การใช้ไมโครคอมพิวเตอร์วิเคราะห์การลัดวงจรของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม

นาย นริศ สุชีธร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2530

ISBN 974-567-441-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I10295021

012510

MICROCOMPUTER APPLICATION TO SHORT CIRCUIT ANALYSIS OF INDUSTRIAL POWER SYSTEMS

Mr. Naris Suteetorn

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Electrical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
1987

ISBN 974-567-441-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การใช้ไมโครคอมพิวเตอร์วิเคราะห์การลัดวงจรของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม

โดย นายนริศ สุธีธร

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร. จรวย บุญยุบล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไพบูลย์ ไชยนิล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ศาสตราจารย์ ดร. จรวย บุญยุบล)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุขมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร)

..... กรรมการ

(ดร. ขจรศักดิ์ โหตรภวานนท์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

* ปกติของ — ๓๑

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้ไมโครคอมพิวเตอร์วิเคราะห์การสัดวงจรของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม
ชื่อนิสิต	นายนริศ สุธีธร
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร. จรวย บุญยุบล
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2529

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สร้างซอฟแวร์ขึ้น ในลักษณะโปรแกรมสำเร็จรูปโดยเขียนขึ้นด้วยภาษาเบสิค สามารถคอมพายล์และเก็บไว้ในดิสค์ในรูปของซอฟแวร์ตัวหนึ่ง สำหรับใช้กับไมโครคอมพิวเตอร์ขนาด 16 บิท สามารถเรียกใช้ได้โดยตรงภายใต้ดอส ใช้ในการวิเคราะห์การสัดวงจรของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม ผลการวิเคราะห์จะเป็นพื้นฐานในการออกแบบและกำหนดขนาดพิกัดของอุปกรณ์ตัดตอนและป้องกันของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยยึดวิธีและแนวทางการวิเคราะห์การสัดวงจรตามมาตรฐานข้อกำหนด และข้อแนะนำของไออีอีอีและมาตรฐานอเมริกัน (IEEE Std, IEEE Recommendation, ANSI)

ผลการวิเคราะห์การสัดวงจรกับตัวอย่างระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมจากมาตราฐาน IEEE Std 141-1976 ซึ่งเป็นระบบที่มีขนาด 19 บัส 46 ลายน์ ได้ผลถูกต้องทุกประการ ทั้งค่ากระแสสัดวงจรที่ใช้เทียบขนาดพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ฟิวส์ และกระแสสัดวงจรสำหรับรีเลย์ถ่วงเวลา

จากการทดลองใช้วิเคราะห์ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าภายในโรงไฟฟ้า ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย 3 แห่ง แห่งแรกคือ ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าภายในโรงไฟฟ้าพลังความร้อนแม่เมาะหน่วยที่ 7 มีขนาด 34 บัส 73 ลายน์ มีกำลังผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 171 เอ็มวีเอ ซึ่งเป็นระบบที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ผลการวิเคราะห์ ใช้เทียบขนาดพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้ตรงกับที่ใช้งานอยู่ แห่งที่สองคือระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าภายในโรงไฟฟ้าพลังความร้อนแม่เมาะหน่วยที่ 8 มีขนาด 41 บัส 89 ลายน์ มีกำลังผลิตจากเครื่อง

กำเนิดไฟฟ้า 333 เอ็มวีเอ เป็นระบบที่อยู่ในขั้นตอนการติดตั้ง ผลการวิเคราะห์การลัดวงจรโดยใช้ข้อมูลจริง ได้ค่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ที่ทำในช่วงแรกของการออกแบบโดยบริษัทวิศวกรที่ปรึกษา สามารถเทียบขนาดพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้ตรงกัน แห่งที่สามคือระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าภายในโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมขนอมหน่วยที่ 1 มีขนาด 8 บัส 16 ลายน์ มีกำลังผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 120 เอ็มวีเอ และ 60 เอ็มวีเอ เป็นระบบที่อยู่ในขั้นตอนการออกแบบ ผลการวิเคราะห์ได้ค่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ที่บริษัทวิศวกรที่ปรึกษาได้ทำไว้ สามารถเทียบขนาดพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้ตรงกัน

สรุปได้ว่า ด้วยซอฟแวร์ที่ได้สร้างขึ้นนี้ สามารถใช้ไมโครคอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือใน การวิเคราะห์การลัดวงจรของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมได้จริงในทางปฏิบัติ สามารถใช้ในการตรวจสอบการวิเคราะห์และการออกแบบของบริษัทวิศวกรที่ปรึกษาได้ผลเป็นที่น่าพอใจ และเป็นข้อพิสูจน์ได้ว่าจะสามารถใช้เป็นเครื่องมือวิเคราะห์การลัดวงจร เพื่อการออกแบบและกำหนดขนาดพิกัดของอุปกรณ์ตัดตอนและป้องกัน ของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Thesis Title	MICROCOMPUTER APPLICATION TO SHORT CIRCUIT ANALYSIS OF INDUSTRIAL POWER SYSTEMS
Name	Mr. Naris Suteetorn
Thesis Advisor	Professor Charuay Boonyubol , Ph.D.
Department	Electrical Engineering
Academic Year	1987

ABSTRACT

In this thesis a software in the form of an application program is developed for 16 bit microcomputer. The program is written in BASIC language compiled by basic compiler and saved on disk ; so the program can be loaded directly and run under DOS. The microcomputer associated with this software package will be a tool for short circuit analysis of industrial power systems. The results of the short circuit analysis will be technical information for designing and determining the ratings of short circuit protective equipment of the system. The method of short circuit analysis is in accordance with IEEE Standard, IEEE Recommendation and American National Standard (ANSI).

The result of short circuit analysis on the example of industrial power system, from IEEE Standard 141-1976, consisting of 19 buses and 46 lines is absolutely correct for all short circuit currents compared with circuit breaker ratings, fuse ratings and short circuit current for time-delayed relaying devices.

The short circuit analysis based on this software package has

also been successfully carried out on the power plant power systems of three EGAT power plants. The first one is the operating power system of Mae Moh Thermal Plant Unit 7 consistihg of 34 buses and 73 lines with an installed capacity of 171 MVA. The circuit breaker ratings selected from short circuit analysis are the same as the ratings of the installed equipment. Secondly, the short circuit analysis using the data of the under-construction power system of the Mae Moh Thermal Plant Unit 8 consisting of 41 buses and 89 lines with a generating capacity of 333 MVA yields the result almost the same as the one recommended the Consultant during the project design criteria phase. Both circuit breaker ratings are equal. Third, the thermal plant power system of Khanom Combined Cycle Plant Unit 1 which is in design phase, consisting of 8 buses and 16 lines with generating capacity of 120 MVA and 60 MVA has been analyzed. The analysis brings about the same result as that of Mae Moh Power Plant Unit 8.

The conclusion is that by using this software package, any 16-bit microcomputer can be used as a tool for short circuit analysis and in actual application it has been satisfactorily used to examine the analysis and design of the Consulting Engineer. Therefore, it is proven that it can be used as a powerful tool for the short circuit analysis for the design and determination of the ratings of short circuit protective equipment for industrial power system.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ของ ศาสตราจารย์ ดร. จรวย บุญยุบล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการวิจัยมาด้วยดีตลอด ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไพบูลย์ ไชยนิล รองศาสตราจารย์ ดร. สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร ดร. ขจรศักดิ์ โหตรภวานนท์ หัวหน้ากองวิศวกรรมไฟฟ้าโรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งได้ให้คำแนะนำจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ และ ดร. สุรชัย สายบัว ผู้ช่วยหัวหน้ากองวิศวกรรมไฟฟ้าโรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและแนวทาง จนได้หัวข้อวิทยานิพนธ์นี้ขึ้นมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญภาพ ..... ฎ
บทที่
1 บทนำ 1
2 การวิเคราะห์การลัดวงจรของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม 6
แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร 7
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส 7
มอเตอร์แบบซิงโครนัสและซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ 8
อินดักชันมอเตอร์ 9
ระบบผลิตกำลังไฟฟ้า 9
หลักเบื้องต้นของการคำนวณกระแสลัดวงจร 10
ลักษณะการเกิดลัดวงจร 10
วงจรสมมูลย์พื้นฐาน 12
ข้อจำกัดในการคำนวณ 14
ค่าอิมพีแดนซ์ 14
สวิชชิงทรานเซียน 14
รายละเอียดการวิเคราะห์ 19
การเตรียมโครงร่างของระบบไฟฟ้า และรวบรวมข้อมูลเบื้องต้น 20
การแปลงข้อมูลเบื้องต้นของอุปกรณ์ต่าง ๆ 23
การรวมอิมพีแดนซ์ 30

การคำนวณการลัดวงจร 31
กระแสลัดวงจรในช่วงไซเกิลแรกสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันสูง. 31
กระแสลัดวงจรในช่วงคอนแทกแยกจากกัน สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันสูง 32
กระแสลัดวงจรในช่วงไซเกิลแรกสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ. 37
กระแสลัดวงจรในไซเกิลแรกสำหรับฟิวส์ 39
กระแสลัดวงจรสำหรับรีเลย์ถ่วงเวลา 42
3 หฤษฎีการวิเคราะห์การลัดวงจรโดยคอมพิวเตอร์ 43
การวิเคราะห์การลัดวงจรโดยใช้บัสอิมพิแดนซ์เมตริกซ์ 43
สมการของระบบไฟฟ้า 43
การคำนวณกระแสลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้า 45
การวิเคราะห์การลัดวงจรโดยไมโครคอมพิวเตอร์ 49
4 โปรแกรมการวิเคราะห์การลัดวงจร 52
โครงสร้างของโปรแกรม 52
การจัดการข้อมูลเบื้องต้น 54
การป้อนข้อมูลใหม่ 54
การใช้ข้อมูลเดิม 56
การนำไฟล์ข้อมูลเดิมมาแก้ไข 56
การลบไฟล์ข้อมูล 58
การนำไฟล์สำรองกลับมาใช้ใหม่ 59
การแสดงข้อมูล 60
โปรแกรมการคำนวณ 70
การแปลงข้อมูลเบื้องต้นให้เป็นอิมพิแดนซ์สมมูลย์ 77
การสร้างบัสอิมพิแดนซ์เมตริกซ์และบันทึกลงไฟล์ 79
การตรวจสอบโครงร่างของระบบไฟฟ้า 82
การสร้างบัสอิมพิแดนซ์เมตริกซ์ 88
การคำนวณกระแสลัดวงจร 94
การคำนวณกระแสลัดวงจรประเภทต่าง ๆ 95

การอินเตอร์โปเลทเพื่อหาแฟคเตอร์ตัวคูณ 104
การคำนวณกระแสที่ไหลในส่วนต่าง ๆ และแรงดันที่บัสของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 105
การเปลี่ยนแปลงข้อมูลเบื้องต้น และการแก้ไขบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ 113
การแสดงผลลัพธ์ 121
การแสดงผลลัพธ์ทางจอภาพ 121
การพิมพ์ผลลัพธ์ทางเครื่องพิมพ์ 126
การแสดงรูปภาพ 129
โครงสร้างไฟล์ข้อมูล 131
โครงสร้างของไฟล์บัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ 131
5 การใช้โปรแกรมและตัวอย่างการวิเคราะห์ 136
การจัดเตรียมข้อมูล 137
ตัวอย่างการวิเคราะห์ 137
เวลาที่ใช้ในการคำนวณ 172
6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 174
เอกสารอ้างอิง 178
ภาคผนวก ก. คู่มือการใช้โปรแกรม 182
ภาคผนวก ข. โปรแกรมการวิเคราะห์การลัดวงจรของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า
ในโรงงานอุตสาหกรรม 209
ภาคผนวก ค. ตัวอย่างผลลัพธ์ทางเครื่องพิมพ์ 263
ภาคผนวก ง. ค่าตัวอย่างของอุปกรณ์ต่าง ๆ 277
ประวัติผู้เขียน 280

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ค่ารีแอคแตนซ์ของเครื่องจักรหมุนในการคำนวณการลัดวงจรแบบต่าง ๆ	29
2.2	แฟคเตอร์ตัวคูณสำหรับคำนวณกระแสลัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ	39
5.1	ข้อมูลของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของตัวอย่างที่ 1	140
5.2	ผลลัพธ์การวิเคราะห์การลัดวงจรของตัวอย่างที่ 1	141
5.3	การเทียบขนาดพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ของตัวอย่างที่ 1	142
5.4	การเทียบขนาดพิกัดของฟิวส์ของตัวอย่างที่ 1	143
5.5	ขนาดพิกัดต่าง ๆ ของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันสูงตามมาตรฐาน ANSI C37.06-1971	144
5.6	ขนาดพิกัดต่าง ๆ ของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำตามมาตรฐาน ANSI C37.06-1973	145
5.7	ขนาดพิกัดต่าง ๆ ของฟิวส์ตามมาตรฐาน ANSI C37.46	146
5.8	ข้อมูลของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของตัวอย่างที่ 2	148
5.9	ผลลัพธ์กระแสลัดวงจรของตัวอย่างที่ 2	148
5.10	ผลลัพธ์กระแสที่ไหลในส่วนต่าง ๆ ของวงจรของตัวอย่างที่ 2	149
5.11	ผลลัพธ์แรงดันที่บัสขณะลัดวงจรของตัวอย่างที่ 2	149
5.12	บัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ของตัวอย่างที่ 2	150
5.13	ข้อมูลของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของตัวอย่างที่ 3	153
5.14	ผลลัพธ์การวิเคราะห์การลัดวงจรของตัวอย่างที่ 3	155
5.15	การเทียบขนาดพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ของตัวอย่างที่ 3	156
5.16	ข้อมูลของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของตัวอย่างที่ 4 ที่สภาวะการทำงานที่ 1	159

5.17 ข้อมูลของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของตัวอย่างที่ 4 ที่สภาวะการทำงานที่ 2 162
5.18 ผลลัพธ์การวิเคราะห์การลัดวงจรของตัวอย่างที่ 4 164
5.19 การเทียบขนาดพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ของตัวอย่างที่ 4 165
5.20 ข้อมูลของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของตัวอย่างที่ 5 169
5.21 ผลลัพธ์การวิเคราะห์การลัดวงจรของตัวอย่างที่ 5 170
5.22 การเทียบขนาดพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ของตัวอย่างที่ 5 171
5.23 เวลาที่ใช้ในการสร้างบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ 173

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	ขั้นตอนการออกแบบระบบไฟฟ้า	5
2.1	กระแสลัดวงจรที่เกิดจากการลัดวงจรที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส	8
2.2	วงจร R, L, C	15
2.3	การเกิดสวิชชิงทรานเซียนของวงจรความต้านทาน R	15
2.4	การเกิดสวิชชิงทรานเซียนของวงจรเหนี่ยวนำ L	15
2.5	กระแสสมดุลย์และกระแสไม่สมดุลย์	17
2.6	อะซิมเมตริกซ์คอลแฟคเตอร์ที่เวลา และอัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ต่าง ๆ กัน	17
2.7	การลดลงของกระแสลัดวงจรสมดุลย์	18
2.8	การแบ่งอินดักชันมอเตอร์ออกเป็นกลุ่ม	23
2.9	(ก) อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง 3 ขดลวด	27
	(ข) วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลง 3 ขดลวด	27
2.10	แฟคเตอร์ตัวคูณซึ่งรวมผลการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรงในการคำนวณกระแสลัดวงจรในช่วงคอนแทกแยกจากกันของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันสูง	34
2.11	แฟคเตอร์ตัวคูณซึ่งรวมผลการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรงและการลดลงของส่วนประกอบกระแสสลับ ในการคำนวณกระแสลัดวงจรในช่วงคอนแทกแยกจากกันของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันสูง	35
2.12	อะซิมเมตริกซ์คอลแฟคเตอร์ที่ครึ่งไซเกิลแรกที่อัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ต่าง ๆ	41
3.1	วงจร 3 โหนด และการวัดค่า Z_{22}, Z_{12}, Z_{32}	44
3.2	วงจร 3 เฟส แทนระบบไฟฟ้าที่เกิดการลัดวงจรที่ P	45

3.3	สัญญลักษณ์ที่ใช้ในโฟลชาร์ท	50
3.4	โฟล์ชาร์ทแสดงการทำงานของโปรแกรมทั้งหมด	51
4.1	โครงสร้างของโปรแกรม	53
4.2	โฟล์ชาร์ทแสดงการจัดการข้อมูลเบื้องต้น	62
4.3	โฟล์ชาร์ทแสดงการป้อนข้อมูลเบื้องต้น	63
4.4	โฟล์ชาร์ทแสดงการใช้ข้อมูลเดิม	64
4.5	(ก), (ข) แสดงโฟล์ชาร์ทการแก้ไขไฟล์ข้อมูล	65
4.6	โฟลชาร์ทแสดงการลบไฟล์ข้อมูล	67
4.7	โฟลชาร์ทแสดงการนำไฟล์สำรองกลับมาใช้ใหม่	68
4.8	โฟลชาร์ทแสดงการแสดงข้อมูลที่มีในไฟล์ข้อมูล	69
4.9	(ก), (ข), (ค), (ง), (จ), (ฉ) โฟลชาร์ทแสดงการทำงานของโปรแกรมการคำนวณ	73
4.10	โฟลชาร์ทแสดงการแปลงข้อมูลเบื้องต้นให้เป็นอิมพิแดนซ์สมมูลย์	78
4.11	โฟลชาร์ทแสดงการตรวจสอบระบบว่าลายน์ใดเป็นบรานช์หรือลิงค์	86
4.12	โฟลชาร์ทแสดงการตรวจสอบแต่ละลายน์ว่าเป็นบรานช์หรือลิงค์	87
4.13	(ก), (ข), (ค) โฟลชาร์ทแสดงการสร้างบัสอิมพิแดนซ์เมตริกซ์	91
4.14	(ก), (ข), (ค) โฟลชาร์ทแสดงการคำนวณกระแสลัดวงจร	100
4.15	โฟลชาร์ทแสดงการตรวจสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าว่าเป็นรีโมทซอสหรือโลคอลซอส	103
4.16	โฟลชาร์ทแสดงการอินเตอร์โปเลทกราฟแฟคเตอร์ตัวคูณของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันสูง	105
4.17	(ก), (ข) โฟลชาร์ทแสดงการคำนวณกระแสในส่วนต่าง ๆ ของวงจรและแรงดันที่บัสขณะลัดวงจร	109
4.18	(ก), (ข) โฟลชาร์ทแสดงการเปลี่ยนข้อมูลเบื้องต้นและดัดแปลงบัสอิมพิแดนซ์เมตริกซ์	119
4.19	โฟลชาร์ทแสดงการพิมพ์ผลลัพธ์	128
4.20	โครงสร้างไฟล์ข้อมูล	134
4.21	โครงสร้างไฟล์บัสอิมพิแดนซ์เมตริกซ์	135

5.1 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของตัวอย่างที่ 1 (จากหนังสือ IEEE Std 141-1976) 139

5.2 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของตัวอย่างที่ 2 (จากหนังสือ Computer Methods in Power System Analysis) 147

5.3 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของตัวอย่างที่ 3 (ของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนแม่เมาะหน่วยที่ 7) 152

5.4 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของตัวอย่างที่ 4 (ของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนแม่เมาะหน่วยที่ 8) ที่สภาวะการทำงานที่ 1 158

5.5 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของตัวอย่างที่ 5 (ของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนแม่เมาะหน่วยที่ 8) ที่สภาวะการทำงานที่ 2 161

5.6 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของตัวอย่างที่ 5 (ของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมขนอม หน่วยที่ 1) 168

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย