ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
242270

อัตถอรรถีผลของการป้องกันแบบแสดท่าเพื่อเสริมความทนทานต่อการนิคเพ็ยนของสัญญาณกระแส

นายนพดล ฉาบแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาครุศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง อัลกอริธึมของการป้องกันแบบผลต่างเพื่อเสริมความทนทานต่อการผิดเพี้ยนของสัญญาณกระแส

โดย นายนพดล ฉาบแก้ว

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

_____คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงษ์)

26 พฤศจิกายน 2553

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

_____ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรธรรม บุณยะกุล)

_____กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพร สิริสำราญนุกูล)

_____กรรมการ
(อาจารย์ ดร.เชิดชัย ประภานวรัตน์)

_____กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ธนพงศ์ สุวรรณศรี)

_____กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อานันทวัฒน์ คุณากร)

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
242270

อัลกอริธึมของการป้องกันแบบผลต่างเพื่อเสริมความทนทานต่อการผิดเพี้ยนของสัญญาณกระแส

นายนพดล ฉาบแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นายนพดล ฉาบแก้ว
ชื่อวิทยานิพนธ์ : อัลกอริธึมของการป้องกันแบบผลต่างเพื่อเสริมความทนทานต่อการผิดเพี้ยนของสัญญาณกระแส
สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรธรรม บุณยะกุล
ปีการศึกษา : 2553

242270

บทคัดย่อ

รีเลย์ป้องกันมีหน้าที่ตรวจจับความผิดพร่องในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อที่จะส่งสัญญาณไปให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำการตัดส่วนที่ผิดพร่องออกจากระบบไฟฟ้า ในขณะเดียวกันหากไม่มีความผิดพร่องใด ๆ เกิดขึ้น รีเลย์จะต้องไม่สั่งปลดส่วนที่ดีนั้นออกจากระบบ เพราะการปลดวงจรโดยไม่จำเป็นจะส่งผลให้เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าลดลง การผิดเพี้ยนของสัญญาณกระแสเป็นสาเหตุหนึ่งของการทำงานที่ผิดพลาดของรีเลย์ โดยเฉพาะกับรีเลย์ผลต่าง ซึ่งใช้สัญญาณกระแสในการประเมินสถานะของอุปกรณ์ การผิดเพี้ยนของสัญญาณกระแสส่งผลให้การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างอยู่บนพื้นฐานของข้อมูลที่ผิดเพี้ยนเช่นกัน งานวิจัยนี้ได้คิดค้นอัลกอริธึมที่สามารถช่วยลดผลกระทบของการผิดเพี้ยนของสัญญาณกระแสที่มีต่อรีเลย์ผลต่าง อัลกอริธึมได้รับการทดสอบด้วยสัญญาณในหลากหลายกรณี ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าอัลกอริธึมมีความคงทนต่อการผิดเพี้ยนของสัญญาณกระแส รีเลย์ผลต่างที่ใช้อัลกอริธึมนี้สามารถตัดสินใจได้อย่างถูกต้อง

ระบบป้องกันไฟฟ้ากำลังที่ดี นอกจากจะมีรีเลย์ที่ทำงานได้อย่างถูกต้องแล้ว ยังจะต้องมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แยกส่วนที่มีความผิดพร่องออกจากระบบ เซอร์กิตเบรกเกอร์เป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการตัดกระแสที่ผิดพร่อง ระบบป้องกันจะล้มเหลวหากเซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน วิทยานิพนธ์นี้จึงคิดค้นวิธีการตรวจสภาพของเซอร์กิตเบรกเกอร์ว่าอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์หรือไม่ สิ่งเหล่านี้จะช่วยให้ระบบป้องกันทำงานได้อย่างสมบูรณ์ทั้งอุปกรณ์ปฐมภูมิและอุปกรณ์ทุติยภูมิ

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 215 หน้า)

คำสำคัญ : รีเลย์ผลต่าง หม้อแปลงกระแส การอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง เซอร์กิตเบรกเกอร์ การแปลงเวฟเลท

_____อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : Mr.Noppadol Charbkaew
Thesis Title : Enhanced Differential Protection Algorithm Immune to Distorted Current Signals
Major Field : Electrical Engineering
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Assistant Professor Dr.Teratam Bunyagul
Academic Year : 2010

242270

Abstract

The main function of protective relay is to detect the fault. Then send the trip signal to corresponding circuit breaker. After the opening of circuit breaker, the faulted part is separated. On the other hand, the healthy component must not be tripped by the relay. The unnecessary tripping causes of the lower power system stability. The current distortion is one of the causes, which leads to the incorrect-decision of a relay, particularly for a current differential relay which uses current signals in a fault detection process. This research proposes the algorithm which immunes to the current distortion. The proposed algorithm is tested in many situations. The test signals are obtained from both real fault current signals and from computer simulations. The test result indicates that the algorithm works with the high immunity to the current distortion. In addition the relay generates a trip signal only in the case of internal faults.

To maintain the trustful protection system, not only the good relay is required. The reliable circuit breaker is also the vitally needed device. This thesis also proposes the condition assessment method. The vibration of circuit breaker is analyzed by wavelet transform. After the experiment and testing, the results indicate that the proposed method can indicate the condition of circuit breaker. The advantage of the proposed method is the assessment can be performed without disassembling of circuit breaker.

(Total 215 pages)

Keywords : Differential Relay, Current Transformer, CT-Saturation, Electrical Power System Protection, Circuit Breaker, Wavelet Transform

Teratam Bunyagul. Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เป็นเพราะได้รับการสนับสนุนจากหลาย ๆ ฝ่าย ไม่ว่าจะเป็นบุพการีของข้าพเจ้า ที่ให้การดูแลและให้การสนับสนุนตลอดมาในทุกด้าน ทั้งด้านทางกายและจิตใจ และที่จะลืมไม่ได้คือครูและอาจารย์ทุกท่านที่ได้มอบวิชาความรู้แก่ข้าพเจ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรธรรม บุณยะกุล ท่านมิได้ให้แต่ความรู้ที่จำเป็นต่อการประกอบอาชีพเท่านั้น แต่ยังได้มอบสิ่งที่สำคัญยิ่งกว่าความรู้ สิ่งนั้นคือ “วิธีการสร้างความรู้” ความสามารถสร้างความรู้ได้เป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนา พัฒนาในที่นี้ไม่ใช่เพียงแค่พัฒนาด้านเทคโนโลยี แต่เป็นการพัฒนาในทุก ๆ ด้าน ทั้งพัฒนาตนเอง สถานที่ กระบวนการในการทำงานและอื่น ๆ อีกมากมาย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษาและข้อมูลที่จำเป็นอย่างยิ่งต่องานวิจัยชิ้นนี้

การวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนบางส่วนจากทุนอุดหนุนการวิจัย เพื่อทำวิทยานิพนธ์สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จึงขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยมา ณ ที่นี้

นพดล ฉาบแก้ว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 รีเลย์ป้องกันผลต่าง	5
2.2 หลักการพื้นฐานของรีเลย์ป้องกันแบบกระแสผลต่างร้อยละ (Percentage Differential Relay)	6
2.3 รีเลย์ผลต่างกับการป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	9
2.4 รีเลย์ป้องกันผลต่างกับการป้องกันหม้อแปลงกำลัง	10
2.5 รีเลย์ป้องกันผลต่างกับการป้องกันบัสบาร์	12
2.6 หม้อแปลงกระแส	13
2.7 ข้อกำหนดคุณสมบัติของหม้อแปลงกระแสในสภาวะคงตัว	16
2.8 ข้อกำหนดคุณสมบัติของหม้อแปลงกระแสในสภาวะชั่วครู่	18
2.9 การอิ่มตัวของแกนหม้อแปลงกระแส	19
2.10 การประมวลผลสัญญาณเบื้องต้น	22
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาการผิดเพี้ยนของสัญญาณกระแส	27
2.12 การปรับปรุงสัญญาณกระแสให้กลับมีสภาพดีดังเดิม	32
บทที่ 3 อัลกอริธึมของรีเลย์ผลต่างที่มีความทนทานต่อการผิดเพี้ยนของสัญญาณกระแส	37
3.1 บทนำ	37
3.2 การคัดเลือกสัญญาณที่มีคุณภาพดี	40
3.3 การคำนวณหาขนาดและมุมของสัญญาณ	40
3.4 การบ่งชี้ถึงสัญญาณคุณภาพดี	43
3.5 การคัดสรรสัญญาณคุณภาพดี	48
3.6 การทดสอบการคำนวณหาค่าขนาดและมุมของสัญญาณกระแส	50
3.7 การประยุกต์ใช้อัลกอริธึมกับรีเลย์ผลต่างร้อยละ	58

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.8 การจำแนกชนิดของเหตุผิดพร่อง	62
บทที่ 4 การทดสอบอัลกอริธึมสำหรับรีเลย์ผลต่าง	67
4.1 การทดสอบโดยใช้สัญญาณจากแบบจำลอง	68
4.2 การทดสอบอัลกอริธึมโดยใช้สัญญาณจากการทดสอบหม้อแปลงกระแสจริง	103
4.3 การทดสอบอัลกอริธึมโดยใช้สัญญาณจากสัญญาณที่ได้จากการบันทึกของรีเลย์ป้องกันขณะเกิดเหตุผิดพร่องจริง	120
บทที่ 5 การตรวจสอบสภาพของเซอร์กิตเบรกเกอร์	127
5.1 การแปลงเวฟเลท	127
5.2 วิธีการแปลข้อมูลจากสัญญาณเวฟเลท	130
5.3 การแปลงสัญญาณเวฟเลทของสัญญาณสั่นสะเทือนในกรณีต่าง ๆ	131
บทที่ 6 สรุปผลงานวิจัย	137
6.1 อัลกอริธึมของการป้องกันแบบผลต่างเพื่อเสริมความทนทานต่อการผิดเพี้ยนของสัญญาณกระแส	137
6.2 การตรวจวัดสภาพของเซอร์กิตเบรกเกอร์โดยการใช้สัญญาณการสั่นสะเทือน	139
เอกสารอ้างอิง	141
ภาคผนวก ก	145
ผลการทดสอบของอัลกอริธึมโดยใช้สัญญาณกระแสจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีที่ความผิดพร่องไม่ได้เกิดขึ้นแต่สัญญาณกระแสมีความผิดเพี้ยน	145
ภาคผนวก ข	157
ผลการทดสอบของอัลกอริธึมโดยใช้สัญญาณกระแสจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีที่เกิดความผิดพร่องภายนอก สัญญาณกระแสไม่มีความผิดเพี้ยน	157
ภาคผนวก ค	179
ผลงานที่ได้รับการเผยแพร่	179
ประวัติผู้วิจัย	215

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	คุณสมบัติของหม้อแปลงกระแส Class P	16
2-2	คุณสมบัติของหม้อแปลงกระแส ตามมาตรฐาน IEC 60044-6	19
4-1	การทดสอบในกรณีเกิดความผิดพร่องภายนอก ไม่มีการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส	74
4-2	การทดสอบในกรณีเกิดความผิดพร่องภายนอกและมีการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส	83
4-3	รายละเอียดและผลการทดลองของเหตุผิดพร่องบนสายส่ง	89
4-4	รายละเอียดและผลการทดลองของเหตุผิดพร่องที่หม้อแปลงขดปฐมภูมิ	95
4-5	รายละเอียดและผลการทดลองของเหตุผิดพร่องที่หม้อแปลงขดทุติยภูมิ	99
4-6	รายละเอียดของสัญญาณที่นำมาทดสอบกรณีมีการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสจริง	103
5-1	สภาวะต่าง ๆ ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้ในการหาเอกลักษณ์	131

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1-1	เซอร์กิตเบรกเกอร์	2
1-2	รีเลย์ป้องกัน	3
1-3	เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่เกิดการระเบิด	3
2-1	การติดตั้งหม้อแปลงกระแสสำหรับป้องกันอุปกรณ์	6
2-2	หลักการทำงานของรีเลย์ผลต่างร้อยละ	7
2-3	คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ผลต่างร้อยละ	7
2-4	ความคลาดเคลื่อนของหม้อแปลงกระแสเทียบกับเส้นตัดสินใจของรีเลย์ผลต่าง	8
2-5	การป้องกันผลต่างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	9
2-6	การป้องกันหม้อแปลงด้วยรีเลย์ผลต่าง	10
2-7	การต่างกันของกระแสพุ่งเข้าด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ	11
2-8	การป้องกันผลต่างของบัสบาร์	12
2-9	หม้อแปลงกระแสของสถานีไฟฟ้าแรงสูง	13
2-10	โครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลง	14
2-11	หม้อแปลงกระแสในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้แท่งตัวนำเป็นขดลวดปฐมภูมิ	14
2-12	วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงกระแส	15
2-13	กระแสของขดลวดทุติยภูมิในกรณีที่มีและไม่มีการอิ่มตัว	16
2-14	นิยามของ Knee Point Voltage	17
2-15	หม้อแปลงกระแสอุดมคติ	20
2-16	หม้อแปลงกระแสในสภาวะทำงานปกติ	20
2-17	หม้อแปลงกระแสในสภาวะที่เกิดการอิ่มตัว	21
2-18	คู่ตัวกรองตั้งฉาก	22
2-19	บล็อกไดอะแกรมของการแปลงฟูริเยร์แบบเต็มคลื่น	24
2-20	ผลตอบสนองเชิงขนาดของการแปลงฟูริเยร์แบบเต็มคลื่น	25
2-21	บล็อกไดอะแกรมของการแปลงฟูริเยร์แบบครึ่งคลื่น	26
2-22	ผลตอบสนองทางขนาดของการแปลงฟูริเยร์แบบครึ่งคลื่น	26
2-23	การตรวจจับการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสโดยใช้อนุพันธ์อันดับสอง	28

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2-24	การตรวจจับการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสโดยใช้การแปลงเวฟเลท	28
2-25	การตรวจจับการอิ่มตัวที่ผิดพลาดเนื่องจากการเปลี่ยนชนิดของความผิดพร่อง	29
2-26	การตรวจจับการอิ่มตัวด้วย Modified Morphological Lifting Scheme (a) สัญญาณกระแส (b) สัญญาณรายละเอียด (c) ผลการตรวจจับการอิ่มตัว	30
2-27	กราฟคุณสมบัติการกระตุ้น	31
2-28	การแก้ไขปัญหาการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส	32
2-29	คุณลักษณะของรีเลย์ผลต่างที่มีเสถียรภาพต่อการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสอันเนื่องมาจากองค์ประกอบกระแสสลับขนาดสูง	35
3-1	องค์ประกอบพื้นฐานของรีเลย์เชิงเลข	38
3-2	การป้องกันอุปกรณ์โดยใช้กระแสผลต่าง	39
3-3	สัญญาณจากหม้อแปลงกระแสที่มีและไม่มีการอิ่มตัว	39
3-4	การเปรียบเทียบผลของการคำนวณหาขนาดของวิธี SDOFP HCDFT และ FCDFT	41
3-5	คู่ตัวกรองตั้งฉากชนิดต่าง ๆ	41
3-6	ความแตกต่างระหว่างสัญญาณที่มีคุณภาพดีและสัญญาณที่มีการผิดเพี้ยน	44
3-7	ผังการบ่งชี้คุณภาพของสัญญาณ	46
3-8	การตรวจสอบคุณสมบัติด้านขนาดของสัญญาณคุณภาพดี	47
3-9	การตรวจสอบคุณสมบัติด้านมุมของสัญญาณคุณภาพดี	48
3-10	ผังการคัดเลือกและการตัดต่อสัญญาณ	49
3-11	การปรับแต่งสัญญาณซึ่งเกิดการผิดเพี้ยนเนื่องมาจากการอิ่มตัวของหม้อแปลง	50
3-12	ผลตอบสนองอิมพัลส์ของคู่ตัวกรองตั้งฉาก $\phi_s(k)$ และ $\phi_c(k)$	51
3-13	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ขนาดกระแสของภาระมีการเปลี่ยนแปลง	52
3-14	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสกรณีที่มีการอิ่มตัวเล็กน้อย	53
3-15	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสกรณีที่มีการอิ่มตัวอย่างรุนแรง	54
3-16	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสกรณีที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	55
3-17	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาด	57
3-18	ผลการคำนวณหาขนาดและมุมของกระแสกรณีที่เป็นกระแสพุ่งเข้าของหม้อแปลงกำลัง	58
3-19	หม้อแปลงกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้านขั้วต่อ (Terminal Side)	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3-20	หม้อแปลงกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้านนิวทรัล (Neutral Side)	60
3-21	คุณสมบัติการทำงานของรีเลย์ผลต่างร้อยละ	61
3-22	การป้องกันการสั่งปลดวงจร (Trip Blocking)	61
3-23	ผังการเชื่อมต่อสัญญาณการสั่งเปิดวงจรไปยังชุดควบคุมเซอร์กิตเบรกเกอร์	62
3-24	ความผิดพร่องชนิดหนึ่งเฟส	63
3-25	ความผิดพร่องชนิดเฟสต่อเฟสไม่ลงดิน	64
3-26	ความผิดพร่องชนิดเฟสต่อเฟสลงดิน	65
3-27	ความผิดพร่องชนิดสามเฟส	65
4-1	ผังการทดสอบการทำงานของอัลกอริธึม	67
4-2	คุณลักษณะของรีเลย์ผลต่างที่ทำการทดสอบ	68
4-3	แบบจำลองระบบไฟฟ้าสำหรับการทดสอบอัลกอริธึม	69
4-4	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ X/R = 3 และมุมเริ่มผิดพร่องเป็น 270°	70
4-5	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ X/R=30 และมุมเริ่มผิดพร่องเป็น 270°	71
4-6	ผลการทำงานของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่อัตราส่วน X/R=3 มุมเริ่มผิดพร่องเป็น 270°	72
4-7	ผลการทำงานของรีเลย์ผลต่างกรณีที่อัตราส่วน X/R=30 มุมเริ่มผิดพร่องเป็น 270°	72
4-8	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ X/R = 30 และมุมเริ่มผิดพร่องเป็น 0°	73
4-9	แบบจำลองระบบไฟฟ้าสำหรับการทดสอบอัลกอริธึม	76
4-10	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก	76
4-11	การคำนวณค่าขนาดและมุมด้วยวิธี HCDFT ในกรณีที่ X/R = 3	78
4-12	การคำนวณค่าขนาดและมุมด้วยวิธี HCDFT ในกรณีที่ X/R = 30	78
4-13	การตัดสินใจตัดวงจรของรีเลย์ผลต่างที่คำนวณด้วยวิธี HCDFT ในกรณีที่ X/R =3	79
4-14	การตัดสินใจตัดวงจรของรีเลย์ผลต่างที่คำนวณด้วยวิธี HCDFT ในกรณีที่ X/R =30	79
4-15	การคำนวณค่าขนาดและมุมด้วยวิธีของงานวิจัยนี้ ในกรณีที่ X/R = 3	80
4-16	การคำนวณค่าขนาดและมุมด้วยวิธีของงานวิจัยนี้ ในกรณีที่ X/R = 30	81
4-17	การตัดสินใจตัดวงจรของรีเลย์ผลต่างที่คำนวณด้วยวิธีของงานวิจัยนี้กรณี X/R=3	82
4-18	การตัดสินใจตัดวงจรของรีเลย์ผลต่างที่คำนวณด้วยวิธีของงานวิจัยนี้กรณี X/R=30	82
4-19	แบบจำลองของระบบที่เกิดเหตุผิดพร่องที่สายส่ง	85

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-20	การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพร่องบนสายส่งที่ระยะ 20 km	86
4-21	การตัดสินใจของรีเลย์กรณีที่เกิดความผิดพร่องบนสายส่งที่ระยะ 20 km	86
4-22	การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพร่องบนสายส่งที่ระยะ 50 km	87
4-23	การตัดสินใจของรีเลย์กรณีที่เกิดความผิดพร่องบนสายส่งที่ระยะ 50 km	87
4-24	การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพร่องบนสายส่งที่ระยะ 90 km	88
4-25	การตัดสินใจของรีเลย์กรณีที่เกิดความผิดพร่องบนสายส่งที่ระยะ 90 km	89
4-26	แบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบกรณีเกิดเหตุผิดพร่องในหม้อแปลง	90
4-27	การคำนวณขนาดและมุมของกระแสผิดพร่องที่ขดลวดปฐมภูมิตำแหน่ง 1%	91
4-28	การตัดสินใจตัดวงจรของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่เกิดความผิดพร่องที่ขดลวดปฐมภูมิที่ตำแหน่ง 1%	92
4-29	การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพร่องที่ด้านปฐมภูมิตำแหน่ง 50%	92
4-30	การตัดสินใจตัดวงจรในกรณีความผิดพร่องเกิดที่ขดลวดปฐมภูมิที่ตำแหน่ง 50%	93
4-31	การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพร่องที่ขดลวดปฐมภูมิตำแหน่ง 90%	94
4-32	การตัดสินใจในกรณีที่เกิดความผิดพร่องที่ขดลวดปฐมภูมิตำแหน่ง 90%	94
4-33	การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพร่องที่ขดลวดทุติยภูมิตำแหน่ง 1%	96
4-34	การตัดสินใจของรีเลย์กรณีเกิดความผิดพร่องที่ขดลวดทุติยภูมิตำแหน่ง 1%	97
4-35	การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพร่องที่ด้านทุติยภูมิตำแหน่ง 50%	97
4-36	การตัดสินใจของรีเลย์กรณีที่เกิดความผิดพร่องที่ขดลวดทุติยภูมิตำแหน่ง 50%	98
4-37	แบบจำลองสำหรับทดสอบในกรณีของการป้องกันบัสบาร์	100
4-38	การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพร่องภายนอกบัสบาร์	101
4-39	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างกรณีที่เกิดความผิดพร่องภายนอกบัสบาร์	101
4-40	การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพร่องภายในที่บัสบาร์	102
4-41	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างกรณีที่เกิดความผิดพร่องภายในที่บัสบาร์	102
4-42	ผังการต่ออุปกรณ์ของชุดทดลองระบบไฟฟ้ากำลังแบบแอนาลอก	103
4-43	ผังการต่ออุปกรณ์ของกลุ่มการทดลองที่ 1	104
4-44	การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพร่องในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 10 กระแสผิดพร่อง 20 A มีการอิ่มตัวทั้ง CT1 และ CT2	105

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-45	การตัดสินใจของรีเลย์ในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 10 กระแสผิดพร่อง 20 A มีการอิ่มตัวทั้ง CT1 และ CT2	105
4-46	ผังการต่ออุปกรณ์ของกลุ่มการทดลองที่ 2	106
4-47	การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพร่องในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 10 กระแสผิดพร่อง 20 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว	106
4-48	การตัดสินใจของรีเลย์ในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 10 กระแสผิดพร่อง 20 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว	107
4-49	ผังการต่ออุปกรณ์ของกลุ่มการทดลองที่ 3	108
4-50	การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพร่องในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 10 กระแสผิดพร่อง 30 A มีการอิ่มตัวทั้ง CT1 และ CT2	108
4-51	การตัดสินใจของรีเลย์ในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 10 กระแสผิดพร่อง 30 A มีการอิ่มตัวทั้ง CT1 และ CT2	109
4-52	ผังการต่ออุปกรณ์ของกลุ่มการทดลองที่ 4	109
4-53	การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพร่องในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 10กระแสผิดพร่อง 30 A มีการอิ่มตัวทั้ง CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว	110
4-54	การตัดสินใจของรีเลย์ในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 10 กระแสผิดพร่อง 30 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว	111
4-55	ผังการต่ออุปกรณ์ของกลุ่มการทดลองที่ 5	111
4-56	การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพร่องในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 16 กระแสผิดพร่อง 5 A มีการอิ่มตัวทั้ง CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว	112
4-57	การตัดสินใจของรีเลย์ในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 16 กระแสผิดพร่อง 5 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว	112
4-58	ผังการต่ออุปกรณ์ของกลุ่มการทดลองที่ 6	113
4-59	การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพร่องในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 40 กระแสผิดพร่อง 35 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว	113
4-60	การตัดสินใจของรีเลย์ในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 40 กระแสผิดพร่อง 35 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว	114

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-61	ผังการต่ออุปกรณ์ของกลุ่มการทดลองที่ 7	114
4-62	การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพร่องในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 40 กระแสผิดพร่อง 20 A มีการอิ่มตัวทั้ง CT1 และ CT2	115
4-63	การตัดสินใจของรีเลย์ในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 40 กระแสผิดพร่อง 20 A มีการอิ่มตัวทั้ง CT1 และ CT2	115
4-64	ผังการต่ออุปกรณ์ของกลุ่มการทดลองที่ 8	116
4-65	การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพร่องในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 40 กระแสผิดพร่อง 20 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว	116
4-66	การตัดสินใจของรีเลย์ในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 40 กระแสผิดพร่อง 20 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว	117
4-67	ผังการต่ออุปกรณ์ของกลุ่มการทดลองที่ 9	117
4-68	การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพร่องในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 40 กระแสผิดพร่อง 30 A มีการอิ่มตัวทั้ง CT1 และ CT2	118
4-69	การตัดสินใจของรีเลย์ในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 40 กระแสผิดพร่อง 30 A มีการอิ่มตัวทั้ง CT1 และ CT2	118
4-70	ผังการต่ออุปกรณ์ของกลุ่มการทดลองที่ 10	119
4-71	การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพร่องในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 40 กระแสผิดพร่อง 30 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว	119
4-72	การตัดสินใจของรีเลย์ในกรณีที่อัตราส่วน X/R มีค่าเป็น 40 กระแสผิดพร่อง 30 A มีการอิ่มตัวที่ CT1 แต่ CT2 ไม่มีการอิ่มตัว	120
4-73	การเกิดความผิดพร่องบนสายส่ง	121
4-74	สัญญาณกระแสที่มีความผิดเพี้ยน	122
4-75	การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสที่เกิดความผิดเพี้ยน	123
4-76	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างกรณีที่สัญญาณกระแสเกิดความผิดเพี้ยน	123
4-77	การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสกรณีเกิดความผิดพร่องภายนอก	124
4-78	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างกรณีเกิดความผิดพร่องภายนอก	124

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-79	สัญญาณกระแสผิดพร่องของมอเตอร์ที่มีการผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส	125
4-80	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างกรณีที่เกิดความผิดพร่องภายในมอเตอร์	126
4-81	การคำนวณค่าขนาดและมุมของกระแสผิดพร่องกรณีที่เกิดความผิดพร่องขึ้นภายในมอเตอร์	126
5-1	สัญญาณสั่นสะเทือนของเซอร์กิตเบรกเกอร์ขณะเปิดและปิดหน้าสัมผัส	128
5-2	สัญญาณเวฟเลท	129
5-3	สัญญาณการสั่นสะเทือนขณะเปิดวงจร (บน) และผลของการแปลงเวฟเลท (ล่าง)	129
5-4	สัญญาณการสั่นสะเทือนขณะเปิดวงจรในปริภูมิเวฟเลท	130
5-5	สัญญาณการสั่นสะเทือนขณะปิดวงจรในปริภูมิเวฟเลท	130
5-6	สัญญาณแรงสั่นสะเทือนขณะปิดวงจรในกรณีที่มีแรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน	132
5-7	สัญญาณแรงสั่นสะเทือนขณะเปิดวงจรกรณีที่มีแรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน	132
5-8	สัญญาณแรงสั่นสะเทือนขณะปิดวงจรกรณีที่มีแรงดันไฮดรอลิคแตกต่างกัน	133
5-9	สัญญาณแรงสั่นสะเทือนขณะเปิดวงจรกรณีที่มีแรงดันไฮดรอลิคแตกต่างกัน	134
5-10	บุชที่ถูกถอดออกเพื่อจำลองการชำรุดของชิ้นส่วนทางกล	134
5-11	การเปรียบเทียบการสั่นสะเทือนในกรณีที่มีการชำรุดของชิ้นส่วนทางกล	135
6-1	การเปรียบเทียบความเร็วในการคำนวณค่าขนาดของสัญญาณที่มีและไม่มีองค์ประกอบกระแสตรง	139
ก-1	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 1	146
ก-2	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 1	146
ก-3	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 2	147
ก-4	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 2	147
ก-5	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 3	148
ก-6	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 3	148
ก-7	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 4	149
ก-8	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 4	149
ก-9	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 5	150

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ก-10	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 5	150
ก-11	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 6	151
ก-12	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข6	151
ก-13	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 7	152
ก-14	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 7	152
ก-15	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 8	153
ก-16	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 8	153
ก-17	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 9	154
ก-18	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 9	154
ก-19	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 10	155
ก-20	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 10	155
ข-1	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 1	158
ข-2	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 1	158
ข-3	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 2	159
ข-4	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 2	159
ข-5	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 3	160
ข-6	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 3	160
ข-7	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 4	161
ข-8	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 4	161
ข-9	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 5	162
ข-10	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 5	162
ข-11	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 6	163
ข-12	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 6	163
ข-13	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 7	164
ข-14	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 7	164
ข-15	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 8	165
ข-16	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 8	165

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ข-17	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 9	166
ข-18	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 9	166
ข-19	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 10	167
ข-20	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 10	167
ข-21	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 11	168
ข-22	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 11	168
ข-23	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 12	169
ข-24	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 12	169
ข-25	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 13	170
ข-26	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 13	170
ข-27	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 14	171
ข-28	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 14	171
ข-29	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 15	172
ข-30	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 15	172
ข-31	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 16	173
ข-32	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 16	173
ข-33	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 17	174
ข-34	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 17	174
ข-35	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 18	175
ข-36	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 18	175
ข-37	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 19	176
ข-38	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 19	176
ข-39	ผลการคำนวณค่าขนาดและมุมในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 20	177
ข-40	การตัดสินใจของรีเลย์ผลต่างในกรณีที่ใช้สัญญาณทดสอบหมายเลข 20	177