โปรแกรมกราฟิกในการวิเคราะห์การป้องกันแบบประสานการทำงานพร้อมทั้งการคำนวณหาค่าความผิดพร่องในระบบสายส่งไฟฟ้าแบบเรเดียล

นายเด่นเทพ เทพประเทืองทิพย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2539

ISBN 974-635-208-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 174 C7333

A GRAPHICAL PROGRAM OF COORDINATIVE PROTECTION ANALYSIS WITH FAULT CALCULATION IN A RADIAL DISTRIBUTION SYSTEM

Mr. Denthep Theppratuangthip

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1996

ISBN 974-635-208-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	โปรแกรมกราฟิกในการวิเคราะห์การป้องกันแบบประสานการทำงานพร้อมทั้งการคำนวณหาค่าความผิดพร่องในระบบสายส่งไฟฟ้าแบบเรเดียล
โดย	นายเด่นเทพ เทพประเทืองทิพย์
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... รักษาการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ไชยะ แช่มช้อย)

เด่นเทพ เทพประเทืองทิพย์ : โปรแกรมกราฟิกในการวิเคราะห์การป้องกันแบบประสานการทำงาน พร้อมทั้งการคำนวณหาค่าความผิดพร่องในระบบสายส่งไฟฟ้าแบบเรเดียล (A GRAPHICAL PROGRAM OF COORDINATIVE PROTECTION ANALYSIS WITH FAULT CALCULATION IN A RADIAL DISTRIBUTION SYSTEM) อ.ที่ปรึกษา : ผ.ศ. ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์, 136 หน้า. ISBN 974-635-208-3

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงการออกแบบระบบป้องกันแบบประสานการทำงานของอุปกรณ์ตัดวงจร ซึ่งโครงงานได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของความรู้ทางทฤษฎี และส่วนซอฟท์แวร์ โดยในส่วนทฤษฎีนั้นได้ทำการศึกษา และจัดทำเป็นรายงานอย่างละเอียด ซึ่งกล่าวถึงความรู้ตั้งแต่เบื้องต้นไปจนถึงการคำนวณปรับตั้งค่าพิกัดการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน และในส่วนซอฟท์แวร์ที่ได้พัฒนาขึ้นมานั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยอำนวยความสะดวกแก่ผู้ใช้ในการออกแบบระบบป้องกันไฟฟ้า

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมานี้มีชื่อว่า "Overcurrent Coordinative Program" พัฒนาด้วยภาษา VISUAL BASIC เวอร์ชั่น 3 โดยสามารถแบ่งการทำงานได้เป็น 3 ส่วนหลัก คือ

1. ส่วนที่ใช้สร้างไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบไฟฟ้า : มีการกำหนดอุปกรณ์ให้เลือกใช้ได้อย่างเพียงพอกับอุปกรณ์ที่มีใช้กันจริงๆ นอกจากนั้นผู้ใช้ต้องลงรายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละตัวในตารางข้อมูลที่กำหนดให้ด้วย เพื่อเก็บไว้เป็นข้อมูลในการคำนวณกระแสลัดวงจรต่อไป

2. ส่วนที่ใช้คำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรของระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบเรเดียล : หลังจากใส่ข้อมูลให้กับอุปกรณ์ และกำหนดจุดผิดพร่องในโปรแกรมส่วนแรกเสร็จแล้ว โปรแกรมจะจำลองรูปวงจรของระบบไฟฟ้าที่จะวิเคราะห์แสดงออกทางหน้าจอ ซึ่งผู้ออกแบบสามารถใช้อุปกรณ์พิเศษที่มีความสามารถในการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรในแต่ละจุดได้อย่างสะดวก โดยผู้ใช้สามารถคำนวณกระแสลัดวงจรได้ทั้งกรณีของการลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล, การลัดวงจรระหว่างสายโดยไม่เกี่ยวข้องกับพื้นดิน และการลัดวงจรระหว่างสายกับพื้นดิน

3. ส่วนวิเคราะห์และออกแบบระบบไฟฟ้าโดยใช้เส้นโค้งลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน : มีการเก็บลักษณะเส้นโค้งของอุปกรณ์ป้องกันแต่ละชนิด ซึ่งพร้อมที่จะให้ผู้ใช้เรียกออกมาได้ตามไดอะแกรมเส้นเดี่ยวที่สร้างขึ้นมาโดยในส่วนนี้ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์สภาพการจัดลำดับการทำงานของอุปกรณ์แต่ละตัวได้โดยการเลื่อนเส้นโค้งของอุปกรณ์เหล่านั้น

โปรแกรมทั้งสามส่วนนี้จะทำงานสอดคล้องกัน ซึ่งเมื่อผู้ใช้ทำงานในแต่ละส่วนเสร็จแล้วก็สามารถจัดเก็บงานซึ่งอาจมีการแก้ไขหรือเพิ่มเติมในภายหลัง นอกจากนั้นก็ยังสามารถพิมพ์ออกมาเพื่อแสดงผลงานที่ทำได้ด้วย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา ระบบพลังงาน ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2539 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

C815444 MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEYWORD COORDINATION / SELECTIVITY / VISUAL BASIC / SINGLE-LINE DIAGRAM
DENTHEP THEPPRATUANGTHIP : A GRAPHICAL PROGRAM OF COORDINATIVE PROTECTION ANALYSIS WITH FAULT CALCULATION IN A RADIAL DISTRIBUTION SYSTEM.THESIS ADVISOR : ASST. PROF. PRASIT PITTAYAPAT
136 pp. ISBN 974-635-208-3

This thesis described the design of coordinative protection system, which consists of two sections, i.e. the theoretical background study and the developed the software. In the theoretical section, a comprehensive study, in the relevant fundamentals on the topic including detailed setting calculations on the selected devices to be used, is thoroughly presented in this report. For the other section, the software is intended to facilitate the user in designing electrical protective systems through the "Overcurrent Coordinative Program" written in VISUAL BASIC version 3. This program is divided into 3 main parts :

1. Creating the single-line diagram : The users can select a complete set of electrical protective devices used in the market today. After completing the construction of the diagram, the program will ask for the specifications of the devices used in the provided tables. These values will be used for calculating short-circuit current in the next part of the program.

2. Calculating short-circuit current in radial distribution system : After filling all the data in and specifying fault location in the first part, program will model the circuit of electrical system on screen. Then, users can apply a special apparatus, designed to facilitate the users in finding out the short-circuit current at any fault location.

3. Analysing and designing characteristic curves of the protective devices : Characteristic curves of different devices in various sizes can be readily loaded from the program memory according to the equipment patterns created on the single-line diagram. Curve coordination can be easily accomplished by shifting relevant curves for each device.

These three parts of the program work together as a single unit. The users can save each part designed for future correction or used as references. Moreover, the results can be printed through the PRINT function in the program.

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา ระบบพลังงาน ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2539 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธ์ พิทยพัฒน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา โดยได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆของการทำวิทยานิพนธ์มาด้วยดีตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขจนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนั้น ต้องขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย อาจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ และ อาจารย์ ไชยะ แช่มช้อย ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไข และให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

อนึ่ง เนื่องจากทุนการศึกษาในระดับปริญญามหาบัณฑิตทั้งหมดนี้ ได้รับการสนับสนุนจาก **"โครงการศิษย์ก้นกุฏิ" ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงขอขอบคุณมา ณ.** ที่นี้ด้วยที่ได้เล็งเห็นความสำคัญต่อการศึกษาระดับสูงของนักศึกษา ซึ่งจะเป็นการวางรากฐานที่สำคัญอันจะนำไปสู่การพัฒนาประเทศไทยอย่างแท้จริง

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้กำลังใจเสมอมา และทุกๆคนที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เด่นเทพ เทพประเทืองทิพย์

มกราคม 2540

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฎ

บทที่

1. บทนำทั่วไป 1
2. ระบบป้องกันไฟฟ้า 10
   - 2.1 ระบบป้องกันที่มีการตัดวงจรแบบเต็มที่ 10
   - 2.2 ระบบป้องกันที่มีการจัดลำดับการตัดวงจร 11
     - 2.2.1 ระบบป้องกันที่มีการจัดลำดับการตัดวงจรแบบเต็มที่ 11
     - 2.2.2 ระบบป้องกันที่มีการจัดลำดับการตัดวงจรเพียงบางส่วน 12
   - 2.3 ระบบป้องกันที่มีการต่อแบบอนุกรมของอุปกรณ์ 12
3. การวิเคราะห์การทำงานของอุปกรณ์แบบประสานการทำงาน 14
   - 3.1 คำนำ 14
   - 3.2 ข้อมูลที่จำเป็นในการวิเคราะห์ 16
   - 3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์การทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน 17
4. อุปกรณ์ป้องกันความผิดพร่องของระบบไฟฟ้า 18
   - 4.1 อุปกรณ์ป้องกันระดับแรงดันต่ำ 18
     - 4.1.1 ฟิวส์แรงดันต่ำ 18
     - 4.1.2 เซอร์กิตเบรคเกอร์แรงดันต่ำ 21
       - 4.1.2.1 ชนิดของเซอร์กิตเบรคเกอร์ 21
       - 4.1.2.2 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของเซอร์กิตเบรคเกอร์ 23
       - 4.1.2.3 พิกัดของเซอร์กิตเบรคเกอร์ 26
       - 4.1.2.4 การเลือกใช้งานเซอร์กิตเบรคเกอร์ 27

สารบัญ (ต่อ)

4.2 อุปกรณ์ป้องกันระดับแรงดันปานกลาง 29
4.2.1 ฟิวส์แรงดันปานกลาง 29
4.2.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ฟิวส์แรงดันปานกลางในการป้องกัน 29
4.2.1.2 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของ ฟิวส์แรงดันปานกลาง 31
4.2.1.3 ข้อควรคำนึงในการเลือกใช้ฟิวส์แรงดันปานกลาง 31
4.2.2 เซอร์กิตเบรคเกอร์แรงดันปานกลาง 32
4.2.3 รีเลย์ 33
4.2.3.1 ส่วนประกอบของระบบป้องกันในระบบไฟฟ้า 33
4.2.3.2 สัญลักษณ์ของรีเลย์ 34
4.2.3.3 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของรีเลย์ 35
5. ข้อกำหนดพิเศษของอุปกรณ์ป้องกัน 37
5.1 พิกัดของอุปกรณ์ป้องกัน 37
5.2 สภาวะการใช้งาน 37
5.3 การป้องกันขั้นต่ำ 39
5.4 ความคงทนของอุปกรณ์ 42
6. การคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบสายส่งไฟฟ้าแบบเรเดียล 44
6.1 คำนำ 44
6.2 แหล่งจ่ายไฟสมมูล (Equivalent voltage source) 46
6.3 อิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Short-circuit impedance) 47
6.3.1 อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า 47
6.3.2 อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง 49
6.3.3 อิมพีแดนซ์ของสายส่งและสายเคเบิล 50
6.3.4 อิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ 52
6.4 วิธีการคำนวณค่ากระแสลัดวงจร 53
6.5 ตัวอย่างการคำนวณค่ากระแสลัดวงจร 54
6.5.1 ตัวอย่างการคำนวณที่ 1 54
6.5.2 ตัวอย่างการคำนวณที่ 2 56

สารบัญ (ต่อ)

7. การวิเคราะห์การป้องกันแบบประสานการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 59
7.1 คำนำ 59
7.2 ภาพรวมของ Visual Basic 60
7.3 หลักการโปรแกรมเชิงภาพของ Visual Basic 61
7.4 ลักษณะและรูปแบบของโปรแกรม 63
7.4.1 ส่วนที่ใช้ในการสร้างไดอะแกรมเส้นเดี่ยว (Single-line diagram) 64
7.4.1.1 ลักษณะของโปรแกรมส่วนที่ 1 64
7.4.1.2 รูปแบบของโปรแกรมส่วนที่ 1 65
7.4.2 ส่วนคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจร 80
7.4.2.1 ลักษณะของโปรแกรมส่วนที่ 2 80
7.4.2.2 รูปแบบของโปรแกรมส่วนที่ 2 81
7.4.3 ส่วนวิเคราะห์และออกแบบระบบไฟฟ้าโดยใช้กราฟลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ตัดวงจร 91
7.4.3.1 ลักษณะของโปรแกรมส่วนที่ 3 91
7.4.3.2 รูปแบบของโปรแกรมส่วนที่ 3 92
8. ตัวอย่างการวิเคราะห์การป้องกันแบบประสานการทำงานด้วยโปรแกรม 105
8.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์ที่ 1 106
8.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์ที่ 2 111
9. สรุปและข้อเสนอแนะ 118
รายการอ้างอิง 120
ภาคผนวก
ก. ตารางแสดงขนาดพิกัดของเซอร์กิตเบรคเกอร์สำหรับมอเตอร์ 124
ข. คำอธิบายการใช้โปรแกรม (Help) 127
ค. ความหมายของตัวแปร 135
ประวัติผู้เขียน 136

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

4.1 ขนาดและความยาวของฟิวส์แบบ HRC 20
5.1 พิกัดของอุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจรของมอเตอร์ 40
5.2 พิกัดของอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินของหม้อแปลง 42
5.3 ความคงทนของหม้อแปลงที่ถูกระบุเป็นวินาที 43
6.1 ค่าตัวประกอบแรงดัน (Voltage factor) 47
6.2 ค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ต่อหน่วยความยาว ของสายไฟฟ้าแรงต่ำ 51
6.3 ค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ต่อหน่วยความยาวของ Busway 51
7.1 สรุปรายละเอียดของปุ่มรูปภาพ และภาพอุปกรณ์บน Picture window 70
7.2 เปรียบเทียบระหว่างปุ่มรูปภาพ และภาพของอุปกรณ์บน Picture window 71
8.1 สรุปค่าอิมพีแดนซ์ของตัวอย่างการวิเคราะห์ที่ 2 112
8.2 สรุปขนาดของกระแสลัดวงจรทุกกรณีที่คำนวณได้ในตัวอย่างการวิเคราะห์ที่ 2 114
ก.1 ขนาดของอุปกรณ์ป้องกันสำหรับมอเตอร์ 3 เฟส 124
ก.2 ขนาดของอุปกรณ์ป้องกันสำหรับมอเตอร์ 1 เฟส 126

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่

1.1 ตัวอย่างที่ 1 ของระบบไฟฟ้าอย่างง่าย 2

1.2 ลักษณะสมบัติระหว่างกระแสและเวลาของอุปกรณ์ป้องกันในรูปที่ 1.1 3

1.3 ตัวอย่างที่ 2 ของระบบไฟฟ้าอย่างง่าย 4

1.4 ลักษณะสมบัติระหว่างกระแสและเวลาของอุปกรณ์ป้องกันในรูปที่ 1.3 4

2.1 ตัวอย่าง ไดอะแกรมเส้นเดี่ยว (Single-line diagram) ของระบบไฟฟ้าอย่างง่าย 10

2.2 ลักษณะของ Fully selective protective system 11

2.3 ลักษณะของ Partially selective protective system 12

2.4 ตัวอย่างของไดอะแกรมเชิงเส้น ในกรณีของ Series connected protective system 13

4.1 ลักษณะของฟิวส์แบบ HRC 19

4.2 ลักษณะของ ACB ที่ใช้เป็นเซอร์กิตเบรคเกอร์หลัก 23

4.3 ลักษณะสมบัติโดยทั่วไประหว่างกระแสและเวลา ของเซอร์กิตเบรคเกอร์ 24

4.4 ลักษณะสมบัติระหว่างกระแสและเวลา ของเซอร์กิตเบรคเกอร์แบบอิเล็กทรอนิคส์ 25

4.5 ลักษณะโครงสร้างของฟิวส์แรงดันปานกลางแบบ HRC 30

4.6 ลักษณะสมบัติโดยทั่วไประหว่างกระแสและเวลา ของฟิวส์แบบ HRC 31

4.7 แสดงรูปเซอร์กิตเบรคเกอร์แรงดันปานกลาง 32

4.8 ลักษณะสมบัติระหว่างกระแสและเวลาแบบผกผันของรีเลย์ ทั้ง 3 แบบ 35

6.1 การลัดวงจรในระบบไฟฟ้า 45

6.2 ตัวอย่างของแหล่งจ่ายไฟสมมูล ณ.ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรในวงจรอิมพีแดนซ์ 46

6.3 แสดงรูปของระบบและวงจรสมมูลสำหรับระบบไฟฟ้า 48

6.4 ระบบไฟฟ้าอย่างง่ายของตัวอย่างการคำนวณที่ 1 55

6.5 วงจรสมมูลเมื่อเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่ง F ของตัวอย่างการคำนวณที่ 1 56

6.6 ระบบไฟฟ้าอย่างง่ายของตัวอย่างการคำนวณที่ 2 57

6.7 วงจรสมมูลเมื่อเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่ง F ของตัวอย่างการคำนวณที่ 2 57

7.1 การเขียนโปรแกรมแบบธรรมดากับแบบ Event-driven 62

7.2 วินโดว์แนะนำชื่อโปรแกรม (Introductory window) 65

7.3 Single-line-diagram window 66

สารบัญภาพ (ต่อ)

7.4 Network-feeder data box 67
7.5 Transformer data box 67
7.6 Motor data box 68
7.7 Line and cable data box 68
7.8 Fuse setting box 69
7.9 Circuit-breaker setting box 69
7.10 Load-panel box 70
7.11 Distribution-board box 70
7.12 Message box ของปุ่ม CLEAR 72
7.13 Message box ถามลักษณะการติดตั้งของแหล่งจ่ายไฟฟ้า และสายส่งชุดแรก 73
7.14 วินโดว์ถามแรงดันพิกัดของหม้อแปลงเพื่อนำไปคำนวณหาอัตราส่วนรอบ (Turn ratio) 73
7.15 วินโดว์ระบุประเภทของมอเตอร์ 74
7.16 ปุ่มกดแสดงข้อมูลของอุปกรณ์ 75
7.17 ตัวอย่างในการแสดงตารางข้อมูลของอุปกรณ์หลัก 75
7.18 Impedance box ของ Network feeder 76
7.19 Open control box ของโปรแกรมในส่วนที่ 1 78
7.20 Save control box ของโปรแกรมในส่วนที่ 1 78
7.21 Message box ของตัวเลือก Exit 79
7.22 ตัวอย่างของข้อมูลที่พิมพ์ออกมา 79
7.23 หัวข้อในการใช้คำสั่ง Help 80
7.24 Message box ถามผู้ใช้ว่าจะคำนวณกระแสลัดวงจรทุกกรณีหรือไม่ 81
7.25 ตัวอย่างของวินโดว์รับข้อมูลในการหาอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของหม้อแปลง 82
7.26 Short-circuit-calculation window 83
7.27 Message box แนะผู้ใช้ให้เริ่มการทำงานของโปรแกรมส่วนที่ 2 83
7.28 การแสดงข้อความให้เห็นว่าไม่ต้องคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ลำดับลบ และลำดับศูนย์ในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจร 85
7.29 Message box บอกให้เริ่มคำนวณค่าอิมพีแดนซ์รวมของวงจรในกรณีที่เกิดจุดผิดพร่องที่จุด F1 85

สารบัญภาพ (ต่อ)

7.30 Transformer-impedance window ที่แสดงทั้ง Z1, Z2 และ Z0 86
7.31 Transformer-impedance window ที่แสดงเฉพาะ Z1 87
7.32 Complex Calculator 87
7.33 Transfer-complex window 88
7.34 Message box บอกย้ำให้ผู้ใช้ย้ายค่าอิมพีแดนซ์เก็บที่ตัวแปร Z1 89
7.35 วินโดว์แสดงขนาดของอิมพีแดนซ์รวม 89
7.36 Move-impedance-amplitude window 89
7.37 Symbol window 90
7.38 Message box แสดงการย้ำเตือนก่อนออกจากโปรแกรมส่วนที่ 2 90
7.39 Relating-file-name window 93
7.40 Main window ของโปรแกรมในส่วนที่ 3 94
7.41 Project window 94
7.42 Print control box ของโปรแกรมในส่วนที่ 3 96
7.43 แสดงแถบเลื่อน (Scroll bar) ที่ใช้ในการเลื่อนกราฟ 97
7.44 Color window ในการปรับสีของโปรแกรมในส่วนที่ 3 97
7.45 Transformer-point window 98
7.46 New MCB window 99
7.47 Open MCB window 100
7.48 New ECB window 100
7.49 New fuse-curve window 101
7.50 Open fuse window 102
7.51 Error-message box กรณีที่มีการให้คู่ลำดับเกินขอบเขตของกราฟ 102
7.52 Error-message box กรณีที่ผู้ใช้ไม่ได้ตั้งชื่อให้กับอุปกรณ์ 103
7.53 Error-message box ย้ำเตือนเรื่องการวางตัวของฟิวส์กับจุดบังคับของหม้อแปลง 104
7.54 Error-message box ย้ำลำดับการตัดวงจรที่ถูกต้องของสายวงจรวิเคราะห์ 104
8.1 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบป้องกันของตัวอย่างที่ 1 106
8.2 วงจรสมมูลเมื่อเกิดการลัดวงจร ของตัวอย่างการวิเคราะห์ที่ 1 107
8.3 การวิเคราะห์กราฟของไดอะแกรมในตัวอย่างการคำนวณที่ 1 110

8.4 การวิเคราะห์กราฟของไดอะแกรมในตัวอย่างการวิเคราะห์ที่ 1 หลังจากที่มีการแก้ไข.. 110
8.5 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบป้องกันของตัวอย่างที่ 1..... 111
8.6 วงจรสมมูลเมื่อเกิดการลัดวงจร ของตัวอย่างการวิเคราะห์ที่ 2..... 113
8.7 การวิเคราะห์กราฟของไดอะแกรมในตัวอย่างการคำนวณที่ 2..... 117
8.8 การวิเคราะห์กราฟของไดอะแกรมในตัวอย่างการวิเคราะห์ที่ 2 หลังจากที่มีการแก้ไข.. 117