่าสูงสุดเพียง 100% แต่ในการทดสอบจริงเราทดสอบที่โชน 1 ที่ 85% ของความยาวสายและโชน 2 ที่ 120% ของความยาวสาย และเครื่องทดสอบรีเลย์นี้สามารถทดสอบรีเลย์ได้ครั้งละ 1 ตัวเท่านั้น

5. ความตั้งใจของงานวิจัยนี้ต้องการที่จะได้เครื่องต้นแบบรีเลย์ระยะทางในราคาประหยัด แต่เนื่องจากความต้องการสมรรถนะ ความเร็วในการทำงาน และเสถียรภาพสูงจึงทำให้ผู้ทำการวิจัยไม่สามารถสร้างรีเลย์ระยะทางต้นแบบในราคาที่ถูกลงได้ ถึงแม้จะได้ทดลองสร้างรีเลย์ระยะทางหลายวิธี เช่น สร้างด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) แต่ก็ประสบปัญหาในเรื่องของความเร็ว ความยุ่งยากและซับซ้อนในการเขียนโปรแกรมซึ่งมีขนาดใหญ่ สุดท้าย

งานวิจัยนี้จึงได้เลือกบอร์ด DSPACE รุ่น DS11104 เพราะเนื่องจากอุปกรณ์ดังกล่าวให้ผลดีหลายประการดังที่ได้กล่าวไปแล้วเบื้องต้น

6. ฮาร์ดแวร์ของรีเลย์ระยะทางที่สร้างขึ้น หรือ KU Distance Relay โดยใช้ DSPACE รุ่น DS11104 นั้นมีความเที่ยงตรงสูงมากเนื่องจากเป็นเขียนโปรแกรมด้วย Matlab/Simulink และสามารถแปลงไฟล์ดังกล่าวเป็นภาษาเครื่องได้โดยมีตัวแปลงไฟล์จากภาษา Simulink เป็นภาษาเครื่อง หรือ Compiler อยู่ในโปรแกรมของ Matlab/Simulink อยู่แล้ว ดังนั้นถ้าเรามีการจำลองและทดสอบโดยใช้ซอฟต์แวร์เทียบกับการทดสอบโดยใช้ฮาร์ดแวร์โดยทดสอบร่วมกับเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300 ก็จะทำให้ผลที่ได้เหมือนกันทุกประการ จากผลดังกล่าว บอกได้ว่า KU Distance Relay ที่สร้างขึ้นจากบอร์ด DSPACE รุ่น DS11104 ทำงานได้อย่างถูกต้อง 100 เปอร์เซ็นต์ เหมาะสำหรับที่จะนำไปพัฒนาต่อเพื่อให้ได้ใช้งานป้องกันจริง โดยเฉพาะอย่างกับการใช้งานจริงกับสายส่งแรงดันที่มีค่าความต้านทานฟอล์ทเกิดขึ้นในขณะที่เกิดฟอล์ท

7. สามารถนำแนวความคิดและวิธีการในคุณูปการนี้ไปต่อยอดงานวิจัยเพื่อสร้างรีเลย์ในระบบป้องกันได้หลายชนิด เช่น รีเลย์กระแสเกิน รีเลย์แรงดันเกิน หรือรีเลย์ความถี่ เป็นต้น แต่ต้องมีหน่วยงานต่าง ๆ ทั้งภาครัฐบาลละเอกชน สนับสนุนการทำวิจัยอย่างต่อเนื่องและจริงจัง

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

งานวิจัยนี้สามารถสรุปเนื้องานในการทำวิทยานิพนธ์ออกเป็น 2 หัวข้อใหญ่ ๆ คือ การจำลอง KU-Distance Relay ด้วยซอฟต์แวร์ในคอมพิวเตอร์ กับ การทดสอบ KU-Distance Relay ที่สร้างมาจาก DSPACE รุ่น DS11104 ดังนี้

1. การจำลองในคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink สร้างรีเลย์ระยะทางแบบโมห์นั้นจะมีการจำลองสภาวะการเกิดฟอล์ทในทุกประเภท ทั้งนี้งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อต้องการให้รีเลย์ระยะทางแบบโมห์ที่สร้างขึ้นจากการจำลองสามารถเป็นต้นแบบในการทำวิจัยหรือสามารถนำไปประยุกต์การใช้งานได้จริงเมื่อเกิดฟอล์ทในทุกกรณี แต่ในงานวิจัยนี้จะเน้นในการแก้ปัญหาของทางเดินอิมพีแดนซ์ออกนอกโซนป้องกันเมื่อเกิดความต้านทานฟอล์ทหรือ  $R_f$  ขึ้นในขณะที่เกิดฟอล์ทแบบ เฟส-เฟส ซึ่งปัญหาดังกล่าวทำให้รีเลย์ระยะทางแบบโมห์ที่มีโซอยู่ทั่วไปเกิดความคลาดเคลื่อนหรือผิดพลาดในระบบป้องกันและทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าได้ จากปัญหาดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงได้คิดวิธีแก้ไขด้วยการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะหรือไดอะแกรม R-X เพื่อที่จะรองรับความต้านทานฟอล์ทที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดฟอล์ท โดยขยายโซนป้องกันของรีเลย์ออกไปทางด้านขวามือตามแนวแกนของความต้านทาน (R) (ขยายไปตามทิศทางของมุมที่ตรวจจับได้ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่ามุมของสายหรือมุมที่เซตตั้งเสมอ ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 6) โดยมีการเซตตั้งเพื่อชดเชยค่าความต้านทานฟอล์ทเพิ่มเข้าไปในตัวรีเลย์ ทำให้รีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่สร้างขึ้นจากการจำลองสามารถรองรับการทำงานที่จะต้องอยู่ในสภาวะที่ไม่ปกติของการเกิดฟอล์ทได้อย่างดียิ่ง โดยเฉพาะการจำลองที่ใช้กับสายส่งแบบวงจรเดี่ยว ผลที่ได้มาจากการจำลองพบว่า ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความต้านทานฟอล์ทในขณะที่เกิดฟอล์ทแบบ เฟส-เฟสเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ที่ไม่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะกับรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ รีเลย์ระยะทางแบบโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะจะทำหน้าที่ในการป้องกันได้ถูกต้องตามโซนป้องกันตามที่ได้เซตตั้งไว้ ซึ่งทำให้ระบบสามารถตัดสายส่งที่มีปัญหาออกจากวงจรได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ และรวดเร็วขึ้น แต่ถ้านรีเลย์ที่ได้สร้างขึ้นมาจากโปรแกรม Matlab/Simulink ไปทดสอบกับสายส่งวงจรเดี่ยวที่มีแหล่งจ่ายสองแหล่งจ่ายจะต้องเพิ่มค่าเซตตั้งเพื่อชดเชยความต้านทานฟอล์ทไปอีก 1 เท่าตัวทั้งนี้ก็เพื่อรองรับกระแสที่ไหลมาจากแหล่งจ่ายอีกด้านของรีเลย์ที่ใช้ตรวจจับฟอล์ทซึ่งทำให้เกิดแรงดันคร่อมความ

ด้านทาน  $R_F$  เพิ่มขึ้น นั่นเอง แต่เมื่อนำรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะไปติดตั้งกับวงจรที่มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น เช่น วงจรทดสอบของ IEEE 14 บัส จะพบว่ารีเลย์ระยะทางแบบโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะยังคงสามารถชดเชยความต้านทานฟอลต์ที่เกิดขึ้นขณะที่เกิดฟอลต์แบบ เฟส-เฟส ได้ในบางจุดซึ่งสาเหตุเกิดมาจากกระแสที่ไหลมาหลายด้านทำให้ค่าความต้านทานฟอลต์มีขนาดเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง ทั้งนี้คงจะต้องมีศึกษาถึงการเพิ่มศักยภาพของรีเลย์ระยะทางที่ได้สร้างขึ้นใหม่นี้ด้วยการนำไปทดสอบจริงและนำไปเปรียบเทียบกับรีเลย์ระยะทางที่มีใช้กันอยู่ต่อไป

2. ผลการทดสอบเมื่อนำหลักการของรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ซึ่งมีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะที่เรียกว่า “KU Distance Relay” จากโปรแกรม Matlab/Simulink มาสร้างฮาร์ดแวร์ ด้วยบอร์ด DSPACE รุ่น DS1104 ที่อัตราการสุ่ม 1 kHz กับเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300 พบว่าฮาร์ดแวร์ของรีเลย์ระยะทางชนิดโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะที่สร้างขึ้นมานั้น สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ทั้งในการเกิดฟอลต์แบบ เฟส-เฟส และ เฟส-ลงดิน ในทุกกรณีคือ สามารถตัดฟอลต์ออกจากระบบได้อย่างถูกต้องตามโซน โดยจะทำงานตรวจจับฟอลต์ได้เช่นเดียวกับรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ที่มีใช้กันอยู่ทั่วไป และเมื่อทดสอบโดยการใส่ความต้านทานฟอลต์เข้าไปในขณะเกิดฟอลต์ รีเลย์ตัวดังกล่าวยังสามารถตรวจจับค่าความต้านทานฟอลต์ได้และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานด้วยการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะด้วยวิธีเพิ่มขนาดของโซนป้องกันในแกนความต้านทานหรือแกน R ด้วยวิธี KU ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว เพื่อชดเชยค่าความต้านทานฟอลต์ที่เพิ่มเข้ามาในขณะที่เกิดฟอลต์ ทำให้ความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับฟอลต์ของรีเลย์ระยะทางแบบโมห์มีน้อยลง (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพวงจรและการติดตั้งค่าความต้านทานฟอลต์หรือ  $R_F$ ) ซึ่งตรงตามแนวคิดที่ได้มีไว้ตั้งแต่เริ่มต้น แต่การทดสอบด้วยวิธีนี้ทำได้กับสายส่งวงจรเดี่ยวเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อจำกัดด้านจำนวนอินพุตและเอาต์พุตของบอร์ด DSPACE รุ่น DS1104 และ ข้อจำกัดจากเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300 ที่สามารถทดสอบรีเลย์ได้ครั้งละ 1 ตัวเท่านั้น แต่ถ้าจะต่อขดงานวิจัยด้วยการทดสอบกับวงจรที่มีความซับซ้อนก็สามารถทำได้โดยการเขียนโปรแกรมรองรับเพื่อนำพอร์ทัลสื่อสารของบอร์ด DSPACE รุ่น DS1104 มาติดต่อและทำงานประสานกันก็จะสามารถนำ “KU Distance Relay” มาทดสอบกับสายส่งหลายวงจรเพื่อทดสอบการทำงานของรีเลย์แนวคิดใหม่ได้

ข้อดีของรีเลย์ระยะทางที่สร้างจากหลักการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะด้วยวิธี KU คือสามารถตรวจจับและชดเชยค่าความต้านทานฟอลต์ในขณะที่เกิดฟอลต์ได้ ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพ

และการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ที่มีใช้กันอยู่ทั่วไป โดยการลดความเสียหายของการตรวจจับทางเดินของอิมพีแดนซ์ที่คลาดเคลื่อนเนื่องจากค่าความต้านทานพอลท์ที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดพอลท์ แต่วิธีปรับปรุงกราฟคุณลักษณะด้วยวิธีนี้มีข้อเสีย คือ ในขณะที่รีเลย์ระยะทางแบบ KU ตรวจจับความต้านทานพอลท์พบในขณะที่เกิดพอลท์และกำลังทำการขยายโซนป้องกันอยู่นั้น ถ้ามีทางเดินของอิมพีแดนซ์ของโหลดเข้ามาในโซนป้องกันที่ถูกขยายก็จะทำให้รีเลย์ระยะทางดังกล่าวเห็นทางเดินของอิมพีแดนซ์เป็นพอลท์แล้วส่งคำสั่งทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ผิดพลาดออกมา ดังนั้นจึงต้องมีการคำนวณค่าเซตตั้งเพื่อชดเชยความต้านทานพอลท์ให้เหมาะสมที่สุด

## ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีข้อเสนอแนะสิ่งที่จะเป็นประโยชน์ต่อไปเป็นข้อ ๆ ดังนี้

1. ภาควิชาได้ใช้แนวความคิดและวิธีการในคุณลักษณะนี้ไปต่อยอดงานวิจัยเพื่อสร้างรีเลย์ในระบบป้องกันได้หลายชนิด แต่ต้องมีหน่วยงานต่าง ๆ สนับสนุนและทำการวิจัยอย่างต่อเนื่องและจริงจัง
2. ถ้าเป็นไปได้ น่าจะมีนำรีเลย์ระยะทางที่สร้างขึ้น ไปทดสอบการทำงานจริงในห้องทดสอบที่มีมาตรฐานในการทดสอบการใช้งาน เช่น การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย หรือ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เป็นต้น เพื่อที่จะหาข้อบกพร่องของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ได้สร้างขึ้นให้มากกว่านี้
3. ควรจะมีเงินสนับสนุนในเรื่องเครื่องมือและอุปกรณ์ของนิสิตระดับบัณฑิตศึกษามากขึ้น เพราะในการทำงานวิจัยในระดับดังกล่าวค่อนข้างที่จะใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่มีราคาแพง
4. ในการทำวิจัยในส่วนของฮาร์ดแวร์เป็นที่ทราบกันดีว่าเงินสนับสนุนของทางภาครัฐจะมีอัตราส่วนที่น้อยกว่าทางภาคเอกชนมากจนเทียบกันไม่ได้ ดังนั้นทางมหาวิทยาลัยควรมีการคัดเลือกงานวิจัยที่สามารถทำร่วมกับเอกชนเพื่อจะได้เป็นงบประมาณเพิ่มขึ้นมาในการทำงานวิจัย ซึ่งจะได้ประโยชน์ทั้งมหาวิทยาลัยและภาคเอกชน
5. งานวิจัยนี้ยังมีข้อค้อยในส่วนของการทดสอบฮาร์ดแวร์ ซึ่งกรณีที่ใช้ในการทดสอบยังมีไม่หลากหลายพอ ซึ่งเกิดจากข้อจำกัดของตัวทดสอบรีเลย์ Freja300 (ซึ่งได้กล่าวไปแล้วข้างต้น) ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการทดสอบให้มีความหลากหลายของกรณีมากกว่าที่เป็นอยู่
6. เครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300 ที่ทำการทดสอบไม่มีการสอบเทียบ (Calibration) มานานกว่า 4 ปี ซึ่งจากการวัดด้วยเครื่องมือวัดออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) พบว่าสัญญาณแรงดันและกระแสที่ออกมาจากเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300 แต่ละเฟสมีค่าไม่เท่ากัน มีค่าคลาดเคลื่อนไม่ตรงกับค่าที่ได้เซตตั้ง จึงมีผลต่อการทดสอบรีเลย์ระยะทางที่ได้สร้างขึ้น (KU Distance Relay) ดังนั้นจึงควรนำเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300 ไปสอบเทียบเพื่อให้เกิดความเที่ยงตรงสูงสุด แต่ทางผู้วิจัยได้ใช้ซอฟต์แวร์ช่วยในการชดเชยค่าคลาดเคลื่อนของเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300 แล้ว ซึ่งวิธีดังกล่าวได้แก้ไขปัญหาค่าคลาดเคลื่อนของเครื่องทดสอบรีเลย์ Freja300 ได้ดี

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ศุรเชษฐ เดชฟุ้ง และ ตฤณ แสงสุวรรณ, การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบวีลย์ชนิดดิจิทัล สำหรับการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29, พัทยา ชลบุรี 2549, หน้า. 57-60

Abhishek Bansal and G. N. Pillai, High Impedance Fault detection using LVQ Neural Networks, **International Journal of Computer, Information, and Systems Science, and Engineering** Volume 1 Number 3

A. A. Girgis and D. G. Hart, Implementation of Kalman and adaptive Kalman filtering algorithm for digital distance protection and vector signaling processor, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 4, Jan. 1989, pp. 141-156.

A. A. Girgis, W. Chang, and E. B. Makram, Analysis of high-impedance fault generated signals using a Kalman filtering approach, **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 5, pp.1714-24, 1990.

A. E. Emanuel, D. Cyganski, J. A. Orr, S. Shiller, and E. M. Gulachenski, High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum, **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 5, pp. 676-86, 1990.

A. G. Phadake and J. S. Thorp, **Computer Relaying for Power System**, Research Studies Press Ltd., England, 1988.

A. G. Phadke, T. Hlibka and M. Ibrahim, Fundamental basis for distance relaying with symmetrical components, **IEEE Transactions on Power Apparatus and System**, Vol. PAS-96, Mar/Apr. 1977, pp. 635-646.

- A. G. Phadke, T. Hlibka, M. Ibrahim, and M. G. Adamisk, A microcomputer based symmetrical component distance relay, **PICA IEEE conference**, May 1979, Cleveland
- A. K. Jampala, S. S. Venkata, and M. J. Damborg, Adaptive transmission protection: Concepts and computational issues, **IEEE Trans. On Power Delivery**, vol. 4, no. 1, pp. 177–185, 1989.
- A. K. Sinha, S. Sinha and P.B. Duttagupta, A multiprocessor based high speed distance relay for transmission line protection, **Proceedings of the International Conference on Power System Protection**, Sept. 1989, Singapore, pp. 823-846.
- A. Lazkano, J. Ruiz, L. A. Leturiondo, and E. Aramendi, High impedance arcing fault detector for three-wire power distribution networks, Lemesos, Cyprus, 2000.
- A. M. Sharaf and G. Wang, High impedance fault detection using feature-pattern based relaying, **Transmission and Distribution Conf. and Exposition, 2003 IEEE PES**, vol. 1, 7-12 Sept. 2003, pp. 222 – 226.
- A. M. Sharaf and S. I. Abu-Azab, A smart relaying scheme for high impedance faults in distribution and utilization networks, Halifax, NS, Canada, 2000.
- A. R. Sedighi, M. R. Haghifam, and O. P. Malik, Soft computing applications in high impedance fault detection in distribution systems, **Electric Power Systems Research**, vol. 76, pp. 136-144, 2005.
- A. R. Sedighi, M. R. Haghifam, O. P. Malik, and M. H. Ghassemian, High impedance fault detection based on wavelet transform and statistical pattern recognition, **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 20, pp.2414-21, 2005.

- A. V. Mamishev, B. D. Russell, and C. L. Benner, Analysis of high impedance faults using fractal techniques, in: **IEEE Power Industry Computer Application Conf.**, 1995, pp. 401–406.
- B. D. Russell and R. P. Chinchali, A digital signal processing algorithm for detecting arcing faults on power distribution feeders, **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 4, pp. 132-40, 1989.
- B. D. Russell, R. P. Chinchali, and C. J. Kim, Behaviour of low frequency spectra during arcing fault and switching events, **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 3, pp. 1485-92, 1988.
- B. J. Mann and I. F. Morrison, Relaying a three-phase transmission line with a digital computer, **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-90, Mar./Apr. 1971, pp. 742-750.
- B. M. Aucoin and B. D. Russell, Detection of distribution high impedance faults using burst noise signals near 60 Hz, **IEEE Trans.Power Deliv.**2 (April (2)) (1987) pp. 342–348.
- C. G. Wester, High impedance fault detection on distribution systems, **presented at 1998 Rural Electric Power Conference Presented at 42<sup>nd</sup> Annual Conference**, 26-28 April 1998, St. Louis, MO, USA, 1998.
- D. C. T. Wai and X. Yibin, A novel technique for high impedance fault identification, **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 13, pp. 738-44, 1998.
- D. C. Yu and S. H. Khan, An adaptive high and low impedance fault detection method, **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 9, pp. 1812-21, 1994.

- D. Damore and A. Ferrero, A simplified algorithm for digital distance protection based on Fourier techniques, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 4, Jan. 1989, pp. 157-164.
- D. Hou, Detection of High-Impedance Faults in Power Distribution Systems, **2006 33rd Annual Western Protective Relay Conference Proceedings**.
- D. L. Waikar, A. C. Liew and S. Elangovan, DESIGN, IMPLEMENTATION AND PERFORMANCE EVALUATION OF A NEW DIGITAL DISTANCE RELAYING ALGORITHM, **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 11, No. 1, February 1996.
- D. L. Waikar, A. C. Liew and S. Elangovan, First zone performance assessment of symmetrical component based improved fault impedance estimation method, **Electrical Power Systems Research Journal**, Vol. 27, pp. 161-168, 1993.
- D. L. Waikar, S. Elangovan and A. C. Liew, Fault impedance estimation algorithm for digital distance relaying, **Paper No. 94-WM-017-4 PWRD, IEEEYPES Winter Meeting**, New York, 1994.
- D. L. Waikar, S. Elangovan and A.C. Liew, Symmetrical component based improved fault impedance estimation method for digital distance protection PartI: design aspects and PartII: computation and validation aspects, **Electrical Power Systems Research Journal**, Vol. 26, No. 2, pp. 143-154, 1993.
- Gerhard Ziegler, **Numerical Distance Protection Principle and Application**, Siemens AG., Berlin and Munich, July, 1999.
- Gang Li, Shengshi Zhu and Fenghai Sui, ADAPTIVE BOWL IMPEDANCE RELAY, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 14, No. 1, January 1999

- G. B. Gilchrist, G.D. Rockfeller and E.A. Udren, Highspeed distance relaying using a digital computer, Part I system description, **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-91, 1972, pp. 1235-1243.
- G. C. Kakoti and H.K. Verma, New algorithms for microprocessor based distance relaying, **Electrical Power Systems Research**, Vol. 15, 1988, pp. 233-238.
- G. S. Hope and V.S. Umamaheshwaran, Sampling of computer protection of transmission lines, **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, V01.93, 1974, p 1522-1530
- H. Ching-Lien, C. Hui-Yung, and C. Ming-Tong, Algorithm comparison for high impedance fault detection based on staged fault test, **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol.3, pp. 427-35, 1988.
- H. C. Wood, T.S. Sidhu, M.S. Sachdev and M. Nagpal, A general purpose hardware for microprocessor based relays, **Proceedings of the International Conference on Power System Protection**, Sept. 1989, Singapore, pp. 43-59.
- H. Khorashadi-Zadeh, A novel approach to detection high impedance faults using artificial neural network, Bristol, UK, 2004.
- K. Chul-Hwan, K. Hyun, K. Young-Hun, B. Sung-Hyun, R. K. Aggarwal, and A. T. Johns, A novel fault-detection technique of high impedance arcing faults in transmission lines using the wavelet transform, **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 17, pp. 921-9, 2002.
- K. K. Li, L. L. Lai, and A. K. David, Stand Alone Intelligent Digital Distance Relay, **IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS**, VOL. 15. NO. 1, FEBRUARY 2000.

- M. Aucoin, Status of high impedance fault detection, **IEEE Trans.PAS**, vol. 104, no. 3, pp. 638-644, Mar. 1985
- M. M. Saha, K. Wikstrom and S. Lindahl, A new approach to fast distance protection with adaptive features, ABB Network Partner, Sweden.
- M. S. Sachdev and M. A. Baribeau, A new algorithm for digital impedance relays, **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-98, Nov./Dec. 1979, pp. 2232-2240.
- M. S. Sachdev and M. Nagpal, A recursive least square error algorithm for power system relaying and measurement application, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. PWDR-6, July 1991, pp. 1008-1015.
- M. S. Sachdev and S.R. Kolla, A polyphase digital distance relay, **Transactions of the Engineering and Operating Division, Canadian Electrical Association**, Vol. 26, Part 4, No. 87-SP-170, March 1987, pp. 1-19.
- Naser Zamanan, Jan Sykulski and A. K. Al-Othman, ARCING HIGH IMPEDANCE FAULT DETECTION USING REAL CODED GENETIC ALGORITHM, **Proceeding of the Third IASTED Asian Conference POWER AND ENERGY SYSTEMS**, Phuket, April 2-4, 2007.
- N. Zamanan and J. K. Sykulski, Modelling arcing high impedances faults in relation to the physical processes in the electric arc, **WSEAS Transactions on Power Systems**, vol. 1 (8), pp. 1507-1512, 2006.
- Philip S. M. Chin, Ng Y. W., D. L. Waikar and So0 H.C., Power system simulator: a teaching aid for tertiary students in electrical engineering, **Journal of the Institution of Engineers, Singapore**, Vol. 32, No. 6, pp. 83-88, October 1992.

- P. K. Dash, A. K. Pradhan, Ganapati Panda, and A. C. Liew. Adaptive Relay Setting for Flexible AC Transmission Systems (FACTS). **IEEE Trans. On Power Delivery**, vol. 15, NO. 1, pp. 38-43, JANUARY 2000.
- P. Sharma, J. Henry and S.I. Ahson, Walsh transform realization for microprocessor implementation of distance protection, **Electric Power Systems Research Journal**, Vol. 19, 1990, pp. 157-166.
- R. H. Kaulinann and J. C. Page, Arcing fault protection for low-voltage, power distribution systems- nature of the problem, **AIEE Trans**, pp. 160-167, June 1960.
- Stanley H. Horowitz and Arun G. Phadake, **Power System Relaying**, Research Studies Press Ltd., England, 1992.
- S. Dechphung and T. Saengsuwan, Adaptive Characteristic of Mho Distance Relay for Compensation of the Phase to Phase Fault Resistance, **ECTI International Conference**, Chiang Rai, Thailand 2007, pp. 313-316
- T. Gammon and J. Matthews, The historical evolution of arcing-fault models for low-voltage systems, Sparks, NV, USA, 1999.
- T. M. Lai, L. A. Snider and E. Lo, Wavelet Transform Based Relay Algorithm for the Detection of Stochastic High Impedance Faults, **International Conference on Power Systems Transients – IPST 2003**.
- T. M. Lai, L. A. Snider, E. Lo, C. H. Cheung, and K. W. Chan, High impedance faults detection using artificial neural network, Hong Kong, China, 2003.

- T. Saengsuwan, Modelling of Distance Relays in EMTP, **IPST International Conference**, Budapest Hungary 1999, pp. 213-217
- V. Cook, **Analysis of Distance Protection**, Research Studies Press Ltd., 1985
- W. J. Smolinski, An algorithm for digital impedance calculation using a single pi section", **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-98, Sept. 1979, pp. 1546-1551.
- Y. Q. Xia, A. K. David, and K. K. Li, High resistance faults on multiterminal lines: Analysis, simulated studies an adaptive distance relaying scheme, **IEEE Trans. on Power Delivery**, vol. 9, no. 1, pp. 492–501, 1993.
- Y. Q. Xia, K. K. Li, and A. K. David, Adaptive relay setting for standalone digital distance protection, **IEEE Trans. on Power Delivery**, vol. 9, no. 1, pp. 480–491, 1993.
- Y. Q. Xia, K. K. Li, and A. K. David, Stand Alone Intelligent Digital Distance Relay, **IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS**, VOL. 15. NO. 1, FEBRUARY 2000.
- Y. Sheng and S. M. Rovnyak, Decision treebased methodology for high impedance fault detection, **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 19, pp. 533-536, 2004.

ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก**

พารามิเตอร์ของวงจรทดสอบ IEEE 14 บัส



# IEEE 14-BUS TEST SYSTEM

Table A.1: Exciter data

Exciter no.	1	2	3	4	5
$K_A$	200	20	20	20	20
$T_A$	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
$T_B$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$T_c$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$V_{Rmax}$	7.32	4.38	4.38	6.81	6.81
$V_{Rmin}$	0.00	0.00	0.00	1.395	1.395
$K_E$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
$T_E$	0.19	1.98	1.98	0.70	0.70
$K_F$	0.0012	0.001	0.001	0.001	0.001
$T_F$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Table A.2: Generator data

Generator bus no.	1	2	3	4	5
MVA	615	60	60	25	25
$x_l$ (p.u.)	0.2396	0.00	0.00	0.134	0.134
$r_a$ (p.u.)	0.00	0.0031	0.0031	0.0014	0.0041
$x_d$ (p.u.)	0.8979	1.05	1.05	1.25	1.25
$x'_d$ (p.u.)	0.2995	0.1850	0.1850	0.232	0.232
$x''_d$ (p.u.)	0.23	0.13	0.13	0.12	0.12
$T'_{do}$	7.4	6.1	6.1	4.75	4.75
$T''_{do}$	0.03	0.04	0.04	0.06	0.06
$x_q$ (p.u.)	0.646	0.98	0.98	1.22	1.22
$x'_q$ (p.u.)	0.646	0.36	0.36	0.715	0.715
$x''_q$ (p.u.)	0.4	0.13	0.13	0.12	0.12
$T'_{qo}$	0.00	0.3	0.3	1.5	1.5
$T''_{qo}$	0.033	0.099	0.099	0.21	0.21
$H$	5.148	6.54	6.54	5.06	5.06
$D$	2	2	2	2	2

Sameh Kamel Mena Kodsi, IEEE Student Member

Claudio A. Cañizares, IEEE Senior Member

# IEEE 14-BUS TEST SYSTEM

Table A.1: Exciter data

Exciter no.	1	2	3	4	5
$K_A$	200	20	20	20	20
$T_A$	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
$T_B$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$T_c$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$V_{Rmax}$	7.32	4.38	4.38	6.81	6.81
$V_{Rmin}$	0.00	0.00	0.00	1.395	1.395
$K_E$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
$T_E$	0.19	1.98	1.98	0.70	0.70
$K_F$	0.0012	0.001	0.001	0.001	0.001
$T_F$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Sameh Kamel Mena Kodsı, IEEE Student Member

Claudio A. Cañizares, IEEE Senior Member

Table A.3: Bus data

Bus No.	P Generated (p.u.)	Q Generated (p.u.)	P Load (p.u.)	Q Load (p.u.)	Bus Type*	Q Generated max.(p.u.)	Q Generated min.(p.u.)
1	2.32	0.00	0.00	0.00	2	10.0	-10.0
2	0.4	-0.424	0.2170	0.1270	1	0.5	-0.4
3	0.00	0.00	0.9420	0.1900	2	0.4	0.00
4	0.00	0.00	0.4780	0.00	3	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.0760	0.0160	3	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.1120	0.0750	2	0.24	-0.06
7	0.00	0.00	0.00	0.00	3	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	2	0.24	-0.06
9	0.00	0.00	0.2950	0.1660	3	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.0900	0.0580	3	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.0350	0.0180	3	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.0610	0.0160	3	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.1350	0.0580	3	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.1490	0.0500	3	0.00	0.00

\*Bus Type: (1) swing bus, (2) generator bus (PV bus), and (3) load bus (PQ bus)

Sameh Kamel Mena Kodsí, IEEE Student Member

Claudio A. Cañizares, IEEE Senior Member

Table A.4: Line Data

From Bus	To Bus	Resistance (p.u.)	Reactance (p.u)	Line charging (p.u.)	tap ratio
1	2	0.01938	0.05917	0.0528	1
1	5	0.05403	0.22304	0.0492	1
2	3	0.04699	0.19797	0.0438	1
2	4	0.05811	0.17632	0.0374	1
2	5	0.05695	0.17388	0.034	1
3	4	0.06701	0.17103	0.0346	1
4	5	0.01335	0.04211	0.0128	1
4	7	0.00	0.20912	0.00	0.978
4	9	0.00	0.55618	0.00	0.969
5	6	0.00	0.25202	0.00	0.932
6	11	0.09498	0.1989	0.00	1
6	12	0.12291	0.25581	0.00	1
6	13	0.06615	0.13027	0.00	1
7	8	0.00	0.17615	0.00	1
7	9	0.00	0.11001	0.00	1
9	10	0.03181	0.08450	0.00	1
9	14	0.12711	0.27038	0.00	1
10	11	0.08205	0.19207	0.00	1
12	13	0.22092	0.19988	0.00	1
13	14	0.17093	0.34802	0.00	1

Sameh Kamel Mena Kodsı, IEEE Student Member

Claudio A. Cañizares, IEEE Senior Member

ภาคผนวก ข  
DSPACE รุ่น DS11104

## DS1104 R&D Controller Board





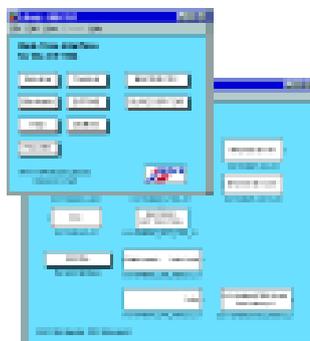
## DS1104 R&D Controller Board

# A Powerful Prototyping System in Your PC



### Software Support

- DS1104 Real-Time Library (included)
- Expertedit and Platform Manager (included)
- Programming from Simulink with Real-Time Interface RTI 1024
- Microsoft C Compiler for PPC processor
- Expertedit control with ControlDesk and MULTITRACK



Real-Time Interface provides Simulink blocks for convenient configuration of A/D, D/A, digital I/O lines, incremental encoder interface and PWM generation.

- Cost-effective system for controller development
- Single-board PCI hardware for use in PC
- Set of intelligent I/O on-board
- Fully programmable from the Simulink block diagram environment

The DS1104 R&D Controller Board is a new piece of hardware that upgrades your PC to a powerful development system for rapid control prototyping. The real-time hardware based on PowerPC technology and its set of I/O interfaces makes the board an ideal solution for developing controllers in various industrial fields. The new DS1104 R&D Controller Board is impressive proof that power does not necessarily have to be expensive. The DS1104 offers an intelligent subset of the hardware architecture of the DS1104 PPC Controller Board, our pioneering success. This way the DS1104 is available at a reasonable price, making it the perfect development system for industry and equally for universities.

Yet it still gives you all the benefits of a dSPACE Prototyping system: full graphical configuration, programming in Simulink/Dataflow from the MathWorks and expertedit control with state-of-the-art software tools. The board can be installed in virtually any PC with a free PCI slot. So why not make your PC a powerful development tool?

## Technical Details

- |                       |  |
|-----------------------|--|
| <b>Main Processor</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ MPC1045 PowerPC 603e-core, 200 MHz</li> <li>■ 32 Kbytes internal cache</li> </ul>   |
| <b>Timers</b>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 1 sample rate timer, 32-bit downcounter</li> <li>■ 2 general purpose timers, 32 bit</li> <li>■ 60-Hz timebase for time measurement</li> </ul> |





132

---

**Headquarters in Germany**

dSPACE GmbH  
Mühldorfer Straße 28  
D-42699 Solingen  
Tel.: +49 2124 7400-0  
Fax: +49 2124 7400-29  
Email: info@dspace.de  
www.dspace.de

**USA and Canada**

dSPACE Inc.  
2700 Cabot Drive, Suite 100  
Irvine, CA 92614  
Tel.: 949 261-1300  
Fax: 949 261-1300  
Email: info@dspace.com  
www.dspace.com

ภาคผนวก ค  
เครื่องทดสอบรีเลย์ Freja 300



## FREJA 300™

### Relay Testing System

The Freja 300™ relay testing system is a computer-aided relay testing and simulation system. The weight of FREJA 300™ is only 15 kg. The rugged hardware design is built for field use over a wide temperature range, with the possibilities of intelligent software to perform rapid testing.

FREJA 300™ can be operated with or without a PC. After being put into the Local mode, FREJA 300™ can be used stand-alone without a PC. Using the Local mode is easy. The function of each key is described on the display, which also presents the settings and measured values.

The very accurate (typically 0.01%) low level analogue inputs are designed for transducer measurements. The high level inputs can be used as a normal volt- and ammeter. FREJA 300™ can generate 4x150 V (82 VA) and 3x15 A (87 VA) or 1x45 A (250 VA), or with the optional external amplifier CA3, six currents. Each output can be varied independently. Both static and dynamic testing can be performed, such as pre-fault and fault generation, simultaneous ramping of several quantities and wave form editing.

FREJA 300™ can also be used as a disturbance simulator and create and generate simulated disturbances, or import actual recorded disturbances from e.g. EMTP™ or COMTRADE™ files (and edit the wave forms), by using the FREJA SIM™ Disturbance Simulator Software. With the built-in DC source you can supply the relay protection.



## APPLICATION

### Relay Testing

FREJA 300 is intended primarily for secondary testing of protective relay equipment. Virtually all types of protection relays can be tested.

Examples of what FREJA 300 can test	IEEE No.
Distance protection equipment	21
Synchronising or synchronism-check relays	25
Undervoltage relays	27
Directional Power relays	32
Undercurrent or underpower relays	37
Negative sequence overcurrent relays	46
Overcurrent./ ground fault relays	50
Inverse time overcurrent./ ground fault relays	51
Power factor relays	55
Overvoltage relays	59
Voltage or current balance relays	60
Directional overcurrent relays	67
DC overcurrent relays	76
Phase-angle measuring or out-of-step protective relays	78
Automatic reclosing devices	79
Frequency relays	81
Differential protective relays	87
Directional voltage relays	91
Voltage and power directional relays	92

## OPERATE WITHOUT A PC

### Local Mode

Using the dial by tuning and clicking it is easy to make the settings. All settings are saved automatically when you exit, but if you prefer you can assign the settings a name and save them separately for convenient access when you conduct your next test. The display can also show the measured value that is being generated. This feature is equivalent to three voltmeters and three ammeters that present RMS values for all generators.

```

2ND 50.00 Hz 63.0 63.0 63.0 63.0 V
* - - VOLT 0.0 0.0 240.0 120.0
o o o -----ms 0.00 0.00 0.00A
2/6 Start RST 0.0 0.0 0.0
  
```

Local Mode Genset

```

2ND 50.00Hz I: <1.000> U: 45.0V
* - - VOLT R: 45.000 |Z| 45.000
o o o -----ms X: 0.000 Zφ: 0.0
2/3 Start RST Run: Seq
  
```

Local Mode R (/)

## OPERATE WITH A PC

### FREJA WIN

#### FREJA Win Control center

There are a number of instrument programs. You start the different programs at the Control center, where you also save and recall results. Since the test setups/results are saved via a regular Microsoft® Explorer display, you can create your own test object structures.

#### General

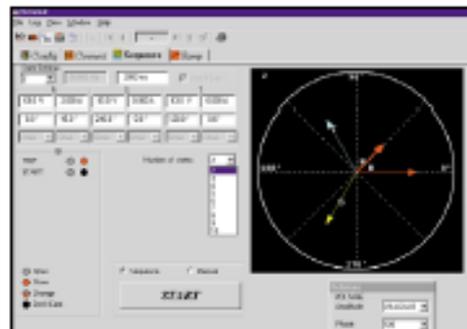
The all-round General instrument program serves as a convenient, easy to understand, user-friendly toolbox. On the Connect page, you can enter information about how to connect the relay, including pictures if so desired.

On the Sequence page, you can vary all generator parameters independently. You can have up to 25 different states (prefault, fault1, fault2, fault3 etc.). This is useful when testing autoreclose relays or motor protection.

On the Ramp page, you can ramp all generator parameters independently. Amplitudes and angles are shown on a vector diagram, and values can be set with a dial, keyboard or mouse. It's also possible to generate up to the 25th harmonic.



Control center



General instrument program



## Distance

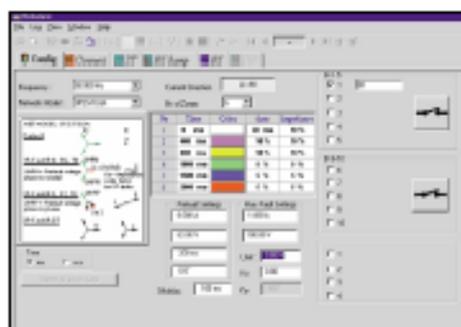
The Distance instrument program is designed to test distance relays. On the Configuration page, you enter the number of zones that are to be tested and also the time and impedance tolerances, thereby creating an automatic test. No programming is needed. Later, when you recall this object via the Control center, all settings are re-established so that you can start testing immediately.

On the Connect page you enter information about how to make connections to the relay, including pictures if so desired. Since this information is saved together with the object in the Control center, it can be displayed again the next time you want to test this relay.

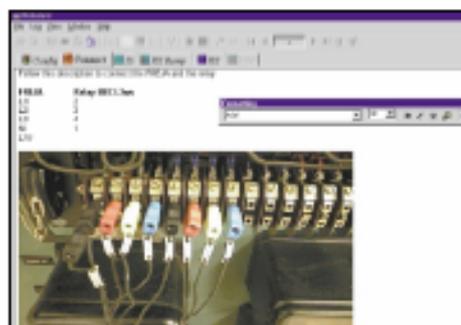
The Zt page is designed for time testing of a distance relay. Normally, you test one type of fault at a time when testing relays. With FREJA Win, however, you can test all seven fault types automatically if so desired. All you have to do is press the <Start>-button. FREJA will test all seven fault types automatically and then compare the readings with the theoretical values that you entered on the Configuration page. If the readings are OK, a green lamp lights. If not, a red lamp lights. If you want to check the reverse direction, the test can start below zero ohms in the 3rd quadrant.

The RX-ramp page, which is part of the Distance instrument program, is designed to test the reach of a distance relay. First, you define the start and stop angles and the delta phi between the ramps. Then press the <Start>-button and relax. FREJA will automatically test all seven types of faults using the time-saving "search-half" method. You can also define your own ramps, using the mouse to specify starting and ending points wherever desired. If you have defined a theoretical reference graph, the program will compare the actual test result with your graph and check for any deviations from the tolerances entered on the Configuration page. If the results are OK, a green lamp lights. If not, a red lamp lights.

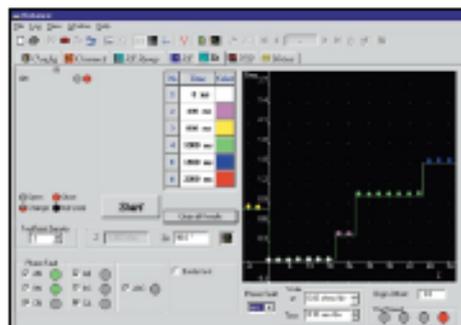
The RX page enables you to define test points manually. You can define different points on the oscilloscope using the mouse or keyboard. Select the automatic mode and press the <Start>-button. FREJA will test all points for the selected fault types. The points will be assigned different colors, depending on the trip time. If you select the manual mode, you can use the dial to search for a boundary.



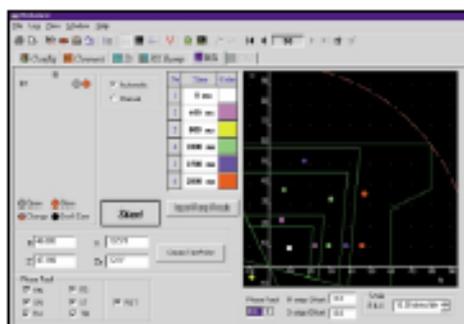
Distance, Config



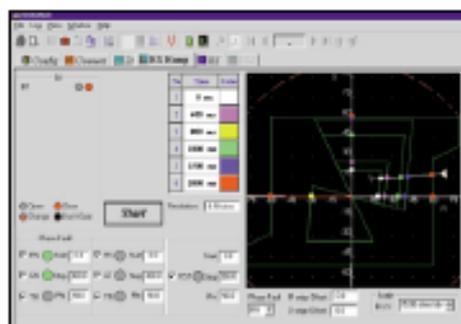
Distance, Connect



Distance, Zt



Distance, RX



Distance, RX ramp



**Reference graphs**

Efficient testing and performance analysis require well-defined reference values. FREJA can automatically create the IEC and IEEE standard curves for overcurrent relays. It is also possible to create reference graphs in the impedance plane using the included library of distance relays made by major manufacturers and/or create other characteristics using the standard circular lens and linear elements (including mho, quadrilateral and ice-cream cone shapes).

The cut and paste buttons make it easy to take copies of the first zone and then edit these copies by inserting zone 2 and zone 3 values.

State-of-the-art distance relays having sophisticated impedance characteristics and several setting groups require many parameter settings. The optional ProGraph feature enables you to import the parameter settings from a master selectivity plan prepared in Microsoft® EXCEL. This eliminates manual transfer errors, and the FREJA software creates the reference graph automatically.

Some relay manufacturers can create a RIO-file with the settings of the relay. Using the FREJA RIO-converter you can create reference graphs based on these settings.

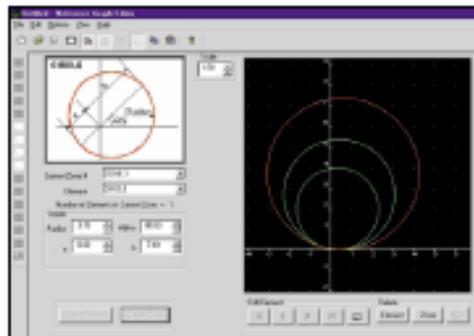
**Sync**

The Uf Min & Max part of the Sync Instrument program is designed especially to test voltage and frequency boundaries for a synchronizing relay. This test is carried out automatically. Simply press the <Start> button, whereupon the program itself searches for the boundaries.

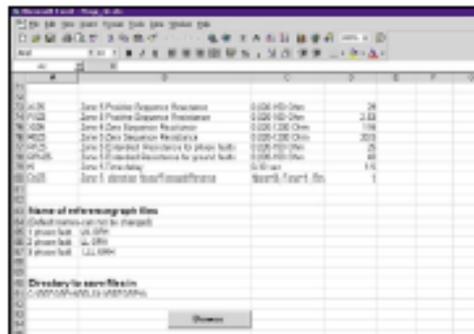
The Synchronizing page is designed to measure lead time. It also enables you to measure the pulses sent out from the synchronizing relay.

The Synchro Check page is designed to test synchrocheck relays.

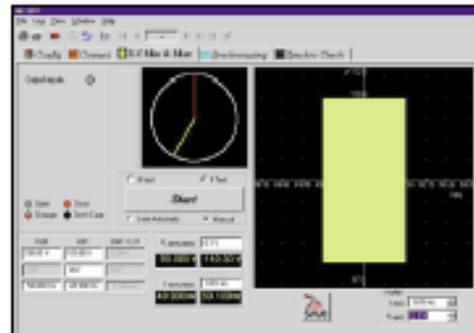
First set the phase angle to +20° (or some other starting point). Then change the phase angle until you reach the boundary. Press the <Save> button to store the result. Now test on the other side, starting at -20°, change the phase angle until you reach the other boundary.



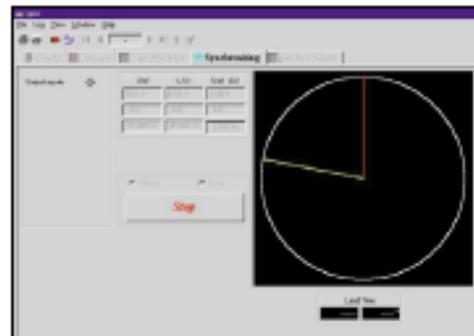
Edit a reference graph



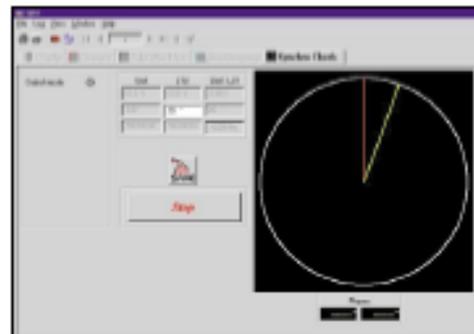
Prograph



Sync Uf Min & Max



Sync Synchronizing



Sync Synchro Check



## SPECIFICATIONS

## Generator Section

VOLTAGE OUTPUTS		
<b>Range</b>	4-phase AC	4 x 150 V
	1-phase AC (L-L)	2 x 300 V
	DC (L-N)	180 V
<b>Power</b>	3-phase AC	3 x 82 VA at 150 V
	1-phase AC (L-L)	1 x 140 VA at 300 V
	DC (L-N)	87 W
<b>Resistive</b>	SW	10 mW
	HW	6.5 mW
<b>Accuracy<sup>(1)</sup> (guaranteed)</b>	±0.01% of range +0.05% of reading	
<b>Distortion (THD+N)<sup>(2)</sup></b>	0.02% typical (0.04% max)	
CURRENT OUTPUTS <sup>(3)</sup>		
<b>Range</b>	3-phase AC	3 x 15 A
	1-phase AC <sup>(3)</sup>	1 x 45 A
	DC (L-N)	15 A
<b>Power</b>	3-phase AC	3 x 87 VA
	1-phase AC <sup>(3)</sup>	1 x 250 VA
	DC (L-N)	3 x 87 W
<b>Resistive</b>	SW	1 mA
	HW	0.65 mA
<b>Accuracy<sup>(1)</sup> (guaranteed)</b>	±0.01% of range +0.3% of reading	
<b>Distortion (THD+N)<sup>(2)</sup></b>	0.1% typical (0.2% max)	
GENERATORS, GENERAL		
<b>Frequency range</b>	Continuous signals DC - 2000 Hz Transient signals DC - 3.5 kHz	
<b>Frequency resolution</b>	1 mHz	
<b>Frequency accuracy</b>	0.01%	
<b>Phase angle range</b>	0 - 360°	
<b>Phase resolution</b>	0.1°	
<b>Phase accuracy<sup>(4)</sup></b>	±0.1°	
<b>Connective (Amplifier outputs)</b>	4 mm banana connectors or 8-pin amplifier multiconnector	
<p>All seven generators are continuously and independently adjustable in amplitude and phase. No switching of range is necessary. All current and voltage outputs are fully overload- and short-circuit-proof and protected against external high voltage transient signals and overtemperatures.</p> <p>(1) For higher current or output power you can use amplifier OAG</p> <p>(2) Parallel connection</p> <p>(3) THD+N: Values at 50/60 Hz, at max amplitude, 50% power and relative load. Measurement bandwidth 22 Hz - 22 kHz.</p> <p>(4) For sinusoidal signals at 50/60 Hz</p>		
DC AUXILIARY VOLTAGE OUTPUT		
<b>Range</b>	20 - 210 V DC	
<b>Output power</b>	75 W at 210 V	

## TIMER/MEASURING SECTION

<b>Binary inputs</b>		
<b>Number</b>	10 inputs (2 groups of 5 independent) dry or wet contacts 275 V DC, 240 V AC	
<b>Internal resolution time</b>	50 µs	
<b>Galvanic isolation</b>	Galvanically separated from the amplifier section. Two galvanically separated groups: 1 to 5 and 6 to 10	
<b>Max measuring time</b>	15264 h (536 days)	
<b>Range / Resolution</b>	0 - 9.9 ms	0.1 ms
	10 ms - 60 min	1 ms
	1 h - 15264 h	1 s
<b>DC current measuring input, LOW</b>		
<b>Measuring range</b>	±20 mA	
<b>Resistive</b>	SW	0.1 µA
	HW	0.6 µA
<b>Accuracy</b>	0.01% typical 0.03% guaranteed (= 6 µA)	
<b>DC voltage measuring input, LOW</b>		
<b>Measuring range</b>	±10 V	
<b>Resistive</b>	SW	0.1 mV
	HW	0.3 mV
<b>Accuracy</b>	0.01% typical 0.03% guaranteed (= 3 mV)	
<b>AC/DC current measuring input, HIGH<sup>(1)</sup></b>		
<b>Measuring range</b>	±14 A DC, 10 A ACrms	
<b>Accuracy</b>	DC <0.1%, AC <0.3%	
<b>AC/DC voltage measuring input, HIGH<sup>(1)</sup></b>		
<b>Measuring range</b>	±220 V DC, 150 V ACrms	
<b>Accuracy</b>	DC <0.05%, AC <0.2%	
<sup>(1)</sup> 50 or 60 Hz AC + harmonics only		
<b>Measurement, internally generated values</b>		
<b>Accuracy</b>	Voltage AC/DC <1%±1digit Current AC/DC <2%±2digit	
<b>Binary outputs</b>		
<b>Number</b>	2 x 4 (NO & NC)	
<b>Type</b>	Zero-potential contacts, controlled via software	
<b>Break capacity AC</b>	240 V AC, max 8 A, max load 2000 VA	
<b>Break capacity DC</b>	275 V DC, max 8 A, max load 240 W	
GENERAL		
<b>Power requirements</b>		
<b>Voltage</b>	90 - 264 V AC single phase	
<b>Frequency</b>	47 - 63 Hz	
<b>Power consumption</b>	600 VA typical (1200 VA max)	
<b>Weight and Dimensions</b>		
<b>Instrument</b>	15 kg (33.1 lbs) 450 x 180 x 410 mm (17.7 x 6.3 x 16.1")	
<b>Hard transport case</b>	7.5 kg (16.5 lbs) 560 x 240 x 575 mm (22 x 9.5 x 22.6")	



ENVIRONMENTAL CONDITIONS	
<b>Operating temperature</b>	0 to +50°C (+32 to +113°F)
<b>Storage temperature</b>	-40 to +70°C (-40 to +158°F)
<b>Humidity</b>	IEC 721-3-1 1987, IEC 721-3-2 1985, IEC 721-3-3 1987
<b>EMC</b>	89/336/EEC
<b>British SS-BN50081-2</b>	EN 55011
<b>Immunity SS-BN50082-2</b>	EN50140, EN50204, EN50141, EN61000-4-2, EN61000-4-4
<b>LVD T3/23/EEC</b>	IEC1010-1 First ed. 1990-09, IEC1010-1 Amend. 1 1992-09, IEC1010-1 Amend. 2 1995-06, IEC950 First ed. 1986
<b>Mechanics</b>	IEC 68-2-32 Second ed. 1975, IEC 68-2-31 First ed. 1969
<b>Other</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>On-line measurement of the current and voltage output, presented on the built-in display or PC.</li> <li>Calibration check when the temperature is changed. Full calibration can be conducted at any time using the FREJA calibration box. This means that you do not need to send away FREJA for calibration. Only the calibration box needs to be sent for calibration once per year.</li> <li>Connection to IBM compatible PC (minimum Pentium® 133MHz 32 MB RAM, Windows® 95/98, NT 4.0) via the serial port. The FREJA has a built-in switch that enables you to switch the PC-communication back and forth between the FREJA and the relay.</li> </ul> <p>Specifications are valid for resistive load, nominal voltage supply and ambient temperature +25°C ±3°C, (+77°F ±5.4°F), after 30 minutes warm up time. All hardware data are for full scale values. Specifications are subject to change without notice.</p>

## OPTIONAL ACCESSORIES

### Remote control

Remote control with cable, 3 m (10 ft), for the dial.  
**Art.No:** CF90010

### Test lead set

With touch-proof contacts, 2 x 0.25 m (0.8 ft)/2.5 mm<sup>2</sup>,  
2 x 0.5 m (1.6 ft)/2.5 mm<sup>2</sup>, 8 x 2 m (6.5 ft)/2.5 mm<sup>2</sup>.  
Normally two sets of this type is needed.  
**Weight:** 0.8 kg (1.8 lbs)  
**Art.No:** GA-00032

### FREJA 300 Multi-cable

Shortens hookup time considerably. Consists of a multipole connector that connects to FREJA 300's three voltage and three current outputs, and a number of banana plugs that connect to the protective relay equipment that is to be tested.  
**Art.No:** GA-00103

### Portable computer

GE Energy Services can offer a number of different types of PCs from which you can choose. Please contact your GE Energy Services representative for more information.

### Computer case with printer

This case includes a printer (but no computer). The case is suitable for the computers offered by GE Energy Services, and also for those who use their own computers.

**Dimensions:** 510 x 390 x 120 mm (20" x 15.4" x 4.7")  
**Weight:** 7.5 kg (16.5 lbs)  
**Art.No:** XC-80061 (115 V), XC-80062 (230 V)

### Current amplifier CA3

Three-phase current amplifier. For higher output power and current.  
**Dimensions:** 450 x 132 x 410 mm (17.7" x 5.2" x 16.2")  
**Weight:** 11 kg (24.3 lbs)  
**Art.No:** CA-19090

### Current amplifier CA1

Single-phase current amplifier. For higher output power and current.  
**Dimensions:** 500 x 300 x 245 mm (19.7" x 11.8" x 9.7")  
**Weight:** 20 kg (44.1 lbs)  
**Art.No:** CA-19090

### Current amplifier CA1H

Single-phase current amplifier. Provides same output power as CA1, but with higher output voltage.  
**Dimensions:** 500 x 300 x 245 mm (19.7" x 11.8" x 9.7")  
**Weight:** 20 kg (44.1 lbs)  
**Art.No:** CA-29090

### GPS100

The GPS100 makes it possible to synchronize two or more FREJA 300s to conduct end-to-end testing. End-to-end testing provides quick, reliable results showing how two or more protective relay systems interact. The GPS100 includes a power pack, an antenna with 20-metre cable and a carrying case.  
**Art.No:** CF90050

### Transient Instrument (SW)

The Transient Instrument is used to generate transient waveforms from a disturbance recorder.  
**Art.No:** CF8214X

### Transducer Instrument (SW)

For testing of transducers. Transducers are used to measure e.g. current, voltage, power, phase angle or frequency.  
**Art.No:** CF8215X

### Auto 21 Instrument (SW)

The AUTO21 converts FREJA RTS 11, 21, 21D and FREJA 300 DOS testplans to FREJA 300 Windows®. This will make it possible to run and printout in a Windows® environment.  
**Art.No:** CF8221X

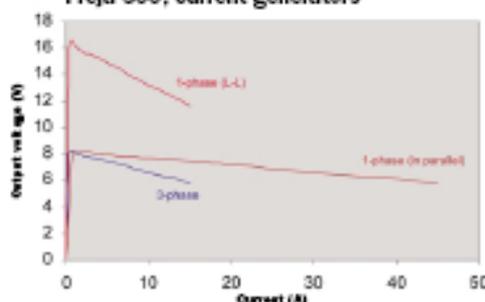
### FREJA Win ProGraph

Automatic reference graph program.  
Contact GE Energy Services for more information.

### Soft transport case for FREJA 300/CA3

**Dimensions:** 470 x 440 x 190 mm (18.5" x 17.3" x 7.5")  
**Weight:** 1.8 kg (4 lbs)  
**Art.No:** GD-00215

Freja 300, current generators



**ORDERING INFORMATION****FREJA 300 Relay Testing System**

FREJA 300, complete with FREJA Win Standard, Freja 300 PC software key, two test lead sets, calibration box and hard transport case (incl. computer and printer).  
For mains voltage 85 - 264 V

**Art.No:** CF19091

LLA Rogowski (option)

**Art.No:** CF19095

Same as above but with soft transport case.

**Art.No:** CF19090

LLA Rogowski (option)

**Art.No:** CF19094

FREJA 300 Basic Unit, incl. calibration box. (Without PC software, software key, test leads and hard transport case.)

**Art.No:** CF19000

LLA Rogowski (option)

**Art.No:** CF19004

FREJA Win Standard, with software key

**Art.No:** CF8203X

Upgrade FREJA Win Standard

**Art.No:** CF8282X

**FREJA Win****Transducer Instrument for FREJA 300**

Transducers are used to measure e.g. current, voltage, power, phase angle or frequency. The output from the transducer is then either a DC voltage or a DC current. Standard ranges are 0-10 V or 4-20 mA, and in some cases also 0-1 mA.

The transducers input signals are connected to FREJA's voltage and/or current generators. The transducer's output signal is connected to the Low Analog Input. The accuracy of the measurement is very high.

You can test all different types of transducers in a fully automatic way. Just press START and the program will test the transducer and present the full scale, absolute, and relative error. In the report you get both graphs, and a table of the result.



Remote control



Multi-cable



GPS200



Test leadset



Calibration box



- Binary inputs.
- Binary outputs (normally-closed and normally-open).
- Display and buttons used in the Local Mode.
- Dial, press to Enter.
- Multiconnector for voltage (LU, L2U, L3U, NU) and current (LI, L2I, L3I, MI).
- Current and voltage outputs.
- Switch, PC to Freja 300 or relay.
- DC supply, connect to (LL) to read the values (in General mode page 5/6 on the display).
- Analog inputs, LOW, for measurement transducers.
- Fuse (50 mA) at the bottom, for Analog inputs LOW (R).
- Analog inputs, HIGH, for volt and ammeter.



**ภาคผนวก ง**

m-file ของรีเลย์ระยะทางแบบโมห์ที่มีการปรับปรุงกราฟคุณลักษณะ

```

clc

%*****Setting 3zone numerical distance relay*****
%*****Dedign by S.Dechphung*****

%*****Setting sample of trip*****
sample_of_trip=7;           %Range 5<=...<=10
adaptive_mho=1;
%*****Setting KU numerical distance zone1 relay*****
z_s_zone1_relay1=((10.24+31.31i)*0.85);
z_f_zone1_relay1=(0+0i);
z_t_zone1_relay1=z_s_zone1_relay1+z_f_zone1_relay1;
z_zone1_relay1=abs(z_t_zone1_relay1);
angle_zone1_relay1=atan(imag(z_t_zone1_relay1)/real(z_t_zone1_relay1)
)*180/pi;
r_fault_setting_zone1_relay1=25;
exp_zone1_relay1=real(z_t_zone1_relay1)/2+r_fault_setting_zone1_relay1+z_zone1_relay1/2;

%*****Setting KU numerical distance zone2 relay*****
z_s_zone2_relay1=((10.24+31.31i)*1.2);
z_f_zone2_relay1=(0+0i);
z_t_zone2_relay1=z_s_zone2_relay1+z_f_zone2_relay1;
z_zone2_relay1=abs(z_t_zone2_relay1);
angle_zone2_relay1=atan(imag(z_t_zone2_relay1)/real(z_t_zone2_relay1)
)*180/pi;
r_fault_setting_zone2_relay1=25;
exp_zone2_relay1=real(z_t_zone2_relay1)/2+r_fault_setting_zone2_relay1+z_zone2_relay1/2;

%*****Setting KU numerical distance zone3 relay*****
z_s_zone3_relay1=((10.24+31.31i)+((10.24+31.31i)*1.5));
z_f_zone3_relay1=(0+0i);
z_t_zone3_relay1=z_s_zone3_relay1+z_f_zone3_relay1;
z_zone3_relay1=abs(z_t_zone3_relay1);
angle_zone3_relay1=atan(imag(z_t_zone3_relay1)/real(z_t_zone3_relay1)
)*180/pi;
r_fault_setting_zone3_relay1=25;
exp_zone3_relay1=real(z_t_zone3_relay1)/2+r_fault_setting_zone3_relay1+z_zone3_relay1/2;

%*****Setting Load Enclose of KU numerical distance*****

r_load_setting=10;
angle_load=15;

%*****Setting Load Enclose of KU numerical distance*****
z_load=200;
r_load=z_load*cos(angle_load*pi/180);
jx_load=z_load*sin(angle_load*pi/180);
m_load=jx_load/r_load;
jx_on_load=(m_load*r_load_setting)+0;
jx_under_load=-jx_on_load;

```

```

r_on=[r_load_setting,r_load];
r_under=[r_load_setting,r_load];
jx_on=[jx_on_load,jx_load];
jx_under=[jx_under_load,-jx_load];
r1=[r_load_setting,r_load_setting];
jx1=[jx_on_load,jx_under_load];
r_load=z_load*cos(angle_load*pi/180);
jx_load=z_load*sin(angle_load*pi/180);
m_load=jx_load/r_load;

%*****Selectec of Adaptive Mho Distance Relay*****
if adaptive_mho==0
    r_fault_setting_zone1_relay1=0;
    r_fault_setting_zone2_relay1=0;
    r_fault_setting_zone3_relay1=0;
end
%*****Define etc*****
trip_KU_zone1_relay1_AB=0;
trip_KU_zone1_relay1_BC=0;
trip_KU_zone1_relay1_CA=0;
trip_KU_zone2_relay1_AB=0;
trip_KU_zone2_relay1_BC=0;
trip_KU_zone2_relay1_CA=0;
trip_KU_zone3_relay1_AB=0;
trip_KU_zone3_relay1_BC=0;
trip_KU_zone3_relay1_CA=0;
trip_KU_zone1_relay1_AG=0;
trip_KU_zone1_relay1_BG=0;
trip_KU_zone1_relay1_CG=0;
trip_KU_zone2_relay1_AG=0;
trip_KU_zone2_relay1_BG=0;
trip_KU_zone2_relay1_CG=0;
trip_KU_zone3_relay1_AG=0;
trip_KU_zone3_relay1_BG=0;
trip_KU_zone3_relay1_CG=0;
adaptive_KU_relay1=1;

x1_zone1_relay1=real(z_s_zone1_relay1);
y1_zone1_relay1=imag(z_s_zone1_relay1);
x4_zone1_relay1=0;
y4_zone1_relay1=0;
x1_zone2_relay1=real(z_s_zone2_relay1);
y1_zone2_relay1=imag(z_s_zone2_relay1);
x4_zone2_relay1=0;
y4_zone2_relay1=0;
x1_zone3_relay1=real(z_s_zone3_relay1);
y1_zone3_relay1=imag(z_s_zone3_relay1);
x4_zone3_relay1=0;
y4_zone3_relay1=0;

x1_adap_zone1_relay1=x1_zone1_relay1;
y1_adap_zone1_relay1=y1_zone1_relay1;
x2_adap_zone1_relay1=x1_zone1_relay1+r_fault_setting_zone1_relay1;
y2_adap_zone1_relay1=y1_zone1_relay1;
x3_adap_zone1_relay1=0+r_fault_setting_zone1_relay1;
y3_adap_zone1_relay1=0;
x4_adap_zone1_relay1=0;

```

```

y4_adap_zone1_relay1=0;
x1_adap_zone2_relay1=x1_zone2_relay1;
y1_adap_zone2_relay1=y1_zone2_relay1;
x2_adap_zone2_relay1=x1_zone2_relay1+r_fault_setting_zone2_relay1;
y2_adap_zone2_relay1=y1_zone2_relay1;
x3_adap_zone2_relay1=0+r_fault_setting_zone2_relay1;
y3_adap_zone2_relay1=0;
x4_adap_zone2_relay1=0;
y4_adap_zone2_relay1=0;
x1_adap_zone3_relay1=x1_zone3_relay1;
y1_adap_zone3_relay1=y1_zone3_relay1;
x2_adap_zone3_relay1=x1_zone3_relay1+r_fault_setting_zone3_relay1;
y2_adap_zone3_relay1=y1_zone3_relay1;
x3_adap_zone3_relay1=0+r_fault_setting_zone3_relay1;
y3_adap_zone3_relay1=0;
x4_adap_zone3_relay1=0;
y4_adap_zone3_relay1=0;

%*****R+jX from simulink*****
r_driving_relay1_AB=R_relay1_AB(1:62);
x_driving_relay1_AB=jX_relay1_AB(1:62);

r_driving_relay1_BC=R_relay1_BC(1:62);
x_driving_relay1_BC=jX_relay1_BC(1:62);

r_driving_relay1_CA=R_relay1_CA(1:62);
x_driving_relay1_CA=jX_relay1_CA(1:62);

r_driving_relay1_AG=R_relay1_AG(1:62);
x_driving_relay1_AG=jX_relay1_AG(1:62);

r_driving_relay1_BG=R_relay1_BG(1:62);
x_driving_relay1_BG=jX_relay1_BG(1:62);

r_driving_relay1_CG=R_relay1_CG(1:62);
x_driving_relay1_CG=jX_relay1_CG(1:62);

%*****Mho numerical distance relay1 zone1*****
cx_zone1_relay1=(z_zone1_relay1/2)*cos(angle_zone1_relay1*pi/180);
cy_zone1_relay1=(z_zone1_relay1/2)*sin(angle_zone1_relay1*pi/180);

%*****Mho numerical distance relay1 zone2*****
cx_zone2_relay1=(z_zone2_relay1/2)*cos(angle_zone2_relay1*pi/180);
cy_zone2_relay1=(z_zone2_relay1/2)*sin(angle_zone2_relay1*pi/180);

%*****Mho numerical distance relay1 zone3*****
cx_zone3_relay1=(z_zone3_relay1/2)*cos(angle_zone3_relay1*pi/180);
cy_zone3_relay1=(z_zone3_relay1/2)*sin(angle_zone3_relay1*pi/180);

%*****KU numerical distance relay1 zone1*****
cx_left_zone1_relay1=(z_zone1_relay1/2)*cos(angle_zone1_relay1*pi/180
);
cy_left_zone1_relay1=(z_zone1_relay1/2)*sin(angle_zone1_relay1*pi/180
);

```

```

cx_right_zone1_relay1=r_fault_setting_zone1_relay1+(z_zone1_relay1/2)
*cos(angle_zone1_relay1*pi/180);
cy_right_zone1_relay1=(z_zone1_relay1/2)*sin(angle_zone1_relay1*pi/180);
KU_left_xx_zone1_relay1=cx_left_zone1_relay1+(z_zone1_relay1/2)*cos(0:0.01:6.28);
KU_left_yy_zone1_relay1=cy_left_zone1_relay1+(z_zone1_relay1/2)*sin(0:0.01:6.28);
KU_right_xx_zone1_relay1=cx_right_zone1_relay1+(z_zone1_relay1/2)*cos(0:0.01:6.28);
KU_right_yy_zone1_relay1=cy_right_zone1_relay1+(z_zone1_relay1/2)*sin(0:0.01:6.28);

%*****KU numerical distance relay1 zone2*****
cx_left_zone2_relay1=(z_zone2_relay1/2)*cos(angle_zone2_relay1*pi/180);
cy_left_zone2_relay1=(z_zone2_relay1/2)*sin(angle_zone2_relay1*pi/180);
cx_right_zone2_relay1=r_fault_setting_zone2_relay1+(z_zone2_relay1/2)
*cos(angle_zone2_relay1*pi/180);
cy_right_zone2_relay1=(z_zone2_relay1/2)*sin(angle_zone2_relay1*pi/180);
KU_left_xx_zone2_relay1=cx_left_zone2_relay1+(z_zone2_relay1/2)*cos(0:0.01:6.28);
KU_left_yy_zone2_relay1=cy_left_zone2_relay1+(z_zone2_relay1/2)*sin(0:0.01:6.28);
KU_right_xx_zone2_relay1=cx_right_zone2_relay1+(z_zone2_relay1/2)*cos(0:0.01:6.28);
KU_right_yy_zone2_relay1=cy_right_zone2_relay1+(z_zone2_relay1/2)*sin(0:0.01:6.28);

%*****KU numerical distance relay1 zone3*****
cx_left_zone3_relay1=(z_zone3_relay1/2)*cos(angle_zone3_relay1*pi/180);
cy_left_zone3_relay1=(z_zone3_relay1/2)*sin(angle_zone3_relay1*pi/180);
cx_right_zone3_relay1=r_fault_setting_zone3_relay1+(z_zone3_relay1/2)
*cos(angle_zone3_relay1*pi/180);
cy_right_zone3_relay1=(z_zone3_relay1/2)*sin(angle_zone3_relay1*pi/180);
KU_left_xx_zone3_relay1=cx_left_zone3_relay1+(z_zone3_relay1/2)*cos(0:0.01:6.28);
KU_left_yy_zone3_relay1=cy_left_zone3_relay1+(z_zone3_relay1/2)*sin(0:0.01:6.28);
KU_right_xx_zone3_relay1=cx_right_zone3_relay1+(z_zone3_relay1/2)*cos(0:0.01:6.28);
KU_right_yy_zone3_relay1=cy_right_zone3_relay1+(z_zone3_relay1/2)*sin(0:0.01:6.28);

%*****Adaptive zone1_AB of KU numerical distance relay1*****
n_adaptive_zone1_relay1_AB=0;t_adaptive_zone1_relay1_AB=0;
while n_adaptive_zone1_relay1_AB<(length(r_driving_relay1_AB))-14
    n_adaptive_zone1_relay1_AB=n_adaptive_zone1_relay1_AB+1;
    if
x_driving_relay1_AB(n_adaptive_zone1_relay1_AB)>=0&x_driving_relay1_AB(n_adaptive_zone1_relay1_AB)<=imag(z_s_zone1_relay1)&r_driving_relay1_AB(n_adaptive_zone1_relay1_AB)>=real(z_s_zone1_relay1)&atan(x_drivi

```

```

ng_relay1_AB(n_adaptive_zone1_relay1_AB)/r_driving_relay1_AB(n_adapti
ve_zone1_relay1_AB))*180/pi<=angle_zone1_relay1-
7&~(r_driving_relay1_AB(n_adaptive_zone1_relay1_AB)-
cx_zone1_relay1)^2+(x_driving_relay1_AB(n_adaptive_zone1_relay1_AB)-
cy_zone1_relay1)^2<=(z_zone1_relay1/2)^2&(r_driving_relay1_AB(n_adapti
ve_zone1_relay1_AB)<=exp_zone1_relay1|(r_driving_relay1_AB(n_adaptiv
e_zone1_relay1_AB)-
cx_left_zone1_relay1)^2+(x_driving_relay1_AB(n_adaptive_zone1_relay1_
AB)-cy_left_zone1_relay1)^2<=(z_zone1_relay1/2)^2)
    if t_adaptive_zone1_relay1_AB<=(sample_of_trip-2)
        t_adaptive_zone1_relay1_AB=t_adaptive_zone1_relay1_AB+1;
    else r_fault_zone1_relay1_AB=r_fault_setting_zone1_relay1;
    end
else r_fault_zone1_relay1_AB=0;
end
end

%*****Adaptive zone2_AB of KU numerical distance relay1*****
n_adaptive_zone2_relay1_AB=0;t_adaptive_zone2_relay1_AB=0;
while n_adaptive_zone2_relay1_AB<(length(r_driving_relay1_AB))-14
    n_adaptive_zone2_relay1_AB=n_adaptive_zone2_relay1_AB+1;
    if
x_driving_relay1_AB(n_adaptive_zone2_relay1_AB)>=0&x_driving_relay1_A
B(n_adaptive_zone2_relay1_AB)<=imag(z_s_zone2_relay1)&r_driving_relay
1_AB(n_adaptive_zone2_relay1_AB)>=real(z_s_zone2_relay1)&atan(x_drivi
ng_relay1_AB(n_adaptive_zone2_relay1_AB)/r_driving_relay1_AB(n_adapti
ve_zone2_relay1_AB))*180/pi<=angle_zone2_relay1-
7&~((r_driving_relay1_AB(n_adaptive_zone2_relay1_AB)-
cx_zone2_relay1)^2+(x_driving_relay1_AB(n_adaptive_zone2_relay1_AB)-
cy_zone2_relay1)^2<=(z_zone2_relay1/2)^2)&(r_driving_relay1_AB(n_adap
tive_zone2_relay1_AB)<=exp_zone2_relay1|(r_driving_relay1_AB(n_adapti
ve_zone2_relay1_AB)-
cx_left_zone2_relay1)^2+(x_driving_relay1_AB(n_adaptive_zone2_relay1_
AB)-cy_left_zone2_relay1)^2<=(z_zone2_relay1/2)^2)
        if t_adaptive_zone2_relay1_AB<=(sample_of_trip-2)
            t_adaptive_zone2_relay1_AB=t_adaptive_zone2_relay1_AB+1;
        else r_fault_zone2_relay1_AB=r_fault_setting_zone2_relay1;
        end
    else r_fault_zone2_relay1_AB=0;
    end
end

%*****Adaptive zone3_AB of KU numerical distance relay1*****
n_adaptive_zone3_relay1_AB=0;t_adaptive_zone3_relay1_AB=0;
while n_adaptive_zone3_relay1_AB<(length(r_driving_relay1_AB))-14
    n_adaptive_zone3_relay1_AB=n_adaptive_zone3_relay1_AB+1;
    if
x_driving_relay1_AB(n_adaptive_zone3_relay1_AB)>=0&x_driving_relay1_A
B(n_adaptive_zone3_relay1_AB)<=imag(z_s_zone3_relay1)&r_driving_relay
1_AB(n_adaptive_zone3_relay1_AB)>=real(z_s_zone3_relay1)&atan(x_drivi
ng_relay1_AB(n_adaptive_zone3_relay1_AB)/r_driving_relay1_AB(n_adapti
ve_zone3_relay1_AB))*180/pi<=angle_zone3_relay1-
7&~((r_driving_relay1_AB(n_adaptive_zone3_relay1_AB)-
cx_zone3_relay1)^2+(x_driving_relay1_AB(n_adaptive_zone3_relay1_AB)-
cy_zone3_relay1)^2<=(z_zone3_relay1/2)^2)&(r_driving_relay1_AB(n_adap
tive_zone3_relay1_AB)<=exp_zone3_relay1|(r_driving_relay1_AB(n_adapti
ve_zone3_relay1_AB)-

```

```

cx_left_zone3_relay1)^2+(x_driving_relay1_AB(n_adaptive_zone3_relay1_
AB)-cy_left_zone3_relay1)^2<=(z_zone3_relay1/2)^2)
    if t_adaptive_zone3_relay1_AB<=(sample_of_trip-2)
        t_adaptive_zone3_relay1_AB=t_adaptive_zone3_relay1_AB+1;
    else r_fault_zone3_relay1_AB=r_fault_setting_zone3_relay1;
    end
else r_fault_zone3_relay1_AB=0;
end
end

%*****Adaptive zone1_BC of KU numerical distance relay1*****
n_adaptive_zone1_relay1_BC=0;t_adaptive_zone1_relay1_BC=0;
while n_adaptive_zone1_relay1_BC<(length(r_driving_relay1_BC))-14
    n_adaptive_zone1_relay1_BC=n_adaptive_zone1_relay1_BC+1;
    if
x_driving_relay1_BC(n_adaptive_zone1_relay1_BC)>=0&x_driving_relay1_B
C(n_adaptive_zone1_relay1_BC)<=imag(z_s_zone1_relay1)&r_driving_relay
1_BC(n_adaptive_zone1_relay1_BC)>=real(z_s_zone1_relay1)&atan(x_drivi
ng_relay1_BC(n_adaptive_zone1_relay1_BC)/r_driving_relay1_BC(n_adapti
ve_zone1_relay1_BC))*180/pi<=angle_zone1_relay1-
7&~((r_driving_relay1_BC(n_adaptive_zone1_relay1_BC)-
cx_zone1_relay1)^2+(x_driving_relay1_BC(n_adaptive_zone1_relay1_BC)-
cy_zone1_relay1)^2<=(z_zone1_relay1/2)^2&(r_driving_relay1_BC(n_adapt
ive_zone1_relay1_BC)<=exp_zone1_relay1|(r_driving_relay1_BC(n_adaptiv
e_zone1_relay1_BC)-
cx_left_zone1_relay1)^2+(x_driving_relay1_BC(n_adaptive_zone1_relay1_
BC)-cy_left_zone1_relay1)^2<=(z_zone1_relay1/2)^2)
        if t_adaptive_zone1_relay1_BC<=(sample_of_trip-2)
            t_adaptive_zone1_relay1_BC=t_adaptive_zone1_relay1_BC+1;
        else r_fault_zone1_relay1_BC=r_fault_setting_zone1_relay1;
        end
    else r_fault_zone1_relay1_BC=0;
    end
end
end

%*****Adaptive zone2_BC of KU numerical distance relay1*****
n_adaptive_zone2_relay1_BC=0;t_adaptive_zone2_relay1_BC=0;
while n_adaptive_zone2_relay1_BC<(length(r_driving_relay1_BC))-14
    n_adaptive_zone2_relay1_BC=n_adaptive_zone2_relay1_BC+1;
    if
x_driving_relay1_BC(n_adaptive_zone2_relay1_BC)>=0&x_driving_relay1_B
C(n_adaptive_zone2_relay1_BC)<=imag(z_s_zone2_relay1)&r_driving_relay
1_BC(n_adaptive_zone2_relay1_BC)>=real(z_s_zone2_relay1)&atan(x_drivi
ng_relay1_BC(n_adaptive_zone2_relay1_BC)/r_driving_relay1_BC(n_adapti
ve_zone2_relay1_BC))*180/pi<=angle_zone2_relay1-
7&~((r_driving_relay1_BC(n_adaptive_zone2_relay1_BC)-
cx_zone2_relay1)^2+(x_driving_relay1_BC(n_adaptive_zone2_relay1_BC)-
cy_zone2_relay1)^2<=(z_zone2_relay1/2)^2&(r_driving_relay1_BC(n_adap
tive_zone2_relay1_BC)<=exp_zone2_relay1|(r_driving_relay1_BC(n_adapti
ve_zone2_relay1_BC)-
cx_left_zone2_relay1)^2+(x_driving_relay1_BC(n_adaptive_zone2_relay1_
BC)-cy_left_zone2_relay1)^2<=(z_zone2_relay1/2)^2)
        if t_adaptive_zone2_relay1_BC<=(sample_of_trip-2)
            t_adaptive_zone2_relay1_BC=t_adaptive_zone2_relay1_BC+1;
        else r_fault_zone2_relay1_BC=r_fault_setting_zone2_relay1;
        end
    else r_fault_zone2_relay1_BC=0;
    end
end
end

```

end

```

%*****Adaptive zone3_BC of KU numerical distance relay1*****
n_adaptive_zone3_relay1_BC=0;t_adaptive_zone3_relay1_BC=0;
while n_adaptive_zone3_relay1_BC<(length(r_driving_relay1_BC))-14
    n_adaptive_zone3_relay1_BC=n_adaptive_zone3_relay1_BC+1;
    if
x_driving_relay1_BC(n_adaptive_zone3_relay1_BC)>=0&x_driving_relay1_B
C(n_adaptive_zone3_relay1_BC)<=imag(z_s_zone3_relay1)&r_driving_relay
1_BC(n_adaptive_zone3_relay1_BC)>=real(z_s_zone3_relay1)&atan(x_drivi
ng_relay1_BC(n_adaptive_zone3_relay1_BC)/r_driving_relay1_BC(n_adapti
ve_zone3_relay1_BC))*180/pi<=angle_zone3_relay1-
7&~((r_driving_relay1_BC(n_adaptive_zone3_relay1_BC)-
cx_zone3_relay1)^2+(x_driving_relay1_BC(n_adaptive_zone3_relay1_BC)-
cy_zone3_relay1)^2<=(z_zone3_relay1/2)^2)&(r_driving_relay1_BC(n_adap
tive_zone3_relay1_BC)<=exp_zone3_relay1|(r_driving_relay1_BC(n_adapti
ve_zone3_relay1_BC)-
cx_left_zone3_relay1)^2+(x_driving_relay1_BC(n_adaptive_zone3_relay1_
BC)-cy_left_zone3_relay1)^2<=(z_zone3_relay1/2)^2)
        if t_adaptive_zone3_relay1_BC<=(sample_of_trip-2)
            t_adaptive_zone3_relay1_BC=t_adaptive_zone3_relay1_BC+1;
        else r_fault_zone3_relay1_BC=r_fault_setting_zone3_relay1;
        end
    else r_fault_zone3_relay1_BC=0;
    end
end
end

```

```

%*****Adaptive zone1_CA of KU numerical distance relay1*****
n_adaptive_zonel_relay1_CA=0;t_adaptive_zonel_relay1_CA=0;
while n_adaptive_zonel_relay1_CA<(length(r_driving_relay1_CA))-14
    n_adaptive_zonel_relay1_CA=n_adaptive_zonel_relay1_CA+1;
    if
x_driving_relay1_CA(n_adaptive_zonel_relay1_CA)>=0&x_driving_relay1_C
A(n_adaptive_zonel_relay1_CA)<=imag(z_s_zonel_relay1)&r_driving_relay
1_CA(n_adaptive_zonel_relay1_CA)>=real(z_s_zonel_relay1)&atan(x_drivi
ng_relay1_CA(n_adaptive_zonel_relay1_CA)/r_driving_relay1_CA(n_adapti
ve_zonel_relay1_CA))*180/pi<=angle_zonel_relay1-
7&~((r_driving_relay1_CA(n_adaptive_zonel_relay1_CA)-
cx_zonel_relay1)^2+(x_driving_relay1_CA(n_adaptive_zonel_relay1_CA)-
cy_zonel_relay1)^2<=(z_zonel_relay1/2)^2)&(r_driving_relay1_CA(n_adapt
ive_zonel_relay1_CA)<=exp_zonel_relay1|(r_driving_relay1_CA(n_adaptiv
e_zonel_relay1_CA)-
cx_left_zonel_relay1)^2+(x_driving_relay1_CA(n_adaptive_zonel_relay1_
CA)-cy_left_zonel_relay1)^2<=(z_zonel_relay1/2)^2)
        if t_adaptive_zonel_relay1_CA<=(sample_of_trip-2)
            t_adaptive_zonel_relay1_CA=t_adaptive_zonel_relay1_CA+1;
        else r_fault_zonel_relay1_CA=r_fault_setting_zonel_relay1;
        end
    else r_fault_zonel_relay1_CA=0;
    end
end
end

```

```

%*****Adaptive zone2_CA of KU numerical distance relay1*****
n_adaptive_zone2_relay1_CA=0;t_adaptive_zone2_relay1_CA=0;
while n_adaptive_zone2_relay1_CA<(length(r_driving_relay1_CA))-14
    n_adaptive_zone2_relay1_CA=n_adaptive_zone2_relay1_CA+1;

```

```

    if
x_driving_relay1_CA(n_adaptive_zone2_relay1_CA)>=0&x_driving_relay1_C
A(n_adaptive_zone2_relay1_CA)<=imag(z_s_zone2_relay1)&r_driving_relay
1_CA(n_adaptive_zone2_relay1_CA)>=real(z_s_zone2_relay1)&atan(x_drivi
ng_relay1_CA(n_adaptive_zone2_relay1_CA)/r_driving_relay1_CA(n_adapti
ve_zone2_relay1_CA))*180/pi<=angle_zone2_relay1-
7&~((r_driving_relay1_CA(n_adaptive_zone2_relay1_CA)-
cx_zone2_relay1)^2+(x_driving_relay1_CA(n_adaptive_zone2_relay1_CA)-
cy_zone2_relay1)^2<=(z_zone2_relay1/2)^2)&(r_driving_relay1_CA(n_adap
tive_zone2_relay1_CA)<=exp_zone2_relay1|(r_driving_relay1_CA(n_adapti
ve_zone2_relay1_CA)-
cx_left_zone2_relay1)^2+(x_driving_relay1_CA(n_adaptive_zone2_relay1_
CA)-cy_left_zone2_relay1)^2<=(z_zone2_relay1/2)^2)
        if t_adaptive_zone2_relay1_CA<=(sample_of_trip-2)
            t_adaptive_zone2_relay1_CA=t_adaptive_zone2_relay1_CA+1;
        else r_fault_zone2_relay1_CA=r_fault_setting_zone2_relay1;
        end
    else r_fault_zone2_relay1_CA=0;
    end
end

%*****Adaptive zone3_CA of KU numerical distance relay1*****
n_adaptive_zone3_relay1_CA=0;t_adaptive_zone3_relay1_CA=0;
while n_adaptive_zone3_relay1_CA<length(r_driving_relay1_CA)
    n_adaptive_zone3_relay1_CA=n_adaptive_zone3_relay1_CA+1;
    if
x_driving_relay1_CA(n_adaptive_zone3_relay1_CA)>=0&x_driving_relay1_C
A(n_adaptive_zone3_relay1_CA)<=imag(z_s_zone3_relay1)&r_driving_relay
1_CA(n_adaptive_zone3_relay1_CA)>=real(z_s_zone3_relay1)&atan(x_drivi
ng_relay1_CA(n_adaptive_zone3_relay1_CA)/r_driving_relay1_CA(n_adapti
ve_zone3_relay1_CA))*180/pi<=angle_zone3_relay1-
7&~((r_driving_relay1_CA(n_adaptive_zone3_relay1_CA)-
cx_zone3_relay1)^2+(x_driving_relay1_CA(n_adaptive_zone3_relay1_CA)-
cy_zone3_relay1)^2<=(z_zone3_relay1/2)^2)&(r_driving_relay1_CA(n_adap
tive_zone3_relay1_CA)<=exp_zone3_relay1|(r_driving_relay1_CA(n_adapti
ve_zone3_relay1_CA)-
cx_left_zone3_relay1)^2+(x_driving_relay1_CA(n_adaptive_zone3_relay1_
CA)-cy_left_zone3_relay1)^2<=(z_zone3_relay1/2)^2)
        if t_adaptive_zone3_relay1_CA<=(sample_of_trip-2)
            t_adaptive_zone3_relay1_CA=t_adaptive_zone3_relay1_CA+1;
        else r_fault_zone3_relay1_CA=r_fault_setting_zone3_relay1;
        end
    else r_fault_zone3_relay1_CA=0;
    end
end

%*****Adaptive zone1_AG of KU numerical distance relay1*****
n_adaptive_zonel_relay1_AG=0;t_adaptive_zonel_relay1_AG=0;
while n_adaptive_zonel_relay1_AG<(length(r_driving_relay1_AG))-14
    n_adaptive_zonel_relay1_AG=n_adaptive_zonel_relay1_AG+1;
    if
x_driving_relay1_AG(n_adaptive_zonel_relay1_AG)>=0&x_driving_relay1_A
G(n_adaptive_zonel_relay1_AG)<=imag(z_s_zonel_relay1)&r_driving_relay
1_AG(n_adaptive_zonel_relay1_AG)>=real(z_s_zonel_relay1)&atan(x_drivi
ng_relay1_AG(n_adaptive_zonel_relay1_AG)/r_driving_relay1_AG(n_adapti
ve_zonel_relay1_AG))*180/pi<=angle_zonel_relay1-
7&~((r_driving_relay1_AG(n_adaptive_zonel_relay1_AG)-
cx_zonel_relay1)^2+(x_driving_relay1_AG(n_adaptive_zonel_relay1_AG)-

```

```

cy_zone1_relay1)^2<=(z_zone1_relay1/2)^2&(r_driving_relay1_AG(n_adapt
ive_zone1_relay1_AG)<=exp_zone1_relay1|(r_driving_relay1_AG(n_adaptiv
e_zone1_relay1_AG)-
cx_left_zone1_relay1)^2+(x_driving_relay1_AG(n_adaptive_zone1_relay1_
AG)-cy_left_zone1_relay1)^2<=(z_zone1_relay1/2)^2)
    if t_adaptive_zone1_relay1_AG<=(sample_of_trip-2)
        t_adaptive_zone1_relay1_AG=t_adaptive_zone1_relay1_AG+1;
    else r_fault_zone1_relay1_AG=r_fault_setting_zone1_relay1;
    end
else r_fault_zone1_relay1_AG=0;
end
end

%*****Adaptive zone2_AG of KU numerical distance relay1*****
n_adaptive_zone2_relay1_AG=0;t_adaptive_zone2_relay1_AG=0;
while n_adaptive_zone2_relay1_AG<(length(r_driving_relay1_AG))-14
    n_adaptive_zone2_relay1_AG=n_adaptive_zone2_relay1_AG+1;
    if
x_driving_relay1_AG(n_adaptive_zone2_relay1_AG)>=0&x_driving_relay1_A
G(n_adaptive_zone2_relay1_AG)<=imag(z_s_zone2_relay1)&r_driving_relay
1_AG(n_adaptive_zone2_relay1_AG)>=real(z_s_zone2_relay1)&atan(x_drivi
ng_relay1_AG(n_adaptive_zone2_relay1_AG)/r_driving_relay1_AG(n_adapti
ve_zone2_relay1_AG))*180/pi<=angle_zone2_relay1-
7&~((r_driving_relay1_AG(n_adaptive_zone2_relay1_AG)-
cx_zone2_relay1)^2+(x_driving_relay1_AG(n_adaptive_zone2_relay1_AG)-
cy_zone2_relay1)^2<=(z_zone2_relay1/2)^2)&(r_driving_relay1_AG(n_adap
tive_zone2_relay1_AG)<=exp_zone2_relay1|(r_driving_relay1_AG(n_adapti
ve_zone2_relay1_AG)-
cx_left_zone2_relay1)^2+(x_driving_relay1_AG(n_adaptive_zone2_relay1_
AG)-cy_left_zone2_relay1)^2<=(z_zone2_relay1/2)^2)
        if t_adaptive_zone2_relay1_AG<=(sample_of_trip-2)
            t_adaptive_zone2_relay1_AG=t_adaptive_zone2_relay1_AG+1;
        else r_fault_zone2_relay1_AG=r_fault_setting_zone2_relay1;
        end
    else r_fault_zone2_relay1_AG=0;
    end
end
end

%*****Adaptive zone3_AG of KU numerical distance relay1*****
n_adaptive_zone3_relay1_AG=0;t_adaptive_zone3_relay1_AG=0;
while n_adaptive_zone3_relay1_AG<(length(r_driving_relay1_AG))-14
    n_adaptive_zone3_relay1_AG=n_adaptive_zone3_relay1_AG+1;
    if
x_driving_relay1_AG(n_adaptive_zone3_relay1_AG)>=0&x_driving_relay1_A
G(n_adaptive_zone3_relay1_AG)<=imag(z_s_zone3_relay1)&r_driving_relay
1_AG(n_adaptive_zone3_relay1_AG)>=real(z_s_zone3_relay1)&atan(x_drivi
ng_relay1_AG(n_adaptive_zone3_relay1_AG)/r_driving_relay1_AG(n_adapti
ve_zone3_relay1_AG))*180/pi<=angle_zone3_relay1-
7&~((r_driving_relay1_AG(n_adaptive_zone3_relay1_AG)-
cx_zone3_relay1)^2+(x_driving_relay1_AG(n_adaptive_zone3_relay1_AG)-
cy_zone3_relay1)^2<=(z_zone3_relay1/2)^2)&(r_driving_relay1_AG(n_adap
tive_zone3_relay1_AG)<=exp_zone3_relay1|(r_driving_relay1_AG(n_adapti
ve_zone3_relay1_AG)-
cx_left_zone3_relay1)^2+(x_driving_relay1_AG(n_adaptive_zone3_relay1_
AG)-cy_left_zone3_relay1)^2<=(z_zone3_relay1/2)^2)
        if t_adaptive_zone3_relay1_AG<=(sample_of_trip-2)
            t_adaptive_zone3_relay1_AG=t_adaptive_zone3_relay1_AG+1;
        else r_fault_zone3_relay1_AG=r_fault_setting_zone3_relay1;
        end
    end
end
end

```

```

        end
    else r_fault_zone3_relay1_AG=0;
    end
end

%*****Adaptive zone1_BG of KU numerical distance relay1*****
n_adaptive_zone1_relay1_BG=0;t_adaptive_zone1_relay1_BG=0;
while n_adaptive_zone1_relay1_BG<(length(r_driving_relay1_BG))-14
    n_adaptive_zone1_relay1_BG=n_adaptive_zone1_relay1_BG+1;
    if
x_driving_relay1_BG(n_adaptive_zone1_relay1_BG)>=0&x_driving_relay1_B
G(n_adaptive_zone1_relay1_BG)<=imag(z_s_zone1_relay1)&r_driving_relay
1_BG(n_adaptive_zone1_relay1_BG)>=real(z_s_zone1_relay1)&atan(x_drivi
ng_relay1_BG(n_adaptive_zone1_relay1_BG)/r_driving_relay1_BG(n_adapti
ve_zone1_relay1_BG))*180/pi<=angle_zone1_relay1-
7&~((r_driving_relay1_BG(n_adaptive_zone1_relay1_BG)-
cx_zone1_relay1)^2+(x_driving_relay1_BG(n_adaptive_zone1_relay1_BG)-
cy_zone1_relay1)^2<=(z_zone1_relay1/2)^2&(r_driving_relay1_BG(n_adapt
ive_zone1_relay1_BG)<=exp_zone1_relay1|(r_driving_relay1_BG(n_adaptiv
e_zone1_relay1_BG)-
cx_left_zone1_relay1)^2+(x_driving_relay1_BG(n_adaptive_zone1_relay1_
BG)-cy_left_zone1_relay1)^2<=(z_zone1_relay1/2)^2)
        if t_adaptive_zone1_relay1_BG<=(sample_of_trip-2)
            t_adaptive_zone1_relay1_BG=t_adaptive_zone1_relay1_BG+1;
        else r_fault_zone1_relay1_BG=r_fault_setting_zone1_relay1;
        end
    else r_fault_zone1_relay1_BG=0;
    end
end

%*****Adaptive zone2_BG of KU numerical distance relay1*****
n_adaptive_zone2_relay1_BG=0;t_adaptive_zone2_relay1_BG=0;
while n_adaptive_zone2_relay1_BG<(length(r_driving_relay1_BG))-14
    n_adaptive_zone2_relay1_BG=n_adaptive_zone2_relay1_BG+1;
    if
x_driving_relay1_BG(n_adaptive_zone2_relay1_BG)>=0&x_driving_relay1_B
G(n_adaptive_zone2_relay1_BG)<=imag(z_s_zone2_relay1)&r_driving_relay
1_BG(n_adaptive_zone2_relay1_BG)>=real(z_s_zone2_relay1)&atan(x_drivi
ng_relay1_BG(n_adaptive_zone2_relay1_BG)/r_driving_relay1_BG(n_adapti
ve_zone2_relay1_BG))*180/pi<=angle_zone2_relay1-
7&~((r_driving_relay1_BG(n_adaptive_zone2_relay1_BG)-
cx_zone2_relay1)^2+(x_driving_relay1_BG(n_adaptive_zone2_relay1_BG)-
cy_zone2_relay1)^2<=(z_zone2_relay1/2)^2)&(r_driving_relay1_BG(n_adap
tive_zone2_relay1_BG)<=exp_zone2_relay1|(r_driving_relay1_BG(n_adapti
ve_zone2_relay1_BG)-
cx_left_zone2_relay1)^2+(x_driving_relay1_BG(n_adaptive_zone2_relay1_
BG)-cy_left_zone2_relay1)^2<=(z_zone2_relay1/2)^2)
        if t_adaptive_zone2_relay1_BG<=(sample_of_trip-2)
            t_adaptive_zone2_relay1_BG=t_adaptive_zone2_relay1_BG+1;
        else r_fault_zone2_relay1_BG=r_fault_setting_zone2_relay1;
        end
    else r_fault_zone2_relay1_BG=0;
    end
end

%*****Adaptive zone3_BG of KU numerical distance relay1*****
n_adaptive_zone3_relay1_BG=0;t_adaptive_zone3_relay1_BG=0;

```

```

while n_adaptive_zone3_relay1_BG<(length(r_driving_relay1_BG))-14
    n_adaptive_zone3_relay1_BG=n_adaptive_zone3_relay1_BG+1;
    if
        x_driving_relay1_BG(n_adaptive_zone3_relay1_BG)>=0&x_driving_relay1_B
        G(n_adaptive_zone3_relay1_BG)<=imag(z_s_zone3_relay1)&r_driving_relay
        1_BG(n_adaptive_zone3_relay1_BG)>=real(z_s_zone3_relay1)&atan(x_drivi
        ng_relay1_BG(n_adaptive_zone3_relay1_BG)/r_driving_relay1_BG(n_adapti
        ve_zone3_relay1_BG))*180/pi<=angle_zone3_relay1-
        7&~((r_driving_relay1_BG(n_adaptive_zone3_relay1_BG)-
        cx_zone3_relay1)^2+(x_driving_relay1_BG(n_adaptive_zone3_relay1_BG)-
        cy_zone3_relay1)^2<=(z_zone3_relay1/2)^2)&(r_driving_relay1_BG(n_adap
        tive_zone3_relay1_BG)<=exp_zone3_relay1|(r_driving_relay1_BG(n_adapti
        ve_zone3_relay1_BG)-
        cx_left_zone3_relay1)^2+(x_driving_relay1_BG(n_adaptive_zone3_relay1_
        BG)-cy_left_zone3_relay1)^2<=(z_zone3_relay1/2)^2)
            if t_adaptive_zone3_relay1_BG<=(sample_of_trip-2)
                t_adaptive_zone3_relay1_BG=t_adaptive_zone3_relay1_BG+1;
            else r_fault_zone3_relay1_BG=r_fault_setting_zone3_relay1;
            end
        else r_fault_zone3_relay1_BG=0;
        end
    end
end

%*****Adaptive zone1_CG of KU numericG1 distance relay1*****
n_adaptive_zone1_relay1_CG=0;t_adaptive_zone1_relay1_CG=0;
while n_adaptive_zone1_relay1_CG<(length(r_driving_relay1_CG))-14
    n_adaptive_zone1_relay1_CG=n_adaptive_zone1_relay1_CG+1;
    if
        x_driving_relay1_CG(n_adaptive_zone1_relay1_CG)>=0&x_driving_relay1_C
        G(n_adaptive_zone1_relay1_CG)<=imag(z_s_zone1_relay1)&r_driving_relay
        1_CG(n_adaptive_zone1_relay1_CG)>=real(z_s_zone1_relay1)&atan(x_drivi
        ng_relay1_CG(n_adaptive_zone1_relay1_CG)/r_driving_relay1_CG(n_adapti
        ve_zone1_relay1_CG))*180/pi<=angle_zone1_relay1-
        7&~(r_driving_relay1_CG(n_adaptive_zone1_relay1_CG)-
        cx_zone1_relay1)^2+(x_driving_relay1_CG(n_adaptive_zone1_relay1_CG)-
        cy_zone1_relay1)^2<=(z_zone1_relay1/2)^2&(r_driving_relay1_CG(n_adapt
        ive_zone1_relay1_CG)<=exp_zone1_relay1|(r_driving_relay1_CG(n_adaptiv
        e_zone1_relay1_CG)-
        cx_left_zone1_relay1)^2+(x_driving_relay1_CG(n_adaptive_zone1_relay1_
        CG)-cy_left_zone1_relay1)^2<=(z_zone1_relay1/2)^2)
            if t_adaptive_zone1_relay1_CG<=(sample_of_trip-2)
                t_adaptive_zone1_relay1_CG=t_adaptive_zone1_relay1_CG+1;
            else r_fault_zone1_relay1_CG=r_fault_setting_zone1_relay1;
            end
        else r_fault_zone1_relay1_CG=0;
        end
    end
end

%*****Adaptive zone2_CG of KU numericG1 distance relay1*****
n_adaptive_zone2_relay1_CG=0;t_adaptive_zone2_relay1_CG=0;
while n_adaptive_zone2_relay1_CG<(length(r_driving_relay1_CG))-14
    n_adaptive_zone2_relay1_CG=n_adaptive_zone2_relay1_CG+1;
    if
        x_driving_relay1_CG(n_adaptive_zone2_relay1_CG)>=0&x_driving_relay1_C
        G(n_adaptive_zone2_relay1_CG)<=imag(z_s_zone2_relay1)&r_driving_relay
        1_CG(n_adaptive_zone2_relay1_CG)>=real(z_s_zone2_relay1)&atan(x_drivi
        ng_relay1_CG(n_adaptive_zone2_relay1_CG)/r_driving_relay1_CG(n_adapti
        ve_zone2_relay1_CG))*180/pi<=angle_zone2_relay1-

```

```

7&~((r_driving_relay1_CG(n_adaptive_zone2_relay1_CG)-
cx_zone2_relay1)^2+(x_driving_relay1_CG(n_adaptive_zone2_relay1_CG)-
cy_zone2_relay1)^2<=(z_zone2_relay1/2)^2)&(r_driving_relay1_CG(n_adap
tive_zone2_relay1_CG)<=exp_zone2_relay1|(r_driving_relay1_CG(n_adapti
ve_zone2_relay1_CG)-
cx_left_zone2_relay1)^2+(x_driving_relay1_CG(n_adaptive_zone2_relay1_
CG)-cy_left_zone2_relay1)^2<=(z_zone2_relay1/2)^2)
    if t_adaptive_zone2_relay1_CG<=(sample_of_trip-2)
        t_adaptive_zone2_relay1_CG=t_adaptive_zone2_relay1_CG+1;
    else r_fault_zone2_relay1_CG=r_fault_setting_zone2_relay1;
    end
else r_fault_zone2_relay1_CG=0;
end
end

%*****Adaptive zone3_CG of KU numericG1 distance relay1*****
n_adaptive_zone3_relay1_CG=0;t_adaptive_zone3_relay1_CG=0;
while n_adaptive_zone3_relay1_CG<length(r_driving_relay1_CG)
    n_adaptive_zone3_relay1_CG=n_adaptive_zone3_relay1_CG+1;
    if
x_driving_relay1_CG(n_adaptive_zone3_relay1_CG)>=0&x_driving_relay1_C
G(n_adaptive_zone3_relay1_CG)<=imag(z_s_zone3_relay1)&r_driving_relay
1_CG(n_adaptive_zone3_relay1_CG)>=real(z_s_zone3_relay1)&atan(x_drivi
ng_relay1_CG(n_adaptive_zone3_relay1_CG)/r_driving_relay1_CG(n_adapti
ve_zone3_relay1_CG))*180/pi<=angle_zone3_relay1-
7&~((r_driving_relay1_CG(n_adaptive_zone3_relay1_CG)-
cx_zone3_relay1)^2+(x_driving_relay1_CG(n_adaptive_zone3_relay1_CG)-
cy_zone3_relay1)^2<=(z_zone3_relay1/2)^2)&(r_driving_relay1_CG(n_adap
tive_zone3_relay1_CG)<=exp_zone3_relay1|(r_driving_relay1_CG(n_adapti
ve_zone3_relay1_CG)-
cx_left_zone3_relay1)^2+(x_driving_relay1_CG(n_adaptive_zone3_relay1_
CG)-cy_left_zone3_relay1)^2<=(z_zone3_relay1/2)^2)
        if t_adaptive_zone3_relay1_CG<=(sample_of_trip-2)
            t_adaptive_zone3_relay1_CG=t_adaptive_zone3_relay1_CG+1;
        else r_fault_zone3_relay1_CG=r_fault_setting_zone3_relay1;
        end
    else r_fault_zone3_relay1_CG=0;
    end
end

%*****Add r_fault KU numerical distance relay1 zone1*****
r_fault_zone1_relay1=r_fault_zone1_relay1_AB+r_fault_zone1_relay1_BC+
r_fault_zone1_relay1_CA;
if r_fault_zone1_relay1>=r_fault_setting_zone1_relay1
    r_fault_zone1_relay1=r_fault_setting_zone1_relay1;
else r_fault_zone1_relay1=0;
end

%*****Add r_fault KU numerical distance relay1 zone2*****
r_fault_zone2_relay1=r_fault_zone2_relay1_AB+r_fault_zone2_relay1_BC+
r_fault_zone2_relay1_CA;
if r_fault_zone2_relay1>=r_fault_setting_zone2_relay1
    r_fault_zone2_relay1=r_fault_setting_zone2_relay1;
else r_fault_zone2_relay1=0;
end

%*****Add r_fault KU numerical distance relay1 zone3*****

```

```

r_fault_zone3_relay1=r_fault_zone3_relay1_AB+r_fault_zone3_relay1_BC+
r_fault_zone3_relay1_CA;
if r_fault_zone3_relay1>=r_fault_setting_zone3_relay1
    r_fault_zone3_relay1=r_fault_setting_zone3_relay1;
else r_fault_zone3_relay1=0;
end

%*****Add r_fault KU numerical distance relay1 zone1*****
r_fault_zone1_relay1=r_fault_zone1_relay1_AG+r_fault_zone1_relay1_BG+
r_fault_zone1_relay1_CG;
if r_fault_zone1_relay1>=r_fault_setting_zone1_relay1
    r_fault_zone1_relay1=r_fault_setting_zone1_relay1;
else r_fault_zone1_relay1=0;
end

%*****Add r_fault KU numerical distance relay1 zone2*****
r_fault_zone2_relay1=r_fault_zone2_relay1_AG+r_fault_zone2_relay1_BG+
r_fault_zone2_relay1_CG;
if r_fault_zone2_relay1>=r_fault_setting_zone2_relay1
    r_fault_zone2_relay1=r_fault_setting_zone2_relay1;
else r_fault_zone2_relay1=0;
end

%*****Add r_fault KU numerical distance relay1 zone3*****
r_fault_zone3_relay1=r_fault_zone3_relay1_AG+r_fault_zone3_relay1_BG+
r_fault_zone3_relay1_CG;
if r_fault_zone3_relay1>=r_fault_setting_zone3_relay1
    r_fault_zone3_relay1=r_fault_setting_zone3_relay1;
else r_fault_zone3_relay1=0;
end

%*****Adaptive KU numerical distance relay1 zone1*****
x1_adap_zone1_relay1=0;
y1_adap_zone1_relay1=0;
x5_adap_zone1_relay1=x1_adap_zone1_relay1;
y5_adap_zone1_relay1=y1_adap_zone1_relay1;

if adaptive_KU_relay1==1

x2_adap_zone1_relay1=z_zone1_relay1*cos(angle_zone1_relay1*pi/180);

y2_adap_zone1_relay1=z_zone1_relay1*sin(angle_zone1_relay1*pi/180);
    x3_adap_zone1_relay1=x2_adap_zone1_relay1+r_fault_zone1_relay1;
    y3_adap_zone1_relay1=y2_adap_zone1_relay1;
    x4_adap_zone1_relay1=x1_adap_zone1_relay1+r_fault_zone1_relay1;
    y4_adap_zone1_relay1=y1_adap_zone1_relay1;
else
    z_t_zone1_relay1=0;
    x3_adap_zone1_relay1=x2_adap_zone1_relay1;
    x4_adap_zone1_relay1=x1_adap_zone1_relay1;
end

xo_adap_zone1_relay1=[x2_adap_zone1_relay1,x3_adap_zone1_relay1];
yo_adap_zone1_relay1=[y2_adap_zone1_relay1,y3_adap_zone1_relay1];
xu_adap_zone1_relay1=[x4_adap_zone1_relay1,x5_adap_zone1_relay1];
yu_adap_zone1_relay1=[y4_adap_zone1_relay1,y5_adap_zone1_relay1];

```

```

xc1_adap_zone1_relay1=z_zone1_relay1/2*cos(angle_zone1_relay1*pi/180)
;
yc1_adap_zone1_relay1=z_zone1_relay1/2*sin(angle_zone1_relay1*pi/180)
;

r1_zone1_relay1=z_zone1_relay1/2;
i_zone1_relay1=1;
for m_zone1_relay1=angle_zone1_relay1:1:angle_zone1_relay1+180

xa_zone1_relay1(i_zone1_relay1)=xc1_adap_zone1_relay1+r1_zone1_relay1
*cos(m_zone1_relay1*pi/180);

ya_zone1_relay1(i_zone1_relay1)=yc1_adap_zone1_relay1+r1_zone1_relay1
*sin(m_zone1_relay1*pi/180);
    i_zone1_relay1=i_zone1_relay1+1;
end
j_zone1_relay1=1;
for n_zone1_relay1=angle_zone1_relay1:-1:angle_zone1_relay1-180

xb_zone1_relay1(j_zone1_relay1)=xc1_adap_zone1_relay1+r_fault_zone1_r
elay1+r1_zone1_relay1*cos(n_zone1_relay1*pi/180);

yb_zone1_relay1(j_zone1_relay1)=yc1_adap_zone1_relay1+r1_zone1_relay1
*sin(n_zone1_relay1*pi/180);
    j_zone1_relay1=j_zone1_relay1+1;
end

%*****Adaptive KU numerical distance relay1 zone2*****
x1_adap_zone2_relay1=0;
y1_adap_zone2_relay1=0;
x5_adap_zone2_relay1=x1_adap_zone2_relay1;
y5_adap_zone2_relay1=y1_adap_zone2_relay1;

if adaptive_KU_relay1==1

x2_adap_zone2_relay1=z_zone2_relay1*cos(angle_zone2_relay1*pi/180);

y2_adap_zone2_relay1=z_zone2_relay1*sin(angle_zone2_relay1*pi/180);
    x3_adap_zone2_relay1=x2_adap_zone2_relay1+r_fault_zone2_relay1;
    y3_adap_zone2_relay1=y2_adap_zone2_relay1;
    x4_adap_zone2_relay1=x1_adap_zone2_relay1+r_fault_zone2_relay1;
    y4_adap_zone2_relay1=y1_adap_zone2_relay1;
else
    z_t_zone2_relay1=0;
    x3_adap_zone2_relay1=x2_adap_zone2_relay1;
    x4_adap_zone2_relay1=x1_adap_zone2_relay1;
end

xo_adap_zone2_relay1=[x2_adap_zone2_relay1,x3_adap_zone2_relay1];
yo_adap_zone2_relay1=[y2_adap_zone2_relay1,y3_adap_zone2_relay1];
xu_adap_zone2_relay1=[x4_adap_zone2_relay1,x5_adap_zone2_relay1];
yu_adap_zone2_relay1=[y4_adap_zone2_relay1,y5_adap_zone2_relay1];
xc1_adap_zone2_relay1=z_zone2_relay1/2*cos(angle_zone2_relay1*pi/180)
;
yc1_adap_zone2_relay1=z_zone2_relay1/2*sin(angle_zone2_relay1*pi/180)
;

```

```

r1_zone2_relay1=z_zone2_relay1/2;
i_zone2_relay1=1;
for m_zone2_relay1=angle_zone2_relay1:1:angle_zone2_relay1+180

xa_zone2_relay1(i_zone2_relay1)=xc1_adap_zone2_relay1+r1_zone2_relay1
*cos(m_zone2_relay1*pi/180);

ya_zone2_relay1(i_zone2_relay1)=yc1_adap_zone2_relay1+r1_zone2_relay1
*sin(m_zone2_relay1*pi/180);
    i_zone2_relay1=i_zone2_relay1+1;
end
j_zone2_relay1=1;
for n_zone2_relay1=angle_zone2_relay1:-1:angle_zone2_relay1-180

xb_zone2_relay1(j_zone2_relay1)=xc1_adap_zone2_relay1+r_fault_zone2_r
elay1+r1_zone2_relay1*cos(n_zone2_relay1*pi/180);

yb_zone2_relay1(j_zone2_relay1)=yc1_adap_zone2_relay1+r1_zone2_relay1
*sin(n_zone2_relay1*pi/180);
    j_zone2_relay1=j_zone2_relay1+1;
end

%*****Adaptive KU numerical distance relay1 zone3*****
x1_adap_zone3_relay1=0;
y1_adap_zone3_relay1=0;
x5_adap_zone3_relay1=x1_adap_zone3_relay1;
y5_adap_zone3_relay1=y1_adap_zone3_relay1;

if adaptive_KU_relay1==1

x2_adap_zone3_relay1=z_zone3_relay1*cos(angle_zone3_relay1*pi/180);

y2_adap_zone3_relay1=z_zone3_relay1*sin(angle_zone3_relay1*pi/180);
    x3_adap_zone3_relay1=x2_adap_zone3_relay1+r_fault_zone3_relay1;
    y3_adap_zone3_relay1=y2_adap_zone3_relay1;
    x4_adap_zone3_relay1=x1_adap_zone3_relay1+r_fault_zone3_relay1;
    y4_adap_zone3_relay1=y1_adap_zone3_relay1;
else
    z_t_zone3_relay1=0;
    x3_adap_zone3_relay1=x2_adap_zone3_relay1;
    x4_adap_zone3_relay1=x1_adap_zone3_relay1;
end

xo_adap_zone3_relay1=[x2_adap_zone3_relay1,x3_adap_zone3_relay1];
yo_adap_zone3_relay1=[y2_adap_zone3_relay1,y3_adap_zone3_relay1];
xu_adap_zone3_relay1=[x4_adap_zone3_relay1,x5_adap_zone3_relay1];
yu_adap_zone3_relay1=[y4_adap_zone3_relay1,y5_adap_zone3_relay1];
xc1_adap_zone3_relay1=z_zone3_relay1/2*cos(angle_zone3_relay1*pi/180)
;
yc1_adap_zone3_relay1=z_zone3_relay1/2*sin(angle_zone3_relay1*pi/180)
;

r1_zone3_relay1=z_zone3_relay1/2;
i_zone3_relay1=1;
for m_zone3_relay1=angle_zone3_relay1:1:angle_zone3_relay1+180

```

```

xa_zone3_relay1(i_zone3_relay1)=xc1_adap_zone3_relay1+r1_zone3_relay1
*cos(m_zone3_relay1*pi/180);

ya_zone3_relay1(i_zone3_relay1)=yc1_adap_zone3_relay1+r1_zone3_relay1
*sin(m_zone3_relay1*pi/180);
    i_zone3_relay1=i_zone3_relay1+1;
end
j_zone3_relay1=1;
for n_zone3_relay1=angle_zone3_relay1:-1:angle_zone3_relay1-180

xb_zone3_relay1(j_zone3_relay1)=xc1_adap_zone3_relay1+r_fault_zone3_r
elay1+r1_zone3_relay1*cos(n_zone3_relay1*pi/180);

yb_zone3_relay1(j_zone3_relay1)=yc1_adap_zone3_relay1+r1_zone3_relay1
*sin(n_zone3_relay1*pi/180);
    j_zone3_relay1=j_zone3_relay1+1;
end

%*****Tripping Zone1 of KU numerical distance relay1*****
m_left_KU_zone1_relay1=(y2_adap_zone1_relay1-
y1_adap_zone1_relay1)/(x2_adap_zone1_relay1-x1_zone1_relay1);
b_left_KU_zone1_relay1=y2_adap_zone1_relay1-
m_left_KU_zone1_relay1*x2_adap_zone1_relay1;
m_right_KU_zone1_relay1=(y3_adap_zone1_relay1-
y4_adap_zone1_relay1)/(x3_adap_zone1_relay1-x4_adap_zone1_relay1);
b_right_KU_zone1_relay1=y3_adap_zone1_relay1-
m_right_KU_zone1_relay1*x3_adap_zone1_relay1;

%*****Tripping zone2 of KU numerical distance relay1*****
m_left_KU_zone2_relay1=(y2_adap_zone2_relay1-
y1_adap_zone2_relay1)/(x2_adap_zone2_relay1-x1_zone2_relay1);
b_left_KU_zone2_relay1=y2_adap_zone2_relay1-
m_left_KU_zone2_relay1*x2_adap_zone2_relay1;
m_right_KU_zone2_relay1=(y3_adap_zone2_relay1-
y4_adap_zone2_relay1)/(x3_adap_zone2_relay1-x4_adap_zone2_relay1);
b_right_KU_zone2_relay1=y3_adap_zone2_relay1-
m_right_KU_zone2_relay1*x3_adap_zone2_relay1;

%*****Tripping zone3 of KU numerical distance relay1*****
m_left_KU_zone3_relay1=(y2_adap_zone3_relay1-
y1_adap_zone3_relay1)/(x2_adap_zone3_relay1-x1_zone3_relay1);
b_left_KU_zone3_relay1=y2_adap_zone3_relay1-
m_left_KU_zone3_relay1*x2_adap_zone3_relay1;
m_right_KU_zone3_relay1=(y3_adap_zone3_relay1-
y4_adap_zone3_relay1)/(x3_adap_zone3_relay1-x4_adap_zone3_relay1);
b_right_KU_zone3_relay1=y3_adap_zone3_relay1-
m_right_KU_zone3_relay1*x3_adap_zone3_relay1;

%*****Tripping zonel_AB of KU numerical distance relay1*****
n_KU_zone1_relay1_AB=0;t_KU_zone1_relay1_AB=0;
while n_KU_zone1_relay1_AB<length(r_driving_relay1_AB)
    n_KU_zone1_relay1_AB=n_KU_zone1_relay1_AB+1;

d_left_KU_zone1_relay1_AB=x_driving_relay1_AB(n_KU_zone1_relay1_AB)-
m_left_KU_zone1_relay1*r_driving_relay1_AB(n_KU_zone1_relay1_AB)-
b_left_KU_zone1_relay1;

```

```

d_right_KU_zone1_relay1_AB=x_driving_relay1_AB(n_KU_zone1_relay1_AB)-
m_right_KU_zone1_relay1*r_driving_relay1_AB(n_KU_zone1_relay1_AB)-
b_right_KU_zone1_relay1;
    d_on=x_driving_relay1_AB(n_KU_zone1_relay1_AB)-
m_load*r_driving_relay1_AB(n_KU_zone1_relay1_AB);
    d_under=-x_driving_relay1_AB(n_KU_zone1_relay1_AB)-
m_load*r_driving_relay1_AB(n_KU_zone1_relay1_AB);
    a=((r_driving_relay1_AB(n_KU_zone1_relay1_AB)-
cx_left_zone1_relay1)^2+(x_driving_relay1_AB(n_KU_zone1_relay1_AB)-
cy_left_zone1_relay1)^2<=(z_zone1_relay1/2)^2)|(r_driving_relay1_AB(n_
KU_zone1_relay1_AB)-
real(cx_right_zone1_relay1))^2+(x_driving_relay1_AB(n_KU_zone1_relay1
_AB)-
cy_right_zone1_relay1)^2<=(z_zone1_relay1/2)^2)|(x_driving_relay1_AB(
n_KU_zone1_relay1_AB)<=y2_adap_zone1_relay1&x_driving_relay1_AB(n_KU_
zone1_relay1_AB)>=y4_adap_zone1_relay1&d_left_KU_zone1_relay1_AB<=0&d
_right_KU_zone1_relay1_AB>=0);

b=~(r_driving_relay1_AB(n_KU_zone1_relay1_AB)>=r_load_setting&d_on<0&
d_under<0);
    if a&b
        if t_KU_zone1_relay1_AB<=(sample_of_trip-2)
            t_KU_zone1_relay1_AB=t_KU_zone1_relay1_AB+1;
        else
trip_KU_zone1_relay1_AB=1,time_of_trip=n_KU_zone1_relay1_AB-15,break
        end
        else t_KU_zone1_relay1_AB=0;
        end
end

%*****Tripping zone2_AB of KU numerical distance relay1*****
n_KU_zone2_relay1_AB=0;t_KU_zone2_relay1_AB=0;
while n_KU_zone2_relay1_AB<length(r_driving_relay1_AB)
    n_KU_zone2_relay1_AB=n_KU_zone2_relay1_AB+1;

d_left_KU_zone2_relay1_AB=x_driving_relay1_AB(n_KU_zone2_relay1_AB)-
m_left_KU_zone2_relay1*r_driving_relay1_AB(n_KU_zone2_relay1_AB)-
b_left_KU_zone2_relay1;

d_right_KU_zone2_relay1_AB=x_driving_relay1_AB(n_KU_zone2_relay1_AB)-
m_right_KU_zone2_relay1*r_driving_relay1_AB(n_KU_zone2_relay1_AB)-
b_right_KU_zone2_relay1;
    d_on=x_driving_relay1_AB(n_KU_zone2_relay1_AB)-
m_load*r_driving_relay1_AB(n_KU_zone2_relay1_AB);
    d_under=-x_driving_relay1_AB(n_KU_zone2_relay1_AB)-
m_load*r_driving_relay1_AB(n_KU_zone2_relay1_AB);
    a=((r_driving_relay1_AB(n_KU_zone2_relay1_AB)-
cx_left_zone2_relay1)^2+(x_driving_relay1_AB(n_KU_zone2_relay1_AB)-
cy_left_zone2_relay1)^2<=(z_zone2_relay1/2)^2)|(r_driving_relay1_AB(n_
KU_zone2_relay1_AB)-
real(cx_right_zone2_relay1))^2+(x_driving_relay1_AB(n_KU_zone2_relay1
_AB)-
cy_right_zone2_relay1)^2<=(z_zone2_relay1/2)^2)|(x_driving_relay1_AB(
n_KU_zone2_relay1_AB)<=y2_adap_zone2_relay1&x_driving_relay1_AB(n_KU_
zone2_relay1_AB)>=y4_adap_zone2_relay1&d_left_KU_zone2_relay1_AB<=0&d
_right_KU_zone2_relay1_AB>=0);

```

```

b=~(r_driving_relay1_AB(n_KU_zone2_relay1_AB)>=r_load_setting&d_on<0&
d_under<0);
    if a&b
        if t_KU_zone2_relay1_AB<=(sample_of_trip-2)
            t_KU_zone2_relay1_AB=t_KU_zone2_relay1_AB+1;
        else
trip_KU_zone2_relay1_AB=1,time_of_trip=n_KU_zone2_relay1_AB-15,break
        end
    else t_KU_zone2_relay1_AB=0;
    end
end

%*****Tripping zone3_AB of KU numerical distance relay1*****
n_KU_zone3_relay1_AB=0;t_KU_zone3_relay1_AB=0;
while n_KU_zone3_relay1_AB<length(r_driving_relay1_AB)
    n_KU_zone3_relay1_AB=n_KU_zone3_relay1_AB+1;

d_left_KU_zone3_relay1_AB=x_driving_relay1_AB(n_KU_zone3_relay1_AB)-
m_left_KU_zone3_relay1*r_driving_relay1_AB(n_KU_zone3_relay1_AB)-
b_left_KU_zone3_relay1;

d_right_KU_zone3_relay1_AB=x_driving_relay1_AB(n_KU_zone3_relay1_AB)-
m_right_KU_zone3_relay1*r_driving_relay1_AB(n_KU_zone3_relay1_AB)-
b_right_KU_zone3_relay1;
    d_on=x_driving_relay1_AB(n_KU_zone3_relay1_AB)-
m_load*r_driving_relay1_AB(n_KU_zone3_relay1_AB);
    d_under=-x_driving_relay1_AB(n_KU_zone3_relay1_AB)-
m_load*r_driving_relay1_AB(n_KU_zone3_relay1_AB);
    a=((r_driving_relay1_AB(n_KU_zone3_relay1_AB)-
cx_left_zone3_relay1)^2+(x_driving_relay1_AB(n_KU_zone3_relay1_AB)-
cy_left_zone3_relay1)^2<=(z_zone3_relay1/2)^2)|(r_driving_relay1_AB(n_
KU_zone3_relay1_AB)-
real(cx_right_zone3_relay1))^2+(x_driving_relay1_AB(n_KU_zone3_relay1
_AB)-
cy_right_zone3_relay1)^2<=(z_zone3_relay1/2)^2)|(x_driving_relay1_AB(
n_KU_zone3_relay1_AB)<=y2_adap_zone3_relay1&x_driving_relay1_AB(n_KU_
zone3_relay1_AB)>=y4_adap_zone3_relay1&d_left_KU_zone3_relay1_AB<=0&d_
_right_KU_zone3_relay1_AB>=0);

b=~(r_driving_relay1_AB(n_KU_zone3_relay1_AB)>=r_load_setting&d_on<0&
d_under<0);
    if a&b
        if t_KU_zone3_relay1_AB<=(sample_of_trip-2)
            t_KU_zone3_relay1_AB=t_KU_zone3_relay1_AB+1;
        else
trip_KU_zone3_relay1_AB=1,time_of_trip=n_KU_zone3_relay1_AB-15,break
        end
    else t_KU_zone3_relay1_AB=0;
    end
end

%*****Tripping zone1_BC of KU numerical distance relay1*****
n_KU_zone1_relay1_BC=0;t_KU_zone1_relay1_BC=0;
while n_KU_zone1_relay1_BC<length(r_driving_relay1_BC)
    n_KU_zone1_relay1_BC=n_KU_zone1_relay1_BC+1;

d_left_KU_zone1_relay1_BC=x_driving_relay1_BC(n_KU_zone1_relay1_BC)-

```

```

m_left_KU_zone1_relay1*r_driving_relay1_BC(n_KU_zone1_relay1_BC)-
b_left_KU_zone1_relay1;

d_right_KU_zone1_relay1_BC=x_driving_relay1_BC(n_KU_zone1_relay1_BC)-
m_right_KU_zone1_relay1*r_driving_relay1_BC(n_KU_zone1_relay1_BC)-
b_right_KU_zone1_relay1;
    d_on=x_driving_relay1_BC(n_KU_zone1_relay1_BC)-
m_load*r_driving_relay1_BC(n_KU_zone1_relay1_BC);
    d_under=-x_driving_relay1_BC(n_KU_zone1_relay1_BC)-
m_load*r_driving_relay1_BC(n_KU_zone1_relay1_BC);
    a=((r_driving_relay1_BC(n_KU_zone1_relay1_BC)-
cx_left_zone1_relay1)^2+(x_driving_relay1_BC(n_KU_zone1_relay1_BC)-
cy_left_zone1_relay1)^2<=(z_zone1_relay1/2)^2|(r_driving_relay1_BC(n_
KU_zone1_relay1_BC)-
real(cx_right_zone1_relay1))^2+(x_driving_relay1_BC(n_KU_zone1_relay1
_BC)-
cy_right_zone1_relay1)^2<=(z_zone1_relay1/2)^2)|(x_driving_relay1_BC(
n_KU_zone1_relay1_BC)<=y2_adap_zone1_relay1&x_driving_relay1_BC(n_KU_
zone1_relay1_BC)>=y4_adap_zone1_relay1&d_left_KU_zone1_relay1_BC<=0&d
_right_KU_zone1_relay1_BC>=0);

b=~(r_driving_relay1_BC(n_KU_zone1_relay1_BC)>=r_load_setting&d_on<0&
d_under<0);
    if a&b
        if t_KU_zone1_relay1_BC<=(sample_of_trip-2)
            t_KU_zone1_relay1_BC=t_KU_zone1_relay1_BC+1;
        else
trip_KU_zone1_relay1_BC=1,time_of_trip=n_KU_zone1_relay1_BC-15,break
        end
        else t_KU_zone1_relay1_BC=0;
        end
end

%*****Tripping zone2_BC of KU numerical distance relay1*****
n_KU_zone2_relay1_BC=0;t_KU_zone2_relay1_BC=0;
while n_KU_zone2_relay1_BC<length(r_driving_relay1_BC)
    n_KU_zone2_relay1_BC=n_KU_zone2_relay1_BC+1;

d_left_KU_zone2_relay1_BC=x_driving_relay1_BC(n_KU_zone2_relay1_BC)-
m_left_KU_zone2_relay1*r_driving_relay1_BC(n_KU_zone2_relay1_BC)-
b_left_KU_zone2_relay1;

d_right_KU_zone2_relay1_BC=x_driving_relay1_BC(n_KU_zone2_relay1_BC)-
m_right_KU_zone2_relay1*r_driving_relay1_BC(n_KU_zone2_relay1_BC)-
b_right_KU_zone2_relay1;
    d_on=x_driving_relay1_BC(n_KU_zone2_relay1_BC)-
m_load*r_driving_relay1_BC(n_KU_zone2_relay1_BC);
    d_under=-x_driving_relay1_BC(n_KU_zone2_relay1_BC)-
m_load*r_driving_relay1_BC(n_KU_zone2_relay1_BC);
    a=((r_driving_relay1_BC(n_KU_zone2_relay1_BC)-
cx_left_zone2_relay1)^2+(x_driving_relay1_BC(n_KU_zone2_relay1_BC)-
cy_left_zone2_relay1)^2<=(z_zone2_relay1/2)^2|(r_driving_relay1_BC(n_
KU_zone2_relay1_BC)-
real(cx_right_zone2_relay1))^2+(x_driving_relay1_BC(n_KU_zone2_relay1
_BC)-
cy_right_zone2_relay1)^2<=(z_zone2_relay1/2)^2)|(x_driving_relay1_BC(
n_KU_zone2_relay1_BC)<=y2_adap_zone2_relay1&x_driving_relay1_BC(n_KU_

```

```
zone2_relay1_BC)>=y4_adap_zone2_relay1&d_left_KU_zone2_relay1_BC<=0&d_
_right_KU_zone2_relay1_BC>=0);
```

```
b=~(r_driving_relay1_BC(n_KU_zone2_relay1_BC)>=r_load_setting&d_on<0&
d_under<0);
```

```
if a&b
```

```
if t_KU_zone2_relay1_BC<=(sample_of_trip-2)
```

```
t_KU_zone2_relay1_BC=t_KU_zone2_relay1_BC+1;
```

```
else
```

```
trip_KU_zone2_relay1_BC=1,time_of_trip=n_KU_zone2_relay1_BC-15,break
```

```
end
```

```
else t_KU_zone2_relay1_BC=0;
```

```
end
```

```
end
```

```
*****Tripping zone3_BC of KU numerical distance relay1*****
```

```
n_KU_zone3_relay1_BC=0;t_KU_zone3_relay1_BC=0;
```

```
while n_KU_zone3_relay1_BC<length(r_driving_relay1_BC)
```

```
n_KU_zone3_relay1_BC=n_KU_zone3_relay1_BC+1;
```

```
d_left_KU_zone3_relay1_BC=x_driving_relay1_BC(n_KU_zone3_relay1_BC)-
m_left_KU_zone3_relay1*r_driving_relay1_BC(n_KU_zone3_relay1_BC)-
b_left_KU_zone3_relay1;
```

```
d_right_KU_zone3_relay1_BC=x_driving_relay1_BC(n_KU_zone3_relay1_BC)-
m_right_KU_zone3_relay1*r_driving_relay1_BC(n_KU_zone3_relay1_BC)-
b_right_KU_zone3_relay1;
```

```
d_on=x_driving_relay1_BC(n_KU_zone3_relay1_BC)-
```

```
m_load*r_driving_relay1_BC(n_KU_zone3_relay1_BC);
```

```
d_under=-x_driving_relay1_BC(n_KU_zone3_relay1_BC)-
```

```
m_load*r_driving_relay1_BC(n_KU_zone3_relay1_BC);
```

```
a=((r_driving_relay1_BC(n_KU_zone3_relay1_BC)-
```

```
cx_left_zone3_relay1)^2+(x_driving_relay1_BC(n_KU_zone3_relay1_BC)-
```

```
cy_left_zone3_relay1)^2<=(z_zone3_relay1/2)^2|(r_driving_relay1_BC(n_
```

```
KU_zone3_relay1_BC)-
```

```
real(cx_right_zone3_relay1))^2+(x_driving_relay1_BC(n_KU_zone3_relay1_
```

```
BC)-
```

```
cy_right_zone3_relay1)^2<=(z_zone3_relay1/2)^2)|(x_driving_relay1_BC(
```

```
n_KU_zone3_relay1_BC)<=y2_adap_zone3_relay1&x_driving_relay1_BC(n_KU_
```

```
zone3_relay1_BC)>=y4_adap_zone3_relay1&d_left_KU_zone3_relay1_BC<=0&d_
```

```
_right_KU_zone3_relay1_BC>=0);
```

```
b=~(r_driving_relay1_BC(n_KU_zone3_relay1_BC)>=r_load_setting&d_on<0&
d_under<0);
```

```
if a&b
```

```
if t_KU_zone3_relay1_BC<=(sample_of_trip-2)
```

```
t_KU_zone3_relay1_BC=t_KU_zone3_relay1_BC+1;
```

```
else
```

```
trip_KU_zone3_relay1_BC=1,time_of_trip=n_KU_zone3_relay1_BC-15,break
```

```
end
```

```
else t_KU_zone3_relay1_BC=0;
```

```
end
```

```
end
```

```
*****Tripping zone1_CA of KU numerical distance relay1*****
```

```
n_KU_zone1_relay1_CA=0;t_KU_zone1_relay1_CA=0;
```

```
while n_KU_zone1_relay1_CA<length(r_driving_relay1_CA)
```

```
n_KU_zone1_relay1_CA=n_KU_zone1_relay1_CA+1;
```

```

d_left_KU_zone1_relay1_CA=x_driving_relay1_CA(n_KU_zone1_relay1_CA)-
m_left_KU_zone1_relay1*r_driving_relay1_CA(n_KU_zone1_relay1_CA)-
b_left_KU_zone1_relay1;

d_right_KU_zone1_relay1_CA=x_driving_relay1_CA(n_KU_zone1_relay1_CA)-
m_right_KU_zone1_relay1*r_driving_relay1_CA(n_KU_zone1_relay1_CA)-
b_right_KU_zone1_relay1;
d_on=x_driving_relay1_CA(n_KU_zone1_relay1_CA)-
m_load*r_driving_relay1_CA(n_KU_zone1_relay1_CA);
d_under=-x_driving_relay1_CA(n_KU_zone1_relay1_CA)-
m_load*r_driving_relay1_CA(n_KU_zone1_relay1_CA);
a=((r_driving_relay1_CA(n_KU_zone1_relay1_CA)-
cx_left_zone1_relay1)^2+(x_driving_relay1_CA(n_KU_zone1_relay1_CA)-
cy_left_zone1_relay1)^2<=(z_zone1_relay1/2)^2|(r_driving_relay1_CA(n_
KU_zone1_relay1_CA)-
real(cx_right_zone1_relay1))^2+(x_driving_relay1_CA(n_KU_zone1_relay1
_CA)-
cy_right_zone1_relay1)^2<=(z_zone1_relay1/2)^2)|(x_driving_relay1_CA(
n_KU_zone1_relay1_CA)<=y2_adap_zone1_relay1&x_driving_relay1_CA(n_KU_
zone1_relay1_CA)>=y4_adap_zone1_relay1&d_left_KU_zone1_relay1_CA<=0&d
_right_KU_zone1_relay1_CA>=0);

b=~(r_driving_relay1_CA(n_KU_zone1_relay1_CA)>=r_load_setting&d_on<0&
d_under<0);
if a&b
    if t_KU_zone1_relay1_CA<=(sample_of_trip-2)
        t_KU_zone1_relay1_CA=t_KU_zone1_relay1_CA+1;
    else
trip_KU_zone1_relay1_CA=1,time_of_trip=n_KU_zone1_relay1_CA-15,break
    end
    else t_KU_zone1_relay1_CA=0;
    end
end

%*****Tripping zone2_CA of KU numerical distance relay1*****
n_KU_zone2_relay1_CA=0;t_KU_zone2_relay1_CA=0;
while n_KU_zone2_relay1_CA<length(r_driving_relay1_CA)
    n_KU_zone2_relay1_CA=n_KU_zone2_relay1_CA+1;

d_left_KU_zone2_relay1_CA=x_driving_relay1_CA(n_KU_zone2_relay1_CA)-
m_left_KU_zone2_relay1*r_driving_relay1_CA(n_KU_zone2_relay1_CA)-
b_left_KU_zone2_relay1;

d_right_KU_zone2_relay1_CA=x_driving_relay1_CA(n_KU_zone2_relay1_CA)-
m_right_KU_zone2_relay1*r_driving_relay1_CA(n_KU_zone2_relay1_CA)-
b_right_KU_zone2_relay1;
d_on=x_driving_relay1_CA(n_KU_zone2_relay1_CA)-
m_load*r_driving_relay1_CA(n_KU_zone2_relay1_CA);
d_under=-x_driving_relay1_CA(n_KU_zone2_relay1_CA)-
m_load*r_driving_relay1_CA(n_KU_zone2_relay1_CA);
a=((r_driving_relay1_CA(n_KU_zone2_relay1_CA)-
cx_left_zone2_relay1)^2+(x_driving_relay1_CA(n_KU_zone2_relay1_CA)-
cy_left_zone2_relay1)^2<=(z_zone2_relay1/2)^2|(r_driving_relay1_CA(n_
KU_zone2_relay1_CA)-
real(cx_right_zone2_relay1))^2+(x_driving_relay1_CA(n_KU_zone2_relay1
_CA)-
cy_right_zone2_relay1)^2<=(z_zone2_relay1/2)^2)|(x_driving_relay1_CA(

```

```

n_KU_zone2_relay1_CA)<=y2_adap_zone2_relay1&x_driving_relay1_CA(n_KU_
zone2_relay1_CA)>=y4_adap_zone2_relay1&d_left_KU_zone2_relay1_CA<=0&d
_right_KU_zone2_relay1_CA>=0);

b=~(r_driving_relay1_CA(n_KU_zone2_relay1_CA)>=r_load_setting&d_on<0&
d_under<0);
    if a&b
        if t_KU_zone2_relay1_CA<=(sample_of_trip-2)
            t_KU_zone2_relay1_CA=t_KU_zone2_relay1_CA+1;
        else
trip_KU_zone2_relay1_CA=1,time_of_trip=n_KU_zone2_relay1_CA-15,break
        end
    else t_KU_zone2_relay1_CA=0;
    end
end

%*****Tripping zone3_CA of KU numerical distance relay1*****
n_KU_zone3_relay1_CA=0;t_KU_zone3_relay1_CA=0;
while n_KU_zone3_relay1_CA<length(r_driving_relay1_CA)
    n_KU_zone3_relay1_CA=n_KU_zone3_relay1_CA+1;

d_left_KU_zone3_relay1_CA=x_driving_relay1_CA(n_KU_zone3_relay1_CA)-
m_left_KU_zone3_relay1*r_driving_relay1_CA(n_KU_zone3_relay1_CA)-
b_left_KU_zone3_relay1;

d_right_KU_zone3_relay1_CA=x_driving_relay1_CA(n_KU_zone3_relay1_CA)-
m_right_KU_zone3_relay1*r_driving_relay1_CA(n_KU_zone3_relay1_CA)-
b_right_KU_zone3_relay1;
    d_on=x_driving_relay1_CA(n_KU_zone3_relay1_CA)-
m_load*r_driving_relay1_CA(n_KU_zone3_relay1_CA);
    d_under=-x_driving_relay1_CA(n_KU_zone3_relay1_CA)-
m_load*r_driving_relay1_CA(n_KU_zone3_relay1_CA);
    a=((r_driving_relay1_CA(n_KU_zone3_relay1_CA)-
cx_left_zone3_relay1)^2+(x_driving_relay1_CA(n_KU_zone3_relay1_CA)-
cy_left_zone3_relay1)^2<=(z_zone3_relay1/2)^2|(r_driving_relay1_CA(n_
KU_zone3_relay1_CA)-
real(cx_right_zone3_relay1))^2+(x_driving_relay1_CA(n_KU_zone3_relay1
_CA)-
cy_right_zone3_relay1)^2<=(z_zone3_relay1/2)^2)|(x_driving_relay1_CA(
n_KU_zone3_relay1_CA)<=y2_adap_zone3_relay1&x_driving_relay1_CA(n_KU_
zone3_relay1_CA)>=y4_adap_zone3_relay1&d_left_KU_zone3_relay1_CA<=0&d
_right_KU_zone3_relay1_CA>=0);

b=~(r_driving_relay1_CA(n_KU_zone3_relay1_CA)>=r_load_setting&d_on<0&
d_under<0);
    if a&b
        if t_KU_zone3_relay1_CA<=(sample_of_trip-2)
            t_KU_zone3_relay1_CA=t_KU_zone3_relay1_CA+1;
        else
trip_KU_zone3_relay1_CA=1,time_of_trip=n_KU_zone3_relay1_CA-15,break
        end
    else t_KU_zone3_relay1_CA=0;
    end
end

%*****Tripping zone1_AG of KU numerical distance relay1*****
n_KU_zonel_relay1_AG=0;t_KU_zonel_relay1_AG=0;
while n_KU_zonel_relay1_AG<length(r_driving_relay1_AG)

```

```

n_KU_zone1_relay1_AG=n_KU_zone1_relay1_AG+1;

d_left_KU_zone1_relay1_AG=x_driving_relay1_AG(n_KU_zone1_relay1_AG)-
m_left_KU_zone1_relay1*r_driving_relay1_AG(n_KU_zone1_relay1_AG)-
b_left_KU_zone1_relay1;

d_right_KU_zone1_relay1_AG=x_driving_relay1_AG(n_KU_zone1_relay1_AG)-
m_right_KU_zone1_relay1*r_driving_relay1_AG(n_KU_zone1_relay1_AG)-
b_right_KU_zone1_relay1;
d_on=x_driving_relay1_AG(n_KU_zone1_relay1_AG)-
m_load*r_driving_relay1_AG(n_KU_zone1_relay1_AG);
d_under=-x_driving_relay1_AG(n_KU_zone1_relay1_AG)-
m_load*r_driving_relay1_AG(n_KU_zone1_relay1_AG);
a=((r_driving_relay1_AG(n_KU_zone1_relay1_AG)-
cx_left_zone1_relay1)^2+(x_driving_relay1_AG(n_KU_zone1_relay1_AG)-
cy_left_zone1_relay1)^2<=(z_zone1_relay1/2)^2|(r_driving_relay1_AG(n_
KU_zone1_relay1_AG)-
real(cx_right_zone1_relay1))^2+(x_driving_relay1_AG(n_KU_zone1_relay1
_AG)-
cy_right_zone1_relay1)^2<=(z_zone1_relay1/2)^2)|(x_driving_relay1_AG(
n_KU_zone1_relay1_AG)<=y2_adap_zone1_relay1&x_driving_relay1_AG(n_KU_
zone1_relay1_AG)>=y4_adap_zone1_relay1&d_left_KU_zone1_relay1_AG<=0&d
_right_KU_zone1_relay1_AG>=0);

b=~(r_driving_relay1_AG(n_KU_zone1_relay1_AG)>=r_load_setting&d_on<0&
d_under<0);
if a&b
    if t_KU_zone1_relay1_AG<=(sample_of_trip-2)
        t_KU_zone1_relay1_AG=t_KU_zone1_relay1_AG+1;
    else
trip_KU_zone1_relay1_AG=1,time_of_trip=n_KU_zone1_relay1_AG-15,break
    end
    else t_KU_zone1_relay1_AG=0;
end
end

%*****Tripping zone2_AG of KU numerical distance relay1*****
n_KU_zone2_relay1_AG=0;t_KU_zone2_relay1_AG=0;
while n_KU_zone2_relay1_AG<length(r_driving_relay1_AG)
    n_KU_zone2_relay1_AG=n_KU_zone2_relay1_AG+1;

d_left_KU_zone2_relay1_AG=x_driving_relay1_AG(n_KU_zone2_relay1_AG)-
m_left_KU_zone2_relay1*r_driving_relay1_AG(n_KU_zone2_relay1_AG)-
b_left_KU_zone2_relay1;

d_right_KU_zone2_relay1_AG=x_driving_relay1_AG(n_KU_zone2_relay1_AG)-
m_right_KU_zone2_relay1*r_driving_relay1_AG(n_KU_zone2_relay1_AG)-
b_right_KU_zone2_relay1;
d_on=x_driving_relay1_AG(n_KU_zone2_relay1_AG)-
m_load*r_driving_relay1_AG(n_KU_zone2_relay1_AG);
d_under=-x_driving_relay1_AG(n_KU_zone2_relay1_AG)-
m_load*r_driving_relay1_AG(n_KU_zone2_relay1_AG);
a=((r_driving_relay1_AG(n_KU_zone2_relay1_AG)-
cx_left_zone2_relay1)^2+(x_driving_relay1_AG(n_KU_zone2_relay1_AG)-
cy_left_zone2_relay1)^2<=(z_zone2_relay1/2)^2|(r_driving_relay1_AG(n_
KU_zone2_relay1_AG)-
real(cx_right_zone2_relay1))^2+(x_driving_relay1_AG(n_KU_zone2_relay1
_AG)-

```

```

cy_right_zone2_relay1)^2<=(z_zone2_relay1/2)^2)|(x_driving_relay1_AG(
n_KU_zone2_relay1_AG)<=y2_adap_zone2_relay1&x_driving_relay1_AG(n_KU_
zone2_relay1_AG)>=y4_adap_zone2_relay1&d_left_KU_zone2_relay1_AG<=0&d
_right_KU_zone2_relay1_AG>=0);

```

```

b=~(r_driving_relay1_AG(n_KU_zone2_relay1_AG)>=r_load_setting&d_on<0&
d_under<0);

```

```

    if a&b
        if t_KU_zone2_relay1_AG<=(sample_of_trip-2)
            t_KU_zone2_relay1_AG=t_KU_zone2_relay1_AG+1;
        else
trip_KU_zone2_relay1_AG=1,time_of_trip=n_KU_zone2_relay1_AG-15,break
        end
    else t_KU_zone2_relay1_AG=0;
    end
end

```

```

%*****Tripping zone3_AG of KU numerical distance relay1*****

```

```

n_KU_zone3_relay1_AG=0;t_KU_zone3_relay1_AG=0;
while n_KU_zone3_relay1_AG<length(r_driving_relay1_AG)
    n_KU_zone3_relay1_AG=n_KU_zone3_relay1_AG+1;

```

```

d_left_KU_zone3_relay1_AG=x_driving_relay1_AG(n_KU_zone3_relay1_AG)-
m_left_KU_zone3_relay1*r_driving_relay1_AG(n_KU_zone3_relay1_AG)-
b_left_KU_zone3_relay1;

```

```

d_right_KU_zone3_relay1_AG=x_driving_relay1_AG(n_KU_zone3_relay1_AG)-
m_right_KU_zone3_relay1*r_driving_relay1_AG(n_KU_zone3_relay1_AG)-
b_right_KU_zone3_relay1;

```

```

d_on=x_driving_relay1_AG(n_KU_zone3_relay1_AG)-
m_load*r_driving_relay1_AG(n_KU_zone3_relay1_AG);
d_under=-x_driving_relay1_AG(n_KU_zone3_relay1_AG)-
m_load*r_driving_relay1_AG(n_KU_zone3_relay1_AG);
a=((r_driving_relay1_AG(n_KU_zone3_relay1_AG)-
cx_left_zone3_relay1)^2+(x_driving_relay1_AG(n_KU_zone3_relay1_AG)-
cy_left_zone3_relay1)^2<=(z_zone3_relay1/2)^2|(r_driving_relay1_AG(n_
KU_zone3_relay1_AG)-
real(cx_right_zone3_relay1))^2+(x_driving_relay1_AG(n_KU_zone3_relay1
_AG)-
cy_right_zone3_relay1)^2<=(z_zone3_relay1/2)^2)|(x_driving_relay1_AG(
n_KU_zone3_relay1_AG)<=y2_adap_zone3_relay1&x_driving_relay1_AG(n_KU_
zone3_relay1_AG)>=y4_adap_zone3_relay1&d_left_KU_zone3_relay1_AG<=0&d
_right_KU_zone3_relay1_AG>=0);

```

```

b=~(r_driving_relay1_AG(n_KU_zone3_relay1_AG)>=r_load_setting&d_on<0&
d_under<0);

```

```

    if a&b
        if t_KU_zone3_relay1_AG<=(sample_of_trip-2)
            t_KU_zone3_relay1_AG=t_KU_zone3_relay1_AG+1;
        else
trip_KU_zone3_relay1_AG=1,time_of_trip=n_KU_zone3_relay1_AG-15,break
        end
    else t_KU_zone3_relay1_AG=0;
    end
end

```

```

%*****Tripping zone1_BG of KU numerical distance relay1*****

```

```

n_KU_zone1_relay1_BG=0;t_KU_zone1_relay1_BG=0;

```

```

while n_KU_zone1_relay1_BG<length(r_driving_relay1_BG)
    n_KU_zone1_relay1_BG=n_KU_zone1_relay1_BG+1;

d_left_KU_zone1_relay1_BG=x_driving_relay1_BG(n_KU_zone1_relay1_BG)-
m_left_KU_zone1_relay1*r_driving_relay1_BG(n_KU_zone1_relay1_BG)-
b_left_KU_zone1_relay1;

d_right_KU_zone1_relay1_BG=x_driving_relay1_BG(n_KU_zone1_relay1_BG)-
m_right_KU_zone1_relay1*r_driving_relay1_BG(n_KU_zone1_relay1_BG)-
b_right_KU_zone1_relay1;
    d_on=x_driving_relay1_BG(n_KU_zone1_relay1_BG)-
m_load*r_driving_relay1_BG(n_KU_zone1_relay1_BG);
    d_under=-x_driving_relay1_BG(n_KU_zone1_relay1_BG)-
m_load*r_driving_relay1_BG(n_KU_zone1_relay1_BG);
    a=((r_driving_relay1_BG(n_KU_zone1_relay1_BG)-
cx_left_zone1_relay1)^2+(x_driving_relay1_BG(n_KU_zone1_relay1_BG)-
cy_left_zone1_relay1)^2<=(z_zone1_relay1/2)^2|(r_driving_relay1_BG(n_
KU_zone1_relay1_BG)-
real(cx_right_zone1_relay1))^2+(x_driving_relay1_BG(n_KU_zone1_relay1
_BG)-
cy_right_zone1_relay1)^2<=(z_zone1_relay1/2)^2)|(x_driving_relay1_BG(
n_KU_zone1_relay1_BG)<=y2_adap_zone1_relay1&x_driving_relay1_BG(n_KU_
zone1_relay1_BG)>=y4_adap_zone1_relay1&d_left_KU_zone1_relay1_BG<=0&d
_right_KU_zone1_relay1_BG>=0);

b=~(r_driving_relay1_BG(n_KU_zone1_relay1_BG)>=r_load_setting&d_on<0&
d_under<0);
    if a&b
        if t_KU_zone1_relay1_BG<=(sample_of_trip-2)
            t_KU_zone1_relay1_BG=t_KU_zone1_relay1_BG+1;
        else
            trip_KU_zone1_relay1_BG=1,time_of_trip=n_KU_zone1_relay1_BG-15,break
        end
    else t_KU_zone1_relay1_BG=0;
    end
end

%*****Tripping zone2_BG of KU numerical distance relay1*****
n_KU_zone2_relay1_BG=0;t_KU_zone2_relay1_BG=0;
while n_KU_zone2_relay1_BG<length(r_driving_relay1_BG)
    n_KU_zone2_relay1_BG=n_KU_zone2_relay1_BG+1;

d_left_KU_zone2_relay1_BG=x_driving_relay1_BG(n_KU_zone2_relay1_BG)-
m_left_KU_zone2_relay1*r_driving_relay1_BG(n_KU_zone2_relay1_BG)-
b_left_KU_zone2_relay1;

d_right_KU_zone2_relay1_BG=x_driving_relay1_BG(n_KU_zone2_relay1_BG)-
m_right_KU_zone2_relay1*r_driving_relay1_BG(n_KU_zone2_relay1_BG)-
b_right_KU_zone2_relay1;
    d_on=x_driving_relay1_BG(n_KU_zone2_relay1_BG)-
m_load*r_driving_relay1_BG(n_KU_zone2_relay1_BG);
    d_under=-x_driving_relay1_BG(n_KU_zone2_relay1_BG)-
m_load*r_driving_relay1_BG(n_KU_zone2_relay1_BG);
    a=((r_driving_relay1_BG(n_KU_zone2_relay1_BG)-
cx_left_zone2_relay1)^2+(x_driving_relay1_BG(n_KU_zone2_relay1_BG)-
cy_left_zone2_relay1)^2<=(z_zone2_relay1/2)^2|(r_driving_relay1_BG(n_
KU_zone2_relay1_BG)-
real(cx_right_zone2_relay1))^2+(x_driving_relay1_BG(n_KU_zone2_relay1

```

```

_BG)-
cy_right_zone2_relay1)^2<=(z_zone2_relay1/2)^2)|(x_driving_relay1_BG(
n_KU_zone2_relay1_BG)<=y2_adap_zone2_relay1&x_driving_relay1_BG(n_KU_
zone2_relay1_BG)>=y4_adap_zone2_relay1&d_left_KU_zone2_relay1_BG<=0&d
_right_KU_zone2_relay1_BG>=0);

b=~(r_driving_relay1_BG(n_KU_zone2_relay1_BG)>=r_load_setting&d_on<0&
d_under<0);
    if a&b
        if t_KU_zone2_relay1_BG<=(sample_of_trip-2)
            t_KU_zone2_relay1_BG=t_KU_zone2_relay1_BG+1;
        else
            trip_KU_zone2_relay1_BG=1,time_of_trip=n_KU_zone2_relay1_BG-15,break
        end
    else t_KU_zone2_relay1_BG=0;
end
end

%*****Tripping zone3_BG of KU numerical distance relay1*****
n_KU_zone3_relay1_BG=0;t_KU_zone3_relay1_BG=0;
while n_KU_zone3_relay1_BG<length(r_driving_relay1_BG)
    n_KU_zone3_relay1_BG=n_KU_zone3_relay1_BG+1;

d_left_KU_zone3_relay1_BG=x_driving_relay1_BG(n_KU_zone3_relay1_BG)-
m_left_KU_zone3_relay1*r_driving_relay1_BG(n_KU_zone3_relay1_BG)-
b_left_KU_zone3_relay1;

d_right_KU_zone3_relay1_BG=x_driving_relay1_BG(n_KU_zone3_relay1_BG)-
m_right_KU_zone3_relay1*r_driving_relay1_BG(n_KU_zone3_relay1_BG)-
b_right_KU_zone3_relay1;
    d_on=x_driving_relay1_BG(n_KU_zone3_relay1_BG)-
m_load*r_driving_relay1_BG(n_KU_zone3_relay1_BG);
    d_under=-x_driving_relay1_BG(n_KU_zone3_relay1_BG)-
m_load*r_driving_relay1_BG(n_KU_zone3_relay1_BG);
    a=((r_driving_relay1_BG(n_KU_zone3_relay1_BG)-
cx_left_zone3_relay1)^2+(x_driving_relay1_BG(n_KU_zone3_relay1_BG)-
cy_left_zone3_relay1)^2<=(z_zone3_relay1/2)^2|(r_driving_relay1_BG(n_
KU_zone3_relay1_BG)-
real(cx_right_zone3_relay1))^2+(x_driving_relay1_BG(n_KU_zone3_relay1
_BG)-
cy_right_zone3_relay1)^2<=(z_zone3_relay1/2)^2)|(x_driving_relay1_BG(
n_KU_zone3_relay1_BG)<=y2_adap_zone3_relay1&x_driving_relay1_BG(n_KU_
zone3_relay1_BG)>=y4_adap_zone3_relay1&d_left_KU_zone3_relay1_BG<=0&d
_right_KU_zone3_relay1_BG>=0);

b=~(r_driving_relay1_BG(n_KU_zone3_relay1_BG)>=r_load_setting&d_on<0&
d_under<0);
    if a&b
        if t_KU_zone3_relay1_BG<=(sample_of_trip-2)
            t_KU_zone3_relay1_BG=t_KU_zone3_relay1_BG+1;
        else
            trip_KU_zone3_relay1_BG=1,time_of_trip=n_KU_zone3_relay1_BG-15,break
        end
    else t_KU_zone3_relay1_BG=0;
end
end

%*****Tripping zone1_CG of KU numericG1 distance relay1*****

```

```

n_KU_zone1_relay1_CG=0;t_KU_zone1_relay1_CG=0;
while n_KU_zone1_relay1_CG<length(r_driving_relay1_CG)
    n_KU_zone1_relay1_CG=n_KU_zone1_relay1_CG+1;

d_left_KU_zone1_relay1_CG=x_driving_relay1_CG(n_KU_zone1_relay1_CG)-
m_left_KU_zone1_relay1*r_driving_relay1_CG(n_KU_zone1_relay1_CG)-
b_left_KU_zone1_relay1;

d_right_KU_zone1_relay1_CG=x_driving_relay1_CG(n_KU_zone1_relay1_CG)-
m_right_KU_zone1_relay1*r_driving_relay1_CG(n_KU_zone1_relay1_CG)-
b_right_KU_zone1_relay1;
    d_on=x_driving_relay1_CG(n_KU_zone1_relay1_CG)-
m_load*r_driving_relay1_CG(n_KU_zone1_relay1_CG);
    d_under=-x_driving_relay1_CG(n_KU_zone1_relay1_CG)-
m_load*r_driving_relay1_CG(n_KU_zone1_relay1_CG);
    a=((r_driving_relay1_CG(n_KU_zone1_relay1_CG)-
cx_left_zone1_relay1)^2+(x_driving_relay1_CG(n_KU_zone1_relay1_CG)-
cy_left_zone1_relay1)^2<=(z_zone1_relay1/2)^2|(r_driving_relay1_CG(n_
KU_zone1_relay1_CG)-
real(cx_right_zone1_relay1))^2+(x_driving_relay1_CG(n_KU_zone1_relay1
_CG)-
cy_right_zone1_relay1)^2<=(z_zone1_relay1/2)^2)|(x_driving_relay1_CG(
n_KU_zone1_relay1_CG)<=y2_adap_zone1_relay1&x_driving_relay1_CG(n_KU_
zone1_relay1_CG)>=y4_adap_zone1_relay1&d_left_KU_zone1_relay1_CG<=0&d
_right_KU_zone1_relay1_CG>=0);

b=~(r_driving_relay1_CG(n_KU_zone1_relay1_CG)>=r_load_setting&d_on<0&
d_under<0);
    if a&b
        if t_KU_zone1_relay1_CG<=(sample_of_trip-2)
            t_KU_zone1_relay1_CG=t_KU_zone1_relay1_CG+1;
        else
trip_KU_zone1_relay1_CG=1,time_of_trip=n_KU_zone1_relay1_CG-15,break
        end
    else t_KU_zone1_relay1_CG=0;
    end
end

%*****Tripping zone2_CG of KU numerically distance relay1*****
n_KU_zone2_relay1_CG=0;t_KU_zone2_relay1_CG=0;
while n_KU_zone2_relay1_CG<length(r_driving_relay1_CG)
    n_KU_zone2_relay1_CG=n_KU_zone2_relay1_CG+1;

d_left_KU_zone2_relay1_CG=x_driving_relay1_CG(n_KU_zone2_relay1_CG)-
m_left_KU_zone2_relay1*r_driving_relay1_CG(n_KU_zone2_relay1_CG)-
b_left_KU_zone2_relay1;

d_right_KU_zone2_relay1_CG=x_driving_relay1_CG(n_KU_zone2_relay1_CG)-
m_right_KU_zone2_relay1*r_driving_relay1_CG(n_KU_zone2_relay1_CG)-
b_right_KU_zone2_relay1;
    d_on=x_driving_relay1_CG(n_KU_zone2_relay1_CG)-
m_load*r_driving_relay1_CG(n_KU_zone2_relay1_CG);
    d_under=-x_driving_relay1_CG(n_KU_zone2_relay1_CG)-
m_load*r_driving_relay1_CG(n_KU_zone2_relay1_CG);
    a=((r_driving_relay1_CG(n_KU_zone2_relay1_CG)-
cx_left_zone2_relay1)^2+(x_driving_relay1_CG(n_KU_zone2_relay1_CG)-
cy_left_zone2_relay1)^2<=(z_zone2_relay1/2)^2|(r_driving_relay1_CG(n_
KU_zone2_relay1_CG)-

```

```

real(cx_right_zone2_relay1))^2+(x_driving_relay1_CG(n_KU_zone2_relay1_CG)-
cy_right_zone2_relay1)^2<=(z_zone2_relay1/2)^2)|(x_driving_relay1_CG(
n_KU_zone2_relay1_CG)<=y2_adap_zone2_relay1&x_driving_relay1_CG(n_KU_
zone2_relay1_CG)>=y4_adap_zone2_relay1&d_left_KU_zone2_relay1_CG<=0&d
_right_KU_zone2_relay1_CG>=0);

b=~(r_driving_relay1_CG(n_KU_zone2_relay1_CG)>=r_load_setting&d_on<0&
d_under<0);
    if a&b
        if t_KU_zone2_relay1_CG<=(sample_of_trip-2)
            t_KU_zone2_relay1_CG=t_KU_zone2_relay1_CG+1;
        else
trip_KU_zone2_relay1_CG=1,time_of_trip=n_KU_zone2_relay1_CG-15,break
        end
    else t_KU_zone2_relay1_CG=0;
    end
end

%*****Tripping zone3_CG of KU numerics distance relay1*****
n_KU_zone3_relay1_CG=0;t_KU_zone3_relay1_CG=0;
while n_KU_zone3_relay1_CG<length(r_driving_relay1_CG)
    n_KU_zone3_relay1_CG=n_KU_zone3_relay1_CG+1;

d_left_KU_zone3_relay1_CG=x_driving_relay1_CG(n_KU_zone3_relay1_CG)-
m_left_KU_zone3_relay1*r_driving_relay1_CG(n_KU_zone3_relay1_CG)-
b_left_KU_zone3_relay1;

d_right_KU_zone3_relay1_CG=x_driving_relay1_CG(n_KU_zone3_relay1_CG)-
m_right_KU_zone3_relay1*r_driving_relay1_CG(n_KU_zone3_relay1_CG)-
b_right_KU_zone3_relay1;
    d_on=x_driving_relay1_CG(n_KU_zone3_relay1_CG)-
m_load*r_driving_relay1_CG(n_KU_zone3_relay1_CG);
    d_under=-x_driving_relay1_CG(n_KU_zone3_relay1_CG)-
m_load*r_driving_relay1_CG(n_KU_zone3_relay1_CG);
    a=((r_driving_relay1_CG(n_KU_zone3_relay1_CG)-
cx_left_zone3_relay1)^2+(x_driving_relay1_CG(n_KU_zone3_relay1_CG)-
cy_left_zone3_relay1)^2<=(z_zone3_relay1/2)^2)|(r_driving_relay1_CG(n_
KU_zone3_relay1_CG)-
real(cx_right_zone3_relay1))^2+(x_driving_relay1_CG(n_KU_zone3_relay1_
CG)-
cy_right_zone3_relay1)^2<=(z_zone3_relay1/2)^2)|(x_driving_relay1_CG(
n_KU_zone3_relay1_CG)<=y2_adap_zone3_relay1&x_driving_relay1_CG(n_KU_
zone3_relay1_CG)>=y4_adap_zone3_relay1&d_left_KU_zone3_relay1_CG<=0&d
_right_KU_zone3_relay1_CG>=0);

b=~(r_driving_relay1_CG(n_KU_zone3_relay1_CG)>=r_load_setting&d_on<0&
d_under<0);
    if a&b
        if t_KU_zone3_relay1_CG<=(sample_of_trip-2)
            t_KU_zone3_relay1_CG=t_KU_zone3_relay1_CG+1;
        else
trip_KU_zone3_relay1_CG=1,time_of_trip=n_KU_zone3_relay1_CG-15,break
        end
    else t_KU_zone3_relay1_CG=0;
    end
end
end

```

```

%*****plot R-X Diagram & Driving Zone of numerical distance
relay1*****
figure(1)
plot(r_on,jx_on,r_under,jx_under,r1,jx1,'-
r',xo_adap_zone1_relay1,yo_adap_zone1_relay1,xu_adap_zone1_relay1,yu_
adap_zone1_relay1,xa_zone1_relay1,ya_zone1_relay1,xb_zone1_relay1,yb_
zone1_relay1,xo_adap_zone2_relay1,yo_adap_zone2_relay1,xu_adap_zone2_
relay1,yu_adap_zone2_relay1,xa_zone2_relay1,ya_zone2_relay1,xb_zone2_
relay1,yb_zone2_relay1,xo_adap_zone3_relay1,yo_adap_zone3_relay1,xu_a
dap_zone3_relay1,yu_adap_zone3_relay1,xa_zone3_relay1,ya_zone3_relay1
,xb_zone3_relay1,yb_zone3_relay1);grid;
set(gca,'XLim',[-35 120],'YLim',[-25 100])
hold on
for i=1:61
    plot(r_driving_relay1_AB(1:i),x_driving_relay1_AB(1:i),'*-
k',r_driving_relay1_BC(1:i),x_driving_relay1_BC(1:i),'*-
r',r_driving_relay1_CA(1:i),x_driving_relay1_CA(1:i),'*-
c',r_driving_relay1_AG(1:i),x_driving_relay1_AG(1:i),'*-
k',r_driving_relay1_BG(1:i),x_driving_relay1_BG(1:i),'*-
r',r_driving_relay1_CG(1:i),x_driving_relay1_CG(1:i),'*-c');
    pause (0.001)
end
hold off

```

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายสุรเชษฐ เดชทุ่ง
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 3 สิงหาคม 2515
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า-ไฟฟ้ากำลัง) สถาบันเทคโนโลยี ราชมงคลคลองหก วศ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	อาจารย์ระดับ 5
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล พระนคร
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	เจ้าของอนุสิทธิบัตรระบบป้องกันการโจรกรรม รถจักรยานยนต์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนเรียนต่อระดับปริญญาตรี จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล (พ.ศ. 2538) ได้รับทุนเรียนต่อระดับปริญญาเอก จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล (พ.ศ. 2544) ได้รับทุนผู้ช่วยสอนจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2544-2547) ได้รับทุนทำงานวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2547)