ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246225

การพัฒนาระบบตรวจจับเหตุการณ์สายล่าไฟฟ้าแรงต่ำด้วยวิธีวัดกระแสสาย กรณีศึกษาสายไฟทางด้านโหลดมีการสั่นสะเทือน

นายอมัฒทนัย พงศ์ดารธารัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

b00250817

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246225

การพัฒนาระบบตรวจจับเหตุการณ์สายจ่ายไฟฟ้าขาดด้วยวิธีวัดกระแสสาย
กรณีศึกษาสายไฟทางด้านโหลดมีการสัมผัสดิน

นายอณัณตชัย พงศ์ถาวรสวัสดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5170721821

A DEVELOPMENT ON DETECTION SYSTEM FOR BROKEN DISTRIBUTION CONDUCTOR USING THE 3-PHASE LINE CURRENT MEASUREMENT : CASE STUDY CONDUCTOR ON THE LOAD SIDE IS TOUCHING TO GROUND

Mr.Anantachai Pongthavornsawad

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาระบบตรวจจับเหตุการณ์สายจ่ายไฟฟ้าขาดด้วยวิธีวัดกระแสสาย กรณีศึกษาสายไฟทางด้านโหลดมีการสัมผัสดิน
โดย	นายอณัณตชัย พงศ์ถาวรสวัสดิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรักษ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนพงศ์ สุวรรณศรี)

อณัณตชัย พงศ์ถาวรสวัสดิ์: การพัฒนาระบบตรวจจับเหตุการณ์สายจ่ายไฟฟ้าขาดด้วยวิธีวัดกระแสสาย กรณีศึกษาสายไฟทางด้านโหลดมีการสัมผัสดิน (A DEVELOPMENT ON DETECTION SYSTEM FOR BROKEN DISTRIBUTION CONDUCTOR USING THE 3-PHASE LINE CURRENT MEASUREMENT: CASE STUDY CONDUCTOR ON THE LOAD SIDE IS TOUCHING TO GROUND) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร. วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา, 79 หน้า

246225

เหตุการณ์ความผิดพร่องแบบสายจำหน่ายไฟฟ้าขาดแล้วตกลงมาสัมผัสพื้นเป็นกรณีที่ระบบป้องกันที่ติดตั้งใช้โดยทั่วไปในสถานีไฟฟ้าไม่สามารถตรวจจับความผิดพร่องที่เกิดขึ้นได้ ทำให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในบริเวณที่เกิดความผิดพร่องได้ วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอเทคนิคใหม่ซึ่งใช้หลักการการเลื่อนเวลาของสัญญาณกระแสมาประยุกต์เข้ากับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์เพื่อใช้สำหรับการตรวจจับความผิดพร่องแบบสายจำหน่ายไฟฟ้าขาดแล้วสัมผัสพื้น การวิจัยเริ่มด้วยการออกแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า เพื่อใช้ในการจำลองความผิดพร่องแบบสายจำหน่ายไฟฟ้าขาดแล้วตกลงมาสัมผัสพื้นด้านภาระ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ออกแบบไว้ที่ระดับแรงดัน 22 kV ระยะทางวงจรสายป้อนอยู่ที่ประมาณ 39.5 กิโลเมตร มีหม้อแปลงจำหน่ายกระจายตามระยะทางวงจรสายป้อน ในการจำลองความผิดพร่องฯ นั้น จะทำการจำลอง 2 รูปแบบคือ ทำการจำลองความผิดพร่องฯ ด้วยโปรแกรมประยุกต์ และทำการจำลองความผิดพร่องฯ บนชุดระบบจำหน่ายไฟฟ้าภายในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำผลที่ได้จากการทดลองไปหารูปแบบการตรวจจับ และออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับความผิดพร่องฯ ซึ่งอุปกรณ์ตรวจจับความผิดพร่องฯดังกล่าว เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์ที่มีความสามารถในการตอบสนองต่อเหตุการณ์ความผิดพร่องฯ ที่เกิดขึ้นในระบบ

จากผลการทดลองที่ได้ทั้ง 2 รูปแบบ พบว่ากระแสสายจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดของกระแส และเวลาของสัญญาณกระแส โดยกระแสจะมีการเลื่อนเวลาต่างไปจาก 20 มิลลิวินาที เมื่อเกิดความผิดพร่องแบบสายจำหน่ายไฟฟ้าขาดแล้วตกลงมาสัมผัสพื้นด้านภาระ และอุปกรณ์ตรวจจับความผิดพร่องฯ ที่ทดลองในชุดระบบจำหน่ายไฟฟ้า ก็ได้ส่งสัญญาณแจ้งเตือนออกมา โดยอุปกรณ์ตรวจจับเฟส A ใช้เวลาในการตรวจจับความผิดพร่องอยู่ที่ 18.33 มิลลิวินาที เฟส B ใช้เวลาตรวจจับความผิดพร่อง 17.27 มิลลิวินาที และเฟส C ใช้เวลาตรวจจับความผิดพร่อง 13.83 มิลลิวินาที

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต อณัณตชัย พงศ์ถาวรสวัสดิ์

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2553

##5170721821: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: Down conductor fault, EMTP-program, Distribution system.

ANANTACHAI PONGTHAVORNSAWAD: A DEVELOPMENT ON DETECTION SYSTEM FOR BROKEN DISTRIBUTION CONDUCTOR USING THE 3-PHASE LINE CURRENT MEASUREMENT: CASE STUDY CONDUCTOR ON THE LOAD SIDE IS TOUCHING TO GROUND. ADVISOR: WEERAPUN RUNGSEEVIJITPRAPA, Dr.-Ing., 79 pp.

246225

Down conductor fault is hardly detected in conventional protection system and the occurred fault causes danger to people, animal and property. This thesis study proposes the novel technique to detect the fault by time shifting method and invents the protective equipment for down conductor fault. Distribution system model is designed for down conductor fault simulation in 22 kV systems, with 39.5 kilometers long feeder line and distribution transformers distributed along the feeder line. Down conductor fault is simulated in 2 types, by EMTP-program and by real distribution system model in the laboratory. Fault simulated from the model is used to design the detective scheme and the protective equipment. The protective equipment installed on each phase is the electronic circuits that can response the down conductor the occurred fault in the system.

According to the result of both types, the whole line current is changed both in magnitude and period time. When fault occurred, the period time is shifted from the ordinary of 20 ms. The protective equipment installed in the distribution system model, sent alert signal at 18.33 ms on phase A, 17.27 ms on phase B and 13.83 ms on phase C.

Department: Electrical Engineering Student's Signature.....

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature.....

Academic Year 2010

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างดีจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก อาจารย์ ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา ที่ได้พบกุญแจดอกสำคัญที่ใช้ในการไขปัญหาของวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งได้สละเวลาเพื่อตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้เป็นที่เรียบร้อยจึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลและความรู้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณว่าที่ร้อยตรีภูวดล จันทรัตน์ที่ได้ร่วมพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการป้องกันจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุก ๆ ท่าน ที่ให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกทั้งอุปกรณ์และสถานที่เพื่อใช้ในการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ และคุณแม่ และขอบคุณนางสาวรุ่งทิวา วัฒนวราภรณ์ที่คอยสนับสนุน และเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยนี้มาโดยตลอด

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูกตเวทีแด่บูรพาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีความรู้และประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฏ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 7

1.3 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์ 7

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 7

1.5 ขั้นตอนในการทำวิทยานิพนธ์ 7

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 9

2.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Electrical distribution system) 9

2.2 การต่อโหลด 3 เฟส (Three Phase Load Connection) 11

2.3 ความผิดพร่องในระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Fault in distribution systems) 15

2.4 การเพิ่มขึ้นของศักย์ไฟฟ้าดิน (Ground potential rise) 18

2.5 หลักการเลื่อนเวลาของกระแส (Time shifting method on current wave) 20

2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์และการประยุกต์ใช้งาน 20

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 21

หน้า

บทที่ 3 การออกแบบจำลองเหตุการณ์สายไฟฟ้าขาดแล้วสัมผัสพื้นด้านภาระไฟฟ้า 23
3.1 ออกแบบการจำลองความผิดพร่องฯ ด้วยโปรแกรมประยุกต์ 23
3.2 ออกแบบการจำลองความผิดพร่องฯ ในภายห้องปฏิบัติการ 27
3.3 ออกแบบเทคนิคการตรวจจับความผิดพร่องฯ 29
3.3.1 แนวความคิดในการตรวจจับความผิดพร่องฯ 29
3.3.2 ผังงานแสดงขั้นตอนการทำงาน (Flow chart diagram) 30
3.3.3 วงจรการตรวจจับความผิดพร่องแบบสายจำหน่ายไฟฟ้าขาด 32
บทที่ 4 การจำลองความผิดพร่องเนื่องจากสายจำหน่ายไฟฟ้าขาดและวิเคราะห์ผล 35
4.1 จำลองความผิดพร่องด้วยโปรแกรมประยุกต์และวิเคราะห์ผลการจำลอง 35
4.1.1 ความผิดพร่องต่อภาระทางไฟฟ้าแบบเดลต้า (Delta load) 35
4.1.2 ความผิดพร่องต่อภาระทางไฟฟ้าแบบวาย 3 เฟส 3 สาย 41
4.1.3 ความผิดพร่องต่อภาระทางไฟฟ้าแบบวาย 3 เฟส 4 สาย 45
4.2 จำลองความผิดพร่องภายในห้องปฏิบัติการและวิเคราะห์ผลการทดลอง 48
4.3 ทดสอบตรวจจับความผิดพร่องด้วยวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ 51
4.3.1 ทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความผิดพร่องด้วยเครื่องสอบเทียบ 51
4.3.2 ทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความผิดพร่องฯ ด้วยการจำลองความผิดพร่องฯ ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าจำลอง 52
4.3.3 ผลการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับความผิดพร่องฯ 55
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 57
5.1 สรุปผลการวิจัย 57
5.2 ข้อเสนอแนะ 58
5.3 ปัญหาในการทำวิจัย 59

หน้า

รายการอ้างอิง 60

ภาคผนวก 61

ภาคผนวก ก ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย..... 62

ภาคผนวก ข ผลการจำลองความผิดพร่องแบบสายไฟฟ้าขาดแล้วสัมผัสพื้น 71

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 79

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้า เมื่อเกิดความผิดพร่องแบบต่างๆ 16

3.1 เปรียบเทียบอุปกรณ์ระบบจำหน่ายกับโมเดลการจำลองด้วยโปรแกรม ATP 25

3.2 โมเดลความผิดพร่องที่ใช้จำลองสายจำหน่ายไฟฟ้าขาดแล้วสัมผัสพื้นด้านภาระ 26

3.3 อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้จำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า ในห้องปฏิบัติการ 27

3.4 อุปกรณ์ที่ใช้จำลองความผิดพร่องฯบนชุดจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 28

4.1 แสดงผลของกระแสสาย เมื่อระบบจำหน่ายอยู่ในสภาวะปกติ 36

4.2 ผลของกระแสทั้งสามเฟส เมื่อจำลองความผิดพร่องฯลงบนเฟส “C” ณ ช่วงความยาว สายต่างๆ โดยภาระเป็นเดลต้า 38

4.3 การเปรียบเทียบเวลาของสัญญาณกระแสที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เมื่อเกิดความผิดพร่องฯ ในเฟส “C” ที่ระยะสายจำหน่ายช่วงต่างๆ 39

4.4 การวิเคราะห์การเลื่อนเวลาของกระแส เมื่อเกิดความผิดพร่องแบบสายไฟฟ้าขาด ในเฟส “A” และ “B” แล้วสัมผัสพื้นด้านภาระแบบเดลต้า 39

4.5 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขนาดของกระแส เมื่อเกิดความผิดพร่องฯในเฟส “C” แต่ละช่วงของสายจำหน่ายแล้วสัมผัสพื้นด้านภาระแบบเดลต้า 40

4.6 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขนาดของกระแส เมื่อเกิดความผิดพร่องฯ บนเฟส “A” และ “B” แล้วสัมผัสพื้นด้านภาระแบบเดลต้า 41

4.7 ข้อมูลกระแสทั้งสามเฟส เมื่อเกิดเหตุการณ์ความผิดพร่องฯบนเฟส “C” แล้วตกลงมา สัมผัสพื้นด้านภาระ แบบวาย 3 เฟส 3 สาย 43

4.8 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขนาดและการเลื่อนเวลาของกระแส เมื่อเกิดความผิดพร่องฯ ขึ้นในเฟสต่างๆ แล้วสัมผัสพื้นด้านภาระแบบวาย 3 เฟส 3 สาย 44

4.9 ข้อมูลกระแสทั้งสามเฟส เมื่อเกิดเหตุการณ์ความผิดพร่องบนเฟส “C” บนระยะสายส่ง ช่วงที่ 4 แล้วสัมผัสพื้นด้านภาระ แบบวาย 3 เฟส 4 สาย 46

4.10 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขนาดและการเลื่อนเวลาของกระแส เมื่อเกิดความผิดพร่องฯ ในเฟสต่างๆ แล้วสัมผัสพื้นด้านภาระแบบ วาย 3 เฟส 4 สาย 47

4.11 ปริมาณกระแสทั้งสามเฟส เมื่อเกิดความผิดพร่องฯ ในเฟส “C” 49

หน้า

4.12 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขนาดและการเลื่อนเวลาของกระแส เมื่อเกิดความผิดพร่องฯ
ในเฟส “C” แล้วสัมผัสพื้นด้านภาระ 50

4.13 ลักษณะเฉพาะของความผิดพร่องแบบสายจำหน่ายไฟฟ้าขาดแล้วสัมผัสพื้นด้านภาระ . 50

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

1.1 เหตุการณ์จำลองของสายตัวนำไฟฟ้าขาดแล้วสัมผัสพื้น 2

1.2 เหตุการณ์สายจ่ายไฟฟ้าขาด 3 เฟสจากสถานที่จริง 2

1.3 เหตุการณ์สายจ่ายไฟฟ้าขาด 2 เฟสจากสถานที่จริง 2

1.4 สาย SAC เสื่อมสภาพ และอาจเกิดเหตุการณ์สายขาดในลำดับต่อมาได้ 4

1.5 วงจรสมมูลกรณีสายตัวนำขาด และทิศทางการไหลของกระแสสาย 4

1.6 สถิติสายไฟฟ้าขาด แยกตามการไฟฟ้าเขตของ กฟภ. ในช่วงปี พ.ศ. 2551-2552 6

2.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง และส่วนประกอบของระบบไฟฟ้ากำลัง 10

2.2 แสดงการต่อโหลดสามเฟสแบบวาย 12

2.3 วงจรสมมูลหนึ่งเฟส กรณีที่โหลดทั้งสามเฟสเท่ากัน 12

2.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสที่มีการต่อแบบเดลต้า (Δ) 13

2.5 แสดงการต่อโหลดสามเฟสแบบเดลต้า 14

2.6 แสดงการเกิด Three Phase Fault 16

2.7 แสดงการเกิด Line to Line Fault 17

2.8 แสดงการเกิด Double Line to Ground Fault 17

2.9 แสดงการเกิด Single Line to Ground Fault 17

2.10 แสดงการเกิด Open Conductor Fault 18

2.11 แสดงการเกิด Down Conductor Fault 18

2.12 แสดงการเกิดศักย์ไฟฟ้าในพื้นดิน 19

2.13 สัญญาณของกระแสขณะเกิดความผิดพร่อง เพื่อมาอธิบายถึงการเลื่อนของเวลา 20

2.14 รูปแบบขาพอร์ตต่างๆของ PIC16F877 21

3.1 วงจรจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า รูปแบบรัศมี ระยะทาง 39.5 กิโลเมตร 24

3.2 การจำลองความผิดพร่องแบบสายจำหน่ายไฟฟ้าขาดแล้วสัมผัสลงพื้นด้านภาระ 26

หน้า

3.3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าจำลองที่ใช้ในการทดลอง 28
3.4 แสดงจุดที่เกิดความผิดพร่องในชุดจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า คือช่วงที่ 2 – 3 29
3.5 รูปแบบการตรวจจับความผิดพร่องแบบสายไฟฟ้าขาดแล้วสัมผัสพื้นด้านภาระ 29
3.6 ผังงานแสดงขั้นตอนการทำงานของการตรวจจับความผิดพร่อง 30
3.7 ผังการทำงานของหน่วยประมวลความผิดพร่องแบบสายจำหน่ายไฟฟ้าขาด 31
3.8 ภาคแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 32
3.9 ภาคการแปลงสัญญาณกระแส 32
3.10 ภาคการประมวลผลสัญญาณกระแส 33
3.11 ภาคการแจ้งเตือน 33
3.12 แบบวงจรการตรวจจับความผิดพร่องแบบสายไฟฟ้าขาด 34
3.13 วงจรการตรวจจับความผิดพร่องฯ ทั้งสามเฟสที่สมบูรณ์พร้อมใช้งาน 34
4.1 สัญญาณของกระแสสายทั้งสามเฟส ในสภาวะปกติ 35
4.2 เวกเตอร์ของกระแสสาย เมื่อระบบไฟฟ้าอยู่ในสภาวะปกติ 36
4.3 สัญญาณของกระแสสาย เมื่อเกิดความผิดพร่องฯ ขึ้นในช่วงที่ 3 ของวงจรจำหน่ายไฟฟ้า โดยภาระเป็นเดลต้า 37
4.4 ตัวอย่างเวกเตอร์กระแสสาย เมื่อระบบไฟฟ้าเกิดความผิดพร่องฯ ซึ่งภาระเป็นเดลต้า 37
4.5 สัญญาณของกระแสสาย เมื่อเกิดความผิดพร่องฯ บนช่วงที่ 4 ของวงจรจำหน่ายไฟฟ้า โดยภาระเป็นแบบวาย 3 เฟส 3 สาย 42
4.6 เวกเตอร์กระแสสาย เมื่อระบบไฟฟ้าเกิดความผิดพร่องฯ ซึ่งภาระเป็นวาย 3 เฟส 3 สาย.. 43
4.7 สัญญาณของกระแสสาย เมื่อเกิดความผิดพร่องฯ บนช่วงที่ 4 ของวงจรจำหน่ายไฟฟ้า โดยภาระเป็นแบบวาย 3 เฟส 4 สาย 45
4.8 เวกเตอร์กระแสสาย เมื่อระบบไฟฟ้าเกิดความผิดพร่องฯ ซึ่งภาระเป็นวาย 3 เฟส 4 สาย . 46
4.9 สัญญาณของกระแส เมื่อเกิดความผิดพร่องฯ ในระหว่างช่วงที่ 2 กับ 3 ของ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าจำลอง 48
4.10 วิเคราะห์ด้านการเลื่อนของเวลา เมื่อเกิดความผิดพร่องฯ ในระหว่างช่วงที่ 2 กับ 3 ของ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าจำลอง 49

หน้า

4.11 การทดลองอุปกรณ์ตรวจจับความผิดพร่องกับเครื่องสอบเทียบ 51

4.12 วงจรการทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับกับเหตุการณ์สายจำหน่ายไฟฟ้าขาดแล้วตกลงมา
สัมผัสพื้นด้านภาระแบบวาย 3 เฟส 3สาย 52

4.13 วงจรวัดสัญญาณกระแสเฟส A เทียบกับสัญญาณการทำงานของวงจรตรวจจับเฟส A .. 52

4.14 วงจรวัดสัญญาณกระแสเฟส B เทียบกับสัญญาณการทำงานของวงจรตรวจจับเฟส B .. 53

4.15 วงจรวัดสัญญาณกระแสเฟส C เทียบกับสัญญาณการทำงานของวงจรตรวจจับเฟส C .. 53

4.16 อุปกรณ์ตรวจจับความผิดพร่องฯ ที่ต่อร่วมกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าจำลอง 54

4.17 แสดงการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับความผิดพร่องฯ ณ ตำแหน่งเวลาที่สายไฟฟ้าขาด 55