การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด
โดยพิจารณาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า

นายนวพล สุดเขต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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.

OPTIMAL MAINTENANCE SCHEDULE FOR EQUIPMENT IN ELECTRICAL SUBSTATION
WITH CONSIDERATION OF SYSTEM RELIABILITY

Mr. Navapol Sudket

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 2013
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด โดยพิจารณาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า
โดย	นายนวพล สุดเขต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. สุรชัย ชัยทัศนีย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร. สุรชัย ชัยทัศนีย์)

....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนบบุญ หุนเจริญ)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนพงศ์ สุวรรณศรี)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

นวพล สุดเขต : การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด โดยพิจารณาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า. (OPTIMAL MAINTENANCE SCHEDULE FOR EQUIPMENT IN ELECTRICAL SUBSTATION WITH CONSIDERATION OF SYSTEM RELIABILITY) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร. สุรชัย ชัยทัศนีย์, 199 หน้า.

อุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ หม้อแปลงไฟฟ้า บัสบาร์ หรือสายไฟฟ้า เป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบไฟฟ้า ซึ่งส่วนมากมีการใช้งานที่ยาวนานย่อมส่งผลให้มีการเสื่อมสภาพ ซึ่งมีผลกระทบต่อความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้ายิ่งมีความสำคัญมาก เพราะสถานีไฟฟ้าเป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างระบบผลิตไฟฟ้า ระบบส่งไฟฟ้า และระบบจำหน่ายไฟฟ้า การบำรุงรักษาจึงถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงสภาพของอุปกรณ์ให้มีสภาพที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ได้ถูกกำหนดตามวงรอบ ซึ่งอาจก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายที่เกินความจำเป็น หรือในบางครั้งอาจส่งผลให้สถานีไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ที่ลดลง ด้วยความสำคัญดังกล่าว วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอ การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด โดยพิจารณาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า ด้วยการประยุกต์วิธีการค้นหาคำตอบด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม ที่ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาน้อยที่สุด ภายใต้มาตรฐานความเชื่อถือได้ที่กำหนดไว้ และจำลองอัตราเหตุกาณ์ล้มเหลวด้วยการกระจายตัวแบบไวบูลล์ที่มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเพิ่มขึ้นตามเวลา นอกจากนี้การกำหนดแผนการบำรุงรักษายังคำนึงถึงการเจริญเติบโตของโหลด อัตราเงินเฟ้อ และรองรับอุปกรณ์ที่เพิ่มขึ้นจากการขยายสถานีไฟฟ้า สำหรับค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาประกอบด้วยค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข และมูลค่าสูญเสียอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ

การทดสอบสมรรถนะกับสถานีไฟฟ้าตัวอย่าง พบว่าขั้นตอนที่ได้นำเสนอสามารถกำหนดแผนการบำรุงรักษาได้อย่างเหมาะสม ด้วยค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่าการบำรุงรักษาตามวงรอบ และอยู่ภายใต้มาตรฐานความเชื่อถือได้ที่กำหนด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต ....
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....
ปีการศึกษา	2556	

5670252221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEYWORDS: MAINTENANCE / GENETIC ALGORITHM / RELIABILITY / SUBSTATION

NAVAPOL SUDKET: OPTIMAL MAINTENANCE SCHEDULE FOR EQUIPMENT IN ELECTRICAL SUBSTATION WITH CONSIDERATION OF SYSTEM RELIABILITY. ADVISOR: SURACHAI CHAITUSANEY, Ph.D., 199 pp.

Electrical equipment, such as power transformer, circuit breaker, busbar, power line, etc., is the important component in power system. Most of them have been long used for many years. During the long use, they are gradually deteriorated day-by-day. The deterioration will impact on the reliability of the whole system. Especially, the deterioration of equipment in electrical substation is very significant because electrical substation is the junction point of generation, transmission and distribution systems. Thus, maintenance is needed to ensure that equipment in electrical substation can be longer available. However, the current maintenance schedule in practice has been determined by fixed schedule basis (time based maintenance) which may cause unnecessary cost and reliability reduction. From all the reasons, this thesis proposes the optimal maintenance schedule for electrical equipment in electrical substation by considering system reliability, using Genetic Algorithms (GA). The failure probability of equipment is modeled by Weibull distribution which brings about an increasing failure rate as time passes. Finally, the optimal maintenance schedule, which minimizes the maintenance cost under a required reliability condition, can be obtained. Moreover, the proposed maintenance schedule considers load growth, inflation and electrical substation expansion. The maintenance cost consists of preventive maintenance cost, corrective maintenance cost and outage cost.

The test results, with the sample electrical substations, show that the proposed method can find the optimal maintenance schedule with the minimized cost, when comparing with a time based maintenance under a required reliability condition.

Department:	Electrical Engineering	Student's Signature	....
Field of Study:	Electrical Engineering	Advisor's Signature	....
Academic Year:	2013		

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ของ อาจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศนีย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบ แก้ไข และให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนพงศ์ สุวรรณศรี ที่ได้เสียสละเวลาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นอย่างสูง ที่ให้ความสะดวกในการติดต่อประสานงาน

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจตลอดมา ตลอดจน พี่น้อง และเพื่อนๆ ทุกคนที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฐ

สารบัญภาพ ..... ณ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ 5

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 5

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินการ 5

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าได้รับจากวิทยานิพนธ์ 6

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6

1.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการบำรุงรักษาอุปกรณ์ 6

1.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า 9

1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ 12

บทที่ 2 การประเมินพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ด้วยเทคนิดความน่าจะเป็น 13

2.1 พฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ 13

2.2 คุณลักษณะฟังก์ชันสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ 16

2.2.1 ฟังก์ชันเหตุการณ์ล้มเหลว 17

2.2.2 ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ 17

2.2.3 ฟังก์ชันความเสียหาย 18

2.2.4 ระยะเวลาการใช้งานอุปกรณ์เฉลี่ย 20

2.2.5 ความสัมพันธ์ฟังก์ชันสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ 20

2.3 ผลกระทบของอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเมื่อเทียบกับเวลา 21

2.4 ฟังก์ชันการกระจายตัวที่ใช้วิเคราะห์ในระบบไฟฟ้ากำลัง 22

2.4.1 การกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ 22

หน้า

2.4.2 การกระจายตัวแบบปกติ 24
2.4.3 การกระจายตัวแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล 25
2.4.4 การกระจายตัวแบบไวบูลล์ 27
2.5 การประยุกต์ทฤษฎีการประเมินความเชื่อถือได้ร่วมกับฟังก์ชันการกระจายตัว 30
บทที่ 3 การบำรุงรักษาอุปกรณ์ 32
3.1 กลยุทธ์การบำรุงรักษา 32
3.1.1 การบำรุงรักษาแบบแก้ไข 33
3.1.2 การบำรุงรักษาแบบตามเวลา 33
3.1.3 การบำรุงรักษาแบบตรวจสภาพ 33
3.1.4 การบำรุงรักษาแบบความเชื่อถือได้เป็นศูนย์กลาง 34
3.1.5 การบำรุงรักษาแบบความเสี่ยง 35
3.2 ระดับการบำรุงรักษาอุปกรณ์ 37
3.3 แบบจำลองการบำรุงรักษาอุปกรณ์ 39
3.3.1 แบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยเทคนิคความน่าจะเป็น 39
3.3.2 แบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ 42
3.3.2.1 แบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว 42
3.3.2.2 แบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยการลดอายุอุปกรณ์ 43
3.3.2.3 แบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยวิธีผสม 44
บทที่ 4 การประเมินความเชื่อถือได้ในสถานีไฟฟ้า 46
4.1 แนวคิดพื้นฐานการประเมินความเชื่อถือได้ 46
4.1.1 ข้อมูลที่ใช้สำหรับประเมินความเชื่อถือได้ 47
4.1.2 ระดับการประเมินความเชื่อถือได้ 48
4.2 การประเมินความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้า 51
4.2.1 การประเมินความเชื่อถือได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์ 52
4.2.1.1 วิธีการลดทอนเครือข่าย 52
4.2.1.2 วิธีความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข 54
4.2.1.3 วิธีการวิเคราะห์ด้วยแผนภาพต้นไม้ 56

หน้า

4.2.1.4 วิธีมินิมัลคัตเซต 57
4.2.2 การประเมินความเชื่อถือได้ด้วยวิธีการจำลองเหตุการณ์ 60
4.2.3 การคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ 63
4.2.3.1 ค่าดัชนี SAIFI 63
4.2.3.2 ค่าดัชนี SAIDI 63
4.2.3.3 ค่าดัชนี ENS 63
4.3 ขั้นตอนการประเมินความเชื่อถือได้ในสถานีไฟฟ้า 64
4.3.1 การเตรียมโครงสร้างสถานีไฟฟ้าและค่าทางสถิติ 64
4.3.2 การตรวจหาเส้นทางที่สั้นที่สุด 65
4.3.3 การตรวจหามินิมัลคัตเซต 68
4.3.3.1 การตรวจหามินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ 68
4.3.3.1 การตรวจหามินิมัลคัตเซตแบบแอคทีฟ 70
4.3.4 การคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ 71
4.4 ตัวอย่างการประเมินความเชื่อถือได้ในสถานีไฟฟ้า 73
บทที่ 5 การค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม 81
5.1 แนวคิดพื้นฐานของขั้นตอนเชิงพันธุกรรม 82
5.2 ขั้นตอนการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม 83
5.2.1 การเข้ารหัสและการถอดรหัส 84
5.2.2 การสร้างประชากรเริ่มต้น 86
5.2.3 การประเมินค่าความเหมาะสม 86
5.2.4 การคัดเลือกประชากรที่เด่นที่สุด 87
5.2.5 การคัดเลือกสายพันธุ์ 87
5.2.6 การดำเนินการทางพันธุกรรม 89
5.2.6.1 การข้ามสายพันธุ์ 89
5.2.6.2 การผ่าเหล่า 92
5.2.7 เงื่อนไขการหยุด 92
5.3 ตัวอย่างการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม 95

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

บทที่ 6 การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด 98
6.1 แนวคิดการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ 98
6.2 แบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับการบำรุงรักษาอุปกรณ์ 101
6.2.1 แบบจำลองอัตราการเกิดเหตุการณ์ล้มเหลว 101
6.2.2 แบบจำลองผลกระทบจากการบำรุงรักษา 102
6.2.3 แบบจำลองการบำรุงรักษาแบบป้องกัน 103
6.2.4 แบบจำลองการบำรุงรักษาแบบแก้ไข 104
6.3 การประเมินผลกระทบจากการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่มีต่อสถานีไฟฟ้า 106
6.3.1 การประเมินผลกระทบของการจ่ายกำลังไฟฟ้าภายใต้สภาวะการบำรุงรักษา 107
6.3.1.1 สภาวะการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกัน 108
6.3.1.2 สภาวะการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบแก้ไข 111
6.3.1.3 ตัวอย่างการประเมินผลกระทบการจ่ายกำลังไฟฟ้าภายใต้สภาวะการบำรุงรักษา 112
6.3.2 การกำหนดระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า 117
6.3.3 การประเมินมูลค่าสูญเสียอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ 120
6.4 สมมุติฐานทางเศรษฐศาสตร์ 122
6.5 การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด 123
6.5.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 124
6.5.1.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับอุปกรณ์ 125
6.5.1.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับสถานีไฟฟ้า 126
6.5.2 เงื่อนไขบังคับ 128
6.5.1.2 เงื่อนไขบังคับระดับอุปกรณ์ 128
6.5.1.2 เงื่อนไขบังคับระดับสถานีไฟฟ้า 129
6.5.3 การประยุกต์วิธีการหาค้นหาคำตอบด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรมเข้ากับปัญหาการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด 130
บทที่ 7 การทดสอบและวิเคราะห์ผล 137
7.1 ข้อมูลพื้นฐานและระบบทดสอบ 137
7.1.1 ข้อมูลทางสถิติและพิกัดของอุปกรณ์ 137

หน้า

7.1.2 รูปแบบการจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้าและการขยายสถานีไฟฟ้า 138
7.1.3 ค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องในการกำหนดแผนการบำรุงรักษา 140
7.1.4 การจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้า 140
7.1.5 เงื่อนไขบังคับความเชื่อถือได้ 142
7.1.6 การกำหนดค่าของตัวแปรในการค้นหาคำตอบด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม................ 143
7.2 การทดสอบ 143
7.2.1 การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด... 144
7.2.1.1 ผลการทดสอบการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด.................................. 144
7.2.1.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด 165
7.2.1.4 ความไวของพารามิเตอร์ในแบบจำลองการบำรุงรักษาที่ส่งผลต่อการกำหนดแผนการบำรุงรักษา 169
7.2.2 การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด......................... 170
7.2.2.1 ผลการทดสอบการตรวจหากลุ่มมินิมัลคัตเซต.. 171
7.2.2.2 ผลการทดสอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า........ 173
7.2.2.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า 186
บทที่ 8 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 192
8.1 สรุปผลการวิจัย.. 192
8.2 ข้อเสนอแนะ... 194
รายการอ้างอิง 195
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 199

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของความสัมพันธ์ของฟังก์ชันสำหรับการประเมินความเชื่อได้............21
ตารางที่ 2.2 ฟังก์ชันสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ในแต่ละรูปแบบการกระจายตัว.............30
ตารางที่ 2.3 ระยะเวลาการใช้งานอุปกรณ์เฉลี่ยในแต่ละรูปแบบการกระจายตัว 31
ตารางที่ 2.4 ฟังก์ชันอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวในแต่ละรูปแบบการกระจายตัว 31
ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างเกณฑ์การประเมินความเสี่ยงของอุปกรณ์..35
ตารางที่ 3.2 สภาพอุปกรณ์ภายหลังจากการบำรุงรักษาในแต่ละระดับการบำรุงรักษา................38
ตารางที่ 4.1 การจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลด้วยการโยนเหรียญ......................................61
ตารางที่ 4.2 การจัดเตรียมข้อมูลโครงสร้างของสถานีไฟฟ้า...65
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลโครงสร้างของระบบที่จำลองขึ้นใหม่...67
ตารางที่ 4.4 ข้อมูลโครงสร้างของสถานีไฟฟ้าไฟฟ้าตัวอย่าง 74
ตารางที่ 4.5 ค่าสถิติของสถานีไฟฟ้าไฟฟ้าตัวอย่าง..75
ตารางที่ 4.6 โครงสร้างของสถานีไฟฟ้าตัวอย่างที่จำลองขึ้นใหม่..75
ตารางที่ 4.7 ตารางผู้มาก่อนของสาขาของสถานีไฟฟ้าตัวอย่าง 76
ตารางที่ 4.8 เส้นทางที่สั้นที่สุดของสถานีไฟฟ้าตัวอย่างที่จุดโหลด 1 76
ตารางที่ 4.9 กลุ่มอุปกรณ์ของสถานีไฟฟ้าที่ตัวอย่างสามารถเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวที่เป็นไปได้ 77
ตารางที่ 4.10 การตรวจสอบอุปกรณ์กับอุปกรณ์ที่อยู่บนเส้นทางที่สั้นที่สุด 77
ตารางที่ 4.11 แสดงการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันของระบบสถานีไฟฟ้าตัวอย่าง 78
ตารางที่ 4.12 มินิมัลคัตเซตของสถานีไฟฟ้าที่จุดโหลด 1 และจุดโหลด 2...78
ตารางที่ 4.13 ค่าทางสถิติของสถานีไฟฟ้าตัวอย่างที่จุดโหลด 1...79
ตารางที่ 4.14 ค่าทางสถิติของสถานีไฟฟ้าตัวอย่างที่จุดโหลด 2...80
ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างการถอดรหัสคำตอบของตัวแปร x และ y 86
ตารางที่ 5.2 ตัวอย่างการสร้างวงล้อรูเล็ท 88
ตารางที่ 6.1 การประเมินผลกระทบสภาวะการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกันและแบบแก้ไข..112
ตารางที่ 6.2 พารามิเตอร์ที่ใช้การคำนวณดัชนี ENS ที่เกิดจากการบำรุงรักษาแบบป้องกัน 121
ตารางที่ 6.3 พารามิเตอร์ที่ใช้การคำนวณดัชนี ENS ที่เกิดจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไข 122
ตารางที่ 6.4 การถอดรหัสคำตอบในแต่ละบิตของอุปกรณ์...131
ตารางที่ 7.1 ข้อมูลทางสถิติและพิกัดของอุปกรณ์..138
ตารางที่ 7.2 ค่าใช้จ่ายสำหรับการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในแต่ละประเภท.......................................140
ตารางที่ 7.3 ปริมาณโหลดเฉลี่ยในแต่ละจุดโหลด 141
ตารางที่ 7.4 เกณฑ์มาตราฐานคุณภาพบริการไฟฟ้า..142
ตารางที่ 7.5 การกำหนดค่าของตัวแปรในการค้นหาคำตอบด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม...............143
ตารางที่ 7.6 กลุ่มมินิมัลคัตเซตของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half 171
ตารางที่ 7.7 กลุ่มมินิมัลคัตเซตของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker 172

หน้า

ตารางที่ 7.8 อุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half ได้รับการบำรุงรักษา ตามวงรอบทุกๆ 5 ปี 175
ตารางที่ 7.9 ผลการทดสอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half 177
ตารางที่ 7.10 อุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker ได้รับการบำรุงรักษา ตามวงรอบทุกๆ 5 ปี....................181
ตารางที่ 7.11 ผลการทดสอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker 183

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1.1 ผลกระทบจากการบำรุงรักษาแบบป้องกันต่อค่าใช้จ่าย 3
ภาพที่ 1.2 แนวคิดการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด 4
ภาพที่ 1.3 แนวทางการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด 11
ภาพที่ 2.1 วงรอบการทำงานของอุปกรณ์ 14
ภาพที่ 2.2 แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์ 2 สถานะของมาร์คอฟ 14
ภาพที่ 2.3 สถานะการทำงานอุปกรณ์ตามแบบจำลอง 2 สถานะของมาร์คอฟ 15
ภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันการกระจายตัวความน่าจะเป็นสะสมและเวลา 16
ภาพที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเหตุการณ์การล้มเหลว และฟังก์ชันความเชื่อถือได้ 18
ภาพที่ 2.6 ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ล้มเหลวในช่วงระยะเวลา 19
ภาพที่ 2.7 ผลกระทบของอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเมื่อเทียบกับเวลา 22
ภาพที่ 2.8 การกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ 23
ภาพที่ 2.9 การกระจายตัวแบบปกติ 25
ภาพที่ 2.10 การกระจายตัวแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล 26
ภาพที่ 2.11 ผลกระทบจากพารามิเตอร์บ่งบอกขนาดของการกระจายตัวแบบไวบูลล์ 27
ภาพที่ 2.12 ผลกระทบจากพารามิเตอร์บ่งบอกรูปร่างของการกระจายตัวแบบไวบูลล์ 28
ภาพที่ 2.13 ฟังก์ชันการกระจายตัวสะสมของการกระจายตัวแบบไวบูลล์ 29
ภาพที่ 3.1 กลยุทธ์การบำรุงรักษาตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน 32
ภาพที่ 3.2 มทริกซ์ประเมินความเสี่ยงของอุปกรณ์ 36
ภาพที่ 3.3 กลยุทธ์การบำรุงรักษาตามลักษณะการดำเนินงาน 37
ภาพที่ 3.4 ตัวอย่างผลกระทบของอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวจากการบำรุงรักษาทั้งสามระดับ 39
ภาพที่ 3.5 แบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว 43
ภาพที่ 3.6 แบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยการลดอายุอุปกรณ์ 44
ภาพที่ 3.7 การเปรียบเทียบแบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวอุปกรณ์ 45
ภาพที่ 4.1 ประเภทความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้า 46
ภาพที่ 4.2 ประเภทข้อมูลที่ใช้สำหรับประเมินความเชื่อถือได้ 47
ภาพที่ 4.3 ขอบเขตการทำงานพื้นฐานในระบบไฟฟ้า 48
ภาพที่ 4.4 แบบจำลองระบบสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ในระดับที่ 1 49
ภาพที่ 4.5 แบบจำลองของระบบสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ในระดับที่ 2 49
ภาพที่ 4.6 แบบจำลองของระบบสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ในระดับที่ 3 50
ภาพที่ 4.7 วิธีการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า 51
ภาพที่ 4.8 การเชื่อมต่อแบบอนุกรม 52
ภาพที่ 4.9 การเชื่อมต่อแบบขนาน 53
ภาพที่ 4.10 ตัวอย่างการคำนวณความเชื่อถือของระบบที่มีการเชื่อมต่อแบบขนานและอนุกรม 54
ภาพที่ 4.11 ตัวอย่างการคำนวณความเชื่อถือด้วยวิธีเงื่อนไขความน่าจะเป็น 55

หน้า

ภาพที่ 4.12 ตัวอย่างการคำนวณความเชื่อถือด้วยวิธีวิเคราะห์แผนภาพต้นไม้ 56
ภาพที่ 4.13 กลุ่มมินิมัลคัตเซตตัวอย่าง............57
ภาพที่ 4.14 กลุ่มมินิมัลคัตเซต 59
ภาพที่ 4.15 ความน่าจะเป็นที่เหรียญออกหัวจากการโยนเหรียญ 20 ครั้ง 61
ภาพที่ 4.16 การจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล 62
ภาพที่ 4.17 ขั้นตอนหลักของการประเมินความเชื่อถือได้ในสถานีไฟฟ้าด้วยมินิมัลคัตเซต 64
ภาพที่ 4.18 การตรวจหาเส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยวิธีผู้มาก่อนของสาขา 66
ภาพที่ 4.19 การจัดทำตารางผู้มาก่อนของสาขา............67
ภาพที่ 4.20 การตรวจหามินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ............69
ภาพที่ 4.21 การตรวจหามินิมัลคัตเซตแบบแอคทีฟ 70
ภาพที่ 4.22 มินิมัลคัตเซตของสถานีไฟฟ้าในแต่ละจุดโหลด............72
ภาพที่ 4.23 สถานีไฟฟ้าที่มีรูปแบบการจัดเรียงบัสแบบ Single-bus............74
ภาพที่ 4.24 เส้นทางที่สั้นที่สุดจากสาขาที่จำลองขึ้นใหม่ของสถานีไฟฟ้าตัวอย่างที่จุดโหลด 1 76
ภาพที่ 4.25 มินิมัลคัตเซตของสถานีไฟฟ้าที่จุดโหลด 1 และจุดโหลด 2............79
ภาพที่ 5.1 วิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยปัญญาเชิงคำนวณ 81
ภาพที่ 5.2 วัฏจักรของขั้นตอนเชิงพันธุกรรม............82
ภาพที่ 5.3 ภาพรวมขั้นตอนการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม............84
ภาพที่ 5.4 ตัวอย่างโครโมโซมของตัวแปร x และ y 86
ภาพที่ 5.5 ตัวอย่างการสร้างประชากรเริ่มต้น 86
ภาพที่ 5.6 ตัวอย่างวงล้อรูเล็ท 88
ภาพที่ 5.7 ตัวอย่างการข้ามสายพันธุ์ในแต่ละรูปแบบ 91
ภาพที่ 5.8 ตัวอย่างการผ่าเหล่าที่บิต 5 92
ภาพที่ 5.9 ขั้นตอนการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม 94
ภาพที่ 5.10 การลู่เข้าของค่าความเหมาะสมของฟังก์ชันตัวอย่าง 97
ภาพที่ 5.11 ระนาบของฟังก์ชันตัวอย่าง............97
ภาพที่ 6.1 ค่าใช้จ่ายสำหรับการวิเคราะห์การลงทุนในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ 100
ภาพที่ 6.2 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ที่จำลองด้วยการกระจายตัวแบบไวบูลล์ 101
ภาพที่ 6.3 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ภายหลังการบำรุงรักษา............103
ภาพที่ 6.4 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ภายหลังการบำรุงรักษา............105
ภาพที่ 6.5 ขอบเขตของแหล่งจ่ายไฟฟ้า สถานีไฟฟ้า จุดโหลด และสัญลักษณ์ในสถานีไฟฟ้า ..108
ภาพที่ 6.6 การดำเนินงานการบำรุงรักษาแบบป้องกัน 108
ภาพที่ 6.7 ขั้นตอนการบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบป้องกัน............109
ภาพที่ 6.8 ขั้นตอนการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าและบัสบาร์แบบป้องกัน 110
ภาพที่ 6.9 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะปกติ 112
ภาพที่ 6.10 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าไปยังจุดโหลด............113

หน้า

ภาพที่ 6.11 มินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟของจุดโหลด 1 113
ภาพที่ 6.12 มินิมัลคัตเซตแบบแอคทีฟของจุดโหลด 1 114
ภาพที่ 6.13 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าไปยังจุดโหลด 115
ภาพที่ 6.14 การไหลของกำลังไฟฟ้าไปยังจุดโหลดกรณีบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าแบบป้องกัน 116
ภาพที่ 6.15 ระยะที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าขณะบำรุงรักษาแบบป้องกัน 117
ภาพที่ 6.16 ระยะที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าขณะบำรุงรักษาแบบป้องกันใน 118
ภาพที่ 6.17 ระยะที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าขณะบำรุงรักษาแบบแก้ไข....119
ภาพที่ 6.18 ระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าภายใต้การบำรุงรักษาอุปกรณ์ 120
ภาพที่ 6.19 มูลค่าของเงินที่แปรผันไปตามช่วงเวลาและอัตราเงินเฟ้อ 122
ภาพที่ 6.20 ตัวอย่างอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวภายหลังการบำรุงรักษา 123
ภาพที่ 6.21 ตัวอย่างอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวภายหลังการบำรุงรักษารายปี 124
ภาพที่ 6.22 โครโมโซมสำหรับคำตอบการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด 132
ภาพที่ 6.23 โครโมโซมสำหรับคำตอบการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด 132
ภาพที่ 6.24 ขั้นตอนการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด....133
ภาพที่ 7.1 การจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้าแบบ Beaker-and-a-half 139
ภาพที่ 7.2 การจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้ารูปแบบ Double-bus-double-breaker 139
ภาพที่ 7.3 ภาพรวมการเจริญเติบโตโหลดที่พิจารณา 142
ภาพที่ 7.4 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเซอร์กิตเบรกเกอร์ก่อนการบำรุงรักษา....145
ภาพที่ 7.5 ความเชื่อถือได้เซอร์กิตเบรกเกอร์ก่อนการบำรุงรักษา....145
ภาพที่ 7.6 จำนวนครั้งที่เซอร์กิตเบรกเกอร์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวก่อนการบำรุงรักษา 146
ภาพที่ 7.7 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขของเซอร์กิตเบรกเกอร์ก่อนบำรุงรักษา....146
ภาพที่ 7.8 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเซอร์กิตเบรกเกอร์กรณีบำรุงรักษาตามวงรอบ 147
ภาพที่ 7.9 ความเชื่อถือได้เซอร์กิตเบรกเกอร์กรณีบำรุงรักษาตามวงรอบ 147
ภาพที่ 7.10 จำนวนครั้งที่เซอร์กิตเบรกเกอร์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวกรณีบำรุงรักษาตามวงรอบ.147
ภาพที่ 7.11 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขเซอร์กิตเบรกเกอร์กรณีบำรุงรักษาตามวงรอบ 148
ภาพที่ 7.12 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเซอร์กิตเบรกเกอร์กรณีบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์ 148
ภาพที่ 7.13 ความเชื่อถือได้เซอร์กิตเบรกเกอร์กรณีบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์....149
ภาพที่ 7.14 จำนวนครั้งที่เซอร์กิตเบรกเกอร์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวกรณีบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์ 149

หน้า

ภาพที่ 7.15 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขเซอร์กิตเบรกเกอร์กรณีบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์ 149
ภาพที่ 7.16 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเซอร์กิตเบรกเกอร์กรณีบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม 150
ภาพที่ 7.17 ความเชื่อถือได้ของเซอร์กิตเบรกเกอร์กรณีบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม...................150
ภาพที่ 7.18 จำนวนครั้งที่เซอร์กิตเบรกเกอร์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวกรณีบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม...151
ภาพที่ 7.19 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขเซอร์กิตเบรกเกอร์กรณีบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม 151
ภาพที่ 7.20 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวหม้อแปลงไฟฟ้าก่อนการบำรุงรักษา..................................152
ภาพที่ 7.21 ความเชื่อถือได้ของหม้อแปลงไฟฟ้าก่อนการบำรุงรักษา..152
ภาพที่ 7.22 จำนวนครั้งที่หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดเหตุการณ์ล้มเหวก่อนการบำรุงรักษา 152
ภาพที่ 7.23 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขของหม้อแปลงไฟฟ้าก่อนบำรุงรักษา..153
ภาพที่ 7.24 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีบำรุงรักษาตามวงรอบ 153
ภาพที่ 7.25 ความเชื่อถือได้ของหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีบำรุงรักษาตามวงรอบ 154
ภาพที่ 7.26 จำนวนครั้งที่หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวกรณีบำรุงรักษาตามวงรอบ 154
ภาพที่ 7.27 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีบำรุงรักษาตามวงรอบ 154
ภาพที่ 7.28 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์ 155
ภาพที่ 7.29 ความเชื่อถือได้ของหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์ 155
ภาพที่ 7.30 จำนวนครั้งที่หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวกรณีบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์ 156
ภาพที่ 7.31 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์ 156
ภาพที่ 7.32 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม 157
ภาพที่ 7.33 ความเชื่อถือได้ของหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม 157
ภาพที่ 7.34 จำนวนครั้งที่หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวกรณีบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม...157
ภาพที่ 7.35 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม 158
ภาพที่ 7.36 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวบัสบาร์ก่อนการบำรุงรักษา...158
ภาพที่ 7.37 ความเชื่อถือได้ของบัสบาร์ก่อนการบำรุงรักษา 159
ภาพที่ 7.38 จำนวนครั้งที่บัสบาร์เกิดเหตุการณ์ล้มเหวก่อนการบำรุงรักษา...............................159

หน้า

ภาพที่ 7.39 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขของบัสบาร์ก่อนบำรุงรักษา 159
ภาพที่ 7.40 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวบัสบาร์กรณีบำรุงรักษาตามวงรอบ 160
ภาพที่ 7.41 ความเชื่อถือได้ของบัสบาร์กรณีบำรุงรักษาตามวงรอบ..160
ภาพที่ 7.42 จำนวนครั้งที่บัสบาร์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวกรณีบำรุงรักษาตามวงรอบ.................161
ภาพที่ 7.43 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขบัสบาร์กรณีบำรุงรักษาตามวงรอบ 161
ภาพที่ 7.44 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวบัสบาร์กรณีบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์..........162
ภาพที่ 7.45 ความเชื่อถือได้ขิงบัสบาร์บัสบาร์กรณีบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์..........162
ภาพที่ 7.46 จำนวนครั้งที่บัสบาร์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวบัสบาร์กรณีบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์ 162
ภาพที่ 7.47 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขบัสบาร์กรณีบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์..........163
ภาพที่ 7.48 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวบัสบาร์กรณีบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม 163
ภาพที่ 7.49 ความเชื่อถือได้ของบัสบาร์กรณีบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม....................................164
ภาพที่ 7.50 จำนวนครั้งที่บัสบาร์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวกรณีบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม...........164
ภาพที่ 7.51 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขบัสบาร์กรณีบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม..........164
ภาพที่ 7.52 ผลการทดสอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์ทั้ง 4 กรณี 165
ภาพที่ 7.53 สัดส่วนค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขเซอร์กิตเบรกเกอร์ 166
ภาพที่ 7.54 ผลการทดสอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 4 กรณี 167
ภาพที่ 7.55 สัดส่วนค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขหม้อแปลงไฟฟ้า..........167
ภาพที่ 7.56 ผลการทดสอบการกำหนดตารางการบำรุงรักษาบัสบาร์ทั้ง 4 กรณี 168
ภาพที่ 7.57 สัดส่วนค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขบัสบาร์ 168
ภาพที่ 7.58 ความไวของประสิทธิภาพการบำรุงรักษา...170
ภาพที่ 7.59 ดัชนี SAIFI ของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half กรณีอุปกรณ์ไม่ได้รับการบำรุงรักษา..........173
ภาพที่ 7.60 ดัชนี SAIDI ของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half กรณีอุปกรณ์ไม่ได้รับการบำรุงรักษา..........174
ภาพที่ 7.61 ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half กรณีอุปกรณ์ไม่ได้รับการบำรุงรักษา 174
ภาพที่ 7.62 ดัชนี SAIFI ของการจัดเรียงบัสรูปรูปแบบ Breaker-and-a-half กรณีอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบ..........176

หน้า

ภาพที่ 7.63 ดัชนี SAIDI ของการจัดเรียงบัสรูปรูปแบบ Breaker-and-a-half กรณีอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบ....176
ภาพที่ 7.64 ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการจัดเรียงบัสรูปรูปแบบ Breaker-and-a-half กรณีอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบ....176
ภาพที่ 7.65 ดัชนี SAIFI ของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half กรณีอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม....178
ภาพที่ 7.66 ดัชนี SAIDI ของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half กรณีอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม....178
ภาพที่ 7.67 ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half กรณีอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม....179
ภาพที่ 7.68 ดัชนี SAIFI ของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker กรณีอุปกรณ์ไม่ได้รับการบำรุงรักษา....180
ภาพที่ 7.69 ดัชนี SAIDI ของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker กรณีอุปกรณ์ไม่ได้รับการบำรุงรักษา....180
ภาพที่ 7.70 ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker กรณีอุปกรณ์ไม่ได้รับการบำรุงรักษา....180
ภาพที่ 7.71 ดัชนี SAIFI ของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker กรณีอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบ....182
ภาพที่ 7.72 ดัชนี SAIDI ของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker กรณีอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบ....182
ภาพที่ 7.73 ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker กรณีอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบ....183
ภาพที่ 7.74 ดัชนี SAIFI ของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker กรณีอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม....185
ภาพที่ 7.75 ดัชนี SAIDI ของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker กรณีอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม....185
ภาพที่ 7.76 ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker กรณีอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม....185
ภาพที่ 7.77 ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half ทั้งสามกรณี....187
ภาพที่ 7.78 สัดส่วนค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการบำรุงรักษาอุปกรณ์ ที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half....188
ภาพที่ 7.79 ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker ทั้งสามกรณี....190

หน้า

ภาพที่ 7.80 สัดส่วนค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker 191
ภาพที่ 8.1 ภาพรวมเครื่องมือในการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด โดยพิจารณาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า 193

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1
บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมถึงเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ของเนื้อหาในแต่ละบท

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าได้เป็นหนึ่งในปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญของการดำรงชีวิตประจำวันสำหรับภาคครัวเรือน และยังเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญในการขับเคลื่อนการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศ ทั้งในภาคอุตสาหกรรมและครัวเรือน ดังนั้น การส่งกำลังไฟฟ้าจะต้องมีความเชื่อถือได้ และความมั่นคง สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่เกิดไฟฟ้าดับ หรือหากเกิดไฟฟ้าดับจะต้องอยู่ในช่วงเวลาและความถี่ที่ยอมรับได้ ภายใต้มาตรฐานที่กำหนดไว้

ดังนั้น ผู้ให้บริการไฟฟ้า ต้องมีการวางแผนการปรับปรุงระบบไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง โดยมีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความเชื่อถือได้ของการส่งกำลังไฟฟ้า ความมั่นคงของระบบไฟฟ้า ด้วยการมุ่งเน้นที่ลดจำนวนครั้ง และระยะเวลาที่เกิดไฟฟ้าดับ เพื่อให้ผู้ใช้ไฟฟ้าได้รับพลังงานไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง [1] โดยทั่วไปความเชื่อถือได้ของการส่งกำลังไฟฟ้าขึ้นอยู่กับสถานีไฟฟ้าเป็นหลัก เพราะสถานีไฟฟ้าทำหน้าที่หลักในการเพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้า หากสถานีไฟฟ้าเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวย่อมนำไปสู่การหยุดจ่ายกำลังไฟฟ้า ตั้งแต่ก่อให้เกิดความไม่สะดวกสบาย แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าในชั่วขณะ ไปจนกระทั่งการเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างครั้งใหญ่ ซึ่งทำให้ระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ที่ลดลง

เมื่อพิจารณาลงไปในสถานีไฟฟ้า สถานีไฟฟ้าแต่ละสถานีประกอบด้วยอุปกรณ์ภายในอีกจำนวนมากตามรูปแบบการจัดเรียงบัส เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ หม้อแปลงไฟฟ้า และบัสบาร์ เป็นต้น ซึ่งส่วนมากอุปกรณ์เหล่านี้ผ่านการใช้งานมาเป็นเวลานานจึงเกิดการเสื่อมสภาพ ทำให้อุปกรณ์มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวสูงขึ้น และหากการล้มเหลวของอุปกรณ์อยู่ในเส้นทางการส่งกำลังไฟฟ้า ย่อมส่งผลให้สถานีไฟฟ้ามีโอกาสที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวได้สูงขึ้นเช่นกัน ทำให้ไม่สามารถจัดส่งกำลังไฟฟ้าให้เป็นไปตามเป้าหมาย นั่นคือ สถานีไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ที่ลดลง

เพื่อปรับปรุงสถานีไฟฟ้าให้มีความเชื่อถือได้ที่สูงขึ้น จึงจำเป็นที่ต้องปรับปรุงอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าให้มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่ลดลง ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีการ เช่น การทำให้อุปกรณ์มีสภาพใหม่ด้วยการเปลี่ยนอุปกรณ์ แต่ต้องใช้จำนวนเงินลงทุนที่ค่อนข้างสูงจึงไม่เป็นที่นิยมมากนักเมื่อเทียบกับ การบำรุงรักษาอุปกรณ์ (Maintenance) ที่มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่า

เนื่องจากภายในสถานีไฟฟ้ามีอุปกรณ์เป็นจำนวนมาก การวางแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าจึงต้องคำนึงถึงเส้นทางการส่งกำลังไฟฟ้าด้วย เพราะหากกำหนดการบำรุงรักษาอุปกรณ์ไม่เหมาะสม อาจส่งผลให้สถานีไฟฟ้าไม่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง และอาจทำให้ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม ในทางกลับกัน หากมีการวางแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ได้อย่างเหมาะสม จะทำให้อุปกรณ์มีสมรรถนะความพร้อมใช้งานสูงขึ้น อุปกรณ์มีความเชื่อถือได้สูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้สถานีไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้สูงขึ้นเช่นเดียวกัน และยังสามารถลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการบำรุงรักษา ตลอดจนการลดภาระงานการบำรุงรักษาที่ซ้ำซ้อน ทำให้มูลค่าการลงทุนทั้งหมดในการบำรุงรักษามีค่าน้อยที่สุด และเกิดประโยชน์ต่อการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าอย่างแท้จริง

อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปการบำรุงรักษาอุปกรณ์สามารถจัดกลุ่มได้ 2 รูปแบบ ตามลักษณะการดำเนินการก่อนหรือหลังอุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว คือ

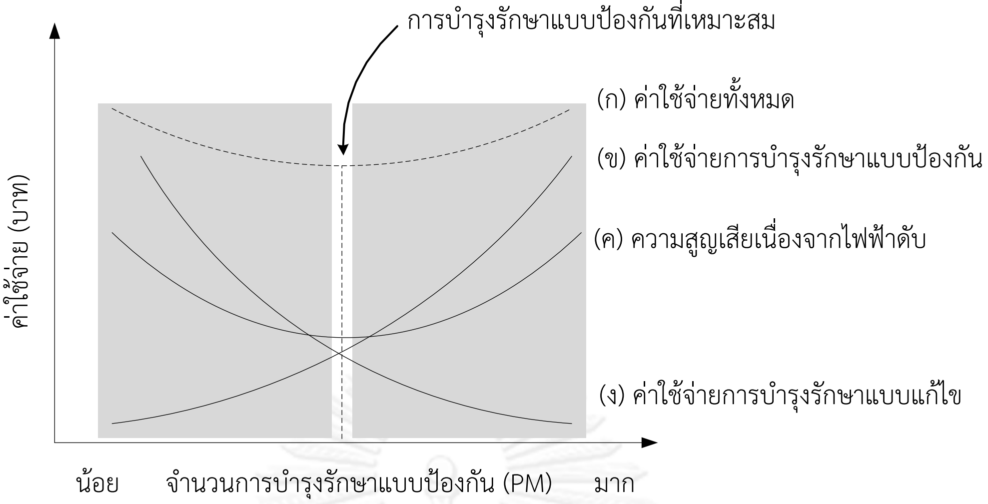
(1) การบำรุงรักษาแบบป้องกัน (Preventive maintenance: PM) เป็นการบำรุงรักษาที่ดำเนินการก่อนอุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว หรือเป็นการบำรุงรักษาในแผนงานเพื่อป้องกันอุปกรณ์ไม่ให้เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว หรือมีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่น้อยลง ซึ่งสามารถกำหนดเป็นตารางการบำรุงรักษา ด้วยการวิเคราะห์อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวในอดีต ร่วมกับการพิจารณาเส้นทางการส่งกำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า

(2) การบำรุงรักษาแบบแก้ไข (Corrective maintenance: CM) เป็นการบำรุงรักษาที่ดำเนินการหลังอุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว หรือเป็นการบำรุงรักษานอกแผนงาน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขสถานการณ์ที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว ให้สามารถกลับมาใช้งานได้อย่างรวดเร็ว การบำรุงรักษารูปแบบนี้ไม่สามารถกำหนดได้ หากแต่ถูกกำหนดจากอิทธิพลของการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ยิ่งมีการบำรุงรักษาแบบป้องกันมากเท่าใด การบำรุงรักษาแบบแก้ไขยิ่งลดลงมากเท่านั้น

การบำรุงรักษาทั้งสองรูปแบบนี้มีผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความถี่ของการบำรุงรักษาแบบป้องกันว่ามีมากน้อยเพียงใด และระหว่างการดำเนินการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไข ยังต้องคำนึงถึงผลกระทบที่สถานีไฟฟ้าไม่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าไปยังจุดโหลด ซึ่งถูกสะท้อนผ่านทางมูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ

ผลกระทบของการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกันภายในสถานีไฟฟ้า ต่อค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกัน การบำรุงรักษาแบบแก้ไขที่เกิดขึ้นนอกแผนงาน และมูลค่าความเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 1.1

CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 1.1 ผลกระทบจากการบำรุงรักษาแบบป้องกันต่อค่าใช้จ่าย

จากภาพที่ 1.1 สามารถอธิบายผลกระทบของการบำรุงรักษาแบบป้องกันต่อค่าใช้จ่ายได้ดังต่อไปนี้

- พื้นที่ด้านซ้ายมือ เป็นพื้นที่ที่แสดงถึง การลงทุนในการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกันน้อยจนเกินไป ทำให้อุปกรณ์มีโนวแน้มเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวมาก มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบแก้ไขสูง และนำไปสู่การเกิดไฟฟ้าดับบ่อยครั้งและยาวนาน ทำให้เกิดมูลค่าความเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ ดังนั้น ผลลัพธ์สุดท้ายของการลงทุนการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกันในรูปแบบนี้ก็จะทำให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมมีค่าสูง
- พื้นที่ด้านขวามือ เป็นพื้นที่ที่แสดงถึง การลงทุนในการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกันที่มากเกินไป แต่ก็มีผลให้อุปกรณ์มีโนวแน้มเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวที่ลดลง ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไขจึงมีค่าน้อยตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม การบำรุงรักษาแบบป้องกันในแต่ละครั้งต้องมีการดับไฟฟ้าเพื่อความปลอดภัยในการบำรุงรักษา ซึ่งหากบำรุงรักษาแบบป้องกันบ่อยจนเกินไปก็อาจทำให้มีมูลค่าความเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับมีค่าสูงได้ ดังนั้น ผลลัพธ์สุดท้ายของการลงทุนการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกันในรูปแบบนี้ก็จะทำให้มีค่าใช้จ่ายโดยรวมมีค่าสูงเช่นกัน
- พื้นที่ตรงกลาง เป็นพื้นที่ที่แสดงถึง การลงทุนในการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกันที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้มีค่าใช้จ่ายทั้งสามส่วนมีค่าต่ำที่สุด

และจะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ของค่าใช้จ่ายทั้งสามส่วนไม่ได้เป็นไปแบบเส้นตรง (Linear) จึงต้องมีวิธีการค้นหาคำตอบของปัญหาโดยเฉพาะไม่สามารถใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์ทั่วไปได้

จากความสำคัญของปัญหาที่ได้กล่าวดังข้างต้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงได้นำเสนอแนวทางการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด ภายใต้แนวคิด 4 ด้าน ดังต่อไปนี้

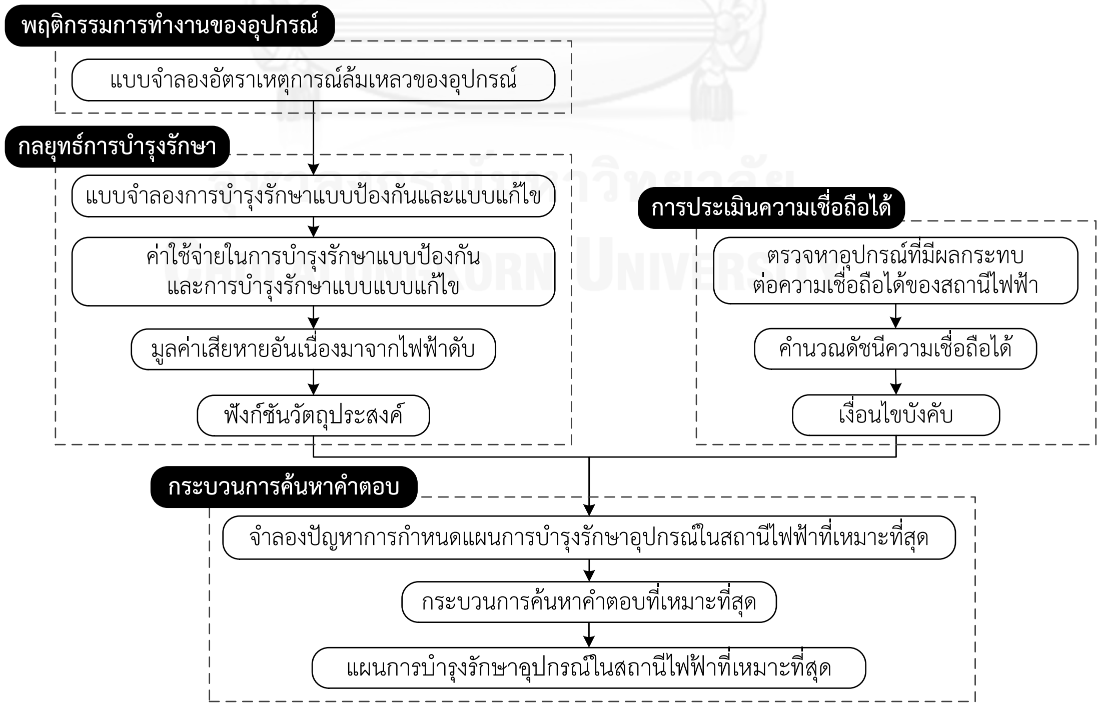
(1) พฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ : วิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ด้วยการกระจายตัวแบบต่างๆ เพื่อกำหนดการกระจายตัวอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์

(2) กลยุทธ์การบำรุงรักษา : วิเคราะห์กลยุทธ์การบำรุงรักษาแบบต่างๆ เพื่อกำหนดแบบจำลองในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ และผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้งในมิติด้านกายภาพและมิติด้านค่าใช้จ่าย ซึ่งจะถูกนำมาเป็นฟังก์ชันเป้าหมายในการคำนวณ

(3) การประเมินความเชื่อถือได้ : วิเคราะห์วิธีการประเมินความเชื่อถือได้แบบต่างๆ เพื่อนำมาประเมินความเชื่อถือได้ ภายหลังการบำรุงรักษา ซึ่งจะถูกนำมาเป็นเงื่อนไขบังคับในการคำนวณ

(4) กระบวนการค้นหาคำตอบ : วิเคราะห์กระบวนการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยวิธีต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหานี้

เมื่อนำการวิเคราะห์ในแต่ละด้าน มาประยุกต์ใช้ในการกำหนดแผการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการวิเคราะห์ได้ดังภาพที่ 1.2



ภาพที่ 1.2 แนวคิดการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1) เพื่อพัฒนาแบบจำลองการบำรุงรักษาอุปกรณ์
2) เพื่อพัฒนากระบวนการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด ที่ทำให้ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและมูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับมีค่าน้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขความเชื่อถือได้

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1) พิจารณาการกำหนดแผนการบำรุงรักษาเฉพาะสถานีไฟฟ้าที่มีอากาศเป็นฉนวนเท่านั้น
2) พิจารณาอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ 2 ประเภท คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ และอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอคทีฟ
3) พิจารณาเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ 3 ชนิด คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ หม้อแปลงไฟฟ้า และบัสบาร์
4) พิจารณากลยุทธ์การบำรุงรักษาอุปกรณ์ 2 รูปแบบ คือ การบำรุงรักษาแบบป้องกัน และการบำรุงรักษาแบบแก้ไข
5) พิจารณาการบำรุงรักษาอุปกรณ์ 3 ชนิด คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ หม้อแปลงไฟฟ้า และบัสบาร์
6) พิจารณาการประเมินความเชื่อถือได้ด้วยวิธีวิเคราะห์แบบมินิมัลคัตเซต
7) พิจารณาการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม
8) พิจารณาการทดสอบสมรรถนะกับสถานีไฟฟ้าในระบบส่งไฟฟ้าที่การจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้า 2 แบบ คือ (1) การจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้ารูปแบบ Breaker-and-a-half และ (2) การจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้ารูปแบบ Double-bus-double-breaker
9) พิจารณาการเจริญเติบโตของโหลดตามอัตราการเพิ่มขึ้นของความต้องการใช้ไฟฟ้า ในการจัดแผนพัฒนาพลังงานไฟฟ้า พ.ศ. 2553 (ฉบับปรังปรุงครั้งที่ 3)
10) ไม่พิจารณาปัญหาทางด้านคุณภาพไฟฟ้า

CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินการ

1) ศึกษาบทความทางวิชาการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ดังนี้
    1.1) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวกับพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยเทคนิคความน่าจะเป็น
    1.2) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวกับการประเมินความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้า

1.3) ศึกษากลยุทธ์การบำรุงรักษาอุปกรณ์
1.4) ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการบำรุงรักษาอุปกรณ์
1.5) ศึกษาแนวทางการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์
1.6) ศึกษารูปแบบการจัดเรียงบัสภายในสถานีไฟฟ้า
1.7) ศึกษาวิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยปัญญาเชิงคำนวณ

2) วิเคราะห์และระบุปัญหาที่จะทำการศึกษา ดังนี้
2.1) วิเคราะห์ผลการทดสอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุดจากแบบจำลองการบำรุงรักษาในระดับอุปกรณ์และระดับสถานีไฟฟ้า
2.2) วิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด

3) กำหนดขอบเขตงานวิจัย
4) รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับระบบที่จะนำมาใช้ทดสอบ และข้อมูลอื่นๆ ที่จำเป็น
5) พัฒนาโปรแกรมสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า
6) พัฒนาโปรแกรมสำหรับการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด ในระดับอุปกรณ์และระดับสถานีไฟฟ้า
7) วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าได้รับจากวิทยานิพนธ์

แนวทางการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด ที่ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและมูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับต่ำที่สุด ภายใต้เงื่อนไขความเชื่อถือได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอแนวทางการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด โดยพิจารณาถึงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า ดังนั้น งานวิจัยในอดีตที่มีความเกี่ยวข้องจึงสามารถแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อ คือ (1) งานวิจัยที่เกี่ยวกับการบำรุงรักษาอุปกรณ์ และ (2) งานวิจัยที่เกี่ยวกับการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า

1.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการบำรุงรักษาอุปกรณ์

จากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวกับการบำรุงรักษาอุปกรณ์ พบว่ามีงานวิจัยในเรื่องนี้เป็นจำนวนมาก สำหรับงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อย่างมีนัยสำคัญ มีดังต่อไปนี้

P. Dehghanian และ M. Kezunovic (2013) [2] ได้นำเสนอการวางแผนและกำหนดตารางการบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์ ด้วยการวิเคราะห์อัตราส่วนของค่าใช้จ่ายและผลประโยชน์ที่ได้รับสำหรับการลงทุนกำหนดให้ค่าใช้จ่ายของการบำรุงรักษาแบบป้องกันแปรผันตามขนาดและเวลาการบำรุงรักษา และผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นกำหนดเป็นค่าใช้จ่ายที่ลดลง 4 ส่วน คือ (1) ค่าใช้จ่ายจากการเลื่อนการบำรุงรักษาแบบแก้ไข, (2) ค่าใช้จ่ายจากการจัดสรรกำลังการผลิตใหม่, (3) มูลค่าเสียหายที่ผู้ให้บริการไฟฟ้าไม่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้ และ (4) มูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ

C. Suwanasri, T. Suwanasri และ S. Wattanawongpitak (2013) [3] ได้นำเสนอการประเมินมูลค่าสินทรัพย์ โดยใช้วิธีผลประโยชน์เป็นศูนย์ สำหรับการวางแผนการปรับปรุงอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในสถานีไฟฟ้าย่อย วิธีผลประโยชน์เป็นศูนย์ถูกนำมาใช้ในการประเมินมูลค่าทรัพย์สินของอุปกรณ์ อาศัยการเปรียบเทียบมูลค่าของอุปกรณ์ที่ลดลงจากการเสื่อมสภาพ กับมูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับที่มีค่าสูงขึ้นและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาที่มีลักษณะคงที่ เมื่อเปรียบเทียบมูลค่าสุทธิของอุปกรณ์เป็นรายปี ณ ปีที่ผลประโยชน์เป็นศูนย์จะถือว่าเป็นปีที่หมดอายุการใช้งานอุปกรณ์ แต่ถ้าหากปีใดมูลค่าสุทธิของอุปกรณ์ต่ำกว่าศูนย์ ผู้ให้บริการไฟฟ้าก็จะมีความเสี่ยงสูงที่ไม่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้

P. Dehghanian, M. Fotuhi-Firuzabad, F. Aminifar, และ R. Billinton (2013) [4]-[5] ได้นำเสนอวิธีการบำรุงรักษาระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยกลยุทธ์การบำรุงรักษาแบบความเชื่อถือได้เป็นศูนย์กลาง โดยแบ่งการคัดเลือกออกเป็น 2 ขั้นตอน เริ่มต้นจากการเลือกอุปกรณ์ที่ต้องบำรุงรักษา จะอาศัยการเรียงลำดับความสำคัญของอุปกรณ์ที่มีผลต่อความเชื่อถือได้ ด้วยการประเมินผลกระทบจากอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว ระยะเวลาการซ่อมแซม และพลังงานไฟฟ้าที่สูญเสีย หลังจากนั้นจึงประเมินแผนการบำรุงรักษาของอุปกรณ์นั้น ด้วยการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างค่าใช้จ่ายและผลประโยชน์ที่ได้รับ

G. Haifeng และ S. Asgarpoor (2012) [6] ได้นำเสนอการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าด้วยการบำรุงรักษาอุปกรณ์ โดยจำลองสถานะอุปกรณ์ด้วยแบบจำลองมาร์คอฟหลายสถานะ ซึ่งแบ่งการสภาวะอุปกรณ์ออกเป็น 3 สภาวะ คือ สภาวะล้มเหลว สภาวะปกติ และสภาวะบำรุงรักษา การบำรุงรักษาที่เหมาะสมถูกกำหนดจากอัตราการบำรุงรักษา ที่อุปกรณ์เปลี่ยนจากสภาวะปกติไปสู่สภาวะบำรุงรักษา โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าที่มากที่สุด และใช้การค้นหาคำตอบด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค

K. S. Moghaddam และ J. S. Ushe (2011) [7] ได้นำเสนอวิธีการบำรุงรักษาที่เหมาะสมด้วยการจำลองผลกระทบของการบำรุงรักษาผ่านทางอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว เมื่ออุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวจะมีค่าลดลง สำหรับค่าใช้จ่ายที่ใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายของเหตุการณ์ล้มเหลว, การบำรุงรักษา และการเปลี่ยนอุปกรณ์ พร้อมทั้งได้

นำเสนอการกำหนดแผนการบำรุงรักษา 2 แบบ คือ การบำรุงรักษาที่ทำให้มีค่าใช้จ่ายต่ำสุดภายใต้ความเชื่อถือได้ที่กำหนด และการบำรุงรักษาที่ทำให้อุปกรณ์มีความเชื่อถือได้สูงสุดภายใต้ค่าใช้จ่ายที่ได้รับมา สำหรับกระบวนการหาค้นหาคำตอบใช้วิธีแบบ Branch and bound

M. Hinow และ M. Mevissen (2011) [8] ได้นำเสนอขั้นตอนเชิงพันธุกรรมที่ใช้ในการกำหนดกลยุทธ์การบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้าที่ดีที่สุด เพื่อลดค่าใช้จ่ายในวงรอบชีวิต ซึ่งประกอบด้วยค่าใช้ 3 ส่วน คือ ค่าใช้ในการลงทุน, การดำเนินการและการบำรุงรักษา และเปลี่ยนอุปกรณ์ ซึ่งการบำรุงรักษาจะใช้ช่วยทำให้ค่าใช้จ่ายในส่วนของการดำเนินการและการบำรุงรักษามีค่าลดลง

F. Camci (2009) [9] ได้นำเสนอการกำหนดแผนการบำรุงรักษา ด้วยการคาดคะเนข้อมูลและใช้กระบวนการค้นหาคำตอบด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม การคาดคะเนข้อมูลใช้วิธีการประเมินความเสี่ยง ซึ่งประกอบด้วยความเสี่ยงของเหตุการณ์ล้มเหลวและความเสี่ยงของการบำรุงรักษา โดยความเสี่ยงของเหตุการณ์ล้มเหลวประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายคงที่เนื่องจากอุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวและค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนชิ้นส่วนอุปกรณ์ เช่นเดียวกัน ความเสี่ยงของการบำรุงรักษาประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายคงที่เนื่องจากการบำรุงรักษาใดๆ และค่าใช้จ่ายของการบำรุงรักษาแบบเฉพาะเจาะจง การกำหนดความเสี่ยงทั้งสองรูปแบบจะตั้งอยู่บนสมมุติฐานของความน่าจะเป็น

P. Hilber, V. Miranda, M. Matos และ L. Bertling (2008) [10] ได้นำเสนอวิธีการจัดการบำรุงรักษาที่เหมาะสมของอุปกรณ์ไฟฟ้า ด้วยวิธีการกำหนดดัชนีชี้วัดที่บ่งบอกถึงความเหมาะสมที่จะบำรุงรักษาอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า เพื่อชี้ให้เห็นว่าอุปกรณ์ใดควรจะมีการบำรุงรักษาในระดับที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งดัชนีดังกล่าวนี้ถูกคำนวณมาจากมูลค่าความเสียหายอันเนื่องมากจากไฟฟ้าดับ ณ จุดโหลด ที่มีสาเหตุมาจากอุปกรณ์นั้นเกิดเหตุการณ์ล้มเหลว

J. McCalley, Y. Jiang, V. Honavar, J. Pathak, M. Kezunovic และ J. Panida (2006) [11] ได้นำเสนอรายงานการศึกษาเกี่ยวการตรวจสภาพและการกำหนดแผนการบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์ และหม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยแบ่งการวางแผนงานออกเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกเป็นการวางแผนระยะปานกลาง การกำหนดตารางการบำรุงรักษาตั้งอยู่บนพื้นฐานของปริมาณโหลดที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา จึงคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการจัดสรรกำลังการผลิตใหม่เป็นหลัก แต่สำหรับการวางแผนในระยะยาว ที่ปริมาณโหลดมีลักษณะคงที่ จะพิจารณาค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาของแต่ละอุปกรณ์ด้วยแบบจำลองของมาร์คอฟ ซึ่งใช้หลักการของความน่าจะเป็นในการวิเคราะห์ นอกจากนี้ ยังได้นำเสนอวิธีการตรวจสภาพ เซอร์กิตเบรกเกอร์ และหม้อแปลงไฟฟ้า

J. Jaturonnatee, D. N. P. Murthy และ R. Boondiskulchok (2006) [12] ได้นำเสนอแบบจำลองการบำรุงรักษาอุปกรณ์ การจำลองผลกระทบที่เกิดจากการบำรุงรักษาของอุปกรณ์เช่ายืม (Leased equipment) การบำรุงรักษาขึ้นอยู่กับค่าใช้จ่าย 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกันที่มีค่าคงที่และแปรผันตามขนาดการบำรุงรักษา ส่วนที่สองเป็นค่าใช้จ่ายของ

เหตุการณ์ล้มเหลวพิจารณาจากจำนวนครั้งที่อุปกรณ์ล้มเหลวซึ่งได้รับการบำรุงรักษาแบบน้อยที่สุด และส่วนที่สามเป็นค่าใช้จ่ายปรับโทษที่อุปกรณ์ไม่สามารถใช้งานได้ และค้นหาคำตอบด้วยวิธีการวิเคราะห์

M. Marketz, J. Polster และ M. Muhr (2005) [13] ได้นำเสนอกลยุทธ์การบำรุงรักษาสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้า กลยุทธ์การบำรุงรักษาแบบความเสี่ยง โดยเฉพาะการยกตัวอย่างการประเมินสภาพ และการประเมินความสำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงและแรงดันปานกลาง

L. Bertling, R. Allan และ R. Eriksson (2005) [14] ได้นำเสนอผลกระทบของความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าจากนโยบายการบำรุงรักษาแบบป้องกัน และการบำรุงรักษาแบบแก้ไข โดยแบ่งการคำนวณเป็น 3 ขั้นตอน เริ่มจากการวิเคราะห์อุปกรณ์ใดที่ต้องได้รับการบำรุงรักษา หลังจากนั้นจึงวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ที่ได้รับผลกระทบจากการบำรุงรักษา และสุดท้ายประเมินประสิทธิภาพจากการบำรุงรักษาในมิติของความเชื่อถือได้และค่าใช้จ่าย สำหรับค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน, ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม และมูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ ค่าใช้จ่ายทั้งหมดอยู่ภายใต้สมมุติฐานทางเศรษฐศาสตร์ที่ประกอบด้วยอัตราเงินเฟ้อและอัตราเงินลด นอกจากนี้ ยังแบ่งอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์เป็นแบบต่อเนื่อง และแบบไม่ต่อเนื่อง

Y.-T. Tsai, K.-S. Wang และ L.-C. Tsai (2004) [15] ได้นำเสนอการวางแผนการบำรุงรักษาแบบป้องกันของระบบ ด้วยการแบ่งประเภทของการบำรุงรักษาแบบป้องกันออกเป็น 3 รูปแบบ คือ การตรวจสภาพอุปกรณ์ การซ่อมบำรุงอุปกรณ์ และการเปลี่ยนอุปกรณ์ ซึ่งการบำรุงรักษาทั้งสามรูปแบบจะส่งผลกระทบต่ออัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่แตกต่างกัน โดยการตรวจสภาพอุปกรณ์ทำให้ขนาดของอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวไม่ลดลง แต่ทำให้แนวโน้มความรุนแรงมีค่าลดลง สำหรับการซ่อมบำรุงอุปกรณ์ทำให้อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวและแนวโน้มความรุนแรงมีค่าลดลง และการเปลี่ยนอุปกรณ์ทำให้อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ นอกจากนี้ยัง ได้นำเสนอวิธีการประเมินผลกระทบจากการบำรุงรักษาด้วยพารามิเตอร์ปรับปรุง

H. Wang และ H. Pham (2003) [16] ได้รอบรวมแบบจำลองการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบไม่สมบูรณ์รูปแบบต่างๆ ที่นิยมใช้ในอดีต ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์และความน่าจะเป็น พร้อมทั้งได้นำเสนอการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองดังกล่าวด้วย

1.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ มีดังต่อไปนี้

M. Vega และ H. G. Sarmiento (2008) [17] ได้นำเสนอขั้นตอนการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าด้วยการตรวจหาเส้นทางการไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งได้ใช้วิธีการสร้างกราฟและวิเคราะห์ถึงการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เป็นไปได้

R. Billinton และ G. Lian (1993) [18] ได้นำเสนอหลักการจำลองเหตุการณ์การล้มเหลวของอุปกรณ์ ด้วยการพิจารณาการแจกแจงของความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์จะเกิดเหตุการณ์แบบไวบูลล์ และประเมินผลกระทบจากค่าพารามิเตอร์ของการแจกแจงแบบไวล์บูลล์ต่อความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้า สำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าใช้การจำลองเหตุการณ์สถานะอุปกรณ์

R. N. Allan, R. Billinton และ M. F. De Oliveira (1976) [19] ได้นำเสนอขั้นตอนการตรวจหาเส้นทางการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีผู้มาก่อนของสาขา และตรวจหากลุ่มอุปกรณ์ที่หากเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแล้วทำให้ระบบเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวตามไปด้วย พร้อมทั้งได้ประเมินความเชื่อถือของระบบไฟฟ้าด้วยวิธีการวิเคราะห์

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาข้างต้นพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสำคัญต่อการปรับปรุงความเชื่อถือได้ด้วยการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า แต่ยังละเลยสมมุติฐานที่สำคัญดังต่อไปนี้

(1) ละเลยการเจริญเติบโตของโหลดที่เพิ่มขึ้นทุกปี

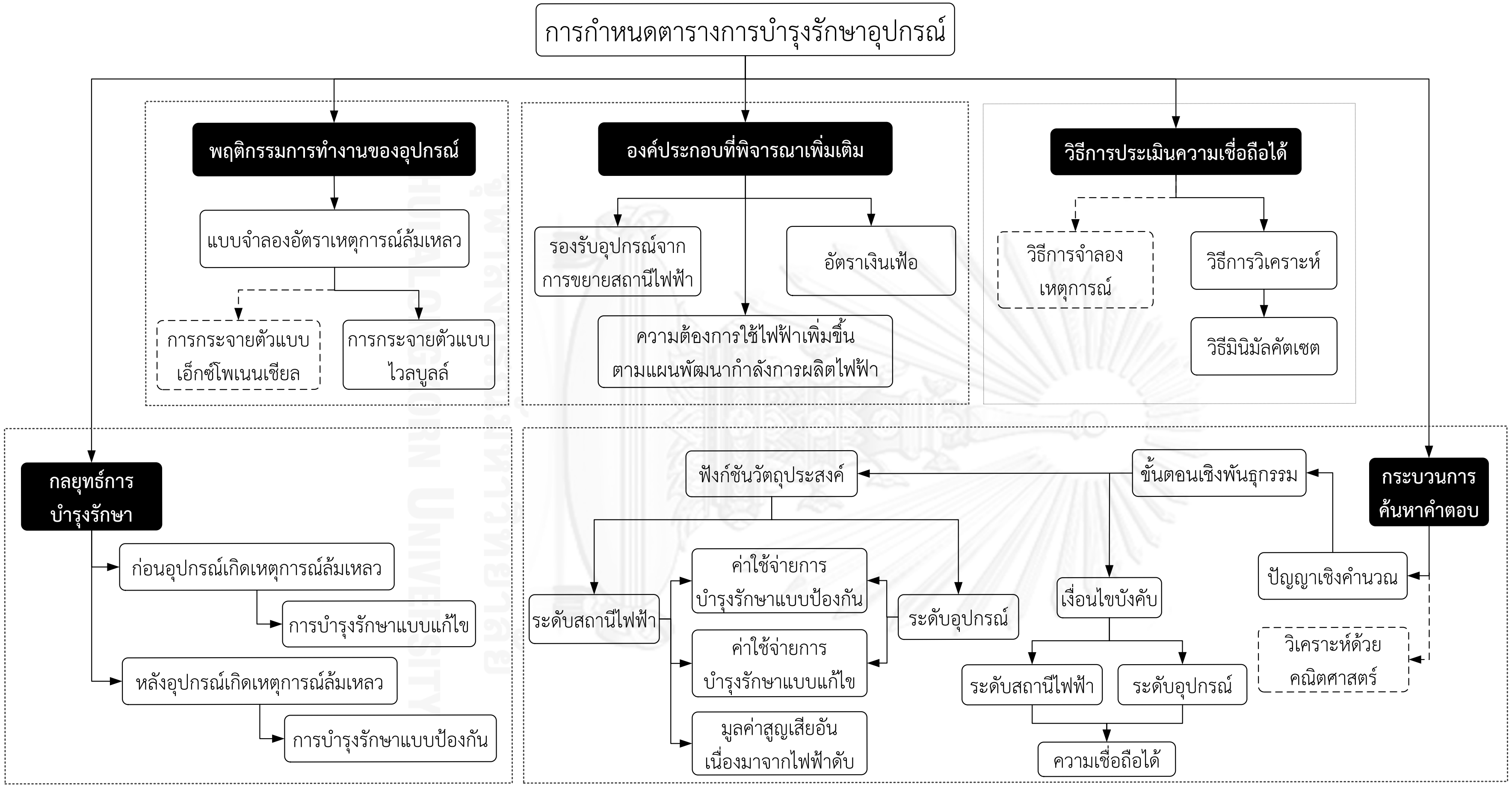
(2) การคำนวณค่าใช้จ่ายไม่คำถึงถึงมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์

(3) ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาไม่แปรผันตามขนาดการบำรุงรักษา

(4) การวางแผนการบำรุงรักษาไม่รองรับอุปกรณ์ที่เพิ่มขึ้นจากการขยายสถานีไฟฟ้า

ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงนำเสนอแนวทางการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด ทั้งในระดับอุปกรณ์และระดับสถานีไฟฟ้า ด้วยการจำลองความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวด้วยการกระจายตัวแบบไวลบูลล์ ที่มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป พร้อมทั้งพิจารณาการบำรุงรักษา 2 รูปแบบ คือ (1) การบำรุงรักษาแบบป้องกัน เพื่อป้องกันหรือลดเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ และ (2) การบำรุงรักษาแบบแก้ไข เพื่อแก้ไขอุปกรณ์ที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวนอกแผนงาน

แผนการบำรุงรักษาที่เหมาะที่สุดถูกกำหนดจากค่าใช้จ่าย 3 ส่วน คือ (1) ค่าใช้ในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน (2) ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข และ (3) มูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ โดยค่าใช้จ่ายทั้งหมดคำนึงถึงอัตราเงินเฟ้อ ภายใต้เงื่อนไขบังคับของดัชนีความเชื่อถือได้ การจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้าที่จุดโหลดเพิ่มขึ้นตามแนวโน้มของแผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้า การกำหนดแผนการบำรุงรักษาในสถานีไฟฟ้า รองรับอุปกรณ์ที่เพิ่มขึ้นจากการขยายสถานีไฟฟ้าตามปีที่ได้กำหนด และปัญหานี้ใช้การค้นหาคำตอบด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม ภาพรวมของแนวทางการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด แสดงได้ดังภาพที่ 1.3



<u>หมายเหตุ</u> ----- หมายถึง ไม่ได้พิจารณาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ภาพที่ 1.3 แนวทางการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด

1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วยเนื้อหาจำนวน 8 บท โดยแต่ละบทมีเนื้อหาที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

บทที่ 1 นำเสนอ ที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 นำเสนอ การประเมินพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ คุณลักษณะของฟังก์ชันสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ ผลกระทบของอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเมื่อเทียบกับเวลา ฟังก์ชันการกระจายตัวที่นิยมใช้วิเคราะห์ในระบบไฟฟ้า และการประยุกต์ทฤษฎีการประเมินความเชื่อถือได้ร่วมกับฟังก์ชันการกระจายตัว

บทที่ 3 นำเสนอ กลยุทธ์การบำรุงรักษา ระดับของการบำรุงรักษา และแบบจำลองการบำรุงรักษาอุปกรณ์

บทที่ 4 นำเสนอ แนวคิคพื้นฐานของการประเมินความเชื่อถือได้ การประเมินความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้า ขั้นตอนการประเมินความเชื่อถือได้ในสถานีไฟฟ้า และตัวอย่างการประเมินความเชื่อถือได้ในสถานีไฟฟ้า

บทที่ 5 นำเสนอ แนวคิดพื้นฐานของขั้นตอนเชิงพันธุกรรม ขั้นตอนการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม และตัวอย่างการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม

บทที่ 6 นำเสนอ แนวคิดการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ แบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับการบำรุงรักษาอุปกรณ์ การประเมินผลกระทบจากการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่มีต่อสถานีไฟฟ้า สมมุติฐานทางเศรษฐศาสตร์ด้านอัตราเงินเฟ้อ และการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด

บทที่ 7 นำเสนอ การทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาที่เหมาะที่สุดในระดับอุปกรณ์และระดับสถานีไฟฟ้า

บทที่ 8 นำเสนอ สรุปผลที่ได้จากงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2
การประเมินพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ด้วยเทคนิดความน่าจะเป็น

การวางแผนการทำงานของระบบไฟฟ้าได้ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ด้วยการสร้างความสมดุลทางด้านเศรษฐศาสตร์ ความเชื่อถือได้ และขีดจำกัดด้านกายภาพของระบบไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม การสร้างความสมดุลดังกล่าวต้องอาศัยเทคนิคความน่าจะเป็นร่วมกับการการประเมินพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า การประเมินพฤติกรรมอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าด้วยเทคนิคความน่าจะเป็น ไม่เพียงแต่ทำให้ทราบถึงความรุนแรงของเหตุการณ์และผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า แต่ยังทราบถึงโอกาสหรือความน่าจะเป็นที่จะเกิดขึ้นของเหตุการณ์นั้นๆ ซึ่งหากมีการพิจารณาร่วมกันอย่างเหมาะสมระหว่างความรุนแรงและโอกาสก็สามารถสร้างดัชนีที่ใช้ประเมินความเสี่ยงของระบบไฟฟ้าได้

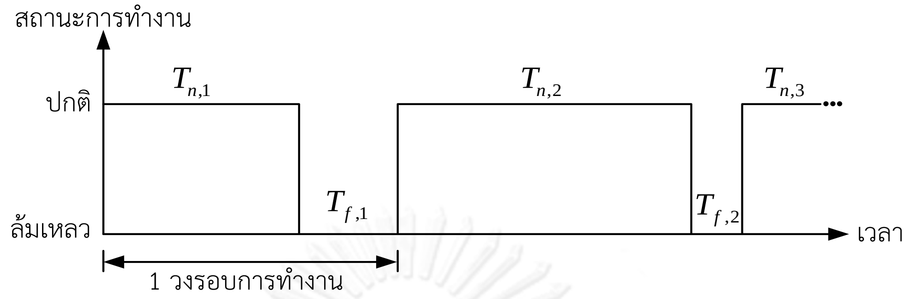
การประเมินพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าด้วยเทคนิคความน่าจะเป็นได้ถูกค้นพบเมื่อปี ค.ศ.1930 [11] แต่ไม่เป็นที่นิยมมากนักในอดีต เนื่องจากต้องอาศัยข้อมูลทางด้านสถิติค่อนข้างมากในการประเมิน อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันปัญหาดังกล่าวได้รับการแก้ไข โดยหน่วยงานที่ประกอบกิจการไฟฟ้ามีการจัดเก็บฐานข้อมูลอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ระบบประมวณผลได้รับการปรับปรุงจนเป็นที่ยอมรับและเชื่อถือได้ และเทคนิคการประเมินผลได้รับการพัฒนาเป็นอย่างมาก ดังนั้น การประเมินพฤติกรรมของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าด้วยเทคนิคดังกล่าวจึงได้ถูกนำกลับมาใช้มากขึ้น

บทนี้แบ่งการนำเสนอออกเป็น 5 ส่วนได้แก่ (1) พฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์, (2) คุณลักษณะฟังก์ชันสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้, (3) ผลกระทบของอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเมื่อเทียบกับเวลา, (4) ฟังก์ชันการกระจายตัวที่ใช้วิเคราะห์ในระบบไฟฟ้า, และ (5) การประยุกต์ทฤษฎีการประเมินความเชื่อถือได้ร่วมกับฟังก์ชันการกระจายตัว

2.1 พฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์

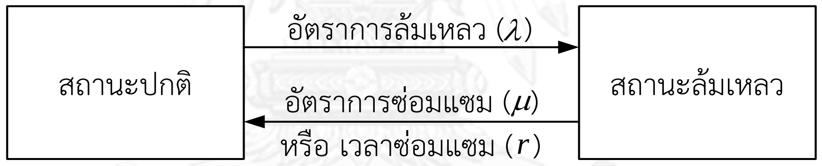
ในทางปฏิบัติหากพิจารณาลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าสามารถจำลองการทำงานได้เป็น 2 สถานะ คือ “สถานะปกติ” และ “สถานะล้มเหลว” โดยอุปกรณ์สามารถทำงานได้ในสถานะปกติในช่วงเวลาที่ i ด้วยเวลา $T_{n,i}$ (Time-normal) หลังจากนั้นอุปกรณ์จะเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวจนไม่สามารถทำงานได้และได้รับการซ่อมแซม ซึ่งอุปกรณ์ใช้เวลาซ่อมแซมในสถานะล้มเหลวด้วยเวลา $T_{f,i}$ (Time-failure) อย่างไรก็ตาม ภายหลังการซ่อมแซม อุปกรณ์สามารถกลับมาทำงานในสถานะปกติได้ดังเดิม จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์มีลักษณะการทำงานในสถานะ “สถานะปกติ, สถานะ

ล้มเหลว, สถานะปกติ, สถานะล้มเหลว, ...” สลับกัน เป็นวงรอบตลอดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 วงรอบการทำงานของอุปกรณ์

โดยปกติการจำลองพฤติกรรมการทำงานของแต่ละอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าตามลักษณะดังกล่าวมักถูกอธิบายด้วยแบบจำลองกระบวนการทำงานแบบต่อเนื่องของมาร์คอฟ (Continuous Markov Processes) หรือบางครั้งอาจเรียกว่า แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์ 2 สถานะของมาร์คอฟ (Two-State-Markov Model) [20, 21] แสดงได้ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์ 2 สถานะของมาร์คอฟ

การใช้แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์ 2 สถานะของมาร์คอฟตลอดช่วงที่พิจารณา จะต้องมีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่คงที่ แต่ถ้าหากต้องการพิจารณาการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ที่มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเพิ่มขึ้นตลอดเวลานั้น ต้องเฉลี่ยอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวออกเป็นช่วงๆ เช่น เฉลี่ยให้มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่คงที่ในแต่ละปี เป็นต้น หลังจากนั้นถึงสามารถใช้แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์ 2 สถานะของมาร์คอฟได้ ทั้งนี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เฉลี่ยอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ให้มีลักษณะคงที่เป็นรายปี

แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์ 2 สถานะของมาร์คอฟมีพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายการทำงานของแบบจำลองจำนวน 2 พารามิเตอร์ คือ (1) อัตราการล้มเหลว และ (2) อัตราการซ่อมซ่อม ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ (2.1) และ (2.2)

$$\text{อัตราการล้มเหลว } (\lambda) = \frac{\text{จำนวนเหตุการณ์การล้มเหลวของอุปกรณ์ในช่วงเวลาที่กำหนด}}{\text{ระยะเวลาทั้งหมดที่อุปกรณ์ทำงานได้}} \quad (2.1)$$

$$\text{เวลาการซ่อมแซม } (r) = \frac{\text{ระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการซ่อมแซมอุปกรณ์}}{\text{จำนวนเหตุการณ์การซ่อมแซมอุปกรณ์ในช่วงเวลาที่กำหนด}} \quad (2.2)$$

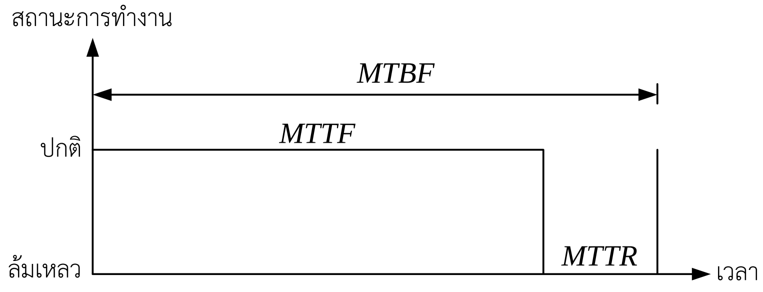
จากภาพที่ 2.1 จะเห็นว่าช่วงระยะเวลาที่อุปกรณ์อยู่ในสถานะปกติ ($T_{n,i}$) และช่วงระยะเวลาที่อุปกรณ์อยู่ในสถานะล้มเหลว ($T_{f,i}$) ในแต่ละช่วงอาจจะมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้น การจำลองการทำงานของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า จำเป็นต้องประมาณด้วยระยะเวลาเฉลี่ยในสถานะทำงานปกติ (Mean time to failure: MTTF) และระยะเวลาเฉลี่ยในสถานะล้มเหลว (Mean time to repair: MTTR) ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ (2.3) และ (2.4)

$$MTTF = \frac{\sum_{i=1}^{N} T_{n,i}}{N} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.3)$$

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{N} T_{f,i}}{N} = \frac{1}{\mu} \quad (2.4)$$

โดย N คือ จำนวนวงรอบการทำงานทั้งหมด

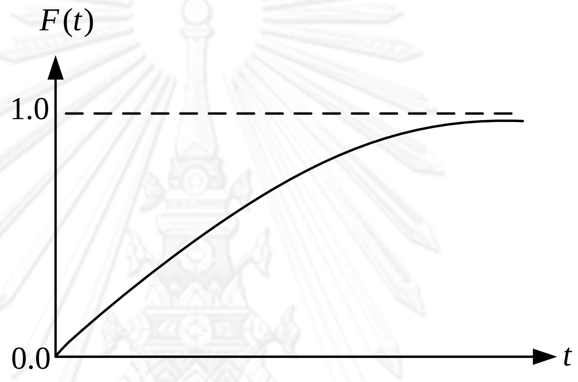
ทั้งนี้ ผลรวมของระยะเวลาเฉลี่ยทั้งในสถานะทำงานปกติและสถานะล้มเหลว ถูกเรียกว่า ระยะเวลาระหว่างเหตุการณ์ล้มเหลว (Mean time between failure: MTBF) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ ช่วงเวลาในหนึ่งคาบการทำงานของอุปกรณ์ตั้งแต่ช่วงเวลาที่อุปกรณ์ทำงานจนเกิดเหตุการณ์การล้มเหลวและทำการซ่อมแซมจนสามารถกลับมาทำงานได้อีกครั้งหนึ่ง แสดงได้ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 สถานะการทำงานอุปกรณ์ตามแบบจำลอง 2 สถานะของมาร์คอฟ

2.2 คุณลักษณะฟังก์ชันสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้

ในทางปฏิบัติระยะเวลาที่อุปกรณ์อยู่ในสถานะปกติ ($T_{n,i}$) ของอุปกรณ์แต่ละชนิดจะมีการกระจายตัวที่แตกต่างกัน ระยะเวลาดังกล่าวนี้ได้จากการศึกษาและทดสอบตัวอย่างของอุปกรณ์ตลอดจนจากตารางบันทึกข้อมูลการทำงานของอุปกรณ์นั้นๆ โดยทั่วไปการศึกษาพฤติกรรรมการทำงานของอุปกรณ์แต่ละชนิดใช้ฟังก์ชันการกระจายตัวความน่าจะเป็นสะสม (Cumulative distribution function: CDF) ในการอธิบาย ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าตัวแปรสุ่มจาก 0 ถึง 1 ดังแสดงในภาพที่ 2.4 [21]



ภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันการกระจายตัวความน่าจะเป็นสะสมและเวลา

หากพิจารณาถึงเวลาการทำงานของอุปกรณ์ซึ่งกำลังทำงานอยู่ ณ เวลาเริ่มต้น ($t=0$) นั้นความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวในเวลาดังกล่าวมีค่าเป็นศูนย์ ขณะที่เวลาผ่านไปความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์นั้นจะเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวจะเพิ่มขึ้น และมีค่าเป็นหนึ่งเมื่อเวลาผ่านไปนานมาก ($t \to \infty$) จะเห็นได้ว่าลักษณะธรรมชาติของอุปกรณ์สามารถเทียบเคียงได้กับฟังก์ชันการกระจายตัวความน่าจะเป็นสะสม การประเมินด้วยลักษณะดังกล่าวเป็นการแสดงถึงความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ล้มเหลวในรูปฟังก์ชันของเวลา กล่าวคือ แกน y เป็นความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวและแกน x เป็นระยะเวลาที่อุปกรณ์สามารถทำงานได้ (TTF) นั่นเอง หากนำฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์เข้ากับทฤษฎีความเชื่อถือได้ พบว่า มีฟังก์ชันที่สำคัญสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ดังต่อไปนี้

(1) ฟังก์ชันเหตุการณ์ล้มเหลว (Failure function)

(2) ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ (Reliability function)

(3) ฟังก์ชันความเสียหาย (Hazard function)

(4) ระยะเวลาการใช้งานอุปกรณ์เฉลี่ย (Mean time to failure: MTTF)

2.2.1 ฟังก์ชันเหตุการณ์ล้มเหลว

ฟังก์ชันเหตุการณ์ล้มเหลว หรือ $Q(t)$ หมายถึง ความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์ไฟฟ้าเกิดเหตุการณ์การล้มเหลวหลังจากการใช้งานไปเวลาที่ t ตามสมมุติฐานที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น ฟังก์ชันเหตุการณ์การล้มเหลวก็เปรียบเสมือนฟังก์ชันการกระจายตัวความน่าจะเป็นสะสมนั่นเอง โดยสามารถคำนวณได้จากความน่าจะเป็น ณ เวลาที่ t ที่มีค่ามากกว่าเวลาการทำงานของอุปกรณ์ หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการหาปริพันธ์ของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability density function: PDF) หรือ $f(t)$ ที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว ณ เวลาที่ t ดังสมการที่ (2.5)

$$Q(t) = P\{TTF \le t\} = \int_0^t f(t)dt \tag{2.5}$$

โดย $Q(t)$ คือ ฟังก์ชันเหตุการณ์การล้มเหลว

$f(t)$ คือ ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ล้มเหลว

TTF คือ ระยะเวลาที่อุปกรณ์สามารถทำงานได้

2.2.2 ฟังก์ชันความเชื่อถือได้

ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ หรือ $R(t)$ หมายถึง ความสามารถที่อุปกรณ์ยังสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ โดยสามารถคำนวณได้จากความน่าจะเป็น ณ เวลาที่ t ที่มีค่าน้อยกว่าเวลาการทำงานของอุปกรณ์ หรือผลต่างของหนึ่งกับความน่าจะเป็นที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวนั่นเอง ดังสมการที่ (2.6)

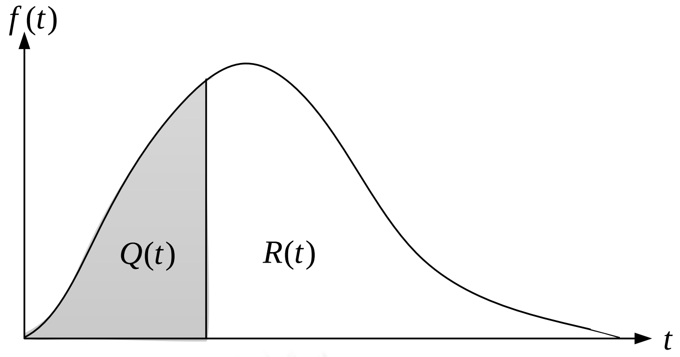
$$R(t) = P\{TTF > t\} = 1 - \int_0^t f(t)dt = 1 - F(t) \tag{2.6}$$

โดย $R(t)$ คือ ฟังก์ชันความเชื่อถือได้

TTF คือ ระยะเวลาที่อุปกรณ์สามารถทำงานได้

จากสมการที่ (2.5) และ (2.6) สังเกตได้ว่า ฟังก์ชันความเชื่อถือได้และฟังก์ชันเหตุการณ์ล้มเหลวเป็นฟังก์ชันของความน่าจะเป็น ดังนั้น จึงทำให้ค่าที่ได้จากทั้งสองฟังก์ชันมีค่าไม่เกินหนึ่ง และจากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.6) สังเกตได้ว่า ฟังก์ชันความเชื่อถือได้มีความสัมพันธ์ในลักษณะตรงกันข้ามกับฟังก์ชันเหตุการณ์ล้มเหลว กล่าวคือ เมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้นความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์จะมีค่าลดลง ในขณะที่เหตุการณ์ล้มเหลวจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเหตุการณ์ล้มเหลวและฟังก์ชันความเชื่อถือได้ ภายใต้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ล้มเหลว สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเหตุการณ์การล้มเหลว และฟังก์ชันความเชื่อถือได้

2.2.3 ฟังก์ชันความเสียหาย

ฟังก์ชันความเสียหาย หรือ $h(t)$ ในบางกรณีอาจเรียกว่า อัตราความเสียหาย (Hazard rate) หรือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลว (Failure rate) ซึ่งทั้งสามชื่อเรียกนี้มีความหมายที่เหมือนกัน โดยหมายถึงจำนวนครั้งของอุปกรณ์ที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวในช่วงระยะเวลาหนึ่ง

พิจารณาการทำงานของอุปกรณ์ในระยะเวลา t หากต้องการประเมินความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ล้มเหลวในเวลาถัดไป (Δt) กล่าวคือ ต้องการประเมินความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ล้มเหลวในช่วงระยะเวลา ($t, t+\Delta t$) นั่นเอง สังเกตได้ว่าความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ล้มเหลวในเวลาถัดไป (Δt) ไม่สามารถประเมินได้อย่างเป็นอิสระจากพฤติกรรมของอุปกรณ์ในอดีตได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ การประเมินความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ล้มเหลวในระยะเวลา ($t, t+\Delta t$) จึงมีเงื่อนไขที่ตลอดช่วงระยะเวลา t ที่ผ่านมาต้องไม่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวขึ้นเลย

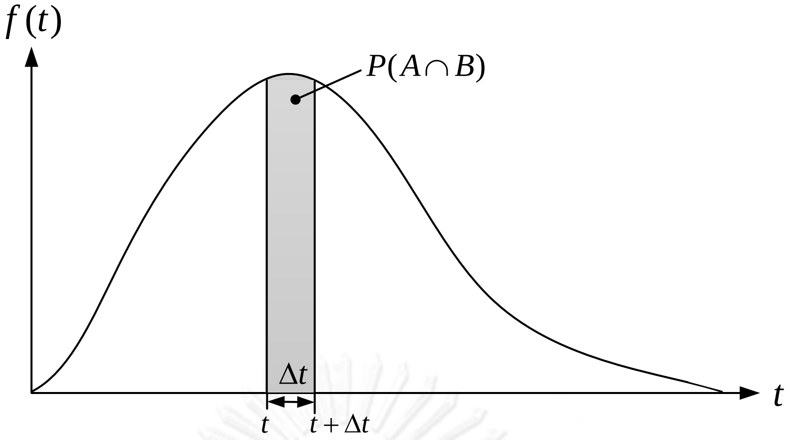
ปัญหานี้มักถูกแก้ไขด้วยทฤษฎีความน่าจะเป็นแบบเงื่อนไข โดยความน่าจะเป็นที่เกิดเหตุการณ์ A ที่ขึ้นกับเงื่อนไขของเหตุการณ์ B สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.7)

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \tag{2.7}$$

กำหนดให้อุปกรณ์มีฟังก์ชันการกระจายตัวเหตุการณ์ล้มเหลว ดังภาพที่ 2.6 ดังนั้น ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ล้มเหลวในระยะเวลา ($t, t+\Delta t$) โดยมีเงื่อนไขที่อุปกรณ์ทำงานตลอดช่วงเวลา t สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.8)

$$P(t < TTF \le t+\Delta t \,|\, TTF > t) = \frac{P\{(t < TTF \le t+\Delta t) \cap (TTF > t)\}}{P(TTF > t)} \tag{2.8}$$

โดย TTF คือ ระยะเวลาที่อุปกรณ์สามารถทำงานได้



ภาพที่ 2.6 ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ล้มเหลวในช่วงระยะเวลา

ความน่าจะเป็นของอุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวในช่วงระยะเวลา $(t, t+\Delta t)$ โดยที่อุปกรณ์ทำงานตลอดช่วงระยะเวลา t คือ $P\{(t < TTF \le t+\Delta t) \cap (TTF > t)\}$ สามารถคำนวณความน่าจะเป็นได้ดังสมการที่ (2.9)

$$P\{(t < TTF \le t+\Delta t) \cap (TTF > t)\} = \int_{t}^{t+\Delta t} f(t)dt = Q(t+\Delta t) - Q(t) \qquad (2.9)$$

และความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์ทำงานตลอดช่วงระยะเวลา t คือ $P(TTF > t)$ สามารถคำนวณความน่าจะเป็นได้ดังสมการที่ (2.10)

$$P(TTF > t) = 1 - \int_{0}^{t} f(t)dt = R(t) \qquad (2.10)$$

จากสมการที่ (2.8) ถึง (2.10) เหตุการณ์ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ล้มเหลวในระยะเวลา $(t, t+\Delta t)$ ภายใต้เงื่อนไขที่อุปกรณ์ทำงานตลอดช่วงเวลา t มีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันความเชื่อถือได้ และฟังก์ชันเหตุการณ์ล้มเหลว ดังสมการที่ (2.11)

$$P(t < TTF \le t+\Delta t \mid TTF > t) = \frac{Q(t+\Delta t) - Q(t)}{R(t)} \qquad (2.11)$$

เมื่อนำความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ล้มเหลวในช่วงระยะเวลา $(t, t+\Delta t)$ ภายใต้เงื่อนไขที่อุปกรณ์ทำงานตลอดช่วงเวลา t ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.11) มาคำนวณอัตราความเสียหายด้วยการหารเวลาระยะเวลาที่สนใจ (Δt) โดยที่ระยะที่สนใจนี้มีค่าน้อยมากจนเข้าใกล้ศูนย์ สามารถคำนวณอัตราความเสียหายได้ดังสมการที่ (2.12)

$$h(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P(t < TTF \le t + \Delta t \mid TTF > t)}{\Delta t}$$
$$= \lim_{\Delta t \to 0} \frac{Q(t+\Delta t) - Q(t)}{\Delta t}$$
$$= \frac{1}{R(t)} \cdot \frac{d}{dt} Q(t)$$
$$= \frac{f(t)}{R(t)} \tag{2.12}$$

อาศัยความสัมพันธ์ของของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวและฟังก์ชันความเชื่อถือได้ ตามสมการที่ (2.13) สามารถคำนวณฟังก์ชันความเสียหายในรูปของฟังก์ชันความเชื่อถือได้ดังสมการที่ (2.14) ตามลำดับ

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = \frac{d}{dt} 1 - R(t) = -\frac{d}{dt} R(t) \tag{2.13}$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{d}{dt} R(t) = -\frac{d}{dt} \ln R(t) \tag{2.14}$$

2.2.4 ระยะเวลาการใช้งานอุปกรณ์เฉลี่ย

ระยะเวลาการใช้งานอุปกรณ์เฉลี่ย (Mean time to failure: MTTF) หมายถึง ระยะเวลาเฉลี่ยที่อุปกรณ์ใช้งานได้จนกว่าเกิดเหตุการณ์ล้มเหลว พิจารณาการกระจายตัวของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ล้มเหลว (Probability density function: PDF) หรือ $f(t)$ ที่บ่งบอกความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นกับเวลาที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว ดังนั้นจึงสามารถคำนวณระยะเวลาการใช้งานอุปกรณ์เฉลี่ยได้จากค่าความคาดหวัง (Expected value) หรือ $E(t)$ ของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ดังสมการที่ (2.15)

$$MTTF = E(t) = \int_{-\infty}^{\infty} t \times f(t)dt \tag{2.15}$$

2.2.5 ความสัมพันธ์ฟังก์ชันสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเหตุการณ์ล้มเหลว ฟังก์ชันความเชื่อถือได้และฟังก์ชันความเสียหาย ตามที่กล่าวไปข้างต้น สามารถสรุปเป็นความสัมพันธ์ได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของความสัมพันธ์ของฟังก์ชันสำหรับการประเมินความเชื่อได้

ฟังก์ชัน	$f(t)$	$Q(t)$	$R(t)$	$h(t)$
$f(t)$	-	$\frac{d}{dt}Q(t)$	$-\frac{d}{dt}R(t)$	$h(t)\cdot\exp(-\int_0^t h(t)dt)$
$Q(t)$	$\int_0^t f(t)dt$	-	$1-R(t)$	$1-\exp(-\int_0^t h(t)dt)$
$R(t)$	$\int_t^\infty f(t)dt$	$1-Q(t)$	-	$\exp(-\int_0^t h(t)dt)$
$h(t)$	$\frac{f(t)}{\int_t^\infty f(t)dt}$	$\frac{1}{1-Q(t)}\cdot\frac{d}{dt}Q(t)$	$-\frac{d}{dt}\ln R(t)$	-

<u>หมายเหตุ</u> $f(t)$ คือ ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ล้มเหลว

$Q(t)$ คือ ฟังก์ชันเหตุการณ์ล้มเหลว

$R(t)$ คือ ฟังก์ชันความเชื่อถือได้

$h(t)$ คือ ฟังก์ชันความเสียหาย

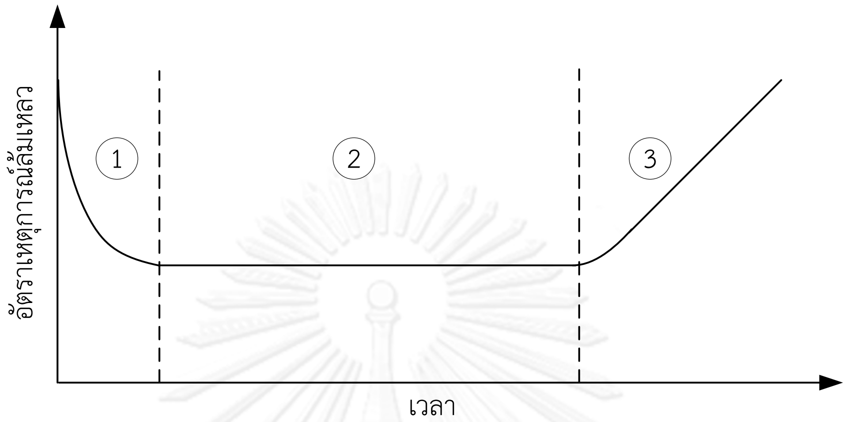
2.3 ผลกระทบของอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเมื่อเทียบกับเวลา

การทำงานของอุปกรณ์ในแต่ละช่วงเวลาย่อมส่งผลต่ออัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน โดยผลกระทบของอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเมื่อเทียบกับเวลา มีลักษณะคล้ายรูปอ่างน้ำ ในบางครั้งจึงอาจเรียกว่า เส้นโค้งรูปอ่างน้ำ (Bathtub curve) แสดงได้ดังภาพที่ 2.6 ซึ่งสามารถแบ่งเส้นโค้งของเหตุการณ์ล้มเหลวออกเป็น 3 ช่วง ดังต่อไปนี้ [21]

- **ช่วงที่** 1 เป็น ระยะเริ่มแรก หรือ ระยะที่อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวลดลง ซึ่งในระยะนี้จะเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวได้ง่าย เนื่องจากอุปกรณ์อาจถูกออกแบบมาไม่สมบูรณ์ หรือ เกิดจากบุคลากรอาจขาดความชำนาญในการใช้อุปกรณ์ เมื่อพบเหตุการณ์ล้มเหลวจะต้องทำการตรวจสอบหาข้อผิดพลาด และทำการแก้ไขก่อนนำอุปกรณ์ไปใช้งาน
- **ช่วงที่** 2 เป็น ระยะเวลาของการใช้งาน หรือ ระยะที่อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวคงที่ ซึ่งในระยะนี้เป็นช่วงการใช้งานโดยทั่วไปของอุปกรณ์ เหตุการณ์ล้มเหลวที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะเกิดแบบสุ่มและค่อนข้างคงที่

Chulalongkorn University

■ **ช่วงที่ 3** เป็น ระยะเวลาการสึกหรอ หรือ ระยะที่อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเพิ่มขึ้น ซึ่งในระยะนี้อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์จะเพิ่มมากขึ้น อันเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอุปกรณ์ไม่สามารถที่จะใช้งานได้



ภาพที่ 2.7 ผลกระทบของอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเมื่อเทียบกับเวลา

2.4 ฟังก์ชันการกระจายตัวที่ใช้วิเคราะห์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

เทคนิคความน่าจะเป็นได้ถูกนำมาใช้ในจัดการความไม่แน่นอนของข้อมูล โดยนำข้อมูลในอดีตมาวิเคราะห์เทียบกับการกระจายตัวรูปแบบต่างๆ การกระจายตัวของข้อมูลจะถูกต้องและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากเพียงใดขึ้นอยู่กับความแม่นยำและความถี่ในการบันทึกข้อมูลในอดีต การกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ในระบบไฟฟ้ากำลังมีดังต่อไปนี้ [21]

(1) การกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ (Uniform distribution)
(2) การกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution)
(3) การกระจายตัวแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential distribution)
(4) การกระจายตัวแบบไวบูลล์ (Weibull distribution)

2.4.1 การกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ

การกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ (Uniform distribution) เป็นรูปแบบการกระจายตัวที่ง่ายที่สุด ในบรรดาการกระจายตัวทั้งหมด ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น แสดงได้ดังสมการที่ (2.16)

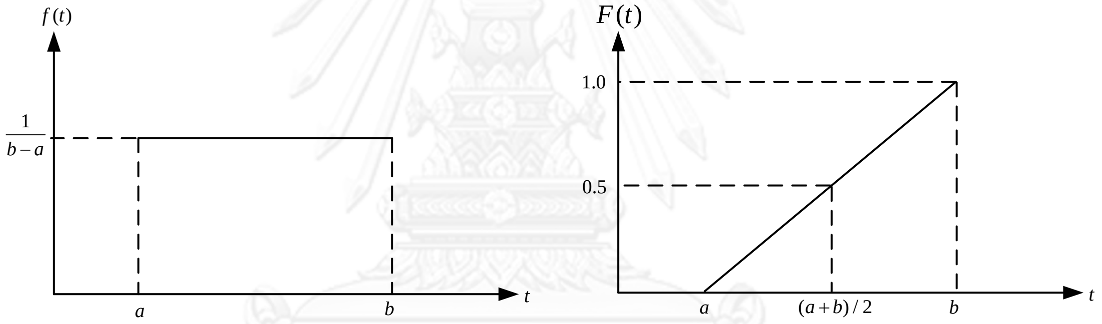
$$f(t) = \frac{1}{b-a} \quad , \; a \le t \le b \tag{2.16}$$

การกระจายตัวรูปแบบแบบสม่ำเสมอ เป็นการกระจายตัวของตัวแปรสุ่ม t เฉพาะช่วง a ถึง b และความน่าจะเป็นที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวของช่วง อย่างไรก็ตาม พื้นที่ใต้กราฟฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นมีค่าเป็นหนึ่งเสมอ

ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นในสมการที่ (2.16) สามารถคำนวณการกระจายตัวสะสมได้ดังสมการที่ (2.17)

$$F(t) = \int_a^t \frac{1}{b-a} dt = \frac{t-a}{b-a} \quad (2.17)$$

ลักษณะของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นและฟังก์ชันการกระจายตัวสะสมของการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ แสดงได้ดังภาพที่ 2.8 (ก) และ 2.8 (ข) ตามลำดับ



(ก) ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (ข) ฟังก์ชันการกระจายตัวสะสม

ภาพที่ 2.8 การกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ

การกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ สามารถคำนวณค่าเฉลี่ย (Expected value) และค่าความแปรปรวน (Standard deviation) ได้ดังสมการที่ (2.18) และ (2.19) ตามลำดับ

$$E(t) = \int_{-\infty}^{\infty} t \times f(t) dt = \int_a^b \frac{t}{b-a} dt = \frac{a+b}{2} \quad (2.18)$$

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} E(t^2)dt - (E(t^2))^2$$
$$= \int_0^t \frac{t^2}{b-a}dt - \left(\frac{a+b}{2}\right)^2$$
$$= \frac{(b-a)^2}{12} \qquad (2.19)$$

2.4.2 การกระจายตัวแบบปกติ

การกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution) เป็นการกระจายตัวที่สำคัญ และถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์ทางสถิติและความน่าจะเป็น จุดเด่นของการกระจายตัวแบบปกติจะมีลักษณะที่สมมาตร ซึ่งถูกกำหนดด้วยค่าเฉลี่ย (Mean, μ) และค่าเบี่ยงแบนมาตรฐาน (Standard deviation, σ) ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น แสดงได้ดังสมการที่ (2.20)

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \qquad (2.20)$$

ฟังก์ชันการกระจายตัวสะสมของการกระจายตัวแบบปกติของตัวแปรสุ่ม t ในช่วง a ถึง b สามารถคำนวณได้จากการหาปริพันธ์ (Integrate) ของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ดังสมการที่ (2.21)

$$F(a \le t \le b) = \int_a^b \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \qquad (2.21)$$

สังเกตได้ว่าการหาปริพันธ์ตามสมการที่ (2.20) ไม่สามารถคำนวณด้วยเทคนิคปริพันธ์ทั่วไปได้ ต้องอาศัยเทคนิคการคำนวณหาปริพันธ์ตามกฎของซิมซันต์ (Simpson’s Rule) ที่ใช้คอมพิวเตอร์คำนวณตารางค่ามาตรฐาน (Standard value table) โดยตารางค่ามาตราฐานนี้แสดงถึงพื้นที่ใต้กราฟของฟังก์ชันการกระจายตัว เพื่อคำนวณหาปริพันธ์ด้วยวิธีการดังกล่าว จึงต้องแปลงค่าตัวแปรสุ่ม t ให้อยู่ในรูปค่ามาตรฐาน Z ดังสมการที่ (2.22)

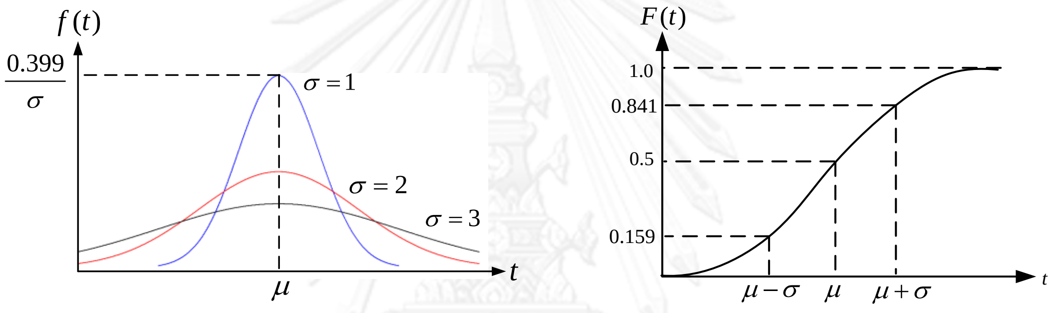
$$Z = \frac{t-\mu}{\sigma} \qquad (2.22)$$

หากแทนค่ามาตรฐาน Z ตามสมการที่ (2.22) ลงในสมการการกระจายตัวแบบปกติในสมการที่ (2.20) จะได้สมการการกระจายตัวแบบปกติในรูปค่ามาตรฐาน Z ดังสมการที่ (2.23)

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} \tag{2.23}$$

จากสมการที่ (2.23) จะเห็นว่าตัวแปรสุ่มอยู่ในรูปของค่ามาตราฐาน Z ที่มีค่าเฉลี่ยเป็น 0 และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 1 การสร้างสมการทดแทนดังกล่าวนี้สามารถสร้างตารางมาตรฐานที่มีการเบี่ยงเบนของตัวแปรสุ่มจากค่าเฉลี่ยในรูปของค่ามาตรฐาน Z ได้ ทำให้สามารถกำหนดพื้นที่ใต้กราฟของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นให้เป็นตารางค่ามาตรฐานอย่างง่ายสำหรับค่าเฉลี่ยและค่าเบียงเบี่ยนมาตราฐานใดๆ

ลักษณะของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นและฟังก์ชันการกระจายตัวสะสมของการกระจายตัวแบบปกติ แสดงได้ดังภาพที่ 2.9 (ก) และ 2.9 (ข) ตามลำดับ



(ก) ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (ข) ฟังก์ชันการกระจายตัวสะสม

ภาพที่ 2.9 การกระจายตัวแบบปกติ

2.4.3 การกระจายตัวแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

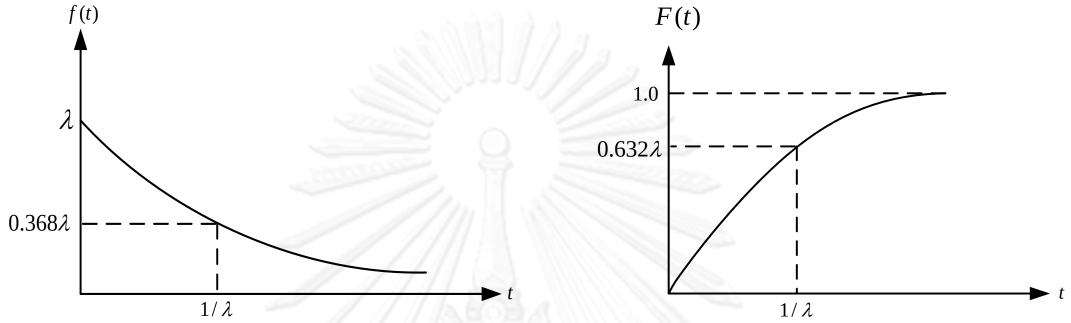
การกระจายตัวแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential distribution) เป็นการกระจายตัวที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า เนื่องจากมีลักษณะในการคำนวณที่ง่ายและไม่ซับซ้อน นอกจากนี้ เมื่อคำนวณอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว (Failure rate) จะมีค่าคงที่ ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของการกระจายตัวแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล แสดงได้ดังสมการที่ (2.24)

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \tag{2.24}$$

ฟังก์ชันการกระจายตัวสะสมของการกระจายตัวแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลสามารถคำนวณ ได้ดังสมการที่ (2.25)

$$F(t) = \int_0^t \lambda e^{-\lambda} dt$$
$$= 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.25)$$

ลักษณะฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นและฟังก์ชันการกระจายตัวสะสมของการกระจายตัวแบบเอ็กซ์โพเทนเชียลแสดงได้ดังภาพที่ 2.10 (ก) และ 2.10 (ข) ตามลำดับ



(ก) ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (ข) ฟังก์ชันการกระจายตัวสะสม

ภาพที่ 2.10 การกระจายตัวแบบเอ็กซ์โพเทนเชียล

สามารถคำนวณค่าเฉลี่ย (Expected value) และค่าความแปรปรวน (Standard deviation) ของการกระจายตัวแบบเอ็กซ์โพเทนเชียล ได้ดังสมการที่ (2.26) และ (2.27)

$$E(t) = \int_{-\infty}^{\infty} t \times f(t) dt$$
$$= \int_0^t t \times \lambda e^{-\lambda t} dt$$
$$= \frac{1}{\lambda} \quad (2.26)$$

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} E(t^2) dt - (E(t^2))^2$$
$$= \int_0^t t^2 \times \lambda e^{-\lambda t} dt - \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2$$
$$= \frac{1}{\lambda} \quad (2.27)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.4.4 การกระจายตัวแบบไวบูลล์

การกระจายตัวแบบไวบูลล์ (Weibull distribution) เป็นการกระจายตัวที่มีความสำคัญและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในทางวิศวกรรม เนื่องจากอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว ของการกระจายตัวรูปแบบนี้มีค่าไม่คงที่เพิ่มขึ้นตามเวลา จึงทำให้สามารถวิเคราะห์ระยะเวลาที่อุปกรณ์สามารถทำงานได้ไปอีกนานเท่าใดจนกว่าเสื่อมสภาพ หรือไม่สามารถใช้งานได้

คุณลักษณะที่สำคัญของการกระจายตัวแบบไวบูลล์ คือ มีลักษณะการกระจายตัวที่ไม่แน่นอนและสามารถครอบคลุมถึงการกระจายตัวรูปแบบอื่นด้วย ซึ่งลักษณะการกระจายตัวจะเปลี่ยนแปลงตามค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกขนาดและรูปร่างของฟังก์ชันการกระจายตัว ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของการกระจายตัวแบบไวบูลล์ แสดงได้ดังสมการที่ (2.28)

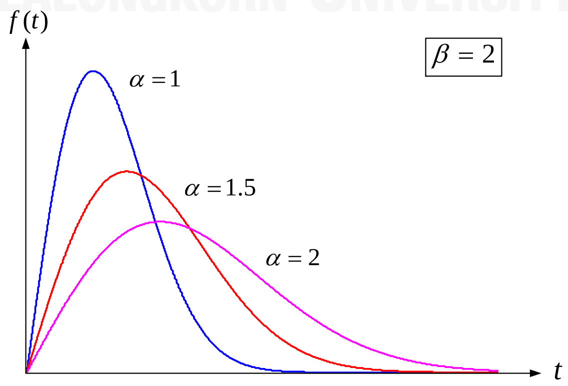
$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}} \tag{2.28}$$

โดย α คือ พารามิเตอร์บ่งบอกขนาด (Scale parameter)

β คือ พารามิเตอร์บ่งบอกรูปร่าง (Shape parameter)

สังเกตได้ว่าการกระจายตัวแบบไวบูลล์ มีพารามิเตอร์ที่แสดงถึงลักษณะของกราฟในแง่ของเวลาและลักษณะเส้นโค้งของฟังก์ชันจำนวน 2 พารามิเตอร์ ดังต่อไปนี้

(1) พารามิเตอร์บ่งบอกขนาด (Scale parameter: α) คือ พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับแกนเวลา หากปรับค่าพารามิเตอร์นี้ให้มีขนาดเพิ่มขึ้นหรือลดลง จะทำให้การรูปแบบการกระจายตัวเปลี่ยนแปลงไปตามแกนเวลา ตัวอย่างเช่น หากมีค่าพารามิเตอร์บ่งบอกลักษณะเท่ากับ 2 ($\beta = 2$) และปรับพารามิเตอร์ที่บ่งบอกขนาด (α) ด้วยค่าต่างๆ ย่อมส่งผลต่อรูปแบบการกระจายตัว แสดงได้ดังภาพที่ 2.11

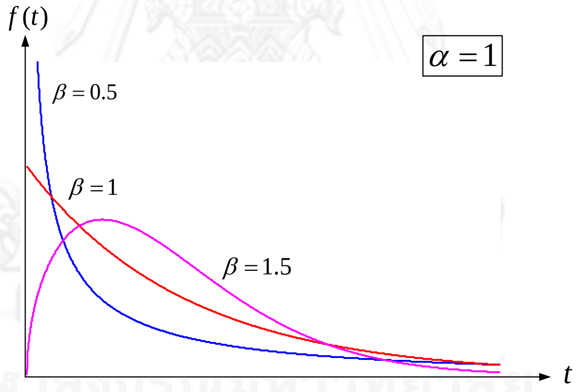


ภาพที่ 2.11 ผลกระทบจากพารามิเตอร์บ่งบอกขนาดของการกระจายตัวแบบไวบูลล์

(2) พารามิเตอร์บ่งบอกรูปร่าง (Shape parameter: β) คือ พารามิเตอร์ที่บอกลักษณะของรูปร่างการกระจายตัว ซึ่งส่งผลถึงการอธิบายลักษณะอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว ค่าของพารามิเตอร์นี้มีช่วงที่น่าสนใจอยู่ 3 ช่วง คือ

- พารามิเตอร์บ่งบอกรูปร่าง มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ($0<\beta<1$) เป็นช่วงที่ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นและอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเพิ่มขึ้นไม่สิ้นสุด แล้วลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น
- พารามิเตอร์บ่งบอกรูปร่าง มีค่าเท่ากับ 1 ($\beta=1$) ลักษณะการกระจายตัวช่วงนี้เหมือนการกระจายตัวแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล และฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นมีลักษณะลดลงเพียงอย่างเดียว แต่อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวมีค่าคงที่
- พารามิเตอร์บ่งบอกรูปร่าง มีค่ามากกว่า 1 ($\beta>1$) ลักษณะการกระจายตัวเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตามช่วงเวลา และอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา

ตัวอย่าง ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์บ่งบอกรูปร่าง ในช่วงต่างๆ เมื่อค่าพารามิเตอร์บ่งบอกขนาดเท่ากับ 1 ($\alpha=1$) สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.12



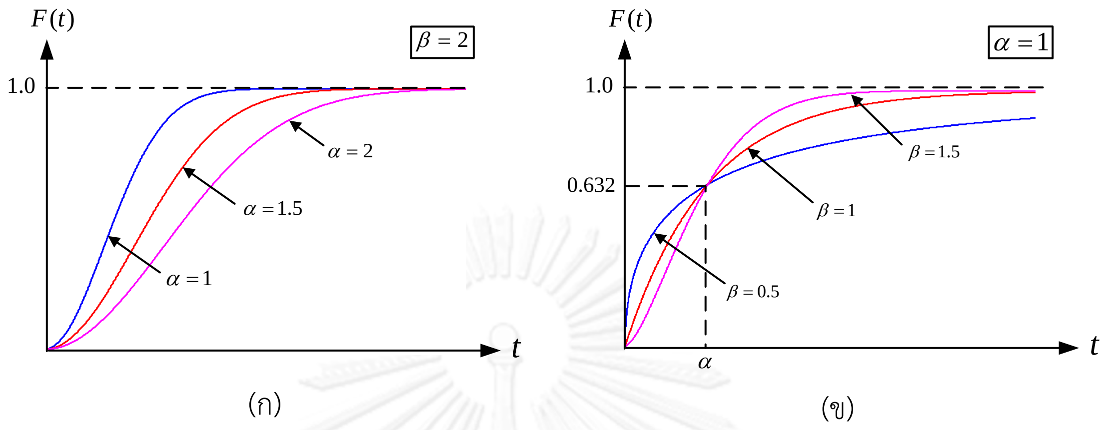
ภาพที่ 2.12 ผลกระทบจากพารามิเตอร์บ่งบอกรูปร่างของการกระจายตัวแบบไวบูลล์

ฟังก์ชันการกระจายตัวสะสมของการกระจายตัวแบบไวบูลล์ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.29)

$$F(t)=\int_0^t \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}} dt$$

$$=1-e^{-(\frac{t}{\alpha})^{\beta}} \quad (2.29)$$

จากตัวอย่างการกระจายตัวแบบไวบูลล์ด้วยพารามิเตอร์แบบต่างๆ ในภาพที่ 2.11 และ ภาพที่ 2.12 สามารถคำนวณฟังก์ชันการกระจายตัวสะสม ได้ดังภาพที่ 2.13 (ก) และ 2.13 (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 2.13 ฟังก์ชันการกระจายตัวสะสมของการกระจายตัวแบบไวบูลล์

สามารถคำนวณค่าเฉลี่ย (Expected value) ของการกระจายตัวแบบไวบูลล์ ได้ดังสมการที่ (2.30)

$$E(t) = \int_{-\infty}^{\infty} t \times f(t)dt$$
$$= \int_{0}^{\infty} t \times \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}} dt$$
$$= \alpha\Gamma(\frac{1}{\beta}+1) \qquad (2.30)$$

โดย $\Gamma(\frac{1}{\beta}+1)$ เป็นค่าของฟังก์ชันการกระจายตัวแบบแกรมมาของ $(\frac{1}{\beta}+1)$ ซึ่งฟังก์ชันการกระจายตัวแบบแกรมมามีฟังก์ชันการกระจายตัวดังสมการที่ (2.31)

$$\Gamma(n) = \int_{0}^{\infty} e^{-t} t^{n-1} dt \qquad (2.31)$$

ค่าความแปรปรวน (Standard deviation) ของการกระจายตัวแบบไวบูลล์ สามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.32)

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} E(t^2)dt - (E(t^2))^2$$

$$= \int_{0}^{\infty} t^2 \times \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}} dt - \left(\alpha\Gamma(\frac{1}{\beta}+1)\right)^2$$

$$= \alpha^2[\Gamma(1+\frac{2}{\beta}) - \Gamma^2(\frac{1}{\beta}+1)] \qquad (2.32)$$

2.5 การประยุกต์ทฤษฎีการประเมินความเชื่อถือได้ร่วมกับฟังก์ชันการกระจายตัว

เมื่อนำทฤษฎีสำหรับการประเมินความเชื่อได้ มาประยุกต์ร่วมกับ ฟังก์ชันการกระจายตัวทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบต่างๆ สามารถสรุปฟังก์ชันสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้และระยะเวลาการใช้งานเฉลี่ย (Mean time to failure: $MTTF$) ในแต่ละรูปแบบการกระจายตัว ดังตารางที่ 2.2 ถึง 2.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 ฟังก์ชันสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ในแต่ละรูปแบบการกระจายตัว

ฟังก์ชัน	รูปแบบการกระจายตัว			
	แบบสม่ำเสมอ	แบบปกติ	แบบเอ็กซ์โพเทนเซียล	แบบไวบูลล์
$f(t)$	$\frac{1}{b-a}$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	$\lambda e^{-\lambda t}$	$\frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}}$
$Q(t)$	$\frac{t-a}{b-a}$	$\int_{t}^{\infty} f(t)dt$	$1-e^{-\lambda t}$	$1-e^{-(\frac{t}{\alpha})^{\beta}}$
$R(t)$	$1-\frac{t-a}{b-a}$	$1-\int_{t}^{\infty} f(t)dt$	$e^{-\lambda t}$	$e^{-(\frac{t}{\alpha})^{\beta}}$
$h(t)$	$\frac{1}{b-t}$	$\frac{f(t)}{R(t)}$	λ	$\frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^{\beta}}$

หมายเหตุ $f(t)$ คือ ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ล้มเหลว
$Q(t)$ คือ ฟังก์ชันเหตุการณ์ล้มเหลว
$R(t)$ คือ ฟังก์ชันความเชื่อถือได้
$h(t)$ คือ ฟังก์ชันความเสียหาย

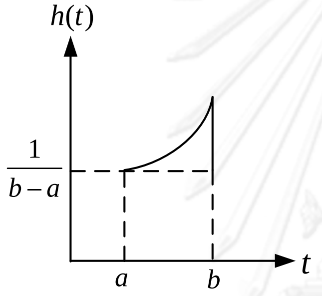
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

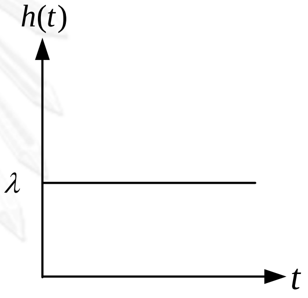
ตารางที่ 2.3 ระยะเวลาการใช้งานอุปกรณ์เฉลี่ยในแต่ละรูปแบบการกระจายตัว

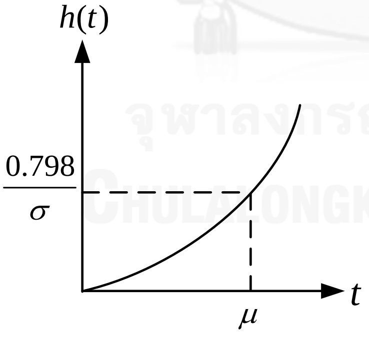
ระยะเวลาการใช้งานอุปกรณ์เฉลี่ย	รูปแบบการกระจายตัว			
	แบบสม่ำเสมอ	แบบปกติ	แบบเอ็กซ์โพเทนเซียล	แบบไวบูลล์
$MTTF$	$\frac{a+b}{2}$	μ	$\frac{1}{\lambda}$	$\alpha \cdot \Gamma(\frac{1}{\beta}+1)$

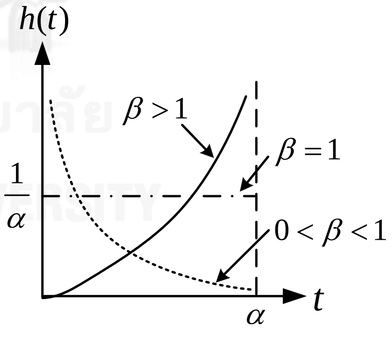
นอกจากนี้ หากพิจารณาเฉพาะฟังก์ชันอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว สามารถเปรียบเทียบลักษณะฟังก์ชันอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวในแต่ละรูปแบบการกระจายตัวได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ฟังก์ชันอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวในแต่ละรูปแบบการกระจายตัว

<table>
<tr><th>การกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ</th><th>การกระจายตัวแบบเอ็กซ์โพเทนเซียล</th></tr>
<tr><td>


$h(t)=\frac{1}{b-t}$</td><td>


$h(t)=\lambda$</td></tr>
<tr><th>การกระจายตัวแบบปกติ</th><th>การกระจายตัวแบบไวบูลล์</th></tr>
<tr><td>


$h(t)=\frac{f(t)}{R(t)}$</td><td>


$h(t)=\frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^{\beta}}$</td></tr>
</table>

บทที่ 3
การบำรุงรักษาอุปกรณ์

เมื่อมีการใช้งานอุปกรณ์ไประยะเวลาหนึ่ง ย่อมมีการเสื่อมสภาพจากวัสดุของอุปกรณ์หรือจากการใช้งานอุปกรณ์อย่างหนัก ซึ่งอาจทำให้อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวและส่งผลกระทบต่อการทำงานโดยรวมของระบบได้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงให้อุปกรณ์เหล่านั้นมีสภาพพร้อมใช้งานอยู่เสมอ และมีความเชื่อถือได้ในระดับที่ต้องการ หนึ่งในวิธีการที่นิยมในการปรับปรุงอุปกรณ์คือการบำรุงรักษา (Maintenance) หากอธิบายถึงความหมายของการบำรุงรักษาอาจกล่าวได้ว่า “การกระทำที่คงสภาพหรือรักษาสภาพในการดำรงอยู่ที่จำเป็น เพื่อให้อุปกรณ์ทำงานได้ดังเดิม” ภายใต้แนวคิดหลัก เพิ่มเวลาการทำงาน และลดเวลาที่ใช้ซ่อมแซมอุปกรณ์ที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว นอกจากนี้การบำรุงรักษายังมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

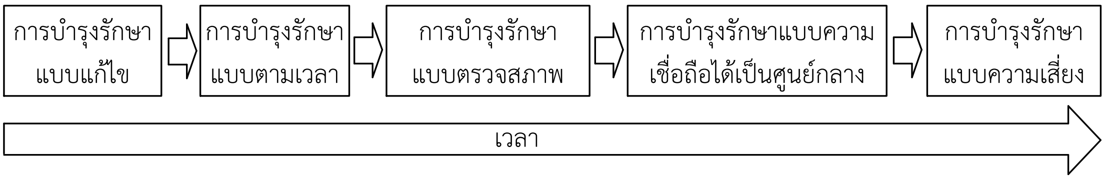
(1) ลดการเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์
(2) ยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ให้ยาวขึ้น
(3) ทำให้เกิดความมั่นใจว่าระบบอยู่ในสถานะทำงานและมีความปลอดภัย
(4) ทำให้ระบบมีสมรรถนะตามที่ต้องการ เช่น ความเชื่อถือได้ เป็นต้น
(5) ลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาทั้งหมดด้วยการวางแผนงานอย่างเหมาะสม

จากความสำคัญข้างต้น ทำให้ต้องทำความเข้าใจถึงวิธีการบำรุงรักษาอย่างเป็นระบบ และนำการบำรุงรักษาดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและประสิทธิผลสูงสุด บทนี้จึงได้นำเสนอรายละเอียดของการบำรุงรักษา ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วนคือ (1) กลยุทธ์การบำรุงรักษา, (2) ระดับการบำรุงรักษา และ (3) แบบจำลองการบำรุงรักษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.1 กลยุทธ์การบำรุงรักษา

กลยุทธ์การบำรุงรักษาได้ถูกพัฒนาตามกาลเวลามาอย่างต่อเนื่อง ด้วยเทคโนโลยีและความรู้ของมนุษย์ที่มีมากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการบำรุงรักษา กลยุทธ์การบำรุงรักษาตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.1 [22]



ภาพที่ 3.1 กลยุทธ์การบำรุงรักษาตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน

3.1.1 การบำรุงรักษาแบบแก้ไข

การบำรุงรักษาแบบแก้ไข (Corrective maintenance: CM) ดำเนินการเฉพาะช่วงเวลาที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวเท่านั้น เพื่อแก้ไขอุปกรณ์ให้กลับคืนสู่สถานะทำงานโดยเร็ว การบำรุงรักษารูปแบบนี้ มีระยะเวลาเฉลี่ยในการซ่อมแซมที่ค่อนข้างนาน เนื่องจากเป็นการบำรุงรักษาที่ไม่ได้วางแผนล่วงหน้า จึงไม่มีความพร้อมในการเตรียมการบำรุงรักษา เช่น แรงงานในการซ่อมแซม เอกสารทางเทคนิคที่สำคัญ หรืออะไหล่ที่ใช้ในการซ่อมแซม เป็นต้น ดังนั้นจึงมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาค่อนข้างสูง ทั้งทางตรงที่เกิดจากความเสียหายของอุปกรณ์ และทางอ้อมที่เกิดจากความเสียหายที่ไม่สามารถใช้อุปกรณ์ได้ การบำรุงรักษาแบบแก้ไขสามารถดำเนินการได้ 2 รูปแบบ คือ การซ่อมแซม และการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ การตัดสินใจที่จะเลือกการบำรุงรักษาแบบแก้ไขให้เป็นรูปแบบใด ขึ้นอยู่กับราคาและสมรรถนะของอุปกรณ์ภายหลังการบำรุงรักษา

3.1.2 การบำรุงรักษาแบบตามเวลา

การบำรุงรักษาตามกำหนดเวลา (Time based maintenance: TBM) เป็นการบำรุงรักษาตามแผนงานที่ได้กำหนดไว้ เพื่อลดโอกาสที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว หรือปรับปรุงความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ โดยทั่วไปกิจกรรมการบำรุงรักษาแบบป้องกันอาจมีการบำรุงรักษาตาม เวลา จำนวนครั้ง หรือระยะทาง เช่น การเปลี่ยนหน้าสัมผัสสวิตซ์ตัดตอนเมื่อใช้งานไป 10,000 ครั้ง การเปลี่ยนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าทุก 5 ปี เป็นต้น จะเห็นได้ว่าการบำรุงรักษาทั้งหมดถูกควบคุมด้วย เวลา จำนวนครั้ง หรือระยะทางที่แน่นอน ค่าใช้จ่ายของการบำรุงรักษาแบบป้องกันถูกกำหนดได้ตามกิจกรรมในตารางการบำรุงรักษา จึงทำให้สามารถกำหนดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน

3.1.3 การบำรุงรักษาแบบตรวจสภาพ

การบำรุงรักษาแบบตรวจสภาพ (Condition based maintenance: CBM) เป็นการบำรุงรักษาที่ใช้เทคนิคการตรวจสอบสภาพอุปกรณ์ ในการตัดสินใจว่าควรบำรุงรักษาอุปกรณ์นั้นหรือไม่ ทำให้สามารถที่หลีกเลี่ยงการบำรุงรักษาที่ไม่จำเป็นได้ และสามารถเน้นการบำรุงรักษาไปที่อุปกรณ์ที่คาดว่าจะเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวได้ การตัดสินใจในการบำรุงรักษาขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ประการ คือ (1) กำหนดเทคโนโลยีการตรวจสภาพให้เหมาะสมกับอุปกรณ์, (2) กำหนดความถี่ในการตรวจสภาพอุปกรณ์ และ (3) กำหนดดัชนีชี้วัดของการตรวจสภาพเพื่อดำเนินการบำรุงรักษา ตัวอย่างเทคนิคการตรวจสอบสภาพ เช่น การวิเคราะห์น้ำมัน การวิเคระห์การสั่นสะเทือน การวิเคราะห์ด้วยกล้องส่งผ่านความร้อน เป็นต้น สังเกตได้ว่า การบำรุงรักษาแบบตรวจสภาพ มีลักษณะการดำเนินงานที่คล้ายคลึงกับการบำรุงรักษาแบบป้องกัน กล่าวคือ เมื่อตรวจสภาพพบว่าอุปกรณ์มีแนวโน้มที่จะเกิด

เหตุการณ์ล้มเหลวจึงทำการบำรุงรักษา มีการป้องกันอุปกรณ์ไม่ให้เกิดเหตุการณ์ และยังกำหนดแผนงานในการตรวจสภาพล่วงหน้า ดังนั้น จึงสามารถถือได้ว่าการบำรุงรักษาแบบตรวจสภาพเป็นการบำรุงรักษาแบบป้องกันอีกแขนงหนึ่งได้เช่นกัน

3.1.4 การบำรุงรักษาแบบความเชื่อถือได้เป็นศูนย์กลาง

การบำรุงรักษาแบบความเชื่อถือได้เป็นศูนย์กลาง (Reliability centered maintenance: RCM) เป็นกระบวนการคัดเลือกการบำรุงรักษาเชิงป้องกันสำหรับอุปกรณ์ในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยหลักการของความเชื่อถือได้ กระบวนการนี้ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1978 โดย Nowlad F. Stanley และ Howard F. Heap [23] เพื่อจัดการงานบำรุงรักษาเครื่องบินโดยสารที่มีขนาดใหญ่ จึงได้นำเสนอกระบวนการจัดการบำรุงรักษาที่เป็นการปฏิวัติความคิดใหม่ทั้งหมด ด้วยการเปลี่ยนมุมมองจากการพยายามบำรุงรักษาที่ตัวอุปกรณ์ มาเป็นการบำรุงรักษาที่หน้าที่ของอุปกรณ์แทน การเปลี่ยนมุมมองดังกล่าวทำให้อุปกรณ์ที่ต้องเข้ารับการบำรุงรักษามีปริมาณที่ลดลงเป็นอย่างมาก เพราะเครื่องบินโดยสารได้รับการออกแบบมาให้มีชิ้นส่วนที่เกินความต้องการใช้งานเนื่องจากมีอุปกรณ์สำรองสำหรับหน้าที่รองรับระบบที่มีความเสี่ยงสูง จึงทำให้อุปกรณ์ไม่จำเป็นต้องทำงานพร้อมกันทั้งหมดในคราวเดียว แต่ขึ้นอยู่กับหน้าที่ที่แตกต่างกันในภารกิจที่ต่างกัน เช่น การนำเครื่องบินขึ้นต้องการใช้เครื่องยนต์ทั้ง 4 เครื่องในการขึ้นบิน แต่เมื่อบินถึงระดับหนึ่งอาจใช้กำลังขับเพียง 1 เครื่องยนต์ จะเห็นได้ว่า เครื่องยนต์มีการสึกหรอที่ไม่เท่ากันจึงทำให้ความถี่ของการบำรุงรักษาเครื่องยนต์ไม่เท่ากันไปด้วย เป็นต้น

จุดเด่นของการบำรุงรักษาแบบความเชื่อถือได้เป็นศูนย์กลาง คือ การนำความรู้ด้านความเชื่อถือได้เข้ามาใช้ในการตัดสินใจเลือกการบำรุงรักษา และจัดการงานตามความสำคัญและหน้าที่ของอุปกรณ์เป็นสำคัญ กลยุทธ์การบำรุงรักษาดังกล่าวประสบความสำเร็จอย่างมากในธุรกิจการบิน และปัจจุบันได้พัฒนาเพื่อนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรม ระบบไฟฟ้า และระบบสาธารณูปโภคอื่นๆ จนเป็นที่รู้จักและยอมรับ รายละเอียดขั้นตอนการวิเคราะห์การบำรุงรักษาแบบความเชื่อถือเป็นศูนย์กลางไม่มีแบบแผนที่แน่นอนขึ้นอยู่กับระบบที่นำไปใช้ อย่างก็ตาม สาระสำคัญของกระบวนการทั้งหมดมีอยู่ 4 กระบวนการหลัก ดังต่อไปนี้

1) การวิเคราะห์หน้าที่และจัดลำดับความสำคัญของอุปกรณ์ในระบบ
2) การรับข้อมูลอัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ (Failure rate) ที่ชัดเจนและแม่นยำ
3) การวิเคราะห์สาเหตุการเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์และผลกระทบที่ตามมา (Failure mode and effect analysis: FMEA)
4) การคัดเลือกงานบำรุงรักษาให้แก่อุปกรณ์ที่ก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

3.1.5 การบำรุงรักษาแบบความเสี่ยง

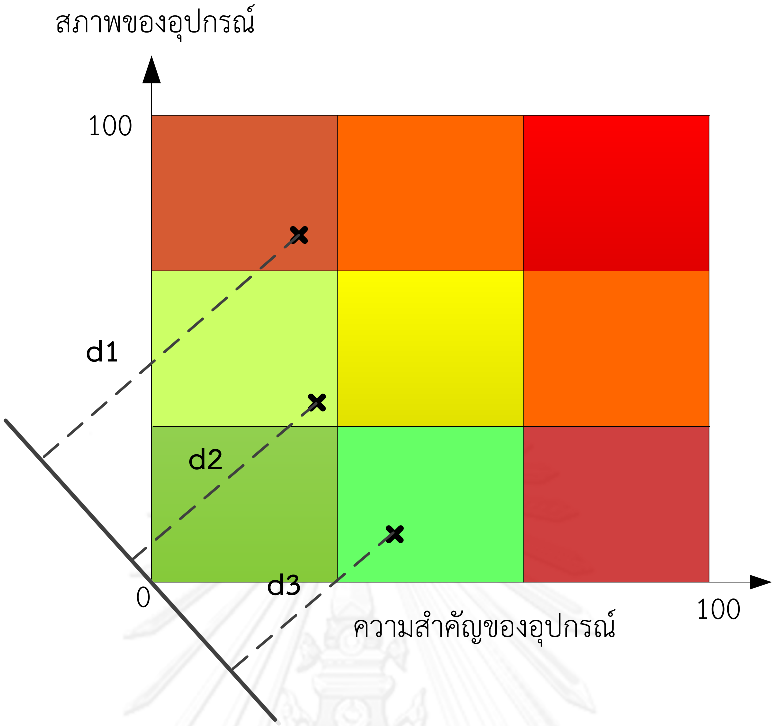
การบำรุงรักษาแบบความเสี่ยง (Risk based maintenance: RBM) เป็นการบำรุงรักษาที่ใช้ความเสี่ยงของอุปกรณ์ในการคัดเลือกงานบำรุงรักษา สำหรับการประเมินความเสี่ยงของอุปกรณ์พิจารณาได้จาก 2 ปัจจัยหลัก คือ (1) ความสำคัญของอุปกรณ์ (Importance: i) และ (2) สภาพของอุปกรณ์ (Condition: c) เมื่อนำทั้งสองปัจจัยมาประเมินความเสี่ยงร่วมกันด้วยเมทริกซ์ความเสี่ยง (Risk matrix) สามารถจัดลำดับความสำคัญและกำหนดแผนการบำรุงรักษาที่เหมาะสมได้ อย่างไรก็ตาม การกำหนดหลักเกณฑ์เพื่อประเมินความเสี่ยงตามปัจจัยทั้งสองนั้น ต้องอาศัยข้อมูลทางสถิติในอดีตและประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานเป็นจำนวนมาก และไม่มีหลักเกณฑ์ที่แน่นอนขึ้นอยู่กับหน่วยงานกำหนดขึ้นตามความเหมาะสม นอกจากนี้ หลักเกณฑ์ที่ได้กำหนดขึ้นอาจมีหลายหลักเกณฑ์ แต่ละหลักเกณฑ์ไม่ได้มีความสำคัญในระดับเดียวกันทั้งหมด ดังนั้น จึงมีการให้คะแนนและถ่วงน้ำหนักตามลำดับความสำคัญในรูปแบบของร้อยละ ตัวอย่างเกณฑ์การประเมินความเสี่ยงของอุปกรณ์ [24] แสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างเกณฑ์การประเมินความเสี่ยงของอุปกรณ์

เกณฑ์ความสำคัญของอุปกรณ์	**ร้อยละ**
พลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียจากไฟฟ้าดับ	50
ความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ล้มเหลว	25
ความสำคัญของโหลดที่เชื่อมต่ออยู่	25
-	-
-	-
รวม	100

เกณฑ์สภาพของอุปกรณ์	**ร้อยละ**
ระยะที่ผ่านการใช้งาน	30
สภาพอุปกรณ์ตามจริงทางกายภาพ	20
ความทนทานต่อโหลดสูงสุด	20
ประสิทธิภาพการซ่อมแซม	15
ประสบการณ์การใช้งาน	15
รวม	100

อุปกรณ์ทั้งหมดได้รับการประเมินความสำคัญและสภาพของอุปกรณ์ตามเกณฑ์ที่กำหนด นำผลการประเมินของแต่ละอุปกรณ์มาจัดเป็นคู่อันดับ (X,Y) โดยอันดับ X คือ ความสำคัญของอุปกรณ์ (i) และอันดับ Y คือ สภาพของอุปกรณ์ (c) ผลจากการประเมินร่วมกันระหว่างความสำคัญและสภาพของอุปกรณ์ด้วยการพล็อตลงบนระบบพิกัดฉากเรียกว่า “เมทริกซ์ความเสี่ยง” แสดงได้ดังภาพที่ 3.2 [25] จากเมทริกซ์ความเสี่ยงสามารถจัดลำดับการบำรุงรักษาอุปกรณ์ก่อนหลังได้ เช่น บริเวณพื้นที่มุมล่างซ้ายมือ อุปกรณ์มีสภาพที่ดีและมีความสำคัญต่อระบบน้อยแสดงว่ามีความเสี่ยงน้อย จึงควรจัดการบำรุงรักษาไว้ลำดับหลัง ในทางตรงกันข้าม บริเวณพื้นที่มุมบนขวามือ อุปกรณ์มีสภาพที่แย่และมีความสำคัญต่อระบบมากแสดงว่ามีความเสี่ยงมาก จึงควรจัดการบำรุงรักษาไว้ลำดับแรก การจัดลำดับการบำรุงรักษาจะลดลั่นกันลงมาตามสมมุติฐานข้างต้น



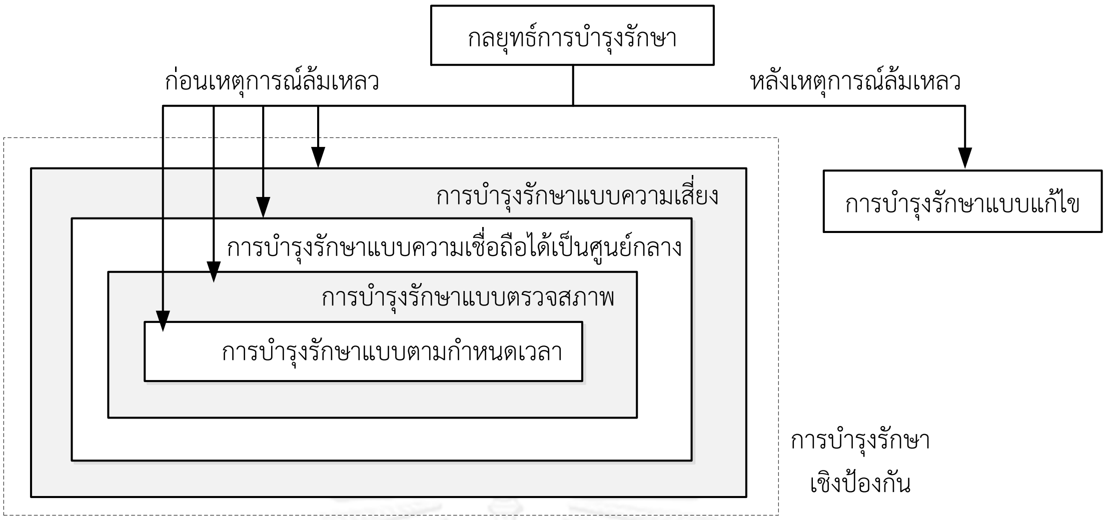
ภาพที่ 3.2 เมทริกซ์ประเมินความเสี่ยงของอุปกรณ์

หากนำกลยุทธ์การบำรุงรักษาทั้งหมดตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 3.1.1 ถึง 3.1.5 มาจัดกลุ่มตามลักษณะการดำเนินงาน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ดังต่อไปนี้

1) การบำรุงรักษาก่อนเหตุการณ์ล้มเหลว มีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันอุปกรณ์ให้เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวน้อยที่สุด กลยุทธ์ของการบำรุงรักษากลุ่มนี้ประกอบไปด้วย การบำรุงรักษาตามเวลา, แบบตรวจสภาพ, แบบความเชื่อถือได้เป็นศูนย์กลาง และแบบความเสี่ยง การบำรุงรักษาแต่ละรูปแบบมีลักษณะการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน เริ่มต้นจากการพิจารณาตามวงรอบเวลาที่ตายตัว ตามสภาพของอุปกรณ์ คำนึงเฉพาะความเชื่อถือได้ ตลอดจนการประเมินจากความสำคัญและสภาพของอุปกรณ์ร่วมกัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการบำรุงรักษากลุ่มนี้ได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องด้วยการนำจุดเด่นและจุดด้อยของแต่ละกลยุทธ์มาปรับใช้ร่วมกัน อาจกล่าวได้ว่าการบำรุงรักษากลุ่มนี้เป็นการบำรุงรักษาแบบป้องกัน เพื่อป้องกันให้อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวน้อยที่สุด

2) การบำรุงรักษาภายหลังเหตุการณ์ล้มเหลว มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขอุปกรณ์ที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวให้กลับมาใช้งานได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเรียกกลยุทธ์การบำรุงรักษาดังกล่าวว่า การบำรุงรักษาแบบแก้ไข

กล่าวโดยสรุป กลยุทธ์การบำรุงรักษาสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ การบำรุงรักษาก่อนและหลังเหตุการณ์ล้มเหลว ซึ่งอาจเรียกการบำรุงรักษาก่อนเหตุการณ์ล้มเหลวว่าเป็นการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive maintenance) ดังภาพที่ 3.3 [22]



ภาพที่ 3.3 กลยุทธ์การบำรุงรักษาตามลักษณะการดำเนินงาน

นอกจากนี้ เพื่อให้การบำรุงรักษาเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ควรมีระบบติดตามการใช้งานอุปกรณ์ตลอดเวลา เช่น ติดตามจำนวนครั้งการเกิดเหตุการณ์ล้มเหลว แรงดันน้ำมัน หรือ ระดับกระแสลัดวงจร เป็นต้น

3.2 ระดับการบำรุงรักษาอุปกรณ์

นอกจากการแบ่งกลยุทธ์การบำรุงรักษาออกเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ การบำรุงรักษาแบบแก้ไข และการบำรุงรักษาแบบป้องกันแล้วยังเกิดคำถามขึ้นว่า “ภายหลังการบำรุงรักษาแต่ครั้งมีผลกระทบต่ออุปกรณ์อย่างไร” ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่ต้องประเมินผลกระทบดังกล่าว ด้วยการแบ่งระดับการบำรุงรักษาตามสภาพอุปกรณ์ภายหลังการบำรุงรักษาออกเป็น 5 ระดับ ดังต่อไปนี้

1) การบำรุงรักษาแบบสมบูรณ์ (Perfect maintenance) ภายหลังจากการบำรุงรักษาอุปกรณ์มีสภาพดีขึ้นเสมือนหนึ่งมีสภาพที่ “ดีเหมือนใหม่ (As good as new)” อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์เริ่มใหม่ที่ศูนย์ เช่น การเปลี่ยนชิ้นส่วนอุปกรณ์ใหม่ทั้งหมดหรือเป็นการยกเครื่องใหม่อย่างสมบูรณ์ (Complete overhaul) ทำให้อุปกรณ์มีสภาพราวกับอุปกรณ์ใหม่ที่ยังไม่เคยผ่านการใช้งาน

2) การบำรุงรักษาแบบไม่สมบูรณ์ (Imperfect maintenance) เป็นการบำรุงรักษาที่เน้นการปรับปรุงสภาพอุปกรณ์ให้ดีขึ้นกว่าเดิม เมื่อเทียบกับสภาพอุปกรณ์ก่อนการบำรุงรักษา แต่ไม่อาจทำให้อุปกรณ์มีสภาพที่ดีเหมือนใหม่ได้ หรืออาจกล่าวได้ว่าอุปกรณ์มีสภาพอยู่ระหว่าง “ดีเหมือนใหม่ (As good as new)” กับ “แย่เหมือนเดิม (As bad as old)”

3) การบำรุงรักษาแบบน้อยที่สุด (Minimal maintenance) มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขอุปกรณ์ที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวให้กลับมาใช้งานได้ดังเดิมด้วยเวลาน้อยที่สุด ดังนั้น จึงไม่มีผลกระทบต่อสภาพของอุปกรณ์ ทำให้ภายหลังการบำรุงรักษาอุปกรณ์มีสภาพที่ “แย่เหมือนเดิม (As bad as old)” และมีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเหมือนกับก่อนเกิดการบำรุงรักษา

4) การบำรุงรักษาแบบแย่ลง (Worse maintenance) เป็นการบำรุงรักษาที่ไม่ได้ทำอย่างรอบคอบหรือเกิดข้อผิดพลาดระหว่างการบำรุงรักษา ภายหลังการบำรุงรักษาประสิทธิภาพการใช้งานอุปกรณ์แย่กว่าก่อนการบำรุงรักษา อุปกรณ์มีสภาพที่แย่ลง อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเพิ่มขึ้นกว่าเดิม แต่ไม่ถึงขั้นที่ทำให้อุปกรณ์ชำรุดจนไม่สามารถใช้งานได้

5) การบำรุงรักษาแบบไร้ผล (Worst maintenance) ภายหลังการบำรุงรักษาอุปกรณ์ไม่สามารถกลับมาใช้งานใหม่ได้เลย (Break down) ซึ่งเกิดจากการขาดความรอบคอบหรือไม่มีการพิจารณาให้ดีเสียก่อนทำการบำรุงรักษา

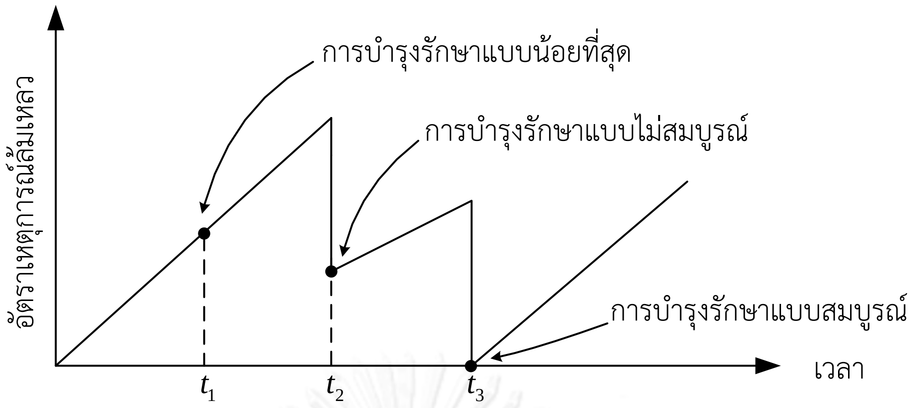
สภาพอุปกรณ์และผลกระทบต่ออัตราเหตุการณ์ล้มเหลวภายหลังจากการบำรุงรักษา ในแต่ละระดับการบำรุงรักษาที่กล่าวไปข้างต้น สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สภาพอุปกรณ์ภายหลังจากการบำรุงรักษาในแต่ละระดับการบำรุงรักษา

ระดับการบำรุงรักษา	**ภายหลังการบำรุงรักษาอุปกรณ์**	
	สภาพของอุปกรณ์	**อัตราเหตุการณ์ล้มเหลว**
การบำรุงรักษาแบบสมบูรณ์	“ดีเหมือนใหม่”	ลดลง
การบำรุงรักษาแบบไม่สมบูรณ์	อยู่ระหว่าง “ดีเหมือนใหม่” กับ “แย่เหมือนเดิม”	ลดลง
การบำรุงรักษาแบบน้อยที่สุด	“แย่เหมือนเดิม”	ไม่เปลี่ยนแปลง
การบำรุงรักษาแบบแย่ลง	“แย่กว่าเดิม”	เพิ่มขึ้น
การบำรุงรักษาแบบไร้ผล	“แย่กว่าเดิม”	เพิ่มขึ้น

ทางปฏิบัติการบำรุงรักษาแบบแย่ลงและการบำรุงรักษาแบบไร้ผล เป็นการบำรุงรักษาที่เกิดขึ้นได้น้อยมากหรือแทบจะไม่เกิดขึ้นเลย ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงให้ความสำคัญกับ ระดับการบำรุงรักษาแบบสมบูรณ์, การบำรุงรักษาแบบไม่สมบูรณ์ และการบำรุงรักษาแบบน้อยที่สุดเป็นหลัก

เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่มากขึ้น จึงได้ยกตัวอย่างผลกระทบของอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวจากการบำรุงรักษาทั้งสามระดับ สมมุติให้อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวจำเป็นต้องรีบซ่อมแซมด้วยการบำรุงรักษาแบบน้อยที่สุด ณ เวลา t_1 หลังจากนั้นอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาแบบไม่สมบูรณ์ตามตารางการบำรุงรักษา ณ เวลา t_2 และอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาแบบสมบูรณ์จนทำให้อุปกรณ์มีสภาพเหมือนใหม่ ณ เวลา t_3 ดังภาพที่ 3.4 ตามลำดับ



ภาพที่ 3.4 ตัวอย่างผลกระทบของอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวจากการบำรุงรักษาทั้งสามระดับ

3.3 แบบจำลองการบำรุงรักษาอุปกรณ์

การบำรุงรักษาย่อมมีผลกระทบต่อสภาพของอุปกรณ์ การประเมินผลกระทบดังกล่าวได้ถูกอธิบายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่สามารถสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพอุปกรณ์ภายหลังการบำรุงรักษาได้ หากแบ่งระดับการบำรุงรักษาตามหัวข้อที่ 3.2 พบว่า สภาพอุปกรณ์ภายหลังการบำรุงรักษาแบบสมบูรณ์และการบำรุงรักษาแบบน้อยที่สุดค่อนข้างมีลักษณะที่แน่นอน กล่าวคือ กรณีการบำรุงรักษาแบบสมบูรณ์ อุปกรณ์มีสภาพเสมือนอุปกรณ์ใหม่ และสำหรับกรณีการบำรุงรักษาแบบน้อยที่สุด อุปกรณ์มีสภาพเสมือนก่อนการบำรุงรักษาตามลำดับ จึงมีเพียงการบำรุงรักษาแบบไม่สมบูรณ์เท่านั้นที่สภาพอุปกรณ์ภายหลังการบำรุงรักษามีลักษณะไม่แน่นอน ดังนั้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงเข้ามามีบทบาทในการอธิบายถึงสภาพอุปกรณ์ภายหลังการบำรุงรักษาในระดับนี้

การจำลองผลกระทบของการบำรุงรักษาต่ออุปกรณ์ นิยมจำลองตามวิธีการประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นภายหลังจากการบำรุงรักษา ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีการ คือ (1) แบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยเทคนิคความน่าจะเป็น และ (2) แบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ [16, 26-28] ซึ่งทั้งสองวิธีการดังกล่าวมีรายละเอียดแบบจำลองที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

3.3.1 แบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยเทคนิคความน่าจะเป็น

แบบจำลองผลกระทบที่เกิดขึ้นภายหลังจากการบำรุงรักษาด้วยเทคนิคความน่าจะเป็น เป็นแบบจำลองอย่างง่ายจึงมักถูกนำไปใช้จำลองผลกระทบจากการบำรุงรักษา การจำลองด้วยวิธีนี้มุ่งเน้นไปที่การกระจายตัวของการบำรุงรักษา และนำดัชนีชี้วัดที่คำนวณได้จากการกระจายตัวไปกำหนดการ

บำรุงรักษาที่เหมาะสม ทั้งนี้ การจำลองด้วยเทคนิคความน่าจะเป็นสามารถแตกแขนงได้อีกหลายแบบจำลอง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอเพียงหลักการพื้นฐานที่สำคัญของเทคนิคนี้เท่านั้น

การจำลองผลกระทบของการบำรุงรักษาด้วยวิธีความน่าจะเป็นตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่า "อุปกรณ์จะมีสภาพที่ดีเหมือนใหม่ (การบำรุงรักษาแบบสมบูรณ์) ด้วยความน่าจะเป็น p และอุปกรณ์กลับมามีสภาพที่แย่เหมือนเดิม (การบำรุงรักษาแบบน้อยที่สุด) ด้วยความน่าจะเป็น q โดยที่ $q=1-p$" สมมุติฐานนี้ สามารถคำนวณฟังก์ชันการกระจายตัวของระยะเวลาการบำรุงรักษาที่สมบูรณ์แบบที่มีความต่อเนื่อง และอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่สอดคล้องกัน ภายใต้ฟังก์ชันการกระจายตัวเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ ได้ดังสมการที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

$$F_p = 1-(1-F)^p \tag{3.1}$$

$$r_p = pr \tag{3.2}$$

โดย F_p คือ ฟังก์ชันการบำรุงรักษาที่สมบูรณ์

F คือ ฟังก์ชันการกระจายตัวเหตุการณ์ล้มเหลว

p คือ ด้วยความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์มีสภาพดีเหมือนใหม่

r_p คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่สอดคล้องกับฟังก์ชันการบำรุงรักษาที่สมบูรณ์

r คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลว

เนื่องจากในทางปฏิบัติ เมื่ออุปกรณ์มีระยะการใช้งานที่ยาวนานขึ้นย่อมมีการเสื่อมสภาพตามกาลเวลา ทำให้อุปกรณ์ต้องได้รับการบำรุงรักษาที่เพิ่มมากขึ้น เพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้และความปลอดภัยของอุปกรณ์ ด้วยเหตุผลข้างต้นนี้ จึงขยายสมมุติฐานความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์มีสภาพที่ดีเหมือนใหม่และอุปกรณ์กลับมามีสภาพที่แย่เหมือนเดิม จากเดิมที่มีค่าคงที่ ให้แปรผันตามเวลา ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงแบบจำลองตามสมการที่ (3.1) และ (3.2) ให้สอดคล้องกับทางปฏิบัติมากขึ้น ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ (3.3) และ (3.4) ตามลำดับ ทั้งนี้ พารามิเตอร์ต่างๆ ในสมการดังกล่าวยังคงมีความหมายเหมือนเดิม เพียงแต่มีการแปรเปลี่ยนตามเวลา

$$F_p = 1-\exp\left[\int_0^t p(x)\cdot[1-F(x)]^{-1}\cdot F(dx)\right] \tag{3.3}$$

$$r_p(t) = p(t)\cdot r(t) \tag{3.4}$$

นอกจากนี้ พบว่าระหว่างการบำรุงรักษาแบบน้อยที่สุดด้วยความน่าจะเป็น $q(t)$ นั้นกระบวนการเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวจะขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่พิจารณา จึงสามารถใช้กระบวนการของ

Non-homogeneous poisson process (NHPP) อธิบายลักษณะการกระจายตัวเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ได้

กระบวนการของ Non-homogeneous poisson process (NHPP) เป็นกระบวนการทางสถิติที่ใช้อธิบายความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่สนใจในช่วงเวลาที่กำหนด โดยมีลักษณะที่สำคัญคือ อัตราการเกิดขึ้นของเหตุการณ์ที่สนใจมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับเวลา ทำให้จำนวนครั้งการเกิดขึ้นของเหตุการณ์ที่สนใจจึงเป็นอิสระต่อกัน เนื่องจากความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่สนใจ แปรผันตามความยาวและตำแหน่งที่ได้ทำการสุ่มในช่วงเวลานั้น สำหรับในกรณีการบำรุงรักษานี้ อัตราการเกิดและจำนวนครั้งของเหตุการณ์ที่สนใจ คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์และจำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวตามลำดับ ดังนั้น ความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์จะเกิดเหตุกาณ์ล้มเหลวในช่วงเวลา (t_1, t_2) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.5

$$P(N(t_2) - N(t_1)) = P(n) = \frac{1}{n!} \cdot \exp\left[-\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t)dt\right] \cdot \left[\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t)dt\right]^n \tag{3.5}$$

โดย $P(n)$ คือ ความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์จะเกิดเหตุกาณ์ล้มเหลวในช่วงเวลาที่สนใจ

$N(t)$ คือ จำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวในช่วงเวลา t

n คือ จำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวในช่วงเวลาที่สนใจ

$\lambda(t)$ คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์

t_1, t_2 คือ ช่วงเวลาที่สนใจ

ทั้งนี้ จำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวในช่วงระยะเวลา t ภายใต้การบำรุงรักษาแบบน้อยที่สุด สามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.6)

$$\Lambda(t) = \int_0^t \lambda(t)dt \tag{3.6}$$

โดย $\Lambda(t)$ คือ จำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวในช่วงระยะเวลา t

โดยทั่วไปอาจเรียกการจำลองผลกระทบของการบำรุงรักษาด้วยเทคนิคความน่าจะเป็นแบบคงที่และแบบแปรผันตามเวลาว่า กฎ (p , q) และกฎ ($p(t)$, $q(t)$) ตามลำดับ ภายใต้การจำลองด้วยวิธีการดังกล่าว ทำให้สามารถวิเคราะห์การกระจายตัวของการบำรุงรักษาแบบสมบูรณ์ได้โดยง่าย และด้วยกระบวนการของ Non-homogeneous poisson process (NHPP) ยังมีผลทำให้การกระจายตัวของการบำรุงรักษามีลักษณะรูปแบบปิด ทำให้คำนวณดัชนี้ชี้วัด เช่น ค่าใช้จ่าย ดัชนีความเชื่อถือได้ เป็นต้น เพื่อนำไปเข้าสู่กระบวนการสำหรับกำหนดการบำรุงรักษาที่เหมาะสมต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3.2 แบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์

นอกจากการจำลองผลกระทบจากการบำรุงรักษาด้วยเทคนิคความน่าจะเป็น ตามที่ได้นำเสนอไปแล้วนั้น ยังสามารถจำลองผลกระทบดังกล่าวผ่านอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ได้โดยตรง ภายใต้แนวคิดพื้นฐาน “การบำรุงรักษาในแต่ละครั้งจะทำให้อุปกรณ์มีสภาพที่ดีขึ้น หากอุปกรณ์มีสภาพที่ดีขึ้นย่อมหมายถึงอุปกรณ์มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่ลดลง” ปัจจุบันการจำลองผลกระทบจากการบำรุงรักษาภายใต้แนวคิดพื้นฐานนี้มีหลายแบบจำลอง อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่มักนิยมใช้มีเพียง 3 รูปแบบ คือ (1) แบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว, (2) แบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยการลดอายุอุปกรณ์ และ (3) แบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยวิธีผสม ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.2.1 แบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว

เมื่อจำลองผลกระทบจากการบำรุงรักษา ตามแบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว (Failure rate maintenance model) โดยหลังจากการบำรุงรักษาฟังก์ชันอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์มีลักษณะการกระจายตัวเหมือนกับก่อนการบำรุงรักษา แต่อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเริ่มต้นมีค่าเป็นศูนย์ และความรุนแรงมีแนวโน้มที่สูงขึ้น แนวคิดนี้อยู่ภายใต้สมมุติฐานฟังก์ชันอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์เป็นฟังก์ชันเพิ่มตลอดเวลา

หากกำหนดให้ อุปกรณ์มีฟังก์ชันอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเป็น $\lambda(t)$ ภายหลังการบำรุงรักษาครั้งที่ i การกระจายตัวของฟังก์ชันอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.7)

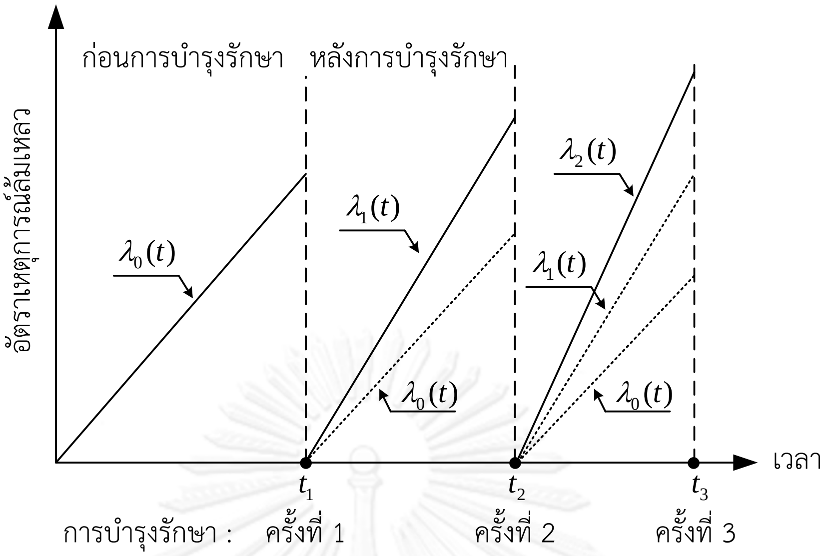
$$\lambda_i(t) = A_i \lambda_{i-1}(t) \quad , A_i > 1 \tag{3.7}$$

โดย $\lambda_i(t)$ คือ ฟังก์ชันอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ หลังการบำรุงรักษาครั้งที่ i ในช่วงเวลา $t \in (0, t_{i+1} - t_i)$

$\lambda_{i-1}(t)$ คือ ฟังก์ชันอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ ก่อนการบำรุงรักษาครั้งที่ i ในช่วงเวลา $t \in (0, t_i - t_{i-1})$

A_i คือ ตัวประกอบปรับค่าจากการบำรุงรักษาครั้งที่ i

ตัวประกอบปรับค่า (A_i) เป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพของการบำรุงรักษาในแต่ละครั้ง และมีค่ามากขึ้นในการบำรุงรักษาครั้งถัดไป เนื่องจาก ภายหลังการบำรุงรักษา ความรุนแรงของอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวปรับตัวสูงขึ้น แบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว แสดงได้ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 แบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว

ภายหลังการบำรุงรักษาฟังก์ชันอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ ตามการจำลองการบำรุงรักษาด้วยแบบจำลองดังกล่าว สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.8 โดยมีเงื่อนไขดังสมการที่ (3.9)

$$\lambda_i(t) = A_i \lambda_{i-1}(t) = \prod_{k=1}^{i} A_k \lambda_0(t) \tag{3.8}$$

$$A_{i+1} > \alpha_i \quad , A_i > 1 \tag{3.9}$$

โดย $\lambda_0(t)$ คือ ฟังก์ชันอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเริ่มต้นของอุปกรณ์

3.3.2.2 แบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยการลดอายุอุปกรณ์

แนวคิดหลักของแบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยการลดอายุอุปกรณ์ (Age reduction maintenance model) คือ การบำรุงรักษาช่วยฟื้นฟูสภาพอุปกรณ์ให้ดีขึ้น เสมือนอุปกรณ์มีอายุที่ลดลงเทียบกับปัจจุบัน เช่น ปัจจุบันอุปกรณ์ผ่านการใช้งานมาแล้ว 6 ปี แต่ภายหลังการบำรุงรักษาอุปกรณ์มีสภาพเสมือนผ่านการใช้งานมาเพียง 3 ปี เป็นต้น แนวคิดนี้อยู่ภายใต้สมมุติฐานฟังก์ชันอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์เป็นฟังก์ชันเพิ่มตลอดเวลา

หากกำหนดให้ ปัจจุบันอุปกรณ์มีอายุ E_i ปี และการบำรุงรักษาช่วยฟื้นฟูให้อุปกรณ์มีอายุลดลงเป็น $B_i \cdot E_i$ ปี ภายหลังการบำรุงรักษาครั้งที่ i การกระจายตัวฟังก์ชันอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.10)

$$\lambda_i(t) = \lambda_{i-1}(B_i \cdot t_i + t) \quad ,0 < B_i < 1 \tag{3.10}$$

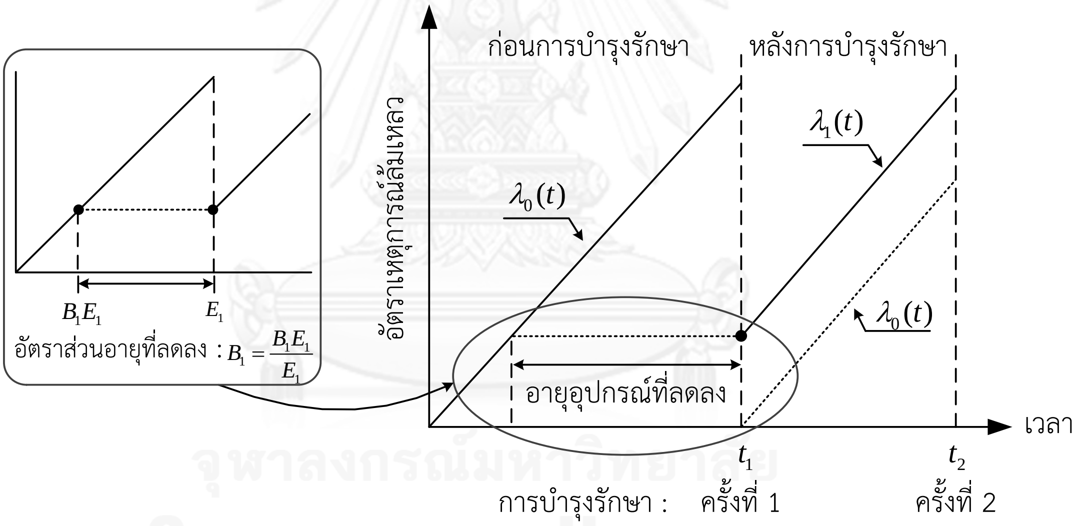
โดย $\lambda_i(t)$ คือ ฟังก์ชันอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ หลังการบำรุงรักษาครั้งที่ i ในช่วงเวลา $t \in (0, t_{i+1} - t_i)$

$\lambda_{i-1}(t)$ คือ ฟังก์ชันอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ ก่อนการบำรุงรักษาครั้งที่ i ในช่วงเวลา $t \in (0, t_i - t_{i-1})$

B_i คือ อัตราส่วนอายุที่ลดลงจากการบำรุงรักษาครั้งที่ i

t_i คือ เวลาการบำรุงรักษาครั้งที่ i

อัตราส่วนอายุที่ลดลง (B_i) เป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพของการบำรุงรักษาในแต่ละครั้ง และมีค่าอยู่ระหว่างศูนย์ถึงหนึ่งเสมอ เนื่องจาก การบำรุงรักษาช่วยฟื้นฟูให้อุปกรณ์มีอายุลดลง ทำให้อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน แบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยการลดอายุอุปกรณ์ แสดงได้ดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 แบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยการลดอายุอุปกรณ์

3.3.2.3 แบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยวิธีผสม

แบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยวิธีผสม (Hybrid maintenance model) เป็นแบบจำลองที่นำข้อดีของแบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวและแบบจำลองการบำรุงการบำรุงรักษาด้วยการลดอายุอุปกรณ์มาผสมผสานกัน โดยแบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยวิธีผสมได้ตั้งสมมุติฐานผลกระทบที่เกิดจากการบำรุงรักษาต่ออัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ที่เกิดขึ้นในระยะยาวและเกิดขึ้นทันที ดังต่อไปนี้

- ผลกระทบระยะยาว : แนวโน้มความรุนแรงของอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว ถูกจำลองด้วยตัวประกอบปรับค่า (A_i)
- ผลกระทบที่เกิดขึ้นทันที : การฟื้นฟูสภาพอุปกรณ์เสมือนมีอายุน้อยลง ถูกจำลองด้วยอัตราส่วนอายุที่ลดลง (B_i)

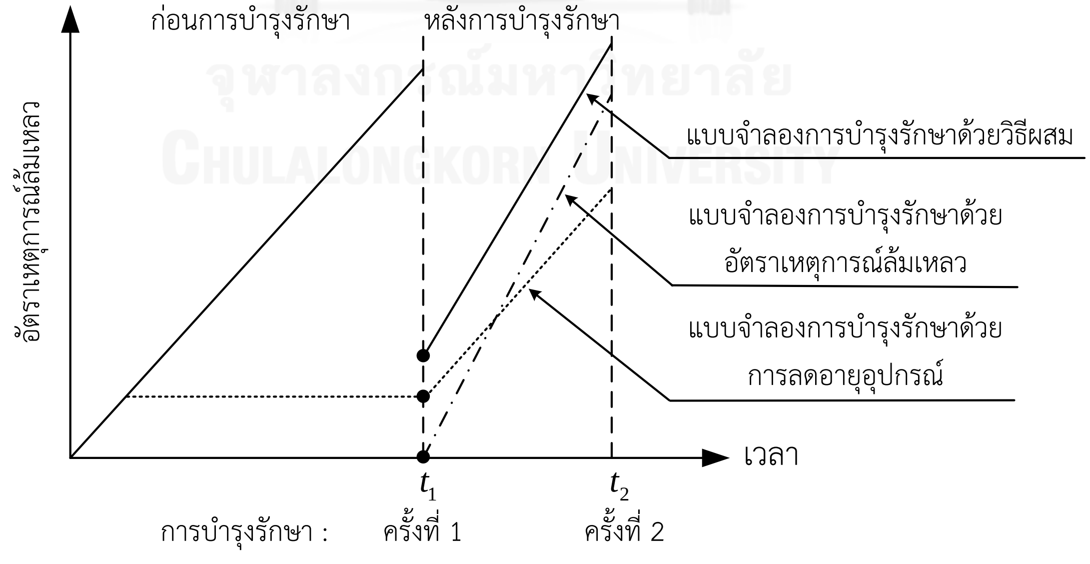
จากสมมุติฐานทั้งสอง ภายหลังการบำรุงรักษาครั้งที่ i การกระจายตัวฟังก์ชันอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.11) และมีเงื่อนไขบังคับดังสมการที่ (3.12) ถึง (3.13) ตามลำดับ

$$\lambda_i(t_i + t) = A_i \cdot \lambda_{i-1}(B_i \cdot t_i + t) \tag{3.11}$$

$$1 < A_1 \le A_2 \le ...A_i \le ... \le A_{N-1} \tag{3.12}$$

$$0 > B_1 \ge B_2 \ge ...B_i \ge ... \ge B_{N-1} < 1 \tag{3.13}$$

ประโยชน์ของแบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยวิธีผสม สามารถรวมข้อดีของแบบจำลองทั้งสองแบบ กล่าวคือ ภายหลังการบำรุงรักษาอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว ณ เวลานั้นจะมีค่าลดลงเสมือนอุปกรณ์ผ่านการใช้งานมาน้อยกว่าความเป็นจริงซึ่งถูกจำลองด้วย $B_i \cdot t_i$ อย่างไรก็ตาม การกระจายของฟังก์ชันอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวหลังจากนั้นมีลักษณะไม่เหมือนเดิมโดยเปลี่ยนเป็น $A_i \cdot \lambda(B_i \cdot t_i)$ ทั้งนี้ เมื่อนำแบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ทั้งสามแบบจำลองมาเปรียบเทียบ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 การเปรียบเทียบแบบจำลองการบำรุงรักษาด้วยอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์

บทที่ 4
การประเมินความเชื่อถือได้ในสถานีไฟฟ้า

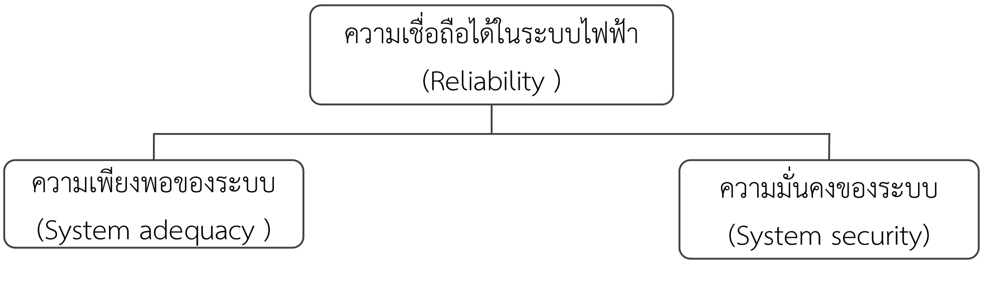
การประเมินความเชื่อถือได้เริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการวางแผนพัฒนาระบบไฟฟ้าในประเทศต่างๆ มากขึ้นรวมทั้งประเทศไทย ปัจจุบันประเทศไทยมีการขยายตัวทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็วทำให้มีความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น จึงต้องมีการปรับปรุงให้ระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เกิดความมั่นใจต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าหรือการลงทุนในภาคอุตสาหกรรม หนึ่งในวิธีการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าที่นิยมใช้ คือ การบำรุงรักษาอุปกรณ์ไฟฟ้า ดังนั้น หากต้องการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ให้เป็นไปอย่างเหมาะสม ด้วยการคำนึงถึงความเชื่อถือได้ จึงจำเป็นต้องทราบถึงวิธีการประเมินความเชื่อถือได้ที่ถูกต้องและแม่นยำเพื่อใช้เป็นดัชนีชี้วัดสำหรับกระบวนการกำหนดแผนการบำรุงรักษาต่อไป

บทนี้ได้อธิบายถึงแนวคิดพื้นฐานตลอดจนขั้นตอนการประเมินความเชื่อถือได้ในสถานีไฟฟ้าซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ (1) แนวคิดพื้นฐานการประเมินความเชื่อถือได้, (2) การประเมินความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้า, (3) ขั้นตอนการประเมินความเชื่อถือได้ในสถานีไฟฟ้า และ (4) ตัวอย่างการประเมินความเชื่อถือได้ในสถานีไฟฟ้า โดยรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 แนวคิดพื้นฐานการประเมินความเชื่อถือได้

สิ่งสำคัญต่อหน่วยงานที่ให้บริการด้านไฟฟ้า คือ การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าให้แก่ผู้ต้องการใช้ไฟฟ้าอย่างมีคุณภาพและความต่อเนื่องของกำลังไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสม ความสามารถที่ระบบไฟฟ้าจะส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้อย่างเพียงพอและมั่นคงนั้น นิยมพิจารณาในรูปของความเชื่อถือได้

ความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้า หมายถึง ความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปยังจุดจำหน่ายไฟฟ้าในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า และเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าจำแนกเป็น 2 ประเภท คือ (1) ความเพียงพอของระบบ (System adequacy) และ (2) ความมั่นคงของระบบ (System security) [20, 29] ดังแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ประเภทความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้า

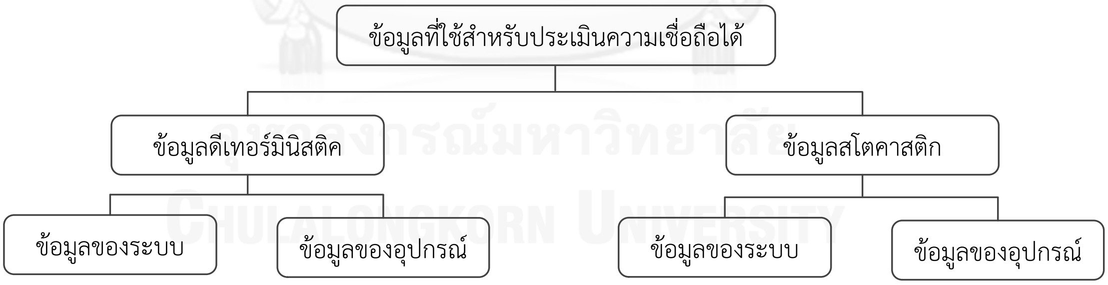
ความเพียงพอของระบบ (System adequacy) หมายถึง ความสามารถของระบบไฟฟ้าที่สามารถส่งผ่านกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าทั้งหมดไปยังจุดจำหน่ายไฟฟ้าในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า โดยอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้ายังคงทำงานได้ภายใต้ค่าพิกัดหรือค่ามาตราฐานที่กำหนด เช่น ระดับแรงดันไฟฟ้า หรือกระแสไฟฟ้าในสายส่ง เป็นต้น การศึกษาความเชื่อถือได้ที่เกี่ยวกับความเพียงพอของระบบ จะเป็นการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในสภาวะอยู่ตัว (Steady-state condition)

ความมั่นคงของระบบ (System security) หมายถึง ความสามารถของระบบไฟฟ้าที่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด เช่น เกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบ หรืออุปกรณ์ในระบบเกิดขัดข้องทันทีทันใดโดยไม่ทราบล่วงหน้า เป็นต้น การศึกษาความเชื่อถือได้ในด้านความมั่นคงของระบบ จะเป็นการวิเคราะห์ในสภาวะพลวัต (Dynamic condition)

นอกจากนี้ การประเมินความเชื่อถือได้ยังตั้งอยู่บนแนวคิดที่สำคัญอีก 2 แนวคิด คือ (1) ข้อมูลที่ใช้สำหรับประเมินความเชื่อถือได้ และ (2) ระดับการประเมินความเชื่อถือได้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.1 ข้อมูลที่ใช้สำหรับประเมินความเชื่อถือได้

การประเมินและการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้า จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลทางสถิติในอดีตเป็นจำนวนมาก ทำให้ต้องอาศัยการจัดการประเภทของข้อมูลอย่างเป็นระบบ ซึ่งสามารถแบ่งประเภทข้อมูลที่ใช้ในการประเมินความเชื่อถือได้ ออกได้เป็น 2 ประเภท ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ประเภทข้อมูลที่ใช้สำหรับประเมินความเชื่อถือได้

ข้อมูลดีเทอร์มินิสติค (Deterministic data) ประกอบไปด้วยข้อมูลของอุปกรณ์ (Component data) และข้อมูลของระบบ (System data) โดยข้อมูลของอุปกรณ์เป็นข้อมูลที่แสดงถึงลักษณะเฉพาะตัว เช่น ค่าอิมพิแดนซ์ ค่าพิกัด หรือ ค่าความนำไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งมักเป็นข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า สำหรับข้อมูลของระบบ เป็นข้อมูลในระดับ

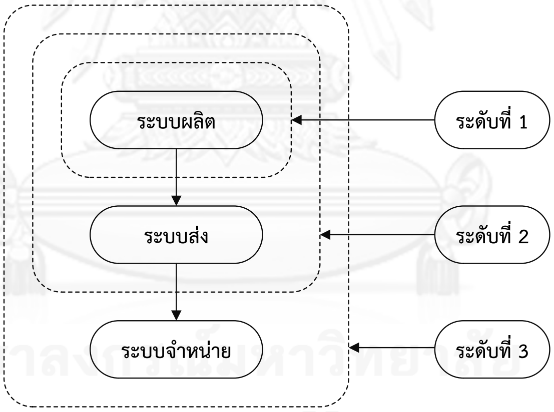
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โครงสร้างของระบบไฟฟ้า เพื่อนำไปใช้อธิบายผลตอบสนองของระบบ หรือวิธีการแก้ไขสถานการณ์ฉุกเฉิน เช่น หากสายส่งไฟฟ้าที่ส่งไปยังจุดโหลดเกิดเหตุกาณ์ล้มเหลวต้องมีการถ่ายโอนจุดโหลดไปยังสายส่งไฟฟ้าเส้นใดแทน เป็นต้น

ข้อมูลสโตคาสติค (Stochastic data) เป็นข้อมูลของตัวแปรสุ่ม (Random variable) สำหรับจำลองพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า ด้วยการนำข้อมูลในอดีตเป็นจำนวนมากมาจำลองผ่านเทคนิคความน่าจะเป็นและสถิติ ข้อมูลสโตคาสติกสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภทเช่นเดียวกัน ข้อมูลของอุปกรณ์ เช่น ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวหรือระยะเวลาการซ่อมแซมอุปกรณ์โดยเฉลี่ย และสำหรับข้อมูลของระบบ เช่น ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวตั้งแต่ 2 อุปกรณ์ขึ้นไป เป็นต้น

4.1.2 ระดับการประเมินความเชื่อถือได้

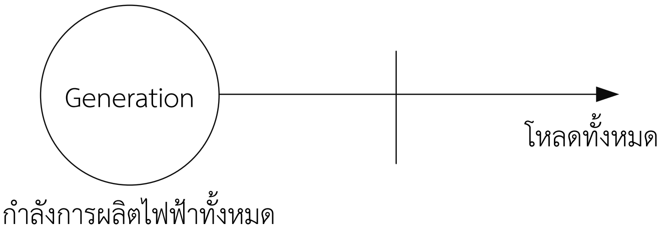
เมื่อพิจารณาโครงสร้างของระบบไฟฟ้าพบว่าสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ (1) ระบบผลิตไฟฟ้า, (2) ระบบส่งไฟฟ้า และ (3) ระบบจำหน่ายไฟฟ้า ดังนั้น การประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าจึงมีแนวคิดที่แบ่งออกเป็น 3 ระดับเช่นกัน แสดงได้ดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ขอบเขตการทำงานพื้นฐานในระบบไฟฟ้า

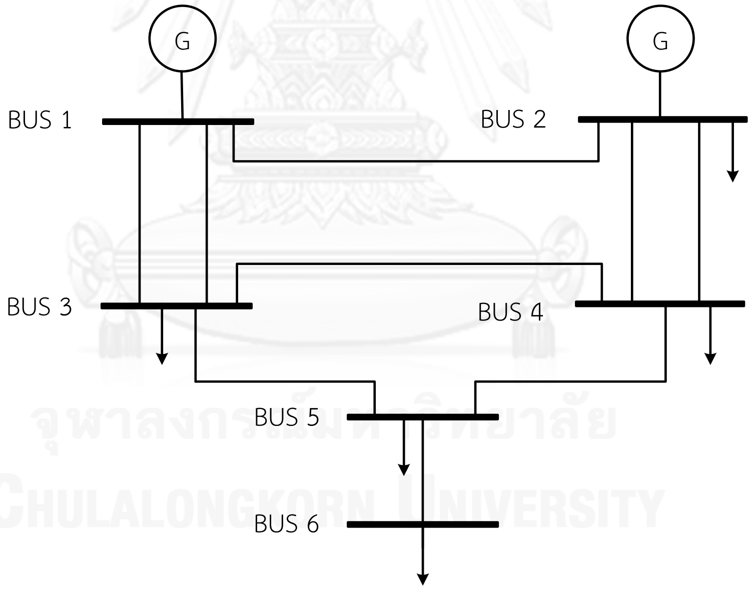
ระดับที่ 1 (Hierarchical level one: HL 1) คือ พิจารณาเฉพาะระบบผลิตไฟฟ้าเพียงระบบเดียว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงความสามารถของระบบผลิตไฟฟ้าที่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า การคำนวณค่าความเชื่อถือได้ของระบบผลิตไฟฟ้าจะคำนึงเหตุการณ์ล้มเหลวในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ซึ่งอาจทำให้กำลังการผลิตโดยรวมของระบบไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าในระบบ โดยแบบจำลองในระดับนี้จะมีรายละเอียดเฉพาะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและความต้องการใช้ไฟฟ้าเท่านั้น (ในที่นี้คือโหลดโดยรวม) แสดงดังภาพที่ 4.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 4.4 แบบจำลองระบบสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ในระดับที่ 1

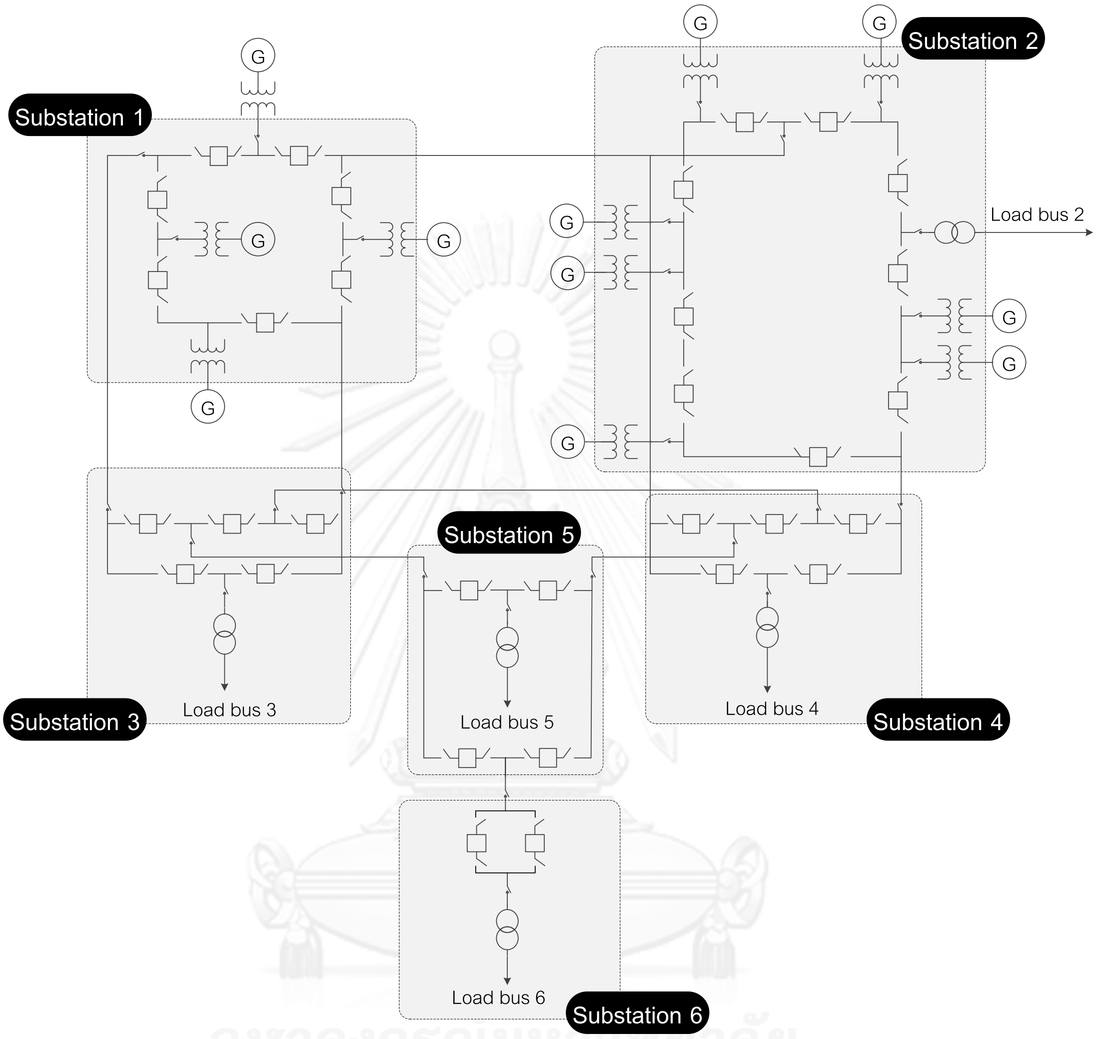
ระดับที่ 2 (Hierarchical level two: HL 2) เป็นการพิจารณารวมระบบผลิตไฟฟ้า และระบบส่งไฟฟ้าเข้าด้วยกัน ซึ่งจะเรียกว่า ระบบไฟฟ้าผสม (Composite system) หรือระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ (Bulk power system) โดยผนวกแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระดับที่ 1 เข้ากับแบบจำลองระบบส่ง หม้อแปลงไฟฟ้า และอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้า จากนั้นใช้เทคนิคการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ระบบสามารถจ่ายให้กับโหลดบัสต่างๆ ในแต่ละสถานะของการเกิดเหตุขัดข้อง ตัวอย่างของระบบทดสอบ Roy Billinton Test System (RBTS) ที่ใช้ประเมินความเชื่อถือได้ในระดับที่ 2 แสดงได้ดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 แบบจำลองของระบบสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ในระดับที่ 2

ระดับที่ 3 (Hierarchical level three: HL 3) เป็นการพิจารณารวมระบบผลิตไฟฟ้า ระบบส่งไฟฟ้า และระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั้งหมดเข้าด้วยกัน ซึ่งหากวิเคราะห์โดยละเอียดจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนมาก ดังนั้น ในทางปฏิบัติจึงวิเคราะห์ในส่วนของระบบจำหน่าย แต่จะนำผลของดัชนีความเชื่อถือได้ที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบ จากการคำนวณในระดับที่ 2 มาใช้วิเคราะห์ร่วมกัน

ตัวอย่างของระบบที่ใช้ในการประเมินความเชื่อถือได้ในระดับที่ 3 ซึ่งแสดงรายละเอียดเพิ่มเติมจากการคำนวณในระดับที่ 2 แสดงได้ดังภาพที่ 4.6

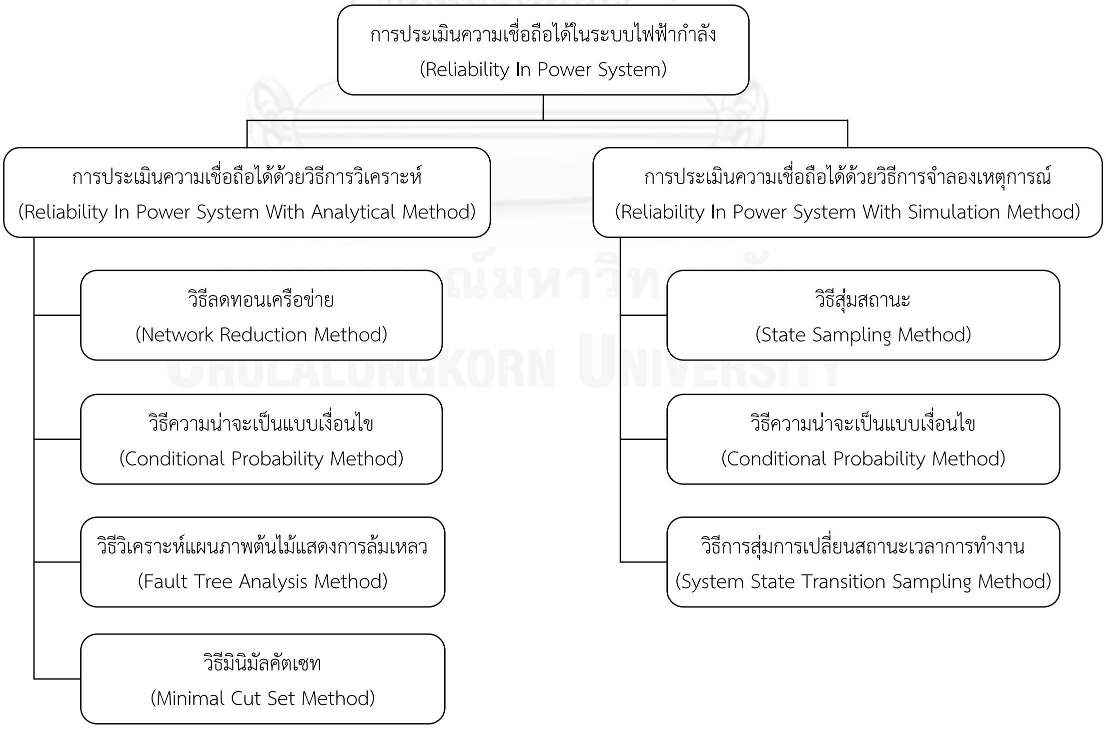


ภาพที่ 4.6 แบบจำลองของระบบสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ในระดับที่ 3

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พิจารณาการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด โดยพิจารณาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า ดังนั้น จึงต้องมีการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าร่วมด้วย สถานีไฟฟ้าเป็นจุดลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้าจากระบบส่งไปสู่ระบบจำหน่ายไฟฟ้า และส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปยังจุดจ่ายไฟฟ้าต่าง จึงถือได้ว่าการประเมินความเชื่อถือได้ดังกล่าวนี้ เป็นการประเมินในระดับที่ 2 และ ระดับที่ 3 ของการประเมินความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้า

4.2 การประเมินความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้า

การประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ (1) วิธีการวิเคราะห์ (Analytical method) และ (2) วิธีการจำลองเหตุการณ์ (Simulation method) ซึ่งในแต่ละวิธีมีข้อดี/ข้อเสียที่แตกต่างกัน วิธีการวิเคราะห์อาศัยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ให้สอดคล้องกับแบบจำลอง ทำให้ผลการคำนวณมีความแม่นยำสูง อย่างไรก็ตาม ผลจากการประเมินความเชื่อถือได้สะท้อนออกมาในแง่ของความพอเพียง กล่าวคือ แสดงถึงความสามารถของระบบไฟฟ้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าทั้งหมดไปยังจุดจำหน่ายไฟฟ้าในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าเท่านั้น ไม่สามารถที่ประเมินถึงพฤติกรรมของระบบไฟฟ้าระหว่างถูกการรบกวน เช่น หากเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้าและทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะหรือไฟกระพริบ เป็นต้น การประเมินความเชื่อได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไม่สามารถที่นำผลกระทบเหล่านี้ไปประกอบการประเมินความเชื่อถือได้ ดังนั้น การประเมินความเชื่อถือได้ด้วยวิธีการจำลองเหตุการณ์แบบวิธีมอนติคาร์โล (Monte carlo method) จึงถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว วิธีการจำลองเหตุการณ์เป็นการจำลองพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งรายละเอียดของการประเมินความเชื่อถือได้ทั้งสองวิธีนี้จะกล่าวในภายหลัง การประเมินความเชื่อถือได้ทั้งสองวิธีสามารถแยกย่อยเป็นวิธีการต่างๆ ได้ดังภาพที่ 4.7 [29]



ภาพที่ 4.7 วิธีการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า

4.2.1 การประเมินความเชื่อถือได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์

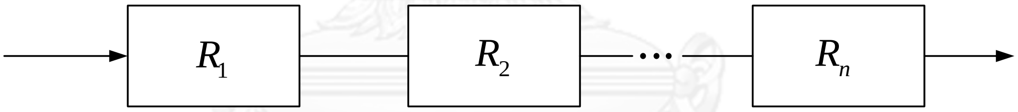
การประเมินความเชื่อถือได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์ (Analytical method) อาศัยแบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์ร่วมกับกระบวนการทางคณิตศาสตร์คำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า การประเมินความเชื่อถือได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์ให้ผลแม่นยำและเหมาะสมกับระบบที่ไม่ซับซ้อนมากนัก สำหรับวิธีการวิเคราะห์ยังประกอบไปด้วยหลายวิธีการย่อย คือ (1) วิธีการลดทอนเครือข่าย, (2) วิธีความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข, (3) วิธีการวิเคราะห์แผนภาพต้นไม้ และ (4) วิธีมินิมัลคัตเซต แต่ละวิธีการมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ [20, 29, 30]

4.2.1.1 วิธีการลดทอนเครือข่าย

ระบบไฟฟ้ามักถูกสร้างขึ้นจากระบบย่อยหรืออุปกรณ์หลายๆ ส่วนมาประกอบกัน ทำให้สามารถจัดเรียงอุปกรณ์ไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบอนุกรมหรือแบบขนานแล้วแต่กรณีไป การจัดเรียงทั้ง 2 รูปแบบนี้มีวิธีการประเมินความเชื่อถือได้ที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

(1) ระบบที่มีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม

ระบบที่มีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม คือ เมื่ออุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวเพียงอุปกรณ์เดียวระบบจะไม่สามารถทำงานได้ การเชื่อมต่อแบบอนุกรมมีรูปแบบการเชื่อมต่อดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 การเชื่อมต่อแบบอนุกรม

การเชื่อมต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าแบบอนุกรมดังภาพที่ 4.8 สามารถคำนวณความเชื่อถือได้ของระบบได้ดังสมการที่ (4.1)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$R_{system} = \prod R = R_1 \times R_2 \times \ldots \times R_n \tag{4.1}$$

โดย R_{system} คือ ความเชื่อถือได้ของระบบ

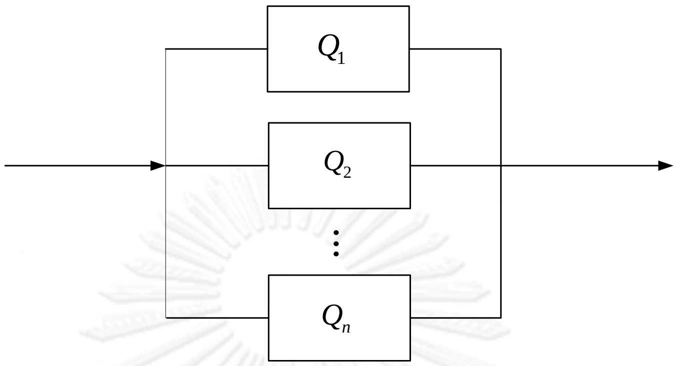
R_n คือ ความเชื่อถือได้ของแต่ละอุปกรณ์

จากสมการที่ (4.1) จะสังเกตได้ว่าความเชื่อถือได้ของระบบจะมีค่าต่ำกว่าหรือมีค่าเท่ากับความเชื่อถือได้ต่ำสุดของอุปกรณ์เสมอ แสดงได้ดังสมการที่ (4.2)

$$R_{system} \le Min(R_1, R_2, \ldots, R_n) \tag{4.2}$$

(2) ระบบที่มีการเชื่อมต่อแบบขนาน

ระบบที่มีการเชื่อมต่อแบบขนาน คือ เมื่ออุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวทุกอุปกรณ์ระบบถึงไม่สามารถทำงานได้ การเชื่อมต่อแบบขนานมีรูปแบบการเชื่อมต่อดังภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 การเชื่อมต่อแบบขนาน

ดังที่กล่าวไปแล้วในข้างต้น หากอุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่งของระบบการเชื่อมต่อแบบขนานเกิดเหตุการณ์ล้มเหลว ระบบยังสามารถทำงานได้แม้เหลือเพียงอุปกรณ์เดียว หรืออีกนัยหนึ่ง ระบบเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวก็ต่อเมื่ออุปกรณ์ทุกอุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว ดังนั้น สามารถคำนวณความน่าจะเป็นที่ระบบเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวได้ดังสมการที่ (4.3)

$$Q_{system} = \prod Q = Q_1 \times Q_2 \times \ldots \times Q_n \tag{4.3}$$

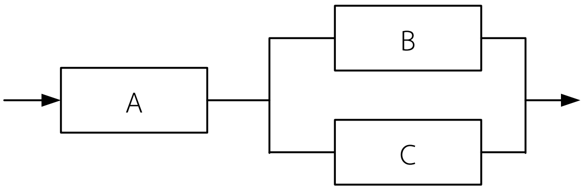
โดย Q_{system} คือ ความน่าจะเป็นที่ระบบเกิดเหตุการณ์ล้มเหลว

Q_n คือ ความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว

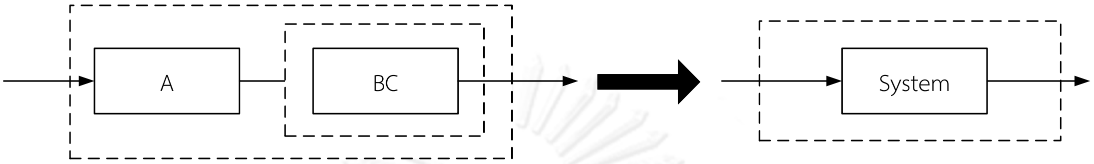
จากสมการที่ (4.3) สามารถหาความเชื่อถือได้ของระบบที่มีการเชื่อมต่ออุปกรณ์แบบขนานดังสมการที่ (4.4)

$$R_{system} = 1 - Q_{system} \tag{4.4}$$

ในกรณีที่ระบบมีความซับซ้อนไม่มากนัก มีรูปแบบการเชื่อมต่อทั้งแบบแบบอนุกรมและแบบขนานผสมกัน สามารถวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ด้วยการลดทอนเครือข่ายได้เช่นกัน ด้วยการยุบรวมการเชื่อมต่อแบบขนาน หลังจากผนวกรวมกับการเชื่อมต่อแบบอนุกรม และคำนวณความเชื่อถือได้ตามปกติ ยกตัวอย่างเช่น ระบบมีการเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังภาพที่ 4.10 (ก) สามารถคำนวณความเชื่อถือได้ของระบบด้วยวิธีการลดทอนดังภาพที่ 4.10 (ข)



(ก) ตัวอย่างการระบบที่มีการเชื่อมต่อแบบอนุกรมและแบบขนาน



R_A $\quad R_{BC} = 1-(Q_B \times Q_C)$ $\quad R_{System} = R_A \times (1-(Q_B \times Q_C))$

(ข) การคำนวณความเชื่อถือของระบบด้วยวิธีการลดทอน

ภาพที่ 4.10 ตัวอย่างการคำนวณความเชื่อถือของระบบที่มีการเชื่อมต่อแบบขนานและอนุกรม

4.2.1.2 วิธีความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข

ระบบไฟฟ้าบางระบบมีรูปการเชื่อมต่อจากระบบย่อยหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าหลายรูปแบบต่อกันทั้งแบบอนุกรม แบบขนาน หรือ มีบางส่วนที่ทับซ้อนกัน ซึ่งหากใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยการลดทอนเครือข่ายอาจทำได้ยาก อย่างไรก็ตาม วิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไขสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ด้วยการใช้ทฤษฎีบทของเบย์ (Bayes’ Theorem) ในการคำนวณความเชื่อได้ของระบบ ดังสมการที่ (4.5)

$$R(system) = P(\text{ ภายใต้เงื่อนไขที่ } 1) \times P(\text{ เงื่อนไขที่ } 1) \times P(\text{ ภายใต้เงื่อนไขที่ } 2) \times P(\text{ เงื่อนไขที่ } 2) \times P(\text{ ภายใต้เงื่อนไขที่ } 3) \times P(\text{ เงื่อนไขที่ } 3) \times ... \quad (4.5)$$

ทั้งนี้ ผลรวมของความน่าจะเป็นในแต่ละเงื่อนไขจะมีค่าเป็น 1 ดังสมการที่ (4.6)

$$P(\text{ เงื่อนไขที่ } 1) + P(\text{ เงื่อนไขที่ } 2) + P(\text{ เงื่อนไขที่ } 3) + \; ... \; = 1 \quad (4.6)$$

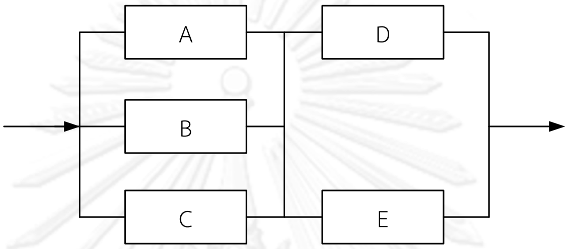
นอกจากนี้ สังเกตได้ว่าอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ามีเงื่อนไขการทำงานอยู่เพียง 2 เงื่อนไข คือ (1) อุปกรณ์สามารถทำงานได้ และ (2) อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว ดังสมการที่ (4.7)

$$R_{system} = R_{system}(\text{ ภายใต้เงื่อนไขที่อุปกรณ์ } X \text{ สามารถทำงานได้}) \cdot R(X) + (R_{system} \text{ ภายใต้เงื่อนไขที่อุปกรณ์ } X \text{ เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว}) \cdot Q(X) \quad (4.7)$$

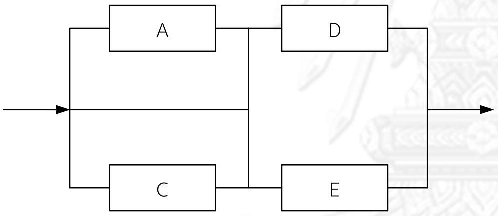
โดย $R(X)$ คือ ความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ X

$Q(X)$ คือ ความน่าจะที่จะเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ X

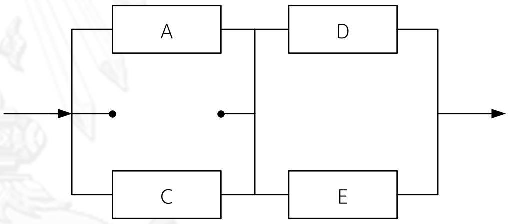
ตัวอย่างเช่น หากระบบไฟฟ้ามีลักษณะการเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังภาพที่ 4.11 (ก) โดยมีการแบกแยกระบบในเงื่อนไขที่อุปกรณ์ B สามารถทำงานได้ แสดงได้ดังภาพที่ 4.11 (ข) และเงื่อนไขที่อุปกรณ์ B เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแสดงดังภาพที่ 4.11 (ค) สามารถคำนวณความเชื่อถือได้ของระบบดังกล่าว ได้ดังสมการที่ (4.8) ถึง (4.11)



(ก) ตัวอย่างระบบที่ใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีความน่าจะเป็น



(ข) อุปกรณ์ B สามารถทำงานได้



(ค) อุปกรณ์ B เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว

ภาพที่ 4.11 ตัวอย่างการคำนวณความเชื่อถือด้วยวิธีเงื่อนไขความน่าจะเป็น

$$R_{system} = R_{system}(\text{ภายใต้เงื่อนไขที่อุปกรณ์ } B \text{ สามารถทำงานได้}) \cdot R(B)$$
$$+(R_{system} \text{ ภายใต้เงื่อนไขที่อุปกรณ์ } B \text{ เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว}) \cdot Q(B) \quad (4.8)$$

เงื่อนไขที่อุปกรณ์ B สามารถทำงานได้ : $R_{system1} = (1 - Q_D \times Q_E)$ (4.9)

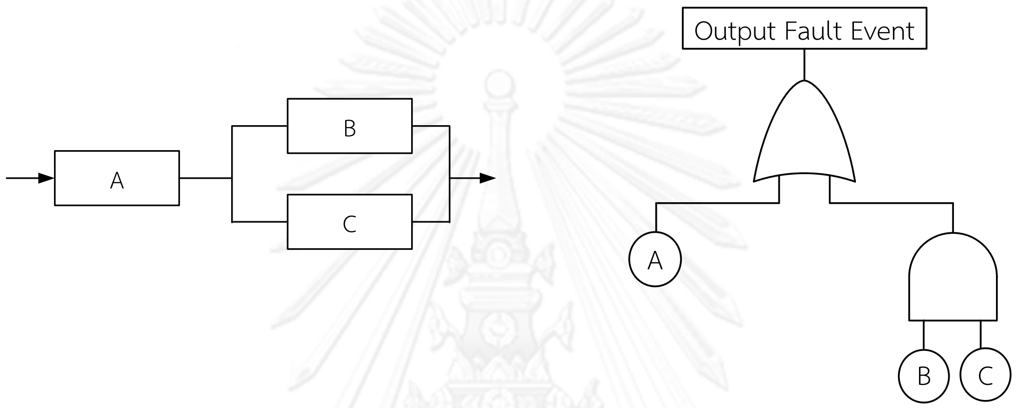
เงื่อนไขที่อุปกรณ์ B เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว : $R_{system2} = (1 - Q_A \times Q_C)(1 - Q_D \times Q_E)$ (4.10)

$$R_{system} = (1 - Q_D \times Q_E)R_B + (1 - Q_A \times Q_C)(1 - Q_D \times Q_E)Q_B \quad (4.11)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2.1.3 วิธีการวิเคราะห์ด้วยแผนภาพต้นไม้

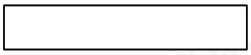
การวิเคราะห์แผนภาพต้นไม้ (Fault tree analysis) อาศัยตัวดำเนินการทางตรรกศาสตร์ (Logic gate) ประยุกต์เข้ากับทฤษฎีความเชื่อถือ โดยมีข้อมูลขาเข้าคือ เหตุการณ์พื้นฐานที่ก่อให้ระบบล้มเหลว (Basic event) และผลลัพธ์ขาออก คือ เหตุการณ์ที่ระบบจะล้มเหลว (Output fault event) และคำนวณความเชื่อถือได้คล้ายกับวิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีลดทอนเครือขาย ตัวอย่างเช่น ระบบมีการเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังภาพที่ 4.12 (ก) สามารถวิเคราะห์แผนภาพต้นไม้ได้ดังภาพที่ 4.12 (ข)

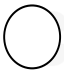


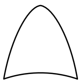
(ก) ระบบตัวอย่าง (ข) การวิเคราะห์แผนภาพต้นไม้

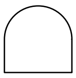
ภาพที่ 4.12 ตัวอย่างการคำนวณความเชื่อถือด้วยวิธีวิเคราะห์แผนภาพต้นไม้

โดยสัญลักษณ์ที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์แผนภาพต้นไม้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

 หมายถึง ผลลัพธ์ที่เกิดเหตุการณ์ระบบจะล้มเหลว

 หมายถึง เหตุการณ์พื้นฐานที่ก่อให้ระบบล้มเหลว

 หมายถึง เกท “OR” ซึ่งมีความหมายโดยนัยว่า “หรือ”

 หมายถึง เกท “AND” ซึ่งมีความหมายโดยนัยว่า “และ”

วิธีนี้มีข้อดีที่สามารถสร้างความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ได้อย่างเป็นระบบ ทำให้วิเคราะห์ความสำคัญของอุปกรณ์ที่มีต่อระบบได้ง่าย และเมื่อนำข้อมูลอุปกรณ์บรรจุในแผนภาพต้นไม้ สามารถที่คำนวณความเชื่อถือได้ทันที แต่ก็มีข้อเสียที่หากระบบซับซ้อนการสร้างแผนภาพต้นไม้อาจทำได้ยาก

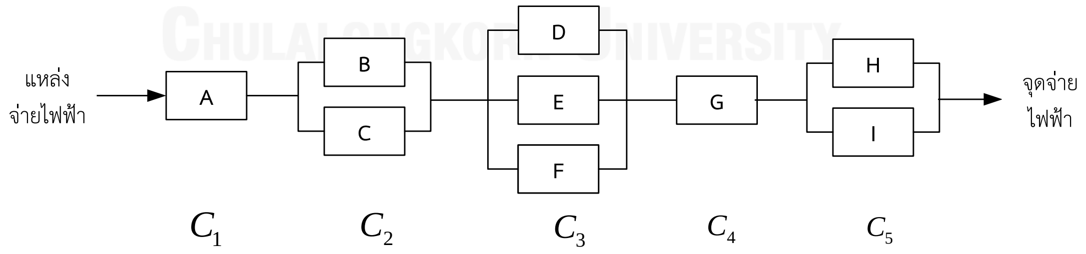
4.2.1.4 วิธีมินิมัลคัตเซต

วิธีมินิคัตเซต (Minimal cut set) เป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า เนื่องจากวิธีการนี้เหมาะสำหรับระบบที่ค่อนข้างซับซ้อน ประกอบกับการคำนวณสามารถประยุกต์ใช้งานกับคอมพิวเตอร์ได้โดยง่ายจึงทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องแม่นยำ สามารถบ่งบอกถึงอุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์ที่มีผลกระทบโดยตรงต่อความเชื่อถือได้ของระบบ ดังนั้น หากทราบถึงอุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์ดังกล่าวย่อมสามารถที่ประเมินความเชื่อถือได้ของระบบได้อย่างถูกต้อง

คัตเซต คือ อุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์ที่เมื่อเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแล้วส่งผลกระทบให้ระบบเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวตามไปด้วย ดังนั้น มินิมัลคัตเซต คือ อุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์ที่เล็กที่สุดที่เมื่อเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแล้วทำให้ระบบล้มเหลวตามไปด้วย หรืออีกนัยหนึ่ง คือ คัตเซทที่เล็กที่สุดนั่นเอง

นอกจากนี้ มินิมัลคัตเซตของระบบสามารถจำลองได้อีก 2 ลักษณะ คือ (1) กลุ่มอุปกรณ์ในมินิมัลคัตเซตมีการเชื่อมต่อแบบขนาน ในกรณีนี้ระบบเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวได้ก็ต่อเมื่ออุปกรณ์ทุกตัวในมินิมัลคัตเซตเกิดเหตุการณ์ล้มเหลว และ (2) กลุ่มอุปกรณ์ในมินิมัลคัตเซตมีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม สำหรับกรณีนี้ถ้าอุปกรณ์เพียงอุปกรณ์เดียวในมินิมัลคัตเซตเกิดเหตุกรณ์ล้มเหลวจะส่งผลให้ระบบเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวตามไปด้วย สังเกตได้ว่าระบบเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวก็ต่อเมื่อคัตเซตที่เชื่อมต่ออนุกรมหรือเชื่อมต่อแบบขนานทั้งหมดเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวพร้อมกัน ดังนั้น ความน่าจะเป็นที่ระบบเกิดเหตุการณ์ล้มเหลว คือ การรวมความน่าจะเป็นที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวของแต่ละมินิคัตเซตในลักษณะของการยูเนียน

ตัวอย่างเช่น ระบบหนึ่ง มีมินิมัลคัตเซต 5 ชุด คือ [A], [B,C], [D,E,F], [G] และ [H,I] ดังภาพที่ 4.13 สามารถคำนวณความน่าจะเป็นที่ระบบจะเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวได้ดังสมการที่ (4.12) ถึง (4.13)



ภาพที่ 4.13 กลุ่มมินิมัลคัตเซตตัวอย่าง

$$Q_{system} = Q(C_1 \cup C_2 \cup C_3 \cup C_4 \cup C_5) \quad (4.12)$$

$$
\begin{aligned}
Q_{system} = {} & Q(C_1)+Q(C_2)+Q(C_3)+Q(C_4)+Q(C_5)-Q(C_1\cap C_2)-Q(C_1\cap C_3) \\
& -Q(C_1\cap C_4)-Q(C_1\cap C_5)-Q(C_2\cap C_3)-Q(C_2\cap C_4)-Q(C_2\cap C_5) \\
& -Q(C_3\cap C_4)-Q(C_3\cap C_5)-Q(C_4\cap C_5)+Q(C_1\cap C_2\cap C_3) \\
& +Q(C_1\cap C_2\cap C_4)+Q(C_1\cap C_2\cap C_5)+Q(C_1\cap C_4\cap C_5) \\
& +Q(C_1\cap C_3\cap C_4)+Q(C_1\cap C_3\cap C_5)+Q(C_2\cap C_3\cap C_4) \\
& +Q(C_2\cap C_3\cap C_5)+Q(C_2\cap C_4\cap C_5)-Q(C_1\cap C_2\cap C_3\cap C_4) \\
& -Q(C_1\cap C_2\cap C_3\cap C_5)-Q(C_1\cap C_3\cap C_4\cap C_5) \\
& -Q(C_2\cap C_3\cap C_4\cap C_5)+Q(C_1\cap C_2\cap C_3\cap C_4\cap C_5)
\end{aligned}
\tag{4.13}
$$

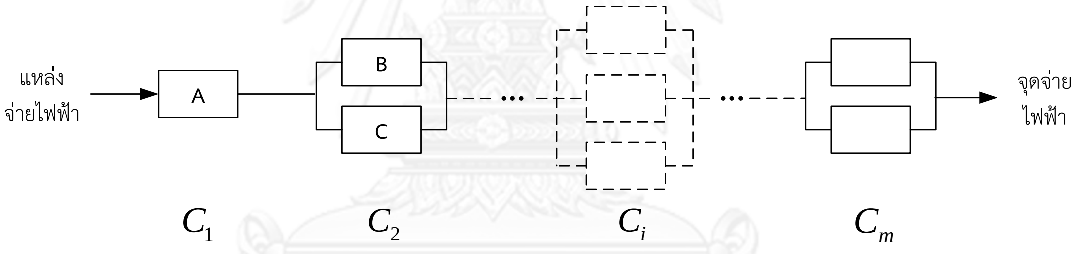
โดยที่

$$
\begin{aligned}
& Q(C_1)=Q_A \\
& Q(C_2)=Q_BQ_C \\
& Q(C_3)=Q_DQ_EQ_F \\
& Q(C_4)=Q_G \\
& Q(C_5)=Q_HQ_I \\
& Q(C_1\cap C_2)=Q(C_1)\cdot Q(C_2)=Q_AQ_BQ_C \\
& Q(C_1\cap C_3)=Q(C_1)\cdot Q(C_3)=Q_AQ_DQ_EQ_F \\
& Q(C_1\cap C_4)=Q(C_1)\cdot Q(C_4)=Q_AQ_G \\
& Q(C_1\cap C_5)=Q(C_1)\cdot Q(C_5)=Q_AQ_HQ_I \\
& Q(C_2\cap C_3)=Q(C_2)\cdot Q(C_3)=Q_BQ_CQ_DQ_EQ_F \\
& Q(C_2\cap C_4)=Q(C_2)\cdot Q(C_4)=Q_BQ_G \\
& Q(C_2\cap C_5)=Q(C_2)\cdot Q(C_5)=Q_BQ_HQ_I \\
& Q(C_3\cap C_4)=Q(C_3)\cdot Q(C_4)=Q_DQ_EQ_FQ_G \\
& Q(C_3\cap C_5)=Q(C_3)\cdot Q(C_5)=Q_DQ_EQ_FQ_HQ_I \\
& Q(C_4\cap C_5)=Q(C_4)\cdot Q(C_5)=Q_GQ_HQ_I \\
& Q(C_4\cap C_5)=Q(C_4)\cdot Q(C_5)=Q_GQ_HQ_I \\
& Q(C_1\cap C_2\cap C_3)=Q(C_1)\cdot Q(C_2)\cdot Q(C_3)=Q_AQ_BQ_CQ_DQ_EQ_F \\
& Q(C_1\cap C_2\cap C_4)=Q(C_1)\cdot Q(C_2)\cdot Q(C_4)=Q_AQ_BQ_CQ_G \\
& Q(C_1\cap C_2\cap C_5)=Q(C_1)\cdot Q(C_2)\cdot Q(C_4)=Q_AQ_BQ_CQ_HQ_I \\
& Q(C_1\cap C_3\cap C_4)=Q(C_1)\cdot Q(C_3)\cdot Q(C_4)=Q_AQ_DQ_EQ_FQ_C \\
& Q(C_1\cap C_3\cap C_5)=Q(C_1)\cdot Q(C_3)\cdot Q(C_5)=Q_AQ_DQ_EQ_FQ_HQ_I \\
& Q(C_1\cap C_4\cap C_5)=Q(C_1)\cdot Q(C_4)\cdot Q(C_5)=Q_AQ_CQ_HQ_I
\end{aligned}
$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$Q(C_1 \cap C_4 \cap C_5) = Q(C_1) \cdot Q(C_4) \cdot Q(C_5) = Q_A Q_C Q_H Q_I$$
$$Q(C_2 \cap C_3 \cap C_4) = Q(C_2) \cdot Q(C_3) \cdot Q(C_4) = Q_B Q_C Q_D Q_E Q_F Q_G$$
$$Q(C_2 \cap C_3 \cap C_5) = Q(C_2) \cdot Q(C_3) \cdot Q(C_5) = Q_B Q_C Q_D Q_E Q_F Q_H Q_I$$
$$Q(C_2 \cap C_4 \cap C_5) = Q(C_2) \cdot Q(C_4) \cdot Q(C_5) = Q_B Q_C Q_G Q_H Q_I$$
$$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap C_4) = Q(C_1) \cdot Q(C_2) \cdot Q(C_3) \cdot Q(C_4) = Q_A Q_B Q_C Q_D Q_E Q_F Q_G$$
$$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap C_5) = Q(C_1) \cdot Q(C_2) \cdot Q(C_3) \cdot Q(C_5) = Q_A Q_B Q_C Q_D Q_E Q_F Q_H Q_I$$
$$Q(C_1 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_5) = Q(C_1) \cdot Q(C_3) \cdot Q(C_4) \cdot Q(C_5) = Q_A Q_D Q_E Q_F Q_G Q_H Q_I$$
$$Q(C_2 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_5) = Q(C_2) \cdot Q(C_3) \cdot Q(C_4) \cdot Q(C_5) = Q_B Q_C Q_D Q_E Q_F Q_G Q_H Q_I$$
$$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_5) = Q(C_1) \cdot Q(C_2) \cdot Q(C_3) \cdot Q(C_4) \cdot Q(C_5)$$
$$= Q_A Q_B Q_C Q_D Q_E Q_F Q_G Q_H Q_I$$

จากตัวอย่างข้างต้น สามารถสรุปการคำนวณความน่าจะเป็นที่ระบบเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวได้ดังสมการที่ (4.14) โดยการกำหนดให้ระบบมีมินิมัลคัตเซต ดังภาพที่ 4.14 และ $C_1, C_2, C_3, \ldots, C_m$ คือ มินิมัลคัตเซตที่ 1, 2, 3, ... , m ตามลำดับ



ภาพที่ 4.14 กลุ่มมินิมัลคัตเซต

$$\begin{aligned} Q_{system} &= [Q(C_1) + Q(C_2) + \ldots + Q(C_m)] - [Q(C_1 \cap C_2) + \ldots + Q(C_i \underset{i \neq j}{\cap} C_j)] \\ &+ [Q(C_1 \cap C_2 \cap C_3) + \ldots + Q(C_i \cap \underset{i \neq j \neq k}{C_j} \cap C_k)] \\ &+ \ldots (-1)^{m-1}[Q(C_1 \cap C_2 \cap \ldots \cap C_m)] \end{aligned} \quad (4.14)$$

จากสมการที่ (4.14) เห็นได้ว่าหากระบบมีกลุ่มมินิคัตเซตและอุปกรณ์ที่มากจะทำให้มีความยุ่งยากในการคำนวณ อย่างไรก็ตาม ความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวของแต่ละอุปกรณ์มีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ หากนำความน่าจะเป็นดังกล่าวมาคูณกันหลายพจน์ผลลัพธ์ที่ได้จะมีค่าความน่าจะเป็นน้อยมาก ดังนั้น จึงสามารถละเลยพจน์ดังกล่าวได้ และสามารถประมาณความน่าจะเป็นที่ระบบจะเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวได้ดังสมการที่ (4.15)

$$Q_{system} = Q(C_1) + Q(C_2) + ... + Q(C_m) = \sum_{i=1}^{m} Q_i \tag{4.15}$$

มินิมัลคัตเซตของระบบไฟฟ้า สามารถแบ่งได้ 2 ประเภทตามประเภทเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ ดังต่อไปนี้

(1) **มินิมัลคัตเซตสำหรับเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอคทีฟ** หมายถึง การที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์การล้มเหลวแล้วทำให้อุปกรณ์ป้องกันที่อยู่ใกล้เคียงกับอุปกรณ์ที่ล้มเหลวทำงาน จึงส่งผลให้ระบบไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังจุดโหลดได้

(2) **มินิมัลคัตเซตสำหรับเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ** หมายถึง การที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์การล้มเหลวแล้วส่งผลให้ระบบไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ โดยไม่ได้เกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน แต่เกิดจากอุปกรณ์ตัวที่ล้มเหลวเอง

ทั้งนี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พิจารณามินิมัลคัตเซตสำหรับเหตุการณ์ล้มเหลวทั้งแบบแอคทีพและแบบพาสซีฟ เพื่อจำลองผลกระทบที่เกิดกับโครงสร้างการทำงานในสถานีไฟฟ้า ภายใต้การบำรุงรักษาอุปกรณ์ และนำผลของมินิมัลคัตเซตไปประเมินความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าต่อไป สำหรับเหตุผลและสมมุติฐานของการจำลองกลุ่มมินิมัลคัตเซตภายใต้การบำรุงรักษา จะกล่าวโดยละเอียดในบทที่ 6

4.2.2 การประเมินความเชื่อถือได้ด้วยวิธีการจำลองเหตุการณ์

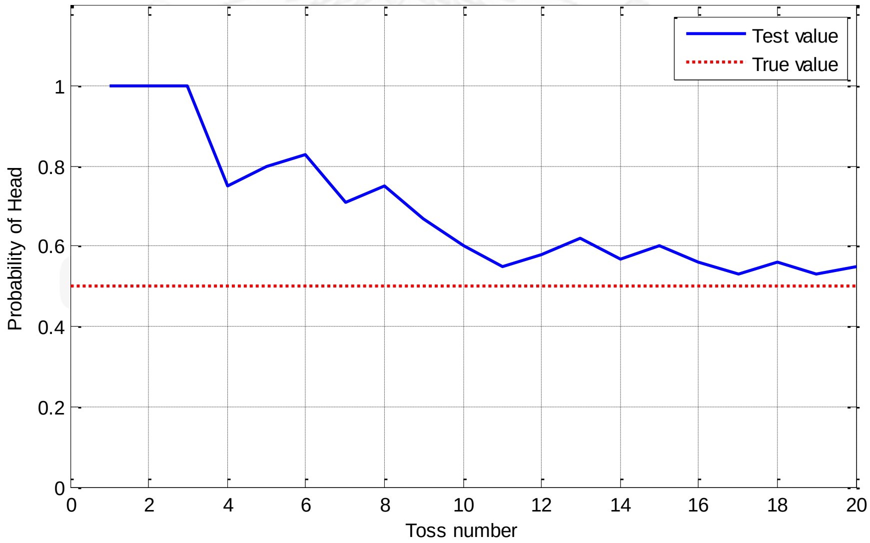
การประเมินความเชื่อถือได้ด้วยวิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล (Monte carlo simulation) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการประเมินความเชื่อถือได้อีกวิธีหนึ่ง แม้ว่าต้องใช้เวลาในการคำนวณยาวนานและมีความยุ่งยากซับซ้อน แต่สามารถจัดการกับปัญหาที่มีความซับซ้อนได้ดี การจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล อาศัยกระบวนการสุ่มตัวเลขเพื่อแสดงเหตุการณ์ที่สนใจผ่านข้อมูลเชิงสถิติ และด้วยพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นกระบวนการสุ่ม ดังนั้น จึงสามารถเลียนแบบพฤติกรรมการทำงานผ่านการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบและคาดการณ์พฤติกรรมอุปกรณ์ภายในระยะเวลาที่ได้จำลองขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองมักออกมาในรูปของความถี่หรือการกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่สนใจ และสามารถประมาณออกมาในรูปของค่าเฉลี่ยได้

เพื่อความเข้าใจที่ง่ายขึ้น จึงยกตัวอย่างกรณีความน่าจะเป็นของการโยนเหรียญ เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าความน่าจะเป็นที่เหรียญออกหัวและออกก้อยเท่ากันคือ 0.5 เมื่อจำลองเหตุการณ์ด้วยการโยนเหรียญภายใต้สภาพแวดล้อมเดียวกันไป 20 ครั้ง พบว่าความน่าจะเป็นที่เหรียญออกหัวและออกก้อยมีค่าดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลด้วยการโยนเหรียญ

ครั้งที่	ด้านเหรียญที่ออก	ความน่าจะเป็น	
		หัว	ก้อย
1	หัว	1	0
2	หัว	1	0
3	หัว	1	0
4	ก้อย	0.75	0.25
5	หัว	0.80	0.20
6	หัว	0.83	0.17
7	ก้อย	0.71	0.29
8	หัว	0.75	0.25
9	ก้อย	0.67	0.33
10	ก้อย	0.60	0.40
11	ก้อย	0.55	0.45
12	หัว	0.58	0.42
13	หัว	0.62	0.38
14	ก้อย	0.57	0.43
15	หัว	0.60	0.40
16	ก้อย	0.56	0.44
17	ก้อย	0.53	0.47
18	หัว	0.56	0.44
19	ก้อย	0.53	0.47
20	หัว	0.55	0.45

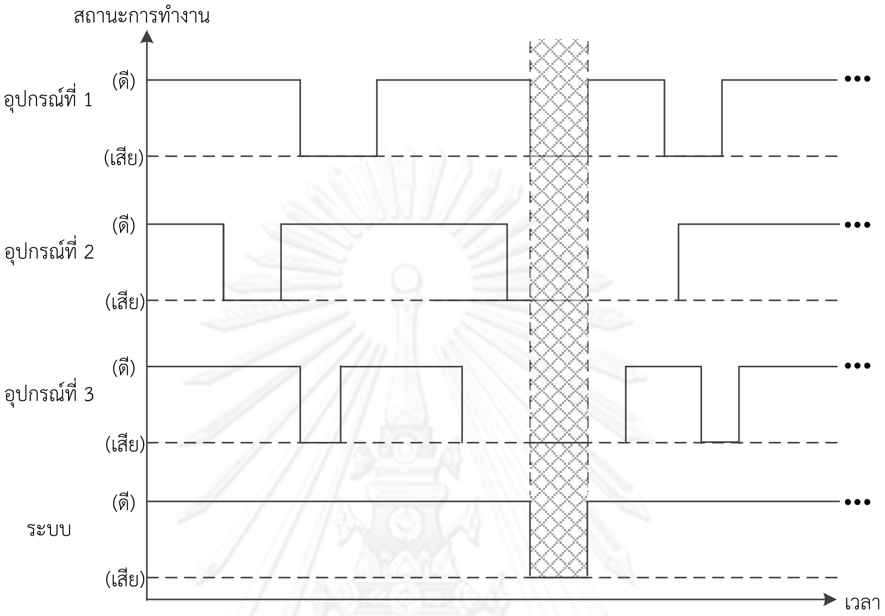
เมื่อนำความน่าจะเป็นที่เหรียญออกหัวจากการโยนเหรียญ 20 ครั้ง มาแสดงเป็นกราฟดังภาพที่ 4.15 พบว่า ความน่าจะเป็นที่เหรียญออกหัวมีแนวโน้มเป็น 0.5 ดังนั้น ด้วยสมมุติฐานนี้หากทดลองโยนเหรียญไปเรื่อยๆ สภาพแวดล้อมเดียวกัน ความน่าจะเป็นที่เหรียญออกหัวย่อมมีค่าเป็น 0.5 ซึ่งมีค่าเท่ากับธรรมชาติของเหรียญที่มีโอกาสออกหัวและออกก้อยอย่างละเท่ากัน



ภาพที่ 4.15 ความน่าจะเป็นที่เหรียญออกหัวจากการโยนเหรียญ 20 ครั้ง

สำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ด้วยการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล มีลักษณะการทำงานด้วยการสุ่มพฤติกรรมการทำงานตามการกระจายตัวของอุปกรณ์ และพิจารณาเหตุการณ์

ล้มเหลวของอุปกรณ์ในแต่ละครั้งว่ามีผลกระทบต่อระบบหรือไม่อย่างไร หลังจากนั้นจึงคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ต่างๆ เช่น จำนวนครั้งที่เกิดการล้มเหลว ช่วงเวลาขณะเกิดการล้มเหลว และช่วงเวลาในการซ่อมแซม เป็นต้น ดังภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.16 การจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล

การสุ่มพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์จะถูกทำซ้ำๆ จนกว่าค่าดัชนีความเชื่อถือได้อยู่ในสภาวะอยู่ตัว การสุ่มพฤติกรรมการทำงานของการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลสามารถแบ่งได้ 3 รูปแบบ คือ (1) การสุ่มสถานะ, (2) การสุ่มช่วงเวลาการทำงาน และ (3) การสุ่มการเปลี่ยนสถานะของระบบ

ทั้งนี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่ได้นำเสนอรายละเอียดขั้นตอนการประเมินความเชื่อถือได้ด้วยวิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลในแต่ละรูปแบบ เนื่องจากแบบจำลองที่ใช้ในปัจจุบันมีโครงสร้างการประเมินความเชื่อถือได้ไม่เหมาะสมกับวิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล การกำหนดแผนการบำรุงรักษาต้องอยู่ภายใต้สมมุติฐานอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้นตลอดเวลา แต่การจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลต้องจำลองพฤติกรรมอุปกรณ์ภายใต้สภาวะเดียวกันจนสิ้นสุดการจำลอง กล่าวคือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ต้องมีค่าคงที่ตลอดเวลาการจำลอง อย่างไรก็ตาม หากต้องการประเมินความเชื่อถือได้ด้วยวิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลก็สามารถทำได้ ด้วยการเฉลี่ยอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวออกเป็นช่วงให้มีลักษณะคงที่แล้วจึงจำลองเหตุการณ์ แต่หากทำตามวิธีนี้ต้องใช้เวลาในการคำนวณนานมาก

4.2.3 การคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้

ระดับความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าสามารถประเมินได้ด้วยค่าดัชนีต่างๆ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่ต้องการใช้งาน ดัชนีที่นิยมใช้สำหรับประเมินความเชื่อถือได้ ประกอบด้วย ดัชนี SAIFI ดัชนี SAIDI และดัชนี ENS ซึ่งแต่ละดัชนีมีความหมายและการคำนวณดังต่อไปนี้

4.2.3.1 ค่าดัชนี SAIFI

ค่าดัชนี SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) คือ ค่าดัชนีที่บ่งบอกถึงจำนวนครั้งที่ผู้ใช้ไฟฟ้าเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวในระบบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งระบบ ตามระยะช่วงเวลาที่พิจารณา สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.16)

$$SAIFI = \frac{\text{ผลรวมของจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว}}{\text{จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมด}} = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i} \tag{4.16}$$

โดย λ_i คือ อัตราการเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบที่ i (ครั้ง/ปี)

N_i คือ จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าของระบบที่ i

4.2.3.2 ค่าดัชนี SAIDI

ค่าดัชนี SAIDI (System Average Interruption Duration Index) คือ ค่าดัชนีที่แสดงระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวของระบบโดยเฉลี่ยที่กระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งระบบ ในระยะช่วงเวลาที่พิจารณา สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.17)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$SAIDI = \frac{\text{ผลรวมของระยะเวลาที่ผู้ใช้ไฟฟ้าที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว}}{\text{จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมด}} = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i} \tag{4.17}$$

โดย U_i คือ ระยะเวลาเฉลี่ยที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวของผู้ใช้ไฟฟ้าของระบบที่ i (ชั่วโมง/ปี)

N_i คือ จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าของระบบที่ i

4.2.3.3 ค่าดัชนี ENS

ค่าดัชนี ENS (Energy Not Supplied) คือ ค่าดัชนีที่บ่งบอกถึงค่าพลังงานไฟฟ้าที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายไฟฟ้า สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.18)

$$ENS = \text{พลังงานไฟฟ้าที่ไม่ได้รับการจ่ายจากระบบผลิตไฟฟ้า} = \sum L_{a(i)} U_i \qquad (4.18)$$

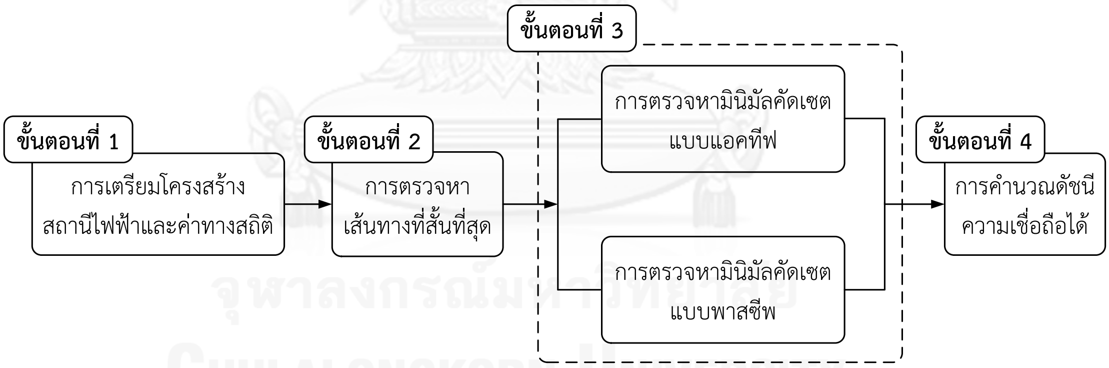
โดย $L_{a(i)}$ คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ต่ออยู่กับจุดจ่ายไฟฟ้าของระบบที่ i (MW)

U_i คือ ระยะเวลาเฉลี่ยที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวของผู้ใช้ไฟฟ้าของระบบที่ i (ชั่วโมง/ปี)

4.3 ขั้นตอนการประเมินความเชื่อถือได้ในสถานีไฟฟ้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้การประเมินความเชื่อถือได้ในสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีมินิมัลคัตเซตตามเหตุผลที่กล่าวไปแล้วข้างต้น จากการศึกษาหลักการและแนวคิดการประเมินความเชื่อถือได้ด้วยวิธีดังกล่าวตามที่นำเสนอในหัวข้อที่ 4.2.1.4 พบว่า ส่วนที่สำคัญที่สุดของการประเมินความเชื่อถือได้ คือ การตรวจหาอุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์ที่หากเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแล้วไม่สามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปยังจุดโหลดได้ หรือการตรวจหามินิมัลคัตเซต ต้องมีความถูกต้องและแม่นยำ เพื่อส่งผลให้การคำนวณความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้ามีความแม่นยำตามไปด้วย

ดังนั้น หัวข้อนี้จึงนำเสนอขั้นตอนการประเมินความเชื่อถือในสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีมินิมัลคัตเซต เริ่มตั้งแต่การเตรียมโครงสร้างสถานีไฟฟ้าตลอดจนการคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนหลัก 4 ขั้นตอน ดังภาพที่ 4.17 [19, 31]



ภาพที่ 4.17 ขั้นตอนหลักของการประเมินความเชื่อถือได้ในสถานีไฟฟ้าด้วยมินิมัลคัตเซต

4.3.1 การเตรียมโครงสร้างสถานีไฟฟ้าและค่าทางสถิติ

โครงสร้างสถานีไฟฟ้าถูกจัดเตรียมในรูปแบบของสาขา (Branch) และข้อมูลในแต่ละสาขาต้องประกอบไปด้วยโนดผู้ส่ง (Sending node) โนดผู้รับ (Receiving node) และอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่ออนุกรมอยู่ระหว่างโนด พร้อมทั้งระบุทิศทางการส่งกำลังไฟฟ้าในแต่ละสาขาด้วย ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การจัดเตรียมข้อมูลโครงสร้างของสถานีไฟฟ้า

สาขา	โนดผู้ส่ง	โนดผู้รับ	อุปกรณ์ไฟฟ้าระหว่างโหนด	ทิศทางการส่งพลังงานไฟฟ้า
...	...	...	...	...
k	a	b	สายไฟฟ้า, เซอร์กิตเบรกเกอร์, หม้อแปลงไฟฟ้า, หรือ บัสบาร์	ส่งพลังงานไฟฟ้าจากโหนดอะไรไปโหนดอะไร หรือ ทั้งสองทิศทาง
...	...	...	...	...

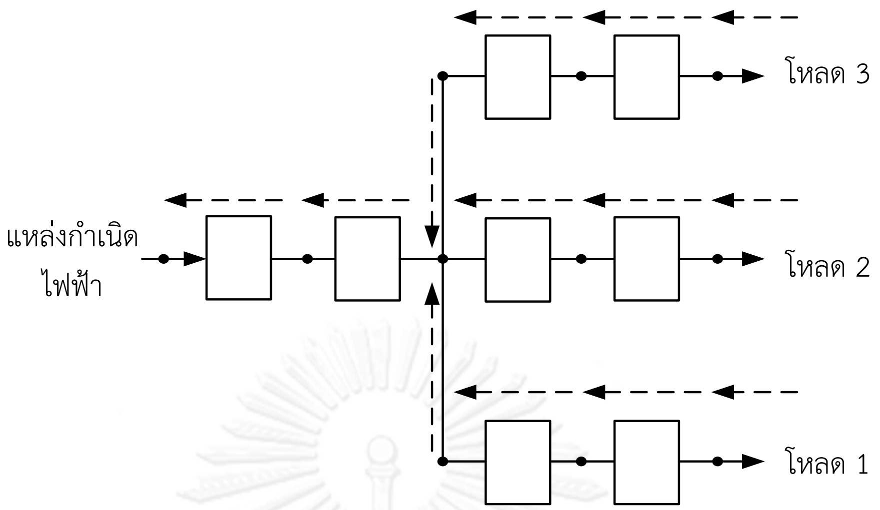
อุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละชนิดต้องมีค่าทางสถิติ 4 ค่า ดังต่อไปนี้ (1) พารามิเตอร์บ่งบอกการจายตัวของอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว (Failure rate), (2) ระยะเวลาซ่อมแซม (Repair time), (3) ระยะเวลาสวิตซ์ชิ่ง (Switching time) และ (4) ระยะเวลาการบำรุงรักษา (Maintenance time)

4.3.2 การตรวจหาเส้นทางที่สั้นที่สุด

เส้นทางที่สั้นที่สุด (Minimal path set) ของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า คือ เส้นทางที่สั้นที่สุดที่อุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์เชื่อมต่อกันจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังจุดโหลดหรือจุดจ่ายไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพิจารณาผลกระทบของระบบไฟฟ้าหากอุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว การตรวจหาเส้นทางที่สั้นที่สุดสามารถตรวจหาได้หลายวิธี แต่วิธีการที่นิยมมากที่สุด คือ วิธีผู้มาก่อนของสาขา

หลักการพื้นฐานของวิธีผู้มาก่อนของสาขา (Predecessor of branch) คือ พิจารณาสาขา (Branch) ที่มีการส่งกำลังไฟฟ้าถัดไปทีละสาขา ในลักษณะย้อนกลับจากจุดโหลดไปยังแหล่งกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจาก กรณีที่ระบบมีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหลายแหล่ง วิธีการนี้ทำให้ทราบถึงเส้นทางการส่งกำลังไฟฟ้าที่สั้นที่สุดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแต่ละแหล่งที่ส่งมายังจุดโหลดได้อย่างครบถ้วน หากดำเนินการตรวจหาเส้นทางที่สั้นสุดตามกระบวนการดังกล่าวนี้ทีละจุดโหลดจนครบทุกจุดโหลด ก็จะทราบถึงเส้นทางการส่งกำลังไฟฟ้าที่สั้นที่สุดที่เป็นไปได้ทั้งหมดของระบบ หลังจากนั้นจึงพิจารณาอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อนุกรมอยู่ในสาขาที่เป็นเส้นทางการส่งกำลังไฟฟ้า เมื่อสิ้นสุดกระบวนการก็ทราบถึงเส้นทางที่สั้นที่สุดของอุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการเชื่อมต่อกันจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังแต่ละจุดโหลดที่เป็นไปได้ทั้งหมด นอกจากนี้ วิธีการดังกล่าวมีข้อดีที่เพียงทราบแค่สาขาของระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ที่อยู่ต้นทางและปลายทาง (ในที่นี้คือแหล่งกำเนิดไฟฟ้าและจุดโหลด) ไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ในสาขาก็สามารถคำนวณเส้นทางที่สั้นที่สุดได้ จึงทำให้ไม่ยุ่งยากต่อการคำนวณ การตรวจหาเส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยวิธีผู้มาก่อนของสาขาแสดงได้ดังภาพที่ 4.18

ด้วยเหตุผลดังกล่าว วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้การตรวจหาเส้นทางการส่งกำลังไฟฟ้าที่สั้นที่สุดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังจุดโหลดด้วยวิธีผู้มาก่อนของสาขาในบริบทของสถานีไฟฟ้า เพื่อตรวจหามินิมัลคัตเซตในขั้นตอนถัดไป



ภาพที่ 4.18 การตรวจหาเส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยวิธีผู้มาก่อนของสาขา

การตรวจหาเส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยวิธีผู้มาก่อนของสาขา ยังประกอบไปด้วยขั้นตอนย่อยอีก 3 ขั้นตอน คือ (1) การจำลองโครงสร้างระบบขึ้นใหม่, (2) การจัดทำตารางผู้มาก่อนของสาขา และ (3) การแปลงสาขาที่จำลองขึ้นให้เป็นสาขาเดิมและใส่ข้อมูลอุปกรณ์ในแต่ละสาขา โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

<u>ขั้นตอนที่ 1</u> การจำลองโครงสร้างระบบขึ้นใหม่

เพื่อให้การดำเนินการตามวิธีผู้มาก่อนของสาขาเป็นไปโดยง่าย จึงจำเป็นต้องจำลองข้อมูลโครงสร้างของระบบขึ้นใหม่ ตามประเภทข้อมูลของระบบให้ชัดเจนขึ้น ดังต่อไปนี้

(1) สาขาที่จำลองขึ้นใหม่ (New branch)

(2) สาขาเดิม (Original branch)

(3) โนดผู้ส่ง (Sending node)

(4) โนดผู้รับ (Receiving node)

(5) ข้อมูลของแต่ละสาขา (Comment of branch)

นอกจากนี้ กำหนดให้โนดแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Source) มีเครื่องหมายเป็น -1 และโนดที่สนใจหรือโนดของจุดโหลด (Node output) มีเครื่องหมายเป็น 0 ตามลำดับ ข้อมูลโครงสร้างของระบบที่จำลองขึ้นใหม่ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.3

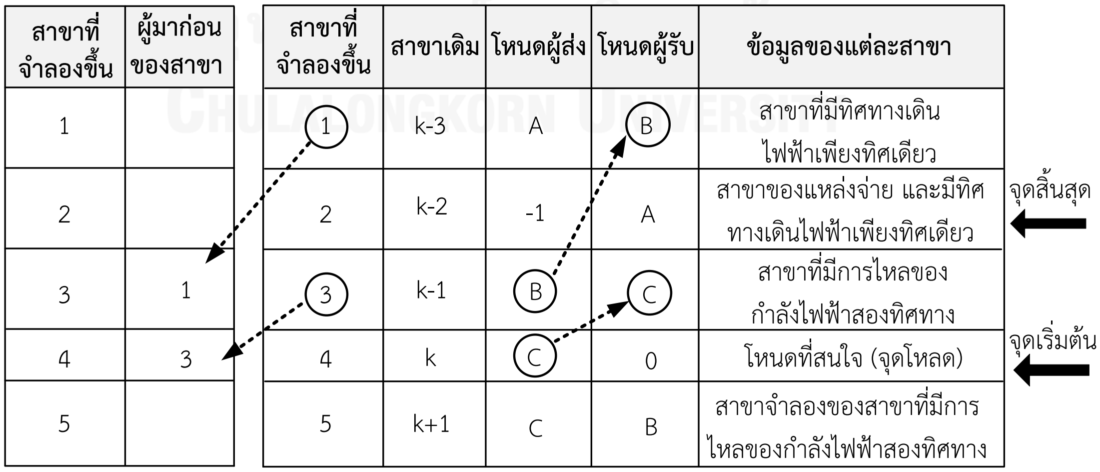
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลโครงสร้างของระบบที่จำลองขึ้นใหม่

สาขาที่จำลองขึ้นใหม่	สาขาเดิม	โนดผู้ส่ง	โนดผู้รับ	ข้อมูลของแต่ละสาขา
1				สาขาที่มีทิศทางเดินไฟฟ้าเพียงทิศเดียว
…				สาขาของแหล่งจ่าย และมีทิศทางเดินไฟฟ้าเพียงทิศเดียว
…				สาขาที่มีการไหลของกำลังไฟฟ้าสองทิศทาง
…				โนดที่สนใจ (จุดโหลด)
n				สาขาจำลองของสาขาที่มีการไหลของกำลังไฟฟ้าสองทิศทาง

นำโครงสร้างของระบบเดิมมา จำลองเป็นสาขาใหม่ตามข้อมูล

__**ขั้นตอนที่ 2**__ การจัดทำตารางผู้มาก่อนของสาขา

หลักการของการจัดทำตารางผู้มาก่อนของสาขา (Array of predecessors) คือ พิจารณาสาขาที่ละสาขาเริ่มจากจุดโหลดไปยังแหล่งกำเนิดไฟฟ้า และตรวจหาผู้มาก่อนของสาขาที่พิจารณาอยู่ ผู้มาก่อนของสาขาที่ k หมายถึง สาขาที่มีโนดผู้รับเป็นโนดผู้ส่งของสาขาที่ k นั่นคือ เป็นการตรวจหาสาขาก่อนหน้าสาขาที่พิจารณาว่าเป็นสาขาใด โดยเริ่มต้นจากสาขาของโหลดหลังจากนั้นก็ตรวจหาสาขาที่มาก่อนหน้าสาขาที่พิจารณาไปเรื่อยๆ จนสิ้นสุดที่สาขาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อสิ้นสุดกระบวนการจะทำให้รู้สาขาที่เชื่อมต่อกันจากจุดโหลดไปยังแหล่งกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดหรือเส้นทางที่สั้นที่สุดนั่นเอง การจัดทำตารางผู้มาก่อนของสาขาแสดงได้ดังภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.19 การจัดทำตารางผู้มาก่อนของสาขา

การจัดทำตารางการหาผู้มาก่อนของสาขามีข้อเงื่อนไขยกเว้น คือ สาขาที่มีทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าได้สองทิศทาง และสาขาจำลองของการไหลกำลังไฟฟ้าสองทิศทางต้องไม่อยู่ในตำแหน่งเดียวกันหรือแถวเดียวกัน เพราะสาขาทั้งสองถือเป็นเส้นทางเดียวกันเพียงแต่มีการไหลของกำลังไฟฟ้าได้สองทิศทางเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ต้องตรวจสอบด้วยว่าเส้นทางทั้งหมดที่ได้จากคำนวณเป็นเส้นทางที่ซ้ำกันหรือเป็นวงวนหรือไม่ หากตรวจพบให้ละเลยเส้นทางเหล่านั้น

ขั้นตอนที่ 3 การแปลงสาขาที่จำลองขึ้นให้เป็นสาขาเดิมและใส่ข้อมูลอุปกรณ์ในแต่ละสาขา

เส้นทางที่สั้นที่สุดที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 2 ยังอยู่ในรูปของสาขาที่จำลองขึ้น ดังนั้น จึงต้องเปลี่ยนสาขาที่จำลองขึ้นให้เป็นสาขาดั้งเดิมของระบบ และบรรจุข้อมูลของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่แต่ละสาขาดังกล่าวด้วย

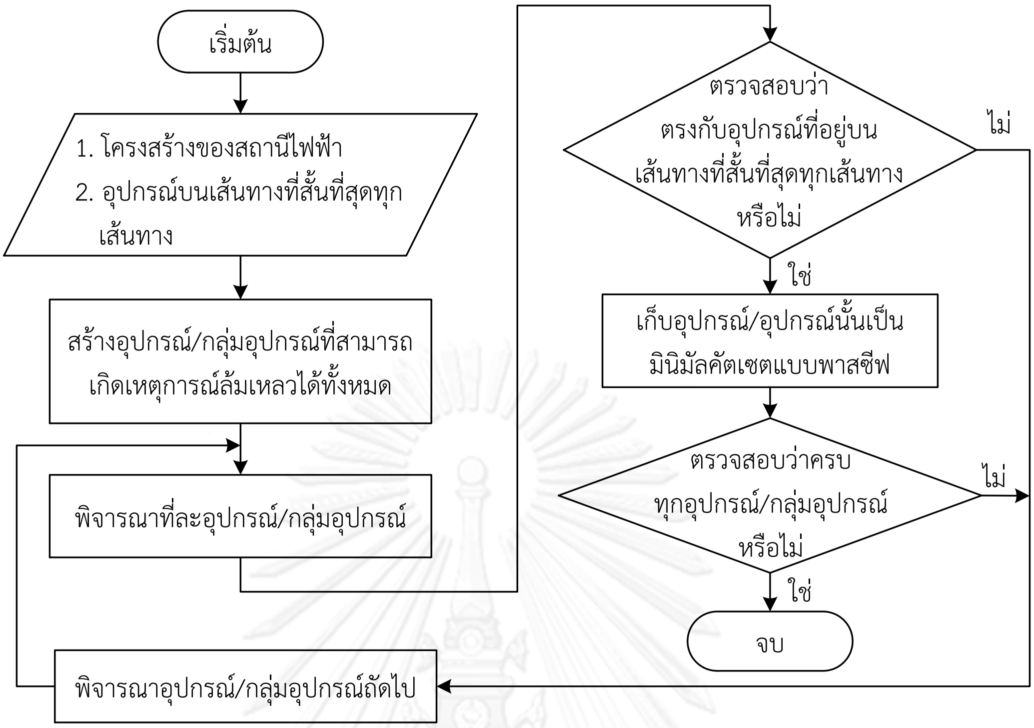
เมื่อสิ้นสุดกระบวนการตรวจสอบเส้นทางที่สั้นที่สุดตามขั้นตอนทั้งสามแล้ว ทำให้ทราบถึงอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกันจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังจุดโหลดด้วยเส้นทางที่สั้นที่สุด เพื่อนำไปเข้าสู่ขั้นตอนการตรวจหามินิมัลคัตเซตในหัวข้อถัดไป

4.3.3 การตรวจหามินิมัลคัตเซต

เนื่องจากมินิมัลคัตเซตเป็นอุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์ที่เล็กที่สุดที่หากเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแล้วทำให้ระบบไฟฟ้าล้มเหลวตามไปด้วย มินิมัลคัตเซตจึงมีหลายอันดับ (Order) ตามจำนวนอุปกรณ์ที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว เช่น อุปกรณ์ล้มเหลวหนึ่งตัวเรียกว่า มินิมัลคัตเซตอันดับหนึ่ง (First order) อุปกรณ์ล้มเหลวสองตัวพร้อมกันเรียกว่า มินิมัลคัตเซตอันดับสอง (Second order) เป็นต้น ในทางปฏิบัติมีโอกาสน้อยมากที่อุปกรณ์สามตัวจะล้มเหลวพร้อมกัน ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงพิจารณาเพียงมินิมัลคัตเซตอันดับหนึ่งและสองเท่านั้น และพิจารณาตามลักษณะการเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภทคือ มินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ และมินิมัลคัตเซตแบบแอคทีพ

4.3.3.1 การตรวจหามินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ

มินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ หมายถึง อุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์ที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแล้วไม่ส่งผลให้อุปกรณ์ป้องกันที่อยู่ข้างเคียงทำงาน แต่กลับทำให้จุดโหลดของสถานีไฟฟ้าไม่ได้รับการจ่ายไฟฟ้า ดังนั้น การตรวจหามินิมัลคัตเซตประเภทดังกล่าว สามารถทำได้ด้วยการตรวจหาอุปกรณ์ที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแล้วตรงกับอุปกรณ์ที่อยู่บนเส้นทางที่สั้นที่สุดทุกเส้นทางหรือไม่ หากตรงกันทุกเส้นทาง ก็ทำให้ไม่มีเส้นทางการส่งกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังจุดโหลด จุดโหลดจึงไม่ได้รับการจ่ายไฟฟ้า แนวคิดการตรวจหามินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ แสดงได้ดังแผนผังในภาพที่ 4.20



ภาพที่ 4.20 การตรวจหามินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ

<u>**ขั้นตอนที่ 1**</u> รับข้อมูลที่ต้องใช้ในการตรวจหามินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ ซึ่งประกอบด้วย

1) โครงสร้างของสถานีไฟฟ้า
2) อุปกรณ์บนเส้นทางที่สั้นที่สุดทุกเส้นทาง ตามที่ตรวจหาได้ในหัวข้อที่ 4.3.2

<u>**ขั้นตอนที่ 2**</u> สร้างอุปกรณ์/กลุ่มอุปกรณ์ของสถานีไฟฟ้าที่สามารถเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวที่เป็นไปได้ทั้งหมดด้วยการใช้หลักของ Combination

<u>**ขั้นตอนที่ 3**</u> พิจารณาที่ละอุปกรณ์/กลุ่มอุปกรณ์

<u>**ขั้นตอนที่ 4**</u> ตรวจสอบอุปกรณ์/กลุ่มอุปกรณ์ ที่พิจารณาจากขั้นตอนที่ 3 ว่าตรงกับอุปกรณ์ที่อยู่บนเส้นทางที่สั้นที่สุดทุกเส้นทางหรือไม่

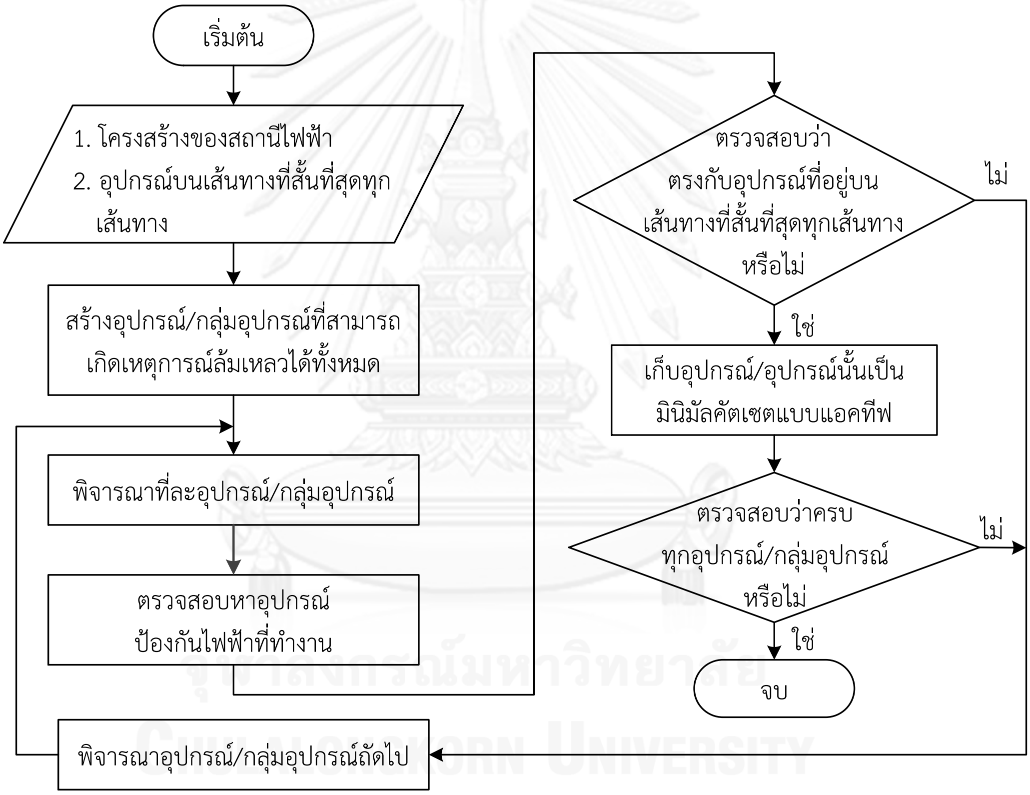
1) หากตรงกันให้เก็บอุปกรณ์/กลุ่มอุปกรณ์ เป็น มินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ
2) หากไม่ตรงกันให้พิจารณาอุปกรณ์/กลุ่มอุปกรณ์ถัดไป ในขั้นตอนที่ 3

<u>**ขั้นตอนที่ 5**</u> ตรวจสอบอุปกรณ์/กลุ่มอุปกรณ์ที่พิจารณาว่า ครบทุกอุปกรณ์/กลุ่มอุปกรณ์ตามจำนวนในขั้นตอนที่ 2 หรือไม่

1) หากครบให้จบการทำงาน และได้รับมินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ
2) หากไม่ครบให้พิจารณาอุปกรณ์/กลุ่มอุปกรณ์ถัดไป ในขั้นตอนที่ 3

4.3.3.1 การตรวจหามินิมัลคัตเซตแบบแอคทีฟ

มินิมัลคัตเซตแบบแอคทีฟ หมายถึง อุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์ที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแล้วส่งผลต่ออุปกรณ์ป้องกันที่อยู่ข้างเคียงทำงาน และด้วยผลของการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันข้างเคียงจึงทำให้สถานีไฟฟ้าไม่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าไปยังจุดโหลดได้ ดังนั้น การตรวจหามินิมัลคัตเซตแบบแอคทีฟจึงมีกระบวนการตรวจหาที่คล้ายคลึงกับแบบพาสซีฟ โดยเพิ่มการตรวจหาอุปกรณ์/กลุ่มอุปกรณ์ และอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าตัวที่ทำงานว่า ตรงกับอุปกรณ์ที่อยู่บนเส้นทางที่สั้นที่สุดทุกเส้นทางหรือไม่ หากตรงกันก็ส่งผลให้ไม่มีเส้นทางที่แหล่งกำเนิดไฟฟ้าสามารถส่งกำลังไฟฟ้าไปยังจุดโหลดได้เลย แนวคิดการตรวจหามินิมัลคัตเซตแบบแอคทีฟ แสดงได้ดังแผนผังในภาพที่ 4.21



ภาพที่ 4.21 การตรวจหามินิมัลคัตเซตแบบแอคทีฟ

<u>ขั้นตอนที่ 1</u> รับข้อมูลที่ต้องใช้ในการตรวจหามินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ ซึ่งประกอบด้วย

1) โครงสร้างของสถานีไฟฟ้า
2) อุปกรณ์บนเส้นทางที่สั้นที่สุดทุกเส้นทาง ตามที่ตรวจหาได้ในหัวข้อที่ 4.32

<u>ขั้นตอนที่ 2</u> สร้างอุปกรณ์/กลุ่มอุปกรณ์ของสถานีไฟฟ้าที่สามารถเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวที่เป็นไปได้ทั้งหมดด้วยการใช้หลักของ Combination

ขั้นตอนที่ 3 พิจารณาที่ละอุปกรณ์/กลุ่มอุปกรณ์

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าตัวที่อยู่ใกล้กับอุปกรณ์ที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวตามขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบอุปกรณ์/กลุ่มอุปกรณ์ ที่พิจารณาจากขั้นตอนที่ 3 และอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าตัวที่ทำงานจากขั้นตอนที่ 4 ว่าตรงกับอุปกรณ์ที่อยู่บนเส้นทางที่สั้นที่สุดทุกเส้นทางหรือไม่

1) หากตรงกันให้เก็บอุปกรณ์/กลุ่มอุปกรณ์ที่พิจารณา (ไม่ได้รวมถึงอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าตัวที่ทำงาน) เป็น มินิมัลคัตเซตแบบแอคทีฟ
2) หากไม่ตรงกันให้พิจารณาอุปกรณ์/กลุ่มอุปกรณ์ถัดไป ในขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบอุปกรณ์/กลุ่มอุปกรณ์ที่พิจารณาว่า ครบทุกอุปกรณ์/กลุ่มอุปกรณ์ตามจำนวนในขั้นตอนที่ 2 หรือไม่

1) หากครบให้จบการทำงาน และได้รับมินิมัลคัตเซตแบบแอคทีฟ
2) หากไม่ครบให้พิจารณาอุปกรณ์/กลุ่มอุปกรณ์ถัดไป ในขั้นตอนที่ 3

จากวิธีการตรวจหามินิมัลคัตเซตทั้งสองประเภทสังเกตได้ว่า มีขั้นตอนที่แตกต่างกันเพียงขั้นตอนเดียว คือ การตรวจหามินิมัลคัตเซตแอคทีฟมีการเพิ่มขั้นตอนการตรวจหาการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันมาอีกหนึ่งขั้นตอน จึงทำให้การตรวจหามินิมัลคัตเซตทั้งสองประเภทอาจดำเนินการไปพร้อมกันได้ หากอุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอคทีฟ แล้วส่งผลให้อุปกรณ์ป้องกันข้างเคียงทำงาน ถ้าอุปกรณ์ตัวที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวและอุปกรณ์ป้องกันข้างเคียงที่ทำงานตรงกับมินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ ก็ย่อมบ่งบอกได้ทันทีว่า จุดโหลดบริเวณนั้นจะไม่ได้รับการจ่ายไฟฟ้า ดังนั้น จึงถือว่าอุปกรณ์ตัวที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวเป็นมินิมัลคัตเซตแบบแอคทีฟ (ไม่ได้รวมถึงอุปกรณ์ป้องกันตัวที่ทำงาน)

4.3.4 การคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้

หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการตรวจหามินิมัลคัตเซตตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 4.3.1 ถึง 4.3.2 ทำให้ทราบถึงอุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์ที่เล็กที่สุด ที่หากเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแล้วทำให้สถานีไฟฟ้าไม่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าไปยังแต่ละจุดโหลดได้ และแต่ละมินิมัลคัตเซตสามารถคำนวณอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว, ระยะเวลาซ่อมแซม และระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวต่อปี อย่างไรก็ตามการคำนวณค่าทางสถิติดังกล่าวแบ่งออกเป็น 2 กรณีตามการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในมินิมัลคัตเซต

(1) กรณีที่มินิมัลคัตเซตมีอุปกรณ์หนึ่งอุปกรณ์ ค่าทางสถิติของมินิมัลคัตเซตมีค่าเท่ากับค่าทางสถิติของอุปกรณ์

(2) กรณีที่มินิมัลคัตเซตมีอุปกรณ์สองอุปกรณ์ขนานกัน ค่าทางสถิติของมินิมัลคัตเซตสามารถคำนวณได้จากอุปกรณ์แต่ละตัว โดยอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของมินิมัลคัตเซต, ระยะเวลาซ่อมแซมของมินิมัลคัตเซต และระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวต่อปีของมินิมัลคัตเซต สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4.19 ถึง 4.21 ตามลำดับ [20]

$$\lambda_C = \frac{\lambda_1\lambda_2(r_1+r_2)}{1+\lambda_1 r_1+\lambda_2 r_2} \approx \lambda_1\lambda_2(r_1+r_2) \quad ,\lambda_i r_i << 1 \qquad (4.19)$$

$$r_C = \frac{r_1 r_2}{r_1+r_2} \qquad (4.20)$$

$$U_C = \lambda_C r_C = \lambda_1\lambda_1 r_1 r_2 \qquad (4.21)$$

โดย λ_C คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของมินิมัลคัตเซตแบบ 2 อุปกรณ์ขนานกัน (ครั้ง/ปี)

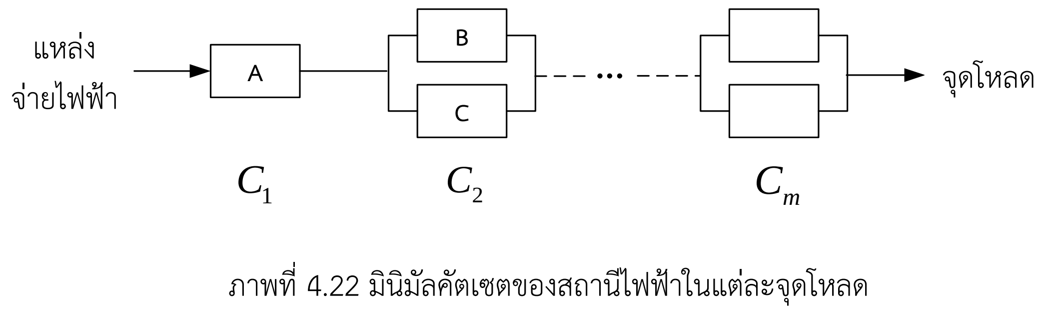
r_C คือ ระยะเวลาซ่อมแซมของมินิมัลคัตเซตแบบ 2 อุปกรณ์ขนานกัน (ชั่วโมง/ครั้ง)

U_C คือ ระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวต่อปีของมินิมัลคัตเซตแบบ 2 อุปกรณ์ขนานกัน (ชั่วโมง/ปี)

λ_1, λ_2 คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ตัวที่ 1 และอุปกรณ์ตัวที่ 2 (ชั่วโมง/ครั้ง)

r_1, r_2 คือ ระยะเวลาซ่อมแซมของอุปกรณ์ตัวที่ 1 และอุปกรณ์ตัวที่ 2 (ครั้ง/ชั่วโมง)

เนื่องจาก มินิมัลคัตเซตของสถานีไฟฟ้าในแต่ละจุดโหลด มีลักษณะเป็นแบบอนุกรมจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังจุดโหลด ดังภาพที่ 4.21 ดังนั้น จึงสามารถคำนวณค่าทางสถิติต่างๆ ของจุดโหลดได้จากผลรวมของค่าสถิติในแต่ละมินิมัลคัตเซต ดังสมการที่สมการ 4.22 ถึง 4.24



ภาพที่ 4.22 มินิมัลคัตเซตของสถานีไฟฟ้าในแต่ละจุดโหลด

$$\lambda_i = \sum_{k=1}^{k=m} \lambda_{C,k} \tag{4.22}$$

$$U_i = \sum_{k=1}^{k=m} U_{C,k} \tag{4.23}$$

$$r_i = \frac{U_i}{\lambda_i} = \frac{\sum_{k=1}^{k=m} U_{C,k}}{\sum_{k=1}^{k=m} \lambda_{C,k}} \tag{4.24}$$

โดย λ_i คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของจุดโหลดที่ i (ครั้ง/ปี)

r_i คือ ระยะเวลาซ่อมแซมของจุดโหลดที่ i (ชั่วโมง/ครั้ง)

U_i คือ ระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวต่อปีของจุดโหลดที่ i (ชั่วโมง/ปี)

$\lambda_{C,k}$ คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของมินิมัลคัตเซตที่ k (ครั้ง/ปี)

$r_{C,k}$ คือ ระยะเวลาซ่อมแซมของมินิมัลคัตเซตที่ k (ครั้ง/ปี)

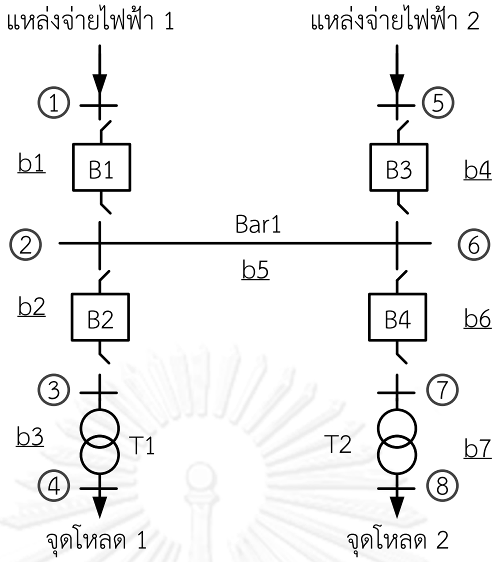
$U_{C,k}$ คือ ระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวต่อปีของของมินิมัลคัตเซตที่ k (ครั้ง/ปี)

m คือ จำนวนมินิมัลคัตเซตทั้งหมดของจุดโหลด i

อย่างไรก็ตาม มินิมัลคัตเซตของแต่ละจุดโหลดมีอยู่ 2 ประเภท คือ มินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟและแบบแอคทีพ ดังนั้น จึงต้องคำนวณค่าทางสถิติที่จุดโหลดตามประเภทของมินิมัลคัตเซตแล้วนำมารวมกัน โดยอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์จะแยกออกเป็น 2 ค่าตามประเภทของมินิมัลคัตเซต แต่สำหรับระยะเวลาซ่อมแซมของอุปกรณ์ในมินิมัลคัตเซตแต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน และเมื่อทราบถึงค่าสถิติต่างๆ ของแต่ละจุดโหลดก็สามารถคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้า ซึ่งรายละเอียดการประเมินดัชนีความเชื่อถือได้ ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.2.3

4.4 ตัวอย่างการประเมินความเชื่อถือได้ในสถานีไฟฟ้า

เพื่อที่ตรวจสอบประสิทธิภาพของการประเมินความเชื่อถือได้ในสถานีไฟฟ้าตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอไปแล้วในหัวข้อที่ 4.3 หัวข้อนี้จึงได้นำเสนอตัวอย่างของการประเมินความเชื่อถือได้ในสถานีไฟฟ้า ด้วยการประเมินความเชื่อถือของสถานีไฟฟ้าที่มีรูปแบบการจัดเรียงบัสแบบ Single-bus ที่มีการจัดเรียงในลักษณะอย่างง่าย กล่าวคือ สถานีไฟฟ้าได้รับพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าด้านขาเข้า 2 ทาง และสถานีไฟฟ้าจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกสู่ระบบหรือจุดโหลดด้านขาออก 2 ทางเช่นกัน แสดงได้ดังภาพที่ 4.23



ภาพที่ 4.23 สถานีไฟฟ้าที่มีรูปแบบการจัดเรียงบัสแบบ Single-bus

อาศัยขั้นตอนการประเมินความเชื่อถือได้ในสถานีไฟฟ้าตามที่ได้นำเสนอไปแล้วในหัวข้อที่ 4.3 สามารถประเมินความเชื่อได้ของสถานีไฟฟ้าที่มีรูปแบบการจัดเรียงบัสแบบ Single-bus ตามภาพที่ 4.23 ได้ดังต่อไปนี้

(1) ขั้นตอนที่ 1: การเตรียมโครงสร้างสถานีไฟฟ้าและค่าทางสถิติ

เมื่อพิจารณาสถานีไฟฟ้าตัวอย่างตามภาพที่ 4.23 สามารถจัดโครงสร้างสถานีไฟฟ้าและค่าทางสถิติ [32] ได้ดังตารางที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลโครงสร้างของสถานีไฟฟ้าไฟฟ้าตัวอย่าง

สาขา	โนดผู้ส่ง	โนดผู้รับ	อุปกรณ์	ทิศทางการส่งกำลังไฟฟ้า
b1	1	2	B1, Bar1	1 → 2
b2	2	3	B2, Bar1	2 → 3
b3	3	4	T1	3 → 4
b4	5	6	B3, Bar1	5 → 6
b5	2	6	Bar1	2 → 6, 6 → 2
b6	6	7	B4, Bar1	6 → 7
b7	7	8	T2	7 → 8

หมายเหตุ จุดโนดที่ 2 เป็นตำแหน่งของบัสบาร์จึงถือว่าเป็นอีกหนึ่งอุปกรณ์

ตารางที่ 4.5 ค่าสถิติของสถานีไฟฟ้าไฟฟ้าตัวอย่าง

อุปกรณ์	อัตราเหตุการณ์ล้มเหลว (ครั้ง/ปี)		ระยะเวลาซ่อมแซม (ชั่วโมง/ครั้ง)	ระยะเวลาสวิตช์ชิ่ง (ชั่วโมง/ครั้ง)
	แบบพาสซีฟ	แบบแอคทีฟ		
เซอร์กิตเบรกเกอร์	0.0007	0.0064	1.4903	0.25
หม้อแปลงไฟฟ้า	-	0.1033	0.6778	0.25
บัสบาร์	-	0.0010	2.0000	0.25

(2) ขั้นตอนที่ 2: การตรวจหาเส้นทางที่สั้นที่สุด

ขั้นตอนการตรวจหาเส้นทางที่สั้นที่สุดมีขั้นตอนย่อยอีก 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ขั้นตอนที่ 1 การจำลองโครงสร้างระบบขึ้นใหม่ สถานไฟฟ้าตัวอย่างสามารถจำลองโครงสร้างขึ้นใหม่ ได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 โครงสร้างของสถานีไฟฟ้าตัวอย่างที่จำลองขึ้นใหม่

สาขาที่จำลองขึ้นใหม่	สาขาเดิม	โนดผู้ส่ง	โนดผู้รับ	ข้อมูลของแต่ละสาขา
1	b2	2	3	สาขาที่มีทิศทางเดินไฟฟ้าเพียงทิศเดียว
2	b3	3	4	
3	b6	6	7	
4	b7	7	8	
5	b1	-1	2	สาขาของแหล่งจ่าย และมีทิศทางเดินไฟฟ้าเพียงทิศเดียว
6	b4	-1	6	
7	b5	2	6	สาขาที่มีการไหลของกำลังไฟฟ้าสองทิศทาง
8	-	4	0	โนดที่สนใจ (จุดโหลด)
9	-	8	0	
10	b6	6	2	สาขาจำลองของสาขาที่มีการไหลของกำลังไฟฟ้าสองทิศทาง

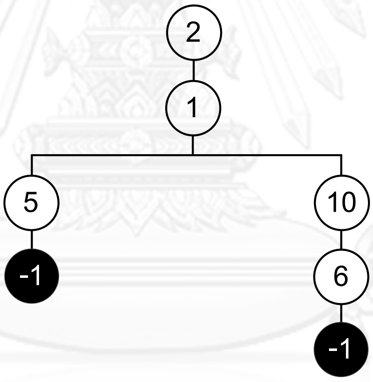
- ขั้นตอนที่ 2 จัดทำตารางผู้มาก่อนของสาขาได้ หากพิจารณาที่**จุดโหลดที่ 1** หรือที่**จุดโนด 4** สามารถจัดทำตารางผู้มาก่อนของสาขาได้ดังตารางที่ 4.7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.7 ตารางผู้มาก่อนของสาขาของสถานีไฟฟ้าตัวอย่าง

สาขาที่จำลองขึ้นใหม่	ผู้มาก่อนของสาขา	
1	5	10
2	1	-
3	-	-
4	-	-
5	-1	-
6	-1	-
7	-	-
8	2	-
9	-	-
10	7 (ซ้ำกับสาขาที่ 10 จึงไม่พิจารณา)	6

จากตารางผู้มาก่อนของสาขาตามตารางที่ 4.7 เส้นทางที่สั้นที่สุดของสถานีไฟฟ้าตัวอย่างที่จุดโหลด 1 สามารถแสดงเป็นแผนภาพต้นไม้ได้ดังภาพที่ 4.24



ภาพที่ 4.24 เส้นทางที่สั้นที่สุดจากสาขาที่จำลองขึ้นใหม่ของสถานีไฟฟ้าตัวอย่างที่จุดโหลด 1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- <u>ขั้นตอนที่ 3</u> การแปลงสาขาที่จำลองขึ้นให้เป็นสาขาเดิมและใส่ข้อมูลอุปกรณ์ในแต่ละสาขา สามารถจัดทำได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 เส้นทางที่สั้นที่สุดของสถานีไฟฟ้าตัวอย่างที่จุดโหลด 1

เส้นทาง	เส้นทางที่สั้นที่สุด												
	สาขาจำลอง					สาขาดั้งเดิม				อุปกรณ์ไฟฟ้าหรือจุดโนด			
1	2	1	5	-1	-	<u>b3</u>	<u>b2</u>	<u>b1</u>		T1	B2	Bar1	B1
2	2	1	10	6	-1	<u>b3</u>	<u>b2</u>	<u>b5</u>	<u>b4</u>	T1	B2	Bar1	B3

(3) ขั้นตอนที่ 3: การตรวจมินิมัลคัตเซต

(3.1) การตรวจหามินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ มีขั้นตอนย่อยอีก 5 ขั้นตอน แต่มีขั้นตอนหลักๆ เพียง 2 ขั้นตอน ดังนี้

- <u>ขั้นตอนที่ 1</u> การสร้างอุปกรณ์/กลุ่มอุปกรณ์ของสถานีไฟฟ้าที่สามารถเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวที่เป็นไปได้ทั้งหมดด้วยการใช้หลักของ Combination ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 กลุ่มอุปกรณ์ของสถานีไฟฟ้าที่ตัวอย่างสามารถเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวที่เป็นไปได้

Combination	อุปกรณ์หรือกลุ่มอุปกรณ์ที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว
รูปแบบที่ 1	[B1], [B2], [B3], [B4], [T1], [T2], [Bar1]
รูปแบบที่ 2	[B1,B2], [B1,B3], [B1,B4], [B1,T1], [B1,T1], ... , [T2,Bar1]
⋮	⋮
รูปแบบที่ 6	[B1,B2,B3,B4,T1,T2,Bar1]

- <u>ขั้นตอนที่ 2</u> ตรวจสอบอุปกรณ์/กลุ่มอุปกรณ์ ว่าตรงกับอุปกรณ์ที่อยู่บนเส้นทางที่สั้นที่สุดทุกเส้นทางหรือไม่ ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 การตรวจสอบอุปกรณ์กับอุปกรณ์ที่อยู่บนเส้นทางที่สั้นที่สุด

เส้นทางการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่สั้นที่สุด	อุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่บนแต่ละเส้นทาง						
	B1	B2	B3	B4	T1	T2	Bar1
เส้นทางที่ 1	×	×			×		×
เส้นทางที่ 2		×	×		×		×

เมื่อตรวจสอบอุปกรณ์/กลุ่มอุปกรณ์ที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวกับอุปกรณ์ที่อยู่บนเส้นทางที่สั้นที่สุดทุกเส้นทางพบว่าสถานีไฟฟ้าตัวอย่างมีมินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟที่จุดโหลด 1 ดังนี้

- มินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟอันดับหนึ่ง : [B2] , [T1] และ [Bar1]
- มินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟอันดับสอง : [B1,B3]

(3.2) การตรวจหามินิมัลคัตเซตแบบแอคทีฟ มีขั้นตอนที่คล้ายคลึงกับการตรวจหามินิมัลคัตเซตแบบแอคทีฟ โดยมีขั้นตอนที่เพิ่มขึ้นมาคือ อุปกรณ์ป้องกันตัวที่ทำงานอันเนื่องจากมีอุปกรณ์ล้มเหลว สำหรับระบบสถานีไฟฟ้าตัวอย่างสามารถแสดงการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันได้ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 แสดงการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันของระบบสถานีไฟฟ้าตัวอย่าง

อุปกรณ์ที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว	อุปกรณ์ป้องกันที่ทำงาน
B1	อุปกรณ์ป้องกันที่แหล่งกำเนิดไฟฟ้า
B2	B1, B3 และ B4
B3	อุปกรณ์ป้องกันที่ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า
B4	B1, B2 และ B4
T1	B2
T2	B6
Bar1	B1, B2, B3 และ B4

เมื่อตรวจสอบอุปกรณ์/กลุ่มอุปกรณ์ที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวและอุปกรณ์ป้องกันที่ทำงาน กับอุปกรณ์ที่อยู่บนเส้นทางที่สั้นที่สุดทุกเส้นทางพบว่า สถานีไฟฟ้าตัวอย่างมีมินิมัลคัตเซตแบบแอคทีฟที่จุดโหลด 1 ดังนี้

- มินิมัลคัตเซตแบบแอคทีฟอันดับหนึ่ง : [B1], [B2], [B3], [B4], [T1], [T2] และ [Bar1]
- มินิมัลคัตเซตแบบแอคทีฟอันดับสอง : -

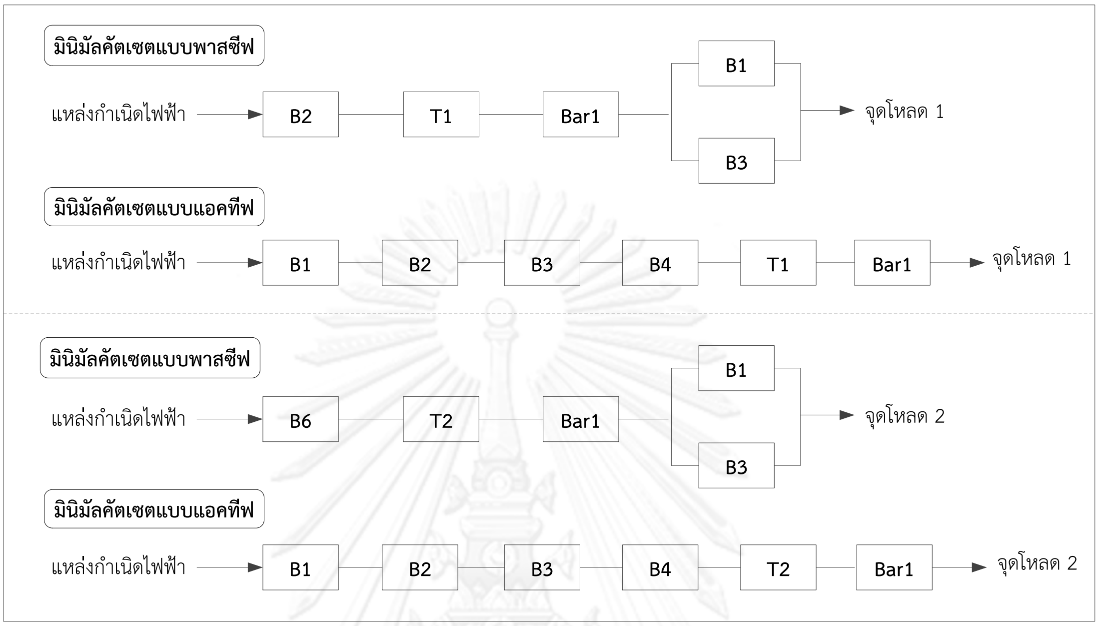
ในทำนองเดียวกันกับการตรวจหามินิมัลคัตเซตของสถานีไฟฟ้าที่จุดโหลด 1 สามารถตรวจหามินิมัลคัตเซตของสถานีไฟฟ้าที่จุดโหลด 2 ได้เช่นกัน โดยมินิมัลคัตเซตของสถานีไฟฟ้าที่จุดโหลด 1 และจุดโหลด 2 แสดงได้ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 มินิมัลคัตเซตของสถานีไฟฟ้าที่จุดโหลด 1 และจุดโหลด 2

มินิมัลคัตเซตของสถานีไฟฟ้าที่จุดโหลด 1		มินิมัลคัตเซตของสถานีไฟฟ้าที่จุดโหลด 2	
แบบพาสซีฟ	แบบแอคทีฟ	แบบพาสซีฟ	แบบแอคทีฟ
[B2]	[B1]	[B4]	[B1]
[T1]	[B2]	[T2]	[B2]
[Bar1]	[B3]	[Bar1]	[B3]
[B1,B3]	[B4]	[B1,B3]	[B4]
	[T1]		[T2]
	[Bar1]		[Bar1]

(4) ขั้นตอนที่ 4: การคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้

มินิมัลคัตเซตของสถานีไฟฟ้าที่จุดโหลด 1 และจุดโหลด 2 สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.25



ภาพที่ 4.25 มินิมัลคัตเซตของสถานีไฟฟ้าที่จุดโหลด 1 และจุดโหลด 2

ดังนั้น สามารถคำนวณค่าทางสถิติของจุดโหลดที่ 1 และจุดโหลดที่ 2 ด้วยสมการที่ (4.19) ถึง (4.24) ได้ดังตารางที่ 4.13 และตารางที่ 4.14 ตามลำดับ นอกจากนี้ การจัดเรียงบัสรูปแบบนี้เมื่อเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอคทีฟจะไม่สามารถสวิตซ์ชิ่งได้

ตารางที่ 4.13 ค่าทางสถิติของสถานีไฟฟ้าตัวอย่างที่จุดโหลด 1

มินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ				มินิมัลคัตเซตแบบแอคทีฟ			
คัตเซต	λ_1 **(ครั้ง/ปี)**	r_1 **(ชม./ครั้ง)**	U_1 **(ชม./ปี)**	**คัตเซต**	λ_1 **(ครั้ง/ปี)**	r_1 **(ชม./ครั้ง)**	U_1 **(ชม./ปี)**
[B2]	0.0007	1.4903	0.0001	[B1]	0.0064	1.4903	0.0095
[T1]	-	-	-	[B2]	0.0064	1.4903	0.0095
[Bar1]	-	-	-	[B3]	0.0064	1.4903	0.0095
[B1,B3]	1.46×10^{-6}	0.7451	2.18×10^{-6}	[B4]	0.0064	1.4903	0.0095
-	-	-	-	[T1]	0.1033	0.6778	0.0700
-	-	-	-	[Bar1]	0.0010	2.0000	0.0020
เฉลี่ย	**0.0007**	**0.1428**	**0.0001**	**เฉลี่ย**	**0.1299**	**0.8469**	**0.1100**

ตารางที่ 4.14 ค่าทางสถิติของสถานีไฟฟ้าตัวอย่างที่จุดโหลด 2

มินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ				มินิมัลคัตเซตแบบแอคทีฟ			
คัตเซต	λ_2 **(ครั้ง/ปี)**	r_2 **(ชม./ครั้ง)**	U_2 **(ชม./ปี)**	**คัตเซต**	λ_2 **(ครั้ง/ปี)**	r_2 **(ชม./ครั้ง)**	U_2 **(ชม./ปี)**
[B6]	0.0007	1.4903	0.0001	[B1]	0.0064	1.4903	0.0095
[T2]	-	-	-	[B2]	0.0064	1.4903	0.0095
[Bar1]	-	-	-	[B3]	0.0064	1.4903	0.0095
[B1,B3]	1.46×10^{-6}	0.7451	2.18×10^{-6}	[B4]	0.0064	1.4903	0.0095
-	-	-	-	[T2]	0.1033	0.6778	0.0700
-	-	-	-	[Bar1]	0.0010	2.0000	0.0020
เฉลี่ย	**0.0007**	**0.1428**	**0.0001**	**เฉลี่ย**	**0.1299**	**0.8469**	**0.1100**

ดังนั้น ระบบสถานีไฟฟ้าตัวอย่างสามารถคำนวณอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว (λ_i) และระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวต่อปี (U_i) ในแต่ละจุดโหลดได้ดังนี้

จุดโหลดที่ 1: อัตราเหตุการณ์ล้มเหลว $\lambda_1 = 0.0007 + 0.1299 = 0.1306$ ครั้ง/ปี

ระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวต่อปี $U_1 = 0.0001 + 0.1100 = 0.1101$ ชม./ปี

ระยะเวลาการซ่อมแซมเฉลี่ย $r_1 = \dfrac{0.1101}{0.1306} = 0.8430$ ชม./ปี

จุดโหลดที่ 2: อัตราเหตุการณ์ล้มเหลว $\lambda_2 = 0.0007 + 0.1299 = 0.1306$ ครั้ง/ปี

ระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวต่อปี $U_2 = 0.0001 + 0.1100 = 0.1101$ ชม./ปี

ระยะเวลาการซ่อมแซมเฉลี่ย $r_1 = \dfrac{0.1101}{0.1306} = 0.8430$ ชม./ปี

หากกำหนดให้จุดโหลดที่ 1 มีผู้ใช้ไฟฟ้า 150 รายและมีความต้องการใช้ไฟฟ้าทั้งหมด 0.775 MW และ จุดโหลดที่ 2 มีผู้ใช้ไฟฟ้า 200 รายและมีความต้องการใช้ไฟฟ้าทั้งหมด 1 MW สามารถนำค่าทางสถิติที่จุดโหลดไปคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าได้ ตัวอย่างเช่น

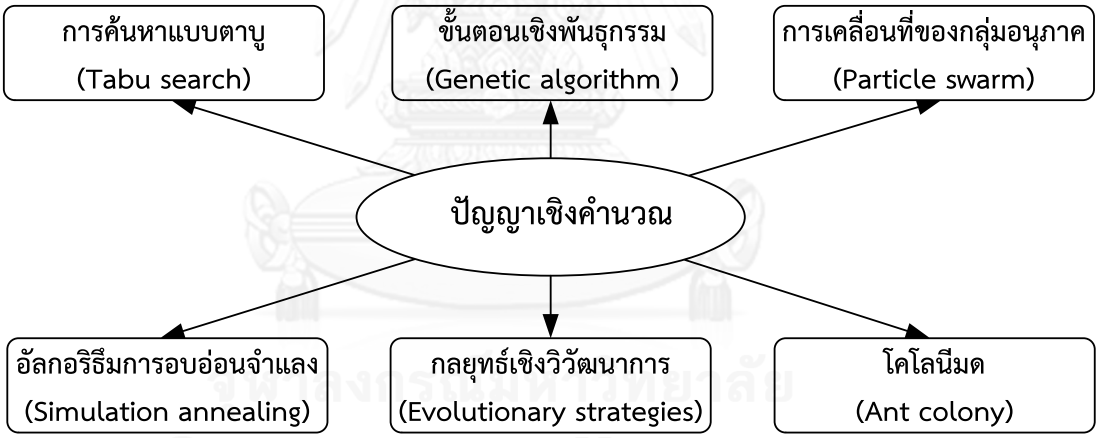
$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i} = \frac{0.1306\cdot150 + 0.1306\cdot200}{150+200} = 0.1306 \text{ ครั้ง/ปี}$$

$$SAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i} = \frac{0.1101\cdot150 + 0.1101\cdot200}{150+200} = 0.1101 \text{ ชั่วโมง/ปี}$$

$$ENS = \sum L_{a(i)} U_i = 0.775\cdot0.1101 + 1\cdot0.1101 = 0.195 \text{ MWh/ปี}$$

บทที่ 5
การค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม

เมื่อนำหลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่ได้ศึกษาจากบทที่ 2 ถึง บทที่ 4 มาประยุกต์เข้ากับแนวคิดในการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ สามารถกำหนดปัญหาให้อยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้ ซึ่งในที่นี้ปัญหาที่ต้องค้นหาคำตอบ คือ การกำหนดแผนการบำรุงรักษาของอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด ซึ่งรายละเอียดของสมการจะนำเสนอในบทถัดไป ปัญหาดังกล่าวมีความยุ่งยากและซับซ้อนทำให้ไม่สามารถใช้การดำเนินการทางคณิตศาสตร์ทั่วไปแก้ปัญหาได้ จึงต้องใช้วิธีการสำหรับปัญหาที่เหมาะที่สุดโดยเฉพาะ ปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการค้นหาค้นตอบที่เรียกว่า "ปัญญาเชิงคำนวณ (Computational Intelligent Techniques)" [33] ด้วยการนำปัญญามาผสมผสานกับกระบวนการทางธรรมชาติกลายเป็นเทคนิคการคำนวณที่มีความชาญฉลาดมากขึ้น คำตอบที่ค้นหาได้อาจไม่เป็นคำตอบที่ถูกต้อง 100 เปอร์เซ็นต์ แต่คำตอบที่ได้รับมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ปัญญาเชิงคำนวณมีหลายวิธีการขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการแก้ปัญหานั้นๆ วิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยปัญญาเชิงคำนวณที่นิยมใช้มีด้วยกัน 6 วิธีการดังภาพที่ 5.1



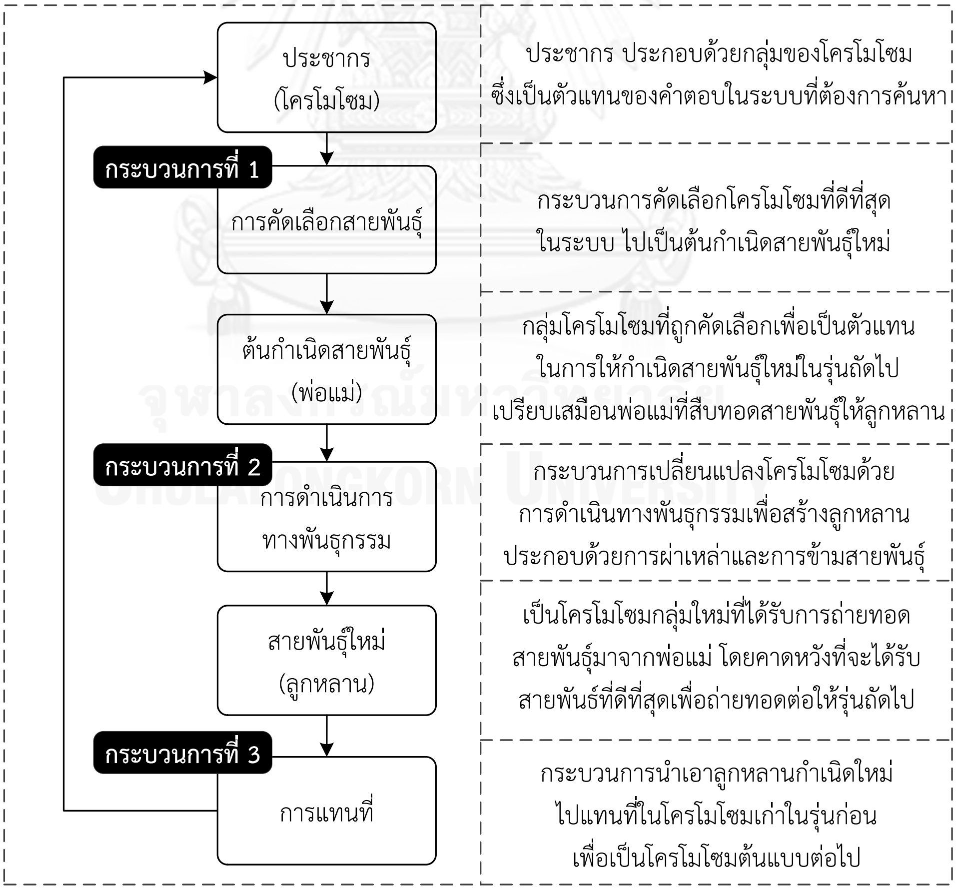
ภาพที่ 5.1 วิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยปัญญาเชิงคำนวณ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้การค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดสำหรับปัญหาการกำหนดแผนการบำรุงรักษาของอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม สำหรับเหตุผลในการเลือกใช้จะกล่าวต่อไปในภายหลัง

ดังนั้น บทนี้จึงได้นำเสนอแนวคิดพื้นฐานตลอดจนขั้นตอนการค้นหาค้นตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรมเป็นหลัก ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ (1) แนวคิดพื้นฐานของขั้นตอนเชิงพันธุกรรม, (2) ขั้นตอนการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม และ (3) ตัวอย่างการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม

5.1 แนวคิดพื้นฐานของขั้นตอนเชิงพันธุกรรม

ขั้นตอนเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm: GA) เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดอีกวิธีการหนึ่ง ด้วยการเลียนแบบหลักการคัดเลือกทางธรรมชาติและหลักการทางสายพันธุ์ แนวคิดของขั้นตอนเชิงพันธุกรรมอาศัยการสมมุติคำตอบหลายๆ คำตอบขึ้นมาก่อน แล้วประเมินค่าความเหมาะสมของแต่ละคำตอบ เพื่อนำไปคัดเลือกหาคำตอบที่ดีกว่าในรุ่นถัดไป หากคำตอบใดมีค่าเหมาะสมที่สุดก็มีโอกาสอยู่รอดมากกว่า คำตอบที่ถูกคัดเลือกในแต่ละรุ่นถูกนำมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ให้แก่ลูกหลานหรือคำตอบรุ่นถัดไป ด้วยการใช้การดำเนินการทางพันธุกรรมอันประกอบด้วยการข้ามสายพันธุ์ และการผ่าเหล่า คำตอบแต่ละคำตอบประกอบไปด้วยสตริงของตัวแปรที่ถูกลงรหัสไว้ที่เรียกว่าโครโมโซม และสามารถถอดรหัสเป็นค่าของตัวแปรจริงได้ โดยทั่วไปนิยมลงรหัสตัวแปรให้เป็นระบบเลขฐานสอง เมื่อพิจารณาวัฏจักรของขั้นตอนเชิงพันธุกรรมทั้งหมดสามารถสรุปได้ 3 กระบวนการ คือ (1) การคัดเลือกสายพันธุ์, (2) การดำเนินการทางพันธุกรรม และ (3) การแทนที่ นอกจากนี้ ทั้งสามกระบวนการมีองค์ประกอบอยู่ 3 องค์ประกอบ คือ (1) ประชากร, (2) ต้นกำเนิดสายพันธุ์ และ (3) สายพันธุ์ใหม่ [33] ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 5.2



ภาพที่ 5.2 วัฏจักรของขั้นตอนเชิงพันธุกรรม

จากแนวคิดพื้นฐานของขั้นตอนเชิงพันธุกรรมข้างต้น สามารถสรุปจุดเด่นของการกระบวนในการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยวิธีการนี้ได้ดังต่อไปนี้

(1) การลงรหัสของตัวแปรอยู่ในรูปของโครโซมมีความยืดหยุ่นสูง ทำให้ในกระบวนการค้นหาคำตอบไม่ต้องใช้ค่าของตัวแปรโดยตรง จึงสะดวกในการแก้ปัญหากับตัวแปรชนิดใดก็ได้ ไม่จำเป็นต้องเป็นตัวแปรชนิดต่อเนื่องเพียงอย่างเดียว

(2) การตั้งคำตอบจากจุดเริ่มต้นหลายๆ คำตอบ ทำให้กระบวนการค้นหาคำตอบเป็นไปแบบขนาน คำตอบที่ได้จึงเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะที่สุดโดยรวม หรือสามารถให้คำตอบแบบวงกว้างได้ (Global optimum)

(3) การประเมินค่าความเหมาะสมใช้เพียงค่าของฟังก์ชันเป้าหมายเท่านั้น จึงทำให้สามารถใช้กับฟังก์ชันเป้าหมายได้ทุกชนิด

(4) โดยทั่วไปกระบวนการค้นหาคำตอบใช้วิธีทางแคลคูลัสของเวคเตอร์ แต่สำหรับขั้นตอนเชิงพันธุกรรมใช้ทฤษฎีทางความน่าจะเป็น

สำหรับปัญหาการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด คำตอบสุดท้ายที่ได้รับต้องแสดงถึงเวลาที่อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษา จึงทำให้ตัวแปรในการค้นหาคำตอบต้องสามารถรองรับคำตอบของอุปกรณ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมด เช่น อุปกรณ์อาจมีการบำรุงรักษา หรืออาจไม่มีการบำรุงรักษา เป็นต้น ซึ่งสอดคล้องกับการลงรหัสตัวแปรให้อยู่ในรูปโครโซมตามวิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม สามารถลงรหัสตัวแปรด้วยการใช้ระบบเลขฐานสอง (0 และ 1) ในการบ่งบอกถึงคำตอบว่ามีการบำรุงรักษาหรือไม่ เช่น ถ้ารหัสคำตอบมีค่าเป็น 0 แสดงถึงอุปกรณ์ไม่มีการบำรุงรักษา และถ้ารหัสคำตอบมีค่าเป็น 1 แสดงถึงอุปกรณ์มีการบำรุงรักษา เป็นต้น ทำให้การประเมินคำตอบที่บรรลุวัตถุประสงค์ของปัญหาเป็นได้โดยง่าย และประกอบกับตัวแปรของชุดคำตอบทั้งหมดที่ทำให้บรรลุวัตถุประสงค์เป็นตัวแปรชนิดไม่ต่อเนื่อง เพียงแสดงถึงปีที่อุปกรณ์ควรได้รับการบำรุงรักษาเท่านั้น ตัวอย่างเช่น หากรู้จำนวนปีที่ต้องการวางแผน โอกาสของคำตอบที่เป็นไปได้ในแต่ละปีย่อมมีเพียงแค่เลือกหรือไม่เลือกบำรุงรักษาอุปกรณ์ ซึ่งแสดงด้วยรหัสโครโมโซม 0 และ 1 เป็นต้น ด้วยเหตุผลตามที่กล่าวไปข้างต้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เลือกใช้การค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดสำหรับปัญหาการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม

5.2 ขั้นตอนการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม

การค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรมตามวัฏจักรในภาพที่ 5.2 ประกอบไปด้วยขั้นตอนพื้นฐาน 7 ขั้นตอน [33, 34] ดังภาพที่ 5.3

(1) การเข้ารหัส (Encoding) และการถอดรหัส (Decoding)

(2) การสร้างประชากรเริ่มต้น (Initialization)

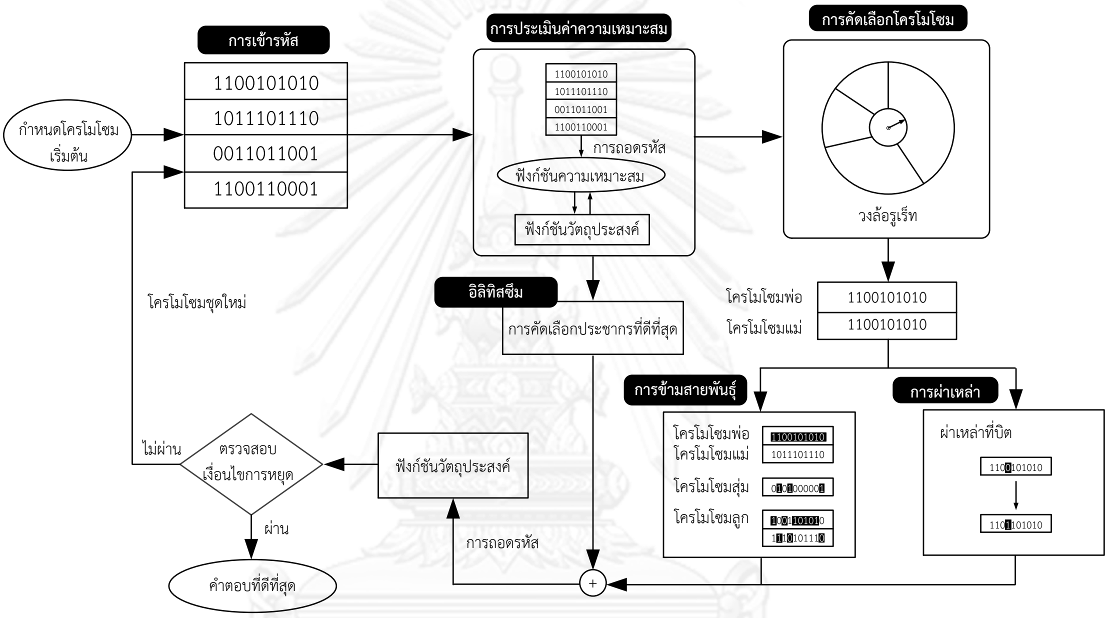
(3) การประเมินค่าความเหมาะสม (Fitness value)

(4) การคัดเลือกประชากรที่เด่นที่สุด (Elitism)

(5) การคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection)

(6) การดำเนินการทางพันธุกรรม (Genetic operators)

(7) เงื่อนไขการหยุด



ภาพที่ 5.3 ภาพรวมขั้นตอนการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม

5.2.1 การเข้ารหัสและการถอดรหัส

ขั้นตอนเชิงพันธุกรรมจะค้นหาคำตอบของปัญหาจากกลุ่มของคำตอบหรือประชากรของคำตอบ แต่ละคำตอบมีคุณลักษณะเฉพาะตัวซึ่งแสดงอยู่ในรูปของโครโมโซม การเข้ารหัส (Encoding) โครโมโซมเป็นขั้นตอนแรกและเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพราะเป็นการออกแบบให้โครโมโซมเป็นตัวแทนของคำตอบ ดังนั้น หากเลือกวิธีการเข้ารหัสที่เหมาะสมย่อมทำให้ขั้นตอนเชิงพันธุกรรมมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นด้วย การเข้ารหัสที่นิยมใช้โดยทั่วไปเป็นการเข้ารหัสด้วยระบบเลขฐานสอง (0 และ 1) และความยาวของโครโมโซม (สตริง) ได้มาจากการเรียงกันของรหัสแบบบิตต่อบิต การเข้ารหัสอาจเป็นคำตอบของทั้งตัวแปรแบบต่อเนื่องหรือแบบไม่ต่อเนื่องก็ได้ตามปัญหาที่พิจารณา แต่สำหรับกรณีของตัวแปรแบบต่อเนื่อง ความยาวของโครโมโซมถูกกำหนดตามความละเอียดของตัวแปรที่ต้องการพิจารณา ดังสมการที่ (5.1)

$$2^{n_i-1} \leq (U_i - L_i)\times 10^{m_i} < 2^{n_i} \tag{5.1}$$

โดย n_i คือ ความยาวโครโมโซมของตัวแปร i

U_i คือ ค่าขอบเขตบนของตัวแปร i

L_i คือ ค่าขอบเขตล่างของตัวแปร i

m_i คือ ค่าความละเอียดของตัวแปร i

หากกำหนดให้ V_i เป็นค่ารหัสโครโมโซมของตัวแปร i ในเลขฐานสิบที่ได้จากการถอดรหัสบิตโครโมโซมที่เป็นเลขฐานสอง ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5.2)

$$V_i = \sum_{i=0}^{n} b_i \times 2^i \tag{5.2}$$

จากสมการที่ (5.2) สามารถถอดรหัสโครโมโซมให้เป็นคำตอบในเลขฐานสิบ เพื่อนำคำตอบไปประเมินค่าคำตอบในขั้นตอนถัดไป ได้ดังสมการที่ (5.3)

$$X_i = L_i + V_i\left(\frac{U_i - L_i}{2^{n_i} - 1}\right) \tag{5.3}$$

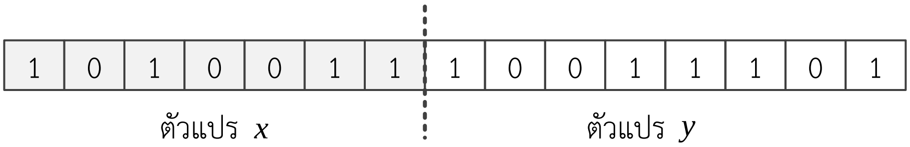
โดย X_i คือ คำตอบของตัวแปร i ในเลขฐานสิบ

ตัวอย่าง เช่น หากต้องการคำตอบตัวแปรต่อเนื่อง x ให้มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 (U_i = 1, L_i = 0) ตัวแปรต่อเนื่อง y ให้มีค่าอยู่ในช่วง -1 ถึง 1 (U_i = -1, L_i = 1) และคำตอบต้องมีความแม่นยำถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 2 ($m = 2$) เมื่อคำนวณความยาวบิตสำหรับเข้ารหัสของตัวแปร x และ y ตามสมการที่ (5.1) จะได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ (5.4) และ (5.5) ตามลำดับ

$$\text{ตัวแปร } x : \quad 64 = 2^6 \leq 100 < 2^7 = 128 \tag{5.4}$$

$$\text{ตัวแปร } y : \quad 128 = 2^7 \leq 200 < 2^8 = 256 \tag{5.5}$$

จากสมการที่ (5.4) และ (5.5) พบว่าตัวแปร x และ y ต้องใช้โครโมโซมที่มีความยาว 7 บิต และ 8 บิตตามลำดับในการเข้ารหัส หลังจากกำหนดความยาวของโครโมโซมในแต่ละตัวแปรแล้ว จึงนำมาเข้ารหัสด้วยระบบเลขฐานสอง ตัวอย่างโครโมโซมของตัวแปร x และ y แสดงดังภาพที่ 5.4



ภาพที่ 5.4 ตัวอย่างโครโมโซมของตัวแปร x และ y

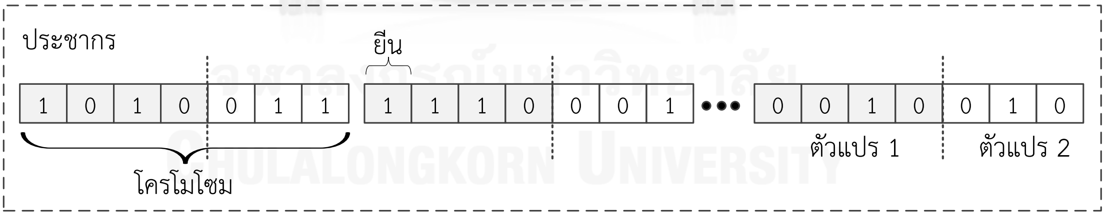
จากตัวอย่างโครโมโซมของตัวแปร x และ y ในภาพที่ 5.4 สามารถถอดรหัสให้เป็นคำตอบในเลขฐานสิบตามสมการที่ (5.3) ได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างการถอดรหัสคำตอบของตัวแปร x และ y

ตัวแปร	รหัสโครโมโซม	ค่ารหัสโครโมโซม (V_i)	คำตอบ (X_i)
x	1 0 1 0 0 1 1	$1010011_2 = 83_{10}$	0.6535_{10}
y	1 0 0 1 1 1 0 1	$10011101_2 = 157_{10}$	-0.3843_{10}

5.2.2 การสร้างประชากรเริ่มต้น

การสร้างประชากรเริ่มต้นเป็นการกำหนดรูปแบบของคำตอบในรูปโครโมโซม ด้วยการสุ่มค่าคำตอบที่อยู่ในขอบเขตของคำตอบตามจำนวนประชากรที่กำหนดไว้ แล้วทำการเข้ารหัสค่าคำตอบเหล่านั้นให้อยู่ในรูปของโครโมโซม ซึ่งโครโมโซมแต่ละตัวประกอบไปด้วยยีน (บิต) ที่เรียงต่อกัน ดังภาพที่ 5.5



ภาพที่ 5.5 ตัวอย่างการสร้างประชากรเริ่มต้น

การกำหนดประชากรเริ่มต้นที่ดีต้องมีจำนวนโครโมโซมที่ไม่มากจนทำให้เสียเวลาในการคำนวณ แต่ก็ต้องไม่น้อยจนเกินไปเพื่อทำให้มีโอกาสเกิดการข้ามสายพันธุ์ที่หลากหลาย

5.2.3 การประเมินค่าความเหมาะสม

หลังจากการถอดรหัสโครโมโซมให้เป็นค่าคำตอบแล้ว คำตอบดังกล่าวจะถูกนำไปประเมินค่าความเหมาะสมด้วยฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสม เพื่อกำหนดค่าความเหมาะสมให้กับโครโมโซม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

แต่ละตัว และเปรียบเทียบกันเองภายในกลุ่มประชากรทั้งหมด ค่าความเหมาะสมเหล่านี้ถูกนำไปใช้เป็นมาตรวัด เพื่อใช้ในการตัดสินใจคัดเลือกโครโมโซมที่ใช้ในการสืบสายพันธุ์ต่อไป ดังนั้น การเลือกวิธีการประเมิน และการกำหนดฟังก์ชันประเมินค่าความเหมาะสมอย่างเหมาะสม จะช่วยให้การค้นหาคำตอบเป็นไปอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

โดยทั่วไปฟังก์ชันประเมินค่าความเหมาะสมขึ้นอยู่กับฟังก์ชันเป้าหมาย เช่น หากต้องการให้มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาน้อยที่สุด โดยการคัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุดต้องประเมินมาจากค่าความเหมาะสม ดังนั้น คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหานี้ต้องทำให้ค่าความเหมาะสมสูงสุด จึงกำหนดให้ฟังก์ชันความเหมาะสมมีค่าเป็นส่วนกลับของฟังก์ชันเป้าหมาย ดังสมการที่ (5.6)

$$f(x) = \frac{1}{F(x)} \tag{5.6}$$

โดย $f(x)$ คือ ค่าความเหมาะสมของตัวแปร x

$F(x)$ คือ ค่าฟังก์ชันเป้าหมายของตัวแปร x

5.2.4 การคัดเลือกประชากรที่เด่นที่สุด

การดำเนินการทางพันธุกรรมเป็นกระบวนการที่อาศัยความน่าจะเป็นในการถ่ายทอดประชากรจากรุ่นหนึ่งไปยังอีกรุ่นหนึ่ง จึงทำให้ไม่มีหลักประกันใดเลยที่บ่งบอกว่า ประชากรในรุ่นถัดไปจะเป็นประชากรที่ดีกว่ารุ่นก่อนหน้า และในบางครั้งก็อาจทำให้สูญเสียโครโมโซมที่ดีที่สุดไปในระหว่างการถ่ายทอดอีกด้วย จากปัญหานี้เองจึงเกิดแนวคิดที่ควรเก็บโครโมโซมที่ดีที่สุดในแต่ละรอบของการถ่ายทอดเอาไว้เพื่อส่งต่อไปในรอบถัดไป เพื่อเป็นหลักประกันว่าโครโมโซมที่ดีที่สุดในรอบถัดไปจะดีกว่าในรอบก่อนหน้านี้เสมอ หลักการนี้เรียกว่า อภิชนนิยม หรืออิลิทิสซึ็ม (Elitism)

5.2.5 การคัดเลือกสายพันธุ์

การคัดเลือกสายพันธุ์เป็นขั้นตอนที่คัดเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุดภายในกลุ่มประชากรทั้งหมด ซึ่งโครโมโซมเหล่านี้ถูกนำไปใช้เป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ เพื่อใช้ในการกำหนดลูกหลานในรุ่นถัดไป การคัดเลือกสายพันธุ์พิจารณาจากค่าความเหมาะสมของโครโมโซมแต่ละตัว ถ้าโครโมโซมใดมีค่าความเหมาะสมสูงก็มีโอกาสที่อยู่รอดมาก ส่วนโครโมโซมใดมีค่าความเหมาะสมน้อยก็มีโอกาสอยู่รอดน้อย วิธีการคัดเลือกสายพันธุ์ที่นิยมใช้คือ การสุ่มแบบวงล้อรูเล็ท (Roulette wheel)

ขั้นแรกต้องทำการสร้างวงล้อรูเล็ท ด้วยการกำหนดค่าความเหมาะสมของโครโซมแต่ละโครโซมอย่างเป็นสัดส่วน เพื่อกำหนดโอกาสที่โครโมโซมแต่ละตัวถูกคัดเลือก ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5.7)

$$P_i = \left(\frac{f_i}{\sum_{i=1}^{n} f_i}\right) \times 100 \tag{5.7}$$

โดย P_i คือ โอกาสที่โครโมโซม i ถูกคัดเลือก (เปอร์เซ็นต์)

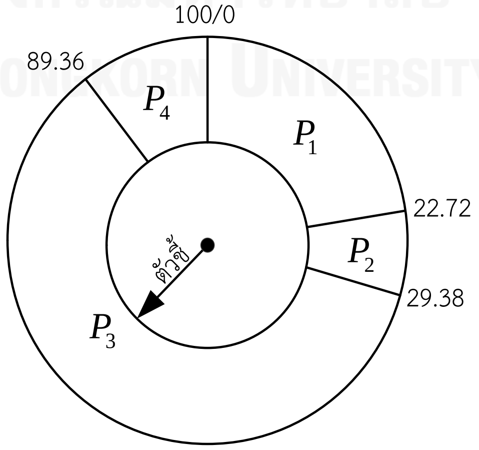
f_i คือ ค่าความเหมาะสมของโครโมโซมที่ i

n คือ จำนวนประชากรโครโมโซมทั้งหมด

หลังจากนั้นโอกาสที่โครโมโซมถูกคัดเลือกจะถูกแปลงไปยังบนวงล้อรูเล็ทภายในช่วง 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ โดยขนาดบนวงล้อรูเล็ทมีความสัมพันธ์กับค่าโอกาสของโครโมโซมนั้นๆ เช่น หากโครโมโซมตัวไหนมีโอกาสมากก็ย่อมมีพื้นที่บนวงล้อรูเล็ทมาก สำหรับขั้นตอนในการคัดเลือกเริ่มจากการสุ่มตัวเลขในช่วง 0 ถึง 100 เพื่อเปรียบเทียบกับโอกาสสะสมที่โครโมโซมจะถูกคัดเลือก หากค่าที่สุ่มมาอยู่ในช่วงของโครโมโซมใด โครโมโซมนั้นจะได้รับการคัดเลือก ตัวอย่างเช่น หากกำหนดให้โครโมโซมมีค่าความเหมาะสมตามตารางที่ 5.2 สามารถสร้างวงล้อรูเล็ทได้ดังภาพที่ 5.6

ตารางที่ 5.2 ตัวอย่างการสร้างวงล้อรูเล็ท

ลำดับ	โครโมโซม	ค่าความเหมาะสม	โอกาสที่โครโซมถูกคัดเลือก	อันดับความเหมาะสม
1	11010	0.005917	22.72 %	2
2	11000	0.001736	6.66 %	4
3	10000	0.015625	59.98 %	1
4	10011	0.002770	10.63 %	3
ผลรวม		**0.026048**	**100**	-



ภาพที่ 5.6 ตัวอย่างวงล้อรูเล็ท

การสุ่มตัวเลขเพื่อคัดเลือกโครโมโซมจะดำเนินการไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้ต้นกำเนิดสายพันธุ์เท่ากับจำนวนที่ต้องการ ดังนั้น สำหรับการคัดเลือกต้นกำเนิดสายพันธุ์จำนวน N โครโมโซมต้องหมุนวงล้อรูเล็ททั้งหมด N ครั้ง และจากภาพที่ 5.6 สังเกตได้ชัดว่าโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมสูงจะมีโอกาสที่ถูกคัดเลือกได้มากกว่าโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมต่ำ

5.2.6 การดำเนินการทางพันธุกรรม

หลังจากกระบวนการคัดเลือกสายพันธุ์ได้ดำเนินไปจนเสร็จสมบูรณ์ โครโมโซมลูกหลานถูกสร้างขึ้นมาใหม่จากโครโมโซมที่ได้คัดเลือกมา ซึ่งถูกคาดหวังว่าโครโมโซมลูกหลานที่เกิดขึ้นมานั้นจะได้รับส่วนดีของโครโมโซมเริ่มต้นด้วยการดำเนินการทางพันธุกรรม โดยทั่วไปการดำเนินการทางพันธุกรรมที่นิยมใช้มี 2 ประเภท คือ (1) การข้ามสายพันธุ์ และ (2) การผ่าเหล่า

5.2.6.1 การข้ามสายพันธุ์

การข้ามสายพันธุ์ (Crossover) เป็นกระบวนการสร้างประชากรรุ่นใหม่โดยอาศัยการแลกเปลี่ยนข้อมูลในยีน (บิต) ระหว่างโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์ (พ่อแม่) จำนวน 2 โครโมโซมเพื่อสร้างโครโมโซมลูกหลานที่เกิดใหม่จำนวน 2 โครโมโซม โครโมโซมลูกหลานที่ได้รับจะถูกฝังพันธุกรรมจากต้นกำเนิดสายพันธุ์อยู่ในตัว โดยปกติการข้ามสายพันธุ์ถูกกำหนดด้วยความน่าจะเป็นค่าหนึ่งที่เรียกว่า ความน่าจะเป็นของการข้ามสายพันธุ์ (Probability of crossover: P_C) ซึ่งปกติมีค่าต่ำหรืออาจกล่าวได้ว่า ความน่าจะเป็นของการข้ามสายพันธุ์ได้ถูกกำหนดขึ้นเพื่อบอกว่าโครโมโซมมีการข้ามสายพันธุ์มากน้อยเพียงใด

กระบวนการข้ามสายพันธุ์มีหลายรูปแบบ ในแต่ละรูปแบบมีขั้นตอนพื้นฐานที่เหมือนกันแตกต่างกันเฉพาะการสุ่มตำแหน่งการข้ามสายพันธุ์เท่านั้น โดยทั่วไปได้แบ่งกระบวนการข้ามสายพันธุ์ออกเป็น 3 รูปแบบ คือ (1) การข้ามสายพันธุ์แบบจุดเดียว, (2) การข้ามสายพันธุ์แบบหลายจุด และ (3) การข้ามสายพันธุ์แบบยูนิฟอร์ม กระบวนการข้ามสายพันธุ์ทั้งสามรูปแบบมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

<u>ขั้นตอนที่ 1</u> สุ่มเลขจริงในช่วง 0 ถึง 1 และตรวจสอบกับความน่าจะเป็นของการข้ามสายพันธุ์ว่ามีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า

1) ถ้าเลขที่สุ่มขึ้นมามีค่าน้อยกว่าความน่าจะเป็นของการข้ามสายพันธุ์ก็ไม่ทำการข้ามสายพันธุ์
2) ถ้าเลขที่สุ่มขึ้นมามีค่ามากกว่าความน่าจะเป็นของการข้ามสายพันธุ์ก็จะทำการข้ามสายพันธุ์

<u>ขั้นตอนที่ 2</u> สุ่มตำแหน่งในการข้ามสายพันธุ์ สามารถแบ่งได้ 3 รูปแบบ

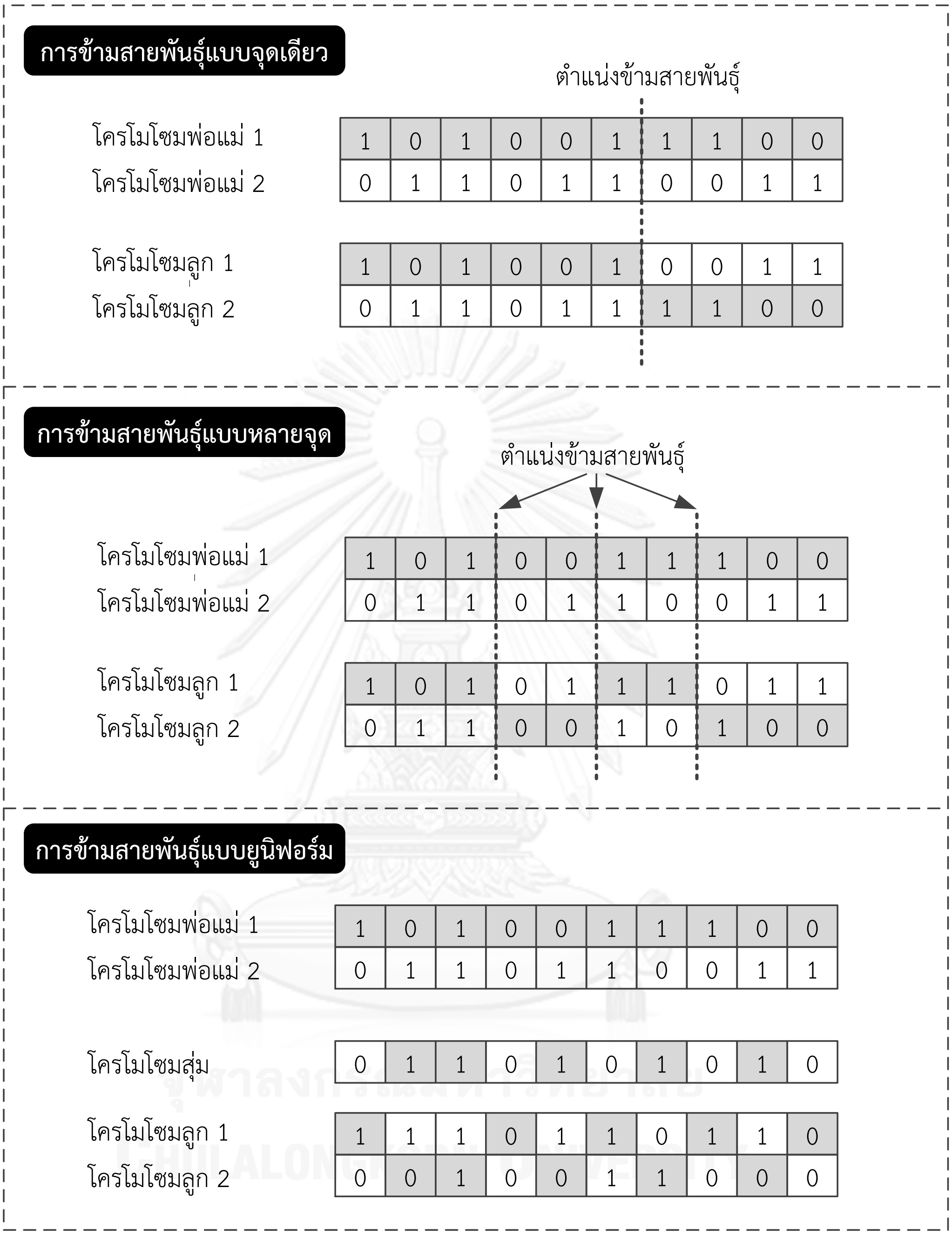
- <u>การข้ามสายพันธุ์แบบจุดเดียว</u> สุ่มตำแหน่งในการข้ามสายพันธุ์เพียงตำแหน่งเดียว โดยการข้ามสายพันธุ์จะเกิดหลังตำแหน่งในการข้ามสายพันธุ์เป็นต้นไป
- <u>การข้ามสายพันธุ์แบบหลายเดียว</u> สุ่มตำแหน่งในการข้ามสายพันธุ์มาหลายตำแหน่งเดียว โดยการข้ามสายพันธ์จะเกิดขึ้นในช่วงของตำแหน่งในการข้ามสายพันธุ์
- <u>การข้ามสายพันธุ์แบบยูนิฟอร์ม</u> สุ่มบิตโครโมโซม 0 หรือ 1 ที่มีความยาวเท่ากับความยาวบิตของโครโมโซมพ่อและแม่ขึ้นมาหนึ่งชุด โดยการข้ามสายพันธุ์จะเกิดเฉพาะตำแหน่งของบิตโครโมโซมที่ได้จากการสุ่มที่มีค่าบิตเป็น 1 เท่านั้น

ตัวอย่างกระบวนการข้ามสายพันธุ์ทั้งสามรูปแบบแสดงได้ดังภาพที่ 5.7

<u>ขั้นตอนที่ 3</u> แลกเปลี่ยนบิตโครโมโซมระหว่างโครโมโซมพ่อและแม่ ตามตำแหน่งในการข้ามสายพันธุ์ในแต่ละกรณีดังที่อธิบายในขั้นตอนที่ 2 และเรียกโครโมโซมที่กำเนิดใหม่ว่าโครโมโซมลูก

ขั้นตอนการข้ามสายพันธุ์ทั้งหมดนี้จะถูกกระทำซ้ำ จนได้โครโมโซมชุดใหม่ขึ้นมาครบตามจำนวนประชากรที่ต้องการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



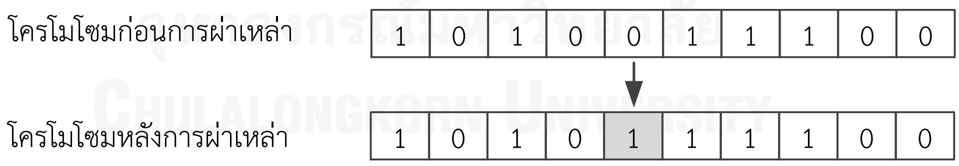
ภาพที่ 5.7 ตัวอย่างการข้ามสายพันธุ์ในแต่ละรูปแบบ

จากภาพที่ 5.7 สังเกตได้ว่าการข้ามสายพันธุ์ในแต่ละประเภทมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน การข้ามสายพันธุ์แบบจุดเดียวจะให้ผลดีสำหรับปัญหาที่มีตัวแปรไม่มากนัก หรือปัญหาที่มีความยาวของบิตโครโมโซมน้อยๆ แต่เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้มีจำนวนตัวแปรมากขึ้น การข้ามสายพันธุ์แบบจุดเดียวจะให้ผลได้ที่ไม่ดีนัก เพราะการข้ามสายพันธุ์แบบจุดเดียวจะแลกเปลี่ยนบิตโครโมโซมในตำแหน่งที่อยู่หลังตำแหน่งข้ามสายพันธุ์ ทำให้บิตโครโมโซมที่อยู่ในตำแหน่งแรกของโครโมโซมพ่อแม่

ไม่มีโอกาสได้แลกเปลี่ยนบิตกับโครโมโซมอื่นเลย สำหรับการข้ามสายพันธุ์แบบหลายจุดจะทำให้โครโมโซมมีคลามหลากหลายมากขึ้น มีผลให้การลู่เข้าของคำตอบสามารถครอบคลุมพื้นที่ได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ด้วยการแลกเปลี่ยนบิตที่มีลักษณะเป็นช่วงอาจทำให้โครโมโซมลูกมีโอกาสเบี่ยงเบนออกไปจากคำตอบได้เช่นกัน ซึ่งแต่ต่างจากการข้ามสายพันธุ์แบบยูนิฟอร์มที่ทุกบิตในโครโมโซมมีโอกาสแลกเปลี่ยนบิตด้วยสัดส่วนที่เท่ากัน ดังนั้น การแลกเปลี่ยนบิตของการข้ามสายพันธุ์รูปแบบนี้จึงไม่ขึ้นกับตำแหน่งข้ามสายพันธุ์ และขนาดของตัวแปรที่บ่งบอกด้วยความยาวของโครโมโซมพ่อแม่ อีกทั้งยังสร้างโครโมโซมลูกให้ครอบคลุมพื้นที่คำตอบมากขึ้น และไม่เบี่ยงเบนไปจากคำตอบเดิมมากนัก

5.2.6.2 การผ่าเหล่า

การผ่าเหล่า (Mutation) เป็นวิธีการแปรผันยีนในโครโมโซม ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กลับการกลายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตนั่นเอง การผ่าเหล่ายังทำให้เกิดความหลากหลายมากขึ้นในกลุ่มประชากร มีผลทำให้สามารถป้องกันการลู่เข้าของคำตอบก่อนกำหนด โดยปกติการผ่าเหล่าถูกกำหนดด้วยความน่าจะเป็นค่าหนึ่งที่เรียกว่า ความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่า (Probability of mutation: P_M) ซึ่งปกติมีค่าสูง สำหรับการตรวจสอบการผ่าเหล่าของบิตในโครโมโซมสามารถทำได้ด้วยการสุ่มเลขจริงในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 ในทุกๆ บิตของโครโมโซม แล้วเปรียบเทียบเลขที่สุ่มในแต่ละบิตกับความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่า ถ้าเลขที่สุ่มในบิตตำแหน่งใดมีค่าต่ำกว่าความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่าบิตตำแหน่งนั้นก็จะไม่ผ่าเหล่า แต่ถ้าเลขที่สุ่มในบิตตำแหน่งใดมีค่าสูงกว่าความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่าก็จะเกิดการผ่าเหล่าที่บิตตำแหน่งนั้น โดยเปลี่ยนบิตที่ตำแหน่งนั้นจาก 0 เป็น 1 หรือ จาก 1 เป็น 0 ตัวอย่างเช่น หากตรวจสอบแล้วพบว่ามีเพียงบิตที่ 5 ที่มีความน่าจะเป็นสูงกว่าความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่า จึงทำให้บิตที่ 5 เกิดการผ่าเหล่า ดังภาพที่ 5.8



ภาพที่ 5.8 ตัวอย่างการผ่าเหล่าที่บิต 5

5.2.7 เงื่อนไขการหยุด

การค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมจะหยุดกระบวนค้นหาก็ต่อเมื่อครบจำนวนรุ่นการถ่ายทอดสูงสุดที่กำหนดเอาไว้ หรือค่าฟังก์ชันเป้าหมายในแต่ละรุ่นไม่มีการเปลี่ยนแปลงครบตามจำนวนครั้งที่กำหนดไว้ หรือ พบคำตอบที่ใกล้เคียงกันในแต่ละรุ่น เช่น โครโมโซมในแต่ละรุ่นมีค่าบิตที่เหมือนกันถึงร้อยละ 95 เป็นต้น

จากขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม ตามที่ได้นำเสนอไปข้างต้นนั้น สามารถสรุปกระบวนการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดทั้งหมด 7 ขั้นตอน ได้ดังต่อไปนี้

<u>ขั้นตอนที่ 1</u> การเข้ารหัสและการถอดรหัส

<u>ขั้นตอนที่ 2</u> กำหนดประชากรเริ่มต้น

<u>ขั้นตอนที่ 3</u> การประเมินหาค่าความเหมาะสม

<u>ขั้นตอนที่ 4</u> การคัดเลือกประชากรที่ดีที่สุด: คัดเลือกโครโมโซมที่มีความเหมาะสมมากที่สุดไว้ 2 โครโมโซม (อิลิทิสซึม)

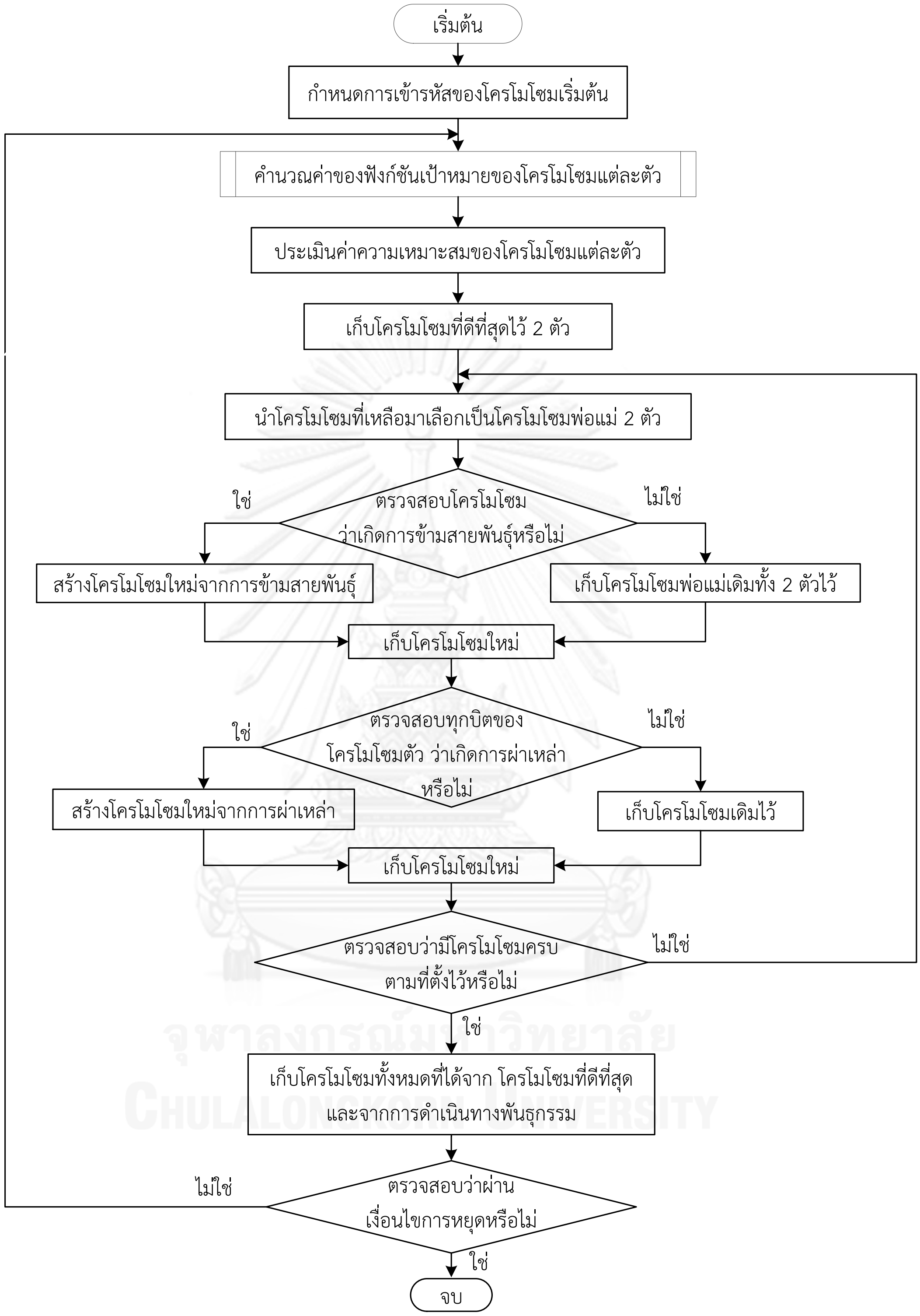
<u>ขั้นตอนที่ 5</u> การคัดเลือกสายพันธุ์: นำโครโซมที่ไม่ได้รับคัดเลือกในขั้นตอนที่ 4 มาดำเนินการคัดเลือกสายพันธุ์

<u>ขั้นตอนที่ 6</u> การดำเนินการทางพันธุกรรม: นำโครโมโซมที่ถูกคัดเลือกสายพันธุ์ในขั้นตอนที่ 5 มาดำเนินการทางพันธุกรรม ด้วยการข้ามสายพันธุ์และการผ่าเหล่า

<u>ขั้นตอนที่ 7</u> การประเมินเงื่อนไขการหยุด: นำโครโมโซมที่รับการคัดเลือกประชากรที่ดีที่สุดในขั้นตอนที่ 4 รวมกับ โครโมโซมลูกที่ได้รับการดำเนินการทางพันธุกรรมในขั้นตอนที่ 6 มาประเมินเงื่อนไขการหยุด หากไม่เป็นไปตามเงื่อนไขการหยุดให้เริ่มการค้นหาคำตอบใหม่ตั้งแต่ขั้นตอนที่ 3

เพื่อความเข้าใจที่มากขึ้น จึงสรุปขั้นตอนโดยละเอียดของการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม ซึ่งแสดงได้ดังแผนผังในภาพที่ 5.9

CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 5.9 ขั้นตอนการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม

5.3 ตัวอย่างการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม

เพื่อความเข้าใจในกระบวนการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรมที่มากขึ้น จึงได้ยกตัวอย่างการหาจุดสูงสุดของฟังก์ชัน ดังต่อไปนี้

ตัวอย่าง จงหาจุดสูงสุดของฟังก์ชัน

$$F(x,y)=\frac{1}{(x+0.5)^2+2(y-0.5)^2-0.3\cos(3x)-0.4\cos(4y)+0.8} \tag{5.8}$$

โดยที่ $-1\le x\le 1$, $-1\le y\le 1$

โดยในหัวข้อนี้นำเสนอขั้นตอนการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม เพียงในรุ่นแรกเท่านั้น ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่1 การเข้ารหัสและถอดรหัส

ปัญหานี้ต้องการความละเอียดของตัวแปรถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 5 ดังนั้น อาศัยหลักการที่ตามหัวข้อที่ 5.2.1 สามารถกำหนดโครโมโซมของตัวแปร x และตัวแปร y ให้มีความยาวเท่ากับ 18 บิต ดังสมการที่ (5.9) และสำหรับการถอดรหัสโครโมโซม สามารถถอดรหัสได้ดังสมการที่ (5.10)

$$131,072=2^{17}\le(1-(-1))\times10^5<2^{18}=262,144 \tag{5.9}$$

$$X_i=-1+V_i\left(\frac{1-(-1)}{2^{18}-1}\right) \tag{5.10}$$

โดย X_i คือ คำตอบของตัวแปร i ในเลขฐานสิบ

V_i คือ ค่ารหัสโครโมโซมของตัวแปร i ในเลขฐานสิบที่ได้จากการถอดรหัสบิตโครโมโซมที่เป็นเลขฐานสอง ($b_n b_{n-1} \ldots b_0$)

ดังนั้น ความยาวโครโมโซมของ 1 ชุดคำตอบ ประกอบด้วยตัวแปร x 18 บิต และตัวแปร y 18 บิต รวมทั้งสิ้นยาว 36 บิต

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างประชากรเริ่มต้น

การสร้างประชากรเริ่มต้นใช้วิธีการสุ่มคำตอบในแต่ละบิตของโครโมโซมตามหลักการที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.2.2 และสำหรับปัญหานี้ได้กำหนดจำนวนประชากรเป็น 50 โครโมโซม

<u>ขั้นตอนที่ 3</u> การประเมินค่าความเหมาะสม

เนื่องจากปัญหาในตัวอย่างนี้เป็นการหาจุดสูงสุดของฟังก์ชัน อาศัยหลักการที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.2.3 สามารถใช้ค่าของฟังก์ชันเป้าหมายเป็นค่าความเหมาะสมได้

<u>ขั้นตอนที่ 4</u> การคัดเลือกประชากรที่ดีที่สุด

เพื่อเป็นหลักประกันที่บ่งบอกถึงว่าประชากรในรุ่นถัดไปจะมีประชากรที่ดีกว่ารุ่นก่อนหน้า จึงเลือกโครโมโซมที่ดีสุดในแต่ละรอบไว้ก่อน 2 โครโมโซม ดังหลักการที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.2.4

<u>ขั้นตอนที่ 5</u> การคัดเลือกสายพันธุ์

นำโครโซมที่ไม่ได้รับคัดเลือกในขั้นตอนที่ 4 มาดำเนินการคัดเลือกสายพันธุ์ตามหลักการที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.2.5

<u>ขั้นตอนที่ 6</u> การดำเนินการทางพันธุกรรม

นำโครโมโซมที่ถูกคัดเลือกในขั้นตอนที่ 5 มาดำเนินการทางพันธุกรรม

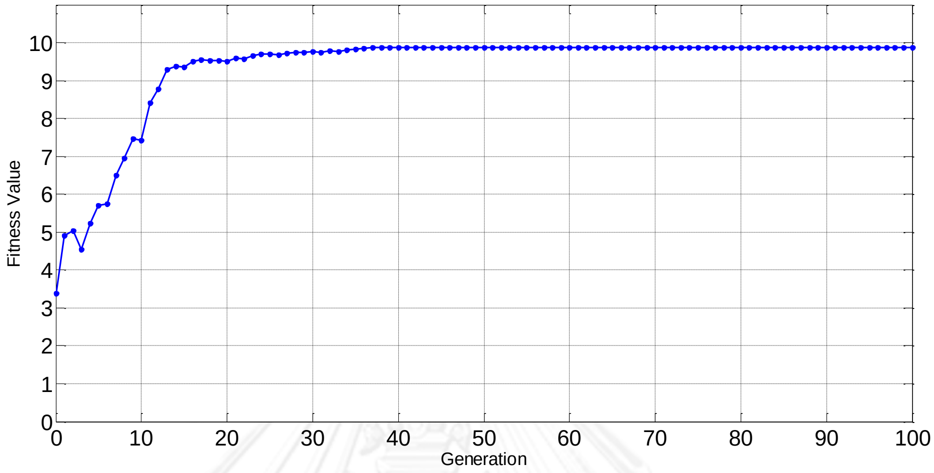
- <u>การข้ามสายพันธุ์</u> ปัญหานี้เลือกใช้การข้ามสายพันธุ์แบบยูนิฟอร์ม และมีความน่าจะเป็นในการข้ามสายพันธุ์เท่ากับ 0.2 เริ่มต้นด้วยการสุ่มความน่าจะเป็นในการข้ามสายพันธุ์ แล้วตรวจสอบกับความน่าจะเป็นในการข้ามสายพันธุ์ ตามหลักการที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.2.6.1
- <u>การผ่าเหล่า</u> ปัญหานี้มีความน่าจะเป็นในการผ่าเหล่าเท่ากับ 0.9 เริ่มต้นด้วยการสุ่มความน่าจะเป็นในการผ่าเหล่าในแต่ละบิตของโครโมโซม แล้วตรวจสอบกับความน่าจะเป็นในการผ่าเหล่า ตามหลักการที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.2.6.2

การดำเนินการทางพันธุกรรมจะดำเนินการจนครบตามจำนวนประชากรตั้งต้นที่ไม่ได้รวมจำนวนประชากรที่ดีที่สุดในขั้นตอนที่ 4 ($N-2$ ตัว) หากกำหนดให้มีประชากรเริ่มต้น N ตัว

<u>ขั้นตอนที่ 7</u> การประเมินเงื่อนไขการหยุด

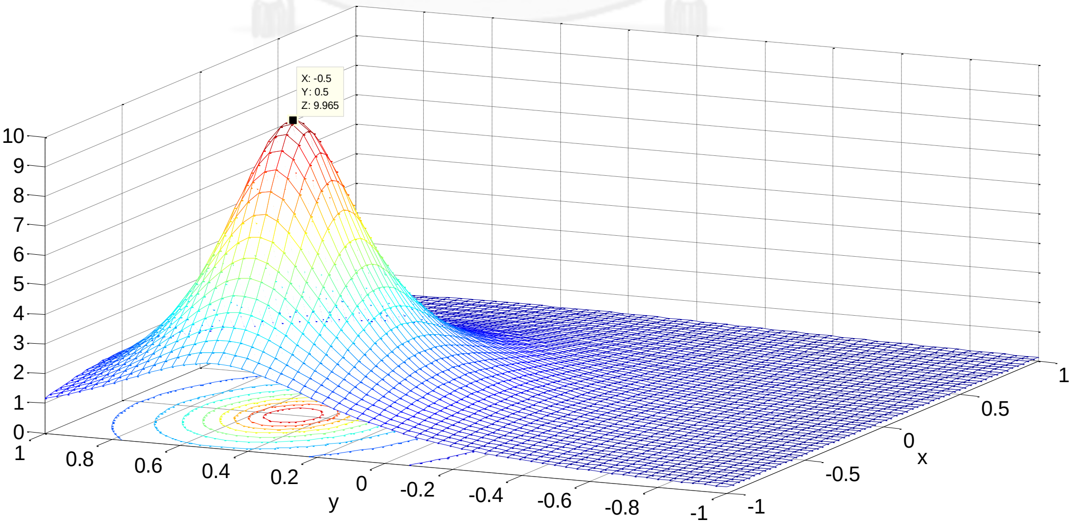
นำโครโมโซมที่รับการคัดเลือกประชากรที่ดีที่สุดในขั้นตอนที่ 4 รวมกับ โครโมโซมลูกที่ได้รับการดำเนินการทางพันธุกรรมในขั้นตอนที่ 6 มาประเมินเงื่อนไขการหยุด ตามหลักการที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.2.7 สำหรับตัวอย่างนี้ได้กำหนดเงื่อนไขการหยุด ดังนี้ เมื่อถึงจำนวนรุ่นสูงสุด คือ 100 รุ่น หรือค่าฟังก์ชันเป้าหมายในแต่ละรุ่นไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิน 10^{-4} โดยหากไม่เป็นไปตามเงื่อนไขการหยุดให้ดำเนินการค้นหาคำตอบใหม่ตั้งแต่ขั้นตอนที่ 3

จากค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรมตามตอมขั้นตอนที่ 1 ถึง 7 พบว่าคำตอบของสมการที่ได้รับ คือ $x = -0.4938213$ และ $y = 0.5184032$ โดยค่าของฟังก์ชันเป้าหมาย ($F(x, y)$) มีค่าเท่ากับ 9.8933748



ภาพที่ 5.10 การลู่เข้าของค่าความเหมาะสมของฟังก์ชันตัวอย่าง

เมื่อเปรียบเทียบกับระนาบของฟังก์ชันตัวอย่างที่ได้จากฟังก์ชัน ezmeshc ในโปรแกรม MATLAB ดังภาพที่ 5.11 สามารถหาจุดสูงสุดของฟังก์ชันได้ที่ $x = -0.5$ และ $y = 0.5$ โดยค่าของฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าเป็น 9.9654725 ซึ่งพบว่ามีความสอดคล้องกับคำตอบที่ได้รับจากกระบวนการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม



ภาพที่ 5.11 ระนาบของฟังก์ชันตัวอย่าง

บทที่ 6
การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด

จากการศึกษาพฤติกรรมการทำงานและการบำรุงรักษาอุปกรณ์ ตลอดจนการประเมินความเชื่อถือได้ ตามที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 ถึง 4 พบว่า เมื่อใช้งานอุปกรณ์ในระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น ทำให้อุปกรณ์เหล่านั้นมีโอกาสเกิดเหตุกาณ์ล้มเหลวสูงขึ้น และส่งผลให้อุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ที่ต่ำลง อย่างไรก็ตาม หากกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ให้มีความเหมาะสมภายใต้ค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุด ย่อมทำให้อุปกรณ์มีจำนวนเหตุการณ์ล้มเหลวลดลง และยังสามารถควบคุมความเชื่อถือได้ให้อยู่ในระดับที่พึงต้องการ เมื่อนำหลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่ได้ศึกษา มาประยุกต์เข้ากับแนวคิดในการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า สามารถกำหนดปัญหานี้ให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ และยังสามารถนำกระบวนการค้นหาคำตอบด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรมตามที่ได้เสนอในบทที่ 5 มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการค้นหาคำตอบของปัญหานี้ได้

ดังนั้น บทนี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองที่ใช้สำหรับการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ การประเมินผลกระทบจากการบำรุงรักษาที่มีต่ออุปกรณ์ และการจำลองปัญหาการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ ตลอดจนการประยุกต์การค้นหาคำตอบด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรมเข้ากับปัญหาการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด ซึ่งสามารถแบ่งการนำเสนอออกเป็น 5 ส่วน คือ (1) แนวคิดการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์, (2) แบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับการบำรุงรักษาอุปกรณ์, (3) การประเมินผลกระทบจากการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่มีต่อสถานีไฟฟ้า, (4) สมมุติฐานทางเศรษฐศาสตร์ และ (5) การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด

6.1 แนวคิดการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์

เมื่อมีการใช้งานอุปกรณ์ที่ยาวนานขึ้นย่อมส่งผลให้อุปกรณ์มีการเลื่อมสภาพ จึงมีโอกาสที่อุปกรณ์จะเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวได้มากขึ้น โดยเฉพาะอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่ทำหน้าหลักในการเพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้า หากเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่งสามารถนำไปสู่การหยุดจ่ายกำลังไฟฟ้า ตั้งแต่ก่อให้เกิดความไม่สะดวกสบายแก่ผู้ใช้ไฟฟ้าในชั่วขณะ ไปจนกระทั่งการเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างครั้งใหญ่ ซึ่งทำให้ระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ที่ลดลง

ดังนั้น หากต้องการที่จะลดความถี่ หรือระยะเวลาของการเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวดังกล่าว ผู้ให้บริการไฟฟ้าจำเป็นที่ต้องลงทุนอย่างชาญฉลาด เพื่อให้การปรับปรุงความเชื่อถือได้เป็นไปอย่างรอบด้านและคุ้มค่าต่อการลงทุนมากที่สุด สำหรับการปรับปรุงความเชื่อถือได้นั้นมีหลากหลายวิธีการ แต่วิธีการที่นิยมใช้มากที่สุด คือ การบำรุงรักษาอุปกรณ์

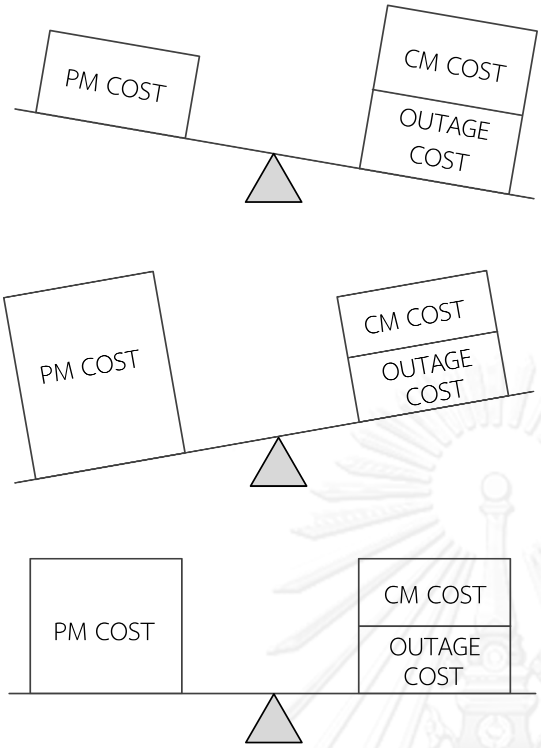
คำถามหลักที่เกิดขึ้นจากแนวความคิดข้างต้นดังกล่าว คือ ควรจะมีการลงทุนเท่าไร และการตัดสินใจควรอยู่บนพื้นฐานอะไรสำหรับการปรับปรุงระบบไฟฟ้าให้ดีขึ้น แนวโน้มที่สำคัญของคำตอบเหล่านี้ คือ การประเมินคุณค่าของความเชื่อถือได้ เพื่อช่วยในการตัดสินใจทางเลือกที่มีอยู่ และช่วยทำให้มั่นใจว่าสิ่งที่ได้ลงทุนไปนั้น ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการปรับปรุงความเชื่อถือได้อย่างแท้จริง ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ จึงต้องตระหนักและให้ความสนใจกับจำนวนเงินที่ลงทุนไปในการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกัน และการบำรุงรักษาแบบแก้ไขที่เกิดขึ้นนอกแผนงาน ตลอดจนมูลค่าความเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ ที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังได้รับการบำรุงรักษา

แนวคิดการวิเคราะห์การลงทุนในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ สามารถกำหนดได้จากค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่ผู้ให้บริการไฟฟ้าต้องสูญเสียไป ซึ่งประกอบด้วยค่าใช้จ่าย 3 ส่วน ดังนี้

(1) ค่าใช้จ่ายในสำหรับการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกัน ที่กำหนดตามแผนงาน (Preventive maintenance cost)
(2) ค่าใช้จ่ายสำหรับการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบแก้ไข ที่เกิดนอกแผนงาน (Corrective maintenance cost)
(3) มูลค่าความเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ (Outage cost)

ความสัมพันธ์ของค่าใช้จ่ายทั้งสามส่วนสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 6.1 โดยหากลงทุนในการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกันน้อยเกินไป ก็จะทำให้อุปกรณ์มีโนวแน้มเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวมาก ซึ่งนำไปสู่การเกิดไฟฟ้าดับบ่อยและยาวนาน นั่นคือ มูลค่าความเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบแก้ไขก็จะมีค่าสูง ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมมีค่าสูง ในทางกลับกัน มูลค่าความเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบแก้ไขจะลดลง ก็ต่อเมื่อความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเกิดมาจากปริมาณการลงทุนในการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกันที่เพิ่มสูงขึ้น แต่ก็กลับทำค่าใช้จ่ายรวมมีค่าสูงเช่นกัน นอกจากนี้ ในบางกรณีของการบำรุงรักษาแบบป้องกันตามแผนงาน อาจมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ทำให้ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ ซึ่งก็อาจเกิดมูลค่าความเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับได้เช่นกัน แต่ก็จะมีค่าน้อยมาก เนื่องจาก การบำรุงรักษาตามแผนงานต้องเตรียมการมาอย่างดี โดยเฉพาะการเตรียมอุปกรณ์สำรอง เพื่อที่นำมาใส่ทดแทนอุปกรณ์เดิมที่อยู่ในระบบไฟฟ้าในขณะที่ถูกนำออกมาบำรุงรักษา จึงทำให้ช่วงระยะเวลาที่เกิดไฟฟ้าน้อยมาก ประกอบกับสามารถแจ้งเตือนผู้ใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ทำการบำรุงรักษาอุปกรณ์ได้ จึงสามารถลดมูลค่าความเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับได้

ดังนั้น หากกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่ทำให้ค่าใช้จ่ายรวมในระบบต่ำที่สุด ต้นทุนส่วนที่เพิ่มขึ้นของผู้ให้บริการไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับปรุงความเชื่อถือได้ด้วยการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกัน จะถูกชดเชยอย่างเหมาะสมด้วยต้นทุนส่วนที่ลดลงของมูลค่าความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์นอกแผนงาน



ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน	น้อยเกินไป
ค่าใช้จ่ายในการบำรุงแบบแก้ไข	มีค่าสูง
มูลค่าความเสียหายจากไฟฟ้าดับ	มีค่าสูง
ค่าใช้จ่ายรวม	มีค่าสูง

ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน	มากเกินไป
ค่าใช้จ่ายในการบำรุงแบบแก้ไข	มีค่าต่ำ
มูลค่าความเสียหายจากไฟฟ้าดับ	มีค่าต่ำ
ค่าใช้จ่ายรวม	มีค่าสูง

ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน	เหมาะสม
ค่าใช้จ่ายในการบำรุงแบบแก้ไข	เหมาะสม
มูลค่าความเสียหายจากไฟฟ้าดับ	เหมาะสม
ค่าใช้จ่ายรวม	มีค่าต่ำ

<u>หมายเหตุ</u> ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน PM COST
ค่าใช้จ่ายในการบำรุงแบบแก้ไข CM COST
มูลค่าความเสียหายจากไฟฟ้าดับ OUTAGE COST

* สัดส่วนทั้งหมดของค่าใช้จ่ายเป็นเพียงการสมมุติขึ้นเท่านั้น ไม่มีนัยสำคัญใดๆ

ภาพที่ 6.1 ค่าใช้จ่ายสำหรับการวิเคราะห์การลงทุนในการบำรุงรักษาอุปกรณ์

อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ของค่าใช้จ่ายทั้งสามส่วนไม่ได้เป็นไปแบบเส้นตรง (Linear) จึงต้องมีวิธีการค้นหาคำตอบของปัญหาโดยเฉพาะไม่สามารถใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์ทั่วไปได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ประยุกต์การหาค้นหาคำตอบด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรมในการแก้ปัญหาการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะสม

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เริ่มต้นการกำหนดแผนการบำรุงรักษาเพียงหนึ่งอุปกรณ์ (ระดับอุปกรณ์) ก่อน หลังจากนั้นได้ขยายขอบเขตให้ครอบคลุมถึงอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าอันได้แก่ เซอร์กิตเบรกเกอร์ หม้อแปลงไฟฟ้า และบัสบาร์ (ระดับสถานีไฟฟ้า) สำหรับค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไข สามารถวิเคราะห์ผ่านการจำลองพฤติกรรมของอุปกรณ์ด้วยอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว และอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่เปลี่ยนไปภายหลังการบำรุงรักษา สำหรับมูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับเกิดขึ้นเฉพาะการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในระดับสถานีไฟฟ้าเท่านั้น โดยอาศัยการวิเคราะห์จากผลกระทบของการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าว่าส่งผลกระทบต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้า ณ จุดโหลดหรือไม่อย่างไร นอกจากนี้ ค่าใช้จ่ายทั้งหมดยังตั้งอยู่บนสมมุติฐานทางเศรษฐศาสตร์อีกด้วย

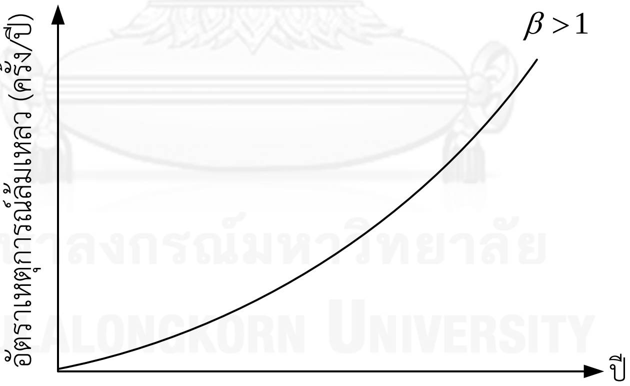
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6.2 แบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับการบำรุงรักษาอุปกรณ์

การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ทั้งในระดับอุปกรณ์และระดับสถานีไฟฟ้า จำเป็นต้องมีการจำลองพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ก่อน เพื่อใช้ในการกำหนดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขของแต่ละอุปกรณ์ แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบไปด้วย 4 แบบจำลอง คือ (1) แบบจำลองอัตราการเกิดเหตุการณ์ล้มเหลว, (2) แบบจำลองผลกระทบจากการบำรุงรักษา, (3) แบบจำลองการบำรุงรักษาแบบป้องกัน และ (4) แบบจำลองการบำรุงรักษาแบบแก้ไข

6.2.1 แบบจำลองอัตราการเกิดเหตุการณ์ล้มเหลว

เมื่ออุปกรณ์ถูกใช้งานในระยะเวลาที่ยาวนาน อุปกรณ์เหล่านั้นย่อมมีการเสื่อมสภาพตามกาลเวลา จึงส่งผลให้อุปกรณ์มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่สูงขึ้น นั่นคือ อุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ที่ลดลง และจากบทที่ 2 พบว่าหากต้องการให้อุปกรณ์มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่สูงขึ้น สามารถจำลองความน่าจะเป็นของการทำงานอุปกรณ์ผ่านการกระจายตัวแบบไวบูลล์ ที่มีพารามิเตอร์บ่งบอกรูปร่างของการแจกแจงแบบไวบูลล์มีค่ามากกว่า 1 (β>1) ดังนั้น ฟังก์ชันอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์จึงมีลักษณะดังภาพที่ 6.2



ภาพที่ 6.2 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ที่จำลองด้วยการกระจายตัวแบบไวบูลล์

อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ที่จำลองด้วยการกระจายตัวแบบไวบูลล์ สามารถคำนวณ ได้ดังสมการที่ (6.1)

$$\lambda_0(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^{\beta}} \quad (6.1)$$

โดย $\lambda_0(t)$ คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ (ครั้ง/ปี)

α คือ พารามิเตอร์บ่งบอกขนาด

β คือ พารามิเตอร์บ่งบอกรูปร่าง

6.2.2 แบบจำลองผลกระทบจากการบำรุงรักษา

เมื่อจำลองพฤติกรรมอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ที่สูงขึ้น ด้วยการกระจายตัวแบบไวบูลล์ที่พารามิเตอร์บ่งบอกรูปร่างมีค่ามากกว่า 1 (β>1) หากมีการบำรุงรักษาย่อมส่งผลโดยตรงต่ออัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์เช่นกัน ผลกระทบที่เกิดขึ้นภายหลังการบำรุงรักษาทำให้อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวมีแนวโน้มที่ลดลงภายในช่วงที่เป็นไปได้ และลดลงจนเป็นศูนย์เสมือนอุปกรณ์ที่สภาพใหม่ก็ต่อเมื่อมีการเปลี่ยนอุปกรณ์เท่านั้น

การบำรุงรักษาอุปกรณ์ตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่า “การบำรุงรักษาทำให้อุปกรณ์มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่ลดลง และลดลงจนเป็นศูนย์เสมือนอุปกรณ์ที่สภาพใหม่ก็ต่อเมื่อมีการเปลี่ยนอุปกรณ์เท่านั้น” ดังนั้น จึงสามารถคำนวณอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวภายหลังการบำรุงรักษาได้ดังสมการที่ (6.2)

$$\lambda(t_i) = \lambda_0(t_i) - \delta_i \qquad (6.2)$$

โดย $\lambda(t_i)$ คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ภายหลังการบำรุงรักษาครั้งที่ i (ครั้ง/ปี)

$\lambda_0(t_i)$ คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ก่อนการบำรุงรักษาครั้งที่ i (ครั้ง/ปี)

δ_i คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ลดลงจากการบำรุงรักษาครั้งที่ i (ครั้ง/ปี)

t_i คือ เวลาที่มีการบำรุงรักษาอุปกรณ์ครั้งที่ i (ครั้ง/ปี)

การบำรุงรักษาในแต่ละครั้งช่วยลดเพียงขนาดของอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว แต่ความรุนแรงของอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวยังมีลักษณะคงเดิม นั่นคือ ภายหลังการบำรุงรักษา การกระจายตัวของอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวมีลักษณะเหมือนเดิม เพียงแต่มีขนาดลดลงตามประสิทธิภาพของการบำรุงรักษาครั้งก่อนหน้า อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่ลดลงนั้นถูกกำหนดด้วยร้อยละของอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวก่อนการบำรุงรักษาที่เวลา t_i และร้อยละดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการบำรุงรักษาซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 100 ทั้งนี้ กรณีที่ประสิทธิภาพการบำรุงรักษาเป็นร้อยละ 0 และร้อยละ 100 หมายถึง อุปกรณ์ไม่ได้รับการบำรุงรักษาและได้รับการบำรุงรักษาจนมีสภาพเสมือนใหม่ตามลำดับ ซึ่งทั้ง 2 กรณีนี้ ไม่ถือว่าเป็นการบำรุงรักษา หากกำหนดให้ คือ ประสิทธิภาพการบำรุงรักษา (ร้อยละ) สามารถคำนวณอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่ลดลงในแต่ละครั้งได้ดังสมการที่ (6.3)

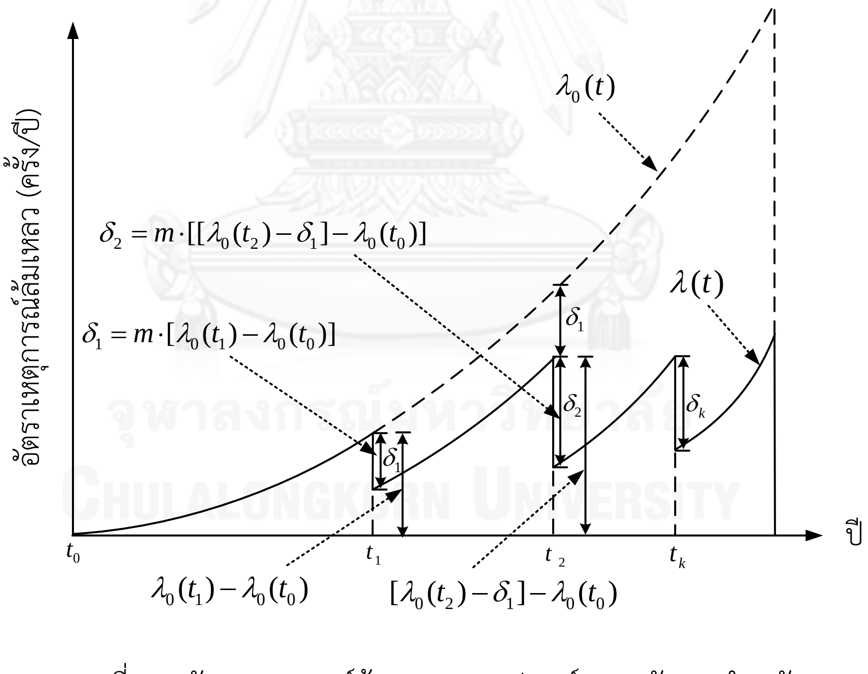
$$\delta_i = m \cdot \lambda_0(t_i) \quad , \ 0\% < m < 100\% \qquad (6.3)$$

อย่างไรก็ตาม อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่ลดลงย่อมถูกจำกัดด้วยขีดจำกัดของการบำรุงรักษาที่เป็นไปได้ ภายใต้สมมุติฐานการบำรุงรักษาข้างต้น จึงสามารถกำหนดให้อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่ลดลงในการบำรุงรักษาแต่ละครั้งมีค่าอยู่ในระหว่าง อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวก่อนการบำรุงรักษาเริ่มต้นที่เวลา t_0 ถึง อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวก่อนการบำรุงรักษาที่เวลา t_i ดังสมการที่ (6.4) ทั้งนี้โดยปกติอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวก่อนการบำรุงรักษาเริ่มต้นที่เวลา t_0 จะมีค่าเป็น 0

$$\lambda_0(t_0) < \delta_i < \lambda_0(t_i) \tag{6.4}$$

ดังนั้น หากอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาทั้งหมด k ครั้ง สามารถคำนวณอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวภายหลังการบำรุงรักษาได้ดังสมการที่ (6.5) และมีลักษณะการการจายตัวอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวภายหลังการบำรุงรักษาดังภาพที่ 6.3

$$\lambda(t) = \lambda_0(t) - \sum_{i=1}^{k} \delta_i \tag{6.5}$$



ภาพที่ 6.3 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ภายหลังการบำรุงรักษา

6.2.3 แบบจำลองการบำรุงรักษาแบบป้องกัน

การบำรุงรักษาแบบป้องกัน (Preventive maintenance: PM) เกิดขึ้นเมื่ออุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามตารางการบำรุงรักษาที่เหมาะสม การบำรุงรักษาแบบป้องกันในแต่ละครั้งได้ช่วยลดอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ลงด้วยขนาด δ ดังนั้น ค่าใช้จ่ายของการบำรุงรักษาแบบป้องกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ย่อมต้องขึ้นอยู่ปริมาณงานที่ทำการบำรุงรักษา ซึ่งสามารถสะท้อนผ่านอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่ลดลงได้ นั่นคือ ค่าใช้จ่ายของการบำรุงรักษาแบบป้องกันแปรผันตามขนาดของการบำรุงรักษาซึ่งในที่นี้คือ δ [12]

สำหรับสมมุติฐานที่ใช้ในการประมาณค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันในแต่ละครั้ง ซึ่งแปรผันตามขนาดของการบำรุงรักษานั้น ใช้วิธีการเปรียบเทียบจากค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ ผ่านอัตราส่วนตามอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวระหว่าง อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่ลดลงจากการบำรุงรักษาแบบป้องกัน (δ_i) กับ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวก่อนการบำรุงรักษาที่เวลาหมดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ ($\lambda_0(L)$) เมื่อกำหนดให้อุปกรณ์มีอายุการใช้งาน L ปี ดังนั้น สามารถประมาณค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกันได้ดังสมการที่ (6.6)

$$C_{PM,i} = C_{replace}\left(\frac{\delta_i}{\lambda_0(L)}\right) \tag{6.6}$$

โดย $C_{PM,i}$ คือ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกันในครั้งที่ i (บาท)

$C_{replace}$ คือ ค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ (บาท)

ดังนั้น หากอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกันทั้งหมด k ครั้ง ค่าใช้จ่ายสำหรับการบำรุงรักษาแบบป้องกันทั้งหมด สามารถประมาณได้ดังสมการที่ (6.7)

$$TC_{PM} = \sum_{i=1}^{k}\left[C_{replace}\cdot\left(\frac{\delta_i}{\lambda_0(L)}\right)\right] \tag{6.7}$$

โดย TC_{PM} คือ ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน (บาท)

6.2.4 แบบจำลองการบำรุงรักษาแบบแก้ไข

เมื่ออุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวนอกแผนงาน จำเป็นต้องได้รับการแก้ไขที่เรียกว่า การบำรุงรักษาแบบแก้ไข (Corrective maintenance: CM) ซึ่งการบำรุงรักษาแบบแก้ไขนี้มีค่าใช้จ่ายแปรตามจำนวนเหตุการณ์ล้มเหลวที่เกิดขึ้น ดังสมการที่ (6.8)

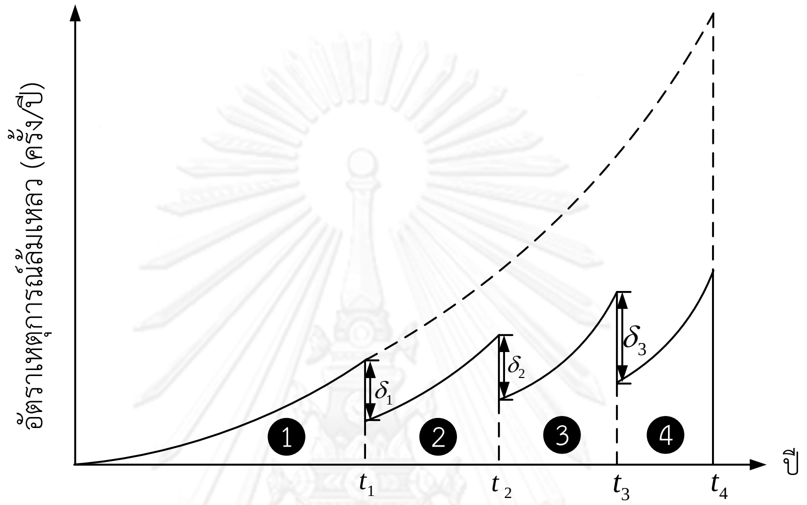
$$TC_{CM} = C_{CM}\cdot N \tag{6.8}$$

โดย TC_{CM} คือ ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข (บาท)

C_{CM} คือ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไขต่อครั้ง (บาท/ครั้ง)

N คือ จำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวภายหลังการบำรุงรักษา (ครั้ง)

จากสมการที่ (6.8) สังเกตได้ว่า จุดสำคัญของการประมาณค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข คือ การประมาณจำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวทั้งหมดตลอดระยะเวลาที่สนใจ ซึ่งสามารถประมาณได้จากค่าความคาดหวังของจำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวของการกระจายตัวฟังก์ชันอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว ยกตัวอย่างเช่น หากอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกันจำนวน 3 ครั้ง ณ เวลาที่ t_1, t_2, t_3 ตามลำดับ ดังภาพที่ 6.4



ภาพที่ 6.4 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ภายหลังการบำรุงรักษา

จากภาพที่ 6.4 สามารถประมาณจำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวทั้งหมด 4 ช่วง ดังนั้น จำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวทั้งหมด สามารถคำนวณได้จากผลรวมของจำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวในแต่ละช่วง ดังสมการที่ (6.9)

$$N = \int_0^{t_1} \frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} dt + \int_{t_1}^{t_2} [\frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} - \delta_1] dt + \int_{t_2}^{t_3} [\frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} - \delta_1 - \delta_2] dt + \int_{t_3}^{t_4} [\frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} - \delta_1 - \delta_2 - \delta_3] dt \quad (6.9)$$

จากสมการที่ (6.9) เมื่อกำหนดให้อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเป็น 0 สามารถคำนวณผลลัพธ์ของการหาปริพันธ์ ได้ดังสมการที่ (6.10)

$$N = \frac{{t_4}^\beta}{\alpha^\beta} - \delta_1(t_4 - t_1) - \delta_2(t_4 - t_2) - \delta_3(t_4 - t_3) \quad (6.10)$$

นอกจากนี้ หากพิจารณาเฉพาะอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวก่อนที่อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษา สามารถประมาณจำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวได้ดังสมการที่ (6.11)

$$N_0 = \int_0^{t_4} \frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} dt = \frac{{t_4}^\beta}{\alpha^\beta} \quad (6.11)$$

โดย N_0 คือ จำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวก่อนการบำรุงรักษา (ครั้ง)

จากสมการที่ (6.9) ถึง สมการที่ (6.11) สามารถอุปมาได้ว่า หากอุปกรณ์มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่มีการกระจายตัวแบบไวบูลล์ และอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกันทั้งหมด k ครั้ง หากกำหนดให้พิจารณาการใช้งานอุปกรณ์ T ปี สามารถประมาณจำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวตลอดอายุการใช้งานได้ดังสมการที่ (6.12)

$$N = N_0 - \sum_{i=1}^{k} \delta_i (T - t_i) = \frac{T^\beta}{\alpha^\beta} - \sum_{i=1}^{k} \delta_i (T - t_i) \quad (6.12)$$

ดังนั้น ค่าใช้จ่ายสำหรับการบำรุงรักษาแบบแก้ไขตลอดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ สามารถประมาณได้ดังสมการที่ (6.13)

$$TC_{CM} = C_{CM} \cdot [\frac{T^\beta}{\alpha^\beta} - \sum_{i=1}^{k} \delta_i (T - t_i)] \quad (6.13)$$

โดย TC_{CM} คือ ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข (บาท)

C_{CM} คือ ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบแก้ไขในแต่ละครั้ง (บาท/ครั้ง)

6.3 การประเมินผลกระทบจากการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่มีต่อสถานีไฟฟ้า

เมื่อนำแบบจำลองการบำรุงรักษาในระดับอุปกรณ์ในหัวข้อที่ 6.2 มาขยายให้ครอบคลุมถึงการบำรุงรักษาในระดับสถานีไฟฟ้า ด้วยการพิจารณาผลกระทบของการจ่ายกำลังไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นภายหลังอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษา โดยปกติ เมื่ออุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว จะส่งผลให้จุดโหลดของสถานีไฟฟ้าไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้เกิดมูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ แต่เมื่ออุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษา ย่อมทำให้อุปกรณ์นั้นเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวน้อยลง ซึ่งก็ทำให้มีมูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับน้อยลงเช่นกัน การกำหนดแผนการบำรุงรักษายังต้องคำนึงถึงปริมาณโหลดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจทำให้มูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับมีค่าสูงได้เช่นกัน ทั้งนี้ การบำรุงรักษาในเวลาเดียวกันจะมีผลกระทบโดยตรงต่ออัตราเหตุการณ์ล้มเหลวทั้ง 2 ประเภท คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ และอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอคทีฟ

นอกจากนี้ มูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับยังสามารถสะท้อนให้เห็นถึงความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าได้ ถ้าหากมูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับมีค่ามาก แสดงว่าความเชื่อถือได้ของ

สถานีไฟฟ้ามีค่าต่ำ ในทางตรงกันข้าม หากมูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับมีค่าน้อย แสดงว่าความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้ามีสูง

ดังนั้น การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ให้มีความเหมาะสม ต้องมีการประเมินจากผลรวมของค่าใช้ทั้งหมด 3 ส่วนให้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งได้แก่ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขของอุปกรณ์ทั้งหมด และมูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ เพื่อให้เกิดความเข้าใจในข้อจำกัดของการบำรุงรักษาอุปกรณ์ทั้งแบบป้องกันและแบบแก้ไข ที่ส่งผลกระทบต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังจุดโหลด รวมทั้งการประมาณมูลค่าสูญเสียอันเนื่องจากไฟฟ้าดับ ตลอดจนการประเมินความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าเช่น ดัชนี *SAIFI* ดัชนี *SAIDI* หรือดัชนี *ENS* ให้เป็นไปอย่างถูกต้องและแม่นยำ จึงได้มีการจำลองผลกระทบจากการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่มีต่อสถานีไฟฟ้าขึ้นด้วยการแบ่งลักษณะอุปกรณ์ออกเป็น 3 สภาวะ คือ

(1) สภาวะปกติ

(2) สภาวะการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกัน

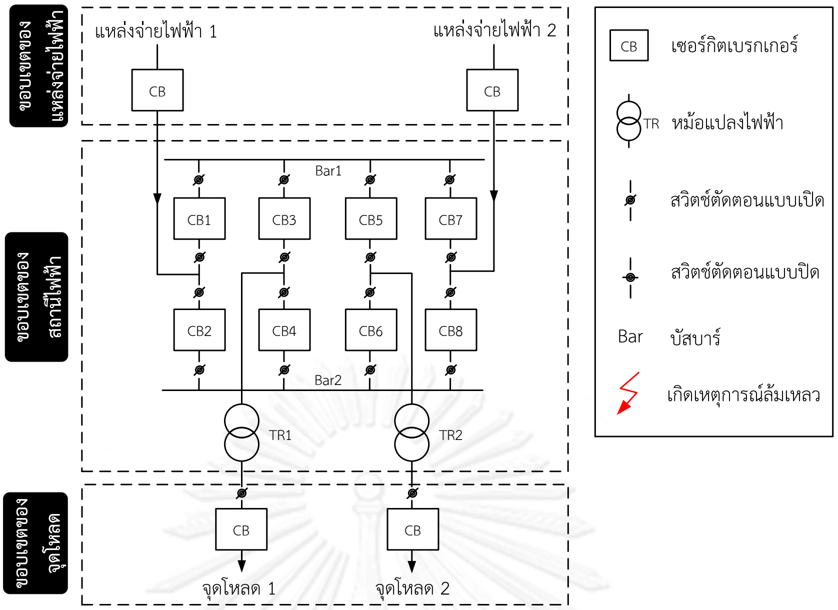
(3) สภาวะการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบแก้ไข

การทำงานของอุปกรณ์ในสภาวะทั้งสาม มีลักษณะที่แตกต่างกันตามรูปแบบการจัดเรียงบัสภายในสถานีไฟฟ้า โดยเฉพาะสภาวะการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกันและแบบแก้ไข ที่สามารถสะท้อนถึงผลกระทบของการบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่จุดโหลด และยังสามารถกำหนดระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า เพื่อนำไปประเมินค่าใช้จ่ายในส่วนของมูลค่าสูญเสียอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ ดังนั้น การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากการบำรุงรักษาอุปกรณ์สามารถแบ่งออกเป็น 3 ด้าน คือ (1) การประเมินผลกระทบของการจ่ายกำลังไฟฟ้าภายใต้สภาวะการบำรุงรักษาอุปกรณ์, (2) การกำหนดระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า และ (3) การประเมินมูลค่าสูญเสียอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.3.1 การประเมินผลกระทบของการจ่ายกำลังไฟฟ้าภายใต้สภาวะการบำรุงรักษา

การวิเคราะห์ผลกระทบของการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังจุดโหลดอันเกิดจากการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกันและแบบแก้ไขนั้น สามารถวิเคราะห์ได้จากทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า ถ้าหากอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกันหรือแบบแก้ไข แล้วทำให้เส้นทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังจุดโหลดขาดหายไป ก็ทำให้จุดโหลดนั้นไม่ได้รับการจ่ายไฟฟ้า การประเมินผลกระทบดังกล่าว จะพิจารณาเฉพาะผลกระทบที่เกิดจากการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในขอบเขตของสถานีไฟฟ้าเท่านั้น

เพื่อให้เกิดความสะดวกและความเข้าในที่ตรงกัน จึงได้กำหนดขอบเขตของแหล่งจ่ายไฟฟ้าสถานีไฟฟ้า และจุดโหลด ตลอดจนสัญลักษณ์ภายในสถานีไฟฟ้า ดังภาพที่ 6.5



ภาพที่ 6.5 ขอบเขตของแหล่งจ่ายไฟฟ้า สถานีไฟฟ้า จุดโหลด และสัญลักษณ์ในสถานีไฟฟ้า

6.3.1.1 สภาวะการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกัน

เพื่อให้เกิดความปลอดภัยของเจ้าหน้าที่ การบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกันต้องมีขั้นตอนในการปฏิบัติอย่างเป็นแบบแผน โดยสามารถแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 3 ช่วงเวลา คือ (1) การเตรียมการก่อนการบำรุงรักษาแบบป้องกัน, (2) ระหว่างการบำรุงรักษาแบบป้องกัน และ (3) ภายหลังการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ดังภาพที่ 6.6

ภาพที่ 6.6 การดำเนินงานการบำรุงรักษาแบบป้องกัน

การดำเนินการบำรุงรักษาแบบป้องกันของแต่ละอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าย่อมมีขั้นตอนที่แตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า 3 ชนิด คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ หม้อแปลงไฟฟ้า และบัสบาร์ สามารถจัดกลุ่มการบำรุงรักษาอุปกรณ์ออกเป็น 2 รูปแบบ คือ

(1) การบำรุงรักษาแบบป้องกัน: เซอร์กิตเบรกเกอร์

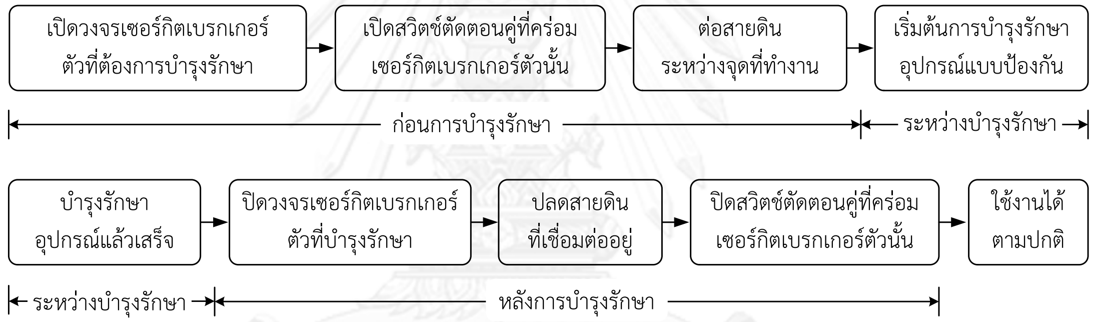
(2) การบำรุงรักษาแบบป้องกัน: หม้อแปลงไฟฟ้าและบัสบาร์

เนื่องจากเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็นอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้า ทำให้หากต้องการบำรุงรักษาแบบป้องกันสามารถที่จะปลดวงจรไฟฟ้าของเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้ทันที ในทางกลับกัน หม้อแปลงไฟฟ้าและบัสบาร์ ไม่สามารถปลดตัวเองออกจากวงจรไฟฟ้าได้ ต้องอาศัยการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์

ชุดที่ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าและบัสบาร์ที่ต้องการบำรุงรักษา ดังนั้น จึงสามารถแบ่งผลกระทบที่เกิดจากการบำรุงรักษาอุปกรณ์ออกเป็น 2 กลุ่ม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

(1) การบำรุงรักษาแบบป้องกัน: เซอร์กิตเบรกเกอร์

เนื่องจากเซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถปลดตัวจากจงจรไฟฟ้าได้ทันที จึงทำให้มีขั้นตอนการปฏิบัติเริ่มต้นจากเปิดวงจรเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่ต้องการบำรุงรักษาออกจากวงจร หลังจากนั้นเปิดสวิตช์ตัดตอน (Disconnecting switch) คู่ที่คร่อมเซอร์กิตเบรกเกอร์นั้น และต่อสายดิน (Grounding) ระหว่างจุดที่ทำงาน แล้วถึงเริ่มต้นการบำรุงรักษาแบบป้องกัน หลังจากการบำรุงรักษาแล้วเสร็จ จึงเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ผ่านการบำรุงรักษาเข้าสู่สถานีไฟฟ้า ด้วยการดำเนินการในลักษณะย้อนกลับ เริ่มต้นจากเชื่อมต่อเซอร์กิตเบรกเกอร์ ปิดวงจรเซอร์กิตเบรกเกอร์ นำสายดินออก และปิดสวิตช์ตัดตอนคู่ที่คร่อมเซอร์กิตเบรกเกอร์นั้น หลังจากนั้นจึงสามารถใช้งานเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้ตามปกติ ลักษณะการดำเนินการทั้ง 3 ช่วงเวลา สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 6.7



ภาพที่ 6.7 ขั้นตอนการบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบป้องกัน

พฤติกรรมการบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบป้องกันทั้ง 3 ขั้นตอนในภาพที่ 6.7 จะเห็นว่ามีเพียงขั้นตอนที่ 1 การเตรียมการก่อนการบำรุงรักษา และขั้นตอนที่ 2 ระหว่างบำรุงรักษาเท่านั้นที่มีผลกระทบต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้า เนื่องจากเป็นการเปิดวงจรไฟฟ้าเพื่อนำอุปกรณ์ออกไปบำรุงรักษา ส่วนขั้นตอนที่ 3 หลังการบำรุงรักษา เป็นการเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้าสู่ระบบ จึงไม่มีผลกระทบต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้า ดังนั้น จึงสามารถประเมินผลกระทบของการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่จุดโหลด ของทั้ง 2 ขั้นตอนที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

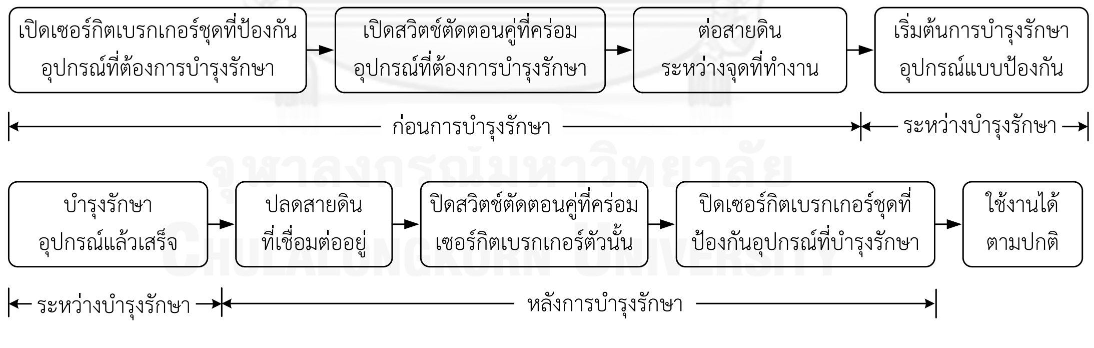
- **<u>การเตรียมการก่อนการบำรุงรักษาแบบป้องกัน</u> :** เนื่องจากเซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถปลดตัวเองออกจากวงจรไฟฟ้า จึงมีเพียงการเปิดสวิตช์ตัดตอนคู่ที่คร่อมระหว่างเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ต้องการบำรุงรักษาเท่านั้น จึงเปรียบเสมือนการถอดเซอร์กิตเบรกเกอร์ออกจากวงจรไฟฟ้า โดยไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ข้างเคียง แล้วตรวจสอบว่าส่งผลกระทบของการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่จุดโหลดหรือไม่ ซึ่งลักษณะการดำเนินการดังกล่าวสอดคล้องกับการ**ตรวจหามินิมัลคัตเซตแบบ**

<u>พาสซีฟ</u> ด้วยการสมมุติให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ต้องการบำรุงรักษาเป็นอุปกรณ์ที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ ถ้าอุปกรณ์ดังกล่าวอยู่ในเส้นทางการจ่ายกำลังไฟฟ้า นั่นคือ หากเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่บำรุงรักษาตรงกับมินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ ก็ทำให้จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า

- **<u>ระหว่างการบำรุงรักษาแบบป้องกัน</u>** เป็นขั้นตอนที่ต่อเนื่องจากขั้นตอนการเตรียมการก่อนการบำรุงรักษา ที่มีการเปิดสวิตช์ตัดตอนคู่ที่คร่อมระหว่างเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ต้องการบำรุงรักษา และเชื่อมต่อสายดิน จึงเปรียบเสมือนการถอดเซอร์กิตเบรกเกอร์ออกจากวงจรไฟฟ้าไปแล้ว ดังนั้น จึงสามารถประเมินผลกระทบของการจ่ายกำลังไฟฟ้าในขณะการบำรุงรักษา กับการ**<u>ตรวจหามินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ</u>** ได้เช่นเดียวกัน

(2) การบำรุงรักษาแบบป้องกัน: หม้อแปลงไฟฟ้า และ บัสบาร์

เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าและบัสบาร์ ไม่สามารถปลดตัวจากจงจรไฟฟ้าได้ทันที จึงทำให้มีขั้นตอนการปฏิบัติเริ่มต้นจากการเปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ชุดที่ป้องกันอุปกรณ์ที่ต้องการบำรุงรักษา หลังจากนั้นจึงเปิดสวิตช์ตัดตอนคู่ที่คร่อมอุปกรณ์นั้น และต่อสายดินระหว่างจุดที่ทำงาน แล้วถึงเริ่มต้นการบำรุงรักษาแบบป้องกัน หลังจากการบำรุงรักษาแล้วเสร็จ ได้เชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ผ่านการบำรุงรักษาเข้าสู่สถานีไฟฟ้า ด้วยการดำเนินการในลักษณะย้อนกลับ เริ่มต้นจากการนำสายดินออก ปิดสวิตช์ตัดตอนคู่ที่คร่อมเซอร์กิตเบรกเกอร์นั้น และปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ชุดที่ป้องกันอุปกรณ์บำรุงรักษานั้น หลังจากนั้นจึงสามารถใช้งานอุปกรณ์ได้ตามปกติ ลักษณะการดำเนินการทั้ง 3 ช่วงเวลาเช่นเดียวกับการบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์ ดังภาพที่ 6.8



ภาพที่ 6.8 ขั้นตอนการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าและบัสบาร์แบบป้องกัน

พฤติกรรมการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าและบัสบาร์แบบป้องกันทั้ง 3 ขั้นตอนในภาพที่ 6.8 มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับการดำเนินการบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบป้องกัน เพียงแต่หม้อแปลงไฟฟ้าและบัสบาร์ไม่สามารถปลดตัวเองออกจากระบบได้ด้วยตัวเอง ต้องอาศัยการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันข้างเคียงในการปลดวงจรแทน ดังนั้น การประเมินผลกระทบการจ่ายกำลังไฟฟ้าของการบำรุงรักษาอุปกรณ์ทั้ง 2 รูปแบบ จึงมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

▪ **<u>การเตรียมก่อนการบำรุงรักษาแบบป้องกัน</u>** : หม้อแปลงไฟฟ้าและบัสบาร์ไม่สามารถปลดออกจากระบบได้ด้วยตัวเอง จึงมีต้องเปิดอุปกรณ์ป้องกันชุดที่ล้อมรอบอุปกรณ์ตัวที่ต้องการบำรุงรักษา แล้วตรวจสอบว่าส่งผลกระทบการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่จุดโหลดหรือไม่ ซึ่งลักษณะการดำเนินการดังกล่าวสอดคล้องกับการตรวจหา**<u>มินิมัลคัตเซตแบบแอคทีฟ</u>** ด้วยการสมมุติให้อุปกรณ์ตัวที่ต้องการบำรุงรักษาเป็นอุปกรณ์ที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว เมื่อมีเหตุการณ์ล้มเหลวอุปกรณ์ป้องกันที่อยู่ข้างเคียงทำงาน ถ้าการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน และอุปกรณ์ที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวอยู่ในเส้นทางการจ่ายกำลังไฟฟ้า ก็ทำให้จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า นั่นคือ หากอุปกรณ์ที่ต้องการบำรุงรักษาตรงกับมินิมัลคัตเซตแบบแอคทีฟ ก็ทำให้จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า

▪ **<u>ระหว่างการบำรุงรักษาแบบป้องกัน</u>** เช่นเดียวกับการบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบป้องกัน หลังจากการเปิดสวิตช์ตัดตอนคู่ที่คร่อมระหว่างอุปกรณ์ที่ต้องการบำรุงรักษา เปรียบเสมือนการถอดอุปกรณ์นั้นออกจากวงจรไฟฟ้าไปแล้ว ดังนั้น จึงสามารถประเมินผลกระทบของการจ่ายกำลังไฟฟ้าในขณะการบำรุงรักษา ด้วยการ**<u>ตรวจหามินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ</u>**

อย่างไรก็ตาม ระหว่างการบำรุงรักษาแบบป้องกันบางอุปกรณ์อาจทำให้สถานีไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ ดังนั้น ในบาง**<u>สถานีไฟฟ้าที่สำคัญ</u>** เช่น สถานีไฟฟ้าในระบบส่งไฟฟ้า หากไฟฟ้าดับอาจส่งผลกระทบเป็นบริเวณกว้าง ทำให้ต้อง**<u>เตรียมอุปกรณ์สำรอง</u>** เพื่อทดแทนอุปกรณ์ที่ต้องการบำรุงรักษา ซึ่งทำให้ระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับกำลังไฟฟ้ามีระยะเวลาที่ลดลง แต่ในกรณีนี้ภายหลังการบำรุงรักษาต้องนำอุปกรณ์สำรองออก และนำอุปกรณ์ที่ผ่านการบำรุงรักษาเชื่อมต่อกลับเข้าสู่สถานีไฟฟ้าเช่นเดิม ซึ่งจะมีผลกระทบต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยสามารถประเมินผลกระทบได้เสมือนกับ การดำเนินการบำรุงรักษาแบบป้องกันอีกครั้งหนึ่ง เพียงแต่ขั้นตอนระหว่างการบำรุงรักษาเปลี่ยนเป็นขั้นตอนการนำอุปกรณ์สำรองออก และใส่อุปกรณ์ที่ผ่านการบำรุงรักษาแทน

6.3.1.2 สภาวะการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบแก้ไข

การบำรุงรักษาแบบแก้ไขเกิดขึ้นเฉพาะอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวนอกแผนงานเท่านั้น เมื่อพิจารณาประเภทของเหตุการณ์ล้มเหลวสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ และเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอคทีฟ ซึ่งเหตุการณ์ล้มเหลวทั้งสองประเภทจะถูกประเมินผลกระทบของการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่จุดโหลดด้วยการตรวจหามินิมัลคัตเซตตามที่ได้อธิบายในบทที่ 4 ดังนั้น ผลกระทบที่เกิดจากการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบแก้ไข สามารถประเมินได้จากการตรวจหามินิมัตคัตเซตแบบพาสซีฟและแบบแอคทีฟ ตามแต่กรณี

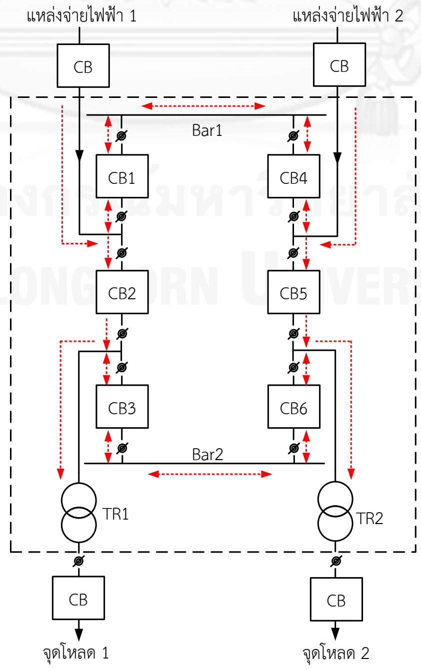
การประเมินผลกระทบของสภาวะการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกันและแบบแก้ไขสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 การประเมินผลกระทบสภาวะการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกันและแบบแก้ไข

สภาวะการบำรุงรักษาอุปกรณ์			วิธีการประเมินผลกระทบ
การบำรุงรักษาแบบป้องกัน	ก่อนการบำรุงรักษา	เซอร์กิตเบรกเกอร์	การตรวจหามินิคัตเซตแบบพาสซีฟ
		หม้อแปลงไฟฟ้าและบัสบาร์	การตรวจหามินิคัตเซตแบบแอคทีฟ
	ระหว่างการบำรุงรักษา	เซอร์กิตเบรกเกอร์	การตรวจหามินิคัตเซตแบบพาสซีฟ
		หม้อแปลงไฟฟ้าและบัสบาร์	การตรวจหามินิคัตเซตแบบพาสซีฟ
	ภายหลังการบำรุงรักษา	เซอร์กิตเบรกเกอร์	-
		หม้อแปลงไฟฟ้าและบัสบาร์	-
การบำรุงรักษาแบบแก้ไข	เหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ		การตรวจหามินิคัตเซตแบบพาสซีฟ
	เหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอคทีฟ		การตรวจหามินิคัตเซตแบบแอคทีฟ

6.3.1.3 ตัวอย่างการประเมินผลกระทบการจ่ายกำลังไฟฟ้าภายใต้สภาวะการบำรุงรักษา

เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่มากขึ้น จึงได้ยกตัวอย่างการประเมินผลกระทบการจ่ายกำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าที่มีรูปแบบการจัดเรียงบัสแบบ Breaker-and-a-half โดยในสภาวะปกติทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงได้ด้วยเส้นประดังภาพที่ 6.9

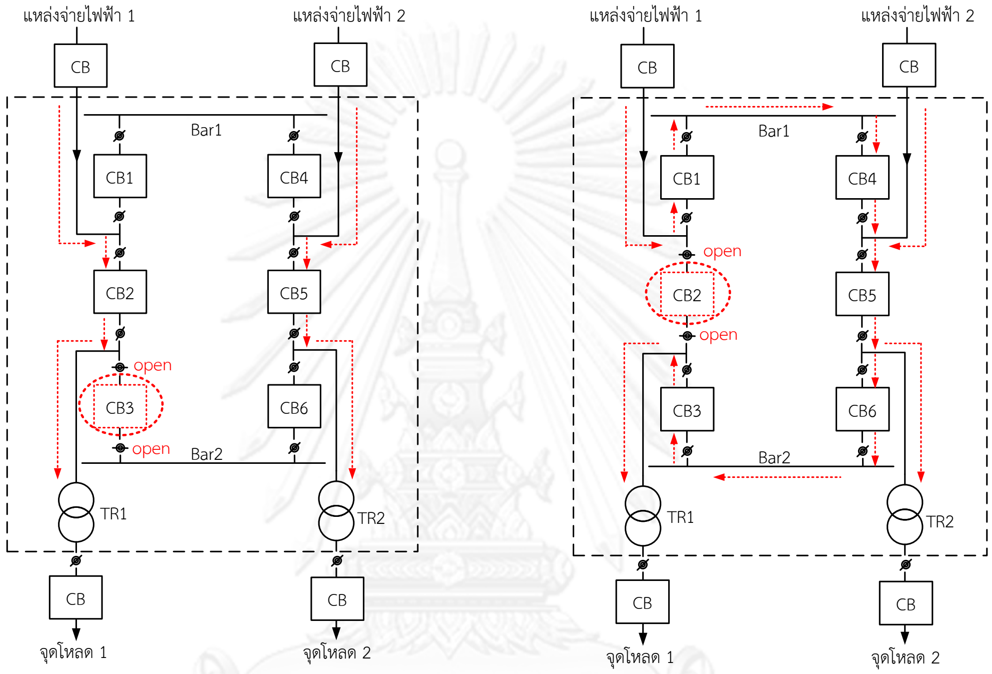


ภาพที่ 6.9 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะปกติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

(1) สภาวะการบำรุงรักษาแบบป้องกัน แบ่งการบำรุงรักษาออกเป็น 2 อุปกรณ์ ดังต่อไปนี้

(1.1) การบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบป้องกัน สามารถแบ่งการบำรุงรักษาออกเป็น 2 กรณี ตามตำแหน่งเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่ต้องการบำรุงรักษา คือ (1) บำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่อยู่ติดกับบัสบาร์ และ (2) บำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่อยู่ตรงกลางเบย์ ดังภาพที่ 6.10 (ก) และภาพที่ 6.10 (ข) ตามลำดับ

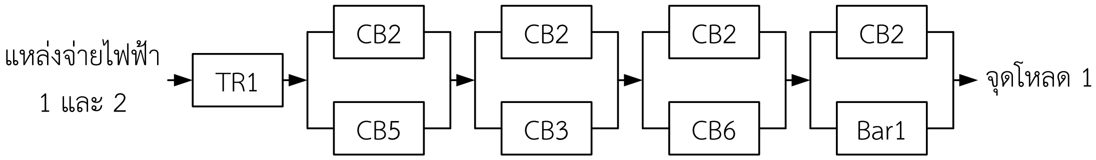


(ก) การบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่อยู่ติดกับบัสบาร์

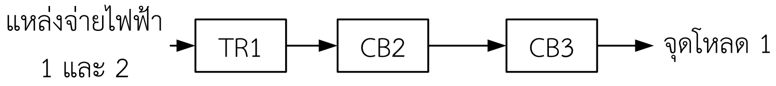
(ข) การบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่อยู่ตรงกลางเบย์

ภาพที่ 6.10 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าไปยังจุดโหลด ระหว่างการบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบป้องกัน

จากนั้นสามารถตรวจหามินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟและแบบแอคทีฟของจุดโหลด 1 ตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 4.3.3.1 และ 4.3.3.2 ได้ดังภาพที่ 6.11 และ ภาพที่ 6.12 ตามลำดับ



ภาพที่ 6.11 มินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟของจุดโหลด 1



ภาพที่ 6.12 มินิมัลคัตเซตแบบแอคทีฟของจุดโหลด 1

พิจารณาการบำรุงรักษาแบบป้องกันของเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่ 3 (CB3) ดังภาพที่ 6.10 (ก) สามารถประเมินผลกระทบการจ่ายกำลังไฟฟ้าตามวิธีที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 6.3.3.1 (1) ได้ดังนี้

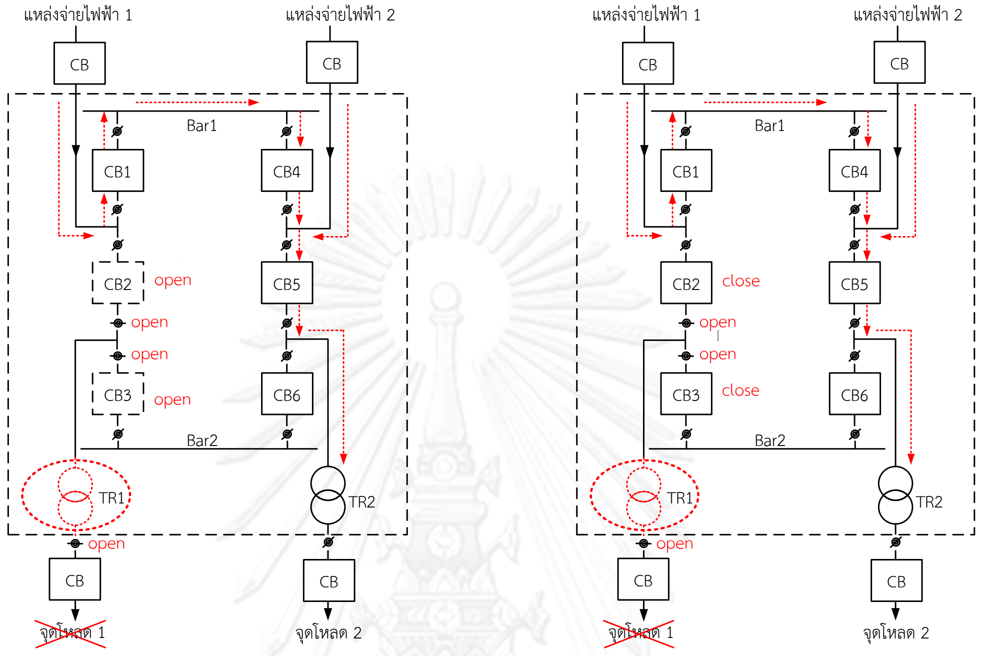
- **<u>การเตรียมการก่อนการบำรุงรักษาแบบป้องกัน</u>** เมื่อเปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่3 (CB3) และเปิดสวิตช์ตัดตอนตัวที่อยู่คร่อม แล้วตรวจสอบการไหลของกำลังไฟฟ้า พบว่าจุดโหลด 1 ยังคงได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งสอดคล้องกับมินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟของจุดโหลด 1 ในภาพที่ 6.11 ที่ไม่มีเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่ 3 (CB3) อยู่ในมินิมัลคัตเซต
- **<u>ระหว่างการบำรุงรักษาแบบป้องกัน</u>** เมื่อเตรียมการก่อนการบำรุงรักษาแล้วเสร็จ ต้องเปิดสวิตช์ตัดตอนตัวที่อยู่คร่อม เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่ 3 (CB3) ดังภาพที่ 6.10 (ก) โดยในขณะที่บำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่ 3 (CB3) นั้น เมื่อตรวจสอบการไหลของกำลังไฟฟ้า พบว่าจุดโหลด 1 ยังคงได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งสอดคล้องกับมินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟของจุดโหลด 1 ในภาพที่ 6.11 ที่ไม่มีเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่ 3 (CB3) อยู่ในมินิมัลคัตเซต

เช่นเดียวกัน หากพิจารณาการบำรุงรักษาแบบป้องกันของเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่ 2 (CB2) ดังภาพที่ 6.10 (ข) สามารถประเมินผลกระทบของการจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้

- **<u>การเตรียมการก่อนการบำรุงรักษาแบบป้องกัน</u>** เนื่องจากเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่ 2 (CB2) ไม่ได้อยู่ในมินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ จึงทำให้การเตรียมการก่อนการบำรุงรักษาแบบป้องกันจุดโหลด 1 ยังคงได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า
- **<u>ระหว่างการบำรุงรักษาแบบป้องกัน</u>** เนื่องจากเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่ 2 (CB2) ไม่ได้อยู่ในมินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ จึงทำให้ระหว่างการบำรุงรักษาแบบป้องกันจุดโหลด 1 ยังคงได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า

จะเห็นว่า ขั้นตอนการเตรียมการและระหว่างการบำรุงรักษาของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบป้องกันของการจัดเรียงบัสแบบ Breaker-and-a-half ไม่ว่าจะเป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ตำแหน่งใด ก็ไม่มีผลกระทบต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังจุดโหลด ซึ่งถือได้ว่าเป็นจุดเด่นของการจัดเรียงบัสแบบรูปแบบนี้

(1.2) การบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าแบบป้องกัน การเตรียมการก่อนการบำรุงรักษาและระหว่างการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าแบบป้องกัน มีทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าดังภาพที่ 6.13 (ก) และ 6.13 (ข) ตามลำดับ



(ก) การเตรียมการก่อนการบำรุงรักษา (ข) ระหว่างการบำรุงรักษา

ภาพที่ 6.13 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าไปยังจุดโหลด
ของการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าแบบป้องกัน

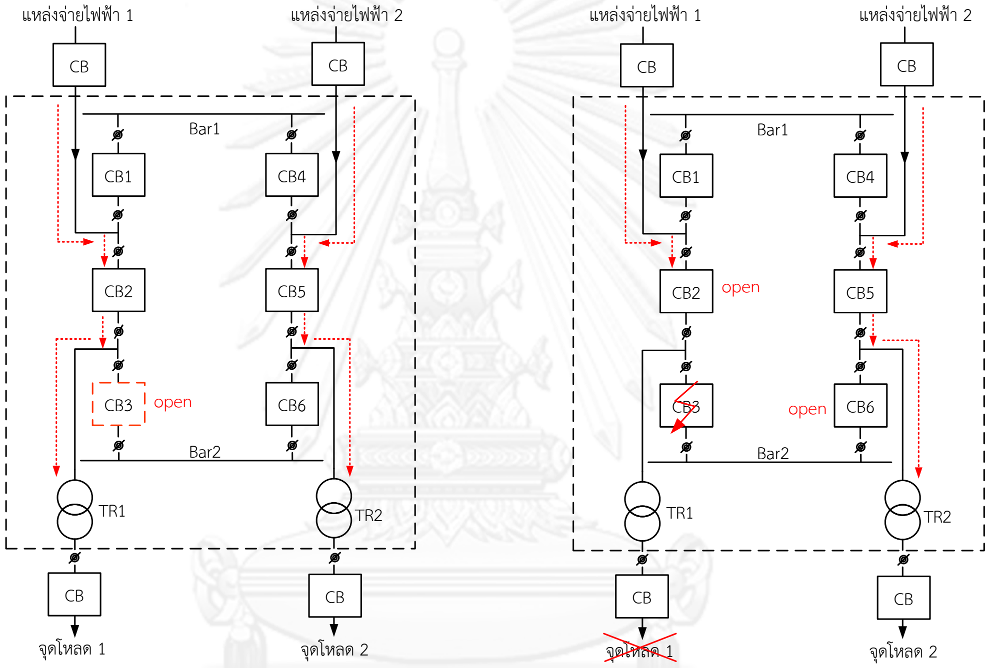
หากหม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่ 1 (TR1) ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ซึ่งไม่สามารถปลดตัวเองออกจากวงจรไฟฟ้าได้ ต้องอาศัยการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันข้างเคียงแทน ดังนั้น สามารถประเมินผลกระทบของการจ่ายกำลังไฟฟ้าตามวิธีที่ได้นำเสนอไปในหัวข้อที่ 6.3.3.1 (2) ดังต่อไปนี้

- **<u>การเตรียมการก่อนการบำรุงรักษาแบบป้องกัน</u>** พิจารณาภาพที่ 6.13 (ก) เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้า ตัวที่ 1 (TR1) อยู่ในมินิมัลคัตเซตแบบแอคทีฟ จึงทำให้การเตรียมการก่อนการบำรุงรักษาแบบป้องกันจุดโหลด 1 ไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า
- **<u>ระหว่างการบำรุงรักษาแบบป้องกัน</u>** พิจารณาภาพที่ 6.13 (ข) เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้า ตัวที่ 1 (TR1) อยู่ในมินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ จึงทำให้ระหว่างการบำรุงรักษาแบบป้องกันจุดโหลด 1 ไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า

จะเห็นได้ว่า หากไม่การเตรียมหม้อแปลงไฟฟ้าสำรอง เพื่อทดแทนหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต้องการบำรุงรักษา หรือการเตรียมการถ่ายโอนจุดโหลด ก็ทำให้จุดโหลดในบริเวณนั้นไม่ได้รับการจ่ายไฟฟ้า

เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่อยู่หน้าจุดโหลดเพียงอุปกรณ์เดียว จึงทำให้ไม่มีเส้นทางการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากสภานีไฟฟ้าเส้นทางอื่นที่จ่ายมายังจุดโหลด

(2) สภาวะการบำรุงรักษาแบบแก้ไข การบำรุงรักษาแบบแก้ไขเกิดขึ้นเฉพาะอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวนอกแผนงานเท่านั้น จึงสามารถประเมินผลกระทบจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไข ด้วยมินิมัลคัตเซตของเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟและแบบแอคทีฟ ตัวอย่างเช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่ 3 (CB3) เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ และแบบแอคทีฟ ดังภาพที่ 6.14 (ก) และ ภาพที่ 6.14 (ข) ตามลำดับ



(ก) การบำรุงรักษาแบบแก้ไข เมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่ 3 (CB3) เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ

(ข) การบำรุงรักษาแบบแก้ไข เมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่ 3 (CB3) เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอคทีฟ

ภาพที่ 6.14 การไหลของกำลังไฟฟ้าไปยังจุดโหลดกรณีบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าแบบป้องกัน

จากภาพที่ 6.14 กรณีที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่ 3 (CB3) เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ แล้วได้รับการบำรุงรักษาแบบแก้ไข แต่จุดโหลด 1 ยังคงได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าอยู่ เพราะเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่ 3 (CB3) ไม่ได้อยู่ในมินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ ในขณะเดียวกัน หากเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่ 3 (CB3) เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอคทีฟ แล้วได้รับการบำรุงรักษาแบบแก้ไข จุดโหลด 1 จะไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าเพราะเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่ 3 (CB3) อยู่ในมินิมัลคัตเซตแบบแอคทีฟ

6.3.2 การกำหนดระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า

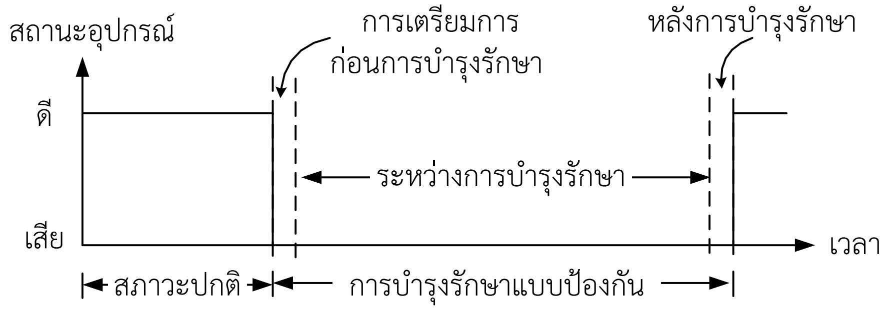
เมื่อทราบถึงผลกระทบของการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไข ตามวิธีที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 6.3.1 แล้ว ประเด็นที่ต้องพิจารณาถัดมา คือ ระยะเวลาในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ควรเป็นเท่าไร หากอุปกรณ์ที่ได้รับการบำรุงรักษาอยู่ในเส้นทางการจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังจุดโหลด ระยะเวลานี้เป็นตัวกำหนดเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งนำไปใช้ในการประเมินมูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ และใช้การคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ของสถานีต่อไป การกำหนดระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า สามารถแสดงด้วยกราฟสถานะของอุปกรณ์และเวลา ดังต่อไปนี้

(1) การบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกัน การบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกันสามารถแบ่งระยะเวลาในการบำรุงรักษาออกเป็น 3 ช่วง ตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 6.3.1.1 คือ

- ระยะเวลาเตรียมการก่อนการบำรุงรักษาแบบป้องกัน
- ระยะเวลาระหว่างการบำรุงรักษาแบบป้องกัน
- ระยะเวลาภายหลังการบำรุงรักษาแบบป้องกัน

สำหรับภายหลังการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ต้องเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ผ่านการบำรุงรักษาเข้าสู่สถานีไฟฟ้าดังเดิม กรณีที่ไม่มีการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำรองในระหว่างที่บำรุงรักษาอุปกรณ์ จะทำให้ระยะเวลาในช่วงนี้จุดโหลดยังไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า จนกว่าจะเชื่อมต่ออุปกรณ์แล้วเสร็จ และเมื่อพิจารณาขั้นตอนการดำเนินการภายหลังการบำรุงรักษาพบว่า มีการปฏิบัติลักษณะย้อนกลับเมื่อเทียบกับขั้นตอนการเตรียมการก่อนบำรุงรักษา ดังภาพที่ 6.7 และ 6.8 ดังนั้น จึงสามารถประมาณระยะเวลาภายหลังการบำรุงรักษามีค่าเท่ากับระยะเวลาการเตรียมการก่อนการบำรุงรักษาได้

ดังนั้น หากอุปกรณ์ที่ต้องการบำรุงรักษาอยู่ในเส้นทางการส่งไฟฟ้า และไม่มีการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำรอง ระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ ผลรวมของระยะเวลาตั้งแต่การเตรียมการก่อนการบำรุงรักษา ระหว่างการบำรุงรักษา และภายหลังการบำรุงรักษา ดังภาพที่ 6.15

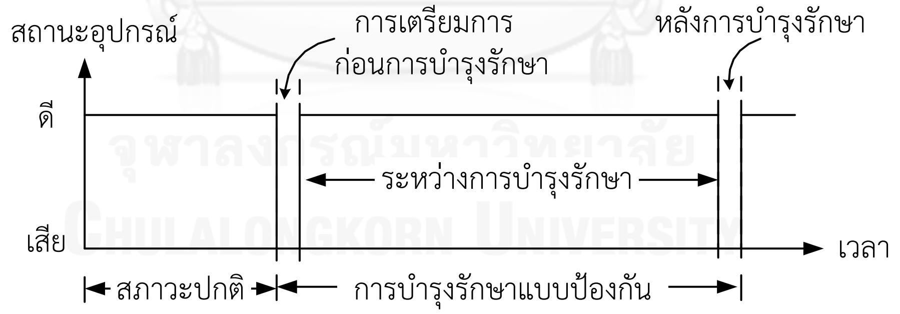


ภาพที่ 6.15 ระยะที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าขณะบำรุงรักษาแบบป้องกัน
ในกรณีที่ไม่มีการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำรอง

แต่ในกรณีที่ อุปกรณ์ที่ต้องการบำรุงรักษาแบบป้องกันอยู่ในเส้นทางการส่งกำลังไฟฟ้า และเป็น**<u>สถานีไฟฟ้าที่สำคัญ</u>** เช่น สถานีไฟฟ้าในระบบส่งไฟฟ้า หากไฟฟ้าดับอาจส่งผลกระทบเป็นบริเวณกว้างบาง จึงต้องเตรียมการ**<u>เตรียมอุปกรณ์สำรอง</u>**เพื่อทดแทนอุปกรณ์ดังกล่าว ซึ่งเวลาในการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำรองมีค่าน้อยมาก สามารถผนวกเวลาการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำรองเข้ากับระยะเวลาของการเตรียมการก่อนการบำรุงรักษาแบบป้องกันในการปลดอุปกรณ์ออกจากสถานีไฟฟ้าได้ และประมาณเวลาดังกล่าวเป็นระยะเวลาเตรียมการก่อนการบำรุงรักษา

เมื่อการบำรุงรักษาอุปกรณ์แล้วเสร็จ ต้องนำอุปกรณ์ที่ผ่านการบำรุงรักษาเชื่อมต่อกลับเข้าสู่สถานีไฟฟ้าเช่นเดิม จำเป็นต้องมีการปลดอุปกรณ์สำรองเดิมออกแล้วนำอุปกรณ์ที่ผ่านการบำรุงรักษากลับเข้าไปแทนที่ โดยในขณะนั้นอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้ายังอยู่ในสถาวะปกติ ดังนั้น การปลดอุปกรณ์สำรองออก จึงมีขั้นตอนในทางปฏิบัติที่ลักษณะคล้ายคลึงกับการดำเนินการบำรุงรักษาแบบป้องกันอีกครั้งหนึ่ง เพียงแต่ขั้นตอนระหว่างการบำรุงรักษา จะถูกแทนที่ด้วยขั้นตอนการนำอุปกรณ์สำรองออก และเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ผ่านการบำรุงรักษาแทน

ดังนั้น หากมีการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำรองระหว่างการบำรุงรักษา ระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายไฟฟ้า จึงเกิดจากผลรวมของระยะเวลาการเตรียมการก่อนการบำรุงรักษา และระยะเวลาภายหลังการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ซึ่งระยะเวลาภายหลังการบำรุงรักษาแบบป้องกันมีค่าเท่ากับระยะเวลาการเตรียมการก่อนการบำรุงรักษา ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า ระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายไฟฟ้าในกรณีที่มีการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำรอง จะมีค่าเป็นสองเท่าของระยะเวลาการเตรียมการก่อนการบำรุงรักษาแบบป้องกันนั่นเอง ดังภาพที่ 6.16



ภาพที่ 6.16 ระยะที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าขณะบำรุงรักษาแบบป้องกันในกรณีที่มีการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำรอง

(2) **การบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบแก้ไข** การบำรุงรักษาแบบแก้ไขเกิดขึ้นเฉพาะอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวนอกแผนงานเท่านั้น ทำให้สามารถแบ่งระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า ตามประเภทเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ ดังต่อไปนี้

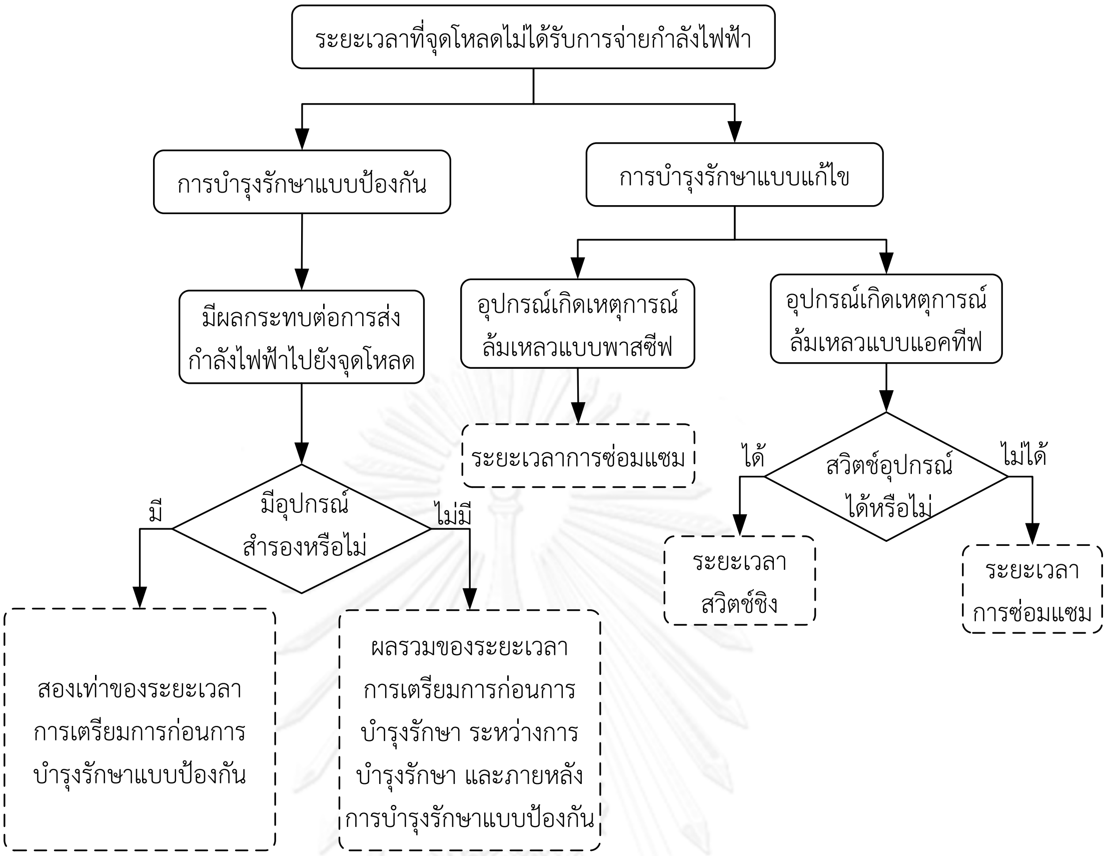
- การบำรุงรักษาแบบแก้ไขในกรณีที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ
- การบำรุงรักษาแบบแก้ไขในกรณีที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอคทีฟ

การบำรุงรักษาแบบแก้ไขทั้ง 2 กรณี มีจุดแตกต่างกันในระยะเวลาของการบำรุงรักษาอย่างชัดเจน ถ้าเป็นการบำรุงรักษาแบบแก้ไขในกรณีที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ ระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับระยะเวลาการซ่อมแซม (Repair time) หรือระยะเวลาการบำรุงรักษาทันที แต่หากเป็นการบำรุงรักษาแบบแก้ไขในกรณีที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอคทีฟ ระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าสามารถเป็นไปได้อีก 2 รูปแบบ คือ (1) ระยะเวลาการซ่อมแซม (Repair time) และ (2) ระยะเวลาการสวิตช์ชิง (Switching time) ขึ้นอยู่กับรูปแบบการจัดเรียงบัสภายในสถานีไฟฟ้า ถ้าสามารถสวิตช์อุปกรณ์ป้องกันบางตัว แล้วทำให้จุดโหลดยังได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าอยู่ ระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับระยะเวลาการสวิตช์ชิงของอุปกรณ์นั้น ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าระยะเวลาการซ่อมแซมเสมอ ในทางตรงข้าม หากไม่สามารถสวิตช์อุปกรณ์ป้องกันได้ ระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าก็จะมีค่าเท่ากับระยะเวลาการซ่อมแซม ดังภาพที่ 6.17

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 6.17 ระยะที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าขณะบำรุงรักษาแบบแก้ไข

ระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า จากการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไข สามารถสรุปได้ดังภาพที่ 6.18



ภาพที่ 6.18 ระยะเวลาที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าภายใต้การบำรุงรักษาอุปกรณ์

6.3.3 การประเมินมูลค่าสูญเสียอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ

หากอุปกรณ์ที่ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไข และอยู่ในเส้นทางการจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังจุดโหลด จะทำให้จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 6.3.2 ดังนั้น จึงสามารถประเมินมูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับที่เกิดจากการบำรุงรักษาอุปกรณ์ได้ด้วยระยะเวลาดังกล่าว ด้วยการคำนวณปริมาณพลังงานที่จุดโหลดไม่ได้รับการจ่ายจากสถานีไฟฟ้าในขณะทำการบำรุงรักษาอุปกรณ์ (ดัชนี ENS) โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1) มูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับที่เกิดจากการบำรุงรักษาแบบป้องกัน

มูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับที่เกิดจากการบำรุงรักษาแบบป้องกัน สามารถประเมินได้ ดังสมการที่ (6.14)

$$TCPM_{ENS} = \sum_{i=1}^{T} \left[IER \cdot ENS_{PM,i} \right] \tag{6.14}$$

โดย $TCPM_{ENS}$ คือ มูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับจากการบำรุงรักษาแบบป้องกัน (บาท)

IER คือ อัตราความเสียหายต่อพลังงานเมื่อเกิดไฟฟ้าดับ (บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

$ENS_{PM,i}$ คือ ปริมาณโหลดที่ไม่ได้รับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากการบำรุงรักษาแบบป้องกันปีที่ i (กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี)

T คือ ปีทั้งหมดที่พิจารณา

เนื่องจากผลกระทบที่เกิดจากการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกัน สามารถประเมินด้วยการตรวจหามินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ ดังนั้น จึงสามารถคำนวณดัชนี ENS ด้วยมินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอไปในบทที่ 4 สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้การคำนวณมีค่าดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 พารามิเตอร์ที่ใช้การคำนวณดัชนี ENS ที่เกิดจากการบำรุงรักษาแบบป้องกัน

อุปกรณ์ที่พิจารณา	**อัตราการบำรุงรักษา : λ_{PM} (ครั้ง/ปี)**	**ระยะเวลาการบำรุงรักษา : r_{PM} (ชั่วโมง/ครั้ง)**
ได้รับการบำรุงรักษา	1	สองเท่าของระยะเวลาการเตรียมการบำรุงรักษา หรือ ผลรวมของระยะเวลาการเตรียมการก่อนการบำรุงรักษา ระหว่างการบำรุงรักษา และภายหลังการบำรุงรักษา
ไม่ได้รับการบำรุงรักษา	0	0

(2) มูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับที่เกิดจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไข

การบำรุงรักษาแบบแก้ไขสามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณี ตามประเภทของเหตุการณ์ล้มเหลว จึงทำให้มูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับของการบำรุงรักษาแบบแก้ไข สามารถประเมินได้จากผลรวมของมูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับของการบำรุงรักษาแบบแก้ไขกรณีอุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ และแบบแอคทีฟ ดังสมการที่ (6.15)

$$TCCM_{ENS} = \sum_{i=1}^{T} \left[IER \cdot (ENS_{CMp,i} + ENS_{CMa,i}) \right] \tag{6.15}$$

โดย $TCCM_{ENS}$ คือ มูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไข (บาท)

$ENS_{CMp,i}$ คือ ปริมาณโหลดที่ไม่ได้รับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟปีที่ i (กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี)

$ENS_{CMa,i}$ คือ ปริมาณโหลดที่ไม่ได้รับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอคทีฟปีที่ i (กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี)

สำหรับดัชนี ENS สามารคำนวณด้วยมินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ และแบบแอคทีฟตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอไปในบทที่ 4 และพารามิเตอร์ที่ใช้การคำนวณมีค่าดังตารางที่ 6.3

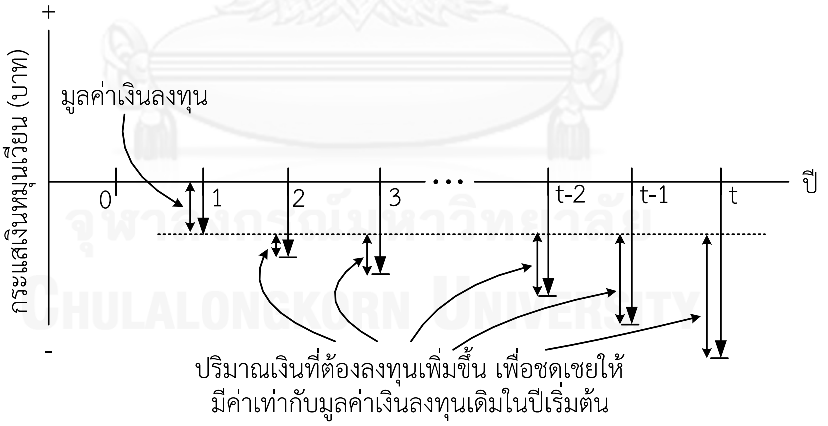
ตารางที่ 6.3 พารามิเตอร์ที่ใช้การคำนวณดัชนี ENS ที่เกิดจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไข

ประเภทเหตุการณ์ล้มเหลว	อัตราการบำรุงรักษาของอุปกรณ์ : λ_{CM} (ครั้ง/ปี)	ระยะเวลาการบำรุงรักษาของอุปกรณ์ : r_{CM} (ชั่วโมง/ครั้ง)
เหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ	อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ (λ_p)	ระยะเวลาการซ่อมแซม (r_r)
เหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอคทีฟ	เหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอคทีฟ (λ_a)	ระยะเวลาการซ่อมแซม (r_r) หรือระยะเวลาสวิตช์ชิง (r_s)

<u>หมายเหตุ</u> อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวทั้งสองประเภทเป็นอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวหลังการบำรุงรักษา

6.4 สมมุติฐานทางเศรษฐศาสตร์

การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ถือได้ว่าเป็นการวางแผนในระยะยาวและเกี่ยวข้องกับปริมาณเงินที่ต้องลงทุน จึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ด้านการเงินร่วมด้วย ตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่อค่าของเงิน คือ เวลา และอัตราเงินเฟ้อ (Inflation rate) หลักการสำคัญของการวิเคราะห์การลงทุน คือ มูลค่าของเงินจะเปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลาที่กำหนด หรืออาจกล่าวได้ว่า ในช่วงเวลาที่ต่างกันเงินค่าเดียวกันจะมีมูลค่าที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์มูลค่าของเงินที่แปรผันไปตามช่วงเวลาและอัตราเงินเฟ้อสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 6.19



ภาพที่ 6.19 มูลค่าของเงินที่แปรผันไปตามช่วงเวลาและอัตราเงินเฟ้อ

จากภาพที่ 6.19 เมื่อลงทุนในแต่ละปีด้วยจำนวนเงินที่เท่ากัน ในแต่ละปีมูลค่าของเงินลงทุนเดิมจะมีค่าลดลงตามอัตราเงินเฟ้อ นั่นคือ ด้วยจำนวนเงินที่เท่ากันในอนาคตจะมีมูลค่าน้อยกว่าปัจจุบัน ดังนั้น จึงต้องคำนึงถึงปริมาณเงินลงทุนที่เพิ่มขึ้น เพื่อชดเชยให้มูลค่าของเงินลงทุนมีค่าเท่ากับมูลค่าของเงินลงทุนเดิมในปีเริ่มต้น

ค่าของเงินในอนาคตจากเงินจำนวนเดียวกันที่มีอยู่ในปัจจุบัน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.18)

$$F = P \cdot (1+d)^{i} \tag{6.18}$$

โดย F คือ มูลค่าเงินในอนาคตของปีที่ i (บาท)

P คือ มูลค่าเงินในปัจจุบัน (บาท)

d คือ อัตราเงินเฟ้อ (%)

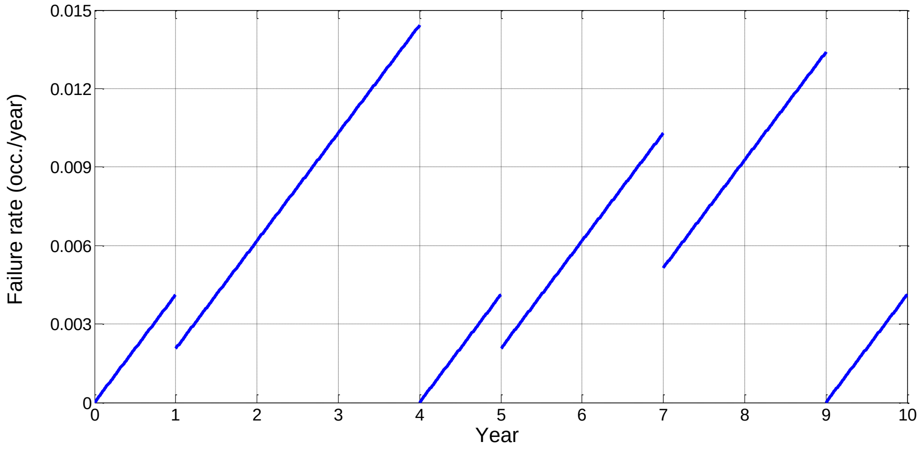
i คือ ปีที่พิจารณา

6.5 การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด

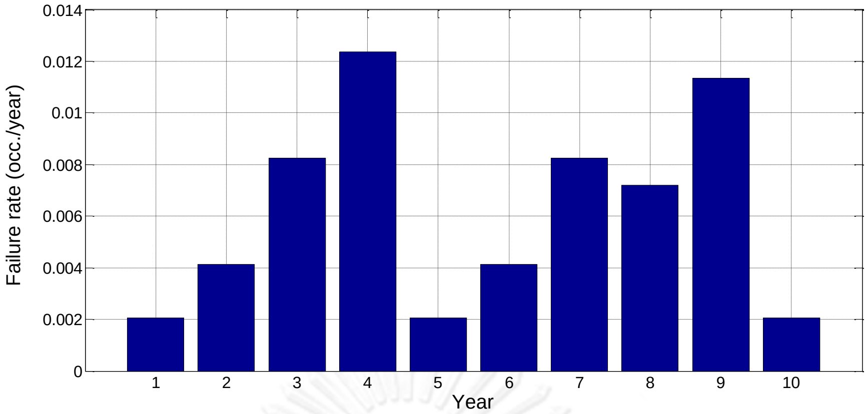
เพื่อให้การกำหนดแผนการบำรุงรักษาสอดคล้องกับสมมุติฐานทางเศรษฐศาสตร์ที่มีอัตราเงินเฟ้อ และแบบจำลอง 2 สถานะของมาร์คอฟ ทำให้ต้องพิจารณาค่าใช้จ่ายทั้งหมดเป็นรายปี อย่างไรก็ตาม วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จำลองฟังก์ชันอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวจากการกระจายตัวแบบไวบูลล์ ที่อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวมีลักษณะเพิ่มขึ้นทุกวินาที ตามภาพที่ 6.2 ดังนั้น ภายหลังการบำรุงรักษาอุปกรณ์จึงต้องเฉลี่ยอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่ลดลงให้คงที่ในแต่ละปี (λ_i) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของจำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวในช่วงปีนั้นๆ ดังสมการที่ (6.19)

$$\lambda_i = [\int_{t_i}^{t_{i+1}} \lambda(t)dt]/[t_{i+1} - t_i] \tag{6.19}$$

ตัวอย่างเช่น อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวภายหลังการบำรุงรักษา ดังภาพที่ 6.20 สามารถคำนวณอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวภายหลังการบำรุงรักษาในแต่ละปี ได้ดังภาพที่ 6.21 ตามลำดับ



ภาพที่ 6.20 ตัวอย่างอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวภายหลังการบำรุงรักษา



ภาพที่ 6.21 ตัวอย่างอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวภายหลังการบำรุงรักษารายปี

เมื่อทราบอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวในแต่ละปีแล้ว ทำให้สามารถพิจารณาค่าใช้จ่ายทั้งหมดจากผลรวมของค่าใช้จ่ายเป็นรายปี หากในปีไหนไม่มีการบำรุงรักษาค่าใช้จ่ายในปีนั้นก็จะเป็นศูนย์

อย่างไรก็ตาม วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้สมมุติฐานประกอบการพิจารณา ดังต่อไปนี้

(1) การทำงานอุปกรณ์จำลองด้วยการกระจายตัวแบบไวบูลล์ ที่พารามิเตอร์บ่งบอกรูปร่างของการแจกแจงแบบไวบูลล์มีค่ามากกว่า 1 (β>1)

(2) ฟังก์ชันอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ที่จากการจำลองการทำงานอุปกรณ์ตามข้อ (1) จะมีค่าเพิ่มขึ้นทุกวินาที

(3) ภายหลังการบำรุงรักษาแบบแก้ไข ไม่ทำให้อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ดีขึ้น

(4) ภายหลังการบำรุงรักษาแบบป้องกันในเวลาเดียวกัน จะช่วยลดอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวทั้งอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟและแบบแอคทีฟ

(5) ภายหลังการบำรุงรักษา การกระจายตัวของอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวจะมีลักษณะเหมือนเดิม เพียงแต่มีขนาดลดลงตามประสิทธิภาพของการบำรุงรักษาครั้งก่อนหน้า

(6) ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันแต่ละครั้ง จะแปรผันตามขนาดการบำรุงรักษา

(7) ค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่พิจารณาจะคำนึงถึงอัตราเงินเฟ้อเสมอ

6.5.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุดนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือ (1) ระดับอุปกรณ์ และ (2) ระดับสถานีไฟฟ้า ซึ่งทั้งสองระดับมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ รายละเอียดของแนวคิดการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ และแนวคิดของการประมาณค่าใช้จ่ายต่างๆ ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 6.1 ถึง 6.4 ตามลำดับ

6.5.1.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับอุปกรณ์

การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด (ระดับอุปกรณ์) สามารถกำหนดได้จากค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่ผู้ให้บริการไฟฟ้าต้องสูญเสียไป ซึ่งประกอบด้วยค่าใช้จ่าย 2 ส่วน ดังต่อไปนี้

(1) ค่าใช้จ่ายจากการบำรุงรักษาแบบป้องกัน

จากสมการที่ 6.7 สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ภายใต้สมมุติฐานทางเศรษฐศาสตร์ ได้ดังสมการที่ (6.20)

$$TC_{PM} = \sum_{i=1}^{T}\left[C_{replace}\cdot\left(\frac{\delta_i}{\lambda_0(L)}\right)\cdot(1+d)^i\right] \tag{6.20}$$

โดย TC_{PM} คือ ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน (บาท)

$C_{replace}$ คือ ค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ (บาท)

$\lambda_0(L)$ คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวก่อนการบำรุงรักษาในปีที่ L (ครั้ง/ปี)

δ_i คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่ลดลงจากการบำรุงรักษาปีที่ i (ครั้ง/ปี)

d คือ อัตราเงินเฟ้อ (%)

i คือ ปีที่กำลังพิจารณา

L คือ อายุการใช้งานอุปกรณ์

T คือ ปีทั้งหมดที่พิจารณา

(2) ค่าใช้จ่ายจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไข

จากสมการที่ 6.13 จะเห็นว่าค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข เป็นการคำนวณจำนวนอุปกรณ์ที่ล้มเหลวทั้งหมดตลอดช่วงที่พิจารณาทั้งหมด ไม่ได้แยกเป็นรายปี ดังนั้น จึงสามารถใช้ประโยชน์จากคำนวณอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวรายปีในสมการที่ (6.19) ในการคำนวณจำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวเป็นรายปีได้ กล่าวคือ จำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวภายใน 1 ปี (ครั้ง) คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ในแต่ละปี (ครั้ง/ปี) นั่นเอง เมื่อคำนึงถึงสมมุติฐานทางเศรษฐศาสตร์สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข ได้ดังสมการที่ (6.21)

$$TC_{CM} = \sum_{i=1}^{T}\left[C_{CM}\cdot\lambda_i\cdot(1+d)^i\right] \tag{6.21}$$

โดย TC_{CM} คือ ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน (บาท)

C_{CM} คือ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไขต่อครั้ง (บาท/ครั้ง)

λ_i คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวภายหลังการบำรุงรักษาปีที่ i (ครั้ง/ปี)

ดังนั้น การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด (ระดับอุปกรณ์) สามารถกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ได้จากการบำรุงรักษาที่ทำให้ผลรวมของค่าใช้จ่ายของการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขซึ่งสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ (6.20) ถึง (6.21) ตามลำดับ ให้มีค่าน้อยที่สุด ดังสมการที่ (6.22)

$$\text{Minimize} \sum_{i=1}^{T}\left[C_{replace}\cdot\left(\frac{\delta_i}{\lambda_0(L)}\right)\cdot(1+d)^i + C_{CM}\cdot\lambda_i\cdot(1+d)^i\right] \tag{6.22}$$

6.5.1.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับสถานีไฟฟ้า

การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด (ระดับสถานีไฟฟ้า) สามารถกำหนดได้จากค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่ผู้ให้บริการไฟฟ้าต้องสูญเสียไป ซึ่งประกอบด้วยค่าใช้จ่าย 3 ส่วน ดังต่อไปนี้

(1) ค่าใช้จ่ายจากการบำรุงรักษาแบบป้องกัน

ค่าใช้จ่ายจากการบำรุงรักษาแบบป้องกันในระดับสถานีไฟฟ้า จะแตกต่างกับค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกันในระดับอุปกรณ์เพียงเล็กน้อย คือ ต้องรวมค่าใช้จ่ายอุปกรณ์ทุกตัวที่ได้รับการบำรุงรักษาในแต่ปีและในแต่ประเภทเหตุการณ์ล้มเหลวด้วย ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6.23)

$$TC_{PM} = \sum_{i=1}^{T}\sum_{j=1}^{N}\left[C_{replace}\cdot\left(\frac{\delta_{p,ij}}{\lambda_0(L)}+\frac{\delta_{a,ij}}{\lambda_0(L)}\right)\cdot(1+d)^i\right] \tag{6.23}$$

โดย $\delta_{p,ij}$ คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟของอุปกรณ์ที่ j ที่ลดลงจากการบำรุงรักษาปีที่ i (ครั้ง/ปี)

$\delta_{a,ij}$ คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอคทีฟของอุปกรณ์ที่ j ที่ลดลงจากการบำรุงรักษาปีที่ i (ครั้ง/ปี)

N คือ จำนวนอุปกรณ์ที่ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกันในปีที่ i

(2) ค่าใช้จ่ายจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไข

ค่าใช้จ่ายจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไขในระดับสถานีไฟฟ้า จะใกล้เคียงกับการบำรุงรักษาแบบแก้ไขในระดับอุปกรณ์ เพียงแต่ต้องคำนึงอุปกรณ์ทุกตัวที่เกิดเหตุเหตุการณ์ล้มเหลวทั้งแบบพาสซีฟ และแบบแอคทีฟ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6.24)

$$TC_{CM} = \sum_{i=1}^{T}\sum_{j=1}^{M}\left[C_{CM}\cdot(\lambda_{p,ij}+\lambda_{a,ij})\cdot(1+d)^{i}\right] \quad (6.24)$$

โดย $\lambda_{p,ij}$ คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟของอุปกรณ์ที่ j ภายหลังการบำรุงรักษาปีที่ i (ครั้ง/ปี)

$\lambda_{a,ij}$ คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอคทีฟของอุปกรณ์ที่ j ภายหลังการบำรุงรักษาปีที่ i (ครั้ง/ปี)

M คือ จำนวนอุปกรณ์ทั้งหมดที่ได้รับการบำรุงรักษาแบบแก้ไขในปีที่ i

(3) ค่าใช้จ่ายจากมูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ

จากสมการที่ 6.14 และ 6.15 ภายใต้สมมุติฐานทางเศรษฐศาสตร์สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายมูลค่าเสียหายอันเนื่องมากจากไฟฟ้าดับที่เกิดจากการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไข ได้ดังสมการที่ (6.25) และ (6.26)

- มูลค่าเสียหายอันเนื่องมากจากไฟฟ้าดับที่เกิดจากการบำรุงรักษาแบบป้องกัน

$$TCPM_{ENS} = \sum_{i=1}^{T}\left[IER\cdot ENS_{PM,i}\cdot(1+d)^{i}\right] \quad (6.25)$$

โดย $TCPM_{ENS}$ คือ มูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับจากการบำรุงรักษาแบบป้องกัน (บาท)

IER คือ อัตราความเสียหายต่อพลังงานเมื่อเกิดไฟฟ้าดับ (บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

$ENS_{PM,i}$ คือ ปริมาณโหลดที่ไม่ได้รับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าปีที่ i (กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี)

- มูลค่าเสียหายอันเนื่องมากจากไฟฟ้าดับที่เกิดจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไข

$$TCCM_{ENS} = \sum_{i=1}^{T}\left[IER\cdot(ENS_{CMp,i}+ENS_{CMa,i})\cdot(1+d)^{i}\right] \quad (6.26)$$

โดย $TCCM_{ENS}$ คือ มูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับจากการบำรุงรักษาแบบแก้ไข (บาท)

$ENS_{CMp,i}$ คือ ปริมาณโหลดที่ไม่ได้รับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟปีที่ i (กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี)

$ENS_{CMa,i}$ คือ ปริมาณโหลดที่ไม่ได้รับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอคทีฟปีที่ i (กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี)

ดังนั้น การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์สถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด (ระดับสถานีไฟฟ้า) สามารถกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ได้จากการบำรุงรักษาที่ทำให้ผลรวมของ

ค่าใช้จ่ายของการบำรุงรักษาแบบป้องกัน การบำรุงรักษาแบบแก้ไข และมูลค่าสูญเสียอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ (6.23) ถึง (6.26) ตามลำดับ ให้มีค่าน้อยที่สุด ดังสมการที่ (6.27)

$$\begin{aligned}\text{Minimize } & \sum_{i=1}^{T}\sum_{j=1}^{N}\left[C_{replace}\cdot\left(\frac{\delta_{p,ij}}{\lambda_0(L)}+\frac{\delta_{a,ij}}{\lambda_0(L)}\right)\cdot(1+d)^i\right] \\ & +\sum_{i=1}^{T}\sum_{j=1}^{M}\left[C_{CM}\cdot(\lambda_{p,ij}+\lambda_{a,ij})\cdot(1+d)^i\right] \\ & +\sum_{i=1}^{T}\left[IER\cdot(ENS_{PM,i}+ENS_{CMp,i}+ENS_{CMa,i})\cdot(1+d)^i\right]\end{aligned} \tag{6.27}$$

6.5.2 เงื่อนไขบังคับ

เงื่อนไขบังคับของการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด สามารถแบ่งออกเป็น 2 ระดับเช่นกัน คือ (1) ระดับอุปกรณ์ และ (2) ระดับสถานีไฟฟ้า ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.5.1.2 เงื่อนไขบังคับระดับอุปกรณ์

การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด (ระดับอุปกรณ์) ต้องกระทำภายใต้เงื่อนไข 2 เงื่อนไข คือ (1) เงื่อนไขความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ และ (2) เงื่อนไขอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่ลดลงจากการบำรุงรักษา

(1) เงื่อนไขความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์

ภายหลังการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในแต่ละปี อุปกรณ์ต้องมีความเชื่อถือได้ไม่น้อยกว่าความเชื่อถือได้ที่กำหนดไว้ ดังสมการที่ (6.28)

$$R(i)\geq R_{required} \tag{6.28}$$

โดย $R(i)$ คือ ความเชื่อถือได้ภายหลังการบำรุงรักษาปีที่ i

$R_{require}$ คือ ความเชื่อถือได้ที่กำหนดไว้

(2) เงื่อนไขอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่ลดลงจากการบำรุงรักษา

อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ลดลงจากการบำรุงรักษาในแต่ละครั้ง จะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวก่อนการบำรุงรักษาเริ่มต้นที่ปีที่ 0 ถึง อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวก่อนการบำรุงรักษาที่ปีที่ i ดังสมการที่ (6.29)

$$\lambda_0(0) < \delta_i < \lambda_0(i) \tag{6.29}$$

โดย δ_i คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่ลดลงจากการบำรุงรักษาปีที่ i (ครั้ง/ปี)

$\lambda_0(0)$ คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวก่อนการบำรุงรักษาเริ่มต้นปีที่ 0 (ครั้ง/ปี)

$\lambda_0(i)$ คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวก่อนการบำรุงรักษาปีที่ i (ครั้ง/ปี)

6.5.1.2 เงื่อนไขบังคับระดับสถานีไฟฟ้า

การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด (ระดับสถานีไฟฟ้า) ต้องกระทำภายใต้เงื่อนไข 2 เงื่อนไข เช่นเดียวกัน คือ (1) เงื่อนไขความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ และ (2) เงื่อนไขอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่ลดลงจากการบำรุงรักษา

(1) เงื่อนไขความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์

ดัชนีความเชื่อถือได้ที่พิจารณาจะประกอบด้วย 2 ดัชนี คือ (1) ดัชนี SAIFI และ (2) ดัชนี SAIDI ภายหลังการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าในแต่ละปี ดัชนีความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าต้องมีค่าเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ดังสมการที่ (6.28) และ (6.29) ตามลำดับ

$$SAIFI(i) \leq SAIFI_{required} \tag{6.28}$$

$$SAIDI(i) \leq SAIDI_{required} \tag{6.29}$$

โดย $SAIFI(i)$ คือ ดัชนี SAIFI ภายหลังการบำรุงรักษาปีที่ i (ครั้ง/ปี)

$SAIDI(i)$ คือ ดัชนี SAIDI ภายหลังการบำรุงรักษาปีที่ i (ชั่วโมง/ปี)

$SAIFI_{required}$ คือ ดัชนี SAIFI ที่กำหนดไว้ (ครั้ง/ปี)

$SAIDI_{required}$ คือ ดัชนี SAIDI ที่กำหนดไว้ (ชั่วโมง/ปี)

(2) เงื่อนไขอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่ลดลงจากการบำรุงรักษา

เช่นเดียวกับ เงื่อนไขอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ลดลงจากการบำรุงรักษาในระดับอุปกรณ์ เพียงแต่เงื่อนไขดังกล่าวต้องครอบคลุมถึงอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวทั้ง 2 ประเภทด้วย คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ และ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอคทีฟ ดังสมการที่ (6.30) และ (6.31) ตามลำดับ

$$\lambda_{p0}(0) < \delta_{p,i} < \lambda_{p0}(i) \tag{6.30}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$\lambda_{a0}(0) < \delta_{a,i} < \lambda_{a0}(i) \tag{6.31}$$

โดย $\delta_{p,i}$ คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟที่ลดลงจากการบำรุงรักษาปีที่ i (ครั้ง/ปี)

$\delta_{a,i}$ คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอคทีฟที่ลดลงจากการบำรุงรักษาปีที่ i (ครั้ง/ปี)

$\lambda_{p0}(0)$ คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟก่อนการบำรุงรักษาเริ่มต้นปีที่ 0 (ครั้ง/ปี)

$\lambda_{a0}(0)$ คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอคทีฟก่อนการบำรุงรักษาเริ่มต้นปีที่ 0 (ครั้ง/ปี)

$\lambda_{p0}(i)$ คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟก่อนการบำรุงรักษาปีที่ i (ครั้ง/ปี)

$\lambda_{a0}(i)$ คือ อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอคทีฟก่อนการบำรุงรักษาปีที่ i (ครั้ง/ปี)

ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าปัญหาการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด ทั้งในระดับอุปกรณ์และระดับสถานีไฟฟ้า มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เงื่อนไขบังคับ และคำตอบที่ต้องค้นหาดังต่อไปนี้

- การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด (ระดับอุปกรณ์)
    - ฟังก์ชันวัตถุประสงค์: สมการที่ (6.22)
    - เงื่อนไขบังคับ: สมการที่ (6.28) ถึง (6.29)
    - คำตอบที่ต้องค้นหา: **ปีใด**ควรบำรุงรักษาแบบป้องกัน เพื่อที่ทำให้มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขบังคับต่างๆ
- การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด (ระดับสถานีไฟฟ้า)
    - ฟังก์ชันวัตถุประสงค์: สมการที่ (6.27)
    - เงื่อนไขบังคับ: สมการที่ (6.30) ถึง (6.31)
    - คำตอบที่ต้องค้นหา: **อุปกรณ์ใดในปีไหน**ควรบำรุงรักษาแบบป้องกัน เพื่อที่ทำให้มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขบังคับต่างๆ

6.5.3 การประยุกต์วิธีการหาค้นหาคำตอบด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรมเข้ากับปัญหาการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด

เพื่อกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด จึงประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาคำตอบด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm: GA) ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุด ตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขบังคับ ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ส่วนสำคัญของการค้นหาคำตอบด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม คือ การกำหนดบิตในการเข้ารหัสและถอดรหัส เพื่อทำให้ใช้ในการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และประเมินฟังก์ชันความเหมาะสม

เมื่อวิเคราะห์คำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดในการบำรุงรักษาแบบป้องกันของแต่ละอุปกรณ์ พบว่าอุปกรณ์หนึ่งสามารถเป็นไปอยู่ 3 เหตุการณ์ ดังต่อไปนี้

(1) อุปกรณ์ไม่ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกัน (อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวไม่เปลี่ยนแปลง)

(2) อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกัน (อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวมีค่าลดลง)

(3) อุปกรณ์ถูกเปลี่ยนเป็นอุปกรณ์ใหม่ (อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเริ่มต้นใหม่ที่ศูนย์)

เมื่อนำคำตอบที่เป็นไปได้ของอุปกรณ์มาเข้ารหัส พบว่าอุปกรณ์แต่ละตัวสามารถเข้ารหัสด้วย 2 บิต และหากแทนบิตดังกล่าวด้วยเลขฐาน 2 สามารถแทนได้ 4 คำตอบ จะเห็นได้ว่าคำตอบในบิตเหลืออยู่อีก 1 คำตอบ ดังนั้น เพื่อให้การค้นหาคำตอบเป็นไปอย่างรวดเร็ว จึงกำหนดให้ เหตุการณ์ที่อุปกรณ์ไม่ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกันแทนด้วยคำตอบ 2 คำตอบ เพราะเหตุการณ์นี้มีโอกาสเกิดขึ้นมากที่สุด การถอดรหัสคำตอบในแต่ละบิตของอุปกรณ์ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 การถอดรหัสคำตอบในแต่ละบิตของอุปกรณ์

การเข้ารหัส	การถอดรหัส	ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่ออัตราเหตุการณ์ล้มเหลว
0 0	อุปกรณ์ไม่ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกัน	ไม่เปลี่ยนแปลง
0 1		
1 0	อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกัน	มีค่าลดลงตามประสิทธิภาพการบำรุงรักษา
1 1	อุปกรณ์ถูกเปลี่ยนเป็นอุปกรณ์ใหม่	เริ่มต้นที่ค่าศูนย์

สำหรับความยาวของโครโมโซม ที่เป็นตัวแทนของชุดคำตอบทั้งหมด สามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณีตามระดับการบำรุงรักษา ดังต่อไปนี้ดังต่อไปนี้

- **การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด (ระดับอุปกรณ์)**

โครโมโซมสำหรับคำตอบของการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด (ระดับอุปกรณ์) แสดงได้ดังภาพที่ 6.22

ปีที่	ชุดที่	ปีที่ 1		ปีที่ 2		ปีที่ 3		ปีที่ 4		ปีที่ 5		…	ปีที่ L	
การลงรหัส	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	…	1	0
	2	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	…	1	1
	⋮													
	n	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	…	1	0

ภาพที่ 6.22 โครโมโซมสำหรับคำตอบการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด

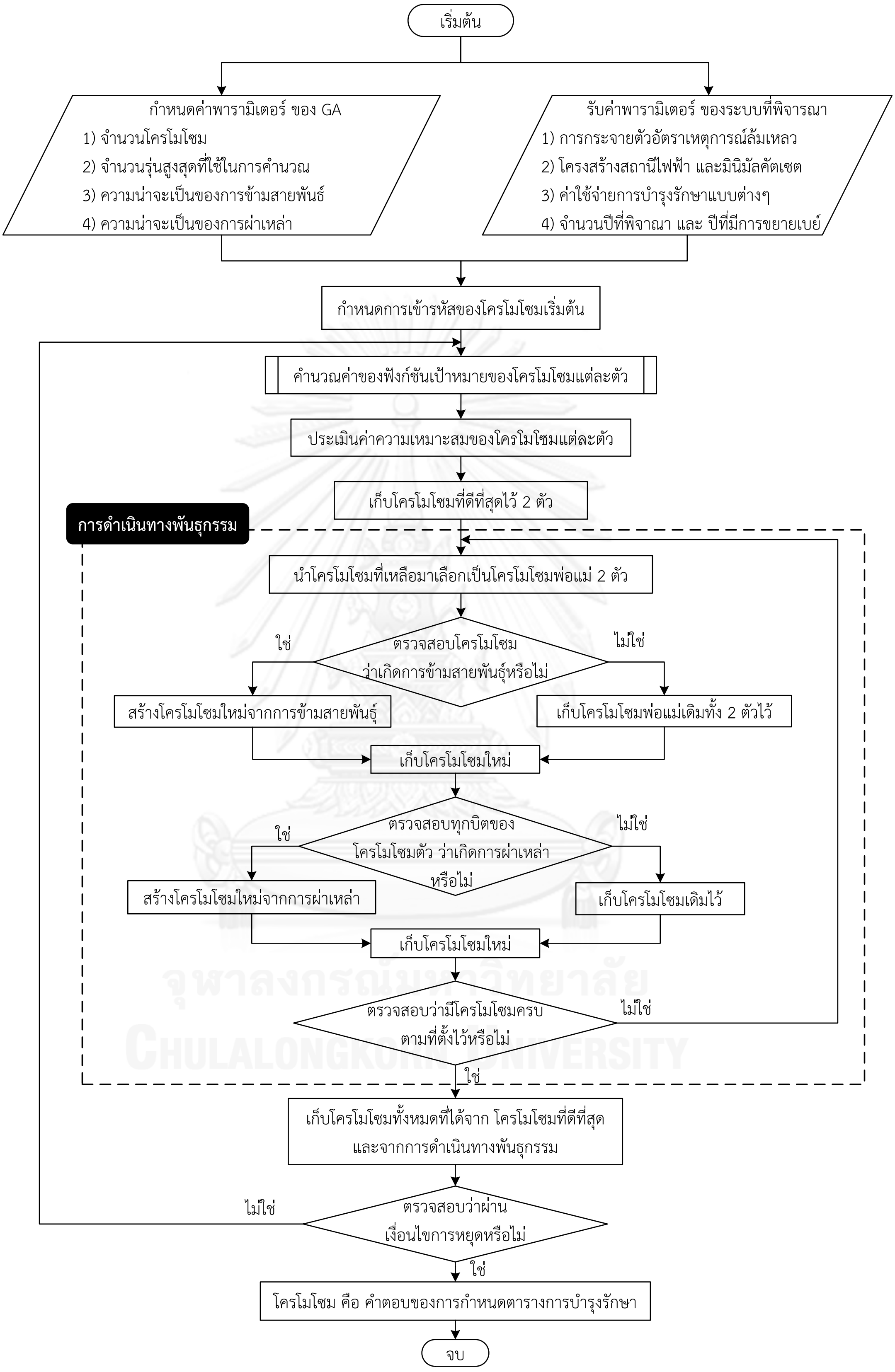
- **การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด (ระดับสถานีไฟฟ้า)**

โครโมโซมสำหรับคำตอบของการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด (ระดับสถานีไฟฟ้า) แสดงได้ดังภาพที่ 6.23

ปีที่	ชุดที่	ปีที่ 1							…	ปีที่ L						
อุปกรณ์		CB1		CB2		…	X			CB1		CB2		…	X	
การลงรหัส	1	0	0	0	1	…	1	0		0	0	0	1	…	1	0
	2	0	0	1	0	…	1	1		0	0	1	0	…	1	1
	⋮															
	n	0	0	0	0	…	1	0		1	1	1	0	…	0	0

ภาพที่ 6.23 โครโมโซมสำหรับคำตอบการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด

เมื่อนำการเข้ารหัสและการถอดรหัสโครโมโซมของการบำรุงรักษาอุปกรณ์ ที่กล่าวไปข้างต้นมาเข้าสู่กระบวนการค้นหาคำตอบด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม ก็สามารถหาคำตอบที่บรรลุวัตถุประสงค์ภายใต้เงื่อนไขบังคับได้ โดยขั้นตอนการค้นหาคำตอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม สามารถแสดงได้ดังแผนผังในภาพที่ 6.24



ภาพที่ 6.24 ขั้นตอนการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด

จากภาพที่ 6.24 ขั้นตอนการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุดด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการค้นหาคำตอบด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

<u>ขั้นตอนที่ 1</u> กำหนดค่า

1) ค่าพารามิเตอร์ของขั้นตอนเชิงพันธุกรรม
   - จำนวนโครโมโซมเริ่มต้น
   - จำนวนรุ่นสูงสุดที่ใช้ในการคำนวณ
   - ความน่าจะเป็นของการข้ามสายพันธุ์
   - ความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่า
2) ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่พิจารณา
   - พารามิเตอร์การกระจายตัวของอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว
   - โครงสร้างสถานีไฟฟ้า และมินิมัลคัตเซต
   - ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขในแต่ครั้งของแต่ละอุปกรณ์ และอัตราความเสียหายต่อพลังงานเมื่อเกิดไฟฟ้าดับ
   - จำนวนปีที่พิจารณา และปีที่มีการขยายสถานีไฟฟ้า (ขยายเบย์)

<u>ขั้นตอนที่ 2</u> กำหนดการเข้ารหัสของโครโมโซมเริ่มต้น ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ

1) การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด (ระดับอุปกรณ์) โครงสร้างของการเข้าและการถอดรหัส จะมีลักษณะดังภาพที่ 6.22
2) การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด (ระดับสถานีไฟฟ้า) โครงสร้างของการเข้าและการถอดรหัส จะมีลักษณะดังภาพที่ 6.23

<u>ขั้นตอนที่ 3</u> คำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในแต่ละโครโมโซม มีขั้นตอนย่อยดังต่อไปนี้

<u>ขั้นตอนที่ 3.1</u> ทำการถอดรหัสโครโซม ตามตารางการถอดรหัสคำตอบในแต่ละบิตของอุปกรณ์ในตารางที่ 6.4

<u>ขั้นตอนที่ 3.2</u> นำการถอดรหัสที่ได้ในขั้นตอนที่ 3.1 มาประเมินผลกระทบต่ออัตราเหตุการณ์ล้มเหลว และประเมินอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวให้อยู่ในรูปแต่ละปี ตามสมการที่ 6.19

<u>ขั้นตอนที่ 3.3</u> นำอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวมาประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และเงื่อนไขบังคับ หากไม่เป็นตามเงื่อนไขให้พิจารณาโครโซมใหม่ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณี

1) การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด (ระดับอุปกรณ์)
   - <u>ฟังก์ชันวัตถุประสงค์:</u> สมการที่ (6.22)
   - <u>เงื่อนไขบังคับ:</u> สมการที่ (6.28) ถึง (6.29)
2) การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด (ระดับสถานีไฟฟ้า)
   - <u>ฟังก์ชันวัตถุประสงค์:</u> สมการที่ (6.27)
   - <u>เงื่อนไขบังคับ:</u> สมการที่ (6.30) ถึง (6.31)

<u>ขั้นตอนที่ 4</u> ประเมินค่าความเหมาะสม เนื่องจากปัญหานี้เป็นการหาจุดต่ำสุดของฟังก์ชัน จึงสามารถประเมินค่าความเหมาะสมของโครโมโซมแต่ละตัวได้ดังสมการที่ (6.32)

$$f(x) = \frac{1}{F(x)} \tag{6.32}$$

โดย $f(x)$ คือ ฟังก์ชันความเหมาะสม

$F(x)$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

<u>ขั้นตอนที่ 5</u> คัดเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุด เพื่อเป็นหลักประกันที่จะบ่งบอกถึงว่าประชากรในรุ่นถัดไปจะมีประชากรที่ดีกว่ารุ่นก่อนหน้า จึงเลือกโครโมโซมที่ดีสุดในแต่ละรอบไว้ก่อน 2 โครโมโซม ดังหลักการที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.2.4

<u>ขั้นตอนที่ 6</u> คัดเลือกสายพันธุ์ นำโครโซมที่ไม่ได้รับคัดเลือกในขั้นตอนที่ 5 มาดำเนินการคัดเลือกสายพันธุ์ตามหลักการที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.2.5

<u>ขั้นตอนที่ 7</u> ดำเนินการทางพันธุกรรม นำโครโมโซมที่ถูกคัดเลือกในขั้นตอนที่ 6 มาดำเนินการทางพันธุกรรม ดังต่อไปนี้

1) <u>การข้ามสายพันธุ์</u> ปัญหานี้เลือกใช้การข้ามสายพันธุ์แบบยูนิฟอร์ม ด้วยการสุ่มความน่าจะเป็นในการข้ามสายพันธุ์ แล้วตรวจสอบกับความน่าจะเป็นในการข้ามสายพันธุ์ ตามหลักการที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.2.6.1

2) <u>การผ่าเหล่า</u> ด้วยการสุ่มความน่าจะเป็นในการผ่าเหล่าในแต่ละบิตของโครโมโซม แล้วตรวจสอบกับความน่าจะเป็นในการข้ามสายพันธุ์ ตามหลักการที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.2.6.2

<u>ขั้นตอนที่ 8</u> ตรวจสอบโครโมโซมที่ได้จากการดำเนินการทางพันธุกรรมว่ามีจำนวนครบตามจำนวนโครโมโซมตั้งต้นที่ไม่ได้รวมโครโมโซมที่ดีที่สุดในขั้นตอนที่ 5 ($n-2$ ตัว) หากกำหนดให้มีประชากรเริ่มต้น n ตัว หรือไม่

1) หากไม่ครบตามจำนวนโครโมโซมตั้งต้น ให้เริ่มการดำเนินทางพันธุกรรมใหม่ตั้งแต่การคัดเลือกสายพันธ์ในขั้นตอนที่ 6
2) หากครบตามจำนวนโครโมโซมตั้งต้น ให้พิจารณาขั้นตอนถัดไป

<u>ขั้นตอนที่ 9</u> เก็บโครโมโซมทั้งหมดที่ได้จากการคัดเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุดขั้นตอนที่ 5 และโครโมโซมทั้งหมดที่ได้จากการดำเนินทางพันธุกรรมในขั้นตอนที่ 7

<u>ขั้นตอนที่ 10</u> เปรียบเทียบ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทุกโครโมโซมมีค่าเท่ากัน หรือ รอบการคำนวณมีค่าเท่ากับจำนวนรอบสูงสุดตามที่ได้กำหนดไว้ หรือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีการลู่เข้า

1) หากเป็นไปตามเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่ง ให้หยุดการทำงาน
2) หากไม่อยู่ภายในเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่ง ให้กลับไปในขั้นตอนที่ 3

<u>ขั้นตอนที่ 11</u> จบการทำงาน โครโมโซม คือ แผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 7
การทดสอบและวิเคราะห์ผล

เพื่อเป็นการประเมินประสิทธิภาพของแนวคิดการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุดที่กล่าวไปข้างต้น จึงได้นำเสนอการทดสอบที่ครอบคลุม 2 ปัจจัยหลักของปัญหา คือ (1) แผนการบำรุงรักษาที่เหมาะที่สุดในระดับอุปกรณ์และระดับสถานีไฟฟ้า และ (2) ความไวของพารามิเตอร์ในแบบจำลองการบำรุงรักษาที่ส่งผลต่อการกำหนดแผนการบำรุงรักษา

7.1 ข้อมูลพื้นฐานและระบบทดสอบ

เพื่อทดสอบแนวทางการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุดตามที่ได้นำเสนอ จำเป็นต้องใช้ข้อมูลของพารามิเตอร์ประกอบการทดสอบ ดังต่อไปนี้

7.1.1 ข้อมูลทางสถิติและพิกัดของอุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ได้นำมาทดสอบ เป็นอุปกรณ์ของสถานีไฟฟ้าในระบบส่งไฟฟ้า ที่มีระดับแรงดัน 115/22 kV ซึ่งเป็นสถานีไฟฟ้าในระบบแรงดันที่มีความสำคัญอย่างมาก ดังนั้น หากมีการบำรุงรักษาอุปกรณ์แบบป้องกันแล้วส่งผลกระทบต่อการส่งกำลังไฟฟ้า จะต้องมีการเตรียมอุปกรณ์สำรองเพื่อทดแทนอุปกรณ์ดังกล่าวเสมอ ค่าสถิติต่างๆ ของอุปกรณ์มีแหล่งที่มาดังต่อไปนี้

- อัตราเหตุการณ์ล้มเหลว : เซอร์กิตเบรกเกอร์ และหม้อแปลงไฟฟ้า นำมาจากบทความในอดีต [3], [35], [36] สำหรับบัสบาร์ นำข้อมูลมาจากโครงการศึกษาวิเคราะห์เพื่อหาอัตราความเสียหายและอัตราซ่อมแซมของอุปกรณ์ในระบบจ่ายไฟฟ้า [32]
- ระยะเวลาการเตรียมการบำรุงแบบป้องกัน : สอบถามข้อมูลจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- ระยะเวลาการซ่อมแซม : นำข้อมูลมาจากโครงการศึกษาวิเคราะห์เพื่อหาอัตราความเสียหายและอัตราซ่อมแซมของอุปกรณ์ในระบบจ่ายไฟฟ้า [32]
- ระยะเวลาการสวิตช์ชิง : สอบถามข้อมูลจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

เนื่องจากข้อมูลที่นำมาทดสอบไม่สามารถนำมาจากแหล่งเดียว จึงต้องสืบค้นข้อมูลจากหลายแหล่งที่มา และต้องนำมาข้อมูลเหล่านั้นมาผสมผสามกันอย่างมีเหตุผล โดยสามารถสรุปค่าสถิติต่างๆ ดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ข้อมูลทางสถิติและพิกัดของอุปกรณ์

พารามิเตอร์		เซอร์กิตเบรกเกอร์	หม้อแปลงไฟฟ้า	บัสบาร์
พิกัดอุปกรณ์		115 kV 2,000 A (40 kA)	115/22 kV 3ϕ 50 MVA	Cu 2000 A, 3 main bar
อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวแบบพาสซีฟ (ครั้ง/ปี)	α	-	-	-
	β	-	-	-
อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวแบบแอคทีฟ (ครั้ง/ปี)	α	21.89	16.12	28.40
	β	2.07	3.55	2
ระยะเวลาการเตรียมการบำรุงแบบป้องกัน (ชม./ครั้ง) (r_m)		0.25	0.25	0.25
ระยะเวลาการซ่อมแซม (ชม./ครั้ง) (r_r)		1.49	0.6678	2
ระยะเวลาการสวิตช์ชิง (ชม./ครั้ง) (r_s)		0.5	0.5	0.5

ทั้งนี้ กำหนดให้พิจารณาการบำรุงรักษาทั้งหมด (T) 25 ปี และอุปกรณ์ทุกอุปกรณ์มีอายุการใช้งาน (L) 25 ปีเช่นเดียวกัน

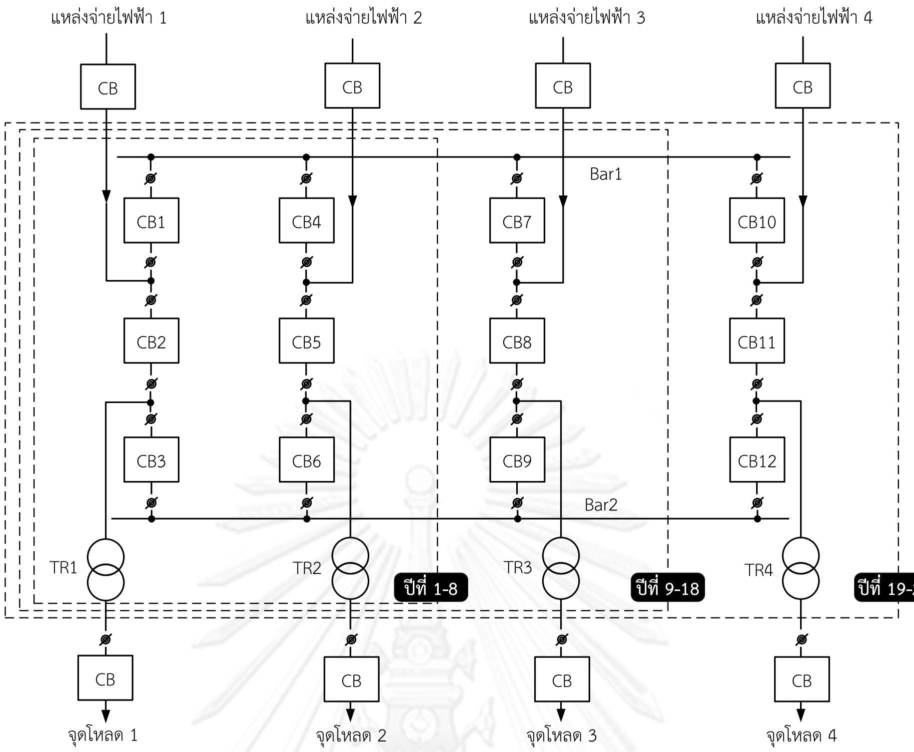
7.1.2 รูปแบบการจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้าและการขยายสถานีไฟฟ้า

การจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้ามีหลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบส่งผลต่อความเชื่อถือได้ที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้พิจารณาการจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้าในระบบส่งไฟฟ้าที่นิยมใช้ในการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย [1] จำนวน 2 รูปแบบ คือ (1) การจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้ารูปแบบ Breaker-and-a-half, (2) การจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้ารูปแบบ Double-bus-double-breaker

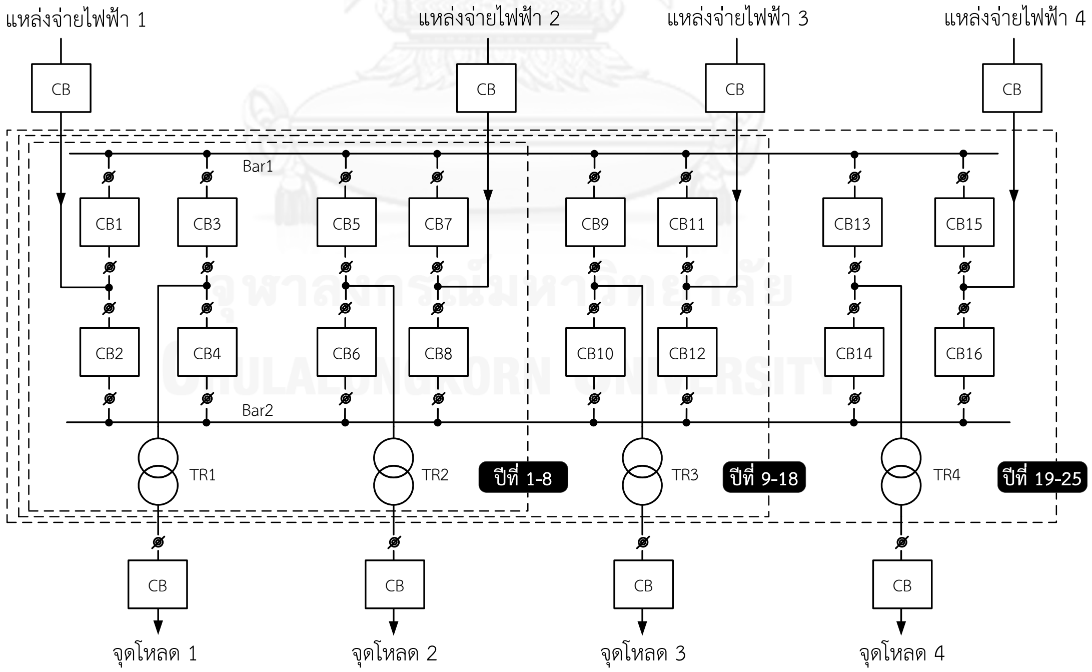
นอกจากนี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้พิจารณาการขยายสถานีไฟฟ้าที่ได้ถูกกำหนดโดยผู้ใช้ ซึ่งการทดสอบนี้ได้กำหนดให้ในแต่ละสถานีไฟฟ้ามีการขยายสถานีไฟฟ้าเพื่อรองรับการเจริญเติบโตของโหลดด้วยครั้งละ 1 เบย์ ดังนั้น เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์จึงกำหนดให้ปีแรก สถานีไฟฟ้าได้รับการส่งกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าด้านขาเข้า 2 ทิศทาง และสถานีไฟฟ้าได้จ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังจุดโหลดด้านขาออก 2 ทิศทางเช่นกัน สำหรับการขยายสถานีไฟฟ้าในแต่ละเบย์ จะประกอบด้วย การส่งกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าด้านขาเข้า 1 ทิศทางและจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังจุดโหลดด้านขาออก 1 ทิศทางเสมอ

- **กำหนดให้มีการขยายสถานีไฟฟ้าในปีที่:** ต้นปีที่ 9 และ 19

การจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 7.1 ถึง 7.2



ภาพที่ 7.1 การจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้าแบบ Beaker-and-a-half



ภาพที่ 7.2 การจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้ารูปแบบ Double-bus-double-breaker

<u>หมายเหตุ</u> สวิตช์ตัดตอนทุกตัวที่พิจารณาในสถาวะปกติ จะอยู่สถานะปกติปิด

7.1.3 ค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องในการกำหนดแผนการบำรุงรักษา

ค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องในการกำหนดแผนการบำรุงรักษาของอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละประเภท ตามแบบจำลองการบำรุงรักษาที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 6 จะอยู่ภายใต้สมมุติฐานอัตราเงินเฟ้อร้อยละ 2.5 [37] สำหรับค่าใช้จ่ายต่างๆ มีค่าดังต่อไปนี้

- **ค่าใช้จ่ายสำหรับการบำรุงรักษา:** ค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ จะมีค่าเท่ากับมูลค่าการลงทุนเริ่มต้นของการจัดซื้ออุปกรณ์ ตามข้อมูลของกองอุปกรณ์ไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และการไฟฟ้านครหลวง สำหรับค่าใช้จ่ายการบำรุงรักแบบแก้ไข กำหนดให้ประมาณจากมูลค่าการลงทุนเริ่มต้นในอัตราร้อยละ 5 ดังแสดงในตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 ค่าใช้จ่ายสำหรับการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในแต่ละประเภท

ค่าใช้จ่ายสำหรับการบำรุงรักษา (บาท)	อุปกรณ์		
	เซอร์กิตเบรกเกอร์	**หม้อแปลงไฟฟ้า**	**บัสบาร์**
การเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ ($C_{replace}$)	1,000,000	37,700,000	128,000
การบำรุงรักษาแบบแก้ไขในแต่ละครั้ง (C_{CM})	50,000	1,885,000	6,400

- **อัตราความเสียหายต่อพลังงานเมื่อเกิดไฟฟ้าดับ (IER):** กำหนดจากอัตราความเสียหายต่อพลังงานเมื่อเกิดไฟฟ้าดับของทั้งประเทศ ตามโครงการศึกษาอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน [38] คือ 81.94 บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง

7.1.4 การจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้คำนึงถึงการเจริญเติบโตโหลดของสถานีไฟฟ้า ด้วยการอ้างอิงจากการพยากรณ์ความต้องการไฟฟ้าสำหรับจัดทำแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย (Power development plan: PDP) พ.ศ. 2555-2573 (ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 3) พฤษภาคม 2555 [39] โดยใช้สมมุติฐานว่า ในปีแรกปริมาณโหลดเฉลี่ยในสถานีไฟฟ้ามีค่าเป็น 60 % ของพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งหมดและมีปริมาณโหลดในแต่ละจุดโหลดที่เท่ากัน หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นของโหลดเป็นไปตาม PDP ดังกล่าว โดยมีเงื่อนไขที่ปริมาณโหลดเฉลี่ยในแต่ละจุดมีค่าไม่เกิน 80 % ของพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้า ณ จุดโหลดนั้น

- **กำหนดให้พิจารณาการกำหนดแผนการบำรุงรักษา (L)** : 25 ปี

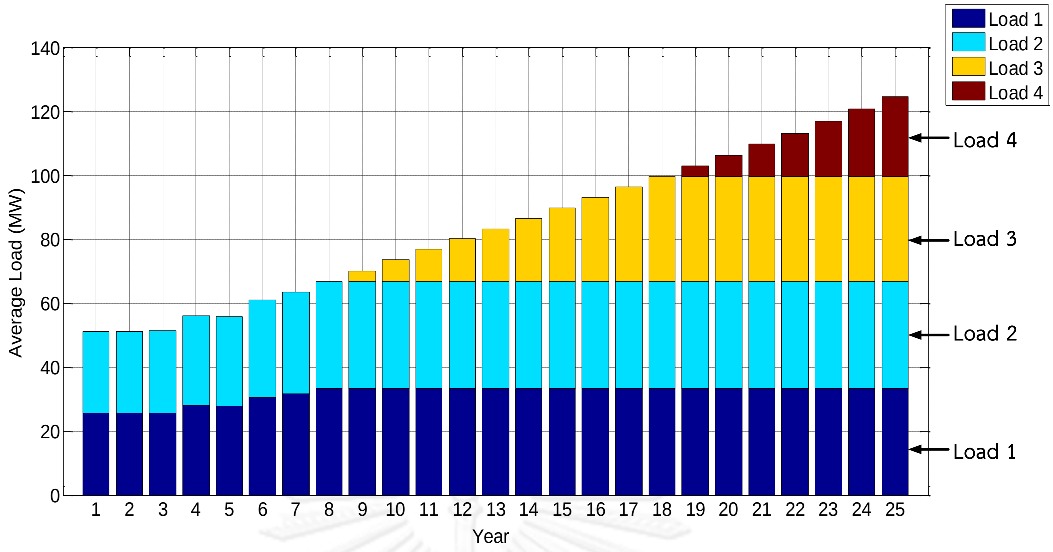
ปริมาณโหลดเฉลี่ยในแต่ละจุดโหลด แสดงได้ดังตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 ปริมาณโหลดเฉลี่ยในแต่ละจุดโหลด

ปีที่	ปริมาณโหลดเฉลี่ยทั้งหมด		ปริมาณโหลดเฉลี่ยในแต่ละจุดโหลด (MW)			
	MW	อัตราการเพิ่ม (%)	จุดโหลด 1	จุดโหลด 2	จุดโหลด 3	จุดโหลด 4
1	68	-	25.50	25.50	-	-
2	68.18	0.26	25.57	25.57	-	-
3	68.37	0.28	25.64	25.64	-	-
4	74.60	9.11	27.97	27.97	-	-
5	74.28	-0.43	27.85	27.85	-	-
6	81.32	9.49	30.50	30.50	-	-
7	84.68	4.13	31.76	31.76	-	-
8	88.84	4.91	33.32	33.32	-	-
9	93.28	5.00	33.32	33.32	3.33	-
10	98.15	5.22	33.32	33.32	6.98	-
11	102.65	4.58	33.32	33.32	10.36	-
12	106.75	4.00	33.32	33.32	13.43	-
13	110.69	3.69	33.32	33.32	16.39	-
14	115.19	4.06	33.32	33.32	19.76	-
15	119.51	3.75	33.32	33.32	23.00	-
16	123.86	3.64	33.32	33.32	26.26	-
17	128.28	3.57	33.32	33.32	29.58	-
18	132.66	3.42	33.32	33.32	32.87	-
19	137.08	3.33	33.32	33.32	33.32	3.22
20	141.67	3.35	33.32	33.32	33.32	6.67
21	146.35	3.30	33.32	33.32	33.32	10.17
22	150.84	3.07	33.32	33.32	33.32	13.54
23	155.70	3.22	33.32	33.32	33.32	17.19
24	160.78	3.26	33.32	33.32	33.32	20.99
25	166.02	3.26	33.32	33.32	33.32	24.92

การเจริญเติบโตของโหลดที่พิจารณาตามตารางที่ 7.3 ตลอด 25 ปีที่พิจาณามีจุดโหลดทั้งสิ้น 4 จุดโหลด โหลดรวมทั้งหมด 2,101 MW ภาพรวมของปริมาณโหลดในแต่ละจุดโหลด ในแต่ละปี สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 7.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 7.3 ภาพรวมการเจริญเติบโตโหลดที่พิจารณา

7.1.5 เงื่อนไขบังคับความเชื่อถือได้

การกำหนดตารางการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า ต้องมีเงื่อนไขบังคับทางด้านความเชื่อถือได้ ดังต่อไปนี้

- **ระดับอุปกรณ์:** กำหนดให้ความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ (R) ในแต่ละปีต้องไม่น้อยกว่า 0.9
- **ระดับสถานีไฟฟ้า:** เนื่องจากสถานีไฟฟ้าที่นำมาทดสอบเป็นสถานีไฟฟ้าในระบบส่งไฟฟ้า ดังนั้น จึงต้องกำหนดให้ความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าในแต่ละปี เป็นตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพบริการไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ตามประกาศของคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน พ.ศ. 2553 ดังตารางที่ 7.4

ตารางที่ 7.4 เกณฑ์มาตราฐานคุณภาพบริการไฟฟ้า

ดัชนีความเชื่อถือได้	มาตราฐานคุณภาพบริการไฟฟ้า
System Average Interruption Frequency Index (SAIFI)	ไม่เกิน 0.331 ครั้ง/ปี/จุดจ่ายไฟฟ้า
System Average Interruption Duration Index (SAIDI)	ไม่เกิน 9.528 นาที/ปี/จุดจ่ายไฟฟ้า

ทั้งนี้ หากเป็นสถานีไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เกณฑ์มาตราฐานคุณภาพบริการไฟฟ้าดังกล่าวจะมีค่าแตกต่างออกไป

7.1.6 การกำหนดค่าของตัวแปรในการค้นหาคำตอบด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม

กระบวนการค้นหาคำตอบด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม จำเป็นต้องกำหนดค่าของตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการค้นหา ดังตารางที่ 7.5

ตารางที่ 7.5 การกำหนดค่าของตัวแปรในการค้นหาคำตอบด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม

ตัวแปรการค้นหาคำตอบด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม	ค่าของตัวแปรที่กำหนด
จำนวนโครโมโซมเริ่มต้น	500
จำนวนรุ่นสูงสุดที่ใช้ในการคำนวณ	100
ความน่าจะเป็นของการข้ามสายพันธุ์	0.2
ความน่าจะเป็นของการผ่าเหล่า	0.9

7.2 การทดสอบ

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของแนวคิดการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 6 จึงได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 รูปแบบ คือ

(1) การทดสอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด (ระดับอุปกรณ์)

(2) การทดสอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด (ระดับสถานีไฟฟ้า)

ซึ่งแต่ละรูปแบบมีครอบคลุมวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

รูปแบบที่ 1 การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด (ระดับอุปกรณ์)

- การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด
  - เซอร์กิตเบรกเกอร์
  - หม้อแปลงไฟฟ้า
  - บัสบาร์
- ความไวของพารามิเตอร์ในแบบจำลองการบำรุงรักษาที่ส่งผลต่อการกำหนดแผนการบำรุงรักษา

รูปแบบที่ 2 การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด (ระดับสถานีไฟฟ้า)

- กลุ่มมินิมัลคัตภายในสถานีไฟฟ้า
  - การจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้ารูปแบบ Breaker-and-a-half
  - การจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้ารูปแบบ Double-bus-double-breaker

- การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด
    - การจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้ารูปแบบ Breaker-and-a-half
    - การจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้ารูปแบบ Double-bus-double-breaker

7.2.1 การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด

การทดสอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด (ระดับอุปกรณ์) จะทดสอบอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า 3 ประเภท ได้แก่ เซอร์กิตเบรกเกอร์ หม้อแปลงไฟฟ้า และบัสบาร์ ซึ่งอุปกรณ์แต่ละประเภทมีลักษณะการแจกความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวและมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแตกต่างกันตามตารางที่ 7.1 และ 7.2 ตามลำดับ การทดสอบในแต่ละประเภทอุปกรณ์ได้แบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ

(1) ก่อนการบำรุงรักษาอุปกรณ์
(2) อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกันตามวงรอบที่กำหนด
(3) อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกันก็ต่อเมื่อมีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด
(4) อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกันอย่างเหมาะสม

ทั้งนี้ กำหนดให้การบำรุงรักษาแบบป้องกันในแต่ละครั้งมี<u>**ประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์**</u>

สำหรับกรณีที่ 4 อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกันอย่างเหมาะสม จะดำเนินการค้นหาคำตอบด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม ภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขบังคับดังนี้

- <u>ฟังก์ชันวัตถุประสงค์:</u> สมการที่ (6.22)
- <u>เงื่อนไขบังคับ:</u> สมการที่ (6.28) ถึง (6.29)
- <u>คำตอบที่ต้องค้นหา:</u> <u>**ปีใด**</u>ควรบำรุงรักษาแบบป้องกัน เพื่อที่ทำให้มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขบังคับต่างๆ

7.2.1.1 ผลการทดสอบการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด

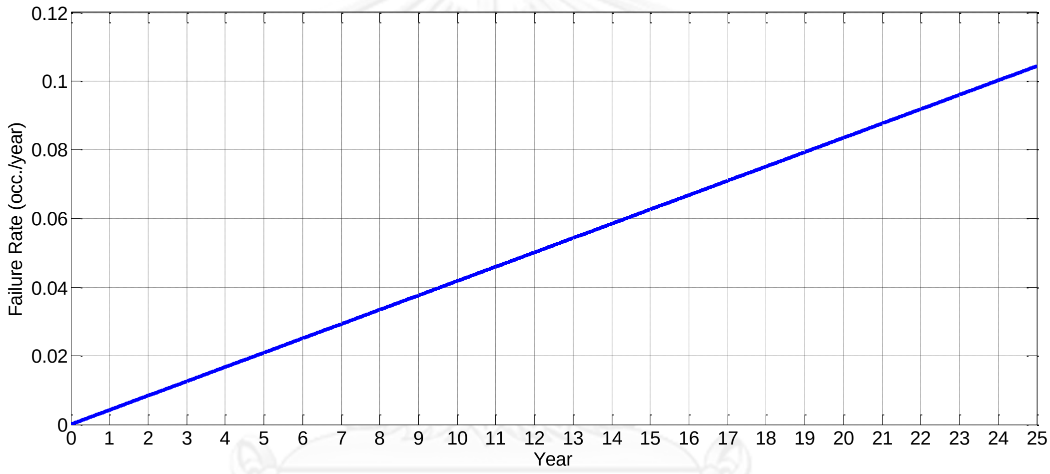
ผลการทดสอบการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ หม้อแปลงไฟฟ้า บัสบาร์ ในแต่ละกรณีศึกษามีดังต่อไปนี้

7.2.1.1.1 ผลการทดสอบการบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์

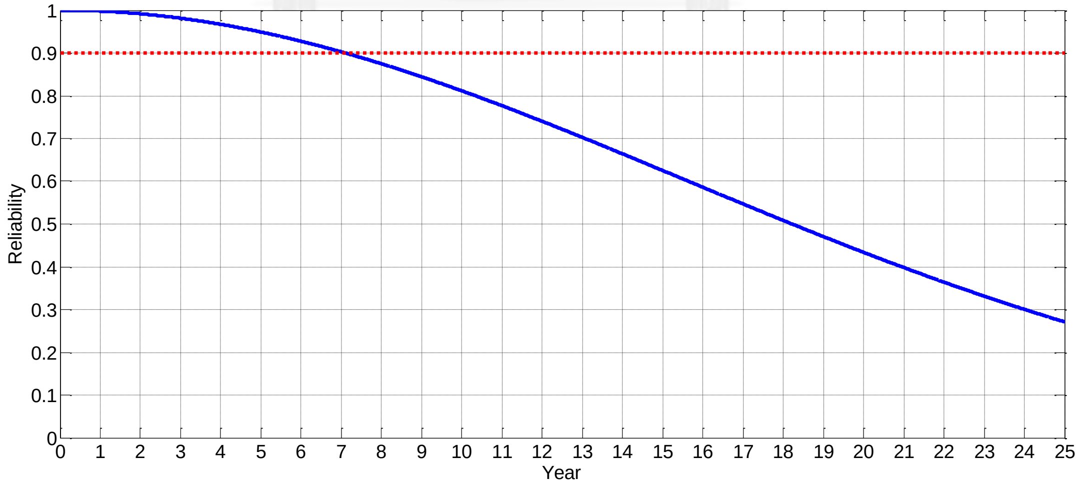
การทดสอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์ ด้วยการทดสอบทั้ง 4 กรณีมีความเชื่อถือได้ และผลรวมของค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแต่ละประเภท ดังต่อไปนี้

<u>กรณีที่ 1</u> ก่อนการบำรุงรักษาอุปกรณ์

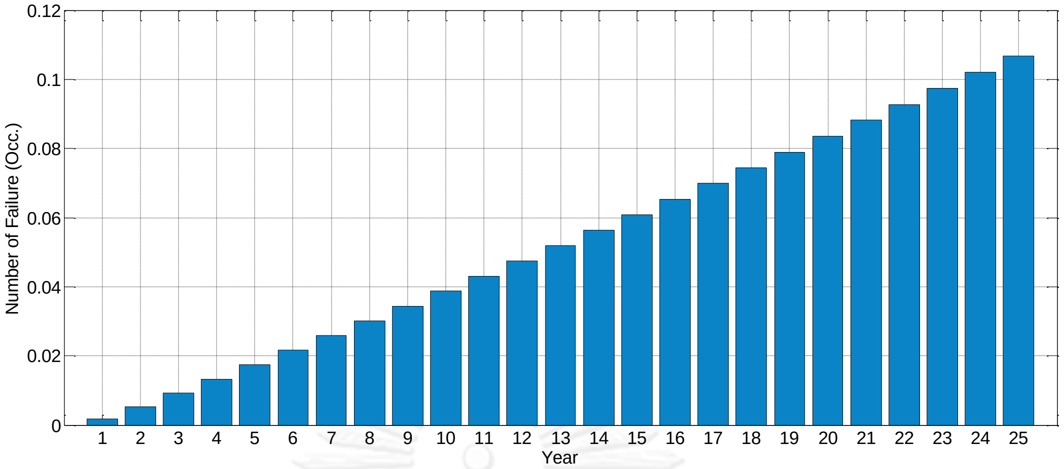
ก่อนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ เซอร์กิตเบรกเกอร์มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว ความเชื่อถือได้ จำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวในแต่ละปี และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ดังภาพที่ 7.4 ถึง 7.7 ตามลำดับ



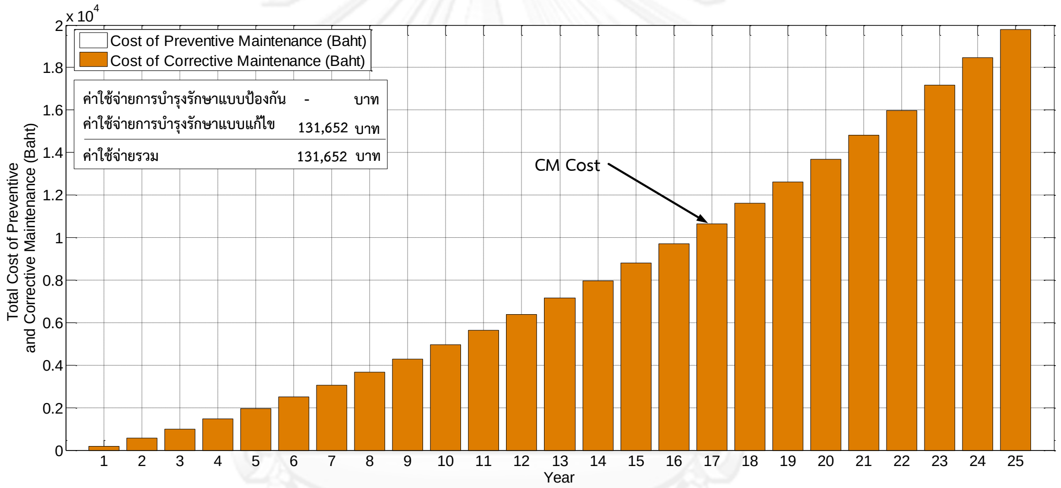
ภาพที่ 7.4 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเซอร์กิตเบรกเกอร์ก่อนการบำรุงรักษา



ภาพที่ 7.5 ความเชื่อถือได้เซอร์กิตเบรกเกอร์ก่อนการบำรุงรักษา



ภาพที่ 7.6 จำนวนครั้งที่เซอร์กิตเบรกเกอร์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวก่อนการบำรุงรักษา

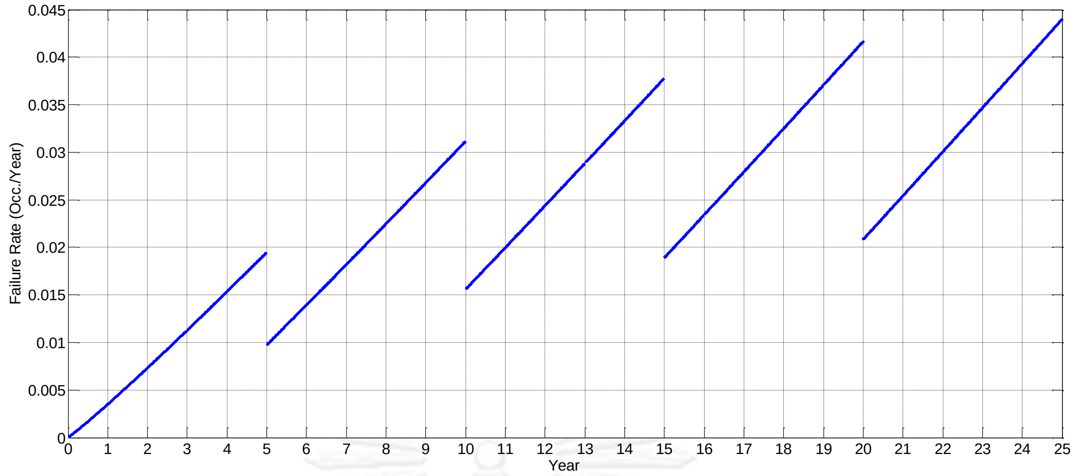


ภาพที่ 7.7 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขของเซอร์กิตเบรกเกอร์ก่อนบำรุงรักษา

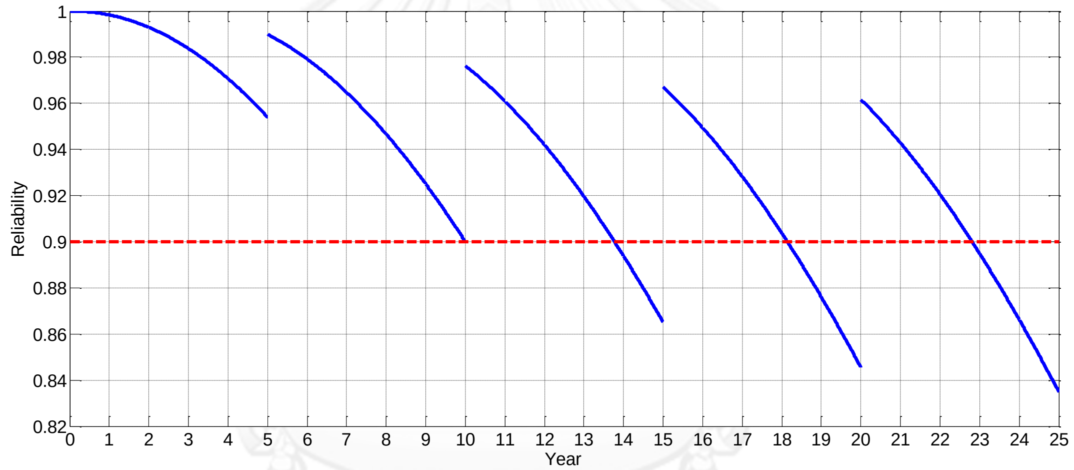
การบำรุงรักษาตามกรณีนี้จะมีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 131,652 บาท โดยเป็นค่าใช้จ่ายของการบำรุงรักษาแบบแก้ไขเพียงอย่างเดียว

<u>กรณีที่ 2</u> อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบที่กำหนด

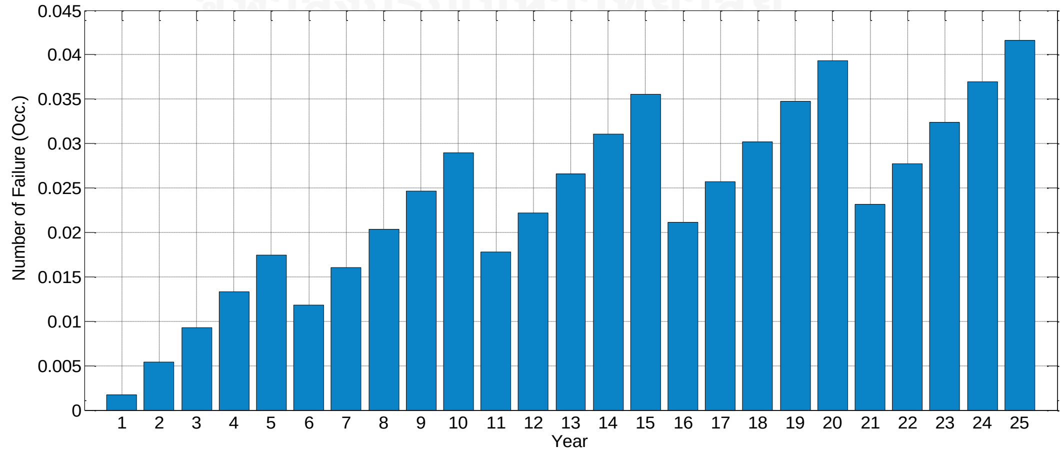
กรณีนี้ กำหนดให้อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาทุกๆ 5 ปี **<u>คือในปีที่ : 5, 10, 15 และ 20</u>** โดยอุปกรณ์มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว ความเชื่อถือได้ จำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวในแต่ละปี และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ดังภาพที่ 7.8 ถึง 7.11 ตามลำดับ



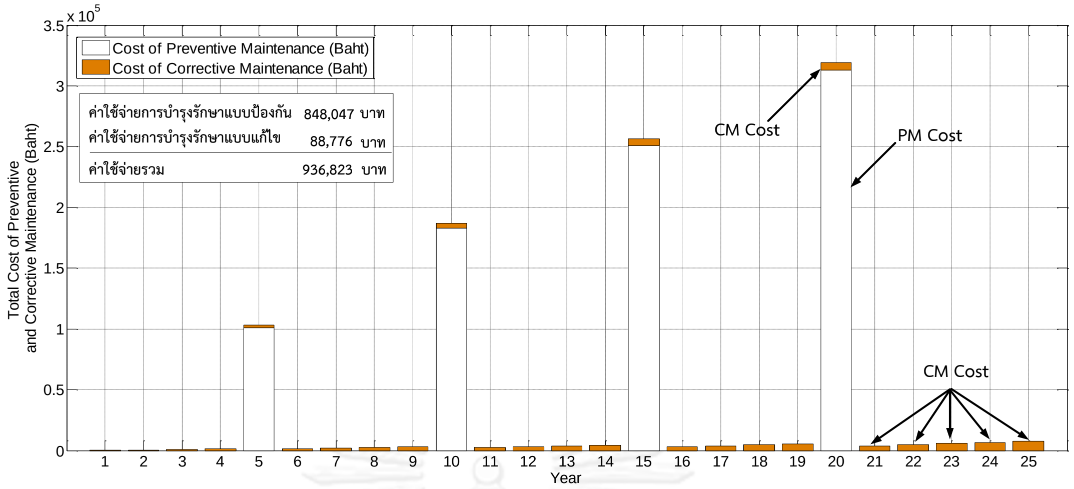
ภาพที่ 7.8 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเซอร์กิตเบรกเกอร์กรณีบำรุงรักษาตามวงรอบ



ภาพที่ 7.9 ความเชื่อถือได้เซอร์กิตเบรกเกอร์กรณีบำรุงรักษาตามวงรอบ



ภาพที่ 7.10 จำนวนครั้งที่เซอร์กิตเบรกเกอร์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวกรณีบำรุงรักษาตามวงรอบ

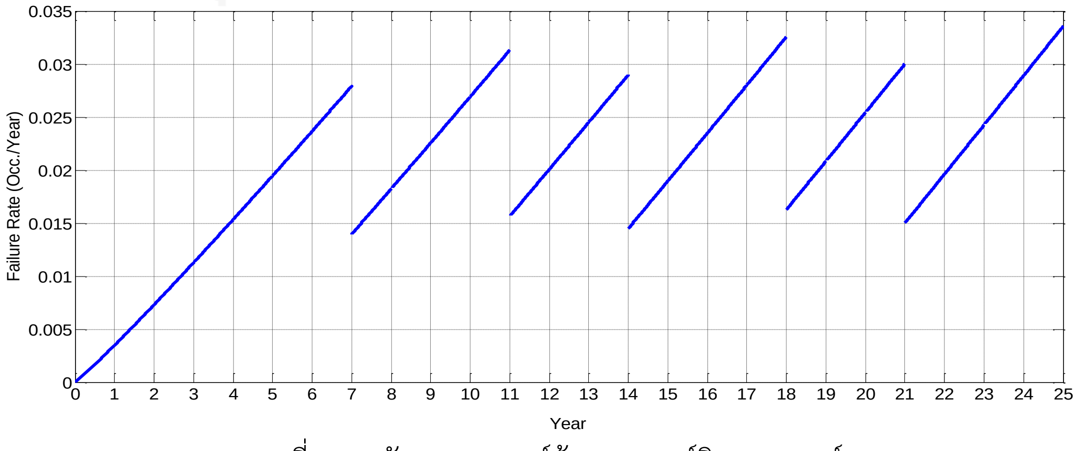


ภาพที่ 7.11 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขเซอร์กิตเบรกเกอร์
กรณีบำรุงรักษาตามวงรอบ

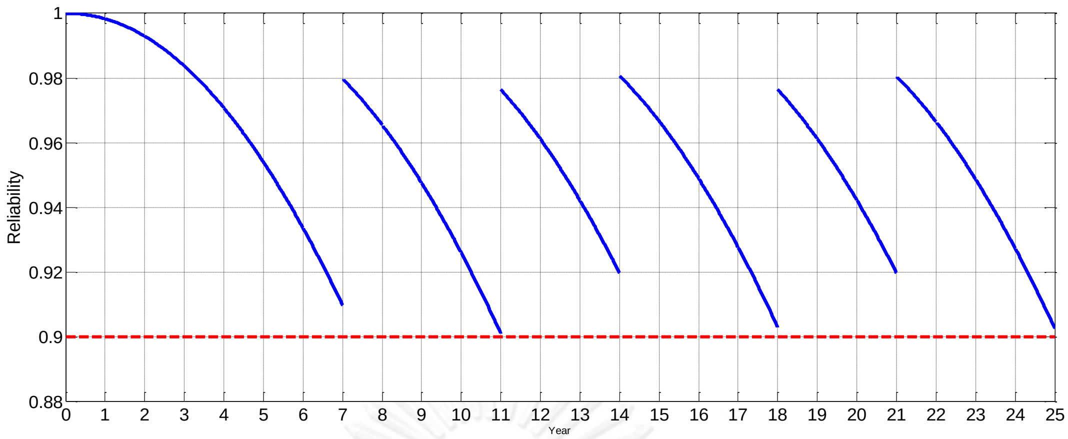
การบำรุงรักษาตามกรณีนี้จะมนค่าใช้จ่ายทั้งหมด 936,823 โดยแบ่งออกเป็นค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน 848,047 บาท และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข 88,776 บาท

<u>กรณีที่ 3</u> อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกันก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

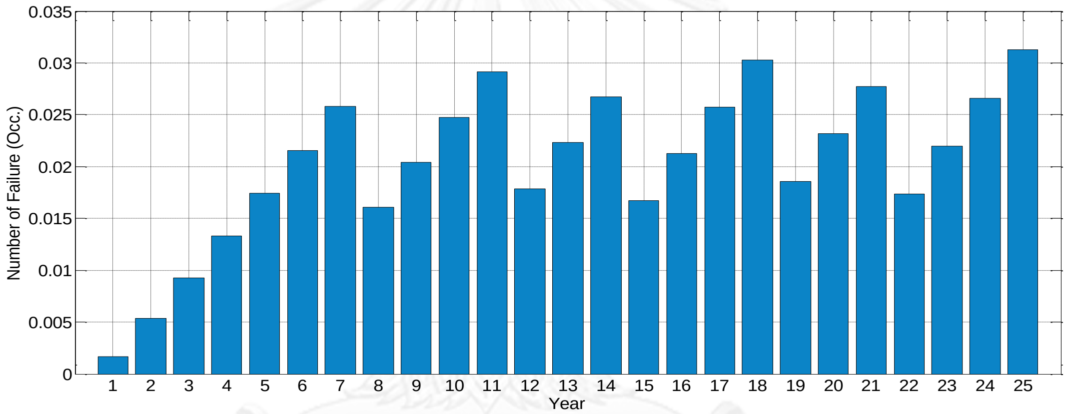
กรณีนี้ กำหนดให้อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งกำหนดให้ความเชื่อถือได้ต้องไม่ต่ำกว่า 0.9 พบว่าอุปกรณ์ต้องได้รับการบำรุงรักษา**<u>ในปี : 7, 11, 14, 18 และ 21</u>** โดยอุปกรณ์มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว ความเชื่อถือได้ จำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวในแต่ละปี และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ดังภาพที่ 7.12 ถึง 7.15 ตามลำดับ



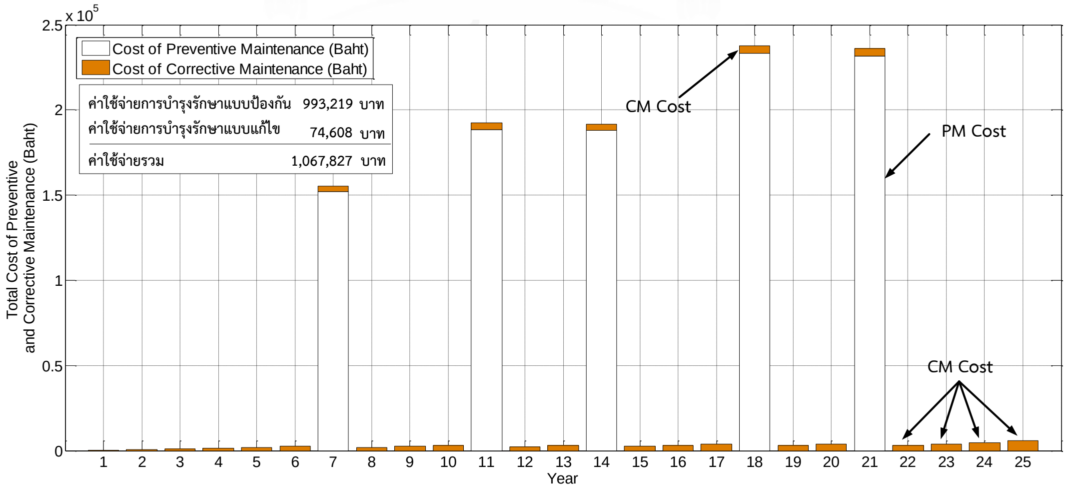
ภาพที่ 7.12 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเซอร์กิตเบรกเกอร์
กรณีบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์



ภาพที่ 7.13 ความเชื่อถือได้เซอร์กิตเบรกเกอร์
กรณีบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์



ภาพที่ 7.14 จำนวนครั้งที่เซอร์กิตเบรกเกอร์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว
กรณีบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์

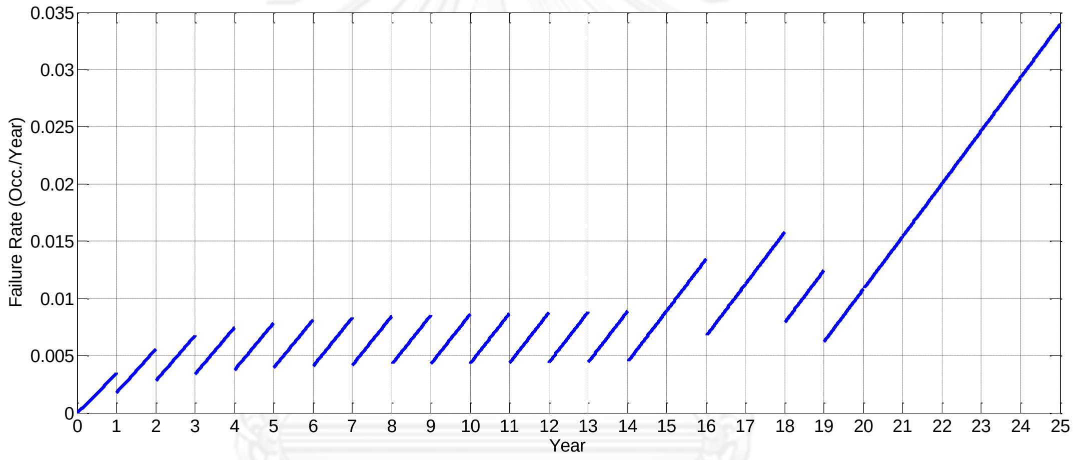


ภาพที่ 7.15 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขเซอร์กิตเบรกเกอร์
กรณีบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์

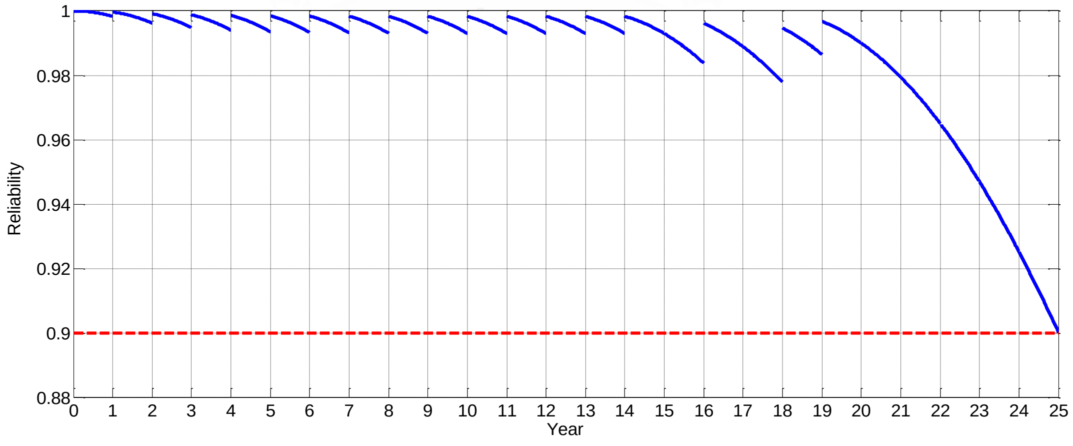
การบำรุงรักษาตามกรณีนี้จะมีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 1,067,827 บาท โดยแบ่งออกเป็นการค่าใช้จ่ายในบำรุงรักษาแบบป้องกัน 993,219 บาท และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข 74,608 บาท

<u>กรณีที่ 4</u> อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาเหมาะสม

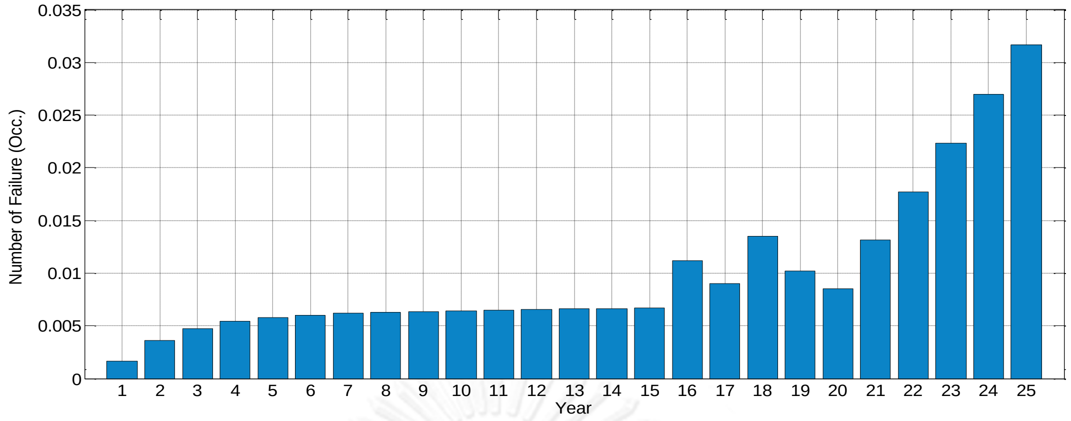
กรณีนี้ อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกันอย่างเหมาะสม ภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามสมการที่ (6.22) และเงื่อนไขบังคับตามสมการที่ (6.28) ถึง (6.29) พบว่าต้องได้รับการบำรุงรักษา **<u>ในปีที่: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 18 และ 19</u>** โดยอุปกรณ์มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว ความเชื่อถือได้ จำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวในแต่ละปี และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ดังภาพที่ 7.16 ถึง 7.19 ตามลำดับ



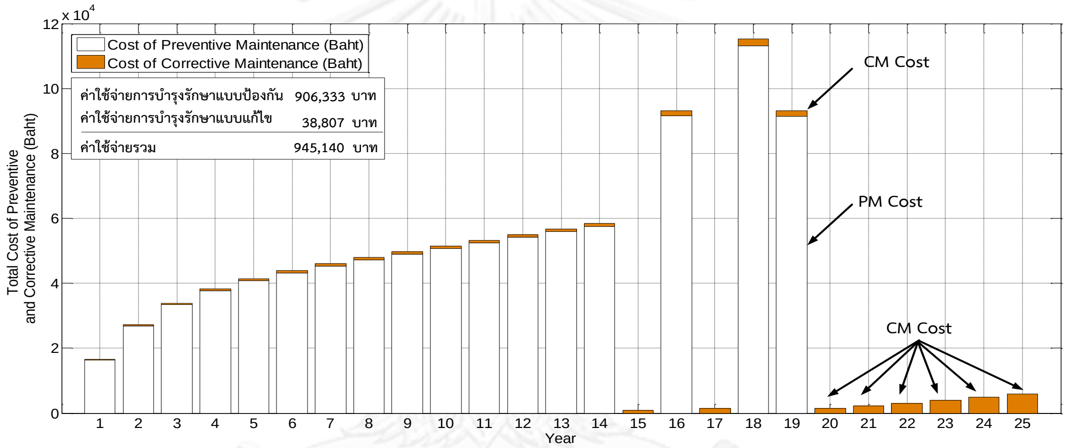
ภาพที่ 7.16 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเซอร์กิตเบรกเกอร์กรณีบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม



ภาพที่ 7.17 ความเชื่อถือได้ของเซอร์กิตเบรกเกอร์กรณีบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม



ภาพที่ 7.18 จำนวนครั้งที่เซอร์กิตเบรกเกอร์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวกรณีบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม



ภาพที่ 7.19 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขเซอร์กิตเบรกเกอร์
กรณีบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม

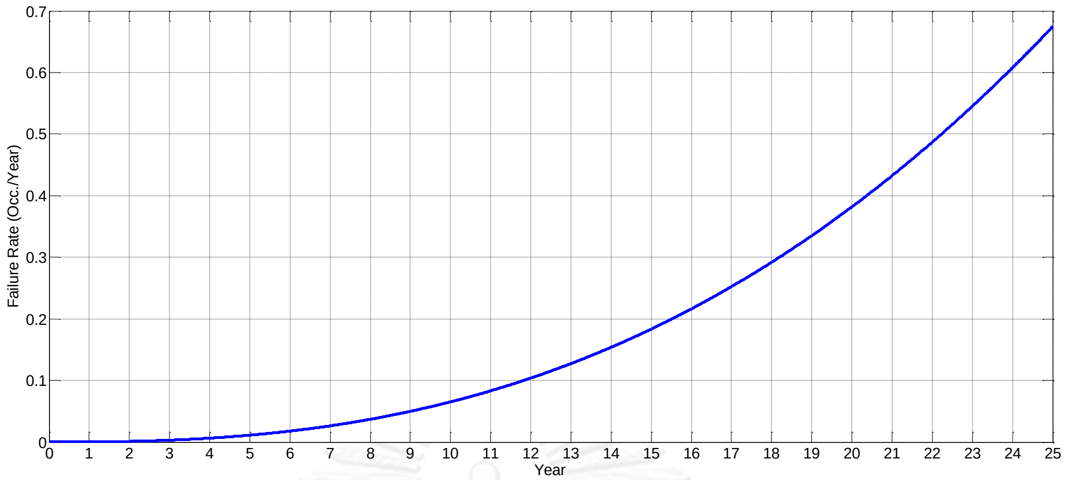
การบำรุงรักษาตามกรณีนี้จะมีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 945,140 บาท โดยแบ่งออกเป็นค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน 906,333 บาท และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข 98,807 บาท

7.2.1.1.2 ผลการทดสอบการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า

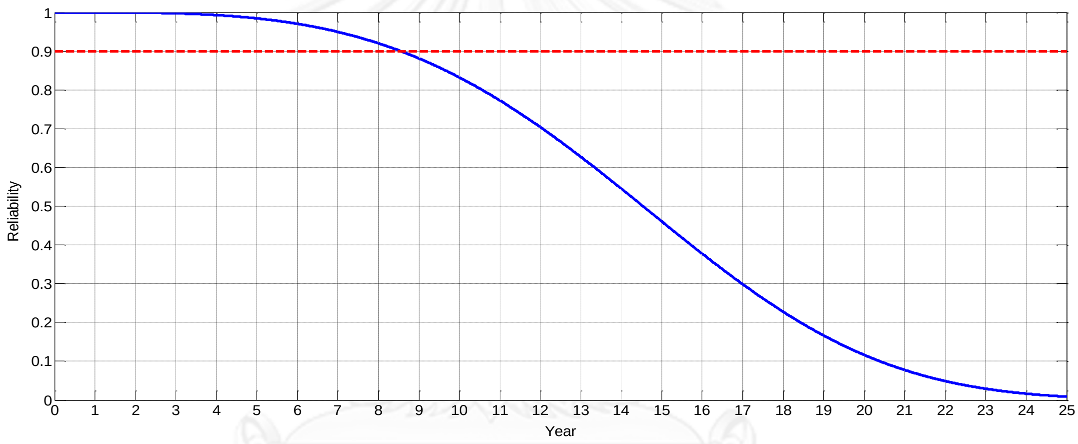
การทดสอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า มีด้วยการทดสอบทั้ง 4 กรณีมีความเชื่อถือได้ และผลรวมของค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแต่ละประเภท ดังต่อไปนี้

<u>กรณีที่ 1</u> ก่อนการบำรุงรักษาอุปกรณ์

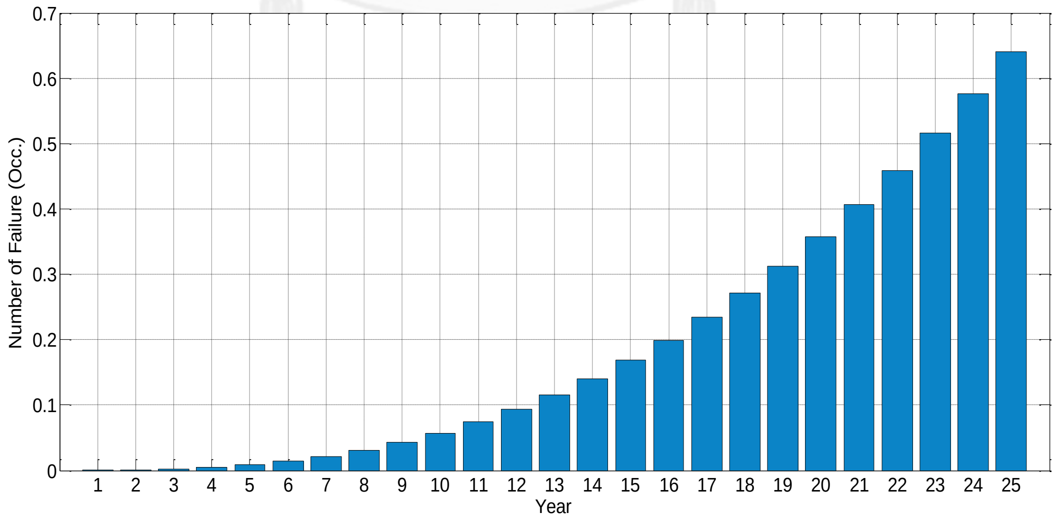
ก่อนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ หม้อแปลงไฟฟ้ามีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว ความเชื่อถือได้ จำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวในแต่ละปี และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ดังภาพที่ 7.20 ถึง 7.23 ตามลำดับ



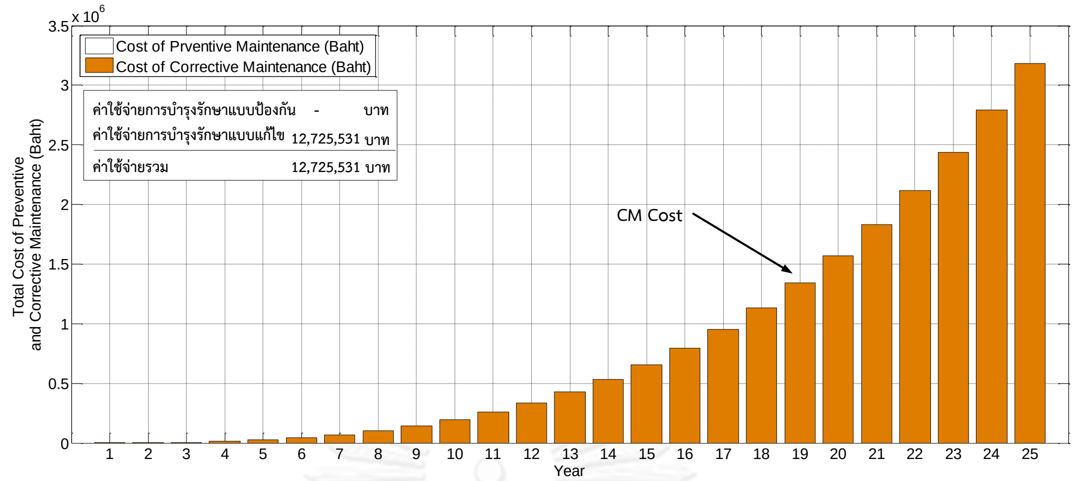
ภาพที่ 7.20 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวหม้อแปลงไฟฟ้าก่อนการบำรุงรักษา



ภาพที่ 7.21 ความเชื่อถือได้ของหม้อแปลงไฟฟ้าก่อนการบำรุงรักษา



ภาพที่ 7.22 จำนวนครั้งที่หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดเหตุการณ์ล้มเหวก่อนการบำรุงรักษา

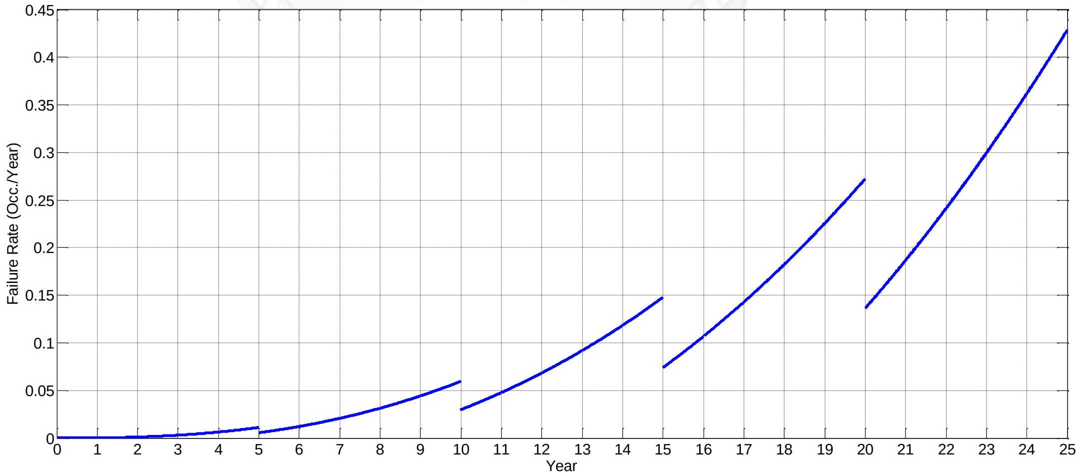


ภาพที่ 7.23 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขของหม้อแปลงไฟฟ้าก่อนบำรุงรักษา

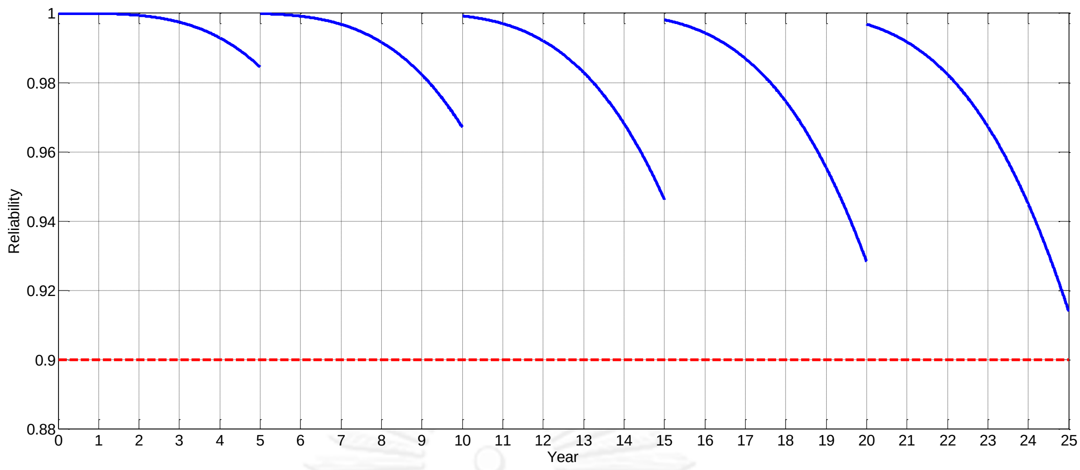
การบำรุงรักษาตามกรณีนี้จะมีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 12,725,531 บาท โดยเป็นค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไขเพียงอย่างเดียว

<u>กรณีที่ 2</u> อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบที่กำหนด

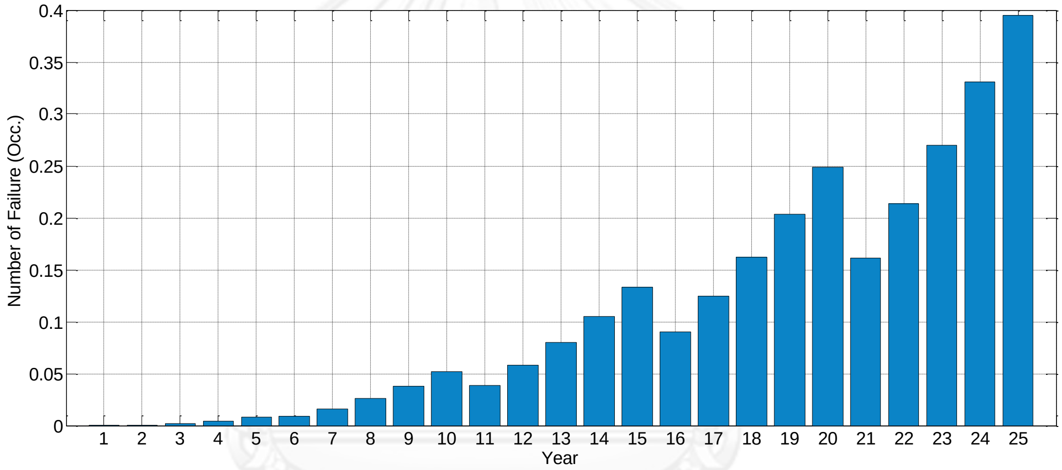
กรณีนี้ กำหนดให้อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาทุกๆ 5 ปี **คือในปีที่ : 5 10 15 20** โดยอุปกรณ์มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว ความเชื่อถือได้ จำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวในแต่ละปี และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ดังภาพที่ 7.24 ถึง 7.27 ตามลำดับ



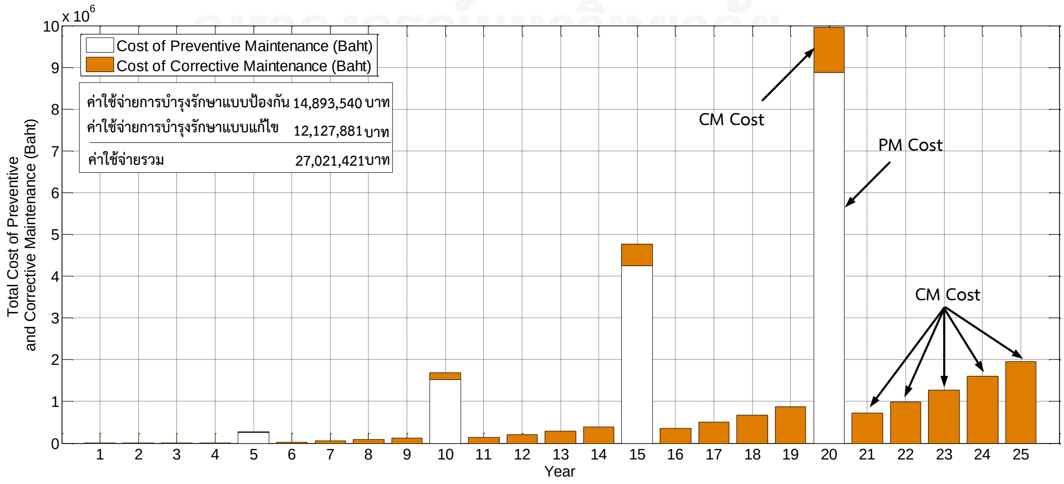
ภาพที่ 7.24 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีบำรุงรักษาตามวงรอบ



ภาพที่ 7.25 ความเชื่อถือได้ของหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีบำรุงรักษาตามวงรอบ



ภาพที่ 7.26 จำนวนครั้งที่หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวกรณีบำรุงรักษาตามวงรอบ

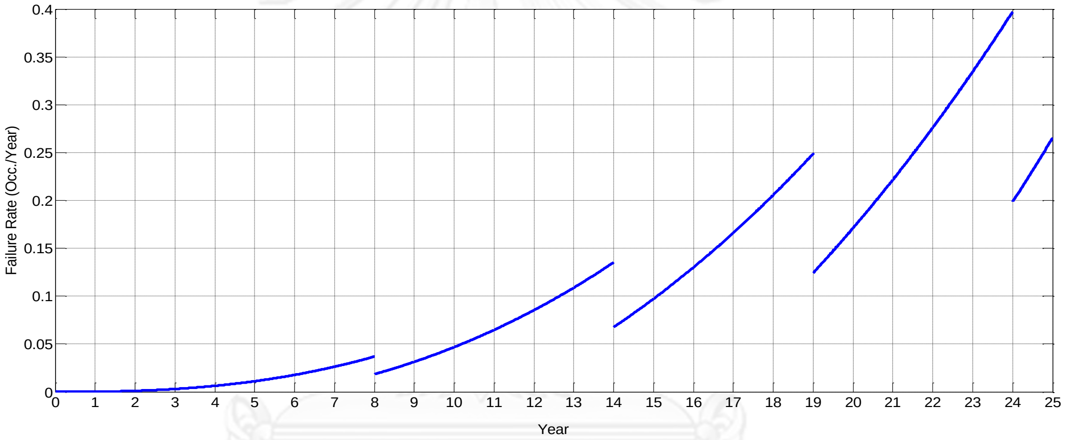


ภาพที่ 7.27 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขหม้อแปลงไฟฟ้า
กรณีบำรุงรักษาตามวงรอบ

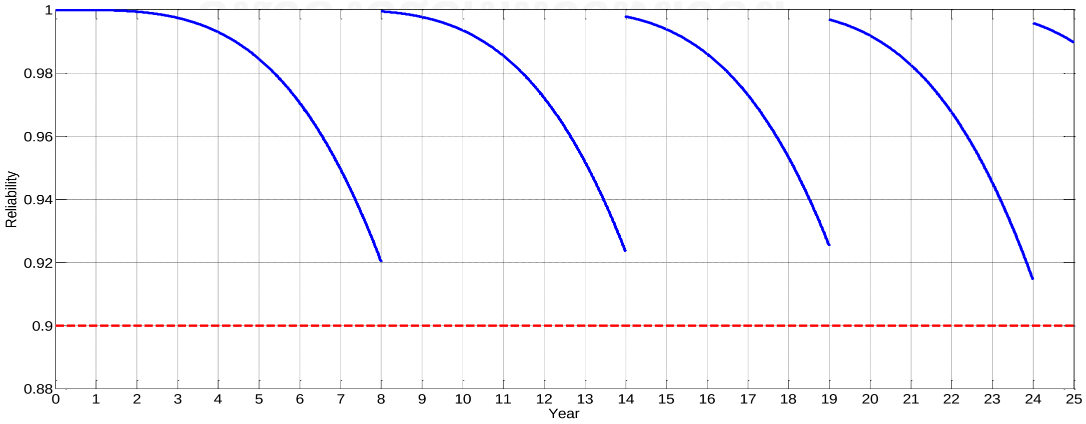
การบำรุงรักษาตามกรณีนี้จะมีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 27,021,421 โดยแบ่งออกเป็นค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน 14,893,540 บาท และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข 12,127,881 บาท

<u>กรณีที่ 3</u> อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกันก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

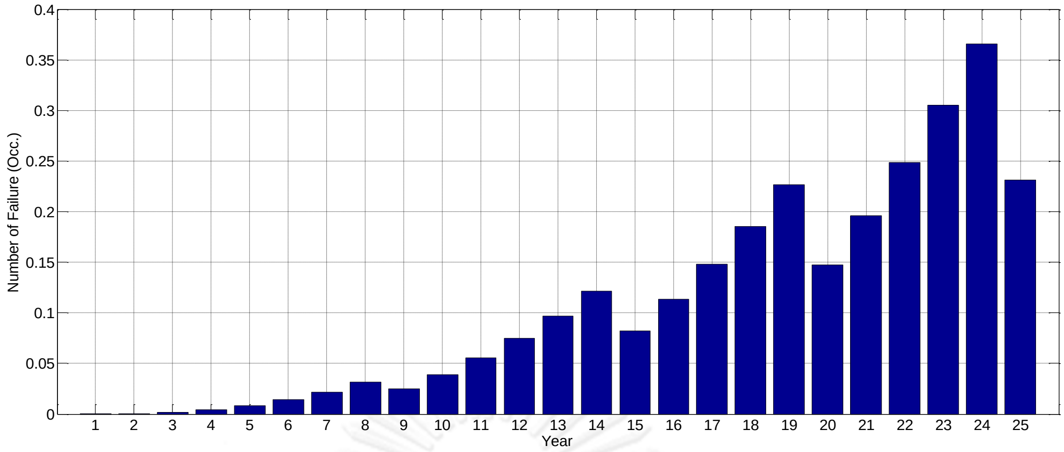
กรณีนี้ กำหนดให้อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งกำหนดให้ความเชื่อถือได้ต้องไม่ต่ำกว่า 0.9 พบว่าอุปกรณ์ต้องได้รับการบำรุงรักษา**<u>ในปี :</u>** <u>8, 14, 19 และ 24</u> โดยอุปกรณ์มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว ความเชื่อถือได้ จำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวในแต่ละปี และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ดังภาพที่ 7.28 ถึง 7.31 ตามลำดับ



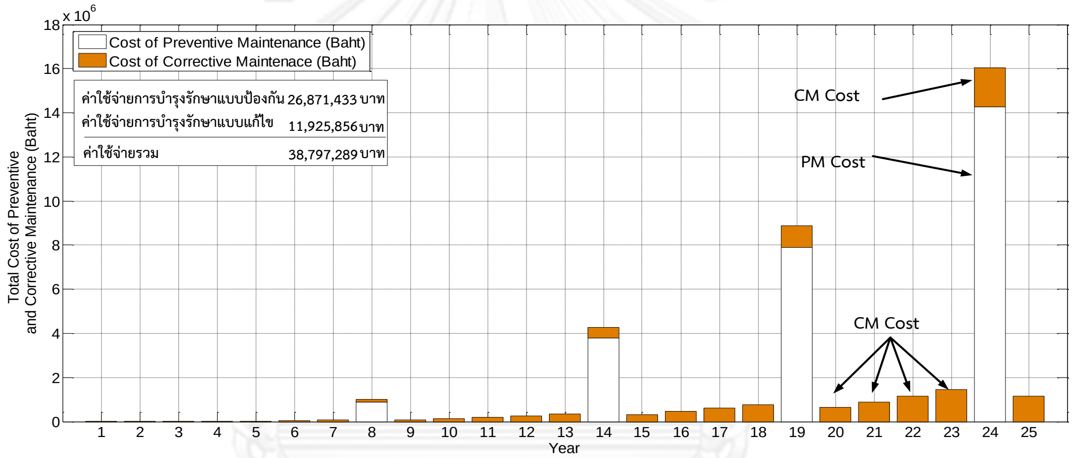
ภาพที่ 7.28 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวหม้อแปลงไฟฟ้า
กรณีบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์



ภาพที่ 7.29 ความเชื่อถือได้ของหม้อแปลงไฟฟ้า
กรณีบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์



ภาพที่ 7.30 จำนวนครั้งที่หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดเหตุการณ์ล้มเหลว
กรณีบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์

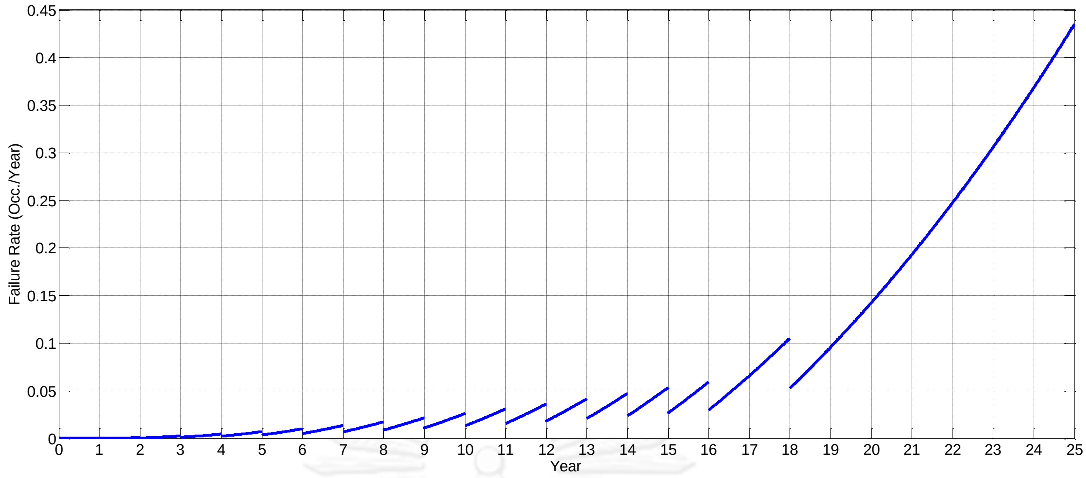


ภาพที่ 7.31 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขหม้อแปลงไฟฟ้า
กรณีบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์

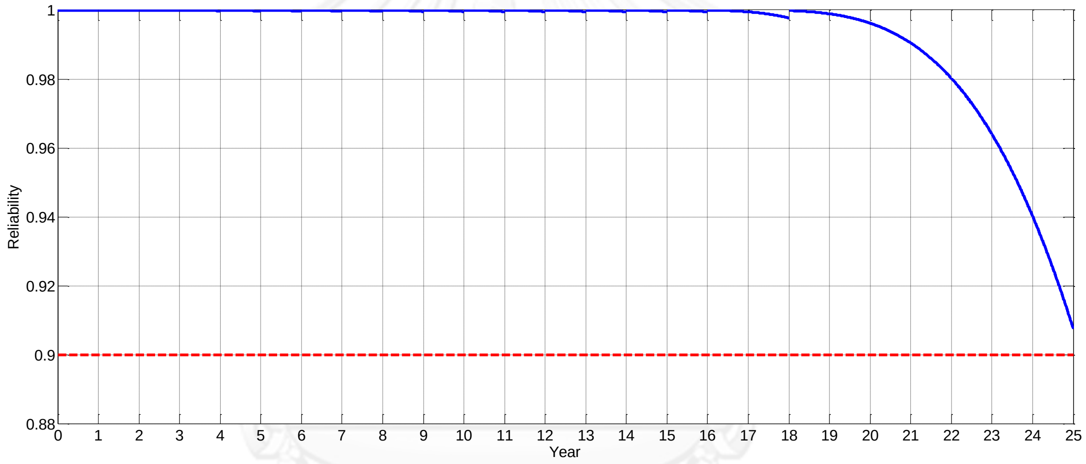
การบำรุงรักษาตามกรณีนี้จะมีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 38,797,289 บาท โดยแบ่งออกเป็นค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน 26,871,433 บาท และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข 11,925,856 บาท

<u>กรณีที่ 4</u> อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาเหมาะสม

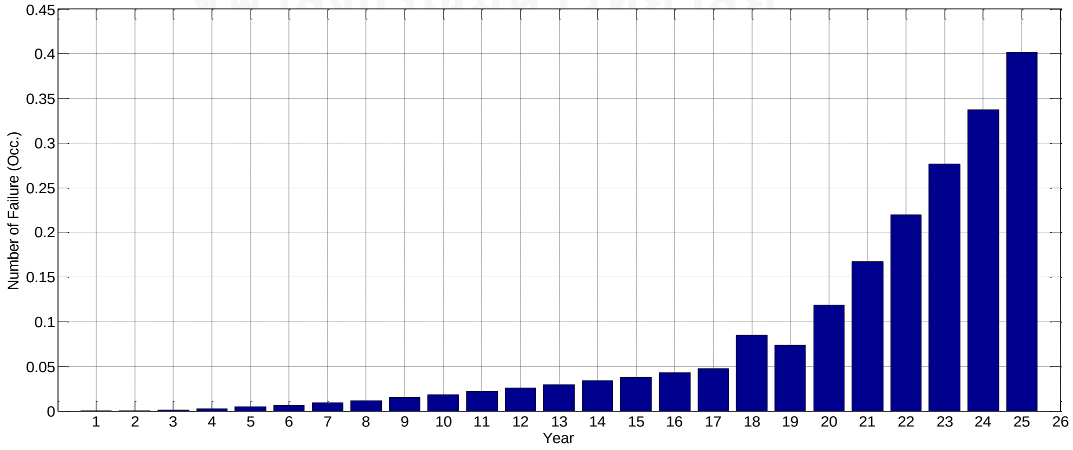
กรณีนี้ อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกันอย่างเหมาะสม ภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามสมการที่ (6.22) และเงื่อนไขบังคับตามสมการที่ (6.28) ถึง (6.29) พบว่าต้องได้รับการบำรุงรักษา **<u>ในปีที่: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 และ 18</u>** โดยอุปกรณ์มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว ความเชื่อถือได้ จำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวในแต่ละปี และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ดังภาพที่ 7.32 ถึง 7.35 ตามลำดับ



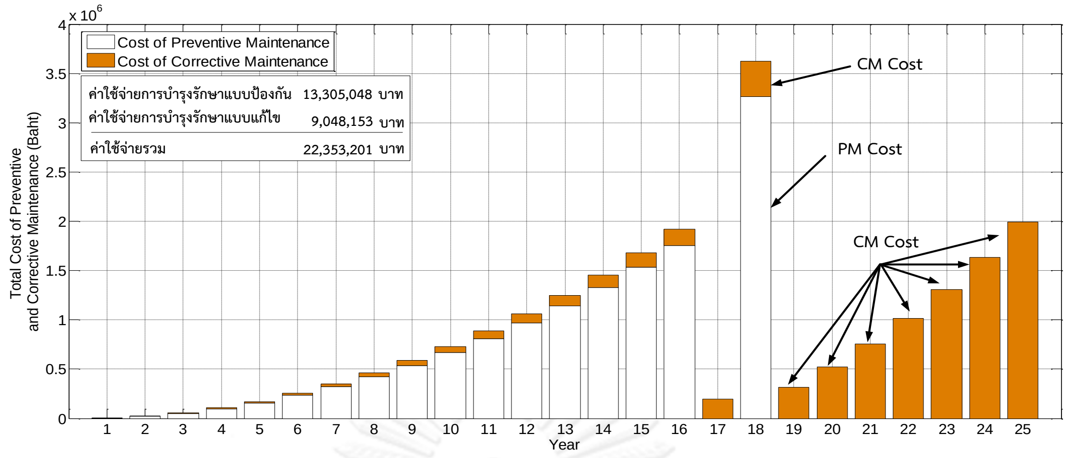
ภาพที่ 7.32 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวหม้อแปลงไฟฟ้า กรณีบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม



ภาพที่ 7.33 ความเชื่อถือได้ของหม้อแปลงไฟฟ้า กรณีบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม



ภาพที่ 7.34 จำนวนครั้งที่หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดเหตุการณ์ล้มเหลว กรณีบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม



ภาพที่ 7.35 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขหม้อแปลงไฟฟ้า
กรณีบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม

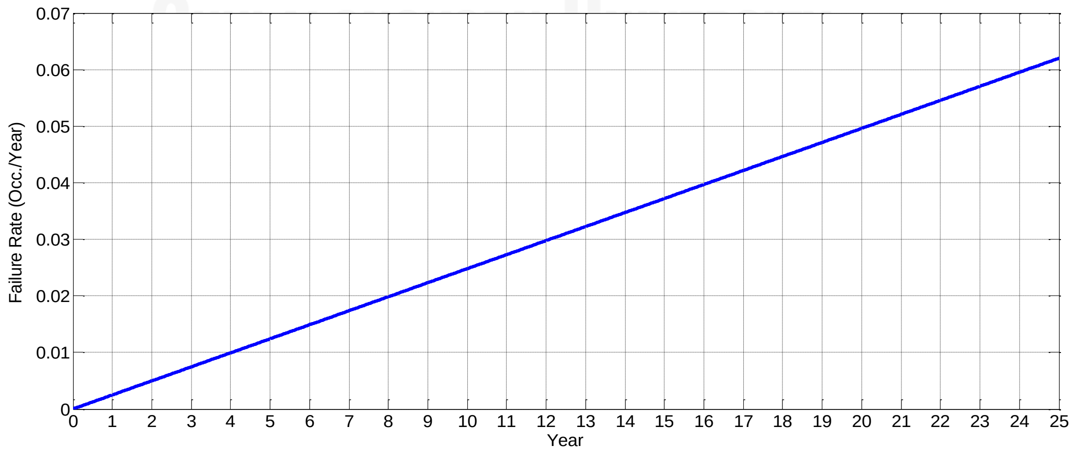
การบำรุงรักษาตามกรณีนี้จะมีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 22,353,201 บาท โดยแบ่งออกเป็นค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน 13,305,048 บาท และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข 9,048,153 บาท

7.2.1.1.3 ผลการทดสอบการบำรุงรักษาบัสบาร์

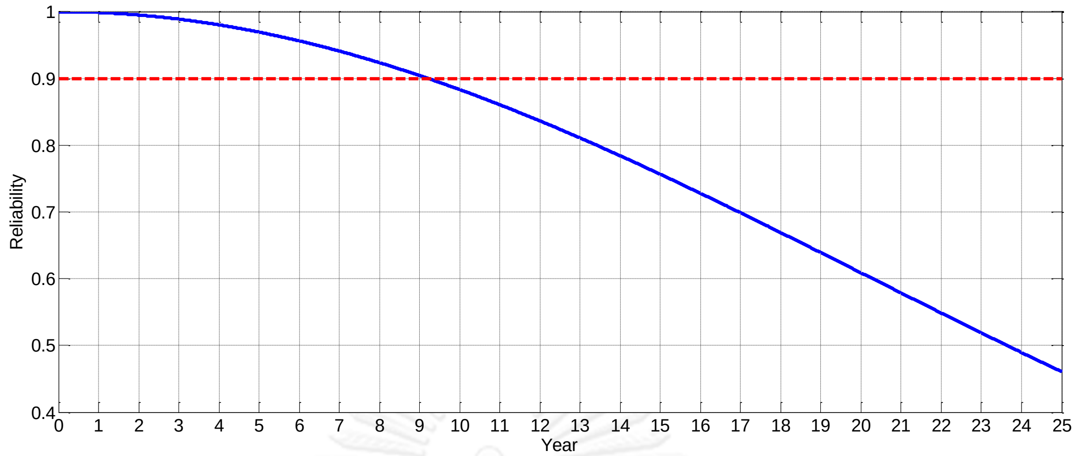
การทดสอบการกำหนดตารางการบำรุงรักษาบัสบาร์ ด้วยการทดสอบทั้ง 4 กรณีมีความเชื่อถือได้ และผลรวมของค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแต่ละประเภท ดังต่อไปนี้

<u>กรณีที่ 1</u> ก่อนการบำรุงรักษาอุปกรณ์

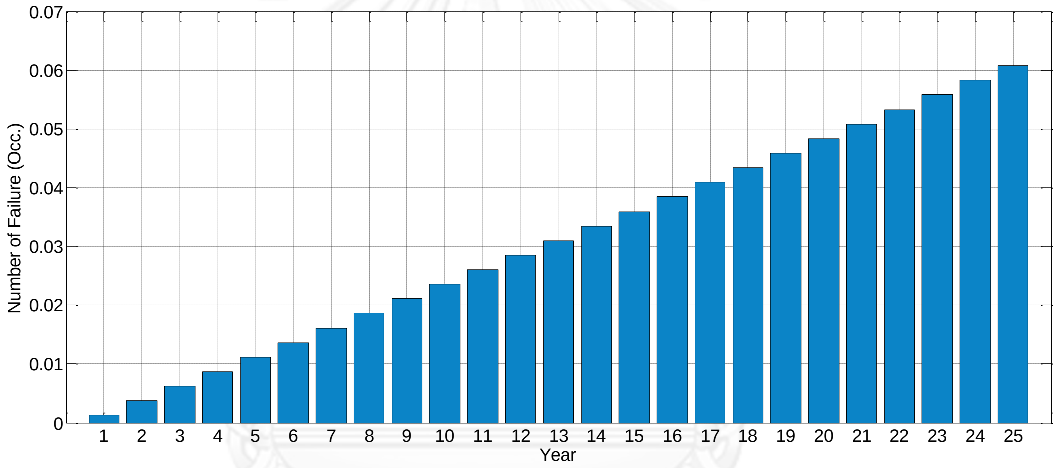
ก่อนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ บัสบาร์มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว ความเชื่อถือได้ จำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวในแต่ละปี และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ดังภาพที่ 7.36 ถึง 7.39



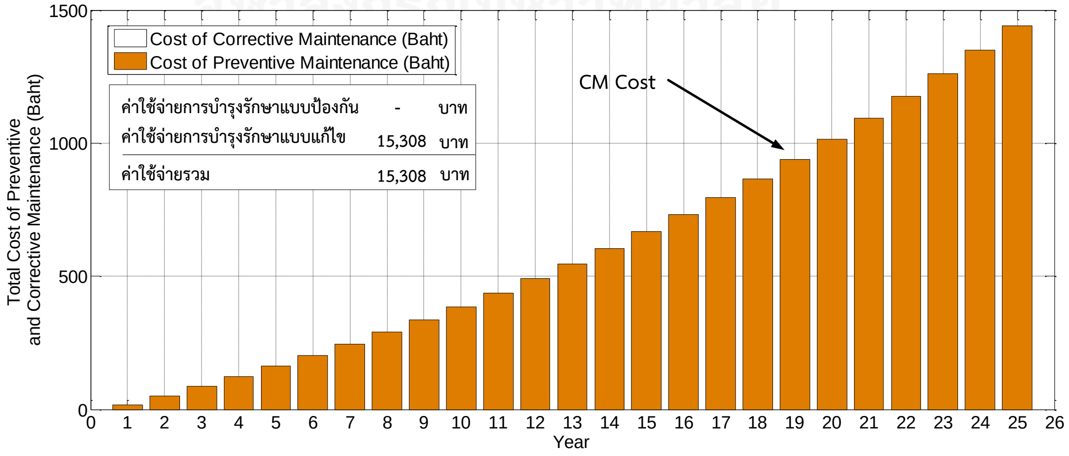
ภาพที่ 7.36 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวบัสบาร์ก่อนการบำรุงรักษา



ภาพที่ 7.37 ความเชื่อถือได้ของบัสบาร์ก่อนการบำรุงรักษา



ภาพที่ 7.38 จำนวนครั้งที่บัสบาร์เกิดเหตุการณ์ล้มเหวก่อนการบำรุงรักษา

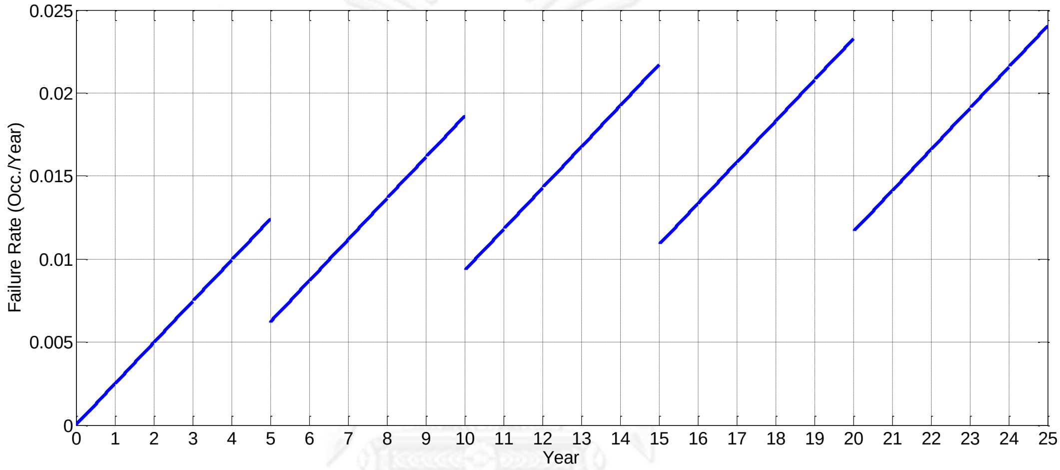


ภาพที่ 7.39 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขของบัสบาร์ก่อนบำรุงรักษา

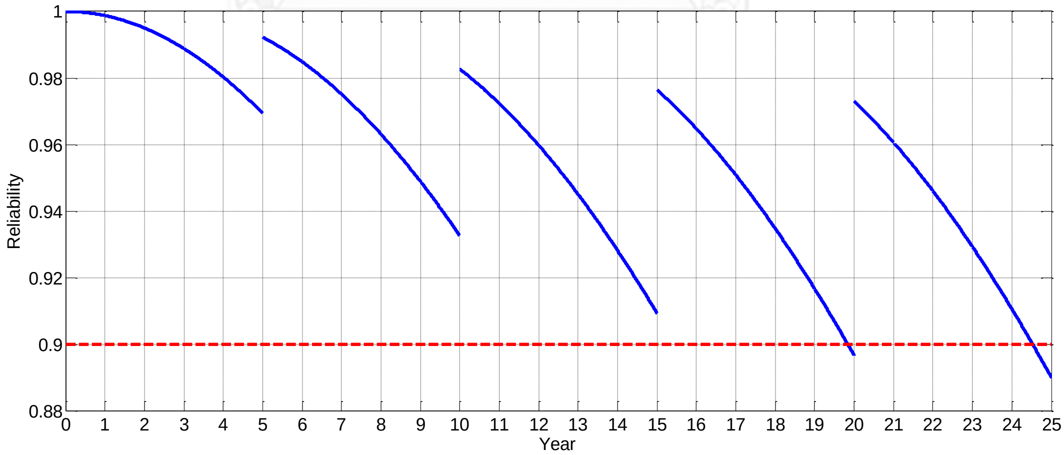
การบำรุงรักษาตามกรณีนี้จะมีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 15,308 บาท โดยเป็นค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไขเพียงอย่างเดียว

<u>กรณีที่ 2</u> อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบที่กำหนด

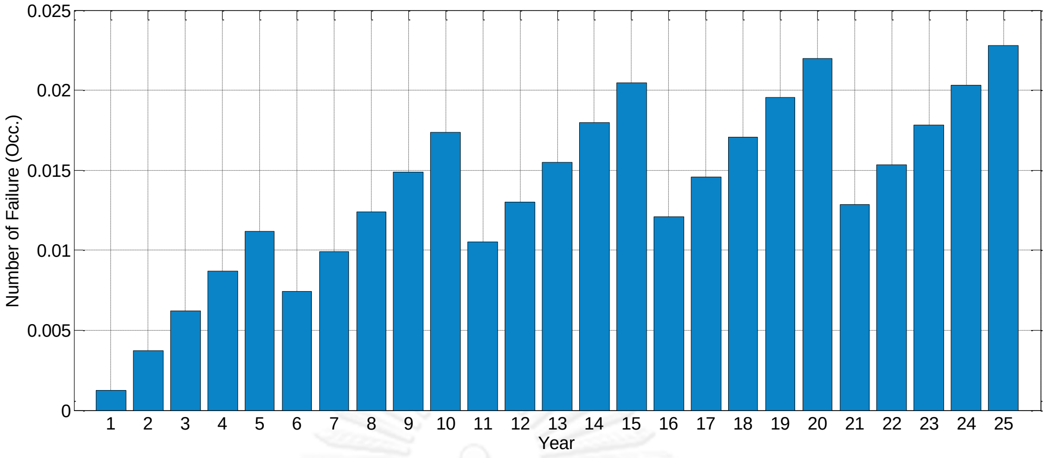
กรณีนี้ กำหนดให้อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาทุกๆ 5 ปี **<u>คือในปีที่ : 5, 10, 15 และ 20</u>** โดยอุปกรณ์มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว ความเชื่อถือได้ จำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวในแต่ละปี และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ดังภาพที่ 7.40 ถึง 7.43 ตามลำดับ



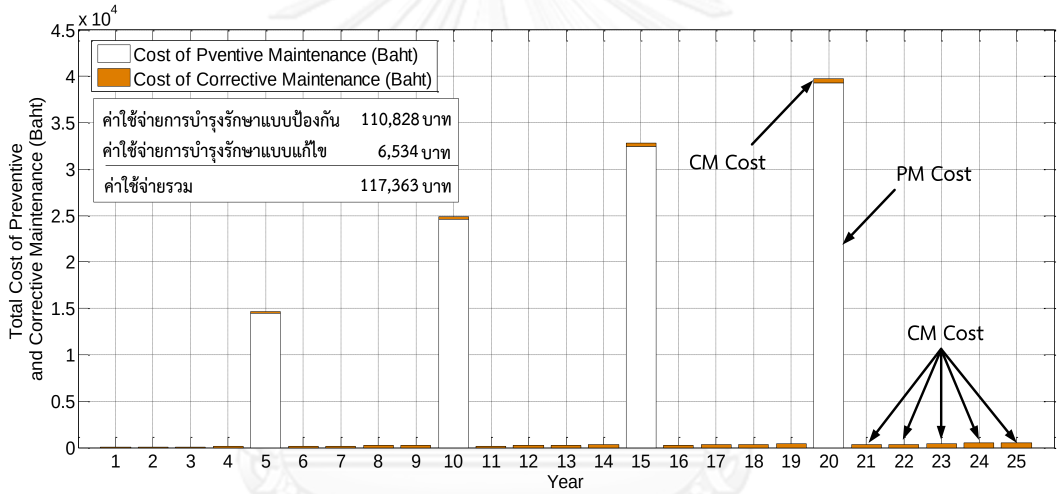
ภาพที่ 7.40 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวบัสบาร์กรณีบำรุงรักษาตามวงรอบ



ภาพที่ 7.41 ความเชื่อถือได้ของบัสบาร์กรณีบำรุงรักษาตามวงรอบ



ภาพที่ 7.42 จำนวนครั้งที่บัสบาร์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวกรณีบำรุงรักษาตามวงรอบ



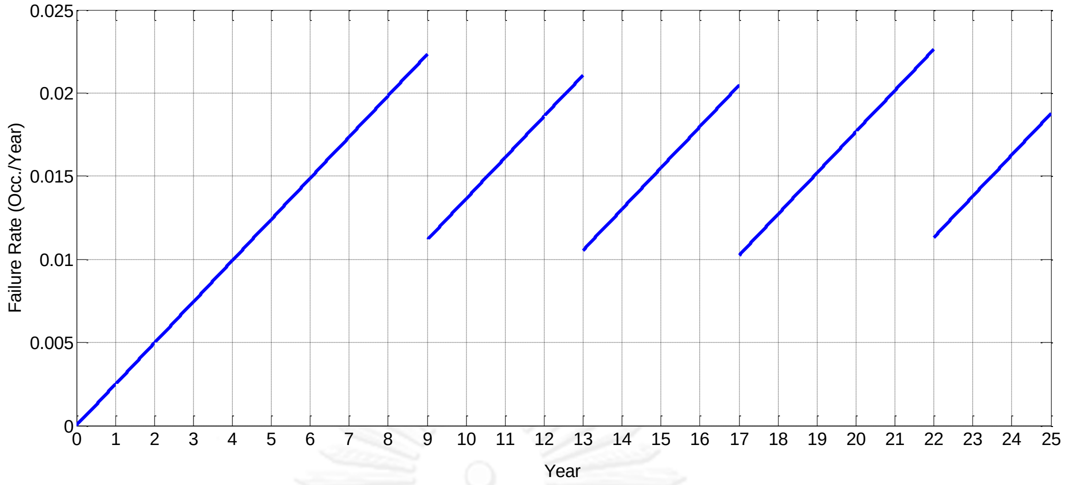
ภาพที่ 7.43 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขบัสบาร์กรณีบำรุงรักษาตามวงรอบ

การบำรุงรักษาตามกรณีนี้จะมีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 117,363 บาท โดยแบ่งออกเป็นค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน 110,828 บาท และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข 6,534 บาท

<u>กรณีที่ 3</u> อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกันก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

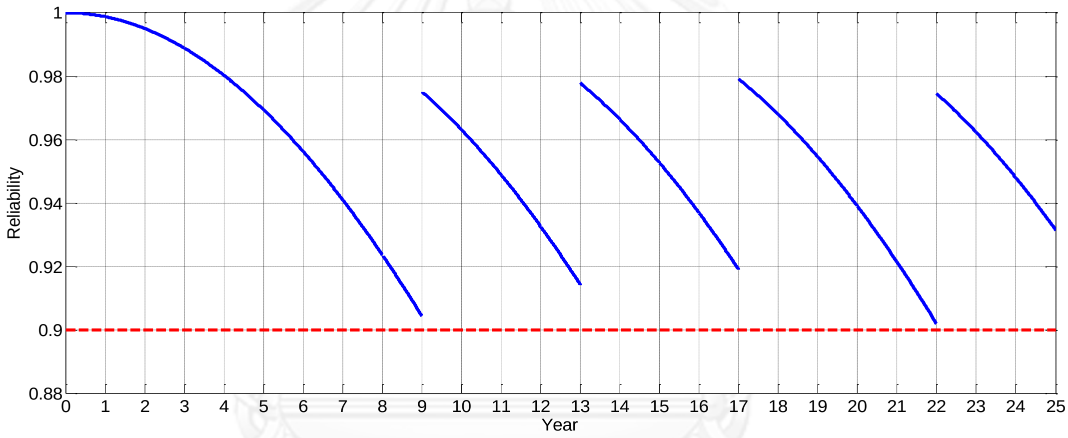
กรณีนี้ กำหนดให้อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งกำหนดให้ความเชื่อถือได้ต้องไม่ต่ำกว่า 0.9 พบว่าอุปกรณ์ต้องได้รับการบำรุงรักษา**<u>ในปี : 9, 13, 17 และ 22</u>** โดยอุปกรณ์มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว ความเชื่อถือได้ จำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวในแต่ละปี และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ดังภาพที่ 7.44 ถึง 7.47 ตามลำดับ

CHULALONGKORN UNIVERSITY



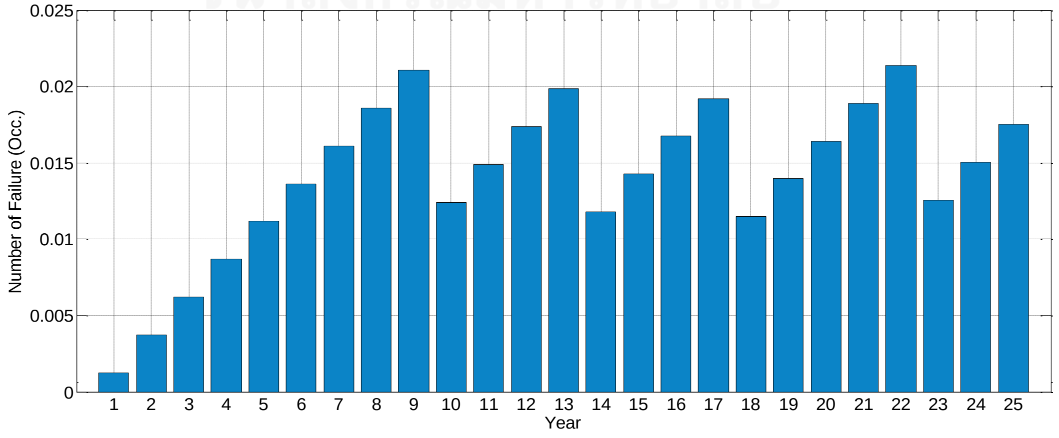
ภาพที่ 7.44 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวบัสบาร์

กรณีบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์



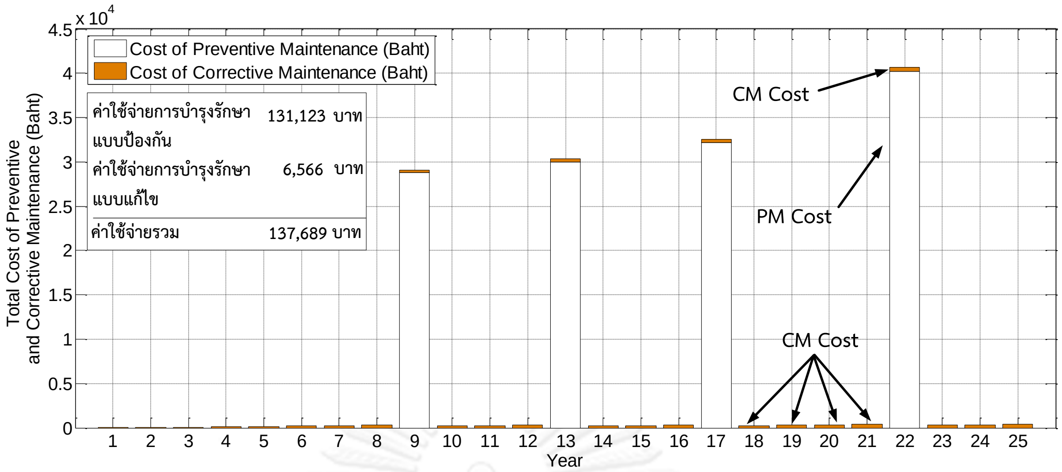
ภาพที่ 7.45 ความเชื่อถือได้ขิงบัสบาร์บัสบาร์

กรณีบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์



ภาพที่ 7.46 จำนวนครั้งที่บัสบาร์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวบัสบาร์

กรณีบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์



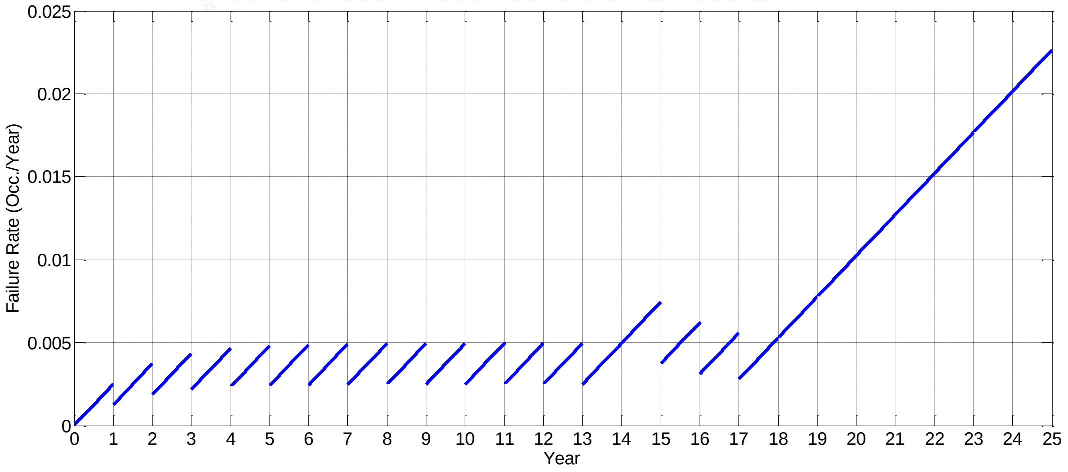
ภาพที่ 7.47 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขบัสบาร์
กรณีบำรุงรักษาก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์

การบำรุงรักษาตามกรณีนี้จะมีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 137,689 บาท โดยแบ่งออกเป็นค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน 131,123 บาท และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข 6,566 บาท

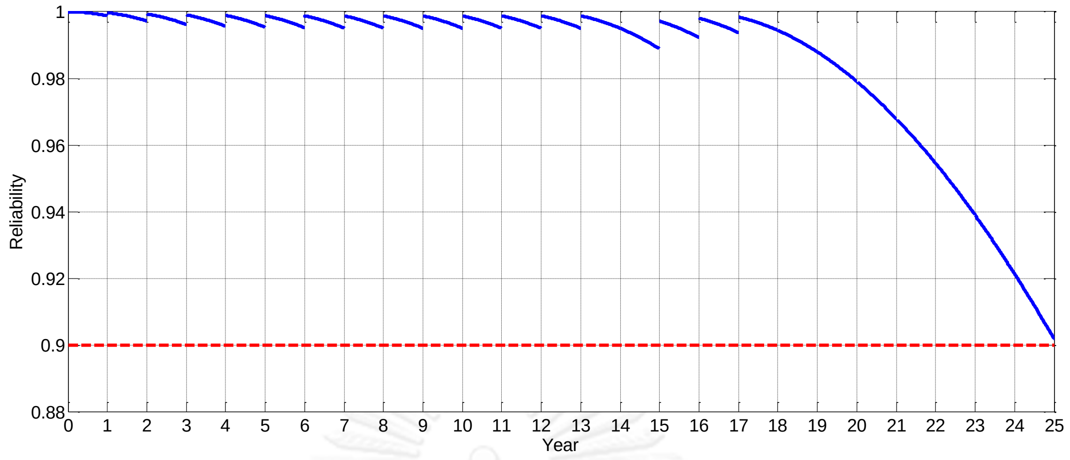
<u>กรณีที่ 4</u> อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาเหมาะสม

กรณีนี้ อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกันอย่างเหมาะสม ภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามสมการที่ (6.22) และเงื่อนไขบังคับตามสมการที่ (6.28) ถึง (6.29) พบว่าต้องได้รับการบำรุงรักษา **<u>ในปีที่: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16 และ 17</u>** โดยอุปกรณ์มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลว ความเชื่อถือได้ จำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวในแต่ละปี และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ดังภาพที่ 7.48 ถึง 7.51 ตามลำดับ

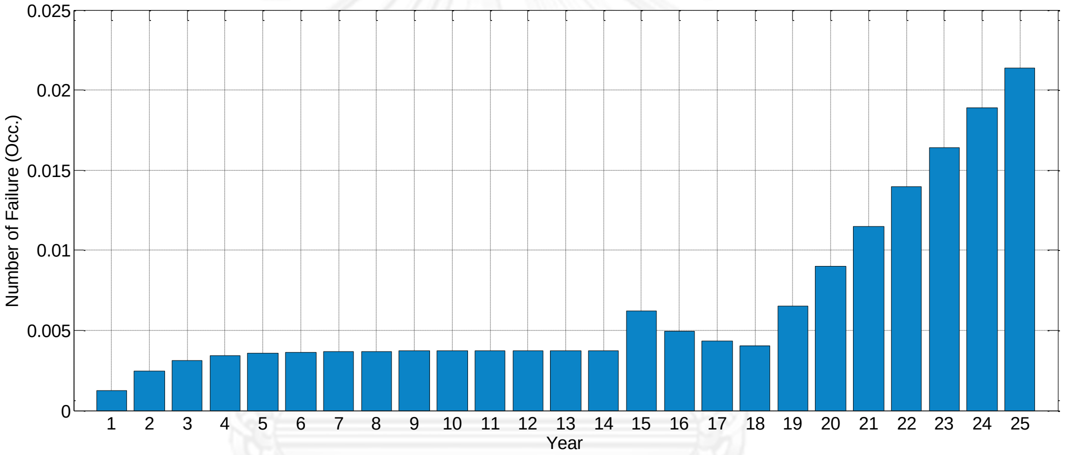
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



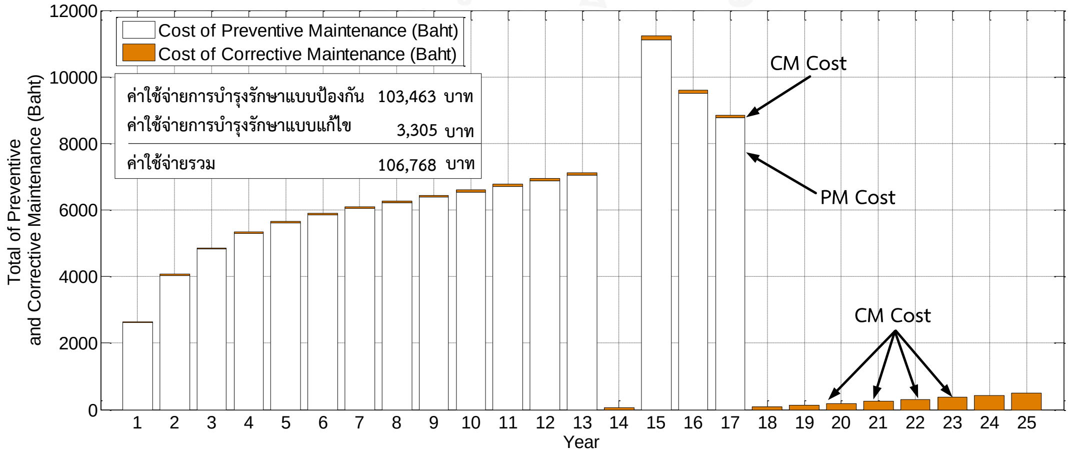
ภาพที่ 7.48 อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวบัสบาร์ กรณีบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม



ภาพที่ 7.49 ความเชื่อถือได้ของบัสบาร์ กรณีบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม



ภาพที่ 7.50 จำนวนครั้งที่บัสบาร์เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว กรณีบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม



ภาพที่ 7.51 ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขบัสบาร์

กรณีบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม

การบำรุงรักษาตามกรณีนี้จะมีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 106,768 บาท โดยแบ่งออกเป็นค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน 103,463 บาท และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข 3,305 บาท

7.2.1.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด

การวิเคราะห์ผลการทดสอบการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ หม้อแปลงไฟฟ้า บัสบาร์ ในแต่ละกรณีศึกษามีรายละเอียดดังต่อไปนี้

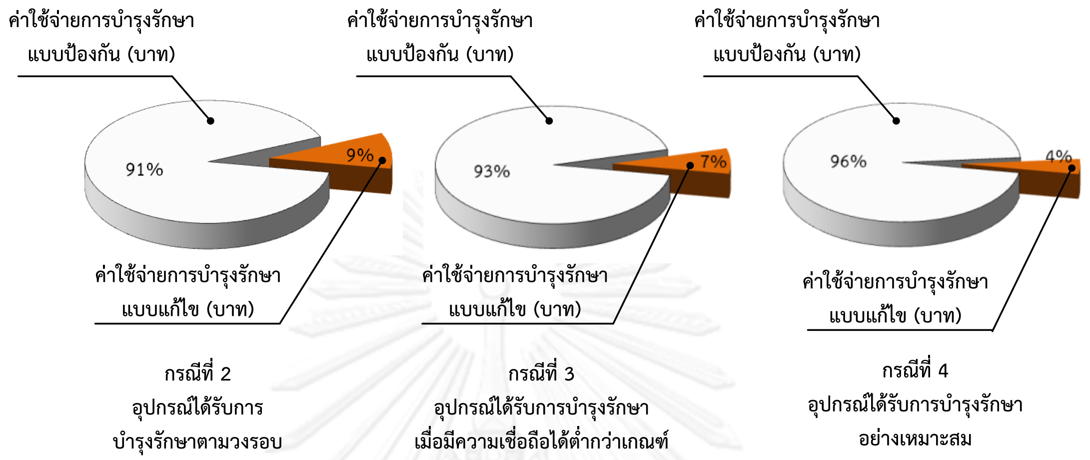
7.2.1.2.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบการบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์

จากการทดสอบทั้ง 4 กรณี สามารถเปรียบเทียบใน 2 มิติ คือ มิติด้านความเชื่อถือได้และมิติด้านค่าใช้จ่าย สำหรับกรณีที่ 1 ก่อนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ จะทำให้มีค่าใช้จ่ายเพียงการบำรุงรักษาแบบแก้ไขเท่านั้น ซึ่งมีมูลค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการบำรุงรักษาทุกกรณี แต่ความเชื่อถือได้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ สำหรับการบำรุงรักษาตามวงรอบทุกๆ 5 ปีในกรณีที่ 2 ต้องใช้ค่าใช้จ่ายที่สูงมากแต่กลับทำให้อุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์ ในทางกลับกัน หากบำรุงรักษาอุปกรณ์ก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีแนวโน้มที่ความเชื่อถือได้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ ดังในกรณีที่ 3 พบว่า ถึงแม้ภายหลังการบำรุงรักษาอุปกรณ์จะมีความเชื่อถืออยู่ในเกณฑ์ แต่ก็ต้องค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาที่สูงมาก สูงกว่าราคาการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่เสียอีก ซึ่งแตกต่างอย่างสิ้นเชิงกลับ การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสมในกรณีที่ 4 ที่ให้หลักประกันด้านความเชื่อถือได้ที่อยู่ในเกณฑ์เสมอ ภายใต้ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำที่สุด ดังภาพที่ 7.52

	กรณีที่ 1 ก่อนการบำรุงรักษาอุปกรณ์	กรณีที่ 2 อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบ	กรณีที่ 3 อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาเมื่อมีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์	กรณีที่ 4 อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม
ปีที่บำรุงรักษาแบบป้องกัน	-	5, 10, 15, 20	7, 11, 14, 18, 21	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 18, 19
ความเชื่อถือได้	ไม่ผ่านเกณฑ์	ไม่ผ่านเกณฑ์	ผ่านเกณฑ์	ผ่านเกณฑ์
ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกัน (บาท)	0	848,047	993,219	906,333
ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบแก้ไข (บาท)	131,652	88,776	74,608	38,807
ค่าใช้จ่ายทั้งหมด (บาท)	131,652	936,823	1,067,827	945,140

ภาพที่ 7.52 ผลการทดสอบการกำหนดตารางการบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์ทั้ง 4 กรณี

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาในกรณีที่ 2 ถึง 4 สัดส่วนของค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันจะมากกว่าค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบแก้ไขเสมอ และการบำรุงรักษาแบบป้องกันช่วยลดการเกิดการบำรุงรักษาแบบแก้ไข ซึ่งสะท้อนในรูปของค่าใช้จ่าย ดังภาพที่ 7.53



ภาพที่ 7.53 สัดส่วนค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขเซอร์กิตเบรกเกอร์

7.2.1.2.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า

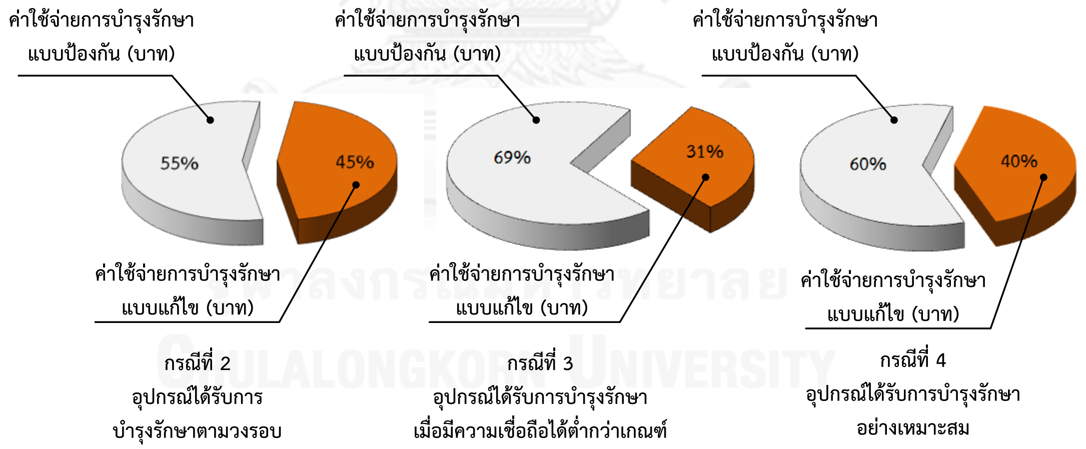
เช่นเดียวกันกับ ผลการทดสอบการบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์ การทดสอบการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า ในกรณีที่ 1 ก่อนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ มีค่าใช้จ่ายเพียงการบำรุงรักษาแบบแก้ไขเท่านั้นและเป็นค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุด แต่ความเชื่อถือได้ของกรณีนี้จะมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ ในกรณีที่ 2 การบำรุงรักษาตามวงรอบ ต้องใช้ค่าใช้จ่ายที่สูงมากแต่กลับทำให้อุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์ สำหรับกรณีที่ 3 การบำรุงรักษาอุปกรณ์เมื่ออุปกรณ์มีแนวโน้มที่ความเชื่อถือได้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ เพื่อที่ทำให้อุปกรณ์มีความเชื่อถือได้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ แต่จะมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาที่สูงมาก ในทางตรงกันข้าม หากมีการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสมในกรณีที่ 4 จะทำให้อุปกรณ์มีความเชื่อถือได้อยู่ในเกณฑ์ และมีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด ดังภาพที่ 7.54

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

	กรณีที่ 1 ก่อนการบำรุงรักษาอุปกรณ์	กรณีที่ 2 อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบ	กรณีที่ 3 อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาเมื่อมีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์	กรณีที่ 4 อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม
ปีที่บำรุงรักษาแบบป้องกัน	-	5, 10, 15, 20	8, 14, 19, 24	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18
ความเชื่อถือได้	ไม่ผ่านเกณฑ์	ไม่ผ่านเกณฑ์	ผ่านเกณฑ์	ผ่านเกณฑ์
ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกัน (บาท)	0	14,893,540	11,925,856	13,305,048
ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบแก้ไข (บาท)	12,725,531	12,127,881	26,871,433	9,048,153
ค่าใช้จ่ายทั้งหมด (บาท)	12,725,531	27,021,421	38,797,289	22,353,201

ภาพที่ 7.54 ผลการทดสอบการกำหนดตารางการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 4 กรณี

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาในกรณีที่ 2 ถึง 4 สัดส่วนของค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันจะมากกว่าค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบแก้ไขเสมอ และการบำรุงรักษาแบบป้องกันช่วยลดการเกิดการบำรุงรักษาแบบแก้ไข ซึ่งสะท้อนในรูปของค่าใช้จ่ายดังภาพที่ 7.55



ภาพที่ 7.55 สัดส่วนค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขหม้อแปลงไฟฟ้า

7.2.1.2.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบการบำรุงรักษาบัสบาร์

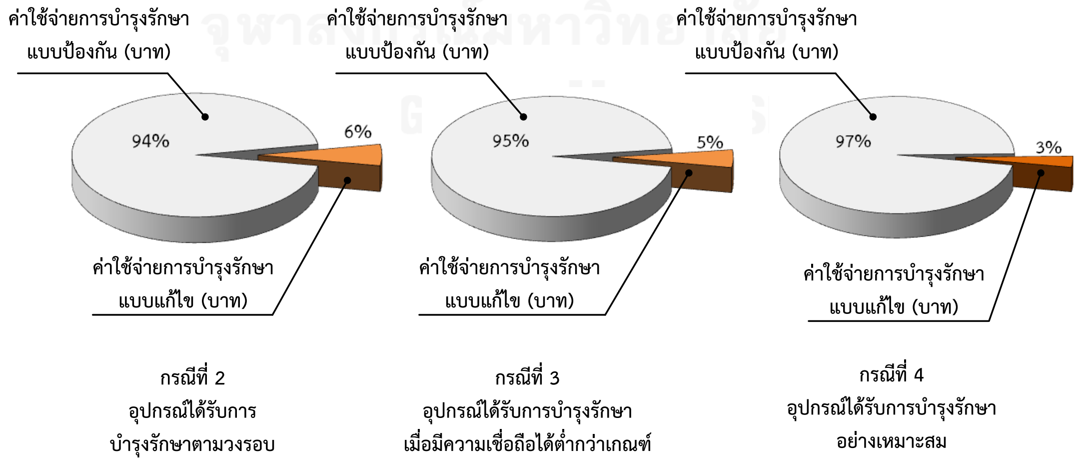
ผลการทดสอบการบำรุงรักษาบัสบาร์ มีลักษณะเช่นเดียวกันกับ ผลการทดสอบการบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์และหม้อแปลงไฟฟ้าในหัวข้อที่ผ่านมา โดยในกรณีที่ 1 ก่อนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ มีค่าใช้จ่ายเพียงการบำรุงรักษาแบบแก้ไขเท่านั้น และมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการบำรุงรักษาทุกกรณี แต่ความเชื่อถือได้ของกรณีนี้จะมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ ในกรณีที่ 2 การบำรุงรักษา

ตามวงรอบทุกๆ 5 ปี มีค่าใช้จ่ายที่สูงมากแต่อุปกรณ์มีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์ สำหรับกรณีที่ 3 การบำรุงรักษาอุปกรณ์ก็ต่อเมื่ออุปกรณ์มีแนวโน้มที่ความเชื่อถือได้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาที่สูงมาก และสูงกว่าราคาการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่เสียอีก แต่สำหรับการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสมในกรณีที่ 4 จะทำให้อุปกรณ์มีความเชื่อถือได้อยู่ในเกณฑ์ และมีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด ดังภาพที่ 7.56

	กรณีที่ 1 ก่อนการบำรุงรักษาอุปกรณ์	กรณีที่ 2 อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบ	กรณีที่ 3 อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาเมื่อมีความเชื่อถือได้ต่ำกว่าเกณฑ์	กรณีที่ 4 อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม
ปีที่บำรุงรักษาแบบป้องกัน	-	5, 10, 15, 20	9, 13, 17, 22	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17
ความเชื่อถือได้	ไม่ผ่านเกณฑ์	ไม่ผ่านเกณฑ์	ผ่านเกณฑ์	ผ่านเกณฑ์
ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกัน (บาท)	0	110,828	131,123	103,463
ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบแก้ไข (บาท)	15,308	6,534	6,566	3,305
ค่าใช้จ่ายทั้งหมด (บาท)	15,308	117,363	137,689	106,768

ภาพที่ 7.56 ผลการทดสอบการกำหนดตารางการบำรุงรักษาบัสบาร์ทั้ง 4 กรณี

เช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาในกรณีที่ 2 ถึง 4 สัดส่วนของค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันจะมากกว่าค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบแก้ไขเสมอ ดังภาพที่ 7.57



ภาพที่ 7.57 สัดส่วนค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขบัสบาร์

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในกรณีที่ 4 อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสมของทุกอุปกรณ์ จะสังเกตุเห็น แนวโน้มการกำหนดการบำรุงรักษาแบบป้องกันอยู่ช่วงต้นใน 15 ปีแรก และ 10 ปีสุดท้ายไม่ค่อยมีการบำรุงรักษามากนัก เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการบำรุงรักษาในระดับอุปกรณ์ คือ การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่ทำให้มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขของความเชื่อถือได้ สำหรับเหตุผลสนับสนุนของการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในช่วงต้น สามารถวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน ดังต่อไปนี้

(1) เนื่องจากการกำหนดเงื่อนไขความเชื่อถือได้ที่สูง (0.9) แต่ในขณะที่อุปกรณ์มีแนวโน้มที่จะเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวสูง จึงทำให้อุปกรณ์ละเมิดขีดจำกัดด้านความเชื่อถือได้ในช่วง 5 ปีแรก ดังนั้น จึงจำเป็นที่ต้องบำรุงรักษาอุปกรณ์ตั้งแต่ปีแรก

(2) เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน แปรผันตามขนาดการบำรุงรักษา (อัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่ลดลง) ดังนั้น ถ้าหากบำรุงรักษาอุปกรณ์ในช่วงปีแรก ซึ่งเป็นช่วงที่มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวน้อย ย่อมส่งผลให้ขนาดที่ต้องบำรุงรักษามีน้อย จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกันน้อยตามไปด้วย สำหรับค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไขจะไม่มีอิทธิพลต่อการกำหนดการบำรุงรักษามากนัก เพราะจำนวนครั้งที่อุปกรณ์ล้มเหลวมีค่าน้อย กอปรกับค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแต่ละครั้งมีค่าน้อยกว่าค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่มาก (ค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่เป็นค่าใช้จ่ายตั้งต้นของการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ซึ่งถูกนำไปใช้กำหนดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกันแต่ละครั้งที่ผันตามสัดส่วนขนาดการบำรุงรักษา) จึงทำให้ค่าใช้จ่ายในส่วนนี้มีค่าน้อยกว่าค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกันมาก

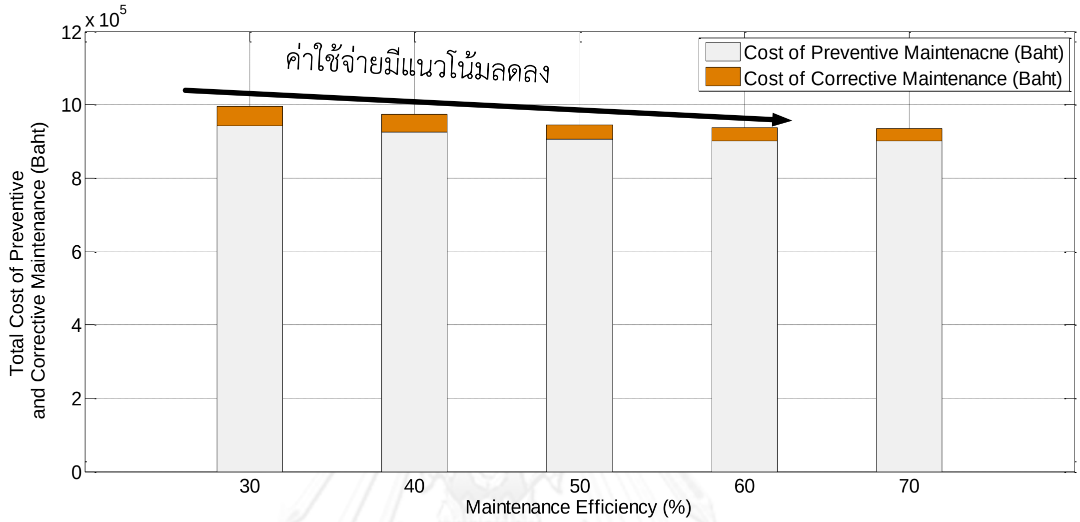
ดังนั้น การกำหนดแผนการบำรุงรักษาจึงขึ้นอยู่กับค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกันเป็นหลัก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบที่สัดส่วนของค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน ที่มีมากกว่าค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบแก้ไข ทำให้การบำรุงรักษาที่เหมาะสมจึงเกิดขึ้นบ่อยในช่วงต้นตามอิทธิพลของค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาป้องกัน

7.2.1.4 ความไวของพารามิเตอร์ในแบบจำลองการบำรุงรักษาที่ส่งผลต่อการกำหนดแผนการบำรุงรักษา

เมื่อพิจารณาสมมุติฐานของการทดสอบ จะเห็นถึงพารามิเตอร์ที่มีบทบาทสำคัญในการกำหนดแผนการบำรุงรักษา คือ ประสิทธิภาพของการบำรุงรักษา ซึ่งพารามิเตอร์นี้อาศัยการสมมุติขึ้นจากประสบการณ์ ดังนั้น จึงนำพารามิเตอร์ดังกล่าวมาพิจารณาความไวของการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ อย่างเหมาะสม

จากการทดสอบที่ผ่านได้กำหนดให้การบำรุงรักษาแบบป้องกันในแต่ละครั้งมีประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น หัวข้อนี้จึงพิจารณาความไวของประสิทธิภาพของการบำรุงรักษา ในการกำหนด

แผนการบำรุงรักษาที่เหมาะสมเฉพาะเซอร์กิตเบรกเกอร์ (การบำรุงรักษาที่เหมาะสมของหม้อแปลงไฟฟ้าและบัสบาร์มีแนวโน้มไปทิศทางเดียวกัน) ที่ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาป้องกัน และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข ด้วยประสิทธิภาพของการบำรุงรักษา 30, 40, 50, 60 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังภาพที่ 7.58



ภาพที่ 7.58 ความไวของประสิทธิภาพการบำรุงรักษา

จากภาพที่ 7.59 จะสังเกตได้ว่า หากการบำรุงรักษาแบบป้องกันมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น จะมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขน้อยลง จึงส่งผลให้ค่าใช้ทั้งหมดมีค่าลดน้อยลงตามไปด้วย

7.2.2 การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด

จากการทดสอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด (ระดับอุปกรณ์) ไปแล้วนั้น จะเห็นว่ามีการพิจารณาเฉพาะค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไขเท่านั้น เพราะเป็นการมองเพียงหนึ่งอุปกรณ์เท่านั้น ยังไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นหากมีการเชื่อมต่ออุปกรณ์เป็นสถานีไฟฟ้า ดังนั้น หัวข้อนี้จึงนำเสนอ การทดสอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด (ระดับสถานีไฟฟ้า) ของแต่ละการจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้า โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ

(1) **การตรวจหากลุ่มมินิมัลคัตภายในสถานีไฟฟ้า** เพื่อนำผลการทดสอบมาประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการบำรุงรักษาอุปกรณ์ และเพื่อนำมาประเมินความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้า ซึ่งเป็นเงื่อนไขบังคับของการกำหนดแผนการบำรุงรักษา โดยวิธีการตรวจหามินิมัลคัตเซตและการประเมินความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้า มีรายละเอียดตามที่นำเสนอไปในบทที่ 4

(2) การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด จะดำเนินการค้นหาคำตอบด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม ภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขบังคับดังนี้

- <u>ฟังก์ชันวัตถุประสงค์:</u> สมการที่ (6.27)
- <u>เงื่อนไขบังคับ:</u> สมการที่ (6.30) ถึง (6.31)
- <u>คำตอบที่ต้องค้นหา:</u> **<u>อุปกรณ์ใดในปีไหน</u>**ควรบำรุงรักษาแบบป้องกัน เพื่อที่ทำให้มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขบังคับต่างๆ

ทั้งนี้ กำหนดให้การบำรุงรักษาแบบป้องกันในแต่ละครั้งมี**<u>ประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์</u>**

7.2.2.1 ผลการทดสอบการตรวจหากลุ่มมินิมัลคัตเซต

กลุ่มมินิมัลคัตเซตของอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าของการจัดเรียงบัสรูปแบบต่างๆ สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มมินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ และกลุ่มมินิมัลคัตเซตแอคทีฟ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

7.2.2.1.1 ผลการตรวจหากลุ่มมินิมัลคัตเซตของการจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้ารูปแบบ Breaker-and-a-half

การจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้ารูปแบบ Breaker-and-a-half ดังภาพที่ 7.1 จะมีกลุ่มมินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ และกลุ่มมินิมัลคัตแบบแอคทีฟ ดังตารางที่ 7.6

ตารางที่ 7.6 กลุ่มมินิมัลคัตเซตของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half

ปีที่	จุดโหลด	กลุ่มมินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ	กลุ่มมินิมัลคัตเซตแอคทีฟ
1-8	จุดโหลด 1	[TR1], [CB2 CB5], [CB2 CB3], [CB2 CB6], [CB2 Bar2]	[CB2], [CB3], [TR1]
	จุดโหลด 2	[TR2], [CB2 CB5], [CB5 CB6], [CB5 CB3], [CB5 Bar2]	[CB5], [CB6], [TR2]
9-18	จุดโหลด 1	[TR1], [CB2 CB3], [CB2 Bar2]	[CB2], [CB3], [TR1]
	จุดโหลด 2	[TR2], [CB5 CB6], [CB5 Bar2]	[CB5], [CB6], [TR2]
	จุดโหลด 3	[TR3], [CB8 CB9], [CB8 Bar2]	[CB8], [CB9], [TR3]
19-25	จุดโหลด 1	[TR1], [CB2 CB3], [CB2 Bar2]	[CB2], [CB3], [TR1]
	จุดโหลด 2	[TR2], [CB5 CB6], [CB5 Bar2]	[CB5], [CB6], [TR2]
	จุดโหลด 3	[TR3], [CB8 CB9], [CB8 Bar2]	[CB8], [CB9], [TR3]
	จุดโหลด 4	[TR4], [CB11 CB12], [CB11 Bar2]	[CB11], [CB12], [TR4]

7.2.2.1.2 ผลการตรวจหากลุ่มมินิมัลคัตเซตของการจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้ารูปแบบ Double-bus-double-breaker

การจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้ารูปแบบ Double-bus-double-breaker ที่มีลักษณะการจัดเรียงอุปกรณ์ และการขยายสถานีไฟฟ้า ดังภาพที่ 7.2 จะมีกลุ่มมินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ และกลุ่มมินิมัลคัตเซตแบบแอคทีฟ ดังตารางที่ 7.7

ตารางที่ 7.7 กลุ่มมินิมัลคัตเซตของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker

ปีที่	จุดโหลด	กลุ่มมินิมัลคัตเซตแบบพาสซีฟ	กลุ่มมินิมัลคัตเซตแอคทีฟ
1-8	จุดโหลด 1	[TR1], [CB3 CB4], [CB3 Bar2], [CB4Bar1], [Bar1 Bar2]	[CB3], [CB4], [TR1], [Bar1 Bar2]
	จุดโหลด 2	[TR2], [CB5 CB6], [CB5 Bar2], [CB6Bar1], [Bar1 Bar2]	[CB5], [CB6], [TR2], [Bar1 Bar2]
9-18	จุดโหลด 1	[TR1], [CB3 CB4], [CB3 Bar2], [CB4 Bar1], [Bar1 Bar2]	[CB3], [CB4], [TR1], [Bar1 Bar2]
	จุดโหลด 2	[TR2], [CB5 CB6], [CB5 Bar2], [CB6 Bar1], [Bar1 Bar2]	[CB5], [CB6], [TR2], [Bar1 Bar2]
	จุดโหลด 3	[TR3], [CB9 CB10], [CB9 Bar2], [CB10 Bar1], [Bar1 Bar2]	[CB9], [CB10], [TR3], [Bar1 Bar2]
19-25	จุดโหลด 1	[TR1], [CB3 CB4], [CB3 Bar2], [CB4 Bar1], [Bar1 Bar2]	[CB3], [CB4], [TR1], [Bar1 Bar2]
	จุดโหลด 2	[TR2], [CB5 CB6], [CB5 Bar2], [CB6 Bar1], [Bar1 Bar2]	[CB5], [CB6], [TR2], [Bar1 Bar2]
	จุดโหลด 3	[TR3], [CB9 CB10], [CB9 Bar2], [CB10 Bar1], [Bar1 Bar2]	[CB9], [CB10], [TR3], [Bar1 Bar2]
	จุดโหลด 4	[TR4], [CB13 CB14], [CB13 Bar2], [CB14 Bar1], [Bar1 Bar2]	[CB13], [CB14], [TR4], [Bar1 Bar2]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย Chulalongkorn University

7.2.2.2 ผลการทดสอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า

ผลการทดสอบการกำหนดแผนการบำรุงอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าของการจัดเรียงบัสรูปแบบต่างๆ จะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

(1) อุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าไม่ได้รับการบำรุงรักษา

(2) อุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบทุกๆ 5 ปี

(3) อุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม

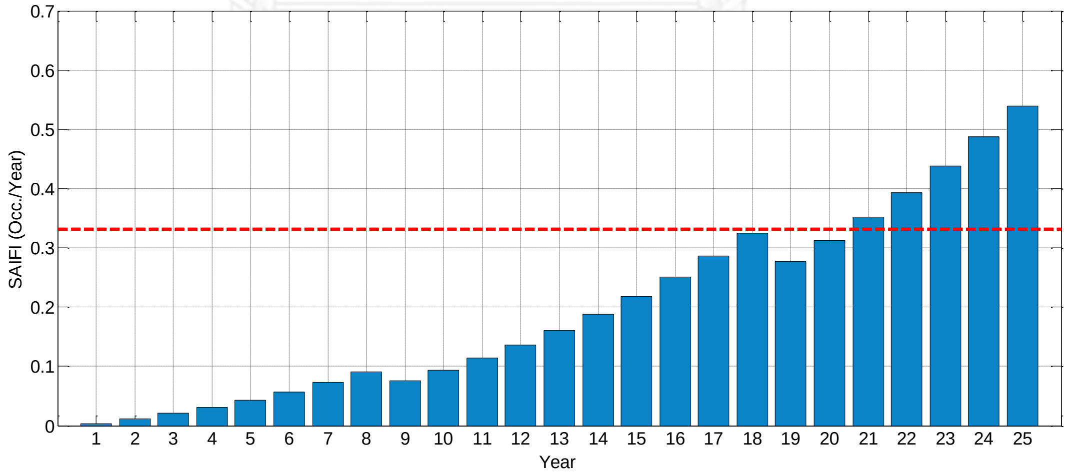
ผลการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

7.2.2.2.1 ผลการทดสอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่ที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half

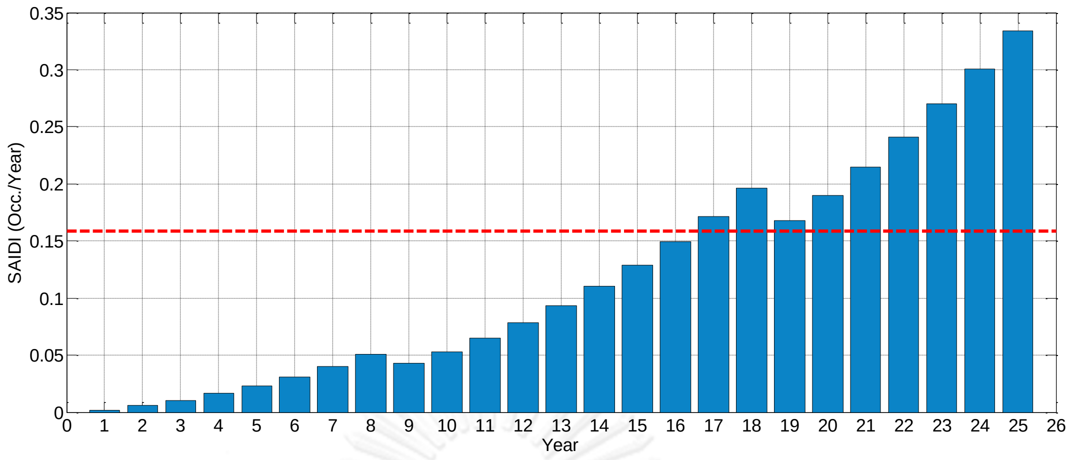
การจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้ารูปแบบ Breaker-and-a-half ที่มีลักษณะการจัดเรียงอุปกรณ์และการขยายสถานีไฟฟ้า ดังภาพที่ 7.1 จะได้รับการกำหนดแผนการบำรุงรักษาดังต่อไปนี้

<u>กรณีที่ 1</u> อุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าไม่ได้รับการบำรุงรักษา

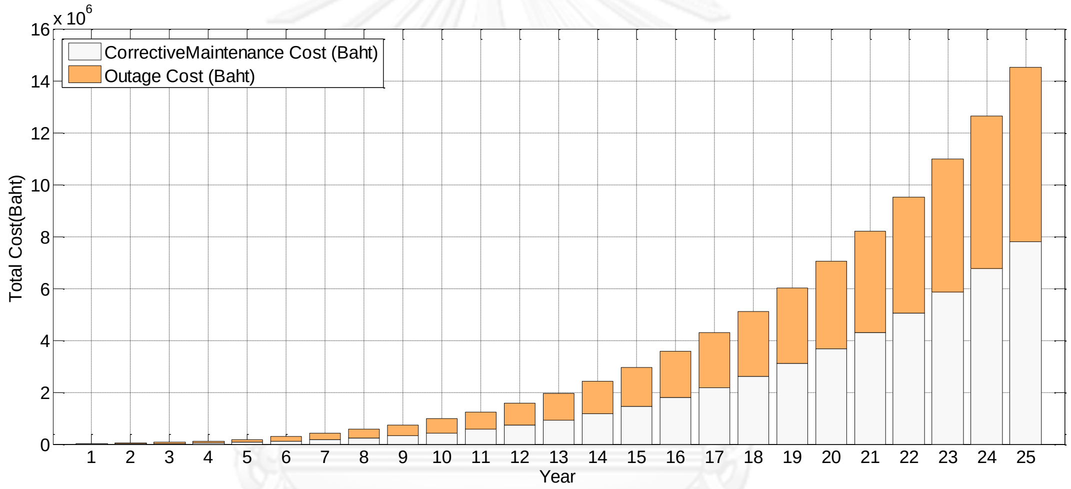
หากอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าไม่ได้รับการบำรุงรักษา จะทำให้มีค่าดัชนี SAIFI ดัชนี SADI และค่าใช้จ่ายทั้งหมด ดังภาพที่ 7.59 ถึง 7.61



ภาพที่ 7.59 ดัชนี SAIFI ของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half
กรณีอุปกรณ์ไม่ได้รับการบำรุงรักษา



ภาพที่ 7.60 ดัชนี SAIDI ของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half กรณีอุปกรณ์ไม่ได้รับการบำรุงรักษา



ภาพที่ 7.61 ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half กรณีอุปกรณ์ไม่ได้รับการบำรุงรักษา

ในกรณีที่ 1 หากอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half ไม่ได้รับการบำรุงรักษา จะมีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 95,442,406 บาท โดยแบ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข 49,334,998 บาท และมูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ 46,107,408 บาท

<u>กรณีที่ 2</u> อุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบทุกๆ 5 ปี

กรณีนี้ หากอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half ทุกอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกันพร้อมกันตามวงรอบในทุกๆ 5 ปี นับจากวันที่เริ่มต้นใช้งาน ดังตารางการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในตารางที่ 7.8

ตารางที่ 7.8 อุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half ได้รับการบำรุงรักษา ตามวงรอบทุกๆ 5 ปี

อุปกรณ์	ปีที่																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
CB1					⊙					⊙					⊙					⊙					
CB2					⊙					⊙					⊙					⊙					
CB3					⊙					⊙					⊙					⊙					
CB4					⊙					⊙					⊙					⊙					
CB5					⊙					⊙					⊙					⊙					
CB6					⊙					⊙					⊙					⊙					
TR1					⊙					⊙					⊙					⊙					
TR2					⊙					⊙					⊙					⊙					
Bar1					⊙					⊙					⊙					⊙					
Bar2					⊙					⊙					⊙					⊙					
CB7													⊙					⊙					⊙		
CB8													⊙					⊙					⊙		
CB9													⊙					⊙					⊙		
TR3													⊙					⊙					⊙		
CB10																							⊙		
CB11																							⊙		
CB12																							⊙		
TR4																							⊙		

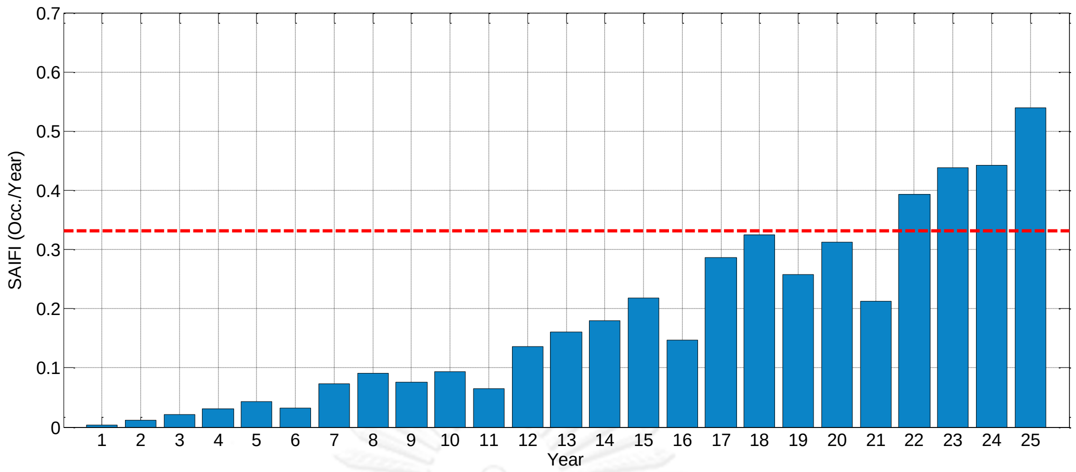
<u>หมายเหตุ</u> [ช่องแรเงา] คือ อุปกรณ์ยังไม่ได้ถูกติดตั้งในสถานีไฟฟ้า

[ช่องว่าง] คือ อุปกรณ์ไม่ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกัน

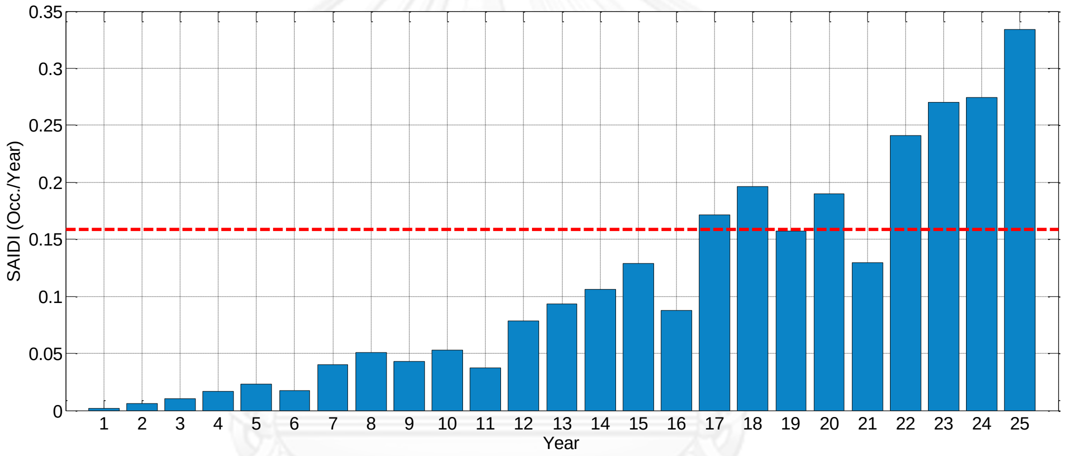
⊙ คือ อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกัน

○ คือ อุปกรณ์ได้รับการเปลี่ยนใหม่

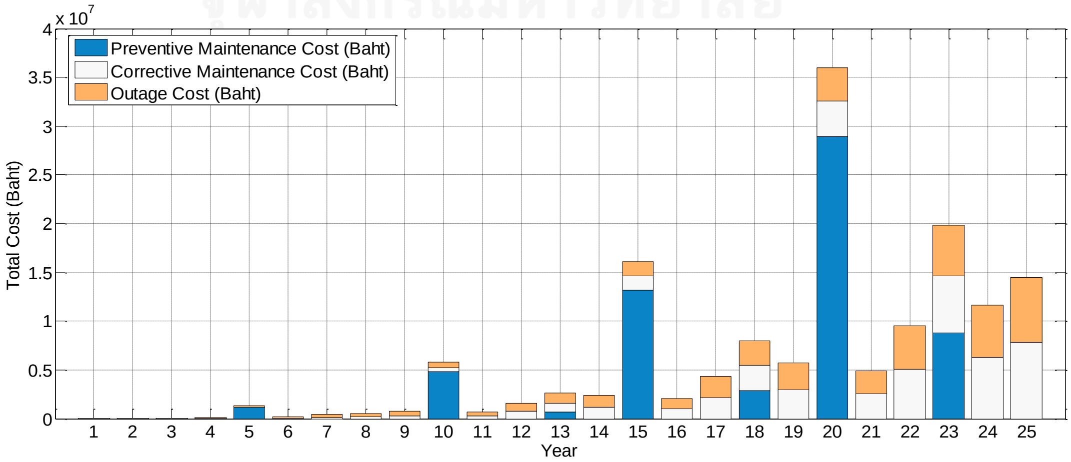
เมื่ออุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามตารางที่ 7.8 จะทำให้มีค่าดัชนี SAIFI ดัชนี SAIDI และค่าใช้จ่ายทั้งหมด ดังภาพที่ 7.62 ถึง 7.64



ภาพที่ 7.62 ดัชนี SAIFI ของการจัดเรียงบัสรูปรูปแบบ Breaker-and-a-half
กรณีอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบ



ภาพที่ 7.63 ดัชนี SAIDI ของการจัดเรียงบัสรูปรูปแบบ Breaker-and-a-half
กรณีอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบ



ภาพที่ 7.64 ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการจัดเรียงบัสรูปรูปแบบ Breaker-and-a-half
กรณีอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบ

ในกรณีที่ 2 หากอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half ซึ่งได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบทุกๆ 5 ปี จะมีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 149,032,898 บาท โดยแบ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข 45,859,137 บาท ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน 60,429,747 และมูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ 42,744,014 บาท

<u>กรณีที่ 3</u> อุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม

กรณีนี้ อุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกันอย่างเหมาะสม ภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามสมการที่ (6.27) และเงื่อนไขบังคับตามสมการที่ (6.30) ถึง (6.31) พบว่า สามารถกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ได้ดังตารางที่ 7.9

ตารางที่ 7.9 ผลการทดสอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half

อุปกรณ์	**ปีที่**																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
CB1																									
CB2																									
CB3																									
CB4																									
CB5																									
CB6																									
TR1	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	
TR2	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	
Bar1																									
Bar2																									
CB7																									
CB8																									
CB9																									
TR3																									
CB10																									
CB11																									
CB12																									
TR4																									

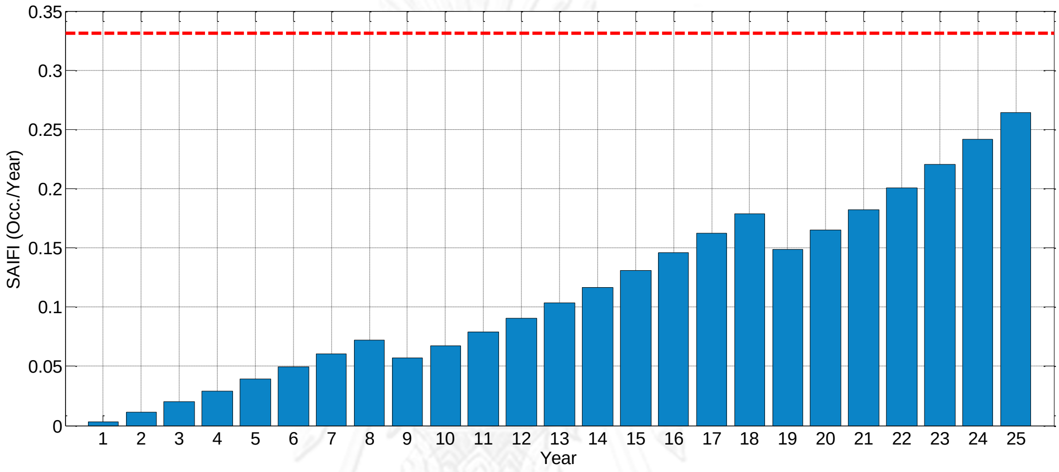
หมายเหตุ ▭ (แรเงา) คือ อุปกรณ์ยังไม่ได้ถูกติดตั้งในสถานีไฟฟ้า

▭ คือ อุปกรณไม่ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกัน

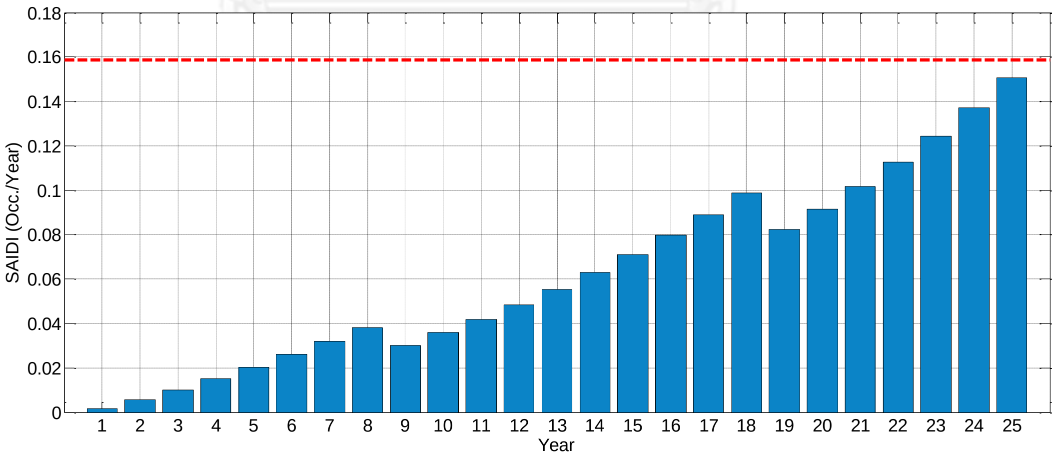
⊙ คือ อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกัน

○ คือ อุปกรณ์ได้รับการเปลี่ยนใหม่

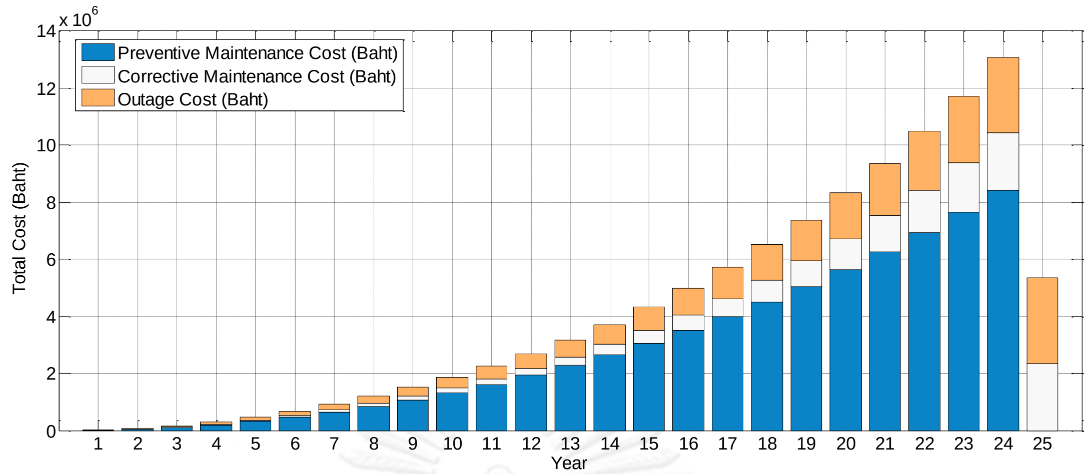
เมื่ออุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามตารางการบำรุงรักษาในตารางที่ 7.9 สถานีไฟฟ้าจะมีค่าดัชนี SAIFI ดัชนี SAIDI และค่าใช้จ่ายทั้งหมดดังภาพที่ 7.65 ถึง 7.67



ภาพที่ 7.65 ดัชนี SAIFI ของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half
กรณีอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม



ภาพที่ 7.66 ดัชนี SAIDI ของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half
กรณีอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม



ภาพที่ 7.67 ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half กรณีอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม

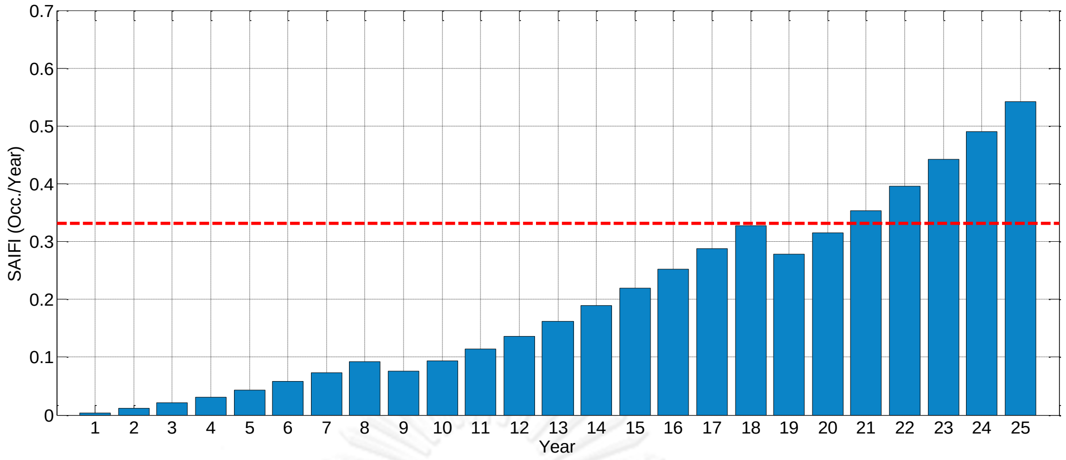
ในกรณีที่ 3 หากอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half ได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม จะมีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 106,268,735 บาท โดยแบ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข 14,960,786 บาท ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน 68,489,048 บาท และมูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ 22,818,900 บาท

7.2.2.2.2 ผลการทดสอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker

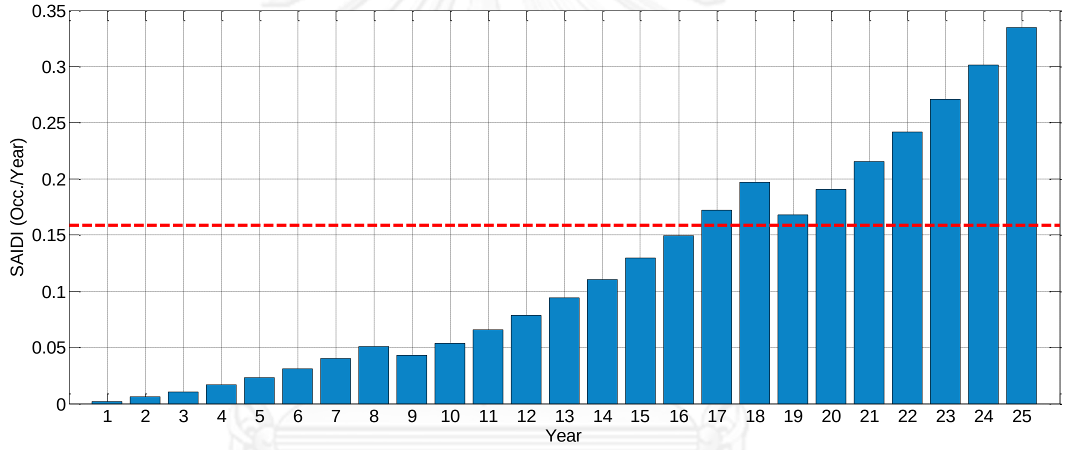
การจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้ารูปแบบ Double-bus-double-breaker ที่มีลักษณะการจัดเรียงอุปกรณ์ และการขยายสถานีไฟฟ้า ดังภาพที่ 7.2 จะได้รับการกำหนดแผนการบำรุงรักษาดังต่อไปนี้

<u>กรณีที่ 1</u> อุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าไม่ได้รับการบำรุงรักษา

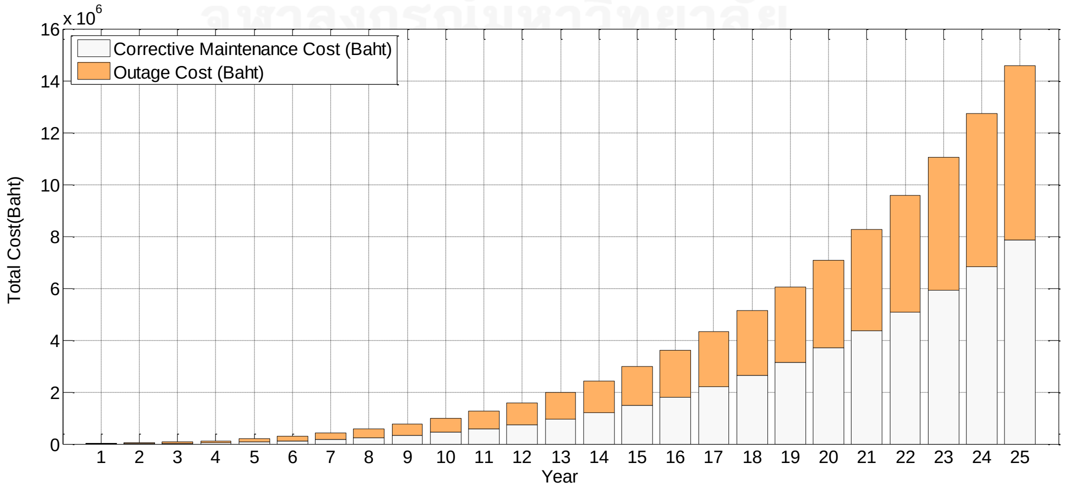
หากอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าไม่ได้รับการบำรุงรักษา จะทำให้มีค่าดัชนี SAIFI ดัชนี SADI และค่าใช้จ่ายทั้งหมด ดังภาพที่ 7.68 ถึง 7.70



ภาพที่ 7.68 ดัชนี SAIFI ของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker
กรณีอุปกรณ์ไม่ได้รับการบำรุงรักษา



ภาพที่ 7.69 ดัชนี SAIDI ของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker
กรณีอุปกรณ์ไม่ได้รับการบำรุงรักษา



ภาพที่ 7.70 ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker
กรณีอุปกรณ์ไม่ได้รับการบำรุงรักษา

ในกรณีที่ 1 หากอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker ไม่ได้รับการบำรุงรักษา จะมีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 96,078,068 บาท โดยแบ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข 49,857,360 บาท และมูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ 46,220,708 บาท

<u>กรณีที่ 2</u> อุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบทุกๆ 5 ปี

กรณีนี้ หากอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker ทุกอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกันพร้อมกันตามวงรอบในทุกๆ 5 ปี นับจากวันที่เริ่มต้นใช้งาน ดังตารางการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในตารางที่ 7.10

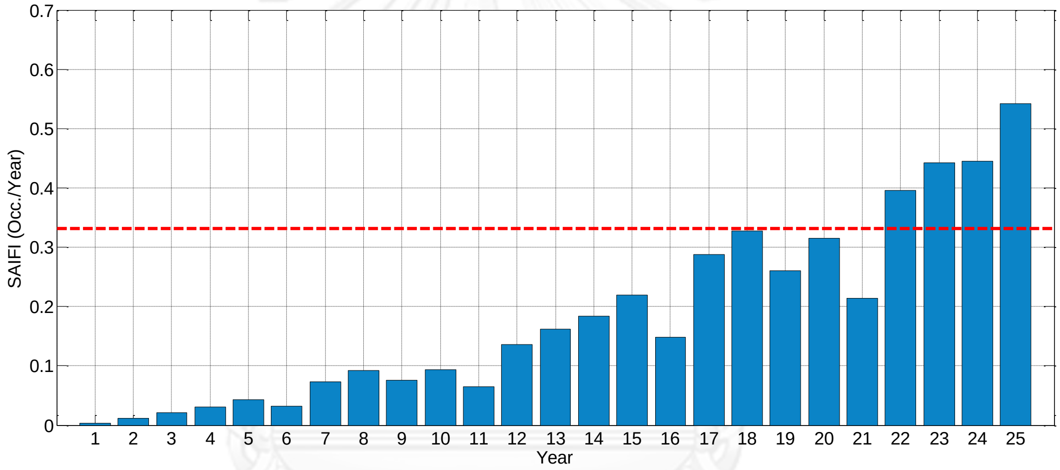
ตารางที่ 7.10 อุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker ได้รับการบำรุงรักษา ตามวงรอบทุกๆ 5 ปี

อุปกรณ์	ปีที่																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
CB1					⊙					⊙					⊙					⊙					
CB2					⊙					⊙					⊙					⊙					
CB3					⊙					⊙					⊙					⊙					
CB4					⊙					⊙					⊙					⊙					
CB5					⊙					⊙					⊙					⊙					
CB6					⊙					⊙					⊙					⊙					
CB7					⊙					⊙					⊙					⊙					
CB8					⊙					⊙					⊙					⊙					
TR1					⊙					⊙					⊙					⊙					
TR2					⊙					⊙					⊙					⊙					
Bar1					⊙					⊙					⊙					⊙					
Bar2					⊙					⊙					⊙					⊙					
CB9													⊙					⊙					⊙		
CB10													⊙					⊙					⊙		
CB11													⊙					⊙					⊙		
CB12													⊙					⊙					⊙		
TR3													⊙					⊙					⊙		
CB13																							⊙		
CB14																							⊙		
CB15																							⊙		

อุปกรณ์	ปีที่																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
CB16																							⊙		
TR4																							⊙		

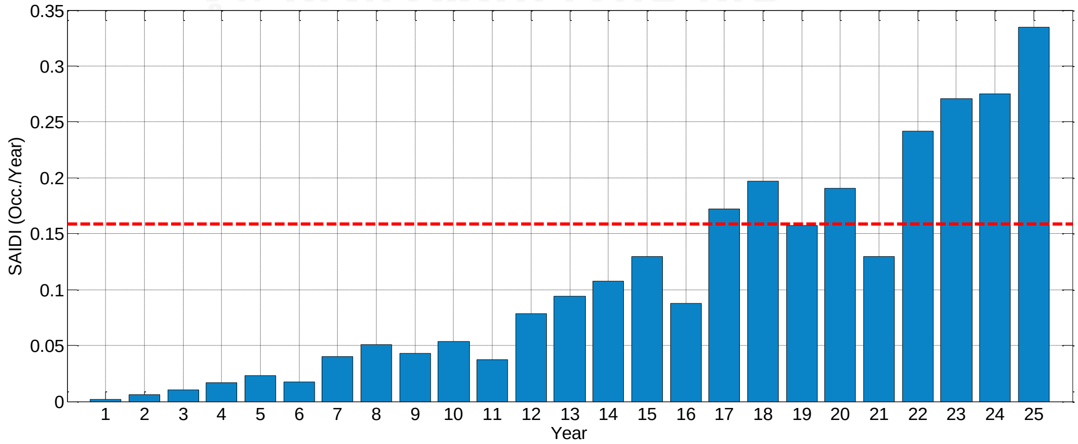
<u>หมายเหตุ</u>
- คือ อุปกรณ์ยังไม่ได้ถูกติดตั้งในสถานีไฟฟ้า
- คือ อุปกรณไม่ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกัน
- ⊙ คือ อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกัน
- ○ คือ อุปกรณ์ได้รับการเปลี่ยนใหม่

เมื่ออุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามตารางที่ 7.10 จะทำให้มีค่าดัชนี SAIFI ดัชนี SADI และค่าใช้จ่ายทั้งหมด ดังภาพที่ 7.71 ถึง 7.73

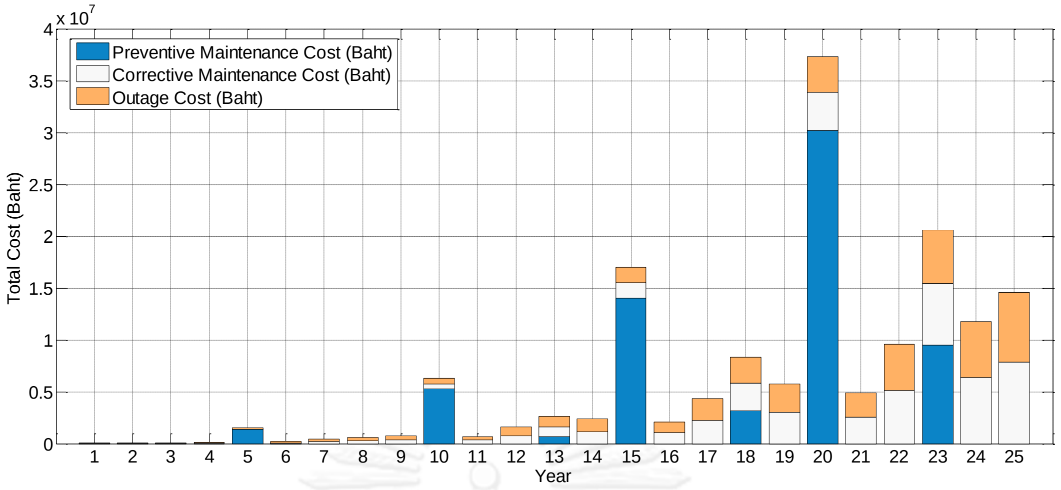


ภาพที่ 7.71 ดัชนี SAIFI ของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker
กรณีอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 7.72 ดัชนี SAIDI ของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker
กรณีอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบ



ภาพที่ 7.73 ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker กรณีอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบ

ในกรณีที่ 2 หากอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker ได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบทุกๆ 5 ปี จะมีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 153,399,673 บาท โดยแบ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข 46,339,347 บาท ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน 64,202,174 และมูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ 42,858,152 บาท

<u>กรณีที่ 3</u> อุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม

กรณีนี้ อุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกันอย่างเหมาะสม ภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามสมการที่ (6.27) และเงื่อนไขบังคับตามสมการที่ (6.30) ถึง (6.31) พบว่า สามารถกำหนดแผนการบำรุงรักษาได้ดังตารางที่ 7.11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 7.11 ผลการทดสอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker

อุปกรณ์	ปีที่																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
CB1																									
CB2																									
CB3																									
CB4																									
CB5																									
CB6																									

อุปกรณ์	ปีที่																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
CB7																									
CB8																									
TR1	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	
TR2	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	
Bar1																									
Bar2																									
CB9	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒																	
CB10	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒																	
CB11	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒																	
CB12	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒																	
TR3	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒																	
CB13	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒							
CB14	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒							
CB15	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒							
CB16	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒							
TR4	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒							

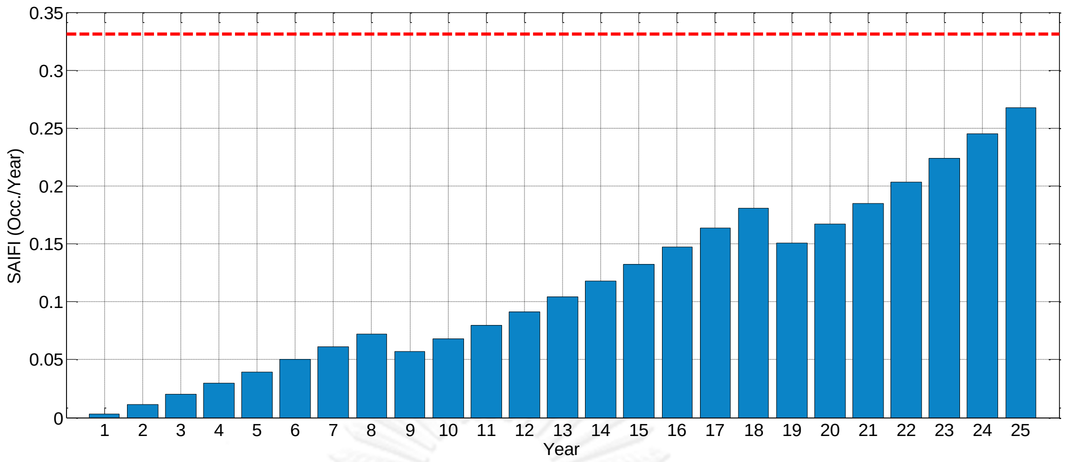
<u>หมายเหตุ</u> ▒ คือ อุปกรณ์ยังไม่ได้ถูกติดตั้งในสถานีไฟฟ้า

☐ คือ อุปกรณไม่ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกัน

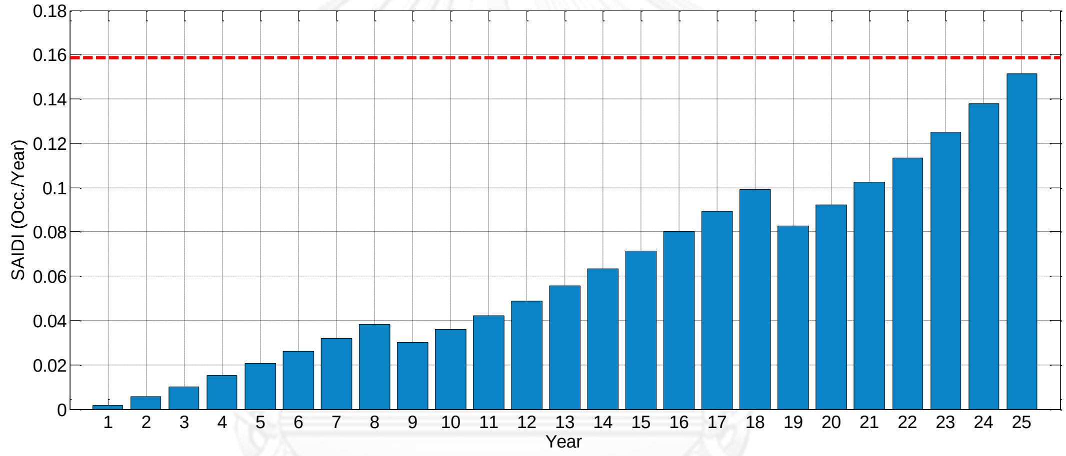
⊙ คือ อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาแบบป้องกัน

○ คือ อุปกรณ์ได้รับการเปลี่ยนใหม่

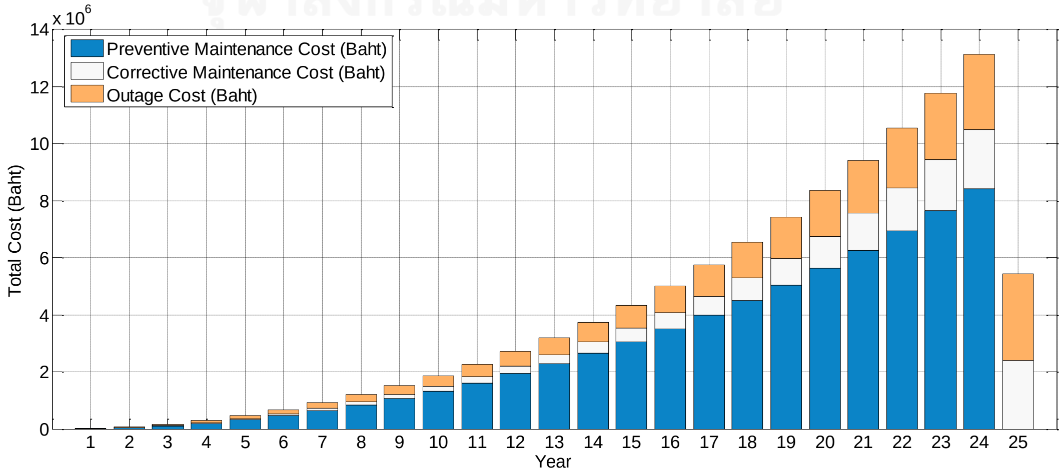
เมื่ออุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามตารางการบำรุงรักษาในตารางที่ 7.11 สถานีไฟฟ้าจะมีค่าดัชนี SAIFI ดัชนี SAIDI และค่าใช้จ่ายทั้งหมดดังภาพที่ 7.74 ถึง 7.76



ภาพที่ 7.74 ดัชนี SAIFI ของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker กรณีอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม



ภาพที่ 7.75 ดัชนี SAIDI ของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker กรณีอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม



ภาพที่ 7.76 ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker กรณีอุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม

ในกรณีที่ 3 หากอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker ได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม จะมีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 106,904,395 บาท โดยแบ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข 15,483,147 บาท ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน 68,489,048 บาท และมูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ 22,932,200 บาท

7.2.2.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า

การวิเคราะห์ผลการทดสอบการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุด ของการจัดเรียงบัสรูปแบบต่างๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

7.2.2.2.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half

จากการทดสอบทั้ง 3 กรณี สามารถเปรียบเทียบใน 2 มิติ คือ มิติด้านความเชื่อถือได้และมิติด้านค่าใช้จ่ายเช่นเดียวกัน สำหรับกรณีที่ 1 ไม่มีการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าตลอดปีที่พิจารณา จะมีเพียงค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไขเท่านั้น ซึ่งมีมูลค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการบำรุงรักษาทุกกรณี แต่ก็จะทำให้ความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้ามีค่าไม่เป็นตามเกณฑ์มาตราฐานคุณภาพบริการไฟฟ้า

ปัจจุบันผู้ให้บริการไฟฟ้านิยมบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าพร้อมกันในปีนั้นตามวงรอบที่กำหนดขึ้น (อาจไม่ได้บำรุงรักษาพร้อมกันในวันเวลาเดียวกัน แต่จะอยู่ในช่วงปีเดียวกัน) ตัวอย่างเช่น กำหนดให้มีการบำรุงรักษาตามวงรอบทุกๆ 5 ปี นับตั้งแต่เริ่มใช้อุปกรณ์ ดังในกรณีที่ 2 จากการทดสอบสอบจะพบว่า การบำรุงรักษาแบบป้องกันด้วยวิธีนี้ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข และมูลค่าสูญเสียอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับลดลง แต่ก็ต้องมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกันสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเมื่อรวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดก็ยังมีค่าสูงมาก อย่างไรก็ตาม หากมูลค่าที่ลงทุนไปในการบำรุงรักษาแบบป้องกันช่วยทำให้ความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้ามีค่าเป็นไปตามเกณฑ์มาตราฐานฯ ก็เป็นแผนการบำรุงรักษาที่พึงยอมรับได้ แต่จากการทดสอบปรากฏว่าค่าดัชนี SAIFI และดัชนี SAIDI มีค่ามากกว่าเกณฑ์มาตราฐานฯ ดังนั้น การบำรุงรักษาตามแผนงานนี้จึงเป็นการลงทุนที่ไม่เกิดประโยชน์ต่อสถานีไฟฟ้า ไม่ช่วยปรับปรุงความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าให้ดีขึ้น จึงไม่เหมาะสมที่จะกำหนดแผนการบำรุงรักษาด้วยวิธีนี้

อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการกำหนดแผนการบำรุงรักษาที่เหมาะสม ด้วยแนวทางที่ได้นำเสนอในบทที่ 6 ซึ่งได้แสดงผลการทดสอบไว้ในกรณีที่ 3 ของการทดสอบ จากการทดสอบพบว่า การบำรุงรักษาแบบป้องกันที่เหมาะสม ช่วยให้ความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้ามีค่าเป็นไปตามเกณฑ์

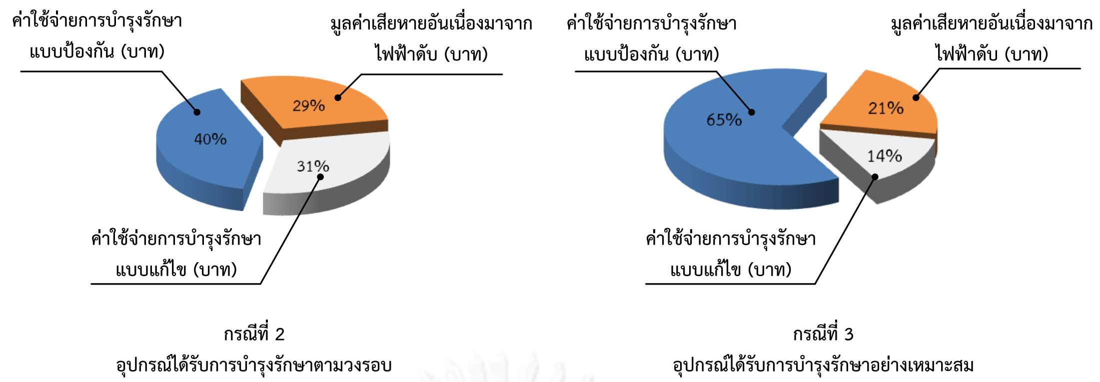
มาตรฐานฯ และเมื่อพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น การบำรุงรักษาแบบป้องกันที่ได้ลงทุนไป ถูกชดเชยด้วยค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไข และมูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับที่ลดลง เมื่อรวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยที่สุด อย่างน้อยก็มีค่าน้อยกว่าค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่าการบำรุงรักษาที่เป็นอยู่ในปัจจุบันตามกรณีที่ 2 และยังทำให้ความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้ามีค่าเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานฯ อีกด้วย ดังภาพที่ 7.7

	กรณีที่ 1 อุปกรณ์ไม่ได้รับการบำรุงรักษา	กรณีที่ 2 อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบ	กรณีที่ 3 อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม
ความเชื่อถือได้	ไม่ผ่านเกณฑ์	ไม่ผ่านเกณฑ์	ผ่านเกณฑ์
ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบแก้ไข (บาท)	49,334,998	45,859,137	14,960,786
ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกัน (บาท)	0	60,429,747	68,489,048
มูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ (บาท)	46,107,408	42,744,014	22,818,900
ค่าใช้จ่ายทั้งหมด (บาท)	95,442,406	149,032,898	106,268,734

ภาพที่ 7.77 ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า
ที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half ทั้งสามกรณี

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาในกรณีที่ 2 และ 3 สัดส่วนของค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกันจะมีค่ามากที่สุดทั้ง 2 กรณี และการบำรุงรักษาแบบป้องกันช่วยลดการเกิดการบำรุงรักษาแบบแก้ไขและมูลค่าเสียหายจากไฟฟ้าดับ ซึ่งสะท้อนในรูปของค่าใช้จ่าย ดังภาพที่ 7.78

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 7.78 สัดส่วนค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการบำรุงรักษาอุปกรณ์
ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Breaker-and-a-half

คำถามถัดมา คือ เพราะเหตุใดการบำรุงรักษาที่เหมาะที่สุด ที่ทำให้มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขบังคับความเชื่อถือได้จึงเป็นไปตามผลการทดสอบในกรณีที่ 3 โดยสามารถวิเคราะห์เหตุผลสนับสนุนออกเป็นที่ละประเด็นดังต่อไปนี้

(1) ถ้าไม่มีการบำรุงรักษาอุปกรณ์ จะมีค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบจากทุกกรณี แต่ก็ทำให้มีความเชื่อถือได้ไม่เป็นไปตามเกณฑ์มาตราฐานฯ ที่กำหนด จึงต้องมีการบำรุงรักษาอุปกรณ์

(2) เนื่องจากระบบไฟฟ้าเป็นโครงสร้างพื้นฐานแห่งรัฐ ผู้ให้บริการไฟฟ้าจำเป็นที่ต้องลงทุนพัฒนา และปรับปรุงระบบไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานฯ ที่กำหนด ถึงแม้จะเป็นการลงทุนที่สูงและไม่มีผลตอบแทนกลับมามากนัก ดังนั้น การบำรุงรักษาอุปกรณ์จึงต้องคำนึงเงื่อนไขของความเชื่อถือได้เป็นสำคัญในอันดับแรก

(3) เมื่อมีการบำรุงรักษาอุปกรณ์จะสังเกตเห็นว่า ไม่ว่าการทดสอบในกรณีใดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกันมีสัดส่วนมากที่สุดเมื่อเทียบจากค่าใช้จ่ายทั้งหมด จึงอาจกล่าวได้ว่าค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกันเป็นตัวชี้วัดของการกำหนดแผนการบำรุงรักษา

(4) การบำรุงรักษาแบบป้องกันในแต่ละครั้งมีค่าใช้จ่ายที่สูง จึงต้องเลือกบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่มีผลทำให้เกิดความคุ้มค่ามากที่สุด โดยทำให้ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไขและมูลค่าเสียหายจากไฟฟ้าดับลดลงมากที่สุด ดังนั้น จึงต้องเลือกบำรุงรักษาแบบป้องกันกับอุปกรณ์ที่มีผลโดยตรงต่อความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้า

(5) เพื่อให้การบำรุงรักษามีผลโดยตรงต่อการปรับปรุงความเชื่อถือได้ จึงต้องกำหนดการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่ผลกระทบต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้า หรือเลือกที่บำรุงรักษาอุปกรณ์ที่อยู่ในกลุ่มมินิมัลคัตเซตของสถานีไฟฟ้าก่อน

(6) เมื่อพิจารณากลุ่มอุปกรณ์ในมินิมัลคัตเซตของระบบทดสอบนี้ มีเพียงเซอร์กิตเบรกเกอร์และหม้อแปลงไฟฟ้าเท่านั้น หากเปรียบเทียบอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวและระยะเวลาการซ่อมแซม/

ระยะเวลาสวิตช์ชิง จะสังเกตได้ว่า หม้อแปลงไฟฟ้ามีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่สูงกว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการคำนวณดัชนี SAIFI และหากเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวจนต้องมีการบำรุงรักษาแบบแก้ไขที่หม้อแปลงไฟฟ้า จะไม่สามารถสวิตช์ชิงไปยังอุปกรณ์อื่นได้ จึงมีผลให้ต้องใช้ระยะเวลาการซ่อมแซมนานมากเมื่อเทียบกับเซอร์กิตเบรกเกอร์ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการคำนวณดัชนี SAIDI และการประมาณพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย (ENS) ที่ใช้ในการประมาณมูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ จากเหตุผลดังกล่าว จึงสามารถสรุปได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อความเชื่อถือได้ จึงเลือกที่จะบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าก่อน

(7) นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาในมิติด้านค่าใช้จ่าย หม้อแปลงไฟฟ้ามีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่สูง จึงต้องมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกันในแต่ละครั้งมากตามไปด้วย แต่ถ้าเลือกบำรุงรักษาเซอร์กิตเบรกเกอร์ ที่มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่ต่ำกว่า ถึงแม้มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกันที่ต่ำกว่า แต่ก็ไม่สามารถทำให้ดัชนีความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าเป็นไปเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดได้ ดังนั้น ด้วยเหตุผลดังกล่าว การกำหนดแผนการบำรุงรักษาจึงเลือกที่บำรุงรักษาจึงเลือกบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า

(8) สำหรับระบบทดสอบนี้ เมื่อเปรียบปริมาณโหลดในแต่ละปีพบว่าจุดโหลดที่ 1 และจุดโหลดที่ 2 มีปริมาณสูงกว่าบริเวณจุดโหลดที่ 3 และจุดโหลดที่ 4 ดังนั้น เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกันจึงเลือกบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีผลกระทบต่อจุดโหลดที่ 1 และ จุดโหลดที่ 2 ซึ่งทำค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกันถูกชดเชยด้วยมูลค่าเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับที่ลดลงมากที่สุด

(9) เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกัน แปรผันตามขนาดการบำรุงรักษาอุปกรณ์ หรืออัตราเหตุการณ์ล้มเหลว ดังนั้น การบำรุงรักษาแบบป้องกันไม่สามารถกระทำเพียงครั้งเดียว ต้องมีการวางแผนล่วงหน้าเพื่อให้อัตราเหตุการณ์ล้มเหลลดลงอย่างเป็นลำดับขั้น เพื่อที่ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกันต่ำที่สุด และคุ้มค่ากับค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบแก้ไขและมูลค่าเสียหายจากไฟฟ้าดับที่ลดลง

7.2.2.2.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสแบบ Double-bus-double-breaker พบว่าแนวโน้มผลการทดสอบที่ลักษณะไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสแบบ Breaker-and-a-half เนื่องจากผลการทดสอบกลุ่มมินิคัตเซตของสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสทั้งสองมีลักษณะใกล้เคียง คือ มีเซอร์

กิตเบรกเกอร์ 2 ตัว และหม้อแปลงไฟฟ้า 1 ตัว ต่อหนึ่งจุดโหลด เพียงแต่การจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้าแบบ Double-bus-double-breaker มีมินิคัตเซตอันดับสองเพิ่มขึ้นอีก 1 กลุ่ม คือ บัสบาร์ทั้งสองข้างที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวพร้อมกัน ซึ่งกลุ่มมินิมัลคัตเซตในกรณีนี้เมื่อคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้แทบจะไม่มีผลกระทบต่อดัชนีเชื่อถือได้ เพราะเหตุการณ์ดังกล่าวมีโอกาสเกิดขึ้นน้อยมาก ทั้งนี้การคำนวณความเชื่อถือได้ของมินิคัตเซตอันดับสองแสดงในสมการที่ (4.17) ถึง (4.19)

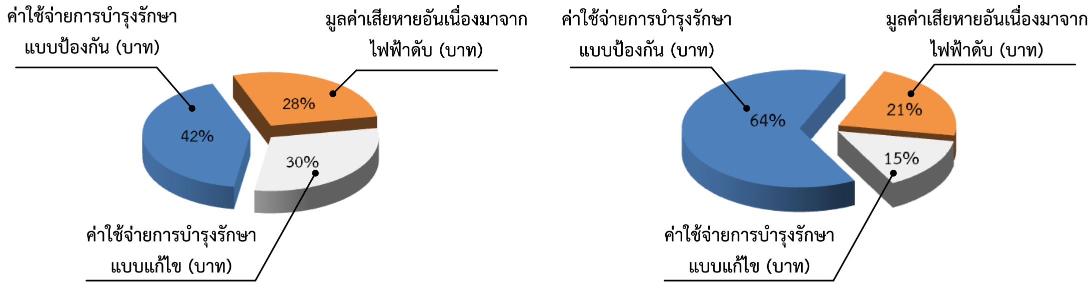
ดังนั้น จึงทำให้การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะที่สุดในกรณีที่ 3 ของการจัดเรียงเรียงบัสทั้งสองรูปแบบมีลักษณะที่เหมือนกัน เพียงแต่ การจัดเรียงบัสในสถานีไฟฟ้าแบบ Double-bus-double-breaker มีจำนวนเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ไม่อยู่ในกลุ่มมินิมัลคัตเซตเพิ่มมา 1 ตัว ต่อหนึ่งจุดโหลด จึงทำให้ค่าใช้จ่ายของการบำรุงรักษาแบบแก้ไขมีค่าสูงกว่า แต่ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกันมีค่าเท่าเดิม และสำหรับมูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับจะมีเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิมเล็กน้อย อันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นมาของกลุ่มมินิคัตเซตอันดับสอง

สำหรับค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงบัสแบบ Double-bus-double-breaker ทั้งสามกรณีแสดงได้ดังภาพที่ 7.79 และสัดส่วนค่าใช้จ่ายแสดงได้ดังภาพที่ 7.80 ตามลำดับ

	กรณีที่ 1 อุปกรณ์ไม่ได้รับการบำรุงรักษา	กรณีที่ 2 อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบ	กรณีที่ 3 อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม
ความเชื่อถือได้	ไม่ผ่านเกณฑ์	ไม่ผ่านเกณฑ์	ผ่านเกณฑ์
ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบแก้ไข (บาท)	49,857,360	46,339,347	15,483,147
ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาแบบป้องกัน (บาท)	0	64,202,174	68,489,048
มูลค่าเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ (บาท)	46,220,708	42,858,152	22,932,200
ค่าใช้จ่ายทั้งหมด (บาท)	96,078,068	153,399,673	106,904,395

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 7.79 ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า
ที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker ทั้งสามกรณี



กรณีที่ 2
อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาตามวงรอบ

กรณีที่ 3
อุปกรณ์ได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม

ภาพที่ 7.80 สัดส่วนค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า
ที่มีการจัดเรียงบัสรูปแบบ Double-bus-double-breaker

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 8
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทนี้จะประกอบไปด้วยการสรุปผลงานงานวิจัย และข้อเสนอแนะเพิ่มเติม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

8.1 สรุปผลการวิจัย

การใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าเป็นระยะเวลานานย่อมทำให้มีอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวเพิ่มสูงขึ้น นั่นคือ ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านั้นมีความเชื่อถือได้ที่ลดลง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงความเชื่อถือได้ด้วยการบำรุงรักษา ผลจากการบำรุงรักษาทำให้อุปกรณ์มีอัตราการเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวที่ลดลง หรืออาจกล่าวได้ว่า อุปกรณ์ไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับไม่มีการบำรุงรักษา ณ เวลาเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันการบำรุงรักษาอุปกรณ์ได้ถูกกำหนดตามวงรอบที่ได้กำหนดขึ้น จึงอาจทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเกินความจำเป็น และในบางกรณีอาจทำให้ความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ไม่เป็นไปมาตรฐานที่กำหนด

การกำหนดแผนการบำรุงรักษาในระดับอุปกรณ์ ต้องคำนึงถึงผลกระทบด้านค่าใช้จ่ายของการบำรุงรักษาแบบป้องกัน (Preventive maintenance) และการบำรุงรักษาแบบแก้ไข (Corrective maintenance) ที่มีลักษณะที่ตรงข้ามกัน และเมื่อขยายแนวทางการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ จากระดับอุปกรณ์ไปสู่ระดับสถานีไฟฟ้า ต้องพิจารณาค่าใช้จ่ายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ (Outage cost) เพิ่มขึ้นจากค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบแก้ไข ดังนั้น จึงสามารถกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าได้จากค่าใช้จ่ายทั้งสามส่วนที่มีค่าน้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขทางด้านความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้า อันได้แก่ ดัชนี SAIFI และ ดัชนี SAIDI ที่เป็นไปตามมาตราฐานคุณภาพบริการไฟฟ้า

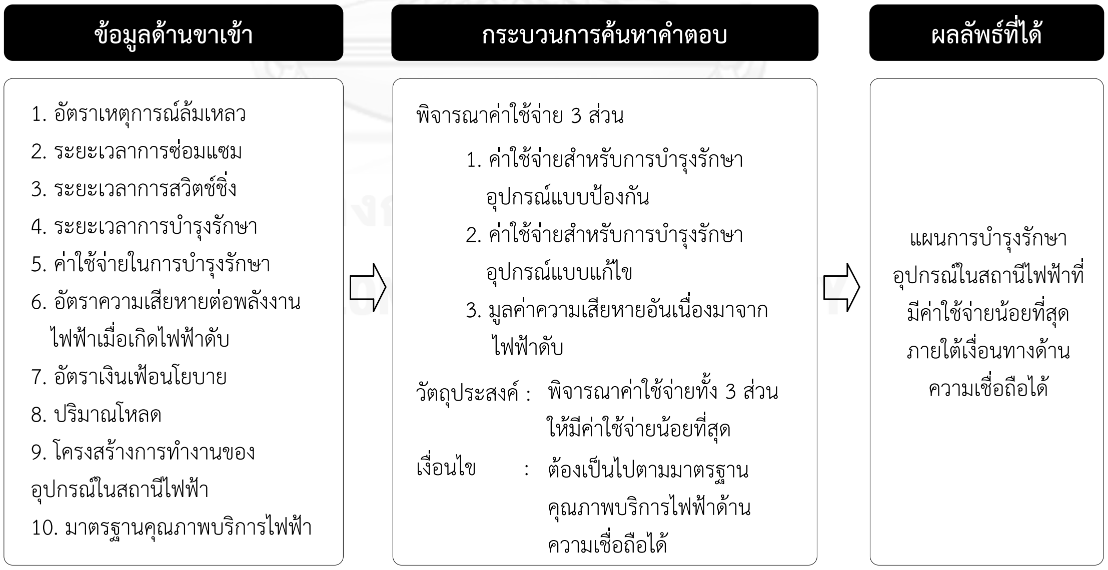
จากการผลการทดสอบการบำรุงรักษาอุปกรณ์อย่างเหมาะสม (ระดับอุปกรณ์) มีข้อสังเกตอย่างมีนัยสำคัญ คือ การบำรุงรักษาอุปกรณ์ควรดูแลตั้งแต่เริ่มติดตั้งอุปกรณ์เข้าสู่ระบบ เพื่อที่ในอนาคตอุปกรณ์จะมีการเสื่อมสภาพที่น้อยลง ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาน้อย ในทางตรงกันข้าม หากละเลยไม่มีการดูแลรักษาอุปกรณ์มาอย่างต่อเนื่องในปีแรกๆ อุปกรณ์จะมีการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว และมีโอกาสเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวได้ง่าย ซึ่งในขณะนั้นอาจต้องใช้ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาที่สูงขึ้น อันเนื่องมาจากขนาดการบำรุงรักษาที่เพิ่มขึ้น และค่าของเงินในอนาคตที่ลดลงตามอัตราเงินเฟ้อ

จากผลการทดสอบการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าอย่างเหมาะสม (ระดับสถานีไฟฟ้า) มีข้อสังเกตอย่างมีนัยสำคัญ คือ เนื่องจากระบบไฟฟ้าเป็นโครงสร้างพื้นฐานแห่งรัฐ ให้บริการไฟฟ้าจึง

จำเป็นที่ต้องลงทุน พัฒนา และปรับปรุงระบบไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ถึงแม้จะเป็นการลงทุนที่สูงและไม่มีผลตอบแทนกลับมามากนัก ดังนั้น การปรับปรุงระบบไฟฟ้าด้วยบำรุงรักษาอุปกรณ์จึงต้องคำนึงเงื่อนไขของความเชื่อถือได้เป็นสำคัญในอันดับแรก ทำให้การบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าเลือกที่จะบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่มีผลกระทบต่อการส่งกำลังไฟฟ้าก่อน ซึ่งก็คือ อุปกรณ์ในกลุ่มมินิมัลคัตเซตนั่นเอง แล้วจึงพิจารณาถึงความคุ้มค่าของการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในมินิมัลคัตเซตภายหลัง

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ตามแนวทางที่นำเสนอและการกำหนดแผนการบำรุงรักษาตามวงรอบ พบว่า แนวทางที่ได้นำเสนอสามารถปรับปรุงความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถบริหารจัดการการบำรุงรักษาให้ครอบคลุมตลอดช่วงปีที่พิจารณา ระดับความเชื่อถือได้ของแต่ละปี เป็นไปตามมาตราฐานคุณภาพบริการไฟฟ้าที่กำหนดไว้ และค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำที่สุด

กล่าวโดยสรุป วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอเครื่องมือในการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า โดยพิจารณาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า ด้วยการใช้ข้อมูลด้านขาเข้าประกอบด้วย อัตราเหตุการณ์ล้มเหลว ระยะเวลาการซ่อมแซม ระยะเวลาการสวิตช์ชิง ระยะเวลาการบำรุงรักษา ค่าใช้ในการบำรุงรักษาแบบต่างๆ และโครงสร้างการทำงานของอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า สำหรับผลลัพธ์ที่ได้คือ แผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนทางด้านความเชื่อถือได้ ดังภาพที่ 8.1



ภาพที่ 8.1 ภาพรวมเครื่องมือในการกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เหมาะที่สุด
โดยพิจารณาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า

8.2 ข้อเสนอแนะ

(1) แนวทางที่ได้นำเสนอพิจารณาเฉพาะการบำรุงรักษาอุปกรณ์ (ระดับอุปกรณ์) และการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า (ระดับสถานีไฟฟ้า) ยังไม่ครอบคลุมถึงการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในทุกสถานีไฟฟ้า (ระดับระบบไฟฟ้า) จึงควรพิจารณาแบบจำลองการบำรุงรักษาเพิ่มเติม ด้วยการคำนึงถึงหลักการ N-1 เพื่อความต่อเนื่องในการส่งกำลังไฟฟ้าในระหว่างมีการบำรุงรักษาอุปกรณ์

(2) วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พิจารณาการกำหนดแผนการบำรุงรักษาในระยะยาวเป็นรายปี ดังนั้นจึงควรพิจารณาเพิ่มเติม ในระหว่างปีที่ต้องบำรุงรักษาอุปกรณ์นั้น จะต้องมีการบำรุงรักษาช่วงเดือนใดด้วยการคำนึงถึงปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้ารายชั่วโมงเป็นหลัก

(3) วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ยังไม่ได้คำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการเตรียมอุปกรณ์สำรองระหว่างทำการบำรุงรักษา

(4) ผู้ให้บริการไฟฟ้าควรมีการเก็บข้อมูลการทำงานอุปกรณ์ในอดีตย้อนหลัง ทั้งข้อมูล อัตราเหตุการณ์ล้มเหลว ระยะเวลาการซ่อมแซม ระยะเวลาการสวิตช์ชิง ระยะเวลาการบำรุงรักษา ตลอดจนอัตราเหตุการณ์ล้มเหลวที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังจากการบำรุงรักษา เพื่อนำมาใช้ประกอบการกำหนดแผนการบำรุงรักษาให้เป็นไปอย่างแม่นยำและน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

[1] คณะทำงานจัดทำมาตรฐานการออกแบบสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบ Gas Insulation Substation (GIS), "มาตราฐานการออกแบบสถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบ Gas Insulation Substation (GIS)," ฝ่ายวิศวกรรมระบบส่ง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย2556.

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

[3] C. Suwanasri, T. Suwanasri, and S. Wattanawongpitak, "A new asset value estimation using zero profit method for renovation planning of high voltage equipment in power substation," *International Transactions on Electrical Energy Systems,* 2013.

[4] P. Dehghanian, M. Fotuhi-Firuzabad, F. Aminifar, and R. Billinton, "A Comprehensive Scheme for Reliability Centered Maintenance in Power Distribution Systems-2014;Part I: Methodology," *Power Delivery, IEEE Transactions on,* vol. 28, pp. 761-770, 2013.

[5] P. Dehghanian, M. Fotuhi-Firuzabad, F. Aminifar, and R. Billinton, "A Comprehensive Scheme for Reliability-Centered Maintenance in Power Distribution Systems-2014;Part II: Numerical Analysis," *Power Delivery, IEEE Transactions on,* vol. 28, pp. 771-778, 2013.

[6] G. Haifeng and S. Asgarpoor, "Reliability and Maintainability Improvement of Substations With Aging Infrastructure," *Power Delivery, IEEE Transactions on,* vol. 27, pp. 1868-1876, 2012.

[7] 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, pp. 654-665, 2011.

[8] M. Hinow and M. Mevissen, "Substation Maintenance Strategy Adaptation for Life-Cycle Cost Reduction Using Genetic Algorithm," *Power Delivery, IEEE Transactions on,* vol. 26, pp. 197-204, 2011.

[9] F. Camci, "System Maintenance Scheduling With Prognostics Information Using Genetic Algorithm," *Reliability, IEEE Transactions on,* vol. 58, pp. 539-552, 2009.

[10] P. Hilber, V. Miranda, M. Matos, and L. Bertling, "Multiobjective optimization applied to maintenance policy for electrical networks," in *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, pp. 1-1, 2008.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

[11] J. McCalley, Y. Jiang, V. Honavar, J. Pathak, M. Kezunovic, and J. Panida, "Automated Integration of Condition Monitering with an Optimized Maintenance Scheduler for Circuit Breaker and Power Transfomers," Power Systems Engineering Reseach Center, 2006.

[12] J. Jaturonnatee, D. N. P. Murthy, and R. Boondiskulchok, "Optimal preventive maintenance of leased equipment with corrective minimal repairs," *European Journal of Operational Research,* vol. 174, pp. 201-215, 2006.

[13] M. Marketz, J. Polster, and M. Muhr, "Maintenance Strategies for Distribution Networks," in *The XIVth International Sysmposium on High Voltage Engineering*, 2005.

[14] L. Bertling, R. Allan, and R. Eriksson, "A reliability-centered asset maintenance method for assessing the impact of maintenance in power distribution systems," *Power Systems, IEEE Transactions on,* vol. 20, pp. 75-82, 2005.

[15] Y.-T. Tsai, K.-S. Wang, and L.-C. Tsai, "A study of availability-centered preventive maintenance for multi-component systems," *Reliability Engineering & System Safety,* vol. 84, pp. 261-270, 2004.

[16] H. Wang and H. Pham, "Optimal Imperfect Maintenance Models," in *Handbook of Reliability Engineering*, H. Pham, Ed., ed: Springer London, 2003, pp. 397-414.

[17] M. Vega and H. G. Sarmiento, "Algorithm to Evaluate Substation Reliability With Cut and Path Sets," *Industry Applications, IEEE Transactions on,* vol. 44, pp. 1851-1858, 2008.

[18] R. Billinton and G. Lian, "Monte Carlo approach to substation reliability evaluation," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C,* vol. 140, pp. 147-152, 1993.

[19] R. N. Allan, R. Billinton, and M. F. De Oliveira, "An Efficient Algorithm for Deducing the Minimal Cuts and Reliability Indices of a General Network Configuration," *Reliability, IEEE Transactions on,* vol. R-25, pp. 226-233, 1976.

[20] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability Evaluation of Power Systems*. Great Britain: Pitman Publishing, 1984.

[21] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability Evaluation of Engineering systems: concepts and techniques*. Great Britain: Pitman Publishing, 1983.

[22] Mihai Andrusca, Maricel Adam, Daniel Florin Irimia, and A. Baraboi, "Electrical Equipment, Component of The Asset Mangement," *Buletinul AGIR,* 2012.

[23] วัฒนา เชียงตระกูล, เกรียงไกร ดำรงรัตน์, และ ดลดิษฐ์ เมืองแมน, *RELIABILITY BAESD MAINTENANCE MANAGEMENT* การจัดการงานบำรุงรักษาด้วย *Reliability*: บริษัท ซีเอ็ด ยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), 2553.

[24] K. Laskowski and M. Schwan, "Optimized Asset Management of High Voltage Substations Based on Life Cycle Cost Analysis Integraing Reliability Prognosis Method," *CIGRE, B3-104,* 2008.

[25] G. Balzer, K. Bakic, H.-J. Haubrich , C. Neumann , and C. Schorn "Selection of an Optimal Maintenance and Replacement Strategy of H.V. Equipment by a Risk Assessment Process," *CIGRE, B3-103,* 2006.

[26] D. Lin, M. J. Zuo, and R. C. M. Yam, "Sequential imperfect preventive maintenance models with two categories of failure modes," *Naval Research Logistics (NRL),* vol. 48, pp. 172-183, 2001.

[27] T. Nakagawa, "Sequential imperfect preventive maintenance policies," *Reliability, IEEE Transactions on,* vol. 37, pp. 295-298, 1988.

[28] D. Achermann, "Modelling, Simulation and optimization of Maintenance Strategies under Consideration of Logistic Process," Doctor of Technical Sciences, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2008.

[29] สัมประสิทธิ์ ประสพสุข, "การประเมินระบบไฟฟ้าบนพื้นฐานของดัชนีความเชื่อถือได้และอัตราค่าพลังงานไฟฟ้าดับ," วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2004.

[30] M. Rausand and A. Hoyland, *Failure Models in System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications*. New Jersey: John Wiley & Son, 2004.

[31] ไชยยศ มิตรเชื้อชาติ, "การประเมินความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าย่อยร่วมกับการพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์," วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.

[32] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, "โครงการศึกษาวิเคราะห์เพื่อหาอัตราความเสียหายและอัตราซ่อมแซมของอุปกรณ์ในระบบจ่ายไฟฟ้า. ," โครงการพัฒนาความชำนาญด้านไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร, 2549.

[33] อาทิตย์ ศรีแก้ว, ปัญญาเชิงคำนวณ. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี , 2009.

[34] K. F. Man, K. S. Tang, and S. Kwong, "Genetic algorithms: concepts and applications [in engineering design]," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on,* vol. 43, pp. 519-534, 1996.

[35] T. Suwanasri, H. May Thandar, and C. Suwanasri, "Failure Rate Analysis of Power Circuit Breaker in High Voltage Substation," presented at the GMSARN Int. Conf. on Green Growth in GMS: Energy, Enveronment and Social Issues, 2013.

[36] C. Suwanasri and T. Suwanasri, "Statistical method with efficient IT support for power transformer asset management," in *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2009. ECTI-CON 2009. 6th International Conference on*, pp. 88-91, 2009.

[37] ธนาคารแห่งประเทศไทย. (2557, 1 กรกฎาคม). รายงานนโยบายการเงิน. Available: http://www.bot.or.th/Thai/MonetaryPolicy/Inflation/Pages/index.aspx

[38] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, "โครงการศึกษาอัตราความเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับ (Outage Cost)," สำนักนโยบายและแผนพลังงาน, 2556.

[39] สำนักนโยบายและแผนพลังงาน, "แผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2555-2573 (ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 3) ", 2555.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย นวพล สุดเขต เกิดวันที่ 18 มิถุนายน พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดสิงห์บุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2556 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2556

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University