แนวทางการสร้างโปรแกรมพลวัตเพื่อวางแผนการบำรุงรักษาแบบเหมาะที่สุดของอุปกรณ์หลักในสถานีไฟฟ้าโดยพิจารณาค่าใช้จ่ายและความเชื่อถือได้

นายสุรวิชญ์ เลาหนันทน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DYNAMIC PROGRAMMING APPROACH TO OPTIMAL MAINTENANCE PLANNING OF MAJOR EQUIPMENT IN SUBSTATION CONSIDERING COST AND RELIABILITY

Mr. Surawit Laohanan

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แนวทางการสร้างโปรแกรมพลวัตเพื่อวางแผนการบำรุงรักษาแบบเหมาะที่สุดของอุปกรณ์หลักในสถานีไฟฟ้าโดยพิจารณาค่าใช้จ่ายและความเชื่อถือได้
โดย	นายสุรวิชญ์ เลาหนันทน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกวิน)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรชัย ชัยทัศนีย์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. สมภพ อัษฎมงคล)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สุรวิชญ์ เลาหนันทน์ : แนวทางการสร้างโปรแกรมพลวัตเพื่อวางแผนการบำรุงรักษาแบบเหมาะที่สุดของอุปกรณ์หลักในสถานีไฟฟ้าโดยพิจารณาค่าใช้จ่ายและความเชื่อถือได้ (DYNAMIC PROGRAMMING APPROACH TO OPTIMAL MAINTENANCE PLANNING OF MAJOR EQUIPMENT IN SUBSTATION CONSIDERING COST AND RELIABILITY) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย, 136 หน้า.

การบริหารสินทรัพย์ภายในสถานีไฟฟ้าเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ โดยเฉพาะระบบเฝ้าระวังสภาวะเพื่อวางแผนงานการบำรุงรักษา การกำหนดแผนงานบำรุงรักษานั้นส่งผลกระทบต่อการทำงานอุปกรณ์ ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า และค่าใช้จ่ายวงชีพ วิทยานิพนธ์นี้มุ่งความสนใจกับการวางแผนบำรุงรักษาระยะยาวโดยพิจารณาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า การวางแผนบำรุงรักษาสามารถแบ่งได้เป็น 2 ระดับ คือ ระดับอุปกรณ์ และระดับสถานีไฟฟ้า เราใช้การแจกแจงแบบไวบูลล์เพื่อประมาณฟังก์ชันความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ ความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้ากำหนดโดยใช้วิธีเซตตัดต่ำสุด และอาจประมาณด้วยความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ที่ส่งผลกระทบอย่างแรงต่อความเชื่อถือได้ของระบบ การกำหนดแผนงานบำรุงรักษามีรูปแบบเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบไม่ต่อเนื่อง เพื่อหาค่าใช้จ่ายวงชีพต่ำที่สุด ภายใต้เงื่อนไขอายุประสิทธิผลสุดท้ายของอุปกรณ์และเงื่อนไขบังคับของความเชื่อถือได้ การหาคำตอบเหมาะที่สุดของการวางแผนบำรุงรักษามีความซับซ้อนและใช้เวลามาก วิทยานิพนธ์นี้เสนอแนวทางของการสร้างโปรแกรมพลวัตเพื่อหาคำตอบเหมาะที่สุดย่อย โดยทำให้ค่าขอบเขตบนของค่าใช้จ่ายวงชีพมีค่าต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายวงชีพที่ได้จากวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต กับคำตอบจากวิธีพันธุกรรมและการบำรุงรักษาตามเวลา เราพบว่าวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตให้แผนงานบำรุงรักษามีค่าใช้จ่ายวงชีพน้อยกว่า และสอดคล้องกับความเชื่อถือได้ที่กำหนด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2560

5970401721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEYWORDS: LIFE CYCLE COST / RELIABILITY / DYNAMIC PROGRAMMING / MAINTENANCE SCHEDULING / SUBSTATION

SURAWIT LAOHANAN: DYNAMIC PROGRAMMING APPROACH TO OPTIMAL MAINTENANCE PLANNING OF MAJOR EQUIPMENT IN SUBSTATION CONSIDERING COST AND RELIABILITY. ADVISOR: PROF.DAVID BANJERDPONGCHAI, Ph.D., 136 pp.

Asset management of substation is an essential issue for smart grid, particularly condition monitoring system for maintenance planning. Maintenance scheduling affects equipment operation, reliability of system, and life cycle cost (LCC). This thesis focuses on long term maintenance by considering reliability of system. Maintenance planning can be divided into equipment level and substation level. Weibull distribution model is used to estimate reliability function of equipment. System reliability is determined using the minimal cut-set method and can be approximated by considering the reliability of devices that strongly impact on system reliability. Optimal maintenance planning is formulated as discrete optimization problem which minimizes LCC subject to specified final condition on effective age of equipment and constraint on system reliability. Finding the optimal solution of the maintenance planning is complicated and time consuming. This thesis proposes dynamic programming (DP) approach to find a suboptimal solution by minimizing an upper bound of LCC. Comparing the results of DP with that using genetic algorithm and a time-based maintenance method, we find that DP provides the maintenance planning with less LCC and satisfy the required reliability.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Department: Electrical Engineering Student's Signature .....
Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature .....
Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จได้ด้วยดี ข้าพเจ้าได้รับคำปรึกษาจากศาสตราจารย์ ดร. เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ท่านให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยด้วยดีตลอดมา และได้กรุณาตรวจสอบ แก้ไข และให้คำแนะนำสำหรับการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์ ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกวิน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรชัย ชัยทัศนีย์ และ ดร. สมภพ อัษฎมงคล (กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย) ที่ได้เสียสละ ตรวจสอบและให้คำแนะนำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณเจ้าหน้าที่บัณฑิตศึกษาของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นอย่างสูงที่ให้ความสะดวกในการติดต่อประสานงาน และขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ได้ให้ทุนการศึกษาและวิจัยระดับปริญญามหาบัณฑิตตลอดระยะเวลาการศึกษา

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจตลอดมา รวมทั้งพี่ น้อง และเพื่อนทุกคนที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง 1

สารบัญภาพ 4

บทที่ 1 บทนำ 8

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 8

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย 13

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 13

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและดำเนินการ 14

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าได้จากวิทยานิพนธ์ 15

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 15

1.6.1 ความน่าจะเป็นของความล้มเหลวของอุปกรณ์ 15

1.6.2 การคำนวณความน่าเชื่อถือระบบไฟฟ้า 16

1.6.3 การจัดการอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า 17

1.6.4 ค่าใช้จ่ายวงชีพ 21

1.6.5 การคำนวณหาจุดคุ้มค่าหรือการหาค่าเหมาะที่สุดของการบำรุงรักษา 22

1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ 25

1.8 สรุป 25

บทที่ 2 การประเมินอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ 26

2.1 รูปแบบอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ 26

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

2.2 แบบจำลองการแจกแจงของอุปกรณ์ 27
2.3 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของการแจกแจงแบบไวบูลล์ 31
2.4 การประเมินความเชื่อถือได้ 33
2.4.1 ฟังก์ชันความล้มเหลว 33
2.4.2 ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ 33
2.4.3 ฟังก์ชันอัตราความล้มเหลว 35
2.4.4 เวลาเฉลี่ยของความล้มเหลว 36
2.5 สรุป 36
บทที่ 3 การประเมินความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้า 37
3.1 แนวคิดพื้นฐานการประเมินความเชื่อถือได้ 37
3.2 เทคนิคการประเมินความเชื่อถือได้ 39
3.2.1 วิธีลดทอนเครือข่าย 39
3.2.2 วิธีเซตตัดต่ำสุด 41
3.3 รูปแบบเหตุการณ์ล้มเหลวภายในระบบไฟฟ้า 43
3.3.1 เหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ 43
3.3.2 เหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอกทีฟ 44
3.3.3 เหตุการณ์ล้มเหลวจากการทำงานผิดปกติของอุปกรณ์ป้องกัน 46
3.3.4 เหตุการณ์ล้มเหลวแบบซ้อนกัน 46
3.3.5 เหตุการณ์ล้มเหลวที่เกิดขึ้นในช่วงการบำรุงรักษาอุปกรณ์ 46
3.4 แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์ 46
3.4.1 แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์แบบ 2 สถานะ 46
3.4.2 แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์แบบ 3 สถานะ 47
3.4.3 แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์แบบ 4 สถานะ 47

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

3.5 การตรวจหาเซตตัดต่ำสุด 48
3.5.1 การตรวจหาเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟ 48
3.5.2 การตรวจหาเซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟ 49
3.6 การประยุกต์ใช้วิธีเซตตัดต่ำสุดกับรูปแบบเหตุการณ์ความล้มเหลว 51
3.6.1 การหาค่าดัชนีประเมินระบบไฟฟ้าจากเซตตัดต่ำสุด 51
3.6.2 การประมาณดัชนีประเมินระบบไฟฟ้าของประเภทเหตุการณ์ความล้มเหลว 54
3.7 การประเมินความเชื่อถือได้เนื่องจากการบำรุงรักษา 58
3.7.1 สภาวะของการบำรุงรักษา 58
3.7.2 การหาเซตตัดต่ำสุดเนื่องจากการบำรุงรักษา 61
3.7.3. การหาระยะเวลาจุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า 63
3.7.4. การคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ภายใต้การบำรุงรักษา 65
3.8 สรุป 67
บทที่ 4 การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้า 68
4.1 แบบจำลองการบำรุงรักษาอุปกรณ์ 68
4.2 ค่าใช้จ่ายวงชีพของอุปกรณ์ 71
4.2.1. ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาเชิงแก้ไข 71
4.2.2 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน 71
4.2.3 ค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า 72
4.3 การกำหนดปัญหาค่าใช้จ่ายการวางแผนบำรุงรักษา 74
4.3.1 การกำหนดปัญหาระดับอุปกรณ์ 74
4.3.2 การกำหนดปัญหาระดับสถานีไฟฟ้า 76
4.4 วิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต 78
4.4.1 องค์ประกอบการสร้างโปรแกรมพลวัต 78

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

4.4.2 ขั้นตอนการสร้างโปรแกรมพลวัตและหลักการของเบลแมน 79
4.4.3 การประยุกต์ใช้การสร้างโปรแกรมพลวัตกับการวางแผนการบำรุงรักษา 80
4.5 สรุป 85
บทที่ 5 การทดสอบและวิเคราะห์ผล 86
5.1 ข้อมูลพื้นฐานและระบบทดสอบ 86
5.1.1 ข้อมูลสถิติความเสียของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า 86
5.1.2 ค่าใช้จ่ายอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า 86
5.1.3 ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้า 87
5.1.4 รูปแบบการจัดเรียงสถานีไฟฟ้า 89
5.1.5 เงื่อนไขบังคับความเชื่อถือได้ระดับอุปกรณ์และระดับสถานีไฟฟ้า 90
5.2 การทดสอบและวิเคราะห์การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาระดับอุปกรณ์ 91
5.2.1 เงื่อนไขอายุประสิทธิผลสุดท้ายของอุปกรณ์ 91
5.2.2 เงื่อนไขความเชื่อถือได้ที่ต้องการของอุปกรณ์ 95
5.2.3 การเปรียบเทียบคำตอบระหว่างวิธีสร้างโปรแกรมพลวัต วิธีพันธุกรรมและการบำรุงรักษาตามเวลา 99
5.3 การทดสอบและวิเคราะห์การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาระดับสถานีไฟฟ้า 105
5.3.1 การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานและบัสถ่ายโอน 106
5.3.2 การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานคู่ 113
5.3.3 การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสและเบรกเกอร์ครึ่ง 117
5.4 สรุป 122
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ 124
6.1 สรุปผลการวิจัย 124
6.2 ข้อเสนอแนะ 125

หน้า

รายการอ้างอิง 126

ภาคผนวก 131

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 136

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างข้อมูลเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของการแจกแจงแบบไวบูลล์ 32
ตารางที่ 2.2 ผลลัพธ์การประมาณค่าพารามิเตอร์ไวบูลล์จากข้อมูลตัวอย่าง..... 33
ตารางที่ 3.1 จำนวนเซตตัดต่ำสุดในระบบตัวอย่าง 42
ตารางที่ 3.2 นิยามแสดงอุปกรณ์ล้มเหลวภายในเวลาเดียวกัน..... 43
ตารางที่ 3.3 การประเมินสภาวะการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบแก้ไขและแบบป้องกัน 62
ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับพลังงาน 65
ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ของการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ... 66
ตารางที่ 4.1 นิยามตัวแปรและสัญญาลักษณ์สำหรับการวางแผนบำรุงรักษา 69
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบการสร้างโปรแกรมพลวัตเพื่อแก้ปัญหาระดับอุปกรณ์ 80
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบวิธีแก้ปัญหาพลวัตเพื่อแก้ปัญหาระดับสถานีไฟฟ้า 80
ตารางที่ 5.1 ข้อมูลทางสถิต พิกัดและค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า..... 87
ตารางที่ 5.2 อัตราการเพิ่มโหลดในแต่ละจุดตามแผน PDP2015 88
ตารางที่ 5.3 เกณฑ์มาตรฐานคุณภาพการให้บริการไฟฟ้าภายในระบบส่ง 91
ตารางที่ 5.4 ผลทดสอบค่าใช้จ่ายวงชีพเหมาะที่สุดของแต่ละอุปกรณ์ภายใต้เงื่อนไขอายุประสิทธิผลสุดท้าย ... 91
ตารางที่ 5.5 แผนงานบำรุงรักษาเหมาะที่สุดของอุปกรณ์ภายใต้เงื่อนไขอายุประสิทธิผลสุดท้าย 92
ตารางที่ 5.6 สัดส่วนค่าใช้จ่ายวงชีพของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังภายใต้เงื่อนไขอายุประสิทธิผลสุดท้าย..... 94
ตารางที่ 5.7 สัดส่วนค่าใช้จ่ายวงชีพของเซอร์กิตเบรกเกอร์ภายใต้เงื่อนไขอายุประสิทธิผลสุดท้าย... 94
ตารางที่ 5.8 สัดส่วนค่าใช้จ่ายวงชีพของบัสบาร์ภายใต้เงื่อนไขอายุประสิทธิผลสุดท้าย..... 94
ตารางที่ 5.9 ผลทดสอบค่าใช้จ่ายวงชีพเหมาะที่สุดของอุปกรณ์โดยมีเงื่อนไขความเชื่อถือได้ที่ต้องการ ... 95
ตารางที่ 5.10 แผนงานบำรุงรักษาระดับอุปกรณ์ของอุปกรณ์ภายใต้เงื่อนความเชื่อถือได้ที่ต้องการ..... 97
ตารางที่ 5.11 สัดส่วนค่าใช้จ่ายวงชีพของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังภายใต้เงื่อนความเชื่อถือได้ที่ต้องการ 98
ตารางที่ 5.12 สัดส่วนค่าใช้จ่ายวงชีพของเซอร์กิตเบรกเกอร์ภายใต้เงื่อนความเชื่อถือได้ที่ต้องการ .. 98

Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.13 สัดส่วนค่าใช้จ่ายวงชีพของบัสบาร์ภายใต้เงื่อนความเชื่อถือได้ที่ต้องการ 98

ตารางที่ 5.14 ค่าตัวแปรของการค้นหาคำตอบด้วยวิธีพันธุกรรม 99

ตารางที่ 5.15 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตกับวิธีพันธุกรรม ภายใต้อายุประสิทธิผล 100

ตารางที่ 5.16 ผลลัพธ์ค่าใช้จ่ายวงชีพจากการบำรุงรักษาตามเวลาของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า 103

ตารางที่ 5.17 เซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟและพาสซีฟสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานและบัสถ่ายโอน 106

ตารางที่ 5.18 ความเชื่อถือได้ที่ต้องการของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานและ บัสถ่ายโอนภายในระยะเวลาวางแผนบำรุงรักษา 107

ตารางที่ 5.19 ผลทดสอบการวางแผนบำรุงรักษาของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานและบัสถ่าย โอนด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต 107

ตารางที่ 5.20 ผลทดสอบการวางแผนบำรุงรักษาของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานและบัสถ่าย โอนด้วยวิธีพันธุกรรม 108

ตารางที่ 5.21 ผลลัพธ์การวางแผนบำรุงรักษาของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานและบัสถ่ายโอน ด้วยการบำรุงรักษาตามเวลา 108

ตารางที่ 5.22 เซตตัดต่ำที่สุดแบบแอกทีฟและพาสซีฟของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานคู่ 113

ตารางที่ 5.23 ผลทดสอบการวางแผนบำรุงรักษาของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานคู่ด้วย วิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต 114

ตารางที่ 5.24 ผลทดสอบการวางแผนบำรุงรักษาของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานคู่ด้วยวิธีพันธุกรรม 114

ตารางที่ 5.25 ผลลัพธ์การวางแผนบำรุงรักษาของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานคู่ด้วยการ บำรุงรักษาตามเวลา 115

ตารางที่ 5.26 เซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟและพาสซีฟรูปแบบบัสและเบรกเกอร์ครึ่ง 117

ตารางที่ 5.27 ผลทดสอบการวางแผนบำรุงรักษาของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสและเบรกเกอร์ครึ่ง ด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต 118

ตารางที่ 5.28 ผลทดสอบการวางแผนบำรุงรักษาอุปกรณ์ของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสและเบรก เกอร์ครึ่งด้วยวิธีพันธุกรรม 119

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.29 ผลลัพธ์การวางแผนบำรุงรักษาของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสและเบรกเกอร์ครึ่งด้วยการบำรุงรักษาตามเวลา 119

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญภาพ

รูปที่ 1.1 จำนวนอุปกรณ์หลักภายในระบบส่งไฟฟ้ากับอายุการใช้งาน ปี 2559 [2] 8
รูปที่ 1.2 การพัฒนาของรูปแบบการบำรุงรักษา 10
รูปที่ 1.3 การแบ่งประเภทการบำรุงรักษา 12
รูปที่ 1.4 ขั้นตอนการกำหนดแผนการบำรุงรักษาสำหรับอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า 24
รูปที่ 2.1 กราฟเส้นโค้งอ่างน้ำ (Bathtub curve) [33] 27
รูปที่ 2.2 กราฟเปรียบเทียบฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบไวบูลล์โดยมี พารามิเตอร์มาตราส่วนเป็น 1 29
รูปที่ 2.3 กราฟเปรียบเทียบฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบไวบูลล์โดยมี พารามิเตอร์รูปร่างเป็น 1 29
รูปที่ 2.4 กราฟเปรียบเทียบฟังก์ชันแจกแจงสะสมแบบไวบูลล์โดยมีพารามิเตอร์มาตราส่วนเป็น 1 . 30
รูปที่ 2.5 กราฟเปรียบเทียบฟังก์ชันแจกแจงสะสมแบบไวบูลล์ โดยมีพารามิเตอร์รูปร่างเป็น 1 30
รูปที่ 2.6 กราฟเปรียบเทียบฟังก์ชันความเชื่อถือได้โดยมีพารามิเตอร์มาตราส่วนเป็น 1 34
รูปที่ 2.7 กราฟเปรียบเทียบฟังก์ชันความเชื่อถือได้โดยมีพารามิเตอร์รูปร่างเป็น 1 34
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันความล้มเหลวและฟังก์ชันความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ 35
รูปที่ 2.9 กราฟเปรียบเทียบฟังก์ชันอัตราความล้มเหลวโดยมีพารามิเตอร์มาตราส่วนเป็น 1 35
รูปที่ 3.1 การแบ่งประเภทของความเชื่อได้ของระบบไฟฟ้า 37
รูปที่ 3.2 ระดับการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า 38
รูปที่ 3.3 การเชื่อมต่ออุปกรณ์แบบอนุกรม 40
รูปที่ 3.4 การเชื่อมต่ออุปกรณ์แบบขนาน 40
รูปที่ 3.5 ระบบทดสอบตัวอย่าง 42
รูปที่ 3.6 กลุ่มเซตตัดต่ำสุดของระบบตัวอย่าง 43
รูปที่ 3.7 แผนภาพความแตกต่างระหว่างเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟและแบบแอกทีฟ 44
รูปที่ 3.8 แผนภาพความแตกต่างสถานะของเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟและแบบแอกทีฟ 45

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3.9 การทำงานของระบบโดยที่อุปกรณ์ CB3 เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟและแบบแอกทีฟ ... 45
รูปที่ 3.10 แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์แบบ 2 สถานะ ... 46
รูปที่ 3.11 แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์แบบ 3 สถานะ ... 47
รูปที่ 3.12 แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์แบบ 4 สถานะ ... 47
รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการตรวจหาเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟ ... 50
รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการตรวจหาเซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟ ... 51
รูปที่ 3.15 การลดรูปเซตตัดต่ำสุดระบบขนาน ... 52
รูปที่ 3.16 การลดรูปเซตตัดต่ำสุดของระบบอนุกรม ... 53
รูปที่ 3.17 ช่วงเวลาของการบำรุงรักษาป้องกัน ... 59
รูปที่ 3.18 ช่วงเวลาขั้นตอนการบำรุงรักษาป้องกันของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ... 60
รูปที่ 3.19 ช่วงเวลาขั้นตอนการบำรุงรักษาป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและบัสบาร์ ... 61
รูปที่ 3.20 ระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าภายใต้การบำรุงรักษาแบบป้องกัน กรณีไม่มีอุปกรณ์สำรองเชื่อมต่อ ... 64
รูปที่ 3.21 ระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าภายใต้การบำรุงรักษาแบบป้องกัน กรณีมีอุปกรณ์สำรองเชื่อมต่อ ... 64
รูปที่ 3.22 ระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าเนื่องจากการบำรุงรักษา ... 65
รูปที่ 4.1 ผลกระทบการบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่ออัตราความล้มเหลว[36] ... 70
รูปที่ 4.2 ผลกระทบการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ทดแทนต่ออัตราความล้มเหลว[36] ... 70
รูปที่ 4.3 ค่าใช้จ่ายระดับอุปกรณ์ ... 74
รูปที่ 4.4 ค่าใช้จ่ายระดับสถานีไฟฟ้า ... 76
รูปที่ 4.5 รูปแบบการสร้างโปรแกรมพลวัต ... 79
รูปที่ 4.6 ขั้นตอนการประยุกต์ใช้วิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตเพื่อหาค่าใช้จ่ายต่ำสุดระดับอุปกรณ์ .. 81
รูปที่ 4.7 ขั้นตอนการประยุกต์ใช้วิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตเพื่อหาการตัดสินใจระดับอุปกรณ์ 82
รูปที่ 4.8 ขั้นตอนการประยุกต์ใช้วิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตเพื่อหาวางแผนระดับสถานีไฟฟ้า 83

รูปที่ 5.1 อัตราการเพิ่มโหลดของจุดโหลดตามแผน PDP2015 89
รูปที่ 5.2 การจัดเรียงอุปกรณ์ภายในสถานไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานและบัสถ่ายโอน 89
รูปที่ 5.3 การจัดเรียงอุปกรณ์ภายในสถานไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานคู่ 90
รูปที่ 5.4 การจัดเรียงอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสและเบรกเกอร์ครึ่ง 90
รูปที่ 5.5 ความเชื่อถือได้ของการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 92
รูปที่ 5.6 ความเชื่อถือได้ของการบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์ 93
รูปที่ 5.7 ความเชื่อถือได้ของการบำรุงรักษาบัสบาร์ 93
รูปที่ 5.8 ความเชื่อถือได้ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังภายใต้เงื่อนไขความเชื่อถือได้ที่ต้องการ 96
รูปที่ 5.9 ความเชื่อถือได้ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ภายใต้เงื่อนไขความเชื่อถือได้ที่ต้องการ 96
รูปที่ 5.10 ความเชื่อถือได้ของบัสบาร์ภายใต้เงื่อนไขความเชื่อถือได้ที่ต้องการ 97
รูปที่ 5.11 การลู่เข้าของคำตอบของค่าใช้จ่ายววชีพของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 101
รูปที่ 5.12 การลู่เข้าของคำตอบของค่าใช้จ่ายวงชีพของเซอร์กิตเบรกเกอร์ 101
รูปที่ 5.13 การลู่เข้าของคำตอบของค่าใช้จ่ายวงชีพของบัสบาร์ 102
รูปที่ 5.14 ความเชื่อถือได้ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจากการบำรุงรักษาตามเวลา 103
รูปที่ 5.15 ความเชื่อถือได้ของเซอร์กิตเบรกเกอร์จากการบำรุงรักษาตามเวลา 104
รูปที่ 5.16 ความเชื่อถือได้ของบัสบาร์จากการบำรุงรักษาตามเวลา 104
รูปที่ 5.17 ดัชนี *SAIFI* ของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานและบัสถ่ายโอนของแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีสร้างโปรแกรมพลวัต วิธีพันธุกรรมและการบำรุงรักษาตามเวลา 109
รูปที่ 5.18 ความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ Tx1 และ Tx2 ของแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีสร้างโปรแกรมพลวัตและการบำรุงรักษาตามเวลา 110
รูปที่ 5.19 ความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ Tx3 ของแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีสร้างโปรแกรมพลวัตและการบำรุงรักษาตามเวลา 111
รูปที่ 5.20 ความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ Main bus ของแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีสร้างโปรแกรมพลวัตและการบำรุงรักษาตามเวลา 111

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 5.21 ดัชนี *SAIFI* ของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานคู่ของแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต วิธีพันธุกรรม และการบำรุงรักษาตามเวลา 115

รูปที่ 5.22 ดัชนี *SAIFI* ของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสและเบรกเกอร์ครึ่งของแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต วิธีพันธุกรรมและการบำรุงรักษาตามเวลา..... 120

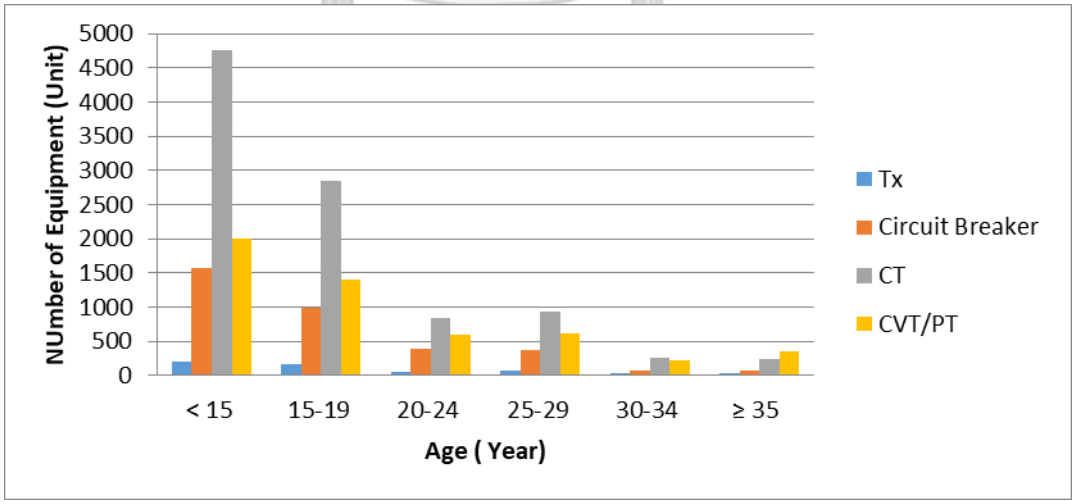
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1
บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึง ที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ เป้าหมายการวิจัย ขอบเขตของการศึกษา ขั้นตอนการศึกษาและดำเนินการ ประโยชน์ที่คาดว่าได้รับ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และเนื้อหาของโครงร่างวิทยานิพนธ์ในแต่ละบท

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

จากการศึกษาสถิติความต้องการใช้ไฟฟ้าในระหว่างปี 2556-2558 [1] พบว่าในปี 2556 ประเทศไทยมีความต้องการไฟฟ้าพลังงานสูงสุด 26,598.14 MW ในขณะที่ปี 2558 มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 27,345.80 MW จะเห็นว่าเพิ่มขึ้น 2.81% ทั้งนี้เนื่องมาจากการขยายตัวในภาคการผลิตและอุตสาหกรรม รวมถึงภาคครัวเรือนและที่อยู่อาศัย เมื่อพิจารณาระบบส่งไฟฟ้าภายในประเทศไทยของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย(กฟผ.) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสถานีไฟฟ้าที่มีหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า และเพิ่มหรือลดระดับไฟฟ้าให้เหมาะสมต่อวัตถุประสงค์การใช้งาน พบว่าอุปกรณ์หลักได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power transformer) เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit breaker) หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (Current transformer) และหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า (Voltage transformer) มีอายุการใช้งานมาเป็นเวลานาน โดยมีสัดส่วนอายุการใช้งานและจำนวนอุปกรณ์ที่ติดตั้งดังรูปที่ 1



รูปที่ 1.1 จำนวนอุปกรณ์หลักภายในระบบส่งไฟฟ้ากับอายุการใช้งาน ปี 2559 [2]

จากรูปที่ 1 จำนวนอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าภายในปี 2559 นั้นประกอบด้วย หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจำนวน 583 อุปกรณ์, เซอร์กิตเบรกเกอร์จำนวน 3,471 อุปกรณ์, หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า

จำนวน 9,900 อุปกรณ์ และหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าจำนวน 5,197 อุปกรณ์ เมื่อพิจารณาอุปกรณ์หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจะเห็นได้ว่าจำนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่อายุมากกว่า 25 ปี มีจำนวน 25.56% และเซอร์กิตเบรกเกอร์มีจำนวน 14.95% เป็นต้น และมีจำนวนเพิ่มขึ้นทุกปี ส่งผลให้อุปกรณ์เสื่อมสภาพเป็นไปตามอายุของอุปกรณ์ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์นั้นลดลง และอุปกรณ์มีอัตราความล้มเหลวสูงขึ้น ผลที่ตามมาคือ สถานีไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ (reliability) และความมั่นคงของระบบไฟฟ้า (security) ลดลง นอกจากนี้มีโอกาสที่จะทำให้เกิดไฟฟ้าดับต่อผู้ใช้ไฟฟ้าชั่วคราว หรืออาจส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นระยะเวลานานและเป็นบริเวณกว้างครั้งใหญ่ได้ เพื่อป้องกันเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นภายในระบบส่งไฟฟ้า ดังนั้นกฟผ. จึงมีภาระค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมากในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าแรงสูงให้อยู่ในสภาพดีและใช้งบประมาณลงทุนเป็นจำนวนมากในโครงการต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น โครงการเปลี่ยนทดแทนเซอร์กิตเบรกเกอร์และสวิตช์ตัดวงจร (disconnecting switch) ที่เสื่อมสภาพในปี 2559-2564 มีจำนวนสูงถึง 175 ล้านบาท โครงการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าใหม่ โครงการปรับปรุงสถานีไฟฟ้าเก่า เป็นต้น

นอกจากนี้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่ต้องหาคำตอบ คือ ควรดำเนินการบำรุงรักษาประจำ (routine maintenance) การบำรุงรักษาใหญ่ (major overhaul) เมื่อไร และควรหยุดใช้งานอุปกรณ์และการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ทดแทน (replacement) เมื่อไร ปัจจัยต่างๆ ประกอบการพิจารณา อาทิเช่น

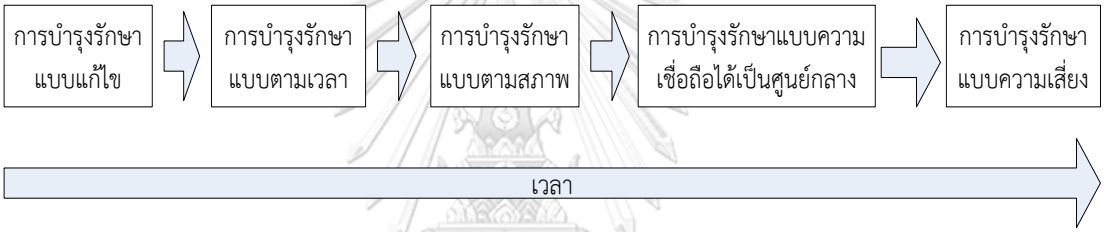
1. อายุการใช้งานของอุปกรณ์ อุปกรณ์ที่มีอายุมากย่อมมีประสิทธิภาพที่ลดลง แต่มีสภาพการใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังรับภาระต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง แต่เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีอายุการใช้งานเท่ากัน มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านน้อยกว่าหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ทำให้สภาพฉนวนแตกต่างกัน สามารถบอกเป็นนัยได้ว่าอุปกรณ์ทั้งสองตัวนี้มีอายุประสิทธิผลที่แตกต่างกัน

2. ความสำคัญและตำแหน่งของอุปกรณ์ต่อระบบไฟฟ้า เนื่องจากอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้ามีอุปกรณ์เป็นจำนวนมาก อุปกรณ์บางตัวอาจอยู่ในตำแหน่งที่เส้นทางการจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยตรง เช่น หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เป็นต้น เมื่อมีการบำรุงรักษาอุปกรณ์หรือเหตุการณ์ล้มเหลวเกิดขึ้นจะส่งผลให้ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ผู้ใช้ไฟฟ้าได้ ทำให้อุปกรณ์เหล่านี้มีความสำคัญมาก ในขณะที่อุปกรณ์บางตัวเมื่อมีการบำรุงรักษา หรือเหตุการณ์ล้มเหลวเกิดขึ้น ไม่ได้ส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับจึงมีความสำคัญของอุปกรณ์น้อยกว่า

3. ค่าใช้จ่ายวงชีพ (life cycle cost) ได้แก่ ต้นทุนค่าใช้จ่ายบำรุงรักษา และค่าเสียโอกาสการขายพลังงานไฟฟ้า หากอุปกรณ์นั้นมีต้นทุนค่าใช้จ่ายสูง ภาระในการบำรุงรักษาจึงมีความสำคัญมาก ในขณะที่อุปกรณ์บ้างตัวมีต้นทุนที่ต่ำ แต่อาจมีผลกระทบที่รุนแรงทำให้ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้มีภาระค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ตัวนี้อาจมีความสำคัญเทียบเท่ากับอุปกรณ์ที่มีมูลค่าสูงได้

4. ประวัติการทำงานของอุปกรณ์ อุปกรณ์แต่ละตัวนั้นมีเหตุการณ์ความล้มเหลว การซ่อมแซมและประสิทธิภาพของการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่แตกต่างกันของบุคคลที่เข้าไปทำงาน จึงทำให้อายุประสิทธิผลของอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายวงชีพของอุปกรณ์นั้นก็จะแตกต่างกัน เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์มีความล้มเหลวเกิดขึ้นทุกๆ 3 ปี เนื่องจากมีกระแสลัดวงจรเกิดขึ้นบ่อย ทำให้ต้องมีการบำรุงรักษาเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้อายุประสิทธิผลของอุปกรณ์ก็มีค่าลดลงและค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาเพิ่มขึ้น เป็นต้น

การบำรุงรักษาอุปกรณ์ คือ การกระทำที่คงที่สภาพหรือรักษาสภาพในการดำรงอยู่ที่จำเป็นเพื่อให้อุปกรณ์ทำงานได้ดังเดิม เป็นสิ่งที่พึ่งควรปฏิบัติเพื่อรักษาความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ อุปกรณ์สามารถทำงานได้ตามหน้าที่ และให้ระบบทั้งหมดมีความมั่นคง โดยรูปแบบการบำรุงรักษาอุปกรณ์นั้น ได้มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ดังรูปที่ 1.2 เพราะมีการพัฒนาของเทคโนโลยีและความรู้อย่างต่อเนื่อง สามารถสรุปรูปแบบการบำรุงรักษาได้ทั้งหมด 5 แบบ ดังนี้



รูปที่ 1.2 การพัฒนาของรูปแบบการบำรุงรักษา

(1) การบำรุงรักษาแบบแก้ไข (Corrective maintenance)

เป็นกลยุทธ์การบำรุงรักษาอุปกรณ์ก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเสียหายเกิดขึ้นเท่านั้น เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นก็จะซ่อมแซมอุปกรณ์หรือนำอุปกรณ์ใหม่มาเปลี่ยนทดแทน การบำรุงรักษาแบบนี้นั้นจะใช้เวลาซ่อมแซมอุปกรณ์ค่อนข้างนาน เนื่องจากไม่ได้มีการวางแผนล่วงหน้า จึงทำให้ขาดความพร้อมสำหรับการบำรุงรักษา อาจต้องใช้กำลังคนมากกว่าที่วางแผน ทำให้มีค่าใช้จ่ายมากกว่าที่วางแผนไว้

(2) การบำรุงรักษาตามเวลา (Time based maintenance)

การกำหนดช่วงเวลาสำหรับการบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ เพื่อลดอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์และเพิ่มความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ ซึ่งสามารถกำหนดค่าใช้จ่ายทีเกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน การบำรุงรักษาแบบนี้สามารถกำหนดได้หลากหลายรูปแบบเช่น การบำรุงรักษาครั้งใหญ่ (Major overhaul) ของตัวเปลี่ยนจุดแยกของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า(On load tap changer, OLTC) ทุก 5 ปี การบำรุงรักษาอุปกรณ์ทางกลของเซอร์กิตเบรกเกอร์เมื่อมีการใช้งานไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ทั้งหมด 2,000 ครั้ง เป็นต้น โดยการบำรุงรักษาแบบนี้จะถูกกำหนดไว้ตามประสบการณ์การใช้งานของผู้ใช้ ข้อมูลสถิติความเสียหาย และคำแนะนำจากผู้ผลิต

(3) การบำรุงรักษาตามสภาพ (Condition based maintenance)

อุปกรณ์จะถูกประเมินสภาพการใช้งานปัจจุบันเพื่อตัดสินใจว่าควรบำรุงรักษา หรือไม่บำรุงรักษา การบำรุงรักษาแบบนี้นั้นจะนำเทคโนโลยีมาเพื่อตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ของอุปกรณ์ตลอดเวลา เช่น การทดสอบทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ การทดสอบความเป็นฉนวนน้ำมัน เป็นต้น เพื่อนำมาวิเคราะห์หาอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ หรือคาดการณ์ความเสียหายที่จะเกิดขึ้นได้ สังเกตได้ว่าการบำรุงรักษาแบบนี้นั้นเป็นการบำรุงรักษาแบบป้องกันได้เหมือนกับการบำรุงรักษาตามเวลา แต่มีประสิทธิภาพที่ผลที่ดีกว่าทั้งในด้าน การลงทุน การนำข้อมูลมาเพื่อดูแนวโน้มความเสียหายของอุปกรณ์ และสามารถกำหนดแผนงานล่วงหน้าของการบำรุงรักษาได้อย่างชัดเจน

(4) การบำรุงรักษาโดยมีความเชื่อถือได้เป็นศูนย์กลาง (Reliability center maintenance)

การบำรุงรักษาโดยมีความเชื่อถือได้เป็นศูนย์กลาง คือ เป็นกระบวนการเพื่อประเมิน กำหนดแผนงานบำรุงรักษาอย่างเหมาะสมและมีประสิทธิผลด้วยการระบุหน้าที่ และสาเหตุการเกิดความเสียหาย เพื่อลดความผลกระทบให้เกิดน้อยที่สุด และมีความเชื่อถือได้สูงสุด รวมทั้งลดจำนวนงานบำรุงรักษาที่ไม่จำเป็นออกไป สาระสำคัญของการบำรุงรักษาแบบนี้ คือ การนำความรู้ทางความเชื่อถือได้มาช่วยการตัดสินใจงานบำรุงรักษา และการจัดงานทั้งหมดตามความสำคัญของหน้าที่ของอุปกรณ์

(5) การบำรุงรักษาแบบความเสี่ยง (Risk based maintenance)

การบำรุงรักษาแบบความเสี่ยงเป็นการบำรุงโดยพิจารณาปัจจัย 2 ปัจจัย ได้แก่ (1) ดัชนีความสำคัญของอุปกรณ์ (Importance index, i) เกี่ยวข้องกับความสำคัญของอุปกรณ์ต่อระบบทั้งหมด และ (2) ดัชนีสภาพของอุปกรณ์ (Condition index, c) เป็นข้อมูลทางด้านเทคนิคของแต่ละอุปกรณ์ จากนั้นก็นำค่าดัชนีที่ได้ไปประเมินความเสี่ยงร่วมกันด้วยเมทริกซ์ความเสี่ยง (Risk matrix) เพื่อกำหนดแผนงานบำรุงรักษาของอุปกรณ์นั้นอย่างเหมาะสม ส่งผลให้อุปกรณ์แต่ละอุปกรณ์มีการวิธีการบำรุงรักษาที่แตกต่างกัน

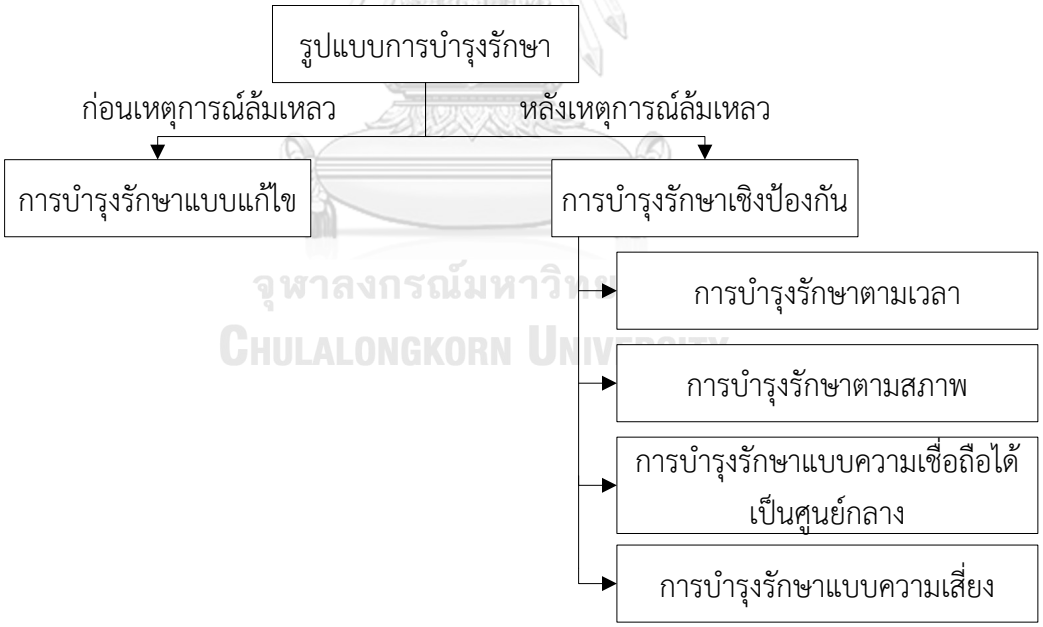
จากวิธีการบำรุงรักษาทั้งหมด 5 แบบ สามารถจัดกลุ่มตามลักษณะดำเนินงานแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ดังต่อไปนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1. การบำรุงรักษาภายหลังเหตุการณ์ล้มเหลว การบำรุงรักษาแบบนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีเหตุการณ์ขัดข้อง ความเสียหายเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ หรือไม่สามารถคาดการณ์เหตุการณ์ความล้มเหลวได้ ดังนั้น การบำรุงรักษาแบบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้อุปกรณ์นำกลับมาใช้งานได้อย่างรวดเร็ว จึงต้องทำการบำรุงรักษาแบบแก้ไขทันที

2. การบำรุงรักษาก่อนเหตุการณ์ล้มเหลว การบำรุงรักษาแบบนี้มีวัตถุประสงค์ต่างๆ เช่น เพื่อป้องกันอุปกรณ์ให้เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวน้อยที่สุด การรักษาสภาพการใช้งานของอุปกรณ์ การเพิ่มความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ และลดความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นต่อระบบ เป็นต้น การบำรุงรักษาที่อยู่ในกลุ่มนี้นั้นประกอบด้วย การบำรุงรักษาตามเวลา การบำรุงรักษาตามสภาพ การบำรุงรักษาโดยมีความเชื่อถือได้เป็นศูนย์กลาง และการบำรุงรักษาความเสี่ยง ที่ได้ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น การบำรุงรักษาแบบนี้เป็นการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน เพื่อป้องกันอุปกรณ์และระบบเกิดเหตุการณ์ความล้มเหลว การแบ่งประเภทการบำรุงรักษา

จากเหตุผลข้างต้น สามารถกล่าวสรุปได้ว่ากลยุทธ์การบำรุงรักษาแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ การบำรุงรักษาก่อนเหตุการณ์ล้มเหลวหรือเรียกว่า การบำรุงรักษาแบบป้องกัน (Preventive maintenance) และหลังเหตุการณ์ล้มเหลว ดังรูปที่ 1.3



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 1.3 การแบ่งประเภทการบำรุงรักษา

การบำรุงรักษาทั้งสองประเภทนั้นมีผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งของการบำรุงรักษาก่อนเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ รวมทั้งการบำรุงรักษาทั้งสองแบบนั้นส่งผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งสามารถบอกเป็นค่าเสียโอกาสในการขายพลังงานไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าได้

ในอนาคตอันใกล้นี้ระบบส่งไฟฟ้าจะปรับเปลี่ยนไปสู่การเป็นโครงข่ายอัจฉริยะ (smart grid) ประกอบด้วยสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ (smart substation) ภายในประกอบด้วย อุปกรณ์อัจฉริยะ (smart equipment) ข้อมูลต่างๆ ของระบบส่งไฟฟ้า รวมถึงอุปกรณ์ไฟฟ้าจะแจ้งสถานะการใช้งานแบบออนไลน์ (online monitoring) รวบรวม และประมวลผลด้วยระบบอัตโนมัติ ดังนั้นการพัฒนาแบบจำลองประเมินสภาพการใช้งานอุปกรณ์เพื่อใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการตัดสินใจกำหนดแผนบำรุงรักษาที่เหมาะสมจะก่อให้เกิดประโยชน์โดยตรงกับกฟผ. ดังนั้นเพื่อให้การจัดการและบริหารอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในระบบส่งนั้นมีความเหมาะสมทั้งในด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ วิทยานิพนธ์นี้จะพัฒนาแนวทางสำหรับการจัดการอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าแรงสูงอย่างเหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เพื่อหาแบบจำลองอายุการใช้งานและความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าของ กฟผ.
2. เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการบำรุงรักษากับค่าใช้จ่ายวงชีพของอุปกรณ์ไฟฟ้า
3. เพื่อเสนอแนวทางแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงอย่างเหมาะสม โดยคำนึงถึงการปฏิบัติการของระบบไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขความเชื่อถือได้และเศรษฐศาสตร์

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. พิจารณาอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เซอร์กิตเบรกเกอร์ และบัสบาร์เท่านั้น
2. วิเคราะห์ข้อมูลสถิติความเสียหายอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าโดยอ้างอิงจาก กฟผ.อุปกรณ์ที่ถูกเปลี่ยน และปลดการใช้งานภายใน กฟผ. ระยะเวลา 40 ปี ภายใต้การบำรุงรักษาอุปกรณ์
3. อาศัยการเพิ่มขึ้นของโหลดภายในสถานีไฟฟ้าตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าประเทศไทย ปี 2558-2579 (PDP2015)
4. กำหนดระยะเวลาวางแผนงานการบำรุงรักษาอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าเป็นระยะเวลา 25 ปี โดยผลกระทบของการบำรุงรักษานั้นมีผลต่ออายุประสิทธิผลของอุปกรณ์
5. ประสิทธิภาพของการบำรุงรักษาอุปกรณ์แต่ละครั้งมีค่าที่
6. พิจารณารูปแบบการเชื่อมต่อภายในสถานีไฟฟ้า ได้แก่ รูปแบบบัสประธานและบัสถ่ายโอน (Main & Transfer bus substation), รูปแบบบัสประธานคู่ (Double bus double breaker substation) และรูปแบบบัสและเบรกเกอร์ครึ่ง (Breaker and a half bus substation)
7. พิจารณารูปแบบการบำรุงรักษา 2 รูปแบบ คือ การบำรุงรักษาแบบแก้ไขและการบำรุงรักษาแบบป้องกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

8. พิจารณาการประเมินความเชื่อถือได้ด้วยวิธีวิเคราะห์แบบเซตตัดต่ำสุด

9. พิจารณาการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต (Dynamic Programming)

10. พิจารณาสถานการณ์ทำงานของอุปกรณ์ 3 สถานะ ได้แก่ สถานะปกติ (Up state), สถานะการซ่อมแซม (Repair state) และสถานะการสวิตซ์ (Switching state)

11. ไม่พิจารณาปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้า

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและดำเนินการ

1. ทบทวนวรรณกรรม บทความวิชาการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ดังนี้
   1.1 ทฤษฎีพื้นฐานความน่าจะเป็นและแบบจำลองต่างๆ สำหรับอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าแรงสูง
   1.2 ทฤษฎีพื้นฐานการประเมินความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า
   1.3 โครงสร้างค่าใช้จ่ายวงชีพ ประกอบด้วย การลงทุน การบำรุงรักษา ความเสียหายในระบบไฟฟ้า เป็นต้น
   1.4 แบบจำลองและผลกระทบของวิธีการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบต่างๆ
   1.5 วิธีการคำนวณและการหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization)
2. วิเคราะห์และระบุปัญหาที่จะศึกษา
   2.1 ตารางเวลาการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยมีค่าใช้จ่ายต่ำสุดระดับอุปกรณ์และระดับสถานีไฟฟ้า ภายใต้เงื่อนไขความเชื่อถือได้
   2.2 เปรียบเทียบคำตอบจากวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของการวางแผนบำรุงรักษาอุปกรณ์
3. กำหนดขั้นตอนและขอบเขตงานวิจัย
4. รวบรวมข้อมูลอายุการใช้งานของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าแรงสูง และจำนวนอุปกรณ์ที่ถูกปลดและเปลี่ยนทดแทนของเดิม ค่าใช้จ่ายต่างๆ ภายในสถานีไฟฟ้าแรงสูงและข้อมูลอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง
5. พัฒนาโปรแกรมสำหรับคำนวณความน่าจะเป็นของความล้มเหลวของอุปกรณ์และความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้า
6. พัฒนาโปรแกรมเพื่อคำนวณการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการบำรุงรักษาระดับอุปกรณ์และระดับสถานีไฟฟ้า
7. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าได้จากวิทยานิพนธ์

1. ระบุพารามิเตอร์ที่สำคัญของค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าของ กฟผ.
2. ประมาณค่าใช้จ่ายและแนวทางการหาค่าเหมาะที่สุดของการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าของ กฟผ.
3. เสนอแนวทางการลดต้นทุนและค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าของ กฟผ.

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาและค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวกับการจัดการและการวางแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า แบ่งเป็น 5 เรื่อง ดังนี้

1. ความน่าจะเป็นของความล้มเหลวของอุปกรณ์
2. การคำนวณความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า
3. การจัดการอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า
4. ค่าใช้จ่ายวงชีพ
5. การคำนวณหาจุดคุ้มค่าหรือการหาค่าเหมาะที่สุดของการบำรุงรักษา

1.6.1 ความน่าจะเป็นของความล้มเหลวของอุปกรณ์

W. Li และ S. Pai (2002) [3] นำเสนอความไม่สามารถใช้สอยได้ (Unavailability) ของอุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้าซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า โดยปกติความไม่พร้อมใช้งานของอุปกรณ์นั้นจะเกี่ยวข้องกับระยะเวลาการซ่อมแซมเมื่อเกิดความเสียหาย ผู้เขียนนั้นได้นิยามและเสนอวิธีการคำนวณค่าความไม่สามารถใช้สอยได้เนื่องจากการเสื่อมสภาพตามอายุของอุปกรณ์ (Unavailability of equipment aging failure) พร้อมทั้งยกตัวอย่างการคำนวณและประยุกต์ใช้งานกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีอายุแตกต่างกันจำนวน 3 ตัว ระดับแรงดัน 230/12 กิโลโวลต์ (kV) ซึ่งใช้ข้อมูลย้อนหลัง 15 ปีจากฐานข้อมูล BC Hydro โดยตัวแปรที่พิจารณา คือ ช่วงเวลาการเกิดความเสียหายย่อย (interval in subsequent) ซึ่งแบ่งเป็น 1, 2 และ 10 ปี ผลลัพธ์ที่ได้คือ ความน่าจะเป็นของอุปกรณ์ที่เสื่อมสภาพตามอายุนั้นจะเพิ่มขึ้น มีจุดเด่นของงานวิจัยนี้ คือ สามารถประยุกต์ใช้ได้กับอุปกรณ์ทั้งในระบบผลิต ส่งและจำหน่าย และเหมาะที่จะใช้กับการวางแผนและดำเนินงาน เพราะมีการคำนึงถึงอายุอุปกรณ์

K. Xie และ W. Li (2009) [4] นำเสนอแบบจำลองเพื่อคำนวณหาความไม่พร้อมใช้งานเนื่องจากสภาพตามอายุของอุปกรณ์ โดยใช้การแจกแจงปรกติ (Normal distribution) ข้อมูลที่ใช้เพื่อแสดงเป็นตัวอย่าง คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 7 ตัว และทดสอบกับระบบทดสอบรอยบิลลิงตัน (Roy Billinton test system, RBTS) และ IEEE-RTS วิธีการนี้มีข้อดีคือมีค่าความแม่นยำมากกว่าวิธีปกติและมีการคำนึงถึงผลกระทบของอายุอุปกรณ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

J. Pan และคณะ (2009) [5] นำเสนอวิธีการประมาณค่าอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ (failure rates) ภายในระบบไฟฟ้าโดยอุปกรณ์หลักแต่ละตัวประกอบด้วยอุปกรณ์ย่อยหลายตัว และความเสียหายของอุปกรณ์ย่อยนั้นก็มีผลกระทบต่ออุปกรณ์หลัก การประเมินค่าความล้มเหลวของอุปกรณ์นั้นสามารถหาได้จากคุณลักษณะภายนอกและค่าที่สามารถตรวจวัดได้ของอุปกรณ์มาเพื่อประเมินอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ พร้อมทั้งกำหนดเกณฑ์การให้คะแนนและตัวถ่วงน้ำหนักคะแนน(ranking and weighting score) เพื่อกำหนดความสำคัญของแต่ละค่าที่วัดได้ ผู้เขียนยกตัวอย่างการใช้งานกับเซอร์กิตเบรกเกอร์โดยใช้ข้อมูลสภาพการใช้งานจริงของอุปกรณ์เพื่อวางแผนบำรุงรักษาอุปกรณ์

C. Suwanasri และคณะ (2014) นำเสนอวิธีการหาอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ระดับแรงดัน 115kV [6] และ 230 kV [7] โดยใช้ข้อมูลสถิติความเสียหายที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าในประเทศไทย อุปกรณ์แบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ ฉนวนหลัก (main insulation), กลไก (mechanism) และส่วนอุปกรณ์ควบคุม อัตราความเสียหายใช้การแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull distribution) เป็นอัตราความเสียหายของอุปกรณ์แต่ละส่วนในเซอร์กิตเบรกเกอร์ ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา คือ สถิติความเสียหายของเซอร์กิตเบรกเกอร์ย้อนหลัง 20 ปี ผลการศึกษาพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ของไวบูลล์ เพื่อหาอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์และกำหนดการบำรุงรักษาที่เหมาะสมของอุปกรณ์แต่ละส่วนภายในเซอร์กิตเบรกเกอร์ วิธีที่นำเสนอนี้มีข้อดี คือ สามารถใช้กับอุปกรณ์อื่นๆ ได้ แต่ข้อจำกัด คือ ต้องการข้อมูลย้อนหลังจำนวนมากเพื่อสร้างแบบจำลอง และไม่สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นได้

1.6.2 การคำนวณความน่าเชื่อถือระบบไฟฟ้า

R. Billinton และ R.N. Allan (1990) [8] ทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการคำนวณความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า (Power system reliability) และยกตัวอย่างวิธีการใช้งานสำหรับออกแบบและวางแผนระบบไฟฟ้า ทั้งในส่วนของระบบผลิตไฟฟ้า (Generation system) ระบบส่งไฟฟ้า (Transmission system) และระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution system)

J. Lu, W. Li และ W. Yan (2007) [9] นำเสนอวิธีการคำนวณค่าความน่าเชื่อถือได้ภายในสถานีไฟฟ้า มีการจัดเรียงอุปกรณ์ที่แตกต่างกันด้วยวิธีกำหนดสถานะ (State enumeration) และกำหนดเซตบัส (labeling bus set) เพื่อแก้ปัญหาความน่าเชื่อถือของสถานีไฟฟ้าจากความเสียหายแบบต่างๆ เช่น ความเสียหายไม่อิสระ (dependent failure), ความเสียหายพหุคูณ (multiple failure) เป็นต้น ผู้เขียนเปรียบเทียบวิธีกำหนดสถานะกับวิธีเซตตัดต่ำสุด (Minimal cut-set) พบว่าวิธีเซตตัดต่ำสุดที่สุดคำนวณโดยใช้คุณสมบัติของเซต คือ ยูเนียน (Union) และอินเตอร์เซคชัน (Intersection) ของอุปกรณ์เพื่อหาค่าความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า ขณะที่ วิธีกำหนดสถานะและ

กำหนดเซตบัสจำลองเหตุการณ์ พร้อมทั้งหาเหตุการณ์ที่ล้มเหลวเนื่องจากอุปกรณ์ พิจารณาหาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า โดยค่าความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้านั้นจากทั้ง 2 วิธีมีค่าเท่ากัน ข้อดีข้อวิธีกำหนดสถานะคือเหมาะกับระบบการจัดเรียงของสถานีไฟฟ้ามีความซับซ้อน และสามารถพิจารณาความเสียหายที่เกิดขึ้นในสถานีได้ครอบคลุมกว่าวิธีการเซตตัดต่ำสุด

M. Shirvani และคณะ (2012) [10] นำเสนอวิธีการคำนวณดัชนีความน่าเชื่อถือของระบบการผลิตไฟฟ้า คือ ค่าคาดหวังของพลังงานที่ไม่ได้ส่งออก (Expected energy not supplied, *EENS*) โดยคำนึงถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น อัตราความขัดข้องโดยเหตุบังคับ (Forced outage rate, *FOR*) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, ค่าพลังงานไฟฟ้าที่สูญหายไป (Capacity outage) เป็นต้น

1.6.3 การจัดการอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า

B. S. Hauge และคณะ (2002) [11] พัฒนาเครื่องมือสำหรับการบำรุงรักษาที่ความเชื่อถือได้เป็นศูนย์กลาง (RCM Toolbox) เพื่อกำหนดช่วงเวลาที่เหมาะสม สำหรับการบำรุงรักษา การตรวจสอบและบำรุงรักษาเชิงป้องกัน โดยพัฒนาเครื่องมือทางคณิตศาสตร์เพื่อเป็นเกณฑ์การเลือกที่เหมาะสม และนำเสนอวิธีการคำนวณความน่าจะเป็นของความเสียหายที่จะเกิดขึ้นโดยใช้ข้อมูลสถิติย้อนหลัง เพื่อหาจำนวนเหตุการณ์ความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่พิจารณา และคำนึงถึงความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ซึ่งแปรผันตามเวลา อีกทั้ง ยกตัวอย่างวิธีการคิดและเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างมีการตรวจสอบ และไม่มีการตรวจสอบในช่วงเวลาหนึ่ง นอกจากนี้ ใช้ข้อมูลสถิติความเสียหายของถังแก๊สไนโตรเจน (Gaseous Nitrogen) ในช่วงระยะเวลา 11 ปี โดยใช้การแจกแจงแบบปกติ เพื่อหาความน่าจะเป็นและคำนวณค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น ผลลัพธ์ คือ การกำหนดช่วงเวลาและอันดับความสำคัญของอุปกรณ์ที่ต้องการบำรุงรักษา ข้อเสียคือ จำเป็นต้องมีการเก็บข้อมูลการทำงาน (Operation Data) เพื่อสร้างแบบจำลองที่ถูกต้อง

G. Balzer และคณะ (2006) [12] นำเสนอวิธีตัดสินใจของการบริหารสินทรัพย์อุปกรณ์ระบบไฟฟ้าแรงสูงโดยเน้นการประเมินความเสี่ยงของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าแรงสูง และผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า ข้อมูลที่ใช้ ได้แก่ ระดับแรงดันไฟฟ้า การเงินและลงทุนของอุปกรณ์ ผู้เขียนนำเสนอตัวชี้วัดสมรรถนะระบบ (system performance index, SPI) เพื่อประกอบเป็นเกณฑ์ตัดสินว่าอุปกรณ์นั้นควรเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ หรือบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่อไป การประเมินสภาพของอุปกรณ์ ความสำคัญของอุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายต่างๆ เช่น ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาค่าใช้จ่ายเนื่องจากไฟฟ้าดับ เป็นต้น ผู้เขียนยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานกับเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ระดับแรงดัน 123 กิโลโวลต์, 245 กิโลโวลต์ และ 420 กิโลโวลต์ ผลลัพธ์ที่ได้คือ คำนวณตัวชี้วัดสมรรถนะระบบ แต่ปัจจัยสำคัญคือค่าใช้จ่ายขึ้นอยู่กับรูปแบบการบำรุงรักษา และการหาจุดคุ้มค่าของการบำรุงรักษาอย่างเหมาะที่สุด

วิธีนี้มีข้อดีคือ คำนึงถึงปัจจัยของอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้ง ส่วนข้อด้อย คือ ไม่สามารถคาดการณ์เวลาที่อุปกรณ์ควรบำรุงรักษา หรือเปลี่ยน

A. Naderian และคณะ (2008) [13] นำเสนอการประเมินสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้ข้อมูลที่มีอยู่อิงมาตรฐาน IEC, IEEE และ CIGRE ในการประเมินสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ปกติการประเมินหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังนิยมใช้ผลทดสอบ เช่น การวิเคราะห์ปริมาณแก๊สที่ละลายภายในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง(dissolve gas analysis, DGA), ค่าฟูรัน (furan) เป็นต้น ผู้เขียนนำเสนอตัวแปรอื่นๆ ที่ต้องประเมินเพิ่มเติม ได้แก่ สภาพการใช้งานตัวเปลี่ยนจุดแยกของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า, บุชชิง, ประวัติของโหลด (load history), อายุ และใบสั่งซ่อมและแก้ไข (work order) เป็นต้น นอกจากนี้ ผู้เขียนใช้วิธีตัดสินใจเชิงวิเคราะห์หลายเกณฑ์ (multi-criteria analysis) และอาศัยตัวถ่วงน้ำหนักของตัวแปรเพื่อประเมินตัวแปรอื่นๆ ข้อมูลที่ใช้ในการทำวิจัย คือ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ ในประเทศสหรัฐอเมริกาจำนวน 1,402 ตัว สามารถแบ่งเกณฑ์สภาพของอุปกรณ์หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังได้ 5 แบบ คือ ดีมาก (Very Good), ดี (Good), พอใช้ (Fair), ไม่ดี (Poor) และ ไม่ดีมาก (Very Poor) จุดเด่นของวิธีนี้ คือ การประเมินสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังใช้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งหมด และสามารถแบ่งเกณฑ์ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเพื่อวางแผนการบำรุงรักษาได้อย่างเหมาะสม แต่มีข้อด้อย คือ การกำหนดตัวประกอบน้ำหนักของตัวแปรต่างๆ จำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญ หรือการเก็บข้อมูลไม่ได้ประเมินหม้อแปลงแต่ละตัวว่ามีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

D. B. Zhang, W. Li และ X. Xiong (2013) [14] นำเสนอการหาจุดคุ้มค่าสำหรับการเปลี่ยนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มีอายุการใช้งานมาเวลานาน โดยคำนึงถึงสภาพการใช้งานปัจจุบัน ความน่าเชื่อได้ของระบบไฟฟ้า และค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น เพื่อหาปีที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยอาศัยการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในประเทศจีน ระดับแรงดัน 230 kV และใช้การแจกแจงแบบไวบูลล์เพื่อคำนวณหาความน่าจะเป็นของอุปกรณ์ที่เสียหายโดยคำนึงถึงอายุฉนวนหรือน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และใช้วิธีกำหนดสถานะเป็นเทคนิคใช้คำนวณหาความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า โดยมีผลลัพธ์คือค่าคาดหวังของพลังงานที่ไม่ได้ส่งออก ท้ายที่สุดประมวลผลค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงเพื่อหาปีที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังตัวใหม่การวิจัยได้ทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 2 ตัวที่มีอายุการใช้งานปกติและอายุใช้งานของความเป็นฉนวนแตกต่างกัน ผลลัพธ์คือ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 2 ตัวมีกำหนดการเปลี่ยนแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ติดตั้ง ค่าความเป็นฉนวน และจำนวนโหลดที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปี

M. Hanai และคณะ (2013) [15] นำเสนอแนวทางการบำรุงรักษาเรียกว่าระบบบริหารจัดการโครงข่ายชาญฉลาด (Intelligent grid management system, IGMS) IGMS กำหนดวัตถุประสงค์เพื่อหาจุดคุ้มค่าของการวางแผนบำรุงรักษาอุปกรณ์และควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า

ให้เหมาะสม โดยพิจารณาตัวแปรต่างๆ สภาพปัจจุบันของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่ผ่านตัวอุปกรณ์ ความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า อัตราการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ เป็นต้น IGMS สามารถแปลงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบเป็นค่าใช้จ่าย เพื่อหาจุดคุ้มค่าของการบำรุงรักษาอุปกรณ์และส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าน้อยที่สุด การประเมินสภาพอุปกรณ์ใช้แบบจำลองการแจกแจงเลขชี้กำลัง (exponential distribution) สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง [16]และแบบจำลองฮิดเด็นมาร์คอฟ (hidden Markov model) สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์[17] ส่วนการหาความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าใช้การจำลองมอนติคาร์โลตามลำดับ (Sequential Monte Carlo simulation) [18] เพื่อหารูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นในระบบ จากนั้น จึงหาจุดคุ้มค่าของการบำรุงรักษา ผลการทดสอบ IGMS ด้วยระบบทดสอบรอยบิลลิงตัน และเปรียบเทียบผลกับการบำรุงรักษาตามเวลา พบว่า IGMS สามารถลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการบำรุงรักษา ยืดเวลาหรืออายุการใช้งานของอุปกรณ์ และสามารถหาวิธีการบำรุงรักษาที่เหมาะสม เช่น การบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบครั้งใหญ่ หรือ การเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ให้เหมาะสมกับช่วงเวลาต่างๆ ของอุปกรณ์ โดยพิจารณาถึงสภาพปัจจุบันและระบบไฟฟ้า เช่น จำนวนโหลดที่เชื่อมต่อ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม IGMS มีข้อเสีย คือ ระบบทดสอบที่ใช้นั้นมีกำลังไฟฟ้าคงที่ในช่วงเวลาที่ศึกษา ในความเป็นจริงโหลดมีอัตราเติบโตขึ้นตลอดเวลาในแต่ละปี IGMS มีจุดแข็งคือ สามารถนำข้อมูลสภาพปัจจุบันของอุปกรณ์ไฟฟ้ามาประมวลผล เพื่อหาจุดคุ้มค่าและเวลาเลือกวิธีการบำรุงรักษาอุปกรณ์ แต่ก็มีจุดด้อยคือ ใช้เวลาประมวลผลนานขึ้นอยู่กับจำนวนอุปกรณ์ หากอุปกรณ์มีจำนวนมากขึ้นจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจำนวนมากในการประมวลผล

K. Tanengko และ P. Damrongkulkamjorn (2013) [19] นำเสนอเครื่องมือสำหรับประเมินความเสี่ยง (Risk assessment) ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในเขตภาคกลางของการไฟฟ้าภูมิภาคโดยใช้ดัชนีสุขภาพ (Health index) ของอุปกรณ์ ที่คำนวณมาจาก 2 ค่า คือ (1) ค่าประเมินสภาพอุปกรณ์ปัจจุบัน (2) ประวัติความเสียหายในอดีต และใช้การถ่วงน้ำหนักคะแนน จากนั้นจึงนำไปประเมินความเสี่ยงด้วยเมทริกซ์ความเสี่ยง ผลลัพธ์ที่ได้มีข้อดีคือ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม ส่วนข้อด้อย คือ การกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักคะแนนจำเป็นต้องใช้คำแนะนำและประสบการณ์จากผู้เชี่ยวชาญ

P. Dehghanian และ M. Kezunovic (2013) [20] นำเสนอวิธีการกำหนดแผนบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยการนำข้อมูลสภาพการใช้งานของเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อประเมินสภาพของการบำรุงรักษาอุปกรณ์ ได้แก่ เล็กน้อย (Minor) รุนแรง (Major) และเปลี่ยนอุปกรณ์ (Replacement) จากนั้นนำไปคำนวณค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาและผลประโยชน์ที่ได้รับ โดยผลประโยชน์ของการบำรุงรักษาแบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ ค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการเลื่อนบำรุงรักษาแบบแก้ไข ค่าใช้จ่ายที่เกิดจากควบคุมกำลังไฟฟ้าภายในระบบให้เหมาะสม ค่าความเสียหายเนื่องผู้ใช้ไฟฟ้า และค่าความเสียหายจากการเกิดไฟฟ้าดับ

T. Suwanasri, R. Phadungthinและ C. Suwanasri (2014) [21] ได้นำเสนอวิธีคำนวณการบำรุงรักษาตามความเสี่ยงสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังโดยสิ่งที่ใช้สำหรับประเมินความเสี่ยงคือสภาพปัจจุบันการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เช่น ผลทดสอบทางไฟฟ้า (electrical test) ความเป็นฉนวนของน้ำมัน (insulating oil test) และการตรวจสอบสภาพภายนอก (visual inspection) โดยใช้วิธีการจัดลำดับและถ่วงน้ำหนักคะแนนเพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนักคะแนน และใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (analytic hierarchy process) ร่วมกับการแจกแจงแบบไวบูลล์เพื่อวิเคราะห์ความเสียหาย ขอบเขตข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา คือ ข้อมูลความเสียหายของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาด 200 เมกะโวลต์แอมแปร์ (MVA) ระดับแรงดัน 230 กิโลโวลต์ และ 50 เมกะโวลต์แอมแปร์ ระดับแรงดัน 115 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ผลการศึกษาพบว่า สภาพของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงคือ ดี น่าสงสัย และ ไม่ดี มีการทดสอบกับหม้อแปลง 200 เมกะโวลต์แอมแปร์ จำนวน 4 เครื่อง ผลการศึกษา พบว่า ส่วนของตัวถังหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (maintank) ที่มีรอยรั่ว เป็นส่วนที่สำคัญที่สุด ในขณะที่ การทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาด 50 เมกะโวลต์แอมแปร์จำนวน 13 ตัวพบว่า ตัวเปลี่ยนจุดแยกของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขณะจ่ายกำลังไฟฟ้ามีรอยรั่วเป็นส่วนสำคัญที่สุด จะเห็นได้ว่า วิธีนี้มีข้อดีคือ สามารถประเมินสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังปัจจุบันได้จากผลทดสอบของหม้อแปลง การให้ความสำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแต่ละตัวเพื่อนำไปบริหารการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังได้อย่างเหมาะสม แต่มีข้อด้อย คือ ไม่สามารถประเมินค่าใช้จ่ายที่เกิดจากความเสียหายหรือผลกระทบของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ไม่สามารถคาดการณ์ความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังได้ วิธีที่นำเสนอมีจุดเด่นคือ เข้าใจง่าย ประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจากผลทดสอบจริงที่สามารถทำได้ในปัจจุบัน จุดด้อยคือ ไม่ได้คำนึงถึงสภาพการใช้งานหรือความสำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้งานในปัจจุบัน เช่น จำนวนโหลดที่ใช้งาน กระแสผิดพร่อง (fault current) เป็นต้น อีกทั้ง อ้างอิงการให้คะแนนจากผู้เชี่ยวชาญ

H. Li และคณะ (2016) [22] นำเสนอวิธีการบำรุงรักษาสำหรับอุปกรณ์ที่ต่างกัน เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์อุปกรณ์ที่ต่างๆกัน เนื่องจากอุปกรณ์บางตัวสามารถบำรุงรักษาอุปกรณ์ได้พร้อมกัน โดยใช้ข้อมูลการตรวจสอบและผลทดสอบของอุปกรณ์ปัจจุบัน มาเพื่อหาวิธีการบำรุงรักษาที่เหมาะสมพร้อมทั้งหาใช้จ่าย 3 ด้าน ได้แก่ (1) ค่าใช้จ่ายการซ่อมแซม (2) ค่าบำรุงรักษาอุปกรณ์ และ (3) ค่าความเสียหายเนื่องจากไม่สามารถจ่ายพลังงานได้ และเลือกวิธีที่มีค่าใช้จ่ายต่ำสุด โดยผู้เขียนได้ประยุกต์ใช้กับสถานีไฟฟ้าแรงดัน 220 กิโลโวลต์ ผลลัพธ์ที่ได้ คือ แนวทางการเลือกวิธีการบำรุงรักษาของอุปกรณ์ที่แตกต่าง สามารถลดช่วงเวลาการดับไฟเพื่อบำรุงรักษา ลดค่าใช้จ่ายจากความสูญเสียไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ พร้อมทั้งเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับสถานีไฟฟ้า และคำนึงถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

1.6.4 ค่าใช้จ่ายวงชีพ

J. Pongpech และ D.N.P. Murthy (2009) [23] นำเสนอวิธีคำนวณค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาของอุปกรณ์เช่ายืม (Leased equipment) ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบแก้ไข, ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกัน และค่าใช้จ่ายเบี้ยปรับของอุปกรณ์ที่ไม่สามารถทำงานได้ และวิเคราะห์แผนบำรุงรักษาที่เหมาะสมเพื่อหาจุดคุ้มค่าระหว่างค่าใช้จ่ายบำรุงรักษากับค่าปรับโทษที่เกิดขึ้น

I. Jeromin และคณะ (2009) [24] นำเสนอวิธีคิดค่าใช้จ่ายทั้งหมดในช่วงชีวิตของอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบฉนวนอากาศ (Air insulated substation, AIS) ที่ระดับแรงดัน 110 กิโลโวลต์ มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนและเลือกวิธีการบำรุงรักษาอุปกรณ์ จากการศึกษา พบว่า วิธีที่นำเสนอ คำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดตามมาตรฐาน IEC 60300-3-3 ประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายการลงทุน, ค่าใช้จ่ายดำเนินการและ ค่าใช้จ่ายรีไซเคิล (recycling cost) การทดสอบใช้ข้อมูลของอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าระดับแรงดัน 110 กิโลโวลต์ ที่ถูกลดระดับแรงดันจาก 380 กิโลโวลต์ และคำนึงผลของอัตราดอกเบี้ยและอัตราเงินเฟ้อผลลัพธ์ที่ได้คือ การคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดนั้น ช่วยให้วิเคราะห์อุปกรณ์ที่เป็นส่วนสำคัญในระบบส่งไฟฟ้า และประเมินการลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น สิ่งที่ทำให้อุปกรณ์มีความสำคัญแตกต่างกันคือ ค่าใช้จ่ายเนื่องจากไฟขัดข้อง (outage cost) ส่วนการบำรุงรักษา มีทางเลือก 2 วิธี คือ การบำรุงรักษาตามกำหนดเวลา และการบำรุงรักษาแบบสภาพ ข้อดีของการบริหารจัดการ คือสามารถเลือกวิธีการบำรุงรักษาที่เหมาะสมโดยคำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น แต่มีข้อเสียคือ ไม่ได้คำนึงถึงสภาพอุปกรณ์ที่ใช้งานอยู่ ซึ่งมีมาตรฐานและสภาพแวดล้อมใช้งานแตกต่างกัน

L. Liu และคณะ (2010) [25] ได้นำเสนอวิธีวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายวงชีพ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ (1) ระดับอุปกรณ์ (device layer) และ (2) ระดับระบบไฟฟ้า (system layer) โดยค่าใช้จ่ายสำหรับการบำรุงรักษาประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายความเสียหาย (failure cost) และการบำรุงรักษาแบบเชื่อถือได้เป็นศูนย์กลาง ผู้เขียนทดลองใช้แบบจำลองนี้เพื่อวิเคราะห์แนวทาง 2 วิธี สำหรับวางแผนระบบส่ง 500 กิโลโวลต์ในประเทศจีน เพื่อเลือกแนวทางที่เหมาะสมและมีค่าใช้จ่ายเกิดขึ้นต่ำที่สุด

W. Pan และคณะ (2012) [26] นำเสนอแบบจำลองต้นทุนของอุปกรณ์ภายในระบบส่งประกอบด้วยค่าใช้จ่ายทั้งหมด 5 แบบคือ (1) ค่าใช้จ่ายลงทุน (investment cost) ค่าใช้จ่ายดำเนินงาน (operation cost), ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษา (maintenance cost), ค่าความเสียหาย (fault cost) และค่าซากของอุปกรณ์ (disposal cost) การคำนวณหาค่าใช้จ่ายบำรุงรักษานั้นต้องใช้ทฤษฎีระบบสีเทา (grey system theory) เพื่อประเมินและคาดการณ์อัตราความล้มเหลว สุดท้ายประเมินความเสี่ยงด้วยวิธี FAHP (Fuzzy analytic hierarchy process)

Z. W. Liao และคณะ (2016) [27] นำเสนอแบบจำลองต้นทุนวงชีพ สำหรับระบบไฟฟ้าอัจฉริยะ เพื่อเลือกรูปแบบการจัดเรียงและลงทุนที่เหมาะสมกับการก่อสร้าง อีกทั้ง คำนึงถึงผลกระทบ

ของความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และช่วงเวลาการบำรุงรักษาอุปกรณ์ การคำนวณความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าใช้วิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลแบบไม่ตามลำดับเวลา (Non-Sequential Monte Carlo simulation) และการคำนวณค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นโดยพิจารณาค่าต้นทุนได้แก่ ค่าใช้จ่ายการลงทุน, ค่าใช้จ่ายดำเนินงาน, ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษา , ค่าโอกาสเกิดความเสียหาย และค่าซากของอุปกรณ์ พร้อมทั้งยกตัวอย่างประยุกต์ใช้งานกับสถานีไฟฟ้าระดับแรงดัน 110 กิโลโวลต์ ผลลัพธ์ที่ได้คือสามารถเลือกรูปแบบการก่อสร้างที่เหมาะสม โดยมีค่าใช้จ่ายต่ำสุดและความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าสูงสุด

1.6.5 การคำนวณหาจุดคุ้มค่าหรือการหาค่าเหมาะที่สุดของการบำรุงรักษา

K. F. Man, K. S. Tang และ S. Kwong (1996) [28] ได้ทบทวนวรรณกรรมการค้นหาคำตอบด้วยวิธีพันธุกรรม (Genetic algorithm, GA) ทั้งในด้านทฤษฎีพื้นฐานของวิธีพันธุกรรม การนำมาประยุกต์ใช้เข้าเทคโนโลยีและการจัดการต่างๆ เช่น การวางแผนบำรุงรักษาอุปกรณ์ การหาจุดคุ้มค่าสำหรับการออกแบบอุปกรณ์ เป็นต้น

J. S. Usher, A. H. Kamal และ W. H. Syed (1998) [29] นำเสนอวิธีคาดการณ์บำรุงรักษาป้องกัน เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์มีความสัมพันธ์กับอายุการใช้งานของอุปกรณ์ โดยเปรียบเทียบวิธีเพื่อหาค่าจุดคุ้มค่าของการบำรุงรักษา 3 วิธี ได้แก่ วิธีค้นหาแบบสุ่ม (random search), ขั้นตอนวิธีพันธุกรรม และ วิธีแตกกิ่งและขอบเขต (branch and bound) ในการศึกษาอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ใช้การแจกแจงแบบไวบูลล์ ผลการศึกษาพบว่า ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมเป็นวิธีที่ดีที่สุด และหาคำตอบได้รวดเร็วที่สุด ส่วนวิธีบรานช์และเบาด์ เหมาะสำหรับข้อมูลระยะเวลาสั้นเพื่อหาจุดคุ้มค่าของการบำรุงรักษา ส่วนวิธีค้นหาแบบสุ่มใช้เวลาการหาคำตอบรวดเร็วกว่าวิธีบรานช์และเบาด์แต่ช้ากว่าขั้นตอนวิธีพันธุกรรม ข้อดีคือ สามารถคาดการณ์และวางแผนบำรุงรักษาอย่างเหมาะสมโดยคำนึงถึงค่าใช้จ่าย ข้อเสีย คือ ผลกระทบของการบำรุงรักษาทำให้อายุของอุปกรณ์เพิ่มขึ้น แต่ยังไม่ทราบผลกระทบกับอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์

K. S. Moghaddam (2010) [30] นำเสนอแบบจำลองสำหรับหาจุดคุ้มค่าการกำหนดแผนบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบเชิงป้องกัน และเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ โดยใช้อายุความเสียหายเป็นข้อมูลเพื่อสร้างฟังก์ชันความเสียหาย และกำหนดแผนบำรุงรักษาด้วยวิธีขั้นตอนพันธุกรรม และเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ระหว่างนโยบายการบำรุงรักษาปัจจุบัน ซึ่งมีผลลัพธ์ทำให้ค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ลดลง และความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์เพิ่มขึ้น

F. Camci (2009) [31] นำเสนอการกำหนดแผนบำรุงรักษา ด้วยการคาดคะเนข้อมูลและใช้กระบวนการค้นหาคำตอบด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม การคาดคะเนข้อมูลมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความเสี่ยงของอุปกรณ์จะล้มเหลวและความเสี่ยงของการบำรุงรักษา และประเมินเป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น

ของแต่ละแบบของการบำรุงรักษา ผู้เขียนเปรียบเทียบการกำหนดแผนบำรุงรักษาทั้งหมด 3 แบบ คือ การบำรุงรักษาแบบแก้ไข การบำรุงรักษาตามคาบเวลา และการบำรุงรักษาตามสภาพ วิธีการนี้มีจุดเด่นคือ สามารถคำนวณหาคำตอบที่เหมาะสมของการบำรุงรักษาแต่ละแบบ เพื่อกำหนดเป็นแผนงานในอนาคต รวมทั้งมีการคำนึงถึงข้อจำกัดต่างๆ เช่น ทรัพยากรสำหรับการบำรุงรักษา ความเสี่ยงของการบำรุงรักษาซึ่งแต่ละครั้งมีโอกาสที่จะบำรุงรักษาดีและไม่ดี จุดด้อยคือ จำเป็นต้องใช้ข้อมูลจำนวนมากเพื่อคาดคะเนเหตุการณ์ต่างๆที่จะเกิดขึ้น และไม่มีการคำนึงถึงการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ทดแทน

M. Hinow และ M. Mevissen (2011) [32] นำเสนอขั้นตอนวิธีพันธุกรรมเพื่อกำหนดกลยุทธ์บำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าแบบเหมาะที่สุด และเพื่อลดค่าใช้จ่ายในวงรอบ ค่าใช้จ่ายประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ ค่าใช้จ่ายการลงทุน ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาอุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายเปลี่ยนอุปกรณ์ กลยุทธ์บำรุงที่เหมาะสมสามารถลดค่าใช้จ่ายทั้งหมด

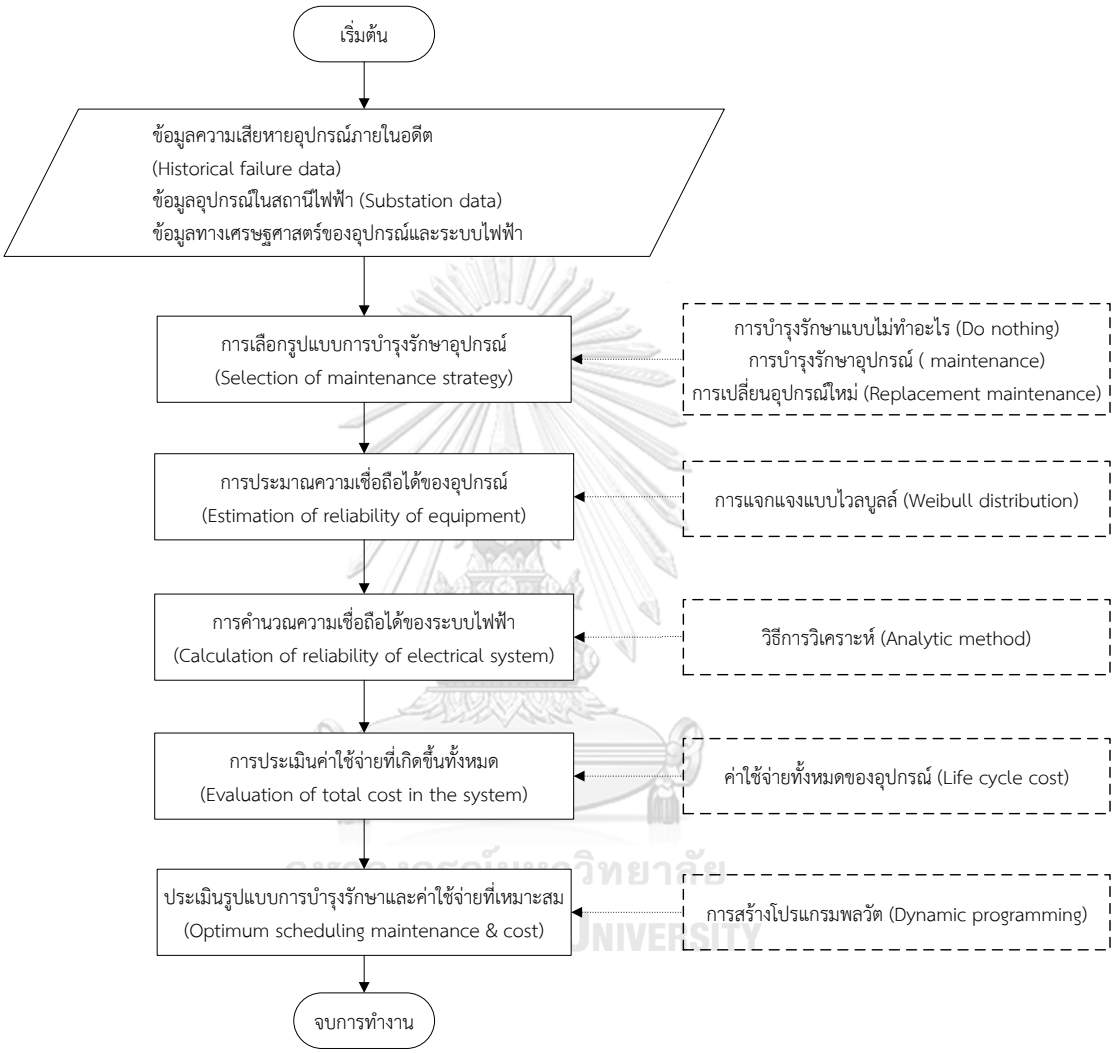
จากการทบทวนวรรณกรรมที่ได้กล่าวมาในข้างต้นนั้น มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดการอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า ทั้งในด้านการคำนวณความน่าจะเป็นของความล้มเหลวโดยใช้ข้อมูลสภาพการใช้งานของอุปกรณ์ ความเชื่อถือได้ระบบไฟฟ้า การจัดการอุปกรณ์ ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของอุปกรณ์ และการหาค่าเหมาะที่สุด แต่ยังไม่ได้คำนึงถึงปัจจัยดังต่อไปนี้

1. การคำนวณความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า ไม่ได้คำนึงถึงอายุประสิทธิผลของอุปกรณ์ ซึ่งส่งผลให้ความเชื่อถือได้อุปกรณ์ลดลง อีกทั้ง การบำรุงรักษาส่งผลกระทบ ทำให้ความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์เพิ่มขึ้น
2. ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการบริหารจัดการอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า
3. การเพิ่มขึ้นของพลังงานไฟฟ้า และขยายอุปกรณ์เพิ่มเติมในแต่ละปีตามอัตราเติบโตของเศรษฐกิจ
4. การกำหนดอายุประสิทธิผลสุดท้ายของอุปกรณ์เพื่อเปรียบเทียบแผนการบำรุงรักษาที่เหมาะสม
5. การวางแผนบำรุงรักษาโดยคำนึงถึงความเชื่อถือได้ที่ต้องการ ด้วยค่าใช้จ่ายวงชีพที่เหมาะที่สุด
6. การกำหนดปัญหาค่าใช้จ่ายสถานีไฟฟ้าโดยพิจารณาจากอุปกรณ์แต่ละอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า

เพราะฉะนั้น วิทยานิพนธ์นี้ จะนำเสนอแนวทางการกำหนดแผนบำรุงรักษาอุปกรณ์ โดยพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เซอร์กิตเบรกเกอร์ และบัสบาร์ ด้วยแบบจำลองความน่าจะเป็นแบบไวบูลล์ และคำนวณความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytic method) พร้อมทั้งคำนวณค่าใช้จ่าย 3 ส่วน ได้แก่ ค่าใช้จ่ายด้านต้นทุน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาอุปกรณ์ และค่าเสียโอกาสเนื่องจากไฟฟ้าดับ พร้อมทั้งประยุกต์ใช้การสร้างโปรแกรมพลวัตกับการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ วิธีบำรุงรักษาที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ การไม่บำรุงรักษา การบำรุงรักษาอุปกรณ์ และการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ทดแทน ภายใต้เงื่อนไขบังคับความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์และสถานีไฟฟ้า สรุปเป็นแผนการทำงานดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 ขั้นตอนการกำหนดแผนการบำรุงรักษาสำหรับอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า

1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 6 บท โดยแต่บทมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ที่มาและความสำคัญ วัตถุประสงค์ ขอบเขตวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดหวัง งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เนื้อหาของวิทยานิพนธ์และสรุป

บทที่ 2 รูปแบบอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ แบบจำลองการแจกแจงของอุปกรณ์ การประมาณค่าพารามิเตอร์ของการแจกแจงแบบไวบูลล์ การประเมินความเชื่อถือได้ และสรุป

บทที่ 3 แนวคิดพื้นฐานการประเมินความเชื่อถือได้ เทคนิคการประเมินความเชื่อถือได้ รูปแบบเหตุการณ์ล้มเหลวภายในสถานีไฟฟ้า แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์ การตรวจหาเซตตัดต่ำสุด การประยุกต์ใช้เซตตัดต่ำสุด การประเมินความเชื่อถือได้เนื่องจากการบำรุงรักษา และสรุป

บทที่ 4 แบบจำลองการบำรุงรักษาอุปกรณ์ ค่าใช้จ่ายวงชีพอุปกรณ์ การกำหนดปัญหาค่าใช้จ่ายการวางแผนบำรุงรักษา วิธีสร้างโปรแกรมพลวัต และสรุป

บทที่ 5 ข้อมูลพื้นฐานและระบบทดสอบ การทดสอบและวิเคราะห์การกำหนดแผนงานระดับอุปกรณ์ และการทดสอบการและวิเคราะห์การกำหนดแผนงานระดับสถานีไฟฟ้า และสรุป

บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

1.8 สรุป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่1 กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์งานวิจัย ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษาและดำเนินการ ประโยชน์ที่คาดว่าได้จากวิทยานิพนธ์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่มงานวิจัยได้แก่ ความน่าจะเป็นของความล้มเหลวอุปกรณ์ การคำนวณความน่าเชื่อถือระบบไฟฟ้า การจัดการอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า ค่าใช้จ่ายวงชีพ และการคำนวณหาจุดคุ้มค่าหรือการหาค่าเหมาะที่สุดของการบำรุงรักษา การวางแผนบำรุงรักษานั้นยังไม่ได้คำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อายุประสิทธิผลของอุปกรณ์ ความเชื่อถือได้ระบบไฟฟ้า อายุประสิทธิผลสุดท้ายของอุปกรณ์ การหาค่าใช้จ่ายที่เหมาะที่สุด ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เสนอแนวทางการกำหนดแผนงานบำรุงรักษาที่เหมาะที่สุดของอุปกรณ์หลักภายในสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต โดยพิจารณาค่าใช้จ่ายและความเชื่อถือได้

บทที่ 2
การประเมินอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์

อุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้านั้นมีอายุการใช้งานมาเป็นระยะเวลานาน และมีการเสื่อมสภาพเกิดขึ้นในขณะที่ใช้งาน เช่น หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีสภาพอายุความเป็นฉนวนลดลง เซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่สามารถปลดการเชื่อมต่อแต่ละอุปกรณ์ขณะที่เกิดความบกพร่องภายในระบบไฟฟ้า เป็นต้น ความเสียหายจากแต่ละอุปกรณ์สามารถส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบไฟฟ้าได้ และอาจเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณชั่วขณะ หรือดับเป็นระยะเวลานาน ดังนั้นการประเมินความล้มเหลวแต่ละอุปกรณ์อย่างเหมาะสมนั้น สามารถสร้างดัชนีที่ใช้ประเมินความเสี่ยงของระบบไฟฟ้าได้ และกำหนดการวางแผนการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม

การประเมินความล้มเหลวของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าสามารถทำได้ด้วยเทคนิคความน่าจะเป็นและสามารถแสดงความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ได้ แต่การประเมินด้วยเทคนิคนี้นั้นจำเป็นต้องมีการเก็บและรวบรวมข้อมูลความเสียหายของอุปกรณ์ด้านสถิติมาเพื่อสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมแต่ละอุปกรณ์ จึงทำให้เทคนิคนี้ไม่เป็นที่นิยมภายในอดีตเพราะว่าจำเป็นต้องใช้ข้อมูลเป็นจำนวนมาก เนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นในตลอดระยะเวลาการดำเนินงานของ กฟผ. รวมทั้งมีการปลดหรือเปลี่ยนอุปกรณ์ค่อนข้างน้อย ดังนั้นแบบจำลองที่ได้ภายในวิทยานิพนธ์นี้อาจไม่แม่นยำ เนื่องจากมีข้อมูลค่อนข้างน้อย แต่สามารถแสดงเป็นแนวทางในอนาคตหากมีการพัฒนาระบบเป็นสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ ซึ่งจะมีการเก็บข้อมูลของอุปกรณ์แต่ละตัวตลอดเวลา ดังนั้นการประเมินความล้มเหลวของอุปกรณ์ด้วยเทคนิคความน่าจะเป็นสามาถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบสถานีไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม

บทนี้แบ่งการนำเสนอออกเป็นทั้งหมด 5 ส่วน ประกอบด้วย รูปแบบอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ แบบจำลองการแจกแจงของอุปกรณ์ การประมาณค่าพารามิเตอร์ของการแจกแจงแบบไวบูลล์ การประเมินความเชื่อได้ร่วมกับฟังก์ชันกระจายตัว และสรุป

2.1 รูปแบบอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์

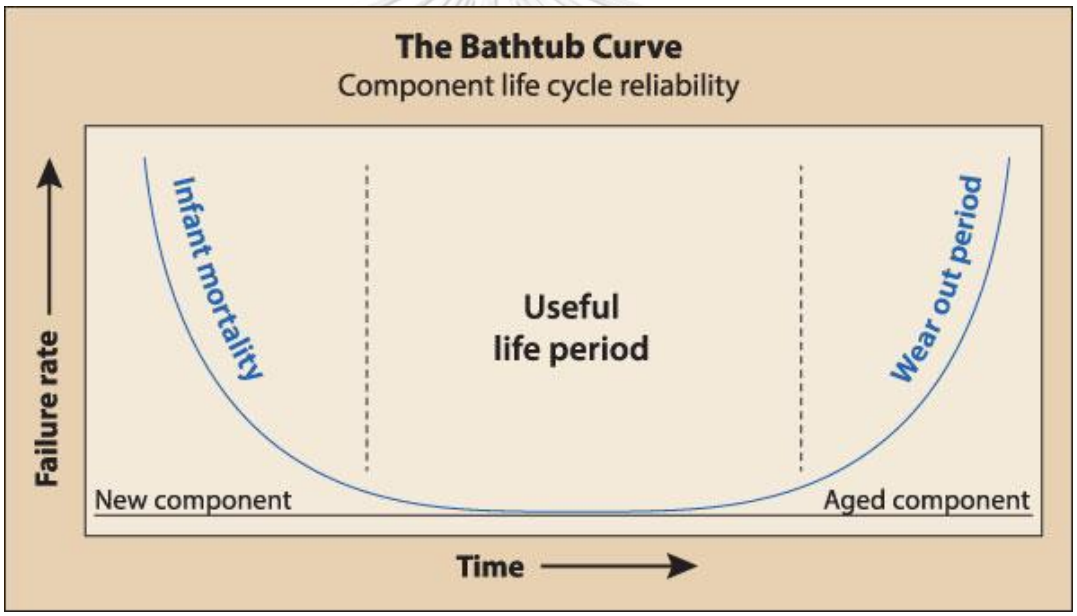
อุปกรณ์แต่ละช่วงเวลานั้นส่งผลให้อัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ (Failure Rate) ที่แตกต่างกัน โดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์และเวลาสามารถแสดงได้เป็นเส้นโค้งอ่างน้ำ (Bathtub curve) ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ช่วงเวลา ดังต่อไปนี้

1) ช่วงเวลาเริ่มต้นใช้งาน (Infant morality) เป็นช่วงเวลาเริ่มแรกของการใช้งานอุปกรณ์ จะพบปัญหาต่างๆ เช่น อุปกรณ์ไม่เหมาะสมสำหรับใช้งาน การออกแบบอุปกรณ์ไม่เหมาะสม การติดตั้งเครื่องจักรไม่ได้มาตรฐาน เป็นต้น ความเสียหายจากอุปกรณ์ส่วนย่อยเป็นช่วงที่อัตราความล้มเหลว

อุปกรณ์นั้นสูงและลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เพราะมีการแก้ไขให้ถูกต้อง และเฝ้าติดตามตรวจสออุปกรณ์เป็นระยะ

2) ช่วงเวลาใช้งาน (Useful life period) เป็นช่วงเวลาที่ต่อเนื่องมาจากช่วงเวลาแรก อัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์มีค่าคงที่เมื่อเทียบกับเวลา ความผิดปกติต่างๆ เกิดขึ้นได้ตอนในช่วงเวลาอายุการใช้งานของอุปกรณ์ เพื่อให้อุปกรณ์นั้นใช้งานได้นานขึ้นจำเป็นต้องบำรุงรักษาอุปกรณ์อย่างเหมาะสม และใช้งานไม่เกินภาระที่ได้ออกแบบไว้

3) ช่วงเวลาสึกหรอ (Wear out period) เมื่ออุปกรณ์ผ่านการใช้งานมาเป็นเวลานาน ทำให้เกิดความล้าและเสื่อมสภาพจากสาเหตุต่างๆ เช่น วัสดุเสื่อมสภาพ ความเป็นฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าลดลง เป็นต้น อัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อุปกรณ์มีโอกาสความเสียหายมากขึ้น จนถึงระดับที่ยอมรับไม่ได้ ต้องดำเนินการซ่อมแซมและเปลี่ยนอุปกรณ์บางส่วนได้



รูปที่ 2.1 กราฟเส้นโค้งอ่างน้ำ (Bathtub curve) [33]

2.2 แบบจำลองการแจกแจงของอุปกรณ์

ข้อมูลความเสียหายของอุปกรณ์ การปลดและเปลี่ยนอุปกรณ์ต่างๆภายในระบบไฟฟ้านั้นเป็นข้อมูลที่ถูกเก็บมาเวลานาน ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน ซึ่งมีความไม่แน่นอนของข้อมูลและมีการกระจายตัวของข้อมูลในรูปแบบต่างๆ จึงได้นำเทคนิคความน่าจะเป็นมาวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูล โดยมีองค์ประกอบที่สำคัญ 4 ส่วน คือ (1) ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability density function) (2) ฟังก์ชันแจกแจงสะสม (Cumulative distribution function) (3) ค่าคาดหวังหรือค่าเฉลี่ย (Expected value) และ (4) ค่าความแปรปรวน (Variance) การแจกแจงที่นิยมใช้ คือ การ

แจกแจงแบบไวบูลล์ ซึ่งใช้วิเคราะห์อัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ อัตราความล้มเหลวที่ได้จากการแจกแจงมีค่าไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์สองตัว ได้แก่ พารามิเตอร์รูปร่าง (Shape parameter) และพารามิเตอร์มาตราส่วน (Scale parameter) กำหนดให้ตัวแปรสุ่มคือ อายุประสิทธิผลของอุปกรณ์ (Effective age of equipment, T_{ef}) โดยฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นมีรูปแบบ ดังนี้

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right)\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \tag{2.1}$$

โดยที่ $f(t)$ คือ ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของอายุประสิทธิผลของอุปกรณ์

β คือ พารามิเตอร์รูปร่าง

η คือ พารามิเตอร์มาตราส่วน

T_{ef} คือ อายุประสิทธิผลของอุปกรณ์ (ปี)

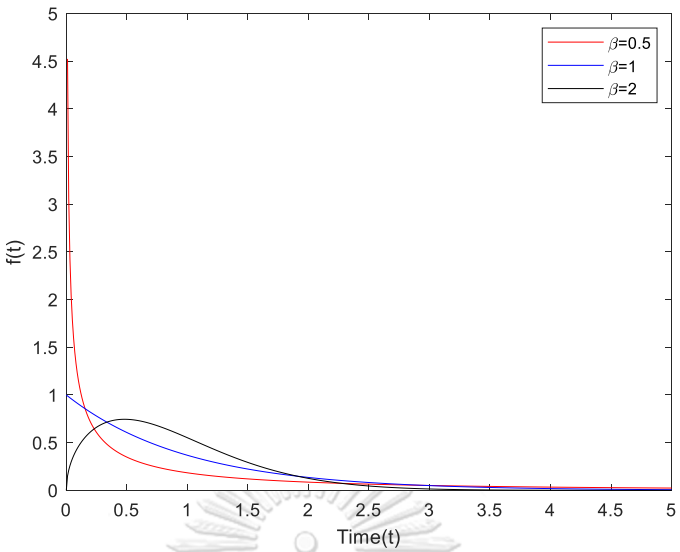
จากสมการที่ (2.1) ฟังก์ชันความหนาแน่นของของความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบไวบูลล์นั้นขึ้นกับพารามิเตอร์รูปร่างและพารามิเตอร์มาตราส่วน ดังต่อไปนี้

1. พารามิเตอร์รูปร่าง คือพารามิเตอร์ที่บ่งบอกลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลสามารถแบ่งออกได้เป็นทั้งหมด 3 รูปแบบดังนี้

- พารามิเตอร์รูปร่างมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเวลามีค่าเพิ่มขึ้น
- พารามิเตอร์รูปร่างมีค่าเท่ากับ 1 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นจะมีค่าลดลงลักษณะคล้ายฟังก์ชันเลขชี้กำลัง (Exponential function)
- พารามิเตอร์รูปร่างมีค่ามากกว่า 1 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นและลงตามช่วงระยะเวลา

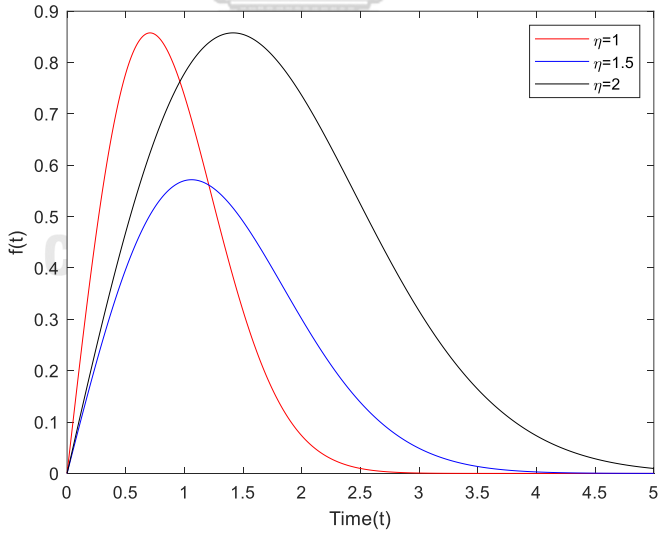
ดังนั้นลักษณะฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่มีค่าพารามิเตอร์รูปร่างเปลี่ยนแปลงทั้งหมด 3 รูปแบบในช่วงเวลาแตกต่างกัน และกำหนดให้พารามิเตอร์มาตราส่วนมีค่าเป็น 1 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2.2 กราฟเปรียบเทียบฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบไวบูลล์โดยมีพารามิเตอร์มาตราส่วนเป็น 1

2. พารามิเตอร์มาตราส่วน คือพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแกนเวลา พารามิเตอร์ส่วนนี้สามารถกำหนดความกว้างตามแกนเวลาของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์รูปร่างมีค่าเป็น 1

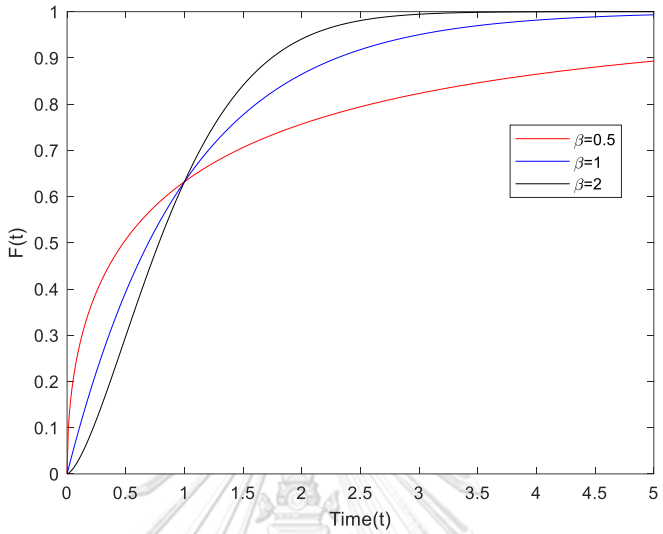


รูปที่ 2.3 กราฟเปรียบเทียบฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบไวบูลล์โดยมีพารามิเตอร์รูปร่างเป็น 1

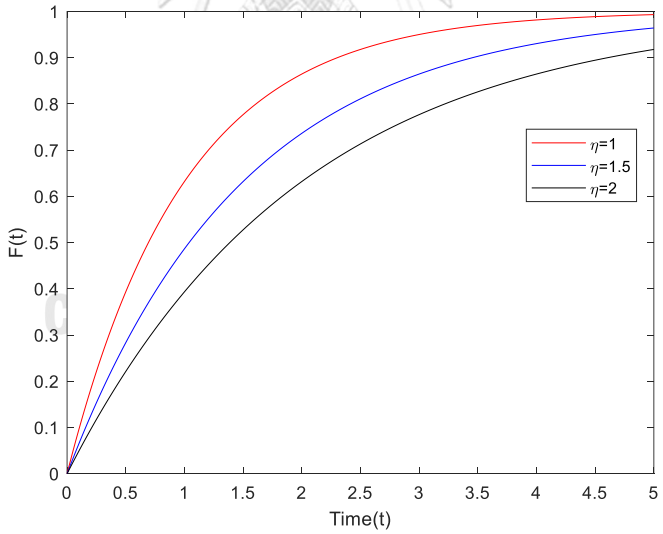
ฟังก์ชันแจกแจงสะสมแบบไวบูลล์ สามารถคำนวณโดยการหาปริพันธ์ของสมการที่ (2.1) ดังนี้

$$F(t)=\int_0^t\left(\frac{\beta}{\eta}\right)\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}}dt \quad =1-e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}} \tag{2.2}$$

ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของการแจกแจงไวบูลล์ ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ 2 ตัวคือ พารามิเตอร์รูปร่าง และพารามิเตอร์มาตราส่วน ซึ่งทำให้ฟังก์ชันแจกแจงแบบสะสมมีลักษณะที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ



รูปที่ 2.4 กราฟเปรียบเทียบฟังก์ชันแจกแจงสะสมแบบไวบูลล์โดยมีพารามิเตอร์มาตราส่วนเป็น 1



รูปที่ 2.5 กราฟเปรียบเทียบฟังก์ชันแจกแจงสะสมแบบไวบูลล์ โดยมีพารามิเตอร์รูปร่างเป็น 1

ค่าคาดหวัง หรือค่าเฉลี่ย และค่าความแปรปรวนของการแจกแจงแบบไวบูลล์ เป็นดังนี้

$$E = \int_0^{\infty} t\left(\frac{\beta}{\eta}\right)\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} dt$$

$$= \eta\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right) \tag{2.3}$$

โดยที่ Γ คือ ฟังก์ชันแกมมา

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} t^2 \times \left(\frac{\beta}{\eta}\right)\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} dt - \left(\eta\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)\right)^2$$

$$= \eta^2\left[\Gamma\left(1+\frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1+\frac{1}{\beta}\right)\right] \tag{2.4}$$

เพื่อให้สอดคล้องกับอัตราความล้มเหลวแบบเส้นโค้งอ่างน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.1. เราจึงใช้การแจกแจงแบบไวบูลล์ แสดงอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ทั้ง 3 ช่วง กล่าวคือ

1. ถ้าค่าพารามิเตอร์รูปร่างมีค่าน้อยกว่า 1 อัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์มีค่าลดลง ซึ่งแสดงช่วงเวลาเริ่มต้นของการใช้งาน

2. ถ้าค่าพารามิเตอร์รูปร่างมีค่าเท่ากับ 1 อัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์มีค่าคงตัว ซึ่งแสดงช่วงเวลาการใช้งาน

3. ถ้าค่าพารามิเตอร์รูปร่างมีค่ามากกว่า 1 อัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงช่วงเวลาสึกหรอ

2.3 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของการแจกแจงแบบไวบูลล์

พารามิเตอร์รูปร่าง และพารามิเตอร์มาตราส่วนของการแจกแจงแบบไวบูลล์สามารถประมาณค่าโดยการประยุกต์ใช้วิธีกำลังสองต่ำสุด (Least squares method) ต่อไป มีรายละเอียดวิธีการประมาณ ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1. จัดอันดับของข้อมูลที่สะสมมาได้ และหาค่ามัธยฐานลำดับ (Median Rank) ของข้อมูล ดังนี้

$$F_i = \frac{i-0.3}{N+0.4} \tag{2.5}$$

โดยที่ F_i คือ มัธยฐานของข้อมูลความเสียที่ i

i คือ อันดับของเวลาที่เสียหาย

N คือ จำนวนเหตุการณ์ความเสียหายทั้งหมด

2. หาค่าพารามิเตอร์รูปร่างและพารามิเตอร์มาตราส่วนด้วยวิธีกำลังสองต่ำสุด ดังนี้

$$y_i = mx_i + c \tag{2.6}$$

โดยที่

$$y_i = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F_i}\right)\right) \tag{2.7}$$

$$x_i = \ln(t_i) \tag{2.8}$$

$$m = \beta = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i \sum_{i=1}^{N} y_i}{N}}{\sum_{i=1}^{N} x^2 - \frac{\left[\sum_{i=1}^{N} x_i\right]^2}{N}} \tag{2.9}$$

$$c = \frac{\sum_{i=1}^{N} y_i}{N} - m\frac{\sum_{i=1}^{N} x_i}{N} \tag{2.10}$$

$$\eta = e^{-\left[\frac{c}{m}\right]} \tag{2.11}$$

โดยที่ t_i คือ อายุประสิทธิผลของข้อมูลลำดับที่ i

การประมาณค่าพารามิเตอร์รูปร่างและพารามิเตอร์มาตราส่วนของการแจกแจงไวบูลล์สามารถประยุกต์ใช้เพื่อฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นและฟังก์ชันแจกแจงสะสมของอุปกรณ์ประมาณโดยการเก็บข้อมูลสถิติ ระยะเวลาที่อุปกรณ์ใช้งานจนเกิดความล้มเหลว ดังตัวอย่างถัดไป

กำหนดให้ข้อมูลความเสียหายของอุปกรณ์มีค่าดังตารางที่ 2.1 [6]

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างข้อมูลเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของการแจกแจงแบบไวบูลล์

อันดับของเวลาเสียหาย (i)	อายุประสิทธิผลอุปกรณ์ (t_i)	ค่ามัธยฐานลำดับข้อมูล (F_i)	x_i	y_i
1	2	0.1296	0.6931	-1.9745
2	3	0.3148	1.0986	-0.9727
3	15	0.5000	2.7081	-0.3665
4	17	0.6852	2.8332	0.1448
5	25	0.8704	3.2189	0.7145

จากตารางที่ 2.1 เมื่อเราเก็บข้อมูลอายุประสิทธิผลการใช้งานของอุปกรณ์ และจัดอันดับของข้อมูล เพื่อหาค่ามัธยฐานลำดับข้อมูล ตัวแปร x และตัวแปร y ดังสมการที่ (2.5) - (2.8) ค่าพารามิเตอร์รูปร่างและพารามิเตอร์มาตราส่วนสามารถคำนวณได้โดยดังสมการที่ (2.9) - (2.11) ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลลัพธ์การประมาณค่าพารามิเตอร์ไวบูลล์จากข้อมูลตัวอย่าง

พารามิเตอร์การแจกแจงแบบไวบูลล์	ค่าที่ได้
พารามิเตอร์รูปร่าง	0.8675
พารามิเตอร์ขนาด	14.5296

2.4 การประเมินความเชื่อถือได้

การประเมินความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์สามารถนำฟังก์ชันการแจกแจงแบบไวบูลล์มาประยุกต์ใช้ประกอบด้วย ฟังก์ชันความล้มเหลว ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ ฟังก์ชันอัตราความล้มเหลว และเวลาเฉลี่ยการใช้งานอุปกรณ์ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.1 ฟังก์ชันความล้มเหลว

ฟังก์ชันความล้มเหลว (Failure function) หมายถึง ความน่าจะเป็นของอุปกรณ์จะเกิดความล้มเหลวขณะที่กำลังดำเนินงาน หลังจากการใช้งานไปเวลาที่ t นิยามดังนี้

$$Q(t) = P\{T_{ef} \le t\} = \int_o^t f(\tau)d\tau \qquad (2.12)$$

โดยที่ $Q(t)$ คือ ฟังก์ชันความล้มเหลวของอุปกรณ์

$f(\tau)$ คือ ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของอุปกรณ์ล้มเหลว

2.4.2 ฟังก์ชันความเชื่อถือได้

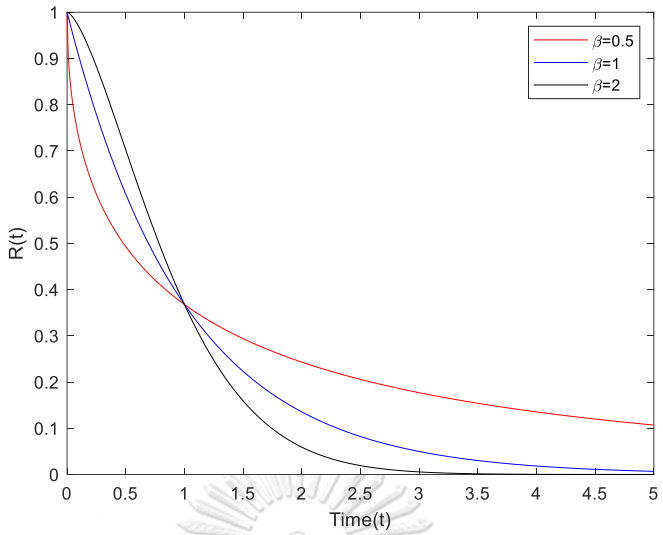
ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ (Reliability function) หมายถึง ความน่าจะเป็นของอุปกรณ์ที่จะทำงานได้ตามระยะเวลาที่กำหนดและปราศจากความล้มเหลว นิยามดังนี้

$$R(t) = P\{T_{ef} > t\} = \int_t^\infty f(\tau)d\tau = 1 - \int_0^t f(\tau)d\tau = 1 - Q(t) \qquad (2.13)$$

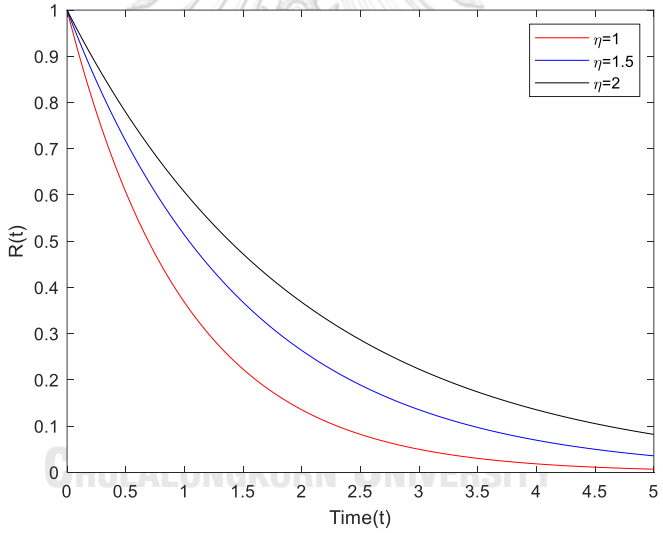
โดยที่ $R(t)$ คือ ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์

จากสมการ (2.13) ความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์นั้นจะแปรผันตามเวลา ถ้าเวลาเพิ่มขึ้น ความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์จะลดลง ถ้า R มีค่าเท่ากับ 0 อุปกรณ์ก็จะเกิดความล้มเหลว นอกจากนี้ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์รูปร่างและพารามิเตอร์มาตราส่วน ส่งผลให้ความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์มีค่าลดลงที่แตกต่างกัน ผลกระทบของพารามิเตอร์รูปร่างสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 และพารามิเตอร์มาตราส่วนดังรูป 2.7 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

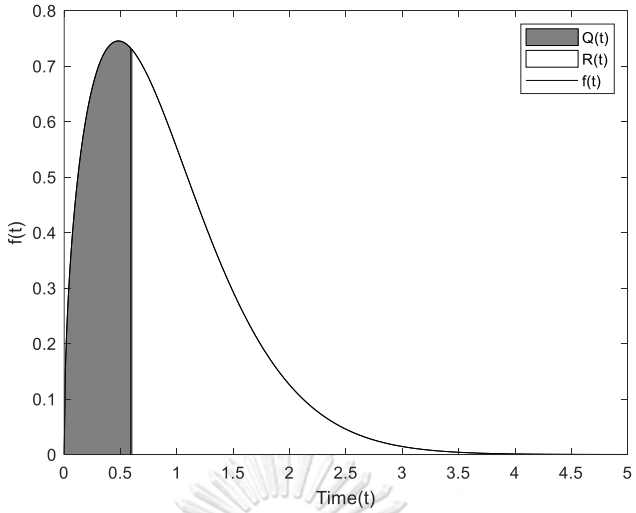


รูปที่ 2.6 กราฟเปรียบเทียบฟังก์ชันความเชื่อถือได้โดยมีพารามิเตอร์มาตราส่วนเป็น 1



รูปที่ 2.7 กราฟเปรียบเทียบฟังก์ชันความเชื่อถือได้โดยมีพารามิเตอร์รูปร่างเป็น 1

จากสมการที่ (2.12) และ (2.13) ค่าฟังก์ชันความล้มเหลวและฟังก์ชันความเชื่อถือได้จะมีค่าไม่เกิน 1 และฟังก์ชันทั้งสองมีลักษณะที่ตรงกันข้ามกัน กล่าวคือ เมื่อเวลาผ่านไปอุปกรณ์ก็มีโอกาสความล้มเหลวที่มากขึ้นในขณะที่ความเชื่อถือของอุปกรณ์นั้นลดลง นอกจากนี้ทั้งสองฟังก์ชันนี้มีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันความล้มเหลวและฟังก์ชันความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์

2.4.3 ฟังก์ชันอัตราความล้มเหลว

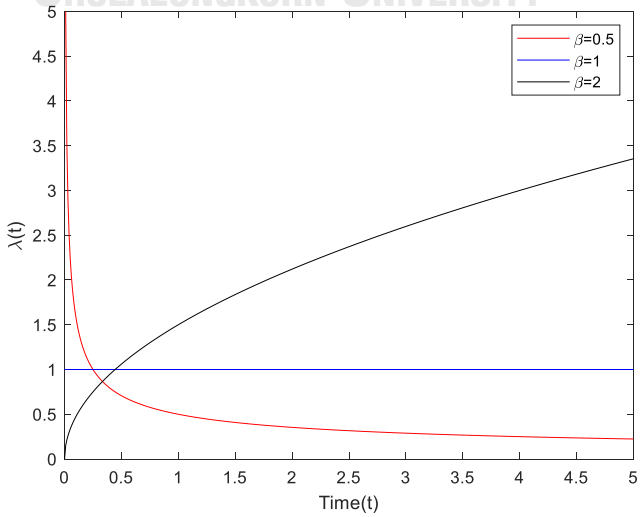
ฟังก์ชันอัตราความล้มเหลว (Failure rate function) หมายถึง จำนวนเหตุการณ์ที่อุปกรณ์ทำงานได้ในช่วงเวลาหนึ่ง หรือสัดส่วนระหว่างความหนาแน่นของความน่าจะเป็นกับฟังก์ชันความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ อธิบายได้ดังนี้

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \left(\frac{\beta}{\eta}\right)\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}, \beta > 1 \qquad (2.14)$$

โดยที่ $\lambda(t)$ คือ ฟังก์ชันอัตราความล้มเหลวอุปกรณ์

ฟังก์ชันอัตราความอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ได้จากการแจกแจงแบบไวบูลล์นั้นจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์รูปร่างที่สามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วงดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 2.2 ส่งผลให้ลักษณะฟังก์ชันอัตราความล้มเหลวมีลักษณะที่แตกต่างกันดังรูปที่ 2.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.9 กราฟเปรียบเทียบฟังก์ชันอัตราความล้มเหลวโดยมีพารามิเตอร์มาตราส่วนเป็น 1

2.4.4 เวลาเฉลี่ยของความล้มเหลว

เวลาเฉลี่ยของความล้มเหลว (Mean time to failure) หมายถึง เวลาเฉลี่ยของอุปกรณ์ที่ทำงานได้จนกระทั้งเกิดความเสียหายในครั้งถัดไป สามารถพิจารณาได้จากฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นกับอายุประสิทธิผลของอุปกรณ์ ดังนั้นสามารถคำนวณได้จากค่าความคาดหวังดังนี้

$$E(T_{ef}) = \int_0^{\infty} \tau f(\tau) d\tau \tag{2.15}$$

โดยที่ $E(T_{ef})$ คือ เวลาเฉลี่ยของความล้มเหลวของอุปกรณ์

2.5 สรุป

ภายในบทที่ 2 ได้อธิบายวิธีการประเมินอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ซึ่งมีลักษณะเป็นกราฟรูปอ่างน้ำ การจำลองโดยใช้การแจงแบบไวบูลล์โดยใช้ข้อมูลสถิตหรืออายุประสิทธิผลของอุปกรณ์ที่ได้ใช้งานมา การแจกแจงแบบไวบูลล์ประกอบด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัว ได้แก่ พารามิเตอร์รูปร่าง และพารามิเตอร์มาตราส่วน พารามิเตอร์เหล่านี้สามารถหาได้โดยวิธีกำลังสองต่ำสุดเพื่อนำไปประเมินความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์โดยมีฟังก์ชัน ได้แก่ ฟังก์ชันความล้มเหลว ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ ฟังก์ชันความล้มเหลว และเวลาเฉลี่ยของความล้มเหลว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
การประเมินความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้า

การประเมินความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้า เป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการวางแผนและพัฒนาระบบไฟฟ้าเนื่องจาก การเจริญเติบโตของเศรษฐกิจส่งผลให้ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น กฟผ. จึงต้องการปรับปรุงระบบไฟฟ้าให้มีความเชื่อถือได้สูง การวางแผนบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุดนั้นเป็นหนึ่งในแนวทางที่รักษาความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าให้สูง ประกอบกับสถานีไฟฟ้าแต่ละสถานีนั้นมีการเชื่อมต่อรูปแบบที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ระบบมีความเชื่อถือได้ที่สูงขึ้น เช่น การเชื่อมต่ออุปกรณ์ขนาน ถ้าอุปกรณ์ตัวหนึ่งเสีย อุปกรณ์ตัวที่สองสามารถทำงานแทนโดยที่ระบบไฟฟ้านั้นยังไม่เกิดความเสียหาย เป็นต้น ดังนั้นการวางแผนบำรุงรักษาที่เหมาะสม นอกจากที่จะพิจารณาที่ตัวอุปกรณ์ดังที่กล่าวไปในบทที่ 2 ยังจำเป็นต้องคำนึงถึงความเชื่อถือได้ของระบบที่ถูกต้องและแม่นยำเพื่อเป็นดัชนีชี้วัดสำหรับการวางแผนบำรุงรักษาที่เหมาะสม

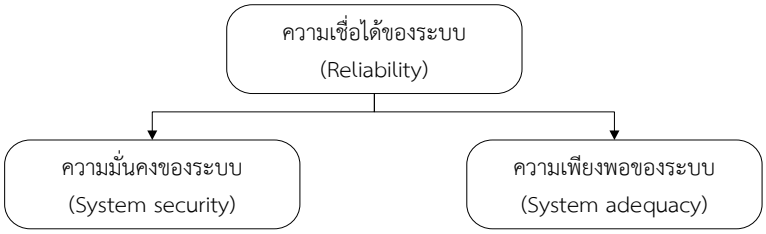
บทนี้แบ่งการนำเสนอออกเป็นทั้งหมด 8 ส่วน ได้แก่ แนวคิดพื้นฐานการประเมินความเชื่อถือได้ เทคนิคการประเมินความเชื่อถือได้ รูปแบบความเสียหายภายในระบบไฟฟ้า แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์ การตรวจหาเซตตัดต่ำสุด การประยุกต์ใช้งานวิธีเซตตัดต่ำสุดกับรูปแบบความล้มเหลว การประเมินความเชื่อถือได้เนื่องจากการบำรุงรักษา และสรุป

3.1 แนวคิดพื้นฐานการประเมินความเชื่อถือได้

หน้าที่สำคัญของระบบไฟฟ้า คือ การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าถึงผู้ใช้งานหรือลูกค้าอย่างมีประสิทธิภาพทั้งในด้านความเชื่อถือได้และคุณภาพไฟฟ้าที่เหมาะสม รวมทั้งกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านไปถึงผู้ใช้งานนั้นต้องเพียงพอ และสามารถใช้งานได้ตลอดเวลา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า คือ ความสามารถของระบบไฟฟ้าที่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าไปอย่างเพียงพอต่อการใช้งาน และมีความมั่นคงตลอดระยะเวลาการส่ง สำหรับความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้านั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ความมั่นคงของระบบ (System security) และความเพียงพอของระบบ (System adequacy) [8] ดังรูปที่ 3.1

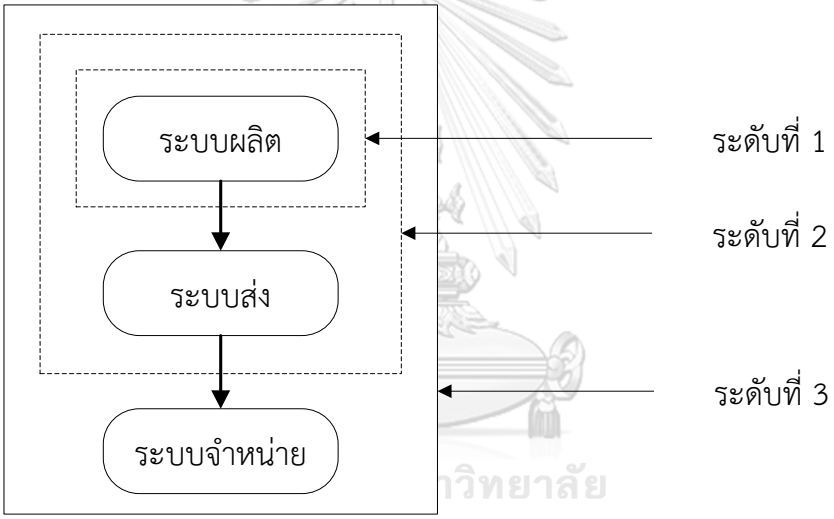


รูปที่ 3.1 การแบ่งประเภทของความเชื่อได้ของระบบไฟฟ้า

ความมั่นคงของระบบ หมายถึง ความสามารถของระบบไฟฟ้าที่สามารถตอบสนองการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า เช่น การเกิดกระแสบกพร่องในระบบไฟฟ้า การเสียหายของอุปกรณ์โดยไม่ทราบล่วงหน้า เป็นต้น ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ในสภาวะพลวัต (Dynamic condition)

ความเพียงพอของระบบ หมายถึง ความสามารถของระบบที่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าไปยังลูกค้า หรือผู้ใช้ไฟฟ้าเพียงพอต่อความต้องการ นอกจากนี้อุปกรณ์ที่เชื่อมต่อภายในระบบก็สามารถรองรับหรือสามารถทำงานภายใต้พิกัดของอุปกรณ์ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับระบบส่ง และระบบจำหน่าย ความเพียงพอของระบบนั้นจะพิจารณาเฉพาะสภาวะอยู่ตัว (Steady state condition) เท่านั้น โดยไม่เกี่ยวข้องกับเหตุการณ์ที่เปลี่ยนแปลงในระบบ

นอกจากนี้แนวคิดการประเมินความเชื่อถือได้นั้นยังสามารถแบ่งระดับการประเมินความเชื่อได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ ระบบผลิต ระบบส่งไฟฟ้า และระบบจำหน่ายไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.2



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 3.2 ระดับการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า

ระดับที่ 1 (Hierarchical level I) จะพิจารณาในส่วนของระบบผลิตไฟฟ้าเท่านั้น โดยละเลยจุดโหลดแต่ละจุดที่อยู่ในระบบส่ง และระบบจำหน่าย การพิจารณาระดับนี้นั้นมีวัตถุประสงค์ คือ ต้องการดูความเพียงพอของกำลังการผลิตไฟฟ้ามีค่าเพียงพอต่อความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบ ถ้ามีโรงไฟฟ้าเกิดเหตุการณ์ล้มเหลว หรือบำรุงรักษานั้นจะส่งผลต่อกำลังการผลิตโดยรวมไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าของระบบ

ระดับที่ 2 (Hierarchical level II) จะพิจารณาในส่วนของระบบผลิตและระบบส่งไฟฟ้า เรียกว่าระบบไฟฟ้าผสม (Composite system) หรือระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ (Bulk power system) ประกอบด้วยอุปกรณ์ โรงไฟฟ้า และอุปกรณ์ต่างๆภายในระบบส่งไฟฟ้า การพิจารณาระดับนี้จะใช้เทคนิคต่างๆ เพื่อหากำลังไฟฟ้าในแต่ละบัสและสถานการณ์ต่างๆ

ระดับที่ 3 (Hierarchical level III) การพิจารณาระดับนี้นั้นจะมีความซับซ้อนมากที่สุด ซึ่งมีการรวมการทำงานของระบบผลิต ระบบส่ง และระบบจำหน่าย ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วจะพิจารณาแยกออกจากกัน วัตถุประสงค์ของการพิจารณาระดับนี้ คือ เพื่อศึกษาความเพียงพอของระบบนั้นสามารถเพียงพอกับลูกค้าแต่ละจุดผู้ใช้ไฟฟ้าจริง ซึ่งจะมีดัชนีชี้วัดต่างๆ ประกอบด้วย ความถี่ของการล้มเหลว ระยะเวลาของการล้มเหลว ระยะเวลาที่ไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ และการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาเหมาะที่สุด โดยพิจารณาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้านั้น ต้องมีการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าและจุดโหลด ซึ่งเป็นจุดจำหน่ายพลังงานงานไฟฟ้าจากระบบส่งไประบบจำหน่าย ดังนั้นการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้จึงเป็นการประเมินความเชื่อถือได้ระดับ 2 และระดับ 3

3.2 เทคนิคการประเมินความเชื่อถือได้

การประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ วิธีการวิเคราะห์ (Analytic method) และ วิธีการจำลองเหตุการณ์ (Simulation method) ซึ่งในแต่ละวิธีนั้นมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน วิธีการวิเคราะห์นั้นจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และคำนวณสมการที่สร้างขึ้นให้สอดคล้องกับแบบจำลอง จุดเด่นของวิธีการวิเคราะห์นั้นทำให้ผลการคำนวณมีความแม่นยำสูง แต่ก็มีข้อเสียคือไม่สามารถแสดงพฤติกรรมของระบบไฟฟ้าระหว่างที่เกิดเหตุการณ์บกพร่อง เช่น การเกิดลัดวงจรทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะ เป็นต้น ในขณะที่วิธีจำลองเหตุการณ์ที่นิยมใช้คือ วิธีมอนติคาร์โล จึงถูกนำมาใช้เพื่อแสดงพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ที่เกิดขึ้นจริง

โดยภายในวิทยานิพนธ์นี้นั้นได้เลือกใช้การประเมินความเชื่อได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์ โดยจะอธิบายแค่ 2 วิธี ได้แก่ วิธีลดทอนเครือข่าย (Reduction method) และวิธีเซตตัดต่ำสุด (Minimal cut-set) ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

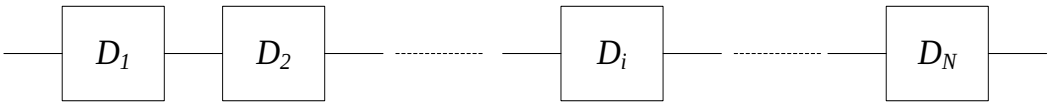
3.2.1 วิธีลดทอนเครือข่าย

การประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับความเชื่อถือได้ของแต่ละอุปกรณ์ สามารถคำนวณด้วยวิธีการลดทอนเครือข่าย ดังนี้

อุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าแต่ละตัว เชื่อมต่อกันและขึ้นอยู่กับการจัดเรียงอุปกรณ์แต่ละรูปแบบ การจัดเรียงอุปกรณ์ไฟฟ้าแบ่งออกเป็นแบบอนุกรมและแบบขนาน แต่ละแบบมีการประเมินความเชื่อถือได้ดังนี้

(1) ระบบที่เชื่อมต่อแบบอนุกรม

ระบบที่เชื่อมต่อแบบอนุกรม คือ เมื่อเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวเพียงอุปกรณ์เดียวระบบจะไม่ทำงาน รูปที่ 3.3 แสดงอุปกรณ์เชื่อมต่อแบบอนุกรม



รูปที่ 3.3 การเชื่อมต่ออุปกรณ์แบบอนุกรม

การเชื่อมต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าแบบอนุกรม คำนวณความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า เป็นดังนี้

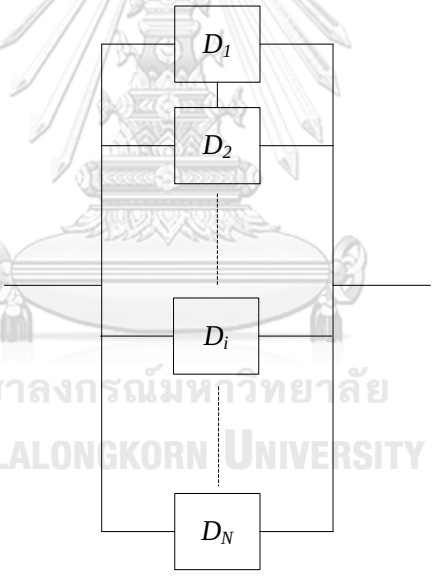
$$R_s = R_1 \times R_2 ... \times R_i \times ... \times R_N \quad (3.1)$$

โดยที่ R_s คือ ความเชื่อถือได้ของระบบ S

R_i คือ ความเชื่อถือได้ของแต่ละอุปกรณ์ D_i

(2) ระบบที่เชื่อมต่อแบบขนาน

ระบบที่เชื่อมต่อแบบขนาน คือ เมื่อเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวเพียงอุปกรณ์เดียวระบบจะทำงานต่อได้ ถ้าอุปกรณ์ล้มเหลวทั้งหมดจะส่งผลให้ระบบไม่ทำงาน รูปที่ 3.4 แสดงการเชื่อมตัวอุปกรณ์แบบขนาน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3.4 การเชื่อมต่ออุปกรณ์แบบขนาน

การเชื่อมต่ออุปกรณ์แบบขนาน คำนวณความน่าจะเป็นที่ระบบจะเกิดความล้มเหลว ดังนี้

$$Q_s = Q_1 \times Q_2 ... \times Q_i \times ... \times Q_N \quad (3.2)$$

โดยที่ Q_s คือ ความน่าจะเป็นที่ระบบ S ล้มเหลว

Q_i คือ ความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์ D_i ล้มเหลว

ระบบที่เชื่อมต่อแบบขนาน จะคำนวณความเชื่อถือได้ระบบ ดังนี้

$$R_s = 1 - Q_s \quad (3.3)$$

3.2.2 วิธีเซตตัดต่ำสุด

เป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า เนื่องจากวิธีการนี้นั้นเหมาะสำหรับระบบที่ค่อนข้างซับซ้อน (Complex system) และสามารถประยุกต์ใช้กับคอมพิวเตอร์โดยผลลัพธ์มีความถูกต้องแม่นยำ โดยวิธีนี้นั้นจะหาอุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์ที่ทำให้ระบบล้มเหลวและส่งผลต่อความเชื่อถือได้ของระบบ ดังนั้นหากเราทราบกลุ่มอุปกรณ์ดังกล่าวก็สามารถประเมินความเชื่อถือได้ของระบบได้อย่างถูกต้อง

เซตตัด (Cut-set) คือ อุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์ที่เมื่อเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแล้วส่งผลกระทบให้ระบบเกิดความล้มเหลวตาม ในขณะที่ เซตต่ำสุด คือ อุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์ที่เล็กที่สุด ที่เมื่อล้มเหลวแล้วจะส่งผลให้ระบบเกิดความล้มเหลวตามไปด้วย ดังนั้น วิธีการเซตตัดต่ำสุดต้องหาเซตตัดต่ำสุดของระบบไฟฟ้า ซึ่งขึ้นอยู่กับการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้าและนำไปประเมินดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า

เซตตัดต่ำสุดของระบบสามารถจำลองได้อีก 2 ลักษณะคือ

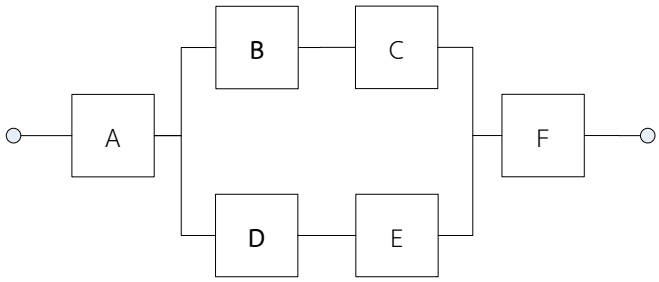
1. กลุ่มอุปกรณ์ในเซตตัดต่ำสุดที่การเชื่อมต่อแบบขนาน คือ ถ้าอุปกรณ์ภายในเซตตัดต่ำสุดเกิดความเสียหายทุกตัวก็จะส่งผลให้ระบบเกิดความล้มเหลว
2. กลุ่มอุปกรณ์ในเซตตัดต่ำสุดที่การเชื่อมต่อแบบอนุกรม คือ ถ้าอุปกรณ์เพียงอุปกรณ์เดียวภายในเซตตัดต่ำสุดเกิดความเสียหายก็จะส่งผลให้ระบบเกิดความล้มเหลว

การหาเซตตัดต่ำสุดแต่ละระบบไฟฟ้าสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

1. ระบุเส้นทางทั้งหมดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังจุดจ่ายไฟ
2. สร้างเมทริกซ์ที่ระบุอุปกรณ์ในแต่ละเส้นทาง โดยแถวของเมทริกซ์แสดงถึงจำนวนเส้นทางทั้งหมด และหลักแสดงถึงจำนวนอุปกรณ์ที่อยู่ภายในเส้นทาง
3. ถ้าหลักของเมทริกซ์ของแต่ละอุปกรณ์มีค่าไม่เป็น 0 แสดงว่าอุปกรณ์นั้นเป็นกลุ่มอุปกรณ์อันดับ 1
4. ตรวจสอบหลักของเมทริกซ์โดยการรวมสองหลัก ถ้าหลักที่รวมกันสองหลักมีค่าไม่เป็น 0 แสดงว่าอุปกรณ์ที่สองตัวนั้นเป็นกลุ่มอุปกรณ์อันดับ 2
5. ตัดกลุ่มอุปกรณ์อับดับ 2 ที่ภายในมีกลุ่มอุปกรณ์อันดับที่ 1 ออก
6. ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 4-5 โดยเพิ่มจำนวนหลักที่รวมกันเป็น 3, 4 และกำจัดกลุ่มอุปกรณ์ที่ซ้ำกับกลุ่มอุปกรณ์อันดับ 1 และอันดับ 2
7. ทำจนกระทั้งถึงจำนวนอันดับที่สามารถถึงได้ภายในระบบ

เพื่ออธิบายให้ชัดเจนและเข้าใจมากขึ้น จึงได้ยกตัวอย่างระบบเพื่อหาเซตตัดต่ำสุดทั้งหมดดังรูปที่ 3.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 3.5 ระบบทดสอบตัวอย่าง

1. ระบุเส้นทางทั้งหมดจากแหล่งจ่ายไฟไปยังจุดจ่ายไฟของระบบรูปที่ 4.9 มีทั้งหมด 2 เส้นทางได้แก่
   - เส้นทางที่ 1 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow F$
   - เส้นทางที่ 2 $A \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$
2. สร้างเมทริกซ์โดยแถวแสดงจำนวนเส้นทาง และหลักแสดงจำนวนอุปกรณ์ดังนี้

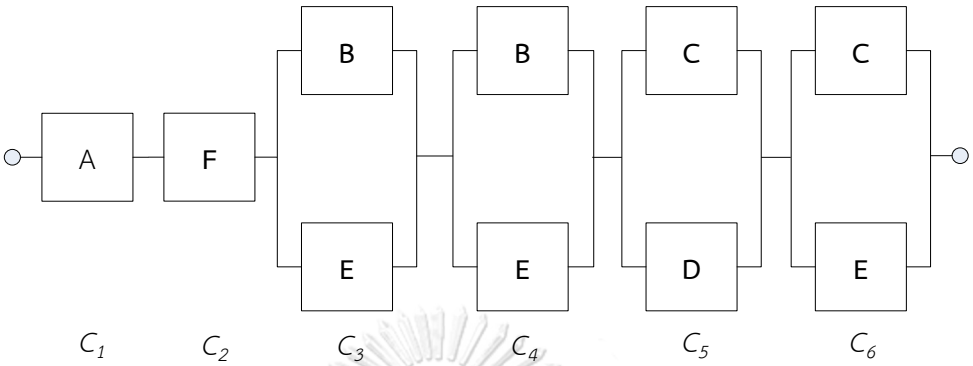
$$\begin{bmatrix} Path & A & B & C & D & E & F \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

3. หากลุ่มอุปกรณ์อันดับที่ 1 จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ A และ F จำนวนหลักทั้งหมดมีค่ามากกว่า 0 แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ A และ F เป็นกลุ่มอุปกรณ์เซตตัดต่ำที่สุดอันดับที่ 1
4. หากลุ่มอุปกรณ์อันดับที่ 2 โดยการรวมสองหลักของอุปกรณ์ เช่นหลักที่ B และ D รวมกันมีค่าเป็น 1 ทั้งหมดแสดงว่าเป็นเซตตัดต่ำที่สุดอันดับที่ 2 ในขณะที่ B กับ C รวมกันแล้วมีค่าไม่เป็น 1 ทั้งหมดแสดงว่าไม่เป็นเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 2 เป็นต้น จำนวนเซตตัดต่ำสุดทั้งหมดของระบบตัวอย่างแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 จำนวนเซตตัดต่ำสุดในระบบตัวอย่าง

ลำดับของเซตตัดต่ำสุด	อุปกรณ์ภายในเซตตัดต่ำสุด
1	A
2	F
3	BD
4	BE
5	CD
6	CE

จากตารางที่ 3.1 เป็นการหาเซตตัดต่ำสุด ในระบบตัวอย่าง ซึ่งมีทั้งหมด 6 ชุด คือ [A], [F], [BD], [BE], [CD]และ [CE] ดังนั้น ระบบตัวอย่างนี้สามารถเขียนจำลองเซตตัดต่ำสุดที่การเชื่อมต่อแบบขนาน และอนุกรมได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 กลุ่มเซตตัดต่ำสุดของระบบตัวอย่าง

ดังนั้นระบบจะเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวก็ต่อเมื่อเซตตัดที่เชื่อมต่ออนุกรมหรือเชื่อมต่อขนานทั้งหมดเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวพร้อมกัน เพราะฉะนั้น ความน่าจะเป็นที่ระบบจะเกิดความล้มเหลวสามารถหาได้จาก การรวมความน่าจะเป็นเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวของแต่ละเซตตัดต่ำที่สุดในลักษณะของยูเนียน (Union)

นิยามประเภทการล้มของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า พบว่าหากอุปกรณ์เกิดความล้มเหลวพร้อมกันหลายอุปกรณ์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 นิยามแสดงอุปกรณ์ล้มเหลวภายในเวลาเดียวกัน

จำนวนอุปกรณ์ที่ล้มเหลวพร้อมกันเวลาเดียวกัน	นิยามเรียกชื่อจำนวนอุปกรณ์ล้มเหลว
1	First order
2	Second order

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3 รูปแบบเหตุการณ์ล้มเหลวภายในระบบไฟฟ้า

การเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวภายในระบบไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทตามเหตุการณ์ความล้มเหลวของอุปกรณ์ ดังนี้

3.3.1 เหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ

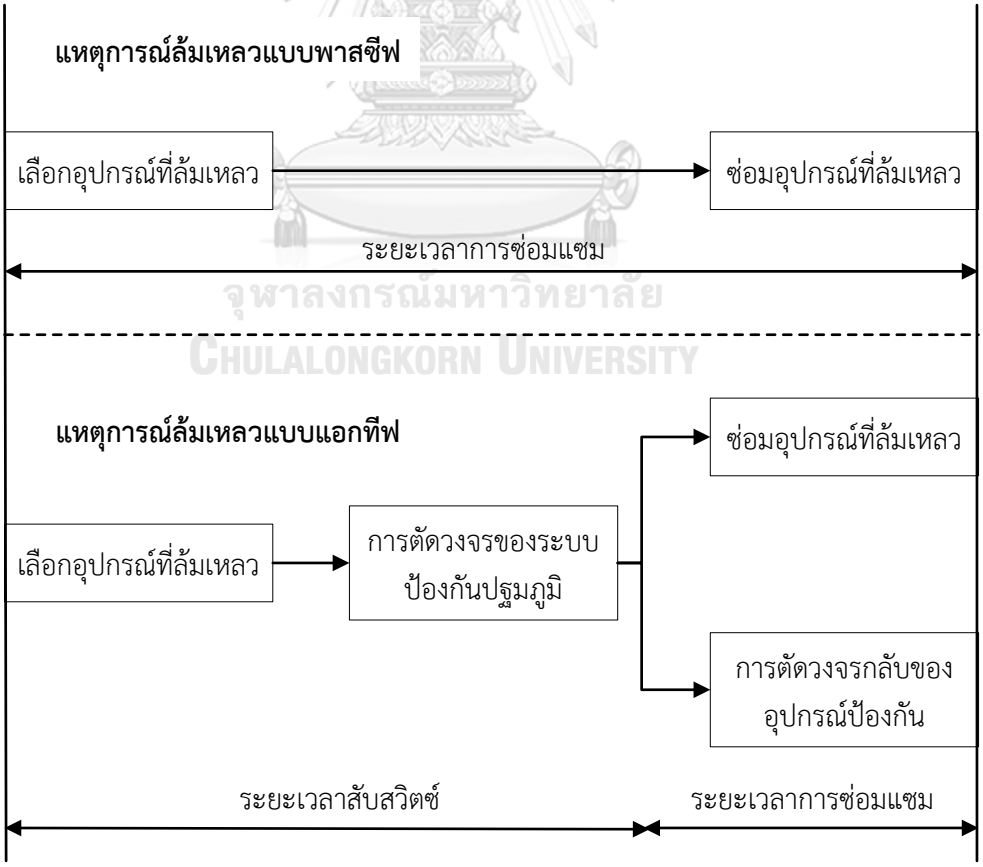
เหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ (Passive failure) คือ อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแล้วส่งผลให้ระบบไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ โดยไม่ได้เกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน แต่เกิดจากอุปกรณ์ตัวที่ล้มเหลวเอง เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่สามารถสั่งเปิดและปิดวงจรได้ เป็นต้น

โดยระบบไฟฟ้าสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อีก ก็ต่อเมื่ออุปกรณ์ที่ล้มเหลวนั้นได้รับการซ่อมแซม หรือเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่

3.3.2 เหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอกทีฟ

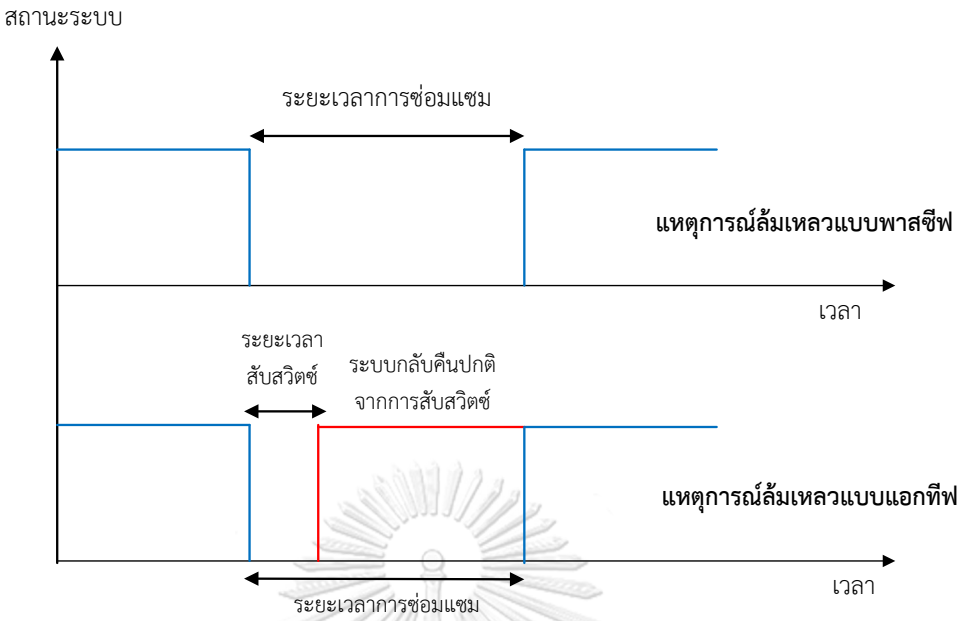
เหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอกทีฟ (Active failure) เมื่ออุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว และส่งผลให้อุปกรณ์ป้องกันปฐมภูมิ (Primary protection) ทีอยู่ใกล้เคียงกับอุปกรณ์ล้มเหลวทำงาน เช่น การเกิดไฟฟ้าลัดวงจรที่อุปกรณ์หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ส่งผลให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่อยู่ข้างเคียงทำงานเพื่อป้องกันกระแสลัดวงจร เป็นต้น หลังจากนั้นระบบปฏิบัติการภายในสถานีไฟฟ้าจะสับสวิตซ์อุปกรณ์ที่ล้มเหลวออกไปจากระบบ และนำเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ทำงานกลับมาปิดวงจรอีกครั้ง ซึ่งสามารถทำให้ระบบสถานีไฟฟ้าสามารถกลับมาใช้งานได้บางส่วนหรือทั้งหมด โดยขึ้นอยู่การเชื่อมต่อภายในสถานีไฟฟ้า

จากหลักการของเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟและเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอกทีฟ สามารถอธิบายความแตกต่างระหว่างการล้มเหลวทั้งสองประเภทได้ดังรูปที่ 3.7 ระยะเวลาและสถานะของระบบดังรูปที่ 3.8 และแสดงแบบจำลองการทำงานของระบบโดยที่อุปกรณ์ CB3 เกี่ยวข้องกับเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟและเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอกทีฟได้ดังรูปที่ 3.9

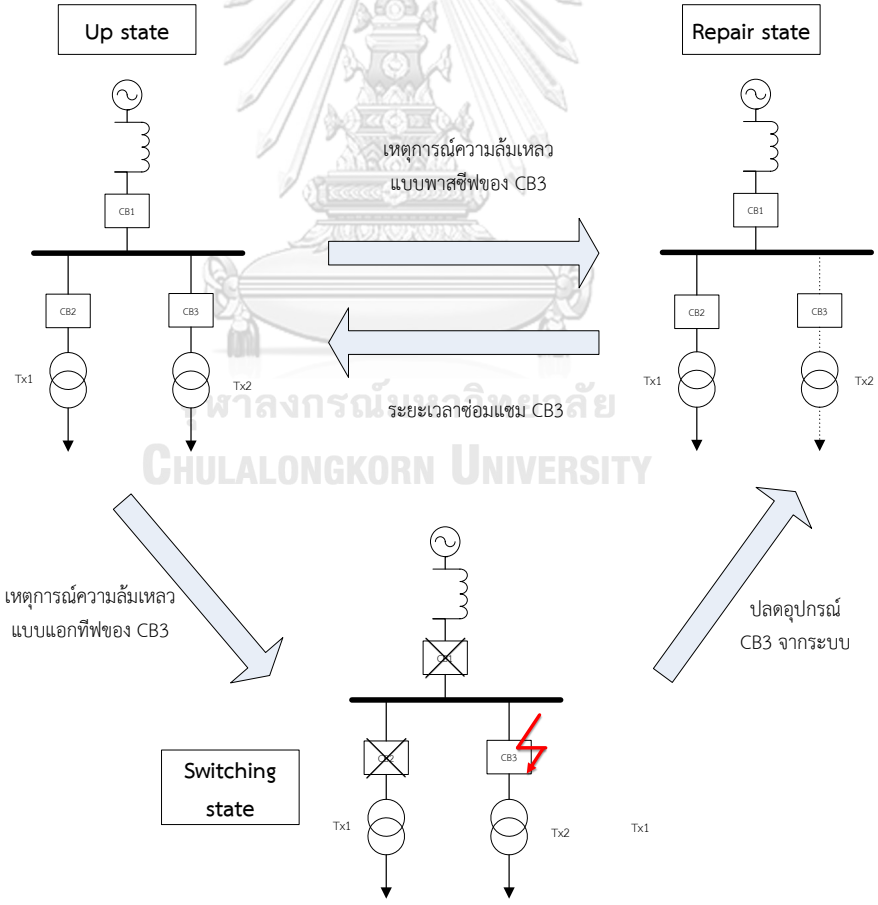


รูปที่ 3.7 แผนภาพความแตกต่างระหว่างเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟและแบบแอกทีฟ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 3.8 แผนภาพความแตกต่างสถานะของเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟและแบบแอกทีฟ



รูปที่ 3.9 การทำงานของระบบโดยที่อุปกรณ์ CB3 เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟและแบบแอกทีฟ

3.3.3 เหตุการณ์ล้มเหลวจากการทำงานผิดปกติของอุปกรณ์ป้องกัน

เหตุการณ์ความล้มเหลวที่เกิดจากการทำงานผิดปกติของอุปกรณ์ป้องกัน (Stuck condition failure) หรืออุปกรณ์ป้องกันไม่ทำงาน เช่น หากเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ส่งผลให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใกล้ที่สุดของตำแหน่งเกิดการลัดวงจรทำงาน แต่เซอร์กิตเบรกเกอร์ดังกล่าวไม่ทำงานตามสภาวะปกติ ทำให้ระบบไฟฟ้ายังคงกระแสลัดวงจรอยู่และอุปกรณ์ป้องกันโซนถัดมาต้องทำงานแทน จึงเรียกเหตุการณ์ล้มเหลวที่เกิดจากการทำงานผิดปกติของอุปกรณ์ป้องกัน

3.3.4 เหตุการณ์ล้มเหลวแบบซ้อนกัน

เหตุการณ์ล้มเหลวแบบซ้อนกัน (Overlapping failure) คือ การล้มเหลวของอุปกรณ์ตั้งแต่ 2 อุปกรณ์ขึ้นไป โดยที่อุปกรณ์สามารถเกิดความล้มเหลวประเภทพาสซีฟและแอกทีฟ อุปกรณ์ทั้งหมดจะต้องมีความเสียหายเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาเดียวกัน เช่น การเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟของอุปกรณ์เซอร์กิตเบรกเกอร์ และเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอกทีฟสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในระยะเวลาเดียวกัน เป็นต้น

3.3.5 เหตุการณ์ล้มเหลวที่เกิดขึ้นในช่วงการบำรุงรักษาอุปกรณ์

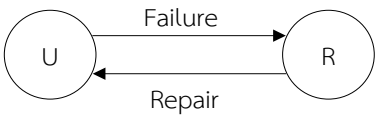
การเกิดเหตุการณ์ขัดข้องในช่วงของการบำรุงรักษาอุปกรณ์ (Maintenance outage) มีผลต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้า ณ จุดโหลด และส่งผลให้จุดโหลดนั้นไม่ได้รับกำลังไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง มีผลทำให้จุดโหลดนั้นไม่ได้รับกำลังไฟฟ้าขณะที่อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษา เป็นต้น

3.4 แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์

แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์ คือ แบบจำลองที่ใช้แสดงสถานะและพฤติกรรมทำงานของอุปกรณ์ เมื่อเกิดเหตุการณ์ความล้มเหลวและขัดข้องมีทั้งหมด 3 ประเภทดังนี้

3.4.1 แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์แบบ 2 สถานะ

สถานะของอุปกรณ์แบบจำลองนี้มีทั้งหมด 2 สถานะ ได้แก่ สถานะที่อุปกรณ์ทำงานปกติ (U) และสถานะอุปกรณ์กำลังซ่อมแซม (R) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.10

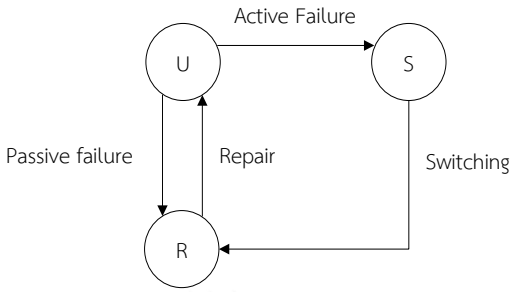


รูปที่ 3.10 แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์แบบ 2 สถานะ

จากรูปที่ 3.10 เมื่ออุปกรณ์ทำงานในสภาวะปกติและเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวกับอุปกรณ์ (Failure) ทำให้สถานะของอุปกรณ์เปลี่ยนไปอยู่ในสภาวะซ่อมแซม เมื่ออุปกรณ์สามารถกลับมาสภาวะปกติได้ด้วยการซ่อมแซมอุปกรณ์ (Repair) โดยแบบจำลองนี้มีข้อดีคือง่ายต่อความเข้าใจ และการวิเคราะห์ แต่มีข้อเสียคือ ไม่สามารถจำลองการทำงานที่ซับซ้อนของอุปกรณ์บางชนิด เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีความสามารถสวิตซ์อุปกรณ์ออกจากระบบและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เป็นต้น

3.4.2 แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์แบบ 3 สถานะ

สถานะการทำงานของอุปกรณ์มีทั้งหมด 3 สถานะ ได้แก่ สถานะที่อุปกรณ์ทำงานปกติ สถานะอุปกรณ์กำลังซ่อมแซม และสถานะการสวิตซ์ (S) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์แบบ 3 สถานะ

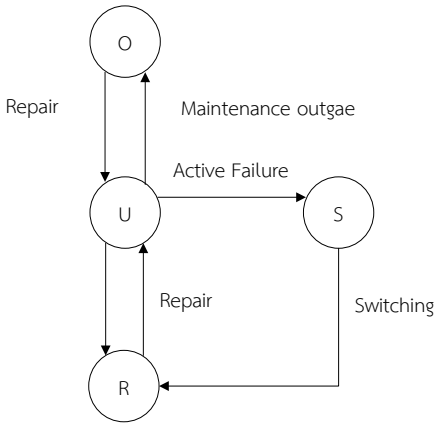
จากรูปที่ 3.11 การเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์จากสภาวะปกติสามารถพิจารณาได้เป็น 2 กรณี ดังนี้

1) อุปกรณ์เกิดความล้มเหลวแบบพาสซีฟ อุปกรณ์จะเปลี่ยนจากสถานะที่อุปกรณ์ทำงานปกติไปสถานะอุปกรณ์กำลังซ่อมแซม และกลับมาที่สภาวะปกติด้วยการซ่อมแซม
2) อุปกรณ์เกิดความล้มเหลวแบบแอกทีฟ อุปกรณ์จะถูกเปลี่ยนสถานะที่อุปกรณ์ทำงานปกติไปสถานะการสวิตซ์ และอุปกรณ์ที่ล้มเหลวนั้นจะถูกเปลี่ยนสถานะการสวิตซ์ไปสถานะซ่อมแซมด้วยระยะเวลาสวิตซ์ พร้อมกับนำอุปกรณ์สำรองมาใช้งานแทนอุปกรณ์ที่โดนปลดออก จากนั้นอุปกรณ์ที่ถูกซ่อมแซมจะถูกกลับมาใช้งานปกติ ทำให้จุดโหลดสามารถรับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายหลักอีกครั้ง

3.4.3 แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์แบบ 4 สถานะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สถานะการทำงานของอุปกรณ์มีทั้งหมด 4 สถานะ ได้แก่ สถานะที่อุปกรณ์ทำงานปกติ สถานะอุปกรณ์กำลังซ่อมแซม สถานะการสวิตซ์ และสถานะที่อุปกรณ์ถูกบำรุงรักษา (O) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์แบบ 4 สถานะ

จากรูปที่ 3.12 การเปลี่ยนสถานะอุปกรณ์ทำงานปกติสามารถพิจารณาได้ 3 กรณี ดังนี้

1) อุปกรณ์เกิดความล้มเหลวแบบพาสซีฟ อุปกรณ์จะถูกเปลี่ยนสถานะจากสถานะอุปกรณ์ทำงานปกติไปสถานะอุปกรณ์กำลังซ่อมแซม และสามารถกลับมาที่สภาวะปกติด้วยการซ่อมแซม
2) อุปกรณ์เกิดความล้มเหลวแบบแอกทีฟ อุปกรณ์จะถูกเปลี่ยนสถานะที่อุปกรณ์ทำงานปกติไปสถานะการสวิตซ์ และอุปกรณ์ที่ล้มเหลวนั้นจะถูกเปลี่ยนสถานะการสวิตซ์ไปสถานะซ่อมแซมด้วยระยะเวลาสวิตซ์ และนำอุปกรณ์สำรองมาใช้งานแทนขณะที่อุปกรณ์กำลังซ่อมแซม เมื่ออุปกรณ์ซ่อมแซมเสร็จก็จะถูกย้ายกลับไปสถานะอุปกรณ์ทำงานปกติ
3) อุปกรณ์ถึงช่วงเวลาการบำรุงรักษา ต้องนำอุปกรณ์ที่ต้องการบำรุงรักษาออกไปซ่อมแซม (Maintenance) และเกิดเหตุการณ์ขัดข้องช่วงระยะเวลาการบำรุงรักษา

จากเหตุผลที่มาข้างต้น วิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาจำนวนอุปกรณ์ล้มเหลวภายในเวลาเดียวกันเพียง 1 อุปกรณ์ ซึ่งมีผลกระทบต่อดัชนีที่ใช้ความเชื่อถือของสถานีไฟฟ้าเป็นอย่างมาก และแบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์ 3 สถานะ ซึ่งมีความใกล้เคียงกับการทำงานจริงของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าโดยสามารถแบ่งประเภทความล้มเหลวได้ 2 ประเภทคือ การล้มเหลวประเภทพาสซีฟ และการล้มเหลวประเภทแอกทีฟ

3.5 การตรวจหาเซตตัดต่ำสุด

ภายในเซตตัดต่ำสุด จะประกอบด้วยกลุ่มอุปกรณ์ต่างๆ ที่ทำให้ระบบเกิดความล้มเหลว ซึ่งสามารถจัดอันดับ (Order) ได้ตามจำนวนอุปกรณ์ภายในเซตตัดต่ำสุด เช่น ภายในเซตตัดต่ำสุดมีอุปกรณ์หนึ่งตัวล้มเหลว เรียกว่า เซตตัดต่ำสุดอันดับหนึ่ง อุปกรณ์ล้มเหลวสองตัวพร้อมกันเรียกว่าเซตตัดต่ำสุดอันดับสอง เป็นต้น รูปแบบเหตุการณ์ความล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทได้แก่ ความล้มเหลวแบบพาสซีฟและความล้มเหลวแบบแอกทีฟมีรายละเอียดดังนี้ [34]

3.5.1 การตรวจหาเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟ

เซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟ (Passive failure minimal cut-set) คือ อุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์ที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแล้วไม่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ป้องกันทำงาน แต่ส่งผลให้จุดโหลดภายในสถานีไฟฟ้าไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า หากอุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์ดังกล่าวอยู่บนเส้นทางที่สั้นที่สุดสำหรับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังจุดจ่ายไฟหรือจุดโหลด จะทำให้ไม่มีกำลังไฟฟ้าจ่ายไปที่จุดโหลดนั้นได้ ขั้นตอนการตรวจหาเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟมีดังนี้

1. ป้อนข้อมูล ได้แก่ โครงสร้างสถานีไฟฟ้า และเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าและจุดโหลด
2. ค้นหาอุปกรณ์และกลุ่มอุปกรณ์ที่ทำให้ระบบเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวด้วยวิธีในหัวข้อที่ 3.2
3. พิจารณาที่ละอุปกรณ์และกลุ่มอุปกรณ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2
4. ตรวจสอบว่าอุปกรณ์และกลุ่มอุปกรณ์ภายในขั้นตอนที่ 3 ว่าอยู่บนเส้นทางที่สั้นที่สุดทุกเส้นทางหรือไม่
   ก. หากอุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์ตรงกัน เก็บข้อมูลกลุ่มอุปกรณ์ที่ตรวจสอบเป็นเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟ
   ข. หากอุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์ไม่ตรงกัน พิจารณากลุ่มอุปกรณ์ถัดไปในขั้นตอนที่ 3
5. ตรวจสอบอุปกรณ์และกลุ่มอุปกรณ์ถัดไปภายในขั้นตอนที่ 2
   ก. หากครบให้จบการทำงาน และแสดงผลลัพธ์เซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟที่เก็บไว้
   ข. หากไม่ครบให้พิจารณาอุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์ถัดไป ในขั้นตอนที่ 3

3.5.2 การตรวจหาเซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟ

เซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟ (Active failure minimal cut-set) คือ อุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์ที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแล้วส่งผลให้อุปกรณ์ป้องกันที่อยู่ข้างเคียงทำงาน และส่งผลให้อุปกรณ์สถานีไฟฟ้าไม่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าไปจุดโหลดได้ การตรวจหาเซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟมีวิธีการคล้ายกับวิธีการตรวจหาเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟ แต่เพิ่มเติมขั้นตอนการตรวจหาอุปกรณ์ป้องกันที่ทำงาน หากอุปกรณ์ป้องกันที่ทำงานอยู่บนเส้นทางที่สั้นที่สุดของการจ่ายกำลังไฟฟ้า ก็จะส่งผลให้จุดโหลดของเส้นทางนั้นไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า วิธีการตรวจหาเซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟสรุปได้ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

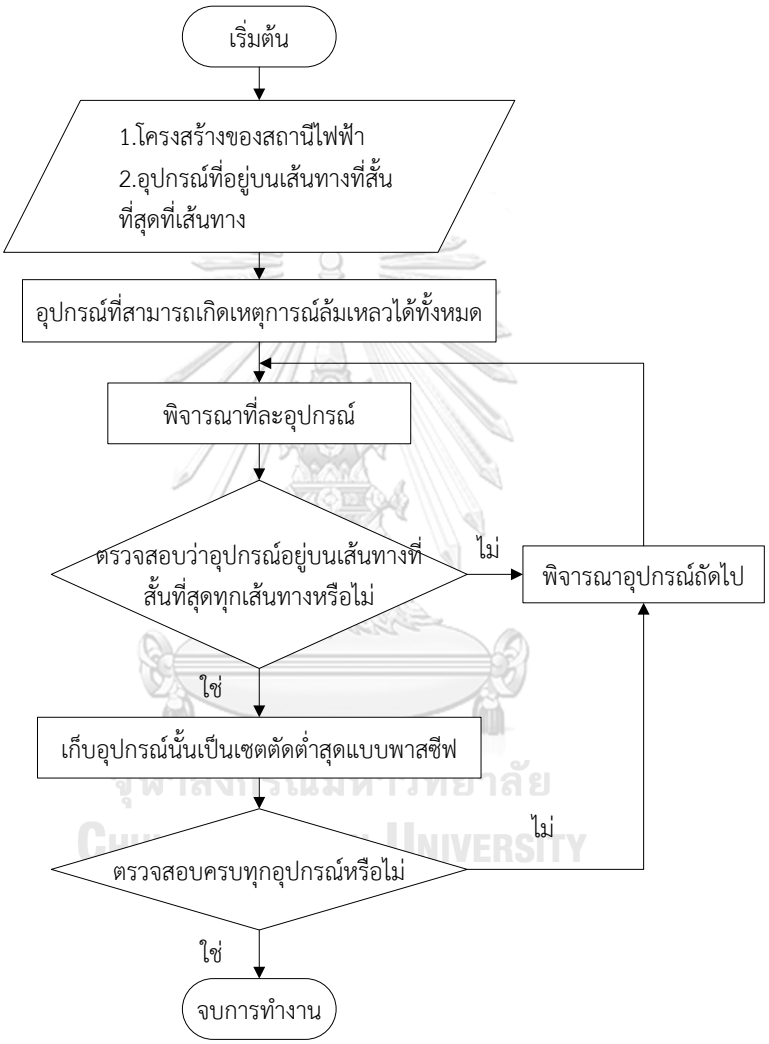
1. ป้อนข้อมูล ได้แก่ โครงสร้างสถานีไฟฟ้า และเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าและจุดโหลด
2. ค้นหาอุปกรณ์และกลุ่มอุปกรณ์ที่ทำให้ระบบเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวด้วยวิธีในหัวข้อที่ 3.2
3. พิจารณาที่ละอุปกรณ์และกลุ่มอุปกรณ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2
4. ตรวจสอบอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าตัวที่อยู่ใกล้กับกลุ่มอุปกรณ์ที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวตามขั้นตอนที่ 3
5. ตรวจสอบอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าตัวที่ทำงานภายในขั้นตอนที่ 4 ว่าอยู่ในภายในเส้นทางที่สั้นที่สุดทุกเส้นทางหรือไม่
   ก. หากอุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์ตรงกัน เก็บข้อมูลกลุ่มอุปกรณ์ที่ตรวจสอบเป็นเซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟ
   ข. หากอุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์ไม่ตรงกัน พิจารณากลุ่มอุปกรณ์ถัดไปในขั้นตอนที่ 3

6. ตรวจสอบอุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์ถัดไปในขั้นตอนที่ 2

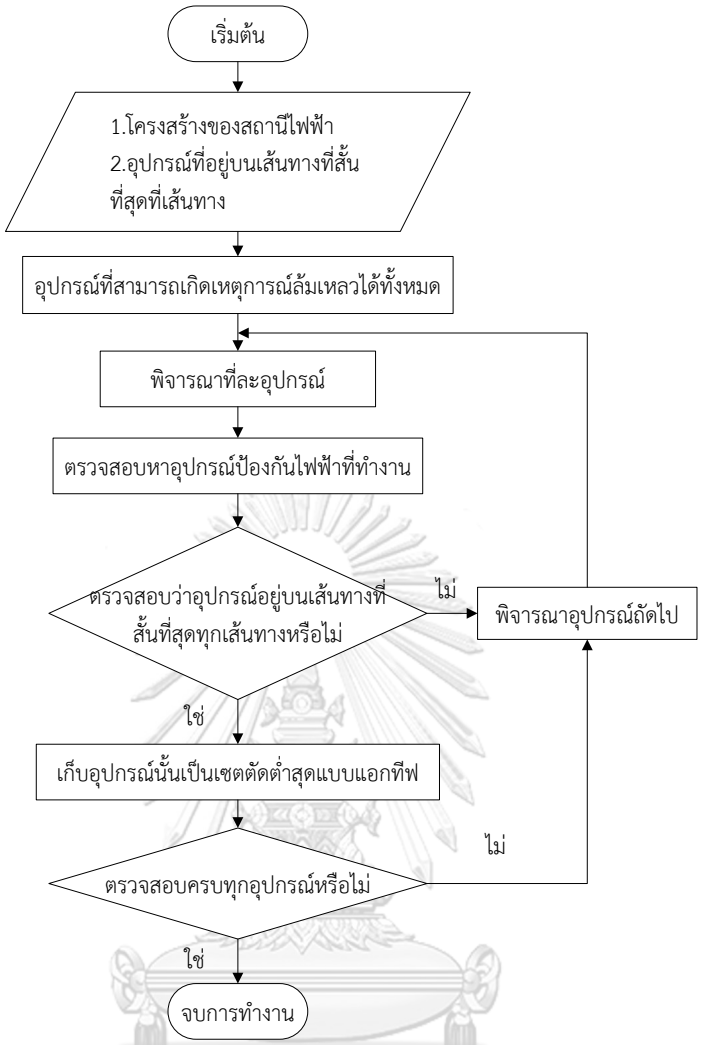
ก. หากครบให้จบการทำงาน และแสดงผลลัพธ์เซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟที่เก็บไว้

ข. หากไม่ครบให้พิจารณาอุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์ถัดไปในขั้นตอนที่ 3

การตรวจสอบเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟและแอกทีฟสามารถสรุปเป็นขั้นตอนการทำงานได้ดังรูปที่ 3.13 และ 3.14 ตามลำดับ



รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการตรวจหาเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟ



รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการตรวจหาเซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟ

3.6 การประยุกต์ใช้วิธีเซตตัดต่ำสุดกับรูปแบบเหตุการณ์ความล้มเหลว

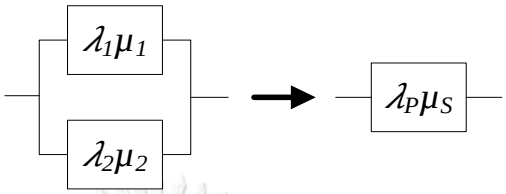
จากหัวข้อที่ 3.2 ถึง 3.5 ได้กล่าวถึงเซตตัดต่ำสุด รูปแบบเหตุการณ์ความล้มเหลวภายในระบบไฟฟ้า แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์ และการตรวจหาเซตตัดต่ำสุดซึ่งประกอบด้วยเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟและแบบแอกทีฟ ดังนั้นภายในหัวข้อนี้จะอธิบาย 2 ส่วน คือ การหาค่าดัชนีประเมินระบบไฟฟ้าจากเซตตัดต่ำสุด [35] และการประมาณดัชนีประเมินระบบไฟฟ้าของประเภทเหตุการณ์ความล้มเหลว

3.6.1 การหาค่าดัชนีประเมินระบบไฟฟ้าจากเซตตัดต่ำสุด

ดัชนีประเมินระบบไฟฟ้า ประกอบด้วย อัตราความล้มเหลวของระบบ ระยะเวลาซ่อมแซมของระบบ และความไม่สามารถใช้สอยได้ของระบบ เซตตัดต่ำสุดนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ เซตตัดต่ำสุดที่การเชื่อมต่อแบบขนาน และเซตตัดต่ำสุดที่มีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม ดังนี้

(1) เซตตัดต่ำสุดที่มีการเชื่อมต่อแบบขนาน

กำหนดให้ อุปกรณ์ที่ 1 และอุปกรณ์ที่ 2 มีอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์เป็น λ_1 และ λ_2 ตามลำดับ และอัตราการซ่อมแซมอุปกรณ์เป็น μ_1 และ μ_2 ตามลำดับ โดยอุปกรณ์ทั้งสองตัวนี้เป็นกลุ่มของเซตตัดต่ำสุดแบบขนานและสามารถยุบรวมเพื่อหาตัวแปร ได้ดังรูปที่ 3.15 สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.15 การลดรูปเซตตัดต่ำสุดระบบขนาน

$$P_{down} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1}\right)\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2}\right) \tag{3.4}$$

$$P_{down} = \frac{\lambda_p}{\lambda_p + \mu_p} \tag{3.5}$$

โดยที่ P_{down} คือ ความน่าจะเป็นที่ระบบเกิดเหตุการณ์ล้มเหลว (สถานะเป็น 0)

λ_p คือ อัตราความล้มเหลวของเซตตัดต่ำสุดแบบ 2 อุปกรณ์ขนานกัน (ครั้ง/ปี)

μ_p คือ อัตราการซ่อมแซมของเซตตัดต่ำสุดแบบ 2 อุปกรณ์ขนานกัน (ครั้ง/ปี)

เพื่อให้วงจรในรูปที่ 3.15 ก่อนลดรูปและหลังลดรูปมีค่าเท่ากัน สำหรับเซตตัดต่ำสุดแบบขนานจะกำหนดให้ อัตราการซ่อมแซมของเซตตัดต่ำสุดแบบ 2 อุปกรณ์ขนานมีค่าเท่ากับอัตราการซ่อมแซมของอุปกรณ์ที่ 1 และอุปกรณ์ที่ 2 รวมกันดังสมการที่ (3.6)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$$\mu_p = \mu_1 + \mu_2 \tag{3.6}$$

$$\frac{1}{r_p} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \tag{3.7}$$

โดยที่ r_p คือ ระยะเวลาซ่อมแซมของเซตตัดต่ำสุดแบบ 2 อุปกรณ์ขนานกัน (ชั่วโมง/ครั้ง)

r_1, r_2 คือ ระยะเวลาซ่อมแซมของอุปกรณ์ที่ 1 และอุปกรณ์ที่ 2 (ชั่วโมง/ครั้ง)

เมื่อนำสมการที่ (3.4) และ (3.5) มีค่าเท่ากัน สามารถแก้สมการหาค่าอัตราความล้มเหลว ระยะเวลาซ่อมแซม และความไม่สามารถใช้สอยได้ของเซตตัดต่ำสุดแบบขนานได้ดังสมการที่ (3.8) ถึง (3.10) ตามลำดับ

$$\lambda_p = \frac{\lambda_1\lambda_2(r_1 + r_2)}{1 + \lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2} \approx \lambda_1\lambda_2(r_1 + r_2) \qquad \lambda_i r_i << 1 \tag{3.8}$$

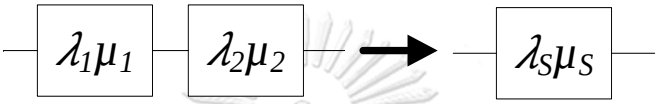
$$r_p = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \tag{3.9}$$

$$U_p = \lambda_p r_p = \lambda_1 \lambda_2 r_1 r_2 \tag{3.10}$$

โดยที่ U_p คือ ความไม่สามารถใช้สอยได้ของเซตตัดต่ำสุดแบบ 2 อุปกรณ์ขนานกัน (ชั่วโมง/ปี)

(2) เซตตัดต่ำสุดที่มีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม

กลุ่มของเซตตัดต่ำสุดที่เชื่อมต่อแบบอนุกรมสามารถยุบรวมเพื่อหาตัวแปรภายใน ได้ดังรูปที่ 3.16 สามารถแสดงคำนวณได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.16 การลดรูปเซตตัดต่ำสุดของระบบอนุกรม

$$P_{up} = \left(\frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1}\right)\left(\frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2}\right) \tag{3.11}$$

$$P_{up} = \frac{\mu_s}{\lambda_s + \mu_s} \tag{3.12}$$

โดยที่ P_{up} คือ ความน่าจะเป็นที่ระบบทำงานปกติ (สถานะเป็น 1)

λ_s คือ อัตราความล้มเหลวของเซตตัดต่ำสุดแบบ 2 อุปกรณ์อนุกรมกัน (ครั้ง/ปี)

μ_s คือ อัตราการซ่อมแซมของเซตตัดต่ำสุดแบบ 2 อุปกรณ์อนุกรมกัน (ครั้ง/ปี)

เพื่อให้วงจรในรูปที่ 3.16 ก่อนลดรูปและหลังลดรูปมีค่าเท่ากัน สำหรับเซตตัดต่ำสุดแบบอนุกรม กำหนดให้อัตราความล้มเหลวของเซตตัดต่ำสุดแบบ 2 อุปกรณ์อนุกรมกัน มีค่าเท่ากับอัตราการซ่อมแซมของอุปกรณ์ที่ 1 และอุปกรณ์ที่ 2 รวมกันดังสมการที่ (3.13) เมื่อนำสมการที่ (3.11) และ (3.12) มีค่าเท่ากัน สามารถหาระยะเวลาซ่อมแซมและความไม่สามารถใช้สอยได้ของเซตตัดแบบอนุกรมได้ดังสมการที่ (3.14) และ (3.15) ตามลำดับ

$$\lambda_s = \lambda_1 + \lambda_2 \tag{3.13}$$

$$r_s = \frac{\lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2}{\lambda_s} \tag{3.14}$$

$$U_s = \lambda_s r_s \tag{3.15}$$

โดยที่ r_s คือ ระยะเวลาซ่อมแซมของเซตตัดต่ำสุดแบบ 2 อุปกรณ์อนุกรม (ชั่วโมง/ครั้ง)

U_s คือ ความไม่สามารถใช้สอยได้ของเซตตัดต่ำสุดแบบ 2 อุปกรณ์อนุกรมกัน (ชั่วโมง/ปี)

สถานีไฟฟ้าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุปกรณ์ในแต่ละปีจะส่งผลให้เซตตัดต่ำสุดของสถานีไฟฟ้าแต่ละจุดโหลดเปลี่ยนแปลงไป กำหนดให้ระยะเวลาต่างๆภายในสถานีไฟฟ้าคือ j มีจำนวนจุดโหลดทั้งหมดภายในสถานีไฟฟ้า N_L และ k คือดัชนีตำแหน่งของโหลดภายในสถานีไฟฟ้า $(k = 1, 2, 3, ..., N_L)$ ดังนั้นสำหรับเซตตัดต่ำสุดจำนวน M_k เซตตัดของจุดโหลดที่ k สามารถคำนวณอัตราความล้มเหลว ความไม่สามารถใช้สอยได้ต่อปี และระยะเวลาซ่อมแซม ได้ดังนี้

$$\lambda_{j,k} = \sum_{l=1}^{M_{j,k}} \lambda_{C_l,j,k} \tag{3.16}$$

$$U_{j,k} = \sum_{l=1}^{M_{j,k}} U_{C_l,j,k} \tag{3.17}$$

$$r_{j,k} = \frac{U_{j,k}}{\lambda_{j,k}} \tag{3.18}$$

โดยที่ $\lambda_{j,k}$ คือ อัตราความล้มเหลว ณ ระยะที่ j จุดโหลดที่ k (ครั้ง/ปี)

$M_{j,k}$ คือ จำนวนเซตตัดต่ำสุดทั้งหมด ณ ระยะที่ j ของจุดโหลดที่ k

l คือ ดัชนีของเซตตัดต่ำสุด $(l = 1, 2, 3, ..., M_{j,k})$

$\lambda_{C_l,j,k}$ คือ อัตราความล้มเหลวของเซตตัดต่ำสุดที่ l ณ ระยะที่ j จุดโหลดที่ k (ครั้ง/ปี)

$U_{j,k}$ คือ ความไม่สามารถใช้สอยได้ต่อปีของจุดโหลดที่ k (ชั่วโมง/ปี)

$U_{C_l,j,k}$ คือ ความไม่สามารถใช้สอยได้ของเซตตัดต่ำสุดที่ l ณ ระยะที่ j จุดโหลดที่ k (ชั่วโมง/ปี)

$r_{j,k}$ คือ ระยะเวลาซ่อมแซม ณ ระยะที่ j ของจุดโหลดที่ k (ชั่วโมง/ครั้ง)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.6.2 การประมาณดัชนีประเมินระบบไฟฟ้าของประเภทเหตุการณ์ความล้มเหลว

เนื่องจากแต่ละเซตตัดต่ำสุดจะประกอบด้วยกลุ่มอุปกรณ์ตั้งแต่ 1 ตัว และมากกว่า 1 อุปกรณ์ขึ้นไป ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับเหตุการณ์ความล้มเหลวแบบพาสซีฟและแบบแอกทีฟ ดังนี้

กำหนดให้ Φ เป็นเซตของกลุ่มอุปกรณ์เซตตัดต่ำสุดประกอบด้วยเหตุการณ์แบบพาสซีฟและแอกทีฟ ดังนี้

$$\Phi = \bigcup_{i=1}^{N} \left(\Phi_{p,i} \cup \Phi_{a,i} \right) \tag{3.19}$$

โดยที่ $\Phi_{p,i}$ คือ เซตกลุ่มอุปกรณ์ล้มเหลวจำนวน i อุปกรณ์ของเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟ

$\Phi_{a,i}$ คือ เซตกลุ่มอุปกรณ์ล้มเหลวจำนวน i อุปกรณ์ของเซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟ

N คือ จำนวนอุปกรณ์ทั้งหมดภายในสถานีไฟฟ้า

i คือ จำนวนอุปกรณ์ล้มเหลวภายในเซตตัดต่ำสุด

การประเมินดัชนีความน่าเชื่อถือภายในระบบไฟฟ้าสามารถคำนวณโดยคำนึงถึงเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟและแอกทีฟ ดังนี้

(1) อัตราความล้มเหลว ณ ระยะที่ j ของจุดโหลดที่ k สามารถคำนวณได้จากผลรวมของอัตราความล้มเหลวแต่ละเซตตัดต่ำสุดทั้งแบบพาสซีฟและแอกทีฟได้ดังสมการที่ (3.16)

เมื่อพิจารณาอัตราความล้มเหลวแต่ละเซตตัดต่ำสุด ณ ระยะที่ j ของจุดโหลดที่ k สามารถประกอบไปด้วยความล้มเหลวแบบพาสซีฟและแอกทีฟ ดังนี้

$$\lambda_{C_l,j,k} = \lambda_{pC_l,j,k} + \lambda_{aC_l,j,k} \tag{3.20}$$

โดยที่ $\lambda_{pC_l,j,k}$ คือ อัตราความล้มเหลวของเซตตัดต่ำสุดแบบพาสทีฟลำดับที่ l ณ ระยะที่ j ของจุดโหลดที่ k (ครั้ง/ปี)

$\lambda_{aC_l,j,k}$ คือ อัตราความล้มเหลวของเซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟลำดับที่ l ณ ระยะที่ j ของจุดโหลดที่ k (ครั้ง/ปี)

จากสมการที่ (3.19) และ (3.20) อัตราความล้มเหลว ณ ระยะที่ j จุดโหลดที่ k สามารถเขียนในรูปจำนวนอุปกรณ์ล้มเหลวภายในเซตตัดต่ำสุด และมีความเกี่ยวข้องกับรูปแบบความล้มเหลวของอุปกรณ์แบบพาสซีฟและแอกทีฟดังนี้

กำหนดให้ $M_{p,j,k}$ คือจำนวนเซตตัดต่ำสุดทั้งหมดแบบพาสซีฟ ณ ระยะที่ j ของจุดโหลดที่ k และ $M_{a,j,k}$ คือจำนวนเซตตัดต่ำสุดทั้งหมดแบบแอกทีฟ ณ ระยะที่ j ของจุดโหลดที่ k เมื่อแทนค่าสมการที่ (3.20) ลงในสมการที่ (3.16) สามารถเขียนอัตราความล้มเหลวได้ดังนี้

$$\lambda_{j,k} = \left(\sum_{l=1}^{M_{1p,j,k}} \lambda_{pC_l,j,k} + \sum_{l=M_{1p,j,k}+1}^{M_{p,j,k}} \lambda_{pC_l,j,k} \right) + \left(\sum_{l=1}^{M_{1a,j,k}} \lambda_{aC_l,j,k} + \sum_{l=M_{1a,j,k}+1}^{M_{a,j,k}} \lambda_{aC_l,j,k} \right) \tag{3.21}$$

โดยที่ $M_{1p,j,k}$ คือ จำนวนเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟลำดับที่ 1 ทั้งหมด ณ ระยะที่ j ของจุดโหลดที่ k

$M_{1a,j,k}$ คือ จำนวนเซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟลำดับที่ 1 ทั้งหมด ณ ระยะที่ j ของจุดโหลดที่ k

เนื่องจากภายในเซตตัดต่ำสุดที่มีเพียงอุปกรณ์ล้มเหลวเพียง 1 อุปกรณ์มีผลกระทบต่อความล้มเหลวภายในระบบไฟฟ้าเป็นอย่างมาก ดังนั้นภายในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเฉพาะเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 เท่านั้น เพราะฉะนั้นอัตราความล้มเหลว ณ ระยะที่ j ของจุดโหลดที่ k สามารถประมาณจากเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 ได้ดังนี้

$$\lambda_{j,k} \approx \left(\sum_{l=1}^{M_{1p,j,k}} \lambda_{pC_l,j,k} \right) + \left(\sum_{l=1}^{M_{1a,j,k}} \lambda_{aC_l,j,k} \right) \tag{3.22}$$

นอกจากนี้สังเกตได้ว่า ภายในเซตตัดต่ำสุดอับดับ 1 มีจำนวนอุปกรณ์เพียงอุปกรณ์เดียว และอุปกรณ์นั้นมีความเกี่ยวข้องกับรูปแบบความล้มเหลวแบบพาสซีฟและแอกทีฟ ดังนั้นอัตราความล้มเหลวของ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 มีค่าเท่ากับอัตราความล้มของอุปกรณ์เกี่ยวข้องภายในเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟและแอกทีฟ เรานำเสนอดัชนี i คือ อุปกรณ์ที่อยู่ภายในเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 ที่ l ดังนี้

$$\lambda_{pC_l,j,k} = \begin{cases} \lambda_{pD_i,j,k} & \text{ถ้าอุปกรณ์ที่ } i \text{ ที่อยู่ภายในเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟที่ } l \text{ ณ ระยะที่ } j \text{ จุดโหลดที่ } k \\ 0, & \text{อื่น} \end{cases} \quad (3.23)$$

$$\lambda_{aC_l,j,k} = \begin{cases} \lambda_{aD_i,j,k} & \text{ถ้าอุปกรณ์ที่ } i \text{ ที่อยู่ภายในเซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟที่ } l \text{ ณ ระยะที่ } j \text{ จุดโหลดที่ } k \\ 0, & \text{อื่น} \end{cases} \quad (3.24)$$

โดยที่ $\lambda_{pD_i,j,k}$ คือ อัตราความล้มเหลวแบบพาสซีฟของอุปกรณ์ที่ i ณ ระยะ j จุดโหลดที่ k (ครั้ง/ปี)

$\lambda_{aD_i,j,k}$ คือ อัตราความล้มเหลวแบบแอกทีฟของอุปกรณ์ที่ i ณ ระยะ j จุดโหลดที่ k (ครั้ง/ปี)

นำค่าประมาณอัตราความล้มเหลวของเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 แบบพาสซีฟและแอกทีฟภายในสมการที่ (3.23) และ (3.24) แทนค่าลงในสมการที่ (3.22) อัตราความล้มเหลว ณ ระยะ j ของจุดโหลดที่ k สามารถประมาณได้จากอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 ดังนี้

$$\lambda_{j,k} \approx \sum_{i=1}^{N} \left(\lambda_{pD_i,j,k} + \lambda_{aD_i,j,k} \right) \quad (3.25)$$

(2) ความไม่สามารถใช้สอยได้ ณ ระยะ j ของจุดโหลดที่ k คือ ระยะเวลาที่ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ของจุดโหลดในแต่ละปี คำนวณได้จากแต่ละเซตตัดต่ำสุดดังสมการที่ (3.17) เมื่อพิจารณาความไม่สามารถใช้สอยได้แต่ละเซตตัดต่ำสุด ณ ระยะ j จุดโหลดที่ k เกิดจากการรวมกันของความล้มเหลวแบบพาสซีฟและแอกทีฟ ดังนี้

$$U_{C_l,j,k} = \lambda_{pC_l,j,k} r_{pC_l,j,k} + \lambda_{aC_l,j,k} r_{aC_l,j,k} \quad (3.26)$$

โดยที่ $r_{pC_l,j,k}$ คือ ระยะเวลาซ่อมแซมของเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟลำดับที่ l ณ ระยะ j ของจุดโหลดที่ k (ชั่วโมง/ครั้ง)

$r_{aC_l,j,k}$ คือ ระยะเวลาซ่อมของแซมเซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟลำดับที่ l ณ ระยะ j ของจุดโหลดที่ k (ชั่วโมง/ครั้ง)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากสมการที่ (3.26) กำหนดให้พจน์ที่ 1 คือความไม่สามารถใช้สอยได้ของเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟลำดับที่ l ณ ระยะ j ของจุดโหลดที่ k (Unavailability due to passive failure, $U_{pC_l,j,k}$) และพจน์ที่ 2 คือความไม่สามารถใช้สอยได้ของเซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟลำดับที่ l ณ ระยะ j ของจุดโหลดที่ k (Unavailability due to active failure, $U_{aC_l,j,k}$) ดังนี้

$$U_{C_l,j,k} = U_{pC_l,j,k} + U_{aC_l,j,k} \quad (3.27)$$

ในทำนองเดียวกันกับอัตราความล้มเหลว ณ ระยะ j ของจุดโหลดที่ k ภายในสมการที่ (3.23) และ (3.24) ความไม่สามารถใช้สอยได้ ณ ระยะ j ของจุดโหลดที่ k สามารถเขียนในรูปจำนวนอุปกรณ์

ล้มเหลวภายในเซตตัดต่ำสุด ที่มีความเกี่ยวข้องกับความล้มเหลวแบบพาสซีฟและแอกทีฟ ความไม่สามารถใช้สอยได้ของจุดโหลดที่ k จากเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 ดังนี้

$$U_{j,k} = \left(\sum_{l=1}^{M_{1p,j,k}} U_{pC_l,j,k} + \sum_{l=M_{1p,j,k}+1}^{M_{p,j,k}} U_{pC_l,j,k} \right) + \left(\sum_{l=1}^{M_{1a,j,k}} U_{aC_l,j,k} + \sum_{l=M_{1a,j,k}+1}^{M_{a,j,k}} U_{aC_l,j,k} \right) \quad (3.28)$$

$$U_{j,k} \approx \sum_{l=1}^{M_{1p,j,k}} U_{pC_l,j,k} + \sum_{l=1}^{M_{1a,j,k}} U_{aC_l,j,k} \quad (3.29)$$

นอกจากนี้สังเกตได้ว่า ภายในเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 มีอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟและแอกทีฟแค่ 1 อุปกรณ์ ดังนั้นความไม่สามารถใช้สอยได้ของเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 มีค่าเท่ากับความไม่สามารถใช้สอยได้ของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟและแอกทีฟ ดังนี้

$$U_{pC_l,j,k} = \begin{cases} \lambda_{pD_i,j,k} r_{pD_i} & \text{ถ้าอุปกรณ์ที่ } i \text{ เป็นอุปกรณ์ภายในเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟที่ } l \text{ ณ ระยะ } j \text{ จุดโหลดที่ } k \\ 0, & \text{อื่น} \end{cases} \quad (3.30)$$

$$U_{aC_l,j,k} = \begin{cases} \lambda_{aD_i,k} r_{aD_i} & \text{ถ้าอุปกรณ์ที่ } i \text{ เป็นอุปกรณ์ภายในเซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟที่ } l \text{ ณ ระยะ } j \text{ จุดโหลดที่ } k \\ 0, & \text{อื่น} \end{cases} \quad (3.31)$$

โดยที่ r_{pD_i} คือ ระยะเวลาซ่อมแซมอุปกรณ์แบบพาสซีฟของอุปกรณ์ที่ i (ชั่วโมง/ครั้ง)

r_{aD_i} คือ ระยะเวลาซ่อมแซมอุปกรณ์แบบแอกทีฟของอุปกรณ์ที่ i (ชั่วโมง/ครั้ง)

นำค่าประมาณความไม่สามารถใช้สอยได้ของเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 แบบพาสซีฟและแอกทีฟภายในสมการที่ (3.30) และ (3.31) แทนค่าลงในสมการที่ (3.29) ความไม่สามารถใช้สอยได้ของจุดโหลดที่ k สามารถประมาณได้จากอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 ดังต่อไปนี้

$$U_{j,k} \approx \left(\sum_{i=1}^{N} \lambda_{pD_i,j,k} r_{pD_i} \right) + \left(\sum_{i=1}^{N} \lambda_{aD_i,j,k} r_{aD_i} \right) \quad (3.32)$$

(3) ค่าดัชนี $EENS_j$ (Expected Energy Not Supplied) ณ ระยะ j คือ ค่าดัชนีที่บ่งบอกถึงพลังงานไฟฟ้าที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายไฟฟ้า ค่า $EENS_j$ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$EENS_j = \sum_{k=1}^{N_L} L_{j,k} U_{j,k} \quad (3.33)$$

โดยที่ $L_{j,k}$ คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียไป ณ ระยะ j ของจุดโหลดที่ k (กิโลวัตต์)

(4) ค่าดัชนีของจำนวนครั้งที่ไฟฟ้าดับ ณ ระยะ j (System Average Interruption Frequency Index: $SAIFI_j$) คือ ค่าเฉลี่ยจำนวนครั้งการเกิดไฟฟ้าดับของจุดโหลดในแต่ละจุดของระบบ คำนวณได้ดังนี้

$$SAIFI_j = \frac{\sum_{k=1}^{N_L} \lambda_{j,k} N_k}{N_k} \quad (3.34)$$

โดยที่ N_k คือ จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าของจุดโหลดที่ k

(5) ค่าดัชนีของระยะเวลาที่ไฟฟ้าดับ ณ ระยะ *j* (System Average Interruption Duration Index : $SAIDI_j$) คือ ค่าเฉลี่ยระยะเวลาการเกิดไฟฟ้าดับของจุดโหลดในแต่ละจุดของระบบและคำนวณได้ดังนี้

$$SAIDI_j = \frac{\sum_{k=1}^{N_L} U_{j,k} N_k}{N_k} \tag{3.35}$$

3.7 การประเมินความเชื่อถือได้เนื่องจากการบำรุงรักษา

รูปแบบการบำรุงรักแบ่งได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ การบำรุงรักษาแบบแก้ไข และการบำรุงรักษาแบบป้องกัน การบำรุงรักษาแต่ละรูปแบบนั้นส่งผลต่อความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า เช่น เมื่ออุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ความล้มเหลว ส่งผลให้จุดโหลดของสถานีไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้า เป็นต้น แต่เมื่ออุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาส่งผลให้อัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ลดลง และเพิ่มความเชื่อถือภายในสถานีไฟฟ้า นอกจากนี้ภายในสถานีไฟฟ้ามีโอกาสเกิดเหตุการณ์ความล้มเหลวแบบพาสซีฟและแอกทีฟ ซึ่งเป็นสิ่งที่ควรพิจารณาขณะทำการบำรุงรักษา

ดังนั้นภายในหัวข้อนี้จะอธิบายการประเมินความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าเนื่องจากการบำรุงรักษาประกอบด้วย สภาวะของการบำรุงรักษา การหาเซตตัดต่ำสุดเนื่องจากการบำรุงรักษา การประเมินระยะเวลาซ่อมแซมของอุปกรณ์เนื่องจากการบำรุงรักษา และ การหาค่าดัชนีประเมินความเชื่อถือได้เนื่องจากการบำรุงรักษา [34] ดังนี้

3.7.1 สภาวะของการบำรุงรักษา

สภาวะของอุปกรณ์ที่มีผลต่อสถานีไฟฟ้าและเกี่ยวข้องกับการบำรุงรักษา สามารถจำลองได้ 3 สภาวะได้แก่

1. สภาวะปกติ
2. สภาวะการบำรุงรักษาแบบแก้ไข
3. สภาวะการบำรุงรักษาแบบป้องกัน

การทำงานของอุปกรณ์ตามสภาวะข้างบนขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น การจัดเรียงอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งสภาวะการบำรุงรักษาแบบแก้ไขและป้องกัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อการจ่ายไฟฟ้าที่จุดโหลดและการกำหนดระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับพลังงานไฟฟ้า มีดังนี้

(1) สภาวะปกติ

อุปกรณ์มีการทำงานปกติตามหน้าที่ของอุปกรณ์ ไม่มีเหตุการณ์ความล้มเหลวเกิดขึ้น ดังนั้นจึงไม่สูญเสียการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่จุดโหลด

CHULALONGKORN UNIVERSITY

(2) สภาวะการบำรุงรักษาแบบแก้ไข

การบำรุงรักษาแบบแก้ไขเกิดขึ้นก็ต่อเมื่ออุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าเกิดความล้มเหลวนอกแผนงานเท่านั้น หรือจากเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิด สามารถแบ่งออกเป็น เหตุการณ์ความล้มเหลวแบบพาสซีฟและแอกทีฟ

(3) สภาวะการบำรุงรักษาแบบป้องกัน

การบำรุงรักษาแบบป้องกันจะต้องมีขั้นตอนตามแบบแผน เพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน ช่วงเวลาของการบำรุงรักษาแบบป้องกันได้แก่ การเตรียมการก่อนการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ระหว่างการบำรุงรักษาแบบป้องกัน และหลังการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ดังรูปที่ 3.17

รูปที่ 3.17 ช่วงเวลาของการบำรุงรักษาป้องกัน

การดำเนินงานบำรุงรักษาป้องกันขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์ โดยอุปกรณ์หลักภายในสถานีไฟฟ้าที่พิจารณาประกอบด้วย เซอร์กิตเบรกเกอร์ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และบัสบาร์ เมื่อพิจารณาการทำงานของอุปกรณ์พบว่า อุปกรณ์เซอร์กิตเบรกเกอร์นั้นสามารถเปิดและปิดวงจรได้ด้วยตัวเองเพื่อทำการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ในขณะที่อุปกรณ์อื่น ไม่สามารถเปิดและปิดวงจรออกจากระบบไฟฟ้าได้ด้วยตนเอง ซึ่งมีลักษณะเวลาของช่วงการบำรุงรักษาป้องกันดังต่อไปนี้

- การบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์

เนื่องจากอุปกรณ์เซอร์กิตเบรกเกอร์นั้นสามารถปลดออกจากวงจรไฟฟ้าได้ทันที จึงมีรายละเอียดขั้นตอนดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1. เปิดวงจรเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ต้องการบำรุงรักษา
2. เปิดสวิตช์ตัดวงจรคู่ที่คร่อมอุปกรณ์เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ต้องการบำรุงรักษา
3. ต่อสายดิน (Grounding) บริเวณจุดที่ทำงาน เพื่อป้องกันกระแสเหนี่ยวนำจากวงจรไฟฟ้าจากวงจรอื่นภายในสถานีไฟฟ้า
4. เริ่มต้นการบำรุงรักษาแบบป้องกัน
5. เมื่อบำรุงรักษาอุปกรณ์เสร็จแล้ว ปิดวงจรเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่บำรุงรักษาเสร็จ
6. ปลดสายดินที่เชื่อมต่ออยู่บริเวณทำงาน
7. ปิดสวิตช์ตัดวงจรคู่ที่คร่อมอุปกรณ์เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่บำรุงรักษาเสร็จ
8. อุปกรณ์ต่อเข้าระบบและใช้งานได้ตามปกติ

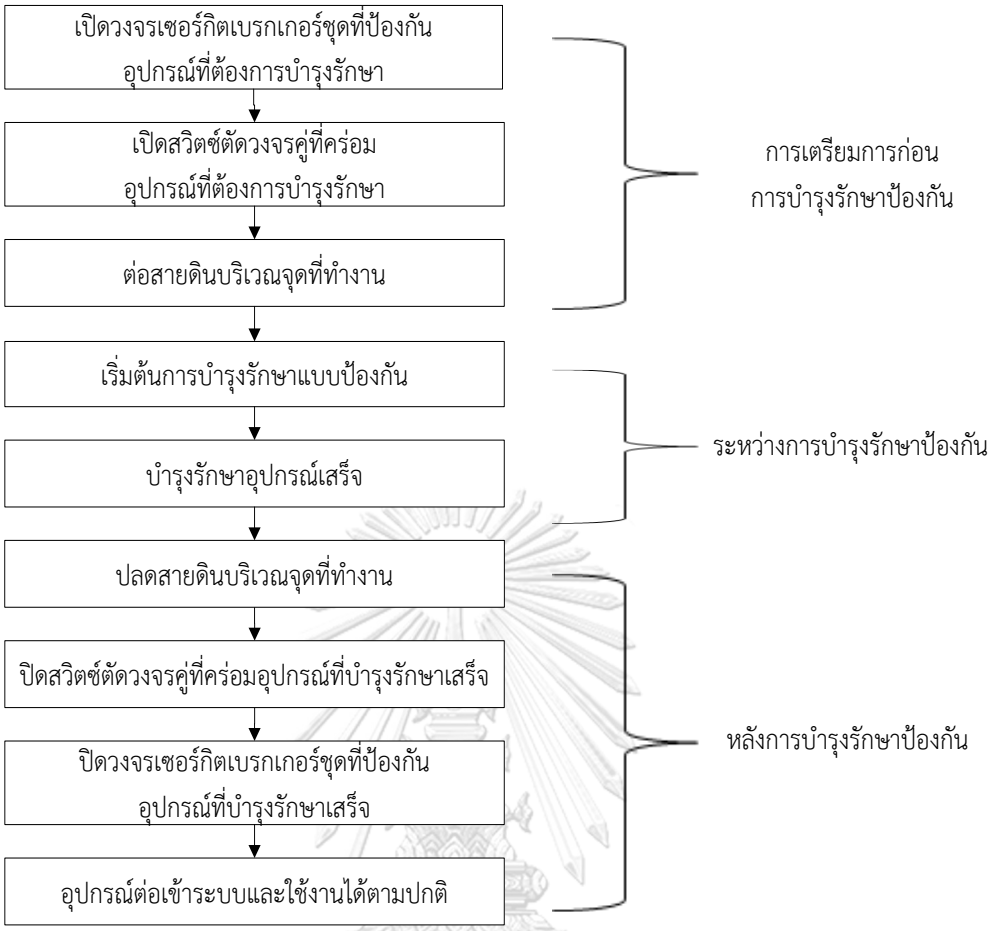
รูปที่ 3.18 ช่วงเวลาขั้นตอนการบำรุงรักษาป้องกันของเซอร์กิตเบรกเกอร์

- การบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและบัสบาร์

เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและบัสบาร์ไม่สามารถปลดออกจากวงจรไฟฟ้าได้เหมือนกับเซอร์กิตเบรกเกอร์ ดังนั้นการบำรุงรักษาอุปกรณ์เหล่านี้จำเป็นต้องพึ่งเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ป้องกันอุปกรณ์ที่บำรุงรักษาเพื่อตัดไฟฟ้าที่ไหลผ่านอุปกรณ์เหล่านี้ ก่อนทำการบำรุงรักษาโดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เปิดวงจรเซอร์กิตเบรกเกอร์ชุดที่ป้องกันอุปกรณ์ที่ต้องการบำรุงรักษา
2. เปิดสวิตช์ตัดวงจรคู่ที่คร่อมอุปกรณ์ที่ต้องการบำรุงรักษา
3. ต่อสายดิน (Grounding) บริเวณจุดที่ทำงาน
4. เริ่มต้นการบำรุงรักษาแบบป้องกัน
5. เมื่อบำรุงรักษาอุปกรณ์เสร็จแล้ว ปลดสายดินที่เชื่อมต่ออยู่บริเวณทำงาน
6. ปิดสวิตช์ตัดวงจรคู่ที่คร่อมอุปกรณ์ที่บำรุงรักษา
7. ปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ชุดที่ป้องกันอุปกรณ์ที่บำรุงรักษาเสร็จ
8. อุปกรณ์ต่อเข้าระบบและใช้งานได้ตามปกติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 3.19 ช่วงเวลาขั้นตอนการบำรุงรักษาป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและบัสบาร์

3.7.2 การหาเซตตัดต่ำสุดเนื่องจากการบำรุงรักษา

การบำรุงรักษาสามารถแบ่งได้เป็นการบำรุงรักษาแบบแก้ไขและป้องกัน ต้องมีการตรวจสอบเซตตัดต่ำสุด สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบดังต่อไปนี้

(1) การหาเซตตัดต่ำสุดเนื่องจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไข สามารถหาได้โดยเซตตัดต่ำสุดจากเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟและแอกทีฟแต่ละจุดโหลด

(2) การหาเซตตัดต่ำสุดเนื่องจากการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์ และช่วงระยะเวลาสำหรับการบำรุงรักษาแบบป้องกัน อุปกรณ์หลักภายในสถานีไฟฟ้าประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เซอร์กิตเบรกเกอร์ และบัสบาร์ โดยที่อุปกรณ์เซอร์กิตเบรกเกอร์นั้นสามารถเปิดและปิดวงจรได้ด้วยด้วยตัวเอง เพื่อทำการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ในขณะที่อุปกรณ์อื่นไม่สามารถเปิดและปิดวงจรออกจากระบบไฟฟ้าได้ด้วยตนเอง ดังนั้น จึงต้องพึ่งพาเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของอุปกรณ์ ดังนั้นการหาเซตตัดต่ำสุดของการบำรุงรักษาแบบแก้ไข และการบำรุงรักษาแบบป้องกันสรุปได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การประเมินสภาวะการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบแก้ไขและแบบป้องกัน

<table>
<tr><td colspan="3">สภาวะการบำรุงรักษาอุปกรณ์</td><td>การตรวจหาเซตตัดต่ำสุด</td></tr>
<tr><td rowspan="2">การบำรุงรักษาแบบแก้ไข</td><td colspan="2">เหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ</td><td>เซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟ</td></tr>
<tr><td colspan="2">เหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอกทีฟ</td><td>เซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟ</td></tr>
<tr><td rowspan="6">การบำรุงรักษาแบบป้องกัน</td><td rowspan="2">การเตรียมการก่อนการบำรุงรักษา</td><td>เซอร์กิตเบรกเกอร์</td><td>เซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟ</td></tr>
<tr><td>หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและบัสบาร์</td><td>เซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟ</td></tr>
<tr><td rowspan="2">ระหว่างการบำรุงรักษา</td><td>เซอร์กิตเบรกเกอร์</td><td>เซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟ</td></tr>
<tr><td>หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและบัสบาร์</td><td>เซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟ</td></tr>
<tr><td rowspan="2">หลังการบำรุงรักษา</td><td>เซอร์กิตเบรกเกอร์</td><td>-</td></tr>
<tr><td>หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและบัสบาร์</td><td>-</td></tr>
</table>

จากตารางที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าการประเมินสภาวะการบำรุงรักษาแบบแก้ไขขึ้นอยู่กับชนิดของความเสียหายที่เกิดขึ้น ในขณะที่การประเมินสภาวะของการบำรุงรักษาแบบป้องกันมีความเกี่ยวข้องกับช่วงเวลาของการบำรุงรักษาแบบป้องกันและชนิดของอุปกรณ์ สามารถอธิบายแต่ละช่วงเวลาได้ดังต่อไปนี้

- การเตรียมการก่อนการบำรุงรักษาแบบป้องกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

พิจารณาอุปกรณ์เซอร์กิตเบรกเกอร์ในสภาวะนี้เปรียบเสมือนการถอดอุปกรณ์นี้ออกจากระบบภายในสถานีไฟฟ้า และไม่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ข้างเคียง จากนั้นจึงตรวจสอบว่าอุปกรณ์ที่ถูกปลดเพื่อทำการบำรุงรักษานั้นของเส้นทางการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้จุดโหลดหรือไม่ ซึ่งมีลักษณะสอดคล้องกับการตรวจสอบเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟ ถ้าอุปกรณ์อยู่บนเส้นทางก็จะทำให้จุดโหลดนั้นไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าในขณะที่ทำการบำรุงรักษา

ในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและบัสบาร์นั้นต้องพึ่งพาอุปกรณ์ป้องกันที่รอบข้าง แล้วจึงตรวจสอบผลกระทบของการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่จุดโหลด มีลักษณะเหมือนกับการตรวจสอบเซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟ โดยการสมมุติให้อุปกรณ์ที่ต้องการบำรุงรักษานั้นล้มเหลว และประเมินการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันข้างเคียง ถ้าอุปกรณ์ที่ล้มเหลวอยู่บนเส้นทางการจ่ายกำลังไฟฟ้า ก็จะทำให้ไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปที่จุดโหลดได้

- ระหว่างการบำรุงรักษาแบบป้องกัน

เป็นขั้นตอนที่ต่อเนื่องจากการขั้นตอนการเตรียมการก่อนการบำรุงรักษา สวิตช์ตัดวงจรคู่ที่คร่อมอุปกรณ์บำรุงรักษานั้นได้ถูกปลดออกเพื่อทำการบำรุงรักษา ดังนั้นอุปกรณ์ทั้ง 3 ชนิด เปรียบเสมือนถอดอุปกรณ์จากระบบไฟฟ้าไปแล้ว จึงสามารถประเมินการตรวจสอบแบบเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟ

- หลังการบำรุงรักษาแบบป้องกัน

ขั้นตอนนี้อุปกรณ์ที่ได้รับการบำรุงรักษาถูกเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้า จึงไม่มีผลกระทบต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้า ดังนั้นจึงไม่ต้องประเมินผลกระทบของการจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปที่จุดโหลด

3.7.3. การหาระยะเวลาจุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า

การประเมินสภาวะอุปกรณ์ของการบำรุงรักษาแบบแก้ไขและการบำรุงรักษาแบบป้องกัน สิ่งที่สำคัญถัดมา คือ ระยะเวลาที่ไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า หากอุปกรณ์นั้นอยู่เส้นทางการจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังจุดโหลด และส่งผลให้จุดโหลดนั้นไม่ได้รับกำลังไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เมื่อนำมาพิจารณาร่วมกับการบำรุงรักษาสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การหาระยะเวลาซ่อมแซมของการบำรุงรักษาแบบแก้ไข และระยะเวลาซ่อมแซมของการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ดังนี้

(1) การหาระยะเวลาซ่อมแซมของการบำรุงรักษาแบบแก้ไข

ระยะเวลาซ่อมแซมของการบำรุงรักษาแบบแก้ไขขึ้นอยู่กับรูปแบบความล้มของอุปกรณ์ ถ้าอุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ ระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับกำลังไฟฟ้า คือ ระยะเวลาการซ่อมแซมอุปกรณ์ ในขณะที่หากอุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอกทีฟ จะต้องพิจารณาก่อนว่าอุปกรณ์สามารถโอนย้ายไปสถานะการสวิตช์ได้หรือไม่ ซึ่งขึ้นอยู่กับการเรียงอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า ถ้าสามารถสวิตช์อุปกรณ์บ้างตัวได้ ระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับระยะเวลาการสวิตช์ แต่ถ้าไม่สามารถสวิตช์ได้ระยะเวลาที่จุดโหลดจะไม่รับกำลังไฟฟ้า คือ ระยะเวลาซ่อมแซมอุปกรณ์

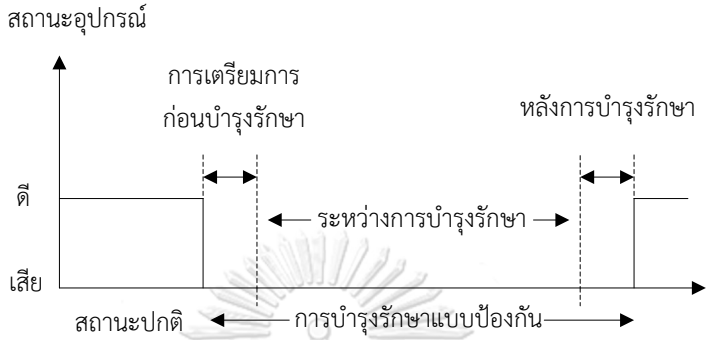
(2) การหาระยะเวลาซ่อมแซมของการบำรุงรักษาแบบป้องกัน

การบำรุงรักษาแบบป้องกันสามารถแบ่งได้ 3 ช่วงเวลาภายในหัวข้อที่ 3.7.1 ได้แก่ ระยะเวลาการเตรียมการก่อนการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ระยะเวลาระหว่างการบำรุงรักษาแบบป้องกัน และระยะเวลาหลังการบำรุงรักษาแบบป้องกัน เมื่อพิจารณาขั้นตอนการเตรียมการก่อนการบำรุงรักษาและหลังการบำรุงรักษาพบว่า มีลักษณะขั้นตอนหลังการบำรุงรักษามีลักษณะงานย้อนกลับกับขั้นตอนการเตรียมการก่อนบำรุงรักษา ส่งผลให้ระยะเวลาของการเตรียมการก่อนบำรุงรักษามีค่าเท่ากับระยะเวลาหลังการบำรุงรักษา นอกจากนี้ระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับพลังงานเนื่องระยะเวลาซ่อมแซมของการบำรุงรักษาแบบป้องกัน สามารถแบ่งได้ 2 ประเภทดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- กรณีไม่มีอุปกรณ์สำรองเชื่อมต่อ

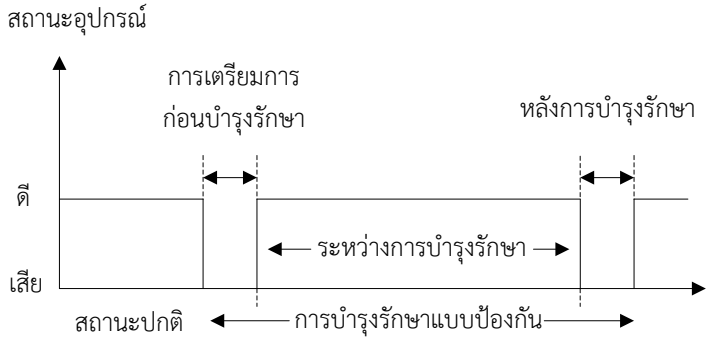
หากอุปกรณ์ที่ต้องการบำรุงรักษาอยู่บนเส้นทางการส่งกำลังไฟฟ้า ส่งผลให้ระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ ผลรวมระยะเวลาการเตรียมการก่อนการบำรุงรักษา ระหว่างการบำรุงรักษา และหลังการบำรุงรักษา ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าภายใต้การบำรุงรักษาแบบป้องกันกรณีไม่มีอุปกรณ์สำรองเชื่อมต่อ

- กรณีมีอุปกรณ์สำรองเชื่อมต่อ

อุปกรณ์สำรองนี้จะทำหน้าแทนอุปกรณ์ที่ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ในช่วงระยะเวลาระหว่างการบำรุงรักษา เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีอุปกรณ์สำรองในช่วงระยะเวลาระหว่างการบำรุงรักษานี้จะไม่มีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้น นอกจากนี้เวลาของการเตรียมอุปกรณ์สำรองมีค่าน้อยมากจึงสามารถรวมกับเวลาการเตรียมการก่อนบำรุงรักษาแบบป้องกันได้ และเมื่ออุปกรณ์บำรุงรักษาเสร็จ จะต้องทำการปลดอุปกรณ์สำรองออก และนำอุปกรณ์ที่ผ่านการบำรุงรักษาเข้าไปใช้งานเหมือนเดิม ระยะเวลาการปลดอุปกรณ์สำรองออกสามารถประมาณเป็นเวลาหลังการบำรุงรักษา เพราะฉะนั้นหากมีอุปกรณ์สำรองเชื่อมต่อ เวลาที่จุดโหลดจะไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าเนื่องจากการบำรุงรักษาแบบป้องกัน มีค่าเป็นสองเท่าของระยะเวลาการเตรียมการก่อนการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ดังรูปที่ 3.21

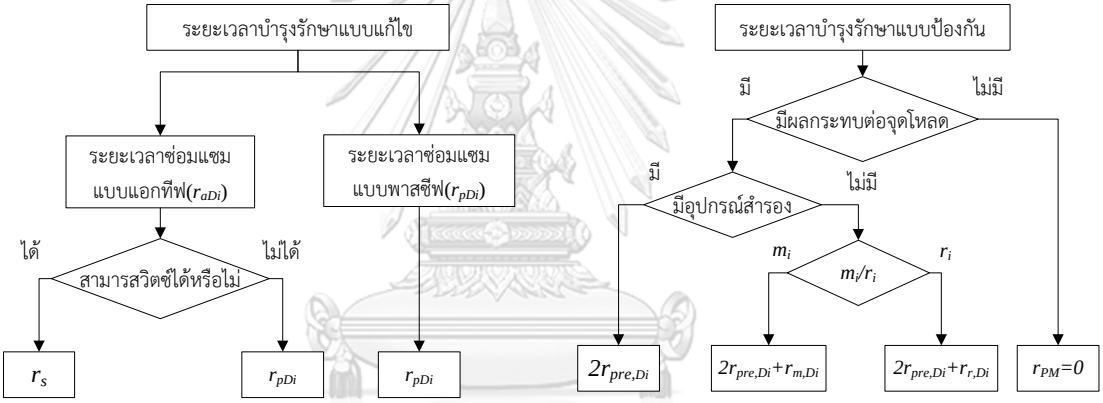


รูปที่ 3.21 ระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าภายใต้การบำรุงรักษาแบบป้องกันกรณีมีอุปกรณ์สำรองเชื่อมต่อ

ดังนั้นระยะเวลาที่จุดโหลดไม่รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า เนื่องจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไขและป้องกัน มีพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.4 และระยะเวลาของการบำรุงรักษาแบบแก้ไขและป้องกันสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.22

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับพลังงาน

พารามิเตอร์	ความหมาย	หน่วย
r_s	ระยะเวลาสวิตช์	ชั่วโมง/ครั้ง
r_{pre,D_i}	ระยะเวลาก่อนการบำรุงรักษาแบบป้องกันของอุปกรณ์ที่ i	ชั่วโมง/ครั้ง
m_i	ตัวแปรตัดสินใจบำรุงรักษาของอุปกรณ์ที่ i	
r_i	ตัวแปรตัดสินใจบำรุงรักษาแบบเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ของอุปกรณ์ที่ i	
r_{m,D_i}	ระยะเวลาซ่อมแซมอุปกรณ์แบบบำรุงรักษาของอุปกรณ์ที่ i	ชั่วโมง/ครั้ง
r_{r,D_i}	ระยะเวลาซ่อมแซมอุปกรณ์แบบเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ของอุปกรณ์ที่ i	ชั่วโมง/ครั้ง



รูปที่ 3.22 ระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าเนื่องจากการบำรุงรักษา

จากรูปที่ 3.22 ระยะเวลาการบำรุงรักษาแบบแก้ไขจะขึ้นอยู่กับรูปแบบความเสียหายที่มีทั้งแบบพาสซีฟและแอกทีฟ ขณะที่ระยะเวลาการบำรุงรักษาแบบป้องกันจะขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่บำรุงรักษานั้นมีผลกระทบต่อจุดโหลด หรือทำให้พลังงานไฟฟ้าสูญหายหรือไม่ รวมทั้งมีอุปกรณ์สำรอง และการตัดสินใจสำหรับการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ซึ่งส่งผลให้ระยะเวลาที่ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้มีค่าแตกต่างกัน

3.7.4. การคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ภายใต้การบำรุงรักษา

การคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ภายใต้การบำรุงรักษาสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ การคำนวณดัชนีเนื่องจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไข และการคำนวณดัชนีเนื่องจากการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ดังนี้

(1) การคำนวณดัชนีภายใต้การบำรุงรักษาแบบแก้ไข

ดัชนีความเชื่อถือได้ประกอบด้วย ความไม่สามารถใช้สอยได้ และดัชนี $EENS$ ที่เกี่ยวข้องกับการบำรุงรักษาแบบแก้ไข สามารถคำนวณได้จากอุปกรณ์ที่ i ที่เกี่ยวข้องกับเซตต่ำที่สุดแบบพาสซีฟและแอกทีฟ ณ ระยะ j ของจุดโหลด k ดังนี้ โดยที่

$$U_{CM_{j,k}} = \sum_{i=1}^{N} \lambda_{aD_i,j,k} r_{aD_i} + \sum_{i=1}^{N} \lambda_{pD_i,j,k} r_{pD_i} \tag{3.36}$$

$$EENS_{CM_{j,k}} = L_{j,k} U_{CM_{j,k}} \tag{3.37}$$

โดยที่ $U_{CM_{j,k}}$ คือ ความไม่สามารถใช้สอยได้เนื่องจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไข ณ ระยะ j ของจุดโหลดที่ k (ชั่วโมง/ปี)

$EENS_{CM_{j,k}}$ คือ ค่าดัชนี $EENS$ เนื่องจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไข ณ ระยะ j ของจุดโหลดที่ k (กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี)

(2) การคำนวณดัชนีภายใต้การบำรุงรักษาแบบป้องกัน

การประเมินค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของการบำรุงรักษาแบบป้องกัน สามารถประเมินได้ด้วยการตรวจหาเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟ และมีผลกระทบทำให้ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ในแต่ละจุดโหลดดังรูปที่ 3.20-3.21 หากอุปกรณ์ที่ i มีผลกระทบทำให้สูญเสียกำลังไฟฟ้าในแต่ละณ ระยะ j จุดโหลดที่ k ค่าพารามิเตอร์สำหรับการบำรุงรักษาแบบป้องกันแสดงได้ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ของการบำรุงรักษาแบบป้องกัน

จุดโหลดที่พิจารณา	ตัวบ่งบอกแสดงการบำรุงรักษาจุดโหลด ($m_{L_{j,k}}$)	อุปกรณ์สำรอง	การตัดสินใจ	ระยะเวลาการบำรุงรักษา
ได้รับการบำรุงรักษา	1	มี	m_i	สองเท่าของระยะเวลาการเตรียมการบำรุงรักษาหรือผลรวมของระยะเวลาการเตรียมการก่อนบำรุงรักษาและหลังการบำรุงรักษา ($2r_{pre,D_i}$)
			r_i	
		ไม่มี	m_i	$2r_{pre,D_i} + r_{m,D_i}$
			r_i	$2r_{pre,D_i} + r_{r,D_i}$
ไม่ได้รับการบำรุงรักษา	0	-	-	0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ค่าระยะเวลาที่ไม่ได้จ่ายพลังงานเนื่องจากการบำรุงรักษาแบบป้องกัน และดัชนี *EENS* เนื่องจากการบำรุงรักษาแบบป้องกัน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.38) และ (3.39) แต่ถ้าอุปกรณ์ที่ทำการบำรุงรักษาแบบป้องกันไม่มีผลกระทบทำให้สูญเสียพลังงานไฟฟ้าค่าดัชนีสองค่าจะเป็น 0

$$r_{PM_{j,k}} = \sum_{i=1}^{N}\left(2r_{pre,D_i} + r_{m,D_i} + r_{r,D_i}\right)$$ อุปกรณ์ i กระทบต่อกำลังไฟฟ้า ณ ระยะ j ของจุดโหลดที่ k (3.38)

$$EENS_{PM_{j,k}} = L_{j,k} m_{L_{j,k}} r_{PM_{j,k}} \tag{3.39}$$

โดยที่ $r_{PM_{j,k}}$ คือ ระยะเวลาซ่อมแซมเนื่องจากการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ณ ระยะ j ของจุดโหลดที่ k (ชั่วโมง/ครั้ง)

$m_{L_{j,k}}$ คือ ตัวบ่งบอกแสดงการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ณ ระยะ j ของจุดโหลดที่ k โดย m_{L_k} มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อมีการบำรุงรักษาจุดโหลดที่ k หรือเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีได้รับการบำรุงรักษา (ครั้ง/ปี)

$EENS_{PM_{j,k}}$ คือ ค่าดัชนี *EENS* เนื่องจากการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ณ ระยะ j จุดโหลดที่ k (กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี)

3.8 สรุป

ภายในบทที่ 3 การประเมินความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีการวิเคราะห์ ภายในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้เลือกใช้วิธีเซตตัดต่ำสุด เพื่อหาเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้า สามารถแบ่งได้เป็นเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟและแอกทีฟ ซึ่งมีเซตตัดต่ำสุดแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับระบบการเชื่อมต่อภายในสถานีไฟฟ้าและเส้นทางที่สั้นที่สุดของการส่งกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์มีสถานะการทำงานทั้งหมด 3 สถานะได้แก่ สถานะอุปกรณ์ทำงานปกติ สถานะอุปกรณ์กำลังซ่อมแซม และสถานะการสวิตซ์ เพื่อนำไปประเมินการหาเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟและแอกทีฟ ซึ่งมีผลต่อการหาดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า

ดัชนีชี้วัดของระบบไฟฟ้าประกอบด้วย อัตราความล้มเหลวของระบบ ความไม่สามารถใช้สอยได้ ดัชนี *EENS* ดัชนี *SAIFI* และดัชนี *SAIDI* ซึ่งมีผลต่อถูกประมาณมาจากเซตตัดต่ำสุดอันดับ 1 นอกจากการหาค่าดัชนีชี้วัดระบบไฟฟ้าสามารถประเมินเนื่องจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไข และป้องกัน โดยที่ดัชนีความเชื่อถือได้ภายใต้การบำรุงรักษาแบบแก้ไขสามารถหาได้เหตุการณ์ความล้มเหลวแบบพาสซีฟและแอกทีฟของจุดโหลด และดัชนีความเชื่อถือได้ภายใต้การบำรุงรักษาแบบป้องกันสามารถหาได้จากเหตุการณ์ที่อุปกรณ์บำรุงรักษาและส่งผลให้ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าที่จุดโหลดได้

บทที่ 4
การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้า

อุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าเป็นสิ่งที่สำคัญต่อระบบส่งกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์จำเป็นต้องมีความเชื่อถือได้ การทำงานที่ถูกต้อง อย่างไรก็ตามอุปกรณ์เมื่อผ่านการใช้งานหรือมีระยะเวลาดำเนินการที่นาน ทำให้อุปกรณ์มีการเสื่อมสภาพ เกิดการทำงานผิดพลาด ความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ลดลง และมีประสิทธิภาพการทำงานที่ลดลง เช่น หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังความเป็นฉนวนของน้ำมันลดลง อุปกรณ์ตัวเปลี่ยนจุดแยกแรงดันเสื่อมสภาพ เซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่สามารถสั่งเปิดและปิดวงจรได้ เป็นต้น ผลที่ตามมา คือผู้ดูแลการใช้ไฟฟ้า หรือ กฟผ. สูญเสียค่าใช้จ่ายจากเหตุการณ์เหล่านี้ เช่น ค่าใช้จ่ายเพื่อซ่อมแซมอุปกรณ์เสียหาย ค่าใช้จ่ายการขายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้า เป็นต้น และส่งผลให้ดัชนีความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าลดลง เพราะฉะนั้นเพื่อให้อุปกรณ์เหล่านี้ทำงานถูกต้อง มีโอกาสเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวต่อระบบไฟฟ้าได้น้อย อุปกรณ์เหล่านี้จำเป็นต้องมีการกำหนดแผนงานบำรุงรักษาที่เหมาะที่สุด การบำรุงรักษานั้นสามารถทำให้อุปกรณ์มีโอกาสเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวที่ลดลง อุปกรณ์มีความน่าเชื่อได้เพิ่มขึ้น และส่งผลให้ดัชนีชี้วัดสถานไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดยมีค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ทั้งหมด เรียกว่า ค่าใช้จ่ายวงชีพอุปกรณ์

การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาที่เหมาะที่สุดนั้นสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ได้โดยการกำหนดปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็น ค่าใช้จ่ายวงชีพของอุปกรณ์ ภายใต้เงื่อนไข (Constraint) เช่น ความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ ความเชื่อถือได้ระดับสถานีไฟฟ้า ผลกระทบของการตัดสินใจบำรุงรักษาต่ออายุประสิทธิผล เป็นต้น นอกจากนี้แต่ละแผนการบำรุงรักษาส่งผลให้อายุประสิทธิผลสุดท้ายของอุปกรณ์มีค่าแตกต่างกัน และได้ผลลัพธ์ค่าใช้จ่ายที่แตกต่างจะถูกนำมาพิจารณา และยังสามารถนำวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต มาประยุกต์ใช้เพื่อหาคำตอบที่เหมาะที่สุด ซึ่งเหมาะสำหรับการแก้ไขปัญหาแบบการค่าเหมาะที่สุด ภายใต้เงื่อนไขของปัญหาที่ได้กำหนดขึ้น

ดังนั้นภายในบทนี้จะแบ่งการนำเสนอเป็นทั้งหมด 5 ส่วนได้แก่ แบบจำลองการบำรุงรักษาอุปกรณ์ ค่าใช้จ่ายวงชีพของอุปกรณ์ การกำหนดปัญหาค่าใช้จ่ายการวางแผนบำรุงรักษา วิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต และสรุป

4.1 แบบจำลองการบำรุงรักษาอุปกรณ์

หัวข้อนี้นำเสนอการจำลองเพื่อค้นหาการกำหนดตารางบำรุงรักษาเชิงป้องกันและเปลี่ยนอุปกรณ์โดยคำนึงถึงความคุ้มค่าระหว่างค่าใช้จ่ายกับความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ การบำรุงรักษาอุปกรณ์นั้นจะส่งผลกระทบต่ออัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ และขึ้นอยู่กับวิธีการบำรุงรักษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

อุปกรณ์ที่เลือกใช้ โดยแบ่งออกเป็น 3 วิธี ได้แก่ การไม่บำรุงรักษา การบำรุงรักษาอุปกรณ์ และการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ทดแทน [36]

นิยามตัวแปรเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหัวข้อที่ 2.4 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 นิยามตัวแปรและสัญญาลักษณ์สำหรับการวางแผนบำรุงรักษา

ตัวแปรสำหรับการวางแผนบำรุงรักษา	สัญลักษณ์
ช่วงเวลาสำหรับการกำหนดบำรุงรักษา (ปี)	T
จำนวนช่วงพิจารณาต่อเนื่อง (discrete interval)	n
จำนวนอุปกรณ์ที่พิจารณาทั้งหมด	N
อุปกรณ์ที่ i	$i \ (1 \le i \le N)$
ระยะที่ j (ปี)	$j \ (1 \le i \le n)$
อายุประสิทธิผลของอุปกรณ์ที่ i ณ ระยะ j	$t_{i,j}$
ตัวแปรค่าการตัดสินใจบำรุงรักษาเชิงป้องกันของอุปกรณ์ i ณ ระยะ j	$m_{i,j}$
ตัวแปรค่าการตัดสินใจเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ของอุปกรณ์ i ณ ระยะ j	$r_{i,j}$

ทั้งนี้ $m_{i,j}$ และ $r_{i,j}$ สามารถมีค่าเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้น ซึ่งแสดงการตัดสินใจบำรุงรักษาแบบป้องกันหรือเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ของอุปกรณ์ i ณ ระยะ j

1. การไม่บำรุงรักษา

พิจารณาเมื่ออุปกรณ์ที่ i ไม่มีการบำรุงรักษา ณ ระยะที่ j อายุประสิทธิผลของอุปกรณ์จะไม่ลดลงดังสมการที่ (4.1) เมื่อแทนค่าอายุประสิทธิผลของอุปกรณ์ในสมการที่ (2.14) จะเห็นว่า อัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์จะมีค่าเพิ่มขึ้น ณ ระยะถัดไป $j+1$

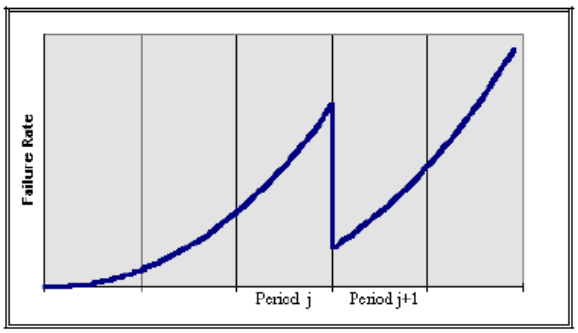
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$t_{i,j+1} = t_{i,j} + \frac{T}{n} \tag{4.1}$$

2. การบำรุงรักษาอุปกรณ์

พิจารณาเมื่ออุปกรณ์ที่ i มีการบำรุงรักษาแบบคงสภาพ ณ ระยะ j กล่าวคือ ให้การบำรุงรักษาแบบคงสภาพเกิดขึ้น ณ เวลาสิ้นสุดของระยะที่พิจารณา การบำรุงรักษาแบบนี้จะมีผลกระทบทำให้อายุประสิทธิผลของอุปกรณ์ที่ i ลดลงในระยะถัดไป ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.2) และอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ i ณ ระยะ j จะมีค่าลดลงดังรูปที่ 4.1

$$t_{i,j+1} = \alpha_i \left(t_{i,j} + \frac{T}{n} \right) m_{i,j} \quad (0 \le \alpha_i \le 1) \tag{4.2}$$



รูปที่ 4.1 ผลกระทบการบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่ออัตราความล้มเหลว[36]

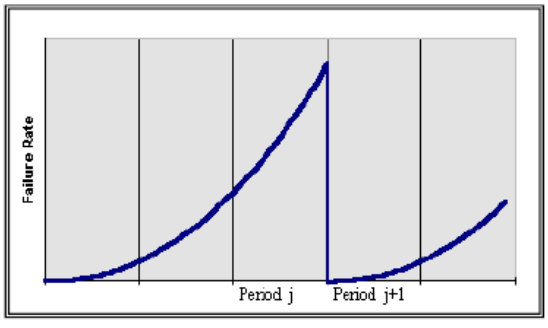
ตัวประกอบการปรับปรุง (Improvement factor, α) นำเสนอโดย Malik (1979) [37], Jayabalan และ Chaudhuri (1992) [38] ตัวประกอบการปรับปรุงนี้จะส่งผลกระทบต่ออายุของอุปกรณ์ที่ i เมื่อสัมประสิทธิ์การบำรุงรักษามีค่าเท่ากับ 0 แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์นั้นถูกบำรุงรักษาสภาพเป็นอุปกรณ์ใหม่ ในขณะที่สัมประสิทธิ์การบำรุงรักษามีค่าเท่ากับ 1 การบำรุงรักษานั้นไม่ส่งผลกระทบต่ออายุประสิทธิผลของอุปกรณ์ หรืออุปกรณ์มีสภาพไม่เปลี่ยนแปลง

3. การเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ทดแทน

พิจารณาเมื่ออุปกรณ์ที่ i เปลี่ยนทดแทน ณ ระยะ j ผลกระทบของการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่นั้นจะส่งผลต่ออายุประสิทธิผลของอุปกรณ์ไปอยู่ที่จุดเริ่มต้น ดังสมการที่ (4.3) และเมื่อแทนค่าสมการที่ (4.3) ลงในสมการที่ (2.14) นั้นผลกระทบของอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ i ณ ระยะ j จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 4.2

$$t_{i,j+1} = \left(t_{i,j} + \frac{T}{n} \right)(1 - r_{i,j}) = 0 \tag{4.3}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 ผลกระทบการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ทดแทนต่ออัตราความล้มเหลว[36]

4.2 ค่าใช้จ่ายวงชีพของอุปกรณ์

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ได้สร้างโมเดลเพื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายอุปกรณ์ภายในระบบส่ง ค่าใช้จ่ายวงชีพสามารถนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ค่าใช้การบำรุงรักษาเชิงแก้ไข (Corrective maintenance cost) ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive maintenance cost) และค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า (Interruption cost) ดังนี้

4.2.1. ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาเชิงแก้ไข

จะเกิดขึ้นเมื่ออุปกรณ์เกิดขึ้นเมื่อมีความเสียหายของอุปกรณ์เกิดขึ้นโดยไม่ได้คาดการณ์หรือวางแผนไว้ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.4) และจำนวนครั้งของความล้มเหลวที่เกิดขึ้น อาจคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ ดังสมการที่ (4.5)

$$CF_{i,j} = F_i N_{i,j} (1+d)^j \tag{4.4}$$

$$N_{i,j} = \int_{t_{i,j}}^{t_{i,j}+\frac{T}{n}} \lambda_i(t)dt \tag{4.5}$$

โดยที่ $CF_{i,j}$ คือ ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาเชิงแก้ไขของอุปกรณ์ที่ i ณ ระยะ j (บาท)

F_i คือ ค่าใช้จ่ายของการบำรุงรักษาเชิงแก้ไขของอุปกรณ์ที่ i (บาท/ครั้ง)

$N_{i,j}$ คือ จำนวนครั้งของความเสียหายที่สามารถเกิดขึ้นได้ของอุปกรณ์ที่ i ณ ระยะ j (ครั้ง)

d คือ อัตราเงินเฟ้อแต่ละปี (%)

จากสมการที่ (4.4) และ (4.5) ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบแก้ไขจะขึ้นมูลค่าความเสียหายแต่ละครั้งของแต่ละอุปกรณ์ และจำนวนครั้งของความเสียหายหายมีขึ้นอยู่อายุประสิทธิผลของอุปกรณ์และประสิทธิภาพของการบำรุงรักษาอุปกรณ์ (α_i)หากค่าประสิทธิภาพของการบำรุงรักษามีค่าต่ำก็ส่งผลให้อายุประสิทธิผลลดลง จำนวนครั้งของความเสียหายลดลง และค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบแก้ไขมีลดลง ในทางตรงข้ามหากค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น จำนวนครั้งของความเสียหายเพิ่มขึ้น และค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบแก้ไขก็จะเพิ่มขึ้น

4.2.2 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

จะเกิดขึ้นเมื่อมีการบำรุงรักษาอุปกรณ์เกิดขึ้นเพื่อลดอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ที่เกิดขึ้นภายในอนาคต ในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถแบ่งวิธีการบำรุงรักษาได้ 2 วิธีคือ การบำรุงรักษาอุปกรณ์ และการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ทดแทนเป็นดังนี้

(1) ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาอุปกรณ์เชิงป้องกันแบบการบำรุงรักษาอุปกรณ์ จะขึ้นกับการตัดสินใจของอุปกรณ์ ระยะที่ต้องการทำการบำรุงรักษาแบบนี้ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.6)

$$CM_{i,j} = M_i(1+d)^j m_{i,j} \quad (4.6)$$

โดยที่ $CM_{i,j}$ คือ ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่ i ณ ระยะ j (บาท)

M_i คือ ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของอุปกรณ์ที่ i (บาท/ครั้ง)

(2) ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาอุปกรณ์เชิงป้องกันแบบเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ จะขึ้นกับการตัดสินใจของอุปกรณ์ ระยะที่ต้องการทำการบำรุงรักษาแบบนี้ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.7)

$$CR_{i,j} = P_i(1+d)^j r_{i,j} \quad (4.7)$$

โดยที่ $CR_{i,j}$ คือ ค่าใช้จ่ายการเปลี่ยนอุปกรณ์ของอุปกรณ์ที่ i ณ ระยะ j (บาท)

P_i คือ ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ของอุปกรณ์ที่ i (บาท/ครั้ง)

จากสมการที่ (4.6) และ (4.7) ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันสามารถเกิดขึ้นโดยขึ้นกับการตัดสินใจเลือกรูปแบบการบำรุงรักษา และค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแต่ละครั้งของอุปกรณ์ ซึ่งหากอุปกรณ์ที่มีค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาป้องกันแต่ละครั้งมีราคาสูง ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาเชิงป้องกันของอุปกรณ์ก็จะมีราคาสูง

4.2.3 ค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า

ค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นเมื่ออุปกรณ์เกิดความเสียหาย หรือมีเหตุการณ์ล้มเหลวเกิดขึ้น และส่งผลกระทบให้เกิดไฟฟ้าดับหรือไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้านั้นได้ อาจเกิดได้จากปัจจัยต่างๆ เช่น การเชื่อมต่อระหว่างสถานีไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า ขนาดของกำลังไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อ ระยะเวลาที่ได้ไฟฟ้าดับ วิธีการบำรุงรักษาอุปกรณ์ ลักษณะความล้มเหลวของอุปกรณ์ มูลค่าความเสียหาย เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อการคำนวณค่าใช้จ่าย เนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้านั้นจะขึ้นอยู่กับ ค่าดัชนี *EENS* แต่ละจุดโหลด ซึ่งประกอบด้วยค่าดัชนี *EENS* ที่เกิดจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไข และดัชนี *EENS* ที่เกิดจากการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ดังนั้นค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าคำนวณได้ดังนี้

$$CE_{j,k} = c_{en}(EENS_{CM_{j,k}} + EENS_{PM_{j,k}})(1+d)^j \quad (4.8)$$

โดยที่ $CE_{j,k}$ คือ ค่าใช้จ่ายการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าระยะ j ของจุดโหลดที่ k (บาท)

c_{en} คือ อัตราการซื้อขายไฟฟ้า (บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

$EENS_{CM_{j,k}}$ คือ ดัชนี *EENS* เนื่องจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไข ณ ระยะ j ของจุดโหลดที่ k (กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี)

$EENS_{PM_{j,k}}$ คือ ดัชนี *EENS* เนื่องจากการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ณ ระยะ j ของจุดโหลดที่ k (กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี)

จากบทที่ 3 ในหัวข้อการประเมินค่าดัชนี $EENS$ ของการบำรุงรักษาแบบแก้ไขและการบำรุงรักษาแบบป้องกัน จากอุปกรณ์ที่ i โดยที่อุปกรณ์นี้นั้นมีผลกระทบต่อการคำนวณค่าดัชนีต่างๆ โดยหากเป็นการบำรุงรักษาแบบแก้ไข อุปกรณ์ที่ i นั้นจะต้องเกี่ยวข้องกับกลุ่มอุปกรณ์อันดับที่ 1 ของรูปแบบความล้มเหลวพาสซีฟและแอกทีฟ ในขณะที่หากเป็นการบำรุงรักษาแบบป้องกัน อุปกรณ์ที่ i นั้นจะต้องส่งผลกระทบต่อจุดโหลดหรือเป็นกลุ่มเซตตัดต่ำที่สุดแบบพาสซีฟ

ดังนั้นหากเรานำค่าดัชนี $EENS_{CM}$ ในสมการที่ (3.37) และค่าดัชนี $EENS_{PM}$ เนื่องจากการบำรุงรักษาแบบป้องกันในสมการที่ (3.39) แทนค่าในสมการที่ (4.8) ค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าสามารถประมาณและเขียนอยู่ในรูปของอุปกรณ์และระยะของการบำรุงรักษาได้ดังนี้

$$CECM_{D_{i,j,k}} = c_{en} L_{j,k} \left(\lambda_{pD_i,j,k} r_{pD_i} + \lambda_{aD_i,j,k} r_{aD_i} \right) (1+d)^j \tag{4.9}$$

$$CEPM_{D_{i,j,k}} = c_{en} L_{j,k} m_{L_{j,k}} r_{PM_{i,k}} (1+d)^j \tag{4.10}$$

$$CE_{j,k} \approx \sum_{i=1}^{N} \left(CECM_{D_{i,j,k}} + CEPM_{D_{i,j,k}} \right) \tag{4.11}$$

โดยที่ $CECM_{D_{i,j,k}}$ คือ ค่าใช้จ่ายการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไขอุปกรณ์ที่ i ณ ระยะ j จุดโหลดที่ k (บาท)

$CEPM_{D_{i,j,k}}$ คือ ค่าใช้จ่ายการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากการบำรุงรักษาแบบป้องกันของอุปกรณ์ที่ i ณ ระยะ j จุดโหลดที่ k (บาท)

จากสมการที่ (4.9) ถึง (4.11) ค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับดัชนี $EENS_{CM}$ และดัชนี $EENS_{PM}$ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่

(1) รูปแบบการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า การเชื่อมต่อหลากหลายรูปแบบส่งผลให้แต่ละจุดโหลดมีเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟ และแบบแอกทีฟที่แตกต่างกัน ทำให้อุปกรณ์บ้างตัวอยู่ในเซตตัดต่ำสุด และไม่อยู่ในเซตตัดต่ำสุด จึงทำให้การคำนวณดัชนี $EENS_{CM}$ และ $EENS_{PM}$ แตกต่างกัน

(2) ระยะเวลาของการบำรุงรักษาแบบแก้ไขและแบบป้องกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์และวิธีการบำรุงรักษาแบบป้องกัน หากอุปกรณ์ที่มีระยะเวลาของการบำรุงรักษาแบบแก้ไขนานจะส่งผลให้ดัชนี $EENS$ มีค่าเพิ่มขึ้นและเสียระยะเวลาการจ่ายโหลดนาน นอกจากนี้การบำรุงรักษาแบบป้องกันหากอุปกรณ์นั้นส่งผลกระทบต่อการสูญเสียพลังงาน และไม่ได้มีอุปกรณ์สำรองเชื่อมต่อระยะเวลาของการบำรุงรักษาแบบป้องกันก็จะนาน ทำให้ดัชนี $EENS_{PM}$ ค่าสูงขึ้น

(3) จำนวนกำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของการใช้พลังงานในแต่ละปี ดังนั้นเวลาทำการบำรุงรักษาก็ส่งผลกระทบให้ไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าในส่วนนี้ ดังนั้นหากจำนวนกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปมีจำนวนมาก จะส่งผลให้ดัชนี $EENS_{CM}$ และดัชนี $EENS_{PM}$ มีค่าสูงขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.3 การกำหนดปัญหาค่าใช้จ่ายการวางแผนบำรุงรักษา

การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับการใช้งานของอุปกรณ์โดยมีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด โดยคำนึงถึงความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ และดัชนีความเชื่อถือได้ของระดับสถานีไฟฟ้า ภายในวิทยานิพนธ์ได้กำหนดสมมุติฐานและมีแนวคิดดังต่อไปนี้

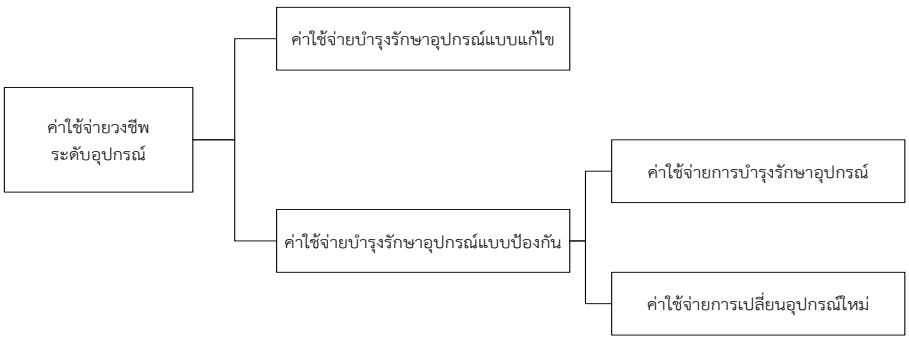
1. อุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าแรงสูงนั้นมีอัตราความเสียหายเปลี่ยนแปลงตามเวลา และส่งผลต่อความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์และระบบไฟฟ้า โดยกำหนดให้พารามิเตอร์รูปร่างมีค่ามากกว่า 1
2. การบำรุงรักษาอุปกรณ์ในแต่ละครั้ง ส่งผลให้อายุประสิทธิผลของอุปกรณ์ในแต่ละปีที่การบำรุงรักษามีค่าลดลง อุปกรณ์มีความเชื่อถือได้เพิ่มขึ้น และอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ลดลง
3. ถ้าอายุประสิทธิผลของอุปกรณ์ปีสุดท้ายของอุปกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์และระบบมีค่าลดลง
4. วิธีการบำรุงรักษาที่แตกต่างกัน ทำให้อายุประสิทธิผลของอุปกรณ์มีค่าแตกต่างกัน และได้ผลลัพธ์ของค่าใช้จ่ายที่แตกต่างกัน
5. ค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานสามารถคิดและคำนวณเฉพาะอุปกรณ์ที่อยู่ในกลุ่มเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 และสามารถเพิ่มเติมเข้าไปได้ในอุปกรณ์

ระดับค่าใช้จ่ายสามารถแบ่งได้ 2 ระดับได้แก่ ระดับอุปกรณ์ และระดับสถานีไฟฟ้า ดังนั้นการกำหนดปัญหาค่าใช้จ่ายการวางแผนบำรุงรักษาจึงสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทดังนี้

4.3.1 การกำหนดปัญหาระดับอุปกรณ์

พิจารณาอุปกรณ์เพียง 1 อุปกรณ์ ประกอบด้วยค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบแก้ไข และค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบป้องกันซึ่งแบ่งตามกลยุทธ์บำรุงรักษาแบบป้องกันได้ 2 แบบ คือ การบำรุงรักษาอุปกรณ์ และเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ทดแทน ดังรูปที่ 4.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.3 ค่าใช้จ่ายระดับอุปกรณ์

ค่าใช้จ่ายวงชีพของอุปกรณ์ 1 ตัว สามารถคำนวณได้ค่าใช้จ่าย 2 ส่วนประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาเชิงแก้ไข และค่าใช้การบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่แบ่งออกเป็นค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาอุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ตลอดช่วงระยะเวลาของการวางแผน ดังนี้

$$TC_{D_i} = \sum_{j=1}^{n} \left(CF_{i,j} + CM_{i,j} + CR_{i,j} \right) \tag{4.12}$$

โดย TC_{D_i} คือ ค่าใช้จ่ายระดับอุปกรณ์ตลอดช่วงระยะเวลาทั้งหมดของอุปกรณ์ที่ i

การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาระดับอุปกรณ์เหมาะที่สุด คือ การตัดสินใจบำรุงรักษาเพื่อทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (4.12) มีค่าต่ำที่สุด และสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ 5 กลุ่ม ดังนี้

$$\min TC_{D_i} \tag{4.13}$$

1. ค่าเริ่มต้น (Initial condition) ของอายุประสิทธิผลของอุปกรณ์ ซึ่งอายุประสิทธิผลของอุปกรณ์เริ่มต้นนั้นจะต้องมีค่าเท่ากับ 0 เปรียบเสมือนอุปกรณ์นั้นยังไม่ผ่านการใช้งานหรืออุปกรณ์ใหม่ ณ สถานะ $j = 1$ ดังนี้

$$t_{i,1} = 0 \tag{4.14}$$

2. ค่าสุดท้าย (Final condition) ของอายุประสิทธิผลของอุปกรณ์ ณ สถานะ $j = n$ ดังนี้

$$t_{i,n} \le t_{D_i,f} \tag{4.15}$$

โดยที่ $t_{D_i,f}$ คือ ค่าคงที่ของอายุประสิทธิผล ณ ระยะสุดท้ายของอุปกรณ์ D_i

3. ค่าอายุประสิทธิผลของอุปกรณ์ก่อนบำรุงรักษาของอุปกรณ์ ซึ่งอยู่กับการตัดสินใจเลือกวิธีการบำรุงรักษาอุปกรณ์ ตลอดสถานะ $j = 1, 2, 3, ..., n$ เป็นดังนี้

$$t_{i,j} = (1 - m_{i,j-1})(1 - r_{i,j-1}) \left(t_{i,j-1} + \frac{T}{n} \right) + m_{i,j-1} \left(\alpha_i \left(t_{i,j-1} + \frac{T}{n} \right) \right) \tag{4.16}$$

4. ความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.13) โดยค่าความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ตลอดการบำรุงรักษานั้น จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่าความเชื่อถือได้ที่ต้องการ ตลอดสถานะ $j = 1, 2, 3, ..., n$ ดังนี้

$$R_{i,j} \ge R_{D_i,req} \tag{4.17}$$

โดยที่ $R_{D_i,req}$ คือ ความเชื่อถือได้ที่ต้องการของอุปกรณ์ D_i

5. ตัวแปรของการบำรุงรักษาอุปกรณ์ ตลอดระยะเวลาวางแผนการบำรุงรักษานั้น หรือเมื่อ $j = 1, 2, 3, ..., n$ สามารถกำหนดเงื่อนไขของตัวแปรการบำรุงรักษาได้ดังสมการที่ (4.18) และเลือกวิธีการบำรุงรักษาได้ทั้งหมด 3 วิธี ได้แก่

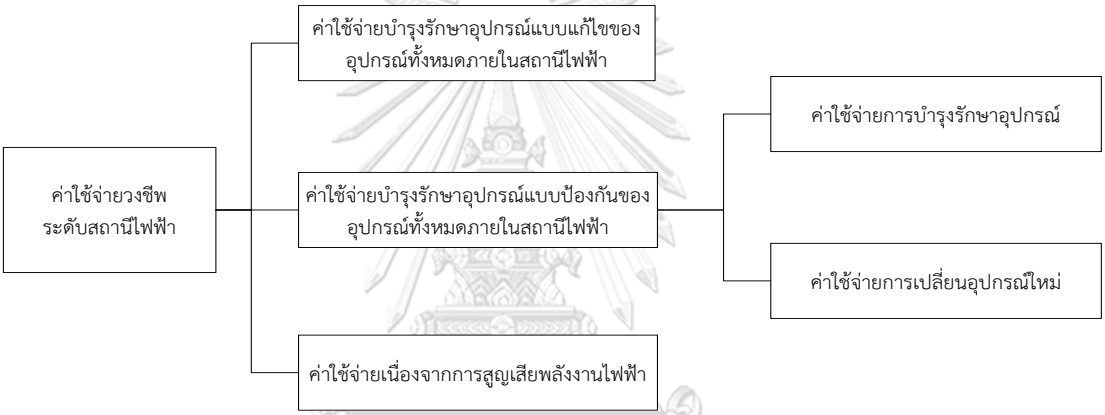
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1. การไม่บำรุงรักษา $(m_{i,j}=0, r_{i,j}=0)$
2. การบำรุงรักษาอุปกรณ์ $(m_{i,j}=1, r_{i,j}=0)$
3. การเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ทดแทน $(m_{i,j}=0, r_{i,j}=1)$

$$m_{i,j}+r_{i,j}\le 1 \tag{4.18}$$

4.3.2 การกำหนดปัญหาระดับสถานีไฟฟ้า

พิจารณาอุปกรณ์ทั้งหมดภายในสถานีไฟฟ้า ประกอบด้วยค่าใช้จ่าย 3 ส่วนได้แก่ ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบแก้ไขของอุปกรณ์ทั้งหมด ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันของอุปกรณ์ทั้งหมด และค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าซึ่งขึ้นอยู่กับการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ค่าใช้จ่ายระดับสถานีไฟฟ้า

การกำหนดแผนการบำรุงรักษาระดับสถานีไฟฟ้าแบบเหมาะที่สุด ค่าใช้จ่ายวงชีพประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาเชิงแก้ไข ค่าใช้การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน และ ค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ทั้งหมดในสถานีไฟฟ้า ดังนี้

$$TC_{D_i}=\sum_{j=1}^{n}\left(CF_{i,j}+CM_{i,j}+CR_{i,j}\right)+\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{N_L}\left(CECM_{D_{i,j,k}}+CEPM_{D_{i,j,k}}\right) \tag{4.19}$$

ดังนั้นสามารถกำหนดปัญหาระดับสถานีไฟฟ้าได้โดยนำค่าใช้จ่ายทั้งหมดของแต่ละอุปกรณ์มารวมกันที่มีค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานตามสมการที่ (4.19) มารวมกันดังนี้

$$TC_s=\sum_{i=1}^{N}TC_{D_i} \tag{4.20}$$

โดย TC_s คือ ค่าใช้จ่ายระดับสถานีไฟฟ้าทั้งหมด (บาท)

กำหนดให้ตัวแปรการบำรุงรักษาของแต่ละอุปกรณ์ $i = 1, 2, 3..., N$ ณ แต่ละระยะ $j = 1, 2, 3, ..., n$ ดังนี้

$$x_j = \left(m_{i,j}, r_{i,j}\right) \subseteq \quad \Omega_i \tag{4.21}$$

โดยที่ x_j คือ ตัวแปรของการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่ i ณ ระยะที่ j

Ω_i คือ เซตที่เป็นไปได้ของตัวแปรการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่ i นั่นคือ สอดคล้องกับสมการ (4.16)-(4.18)

การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาระดับสถานีไฟฟ้าแบบเหมาะที่สุด คือ การตัดสินใจบำรุงรักษาเพื่อทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ตามสมการ (4.20) มีค่าต่ำที่สุด และสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับทั้งระดับอุปกรณ์ และความเชื่อถือได้ระดับสถานีไฟฟ้า

$$\min TC_s \tag{4.22}$$

$$x_j \subseteq \ \Omega_i \quad \forall j \tag{4.23}$$

$$SAIFI_j \leq SAIFI_{req} \quad \forall j \tag{4.24}$$

โดยที่ $SAIFI_{req}$ คือ ค่าดัชนี $SAIFI$ ที่ต้องการของระบบ

ลำดับต่อไป เรานำเสนอแนวทางแก้ปัญหาการกำหนดแผนการบำรุงรักษาระดับสถานีไฟฟ้าแบบเหมาะที่สุด สังเกตว่า ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ตามสมการ (4.19)-(4.20) สามารถเขียนเป็นผลรวมของค่าใช้จ่ายตามอุปกรณ์ และสามารถกำหนดให้ความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ต้องสอดคล้องกับความเชื่อถือได้ของระบบ ดังนี้

$$\min_{x_{i,j} \subset \Omega_i, \forall i,j} TC_s \leq \sum_{i=1}^{N} \min_{x_{i,j} \subset \Omega_i, \forall j} TC_{D_i} \tag{4.25}$$

โดยอุปกรณ์สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มดังต่อไปนี้

1. อุปกรณ์เป็นสมาชิกกลุ่มอุปกรณ์ภายในเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 ค่าใช้จ่ายการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าจะถูกเพิ่มเติมภายในค่าใช้จ่ายวงชีพของอุปกรณ์

2. อุปกรณ์นั้นไม่เป็นสมาชิกกลุ่มอุปกรณ์ภายในเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 ค่าใช้จ่ายการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าจะไม่ถูกเพิ่มเติมภายในค่าใช้จ่ายวงชีพของอุปกรณ์และสามารถกำหนดให้ความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ต้องสอดคล้องกับความเชื่อถือได้ของระบบ

จะเห็นได้ว่า ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดทางซ้ายมือของสมการที่ (4.25) มีความซับซ้อนเนื่องจาก การเชื่อมต่อของอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้ามีรูปแบบหลากหลาย ทำให้การหาคำตอบใช้เวลาค่อนข้างนาน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาปัญหาย่อยทางขวามือของสมการที่ (4.25) จะเห็นว่า ปัญหามีความซับซ้อนเพียงระดับอุปกรณ์ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกแก้ปัญหาทางด้านขวาของสมการที่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

(4.25) เพื่อหาคำตอบเหมาะที่สุดย่อย (Suboptimal) และเป็นค่าขอบเขตบนของค่าใช้จ่ายวงชีพระดับสถานีไฟฟ้า

4.4 วิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต

การสร้างโปรแกรมพลวัต เป็นแนวทางการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear optimization problem) พัฒนาโดย Richard Bellman [39, 40] วิธีแก้ปัญหานี้ประยุกต์ใช้กับงานวิศวกรรมหลายสาขา รวมทั้งการแก้ปัญหาสินค้าคงคลัง เป็นต้น วิธีแก้ปัญหาแบ่งออกเป็นปัญหาย่อยและการแก้ปัญหาสถานะ (state) โดยแต่ละสถานะจะประกอบด้วยตัวแปรเดียว แทนที่จะแก้ปัญหาด้วยตัวแปรทั้งหมดพร้อมกัน ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง (1) องค์ประกอบการสร้างโปรแกรมพลวัต และ (2) ขั้นตอนการสร้างโปรแกรมพลวัตและหลักการของเบลแมน (Bellman's principle)

4.4.1 องค์ประกอบการสร้างโปรแกรมพลวัต

การสร้างโปรแกรมพลวัต ประกอบด้วย (1) ตัวแปรสถานะ (state variable), (2) ตัวแปรควบคุม (control variable), (3) สมการพลวัต (dynamic equation), (4) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ย่อย และ (5) เงื่อนไขบังคับของตัวแปรสถานะและตัวแปรควบคุม สามารสรุปวิธีการหาคำตอบได้ดังรูปที่ 13 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ตัวแปรสถานะ ($t_{i,j}$) คือ ค่าตัวแปรสถานะของอุปกรณ์ที่ i ณ ระยะที่ j
2. ตัวแปรควบคุม ($m_{i,j}, r_{i,j}$) คือ ค่าตัวแปรที่แสดงการตัดสินใจการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่ i ณ ระยะที่ j ซึ่งจะมีผลต่อค่าตัวแปรสถานะของอุปกรณ์ที่ i ณ ระยะที่ $j+1$
3. สมการพลวัต ($g(t_{i,j-1}, m_{i,j-1}, r_{i,j-1})$) คือ สมการของสถานะถัดไปเพื่อหาค่าตัวแปรสถานะ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตัวแปรสถานะและตัวแปรควบคุมของอุปกรณ์ที่ i ระยะที่ $j-1$ ดังนี้

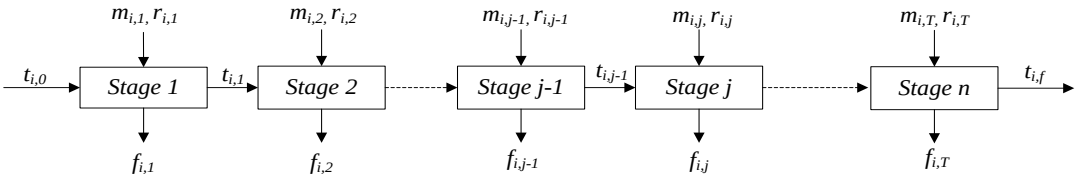
$$t_{i,j} = g(t_{i.j-1}, m_{i,j-1}, r_{i,j-1}) \tag{4.26}$$

4. ฟังก์ชันย่อยวัตถุประสงค์ย่อย ($f_{i,j}$) คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ย่อยของอุปกรณ์ที่ i ณ ระยะที่ j สำหรับฟังก์ชันย่อยระดับอุปกรณ์ดังสมการที่ (4.27) และฟังก์ชันวัตถุประสงค์ย่อยระดับสถานีไฟฟ้าดังสมการที่ (4.28)

$$f_{i,j} = CF_{i,j} + CM_{i,j} + CR_{i,j} \tag{4.27}$$

$$f_{i,j} = CF_{i,j} + CM_{i,j} + CR_{i,j} + \sum_{k=1}^{N_L} \left(CECM_{D_i,j,k} + CEPM_{D_i,j,k} \right) \tag{4.28}$$

5. เงื่อนไขบังคับของตัวแปรสถานะ คือ เงื่อนไขบังคับของตัวแปรสถานะโดย $t_{i,j} \in \Omega_i$
6. เงื่อนไขบังคับตัวแปรควบคุม คือ เงื่อนไขบังคับของตัวแปรควบคุมโดยที่ $m_{i,j}, r_{i,j} \in \Omega_i$



รูปที่ 4.5 รูปแบบการสร้างโปรแกรมพลวัต

4.4.2 ขั้นตอนการสร้างโปรแกรมพลวัตและหลักการของเบลแมน

เพื่อประยุกต์วิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตกับการกำหนดแผนงานบำรุงรักษาอุปกรณ์ เริ่มต้นด้วยกำหนดให้สถานะเริ่มต้นโดยสำหรับการแก้ปัญหานี้คือ ค่าใช้จ่าย ณ ปีบำรุงรักษาระยะที่ 1 ($V(t_{i,1},1)$) โดยที่ $i=1,2,...,N$ ดังนี้

$$V(t_{i,1},1)=\min_{m_{i,j},r_{i,j}\in\Omega_i}\left\{f_{i,1}(t_{i,1},m_{i,1},\mathrm{r}_{i,1})\right\} \tag{4.29}$$

โดยที่ $V(t_{i,j},j)$ แทนด้วยผลรวมของค่าใช้จ่ายวงชีพของอุปกรณ์ i ในระยะที่ 1 ถึง j

จากสมการที่ (4.29) ถ้าจะพิจารณาค่าใช้วงชีพปีถัดไป โดยที่ $i=1,2,...,N$ และ $j=2,3,...,n-1$ เมื่อทราบค่าของ $V(t_{i,j-1},j-1)$ ณ ระยะก่อนหน้า จะสามารถคำนวณหาค่าเหมาะที่สุดตามหลักการของเบลแมน ดังนี้

$$V(t_{i,j},j)=\min_{m_{i,j},r_{i,j}\in\Omega_i}\left\{f_{i,j}(g(t_{i,j-1},m_{i,j-1},r_{i,j-1}),m_{i,j},r_{i,j})+V\left(t_{i,j-1},j-1\right)\right\} \tag{4.30}$$

จากสมการที่ (4.29) และสมการที่ (4.30) การหาคำตอบเหมาะที่สุด พิจารณาระยะเริ่มต้นไปถึงระยะสุดท้าย (n) คำตอบจะเป็นดังนี้

$$y_{i,n}=\min_{m_{i,j},r_{i,j}\in\Omega_i}\left\{f_{i,n}(t_{i,n},m_{i,n},r_{i,n})+V\left(t_{i,n-1},n-1\right)\right\} \tag{4.31}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โดยที่ $y_{i,n}$ คือ ผลค่าใช้จ่ายวงชีพที่ต่ำสุดของ (4.13) อุปกรณ์ที่ i ของฟังก์ชัน ณ ระยะที่ n

ขั้นตอนการสร้างโปรแกรมพลวัตนั้นขึ้นอยู่กับหลักการของเบลแมน ขั้นตอนและรายละเอียดดังสมการที่ (4.30) โดยมีขั้นตอน 2 วิธี คือ (1) การหาหาค่าต่ำที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ (2) การหาตัวแปรควบคุมในแต่ละสถานะให้สอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ (1) โดยมีหลักการดังต่อไปนี้

(1) การหาค่าต่ำที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เป็นดังนี้

1. คำนวณหาคำตอบเหมาะที่สุดเริ่มต้น ดังสมการที่ (4.29)
2. สำหรับค่า $j=2,3,...,n$ คำนวณด้วยหลักการของเบลแมนตามสมการที่ (4.30)

(2) การหาตัวแปรควบคุมในแต่ละสถานะให้สอดคล้องกับผลลัพธ์ เป็นดังนี้

1. กำหนดให้ค่าตัวแปรสถานะและตัวแปรควบคุมระยะที่ n มีค่าดังสมการที่ (4.31)

2. สำหรับค่า $j = n,...,2$ ของแต่ละอุปกรณ์และสามารถคำนวณหาค่าตัวแปรควบคุม ($m_{i,j}, r_{i,j}$) ที่เหมาะสม และกำหนดตัวแปรสถานะถัดไป ($t_{i,j}$) ดังนี้

$$m_{i,j}, r_{i,j} = \underset{m_{i,j}, r_{i,j} \in \Omega_i}{\arg\min} \left\{ f_{i,j}(g^{-1}\left(t_{i,j}, m_{i,j}, r_{i,j}\right), m_{i,j}, r_{i,j}) + V\left(t_{i,j}, j\right)\right\} \quad (4.32)$$

โดย $g^{-1}(t_{i,j}, m_{i,j}, r_{i,j})$ คือ ฟังก์ชันผกผันของ (4.26) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$t_{i,j-1} = g^{-1}(t_{i,j}, m_{i,j}, \mathrm{r}_{i,j})$$

$$t_{i,j-1} = \frac{t_{i,j}}{(1-m_{i,j})\cdot(1-r_{i,j}) + m_{i,j}\alpha_i} - \left(\frac{T}{n}\right) \quad (4.33)$$

3. หาตัวแปรควบคุมที่เหมาะสม ณ ระยะที่ 1 ดังนี้

$$m_{i,1}, r_{i,1} = \underset{m_{i,j}, r_{i,j} \in \Omega_i}{\arg\min} \left\{ f_{i,1}(g^{-1}\left(t_{i,2}, m_{i,2}, r_{i,2}\right), m_{i,1}, r_{i,1}) + V\left(t_{i,2}, 2\right)\right\} \quad (4.34)$$

4.4.3 การประยุกต์ใช้การสร้างโปรแกรมพลวัตกับการวางแผนการบำรุงรักษา

หัวข้อนี้นำเสนอแนวทางการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบเหมาะที่สุด ทั้งในระดับอุปกรณ์ และระดับสถานีไฟฟ้า โดยการประยุกต์ใช้การสร้างโปรแกรมพลวัต ตารางที่ 4.2 และ ตารางที่ 4.3 อธิบายองค์ประกอบการสร้างโปรแกรมพลวัตเพื่อแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดระดับอุปกรณ์และระดับสถานีไฟฟ้า ตามลำดับ

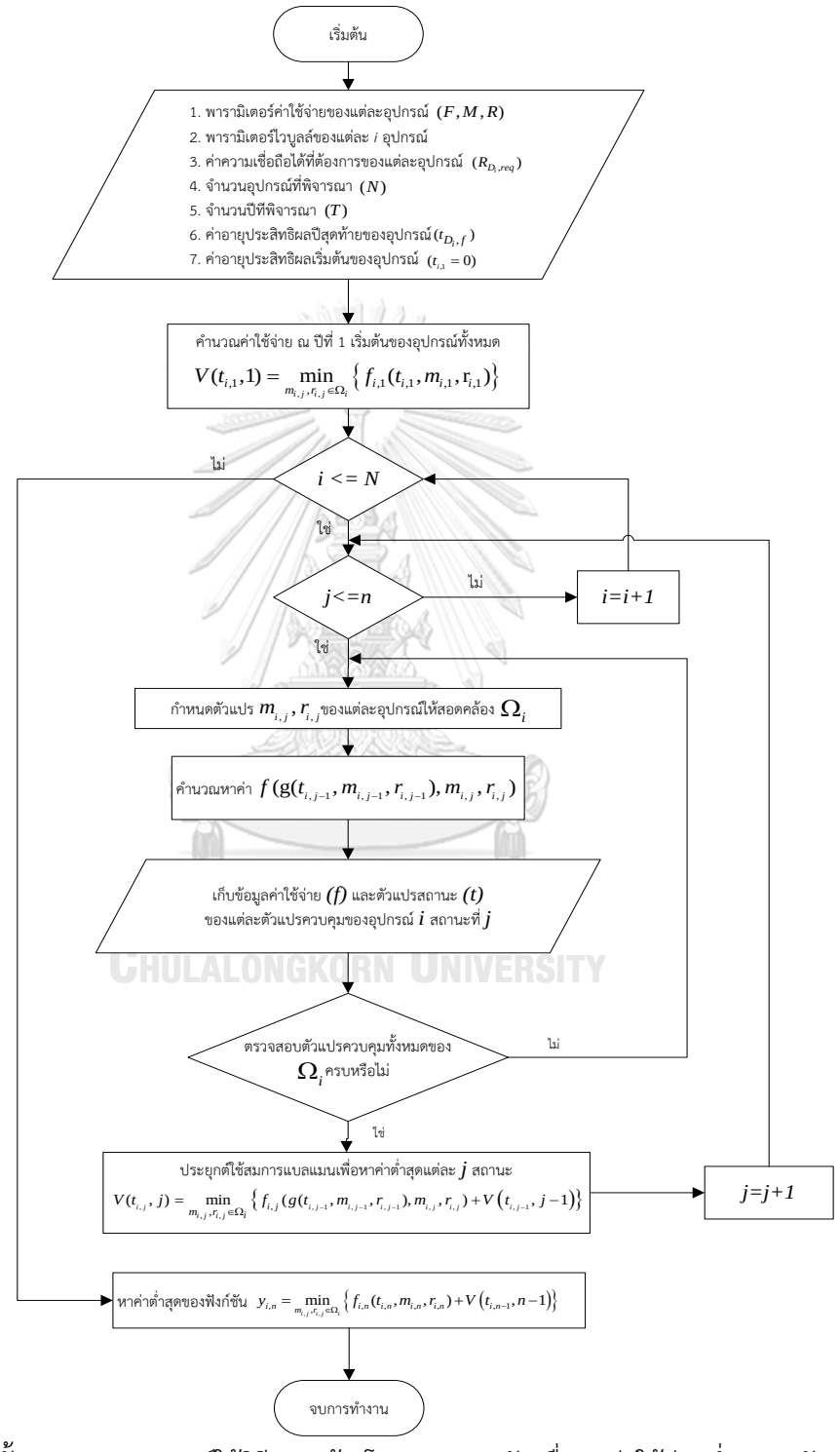
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบการสร้างโปรแกรมพลวัตเพื่อแก้ปัญหาระดับอุปกรณ์

องค์ประกอบ	คำอธิบาย
สมการพลวัต ($g(t_{i,j-1}, m_{i,j-1}, r_{i,j-1})$)	สมการที่ (4.16)
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ย่อย ($f_{i,j}(t_{i,j}, m_{i,j}, r_{i,j})$)	สมการที่ (4.27)
เงื่อนไขบังคับของตัวแปรสถานะ	สมการที่ (4.14), (4.15) และ (4.17)
เงื่อนไขบังคับตัวแปรควบคุม	สมการที่ (4.18)

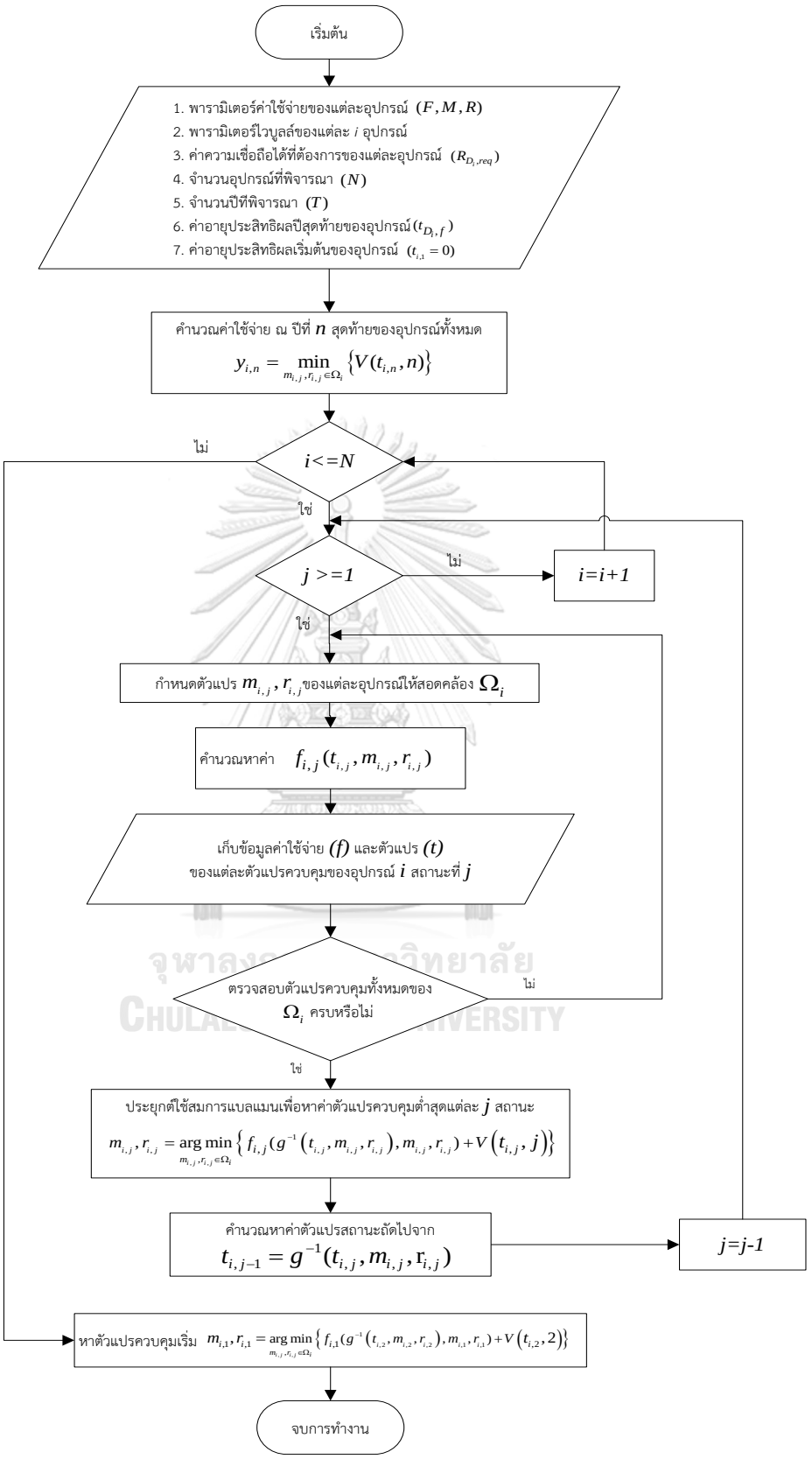
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบวิธีแก้ปัญหาพลวัตเพื่อแก้ปัญหาระดับสถานีไฟฟ้า

องค์ประกอบวิธีแก้ปัญหาพลวัต	คำอธิบาย
สมการพลวัต ($g(t_{i,j-1}, m_{i,j-1}, r_{i,j-1})$)	สมการที่ (4.16)
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ย่อย ($f_{i,j}(t_{i,j}, m_{i,j}, r_{i,j})$)	สมการที่ (4.28)
เงื่อนไขบังคับของตัวแปรสถานะ	สมการที่ (4.24)
เงื่อนไขบังคับตัวแปรควบคุม	สมการที่ (4.23)

การหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และการตัวแปรควบคุมแต่ละสถานะให้สอดคล้องกับผลลัพธ์กับการกำหนดแผนงานบำรุงรักษาระดับอุปกรณ์ ทำได้ตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 4.6.2 สามารถสรุปการหาค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุดดังรูปที่ 4.6 และการตัดสินใจวางแผนดังรูป 4.7

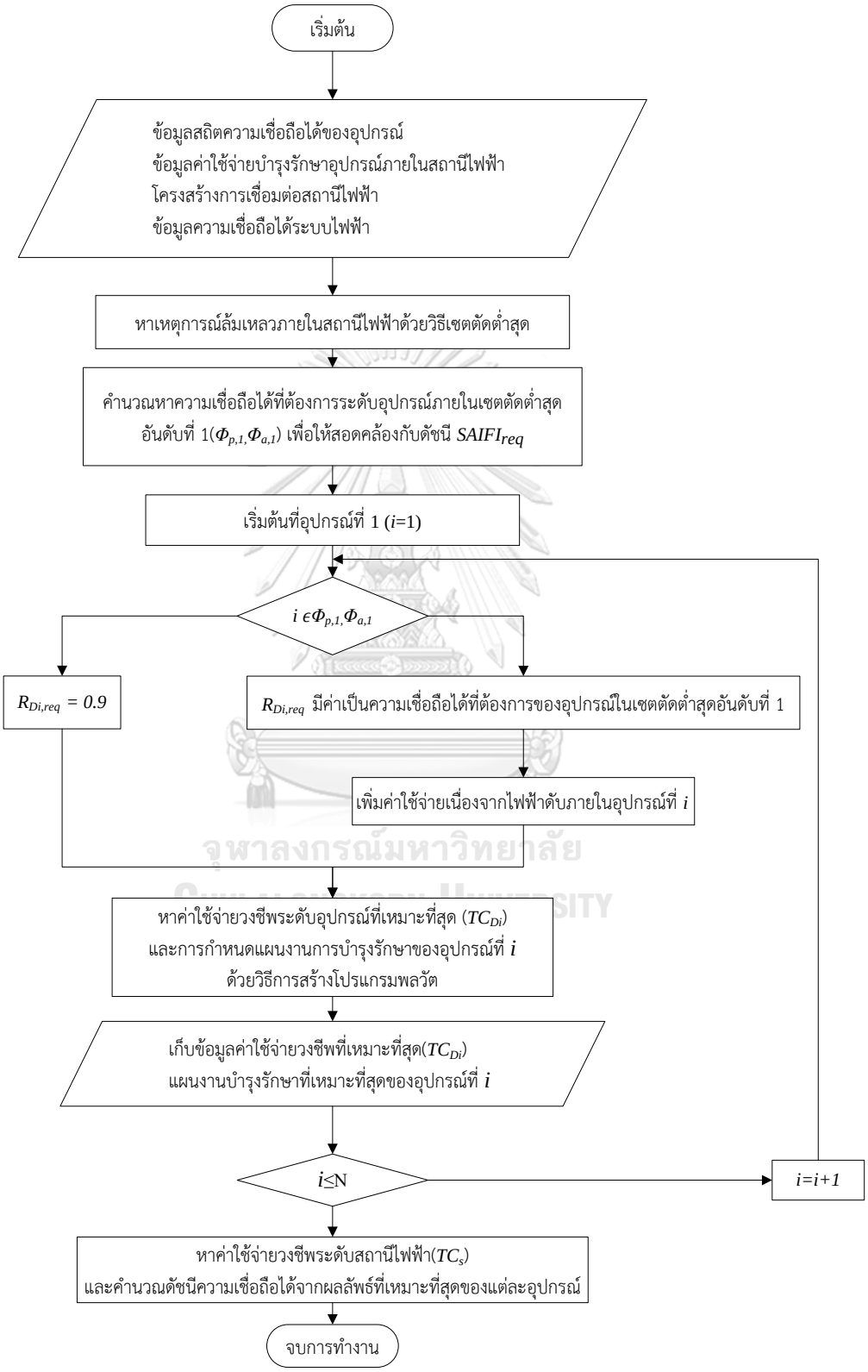


รูปที่ 4.6 ขั้นตอนการประยุกต์ใช้วิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตเพื่อหาค่าใช้จ่ายต่ำสุดระดับอุปกรณ์



รูปที่ 4.7 ขั้นตอนการประยุกต์ใช้วิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตเพื่อหาการตัดสินใจระดับอุปกรณ์

การหาคำตอบระดับสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต สามารถทำได้ตามขั้นตอนเหมาะสมรองลงมาและสอดคล้องกับดัชนี *SAIFI* ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ขั้นตอนการประยุกต์ใช้วิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตเพื่อหาวางแผนระดับสถานีไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.8 สามารถสรุปขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

1) ป้อนข้อมูลสถิติความเชื่อถือได้อุปกรณ์ ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษา โครงสร้างการเชื่อมต่อภายในสถานีไฟฟ้า และข้อมูลความเชื่อถือได้ระบบไฟฟ้า
2) หาเหตุการณ์ล้มเหลวภายในสถานีไฟฟ้า(Φ) ด้วยวิธีเซตตัดต่ำที่สุดแบบพาสซีฟและแอกทีฟของแต่ละจุดโหลด
3) คำนวณความเชื่อถือได้ที่ต้องการระดับอุปกรณ์ ($R_{D_i,req}$) ที่อยู่ภายในเซตตัดอันดับที่ 1 ของเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟและแอกทีฟ ($\Phi_{p,1}, \Phi_{a,1}$) มีขั้นตอนดังนี้
   ก. นับจำนวนอุปกรณ์ภายในเซตตัดอันดับที่ 1 แบบพาสซีฟและแอกทีฟ
   ข. แบ่งอัตราความล้มเหลวให้แต่ละอุปกรณ์ภายในเซตตัดต่ำสุด โดยให้มีความสำคัญเท่ากัน เช่น ดัชนี *SAIFI* ที่ต้องการมีค่าเป็น 0.15 และมีอุปกรณ์ภายในเซตตัดทั้งหมด 3 อุปกรณ์ ดังนั้นแต่ละอุปกรณ์มีอัตราความล้มเหลวที่ต้องการเป็น 0.03
   ค. คำนวณหาค่าอายุประสิทธิผลจากอัตราความล้มเหลวที่ต้องการแต่ละอุปกรณ์ด้วยฟังก์ชันอัตราความล้มเหลวอุปกรณ์ หรือสมการที่ 2.14
   ง. คำนวณค่าความเชื่อถือได้ที่ต้องการของอุปกรณ์ภายในเซตตัดต่ำที่สุดด้วยสมการความเชื่อถือได้ภายในบทที่ 2 หรือสมการที่ 2.13
4) เริ่มต้นอุปกรณ์ที่ 1 ของสถานีไฟฟ้า
5) หาค่าใช้จ่ายวงชีพแต่ละอุปกรณ์ (TC_{D_i}) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้
   ก. ถ้าอุปกรณ์ไม่ได้อยู่ในเซตตัดต่ำที่สุด ให้มีความเชื่อถือได้ที่ต้องการ ($R_{D_i,req}$)เป็น 0.9
   ข. ถ้าอุปกรณ์อยู่ในเซตตัดต่ำที่สุด ให้มีความเชื่อถือได้ที่ต้องการตามค่าที่คำนวณได้ภายในขั้นตอนที่ 3 และเพิ่มค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า ($CE_{j,k}$) ลงในค่าใช้จ่ายวงชีพของอุปกรณ์
6) หาค่าใช้จ่ายวงชีพระดับอุปกรณ์ต่ำที่สุดและแผนงานบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่ i ด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต
7) เก็บข้อมูลค่าใช้จ่ายวงชีพและแผนงานบำรุงรักษาที่เหมาะที่สุดของอุปกรณ์ i
8) พิจารณาอุปกรณ์ถัดไป
9) กลับไปทำขั้นตอนที่ 5 ถึง 7 จนกระทั่งครบอุปกรณ์ทั้งหมด
10) หาค่าใช้จ่ายวงชีพระดับสถานีไฟฟ้า (TC_s)ด้วยการนำผลรวมค่าใช้จ่ายวงชีพต่ำที่สุดของแต่ละอุปกรณ์ที่ได้เก็บไว้ และคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ระบบไฟฟ้าจากแผนงานบำรุงรักษาของอุปกรณ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.5 สรุป

ภายในบทที่ 4 ได้กล่าวถึงแบบจำลองการบำรุงรักษาอุปกรณ์ประกอบด้วยวิธีการบำรุงรักษา 3 แบบ ได้แก่ การบำรุงรักษาไม่ทำอะไร การบำรุงรักษา และการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ โดยแต่ละวิธีนั้นมีผลกระทบต่ออายุประสิทธิผลของอุปกรณ์ การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาสามารถกำหนดได้ 2 ระดับ คือ ระดับอุปกรณ์ และระดับสถานีไฟฟ้า ค่าใช้จ่ายวงชีพระดับอุปกรณ์ประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบแก้ไข ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบป้องกัน ส่วนค่าใช้จ่ายวงชีพระดับสถานีไฟฟ้าจะมีค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเพิ่มเข้ามา ค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าสามารถประมาณได้จากเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 ของเหตุการณ์ความล้มเหลวแบบพาสซีฟและแอกทีฟ

การกำหนดปัญหาระดับอุปกรณ์นั้น ภายในระบบจะมีอุปกรณ์เพียง 1 อุปกรณ์ โดยมีเงื่อนไขทั้งหมด 5 เงื่อนไขได้แก่ ค่าอายุประสิทธิผลเริ่มต้น ค่าอายุประสิทธิผลสุดท้าย ค่าอายุประสิทธิผลระยะถัดไปเนื่องจากการตัดสินใจบำรุงรักษา การตัดสินใจบำรุงรักษาแต่ละระยะ และความเชื่อถือได้ระดับอุปกรณ์ ส่วนการกำหนดปัญหาระดับสถานีไฟฟ้ามีเงื่อนไขทั้งหมด 2 เงื่อนไขได้แก่ เซตที่เป็นไปได้ของตัวแปรการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่ i เงื่อนไขดัชนี $SAIFI$ ของสถานีไฟฟ้า

การค้นหาคำตอบของระดับอุปกรณ์และระดับสถานีไฟฟ้าสามารถนำวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต โดยใช้หลักการของเบลแมน เพื่อหาคำตอบค่าใช้จ่ายวงชีพที่ต่ำที่สุดและแผนงานบำรุงรักษาที่เหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข อย่างไรก็ตามการหาคำตอบระดับสถานีไฟฟ้าทางตรงเป็นปัญหาที่ซับซ้อน เพื่อลดความซับซ้อนของปัญหา การค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดย่อย โดยทำให้ค่าขอบเขตบนของค่าใช้จ่ายวงชีพมีค่าต่ำสุดถูกนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาระดับสถานีไฟฟ้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 5
การทดสอบและวิเคราะห์ผล

การประเมินแนวทางการกำหนดแผนงานบำรุงรักษาอย่างเหมาะสมภายในสถานีไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาระดับอุปกรณ์ภายใต้ปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อายุประสิทธิผลสุดท้ายของอุปกรณ์ ความเชื่อถือได้ที่ต้องการของอุปกรณ์ เป็นต้น การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาระดับสถานีไฟฟ้าที่เชื่อมต่อของอุปกรณ์แตกต่างกัน นอกจากนี้วิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตถูกนำไปเปรียบเทียบประสิทธิผลระหว่างวิธีพันธุกรรมและการบำรุงรักษาตามเวลา

5.1 ข้อมูลพื้นฐานและระบบทดสอบ

เพื่อทดสอบแนวทางการกำหนดแผนงานบำรุงรักษาที่เหมาะสม จำเป็นต้องมีพารามิเตอร์เพื่อประกอบการทดสอบทั้งในระดับอุปกรณ์และสถานีไฟฟ้า ได้แก่ ข้อมูลสถิติความเสียของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า ค่าใช้จ่ายอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า รูปแบบการจัดเรียงสถานีไฟฟ้า ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้า เงื่อนไขบังคับความเชื่อถือได้ระดับอุปกรณ์และสถานีไฟฟ้า ดังนี้

5.1.1 ข้อมูลสถิติความเสียของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า

- ข้อมูลสถิตความเสียหายของอุปกรณ์เพื่อกำหนดพารามิเตอร์รูปร่าง และพารามิเตอร์ขนาดด้วยวิธีกำลังสองต่ำสุด ที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3 อุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า ณ ระดับแรงดัน 115 kV ที่พิจารณา ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยใช้ข้อมูลการปลดและเปลี่ยนอุปกรณ์ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยตลอดระยะเวลา 40 ปี และบัสบาร์ใช้ข้อมูลแหล่งอ้างอิง [34]
- ระยะเวลาการซ่อมแซมอุปกรณ์ ระยะเวลาสวิตช์ และระยะเวลาการเตรียมการบำรุงรักษาป้องกันภายในสถานีไฟฟ้า โดยใช้ข้อมูลจากแหล่งอ้างอิง [34]
- พิกัดอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า

5.1.2 ค่าใช้จ่ายอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า

ค่าใช้จ่ายอุปกรณ์เพื่อกำหนดแผนงานบำรุงรักษาของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าแต่ละประเภท ประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบแก้ไข ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษา และค่าใช้จ่ายเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ของแต่ละอุปกรณ์โดยใช้แหล่งข้อมูลจาก [34] และกำหนดให้อัตราเงินเฟ้อในแต่ละปีของระยะเวลาการบำรุงรักษาร้อยละ 2.5 สำหรับค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบแก้ไขและค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษา มีค่าเป็นร้อยละ 10 และ 5 ของค่าใช้จ่ายเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ตามลำดับ

จากข้อมูลภายในหัวข้อที่ 5.1.1 และ 5.1.2 สามารถสรุปข้อมูลแต่ละอุปกรณ์ดังตารางที่ 5.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลทางสถิต พิกัดและค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า

อุปกรณ์	หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	เซอร์กิตเบรกเกอร์	บัสบาร์
พิกัดอุปกรณ์	115/22 kV 50 MVA	115 kV 2,000 A	115 kV 2,000 A
พารามิเตอร์รูปร่างแบบแอกทีฟ	2.75	2.92	2
พารามิเตอร์มาตราส่วนแบบแอกทีฟ	21.32	31.32	28.4
พารามิเตอร์รูปร่างแบบพาสซีฟ			
พารามิเตอร์มาตราส่วนแบบพาสซีฟ			
ระยะเวลาสวิตซ์ (ชั่วโมง/ครั้ง) (r_s)	0.25	0.25	0.25
ระยะเวลาการซ่อมแซมแบบแก้ไข (ชั่วโมง/ครั้ง) (r_{pD_i})	0.6678	1.49	2
ระยะเวลาการเตรียมการบำรุงรักษาแบบป้องกัน (ชั่วโมง/ครั้ง) (r_{pre,D_i})	0.25	0.25	0.25
ระยะเวลาการบำรุงรักษา (วัน/ครั้ง) (r_{m,D_i})	1	3	1
ระยะเวลาการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ (วัน/ครั้ง) (r_{r,D_i})	15	7	3
ค่าบำรุงรักษาเชิงแก้ไข (F_i)	3.77	0.14	0.0128
ค่าบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (M_i)	1.885	0.07	0.0064
ค่าบำรุงรักษาเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ (P_i)	37.7	1.4	0.128

กำหนดอัตราความเสียหายต่อพลังงานเมื่อเกิดไฟฟ้าดับ(c_{en}) คือ ค่าสูญเสียการขายไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยมีค่าเป็น 3.63 บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งเป็นอัตราขายส่งรวมในช่วง Peak ระดับแรงดัน 69-115 กิโลโวลต์ [41]

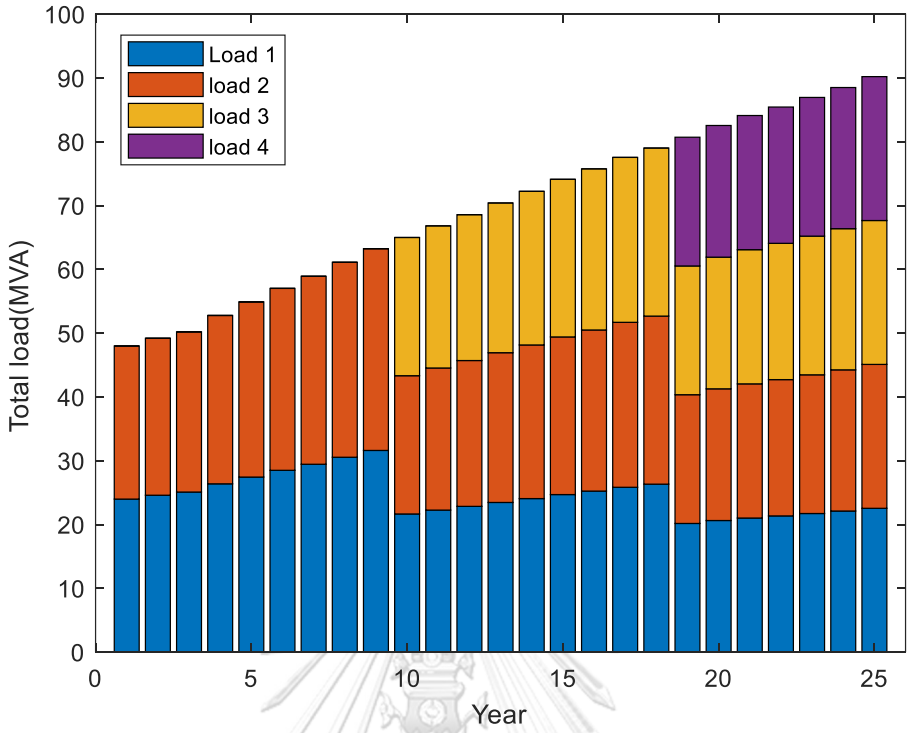
5.1.3 ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้า

วิทยานิพนธ์นี้ได้อ้างอิงการเจริญเติบโตของสถานีไฟฟ้า จากการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้า ตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย (Power development plan: PDP) [42]โดยให้ปริมาณโหลดเฉลี่ยเริ่มต้นเป็น 60% ของพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังทั้งหมดภายในสถานีไฟฟ้า มีค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor) เป็น 0.8 และอัตราการเพิ่มโหลดแต่ละปี ดังตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.1

ตารางที่ 5.2 อัตราการเพิ่มโหลดในแต่ละจุดตามแผน PDP2015

ปีที่	ปริมาณโหลดเฉลี่ย (MW)	อัตราการเพิ่ม (%)	โหลดที่1 (MW)	โหลดที่2 (MW)	โหลดที่3 (MW)	โหลดที่4 (MW)
1	48.00	-	24.00	24.00		
2	49.21	2.52	24.60	24.60		
3	50.21	2.03	25.10	25.10		
4	52.78	5.13	26.39	26.39		
5	54.91	4.02	27.45	27.45		
6	57.03	3.86	28.51	28.51		
7	58.92	3.33	29.46	29.46		
8	61.12	3.72	30.56	30.56		
9	63.25	3.49	31.62	31.62		
10	65.01	2.78	21.67	21.67	21.67	
11	66.83	2.80	22.28	22.28	22.28	
12	68.58	2.62	22.86	22.86	22.86	
13	70.42	2.68	23.47	23.47	23.47	
14	72.24	2.59	24.08	24.08	24.08	
15	74.13	2.61	24.71	24.71	24.71	
16	75.76	2.21	25.25	25.25	25.25	
17	77.56	2.37	25.85	25.85	25.85	
18	79.03	1.89	26.34	26.34	26.34	
19	80.72	2.15	20.18	20.18	20.18	20.18
20	82.57	2.28	20.64	20.64	20.64	20.64
21	84.13	1.89	21.03	21.03	21.03	21.03
22	85.46	1.58	21.36	21.36	21.36	21.36
23	86.96	1.76	21.74	21.74	21.74	21.74
24	88.52	1.79	22.13	22.13	22.13	22.13
25	90.22	1.93	22.56	22.56	22.56	22.56

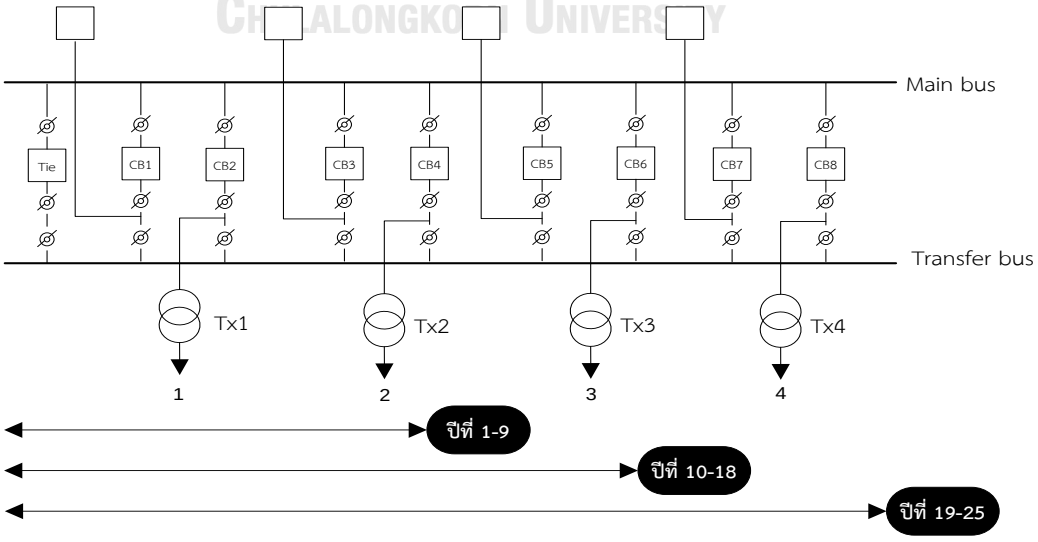
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



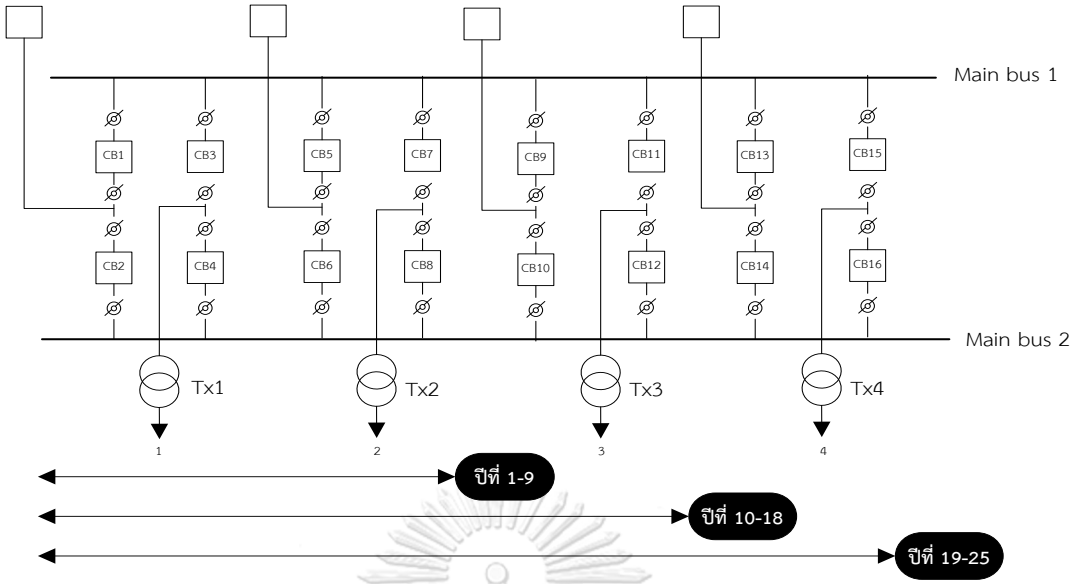
รูปที่ 5.1 อัตราการเพิ่มโหลดของจุดโหลดตามแผน PDP2015

5.1.4 รูปแบบการจัดเรียงสถานีไฟฟ้า

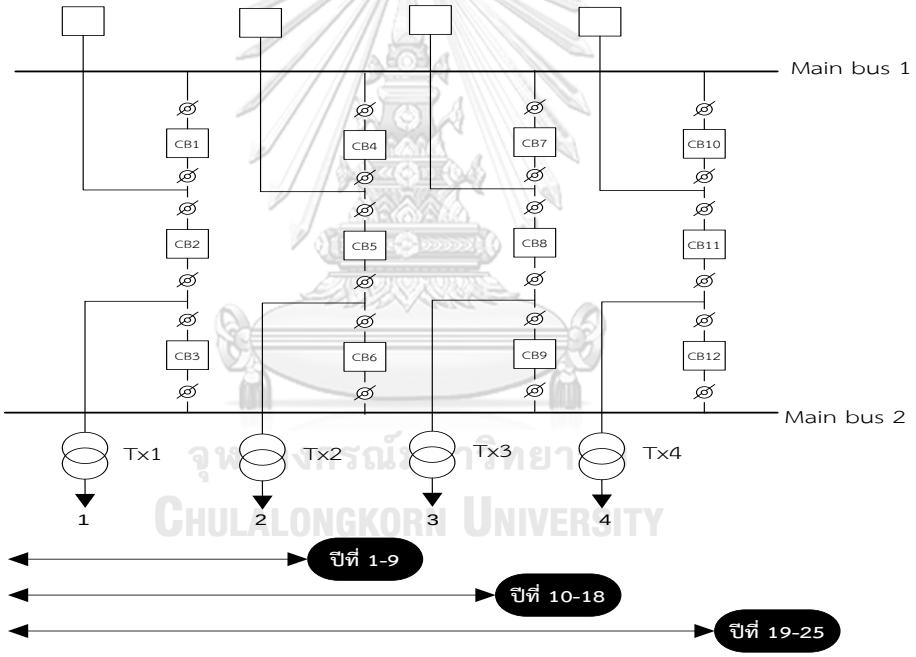
วิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาการจัดเรียงอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าที่นิยมใช้ภายในการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยประกอบด้วย รูปแบบบัสประธานและบัสถ่ายโอน รูปแบบบัสประธานคู่ และรูปแบบบัสและเบรกเกอร์ครึ่ง ดังรูปที่ 5.2, 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ โดยอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับจุดโหลดที่ 3 เพิ่มเติมในปีที่ 10 และจุดโหลดที่ 4 ปีที่ 19



รูปที่ 5.2 การจัดเรียงอุปกรณ์ภายในสถานไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานและบัสถ่ายโอน



รูปที่ 5.3 การจัดเรียงอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานคู่



รูปที่ 5.4 การจัดเรียงอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสและเบรกเกอร์ครึ่ง

5.1.5 เงื่อนไขบังคับความเชื่อถือได้ระดับอุปกรณ์และระดับสถานีไฟฟ้า

การกำหนดเงื่อนไขบังคับด้านความเชื่อได้ระดับอุปกรณ์ ตามสมการที่ (4.17) และเงื่อนไขความเชื่อถือได้ระดับสถานีไฟฟ้าตามสมการที่ (4.24) ดังนี้

- ระดับอุปกรณ์ : กำหนดให้ความเชื่อถือระดับอุปกรณ์ที่ต้องการ ($R_{D_i,req}$) มีค่าเป็น 0.9
- ระดับสถานีไฟฟ้า : สถานีไฟฟ้าเป็นของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อยู่ในระบบส่งไฟฟ้า เพราะฉะนั้นการกำหนดความเชื่อถือได้ระบบสถานีไฟฟ้าภายในแต่ละปี ต้อง

เป็นไปตามมาตรฐานการให้บริการในการประกอบกิจการไฟฟ้า ตามที่คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานปี 2559 [43] ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 เกณฑ์มาตรฐานคุณภาพการให้บริการไฟฟ้าภายในระบบส่ง

ดัชนีความเชื่อได้	ภาคกลาง	ภาคอีสาน	ภาคใต้	ภาคเหนือ	นครหลวง	รวม
SAIFI	0.148	0.158	0.176	0.198	0.066	0.244
SAIDI	2.659	2.631	2.486	10.299	0.776	5.060

5.2 การทดสอบและวิเคราะห์การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาระดับอุปกรณ์

ในหัวข้อที่ 4.5.1 การกำหนดปัญหาค่าใช้จ่ายระดับอุปกรณ์ $(i=1)$ จะแสดงผลลัพธ์การคำนวณค่าใช้จ่ายระดับอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า โดยพารามิเตอร์ไวบูลล์และค่าใช้จ่ายของแต่ละอุปกรณ์ดังตารางที่ 5.1 โดยพิจารณาระยะเวลาวางแผนทั้งหมด 25 ปี กำหนดตัวแปรแบ่งช่วงเวลา (n) มีค่าเท่ากับ 1 เพื่อพิจารณาช่วงเวลาเป็นปี ตัวประกอบการปรับปรุงมีค่าเป็น 0.5 และค่าคงที่ของความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ ($R_{D_1,req}$) เป็น 0.9 โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 รูปแบบได้แก่

- เงื่อนไขอายุประสิทธิผลสุดท้ายของอุปกรณ์
- เงื่อนไขความเชื่อถือได้ที่ต้องการของอุปกรณ์
- การเปรียบเทียบคำตอบระหว่างวิธีสร้างโปรแกรมพลวัต วิธีพันธุกรรมและการบำรุงรักษาตามเวลา

5.2.1 เงื่อนไขอายุประสิทธิผลสุดท้ายของอุปกรณ์

การทดลองตามอายุประสิทธิผลสุดท้ายของอุปกรณ์ ด้วยข้อมูลตามตารางที่ 5.1 แบ่งเป็น 5 กรณี คือ 9, 8.5, 8, 7.5 และ 7 ด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต และแสดงค่าใช้จ่ายในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ผลทดสอบค่าใช้จ่ายวงชีพเหมาะที่สุดของแต่ละอุปกรณ์ภายใต้เงื่อนไขอายุประสิทธิผลสุดท้าย

อายุประสิทธิผลสุดท้ายของอุปกรณ์ ($t_{D_1,f}$)	หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (ล้านบาท)	เซอร์กิตเบรกเกอร์ (ล้านบาท)	บัสบาร์ (ล้านบาท)
9	12.7191	0.3433	0.1046*
8.5	12.8508	0.3485	0.1047*
8	13.0020	0.3541	0.1053*
7.5	13.1736	0.3596	0.1057*
7	13.3486	0.3660	0.1067*

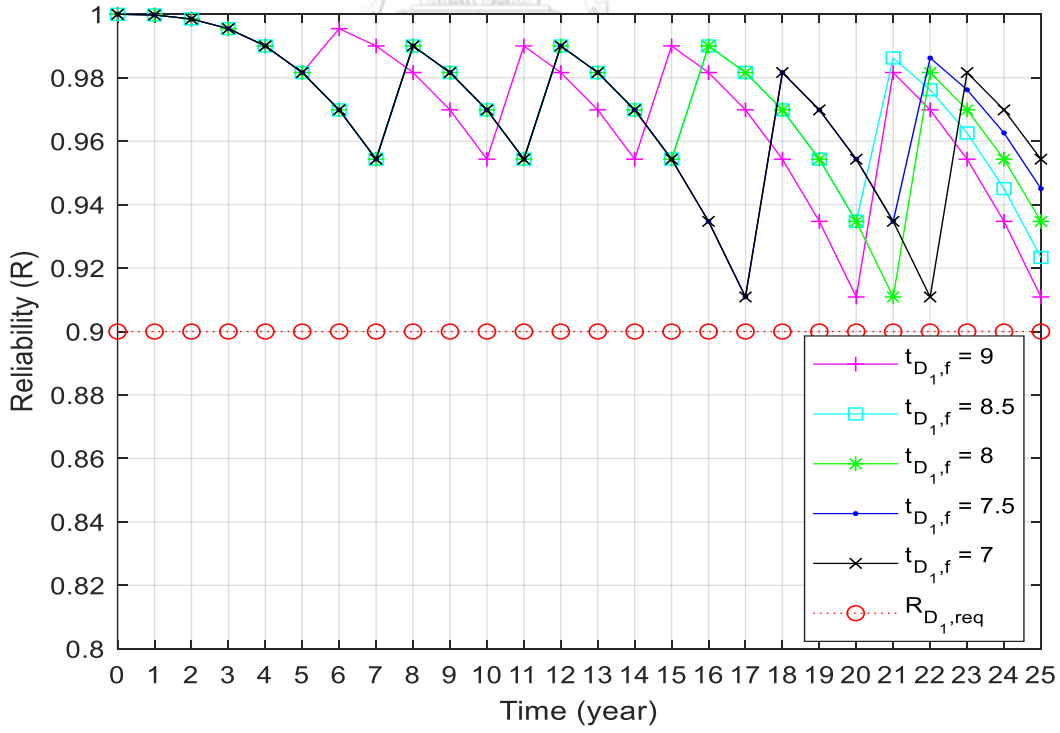
หมายเหตุ * อายุประสิทธิผลสุดท้ายของอุปกรณ์ มีค่าต่ำกว่าขอบเขตของเงื่อนไขบังคับ

ผลลัพธ์ข้างต้นเกี่ยวกับค่าใช้จ่าย แต่ละอุปกรณ์จะมีแผนงานบำรุงรักษาที่แตกต่างกัน สามารถสรุปแผนงานบำรุงรักษาในช่วงเวลา 25 ปี ภายใต้เงื่อนไขอายุประสิทธิผลของอุปกรณ์สุดท้ายที่แตกต่างกันของอุปกรณ์ดังตารางที่ 5.5

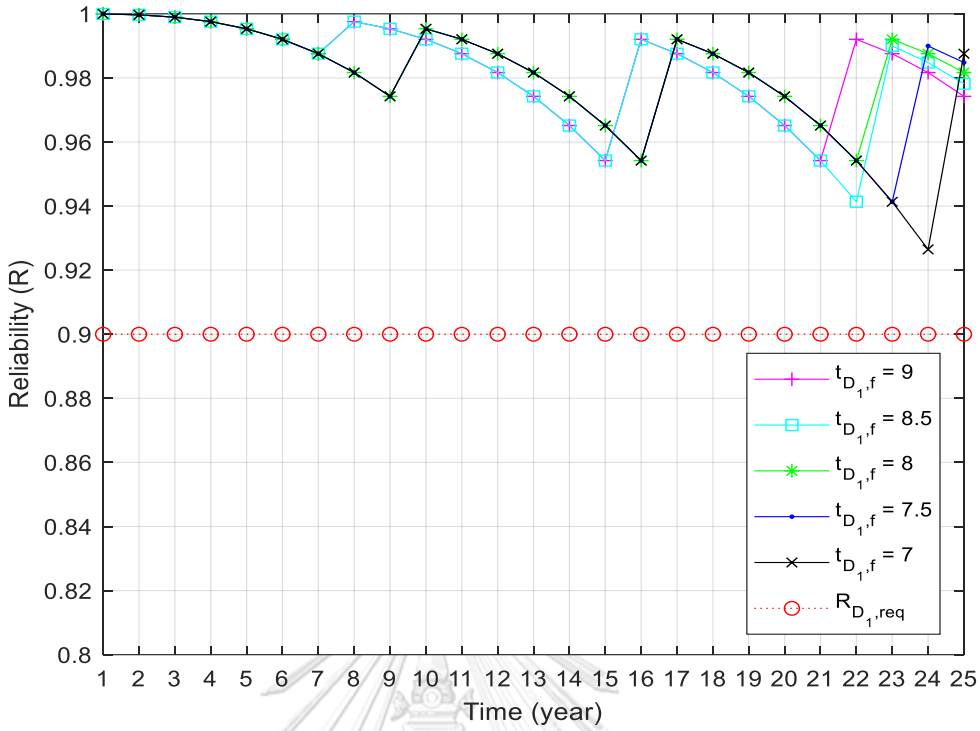
ตารางที่ 5.5 แผนงานบำรุงรักษาเหมาะที่สุดของอุปกรณ์ภายใต้เงื่อนไขอายุประสิทธิผลสุดท้าย

อายุประสิทธิผลสุดท้ายของอุปกรณ์ ($t_{D_1,f}$)	ปีทำการบำรุงรักษาอุปกรณ์ (ปี)		
	หม้อแปลงกำลังไฟฟ้ากำลัง	เซอร์กิตเบรกเกอร์	บัสบาร์
9	6, 11, 15, 21	8, 16, 22	7, 10, 13, 16, 20
8.5	8, 12, 16, 21	8, 16, 23	7, 10, 13, 17, 20
8	8, 12, 16, 22	10, 17, 23	7, 10, 13, 17, 21
7.5	8, 12, 18, 22	10, 17, 24	7, 10, 14, 18, 21
7	8, 12, 18, 23	10, 17, 25	7, 10, 14, 18, 22

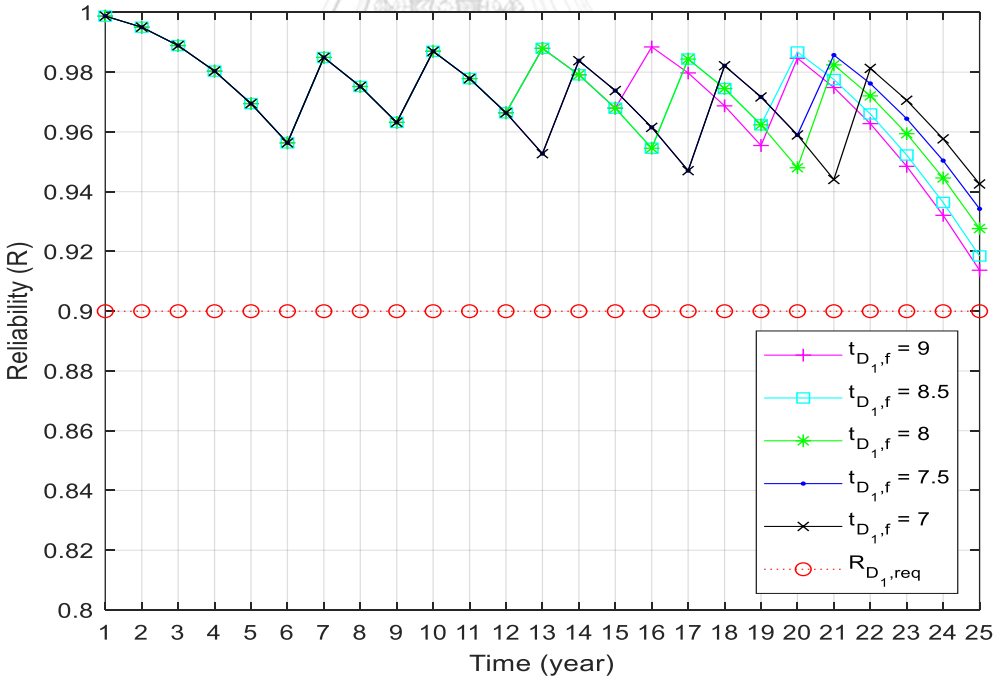
ความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ตลอดช่วงระยะเวลาการวางแผน 25 ปีที่ได้จากการสร้างโปรแกรมพลวัตภายใต้เงื่อนไขอายุประสิทธิผลสุดท้ายของอุปกรณ์หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เซอร์กิตเบรกเกอร์ และบัสบาร์ แสดงได้ดังรูปที่ 5.5-5.7 ตามลำดับ



รูปที่ 5.5 ความเชื่อถือได้ของการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 5.6 ความเชื่อถือได้ของการบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์



รูปที่ 5.7 ความเชื่อถือได้ของการบำรุงรักษาบัสบาร์

จากตารางที่ 5.4 เมื่ออายุประสิทธิผลสุดท้ายของอุปกรณ์มีค่าลดลง ค่าใช้จ่ายวงชีพระดับอุปกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาสัดส่วนระหว่างค่าใช้จ่ายวงชีพของแต่ละอุปกรณ์เป็นดังนี้

ตารางที่ 5.6 สัดส่วนค่าใช้จ่ายวงชีพของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังภายใต้เงื่อนไขอายุประสิทธิผลสุดท้าย

อายุประสิทธิผลสุดท้ายของอุปกรณ์ ($t_{D_1,f}$)	หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	
	ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแก้ไข (ล้านบาท)	ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาป้องกัน (ล้านบาท)
9	2.1637	10.554
8.5	2.0546	10.7961
8	2.1267	10.8753
7.5	2.1567	11.0169
7	2.2505	11.0981

ตารางที่ 5.7 สัดส่วนค่าใช้จ่ายวงชีพของเซอร์กิตเบรกเกอร์ภายใต้เงื่อนไขอายุประสิทธิผลสุดท้าย

อายุประสิทธิผลสุดท้ายของอุปกรณ์ ($t_{D_1,f}$)	เซอร์กิตเบรกเกอร์	
	ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแก้ไข (ล้านบาท)	ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาป้องกัน (ล้านบาท)
9	0.0336	0.3097
8.5	0.0358	0.3127
8	0.0344	0.3196
7.5	0.0369	0.3227
7	0.0401	0.3259

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.8 สัดส่วนค่าใช้จ่ายวงชีพของบัสบาร์ภายใต้เงื่อนไขอายุประสิทธิผลสุดท้าย

อายุประสิทธิผลสุดท้ายของอุปกรณ์ ($t_{D_1,f}$)	บัสบาร์	
	ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแก้ไข (ล้านบาท)	ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาป้องกัน (ล้านบาท)
9	0.006	0.0446
8.5	0.0599	0.0448
8	0.0602	0.0451
7.5	0.0602	0.0456
7	0.0609	0.0458

จากตารางที่ 5.6 -5.8 จะเห็นได้ว่าเมื่ออายุประสิทธิผลสุดท้ายลดลงของอุปกรณ์หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เซอร์กิตเบรกเกอร์ และบัสบาร์ ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบป้องกันมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีจำนวนครั้งของการบำรุงรักษาแบบป้องกันเพิ่มขึ้นและเมื่อมีการตัดสินใจบำรุงรักษาแบบป้องกันที่ล่าช้า ทำให้ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบป้องกันเพิ่มขึ้น อันเนื่องจากอัตราเงินเฟ้อ ในขณะเดียวกันเมื่อทำการบำรุงรักษาในปีหลัง อุปกรณ์มีค่าอายุประสิทธิผลลดลงไม่มาก เช่น การบำรุงรักษาแบบป้องกันปีที่ 6 มีอายุประสิทธิผลของอุปกรณ์คือ 6 ปี เมื่อทำการบำรุงรักษาแบบป้องกัน อายุประสิทธิผลปีถัดไปเป็น 3.5 ปี ในขณะที่บำรุงรักษาแบบป้องกันปี 8 อายุประสิทธิผลของอุปกรณ์เป็น 8 ปี มีอายุประสิทธิผลปีถัดไปลดลงเหลือ 4.5 เมื่อคำนวณหาค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบแก้ไขก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ค่าพารามิเตอร์ของแต่ละอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน เช่น พารามิเตอร์รูปร่าง พารามิเตอร์มาตราส่วน ค่าใช้จ่ายของแต่ละอุปกรณ์ และตัวประกอบการปรับปรุง ส่งผลให้การคำนวณความเชื่อถือของอุปกรณ์แต่ละระยะเวลาแตกต่างกัน ดังนั้นการหาผลลัพธ์ด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต โดยที่ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายวงชีพมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น จึงได้แผนงานการบำรุงรักษาที่เหมาะที่สุดของแต่ละอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าแตกต่างกัน

5.2.2 เงื่อนไขความเชื่อถือได้ที่ต้องการของอุปกรณ์

การทดลองแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ 0.95, 0.9 และ 0.85 ตามลำดับ โดยกำหนดอายุประสิทธิผลสุดท้ายของอุปกรณ์ ($t_{D_1,f}$) เป็น 10 ปี โดยมีค่าใช้จ่ายวงชีพแสดงได้ดังตารางที่ 5.9

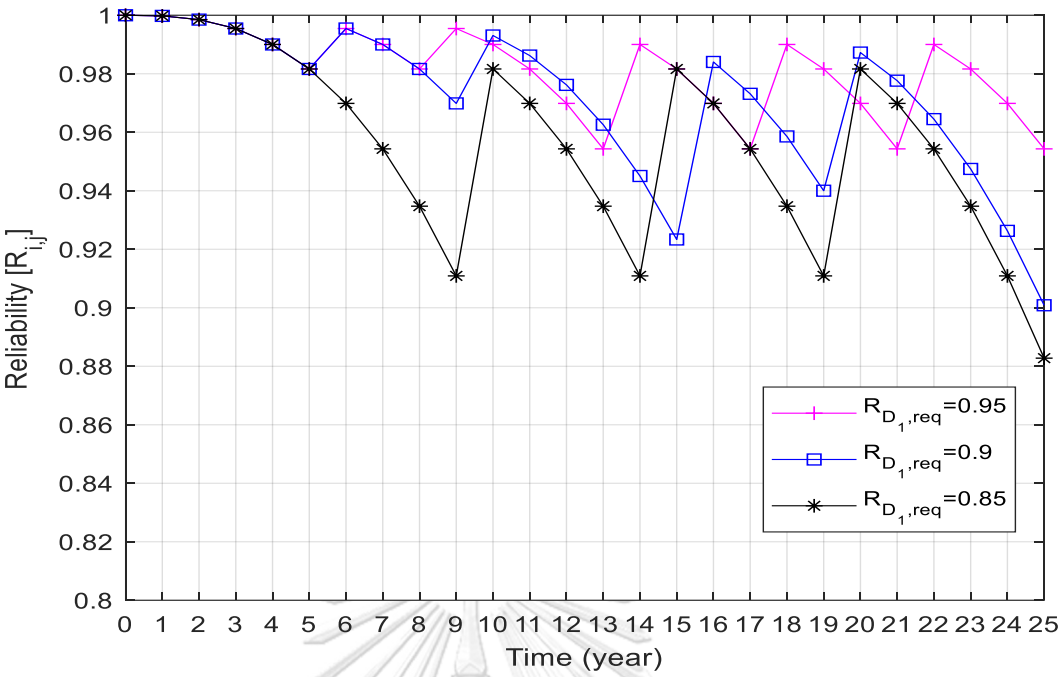
ตารางที่ 5.9 ผลทดสอบค่าใช้จ่ายวงชีพเหมาะที่สุดของอุปกรณ์โดยมีเงื่อนไขความเชื่อถือได้ที่ต้องการ

ความเชื่อถือได้ที่ต้องการของอุปกรณ์ ($R_{D_1,req}$)	หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (ล้านบาท)	เซอร์กิตเบรกเกอร์ (ล้านบาท)	บัสบาร์ (ล้านบาท)
0.95	15.0552*	0.3335	0.1080*
0.9	12.6374*	0.2797*	0.1045*
0.85	10.9746	0.2766	0.1045*

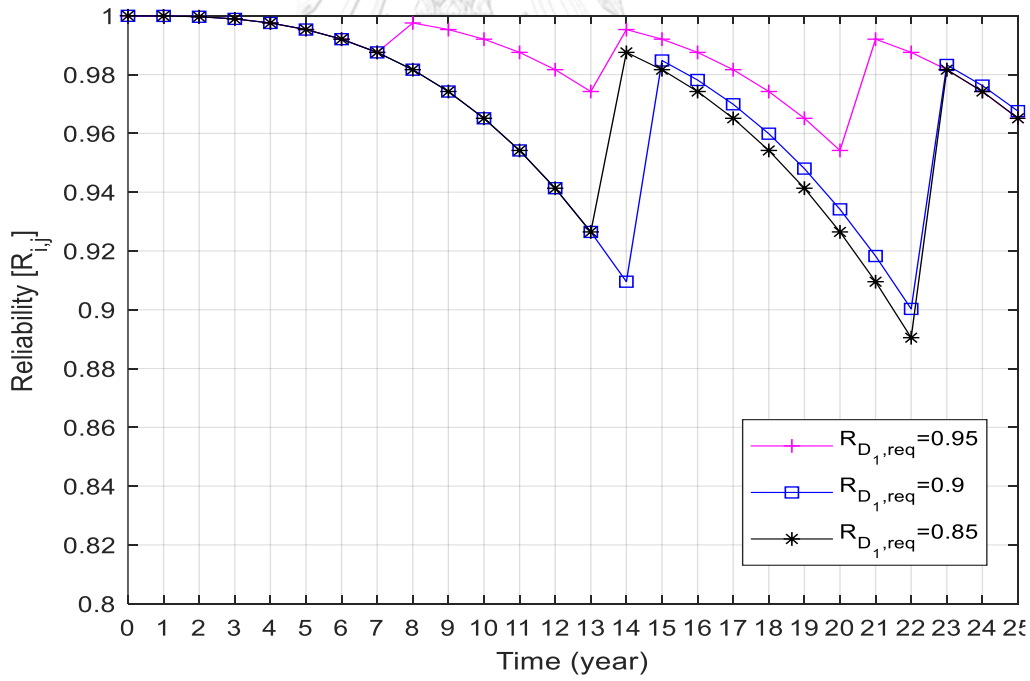
หมายเหตุ * อายุประสิทธิผลสุดท้ายของอุปกรณ์มีค่าต่ำกว่าขอบเขตของเงื่อนไขบังคับ

ความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ตลอดช่วงระยะเวลาการวางแผนแบบเหมาะที่สุด 25 ปีที่ได้จากการสร้างโปรแกรมพลวัตภายใต้เงื่อนไขของความเชื่อถือได้ที่ต้องการของอุปกรณ์ หม้อแปลงกำลังไฟฟ้า เซอร์กิตเบรกเกอร์ และบัสบาร์แสดงได้ดังรูปที่ 5.8-5.10 ตามลำดับ

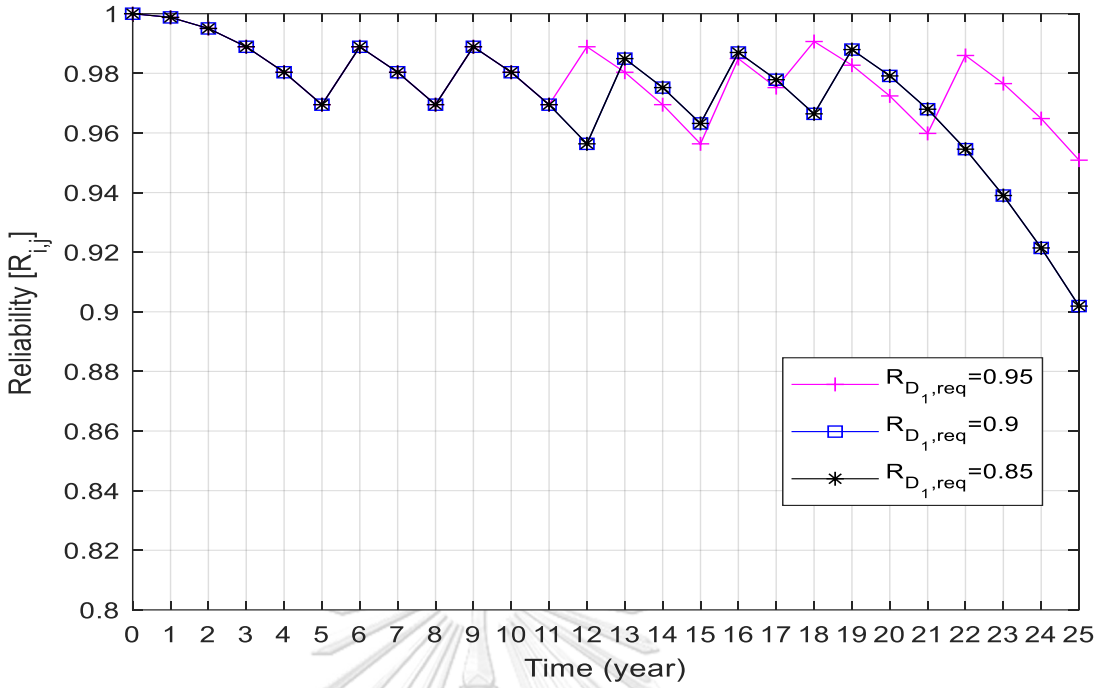
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 5.8 ความเชื่อถือได้ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังภายใต้เงื่อนไขความเชื่อถือได้ที่ต้องการ



รูปที่ 5.9 ความเชื่อถือได้ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ภายใต้เงื่อนไขความเชื่อถือได้ที่ต้องการ



รูปที่ 5.10 ความเชื่อถือได้ของบัสบาร์ภายใต้เงื่อนไขความเชื่อถือได้ที่ต้องการ

ผลลัพธ์ข้างต้นเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายและความเชื่อถือได้ระดับอุปกรณ์ แต่ละอุปกรณ์จะมีแผนงานบำรุงรักษาที่เหมาะที่สุดแตกต่างกัน โดยสามารถสรุปแผนงานบำรุงรักษาในช่วงเวลา 25 ปี ภายใต้เงื่อนไขความเชื่อถือได้ที่ต้องการแตกต่างกันดังตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 แผนงานบำรุงรักษาระดับอุปกรณ์ของอุปกรณ์ภายใต้เงื่อนความเชื่อถือได้ที่ต้องการ

ความเชื่อถือได้ที่ต้องการของอุปกรณ์ ($R_{D_{req}}$)	ปีทำการบำรุงรักษาอุปกรณ์ (ปี)		
	หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	เซอร์กิตเบรกเกอร์	บัสบาร์
0.95	6, 9, 14, 18, 22	8, 14, 21	6, 9, 12, 16, 18, 22
0.9	6, 10, 16, 20	15, 23	6, 9, 13, 16, 19
0.85	10, 15, 20	14, 23	6, 9, 13, 16, 19

เมื่อกำหนดความเชื่อถือได้ที่ต้องการของอุปกรณ์มีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายวงชีพระดับอุปกรณ์แต่ละอุปกรณ์แสดงได้ดังนี้

ตารางที่ 5.11 สัดส่วนค่าใช้จ่ายวงชีพของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังภายใต้เงื่อนความเชื่อถือได้ที่ต้องการ

ความเชื่อถือได้ที่ต้องการของอุปกรณ์ ($R_{D_1,req}$)	หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	
	ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแก้ไข (ล้านบาท)	ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาป้องกัน (ล้านบาท)
0.95	1.665	13.3887
0.9	2.1513	10.4861
0.85	2.7428	8.2318

ตารางที่ 5.12 สัดส่วนค่าใช้จ่ายวงชีพของเซอร์กิตเบรกเกอร์ภายใต้เงื่อนความเชื่อถือได้ที่ต้องการ

ความเชื่อถือได้ที่ต้องการของอุปกรณ์ ($R_{D_1,req}$)	เซอร์กิตเบรกเกอร์	
	ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแก้ไข (ล้านบาท)	ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาป้องกัน (ล้านบาท)
0.95	0.0317	0.3018
0.9	0.0548	0.2249
0.85	0.0542	0.2224

ตารางที่ 5.13 สัดส่วนค่าใช้จ่ายวงชีพของบัสบาร์ภายใต้เงื่อนความเชื่อถือได้ที่ต้องการ

ความเชื่อถือได้ที่ต้องการของอุปกรณ์($R_{D_1,req}$)	บัสบาร์	
	ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแก้ไข (ล้านบาท)	ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาป้องกัน (ล้านบาท)
0.95	0.0535	0.0545
0.9	0.0605	0.0440
0.85	0.0605	0.0440

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากตารางที่ 5.11 -5.13 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเชื่อถือได้ที่ต้องการของอุปกรณ์ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เซอร์กิตเบรกเกอร์ และบัสบาร์มีค่าลดลง ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบป้องกันมีค่าลดลง เพราะจำนวนครั้งหรือความถี่ของการบำรุงรักษาแบบป้องกันที่ลดลง ส่งผลให้อายุประสิทธิผลของแต่ละอุปกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาของการบำรุงรักษา และค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบแก้ไขเพิ่มขึ้น การกำหนดความเชื่อถือได้ที่แตกต่างกันโดยคงที่อายุประสิทธิผลของอุปกรณ์นั้นส่งผลให้ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบแก้ไขและค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบป้องกันมีลักษณะความสัมพันธ์แบบผกผัน นอกจากนี้อัตราเงินเฟ้อที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปีส่งผลให้ค่าใช้จ่ายวงชีพนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น

5.2.3 การเปรียบเทียบคำตอบระหว่างวิธีสร้างโปรแกรมพลวัต วิธีพันธุกรรมและการบำรุงรักษาตามเวลา

วิธีพันธุกรรม [28] พัฒนาโดย John Holland ในปี 1975 ซึ่งประยุกต์แนวคิดของวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตในระบบชีววิทยากับการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้หลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติและหลักการทางสายพันธุ์ เป็นการคำนวณอย่างหนึ่ง กล่าวได้ว่า มีวิวัฒนาการอยู่ในขั้นตอนของการค้นหาคำตอบ ปัจจุบันได้นิยมนำไปประยุกต์ใช้ และแก้ไขปัญหาด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น การประมวลผลสัญญาณดิจิตอล, การประมวลผลสัญญาณภาพและการมองเห็น, ระบบควบคุม, การสื่อสารและโทรคมนาคม ระบบไฟฟ้ากำลัง เป็นต้น วิธีพันธุกรรมถือว่าเป็นการค้นหาค่าเหมาะที่สุดเชิงผสมผสาน (Combinatorial optimization) แบบปัญญาเชิงคำนวณ และอาจค้นหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพ และลดความยุ่งยากในขั้นตอนต่างๆ ของการค้นหาลงไป

เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิผลของแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า ระหว่างวิธีพันธุกรรมกับวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า โดยกำหนดตัวแปรการค้นหาคำตอบด้วยวิธีพันธุกรรมได้แก่ จำนวนโครโมโซมเริ่มต้น จำนวนรุ่นสูงสุดที่ใช้ในการคำนวณ 5,000, ความน่าจะเป็นของการข้ามสายพันธุ์ 0.3 และความน่าจะเป็นการผ่าเหล่า 0.8 ดังตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.14 ค่าตัวแปรของการค้นหาคำตอบด้วยวิธีพันธุกรรม

พารามิเตอร์ของวิธีพันธุกรรม	ค่าที่กำหนด
จำนวนโครโมโซมเริ่มต้น	500
จำนวนรุ่นสูงสุดที่ใช้ในการคำนวณ	5000
ความน่าจะเป็นของการข้ามสายพันธุ์	0.3
ความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่า	0.8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

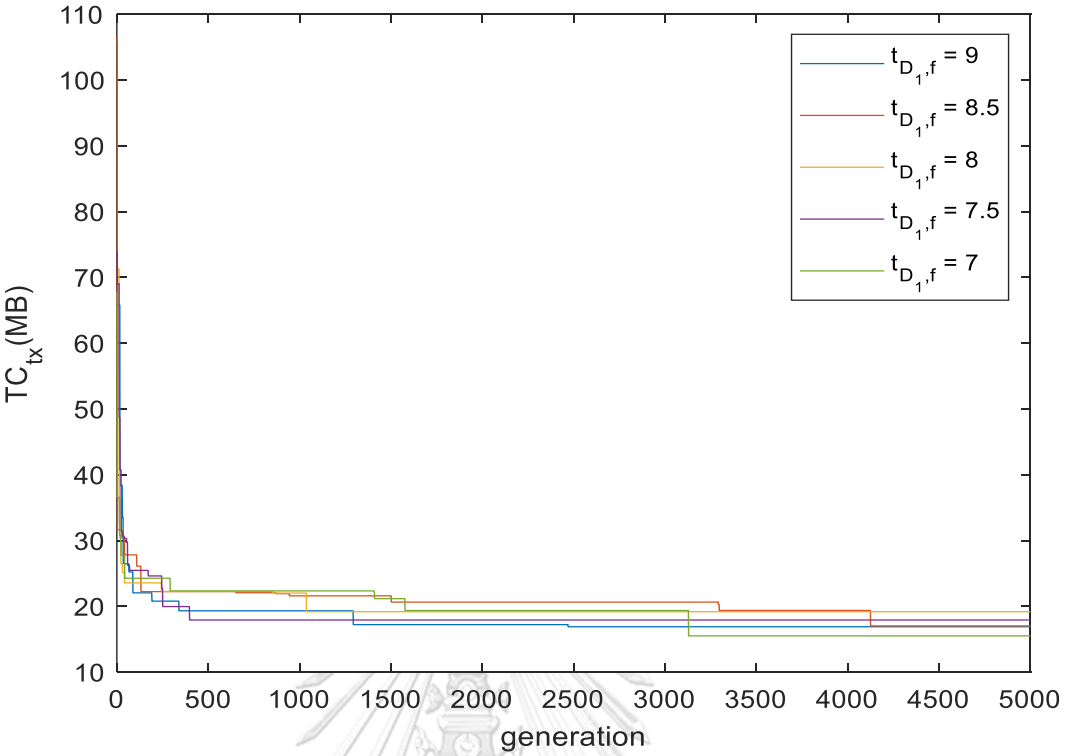
เปรียบเทียบผลลัพธ์ค่าใช้จ่ายวงชีพและแผนการบำรุงรักษาระหว่างวิธีพันธุกรรมกับการสร้างโปรแกรมพลวัตของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Tx) เซอร์กิตเบรกเกอร์ (CB) และ บัสบาร์ (Busbar) ดังตารางที่ 5.15 และการลู่เข้าของคำตอบของวิธีพันธุกรรมดังรูปที่ 5.11-5.13

ตารางที่ 5.15 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตกับวิธีพันธุกรรม ภายใต้อายุประสิทธิผล

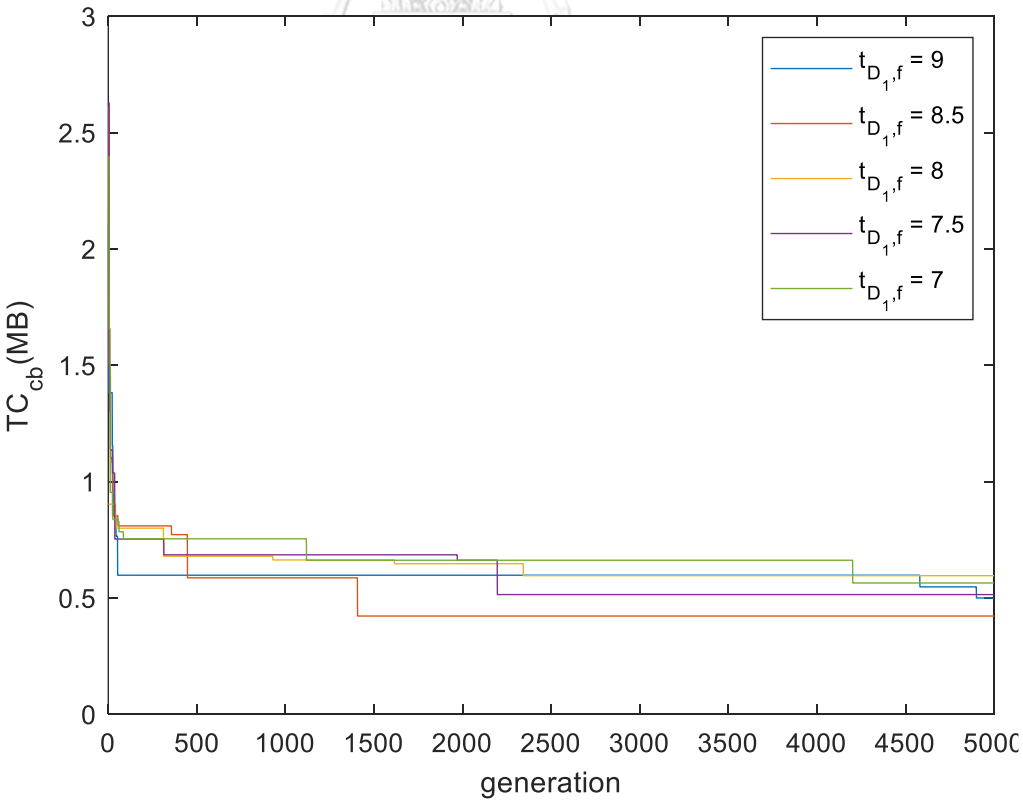
อุปกรณ์	อายุประสิทธิผลสุดท้ายของอุปกรณ์($t_{D_1,f}$)	การสร้างโปรแกรมพลวัต		วิธีพันธุกรรม	
		ปีบำรุงรักษาอุปกรณ์ (ปี)	ค่าใช้จ่ายวงชีพ (ล้านบาท)	ปีบำรุงรักษาอุปกรณ์(ปี)	ค่าใช้จ่ายวงชีพ (ล้านบาท)
Tx	9	6, 11, 15, 21	12.7191	3, 9, 11, 12, 17, 21	16.9025*
	8.5	8, 12, 16, 21	12.8508	2, 6, 9, 13, 18, 23	17.0319*
	8	8, 12, 16, 22	13.0020	4, 7, 8, 9, 14, 16, 23	19.1884*
	7.5	8, 12, 18, 22	13.1736	5, 7, 11, 15, 21, 25	17.9265*
	7	8, 12, 18, 23	13.3486	4, 7, 14, 19, 24	15.5165*
CB	9	8, 16, 22	0.3433	2, 5, 7, 19, 22	0.4997*
	8.5	8, 16, 23	0.3485	7, 8, 17, 22	0.4221*
	8	10, 17, 23	0.3541	8, 9, 10, 12, 17, 21	0.5956*
	7.5	10, 17, 24	0.3596	6, 9, 14, 18, 22	0.5143*
	7	10, 17, 25	0.3660	10, 11, 20, 22, 23	0.5642*
Busbar	9	7, 10, 13, 16, 20	0.1046*	4, 12, 15, 18, 19, 22	0.1138*
	8.5	7, 10, 13, 17, 20	0.1047*	6, 8, 14, 16, 17, 20	0.1087*
	8	7, 10, 13, 17, 21	0.1053*	2, 3, 4, 9, 13, 16, 22	0.1168*
	7.5	7, 10, 14, 18, 21	0.1057*	5, 12, 14, 17, 21, 22	0.1127*
	7	7, 10, 14, 18, 22	0.1067*	3, 5, 6, 11, 12, 17, 20, 22	0.1171*

หมายเหตุ * อายุประสิทธิผลสุดท้ายของอุปกรณ์ มีค่าต่ำกว่าขอบเขตของเงื่อนไขบังคับ

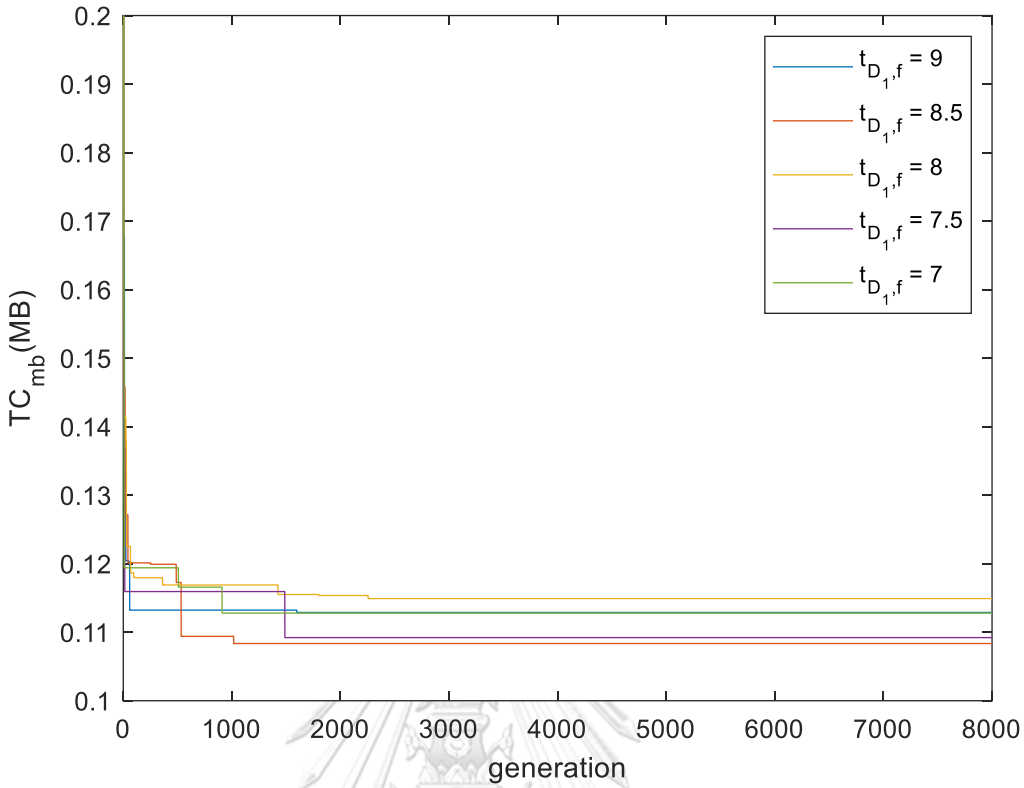
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 5.11 การลู่เข้าของคำตอบของค่าใช้จ่ายววงชีพของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 5.12 การลู่เข้าของคำตอบของค่าใช้จ่ายวงชีพของเซอร์กิตเบรกเกอร์



รูปที่ 5.13 การลู่เข้าของคำตอบของค่าใช้จ่ายวงชีพของบัสบาร์

จากผลทดสอบค่าใช้จ่ายวงชีพของแต่ละอุปกรณ์ ในตารางที่ 5.15 พบว่า วิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตได้คำตอบของค่าใช้จ่ายวงชีพที่ต่ำกว่าของวิธีพันธุกรรม วิธีพันธุกรรมให้คำตอบของแต่ละอุปกรณ์ที่ลู่เข้าสู่คำตอบ ดังรูปที่ 5.11-5.13 การค้นหาคำตอบด้วยวิธีพันธุกรรมนั้นจะขึ้นพารามิเตอร์พันธุกรรมภายในตารางที่ 5.14 โดยค่าความผิดพลาด (Error) ระหว่างวิธีพันธุกรรมและวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีค่าความผิดพลาด 16-48%
- เซอร์กิตเบรกเกอร์ค่าความผิดพลาด 21-68%
- บัสบาร์มีค่าความผิดพลาด 4-11%

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตและวิธีพันธุกรรมของค่าใช้จ่ายวงชีพของอุปกรณ์ พบว่า วิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตให้ค่าคำตอบที่เหมาะสมกว่าวิธีพันธุกรรม ในขณะที่การค้นหาคำตอบของวิธีพันธุกรรมจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์พันธุกรรม และการค้นหาคำตอบในแต่ละรอบมีโอกาสไม่สูงที่จะพบคำตอบที่ต่ำที่สุด จึงทำให้คำตอบภายในตารางไม่ต่ำที่สุด ถ้าหากเพิ่มจำนวนรอบและประชากรเริ่มต้นให้มากขึ้นกว่านี้ จะทำให้หาคำตอบที่ต่ำที่สุดของปัญหา และใกล้เคียงกับวิธีสร้างโปรแกรมพลวัต ดังผลลัพธ์การบำรุงรักษาบัสบาร์ภายในตารางที่ 5.15 กรณีที่อายุประสิทธิผลสุดท้ายของอุปกรณ์เป็น 8.5 ปี เมื่อปรับเพิ่มจำนวนรุ่นสูงสุดเป็น 8,000 และจำนวนประชากรเริ่มต้นเป็น

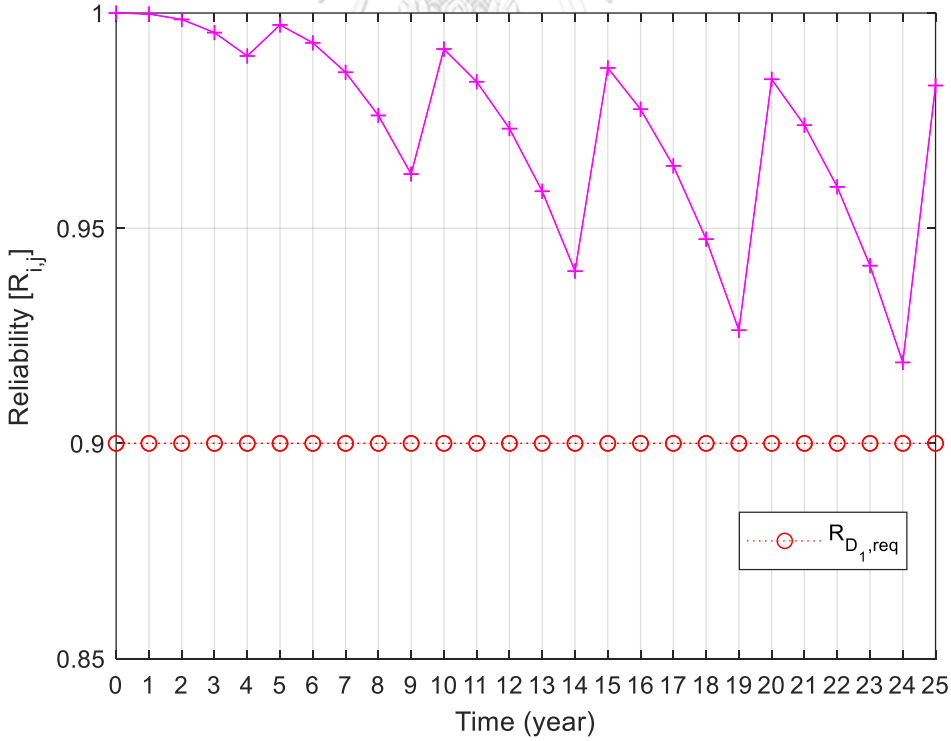
1,000 ประชากรทำ แต่สำหรับวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต หากปัญหาที่เรากำหนดนั้นมีจำนวนตัวแปรมากขึ้น เวลาหาค่าเหมาะที่สุดของปัญหาก็เพิ่มขึ้นตามเช่นกัน

การเปรียบเทียบคำตอบระหว่างวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตกับการวางแผนบำรุงรักษาตามเวลา

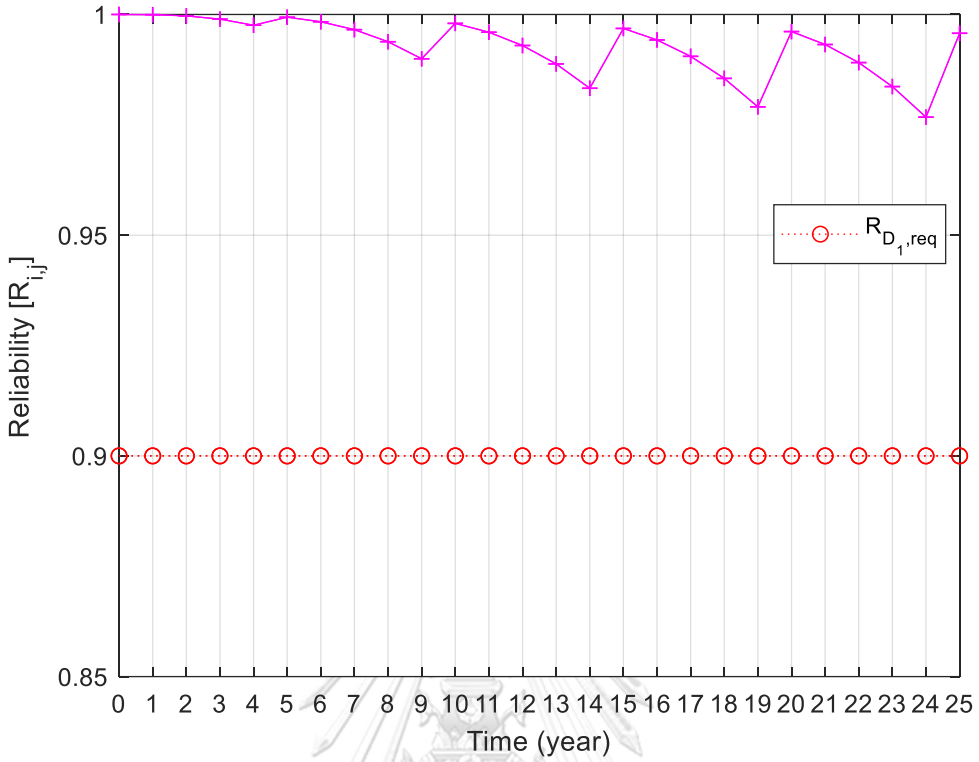
ปัจจุบันการบำรุงรักษาตามเวลานั้นเป็นที่นิยมมากในปัจจุบัน ซึ่งในการทดสอบเราได้กำหนดให้แผนการบำรุงรักษาแต่ละอุปกรณ์นั้นบำรุงรักษาทุกๆ 5 ปี ได้ผลลัพธ์ค่าใช้จ่ายวงชีพของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าดังตารางที่ 5.16 และความเชื่อถือได้ของแต่ละอุปกรณ์ตลอดการบำรุงรักษาตามเวลาได้ดังรูปที่ 5.14-5.16

ตารางที่ 5.16 ผลลัพธ์ค่าใช้จ่ายวงชีพจากการบำรุงรักษาตามเวลาของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า

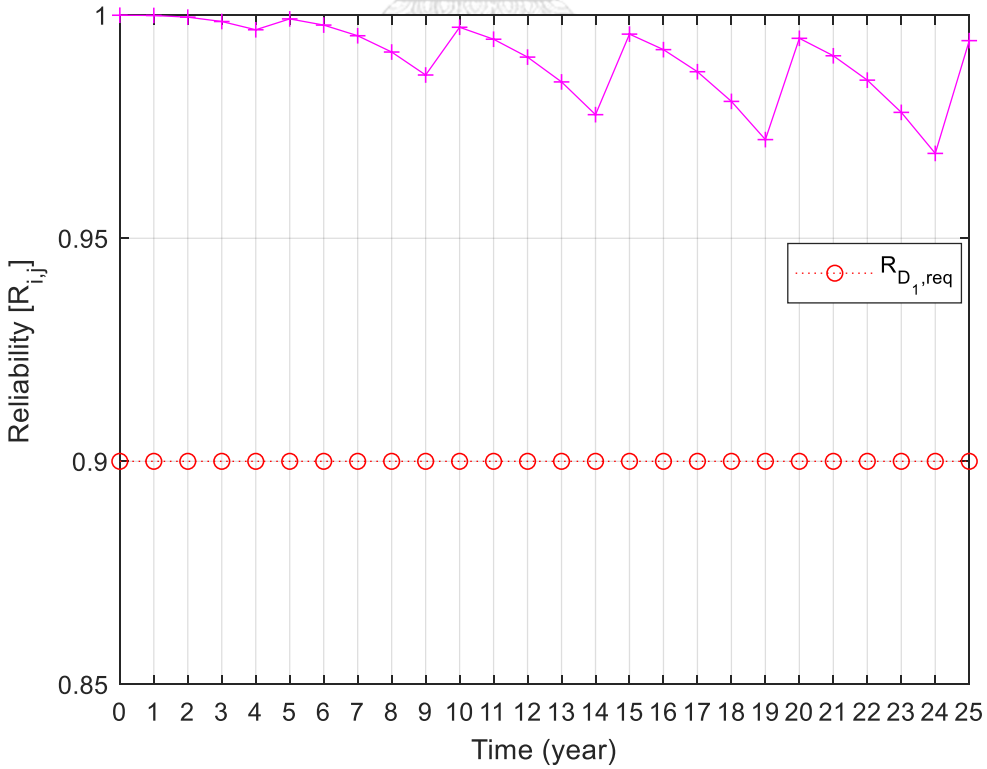
อุปกรณ์	ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบแก้ไข (ล้านบาท)	ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบป้องกัน (ล้านบาท)	ค่าใช้จ่ายวงชีพ (ล้านบาท)
หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	2.032	13.8562	15.8911
เซอร์กิตเบรกเกอร์	0.0214	0.5147	0.5360
บัสบาร์	0.0686	0.0471	0.1156



รูปที่ 5.14 ความเชื่อถือได้ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจากการบำรุงรักษาตามเวลา



รูปที่ 5.15 ความเชื่อถือได้ของเซอร์กิตเบรกเกอร์จากการบำรุงรักษาตามเวลา



รูปที่ 5.16 ความเชื่อถือได้ของบัสบาร์จากการบำรุงรักษาตามเวลา

คำตอบค่าใช้จ่ายวงชีพระดับอุปกรณ์ที่ได้จากวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตนั้นมีค่าที่น้อยกว่าจากการวางแผนบำรุงรักษาตามเวลา เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์จากตารางที่ 5.4 และ 5.9 ค่าใช้จ่ายวงชีพจากการบำรุงรักษาตามเวลามีความแตกต่างจากวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตของแต่ละอุปกรณ์ดังนี้

- หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีค่าความแตกต่างระหว่าง 19.05-24.94%
- เซอร์กิตเบรกเกอร์ค่าความแตกต่างระหว่าง 46.45-56.13%
- บัสบาร์มีค่าความแตกต่างระหว่าง 8.34-10.52%

การบำรุงรักษาตามเวลาของอุปกรณ์หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและเซอร์กิตเบรกเกอร์มีค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบแก้ไขที่น้อยกว่าการบำรุงรักษาแบบเหมาะที่สุดจากวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต เนื่องจากมีความถี่ของการบำรุงรักษาแบบป้องกันที่สูง ทำให้อายุประสิทธิผลระยะถัดไปมีค่าลดลง และส่งผลให้ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบป้องกันของการบำรุงรักษาตามเวลามีค่าเพิ่มขึ้นและมากกว่าค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาจากวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต

ส่วนในกรณีของบัสบาร์มีค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบแก้ไขภายใต้การบำรุงรักษาตามเวลามีค่ามากกว่าการบำรุงรักษาแบบเหมาะที่สุดด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต เพราะ ระยะห่างระหว่างการบำรุงรักษาแบบป้องกันแต่ละครั้งมีระยะเวลาที่สั้นกว่า เช่น การบำรุงรักษาตามเวลานั้นจะมีระยะห่างระหว่างการบำรุงรักษาเป็น 5 ปี แต่ระยะห่างระหว่างการบำรุงรักษาแบบเหมาะที่สุดจะมีค่าแตกต่างกันและสั้นกว่า ทำให้อายุประสิทธิผลระยะถัดไปมีค่าลดลง และค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบแก้ไขมีค่าลดลง ขณะที่ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบป้องกันมีค่ามากกว่าการบำรุงรักษาแบบเหมาะที่สุด เนื่องจากมีความถี่ของการบำรุงรักษาแบบป้องกันที่เพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้นค่าใช้จ่ายวงชีพของการบำรุงรักษาตามเวลามีค่าสูงกว่าค่าใช้จ่ายวงชีพจากการบำรุงรักษาแบบเหมาะที่สุดด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต

นอกจากนี้ความเชื่อถือได้ของทั้ง 2 กรณีที่ค่าเกินความเชื่อถือได้ที่ต้องการ คือ 0.9 ทั้งสองรูปแบบ เพราะฉะนั้นการบำรุงรักษาแบบเหมาะที่สุดจากวิธีสร้างโปรแกรมพลวัตจึงดีกว่าในแง่ของค่าใช้จ่ายวงชีพระดับอุปกรณ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.3 การทดสอบและวิเคราะห์การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาระดับสถานีไฟฟ้า

การทดสอบเพื่อประเมินการกำหนดแผนงานบำรุงรักษาอุปกรณ์สถานีไฟฟ้าด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต โดยกำหนดพารามิเตอร์ค่าอายุประสิทธิผลสุดท้ายของอุปกรณ์($t_{D_i,f}$) มีค่าเป็น 10 ปี ตัวประกอบการปรับปรุงบำรุงรักษา(α_i) 0.5 และความเชื่อถือของอุปกรณ์ที่ต้องการที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 เป็น 0.9 ทั้งนี้เนื่องจากดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าแต่ละภูมิภาคมีค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้นภายในวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้กำหนดเกณฑ์ $SAIFI_{req}$ มีค่าเป็น 0.15 เพื่อกำหนดแผนงานบำรุงรักษาระดับสถานีไฟฟ้า โดยแบ่งการทดสอบแบ่งเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบบัสประธานและบัสถ่ายโอน รูปแบบบัสประธานคู่ และรูปแบบบัสและเบรกเกอร์ครึ่ง

ผลการทดสอบแต่ละหัวข้อนี้จะประกอบด้วย กลุ่มเซตตัดต่ำสุดภายในสถานีไฟฟ้า โดยมีการเปรียบเทียบผลสอบระหว่างวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต วิธีพันธุกรรม และการบำรุงรักษาตามเวลาด้วยการกำหนดพารามิเตอร์วิธีพันธุกรรมดังตารางที่ 5.14 และการบำรุงรักษาตามเวลาของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าทุกๆ 5 ปี ดังนี้

5.3.1 การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานและบัสถ่ายโอน เซตตัดต่ำสุดของสถานีไฟฟ้า

เซตตัดต่ำสุดของสถานีไฟฟ้าแต่ละจุดโหลดมีผลลัพธ์ดังตารางที่ 5.17 ดังนี้

ตารางที่ 5.17 เซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟและพาสซีฟสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานและบัสถ่ายโอน

ปีที่	จุดโหลด	เหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอกทีฟ	เหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ
1-9	1	[Tx1], [CB1], [CB2], [CB3], [CB4], [Bus]	[Tx1], [CB2], [Bus]
	2	[Tx2], [CB1], [CB2], [CB3], [CB4], [Bus]	[Tx2], [CB4], [Bus]
10-18	1	[Tx1], [CB1], [CB2], [CB3], [CB4], [Bus], [CB5], [CB6]	[Tx1], [CB2], [Bus]
	2	[Tx2], [CB1], [CB2], [CB3], [CB4], [Bus], [CB5], [CB6]	[Tx2], [CB4], [Bus]
	3	[Tx3], [CB1], [CB2], [CB3], [CB4], [Bus], [CB5], [CB6]	[Tx3], [CB6], [Bus]
19-25	1	[Tx1], [CB1], [CB2], [CB3], [CB4], [Bus], [CB5], [CB6], [CB7], [CB8]	[Tx1], [CB2], [Bus]
	2	[Tx2], [CB1], [CB2], [CB3], [CB4], [Bus], [CB5], [CB6], [CB7], [CB8]	[Tx2], [CB4], [Bus]
	3	[Tx3], [CB1], [CB2], [CB3], [CB4], [Bus], [CB5], [CB6], [CB7], [CB8]	[Tx3], [CB6], [Bus]
	4	[Tx4], [CB1], [CB2], [CB3], [CB4], [Bus], [CB5], [CB6], [CB7], [CB8]	[Tx4], [CB8], [Bus]

จากตารางที่ 5.17 สถานีไฟฟ้ารูปแบบนี้เมื่อมีการเพิ่มอุปกรณ์ใหม่ภายในปีที่ 10 และ 19 ทำให้เซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟและแอกทีฟมีจำนวนเพิ่มขึ้น อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับเซตตัดต่ำสุดมี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จำนวนเพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้นการกำหนดความเชื่อถือได้ที่ต้องการของแต่ละอุปกรณ์ต้องมีค่าเพิ่มขึ้นและเปลี่ยนแปลงตามเวลา เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขความเชื่อถือได้ที่ต้องการของอุปกรณ์ ดังนี้

ตารางที่ 5.18 ความเชื่อถือได้ที่ต้องการของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานและบัสถ่ายโอนภายในระยะเวลาวางแผนบำรุงรักษา

อุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า	ค่าความเชื่อถือได้ที่ต้องการของอุปกรณ์ ($R_{D_i,req}$)		
	ปีที่ 1-9	ปีที่ 10-18	ปีที่ 19-25
หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	0.9422	0.9666	0.977
เซอร์กิตเบรกเกอร์	0.8984	0.9396	0.9591
บัสบาร์	0.9116	0.9556	0.9735

การเปรียบเทียบผลทดสอบระหว่างวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต วิธีพันธุกรรมและการบำรุงรักษาตามเวลา

ผลทดสอบการกำหนดแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต ดังตารางที่ 5.19 วิธีพันธุกรรมดังตารางที่ 5.20 และการบำรุงรักษาตามเวลาดังตารางที่ 5.21

ตารางที่ 5.19 ผลทดสอบการวางแผนบำรุงรักษาของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานและบัสถ่ายโอนด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต

อุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า	ปีทำการบำรุงรักษา (ปี)	ค่าใช้จ่ายวงชีพ (ล้านบาท)
Tx1, Tx2	8, 10, 17, 20, 23	36.7251*2
Tx3	12, 17, 20, 23	25.2498
Tx4	22	6.7858
CB1, CB3	10, 15, 20	0.3579*2
CB2, CB4	10, 15, 20	0.5346*2
CB5	13, 19	0.2355
CB6	13, 19	0.3528
CB7	-	0.0076
CB8	-	0.0076
Main bus	8, 10, 13, 17, 19, 20, 23	1.5339
ผลรวมค่าใช้จ่ายวงชีพทั้งหมดของสถานีไฟฟ้า (TC_s)		109.4084

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 5.20 ผลทดสอบการวางแผนบำรุงรักษาของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานและบัสถ่ายโอนด้วยวิธีพันธุกรรม

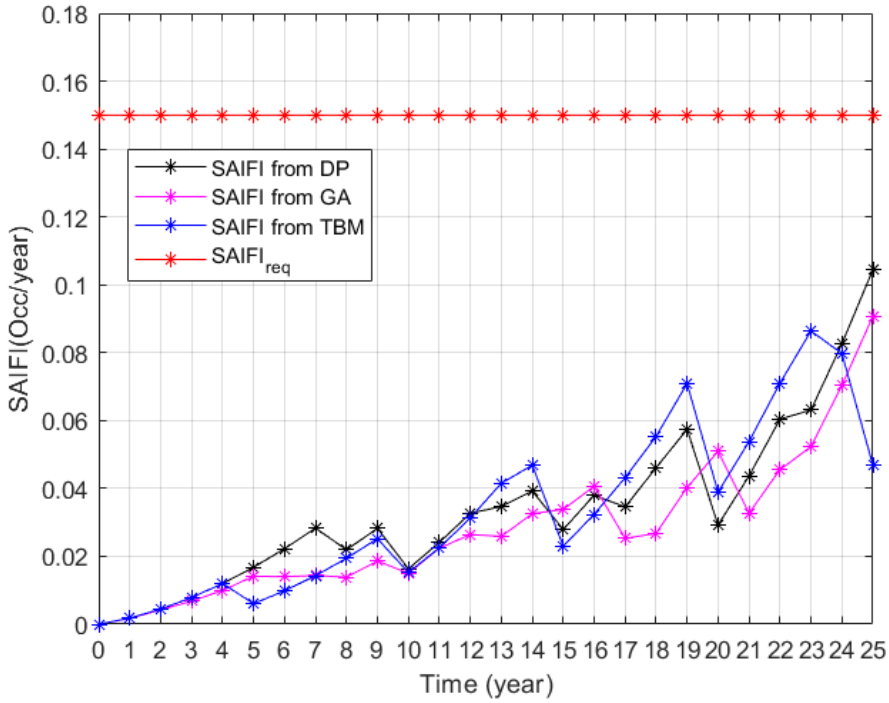
อุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า	ปีทำการบำรุงรักษา (ปี)	ค่าใช้จ่ายวงชีพ (ล้านบาท)
Tx1, Tx2	6, 8, 10, 13, 16, 19, 21, 22	46.8437*2
Tx3	14, 18, 21, 23	26.0650
Tx4	22	6.7858
CB1, CB3	3, 4, 8, 17, 21	0.5082*2
CB2, CB4	1, 10, 13, 15, 21	0.7964*2
CB5	17, 18	0.2408
CB6	14, 19	0.3565
CB7	-	0.0076
CB8	-	0.0076
Main bus	7, 10, 12, 15, 17, 18, 20, 23	1.7702
ผลรวมค่าใช้จ่ายวงชีพทั้งหมดของสถานีไฟฟ้า (TC_s)		131.5301

ตารางที่ 5.21 ผลลัพธ์การวางแผนบำรุงรักษาของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานและบัสถ่ายโอนด้วยการบำรุงรักษาตามเวลา

อุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า	ปีทำการบำรุงรักษา (ปี)	ค่าใช้จ่ายวงชีพ (ล้านบาท)
Tx1, Tx2	5, 10, 15, 20, 25	31.0557*2
Tx3	14, 19, 24	19.6421
Tx4	23	7.0110
CB1, CB3	5, 10, 15, 20, 25	0.5536*2
CB2, CB4	5, 10, 15, 20, 25	0.8625*2
CB5	14, 19, 24	0.3575
CB6	14, 19, 24	0.5504
CB7	23	0.1277
CB8	23	0.1973
Main bus	5, 10, 15, 20, 25	1.187
ผลรวมค่าใช้จ่ายวงชีพทั้งหมดของสถานีไฟฟ้า (TC_s)		100.6895

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ค่าดัชนี *SAIFI* ของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานและบัสถ่ายโอนของแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต วิธีพันธุกรรม และการบำรุงรักษาตามเวลาแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 5.17 ดัชนี *SAIFI* ของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานและบัสถ่ายโอนของแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีสร้างโปรแกรมพลวัต วิธีพันธุกรรมและการบำรุงรักษาตามเวลา

ผลทดสอบระหว่างวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตกับวิธีพันธุกรรมภายในตารางที่ 5.19 และ 5.20 พบว่ามีค่าความผิดพลาดของแต่ละอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้ารูปแบบนี้มีค่าดังนี้

- หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงระหว่าง 0-27.6%
- เซอร์กิตเบรกเกอร์มีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงระหว่าง 0-49%
- บัสบาร์มีค่าความผิดพลาด 15.4%

จากผลลัพธ์ตารางที่ 5.19 และ 5.20 แสดงให้เห็นว่าการกำหนดแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตให้คำตอบค่าใช้จ่ายวงชีพระดับสถานีไฟฟ้าน้อยกว่าวิธีพันธุกรรม

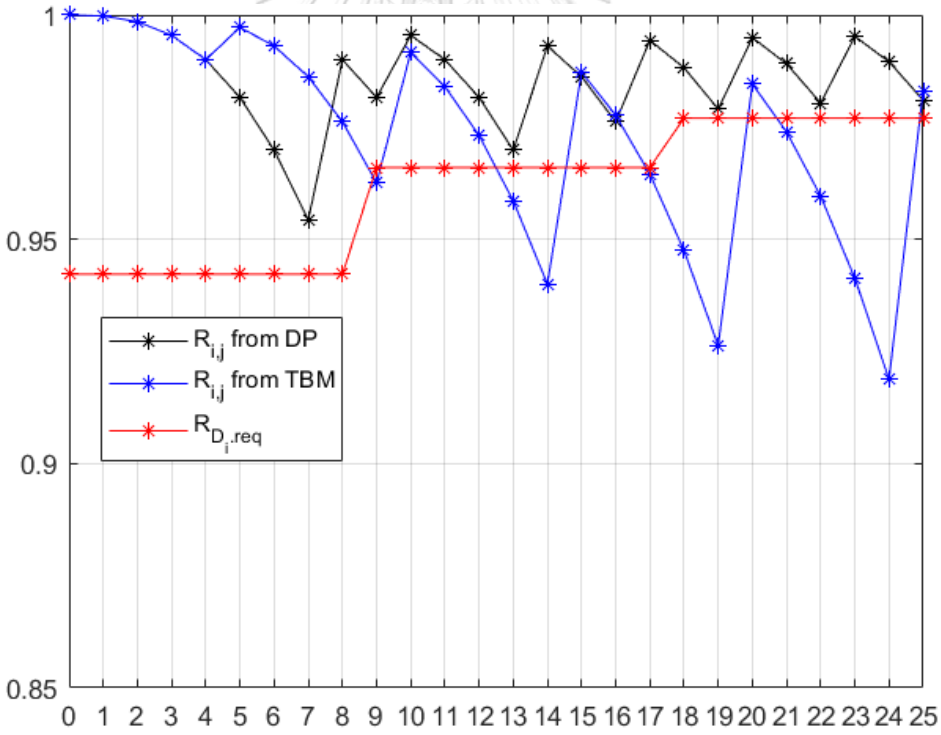
จากตารางที่ 5.19 และตารางที่ 5.21 พบว่าค่าใช้จ่ายวงชีพระดับสถานีไฟฟ้าจากวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตมีค่ามากกว่าการกำหนดแผนงานบำรุงรักษาตามเวลาของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานและบัสถ่ายโอน เนื่องจากอุปกรณ์ Tx1, Tx2, Tx3 และ Main bus มีค่าใช้จ่ายวงชีพจากการบำรุงรักษาตามเวลาน้อยกว่าจากคำตอบที่ได้จากวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต เมื่อเปรียบจำนวนครั้งของการบำรุงรักษาทั้งสองแบบแต่ละอุปกรณ์พบว่า อุปกรณ์ Tx3 และ Main bus มีจำนวนครั้งของการบำรุงรักษาจากวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตมากกว่าการบำรุงรักษาตามเวลา ในขณะที่ Tx1 และ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

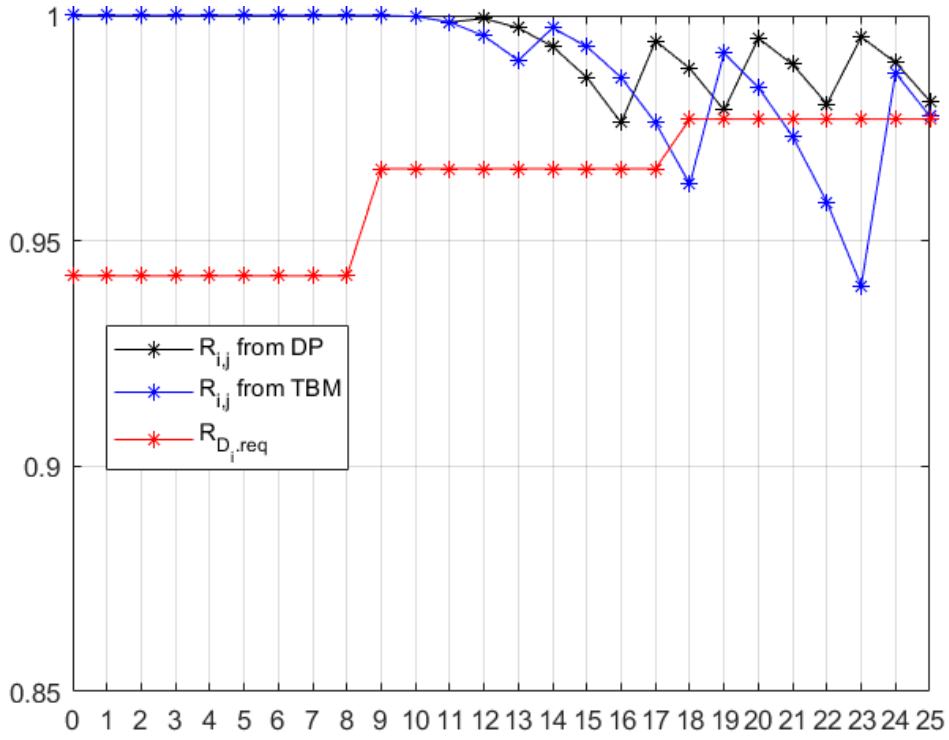
Tx2 มีจำนวนครั้งของการบำรุงรักษาทั้งสองแบบเท่ากัน แต่เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ที่เหลือมีค่าใช้จ่ายวงชีพน้อยกว่า เพราะมีจำนวนครั้งของการบำรุงรักษาแบบป้องกันที่น้อยกว่าการบำรุงรักษาตามเวลา ค่าใช้จ่ายวงชีพอุปกรณ์อื่นที่ได้การบำรุงรักษาตามเวลากับวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตมีค่าแตกต่างของค่าใช้จ่ายวงชีพแต่ละอุปกรณ์ดังนี้

- หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีค่าความแตกต่าง 3%
- เซอร์กิตเบรกเกอร์ค่าความแตกต่างระหว่าง 32.92-96.12%
- บัสบาร์มีค่าความแตกต่าง 2.14%

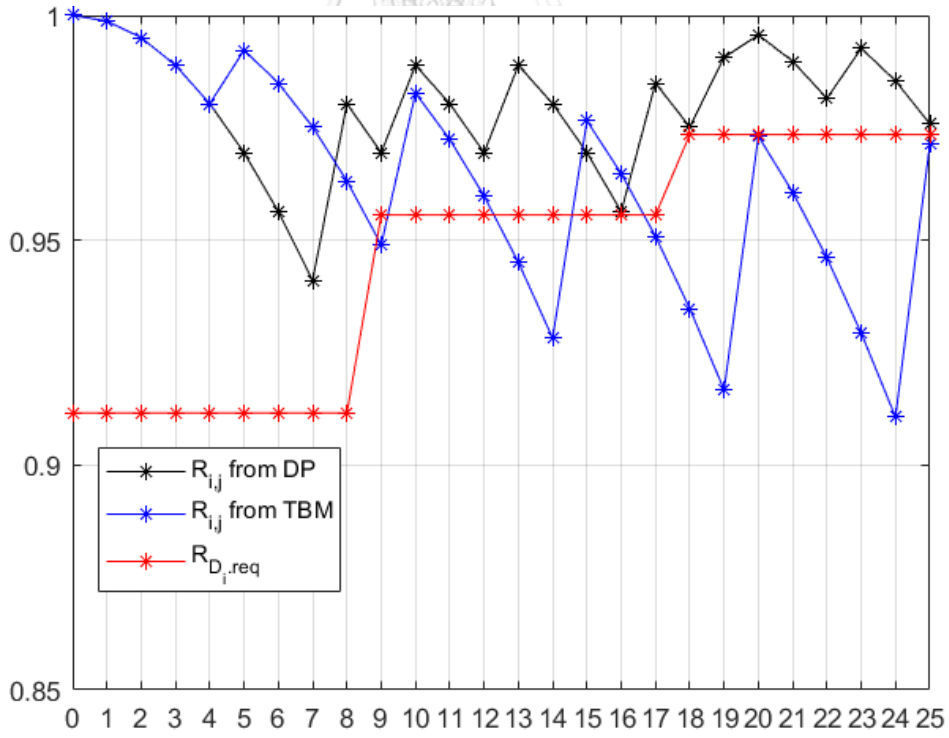
เนื่องจากสถานีไฟฟ้ารูปแบบนี้เมื่อมีการเพิ่มอุปกรณ์ใหม่ภายในปีที่ 10 และ 19 ส่งผลให้ค่าความเชื่อถือได้ที่ต้องการของแต่ละอุปกรณ์ที่อยู่ภายในเซตตัดอันดับ 1 ต้องมีค่าเพิ่มขึ้น ได้แก่ Tx1, Tx2, Tx3 และ Main bus เป็นอุปกรณ์ภายในเซตตัดต่ำสุด ทำให้การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาตามเวลาของอุปกรณ์เหล่านี้จะไม่สอดคล้องกับความเชื่อถือได้ที่ต้องการของอุปกรณ์ ในขณะที่ผลลัพธ์การวางแผนบำรุงรักษาด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตนั้นสอดคล้องกับความเชื่อถือได้ที่ต้องการตลอดระยะเวลาการบำรุงรักษา ดังรูปที่ 5.18- 5.20



รูปที่ 5.18 ความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ Tx1 และ Tx2 ของแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีสร้างโปรแกรมพลวัตและการบำรุงรักษาตามเวลา



รูปที่ 5.19 ความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ Tx3 ของแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีสร้างโปรแกรมพลวัตและการบำรุงรักษาตามเวลา



รูปที่ 5.20 ความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ Main bus ของแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีสร้างโปรแกรมพลวัตและการบำรุงรักษาตามเวลา

สถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานและบัสถ่ายโอนแบ่งค่าใช้จ่ายการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ได้เป็นทั้งหมด 2 กลุ่ม ได้แก่

1) มีค่าใช้จ่ายการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไขและแบบป้องกัน ได้แก่อุปกรณ์ Tx1, Tx2, Tx3, Tx4, CB2, CB4, CB6, CB8 และ Main bus เป็นอุปกรณ์ภายในเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 ของเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟและแอกทีฟ อุปกรณ์กลุ่มนี้จะมีค่าใช้จ่ายวงชีพสูงเนื่องจากการบำรุงรักษาแบบป้องกันของอุปกรณ์เหล่านี้อยู่บนเส้นทางการไหลของกำลังไฟฟ้า ทำให้จุดโหลดแต่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาซ่อมแซมอุปกรณ์ขณะทำการบำรุงรักษาแบบป้องกัน หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังส่งผลทำให้จุดโหลดนั้นมีกำลังไฟฟ้าหายโดยตรง มีระยะเวลาซ่อมแซมที่นาน และไม่มีอุปกรณ์สำรองมาใช้งานแทนขณะทำการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ในขณะที่อุปกรณ์อื่นๆ ภายในสถานีไฟฟ้านั้นมีอุปกรณ์สำรองทำงานแทน เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์สำรอง และบัสถ่ายโอนเพื่อนำมาใช้งานแทนขณะทำการบำรุงรักษา

2) มีค่าใช้จ่ายการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไขเพียงอย่างเดียว ได้แก่อุปกรณ์ CB1, CB3, CB5, และ CB7 เป็นอุปกรณ์ภายในเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 ของเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอกทีฟ เมื่ออุปกรณ์ที่อยู่ในเส้นทางการส่งกำลังไฟฟ้าไปยังจุดโหลดมีปัญหาจะส่งผลให้อุปกรณ์ป้องกันปลดอุปกรณ์เหล่านี้ จึงทำให้มีผลกระทบจุดโหลดแต่ละจุดไม่ได้รับกำลังไฟฟ้า ในขณะที่ทำการบำรุงรักษาแบบป้องกันอุปกรณ์เหล่านี้จะไม่ส่งผลกระทบทำให้จุดโหลดภายในสถานีไฟฟ้าไม่รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้ไม่เป็นสมาชิกเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 ของเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ ดังนั้นค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าจากการบำรุงรักษาแบบป้องกันจึงไม่คิดตลอดระยะเวลาการบำรุงรักษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากรูปที่ 5.17 พบว่าการกำหนดแผนงานการบำรุงรักภายในสถานีไฟฟ้ารูปแบบนี้ทั้งหมด 3 วิธี สามารถวางแผนตลอดระยะเวลาของการบำรุงรักษาอุปกรณ์โดยมีดัชนี $SAIFI$ ต่ำกว่า $SAIFI_{req}$ เมื่ออุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้ามีการบำรุงรักษาแบบป้องกันเกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์ที่อยู่ภายในเซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟมีผลดัชนี $SAIFI$ ลดลง เช่น ปีที่ 8, 10, 15, 17, 20 จากผลลัพธ์วิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต ค่าดัชนี $SAIFI$ ลดลงเพราะมีการกำหนดแผนงานบำรุงรักษาอุปกรณ์ หากมีการบำรุงรักษาแบบป้องกันของอุปกรณ์พร้อมกันหลายอุปกรณ์ เช่นปีที่ 20 ส่งผลดัชนี $SAIFI$ มีค่าลดลงอย่างมาก ในทำนองเดียวผลลัพธ์จากวิธีพันธุกรรมค่าดัชนี $SAIFI$ ลดลงในปีที่ 17 และ 21 และการบำรุงรักษาตามเวลาค่าดัชนี $SAIFI$ ลดลงในปีที่ 5, 10, 15, 20 และ 25 เป็นต้น

เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายระดับสถานีไฟฟ้าพบว่า การบำรุงรักษาตามเวลามีผลลัพธ์ค่าใช้จ่ายวงชีพระดับสถานีไฟฟ้าน้อยที่สุด อันดับถัดมาคือการวางแผนการบำรุงรักษาด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต และค่าใช้จ่ายระดับสถานีไฟฟ้ามากที่สุดคือวิธีพันธุกรรม การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการสร้าง

โปรแกรมพลวัตและวิธีพันธุกรรมพบว่า จำนวนครั้งของการบำรุงรักษาแบบป้องกันของอุปกรณ์น้อยกว่าจึงทำให้มีค่าใช้จ่ายวงชีพระดับสถานีไฟฟ้าต่ำสุด อย่างไรก็ตามเมื่อคำนึงถึงความเชื่อถือได้ของแต่ละอุปกรณ์ตลอดระยะเวลาการบำรุงรักษา การกำหนดแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตจึงเหมาะสมกว่าในด้านของความเชื่อถือได้ระบบไฟฟ้าทั้งอุปกรณ์และสถานีไฟฟ้า การบำรุงรักษาตามเวลาถึงแม้ว่าผลดัชนีของสถานีไฟฟ้าจะอยู่ภายในเกณฑ์ $SAIFI_{req}$ แต่ความเชื่อถือได้ระดับอุปกรณ์ที่อยู่ภายในสถานีไฟฟ้าจะไม่สอดคล้องกับความเชื่อถือได้ที่ต้องการของอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานและบัสถ่ายโอน

5.3.2 การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานคู่

เซตตัดต่ำสุดของสถานีไฟฟ้า

เซตตัดต่ำสุดของสถานีไฟฟ้าแต่ละจุดโหลดมีผลลัพธ์ดังตารางที่ 5.22 ดังนี้

ตารางที่ 5.22 เซตตัดต่ำที่สุดแบบแอกทีฟและพาสซีฟของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานคู่

ปีที่	จุดโหลด	เหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอกทีฟ	เหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ
1-9	1	[Tx1], [CB3], [CB4]	[Tx1]
	2	[Tx2], [CB7], [CB8]	[Tx2]
10-18	1	[Tx1], [CB3], [CB4]	[Tx1]
	2	[Tx2], [CB7], [CB8],	[Tx2]
	3	[Tx3], [CB11], [CB12]	[Tx3]
19-25	1	[Tx1], [CB3], [CB4]	[Tx1]
	2	[Tx2], [CB7], [CB8]	[Tx2]
	3	[Tx3], [CB11], [CB12]	[Tx3]
	4	[Tx4], [CB15], [CB16]	[Tx4]

จากตารางที่ 5.22 การเพิ่มขึ้นของจำนวนอุปกรณ์ในปีที่ 10 และ 19 ไม่ส่งผลกระทบต่อจุดโหลดอื่นๆ ภายในสถานีไฟฟ้าจึงทำให้เซตตัดต่ำสุดของแต่ละจุดโหลดมีค่าคงที่ และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องยังคงเหมือนเดิมตลอดช่วงเวลาการบำรุงรักษา ดังนั้นการกำหนดความเชื่อถือได้ที่ต้องการของอุปกรณ์ที่อยู่ภายในเซตตัดต่ำสุดอันดับ 1 จะมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาการวางแผน ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเป็น 0.7981 และเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 0.678

ผลทดสอบการกำหนดแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตแสดงได้ดังตารางที่ 5.23 วิธีพันธุกรรมดังตารางที่ 5.24 และการบำรุงรักษาตามเวลาดังตารางที่ 5.25

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 5.23 ผลทดสอบการวางแผนบำรุงรักษาของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานคู่ด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต

อุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า	ปีทำการบำรุงรักษา (ปี)	ค่าใช้จ่ายวงชีพ (ล้านบาท)
Tx1, Tx2	10, 13, 21	19.5947*2
Tx3	21	8.4584
Tx4	-	0.4682
CB1, CB2, CB5, CB6	15, 23	0.2797*4
CB3, CB4, CB7, CB8	14, 23	0.2905*4
CB9, CB10	21	0.1409*2
CB11, CB12	21	0.1461*2
CB13, CB14	-	0.0047*2
CB15, CB16	-	0.0055*2
Main bus 1, Main bus 2	6, 9, 13, 16, 19	0.1045*2
ผลรวมค่าใช้จ่ายวงชีพทั้งหมดของสถานีไฟฟ้า (TC_s)		51.2002

ตารางที่ 5.24 ผลทดสอบการวางแผนบำรุงรักษาของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานคู่ด้วยวิธีพันธุกรรม

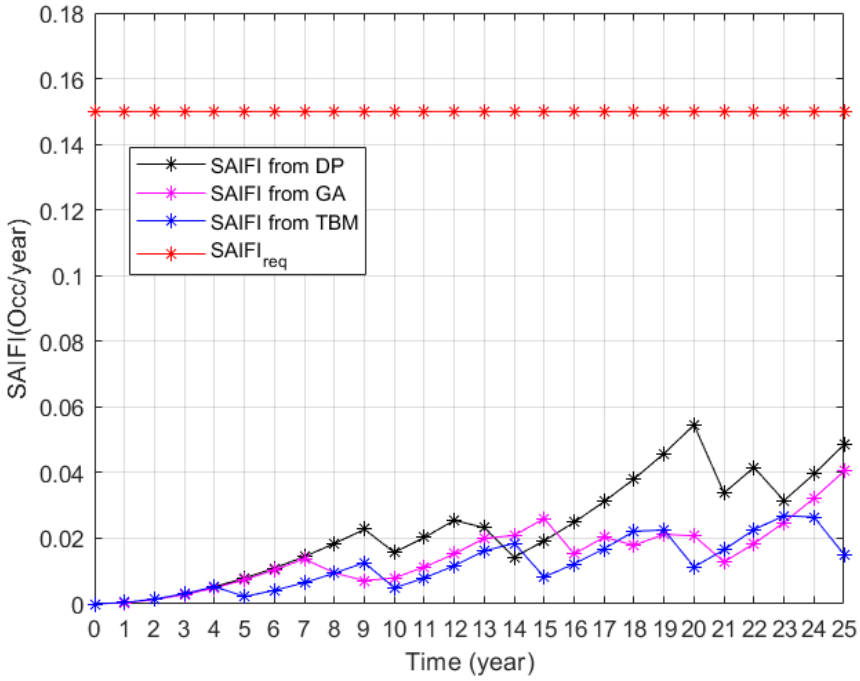
อุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า	ปีทำการบำรุงรักษา (ปี)	ค่าใช้จ่ายวงชีพ (ล้านบาท)
Tx1, Tx2	8, 16, 18, 21	26.9489*2
Tx3	10, 21	13.1606
Tx4	-	0.4682
CB1, CB2, CB5, CB6	8, 11, 15, 22	0.4223*4
CB3, CB4, CB7, CB8	1, 9, 10, 14, 20	0.4895*4
CB9, CB10	21	0.1409*2
CB11, CB12	14, 19	0.2284*2
CB13, CB14	-	0.0047*2
CB15, CB16	-	0.0055*2
Main bus 1, Main bus 2	6, 9, 13, 16, 19	0.1045*2
ผลรวมค่าใช้จ่ายวงชีพทั้งหมดของสถานีไฟฟ้า (TC_s)		72.1416

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 5.25 ผลลัพธ์การวางแผนบำรุงรักษาของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานคู่ด้วยการบำรุงรักษาตามเวลา

อุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า	ปีทำการบำรุงงรักษา (ปี)	ค่าใช้จ่ายวงชีพ (ล้านบาท)
Tx1, Tx2	5, 10, 15, 20, 25	31.0557*2
Tx3	14, 19, 24	19.6421
Tx4	23	7.0110
CB1, CB2, CB5, CB6	5, 10, 15, 20, 25	0.5360*4
CB3, CB4, CB7, CB8	5, 10, 15, 20, 25	0.5414*4
CB9, CB10	14, 19, 24	0.3486*2
CB11, CB12	14, 19, 24	0.3511*2
CB13, CB14	23	0.1261*2
CB15, CB16	23	0.1265*2
Main bus 1, Main bus 2	5, 10, 15, 20, 25	0.1156*2
ผลรวมค่าใช้จ่ายวงชีพทั้งหมดของสถานีไฟฟ้า (TC_s)		95.2097

ค่าดัชนี *SAIFI* ของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานคู่ของแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต วิธีพันธุกรรมและการบำรุงรักษาตามเวลาแสดงได้ดังรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 ดัชนี *SAIFI* ของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานคู่ของแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต วิธีพันธุกรรม และการบำรุงรักษาตามเวลา

ผลทดสอบระหว่างวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตกับวิธีพันธุกรรมภายในตารางที่ 5.23 และ 5.24 พบว่าค่าความผิดพลาดของแต่ละอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้ารูปแบบนี้มีค่าดังนี้

- หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงระหว่าง 0-52%
- เซอร์กิตเบรกเกอร์มีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงระหว่าง 0-68.5 %
- บัสบาร์มีค่าความผิดพลาด 0 %

จากผลลัพธ์ตารางที่ 5.23 และ 5.24 แสดงให้เห็นว่าการกำหนดแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตให้คำตอบค่าใช้จ่ายวงชีพระดับสถานีไฟฟ้าน้อยกว่าวิธีพันธุกรรม

จากตารางที่ 5.23 และ 5.25 พบว่าค่าใช้จ่ายวงชีพของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าแตกต่างจากวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตมากกว่า 68% ซึ่งบ่งบอกได้ถึงการบำรุงรักษาแบบป้องกันที่มากเกินเพราะฉะนั้นคำตอบจากวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตจึงดีกว่าในด้านของค่าใช้จ่ายวงชีพ

ค่าใช้จ่ายการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานคู่ สามารถแบ่งได้เป็นทั้งหมด 3 กลุ่มได้แก่

1) มีค่าใช้จ่ายการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไขและแบบป้องกัน ได้แก่อุปกรณ์ Tx1, Tx2, Tx3, และ Tx4 อุปกรณ์เหล่านี้เป็นอุปกรณ์ที่อยู่ภายในเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 ของเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟและแอกทีฟ และอยู่บนเส้นทางของการส่งกำลังไฟฟ้าไปยังจุดโหลด เมื่อมีการบำรุงรักษาป้องกันของอุปกรณ์เหล่านี้ และไม่มีอุปกรณ์สำรองทำงานส่งผลให้จุดโหลดไม่รับกำลังไฟฟ้าตลอดช่วงเวลาการบำรุงรักษา

2) มีค่าใช้จ่ายการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไขเพียงอย่างเดียว ได้แก่อุปกรณ์ CB3, CB4, CB7, CB8, CB11, CB12, CB15 และ CB16 อุปกรณ์เหล่านี้จะเป็นอุปกรณ์ที่อยู่ภายในเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 ของเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอกทีฟ อุปกรณ์เหล่านี้อยู่บนเส้นทางการส่งกำลังไฟฟ้าไปยังจุดโหลด เมื่อมีการบำรุงรักษาแบบป้องกันของอุปกรณ์เหล่านี้จะไม่ส่งผลกระทบต่อการสูญเสียค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟฟ้า เพราะอุปกรณ์เหล่านี้ไม่ได้เป็นอุปกรณ์ภายในเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟ และไม่ส่งผลกระทบให้จุดโหลดสูญเสียกำลังไฟฟ้า

3) ไม่มีค่าใช้จ่ายการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไขและแบบป้องกัน ได้แก่ CB1, CB2, CB5, CB6, CB10, CB11, CB13 และ CB14 อุปกรณ์เหล่านี้ไม่ได้อยู่ภายในเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 ของเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟและแอกทีฟ ดังนั้นค่าใช้จ่ายวงชีพแต่ละอุปกรณ์จะไม่มีค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงาน และกลุ่มอุปกรณ์เหล่านี้จะถูกตั้งความเชื่อถือได้ที่ต้องการของอุปกรณ์มีค่าเป็น 0.9 เพื่อกำหนดแผนงานการบำรุงรักษาที่เหมาะที่สุด ถ้าความเชื่อถือได้ที่ต้องการมีค่าต่ำก็จะทำให้ค่าใช้จ่ายวงชีพของอุปกรณ์มีค่าลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากรูปที่ 5.21 การวางแผนการบำรุงรักษาทั้งหมด 3 วิธีทำให้ดัชนี *SAIFI* ของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานคู่อยู่ภายใต้เงื่อนไขของ $SAIFI_{req}$ การบำรุงรักษาอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าโดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์ที่อยู่ภายในเซตตัดต่ำสุดของสถานีไฟฟ้าจะส่งผลให้ดัชนี *SAIFI* มีค่าลดลง จากรูปที่ 5.21 เช่นปีที่ 10, 14, 21 และ 23 ของอุปกรณ์ Tx1, Tx2, CB3, CB4, CB7 และ CB8 ของแผนงานการบำรุงรักษาจากวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตหากจำนวนอุปกรณ์ที่บำรุงรักษาในเวลาเดียวกันมีจำนวนเยอะ ส่งผลให้ดัชนี *SAIFI* มีค่าลดลงอย่างมาก ขณะที่อุปกรณ์อื่นที่ไม่ได้อยู่ภายในเซตตัดต่ำสุดนั้น ไม่ส่งผลกระทบต่อดัชนี *SAIFI* ของสถานีไฟฟ้า เพราะอุปกรณ์เหล่านี้จะไม่ส่งผลกระทบหรือความเสียหายต่อระบบ ในทำนองเดียวกันกับแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีพันธุกรรมภายในปีที่ 8, 9, 16, 18 และ 21 และการบำรุงรักษาตามเวลาปีที่ 5, 10, 15, 20 และ 25 เป็นต้น

จากตารางที่ 5.23 -5.25 พบว่า ค่าใช้จ่ายระดับสถานีไฟฟ้าจากการวางแผนบำรุงรักษาด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตมีค่าน้อยที่สุด ลำดับถัดมาคือวิธีพันธุกรรม และค่าใช้จ่ายมากที่สุดคือการบำรุงรักษาตามเวลา ผลลัพธ์การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาด้วยวิธีพันธุกรรมและการบำรุงรักษาตามเวลาจะมีค่าใช้จ่ายวงชีพมากกว่า เนื่องจากจำนวนครั้งของการบำรุงรักษาแบบป้องกันของอุปกรณ์มากกว่าผลทดสอบจากวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต และคำตอบที่ได้จากวิธีพันธุกรรมนั้นไม่ใช่ค่าใช้จ่ายวงชีพที่ต่ำสุด

ดังนั้นสำหรับสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานคู่การวางแผนการบำรุงรักษาที่ทั้ง 3 วิธีสามารถทำให้สถานีไฟฟ้าอยู่ภายใต้เงื่อนไข $SAIFI_{req}$ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายวงชีพระดับสถานีไฟฟ้านั้น คำตอบที่ได้จากวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตจึงเหมาะสมกว่าในแง่ของค่าใช้จ่ายวงชีพที่น้อยกว่า เพราะมีจำนวนครั้งของการบำรุงรักษาแบบป้องกันที่น้อยกว่า ในขณะที่การกำหนดแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีพันธุกรรมและการบำรุงรักษาตามเวลามีความถี่ของการบำรุงรักษาแบบป้องกันที่สูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.3.3 การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสและเบรกเกอร์ครึ่งเซตตัดต่ำสุดของสถานีไฟฟ้า

เซตตัดต่ำสุดของสถานีไฟฟ้าแต่ละจุดโหลดมีผลลัพธ์ดังตารางที่ 5.26 ดังนี้

ตารางที่ 5.26 เซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟและพาสซีฟรูปแบบบัสและเบรกเกอร์ครึ่ง

ปีที่	จุดโหลด	เหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอกทีฟ	เหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ
1-9	1	[Tx1], [CB2], [CB3]	[Tx1]
	2	[Tx2], [CB5], [CB6]	[Tx2]
10-18	1	[Tx1], [CB2], [CB3]	[Tx1]
	2	[Tx2], [CB5], [CB6]	[Tx2]
	3	[Tx3], [CB8], [CB9]	[Tx3]

ปีที่	จุดโหลด	เหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอกทีฟ	เหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ
19-25	1	[Tx1], [CB2], [CB3]	[Tx1]
	2	[Tx2], [CB5], [CB6]	[Tx2]
	3	[Tx3], [CB8], [CB9]	[Tx3]
	4	[Tx4], [CB11], [CB12]	[Tx4]

จากตารางที่ 5.26 สังเกตได้ว่าเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟและแอกทีฟของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสและเบรกเกอร์ครึ่งเหมือนกับสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานคู่ เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุปกรณ์จะไม่ส่งผลกระทบต่อจุดโหลดอื่นภายในสถานีไฟฟ้า จึงทำให้ค่าความเชื่อถือได้ที่ต้องการของอุปกรณ์ที่อยู่ภายในเซตตัดมีค่าคงที่ คือ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเป็น 0.7981 และเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 0.678

การเปรียบเทียบผลทดสอบระหว่างวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต วิธีพันธุกรรมและการบำรุงรักษาตามเวลา

ผลทดสอบการกำหนดแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตดังตารางที่ 5.27 วิธีพันธุกรรมดังตารางที่ 5.28 และการบำรุงรักษาตามเวลาดังตารางที่ 5.29

ตารางที่ 5.27 ผลทดสอบการวางแผนบำรุงรักษาของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสและเบรกเกอร์ครึ่งด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต

อุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า	ปีทำการบำรุงรักษา (ปี)	ค่าใช้จ่ายวงชีพ (ล้านบาท)
Tx1, Tx2	10, 13, 21	19.5947*2
Tx3	21	8.4584
Tx4	-	0.4682
CB1, CB4	15, 23	0.2797*2
CB2, CB3, CB5, CB6	14, 23	0.2905*4
CB7	21	0.1409
CB8, CB9	21	0.1461*2
CB10	-	0.0047
CB11, CB12	-	0.0055*2
Main bus 1, Main bus 2	6, 9, 13, 16, 19	0.1045*2
ผลรวมค่าใช้จ่ายวงชีพทั้งหมดของสถานีไฟฟ้า (TC_s)		50.4953

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 5.28 ผลทดสอบการวางแผนบำรุงรักษาอุปกรณ์ของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสและเบรกเกอร์ครึ่งด้วยวิธีพันธุกรรม

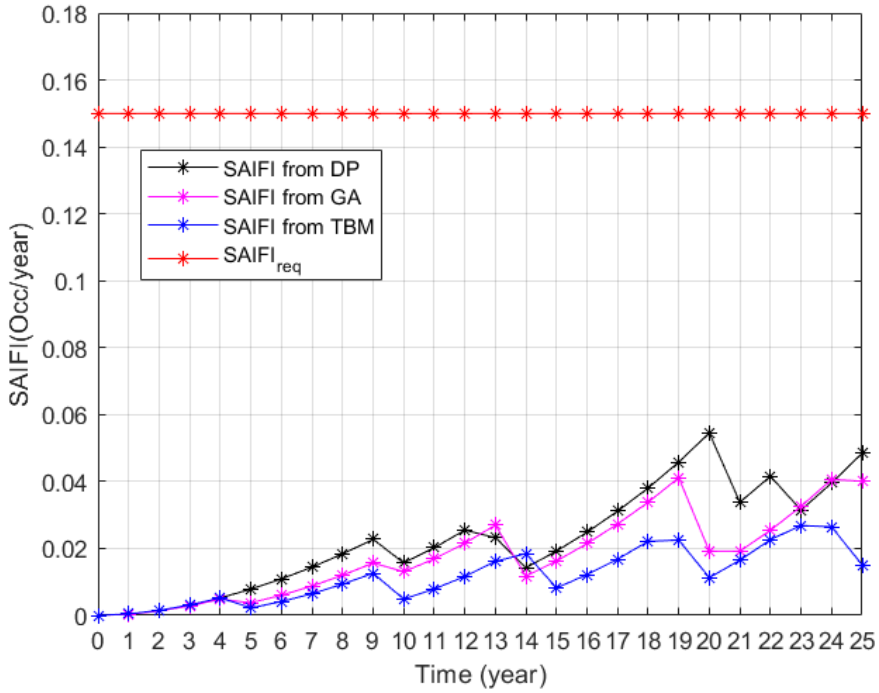
อุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า	ปีทำการบำรุงรักษา (ปี)	ค่าใช้จ่ายวงชีพ (ล้านบาท)
Tx1, Tx2	5, 14, 20, 21	25.5818*2
Tx3	11, 20	12.0971
Tx4	-	0.4682
CB1, CB4,	3, 6, 8, 22	0.4060*2
CB2, CB3, CB5, CB6	1, 10, 14, 20	0.4099*4
CB7	23	0.1513
CB8, CB9	25	0.1739
CB10	-	0.0047
CB11, CB12	-	0.0055*2
Main bus 1, Main bus 2	7, 10, 13, 16, 20	0.1046*2
ผลรวมค่าใช้จ่ายวงชีพทั้งหมดของสถานีไฟฟ้า (TC_s)		67.7148

ตารางที่ 5.29 ผลลัพธ์การวางแผนบำรุงรักษาของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสและเบรกเกอร์ครึ่งด้วยการบำรุงรักษาตามเวลา

อุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า	ปีทำการบำรุงรักษา (ปี)	ค่าใช้จ่ายวงชีพ (ล้านบาท)
Tx1, Tx2	5, 10, 15, 20, 25	31.0557*2
Tx3	14, 19, 24	19.6421
Tx4	23	7.0110
CB1, CB4	5, 10, 15, 20, 25	0.5360*2
CB2, CB3, CB5, CB6	5, 10, 15, 20, 25	0.5414*4
CB7	14, 19, 24	0.3486
CB8, CB9	14, 19, 24	0.3511*2
CB10	23	0.1261
CB11, CB12	23	0.1274*2
Main bus 1, Main bus 2	5, 10, 15, 20, 25	0.1156*2
ผลรวมค่าใช้จ่ายวงชีพทั้งหมดของสถานีไฟฟ้า (TC_s)		93.6630

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ค่าดัชนี *SAIFI* ของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสและเบรกเกอร์ครึ่งของแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต วิธีพันธุกรรมแสดงและการบำรุงรักษาตามเวลาได้ดังรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 ดัชนี *SAIFI* ของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสและเบรกเกอร์ครึ่งของแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต วิธีพันธุกรรมและการบำรุงรักษาตามเวลา

ผลทดสอบระหว่างวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตกับวิธีพันธุกรรมภายในตารางที่ 5.27 และ 5.28 พบว่าค่าความผิดพลาดของแต่ละอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้ารูปแบบนี้มีค่าดังนี้

- หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีค่าความผิดพลาด 0-43%
- เซอร์กิตเบรกเกอร์มีค่าความผิดพลาด 0-45.2 %
- บัสบาร์มีค่าความผิดพลาด 0.1 %

จากผลลัพธ์ตารางที่ 5.27 และ 5.28 แสดงให้เห็นว่าการกำหนดแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตให้คำตอบค่าใช้จ่ายวงชีพระดับสถานีไฟฟ้าน้อยกว่าวิธีพันธุกรรม

จากตารางที่ 5.27 และ 5.28 ค่าใช้จ่ายวงชีพแตกต่างจากวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตมากกว่า 60% เช่นเดียวกับสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานคู่ แสดงให้เห็นถึงการบำรุงรักษาแบบป้องกันที่มากเกิน ในขณะที่คำตอบจากวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตนั้นให้จำนวนครั้งการบำรุงรักษาแบบป้องกันน้อยกว่า

การจัดกลุ่มค่าใช้จ่ายการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสและเบรกเกอร์ครึ่ง แบ่งออกเป็นทั้งหมด 3 กลุ่มได้แก่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1) มีค่าใช้จ่ายการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไขและแบบป้องกัน ได้แก่อุปกรณ์ Tx1, Tx2, Tx3, และ Tx4 อุปกรณ์เหล่านี้อยู่ภายในเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 ของเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟและแอกทีฟ ซึ่งอยู่บนเส้นทางการจ่ายกำลังไฟฟ้าและส่งผลกระทบต่อการบำรุงรักษาแบบแก้ไขและป้องกัน

2) มีค่าใช้จ่ายการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไขเพียงอย่างเดียว ได้แก่อุปกรณ์ CB2, CB3, CB5, CB6, CB8, CB9, CB11 และ CB12 เป็นอุปกรณ์ภายในเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 และอยู่บนเส้นทางการส่งกำลังไฟฟ้าแต่ละจุดโหลด แต่ไม่รับผลกระทบต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อมีการบำรุงรักษาแบบป้องกัน จึงทำให้ค่าใช้จ่ายการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าจากการบำรุงรักษาแบบป้องกันเกิดขึ้นภายในอุปกรณ์เหล่านี้

3) ไม่มีค่าใช้จ่ายการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไขและแบบป้องกัน ได้แก่ CB1, CB4, CB7 และ CB10 ไม่ได้อยู่ภายในเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 ของเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟและแอกทีฟ ดังนั้นค่าใช้จ่ายวงชีพแต่ละอุปกรณ์จะไม่มีค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานและแผนงานการบำรุงรักษาของอุปกรณ์ในกลุ่มนี้จะขึ้นกับค่าความเชื่อถือได้ที่ต้องการของอุปกรณ์ ถ้าความเชื่อถือได้ที่ต้องการมีค่าต่ำก็จะทำให้ค่าใช้จ่ายวงชีพของอุปกรณ์มีค่าลดลง

จากรูปที่ 5.22 การบำรุงรักษาทั้งหมด 3 วิธีทำให้ดัชนี *SAIFI* ของสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสและเบรกเกอร์ครึ่งอยู่ภายใต้เงื่อนไขของ $SAIFI_{req}$ เมื่อมีการบำรุงรักษาอุปกรณ์ภายในเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 จะส่งผลให้ดัชนี *SAIFI* ของสถานีไฟฟ้ามีค่าลดลง เช่น ปีที่ 10, 14, 21 และ 23 ของอุปกรณ์ Tx1, Tx2, Tx3, CB2, CB3, CB5 และ CB6 จากวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต ในทำนองเดียวกันกับแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีพันธุกรรมภายในปีที่ 10, 14 และ 20 ส่วนการบำรุงรักษาตามเวลาปีที่ 5, 10, 15, 20 และ 25 เป็นต้น ในขณะที่อุปกรณ์ที่ไม่อยู่ในเซตตัดต่ำสุดของสถานีไฟฟ้า ถึงแม้ว่าได้รับการบำรุงรักษาก็จะไม่ผลกระทบต่อดัชนี *SAIFI* ของสถานีไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายระดับสถานีไฟฟ้าพบว่า การกำหนดแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตมีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด อันดับถัดมาคือวิธีพันธุกรรม และค่าใช้จ่ายมากที่สุดคือ การบำรุงรักษาตามเวลา วิธีการกำหนดแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีพันธุกรรมและการบำรุงรักษาตามเวลา มีความถี่ของการบำรุงรักษาที่มากกว่าคำตอบจากวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงกว่า และคำตอบที่ได้จากวิธีพันธุกรรมนั้นไม่ใช่ค่าใช้จ่ายวงชีพที่ต่ำสุด

ดังนั้นสำหรับสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสและเบรกเกอร์ครึ่งได้ผลลัพธ์เหมือนกับการจัดเรียงสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานคู่ คือ การวางแผนการบำรุงรักษาที่ทั้ง 3 วิธีสามารถทำให้สถานีไฟฟ้าอยู่ภายใต้เงื่อนไข $SAIFI_{req}$ แต่เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายวงชีพระดับสถานีไฟฟ้านั้น คำตอบที่ได้จากวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตจึงเหมาะสมกว่าในแง่ของค่าใช้จ่ายวงชีพที่น้อยกว่า เพราะมีจำนวนครั้งของการ

บำรุงรักษาแบบป้องกันที่น้อยกว่า ในขณะที่การกำหนดแผนงานการบำรุงรักษาด้วยวิธีพันธุกรรมและการบำรุงรักษาตามเวลานั้นมีความถี่ของการบำรุงรักษาที่มากเกินไป

5.4 สรุป

บทที่ 5 ได้มีการทดสอบการกำหนดแผนงานบำรุงรักษาด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต ข้อมูลที่จำเป็นต้องการทดสอบได้แก่ ข้อมูลสถิตความเสียหายอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า ค่าใช้จ่ายอุปกรณ์ ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้า รูปแบบการเรียงอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า และเงื่อนไขบังคับความเชื่อถือได้ การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่

ระดับอุปกรณ์ ได้ทดสอบการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตกับอุปกรณ์หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เซอร์กิตเบรกเกอร์ และบัสบาร์ จากผลการทดสอบสังเกตได้ว่า เมื่อลดค่าอายุประสิทธิผลของอุปกรณ์ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายวงชีพเพิ่มขึ้นทั้งในส่วนค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบแก้ไข และค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบป้องกัน หากลดความเชื่อถือได้ที่ต้องการระดับอุปกรณ์ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายวงชีพระดับอุปกรณ์ลดลง โดยค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบแก้ไขมีค่าเพิ่มขึ้น และค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบป้องกันที่ลดลง ซึ่งลักษณะของแผนงานและค่าใช้จ่ายวงชีพที่เหมาะสมจะได้นั้นขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ไวบูลล์ของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า นอกจากนี้คำตอบที่ได้จากวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตนั้นมีค่าใช้จ่ายวงชีพและแผนงานการบำรุงรักษาที่น้อยกว่าการค้นหาคำตอบด้วยวิธีพันธุกรรม และการกำหนดแผนงานการบำรุงรักษาตามเวลา

ระดับสถานีไฟฟ้า ได้ทดสอบการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตกับสถานีไฟฟ้าทั้งหมด 3 รูปแบบ ได้แก่ บัสประธานและบัสถ่ายโอน บัสประธานคู่ และบัสและเบรกเกอร์ครึ่ง สามารถแบ่งอุปกรณ์ที่มีความสัมพันธ์กับค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าได้ 3 กลุ่มได้แก่

- มีค่าใช้จ่ายการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไขและการบำรุงรักษาแบบป้องกัน คือกลุ่มอุปกรณ์ที่อยู่ภายในเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟและแอกทีฟ
- มีค่าใช้จ่ายการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไขเพียงอย่างเดียว เป็นกลุ่มอุปกรณ์ที่อยู่ภายในเซตตัดต่ำสุดแบบแอกทีฟ
- ไม่มีค่าใช้จ่ายการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไขและการบำรุงรักษาแบบป้องกัน คือ อุปกรณ์ที่ได้อยู่ในเซตตัดต่ำสุดแบบพาสซีฟและแอกทีฟ

สถานีไฟฟ้าทั้งหมด 3 รูปแบบนั้นเมื่อเปรียบเทียบวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตได้ให้ค่าใช้จ่ายวงชีพน้อยกว่าการค้นหาคำตอบด้วยวิธีพันธุกรรม อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับการกำหนดแผนงานบำรุงรักษาตามเวลา สถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานและบัสถ่ายโอนให้ผลลัพธ์ค่าใช้จ่ายวงชีพน้อยกว่าวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต แต่เมื่อพิจารณาถึงความเชื่อถือได้แต่ละอุปกรณ์นั้นไม่ผ่าน

เกณฑ์ ในขณะที่สถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานคู่และบัสและเบรกเกอร์ครึ่งได้ให้ผลลัพธ์ค่าใช้จ่ายวงชีพที่ต่ำกว่า และอยู่ภายใต้เงื่อนไขบังคับความเชื่อถือได้ทั้งอุปกรณ์และสถานีไฟฟ้า

นอกจากนี้ผลการกำหนดแผนงานบำรุงรักษาไม่มีค่าใช้จ่ายของเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ปรากฏขึ้นในช่วงของระยะเวลาการวางแผนบำรุงรักษา เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาปกติ และระยะเวลาดำเนินการที่นานกว่าจึงทำให้ค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้ามีค่าสูง

เมื่อเปรียบเทียบวิธีการค้นคำตอบด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตและวิธีพันธุกรรมทั้งในปัญหาระดับอุปกรณ์ และระดับสถานีไฟฟ้า วิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตเหมาะสำหรับการแก้ปัญหาแบบไม่เชิงเส้น เนื่องจากให้ค่าใช้จ่ายวงชีพต่ำกว่าวิธีพันธุกรรม และสอดคล้องเงื่อนไขของปัญหา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 6
สรุปและข้อเสนอแนะ

บทนี้จะประกอบด้วยการสรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะเพิ่มเติม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการกำหนดแผนงานการบำรุงรักษาอุปกรณ์หลักภายในสถานีไฟฟ้า ปัญหาการกำหนดแผนงานการบำรุงรักษาสามารถกำหนดเป็นปัญหาทางคณิตศาสตร์ได้ และเกี่ยวข้องกับการตัดสินใจบำรุงรักษา วัตถุประสงค์ของงานวิจัยมุ่งเน้นการกำหนดแผนงานบำรุงรักษาค่าใช้จ่ายวงชีพระดับอุปกรณ์ และระดับสถานีไฟฟ้า ภายใต้เงื่อนไขบังคับอายุประสิทธิผลสุดท้ายและความเชื่อถือได้ การแก้ปัญหานี้ได้นำเสนอวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตโดยการหาคำตอบเหมาะที่สุดย่อย โดยผลลัพธ์นั้นได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับวิธีพันธุกรรม และการบำรุงรักษาตามเวลา ผลลัพธ์การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาจากวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตให้คำตอบที่มีค่าใช้จ่ายวงชีพน้อยกว่า และอยู่ภายใต้เงื่อนไขความเชื่อถือได้ สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาระดับอุปกรณ์มีค่าใช้จ่ายที่พิจารณาได้แก่ ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบแก้ไข และค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบป้องกัน ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายวงชีพเพิ่มขึ้น คือ การเพิ่มขึ้นของอายุประสิทธิผลสุดท้ายของอุปกรณ์และความเชื่อถือได้ที่ต้องการเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผลลัพธ์การวางแผนบำรุงรักษาแต่ละอุปกรณ์ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์รูปร่าง และพารามิเตอร์ขนาดที่ส่งผลต่อการคำนวณความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแบบแก้ไข ทำให้แต่ละอุปกรณ์มีการบำรุงรักษาที่แตกต่างกัน

การกำหนดแผนงานระดับสถานีไฟฟ้านั้นได้มีค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเพิ่มเข้ามาในค่าใช้จ่ายวงชีพ โดยค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าและดัชนีของสถานีไฟฟ้าสามารถประมาณได้จากเซตต่ำสุดอันดับที่ 1 ของสถานีไฟฟ้าแต่ละรูปแบบ โดยสามารถแบ่งกลุ่มอุปกรณ์ตามค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าได้ทั้งหมด 3 กลุ่ม ได้แก่ มีค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไขและป้องกัน มีค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไข และไม่มีค่าใช้จ่ายเนื่องจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไขและป้องกัน วิธีการหาคำตอบด้วยการสร้างโปรแกรมพลวัตนั้นเหมาะสำหรับสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานคู่ และบัสและเบรกเกอร์ครึ่ง ทั้งในเรื่องค่าใช้จ่ายวงชีพและความเชื่อถือได้มากที่สุด แต่สำหรับสถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานและบัสถ่ายโอนนั้นถึงแม้ว่าจะค่าใช้จ่ายวงชีพที่มากกว่าการบำรุงรักษาตามเวลา แต่เมื่อพิจารณาความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ภายในเซตตัด

ต่ำสุดนั้นไม่เหมาะสม และมีค่าน้อยกว่าการหาความเชื่อถือได้ที่ได้จากการคำนวณจากเกณฑ์มาตรฐาน *SAIFI* ที่ต้องการของสถานีไฟฟ้า

เมื่อเปรียบเทียบวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตซึ่งให้ค่าใช้จ่ายวงชีพที่ต่ำกว่าวิธีพันธุกรรมและสอดคล้องเงื่อนไขบังคับของปัญหา ในขณะที่วิธีพันธุกรรมนั้นขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์พันธุกรรม ซึ่งในบางครั้งอาจทำให้คำตอบลู่เข้าค่าที่เหมาะสมที่สุดสัมพัทธ์ (Local minimum) และวิธีพันธุกรรมนั้นไม่เหมาะสมสำหรับการค้นหาคำตอบปัญหาแบบนี้

แต่อย่างไรก็ตามคำตอบที่ได้ภายในระดับสถานีไฟฟ้านั้นเป็นประมาณค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าจากเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 เท่านั้น และเพิ่มเติมเข้าไปในอุปกรณ์ที่เป็นสมาชิกเซตตัดต่ำสุดอันดับที่ 1 และกระบวนการที่นำเสนอนั้นได้คำตอบเป็นคำตอบที่เหมาะสมรองลงมา ทำให้ความซับซ้อนของปัญหาลดลงสำหรับกระบวนการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต

6.2 ข้อเสนอแนะ

1) แนวทางที่ได้นำเสนอนั้นพิจารณาเฉพาะการบำรุงรักษาระดับอุปกรณ์ และระดับสถานีไฟฟ้า ยังไม่ได้พิจารณาระดับระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อระหว่างสถานีไฟฟ้า

2) วิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ข้อมูลระยะเวลาการดำเนินงานการปลดและเปลี่ยนอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าโดยใช้อายุเป็นหลัก แต่ในปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีต่างๆมาในสถานีไฟฟ้ามาเพื่อตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น สภาพน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง การวัดการสั่นของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เป็นต้น ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถนำมาประยุกต์เปลี่ยนเป็นค่าอายุประสิทธิผลของอุปกรณ์ และสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์ เพื่อกำหนดแผนงานบำรุงรักษา

3) ผู้ผลิตไฟฟ้าควรเก็บข้อมูลสถิติต่างๆ เช่น อายุประสิทธิผลของอุปกรณ์ไฟฟ้าเมื่อเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวและไม่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวที่ส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับและไฟฟ้าไม่ดับ เพื่อสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์ และประเมินความน่าเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อประเมินค่าใช้จ่ายวงชีพที่ถูกต้องของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า ระยะเวลาซ่อมแซมอุปกรณ์จากความเสียหายแต่ละรูปแบบ ประวัติการบำรุงรักษาอุปกรณ์ เพื่อวัดประสิทธิผลของการบำรุงรักษาแต่ละครั้ง และกำหนดเป็นตัวประกอบการปรับปรุงของอุปกรณ์

4) วิธีการสร้างโปรแกรมพลวัตมีข้อด้อย คือใช้ระยะเวลาในการหาคำตอบนาน เมื่อมีขนาดของปัญหาที่ใหญ่ขึ้น แต่คำตอบที่ได้นั้นเป็นค่าเหมาะที่สุดสำหรับปัญหา แต่สามารถนำวิธีการประมาณการสร้างโปรแกรมพลวัต (Approximate dynamic programming) เพื่อลดระยะเวลาการหาคำตอบที่เหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไขของความเชื่อได้ สำหรับการกำหนดแผนงานการบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รายการอ้างอิง

[1] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (6/6/2016). ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุด. Available: http://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&layout=edit&id=353&Itemid=200

[2] P. pongprasert, "Egat's experience on transmission system asset management," in *Best Practice of Transmission System*, 2015.

[3] W. Li and S. Pai, "Evaluating unavailability of equipment aging failures," *IEEE Power Engineering Review,* vol. 22, no. 2, pp. 52-54, 2002.

[4] K. Xie and W. Li, "Analytical model for unavailability due to aging failures in power systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems,* vol. 31, no. 7-8, pp. 345-350, 2009.

[5] J. Pan, Z. Wang, and D. Lubkeman, "Condition based failure rate modeling for electric network components," in *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE'09. IEEE/PES*, 2009, pp. 1-6: IEEE.

[6] C. Suwanasri, S. Lipirodjanapong, T. Suwanasri, and W. Wangdee, "Failure rate analysis of circuit breaker and its preventive maintenance application," in *Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2014 International Conference on*, 2014, pp. 1-6: IEEE.

[7] T. Suwanasri *et al.*, "Failure rate analysis of power circuit breaker in high voltage substation," *GMSARN INTERNATIONAL JOURNAL,* vol. 95, no. 24472, pp. 1-6, 2014.

[8] R. Billinton and R. N. Allan, "Basic power system reliability concepts," *Reliability Engineering & System Safety,* vol. 27, no. 3, pp. 365-384, 1990.

[9] J. Lu, W. Li, and W. Yan, "State enumeration technique combined with a labeling bus set approach for reliability evaluation of substation configuration in power systems," *Electric power systems research,* vol. 77, no. 5-6, pp. 401-406, 2007.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

[10] M. Shirvani, A. Memaripour, M. Abdollahi, and A. Salimi, "Calculation of generation system reliability index: Expected Energy Not Served," *Life Science Journal,* vol. 9, no. 4, 2012.

[11] B. S. Hauge, "Optimizing intervals for inspection and failure-finding tasks," in *Reliability and Maintainability Symposium, 2002. Proceedings. Annual*, 2002, pp. 14-19: IEEE.

[12] G. Balzer, K. Bakic, H. Haubrich, C. Neumann, and C. Schorn, "Selection of an optimal maintenance and replacement of HV equipment by a risk assessment process: CIGRE," *B3-103,* 2006.

[13] A. Naderian, S. Cress, R. Piercy, F. Wang, and J. Service, "An approach to determine the health index of power transformers," in *Electrical Insulation, 2008. ISEI 2008. Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on*, 2008, pp. 192-196: IEEE.

[14] D. Zhang, W. Li, and X. Xiong, "Replacement strategy for aged transformers based on condition monitoring and system risk," *AutomationofElectricPowerSystems (in Chinese),* vol. 37, no. 17, p. 64G71, 2013.

[15] F. Endo, M. Kanamitsu, H. Kojima, N. Hayakawa, and H. Okubo, "Optimum operation and maintenance of power grid based on equipment diagnoses," in *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*, 2007, pp. 1959-1963: IEEE.

[16] F. Endo, R. Shiomi, Y. Suzuki, H. Kojima, N. Hayakawa, and H. Okubo, "Optimization of asset maintenance strategies and power flow operation based on condition diagnoses," in *Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering*, 2009, pp. 1-4.

[17] Y. Suzuki, H. Kojima, N. Hayakawa, F. Endo, and H. Okubo, "Optimization of asset management in high voltage substation based on equipment monitoring and power system operation," in *Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium on*, 2010, pp. 1-5: IEEE.

[18] M. Hanai, H. Kojima, N. Hayakawa, K. Shinoda, and H. Okubo, "Integration of asset management and smart grid with intelligent grid management system,"

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 20, no. 6, pp. 2195-2202, 2013.

[19] K. Taengko and P. Damrongkulkamjorn, "Risk assessment for power transformers in PEA substations using health index," in *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2013 10th International Conference on*, 2013, pp. 1-6: IEEE.

[20] P. Dehghanian and M. Kezunovic, "Cost/benefit anaalysis for circuit breaker maintenance planning and scheduling," in *North American Power Symposium (NAPS), 2013*, 2013, pp. 1-6: IEEE.

[21] T. Suwanasri, R. Phadungthin, and C. Suwanasri, "Risk-based maintenance for asset management of power transformer: practical experience in Thailand," *International Transactions on Electrical Energy Systems,* vol. 24, no. 8, pp. 1103-1119, 2014.

[22] H. Liu, Y. Wang, L. Zhou, Y. Chen, and X. Du, "An optimization method of maintenance strategy for power equipment," in *Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2016 International Conference on*, 2016, pp. 940-943: IEEE.

[23] J. Pongpech and D. Murthy, "Optimal periodic preventive maintenance policy for leased equipment," *Reliability Engineering & System Safety,* vol. 91, no. 7, pp. 772-777, 2006.

[24] I. Jeromin, G. Balzer, J. Backes, and R. Huber, "Life cycle cost analysis of transmission and distribution systems," *CIRED, Prag,* vol. 8, no. 11, 2009.

[25] L. Liu, H. Cheng, Z. Ma, Z. Zhu, J. Zhang, and L. Yao, "Life cycle cost estimate of power system planning," in *Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on*, 2010, pp. 1-8: IEEE.

[26] W. Pan, G. Wu, H. Zhou, C. Wang, and Y. Hou, "Risk-based life cycle cost analysis method for transmission systems," in *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on*, 2012, pp. 1-5: IEEE.

[27] Z. Liao, C. Chen, and X. Zang, "Research on comparison of power grid planning program based on life cycle cost," in *2016 IEEE International*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2016, pp. 1-5.

[28] K. F. Man, K. S. Tang, and S. Kwong, "Genetic algorithms: concepts and applications [in engineering design]," *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* vol. 43, no. 5, pp. 519-534, 1996.

[29] J. S. Usher, A. H. Kamal, and W. H. Syed, "Cost optimal preventive maintenance and replacement scheduling," *IIE Transactions,* vol. 30, no. 12, pp. 1121-1128, 1998/12/01 1998.

[30] K. S. Moghaddam, "Preventive maintenance and replacement scheduling models and algorithms," Ph.D thesis, Industrial Engineering, University of Louisville, USA, 2010.

[31] F. Camci, "System maintenance scheduling with prognostics information using Genetic Algorithm," *IEEE Transactions on Reliability,* vol. 58, no. 3, pp. 539-552, 2009.

[32] M. Hinow and M. Mevissen, "Substation maintenance strategy adaptation for life-cycle cost reduction using Genetic Algorithm," *IEEE Transactions on Power Delivery,* vol. 26, no. 1, pp. 197-204, 2011.

[33] (6/11/2017). *Treat Your Electrical Equipment Like Your Automobile Tires*. Available: http://www.p3-inc.com/blog/entry/treat-your-electrical-equipment-like-your-automobile-tires

[34] นวพล สุดเขต, "การกำหนดแผนงานบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยพิจาณาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า," วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2554.

[35] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability evaluation of engineering systems*. Springer, 1992.

[36] K. S. Moghaddam and J. S. Usher, "Preventive maintenance and replacement scheduling for repairable and maintainable systems using Dynamic Programming," *Computers & Industrial Engineering,* vol. 60, no. 4, pp. 654-665, 2011.

[37] M. A. K. Malik, "Reliable preventive maintenance scheduling," *A I I E Transactions,* vol. 11, no. 3, pp. 221-228, 1979/09/01 1979.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

[38] J. V. and C. Dipak, "Optimal maintenance and replacement policy for a deteriorating system with increased mean downtime," *Naval Research Logistics (NRL),* vol. 39, no. 1, pp. 67-78, 1992.

[39] M. Gerdts. Combinatorial optimization MSM 3M02b [Online]. Available: https://www.unibw.de/lrt1/gerdts/lehre/co.pdf

[40] R. Bellman, *Dynamic Programming*. Courier Corporation, 2013.

[41] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. อัตราค่าไฟฟ้าขายส่งสำหรับ การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) [Online]. Available: http://www3.egat.co.th/ft/20150930%20Wholesale%20Rate_MEA_PEA_Nov2015_rebase%20Ft%20%200.0212.pdf

[42] สำนักนโยบายและแผนพลังงาน, "แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ,2558-2579," 2558.

[43] เกณฑ์มาตรฐานการให้บริการพลังงานด้านกิจการไฟฟ้าประเภทใบอนุญาตระบบส่งไฟฟ้า, 2559.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

คำศัพท์ภายในวิทยานิพนธ์นี้อ้างอิงจากพจนานุกรมวิศวกรรมไฟฟ้าและราชบัณฑิตสถาน วิศวกรรม

คำศัพท์ภาษาอังกฤษ	คำศัพท์ภาษาไทย
Active failure	เหตุการณ์ล้มเหลวแอกทีฟ
Active failure minimal cut-set	เซตตัดต่ำสุดของเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอกทีฟ
Active part	อุปกรณ์ส่วนแอกทีฟ
Air insulated substation (AIS)	สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบฉนวนอากาศ
analytic hierarchy process	กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น
Bathtub curve	กราฟเส้นโค้งอ่างน้ำ
Bellman principle	หลักการของเบลแมน
branch and bound	วิธีแตกกิ่งและขอบเขต
Breaker and a half bus substation	สถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสและเบรกเกอร์ครึ่ง
Bulk power system	ระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่
Bushing	บุชชิ่ง
Capacity outage	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่สูญหายไป
Circuit breaker	เซอร์กิตเบรกเกอร์กำลัง
Composite system	ระบบไฟฟ้าผสม
Condition based maintenance	การบำรุงรักษาตามสภาพ
Condition index	ดัชนีสภาพของอุปกรณ์
Control variable	ตัวแปรควบคุม
Corrective maintenance	การบำรุงรักษาแบบแก้ไข
Corrective maintenance cost	ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาแก้ไข
Cumulative distribution function	ฟังก์ชันแจกแจงสะสม
Current transformer	หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า
Cut-set	เซตตัด
dependent failure	ความเสียหายไม่อิสระ
disposal costs	ค่าซากอุปกรณ์
Distribution system	ระบบจำหน่ายไฟฟ้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

คำศัพท์ภาษาอังกฤษ	คำศัพท์ภาษาไทย
Double bus double breaker substation	สถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานคู่
Dynamic condition	สภาวะพลวัต
dynamic equation	สมการพลวัต
Dynamic programming	วิธีการสร้างโปรแกรมพลวัต
Effective age of equipment	อายุประสิทธิผลของอุปกรณ์
Expected energy not supplied, (EENS)	ค่าคาดหวังของพลังงานที่ไม่ได้ส่งออก
Expected value	ค่าความคาดหวังหรือค่าเฉลี่ย
Exponential distribution	การแจกแจงแบบเลขชี้กำลัง
Exponential function	ฟังก์ชันเลขชี้กำลัง
failure cost	ค่าใช่จ่ายความเสียหาย
Failure function	ฟังก์ชันความล้มเหลว
Failure rate	อัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์
Failure rate function	ฟังก์ชันอัตราความล้มเหลว
Force outage rate	อัตราความขัดข้องโดยเหตุบังคับ
Generation system	ระบบผลิตไฟฟ้า
Genetic algorithm	วิธีพันธุกรรม
grey system theory	ทฤษฎีระบบสีเทา
Grounding	กราวน์
hidden Markov model	แบบจำลองฮิดเด็นมาร์คอฟ
Importance index	ดัชนีความสำคัญอุปกรณ์
Improvement factor	ตัวประกอบการปรับปรุง
Infant morality	ช่วงเวลาเริ่มต้นใช้งาน
Interruption cost	ค่าใช้จ่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า
Interval in subsequent	ช่วงเวลาการเกิดความเสียหายย่อย
investment cost	ค่าใช้จ่ายลงทุน
labeling bus set	กำหนดเซตบัส
Leased equipment	อุปกรณ์เช่ายืม
Least squares method	วิธีกำลังสองต่ำสุด
Life cycle cost	ค่าใช้จ่ายวงชีพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

คำศัพท์ภาษาอังกฤษ	คำศัพท์ภาษาไทย
Load pattern	ลักษณะโหลด
Load shedding	กระบวนการปลดโหลด
Main & Transfer bus substation	สถานีไฟฟ้ารูปแบบบัสประธานและบัสถ่ายโอน
Main insulation	ฉนวนหลัก
Maintenance cost	ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษา
Maintenance outage	เหตุการณ์ล้มเหลวเกิดขึ้นในช่วงการบำรุงรักษา
Major overhaul	การบำรุงรักษาใหญ่
Mean time to failure	เวลาเฉลี่ยของความล้มเหลว
Mechanism	กลไก
Median Rank	ค่ามัธยฐานของอันดับข้อมูล
Minimal cut-set	วิธีเซตตัดต่ำสุด
Multi-criteria analysis	วิธีตัดสินใจเชิงวิเคราะห์หลายเกณฑ์
multiple failure	ความเสียหายพหุคูณ
nonlinear optimization problem	ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบไม่เชิงเส้น
Non-Sequential Monte Carlo simulation	การจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลแบบไม่ตามลำดับเวลา
Normal distribution	การแจกแจงปรกติ
On load Tap changer	ตัวเปลี่ยนจุดแยกของหม้อแปลงขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า
online monitoring	สถานะการใช้งานแบบออนไลน์
operation cost	ค่าใช้จ่ายดำเนินงาน
Optimal solution	คำตอบเหมาะที่สุด
Optimization	การหาค่าเหมาะที่สุด
Outage cost	ค่าใช้จ่ายนื่องจากไฟขัดข้อง
Overlapping failure	เหตุการณ์ล้มเหลวแบบซับซ้อน
Passive failure	เหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ
Passive failure minimal cut-set	เซตตัดต่ำสุดของเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ
Power system reliability	ความเชื่อถือได้ระบบไฟฟ้า
Power transformer	หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

คำศัพท์ภาษาอังกฤษ	คำศัพท์ภาษาไทย
Preventive maintenance	การบำรุงรักษาแบบป้องกัน
Preventive maintenance cost	ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาเชิงป้องกัน
Primary protection	วงจรป้องกันปฐมภูมิ
Probability density function	ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น
Probability of force outage	ความน่าจะเป็นที่ไฟฟ้าดับ
random search	วิธีค้นหาแบบสุ่ม
ranking and weighting score	เกณฑ์การให้คะแนนและตัวถ่วงน้ำหนักคะแนน
recycling cost	ค่าใช้จ่ายรีไซเคิล
Reduction method	วิธีลดทอนเครือข่าย
Reliability	ความเชื่อถือได้
Reliability center maintenance	การบำรุงรักษาโดยมีความเชื่อถือได้เป็นศูนย์กลาง
Reliability function	ฟังก์ชันความเชื่อถือได้
Repair state	สถานะการซ่อมแซม
Replacement	การเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ทดแทน
Risk based maintenance	การบำรุงรักษาแบบความเสี่ยง
Risk matrix	เมทริกซ์ความเสี่ยง
Routine maintenance	การบำรุงรักษาประจำ
Scale parameter	พารามิเตอร์มาตราส่วน
Sequential Monte Carlo simulation	การจำลองมอนติคาร์โลตามลำดับ
Shape parameter	พารามิเตอร์รูปร่าง
smart equipment	อุปกรณ์อัจฉริยะ
Smart grid	โครงข่ายอัจฉริยะ
State enumeration	วิธีกำหนดสถานะ
State variable	ตัวแปรสถานะ
Steady state condition	สภาวะอยู่ตัว
Stuck condition failure	การทำงานผิดปกติของอุปกรณ์ป้องกัน
Surge Arrester	กับดักเสิร์จ
Switching state	สถานะการสวิตซ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

คำศัพท์ภาษาอังกฤษ	คำศัพท์ภาษาไทย
System adequacy	ความเพียงพอของระบบ
System Average Interruption Duration Index	ค่าดัชนีระยะเวลาที่ไฟดับ
System Average Interruption Frequency Index	ค่าดัชนีจำนวนครั้งที่ไฟดับ
System performance index	ตัวชี้วัดสมรรถนะระบบ
System security	ความมั่นคงของระบบ
System stability	เสถียรภาพของระบบ
Time based maintenance	การบำรุงรักษาตามเวลา
Transmission system	ระบบส่งไฟฟ้า
Unavailability	ความไม่สามารถใช้สอยได้
Unavailability due to active failure	ความไม่สามารถใช้สอยได้เนื่องจากเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอคทีฟ
Unavailability due to passive failure	ความไม่สามารถใช้สอยได้เนื่องจากเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ
Unavailability of equipment aging failure	ความไม่สามารถใช้สอยได้เนื่องจากการเสื่อมสภาพตามอายุของอุปกรณ์
Up state	สถานะปกติ
Useful life period	ช่วงเวลาใช้งาน
Variance	ค่าความแปรปรวน
Voltage transformer	หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า
Wear out period	ช่วงเวลาสึกหรอ
Weibull distribution	การแจกแจงแบบไวบูลล์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุรวิชญ์ เลาหนันทน์ เกิดวันที่ 5 กันยายน พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2556 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยปี 2559

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY