

การประเมินสมรรถนะของขั้นตอนวิธีตรวจจับการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง
ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า



นายชาญชัย พงศ์สุวรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PERFORMANCE EVALUATION OF HIGH IMPEDANCE FAULT DETECTION
ALGORITHMS ON A DISTRIBUTION SYSTEM

Mr.Chanchai Pongsuwan

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 2008

Copyright of Chulalongkorn University

511120

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประเมินสมรรถนะของขั้นตอนวิธีตรวจจับการเกิด
ลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

โดย

นายชาญชัย พงศ์สุวรรณ

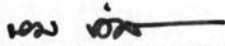
สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

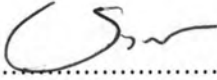
อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....  คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวรงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์)

.....  อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

.....  กรรมการ
(อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ)

ชาญชัย พงศ์สุวรรณ : การประเมินสมรรถนะของขั้นตอนวิธีตรวจจับการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงในระบบจำหน่ายไฟฟ้า. (PERFORMANCE EVALUATION OF HIGH IMPEDANCE FAULT DETECTION ALGORITHMS ON A DISTRIBUTION SYSTEM)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล, 157 หน้า.

การลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เป็นสภาวะผิดปกติที่ไม่สามารถตรวจจับได้ด้วยรีเลย์ป้องกันกระแสเกิน ซึ่งเหตุการณ์นี้เสี่ยงต่อการเกิดอัคคีภัยและเป็นอันตรายต่อชีวิต

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประเมินสมรรถนะของขั้นตอนวิธีตรวจจับการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของรีเลย์ 3 ชนิด ทดลองบนพื้นผิวชนิดต่างๆ เพื่อศึกษาคุณลักษณะของการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง โดยทดลองในระบบจำหน่ายแรงดัน 24 กิโลโวลต์ และทำการบันทึกสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่สถานีย่อยเพื่อใช้เป็นสัญญาณทดสอบการทำงานของรีเลย์ที่มีความสามารถในการตรวจจับการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิติต ชาญณรงค์.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2551

4870270421 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : HIGH IMPEDANCE FAULT / BROKEN AND DOWNED CONDUCTORS/
FAULT DETECTION

CHANCHAI PONGSUWAN : PERFORMANCE EVALUATION OF HIGH
IMPEDANCE FAULT DETECTION ALGORITHMS ON A DISTRIBUTION SYSTEM.

ADVISOR : CHANNARONG BANMONGKOL, D.Eng. 157 pp.

High impedance faults (HIFs) on a distribution system are abnormal conditions that cannot be detected by overcurrent protection relays. These faults pose a risk of fires and a threat on human lives.

This thesis presents the performance evaluation of high impedance fault detection algorithms of 3 HIF relays. Experiments of HIFs on different surfaces have been performed to study the characteristics of HIFs occurring in a 24 kV distribution system. The current signals during HIFs are measured at a substation and used to test the operation of the HIF relays. The performance of the HIF relays is discussed.

Department : Electrical Engineering

Student's Signature *chanchai pongsuwan*

Field of Study : Electrical Engineering

Advisor's Signature *Chang*

Academic Year : 2008

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถอย่างดียิ่งจากอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ คือ อาจารย์ ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล ที่ได้ให้คำปรึกษา ปรับปรุงแก้ไขปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์จนแล้วเสร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ และอาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ ที่เสียสละเวลาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกท่านที่ทำงานอยู่ฝ่ายวิจัยและพัฒนา, ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า การไฟฟ้านครหลวง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณอนุชา หริรักษ์ วิศวกรไฟฟ้า 6 และคุณจตุพร ธรรมเจริญ วิศวกรไฟฟ้า 6 ที่ให้ความอนุเคราะห์ในข้อมูลที่เป็นประโยชน์ รวมทั้งทุ่มเทร่างกายและแรงใจในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตลอดจนผู้บังคับบัญชาทุกท่านที่ได้มอบโอกาสในการศึกษา วิจัยจนสำเร็จ

สำหรับคุณความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้บิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่งตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า จึงขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. การลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง.....	4
2.1 คุณลักษณะของการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง.....	4
2.2 รูปแบบการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง.....	5
2.2.1 สายตัวนำไฟฟ้ามีการสัมผัสกับวัตถุอื่น.....	5
2.2.2 สายตัวนำไฟฟ้าขาดสัมผัสพื้น.....	9
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดอาร์กและสายตัวนำไฟฟ้าขาด.....	11
2.3.1 สายตัวนำไฟฟ้าหุ้มฉนวน.....	11
2.3.2 สายตัวนำไฟฟ้าเปลือยขนาดเล็ก.....	12
2.4 การจำแนกเหตุการณ์สายตัวนำไฟฟ้าขาด.....	12
2.4.1 สายตัวนำไฟฟ้าขาดสัมผัสพื้นด้านแหล่งจ่าย.....	12
2.4.2 สายตัวนำไฟฟ้าขาดสัมผัสพื้นด้านโหลด.....	17
2.5 คุณลักษณะของอาร์ก.....	20
2.5.1 คุณลักษณะของการลัดวงจรโดยมีอาร์กในโดเมนเวลา.....	20
2.5.2 คุณลักษณะของการลัดวงจรโดยมีอาร์กในโดเมนความถี่.....	21

บทที่	หน้า
2.6 ชนิดของสายตัวนำไฟฟ้าในระบบจำหน่ายของ กฟน.....	22
2.6.1 สายสำหรับระบบแรงดัน 69 และ 115 กิโลโวลต์.....	22
2.6.2 สายสำหรับระบบแรงดัน 12 และ 24 กิโลโวลต์.....	22
2.6.2.1 สายเปลือย.....	22
2.6.2.2 สายหุ้มฉนวนบางส่วน.....	23
2.6.2.3 สาย Spaced aerial cable.....	24
2.6.2.4 สาย Preassembly aerial cable.....	25
2.7 ความยาวสายตัวนำในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง.....	26
3. เทคนิคขั้นต้นวิธีตรวจจับการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง.....	29
3.1 เงื่อนไขทางไฟฟ้าที่ใช้ในการตรวจจับ.....	29
3.1.1 สายตัวนำขาด.....	29
3.1.2 สายตัวนำหย่อน.....	29
3.1.3 สายตัวนำมีการสัมผัสกับวัตถุอื่น.....	30
3.2 วิธีการตรวจจับเหตุการณ์ลัดวงจร.....	30
3.2.1 กลุ่มเทคนิควิธีการตรวจจับ.....	30
3.2.2 ความเป็นไปได้ในการตรวจจับ.....	31
3.3 ความไวในการตรวจจับ.....	32
3.4 ความครอบคลุมในการตรวจจับ.....	34
3.5 จุดมุ่งหมายของการตรวจจับการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง.....	35
3.6 เงื่อนไขที่บ่งบอกสภาวะที่ไม่ปลอดภัย.....	35
3.7 ตำแหน่งการเกิดลัดวงจร.....	36
3.8 การจัดความสัมพันธ์ร่วมกับการป้องกันกระแสเกิน.....	36
3.9 ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจจับการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงและเหตุการณ์ สายตัวนำขาด.....	37
3.9.1 ขั้นตอนวิธีการตรวจจับ.....	37
3.9.1.1 การตรวจจับโดยใช้ขนาดของกระแสฮาร์มอนิกที่สามและมุมเฟส....	37
3.9.1.2 การตรวจจับโดยอาศัยองค์ประกอบฮาร์มอนิก.....	39
3.9.1.3 การตรวจจับจากเฟสเซอร์ของฮาร์มอนิกที่สาม.....	40

บทที่	หน้า
3.9.1.4 การตรวจจับโดยใช้การเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงาน.....	41
3.9.1.5 ขั้นตอนวิธีการตรวจจับโดยใช้หลักการแบบสุ่ม.....	43
3.9.1.6 การตรวจจับโดยการแยกปริมาณกระแสไฟฟ้าลัดวงจร.....	44
3.9.1.7 การตรวจจับโดยวิเคราะห์รูปแบบการเกิดอาร์กแบบทันทีทันใด.....	44
3.9.1.8 การตรวจจับเหตุการณ์สายตัวนำไฟฟ้าขาดโดยใช้เทคนิคเวฟ เล็ตทราเน็ลโฟร์ม.....	45
3.9.1.9 การตรวจจับเหตุการณ์สายตัวนำขาดด้วยวิธีทางกล.....	45
3.10 หลักการทำงานและรายละเอียดอุปกรณ์ ของรีเลย์ที่มีความสามารถตรวจจับการ ลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง ที่นำมาทดสอบติดตั้งใช้งานในระบบจำหน่ายของ กฟน.	46
3.10.1 หลักการทำงานของรีเลย์ชนิด A.....	46
3.10.2 หลักการทำงานของรีเลย์ชนิด B.....	53
3.10.2.1.Energy algorithm.....	54
3.10.2.2 Randomness algorithm.....	55
3.10.2.3 Expert arc detector algorithm (EAD).....	56
3.10.2.4 Load event detector algorithm.....	57
3.10.2.5 Load analysis algorithm.....	57
3.10.2.6 Load extraction algorithm & arc burst pattern analysis.....	57
3.10.2.7 Spectral analysis algorithm.....	58
3.10.2.8 Arcing suspected.....	59
3.10.2.9 ขั้นตอนการตัดสินใจและวิเคราะห์เหตุการณ์การลัดวงจร.....	59
3.10.3 หลักการทำงานของรีเลย์ชนิด C.....	60
3.10.3.1 Sum of difference current (SDI).....	61
3.10.3.2 ชุดคำนวณค่าเฉลี่ย (IIR limiting averager).....	63
3.10.3.3 ชุดจัดการหน่วยความจำและตรวจจับแนวโน้ม (Trending and memory).....	65
3.10.3.4 Adaptive tuning.....	67

บทที่	หน้า
3.10.3.5 ชุดตัดสินใจ (Decision logic).....	68
4. จำลองการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงในระบบจำหน่ายของ กฟน.	71
4.1 การจำลองการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง.....	71
4.1.1 กรณีศึกษาเหตุการณ์สายตัวนำไฟฟ้าขาด.....	71
4.1.2 การจำลองการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง.....	73
4.1.2.1 ข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า.....	73
4.1.2.2 แบบจำลองกรณีสายตัวนำไฟฟ้าขาดตกสัมผัสพื้นด้านแหล่งจ่าย.....	74
4.1.2.3 แบบจำลองกรณีสายตัวนำไฟฟ้าขาดตกสัมผัสพื้นด้านโหลด.....	79
5. การทดลองเหตุการณ์ลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงในระบบจำหน่ายของ กฟน.....	85
5.1 การทดลองการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง.....	85
5.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	89
6. ผลการทดลอง.....	96
6.1 ผลทดลองการตรวจจับการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง.....	96
6.2 การวิเคราะห์สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองเหตุการณ์ลัดวงจรแบบ อิมพีแดนซ์ค่าสูงในระบบจำหน่ายของ กฟน.	100
6.2.1 สภาวะปกติของระบบจำหน่าย.....	117
6.2.2 กรณีรีเลย์ชนิด A และ B ส่งสัญญาณทริป.....	122
6.2.3 กรณีรีเลย์ชนิด B และ C ส่งสัญญาณทริป.....	127
6.2.4 กรณีรีเลย์ชนิด A และ C ส่งสัญญาณทริป.....	133
7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	139
7.1 ข้อสรุป.....	139
7.2 ปัญหาและอุปสรรค.....	141
7.3 ข้อเสนอแนะ.....	141
รายการอ้างอิง.....	142
ภาคผนวก.....	145
ก. ขั้นตอนการทดลองการเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรในระบบจำหน่ายไฟฟ้าการไฟฟ้า นครหลวง.....	146
ข. สถิติสายป้อนอากาศในเขตจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง.....	156
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	157

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่มีลักษณะแตกต่างกัน.....	13
2.2 คุณสมบัติต่างๆของสายเปลือยในระบบแรงดัน 12 และ 24 กิโลโวลต์.....	23
2.3 คุณสมบัติต่างๆของสายหุ้มฉนวนบางส่วนในระบบแรงดัน 12 และ 24 กิโลโวลต์.....	24
2.4 คุณสมบัติต่างๆของสาย spaced aerial cable ในระบบแรงดัน 12 และ 24 กิโลโวลต์.....	25
2.5 คุณสมบัติต่างๆของสาย preassembly aerial cable ในระบบแรงดัน 24 กิโลโวลต์.....	25
2.6 ความยาวของสายตัวนำในระบบจำหน่ายของ กฟน. สถานะถึงเดือน มกราคม 2552.....	26
2.7 สรุปสาเหตุการเกิดลัดวงจรในพื้นที่จำหน่ายไฟฟ้าของ กฟน.ปี2001 -2007.....	27
3.1 ความเป็นไปได้ในการนำวิธีการตรวจจับเหตุการณ์สายตัวนำไฟฟ้าขาดในแต่ ละกลุ่มตามเงื่อนไขทางไฟฟ้าที่แบ่งตามชนิดของการลัดวงจรกรณีที่ 1 ถึง 8...	32
3.2 การตั้งค่าทำงานของรีเลย์ชนิด A.....	52
3.3 การตั้งค่า arc sensitivity.....	56
3.4 เงื่อนไขการตัดสินใจของรีเลย์ชนิด B.....	60
4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า.....	73
4.2 การเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงที่เกิดจากสายตัวนำขาดตกพื้นด้าน แหล่งจ่ายโดยความต้านทานทางพื้นผิวคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่า360 โอห์ม.....	77
4.3 การเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงที่เกิดจากสายตัวนำขาดด้านโหลดโดย ความต้านทานพื้นผิวคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่า360 โอห์ม.....	82
4.4 ค่าความต้านทานของพื้นผิวชนิดต่างๆ.....	83
5.1 รูปแบบการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง วันที่ 9 กรกฎาคม 2551.....	90
5.2 รูปแบบการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง วันที่ 3 ธันวาคม 2551.....	92
5.3 รูปแบบการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง วันที่ 4 ธันวาคม 2551.....	94
6.1 ผลการทดสอบรีเลย์ทั้ง 3 ชนิด โดยใช้สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองใน วันที่ 9 กรกฎาคม 2551.....	97

ตารางที่	หน้า
6.2 ผลการทดสอบบรีเลย์ทั้ง 3 ชนิด โดยใช้สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองใน วันที่ 3 ธันวาคม 2551.....	98
6.3 ผลการทดสอบบรีเลย์ทั้ง 3 ชนิด โดยใช้สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองใน วันที่ 4 ธันวาคม 2551.....	99
ก.1 รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในแบบการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อใช้ในการทดลอง.....	155
ข.1 สถิติการเกิดสายป้อนขาดแยกตามเขตพื้นที่บริการของการไฟฟ้านครหลวง....	156

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ต้นไม้สัมผัสกับสายตัวนำไฟฟ้าทำให้เกิดรอยไหม้.....	6
2.2 รอยไหม้จะเริ่มก่อตัวขึ้นจากจุดสัมผัสทั้ง 2 จุด	6
2.3 กระบวนการสร้างรอยไหม้ทำให้เกิดไอน้ำและควัน.....	7
2.4 เกิดอาร์กเมื่อรอยไหม้เชื่อมต่อกันสมบูรณ์.....	7
2.5 ปริมาณกระแสไฟฟ้าเมื่อสายตัวนำสัมผัสต้นไม้.....	8
2.6 รูปแบบการไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่อเกิดเหตุการณ์สายตัวนำไฟฟ้าขาดสัมผัสพื้น ทราย.....	10
2.7 ความร้อนจากการเกิดอาร์กทำให้ทรายหลอมละลายกลายเป็นแก้วซึ่งมีความเป็น ฉนวนสูง.....	10
2.8 การเคลื่อนที่ของอาร์ก	11
2.9 ฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าเสื่อมสภาพ.....	11
2.10 สายตัวนำไฟฟ้าขาดสัมผัสพื้นด้านแหล่งจ่าย.....	12
2.11 ปริมาณกระแสไฟฟ้าของสภาพเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดกับสายบ่อนในระบบ จำหน่าย.....	13
2.12 การเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงบนพื้นคอนกรีต.....	14
2.13 การเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงบนพื้นทราย.....	15
2.14 การเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงบนพื้นยางมะตอย.....	15
2.15 สายไฟฟ้าขาดเป็นอันตรายต่อประชาชนที่สัญจรผ่าน.....	16
2.16 สายตัวนำไฟฟ้าขาดสัมผัสพื้นด้านโหลด.....	17
2.17 ลักษณะวงจรเมื่อเกิดสายตัวนำไฟฟ้าขาดแล้วตกลงบนพื้นทางด้านโหลด.....	18
2.18 วงจรที่ใช้ในการพิจารณากระแสไฟฟ้าลัดวงจรโดยมีผลของ load impedance effects.....	19
2.19 ลักษณะกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่า สูง.....	20
2.20 ตัวอย่างสเปกตรัมของการลัดวงจรแบบมีอาร์ก.....	21
2.21 สายอลูมิเนียมเปลือย.....	22
2.22 สายไฟฟ้าหุ้มฉนวนบางส่วน.....	23

รูปที่	หน้า
2.23 สาย spaced aerial cable.....	24
2.24 สาย preassembly aerial cable.....	25
3.1 คุณลักษณะของกระแสไฟฟ้ากับเวลาการทำงานของรีเลย์.....	33
3.2 วิธีการตรวจจับเพียงวิธีเดียวจะครอบคลุมการเกิดลัดวงจรบางกรณี.....	34
3.3 วิธีการตรวจจับมากกว่า 1 รูปแบบ สามารถครอบคลุมการเกิดลัดวงจรได้ ทั้งหมด.....	35
3.4 แท่งการรัดถูกแขวนด้วย Hot Stick ติดตั้งอยู่กลางช่วงระหว่างเสา.....	45
3.5 ขั้นตอนวิธีการตรวจจับการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์สูงของรีเลย์ชนิด A.....	47
3.6 higher order statistics.....	48
3.7 ขั้นตอนการตรวจจับโดยใช้ wavelet.....	49
3.8 ขั้นตอนการตรวจจับโดยใช้ neural network.....	50
3.9 แสดงวงจรการต่อใช้งานของรีเลย์ชนิด A.....	51
3.10 แสดงวงจรการต่อบล็อกไดอะแกรมภายในของรีเลย์ชนิด A.....	51
3.11 หน้าต่างแสดงการเลือกใช้งานโหมดตรวจจับลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง.....	52
3.12 หน้าต่างการตั้งค่าการทำงานโหมดตรวจจับลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง.....	53
3.13 หลักการทำงานของรีเลย์ชนิด B.....	53
3.14 Energy algorithm.....	54
3.15 Randomness algorithm.....	55
3.16 Load extraction.....	58
3.17 Arc burst pattern.....	58
3.18 Spectrum Analysis.....	59
3.19 ขั้นตอนการทำงานของรีเลย์ชนิด C.....	61
3.20 การคำนวณหาค่าผลรวมความต่างของกระแสไฟฟ้า(SDI).....	62
3.21 การคำนวณหาสัญญาณ SDI ในโดเมนเวลา.....	62
3.22 ผลตอบสนองต่อความถี่ถึงฮาร์มอนิกอันดับที่สี่.....	63
3.23 ชุดการทำงานของ IIR input limiting averager.....	64
3.24 บล็อกไดอะแกรมของชุดจัดการหน่วยความจำและตรวจจับแนวโน้ม.....	66
3.25 Adaptive tuning function.....	67

รูปที่	หน้า
3.26 ขั้นตอนการทำงานของชุดตัดสืนใจ.....	69
3.27 ย่านการนับสำหรับการลัดวงจรและการเตือน.....	70
4.1 แผนผังแสดงจุดเกิดเหตุสายตัวนำไฟฟ้าขาดตกพื้น.....	72
4.2 สภาพพื้นที่ที่พบสายตัวนำไฟฟ้าขาดตกพื้น.....	72
4.3 แบบจำลองกรณีสายตัวนำไฟฟ้าขาดตกพื้นด้านแหล่งจ่าย.....	74
4.4 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้า จุดตรวจวัดจุดที่ 1.....	74
4.5 ปริมาณกระแสไฟฟ้า(อาร์เอ็มเอส) จุดตรวจวัดจุดที่ 1.....	75
4.6 รูปขยายรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าช่วงที่สายเริ่มขาดแต่ยังไม่สัมผัสพื้น จุดตรวจวัดจุดที่ 1.....	75
4.7 รูปขยายรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรช่วงที่สายสัมผัสพื้นด้านแหล่งจ่าย จุดตรวจวัดจุดที่ 1.....	76
4.8 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ณ ตำแหน่งที่สายสัมผัสพื้น จุดตรวจวัดจุดที่ 2.....	76
4.9 ปริมาณกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (อาร์เอ็มเอส) ช่วงที่สายสัมผัสพื้นด้านแหล่งจ่าย จุดตรวจวัดจุดที่ 1.....	77
4.10 แบบจำลองกรณีเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงโดยสายตัวนำไฟฟ้าขาด สัมผัสพื้นด้านโหลด.....	79
4.11 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้า จุดตรวจวัดจุดที่ 1.....	79
4.12 ปริมาณกระแสไฟฟ้า(อาร์เอ็มเอส) จุดตรวจวัดจุดที่ 1.....	80
4.13 รูปขยายรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าช่วงที่สายเริ่มขาดแต่ยังไม่สัมผัสพื้น จุดตรวจวัดจุดที่ 1.....	80
4.14 ปริมาณกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (อาร์เอ็มเอส) ช่วงที่สายสัมผัสพื้นด้านโหลด จุดตรวจวัดจุดที่ 1.....	81
4.15 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ณ ตำแหน่งที่สายสัมผัสพื้น จุดตรวจวัดจุดที่2.....	81
4.16 ปริมาณกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเทียบกับพื้นผิวชนิดต่างๆ.....	84
5.1 สถานที่ที่ทดลองเหตุการณ์ลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง.....	86
5.2 วิธีการทดลองการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง.....	87
5.3 การควบคุมสายตัวนำไฟฟ้าสัมผัสพื้นผิวทดสอบโดยใช้รถกระเช้า.....	87
5.4. กลุ่มงานบันทึกสัญญาณไฟฟ้าที่สถานีย่อยนนทบุรี.....	88

รูปที่	หน้า
5.5 กลุ่มงานจำลองเหตุการณ์ลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง.....	88
5.6 รูปแบบการทดลองการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงด้านแหล่งจ่าย.....	89
5.7 รูปแบบการทดลองการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงทางด้านโหลด.....	90
5.8 พื้นคอนกรีต ลัดวงจรด้านโหลด หม้อแปลงไม่มีโหลด.....	91
5.9 พื้นคอนกรีต ลัดวงจรด้านโหลด หม้อแปลงมีโหลด.....	91
5.10 สายตัวนำไฟฟ้าสัมผัสพื้นกรวด ไม่มีอาร์กเกิดขึ้น.....	93
5.11 สายตัวนำไฟฟ้าสัมผัสพื้นยางมะตอย ไม่มีอาร์กเกิดขึ้น.....	93
5.12 สายตัวนำไฟฟ้าสัมผัสต้นไม้ เกิดอาร์กและมีการลุกไหม้.....	95
6.1 เครื่องทดสอบบริเลย์ OMICRON รุ่น CMC 256 – 6.....	96
6.2 สัญญาณกระแสเฟสและนิวทรัลเมื่อรองความถี่มูลฐานออก การทดลองที่ 1 วันที่ 9 กรกฎาคม 2551.....	102
6.3 รูปคลื่นกระแสเฟสของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ การทดลองที่ 1 วันที่ 9 กรกฎาคม 2551.....	103
6.4 รูปคลื่นกระแสนิวทรัลของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ การทดลองที่ 1 วันที่ 9 กรกฎาคม 2551.....	104
6.5 สัญญาณกระแสเฟสและนิวทรัลเมื่อรองความถี่มูลฐานออก การทดลองที่ 2 วันที่ 9 กรกฎาคม 2551.....	105
6.6 รูปคลื่นกระแสเฟสของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ การทดลองที่ 2 วันที่ 9 กรกฎาคม 2551.....	106
6.7 รูปคลื่นกระแสนิวทรัลของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ การทดลองที่ 2 วันที่ 9 กรกฎาคม 2551.....	107
6.8 สัญญาณกระแสเฟสและนิวทรัลเมื่อรองความถี่มูลฐานออก การทดลองที่ 8 วันที่ 3 ธันวาคม 2551.....	108
6.9 รูปคลื่นกระแสเฟสของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ การทดลองที่ 8 วันที่ 3 ธันวาคม 2551.....	109
6.10 รูปคลื่นกระแสนิวทรัลของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ การทดลองที่ 8 วันที่ 3 ธันวาคม 2551.....	110
6.11 สัญญาณกระแสเฟสและนิวทรัลเมื่อรองความถี่มูลฐานออก การทดลองที่ 9 วันที่ 3 ธันวาคม 2551.....	111

รูปที่	หน้า
6.12 รูปคลื่นกระแสเฟสของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ การทดลองที่ 9 วันที่ 3 ธันวาคม 2551.....	112
6.13 รูปคลื่นกระแสนิวทรัลของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ การทดลองที่ 9 วันที่ 3 ธันวาคม 2551.....	113
6.14 สัญญาณกระแสเฟสและนิวทรัลเมื่อกรองความถี่มูลฐานออก การทดลองที่ 7 วันที่ 4 ธันวาคม 2551.....	114
6.15 รูปคลื่นกระแสเฟสของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ การทดลองที่ 7 วันที่ 4 ธันวาคม 2551.....	115
6.16 รูปคลื่นกระแสนิวทรัลของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ การทดลองที่ 7 วันที่ 4 ธันวาคม 2551.....	116
6.17 สัญญาณกระแสเฟสและนิวทรัลเมื่อกรองความถี่มูลฐานออก ในสภาวะปกติของระบบจำหน่าย.....	118
6.18 รูปคลื่นกระแสเฟสของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ในสภาวะปกติของระบบจำหน่าย.	119
6.19 รูปคลื่นกระแสนิวทรัลของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ในสภาวะปกติของระบบจำหน่าย.....	120
6.20 การต่อหม้อแปลงกระแสที่สถานีย่อยของการไฟฟ้านครหลวง.....	121
6.21 การทดลองลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงบนพื้นคอนกรีตซ้อนคั่นด้วยทราย (sandwich).....	122
6.22 สัญญาณกระแสเฟสและนิวทรัลเมื่อกรองความถี่มูลฐานออก การทดลองที่ 11 วันที่ 3 ธันวาคม 2551.....	124
6.23 รูปคลื่นกระแสเฟสของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ การทดลองที่ 11 วันที่ 3 ธันวาคม 2551.....	125
6.24 รูปคลื่นกระแสนิวทรัลของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ การทดลองที่ 11 วันที่ 3 ธันวาคม 2551.....	126
6.25 การทดลองลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงบนพื้นคอนกรีตซ้อนคั่นด้วยทราย (sandwich).....	127
6.26 สัญญาณกระแสเฟสและนิวทรัลเมื่อกรองความถี่มูลฐานออก การทดลองที่ 1 วันที่ 4 ธันวาคม 2551.....	129

รูปที่	หน้า
6.27 รูปคลื่นกระแสเฟสของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ การทดลองที่ 1 วันที่ 4 ธันวาคม 2551.....	130
6.28 รูปคลื่นกระแสนิวทรัลของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ การทดลองที่ 1 วันที่ 4 ธันวาคม 2551.....	131
6.29 การเปลี่ยนแปลงค่า SDI รีเลย์ชนิด C การทดลองที่ 1 วันที่ 4 ธันวาคม 2551....	132
6.30 การทดลองลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงบนพื้นคอนกรีตซ้อนกันด้วยทราย (sandwich).....	133
6.31 สัญญาณกระแสเฟสและนิวทรัลเมื่อกรองความถี่มูลฐานออก การทดลองที่ 2 วันที่ 4 ธันวาคม 2551.....	135
6.32 รูปคลื่นกระแสเฟสของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ การทดลองที่ 2 วันที่ 4 ธันวาคม 2551.....	136
6.33 รูปคลื่นกระแสนิวทรัลของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ การทดลองที่ 2 วันที่ 4 ธันวาคม 2551.....	137
6.34 การเปลี่ยนแปลงค่า SDI รีเลย์ชนิด C การทดลองที่ 2 วันที่ 4 ธันวาคม 2551....	138
ก.1 แผนภาพภูมิศาสตร์แสดงตำแหน่งการทดลองและสถานีย่อยนนทบุรี.....	146
ก.2 แสดงสถานที่ทดลองสายไฟฟ้าขาด.....	147
ก.3 ระยะทางจากสถานีย่อยนนทบุรีสายป้อน NR – 424 ถึงตำแหน่งทดลอง.....	148
ก.4 การจำลองระบบไฟฟ้าเพื่อคำนวณหาปริมาณกระแสไฟฟ้าลัดวงจรชนิด 1 เฟส...	148
ก.5 สัญญาณกระแสไฟฟ้าลัดวงจร.....	149
ก.6 กรณีการเกิดลัดวงจรชนิด 1 เฟส โดยมีค่าความต้านทานที่จุดลัดวงจร.....	149
ก.7 การจำลองระบบไฟฟ้าเพื่อคำนวณหาปริมาณกระแสไฟฟ้าลัดวงจรด้านโหลด.....	150
ก.8 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกรณีโหลดหม้อแปลงจำหน่าย 20%.....	150
ก.9 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกรณีโหลดหม้อแปลงจำหน่าย 50%.....	151
ก.10 คุณลักษณะการทำงานของฟิวส์ชนิด K.....	152
ก.11 คุณลักษณะการทำงานของฟิวส์และรีเลย์โหมดการทำงานแบบ over current (OC).....	153
ก.12 คุณลักษณะการทำงานของฟิวส์และรีเลย์โหมดการทำงานแบบ earth fault (EF).....	153

รูปที่	หน้า
ก.13 กำหนดตำแหน่งอุปกรณ์ที่ติดตั้งและบุคคลร่วมทดลอง.....	154
ก.14 แบบการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อใช้ในการทดลอง.....	155