การประเมินความเชื่อถือได้ของการจัดอันดับเทียร์ สำหรับการออกแบบระบบไฟฟ้า

นายสุทธิพงษ์ รัตนาภากร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TIER CLASSIFICATION RELIABILITY ASSESSMENT FOR ELECTRICAL SYSTEM DESIGN

Mr.Suttipong Rattanapagron

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

520779

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินความเชื่อถือได้ของการจัดอันดับเทียร์สำหรับการออกแบบระบบไฟฟ้า
โดย	นายสุทธิพงษ์ รัตนาภากร
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสตถิพงศ์ พิชัยสวัสดิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสตถิพงศ์ พิชัยสวัสดิ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ประดิษฐ์ เพื่องฟู)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุทธิพงษ์ รัตนาภากร : การประเมินความเชื่อถือได้ของการจัดอันดับเทียร์สำหรับการออกแบบระบบไฟฟ้า. (Tier Classification Reliability Assessment for Electrical System Design) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.โสตถิพงศ์ พิชัยสวัสดิ์, 163 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการประเมินความเชื่อถือได้สำหรับการออกแบบระบบไฟฟ้าแรงต่ำโดยเน้นไปที่ระบบไฟฟ้าภายในอาคาร โดยพิจารณาภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ ซึ่งการจัดอันดับเทียร์ คือ เกณฑ์มาตรฐานที่ใช้ในการประเมินระบบการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่โหลดและเป็นมาตรฐานที่บอกให้รู้ว่าระบบการจ่ายพลังงานไฟฟ้าดังกล่าวนั้นมีประสิทธิภาพและมีความน่าเชื่อถือมากน้อยเพียงใด ซึ่งมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ระดับด้วยกัน ได้แก่ การจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1 (Tier 1), การจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 2 (Tier 2), การจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 (Tier 3) และการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 (Tier 4) โดยที่การจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับจะมีรูปแบบของโครงสร้างของระบบที่แตกต่างกัน ทำให้การจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับมีความน่าเชื่อถือที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบสามารถเลือกใช้ให้สอดคล้องกับระบบ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้วิธีการประเมินความเชื่อถือได้ด้วยวิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลแบบวิธีสุ่มช่วงเวลาการทำงานเข้ามาวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าดังกล่าว ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าสำหรับสถานที่สำคัญต่าง ๆ เช่น ธนาคาร โรงพยาบาล โรงงานอุตสาหกรรม หรือระบบไฟฟ้าภายในอาคารที่ต้องการความน่าเชื่อถือของระบบที่ดี โดยระบบที่ใช้ทดสอบ ได้แก่ ระบบไฟฟ้าของอาคารและโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความน่าเชื่อถือที่ดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต.....สุทธิพงษ์ รัตนาภากร.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา..2552.....

5070633121 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : MONTE CARLO SIMULATION / TIER CLASSIFICATION / RELIABILITY

SUTTIPONG RATTANAPAGRON : TIER CLASSIFICATION RELIABILITY ASSESSMENT FOR ELECTRICAL SYSTEM DESIGN.THESIS ADVISOR : ASST.PROF.SOTDHIPONG PHICHAISAWAT, Ph.D., 163 pp.

This thesis presents a reliable evaluation for a low voltage electrical system in a building based on Tier ranking. The Tier ranking is a standard criterion for the power system evaluation showing an efficiency and reliability. The Tier ranking is divided into 4 parts; Tier 1 to Tier 4. Each Tier ranking shows different structures of system patterns with different reliability. Engineers can choose a suitable one for the system. The thesis applied a reliability evaluation using Monte Carlo simulation with state duration sampling method. It can be used for the important buildings such as banks, hospitals, industrial factories or any other building electrical systems that need good reliability. The testing systems include the systems of the general important building and the industry building.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : .....Electrical Engineering..... Student's Signature: Suttipong Rattanapagron
Field of Study : ...Electrical Engineering.... Advisor's Signature: Sotdhipong Phichaisawat
Academic Year : .....2009.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสตถิพงศ์ พิชัยสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ โดยเป็นประโยชน์กับการนำเสนอหัวข้อวิจัยในครั้งนี้ รวมทั้งกรุณาตรวจสอบแก้วิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นย่างดี และขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล และ ดร.ประดิษฐ์ เฟื่องฟู ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไข และให้คำแนะนำเพิ่มเติมจนวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ พี่เกรียติชัย เสนา และ พี่สถาพร ลิมป์ปัทมปาณี ที่ให้คำแนะนำด้านเทคนิคจากประสบการณ์ในการทำงาน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยเป็นอย่างมาก ตลอดจนขอบคุณรุ่นพี่และรุ่นน้องในห้องปฏิบัติการทุกคนที่ให้กำลังใจและให้คำปรึกษา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่ชาย ที่ให้กำลังใจตลอดมาตลอดจนเพื่อนทุก ๆ คนที่เป็นส่วนในการผลักดันให้เกิดความสำเร็จ และลุล่วงไปด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ

กิตติกรรมประกาศ.....ฉ

สารบัญ.....ช

สารบัญตาราง.....ญ

สารบัญภาพ.....ฏ

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....1

1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....2

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....2

1.6 เนื้อหาวิทยานิพนธ์.....2

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการประเมินความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลัง.....4

2.1 แนวคิดพื้นฐานของการประเมินความเชื่อถือได้.....4

2.2 ข้อมูลสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง.....9

บทที่ 3 หลักการเบื้องต้นของการจัดอันดับเทียร์.....11

3.1 ที่มาและความสำคัญของการจัดอันดับเทียร์.....11

3.2 ประวัติของการจัดอันดับเทียร์.....12

3.3 คำจำกัดความของการจัดอันดับเทียร์.....12

3.4 มาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ.....13

3.4.1 มาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1 (Tier 1).....13

3.4.2 มาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 2 (Tier 2).....14

3.4.3 มาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 (Tier 3).....16

3.4.4 มาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 (Tier 4).....17

บทที่ 4 การวิเคราะห์อุปกรณ์ในระบบการจัดอันดับเทียร์.....19

4.1 ชนิดของอุปกรณ์ในระบบการจัดอันดับเทียร์.....19

4.2 การกระจายความน่าจะเป็นในการทำงานของอุปกรณ์.....21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์ 22
4.3.1 แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์แบบ 2 สถานะ (Two-state model) 22
4.3.2 แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์แบบ 3 สถานะ (Three-state model) 22
4.3.3 แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์แบบ 4 สถานะ (Four-state model) 23
4.4 การพิจารณาอุปกรณ์ในระบบการจัดอันดับเทียร์ที่มีเงื่อนไขพิเศษ 24
4.4.1 การพิจารณาเงื่อนไขพิเศษสำหรับยูพีเอส 24
4.4.2 การพิจารณาเงื่อนไขพิเศษสำหรับเอทีเอส 28
4.5 ลักษณะการล้มเหลวของอุปกรณ์ 33
บทที่ 5 หลักของการประเมินความเชื่อถือได้ 35
5.1 ประเภทของการประเมินความเชื่อถือได้ 35
5.2 การสุ่มช่วงเวลาการทำงาน (State duration sampling) 37
5.3 เกณฑ์การหยุดการคำนวณ (Stopping criteria) 40
บทที่ 6 การตรวจสอบความล้มเหลวของระบบ 42
6.1 การตรวจสอบความล้มเหลวของระบบ 42
6.2 อุปกรณ์ที่มีลักษณะการต่อแบบขนาน 44
บทที่ 7 ดัชนีสากลความมั่นคงของการจัดอันดับเทียร์ 47
7.1 ประเภทของดัชนีสากลความมั่นคงของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 47
7.2 ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด 49
7.3 ดัชนีความเชื่อถือได้ของผู้ใช้ไฟฟ้า 50
บทที่ 8 ตัวอย่างการประเมินความเชื่อถือได้ของการจัดอันดับเทียร์สำหรับการออกแบบระบบไฟฟ้า 55
8.1 การวิเคราะห์ผลจากการออกแบบระบบไฟฟ้า 57
8.1.1 ระบบทดสอบระบบที่ 1 57
8.1.2 ระบบทดสอบระบบที่ 2 63
8.1.3 ระบบทดสอบระบบที่ 3 69
8.1.4 ระบบทดสอบระบบที่ 4 80
8.1.5 เปรียบเทียบผลการทดสอบ 91
8.2 การวิเคราะห์ผลจากระบบไฟฟ้าที่ใช้งานจริง 101

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

8.2.1 ระบบทดสอบระบบที่ 5 101
8.2.2 ระบบทดสอบระบบที่ 6 110
บทที่ 9 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 118
9.1 สรุปผลการวิจัย 118
9.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาและพัฒนาต่อไป 119
รายการอ้างอิง 120
ภาคผนวก 121
ภาคผนวก ก 122
ภาคผนวก ข 123
ภาคผนวก ค 127
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 163

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 สรุปข้อกำหนดของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ 18
ตารางที่ 8.1 รายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบทดสอบระบบที่ 1 59
ตารางที่ 8.2 ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด ของระบบทดสอบระบบที่ 1 60
ตารางที่ 8.3 ดัชนีความเชื่อถือได้ของผู้ใช้ไฟฟ้า ของระบบทดสอบระบบที่ 1 61
ตารางที่ 8.4 รายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบทดสอบระบบที่ 2 65
ตารางที่ 8.5 ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด ของระบบทดสอบระบบที่ 2 66
ตารางที่ 8.6 ดัชนีความเชื่อถือได้ของผู้ใช้ไฟฟ้า ของระบบทดสอบระบบที่ 2 67
ตารางที่ 8.7 รายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบทดสอบระบบที่ 3 72
ตารางที่ 8.8 ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด ของระบบทดสอบระบบที่ 3 73
ตารางที่ 8.9 ดัชนีความเชื่อถือได้ของผู้ใช้ไฟฟ้า ของระบบทดสอบระบบที่ 3 74
ตารางที่ 8.10 รายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบทดสอบระบบที่ 3 76
ตารางที่ 8.11 ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด ของระบบทดสอบระบบที่ 3 78
ตารางที่ 8.12 ดัชนีความเชื่อถือได้ของผู้ใช้ไฟฟ้า ของระบบทดสอบระบบที่ 3 78
ตารางที่ 8.13 รายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบทดสอบระบบที่ 4 83
ตารางที่ 8.14 ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด ของระบบทดสอบระบบที่ 4 84
ตารางที่ 8.15 ดัชนีความเชื่อถือได้ของผู้ใช้ไฟฟ้า ของระบบทดสอบระบบที่ 4 85
ตารางที่ 8.16 รายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบทดสอบระบบที่ 4 87
ตารางที่ 8.17 ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด ของระบบทดสอบระบบที่ 4 89
ตารางที่ 8.18 ดัชนีความเชื่อถือได้ของผู้ใช้ไฟฟ้า ของระบบทดสอบระบบที่ 4 89
ตารางที่ 8.19 รายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบทดสอบระบบที่ 5 104
ตารางที่ 8.20 ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด ของระบบทดสอบระบบที่ 5 105
ตารางที่ 8.21 รายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบทดสอบระบบที่ 6 113
ตารางที่ 8.22 ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด ของระบบทดสอบระบบที่ 6 114

ตารางที่ ก.1 รายละเอียดของแต่ละจุดโหลดของระบบทดสอบระบบที่ 1 (เทียร์ระดับที่ 1) ระบบทดสอบระบบที่ 2 (เทียร์ระดับที่ 2) ระบบทดสอบระบบที่ 3 (เทียร์ระดับที่ 3) และระบบทดสอบระบบที่ 4 (เทียร์ระดับที่ 4) 122

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ข.1 ตารางแสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE Std 493™-2007. 123

ตารางที่ ค.1 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 1 127
ตารางที่ ค.2 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 2 130
ตารางที่ ค.3 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 3 133
ตารางที่ ค.4 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 4 137
ตารางที่ ค.5 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 5 141
ตารางที่ ค.6 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 6 154

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ประเภทของความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลัง 4
รูปที่ 2.2 การแบ่งระดับขั้นในการศึกษาความเชื่อถือได้....5
รูปที่ 2.3 แบบจำลองระบบสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ในระดับขั้นที่ 1....6
รูปที่ 2.4 แบบจำลองระบบสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ในระดับขั้นที่ 2....7
รูปที่ 2.5 แบบจำลองระบบสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ในระดับขั้นที่ 3....8
รูปที่ 2.6 การจัดประเภทข้อมูลสำหรับใช้ประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง....9
รูปที่ 3.1 โครงสร้างพื้นฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1....13
รูปที่ 3.2 โครงสร้างพื้นฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 2....14
รูปที่ 3.3 โครงสร้างพื้นฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3....16
รูปที่ 3.4 โครงสร้างพื้นฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4....17
รูปที่ 4.1 ช่วงเวลาการทำงานปกติของอุปกรณ์....21
รูปที่ 4.2 ช่วงเวลาการทำงานของอุปกรณ์เมื่อประมาณเป็นค่าเฉลี่ย....21
รูปที่ 4.3 แบบจำลอง 2 สถานะของอุปกรณ์....22
รูปที่ 4.4 แบบจำลอง 3 สถานะของอุปกรณ์....23
รูปที่ 4.5 แบบจำลอง 4 สถานะของอุปกรณ์....23
รูปที่ 4.6 ลักษณะการทำงานของยูพีเอส....24
รูปที่ 4.7 แบบจำลองการทำงานของยูพีเอสกรณี Back up time < TTR....25
รูปที่ 4.8 แบบจำลองการทำงานของยูพีเอสกรณี Back up time > TTR....26
รูปที่ 4.9 แบบจำลองการทำงานของยูพีเอสกรณี Back up time = TTR....27
รูปที่ 4.10 เอทีเอสที่มีลักษณะการทำงานแบบเดินหน้า....29
รูปที่ 4.11 เอทีเอสที่มีลักษณะการทำงานแบบย้อนกลับ....29
รูปที่ 4.12 แบบจำลองการทำงานของเอทีเอส....30
รูปที่ 4.13 เอทีเอสที่มีลักษณะการทำงานแบบเดินหน้า....30
รูปที่ 4.14 เอทีเอสที่มีลักษณะการทำงานแบบย้อนกลับ....31
รูปที่ 4.15 แบบจำลองการทำงานของเอทีเอส....31
รูปที่ 4.16 เอทีเอสที่มีลักษณะการทำงานแบบเดินหน้า....32
รูปที่ 4.17 เอทีเอสที่มีลักษณะการทำงานแบบย้อนกลับ....32

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.18 แบบจำลองการทำงานของเอทีเอส 33
รูปที่ 4.19 แผนผังการล้มเหลวแบบพาสสีฟและแบบแอคทีฟ 34
รูปที่ 5.1 วิธีการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง 36
รูปที่ 5.2 ระบบตัวอย่างสำหรับวิธีการสุ่มช่วงเวลาการทำงาน 38
รูปที่ 5.3 ช่วงเวลาการทำงานของระบบตัวอย่างที่สุ่มได้ 39
รูปที่ 5.4 ขั้นตอนการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลโดยวิธีการสุ่มช่วงเวลาการทำงาน 41
รูปที่ 6.1 ขั้นตอนการตรวจสอบความล้มเหลวของระบบ 43
รูปที่ 6.2 อุปกรณ์ต่อขนานกัน 2 ตัว 44
รูปที่ 6.3 อุปกรณ์ต่อขนานกัน 3 ตัว 45
รูปที่ 7.1 ดัชนีสากลความมั่นคงของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 48
รูปที่ 8.1 ขั้นตอนการประเมินความเชื่อถือได้สำหรับการออกแบบระบบไฟฟ้า 56
รูปที่ 8.2 แผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบระบบที่ 1 (Tier 1) 57
รูปที่ 8.3 แผนภาพแสดงหมายเลขของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 1 (Tier-1) 58
รูปที่ 8.4 การลู่เข้าของค่าต่าง ๆ ณ จุดโหลดที่ 1 (LP#1) 60
รูปที่ 8.5 การเปรียบเทียบอัตราการล้มเหลวของแต่ละจุดโหลด 61
รูปที่ 8.6 การเปรียบเทียบค่าความพร้อมมูลของแต่ละจุดโหลด 62
รูปที่ 8.7 การเปรียบเทียบระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในหนึ่งปีของแต่ละจุดโหลด 62
รูปที่ 8.8 แผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบระบบที่ 2 (Tier-2) 63
รูปที่ 8.9 แผนภาพแสดงหมายเลขของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 2 (Tier-2) 64
รูปที่ 8.10 การลู่เข้าของค่าต่าง ๆ ณ จุดโหลดที่ 1 (LP#1) 66
รูปที่ 8.11 การเปรียบเทียบอัตราการล้มเหลวของแต่ละจุดโหลด 67
รูปที่ 8.12 การเปรียบเทียบค่าความพร้อมมูลของแต่ละจุดโหลด 68
รูปที่ 8.13 การเปรียบเทียบระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในหนึ่งปีของแต่ละจุดโหลด 68
รูปที่ 8.14 แผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบระบบที่ 3 (Tier-3) 70
รูปที่ 8.15 แผนภาพแสดงหมายเลขของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 3 (Tier-3) 71
รูปที่ 8.16 การลู่เข้าของค่าต่าง ๆ ณ จุดโหลดที่ 1 (LP#1) 73
รูปที่ 8.17 การเปรียบเทียบอัตราการล้มเหลวของแต่ละจุดโหลด 74

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 8.18 การเปรียบเทียบค่าความพร้อมมูลของแต่ละจุดโหลด 75
รูปที่ 8.19 การเปรียบเทียบระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในหนึ่งปีของแต่ละจุดโหลด 75
รูปที่ 8.20 การลู่เข้าของค่าต่าง ๆ ณ จุดโหลดที่ 1 (LP#1) 77
รูปที่ 8.21 การเปรียบเทียบอัตราการล้มเหลวของแต่ละจุดโหลด 79
รูปที่ 8.22 การเปรียบเทียบค่าความพร้อมมูลของแต่ละจุดโหลด 79
รูปที่ 8.23 การเปรียบเทียบระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในหนึ่งปีของแต่ละจุดโหลด 80
รูปที่ 8.24 แผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบระบบที่ 4 (Tier-4) 81
รูปที่ 8.25 แผนภาพแสดงหมายเลขของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 4 (Tier-4) 82
รูปที่ 8.26 การลู่เข้าของค่าต่าง ๆ ณ จุดโหลดที่ 1 (LP#1) 84
รูปที่ 8.27 การเปรียบเทียบอัตราการล้มเหลวของแต่ละจุดโหลด 85
รูปที่ 8.28 การเปรียบเทียบค่าความพร้อมมูลของแต่ละจุดโหลด 86
รูปที่ 8.29 การเปรียบเทียบระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในหนึ่งปีของแต่ละจุดโหลด 86
รูปที่ 8.30 การลู่เข้าของค่าต่าง ๆ ณ จุดโหลดที่ 1 (LP#1) 88
รูปที่ 8.31 การเปรียบเทียบอัตราการล้มเหลวของแต่ละจุดโหลด 90
รูปที่ 8.32 การเปรียบเทียบค่าความพร้อมมูลของแต่ละจุดโหลด 90
รูปที่ 8.33 การเปรียบเทียบระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในหนึ่งปีของแต่ละจุดโหลด 91
รูปที่ 8.34 การเปรียบเทียบอัตราการล้มเหลวของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ 92
รูปที่ 8.35 การเปรียบเทียบค่าความพร้อมมูลของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ 92
รูปที่ 8.36 การเปรียบเทียบช่วงระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในหนึ่งปี 93
รูปที่ 8.37 การเปรียบเทียบ SAIFI ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ 94
รูปที่ 8.38 การเปรียบเทียบ SAIDI ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ 94
รูปที่ 8.39 การเปรียบเทียบ CAIFI ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ 95
รูปที่ 8.40 การเปรียบเทียบ CAIDI ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ 95
รูปที่ 8.41 การเปรียบเทียบ ENS ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ 96
รูปที่ 8.42 การเปรียบเทียบอัตราการล้มเหลวของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ 97
รูปที่ 8.43 การเปรียบเทียบค่าความพร้อมมูลของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ 97

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 8.44 การเปรียบเทียบช่วงระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในหนึ่งปี....98
รูปที่ 8.45 การเปรียบเทียบ SAIFI ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ....99
รูปที่ 8.46 การเปรียบเทียบ SAIDI ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ....99
รูปที่ 8.47 การเปรียบเทียบ CAIFI ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ....100
รูปที่ 8.48 การเปรียบเทียบ CAIDI ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ....100
รูปที่ 8.49 การเปรียบเทียบ ENS ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ....101
รูปที่ 8.50 แผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบระบบที่ 5....102
รูปที่ 8.51 แผนภาพแสดงหมายเลขของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 5....103
รูปที่ 8.52 การลู่เข้าของค่าต่าง ๆ ณ จุดโหลดที่ 1 (LP#1)....105
รูปที่ 8.53 การเปรียบเทียบอัตราการล้มเหลวของแต่ละจุดโหลด....108
รูปที่ 8.54 การเปรียบเทียบค่าความพร้อมมูลของแต่ละจุดโหลด....109
รูปที่ 8.55 การเปรียบเทียบระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในหนึ่งปีของแต่ละจุดโหลด....110
รูปที่ 8.56 แผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบระบบที่ 6....111
รูปที่ 8.57 แผนภาพแสดงหมายเลขของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 6....112
รูปที่ 8.58 การลู่เข้าของค่าต่าง ๆ ณ จุดโหลดที่ 1 (LP#1)....114
รูปที่ 8.59 การเปรียบเทียบอัตราการล้มเหลวของแต่ละจุดโหลด....116
รูปที่ 8.60 การเปรียบเทียบค่าความพร้อมมูลของแต่ละจุดโหลด....116
รูปที่ 8.61 การเปรียบเทียบระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในหนึ่งปีของแต่ละจุดโหลด....117

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น ดังนั้นการขาดพลังงานไฟฟ้าแม้เพียงชั่วขณะอาจมีผลต่อกิจกรรมต่าง ๆ ที่กำลังดำเนินอยู่ จากสาเหตุดังกล่าวทำให้การไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นการไฟฟ้าฝ่ายผลิต การไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจึงจำเป็นต้องจัดหาพลังงานไฟฟ้าให้แก่ลูกค้าหรือผู้ใช้ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง มีประสิทธิภาพและความชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

โดยปกติแล้วจะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังจะพิจารณาอยู่ 3 ระดับขั้น ได้แก่ ระดับขั้นที่ 1 เป็นการพิจารณาระบบผลิตไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ระดับขั้นที่ 2 เป็นการพิจารณารวมระหว่างระบบผลิตไฟฟ้าและระบบส่งไฟฟ้าเข้าด้วยกัน และระดับขั้นที่ 3 เป็นการพิจารณารวมทั้งระบบผลิตไฟฟ้า ระบบส่งไฟฟ้าและระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าด้วยกัน

แต่ในความเป็นจริงแล้วการพิจารณาความเชื่อถือได้ทั้ง 3 ระดับขั้นดังกล่าวอยู่ในส่วนรับผิดชอบของการไฟฟ้าทั้งสิ้น ดังนั้นถ้าหากพิจารณาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าก็ควรพิจารณาในส่วนของการออกแบบระบบไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้ารายนั้น ๆ ด้วย โดยพิจารณาในกรณีที่เป็นสถานที่สำคัญต่าง ๆ เช่น โรงงานอุตสาหกรรม โรงพยาบาล ธนาคาร และสถานที่สำคัญทางราชการต่าง ๆ เป็นต้น

จากสาเหตุดังกล่าวจึงเกิดแนวความคิดที่ว่า ถ้าหากต้องการที่จะพิจารณาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าในสถานที่ดังกล่าว โดยพิจารณาภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ ก็จะทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้ารายนั้น ๆ เกิดความมั่นใจในการใช้พลังงานไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น และยังสามารถที่จะทำการตรวจสอบค่าดัชนีต่าง ๆ ที่ต้องการทราบจากผู้ใช้ไฟฟ้ารายนั้น ๆ ได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์
2. เพื่อศึกษาและนำทฤษฎีของการจัดอันดับเทียร์ มาประกอบกับการออกแบบระบบไฟฟ้าในอาคาร เพื่อให้ระบบไฟฟ้าในอาคารมีความน่าเชื่อถือที่ดี
3. ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมเพื่อประเมินดัชนีความเชื่อถือได้ของการจัดอันดับเทียร์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์เท่านั้น
2. ศึกษาเฉพาะในสภาวะอยู่ตัวเท่านั้น (Steady-state Condition)
3. พิจารณาการกระจายความน่าจะเป็นของข้อมูลแบบเอ็กโพเนนเชียล (Exponential)
4. ใช้แบบจำลองสองสถานะ (Two-state model) พิจารณาจำลองสภาวะการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาหลักการเบื้องต้นของการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า
2. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการจัดอันดับเทียร์
3. รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับระบบที่จะนำมาใช้ทดสอบ
4. ศึกษาการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์
5. ทำการออกแบบ ปรับปรุง และพัฒนาโปรแกรม
6. วิเคราะห์และทำการทดสอบระบบเบื้องต้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถประเมินดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบการจัดอันดับเทียร์สำหรับการออกแบบระบบไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม
2. สามารถทำการประเมินความเชื่อถือได้ของสถานที่สำคัญต่าง ๆ หรือสถานที่ ที่ต้องการความมั่นคงของระบบไฟฟ้าที่ดี เช่น ธนาคาร โรงพยาบาล โรงงานอุตสาหกรรม หรือสถานที่สำคัญทางราชการ เป็นต้น ได้อย่างเหมาะสม

1.6 เนื้อหาวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบทเป็นดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขั้นตอน วิธีการดำเนินงานและขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึง ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบฟ้ากำลัง ได้แก่ แนวคิดพื้นฐาน ข้อมูลที่ใช้ในการประเมินความเชื่อถือได้ ประเภทของการขัดข้องของอุปกรณ์ในระบบ แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์ในระบบ

บทที่ 3 กล่าวถึง ทฤษฎีพื้นฐานของเทียร์และนำมาประยุกต์เข้ากับการออกแบบระบบไฟฟ้า และทำการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้านั้น ๆ

บทที่ 4 กล่าวถึง อุปกรณ์ในการออกแบบระบบไฟฟ้า สภาวะการทำงานและการล้มเหลวของอุปกรณ์ และแบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์

บทที่ 5 กล่าวถึง วิธีการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งประกอบด้วยวิธีการวิเคราะห์ และวิธีการจำลองเหตุการณ์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้วิธีการประเมินความเชื่อถือได้ด้วยวิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล โดยใช้วิธีการสุ่มช่วงเวลาการทำงาน

บทที่ 6 กล่าวถึง วิธีการตรวจสอบความล้มเหลวของระบบ ซึ่งจะทำให้ทราบว่าถ้าหากอุปกรณ์ในระบบเกิดการล้มเหลวขึ้นแล้วจะส่งผลกระทบต่อจุดโหลดที่สนใจอย่างไร

บทที่ 7 กล่าวถึง ดัชนีความมั่นคงของการออกแบบระบบไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ.จุดโหลด และดัชนีความเชื่อถือได้ที่อ้างอิงอุปกรณ์ไฟฟ้า

บทที่ 8 กล่าวถึง ตัวอย่างการประเมินความเชื่อถือได้ของการจัดอันดับเทียร์สำหรับการออกแบบระบบไฟฟ้า ผลการทดสอบที่ได้จากการใช้วิธีการที่นำเสนอ โดยทดสอบกับระบบไฟฟ้าของโรงงาน และทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้

บทที่ 9 กล่าวถึง บทสรุป ประโยชน์ที่ได้ ของวิธีการนำเสนอสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พร้อมทั้งข้อเสนอแนะเพิ่มเติมต่าง ๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

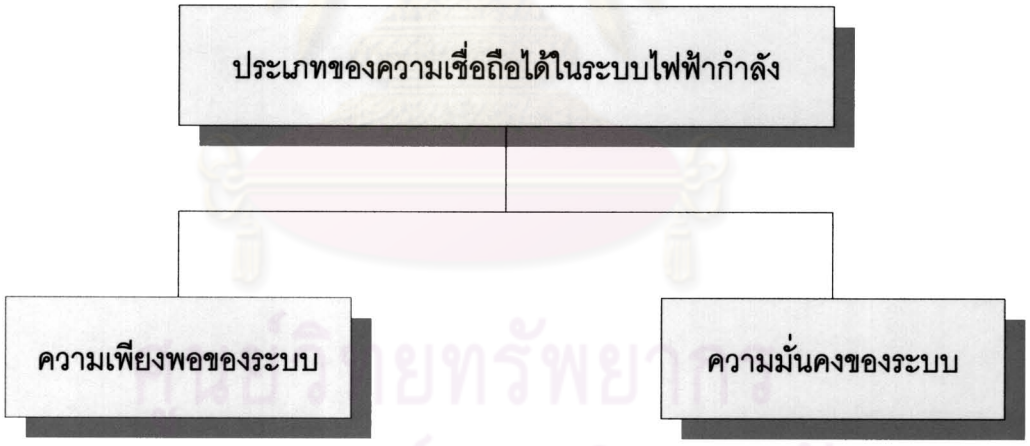
บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการประเมินความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการประเมินความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งประกอบด้วยหัวข้อหลัก ๆ ได้แก่ พื้นฐานของการประเมินความเชื่อถือได้ ข้อมูลสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง ประเภทของการขัดข้องของอุปกรณ์ในระบบ และข้อมูลสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลัง

2.1 แนวคิดพื้นฐานของการประเมินความเชื่อถือได้ [1,2,3]

ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ความพอเพียงของระบบ (System adequacy) และความมั่นคงของระบบ (System security) แสดงได้ดังรูปที่ 2.1



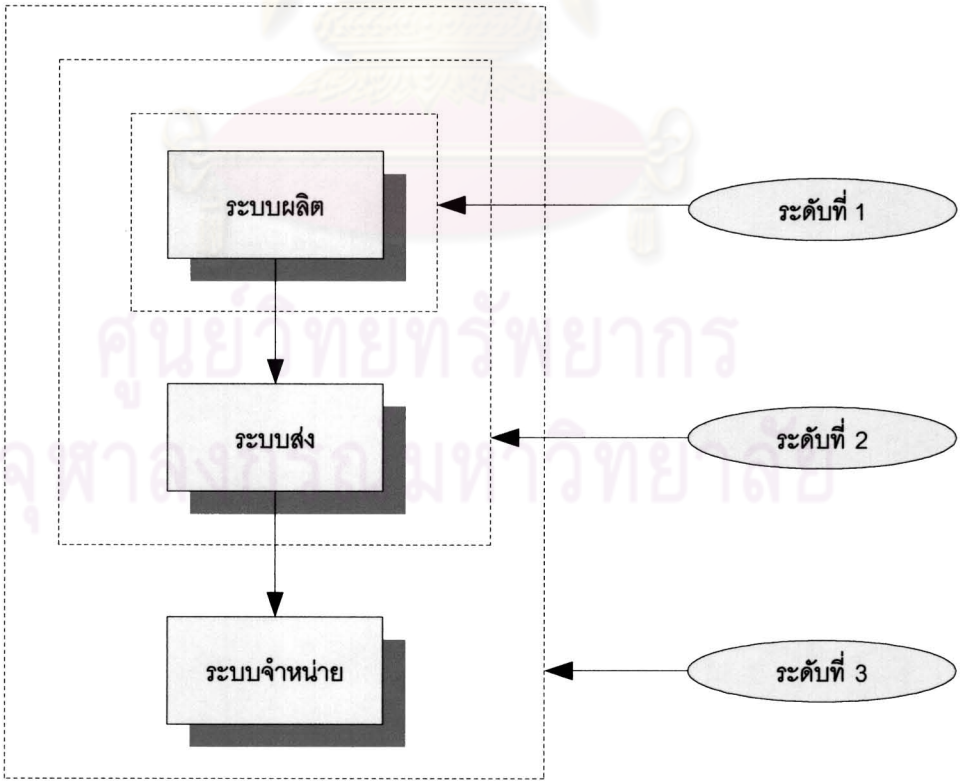
รูปที่ 2.1 ประเภทของความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลัง

ความพอเพียงของระบบ (System adequacy) หมายถึง ความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลังที่จะสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างเพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าของโหลด โดยที่อุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังยังคงทำงานภายในพิกัดและมีระดับแรงดันอยู่ในช่วงที่กำหนด ในการศึกษาเพื่อประเมินความเชื่อถือได้ที่เกี่ยวกับความพอเพียงของระบบ จะเป็นการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะอยู่ตัว (Steady-state condition) เพื่อทำการตรวจสอบปัญหาที่อาจจะ

เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้แบบจำลองระบบในสภาวะอยู่ตัว (Steady-state network model) เช่น การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Load flow analysis) สำหรับปัญหาที่จะทำการตรวจสอบ ได้แก่ การมีกำลังผลิตไม่เพียงพอ (Insufficient generation) อุปกรณ์ในระบบส่งรับโหลดเกินพิกัด (Line overload) หรือปัญหาเกี่ยวกับระดับแรงดันที่บัสไม่อยู่ในช่วงที่กำหนด (Voltage violation) เป็นต้น

ความมั่นคงของระบบ (System security) หมายถึง ความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลังที่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดซึ่งเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้ากำลังได้ เช่น เกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง หรือมีอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังเกิดขัดข้องขึ้นทันทีทันใดโดยไม่ทราบล่วงหน้า เป็นต้น การศึกษาความเชื่อถือได้ในด้านความมั่นคงของระบบจะทำการวิเคราะห์ในสภาวะพลวัต (Dynamic condition) โดยใช้แบบจำลองพลวัต (Dynamic model) เพื่อที่จะตรวจสอบปัญหาที่อาจเกิดขึ้น โดยที่ปัญหาที่อาจเกิดขึ้น ได้แก่ ความไม่มีเสถียรภาพ (Instability) การเกิดโหลดเกินแบบต่อเนื่อง (Overload cascading) เป็นต้น

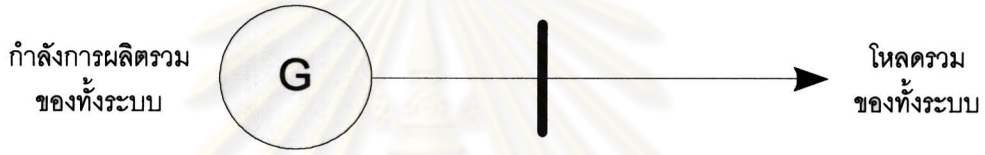
โดยทั่วไปเราสามารถจำแนกหน้าที่การทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ ระบบผลิต ระบบส่ง และระบบจำหน่าย ดังนั้นการศึกษาความเชื่อถือได้จึงสามารถแบ่งระดับขั้นในการศึกษาได้ 3 ระดับเช่นกัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การแบ่งระดับขั้นในการศึกษาความเชื่อถือได้

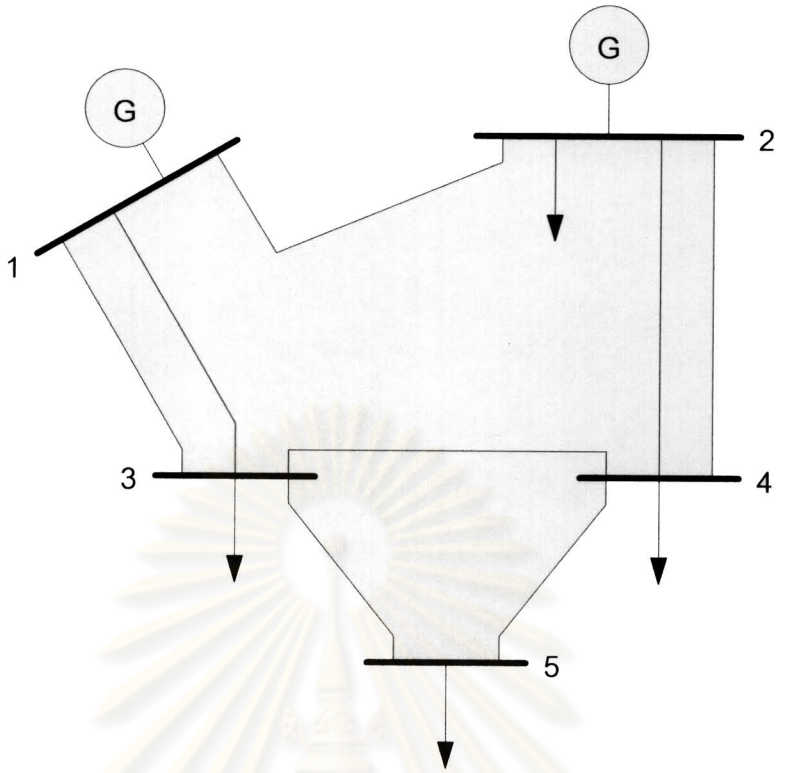
จากรูปที่ 2 จะเห็นว่าการการศึกษาความเชื่อถือได้ในระดับที่ 1 นั้นจะศึกษาเฉพาะระบบผลิตและระดับที่ 2 เป็นการศึกษาระบบผลิตและระบบส่งรวมเข้าด้วยกัน ส่วนระดับที่ 3 จะศึกษารวมทั้งระบบผลิต ระบบส่งและระบบจำหน่ายรวมเข้าด้วยกันทั้งหมด

ระดับที่ 1 (Hierarchical level one : HL 1) เป็นการพิจารณาเฉพาะระบบผลิตไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว โดยเป็นการศึกษาถึงความสามารถของระบบผลิตไฟฟ้าที่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้อย่างเพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า ซึ่งเป็นการหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบอันเป็นผลเนื่องจากสถานะ การเกิดเหตุการณ์ขัดข้องในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว และแบบจำลองความต้องการไฟฟ้า ดังนั้น เราจึงสามารถทำการจำลองระบบสำหรับประเมินความเชื่อถือได้ในระดับชั้นที่ 1 แสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แบบจำลองระบบสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ในระดับชั้นที่ 1

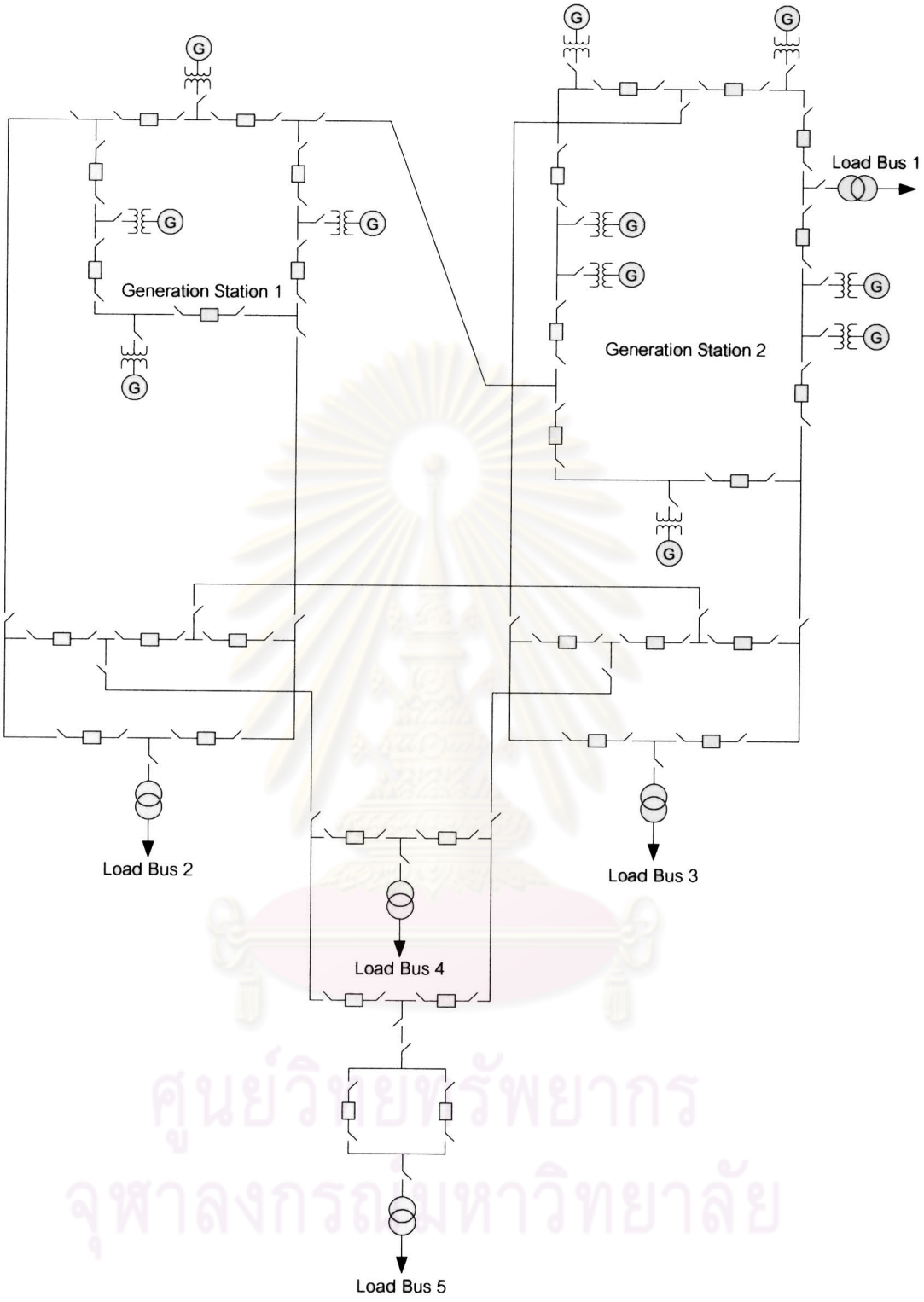
ระดับที่ 2 (Hierarchical level two : HL 2) เป็นการพิจารณารวมระบบผลิตไฟฟ้าและระบบส่งไฟฟ้าเข้าด้วยกัน โดยจะเรียกว่าระบบไฟฟ้าผสม (Composite system) หรือระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ (Bulk power system) ซึ่งจะรวมผลของแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระดับชั้นที่ 1 เข้ากับแบบจำลองระบบส่ง และรวมถึงหม้อแปลงไฟฟ้าตลอดจนอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบ จากนั้นใช้เทคนิคการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ระบบสามารถจ่ายให้กับโหลดบัสต่าง ๆ ในแต่ละสถานะ การเกิดเหตุขัดข้อง โดยปัญหาหลักที่เราจะพิจารณาในส่วนนี้จะประกอบด้วย ปัญหากำลังการผลิตในสถานะ การเกิดเหตุขัดข้องนั้นไม่เพียงพอที่จะจ่ายให้กับโหลดบัสต่าง ๆ ในระบบ ปัญหาสายส่งรับกำลังเกิน และปัญหาระดับแรงดันในระบบ โดยหากระบบไฟฟ้ากำลังเกิดปัญหาดังกล่าวขึ้น วิธีการจัดสรรกำลังการผลิตและการตัดโหลด (Generation rescheduling and load shedding) จะถูกนำมาใช้แก้ไขปัญหา ตัวอย่างของระบบที่ใช้ในการประเมินความเชื่อถือได้ในระดับชั้นที่ 2 แสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แบบจำลองระบบสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ในระดับชั้นที่ 2

ระดับที่ 3 (Hierarchical level three : HL 3) เป็นการพิจารณารวมระบบผลิตไฟฟ้า ระบบส่งไฟฟ้า และระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั้งหมดเข้าด้วยกัน ซึ่งหากวิเคราะห์โดยละเอียดจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนมาก ดังนั้น ในทางปฏิบัติเราจึงทำการวิเคราะห์ในส่วนของระบบจำหน่าย แต่จะนำผลของดัชนีความเชื่อถือได้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบ จากการคำนวณในระดับ HL 2 มาใช้วิเคราะห์ร่วมด้วย ตัวอย่างของระบบที่ใช้ในการประเมินความเชื่อถือได้ในระดับชั้นที่ 3 แสดงได้ดังรูปที่ 2.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



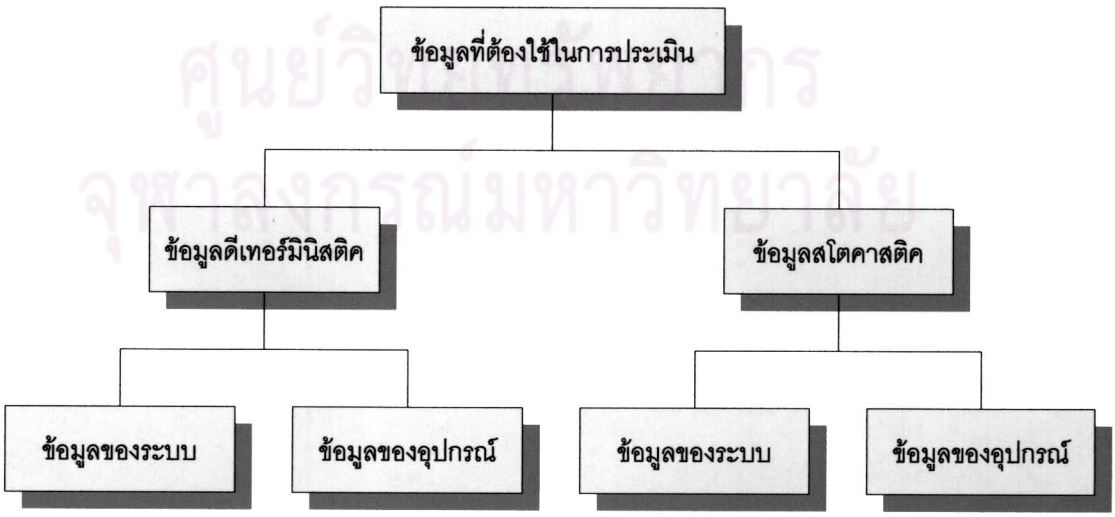
รูปที่ 2.5 แบบจำลองระบบสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ในระดับชั้นที่ 3

สำหรับการพิจารณาระดับความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้นจะพิจารณา 2 ประเภท คือ การคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด ได้แก่ อัตราการล้มเหลวเฉลี่ย (Average

failure rate : λ), เวลาที่เกิดไฟฟ้าดับเฉลี่ย (Average outage time : r) และระยะเวลาเฉลี่ยที่เกิดไฟฟ้าดับในหนึ่งปี (Average annual outage time : U) ส่วนอีกประเภทหนึ่ง คือ การคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ของผู้ใช้ไฟฟ้า เช่น ดัชนีแสดงความถี่ของการเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับของระบบโดยเฉลี่ย (System average interruption frequency index : SAIFI), ดัชนีแสดงช่วงเวลาของการเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับของระบบโดยเฉลี่ย (System average interruption duration index : SAIDI), ดัชนีแสดงความถี่ของการเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับที่ผู้ใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ย (Customer average interruption frequency index : CAIFI), ดัชนีแสดงช่วงเวลาการเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับที่ผู้ใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ย (Customer average interruption duration index : CAIDI) [3] เป็นต้น

2.2 ข้อมูลสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง [1,2]

การประเมินหรือการวิเคราะห์พฤติกรรมความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า โดยอาศัยข้อมูลทางสถิติการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบเริ่มแพร่หลายตั้งแต่ช่วงทศวรรษ 1930 เป็นต้นมา เหตุผลที่การประเมินความเชื่อถือได้ไม่เป็นที่แพร่หลายในช่วงก่อนเวลาดังกล่าวก็คือ การขาดแคลนข้อมูล เหตุผลในด้านข้อจำกัดของเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งยังไม่มีประสิทธิภาพสูงพอ และขาดเทคนิควิธีการประเมินค่าความเชื่อถือได้ที่เหมาะสม แต่ในปัจจุบันข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการประเมินความเชื่อถือได้นั้นได้รับการจัดเก็บข้อมูลอย่างเป็นระบบมากขึ้น และเทคโนโลยีเกี่ยวกับคอมพิวเตอร์ก็มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว เทคนิควิธีการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังจึงถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง สำหรับข้อมูลที่ต้องการใช้ในการประเมินดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การจัดประเภทข้อมูลสำหรับใช้ประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง

การจัดประเภทข้อมูลสำหรับใช้ประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. **ข้อมูลดีเทอร์มินิสติค** (Deterministic data) [1,2]

ข้อมูลดีเทอร์มินิสติค (Deterministic data) **คือ ข้อมูลที่ประกอบด้วยข้อมูลของอุปกรณ์** (Component data) **และข้อมูลของระบบ** (System data) **ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้**

ข้อมูลของอุปกรณ์ (Component data) **เป็นข้อมูลที่สอดคล้องกับคุณสมบัติเฉพาะของอุปกรณ์แต่ละชนิด เช่น ค่าอิมพีแดนซ์** (Impedance) **ค่าความนำไฟฟ้า** (Susceptance) **ของสายส่ง ขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตลอดจนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งค่าที่กล่าวมาข้างต้นเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้อยู่ทั่วไปแล้วในการคำนวณทางวิศวกรรม**

ข้อมูลของระบบ (System data) **เป็นข้อมูลที่ใช้อธิบายผลตอบสนองของระบบและวิธีการแก้ไข** (Remedial action) **ภายใต้ภาวการณ์เกิดเหตุขัดข้อง ตัวอย่างเช่น มีสายส่ง 2 สายส่งเดินขนานกันหากมีเส้นใดเส้นหนึ่งเกิดเหตุขัดข้องขึ้นแล้ว จะมีวิธีการจัดการกับการรับโหลดของสายส่งที่เหลืออย่างไร อาจจะตัดสายส่งเส้นนั้นออกจากระบบไปหรือว่าปล่อยให้ทำงานต่อไปในภาวะโหลดเกินหรือว่ามีวิธีการแก้ไขอื่น ๆ ที่จะจัดการเพื่อรักษาการทำงานของระบบโดยรวมให้สามารถทำงานต่อไปได้ ข้อมูลเหล่านี้จึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับการศึกษาเรื่องความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้ากำลังในระดับชั้นที่ 2**

2. **ข้อมูลสโตคาสติค** (Stochastic data) [1,2]

ข้อมูลสโตคาสติค (Stochastic data) **ข้อมูลประเภทนี้เป็นข้อมูลของตัวแปรสุ่ม** (Random variable) **ซึ่งจะใช้ในการจำลองพฤติกรรมหรือความน่าจะเป็นของอุปกรณ์สำหรับสถานการณ์การทำงานที่แตกต่างกัน โดยมีค่าที่ไม่แน่นอน ซึ่งจะประกอบด้วยข้อมูลของอุปกรณ์** (Component data) **และข้อมูลของระบบ** (System data) **เช่นเดียวกัน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้**

ข้อมูลของอุปกรณ์ (Component data) **ได้แก่ ค่าพารามิเตอร์เกี่ยวกับโอกาสที่อาจจะเกิดการขัดข้อง** (Failure parameter) **ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการซ่อมแซมอุปกรณ์** (Repair parameter) **เป็นต้น**

ข้อมูลของระบบ (System data) **ได้แก่ ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกรณีการเกิดเหตุขัดข้องของอุปกรณ์ภายในระบบตั้งแต่ 2 อุปกรณ์ขึ้นไป ตัวอย่างเช่น ผลของการเกิดการขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกัน** (Common mode outage)

บทที่ 3

หลักการเบื้องต้นของการจัดอันดับเทียร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและหลักการเบื้องต้นของการจัดอันดับเทียร์ ซึ่งจะประกอบไปด้วยหัวข้อหลัก ๆ ได้แก่ ที่มาและความสำคัญของการจัดอันดับเทียร์ ประวัติของการจัดอันดับเทียร์ คำจำกัดความของการจัดอันดับเทียร์ และมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ เพื่อให้เกิดความเข้าใจในหลักการของการจัดอันดับเทียร์

3.1 ที่มาและความสำคัญของการจัดอันดับเทียร์ [4]

เทียร์ (Tier) คือ เกณฑ์มาตรฐานที่ใช้ในการประเมินระบบการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่โหลด โดยเป็นมาตรฐานที่บอกให้รู้ว่าระบบไฟฟ้าสำหรับสถานที่ดังกล่าวนั้นมีประสิทธิภาพและมีความน่าเชื่อถือมากน้อยเพียงใด

การจัดอันดับเทียร์ (Tier classification) คือ การจัดแบ่งระดับเกณฑ์มาตรฐานของระบบการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่โหลด โดยตามมาตรฐานสามารถแบ่งการจัดอันดับเทียร์ออกได้เป็น 4 ระดับด้วยกัน คือ การจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1 (Tier 1), การจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 2 (Tier 2), การจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 (Tier 3) และการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 (Tier 4) โดยการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับนั้นอาจจะพิจารณาจากค่าความพร้อมมูล ประสิทธิภาพ และความน่าเชื่อถือ เป็นต้น ทำให้โครงสร้างพื้นฐานของระบบการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับมีความแตกต่างกัน โดยผู้ออกแบบสามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสม เช่น อาจพิจารณาจากความสำคัญของโหลดหรืออาจพิจารณาจากพฤติกรรมการใช้งานของโหลด เป็นต้น

สถาบันอัพไทม์ (Uptime Institute) คือ สถาบันที่เป็นผู้จัดตั้งกฎเกณฑ์และมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ (Tier classification standard) ขึ้น เพื่อเป็นมาตรฐานที่ใช้สำหรับการกำหนดลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของการออกแบบระบบการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้มีค่าความน่าเชื่อถือที่ต้องการ และยังสามารถนำไปใช้พัฒนาประสิทธิภาพของ ระบบสารสนเทศและระบบศูนย์กลางข้อมูลขององค์กรต่าง ๆ โดยโหลดที่จะทำการพิจารณาเป็นหลัก ได้แก่ คอมพิวเตอร์ (Computer) เป็นต้น โดยมาตรฐานดังกล่าวนี้ได้ถูกนำมาใช้ครั้งแรกตั้งแต่ปี 1965 และได้รับการยอมรับกันอย่างแพร่หลายจากอุตสาหกรรมโดยทั่วไป และองค์กรหรือบริษัทต่าง ๆ ที่ส่วนมากจะใช้อุปกรณ์ที่มีความอ่อนไหว (Sensitive equipment) เช่น คอมพิวเตอร์ในการทำงานเป็นหลัก

3.2 ประวัติของการจัดอันดับเทียร์ [4]

สถาบันอัพไทม์ (Uptime Institute) ได้กำหนดการจัดอันดับของเทียร์ออกเป็น 4 ระดับด้วยกัน โดยแบ่งตามค่าความพร้อมมูลของโครงสร้างพื้นฐาน โดยที่การจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1 (Tier 1) ปรากฏครั้งแรกในช่วงต้นปี 1965 โดยมีค่าความพร้อมมูลของจุดโหลดหลักต้องไม่ต่ำกว่า 99.67% การจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 2 (Tier 2) ปรากฏครั้งแรกในช่วงต้นปี 1970 โดยมีค่าความพร้อมมูลของจุดโหลดหลักต้องไม่ต่ำกว่า 99.75% ต่อมาได้มีการพัฒนาแนวความคิดที่จะสร้างระบบที่มีการกระจายพลังงานไฟฟ้าและมีค่าความพร้อมมูลของโครงสร้างพื้นฐานที่ดีขึ้น ดังนั้น จึงได้เกิดการจัดตั้งระบบการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 (Tier 3) และระบบการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 (Tier 4) ขึ้นในปี 1985 และ 1995 ตามลำดับ

ระบบการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 (Tier 3) และระบบการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 (Tier 4) นั้นต้องการแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่เป็นอิสระต่อกันอย่างน้อย 2 ระบบ ทำให้ระบบทั้งสองมีค่าความพร้อมมูลของจุดโหลดหลักที่ดีขึ้น ทำให้ระบบมีความเชื่อถือได้ที่ดีขึ้น โดยต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 99.98% และ 99.99% ตามลำดับ

3.3 คำจำกัดความของการจัดอันดับเทียร์ [4]

- อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ เป็นคำกว้าง ๆ ซึ่งรวมถึงอุปกรณ์ทางด้านเทคโนโลยีสารสนเทศทั้งหมดรวมถึงเซอร์เวอร์ เครือข่าย และส่วนประกอบในเทคโนโลยีสารสนเทศอื่น ๆ
- ความสามารถที่ทดแทนกันได้ของอุปกรณ์ คือ ส่วนประกอบต่าง ๆ ที่นอกเหนือจากส่วนประกอบหลักของโครงสร้างพื้นฐาน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถทำงานทดแทนกันได้ในกรณีที่อุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งเกิดเหตุขัดข้องหรือเกิดการล้มเหลวขึ้นโดยไม่ทำให้ระบบเกิดการล้มเหลว หรืออาจกล่าวได้ว่า การมีอุปกรณ์สำรองนั่นเอง ซึ่งสัญลักษณ์ที่ใช้แทนความสามารถที่ทดแทนกันได้ของอุปกรณ์มีดังนี้ N+1 หมายถึง การมีอุปกรณ์สำรองจำนวน 1 อุปกรณ์ และสัญลักษณ์ N+2 หมายถึง การมีอุปกรณ์สำรองจำนวน 2 อุปกรณ์ เป็นต้น
- ความสามารถในการใช้งานได้ คือ ค่าความสามารถของอุปกรณ์ตัวหนึ่ง ๆ ที่สามารถทำงานได้โดยไม่เกิดเหตุขัดข้องหรือเกิดการล้มเหลวขึ้น โดยสาเหตุของการล้มเหลวของอุปกรณ์อาจเกิดจากหลายประการ เช่น ความผิดพลาดจากการติดตั้งอุปกรณ์ หรือการใช้งานอุปกรณ์เป็นระยะเวลานานเกินไปโดยไม่มีการซ่อมบำรุง เป็นต้น
- การทนต่อความผิดพลาด คือ ระบบที่ยังคงสามารถทำงานในกรณีที่เกิดเหตุขัดข้องหรือความผิดพร่องขึ้นกับอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งโดยไม่คาดคิด หรืออาจกล่าวได้ว่าอุปกรณ์

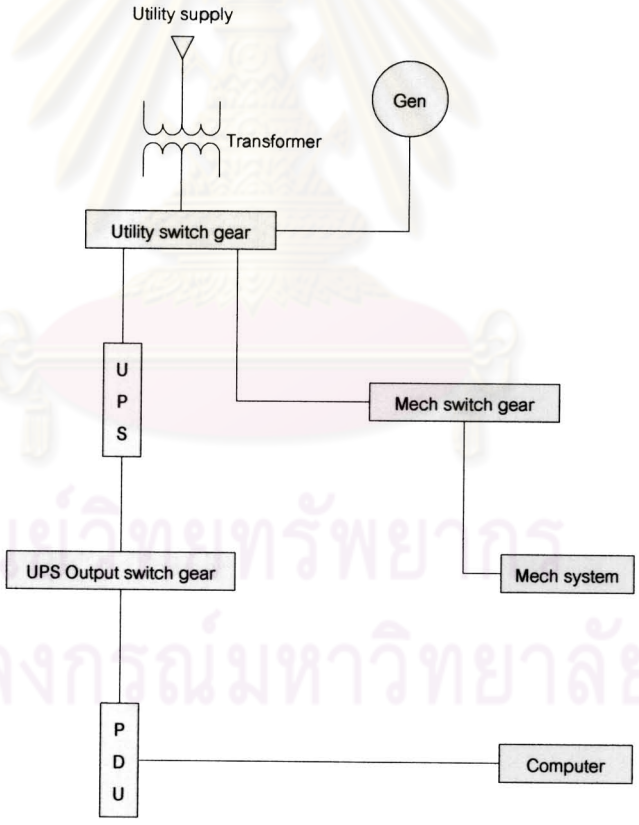
คอมพิวเตอร์ยังคงสามารถทำงานได้หรือไม่ได้รับผลกระทบในกรณีที่เกิดเหตุขัดข้องขึ้นกับอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งภายในระบบ

- ความสามารถในการซ่อมบำรุงร่วมกัน คือ ความสามารถที่จะทำการซ่อมบำรุงระบบหรืออุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งภายในระบบได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อโหลดหรือส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์คอมพิวเตอร์

3.4 มาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ

จากที่กล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่า การจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยรายละเอียดของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

3.4.1 มาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1 (Tier 1) [4]



รูปที่ 3.1 โครงสร้างพื้นฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1

ข้อกำหนดทางโครงสร้างพื้นฐาน

- มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าอิสระเพียงแหล่งเดียว

- ไม่มีอุปกรณ์ทดแทนหรืออุปกรณ์สำรองในกรณีที่อุปกรณ์เกิดการล้มเหลวหรือเกิดเหตุขัดข้องขึ้น เช่น เครื่องสำรองไฟฟ้า (Uninterruptible power supply : UPS), เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)
- ค่าความพร้อมมูลของจุดโหลดหลัก (คอมพิวเตอร์) ต้องไม่ต่ำกว่า 99.67%

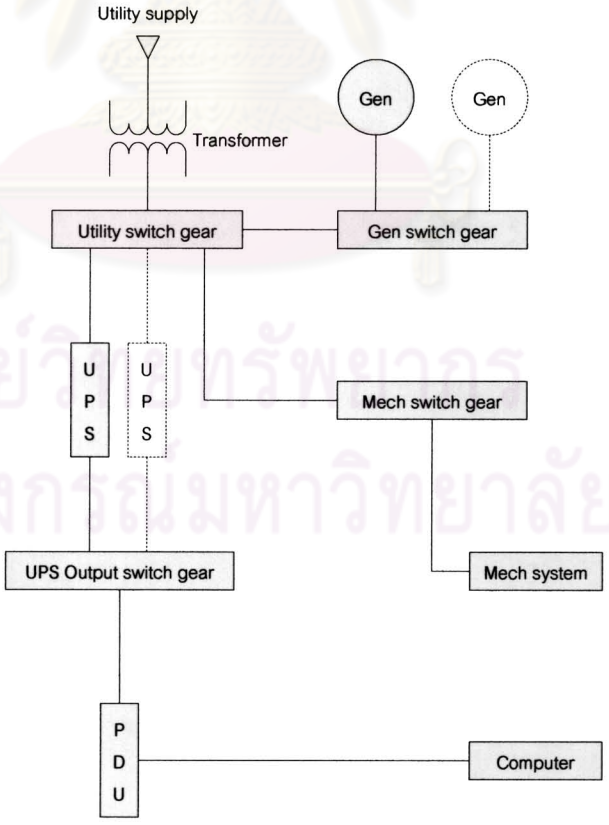
<u>ผลการทดสอบระบบเบื้องต้น</u>

- ความผิดพลาดของอุปกรณ์หรือส่วนประกอบใด ๆ ในระบบจะส่งผลกระทบทั้งระบบ

<u>ผลกระทบในการปฏิบัติงาน</u>

- ถ้าหากเกิดความผิดพลาดขึ้นที่ส่วนใดของระบบก็แล้วแต่ ก็จะทำให้ระบบเกิดการล้มเหลว
- ถ้าหากต้องการที่จะทำการซ่อมบำรุงระบบจะต้องทำการปิดระบบทั้งระบบ
- การทำงานของสัญญาณเตือนเมื่อเกิดไฟไหม้ อุปกรณ์การดับไฟ หรือการตัดการทำงานยามฉุกเฉิน อาจจะทำให้เกิดความขัดข้องแก่โหลดได้

3.4.2 มาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 2 (Tier 2) [4]



รูปที่ 3.2 โครงสร้างพื้นฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 2

ข้อกำหนดทางโครงสร้างพื้นฐาน

- มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าอิสระเพียงแหล่งเดียว
- มีอุปกรณ์ทดแทนหรืออุปกรณ์สำรองในกรณีที่อุปกรณ์เกิดการล้มเหลวหรือเกิดเหตุขัดข้องขึ้น เช่น เครื่องสำรองไฟ (Uninterruptible power supply : UPS), เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)
- ค่าความพร้อมมูลของจุดโหลดหลัก (คอมพิวเตอร์) ต้องไม่ต่ำกว่า 99.75%

ผลการทดสอบระบบเบื้องต้น

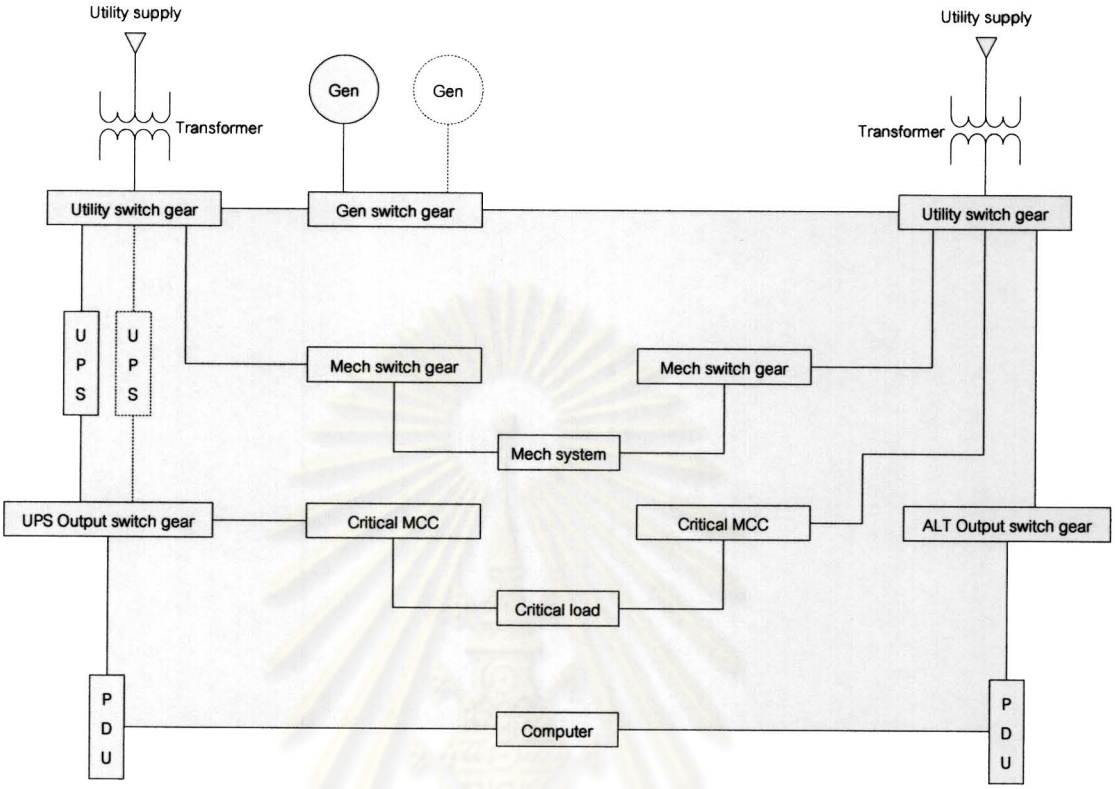
- ความผิดพลาดของอุปกรณ์หรือส่วนประกอบใด ๆ ในระบบจะส่งผลกระทบต่อระบบทั้งระบบ คือ ระบบจะเกิดเหตุขัดข้องหรือล้มเหลวนั่นเอง ยกเว้นแต่กรณีที่ เครื่องสำรองไฟฟ้า (Uninterruptible power supply : UPS) หรือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) เกิดเหตุขัดข้องขึ้นระบบจะไม่ล้มเหลว เพราะมีสำรองอยู่

ผลกระทบในการปฏิบัติงาน

- ระบบนี้มีความไวต่อการขัดข้องจากทั้งการทำงานหรือจากความผิดพลาดของระบบ คือ ถ้าหากเกิดความผิดพลาดขึ้นที่ส่วนใดของระบบก็แล้วแต่ ก็จะทำให้ระบบเกิดการล้มเหลว ยกเว้นในส่วนของเครื่องสำรองไฟฟ้า (Uninterruptible power supply : UPS) หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ระบบดังกล่าวจะไม่เกิดการล้มเหลวเพราะมีอุปกรณ์สำรองอยู่
- ถ้าหากต้องการที่จะทำการซ่อมบำรุงระบบจะต้องทำการปิดระบบทั้งระบบ
- การทำงานของสัญญาณเตือนเมื่อเกิดไฟไหม้ อุปกรณ์การดับไฟ หรือการตัดการทำงานยามฉุกเฉิน อาจจะทำให้เกิดความขัดข้องแก่โหลดได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.3 มาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 (Tier 3) [4]



รูปที่ 3.3 โครงสร้างพื้นฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3

ข้อกำหนดทางโครงสร้างพื้นฐาน

- มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าอิสระ 2 แหล่ง
- แหล่งจ่ายไฟฟ้าอิสระ 2 แหล่ง สามารถทดแทนกันได้ในกรณีที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าอิสระแหล่งใดแหล่งหนึ่งเกิดการขัดข้องขึ้น ระบบก็จะไม่เกิดการล้มเหลว
- ค่าความพร้อมมูลของจุดโหลดหลัก (คอมพิวเตอร์) ต้องไม่ต่ำกว่า 99.98%

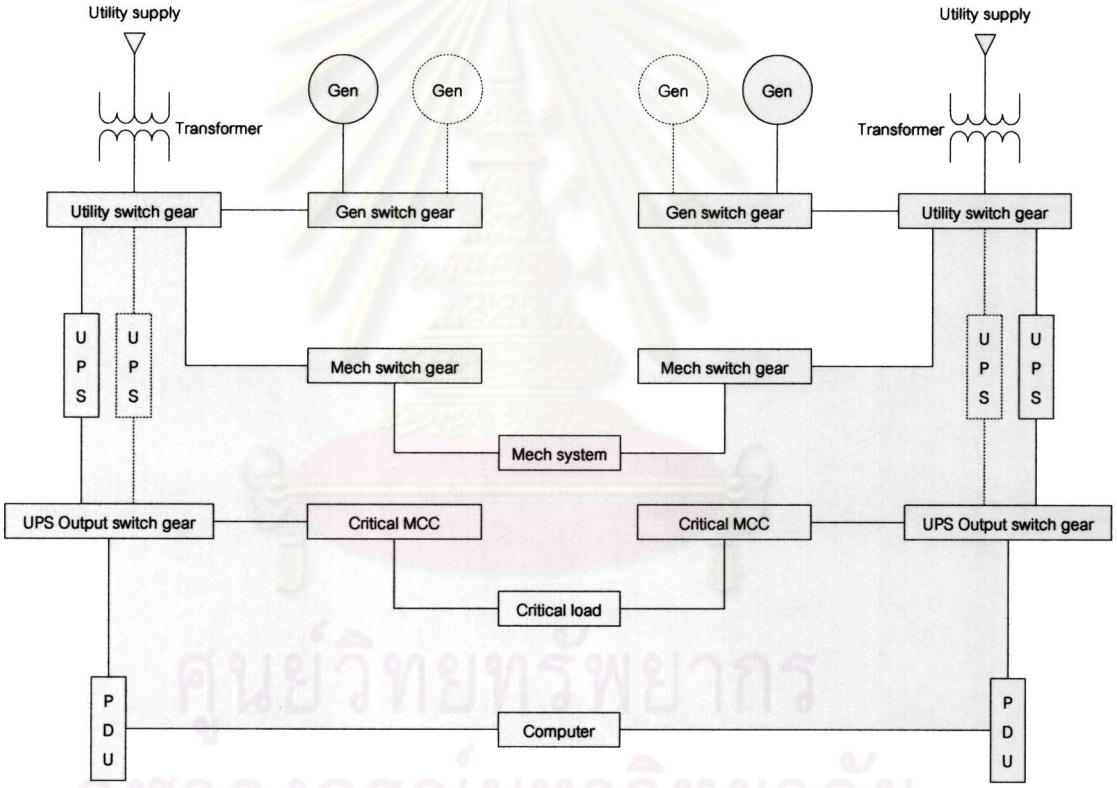
ผลการทดสอบระบบเบื้องต้น

- ในกรณีที่เกิดความผิดพลาดที่ร้ายแรงหรือที่ไม่นอกเหนือจากที่คาดการณ์ไว้ขึ้นกับระบบอาจจะไม่ส่งผลให้โหลดเกิดการล้มเหลว
- อุปกรณ์แต่ละตัวหากเกิดความผิดพลาดขึ้นหรือต้องการที่จะซ่อมบำรุงอุปกรณ์ตัวนั้น ๆ ก็สามารถทำได้โดยอาจจะไม่ส่งผลกระทบต่อโหลด

ผลกระทบในการปฏิบัติงาน

- ระบบนี้จะมีผลต่อการขัดข้องในกรณีที่ร้ายแรงที่สุดอย่างเดียวที่นอกเหนือจากที่ได้เตรียมการไว้ล่วงหน้า
- การซ่อมบำรุงสามารถทำได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อโหลด เพราะมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าอิสระให้แก่โหลด 2 แหล่งจ่าย
- การทำงานของสัญญาณเตือนเมื่อเกิดไฟไหม้ อุปกรณ์การดับไฟ หรือการตัดการทำงานยามฉุกเฉิน อาจจะทำให้เกิดความขัดข้องแก่โหลดได้

3.4.4 มาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 (Tier 4) [4]



รูปที่ 3.4 โครงสร้างพื้นฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4

ข้อกำหนดโครงสร้างพื้นฐาน

- มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าอิสระ 2 แหล่ง
- แหล่งจ่ายไฟฟ้าอิสระ 2 แหล่ง สามารถทดแทนกันได้ในกรณีที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าอิสระแหล่งใดแหล่งหนึ่งเกิดการขัดข้องขึ้น ระบบก็จะไม่เกิดการล้มเหลว
- ค่าความพร้อมมูลของจุดโหลดหลัก (คอมพิวเตอร์) ต้องไม่ต่ำกว่า 99.99%

ผลการทดสอบระบบเบื้องต้น

- ในกรณีที่เกิดความผิดพลาดที่ร้ายแรงหรือที่ไม่นอกเหนือจากที่คาดการณ์ไว้ขึ้นกับระบบจะไม่ส่งผลให้โหลดเกิดการล้มเหลว
- อุปกรณ์แต่ละตัวหากเกิดความผิดพลาดขึ้นหรือต้องการที่จะซ่อมบำรุงอุปกรณ์ตัวนั้น ๆ ก็สามารถทำได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อโหลด

ผลกระทบในการปฏิบัติงาน

- ระบบนี้จะมีผลต่อการขัดข้องในกรณีที่ร้ายแรงที่สุดอย่างเดียวที่นอกเหนือจากที่ได้เตรียมการไว้ล่วงหน้า
- การซ่อมบำรุงสามารถทำได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อโหลด
- การทำงานของสัญญาณเตือนเมื่อเกิดไฟไหม้ อุปกรณ์การดับไฟ หรือการตัดการทำงานยามฉุกเฉิน อาจจะทำให้เกิดความขัดข้องแก่โหลดได้

ตารางที่ 3.1 สรุปข้อกำหนดของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ [4]

ข้อกำหนดของ Tier	Tier 1	Tier 2	Tier 3	Tier 4
ปีที่นำมาใช้ครั้งแรก	1965	1970	1985	1995
แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า	ระบบ	ระบบ	ระบบ+ระบบ	ระบบ+ระบบ
เส้นทางการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้า	1	1	ทำงานได้สองทางพร้อม ๆ กัน	ทำงานได้สองทางพร้อม ๆ กัน
ความสามารถในการซ่อมบำรุงร่วมกันได้	ไม่มี	ไม่มี	มี	มี
ความทนต่อความผิดพลาด (เหตุการณ์เดียว)	ไม่มี	ไม่มี	มี	มี
ช่วงเวลาที่เกิดความผิดพลาดต่อปี(ชั่วโมงต่อปี)	28.8	22.0	1.6	0.8
ความพร้อมมูลต้องไม่ต่ำกว่า	99.67%	99.75%	99.98%	99.99%

บทที่ 4

การวิเคราะห์อุปกรณ์ในระบบการจัดอันดับเทียร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและหลักการเบื้องต้นของการวิเคราะห์อุปกรณ์ในระบบการจัดอันดับเทียร์ ซึ่งจะประกอบไปด้วยหัวข้อหลัก ๆ ได้แก่ ชนิดของอุปกรณ์ในระบบการจัดอันดับเทียร์ การกระจายความน่าจะเป็นในการทำงานของอุปกรณ์ในระบบการจัดอันดับเทียร์ แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์ในระบบการจัดอันดับเทียร์ และลักษณะการล้มเหลวของอุปกรณ์ในระบบการจัดอันดับเทียร์

4.1 ชนิดของอุปกรณ์ในระบบการจัดอันดับเทียร์

ตามมาตรฐานการของการจัดอันดับเทียร์อุปกรณ์ในระบบจะประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ หลากหลายชนิด โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์หลัก ๆ ซึ่งแต่ละชนิดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้า คือ อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในการส่งผ่านพลังงาน จากวงจรไฟฟ้าหนึ่งไปยังอีกวงจรหนึ่งซึ่งอาศัยหลักการของแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทั่วไปเราใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อปรับระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้มีขนาดลดลงหรือเพิ่มขึ้น โดยมีความถี่ไฟฟ้าคงเดิม ลักษณะการใช้งานคือจะใช้เชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้าแรงสูง และไฟฟ้าแรงต่ำเพื่อทำการปรับระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้มีค่าเหมาะสมแก่การใช้งาน

2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือ เครื่องมือที่ใช้สำหรับแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยมีหลักการทำงาน คือเมื่อสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดขดลวด หรือขดลวดเคลื่อนที่ตัดสนามแม่เหล็กก็จะได้ไฟฟ้าออกมา เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ก็เป็นส่วนประกอบสำคัญสำหรับระบบไฟฟ้าในอาคาร เพราะจะช่วยให้ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าดังกล่าวดีขึ้น

3. สวิตช์เกียร์ (Switch gear)

สวิตช์เกียร์ คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับพลังงานไฟฟ้าและจ่ายพลังงานไฟฟ้า เพื่อนำไปจ่ายให้แก่โหลดต่าง ๆ ตามที่ต้องการ สวิตช์เกียร์เป็นที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสถานีไฟฟ้าเป็นของโรงงานเอง และสวิตช์เกียร์นี้อาจทำหน้าที่ตัดไฟเมื่อมีสิ่งผิดปกติเกิดขึ้นกับวงจรไฟฟ้า รวมถึงการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายอยู่ว่าอยู่ในระดับปกติหรือไม่ ดังนั้นสวิตช์เกียร์จำเป็นต้องมีการตรวจสอบและบำรุงรักษาเป็นประจำ เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าอุปกรณ์ดังกล่าวมีความพร้อม

ที่จะทำงานเมื่อเกิดเหตุผิดปกติขึ้น เพราะถ้าหากว่าสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นไม่ถูกตัดหรือกำจัดออกไปในเวลาที่รวดเร็วแล้วอาจจะทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบได้

4. เครื่องสำรองไฟฟ้า (Uninterruptible power supply : UPS)

เครื่องสำรองไฟฟ้า หมายถึง แหล่งจ่ายพลังงานต่อเนื่อง เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อื่น ๆ ได้อย่างต่อเนื่องแม้ว่าไฟดับเครื่องสำรองไฟฟ้า (UPS) จะปรับระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่อยู่เสมอ และมีหน้าที่หลัก คือ ป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ (โดยเฉพาะคอมพิวเตอร์) ที่มีสาเหตุจากไฟฟ้าดับหรือไฟกระชาก เป็นต้น และยังมีหน้าที่ในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำรองจากแบตเตอรี่ให้แก่อุปกรณ์ไฟฟ้า ในกรณีที่แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเกิดขัดข้องขึ้น

5. อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าจากตู้แร็ค (Protocol data unit : PDU)

อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าจากตู้แร็ค คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นชุดจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับวงจรย่อย โดยมีหลายขนาดให้เลือกตามความเหมาะสมกับการใช้งาน และยังสามารถแบ่งโหลดออกเป็นสัดส่วนได้ตามพิกัดกำลังที่ใช้และฟังก์ชันการใช้งาน

6. เอทีเอส (Automatic transfer switch : ATS)

เอทีเอส คือ สวิตช์ที่ทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่มีลักษณะการทำงานแบบอัตโนมัติโดยมีรูปแบบการทำงานที่หลากหลาย ขึ้นอยู่กับว่าผู้ออกแบบจะเลือกใช้งานในลักษณะใด

7. เซอร์กิตเบรคเกอร์ (Circuit breaker : CB)

เซอร์กิตเบรกเกอร์ คือ อุปกรณ์ป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในกรณีเกิดการขัดข้องกับระบบ และมีคุณสมบัติสามารถทำงานปิดกลับอัตโนมัติได้

8. สายไฟฟ้า (Conductor)

สายไฟฟ้า คือ อุปกรณ์ตัวนำไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าไปสู่อุปกรณ์ต่าง ๆ และเป็นส่วนสำคัญสำหรับระบบไฟฟ้าอย่างมาก

9. ตู้โหลด (Load panel : LP)

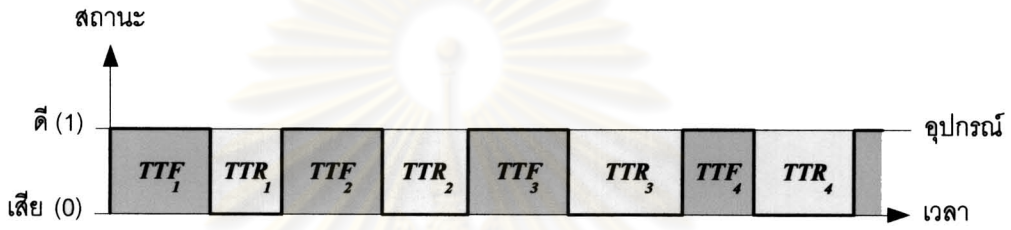
ตู้โหลด คือ อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นและเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับระบบไฟฟ้าในอาคารทั่วไป

10. บัสบาร์ (Bus bar)

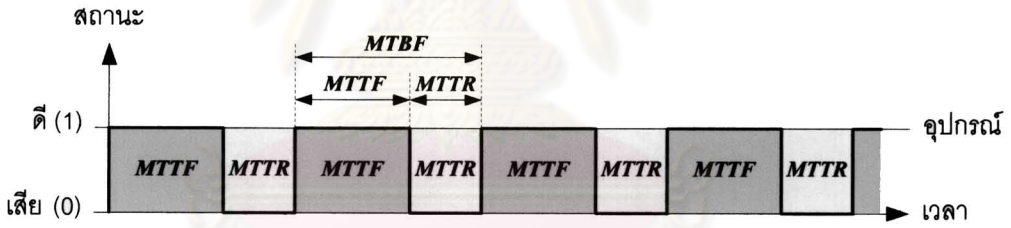
บัสบาร์ คือ อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับต่อเชื่อมหรือเป็นทางผ่านของพลังงานไฟฟ้านั่นเอง โดยส่วนมากแล้วจะใช้ในส่วนของตู้คอนโทรล

4.2 การกระจายความน่าจะเป็นในการทำงานของอุปกรณ์ [1,5,6]

หากพิจารณาพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าการทำงานปกติของอุปกรณ์มีลักษณะเป็นช่วงตามคาบเวลาที่ไม่สม่ำเสมอ (Non-periodic) ประกอบด้วยสถานะทำงานปกติ "สถานะดี" (Operable state) สลับกับสถานะขัดข้อง "สถานะเสีย" (Failed state) แต่ในการสร้างแบบจำลอง 2 สถานะ "ดี-เสีย" เพื่อแทนการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวในช่วงระยะเวลายาว สามารถจะประมาณช่วงระยะเวลาในแต่ละสถานะเป็นค่าเฉลี่ย และช่วงคาบเวลาแสดงพฤติกรรมของอุปกรณ์เป็นคาบเวลาที่สม่ำเสมอ (Periodic) [1] แสดงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ช่วงเวลาการทำงานปกติของอุปกรณ์



รูปที่ 4.2 ช่วงเวลาการทำงานของอุปกรณ์เมื่อประมาณเป็นค่าเฉลี่ย

โดยที่

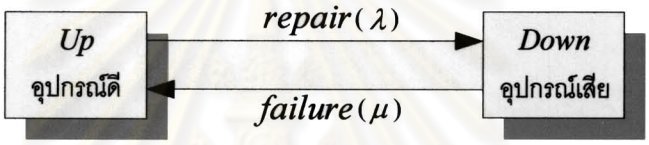
TTF (Time to failure)	คือ ช่วงเวลาการทำงานของอุปกรณ์
TTR (Time to repair)	คือ ช่วงเวลาการซ่อมแซมอุปกรณ์
MTTF (Mean time to failure)	คือ ช่วงเวลาการทำงานของอุปกรณ์โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ย
MTTR (Mean time to failure)	คือ ช่วงเวลาการซ่อมแซมอุปกรณ์โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ย
MTBF (Mean time between failure)	คือ ช่วงเวลาในหนึ่งคาบการทำงานของอุปกรณ์ตั้งแต่ช่วงเวลาที่อุปกรณ์ทำงานจนเกิดเหตุขัดข้องและทำการซ่อมแซมจนสามารถกลับมาทำงานได้อีกครั้ง โดยมีค่าเท่ากับ $MTTF + MTTR$

4.3 แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์

ในทางปฏิบัติ อุปกรณ์แต่ละชนิดทำหน้าที่แตกต่างกัน แต่เมื่อต้องการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองสถานะ (State model) เพื่อจำลองพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์แต่ละชนิด สำหรับใช้ในการพิจารณาถึงโอกาสที่จะเกิดขัดข้องของอุปกรณ์ชนิดนั้น ๆ ขึ้นในระหว่างปฏิบัติงาน

4.3.1 แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์แบบ 2 สถานะ (Two-state model) [2,5,6]

โดยทั่วไปแบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์จะเป็นแบบ 2 สถานะ คือ สถานะที่สามารถใช้งานได้ตามปกติ (Up) และสถานะที่อุปกรณ์ใช้งานไม่ได้ (Down) ดังนั้น แบบจำลองพื้นฐานก็คือแบบจำลอง 2 สถานะ แสดงได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แบบจำลอง 2 สถานะของอุปกรณ์

โดยที่

λ คือ อัตราการเสีย (Failure rate)

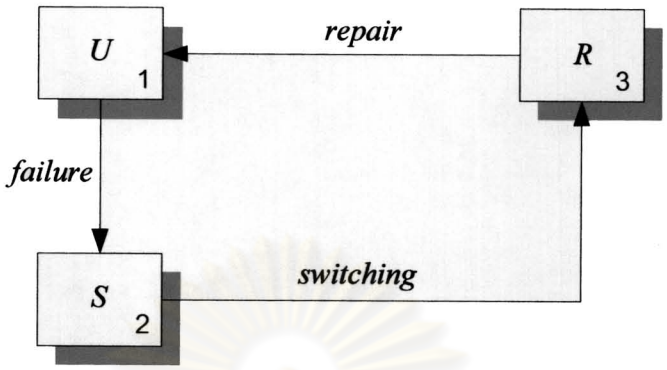
μ คือ อัตราการซ่อม (Repair rate)

แบบจำลอง 2 สถานะซึ่งเชื่อมโยงกันด้วยอัตราการล้มเหลว (λ) และอัตราการซ่อมแซม (μ) กล่าวคือ ในการเปลี่ยนสถานะจากการทำงานปกติไปเป็นสถานะล้มเหลวจะเป็นไปตามอัตราการล้มเหลวและเปลี่ยนสถานะ ในทางกลับกันจะเป็นไปตามอัตราการซ่อมแซม แบบจำลองนี้มีข้อดี คือ ง่ายแก่การเข้าใจและการวิเคราะห์ แต่มีข้อเสีย คือ ไม่สามารถจำลองการทำงานที่ซับซ้อนได้ตามความจริงของบางอุปกรณ์ เช่น การตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบแอคทีฟและแบบพาสสีฟ [5] เป็นต้น

4.3.2 แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์แบบ 3 สถานะ (Three-state model) [2,5,6]

เพื่อที่จะพิจารณาถึงพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีลักษณะการทำงานที่ซับซ้อนได้ดียิ่งขึ้น จึงได้มีการพัฒนาแบบจำลอง 3 สถานะ (Three-state model) แสดงได้ดังรูปที่

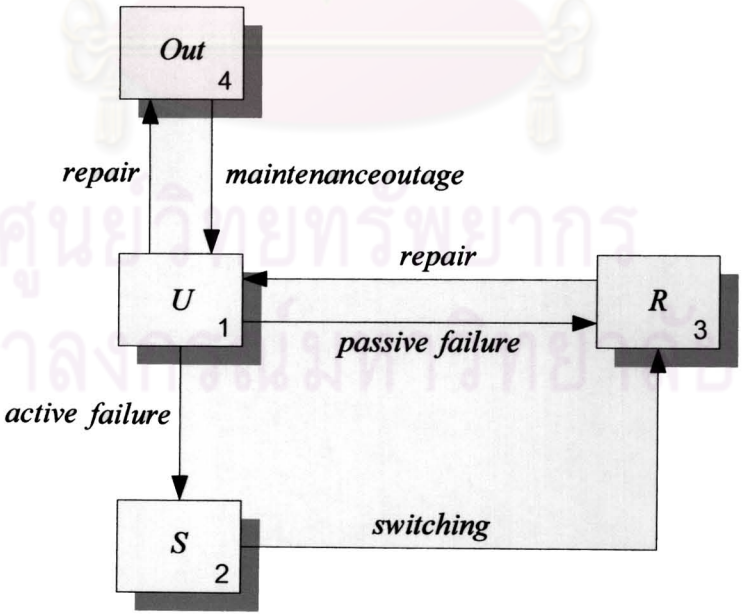
4.4 ขึ้นเพื่อที่จะใช้ในการพิจารณาประเภทของการล้มเหลวของอุปกรณ์ได้อย่างเหมาะสมกว่าแบบจำลอง 2 สถานะ



รูปที่ 4.4 แบบจำลอง 3 สถานะของอุปกรณ์

4.3.3 แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์แบบ 4 สถานะ (Four-state model) [2,5,6]

เพื่อที่จะพิจารณาถึงพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีลักษณะการทำงานที่ซับซ้อนได้ดียิ่งขึ้น จึงได้มีการพัฒนาแบบจำลอง 4 สถานะ (Four-state model) แสดงได้ดังรูปที่ 4.5 ขึ้นเพื่อที่จะใช้ในการพิจารณาประเภทของการล้มเหลวของอุปกรณ์ได้อย่างเหมาะสมกว่าแบบจำลอง 2 สถานะ และแบบจำลอง 3 สถานะ



รูปที่ 4.5 แบบจำลอง 4 สถานะของอุปกรณ์

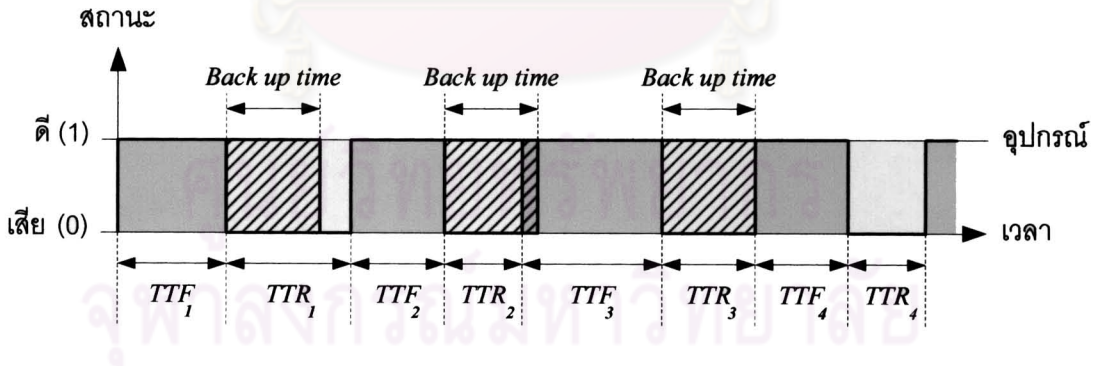
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์แบบ 2 สถานะ แทนการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบ เพื่อให้ง่ายแก่การเข้าใจและการวิเคราะห์

4.4 การพิจารณาอุปกรณ์ในระบบการจัดอันดับเทียร์ที่มีเงื่อนไขพิเศษ

เพื่อให้ผลการทดสอบมีความถูกต้องแม่นยำแล้ว จำเป็นจะต้องทำการสร้างแบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์ (แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์แบบ 2 สถานะ) เพื่อจำลองพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ดังนั้นจึงต้องทำการพิจารณาอุปกรณ์ที่มีลักษณะการทำงานที่มีเงื่อนไขพิเศษ ซึ่งได้แก่ เครื่องสำรองพลังงานไฟฟ้า (Uninterruptible power supply : UPS) และเอทีเอส (Automatic transfer switch : ATS)

4.4.1 การพิจารณาเงื่อนไขพิเศษสำหรับยูพีเอส

สำหรับระบบไฟฟ้าในอาคารสำนักงาน หรือโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ส่วนประกอบที่สำคัญที่ช่วยให้ระบบไฟฟ้าดังกล่าวมีความเชื่อถือได้ที่ดีขึ้นนั้น ได้แก่ เครื่องสำรองพลังงานไฟฟ้า (Uninterruptible power supply : UPS) และยูพีเอสก็เป็นส่วนประกอบหลักสำหรับการจัดอันดับเทียร์ทั้ง 4 ระดับ ดังนั้นจึงต้องทำการพิจารณาลักษณะการทำงานของยูพีเอสให้มีเงื่อนไขใกล้เคียงกับลักษณะการทำงานจริงมากที่สุด ซึ่งลักษณะการทำงานของยูพีเอสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6

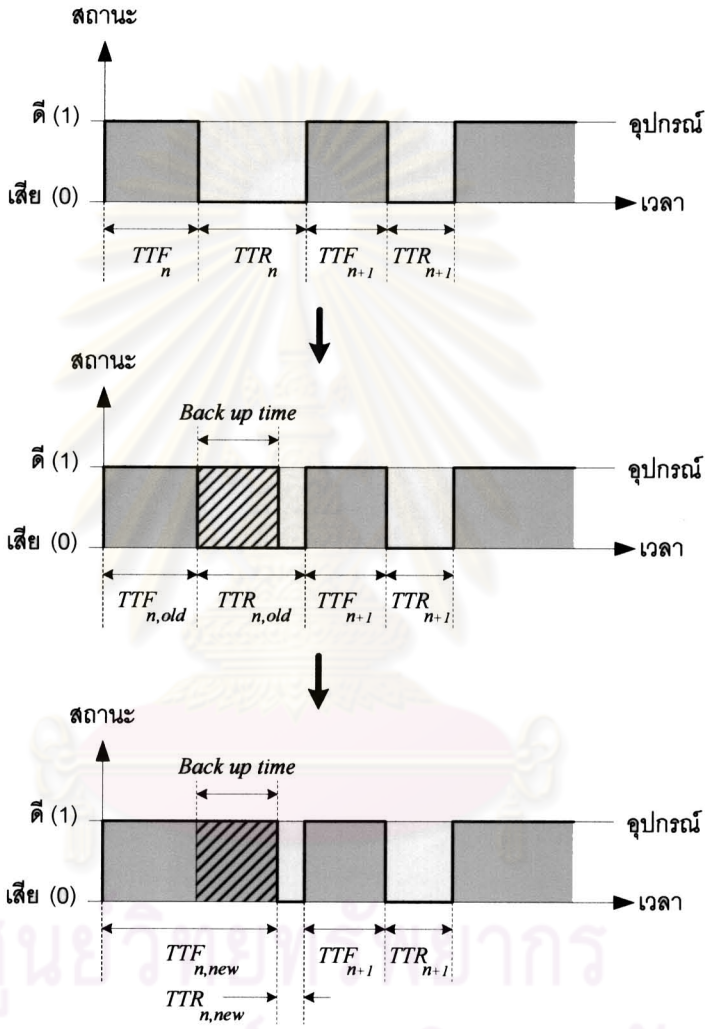


รูปที่ 4.6 ลักษณะการทำงานของยูพีเอส

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าเราสามารถพิจารณาลักษณะการทำงานของยูพีเอสออกได้เป็น 3 กรณี คือ Back up time < TTR, Back up time > TTR และ Back up time = TTR ซึ่งแต่ละกรณีมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- กรณี Back up time < TTR

ลักษณะการทำงานของเครื่องสำรองพลังงานไฟฟ้า (Uninterruptible power supply : UPS) ในกรณีที่ช่วงระยะเวลาที่เครื่องสำรองพลังงานไฟฟ้าสามารถสำรองจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่โหลดได้ (Back up time) มีค่าน้อยกว่าช่วงระยะเวลาการซ่อมแซมอุปกรณ์ (Time to repair : TTR) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แบบจำลองการทำงานของยูพีเอสกรณี Back up time < TTR

จากรูปจะได้ว่าช่วงระยะเวลาการทำงานของอุปกรณ์ของคาบการทำงานลำดับที่ n ในสภาวะหลังจากพิจารณาเงื่อนไขของยูพีเอสสามารถคำนวณได้ตาม (4.1)

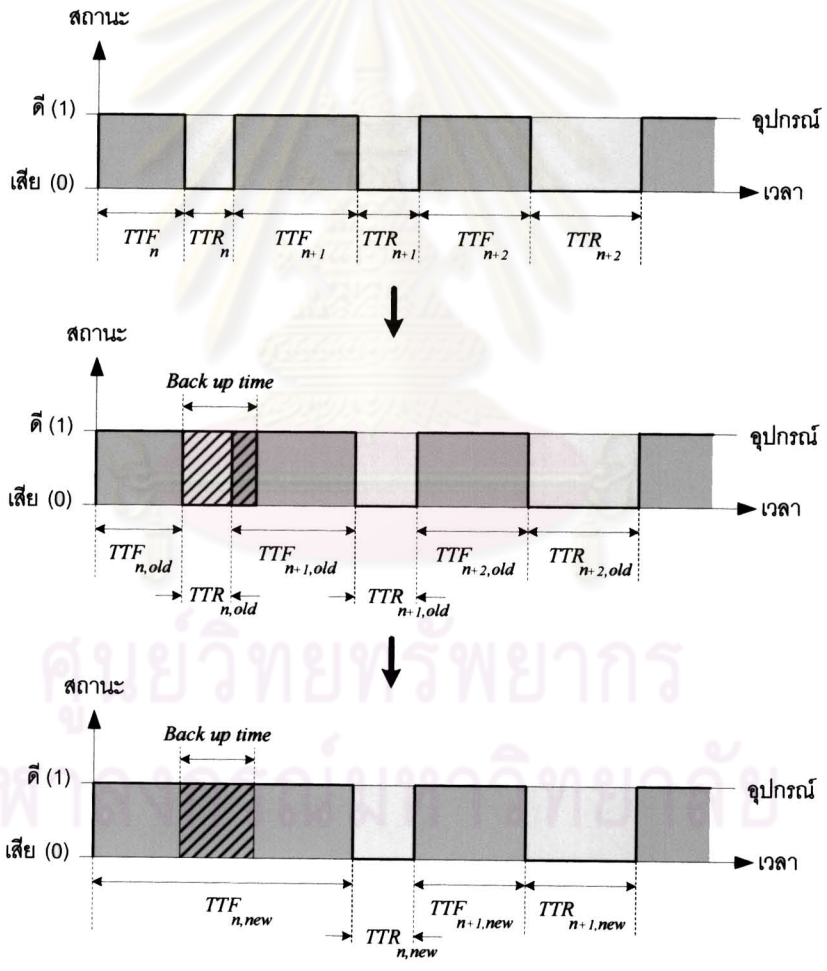
$$TTF_{n,new} = TTF_{n,old} + Back\,up\,time \qquad (4.1)$$

และช่วงระยะเวลาการซ่อมแซมอุปกรณ์ของคาบการทำงานลำดับที่ n ในสภาวะหลังจากพิจารณาเงื่อนไขของยูพีเอสสามารถคำนวณได้ตาม (4.2)

$$TTR_{n,new} = TTR_{n,old} - Back\ up\ time \qquad (4.2)$$

- กรณี Back up time > TTR

ลักษณะการทำงานของเครื่องสำรองพลังงานไฟฟ้า (Uninterruptible power supply : UPS) ในกรณีที่ช่วงระยะเวลาที่ยูพีเอสสามารถสำรองจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่โหลดได้ (Back up time) มีค่ามากกว่าช่วงระยะเวลาการซ่อมแซมอุปกรณ์ (Time to repair : TTR) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แบบจำลองการทำงานของยูพีเอสกรณี Back up time > TTR

จากรูปจะได้ว่าช่วงระยะเวลาการทำงานของอุปกรณ์ของคาบการทำงานลำดับที่ n ในสภาวะหลังจากพิจารณาเงื่อนไขของยูพีเอสสามารถคำนวณได้ตาม (4.3)

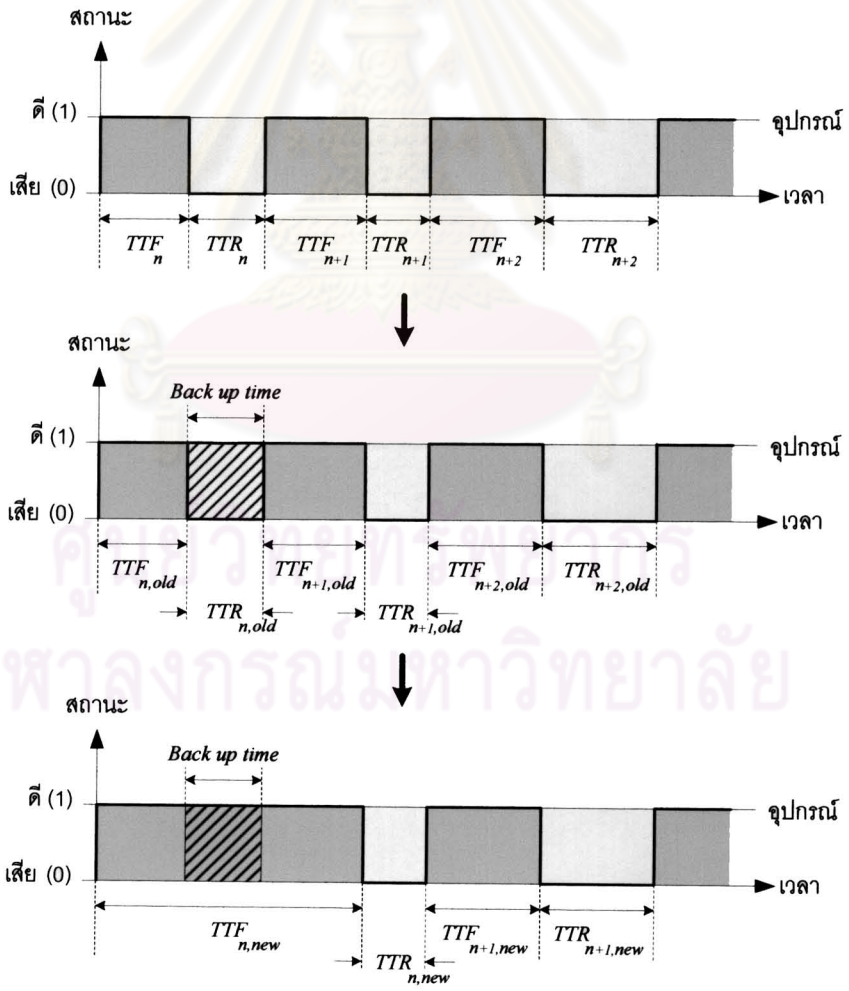
$$TTF_{n,new} = TTF_{n,old} + TTR_{n,old} + TTF_{n+1,old} \quad (4.3)$$

และช่วงระยะเวลาการซ่อมแซมอุปกรณ์ของคาบการทำงานลำดับที่ n ในสภาวะหลังจากพิจารณาเงื่อนไขของยูพีเอสสามารถคำนวณได้ตาม (4.4)

$$TTR_{n,new} = TTR_{n+1,old} \quad (4.4)$$

- กรณี Back up time = TTR

ลักษณะการทำงานของเครื่องสำรองพลังงานไฟฟ้า (Uninterruptible power supply : UPS) ในกรณีที่ช่วงระยะเวลาที่ยูพีเอสสามารถสำรองจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่โหลดได้ (Back up time) มีค่าเท่ากันกับช่วงระยะเวลาการซ่อมแซมอุปกรณ์ (Time to repair : TTR) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แบบจำลองการทำงานของยูพีเอสกรณี Back up time = TTR

จากรูปจะได้ว่าช่วงระยะเวลาการทำงานของอุปกรณ์ของคาบการทำงานลำดับที่ n ในสภาวะหลังจากพิจารณาเงื่อนไขของยูพีเอสสามารถคำนวณได้ตาม (4.5)

$$TTF_{n,new} = TTF_{n,old} + TTR_{n,old} + TTF_{n+1,old} \quad (4.5)$$

และช่วงระยะเวลาการซ่อมแซมอุปกรณ์ของคาบการทำงานลำดับที่ n ในสภาวะหลังจากพิจารณาเงื่อนไขของยูพีเอสสามารถคำนวณได้ตาม (4.6)

$$TTR_{n,new} = TTR_{n+1,old} \quad (4.6)$$

โดยที่

$TTF_{n,old}$ คือ ช่วงระยะเวลาการทำงานของอุปกรณ์ของคาบการทำงานลำดับที่ n ในสภาวะก่อนพิจารณาเงื่อนไขของยูพีเอส

$TTF_{n,new}$ คือ ช่วงระยะเวลาการทำงานของอุปกรณ์ของคาบการทำงานลำดับที่ n ในสภาวะหลังจากพิจารณาเงื่อนไขของยูพีเอส

$TTR_{n,old}$ คือ ช่วงระยะเวลาการซ่อมแซมอุปกรณ์ของคาบการทำงานลำดับที่ n ในสภาวะก่อนพิจารณาเงื่อนไขของยูพีเอส

$TTR_{n,new}$ คือ ช่วงระยะเวลาการซ่อมแซมอุปกรณ์ของคาบการทำงานลำดับที่ n ในสภาวะหลังจากพิจารณาเงื่อนไขของยูพีเอส

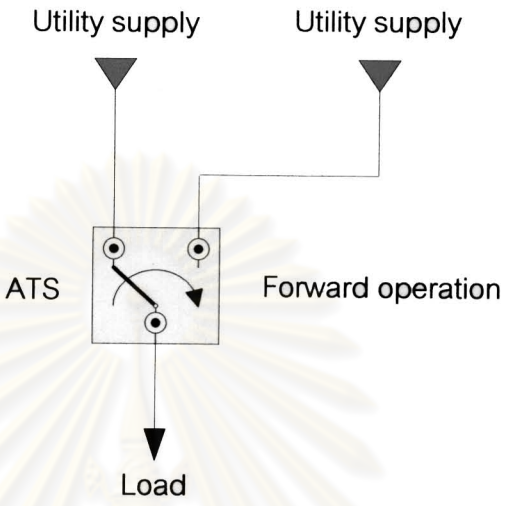
Back up time คือ ช่วงระยะเวลาที่ยูพีเอสสามารถสำรองจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่โหลดได้

4.4.2 การพิจารณาเงื่อนไขพิเศษสำหรับเอทีเอส

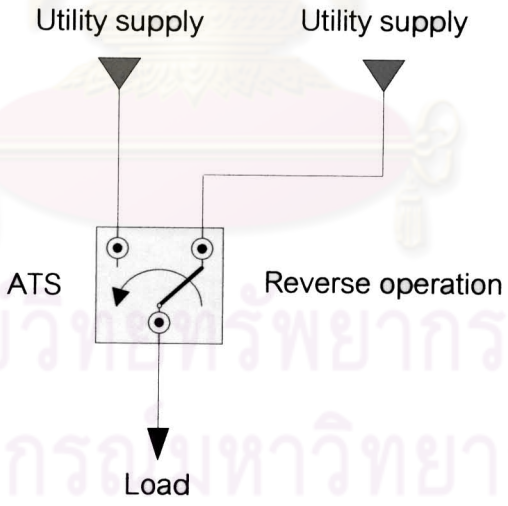
สำหรับระบบไฟฟ้าในอาคารสำนักงาน หรือโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ส่วนประกอบที่สำคัญที่ช่วยให้ระบบไฟฟ้าดังกล่าวมีความเชื่อถือได้ที่ดีขึ้นอีกชนิด ได้แก่ เอทีเอส (Automatic transfer switch : ATS) ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญสำหรับการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 และระดับที่ 4 ดังนั้นจึงต้องทำการพิจารณาลักษณะการทำงานของเอทีเอสให้มีเงื่อนไขใกล้เคียงกับลักษณะการทำงานจริงมากที่สุด ซึ่งลักษณะการทำงานแบ่งได้เป็น 3 กรณี คือ ส่งผ่านระหว่างการไฟฟ้ากับการไฟฟ้า, ส่งผ่านระหว่างการไฟฟ้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และส่งผ่านระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่อง

- ส่งผ่านระหว่างการไฟฟ้ากับการไฟฟ้า

การทำงานของเอทีเอส (Automatic transfer switch : ATS) ที่ถูกใช้งานในลักษณะส่งผ่านระหว่างการไฟฟ้ากับการไฟฟ้า สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11



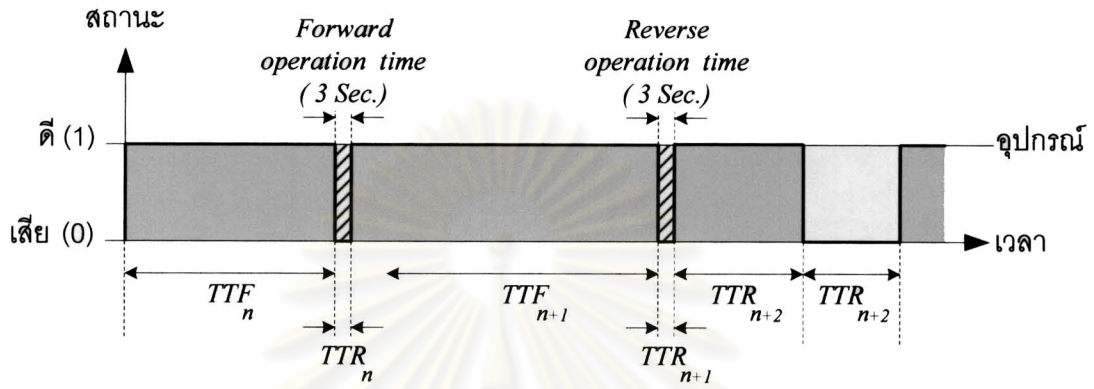
รูปที่ 4.10 เอทีเอสที่มีลักษณะการทำงานแบบเดินหน้า



รูปที่ 4.11 เอทีเอสที่มีลักษณะการทำงานแบบย้อนกลับ

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 จะเห็นได้ว่าเอทีเอสจะมีลักษณะการทำงาน 2 ลักษณะ คือ ลักษณะการทำงานแบบเดินหน้า (Forward operation) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการทำงานในลักษณะนี้จะใช้ระยะเวลาในการสวิตช์หรือที่เรียกว่า ช่วงระยะเวลาการทำงานในลักษณะเดินหน้า (Forward

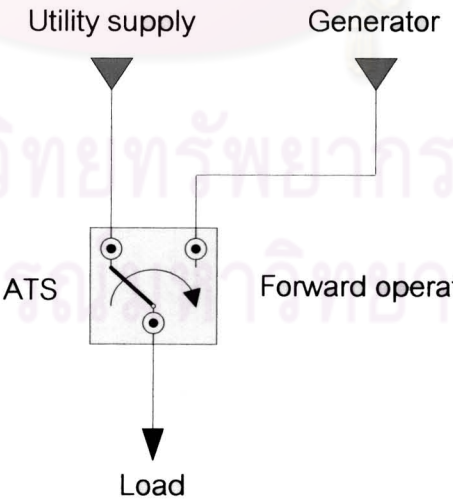
operation time) ประมาณ 3 วินาที และลักษณะการทำงานแบบย้อนกลับ (Reverse operation) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการทำงานในลักษณะนี้จะใช้ระยะเวลาในการสวิตช์หรือที่เรียกว่า ช่วงระยะเวลาการทำงานในลักษณะย้อนกลับ (Reverse operation time) ประมาณ 3 วินาที ดังนั้นเราจึงสามารถจำลองลักษณะการทำงานของเอทีเอสได้ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แบบจำลองการทำงานของเอทีเอส

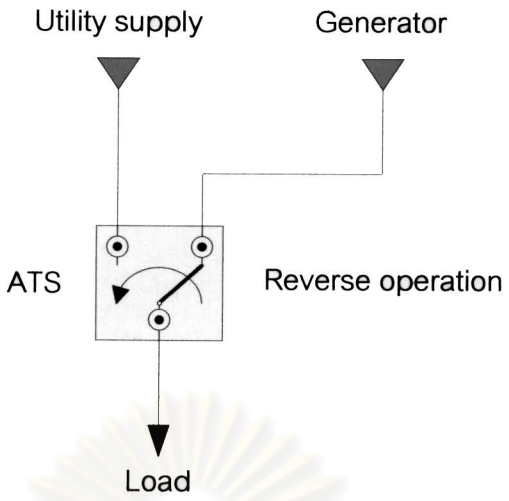
- ส่งผ่านระหว่างการไฟฟ้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การทำงานของเอทีเอส (Automatic transfer switch : ATS) ที่ถูกใช้งานในลักษณะส่งผ่านระหว่างการไฟฟ้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14



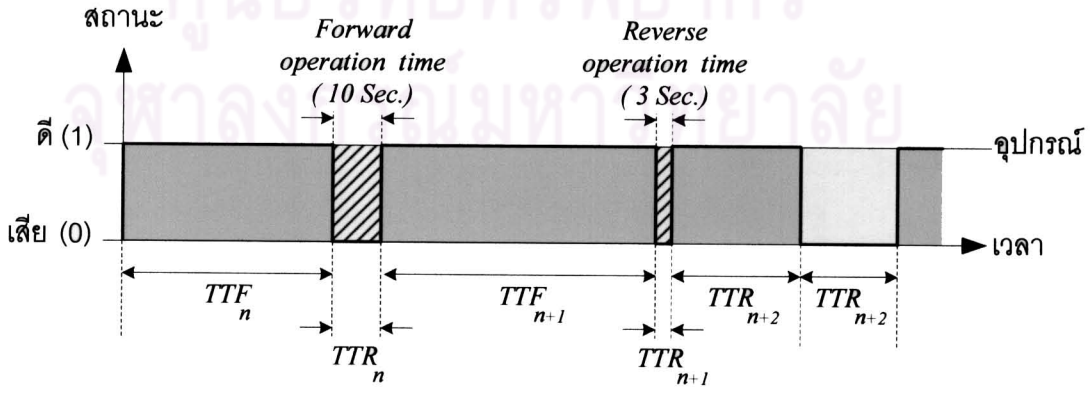
รูปที่ 4.13 เอทีเอสที่มีลักษณะการทำงานแบบเดินหน้า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.14 เอทีเอสที่มีลักษณะการทำงานแบบย้อนกลับ

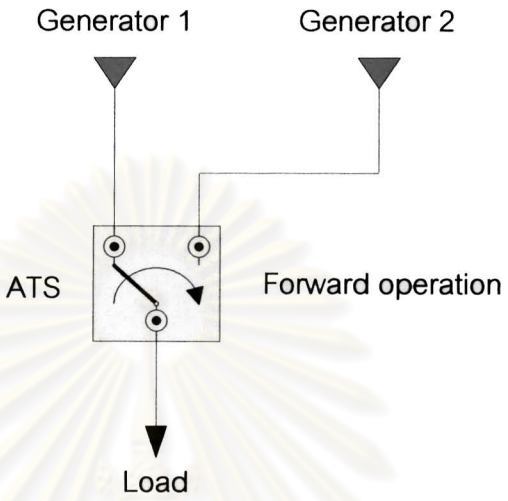
จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 จะเห็นได้ว่าเอทีเอสจะมีลักษณะการทำงาน 2 ลักษณะ คือ ลักษณะการทำงานแบบเดินหน้า (Forward operation) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการทำงานในลักษณะนี้จะใช้ระยะเวลาในการสวิตช์หรือที่เรียกว่า ช่วงระยะเวลาการทำงานในลักษณะเดินหน้า (Forward operation time) ประมาณ 10 วินาที และลักษณะการทำงานแบบย้อนกลับ (Reverse operation) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการทำงานในลักษณะนี้จะใช้ระยะเวลาในการสวิตช์หรือที่เรียกว่า ช่วงระยะเวลาการทำงานในลักษณะย้อนกลับ (Reverse operation time) ประมาณ 3 วินาที สาเหตุของการที่ช่วงระยะเวลาการทำงานในลักษณะเดินหน้ามีค่ามากกว่าช่วงระยะเวลาการทำงานในลักษณะย้อนกลับเพราะต้องรอช่วงจังหวะของการซิงโครไนส์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบนั่นเอง ดังนั้นเราจึงสามารถจำลองลักษณะการทำงานของเอทีเอสได้ดังแสดงในรูปที่ 4.15



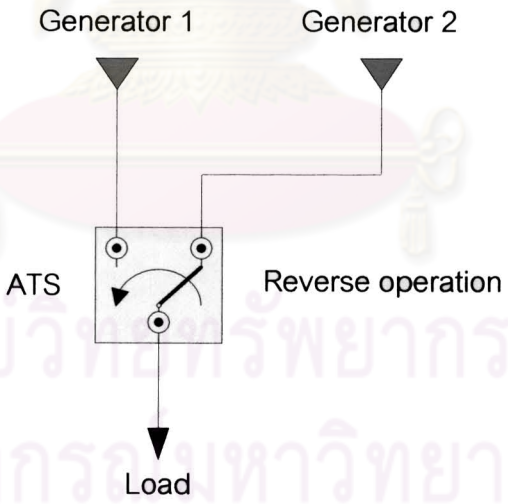
รูปที่ 4.15 แบบจำลองการทำงานของเอทีเอส

- ส่งผ่านระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การทำงานของเอทีเอส (Automatic transfer switch: ATS) ที่ถูกใช้งานในลักษณะส่งผ่านระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17



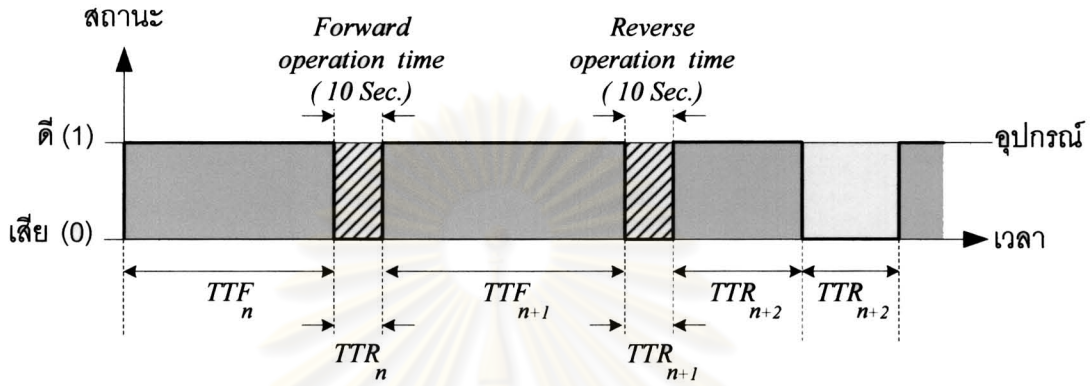
รูปที่ 4.16 เอทีเอสที่มีลักษณะการทำงานแบบเดินหน้า



รูปที่ 4.17 เอทีเอสที่มีลักษณะการทำงานแบบย้อนกลับ

จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 จะเห็นได้ว่าเอทีเอสจะมีลักษณะการทำงาน 2 ลักษณะ คือ ลักษณะการทำงานแบบเดินหน้า (Forward operation) และลักษณะการทำงานแบบย้อนกลับ (Reverse operation) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะใช้ระยะเวลาในการสวิตช์หรือที่เรียกว่า ช่วงระยะเวลา

การทำงานในลักษณะเดินหน้า (Forward operation time) และช่วงระยะเวลาการทำงานในลักษณะย้อนกลับ (Reverse operation time) ประมาณ 10 วินาที เพราะต้องรอช่วงจังหวะของการซิงโครไนส์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ ดังนั้นเราจึงสามารถจำลองลักษณะการทำงานของเอทีเอสได้ดังแสดงในรูปที่ 4.18



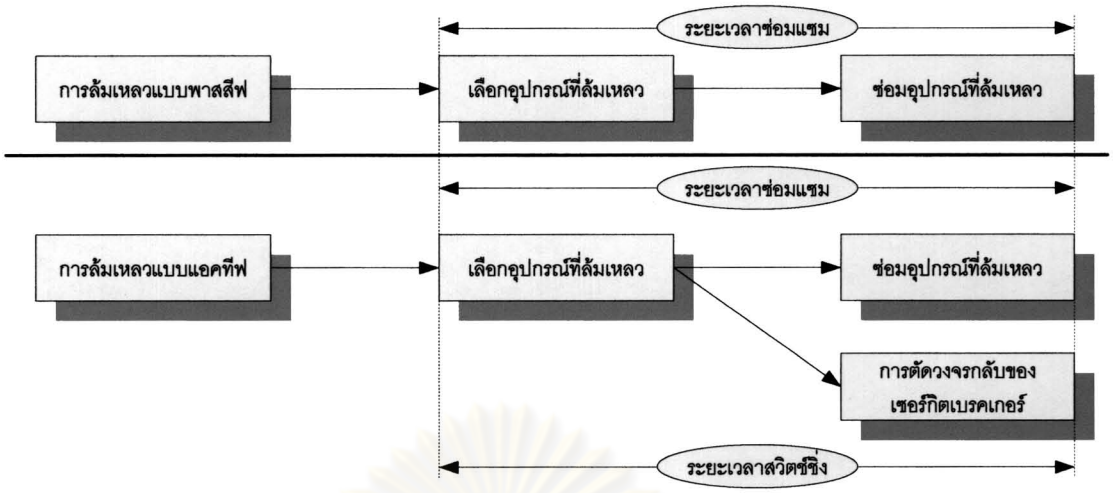
รูปที่ 4.18 แบบจำลองการทำงานของเอทีเอส

4.5 ลักษณะการล้มเหลวของอุปกรณ์ [2,7]

ความล้มเหลวแบบพาสสีฟ (Passive failure) เป็นความล้มเหลวของอุปกรณ์ แต่ไม่ส่งผลต่ออุปกรณ์ที่เหลือ ซึ่งยังคงทำงานได้ตามปกติ อุปกรณ์ที่เกิดการล้มเหลวดังกล่าวสามารถทำให้ทำงานได้อีกโดยการซ่อมหรือเปลี่ยนอุปกรณ์ตัวที่เกิดการล้มเหลวนั้น

ความล้มเหลวแบบแอคทีฟ (Active failure) เป็นความล้มเหลวของอุปกรณ์ที่เป็นเหตุให้เกิดการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในเขตการป้องกันปฐมภูมิ (Primary protection zone) ที่อยู่รอบ ๆ อุปกรณ์ที่ล้มเหลวนั้น ในทางปฏิบัติหลังจากที่อุปกรณ์ป้องกันทำงานเพื่อจัดการกับเหตุการณ์ดังกล่าวได้เรียบร้อยแล้ว ก็จะทำการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์และส่วนที่ผิดปกติออกไป ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ที่ล้มเหลวแบบแอคทีฟจะถูกแยกออกไปและเซอร์กิตเบรคเกอร์จะปิดวงจรกลับมาอีกครั้ง ทำให้การทำงานทั้งหมดหรือบางส่วนกลับคืนมา จะสังเกตได้ว่าอุปกรณ์ที่ล้มเหลวนั้นจะกลับมาใช้งานได้อีกครั้งจะต้องมีการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนแปลงทดแทนด้วยเช่นกัน

ตามหลักการข้างต้นสามารถอธิบายความแตกต่างระหว่างการล้มเหลวแบบแอคทีฟและการล้มเหลวแบบพาสสีฟได้ด้วยแผนภาพรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 แผนผังการล้มเหลวแบบพาสสีฟและแบบแอคทีฟ

ระยะเวลาซ่อมแซม (Repair time) เป็นระยะเวลาซ่อมอุปกรณ์ที่ล้มเหลวหรือระยะเวลาที่เกิดการล้มเหลว คือ เป็นช่วงเวลานับตั้งแต่เกิดการล้มเหลวจนถึงเวลาที่อุปกรณ์กลับมาใช้งานได้อีกครั้งโดยการซ่อมหรือเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ [7]

ระยะเวลาสวิตช์ชิ่ง (Switching time) เป็นระยะเวลาที่นับจากเริ่มเปิดวงจรของอุปกรณ์ป้องกันหรือสวิตช์ตัดตอน เนื่องจากการขัดข้องจนกระทั่งทำการปิดวงจรกลับคืนได้สำเร็จ [7]

แบบจำลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์อาจมีการล้มเหลวและกลับคืนสู่การทำงานแบบต่าง ๆ กัน หากพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองดังกล่าวกับการทำงานจริงของอุปกรณ์นั้นจะพบว่าโดยทั่วไปอุปกรณ์จะทำงานในสถานะปกติ คือ สถานะที่ 1 แล้วต่อมาอาจล้มเหลวแบบแอคทีฟ เช่น เกิดการลัดวงจร ทำให้เข้าสู่สภาวะที่ 2 จากนั้นเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานสามารถทำการสวิตช์ชิ่งเพื่อนำอุปกรณ์ออกจากระบบซึ่งเปรียบเสมือนสถานะที่ 3 แล้วจึงทำการซ่อมแซมให้กลับมาใช้งานได้ตามปกติในสภาวะที่ 1 หรือบางกรณี จากการทำงานปกติในสภาวะที่ 1 อุปกรณ์อาจเกิดการล้มเหลวแบบพาสสีฟ เช่น การเปิดวงจรทำให้เข้าสู่สภาวะที่ 3 หลังจากนั้นจึงซ่อมแซมให้กลับมาสู่สภาวะที่ 1 อีกครั้ง หรือจากสภาวะที่ 1 อาจมีการซ่อมบำรุงทำให้เข้าสู่สภาวะที่ 4 หลังจากปฏิบัติงานเสร็จเรียบร้อยจึงกลับเข้าสู่สภาวะที่ 1 ตามเดิม [7]

อุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบการจัดอันดับเทียร์อาจไม่จำเป็นต้องมีสถานการณ์ทำงานครบทั้ง 4 สถานะตามแบบจำลองข้างต้น หากขึ้นอยู่กับการทำงานของแต่ละอุปกรณ์นั้น ๆ สำหรับเซอร์กิตเบรคเกอร์ซึ่งมีลักษณะการทำงานที่ซับซ้อนนั้นมีสถานการณ์ทำงานที่เป็นไปได้ทั้ง 4 สถานะ แต่โดยทั่วไปแล้วจะไม่มีการล้มเหลวแบบพาสสีฟทำให้แบบจำลอง 2 สถานะก็สามารถนำมาใช้จำลองพฤติกรรมการทำงานได้ [5]

บทที่ 5

หลักของการประเมินความเชื่อถือได้

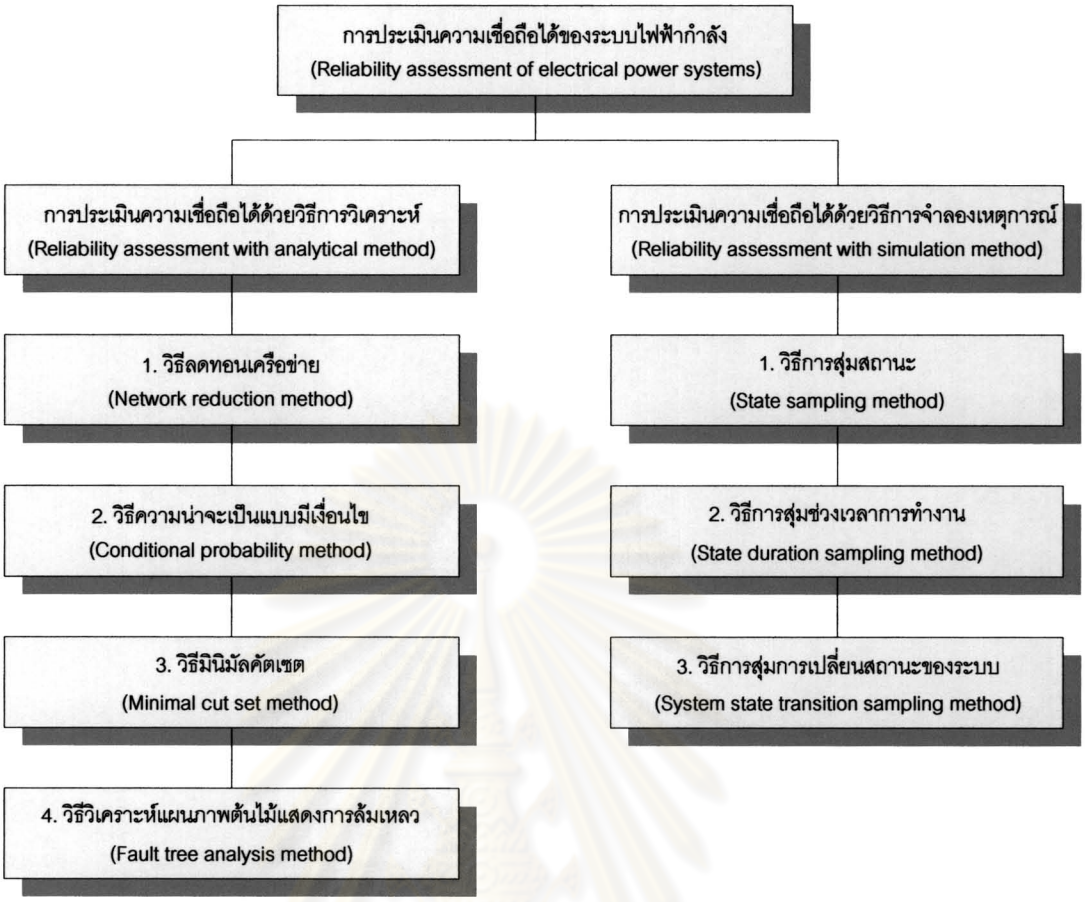
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและหลักการเบื้องต้นของการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะประกอบไปด้วยหัวข้อหลัก ๆ ได้แก่ ประเภทของการประเมินความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลัง การประเมินความเชื่อถือได้ด้วยวิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลโดยวิธีการสุ่มช่วงเวลาการทำงาน และเกณฑ์ของการหยุดการคำนวณ

5.1 ประเภทของการประเมินความเชื่อถือได้ [1,6,7]

การประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบ่งออกเป็น 2 วิธีการหลัก คือ วิธีการวิเคราะห์ (Analytical method) และวิธีการจำลองเหตุการณ์ (Simulation method) โดยแต่ละวิธีสามารถแบ่งออกเป็นวิธีการย่อยได้อีก คือ สำหรับวิธีการวิเคราะห์ที่นำมาใช้ในการคำนวณค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังนั้นสารถแบ่งออกได้เป็น 4 วิธี คือ วิธีลดทอนเครือข่าย (Network reduction method) วิธีความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข (Conditional probability method) วิธีมินิมัลคัตเซต (Minimal cut set method) และวิธีการวิเคราะห์แผนภาพต้นไม้แสดงการล้มเหลว (Fault tree analysis method) ในทำนองเดียวกันวิธีการจำลองเหตุการณ์ที่นำมาใช้ในการคำนวณค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี คือ วิธีการสุ่มสถานะ (State Sampling Method) วิธีการสุ่มช่วงเวลาการทำงาน (State duration sampling method) และวิธีวิธีสุดท้ายคือวิธีการสุ่มการเปลี่ยนสถานะของระบบ (System state transition sampling method) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ISBN 974883084



รูปที่ 5.1 วิธีการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง

วิธีการวิเคราะห์มีจุดด้อยเนื่องจาก การคำนวณจะมีความซับซ้อน และเสียเวลามากหากระบบมีขนาดใหญ่ขึ้น อย่างไรก็ตามวิธีการจำลองเหตุการณ์แม้ว่าจะต้องการเวลาในการคำนวณสูงแต่สามารถจัดการกับปัญหาที่ซับซ้อนได้ดี วิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลโดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการสุ่มผ่านแบบจำลองที่จำลองพฤติกรรมของระบบจริงโดยที่อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ทำงานในระบบจะมีพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันไป เช่น จำนวนครั้งที่เกิดการล้มเหลว ช่วงเวลาระหว่างการล้มเหลว ช่วงเวลาในการซ่อมแซม เป็นต้น โดยการสุ่มนั้นจะถูกกระทำซ้ำหลาย ๆ ครั้งจากกระบวนการดังกล่าวจะนำสู่การตรวจสอบและทำนายรูปแบบพฤติกรรมของระบบในช่วงเวลาที่จำลองเหตุการณ์ เพื่อที่จะได้ค่าการกระจายของความถี่หรือความน่าจะเป็นของดัชนีความเชื่อถือได้ต่างๆของระบบไฟฟ้ากำลัง และเป็นการประมาณค่าความคาดหวังหรือค่าเฉลี่ยของค่าดัชนีความเชื่อถือได้แบบต่าง ๆ

โดยการสุ่มแบบมอนติคาร์โลมี 3 แบบได้แก่ วิธีการสุ่มสถานะ (State sampling) ซึ่งเป็นการสุ่มแบบที่แต่ละสถานะไม่เกี่ยวเนื่องกัน (Non-sequential) วิธีการสุ่มช่วงเวลาการทำงาน

(State duration sampling) และวิธีสุดท้ายคือวิธีการสุ่มการเปลี่ยนสถานะของระบบ (System state transition sampling) ซึ่งเป็นการสุ่มที่แต่ละสถานะเกี่ยวเนื่องกัน (Sequential)

5.2 การสุ่มช่วงเวลาการทำงาน (State duration sampling) [3,6,7]

การสุ่มช่วงเวลาการทำงานเป็นการสุ่มโดยมีสมมติฐานให้ช่วงเวลาการทำงาน (T) ในแต่ละสถานะ เช่น สถานะดีหรือสถานะเสีย ซึ่งสถานะดีของอุปกรณ์เป็นการกระจายแบบเอ็กโพเนนเชียล (Exponential distribution) และสถานะเสียของอุปกรณ์เป็นการกระจายแบบปกติ (Normal distribution)

พิจารณาที่สถานะดีของอุปกรณ์ที่มีการกระจายแบบเอ็กโพเนนเชียล (Exponential distribution) ซึ่งมีรูปของฟังก์ชันความหนาแน่น (Density function) ตาม (5.1)

$$f_T(t) = \lambda e^{-\lambda t} \tag{5.1}$$

โดยที่

λ คือ อัตราการล้มเหลว

t คือ เวลา

ดังนั้น ค่าความไม่พร้อมมูล (U) ที่เวลา T สามารถคำนวณได้ตาม (5.2)

$$U = F_T(T) = \int_0^T \lambda e^{-\lambda T} = 1 - e^{-\lambda T} \tag{5.2}$$

จะได้

$$T = -\frac{1}{\lambda}\ln(1-U) \tag{5.3}$$

ในทำนองเดียวกัน หากเราสมมติให้ช่วงเวลาในการซ่อมแซมอุปกรณ์โดยเริ่มตั้งแต่อุปกรณ์เสียจนกลับมาใช้งานได้อีกครั้งมีการกระจายแบบปกติโดยสามารถคำนวณได้ตาม (5.4)

$$T = r + (Z \times \sigma_r) \tag{5.4}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่

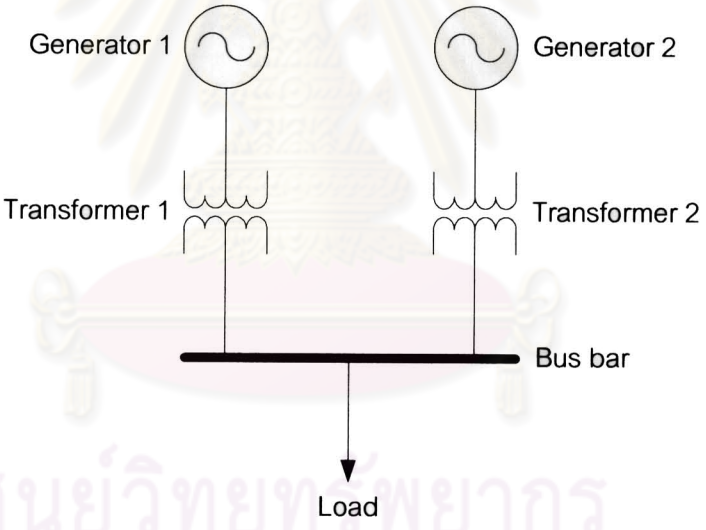
U คือ ตัวเลขสุ่มสำหรับการกระจายแบบเอ็กโพแนนเชียล
(Exponential uniform distributed random numbers)

Z คือ ตัวเลขสุ่มสำหรับการกระจายแบบปกติ
(Normally uniform distributed random numbers)

r คือ ระยะเวลาเฉลี่ยในการซ่อมแซมอุปกรณ์ มีค่าเท่ากับ $1/\mu$

σ_r คือ ความแปรปรวนของระยะเวลาซ่อมแซม มีค่าเท่ากับ $0.1 \times r$

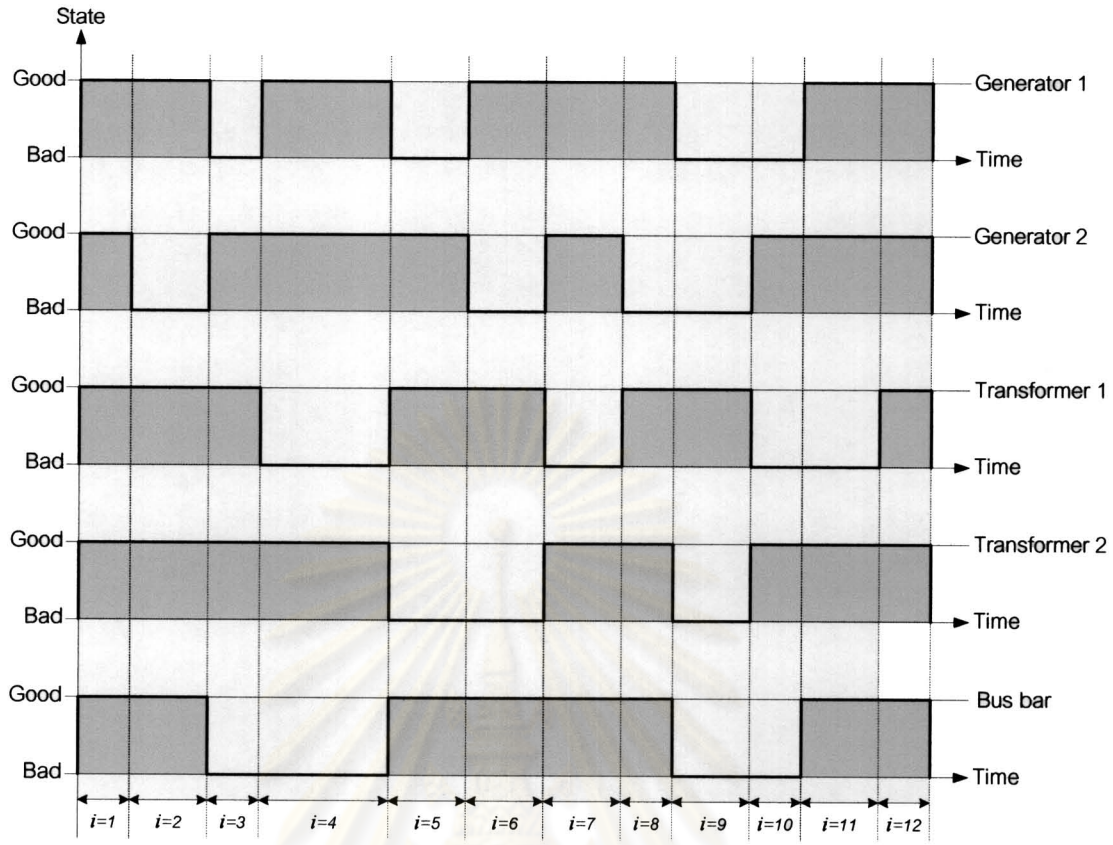
ด้วยวิธีการดังกล่าวจะสามารถสุ่มช่วงระยะเวลาการทำงานของแต่ละอุปกรณ์ที่อยู่ในสถานะหนึ่ง ๆ จนกระทั่งเกิดการเปลี่ยนสถานะขึ้น และเมื่อทำการสุ่มซ้ำจนครบทุกอุปกรณ์และครบระยะเวลาที่ต้องการก็จะได้ข้อมูลของระบบ ซึ่งระบบตัวอย่างสำหรับวิธีการสุ่มช่วงระยะเวลาการทำงานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ระบบตัวอย่างสำหรับวิธีการสุ่มช่วงเวลาการทำงาน

จากระบบตัวอย่างในรูปที่ 5.2 เมื่อทำการสุ่มช่วงระยะเวลาการทำงานของแต่ละอุปกรณ์จนครบก็จะได้ข้อมูลของระบบซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.3 ช่วงเวลาการทำงานของระบบตัวอย่างที่สุ่มได้

วิธีการสุ่มช่วงเวลาการทำงานในแต่ละสถานะของแต่ละอุปกรณ์มีข้อดี คือ สามารถจำลองลักษณะการกระจายของสถานการณ์ทำงานของอุปกรณ์โดยใช้การกระจายความน่าจะเป็นในการทำงานของอุปกรณ์แบบใดก็ได้ และสามารถคำนวณดัชนีเกี่ยวกับความถี่และระยะเวลาได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ แต่ก็มีข้อเสีย คือ จะต้องใช้หน่วยความจำของคอมพิวเตอร์สูงกว่า ใช้เวลาการคำนวณมากกว่า และมีความซับซ้อนสูง แต่ในปัจจุบันสมรรถนะของคอมพิวเตอร์สูงขึ้นมาก ดังนั้นข้อเสียดังกล่าวจึงสามารถละเลยได้ [7]

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้วิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลโดยวิธีการสุ่มช่วงเวลาการทำงาน (State duration sampling) เพราะสามารถทำการจำลองลักษณะการกระจายของสถานการณ์การทำงานของอุปกรณ์โดยใช้การกระจายแบบใดก็ได้ และสามารถคำนวณดัชนีที่เกี่ยวกับความถี่และระยะเวลาได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

5.3 เกณฑ์การหยุดการคำนวณ (Stopping criteria) [6]

สำหรับเกณฑ์การหยุดการคำนวณของการจำลองเหตุการณ์ตามวิธีมอนติคาร์โลนั้นนิยมใช้เกณฑ์สองแบบ คือ การกำหนดจำนวนรอบสูงสุดในการทำงาน และการกำหนดค่าสูงสุดของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative uncertainty) ของดัชนีที่ยอมรับได้ไว้ที่ค่าหนึ่ง การคำนวณความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์แสดงได้ตาม (5.5)

$$\textit{ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์} = \frac{S}{\hat{x}\sqrt{n}} \qquad (5.5)$$

โดยที่

S คือ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน $(S.D.)$ ของดัชนี

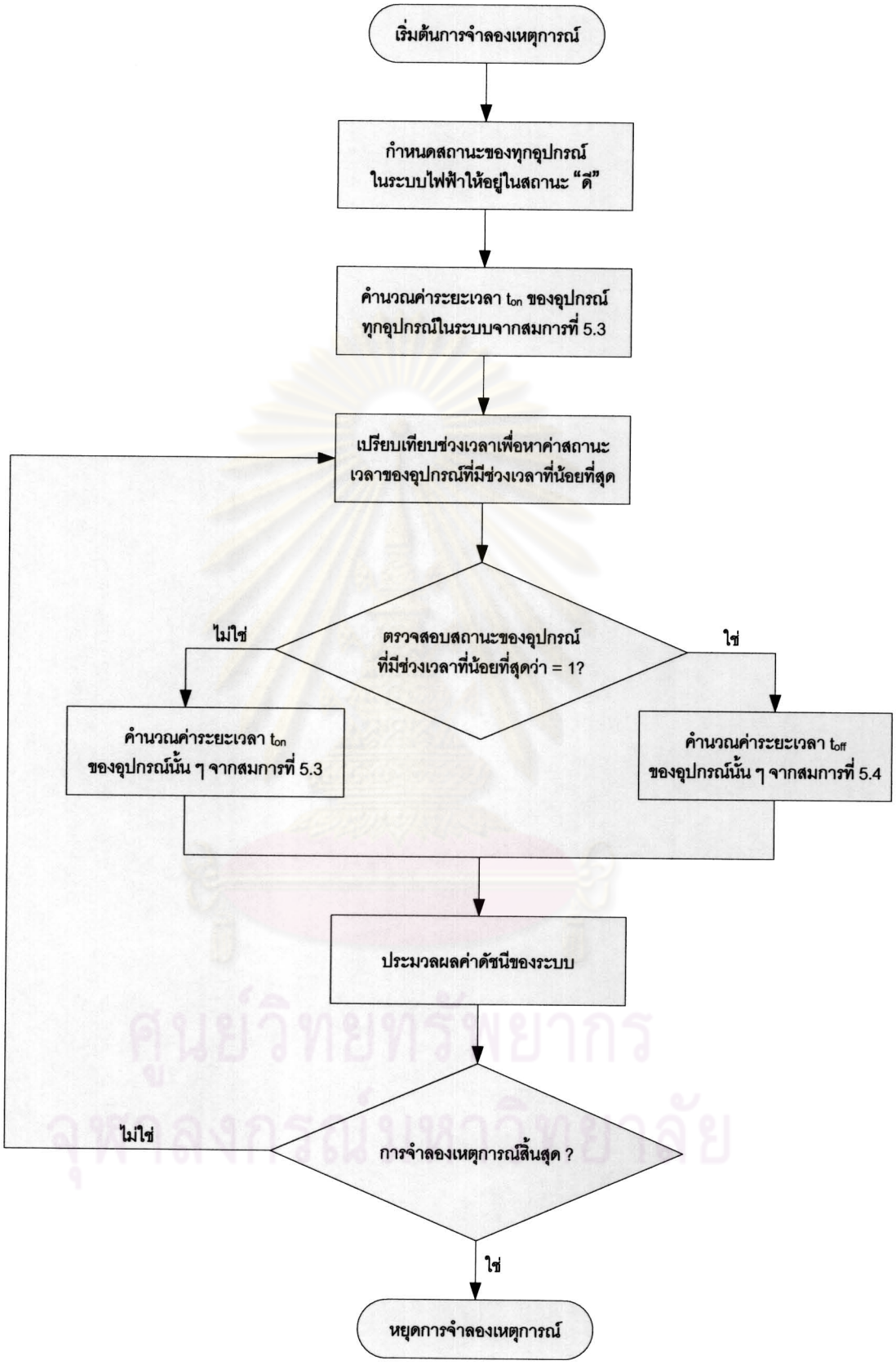
$\hat{x}$ คือ ค่าเฉลี่ย $(Mean)$ ของดัชนี

n คือ จำนวนครั้งของการสุ่ม

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกำหนดค่าสูงสุดของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ที่ยอมรับได้ เป็นเกณฑ์สำหรับหยุดการคำนวณ

ขั้นตอนการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลโดยวิธีการสุ่มช่วงเวลาการทำงานที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.4 ขั้นตอนการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลโดยวิธีการสุ่มช่วงเวลาการทำงาน

บทที่ 6

การตรวจสอบความล้มเหลวของระบบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการตรวจสอบความล้มเหลวของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะประกอบไปด้วยหัวข้อหลัก ๆ ได้แก่ วิธีการและขั้นตอนของการตรวจสอบความล้มเหลวของระบบ และวิธีการพิจารณาอุปกรณ์ที่มีลักษณะการต่อแบบขนานกัน

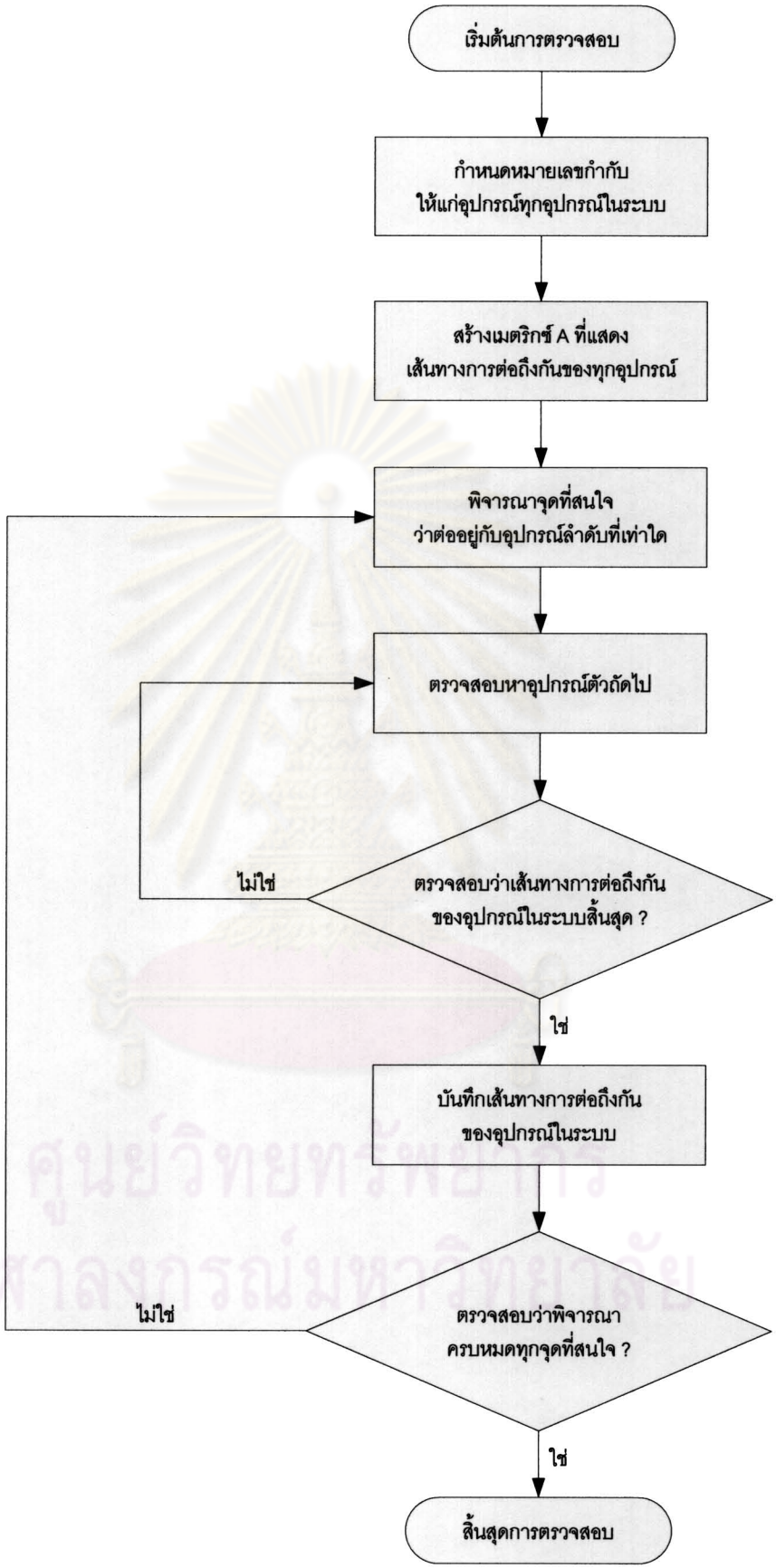
6.1 การตรวจสอบความล้มเหลวของระบบ

ในการพิจารณาระบบใดระบบหนึ่ง เราจำเป็นต้องทราบข้อมูลเบื้องต้นต่าง ๆ ของระบบ เช่น โครงสร้างของระบบ จำนวนอุปกรณ์ภายในระบบ จำนวนแหล่งจ่ายของระบบ และจำนวนจุดที่ต้องการพิจารณา เป็นต้น ที่สำคัญ คือ เราต้องทราบว่าในขณะที่อุปกรณ์ภายในระบบเกิดเหตุขัดข้องหรือล้มเหลวขึ้นแล้ว จะส่งผลกระทบให้จุดที่เรากำลังทำการพิจารณาเกิดการล้มเหลวขึ้นตามไปด้วยหรือไม่ ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการเข้ามาตรวจสอบความล้มเหลวของระบบ

เมื่อเราทราบข้อมูลที่จุดที่เราต้องการพิจารณา ได้แก่ เวลาที่ระบบสามารถทำงานได้อย่างปกติ จำนวนครั้งที่ระบบเกิดการล้มเหลว และเวลาที่ใช้ในการซ่อมแซมอุปกรณ์ที่เกิดการล้มเหลวจนกลับมาใช้งานได้อีกครั้ง ในช่วงเวลาหนึ่งที่เราต้องการพิจารณา ก็จะสามารถคำนวณค่าดัชนีต่างที่เราต้องการทราบ ณ จุดโหลดนั้นได้ เช่น อัตราการล้มเหลวของระบบ เป็นต้น

ขั้นตอนที่ใช้ในการตรวจสอบความล้มเหลวของระบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.1 โดยจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า ระบบที่จะทำการพิจารณาต้องมีโครงสร้างของระบบเป็นแบบเรเดียล (Radial) เท่านั้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



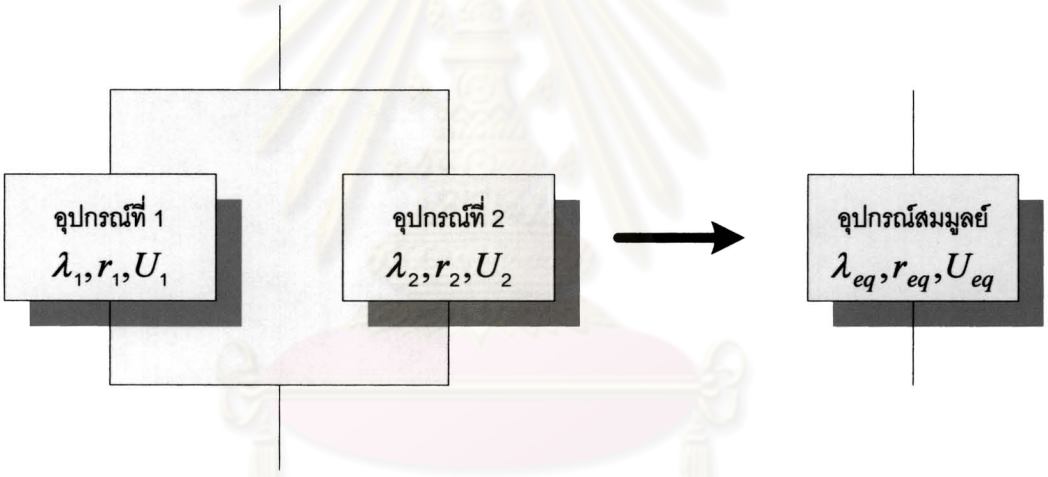
รูปที่ 6.1 ขั้นตอนการตรวจสอบความล้มเหลวของระบบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.2 อุปกรณ์ที่มีลักษณะการต่อแบบขนาน [2]

เนื่องจากว่าวิธีการตรวจสอบความล้มเหลวของระบบดังกล่าวจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ว่าระบบที่จะทำการตรวจสอบต้องมีความเป็นเรเดียล (Radial) เท่านั้น ดังนั้นในกรณีที่ระบบนั้นมีอุปกรณ์สำรอง เช่น เครื่องสำรองไฟฟ้า (Uninterruptible power supply : UPS) เป็นต้น จำเป็นจะต้องคำนวณหาอัตราการล้มเหลวสมมูลย์ (Lamda equivalent : λ_{eq}) ระยะเวลาการซ่อมแซมสมมูลย์ (Repair time equivalent : r_{eq}) และค่าความไม่พร้อมมูลสมมูลย์ (Annual outage time equivalent or Unavailability equivalent : U_{eq}) ของอุปกรณ์ชุดนั้นก่อน หรืออาจกล่าวได้ว่าต้องทำการคำนวณในส่วนของอุปกรณ์ที่มีลักษณะการต่อที่ขนานกันนั่นเอง โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

ในกรณีที่มีอุปกรณ์ต่อขนานกัน 2 ตัว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.2 และสามารถคำนวณค่าดัชนีต่าง ๆ ได้ดังตาม (6.1), (6.2) และ (6.3)



รูปที่ 6.2 อุปกรณ์ต่อขนานกัน 2 ตัว

$$\lambda_{eq} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (r_1 + r_2)}{1 + \lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2} \tag{6.1}$$

$$r_{eq} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \tag{6.2}$$

$$U_{eq} = \lambda_{eq} r_{eq} \tag{6.3}$$

โดยที่

λ_1 คือ อัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ 1

r_1 คือ ช่วงระยะเวลาการซ่อมแซมของอุปกรณ์ที่ 1

U_1 คือ ค่าความไม่พร้อมมูลของอุปกรณ์ที่ 1

λ_2 คือ อัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ 2

r_2 คือ ช่วงระยะเวลาการซ่อมแซมของอุปกรณ์ที่ 2

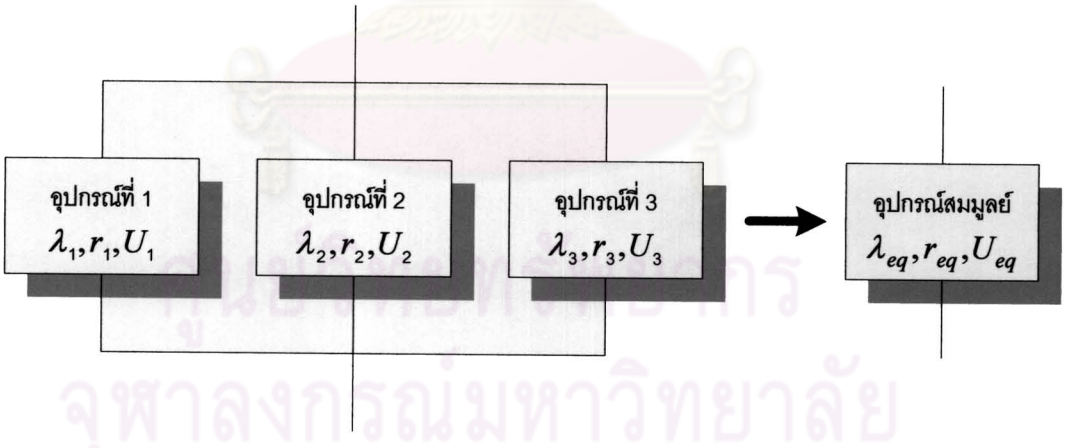
U_2 คือ ค่าความไม่พร้อมมูลของอุปกรณ์ที่ 2

λ_{eq} คือ อัตราการล้มเหลวสมมูลย์สำหรับอุปกรณ์ที่มีลักษณะการต่อขนานกัน 2 อุปกรณ์

r_{eq} คือ ช่วงระยะเวลาการซ่อมแซมสมมูลย์สำหรับอุปกรณ์ที่มีลักษณะการต่อขนานกัน 2 อุปกรณ์

U_{eq} คือ ค่าความไม่พร้อมมูลสมมูลย์สำหรับอุปกรณ์ที่มีลักษณะการต่อขนานกัน 2 อุปกรณ์

ในกรณีที่มีอุปกรณ์ต่อขนานกัน 3 ตัว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.3 และสามารถคำนวณค่าดัชนีต่าง ๆ ได้ตาม (6.4), (6.5) และ (6.6)



รูปที่ 6.3 อุปกรณ์ต่อขนานกัน 3 ตัว

$$\lambda_{eq} = \lambda_1\lambda_2\lambda_3(r_1r_2 + r_2r_3 + r_3r_1) \tag{6.4}$$

$$r_{eq} = \frac{r_1r_2r_3}{r_1r_2 + r_2r_3 + r_3r_1} \tag{6.5}$$

$$U_{eq} = \lambda_{eq} r_{eq} \quad (6.6)$$

โดยที่

λ_1 คือ อัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ 1

r_1 คือ ช่วงระยะเวลาการซ่อมแซมของอุปกรณ์ที่ 1

U_1 คือ ค่าความไม่พร้อมมูลของอุปกรณ์ที่ 1

λ_2 คือ อัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ 2

r_2 คือ ช่วงระยะเวลาการซ่อมแซมของอุปกรณ์ที่ 2

U_2 คือ ค่าความไม่พร้อมมูลของอุปกรณ์ที่ 2

λ_3 คือ อัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ 3

r_3 คือ ช่วงระยะเวลาการซ่อมแซมของอุปกรณ์ที่ 3

U_3 คือ ค่าความไม่พร้อมมูลของอุปกรณ์ที่ 3

λ_{eq} คือ อัตราการล้มเหลวสมมูลย์สำหรับอุปกรณ์ที่มีลักษณะการต่อขนานกัน 3 อุปกรณ์

r_{eq} คือ ช่วงระยะเวลาการซ่อมแซมสมมูลย์สำหรับอุปกรณ์ที่มีลักษณะการต่อขนานกัน 3 อุปกรณ์

U_{eq} คือ ค่าความไม่พร้อมมูลสมมูลย์สำหรับอุปกรณ์ที่มีลักษณะการต่อขนานกัน 3 อุปกรณ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

ดัชนีสากลความมั่นคงของการจัดอันดับเทียร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงดัชนีสากลความมั่นคงของการจัดอันดับเทียร์ซึ่งประยุกต์มาจากดัชนีความมั่นคงของระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยจะประกอบไปด้วยหัวข้อหลัก ๆ ได้แก่ ประเภทของดัชนีสากลความมั่นคงของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งสามารถแบ่งแยกออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด และดัชนีความเชื่อถือได้ของผู้ใช้ไฟฟ้า และกล่าวถึงรายละเอียดของสมการต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าดัชนีดังกล่าว

7.1 ประเภทของดัชนีสากลความมั่นคงของระบบจำหน่ายไฟฟ้า [3,7]

ในการคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบการจัดอันดับเทียร์นั้นจะใช้หลักการเดียวกันกับการคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยจะต้องคำนึงถึงสถิติการทำงานหรือการคาดการณ์ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ประกอบกันขึ้นเป็นระบบว่าจะเกิดเหตุขัดข้องขึ้นบ่อยครั้งหรือเมื่อเกิดเหตุขัดข้องขึ้นแล้วต้องใช้เวลาซ่อมแซมนานหรือไม่ เพื่อที่จะสามารถทำการจ่ายไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าได้ตามปกติอีกครั้ง ซึ่งดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายที่นิยมพิจารณาสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด และ ดัชนีความเชื่อถือได้ของผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 7.1 ดัชนีสากลความมั่นคงของระบบจำหน่ายไฟฟ้า

7.2 ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด [3,7]

ดัชนีความเชื่อถือได้พื้นฐาน ณ จุดโหลดที่นิยมใช้ ได้แก่

1. อัตราการล้มเหลวเฉลี่ย (Average failure rate : λ) หมายถึง ความถี่ของการล้มเหลวหรือการไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าได้ ณ จุดโหลดตามที่กำหนดไว้โดยค่าเฉลี่ย ความถี่ดังกล่าวมักจะมีหน่วยเป็นจำนวนครั้งต่อหนึ่งปี
2. ระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับโดยเฉลี่ย (Average outage time : r) หมายถึง ช่วงระยะเวลาเฉลี่ยที่เกิดเหตุขัดข้องหรือเกิดไฟฟ้าดับ ณ จุดโหลดนั้น ในแต่ละครั้งจนระบบกลับเข้าสู่สภาวะปกติ
3. ระยะเวลาเฉลี่ยที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับโดยเฉลี่ยในหนึ่งปี (Average annual outage time : U) หมายถึง ช่วงระยะเวลาที่เกิดเหตุขัดข้องรวมกันทั้งหมดในหนึ่งปี

การคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ณ จุดโหลด ด้วยวิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลจะมีสมการในการคำนวณดังต่อไปนี้

$$\lambda_j = \frac{N_j}{\sum T_{uj}} \tag{7.1}$$

$$r_j = \frac{\sum T_{dj}}{N_j} \tag{7.2}$$

$$U_j = \frac{\sum T_{dj}}{\sum T_{uj} + \sum T_{dj}} \tag{7.3}$$

โดยที่

T_u คือ เวลาที่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่โหลดได้

T_d คือ เวลาที่ไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่โหลดได้

N คือ จำนวนครั้งที่เสียในช่วงเวลาที่ทำการสุ่ม

λ คือ อัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์

U คือ ระยะเวลาที่เกิดเหตุขัดข้องของอุปกรณ์ในหนึ่งปี

r คือ ระยะเวลาที่เกิดเหตุขัดข้องของอุปกรณ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7.3 ดัชนีความเชื่อถือได้ของผู้ใช้ไฟฟ้า [3,7]

จากค่าดัชนีพื้นฐาน ณ จุดโหลด จะนำไปคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ที่อ้างอิงผู้ใช้ไฟฟ้า (Customer-oriented index) ซึ่งเป็นดัชนีความเชื่อถือได้ที่บอกถึงค่าเฉลี่ยของจำนวนครั้งที่ไฟดับและจำนวนเวลาที่ไฟดับต่อผู้ใช้ไฟฟ้า 1 ราย ซึ่งทำให้สามารถเปรียบเทียบกันระหว่างระบบต่าง ๆ ได้ และยังทำให้สามารถตั้งเป้าหมายจำนวนครั้งหรือเวลาที่จะปรับปรุงให้ดีขึ้นและดำเนินการให้เป็นไปตามเป้าหมายได้ ดัชนีดังกล่าว ได้แก่

1. *SAIFI* (System average interruption frequency index) หมายถึง ดัชนีแสดงความถี่ของการเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับของระบบโดยเฉลี่ย มีหน่วยเป็น ครั้ง/ราย/ปี โดยสามารถคำนวณได้ตาม (7.4)

$$SAIFI = \frac{\textit{ผลรวมของจำนวนครั้งที่เกิดไฟดับที่ผู้ใช้ไฟแต่ละรายตลอดปี}}{\textit{จำนวนผู้ใช้ไฟทั้งหมด}}$$

$$SAIFI = \frac{\sum_{i \in R} \lambda_i N_i}{\sum_{i \in R} N_i} \qquad (7.4)$$

โดยที่

λ คือ อัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์

N คือ จำนวนผู้ใช้ไฟที่ต่อ ณ จุดโหลด

i คือ จุดโหลดลำดับที่ i

2. *SAIDI* (System average interruption duration index) หมายถึง ดัชนีแสดงช่วงระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับของระบบโดยเฉลี่ย มีหน่วยเป็น ชั่วโมง/ราย/ปี โดยสามารถคำนวณได้ตาม (7.5)

$$SAIDI = \frac{\textit{ผลรวมของระยะเวลาที่เกิดไฟดับที่ผู้ใช้ไฟแต่ละรายตลอดปี}}{\textit{จำนวนผู้ใช้ไฟทั้งหมด}}$$

$$SAIDI = \frac{\sum_{i \in R} U_i N_i}{\sum_{i \in R} N_i} \quad (7.5)$$

โดยที่

U คือ ระยะเวลาที่เกิดเหตุขัดข้องของอุปกรณ์ในหนึ่งปี

N คือ จำนวนผู้ใช้ไฟที่ต่อ ณ จุดโหลด

i คือ จุดโหลดลำดับที่ i

3. *CAIFI* (Customer average interruption frequency index) หมายถึง ดัชนีแสดงความถี่ของการเกิดเหตุการณ์ไฟดับที่ผู้ใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ย มีหน่วยเป็น ครั้ง/ราย/ปี โดยสามารถคำนวณได้ตาม (7.6)

$$CAIFI = \frac{\textit{ผลรวมของจำนวนครั้งที่เกิดไฟดับที่ผู้ใช้ไฟแต่ละรายตลอดปี}}{\textit{จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่เกิดไฟดับทั้งหมด}}$$

$$CAIFI = \frac{\sum_{i \in R} \lambda_i N_i}{\sum_{i \in R} M_i} \quad (7.6)$$

โดยที่

λ คือ อัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์

N คือ จำนวนผู้ใช้ไฟที่ต่อ ณ จุดโหลด

M คือ จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่เกิดไฟดับ

i คือ จุดโหลดลำดับที่ i

4. *CAIDI* (Customer average interruption duration index) หมายถึง ดัชนีแสดงช่วงเวลาของการเกิดเหตุการณ์ไฟดับที่ผู้ใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ย มีหน่วยเป็น ชั่วโมง/ครั้ง โดยสามารถคำนวณได้ตาม (7.7)

$$CAIDI = \frac{\textit{ผลรวมของระยะเวลาที่เกิดไฟดับที่ผู้ใช้ไฟแต่ละรายตลอดปี}}{\textit{ผลรวมของจำนวนครั้งที่เกิดไฟดับที่ผู้ใช้ไฟแต่ละรายตลอดปี}}$$

$$CAIDI = \frac{\sum_{i \in R} U_i N_i}{\sum_{i \in R} \lambda_i N_i} = \frac{SAIDI}{SAIFI} \qquad (7.7)$$

โดยที่

U คือ ระยะเวลาที่เกิดเหตุขัดข้องของอุปกรณ์ในหนึ่งปี

λ คือ อัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์

N คือ จำนวนผู้ใช้ไฟที่ต่อ ณ จุดโหลด

i คือ จุดโหลดลำดับที่ i

5. *ASAI* (Average service availability index) หมายถึง ดัชนีแสดงการมีไฟฟ้าให้บริการแก่ผู้ใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ย โดยสามารถคำนวณได้ตาม (7.8)

$$ASAI = \frac{\text{ผลรวมของจำนวนชั่วโมงที่มีไฟฟ้าให้บริการแก่ผู้ใช้ไฟแต่ละราย}}{\text{ผลรวมของจำนวนชั่วโมงที่ผู้ใช้ไฟแต่ละรายต้องการไฟฟ้า}}$$

$$ASAI = \frac{\sum_{i \in R} 8760 N_i - \sum_{i \in R} U_i N_i}{\sum_{i \in R} 8760 N_i} \qquad (7.8)$$

โดยที่

U คือ ระยะเวลาที่เกิดเหตุขัดข้องของอุปกรณ์ในหนึ่งปี

N คือ จำนวนผู้ใช้ไฟที่ต่อ ณ จุดโหลด

i คือ จุดโหลดลำดับที่ i

6. *ASUI* (Average service unavailability index) หมายถึง ดัชนีแสดงการไม่มีไฟฟ้าให้บริการแก่ผู้ใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ย โดยสามารถคำนวณได้ตาม (7.9)

$$ASUI = \frac{\text{ผลรวมของจำนวนชั่วโมงที่ไม่มีไฟฟ้าให้บริการแก่ผู้ใช้ไฟแต่ละราย}}{\text{ผลรวมของจำนวนชั่วโมงที่ผู้ใช้ไฟแต่ละรายต้องการไฟฟ้า}}$$

$$ASUI = \frac{\sum_{i \in R} U_i N_i}{\sum_{i \in R} 8760 N_i} \qquad (7.9)$$

โดยที่

U คือ ระยะเวลาที่เกิดเหตุขัดข้องของอุปกรณ์ในหนึ่งปี

N คือ จำนวนผู้ใช้ไฟที่ต่อ ณ จุดโหลด

i คือ จุดโหลดลำดับที่ i

7. ENS (Energy not supplied) หมายถึง ดัชนีแสดงจำนวนพลังงานไฟฟ้าที่ไม่ได้จ่ายให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้า มีหน่วยเป็น กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี โดยค่าดัชนีแสดงจำนวนพลังงานไฟฟ้าที่ไม่ได้จ่ายให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถทำการคำนวณได้ตาม (7.10)

$$ENS = \textit{ผลรวมของจำนวนพลังงานไฟฟ้าที่ไม่ได้รับการจ่ายให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้า}$$

$$ENS = \sum_{i \in R} P_{ai} U_i \qquad (7.10)$$

โดยที่

U คือ ระยะเวลาที่เกิดเหตุขัดข้องของอุปกรณ์ในหนึ่งปี

P คือ โหลดเฉลี่ยที่จุดโหลด i

i คือ จุดโหลดลำดับที่ i

8. $AENS$ (Average energy not supplied) หมายถึง ดัชนีแสดงจำนวนพลังงานไฟฟ้าที่ไม่ได้จ่ายให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ย มีหน่วยเป็น กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ราย/ปี โดยสามารถคำนวณได้ตาม (7.11)

$$AENS = \frac{\textit{ผลรวมของจำนวนพลังงานไฟฟ้าที่ไม่ได้รับการจ่ายให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้า}}{\textit{จำนวนผู้ใช้ไฟทั้งหมด}}$$

$$AENS = \frac{ENS}{\sum_{i \in R} N_i} \qquad (7.11)$$

โดยที่

ENS คือ ผลรวมของจำนวนพลังงานไฟฟ้าที่ไม่ได้รับการจ่ายให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้า

N คือ จำนวนผู้ใช้ไฟที่ต่อ ณ จุดโหลด

i คือ จุดโหลดลำดับที่ i

9. $ACCI$ (Average customer curtailment index) หมายถึง ดัชนีแสดงจำนวนพลังงานไฟฟ้าที่ผู้ใช้ไฟฟ้าต้องการจริงแต่ขาดหายไปในช่วงเวลาที่เกิดการขัดข้องขึ้นหรือเกิดไฟดับต่อผู้ใช้ไฟฟ้า 1 รายโดยเฉลี่ย มีหน่วยเป็น กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ราย/ปี โดยสามารถคำนวณได้ตาม (7.12)

$$ACCI = \frac{\textit{ผลรวมของจำนวนพลังงานไฟฟ้าที่ไม่ได้รับการจ่ายให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้า}}{\textit{จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่เกิดไฟดับทั้งหมด}}$$

$$ACCI = \frac{ENS}{\sum_{i \in R} M_i} \qquad (7.12)$$

โดยที่

ENS คือ ผลรวมของจำนวนพลังงานไฟฟ้าที่ไม่ได้รับการจ่ายให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้า

M คือ จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่เกิดไฟดับ

i คือ จุดโหลดลำดับที่ i

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

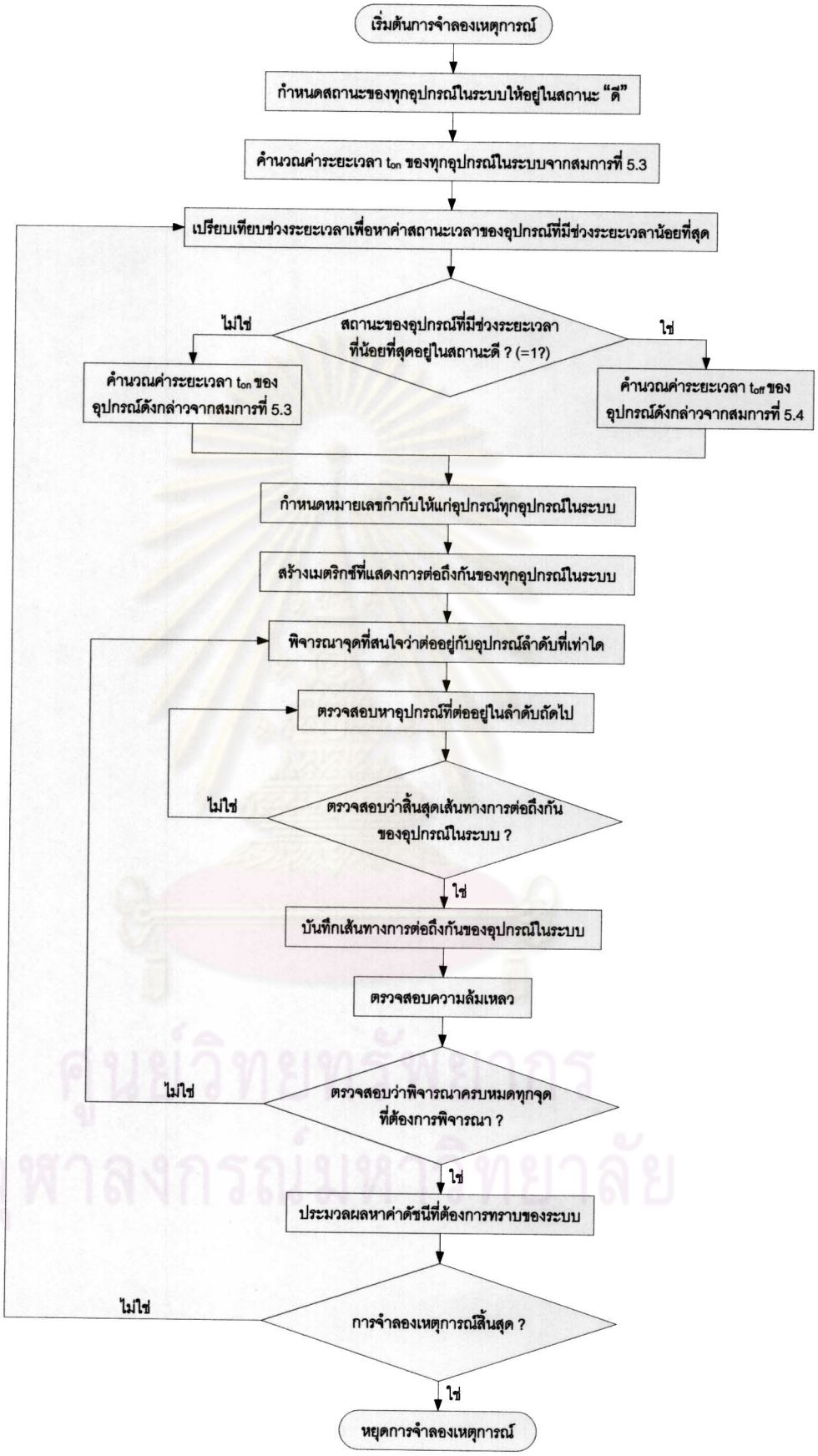
บทที่ 8

ตัวอย่างการประเมินความเชื่อถือได้ของการจัดอันดับเทียร์สำหรับการออกแบบระบบไฟฟ้า

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบระบบไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ตามทฤษฎีที่ได้ศึกษาจากบทที่ผ่านมาข้างต้น โดยขั้นตอนการประเมินความเชื่อถือได้สำหรับการออกแบบระบบไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.1

ระบบไฟฟ้าที่นำมาทดสอบสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีทั้งหมด 6 ระบบ โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ออกแบบระบบไฟฟ้าเพื่อที่จะสามารถรองรับโหลดตามที่ต้องการได้ โดยทำการออกแบบตามเงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ทั้ง 4 ระดับ เพื่อที่จะทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบว่าแตกต่างกันอย่างไร ได้แก่ ระบบทดสอบระบบที่ 1 ออกแบบระบบไฟฟ้าให้เป็นไปตามเงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1 (Tier 1), ระบบทดสอบระบบที่ 2 ออกแบบระบบไฟฟ้าให้เป็นไปตามเงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 2 (Tier 2), ระบบทดสอบระบบที่ 3 ออกแบบระบบไฟฟ้าให้เป็นไปตามเงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 (Tier 3) และระบบทดสอบระบบที่ 4 ทำการออกแบบระบบไฟฟ้าให้เป็นไปตามเงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 (Tier 4) ส่วนกรณีที่ 2 คือ เลือกระบบไฟฟ้าที่ได้มีการออกแบบไว้แล้วและเป็นไปตามเงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ โดยทำการทดสอบ 2 ระบบ ได้แก่ ระบบทดสอบระบบที่ 5 เป็นระบบไฟฟ้าของโรงงานแห่งหนึ่งซึ่งอยู่ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 และระบบทดสอบระบบที่ 6 เป็นระบบไฟฟ้าของโรงงานเช่นกันซึ่งอยู่ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



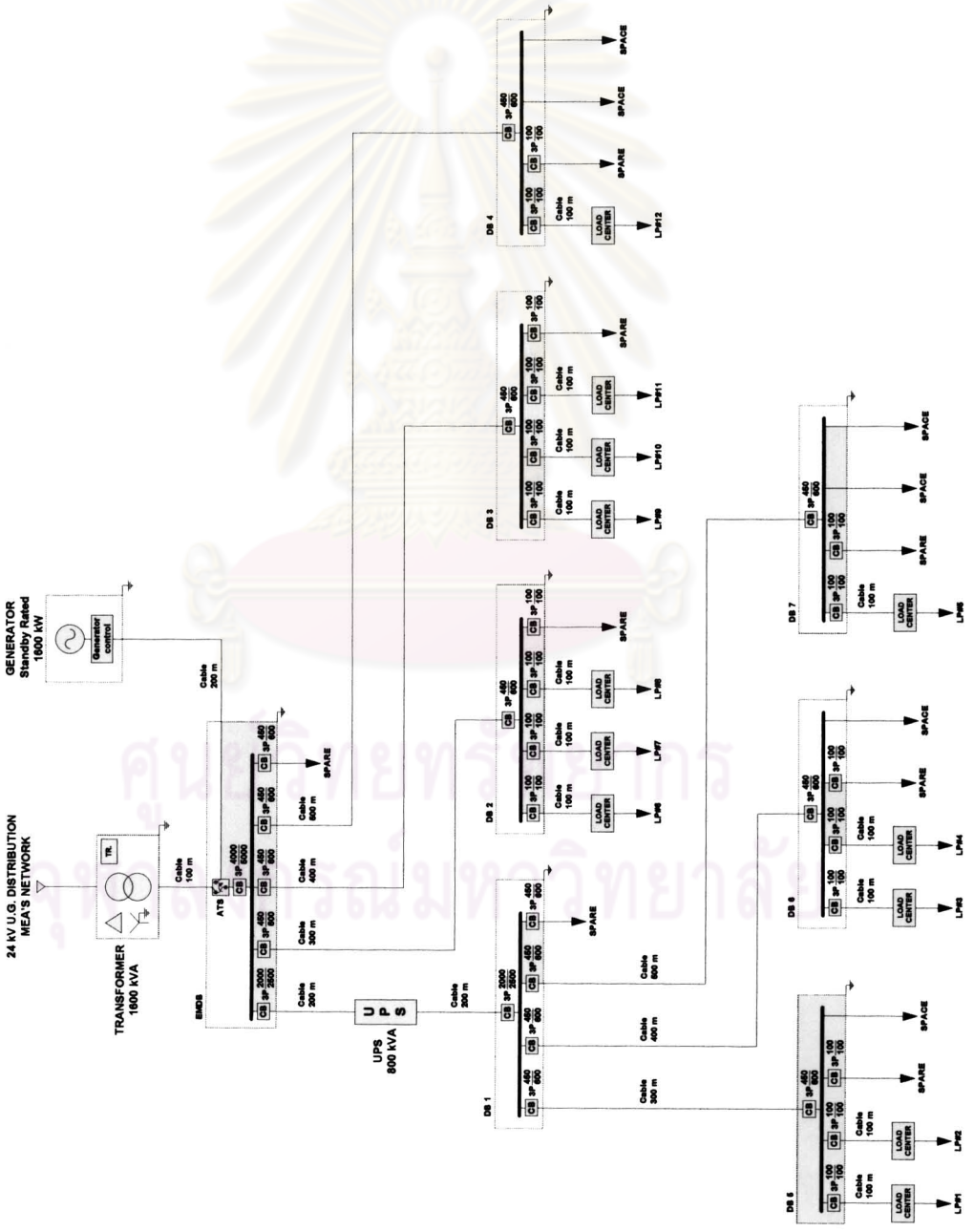
รูปที่ 8.1 ขั้นตอนการประเมินความเชื่อถือได้สำหรับการออกแบบระบบไฟฟ้า

8.1 การวิเคราะห์ผลจากการออกแบบระบบไฟฟ้า

ออกแบบระบบไฟฟ้าให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามเงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ ได้แก่ การจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1 ระดับที่ 2 ระดับที่ 3 และระดับที่ 4 ตามลำดับ เพื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร

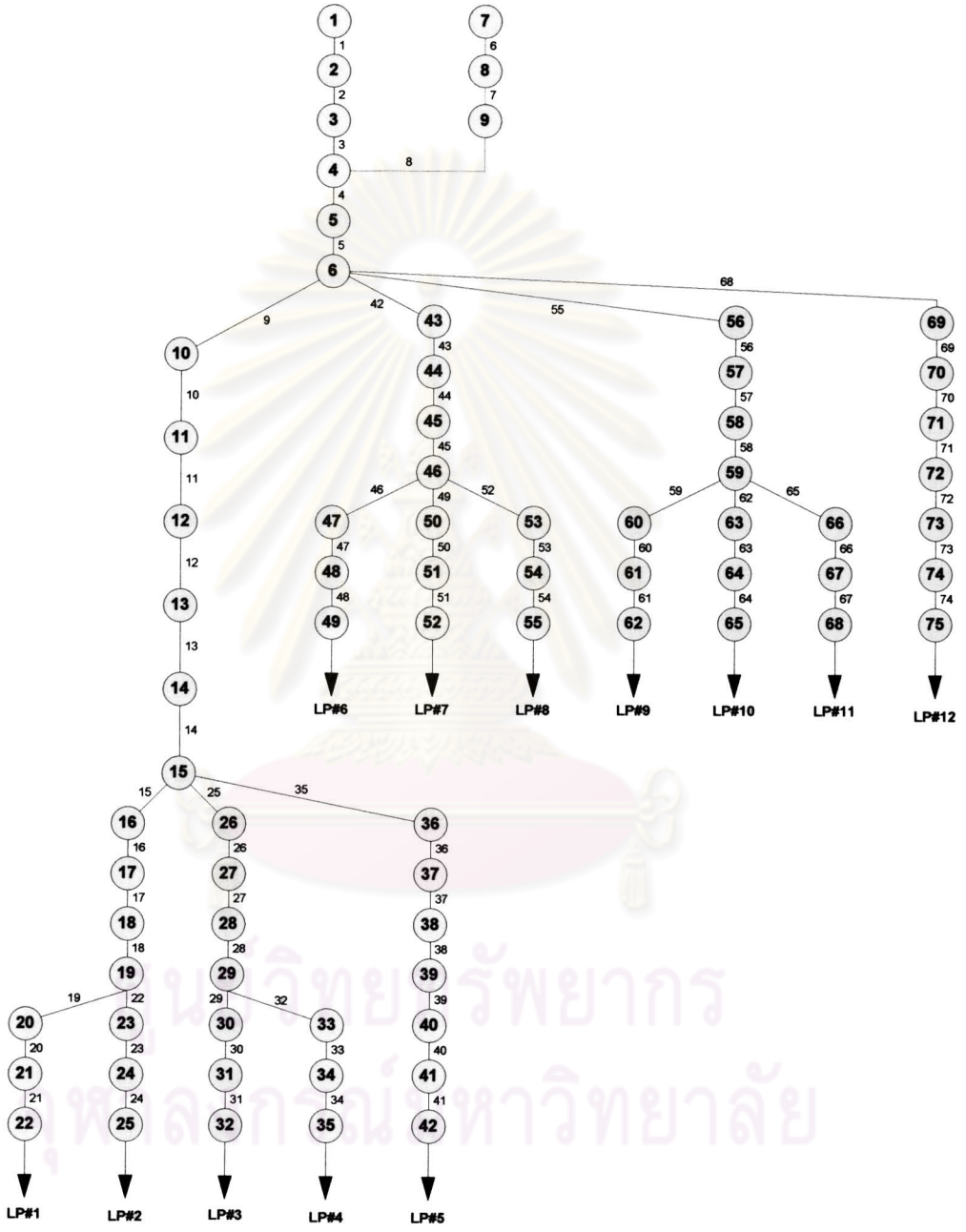
8.1.1 ระบบทดสอบระบบที่ 1

ทดสอบระบบไฟฟ้าที่ทำการออกแบบระบบให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามเงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1 (Tier 1) ซึ่งแผนภาพเส้นเดียวของระทดสอบนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.2



รูปที่ 8.2 แผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบระบบที่ 1 (Tier 1)

กำหนดหมายเลขให้กับอุปกรณ์ทุกตัวและสายส่งแรงต่ำทุกเส้นในระบบทดสอบเพื่อที่จะใช้เป็นข้อมูลสำหรับกระบวนการของการคำนวณค่าดัชนีต่าง ๆ ของระบบ โดยแผนภาพที่แสดงหมายเลขของอุปกรณ์และสายส่งแรงต่ำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.3

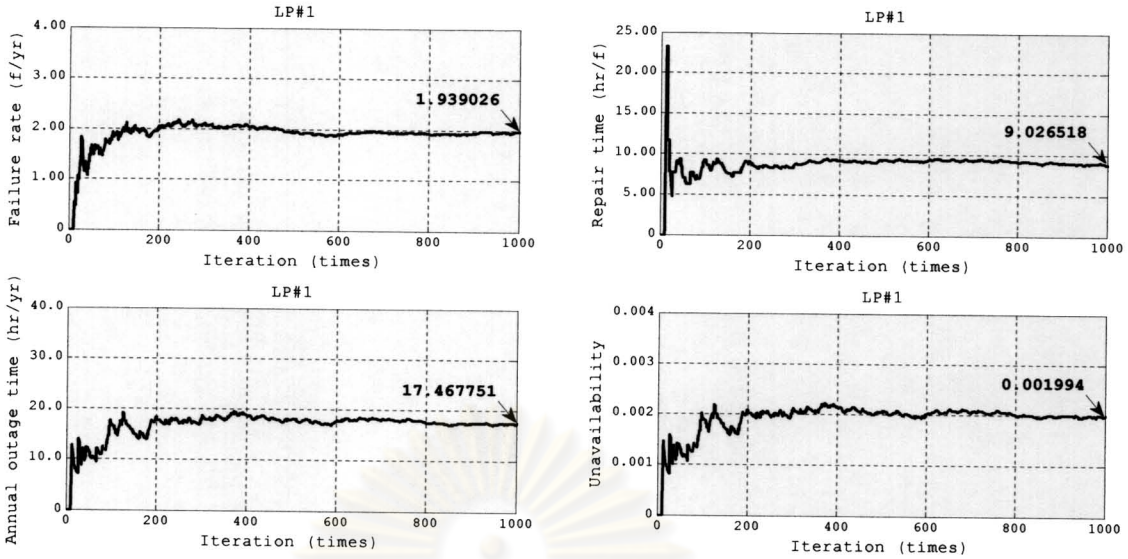


รูปที่ 8.3 แผนภาพแสดงหมายเลขของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 1 (Tier-1)

ในระบบทดสอบจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลายชนิด ดังนั้นผู้ออกแบบจึงได้เลือกคุณสมบัติของอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อให้ระบบทดสอบดังกล่าวมีความเชื่อถือได้ที่ดีพอที่จะสามารถผ่านมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1 (Tier 1) โดยคุณสมบัติของอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE Std 493™-2007.[9] สามารถแสดงได้ตามตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 รายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบทดสอบระบบที่ 1

Item	Item description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
1	24 kV power source from electric utility	1.956000	1.3200	4479.85
2	Transformer, liquid, forced air, <=5000 kVA	0.01263	3.65	693748.2
3	Diesel engine generator, unpackaged, 250 kW to 1.5 MW, continuous	0.632990	24.0500	13839.2
4	Control panel, generator, wo/switchgear	0.01111	2.11	788570.6
5	Control panel, switch gear controls	0.019620	1.2700	446426.2
6	Uninterruptible power supply UPS rotary	0.009380	2.0000	933708
7	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.2900	923068.2
8	Switch automatic transfer : ATS, 0 to 600 A	0.085800	5.7400	102093.8
9	Circuit breaker, 600 V, including model, >600 A, n.c.	0.03430	8.75	2554428
10	Circuit breaker, 600 V, including model, <600 A, n.c.	0.00255	6	3440004
11	Cable, aboveground, no conduit, >600 V per 1000 ft	0.00076	4	11589564
12	Cable, aboveground, no conduit, <=600 V per 1000 ft	0.00012	2.5	72896904



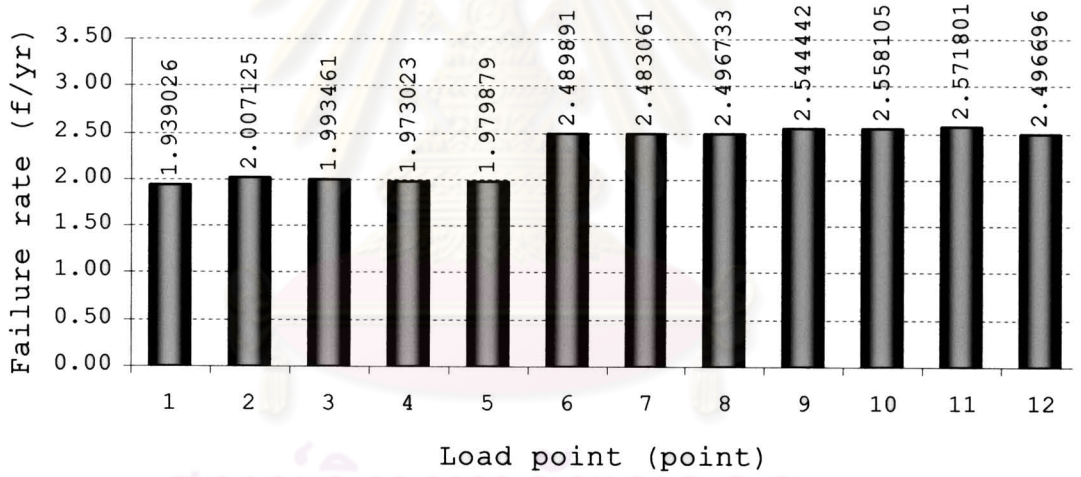
รูปที่ 8.4 การลู่เข้าของค่าต่าง ๆ ณ จุดโหลดที่ 1 (LP#1)

ตารางที่ 8.2 ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด ของระบบทดสอบระบบที่ 1

จุดโหลด	λ (f/yr)	r (hr/f)	U (hr/yr)	Unavailability	Availability
LP#1	1.939026	9.026518	17.467751	0.001994	0.998006
LP#2	2.007125	8.858266	17.743634	0.002026	0.997974
LP#3	1.993461	8.793931	17.495346	0.001997	0.998003
LP#4	1.973023	8.824135	17.375688	0.001984	0.998016
LP#5	1.979879	8.911927	17.609072	0.002010	0.99799
LP#6	2.489891	7.610657	18.908800	0.002159	0.997841
LP#7	2.483061	7.594047	18.815982	0.002148	0.997852
LP#8	2.496733	7.645462	19.047173	0.002174	0.997826
LP#9	2.544442	7.620766	19.347773	0.002209	0.997791
LP#10	2.558105	7.655601	19.54015	0.002231	0.997769
LP#11	2.571801	7.733478	19.843917	0.002265	0.997735
LP#12	2.496696	7.592714	18.915761	0.002159	0.997841

ตารางที่ 8.3 ดัชนีความเชื่อถือได้ของผู้ใช้ไฟฟ้า ของระบบทดสอบระบบที่ 1

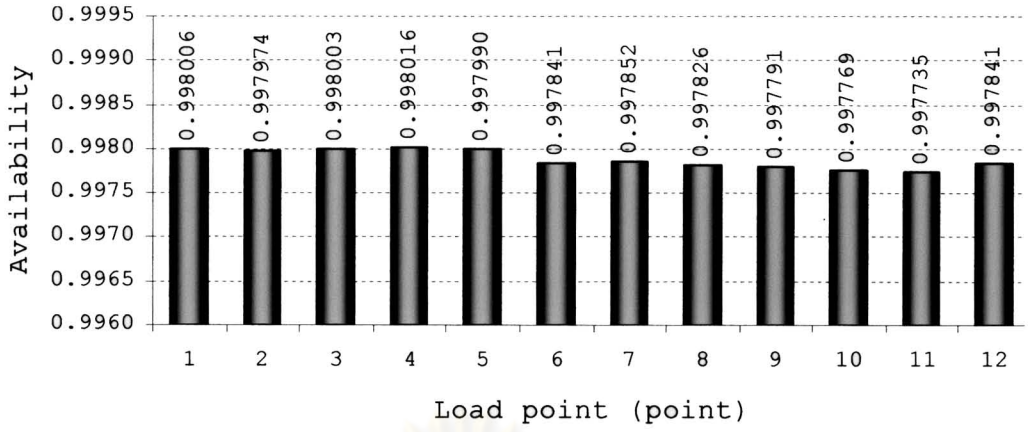
ดัชนี	ค่าที่ได้จากการทดสอบ	หน่วย
SAIFI	2.241374	ครั้ง/อุปกรณ์/ปี
SAIDI	18.344728	ชั่วโมง/อุปกรณ์/ปี
CAIFI	2.241374	ครั้ง/อุปกรณ์/ปี
CAIDI	8.184590	ชั่วโมง/ครั้ง
ASAI	0.997906	ไม่มีหน่วย
ASUI	0.002094	ไม่มีหน่วย
ENS	270.330364	กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี
AENS	1.393455	กิโลวัตต์-ชั่วโมง/อุปกรณ์/ปี
ACCI	1.393455	กิโลวัตต์-ชั่วโมง/อุปกรณ์/ปี



รูปที่ 8.5 การเปรียบเทียบอัตราการล้มเหลวของแต่ละจุดโหลด

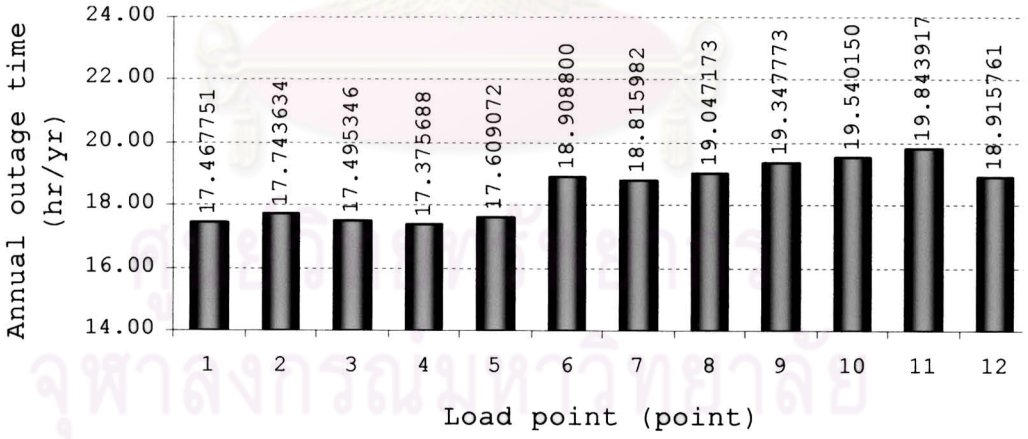
จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบระบบที่ 1 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1 (Tier 1) และเมื่อทำการพิจารณาอัตราการล้มเหลว (Failure rate) ของแต่ละจุดโหลดดังแสดงในรูปที่ 8.5 จะเห็นได้ว่าแต่ละจุดโหลดมีค่าอัตราการล้มเหลวที่แตกต่างกัน ดังนั้นผู้ออกแบบเลือกพิจารณาติดตั้งโหลดได้ตามความเหมาะสมขึ้นอยู่กับว่าต้องการให้โหลดดังกล่าวมีความเชื่อถือได้มากน้อยเพียงใด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 8.6 การเปรียบเทียบค่าความพร้อมมูลของแต่ละจุดโหลด

จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบระบบที่ 1 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1 (Tier 1) และเมื่อทำการพิจารณาความพร้อมมูล (Availability) ของแต่ละจุดโหลดดังแสดงในรูปที่ 8.6 โดยในกรณีของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1 นั้นค่าความพร้อมมูลของจุดโหลดที่พิจารณาต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 99.67% จากผลที่ได้แต่ละจุดโหลดมีค่าความพร้อมมูลไม่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานก็ถือว่าผ่านเกณฑ์ดังกล่าว ซึ่งผู้ออกแบบสามารถเลือกอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ตามความเหมาะสมโดยอาจพิจารณาจากงบประมาณในการติดตั้งระบบ เพราะอุปกรณ์ที่มีความเชื่อถือได้ที่ดีก็ย่อมมีราคาสูงเช่นกัน

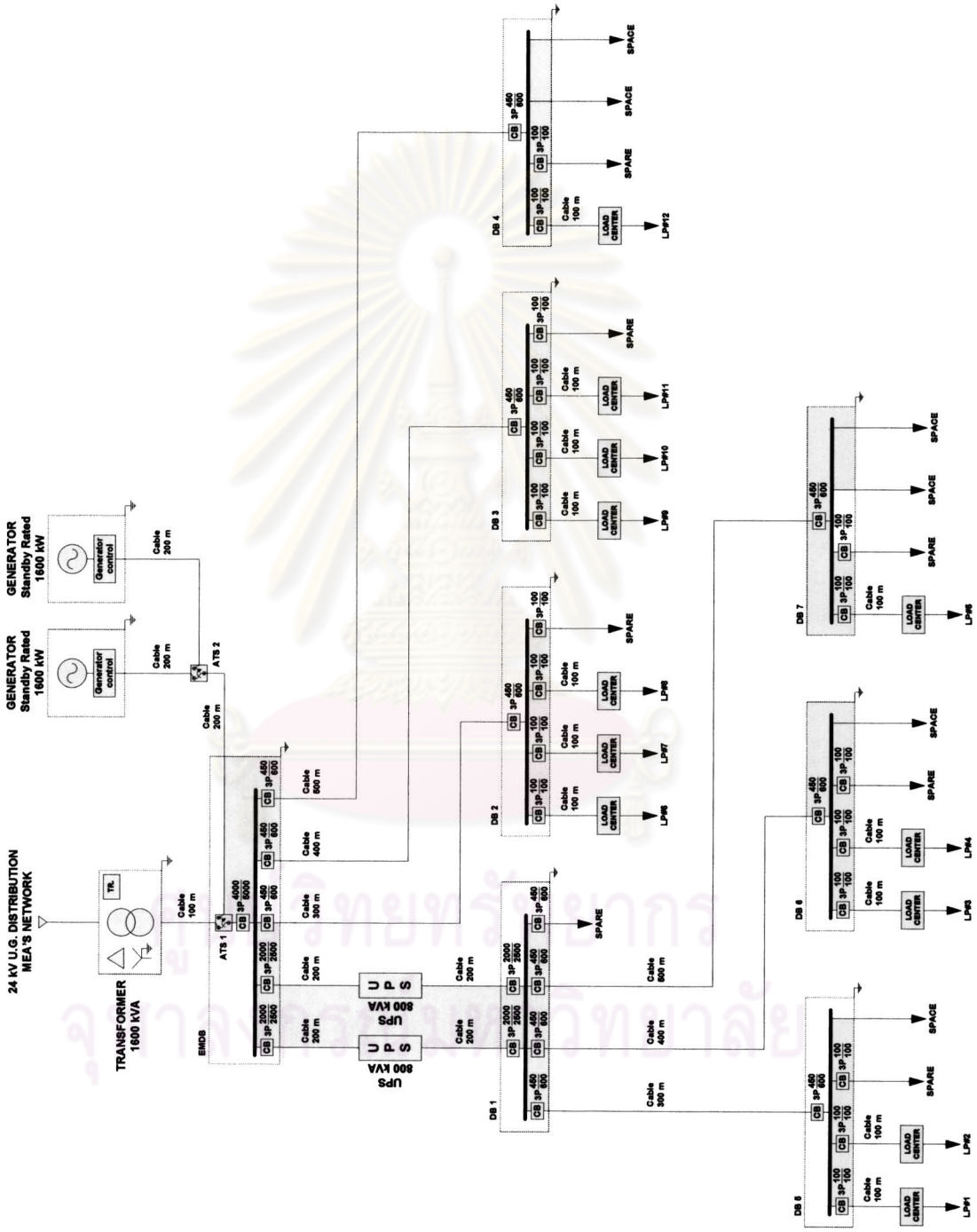


รูปที่ 8.7 การเปรียบเทียบระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในหนึ่งปีของแต่ละจุดโหลด

จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบระบบที่ 1 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1 (Tier 1) และเมื่อทำการพิจารณาช่วงระยะเวลาเฉลี่ยที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในหนึ่งปี (Annual outage time) จะได้ว่าแต่ละจุดโหลดมีค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถเลือกติดตั้งโหลดได้ตามความเหมาะสม

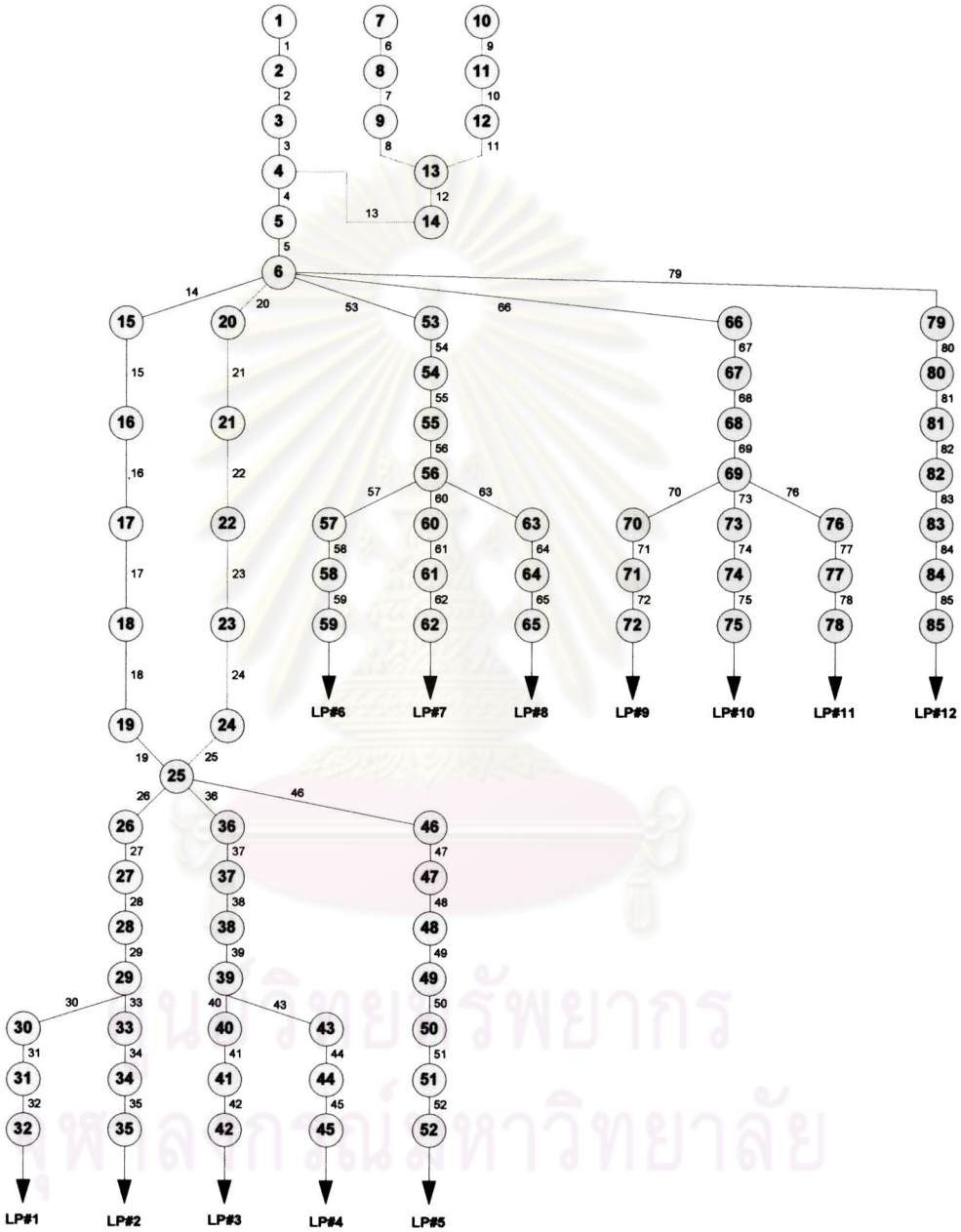
8.1.2 ระบบทดสอบระบบที่ 2

ทดสอบระบบไฟฟ้าที่ทำการออกแบบระบบให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามเงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 2 (Tier 2) ซึ่งแผนภาพเส้นเดียวของระทดสอบนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.8



รูปที่ 8.8 แผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบระบบที่ 2 (Tier-2)

กำหนดหมายเลขให้กับอุปกรณ์ทุกตัวและสายส่งแรงต่ำทุกเส้นในระบบทดสอบเพื่อที่จะใช้เป็นข้อมูลสำหรับกระบวนการของการคำนวณค่าดัชนีต่าง ๆ ของระบบ โดยแผนภาพที่แสดงหมายเลขของอุปกรณ์และสายส่งแรงต่ำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.9



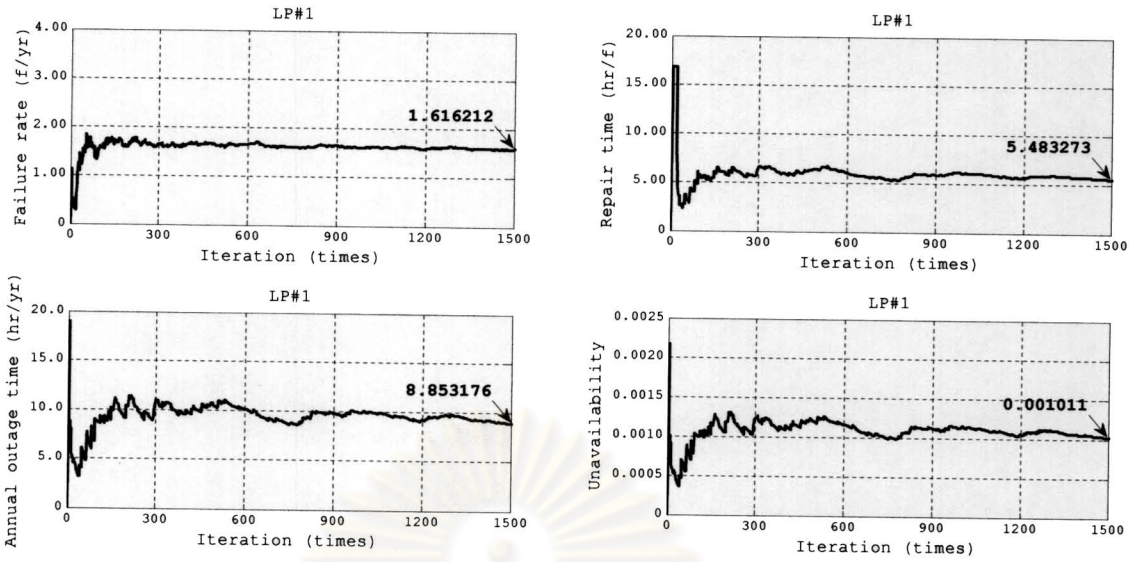
รูปที่ 8.9 แผนภาพแสดงหมายเลขของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 2 (Tier-2)

ในระบบทดสอบจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลายชนิด ดังนั้นผู้ออกแบบจึงได้เลือกคุณสมบัติของอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อให้ระบบทดสอบดังกล่าวมีความเชื่อถือได้ที่ดีพอที่จะสามารถ

ผ่านมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 2 (Tier 2) โดยคุณสมบัติของอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE Std 493™-2007.[9] สามารถแสดงได้ตามตารางที่ 8.4

ตารางที่ 8.4 รายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบทดสอบระบบที่ 2

Item	Item description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
1	24 kV power source from electric utility	1.956000	1.3200	4479.85
2	Transformer, liquid, forced air, <=5000 kVA	0.01263	3.65	693748.2
3	Diesel engine generator, unpackaged, 250 kW to 1.5 MW, continuous	0.632990	24.0500	13839.2
4	Control panel, generator, wo/switchgear	0.01111	2.11	788570.6
5	Control panel, switch gear controls	0.019620	1.2700	446426.2
6	Uninterruptible power supply UPS rotary	0.009380	2.0000	933708
7	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.2900	923068.2
8	Switch automatic transfer : ATS, 0 to 600 A	0.085800	5.7400	102093.8
9	Circuit breaker, 600 V, including model, >600 A, n.c.	0.03430	8.75	2554428
10	Circuit breaker, 600 V, including model, <600 A, n.c.	0.00255	6	3440004
11	Cable, aboveground, no conduit, >600 V per 1000 ft	0.00076	4	11589564
12	Cable, aboveground, no conduit, <=600 V per 1000 ft	0.00012	2.5	72896904



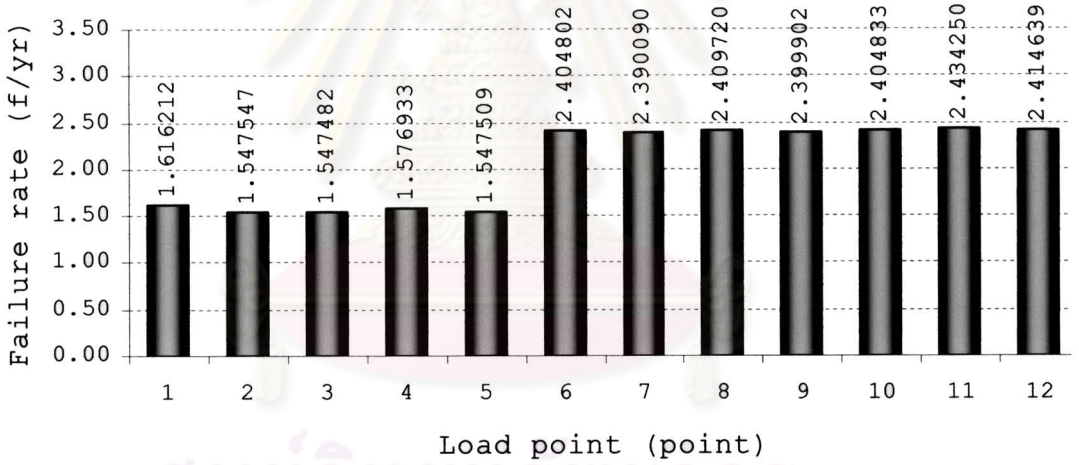
รูปที่ 8.10 การลู่เข้าของค่าต่าง ๆ ณ จุดโหลดที่ 1 (LP#1)

ตารางที่ 8.5 ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด ของระบบทดสอบระบบที่ 2

จุดโหลด	λ (f/yr)	r (hr/f)	U (hr/yr)	Unavailability	Availability
LP#1	1.616212	5.483273	8.853176	0.001011	0.998989
LP#2	1.547547	5.366064	8.296372	0.000947	0.998989
LP#3	1.547482	5.172828	7.997549	0.000913	0.999087
LP#4	1.576933	5.323762	8.387180	0.000957	0.999043
LP#5	1.547509	5.272138	8.151090	0.000930	0.999070
LP#6	2.404802	4.587157	11.017330	0.001258	0.998742
LP#7	2.390090	4.586464	10.948362	0.001250	0.998750
LP#8	2.409720	4.607593	11.088952	0.001266	0.998734
LP#9	2.399902	4.593390	11.009832	0.001257	0.998743
LP#10	2.404833	4.634597	11.131271	0.001271	0.998729
LP#11	2.434250	4.622752	11.238499	0.001283	0.998717
LP#12	2.414639	4.631239	11.168514	0.001275	0.998725

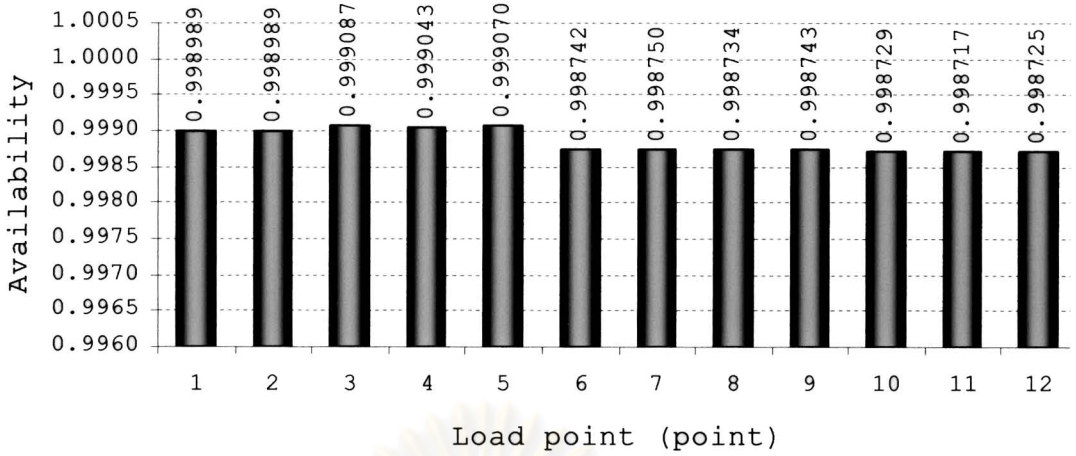
ตารางที่ 8.6 ดัชนีความเชื่อถือได้ของผู้ใช้ไฟฟ้า ของระบบทดสอบระบบที่ 2

ดัชนี	ค่าที่ได้จากการทดสอบ	หน่วย
SAIFI	1.973350	ครั้ง/อุปกรณ์/ปี
SAIDI	9.656668	ชั่วโมง/อุปกรณ์/ปี
CAIFI	1.973350	ครั้ง/อุปกรณ์/ปี
CAIDI	4.893541	ชั่วโมง/ครั้ง
ASAI	0.998898	ไม่มีหน่วย
ASUI	0.001102	ไม่มีหน่วย
ENS	151.941776	กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี
AENS	0.783205	กิโลวัตต์-ชั่วโมง/อุปกรณ์/ปี
ACCI	0.783205	กิโลวัตต์-ชั่วโมง/อุปกรณ์/ปี



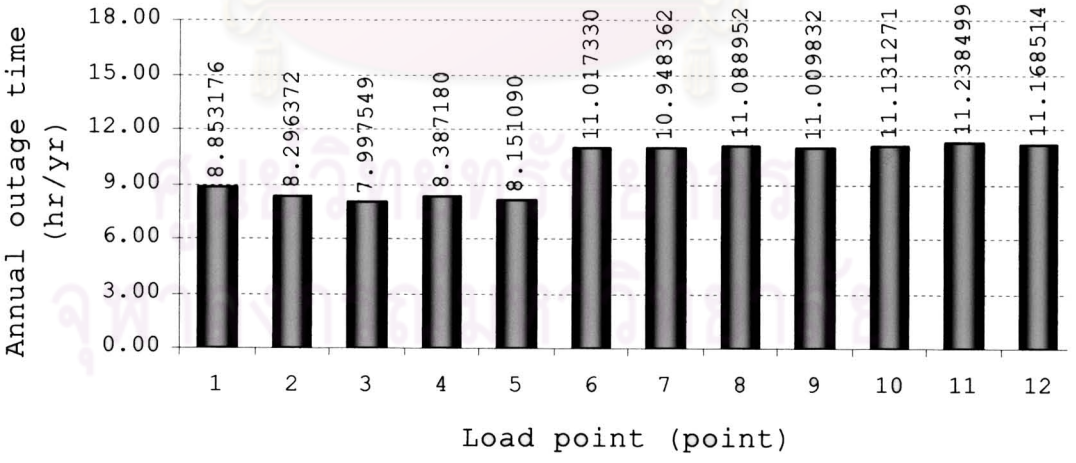
รูปที่ 8.11 การเปรียบเทียบอัตราการล้มเหลวของแต่ละจุดโหลด

จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบระบบที่ 2 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 2 (Tier 2) และเมื่อทำการพิจารณาอัตราการล้มเหลว (Failure rate) ของแต่ละจุดโหลดดังแสดงในรูปที่ 8.11 จะเห็นได้ว่าแต่ละจุดโหลดมีค่าอัตราการล้มเหลวที่แตกต่างกัน ดังนั้นผู้ออกแบบเลือกพิจารณาติดตั้งโหลดได้ตามความเหมาะสมขึ้นอยู่กับว่าต้องการให้โหลดดังกล่าวมีความเชื่อถือได้มากน้อยเพียงใด



รูปที่ 8.12 **การเปรียบเทียบค่าความพร้อมมูลของแต่ละจุดโหลด**

จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบระบบที่ 2 **ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่** 2 (Tier 2) **และเมื่อทำการพิจารณาความพร้อมมูล** (Availability) **ของแต่ละจุดโหลดดังแสดงในรูปที่** 8.12 **โดยในกรณีของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่** 2 **นั้นค่าความพร้อมมูลของจุดโหลดที่พิจารณาต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า** 99.75% **จากผลที่ได้แต่ละจุดโหลดมีค่าความพร้อมมูลไม่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานก็ถือว่าผ่านเกณฑ์ดังกล่าว ซึ่งผู้ออกแบบสามารถเลือกอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ตามความเหมาะสมโดยอาจพิจารณาจากงบประมาณในการติดตั้งระบบ เพราะอุปกรณ์ที่มีความเชื่อถือได้ที่ดีก็ย่อมมีราคาสูงเช่นกัน**



รูปที่ 8.13 **การเปรียบเทียบระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในหนึ่งปีของแต่ละจุดโหลด**

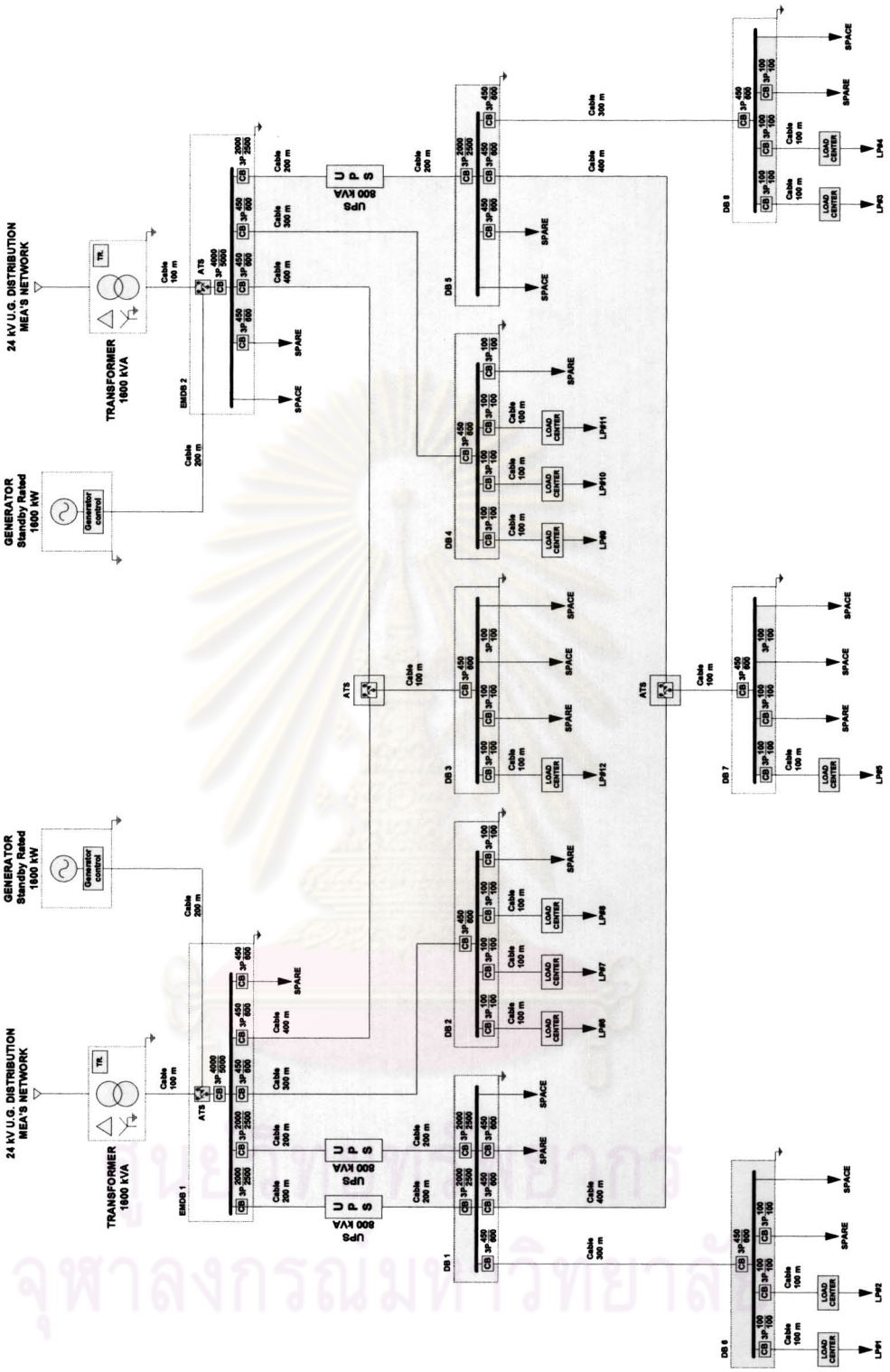
จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบระบบที่ 2 **ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่** 2 (Tier 2) **และเมื่อทำการพิจารณาช่วงระยะเวลาที่จุดโหลดนั้น ๆ ไม่ได้รับการ**

จ่ายพลังงานไฟฟ้าต่อปี (Annual outage time) ของแต่ละจุดโหลดดังแสดงในรูปที่ 8.13 จะเห็นได้ว่าแต่ละจุดโหลดมีค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถเลือกติดตั้งโหลดได้ตามความเหมาะสม

8.1.3 ระบบทดสอบระบบที่ 3

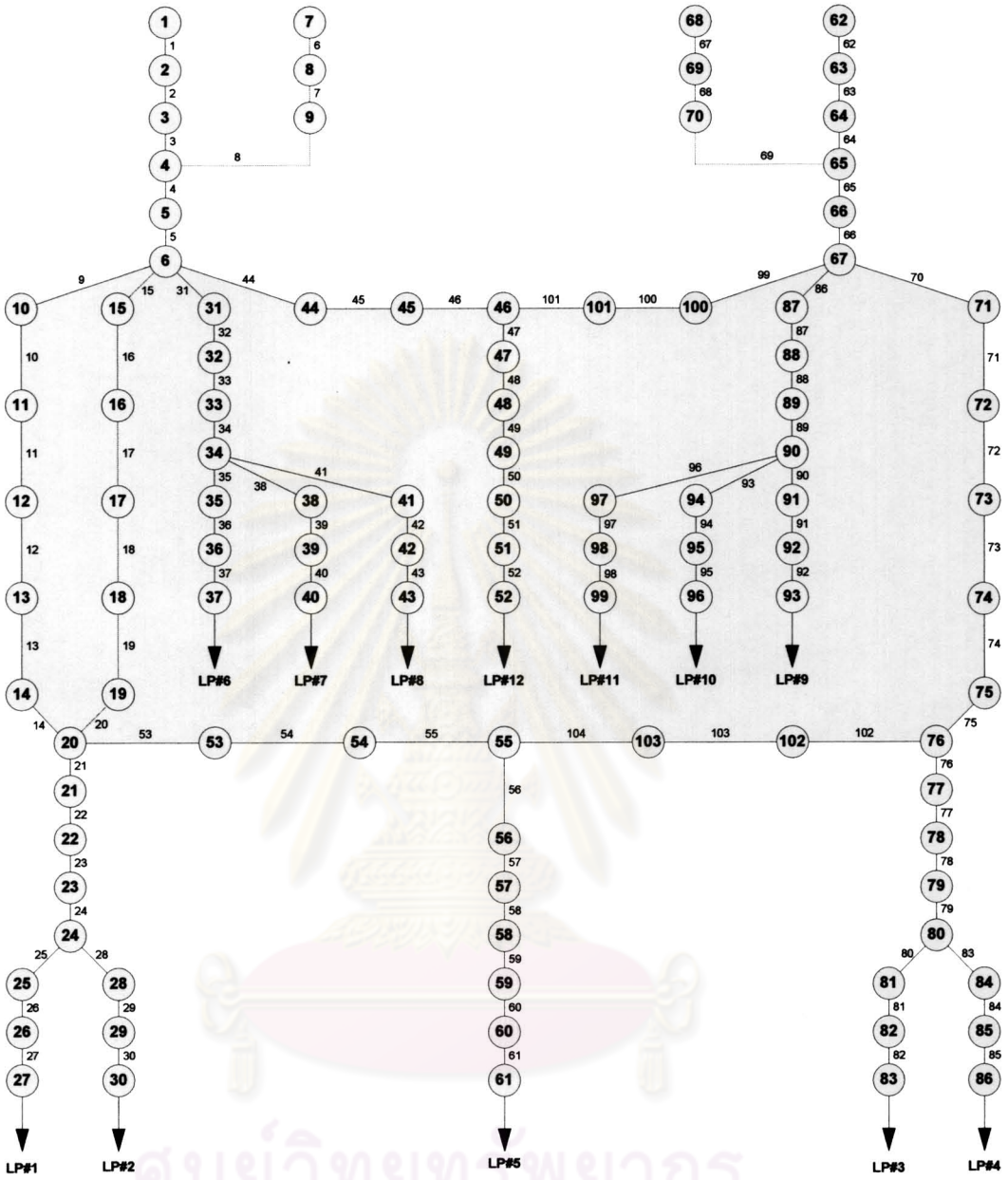
เนื่องจากเมื่อทำการทดสอบแล้วปรากฏว่า การจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 มีความเชื่อถือได้ของระบบดีขึ้นกว่าการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1 และการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 2 แต่ค่าความพร้อมมูลของระบบยังไม่ผ่านมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณี โดยกรณีที่ 1 คือ ทดสอบระบบไฟฟ้าที่ทำการออกแบบให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามเงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 ซึ่งอุปกรณ์ทุกตัวในระบบมีคุณสมบัติเดียวกันกับการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1 และการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 2 กรณีที่ 2 คือ ทดสอบระบบฟฟ้าเดียวกันกับในกรณีแรกแต่ทำการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์บางตัวในระบบ เพื่อให้ระบบดังกล่าวมีค่าความพร้อมมูลที่ผ่านมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 ระบบทดสอบสำหรับการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.14

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 8.14 แผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบระบบที่ 3 (Tier-3)

กำหนดหมายเลขให้กับอุปกรณ์ทุกตัวและสายส่งแรงต่ำทุกเส้นในระบบทดสอบเพื่อที่จะใช้เป็นข้อมูลสำหรับกระบวนการของการคำนวณค่าดัชนีต่าง ๆ ของระบบ โดยแผนภาพที่แสดงหมายเลขของอุปกรณ์และสายส่งแรงต่ำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.15



รูปที่ 8.15 แผนภาพแสดงหมายเลขของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 3 (Tier-3)

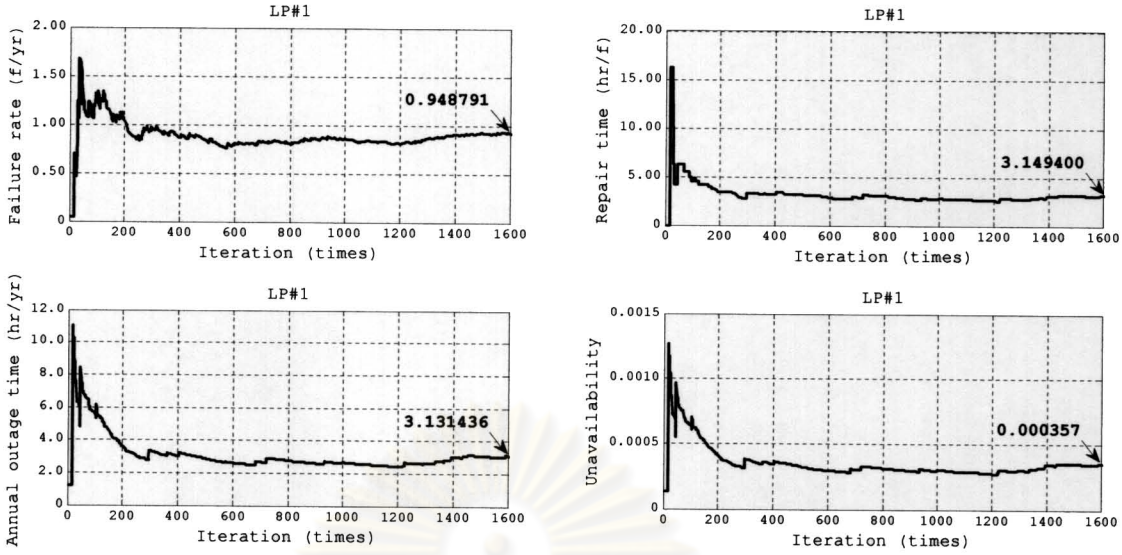
8.1.3.1 การจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 (Tier-3) เมื่ออุปกรณ์ทุกตัวในระบบมีคุณสมบัติเดิม

ทดสอบระบบไฟฟ้าที่ทำการออกแบบระบบให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามเงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 8.14 โดยที่อุปกรณ์ทุกตัวในระบบมีคุณสมบัติเดียวกันกับการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1 และการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 2

ในระบบทดสอบจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลายชนิด ดังนั้นผู้ออกแบบจึงได้เลือกคุณสมบัติของอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อให้ระบบทดสอบดังกล่าวมีความเชื่อถือได้ที่ดีพอที่จะสามารถผ่านมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 (Tier 3) โดยคุณสมบัติของอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE Std 493™-2007.[9] สามารถแสดงได้ตามตารางที่ 8.7

ตารางที่ 8.7 รายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบทดสอบระบบที่ 3

Item	Item description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
1	24 kV power source from electric utility	1.956000	1.3200	4479.85
2	Transformer, liquid, forced air, <=5000 kVA	0.01263	3.65	693748.2
3	Diesel engine generator, unpackaged, 250 kW to 1.5 MW, continuous	0.632990	24.0500	13839.2
4	Control panel, generator, wo/switchgear	0.01111	2.11	788570.6
5	Control panel, switch gear controls	0.019620	1.2700	446426.2
6	Uninterruptible power supply UPS rotary	0.009380	2.0000	933708
7	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.2900	923068.2
8	Switch automatic transfer : ATS, 0 to 600 A	0.085800	5.7400	102093.8
9	Circuit breaker, 600 V, including model, >600 A, n.c.	0.03430	8.75	2554428
10	Circuit breaker, 600 V, including model, <600 A, n.c.	0.00255	6	3440004
11	Cable, aboveground, no conduit, >600 V per 1000 ft	0.00076	4	11589564
12	Cable, aboveground, no conduit, <=600 V per 1000 ft	0.00012	2.5	72896904



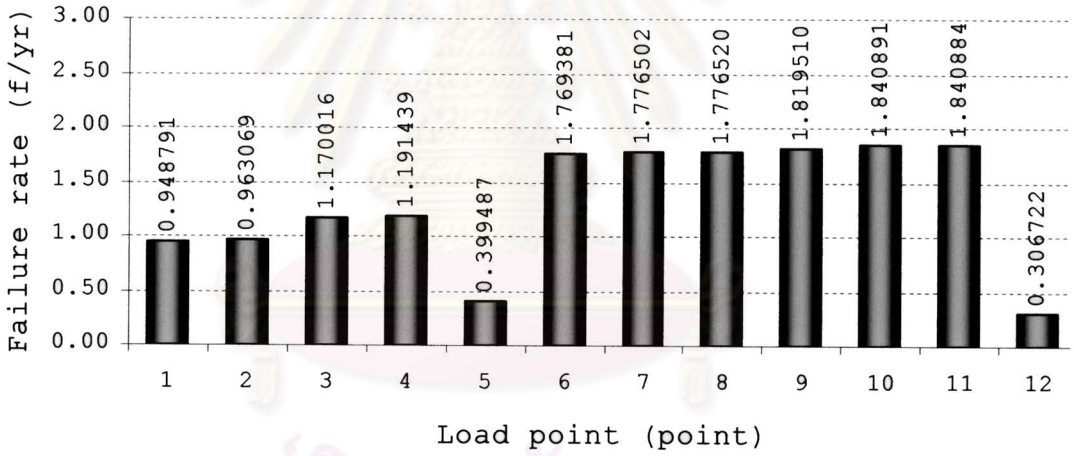
รูปที่ 8.16 การลู่เข้าของค่าต่าง ๆ ณ จุดโหลดที่ 1 (LP#1)

ตารางที่ 8.8 ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด ของระบบทดสอบระบบที่ 3

จุดโหลด	λ (f/yr)	r (hr/f)	U (hr/yr)	Unavailability	Availability
LP#1	0.948791	3.149400	3.131436	0.000357	0.999643
LP#2	0.963069	3.228416	3.234224	0.000369	0.999631
LP#3	1.170016	3.539268	3.369977	0.000385	0.999615
LP#4	1.191439	3.613776	3.513047	0.000401	0.999599
LP#5	0.399487	8.417441	3.661364	0.000418	0.999582
LP#6	1.769381	3.034154	3.791201	0.000433	0.999567
LP#7	1.776502	2.980428	3.721036	0.000425	0.999575
LP#8	1.776520	3.045586	3.823722	0.000436	0.999564
LP#9	1.819510	3.618950	4.839363	0.000552	0.999448
LP#10	1.840891	3.512357	4.720564	0.000539	0.999461
LP#11	1.840884	3.491400	4.686192	0.000535	0.999465
LP#12	0.306722	8.522276	3.313193	0.000378	0.999622

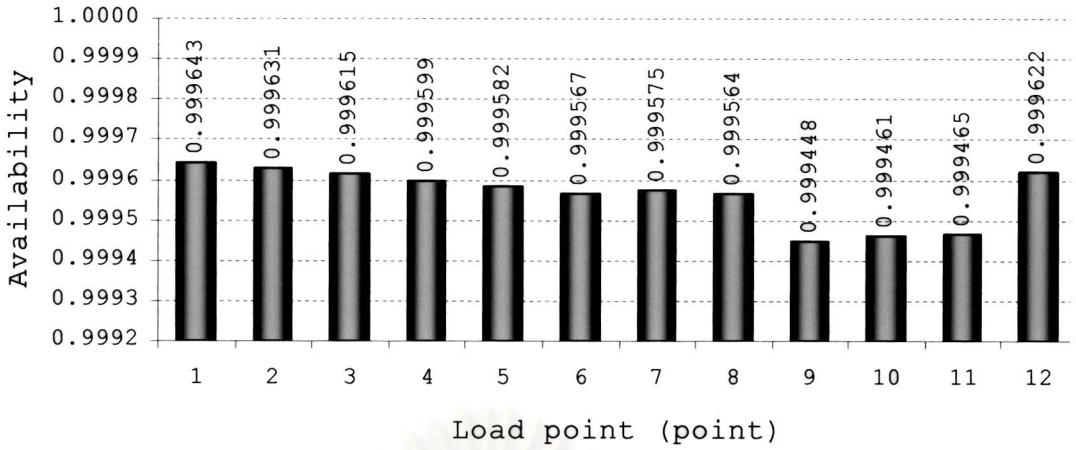
ตารางที่ 8.9 ดัชนีความเชื่อถือได้ของผู้ใช้ไฟฟ้า ของระบบทดสอบระบบที่ 3

ดัชนี	ค่าที่ได้จากการทดสอบ	หน่วย
SAIFI	1.324204	ครั้ง/อุปกรณ์/ปี
SAIDI	3.792722	ชั่วโมง/อุปกรณ์/ปี
CAIFI	1.324204	ครั้ง/อุปกรณ์/ปี
CAIDI	2.864152	ชั่วโมง/ครั้ง
ASAI	0.999567	ไม่มีหน่วย
ASUI	0.000433	ไม่มีหน่วย
ENS	55.863235	กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี
AENS	0.287955	กิโลวัตต์-ชั่วโมง/อุปกรณ์/ปี
ACCI	0.287955	กิโลวัตต์-ชั่วโมง/อุปกรณ์/ปี



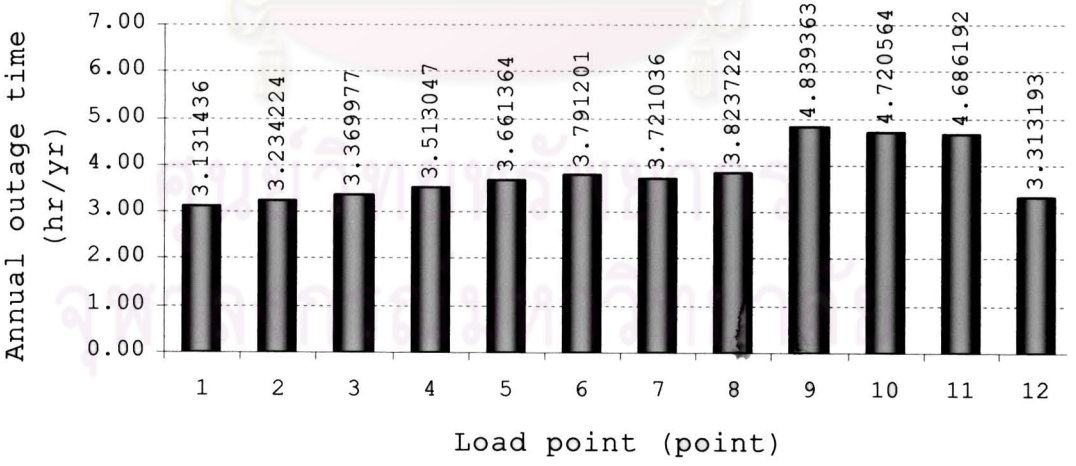
รูปที่ 8.17 การเปรียบเทียบอัตราการล้มเหลวของแต่ละจุดโหลด

จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบระบบที่ 3 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 (Tier 3) และเมื่อทำการพิจารณาอัตราการล้มเหลว (Failure rate) ของแต่ละจุดโหลดดังแสดงในรูปที่ 8.17 จะเห็นได้ว่าแต่ละจุดโหลดมีค่าอัตราการล้มเหลวที่แตกต่างกัน ดังนั้นผู้ออกแบบเลือกพิจารณาติดตั้งโหลดได้ตามความเหมาะสมขึ้นอยู่กับว่าต้องการให้โหลดดังกล่าวมีความเชื่อถือได้มากน้อยเพียงใด



รูปที่ 8.18 การเปรียบเทียบค่าความพร้อมมูลของแต่ละจุดโหลด

จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบระบบที่ 3 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 (Tier 3) และเมื่อทำการพิจารณาความพร้อมมูล (Availability) ของแต่ละจุดโหลดดังแสดงในรูปที่ 8.18 โดยในกรณีของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 นั้นค่าความพร้อมมูลของจุดโหลดที่พิจารณาต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 99.98% จากผลที่ได้แต่ละจุดโหลดมีค่าความพร้อมมูลต่ำกว่าค่ามาตรฐานก็ถือว่าไม่ผ่านเกณฑ์ดังกล่าว ถ้าผู้ออกแบบต้องการให้ระบบดังกล่าวผ่านมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 แล้ว ต้องทำการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์บางประเภทในระบบให้มีความเชื่อถือได้ที่ดีขึ้นเพื่อจะส่งผลให้ระบบมีความเชื่อถือได้ที่ดีขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 8.19 การเปรียบเทียบระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในหนึ่งปีของแต่ละจุดโหลด

จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบระบบที่ 3 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 (Tier 3) และเมื่อทำการพิจารณาช่วงระยะเวลาที่จุดโหลดนั้น ๆ ไม่ได้รับการ

จ่ายพลังงานไฟฟ้าต่อปี (Annual outage time) ของแต่ละจุดโหลดดังแสดงในรูปที่ 8.19 จะเห็นได้ว่าแต่ละจุดโหลดมีค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถเลือกติดตั้งโหลดได้ตามความเหมาะสม

8.1.3.2 การจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 (Tier-3) เมื่อปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของอุปกรณ์บางตัวในระบบ

เมื่อทำการทดสอบระบบไฟฟ้าที่ได้ทำการออกแบบระบบให้มีคุณสมบัติตามเงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 8.14 โดยใช้อุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติเดียวกันกับการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1 และการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 2 แล้วปรากฏว่าค่าความพร้อมมูลของระบบมีค่าที่ดีขึ้น แต่ยังไม่ดีพอที่จะสามารถผ่านค่าตามมาตรฐาน ดังนั้นจึงต้องทำการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์บางตัวในระบบให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น

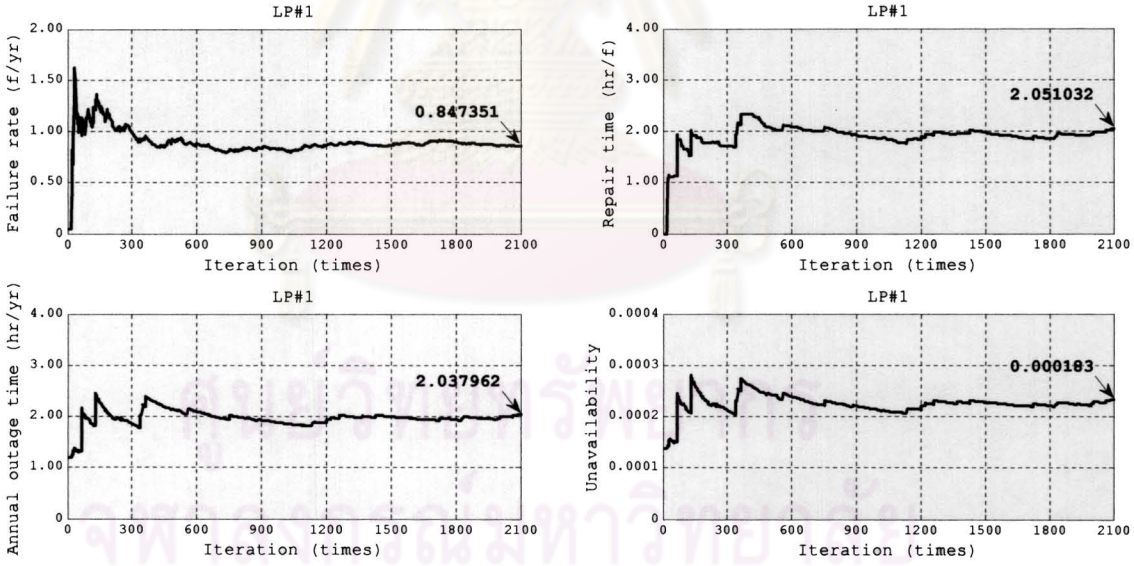
ในระบบทดสอบจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลายชนิด ดังนั้นผู้ออกแบบจึงได้เลือกคุณสมบัติของอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อให้ระบบทดสอบดังกล่าวมีความเชื่อถือได้ที่ดีพอที่จะสามารถผ่านมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 (Tier 3) โดยคุณสมบัติของอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE Std 493™-2007.[9] สามารถแสดงได้ตามตารางที่ 8.10

ตารางที่ 8.10 รายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบทดสอบระบบที่ 3

Item	Item description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
1	24 kV power source from electric utility	1.956000	1.3200	4479.85
2	Transformer, liquid, forced air, <=5000 kVA	0.01263	3.65	693748.2
3	Diesel engine generator, unpackaged, 250 kW to 1.5 MW, continuous	0.632990	24.0500	13839.2
4	Control panel, generator, wo/switchgear	0.01111	2.11	788570.6
5	Control panel, switch gear controls	0.019620	1.2700	446426.2
6	Uninterruptible power supply	0.009380	2.0000	933708

ตารางที่ 8.10 รายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบทดสอบระบบที่ 3 (ต่อ)

Item	Item description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
7	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.2900	923068.2
8	Switch automatic transfer : ATS, 0 to 600 A	0.085800	5.7400	102093.8
9	Circuit breaker, 600 V, drawout (metal clad), >600 A, n.c.	0.00185	0.5	4732057.8
10	Circuit breaker, 600 V, drawout (metal clad), <600 A, n.c.	0.00021	6	42129480
11	Cable, aboveground, no conduit, >600 V per 1000 ft	0.00076	4	11589564
12	Cable, aboveground, no conduit, <=600 V per 1000 ft	0.00012	2.5	72896904



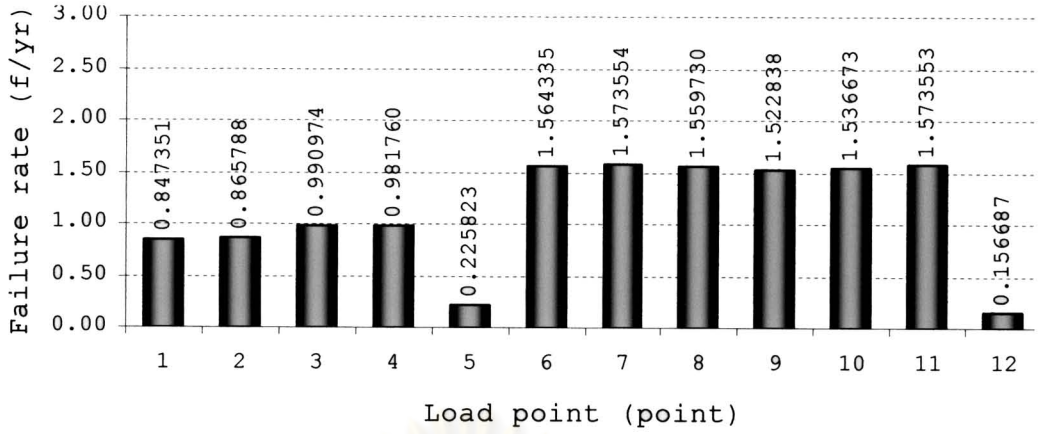
รูปที่ 8.20 การลู่เข้าของค่าต่าง ๆ ณ จุดโหลดที่ 1 (LP#1)

ตารางที่ 8.11 ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด ของระบบทดสอบระบบที่ 3

จุดโหลด	λ (f/yr)	r (hr/f)	U (hr/yr)	Unavailability	Availability
LP#1	0.847351	2.051032	2.037962	0.000183	0.999817
LP#2	0.865788	2.040536	2.048774	0.000181	0.999819
LP#3	0.990974	2.119093	1.508852	0.000172	0.999828
LP#4	0.981760	2.177107	1.555485	0.000178	0.999822
LP#5	0.225823	4.626348	1.344611	0.000153	0.999847
LP#6	1.564335	2.614533	2.802210	0.000320	0.999680
LP#7	1.573554	2.605658	2.804903	0.000320	0.999680
LP#8	1.559730	2.637737	2.826314	0.000323	0.999677
LP#9	1.522838	2.592117	2.705606	0.000309	0.999691
LP#10	1.536673	2.614203	2.757130	0.000315	0.999685
LP#11	1.573553	2.599943	2.797055	0.000319	0.999681
LP#12	0.156687	4.182073	1.355225	0.000155	0.999845

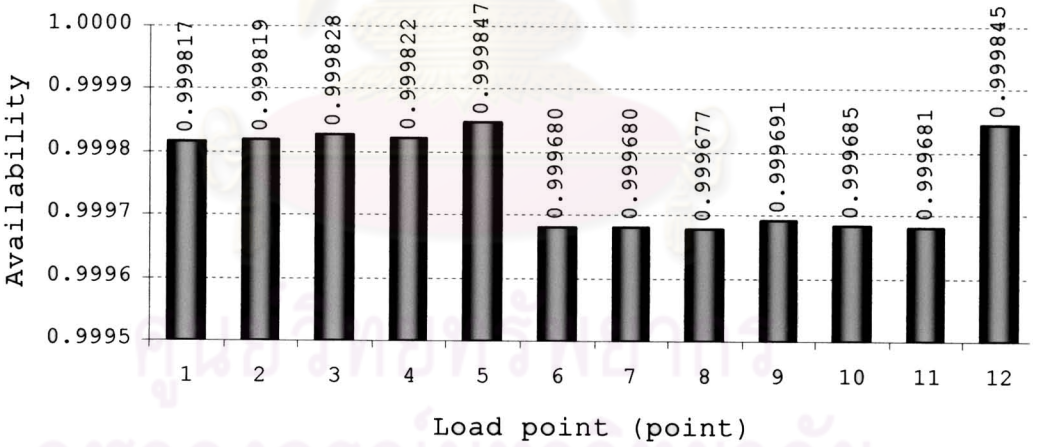
ตารางที่ 8.12 ดัชนีความเชื่อถือได้ของผู้ใช้ไฟฟ้า ของระบบทดสอบระบบที่ 3

ดัชนี	ค่าที่ได้จากการทดสอบ	หน่วย
SAIFI	1.126754	ครั้ง/อุปกรณ์/ปี
SAIDI	2.191521	ชั่วโมง/อุปกรณ์/ปี
CAIFI	1.126754	ครั้ง/อุปกรณ์/ปี
CAIDI	1.944985	ชั่วโมง/ครั้ง
ASAI	0.999750	ไม่มีหน่วย
ASUI	0.000250	ไม่มีหน่วย
ENS	32.854917	กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี
AENS	0.169355	กิโลวัตต์-ชั่วโมง/อุปกรณ์/ปี
ACCI	0.169355	กิโลวัตต์-ชั่วโมง/อุปกรณ์/ปี



รูปที่ 8.21 การเปรียบเทียบอัตราการล้มเหลวของแต่ละจุดโหลด

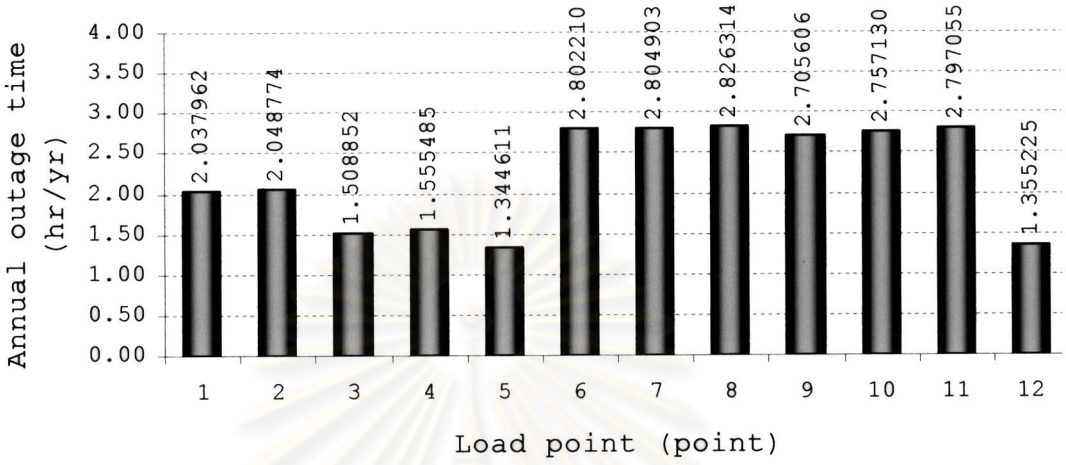
จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบระบบที่ 3 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 (Tier 3) และเมื่อทำการพิจารณาอัตราการล้มเหลว (Failure rate) ของแต่ละจุดโหลดดังแสดงในรูปที่ 8.21 จะเห็นได้ว่าแต่ละจุดโหลดมีค่าอัตราการล้มเหลวที่แตกต่างกัน ดังนั้นผู้ออกแบบเลือกพิจารณาติดตั้งโหลดได้ตามความเหมาะสมขึ้นอยู่กับว่าต้องการให้โหลดดังกล่าวมีความเชื่อถือได้มากน้อยเพียงใด



รูปที่ 8.22 การเปรียบเทียบค่าความพร้อมมูลของแต่ละจุดโหลด

จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบระบบที่ 3 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 (Tier 3) และเมื่อทำการพิจารณาความพร้อมมูล (Availability) ของแต่ละจุดโหลดดังแสดงในรูปที่ 8.22 โดยในกรณีของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 นั้นค่าความพร้อมมูลของจุดโหลดที่พิจารณาต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 99.98% จากผลที่ได้มีเพียงบางจุดโหลดเท่านั้นที่มีค่าความพร้อมมูลไม่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานและถือว่าผ่านเกณฑ์ดังกล่าว ซึ่งก็เพียงพอที่จะรองรับโหลดที่

สำคัญ ๆ ต่อระบบไฟฟ้าหนึ่งระบบได้ ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถเลือกอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ตามความเหมาะสมโดยอาจพิจารณาจากงบประมาณในการติดตั้งระบบ เพราะอุปกรณ์ที่มีความเชื่อถือได้ที่ดีก็ย่อมมีราคาสูงเช่นกัน

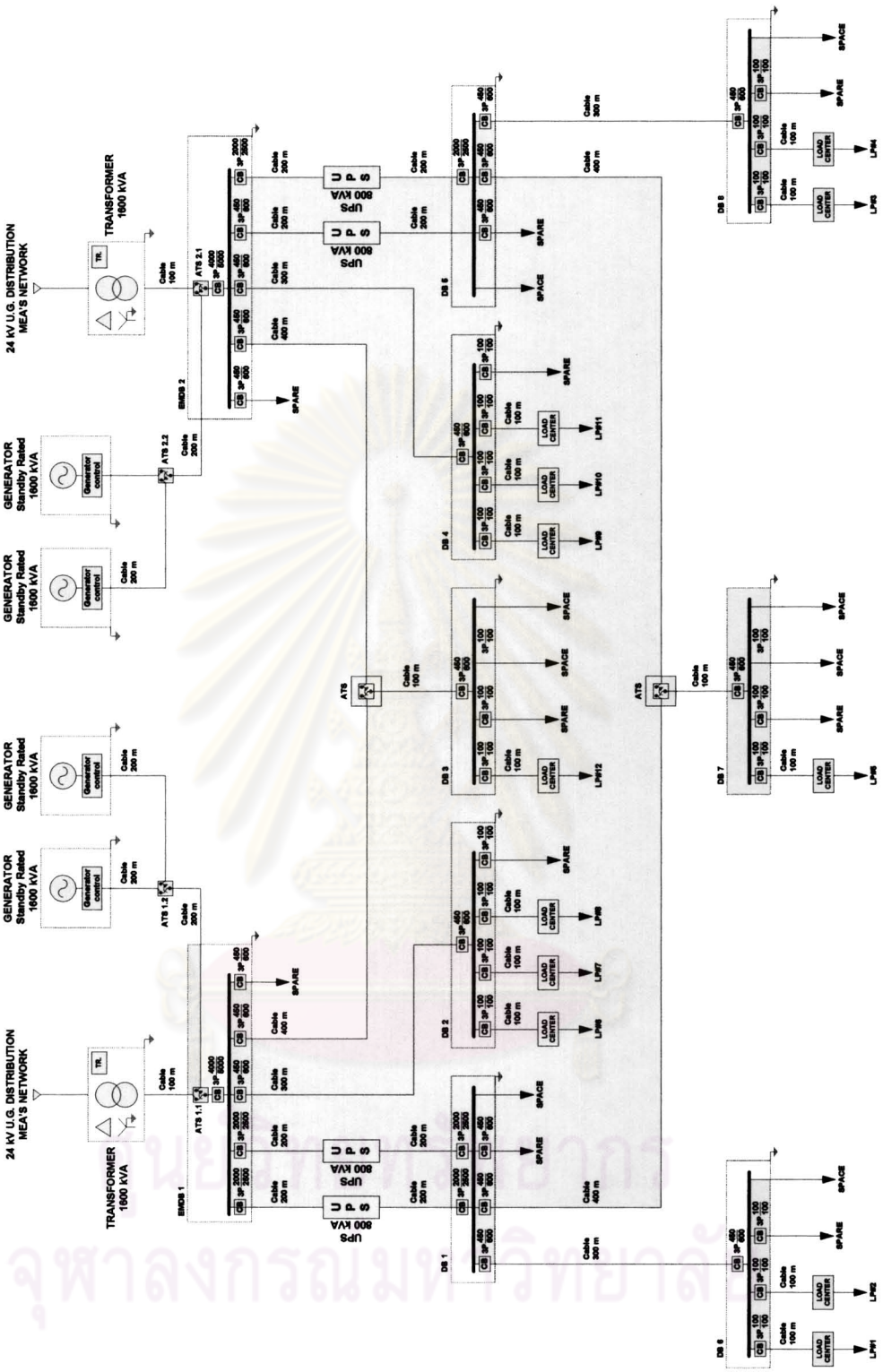


รูปที่ 8.23 การเปรียบเทียบระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในหนึ่งปีของแต่ละจุดโหลด

จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบระบบที่ 3 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 (Tier 3) และเมื่อทำการพิจารณาช่วงระยะเวลาที่จุดโหลดนั้น ๆ ไม่ได้รับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าต่อปี (Annual outage time) ของแต่ละจุดโหลดดังแสดงในรูปที่ 8.23 จะเห็นได้ว่าแต่ละจุดโหลดมีค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถเลือกติดตั้งโหลดได้ตามความเหมาะสม

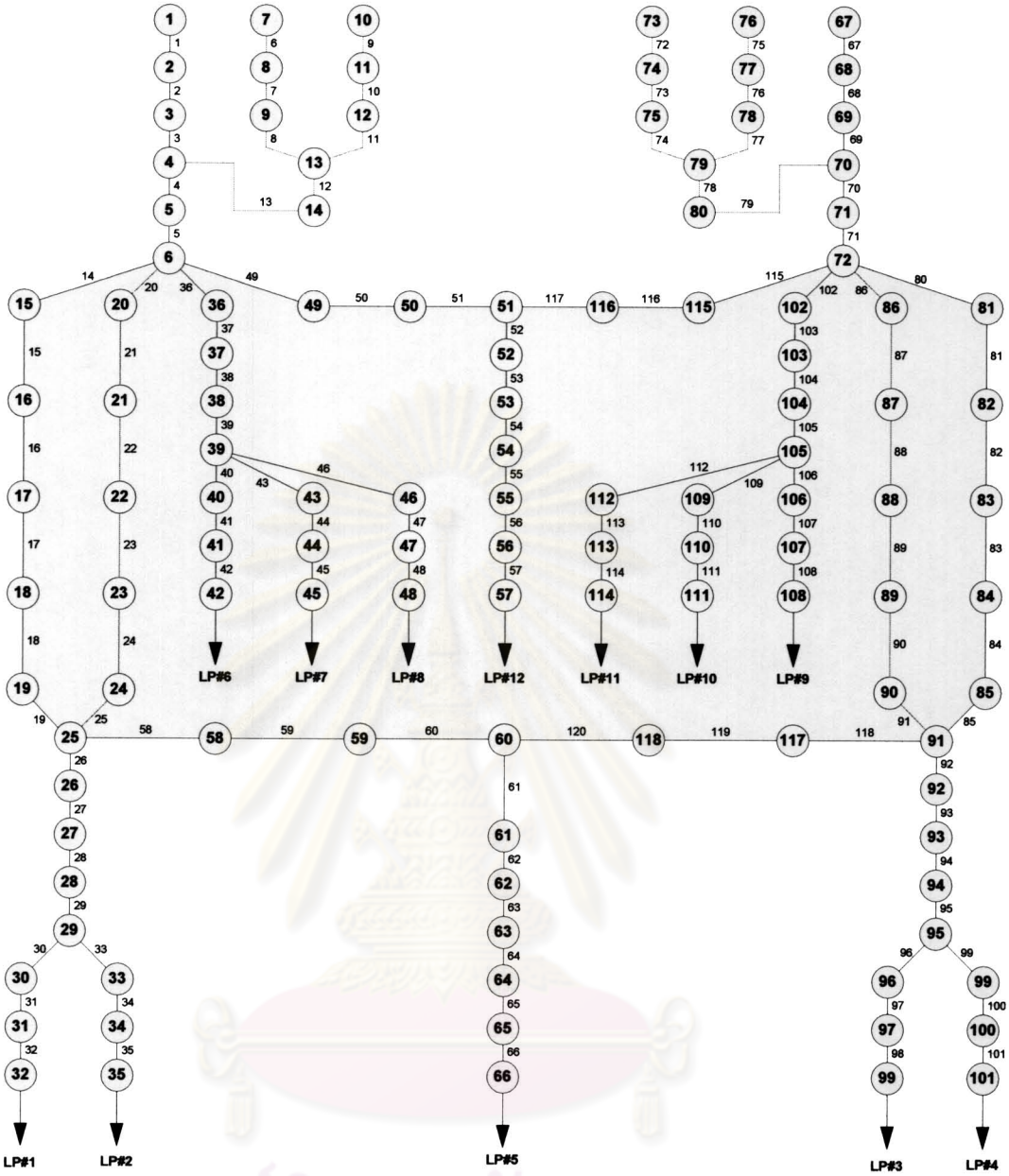
8.1.4 ระบบทดสอบระบบที่ 4

เนื่องจากเมื่อทำการทดสอบแล้วปรากฏว่า การจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 มีความเชื่อถือได้ของระบบดีขึ้นกว่าการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1 การจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 2 และการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 แต่ค่าความพร้อมมูลของระบบยังไม่ผ่านมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณี โดยกรณีที่ 1 คือ ทดสอบระบบไฟฟ้าที่ทำการออกแบบให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามเงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 ซึ่งอุปกรณ์ทุกตัวในระบบมีคุณสมบัติเดียวกันกับการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1 และการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 2 กรณีที่ 2 คือ ทดสอบระบบไฟฟ้าเดียวกันกับในกรณีแรกแต่ทำการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์บางตัวในระบบ เพื่อให้ระบบดังกล่าวมีค่าความพร้อมมูลที่ผ่านมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 ระบบทดสอบสำหรับการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.24



รูปที่ 8.24 แผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบระบบที่ 4 (Tier-4)

กำหนดหมายเลขให้กับอุปกรณ์ทุกตัวและสายส่งแรงต่ำทุกเส้นในระบบทดสอบเพื่อที่จะใช้เป็นข้อมูลสำหรับกระบวนการของการคำนวณค่าดัชนีต่าง ๆ ของระบบ โดยแผนภาพที่แสดงหมายเลขของอุปกรณ์และสายส่งแรงต่ำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.25



รูปที่ 8.25 แผนภาพแสดงหมายเลขของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 4 (Tier-4)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

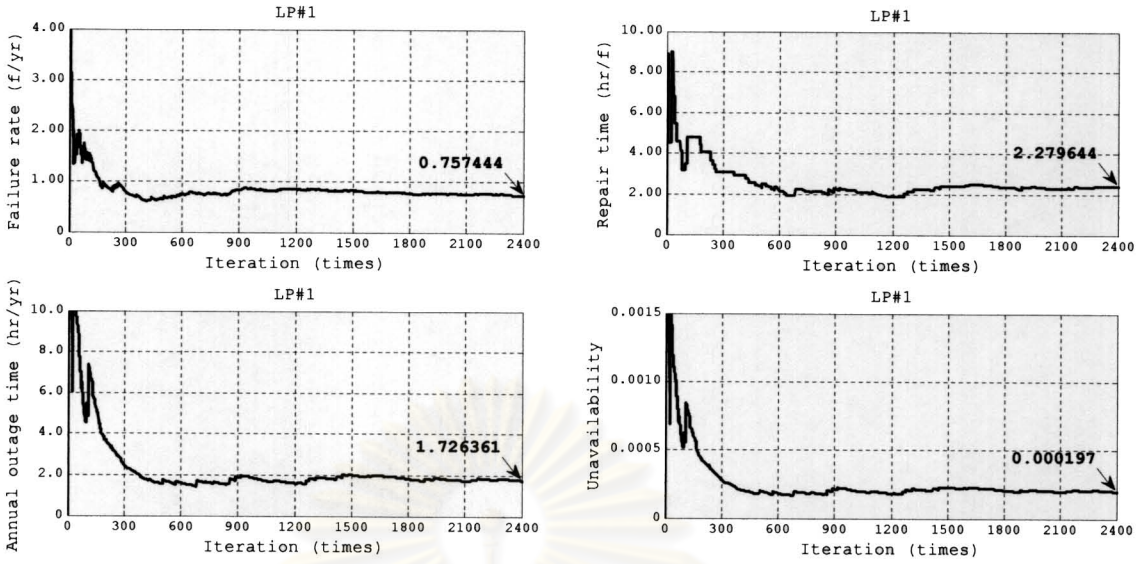
8.1.4.1 การจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 (Tier-4) เมื่ออุปกรณ์ทุกตัวในระบบมีคุณสมบัติเดิม

ทดสอบระบบไฟฟ้าที่ทำการออกแบบระบบให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามเงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 8.24 โดยที่อุปกรณ์ทุกตัวในระบบมีคุณสมบัติเดียวกันกับการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1 และการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 2

ในระบบทดสอบจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลายชนิด ดังนั้นผู้ออกแบบจึงได้เลือกคุณสมบัติของอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อให้ระบบทดสอบดังกล่าวมีความเชื่อถือได้ที่ดีพอที่จะสามารถผ่านมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 (Tier 4) โดยคุณสมบัติของอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE Std 493™-2007.[9] สามารถแสดงได้ตามตารางที่ 8.13

ตารางที่ 8.13 รายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบทดสอบระบบที่ 4

Item	Item description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
1	24 kV power source from electric utility	1.956000	1.3200	4479.85
2	Transformer, liquid, forced air, <=5000 kVA	0.01263	3.65	693748.2
3	Diesel engine generator, unpackaged, 250 kW to 1.5 MW, continuous	0.632990	24.0500	13839.2
4	Control panel, generator, wo/switchgear	0.01111	2.11	788570.6
5	Control panel, switch gear controls	0.019620	1.2700	446426.2
6	Uninterruptible power supply UPS rotary	0.009380	2.0000	933708
7	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.2900	923068.2
8	Switch automatic transfer : ATS, 0 to 600 A	0.085800	5.7400	102093.8
9	Circuit breaker, 600 V, including model, >600 A, n.c.	0.03430	8.75	2554428
10	Circuit breaker, 600 V, including model, <600 A, n.c.	0.00255	6	3440004
11	Cable, aboveground, no conduit, >600 V per 1000 ft	0.00076	4	11589564
12	Cable, aboveground, no conduit, <=600 V per 1000 ft	0.00012	2.5	72896904



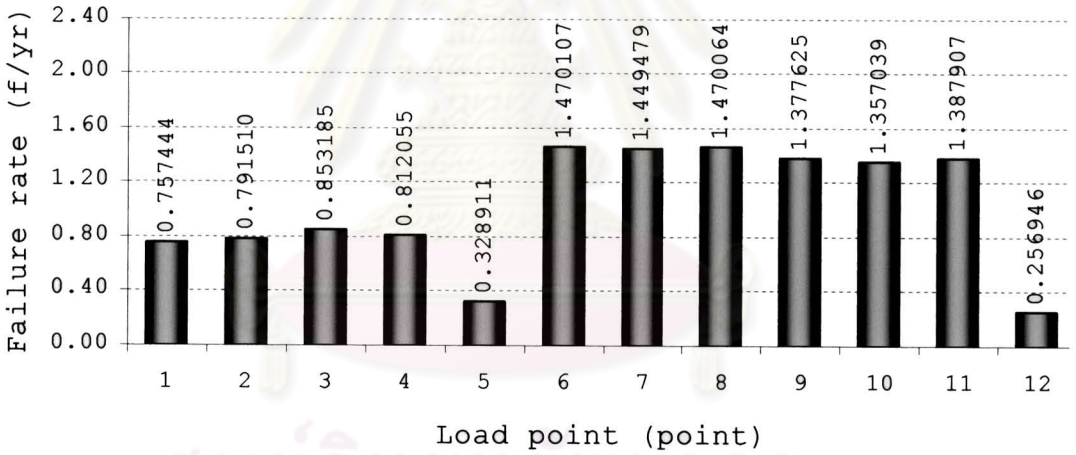
รูปที่ 8.26 การลู่เข้าของค่าต่าง ๆ ณ จุดโหลดที่ 1 (LP#1)

ตารางที่ 8.14 ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด ของระบบทดสอบระบบที่ 4

จุดโหลด	λ (f/yr)	r (hr/f)	U (hr/yr)	Unavailability	Availability
LP#1	0.757444	2.279644	1.726361	0.000197	0.999803
LP#2	0.791510	2.462627	1.948759	0.000222	0.999778
LP#3	0.853185	2.211723	1.886602	0.000215	0.999785
LP#4	0.812055	2.161794	1.755144	0.000200	0.999800
LP#5	0.328911	6.012644	1.977178	0.000226	0.999774
LP#6	1.470107	2.502913	3.678003	0.000420	0.999580
LP#7	1.449479	2.260875	3.275865	0.000374	0.999626
LP#8	1.470064	2.331502	3.426117	0.000391	0.999609
LP#9	1.377625	2.869750	3.951657	0.000451	0.999549
LP#10	1.357039	2.797300	3.794403	0.000433	0.999567
LP#11	1.387907	2.851465	3.955781	0.000452	0.999548
LP#12	0.256946	5.661631	1.454494	0.000166	0.999834

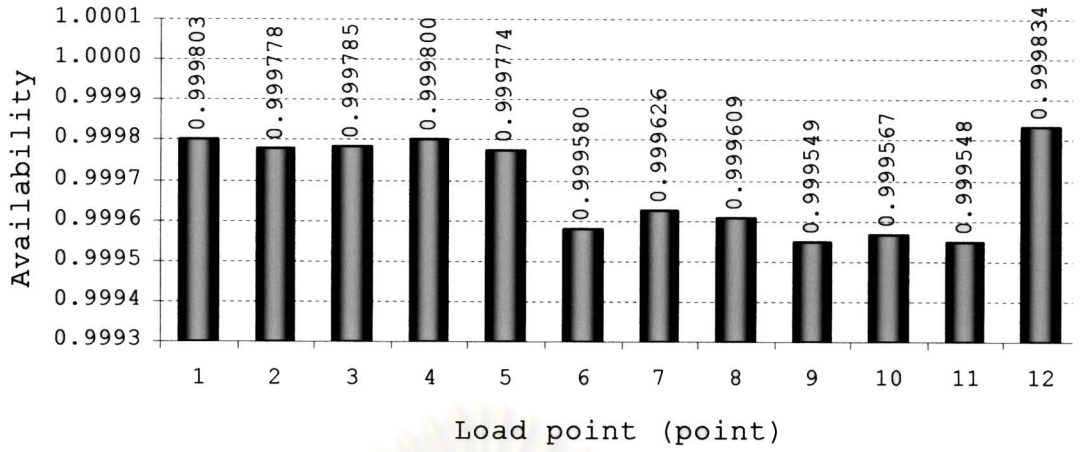
ตารางที่ 8.15 ดัชนีความเชื่อถือได้ของผู้ใช้ไฟฟ้า ของระบบทดสอบระบบที่ 4

ดัชนี	ค่าที่ได้จากการทดสอบ	หน่วย
SAIFI	1.034095	ครั้ง/อุปกรณ์/ปี
SAIDI	2.723297	ชั่วโมง/อุปกรณ์/ปี
CAIFI	1.034095	ครั้ง/อุปกรณ์/ปี
CAIDI	2.633507	ชั่วโมง/ครั้ง
ASAI	0.999689	ไม่มีหน่วย
ASUI	0.000311	ไม่มีหน่วย
ENS	41.406198	กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี
AENS	0.213434	กิโลวัตต์-ชั่วโมง/อุปกรณ์/ปี
ACCI	0.213434	กิโลวัตต์-ชั่วโมง/อุปกรณ์/ปี



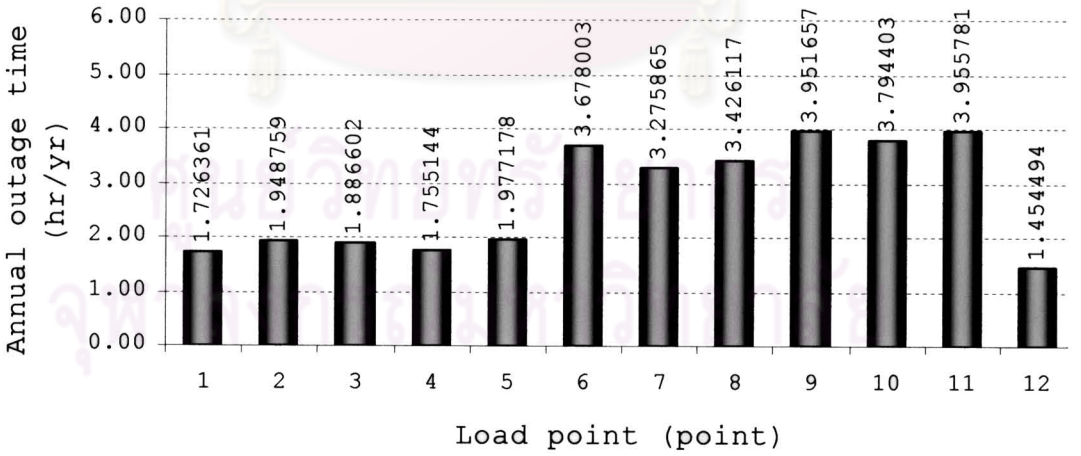
รูปที่ 8.27 การเปรียบเทียบอัตราการล้มเหลวของแต่ละจุดโหลด

จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบระบบที่ 4 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 (Tier 4) และเมื่อทำการพิจารณาอัตราการล้มเหลว (Failure rate) ของแต่ละจุดโหลดดังแสดงในรูปที่ 8.27 จะเห็นได้ว่าแต่ละจุดโหลดมีค่าอัตราการล้มเหลวที่แตกต่างกัน ดังนั้นผู้ออกแบบเลือกพิจารณาติดตั้งโหลดได้ตามความเหมาะสมขึ้นอยู่กับว่าต้องการให้โหลดดังกล่าวมีความเชื่อถือได้มากน้อยเพียงใด



รูปที่ 8.28 การเปรียบเทียบค่าความพร้อมมูลของแต่ละจุดโหลด

จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบระบบที่ 4 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 (Tier 4) และเมื่อทำการพิจารณาความพร้อมมูล (Availability) ของแต่ละจุดโหลดดังแสดงในรูปที่ 8.28 โดยในกรณีของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 นั้นค่าความพร้อมมูลของจุดโหลดที่พิจารณาต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 99.99% จากผลที่ได้แต่ละจุดโหลดมีค่าความพร้อมมูลต่ำกว่าค่ามาตรฐานก็ถือว่าไม่ผ่านเกณฑ์ดังกล่าว ถ้าผู้ออกแบบต้องการให้ระบบดังกล่าวผ่านมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 แล้ว ต้องทำการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์บางประเภทในระบบให้มีความเชื่อถือได้ที่ดีขึ้นเพื่อจะส่งผลให้ระบบมีความเชื่อถือได้ที่ดีขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 8.29 การเปรียบเทียบระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในหนึ่งปีของแต่ละจุดโหลด

จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบระบบที่ 4 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 (Tier 4) และเมื่อทำการพิจารณาช่วงระยะเวลาที่จุดโหลดนั้น ๆ ไม่ได้รับการ

จ่ายพลังงานไฟฟ้าต่อปี (Annual outage time) ของแต่ละจุดโหลดดังแสดงในรูปที่ 8.29 จะเห็นได้ว่าแต่ละจุดโหลดมีค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถเลือกติดตั้งโหลดได้ตามความเหมาะสม

8.1.4.2 การจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 (Tier-4) เมื่อปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของอุปกรณ์บางตัวในระบบ

เมื่อทำการทดสอบระบบไฟฟ้าที่ได้ทำการออกแบบระบบให้มีคุณสมบัติตามเงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 8.24 โดยใช้อุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติเดียวกันกับการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1 และการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 2 แล้วปรากฏว่าค่าความพร้อมมูลของระบบมีค่าที่ดีขึ้น แต่ยังไม่ดีพอที่จะสามารถผ่านค่าตามมาตรฐาน ดังนั้นจึงต้องทำการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์บางตัวในระบบให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น

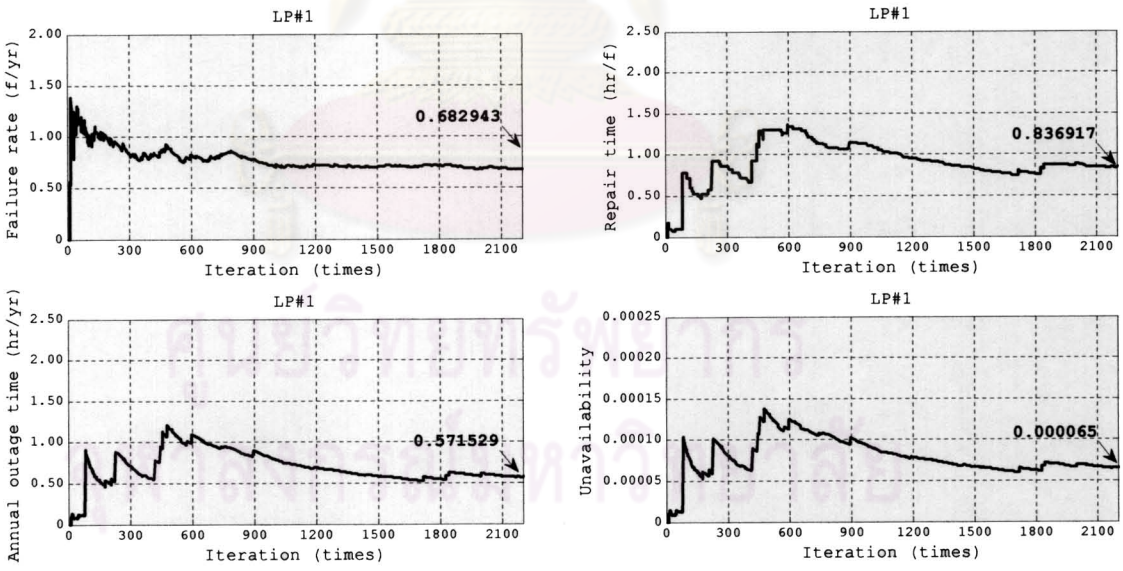
ในระบบทดสอบจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลายชนิด ดังนั้นผู้ออกแบบจึงได้เลือกคุณสมบัติของอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อให้ระบบทดสอบดังกล่าวมีความเชื่อถือได้ที่ดีพอที่จะสามารถผ่านมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 (Tier 4) โดยคุณสมบัติของอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE Std 493™-2007.[9] สามารถแสดงได้ตามตารางที่ 8.16

ตารางที่ 8.16 รายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบทดสอบระบบที่ 4

Item	Item description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
1	24 kV power source from electric utility	1.956000	1.3200	4479.85
2	Transformer, liquid, forced air, <=5000 kVA	0.01263	3.65	693748.2
3	Diesel engine generator, unpackaged, 250 kW to 1.5 MW, continuous	0.632990	24.0500	13839.2
4	Control panel, generator, wo/switchgear	0.01111	2.11	788570.6
5	Control panel, switch gear controls	0.019620	1.2700	446426.2
6	Uninterruptible power supply	0.009380	2.0000	933708

ตารางที่ 8.16 รายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบทดสอบระบบที่ 4 (ต่อ)

Item	Item description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
	UPS rotary			
7	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.2900	923068.2
8	Switch automatic transfer : ATS, 0 to 600 A	0.085800	5.7400	102093.8
9	Circuit breaker, 600 V, drawout (metal clad), >600 A, n.c.	0.00185	0.5	4732057.8
10	Circuit breaker, 600 V, drawout (metal clad), <600 A, n.c.	0.00021	6	42129480
11	Cable, aboveground, no conduit, >600 V per 1000 ft	0.00076	4	11589564
12	Cable, aboveground, no conduit, <=600 V per 1000 ft	0.00012	2.5	72896904



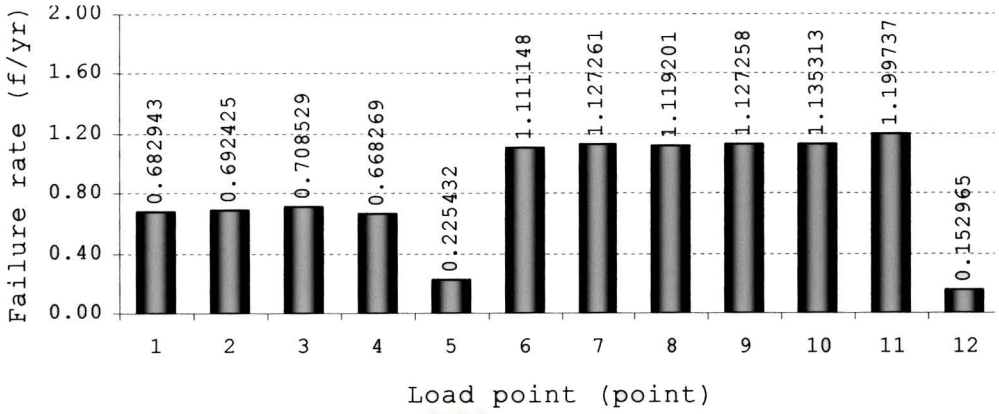
รูปที่ 8.30 การลู่เข้าของค่าต่าง ๆ ณ จุดโหลดที่ 1 (LP#1)

ตารางที่ 8.17 ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด ของระบบทดสอบระบบที่ 4

จุดโหลด	λ (f/yr)	r (hr/f)	U (hr/yr)	Unavailability	Availability
LP#1	0.682943	0.836917	0.571529	0.000065	0.999935
LP#2	0.692425	0.925668	0.640909	0.000073	0.999927
LP#3	0.708529	0.867991	0.614954	0.000070	0.999930
LP#4	0.668269	0.856802	0.572536	0.000065	0.999935
LP#5	0.225432	4.253096	1.015026	0.000086	0.999914
LP#6	1.111148	1.546123	1.717635	0.000196	0.999804
LP#7	1.127261	1.590304	1.792322	0.000205	0.999795
LP#8	1.119201	1.545785	1.729703	0.000197	0.999803
LP#9	1.127258	1.570939	1.770496	0.000202	0.999798
LP#10	1.135313	1.579830	1.793235	0.000205	0.999795
LP#11	1.199737	1.550915	1.860295	0.000212	0.999788
LP#12	0.152965	4.226073	0.946395	0.000074	0.999926

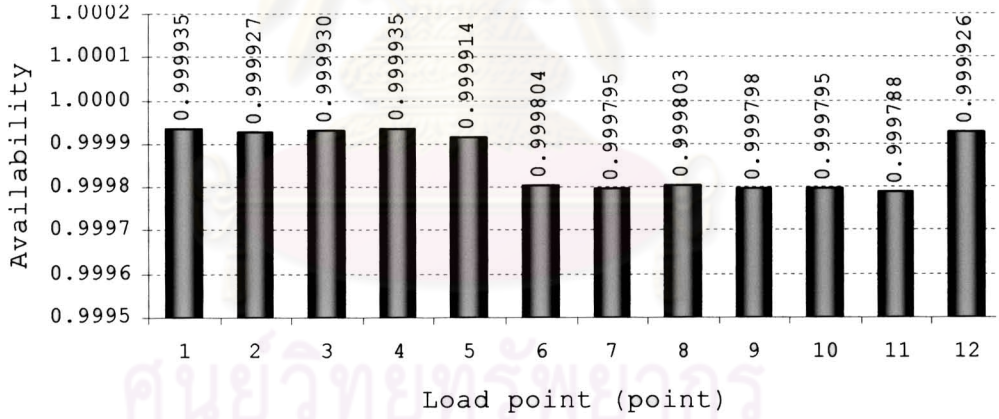
ตารางที่ 8.18 ดัชนีความเชื่อถือได้ของผู้ใช้ไฟฟ้า ของระบบทดสอบระบบที่ 4

ดัชนี	ค่าที่ได้จากการทดสอบ	หน่วย
SAIFI	0.833848	ครั้ง/อุปกรณ์/ปี
SAIDI	1.191149	ชั่วโมง/อุปกรณ์/ปี
CAIFI	0.833848	ครั้ง/อุปกรณ์/ปี
CAIDI	1.428497	ชั่วโมง/ครั้ง
ASAI	0.999864	ไม่มีหน่วย
ASUI	0.000136	ไม่มีหน่วย
ENS	19.353375	กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี
AENS	0.099760	กิโลวัตต์-ชั่วโมง/อุปกรณ์/ปี
ACCI	0.099760	กิโลวัตต์-ชั่วโมง/อุปกรณ์/ปี



รูปที่ 8.31 การเปรียบเทียบอัตราการล้มเหลวของแต่ละจุดโหลด

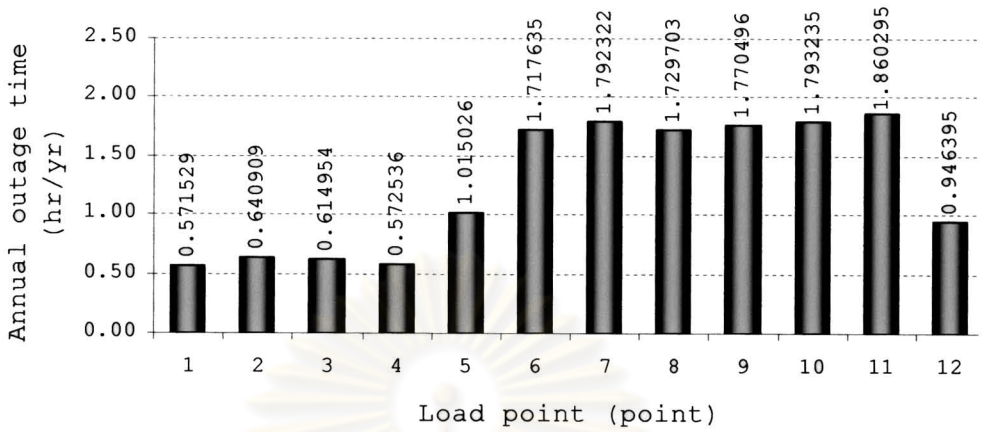
จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบระบบที่ 4 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 (Tier 4) และเมื่อทำการพิจารณาอัตราการล้มเหลว (Failure rate) ของแต่ละจุดโหลดดังแสดงในรูปที่ 8.31 จะเห็นได้ว่าแต่ละจุดโหลดมีค่าอัตราการล้มเหลวที่แตกต่างกัน ดังนั้นผู้ออกแบบเลือกพิจารณาติดตั้งโหลดได้ตามความเหมาะสมขึ้นอยู่กับว่าต้องการให้โหลดดังกล่าวมีความเชื่อถือได้มากน้อยเพียงใด



รูปที่ 8.32 การเปรียบเทียบค่าความพร้อมมูลของแต่ละจุดโหลด

จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบระบบที่ 4 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 (Tier 4) และเมื่อทำการพิจารณาความพร้อมมูล (Availability) ของแต่ละจุดโหลดดังแสดงในรูปที่ 8.32 โดยในกรณีของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 นั้นค่าความพร้อมมูลของจุดโหลดที่พิจารณาต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 99.99% จากผลที่ได้มีเพียงบางจุดโหลดเท่านั้นที่มีค่าความพร้อมมูลไม่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานและถือว่าผ่านเกณฑ์ดังกล่าว ซึ่งก็เพียงพอที่จะรองรับโหลดที่สำคัญ ๆ ต่อระบบไฟฟ้าหนึ่งระบบได้ ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถเลือกอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ตามความ

เหมาะสมโดยอาจพิจารณาจากงบประมาณในการติดตั้งระบบ เพราะอุปกรณ์ที่มีความเชื่อถือได้ที่ดีก็ย่อมมีราคาสูงเช่นกัน



รูปที่ 8.33 การเปรียบเทียบระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในหนึ่งปีของแต่ละจุดโหลด

จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบระบบที่ 1 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1 (Tier 1) และเมื่อทำการพิจารณาช่วงระยะเวลาที่จุดโหลดนั้น ๆ ไม่ได้รับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าต่อปี (Annual outage time) ของแต่ละจุดโหลดดังแสดงในรูปที่ 8.33 จะเห็นได้ว่าแต่ละจุดโหลดมีค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถเลือกติดตั้งโหลดได้ตามความเหมาะสม

8.1.5 เปรียบเทียบผลการทดสอบ

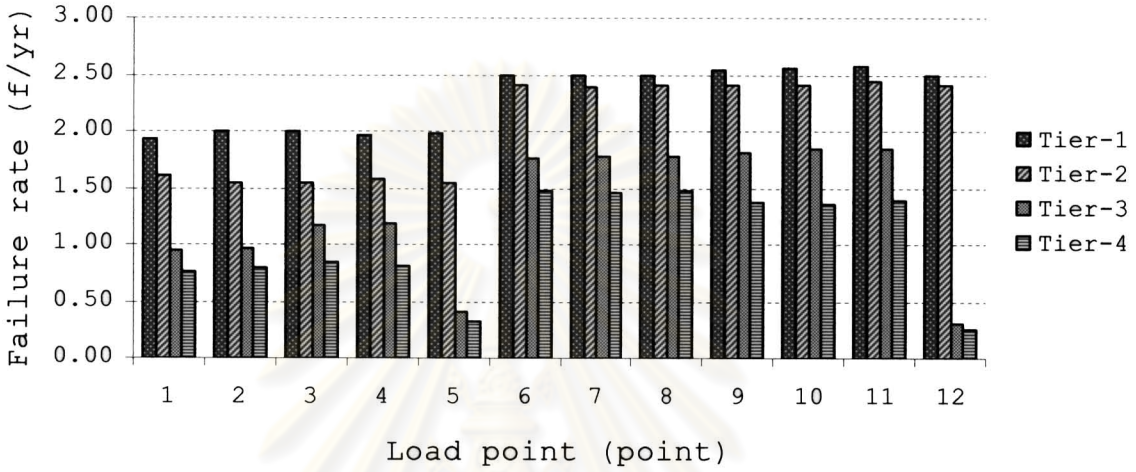
การเปรียบเทียบผลการทดสอบของการออกแบบระบบไฟฟ้าตามมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1 การจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 2 การจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 และสุดท้ายการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 จะแบ่งการเปรียบเทียบออกเป็น 2 กรณี คือ เปรียบเทียบผลการทดสอบการจัดอันดับเทียร์ทุกระดับโดยที่อุปกรณ์ทุกตัวมีคุณสมบัติเดียวกันทั้งหมด และเปรียบเทียบผลการทดสอบการจัดอันดับเทียร์ทุกระดับโดยที่มีการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของอุปกรณ์บางตัวในระบบ

8.1.5.1 เปรียบเทียบผลการทดสอบการจัดอันดับเทียร์ทุกระดับโดยที่อุปกรณ์ทุกตัวในระบบมีคุณสมบัติเดียวกันทั้งหมด

ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบของการจัดอันดับเทียร์ทุกระดับที่ได้ จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าทั้ง 4 ระบบ ได้แก่ ระบบทดสอบระบบที่ 1 โดยทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1 (Tier 1), ระบบทดสอบระบบที่ 2 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 2 (Tier 2), ระบบทดสอบระบบที่ 3 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับ

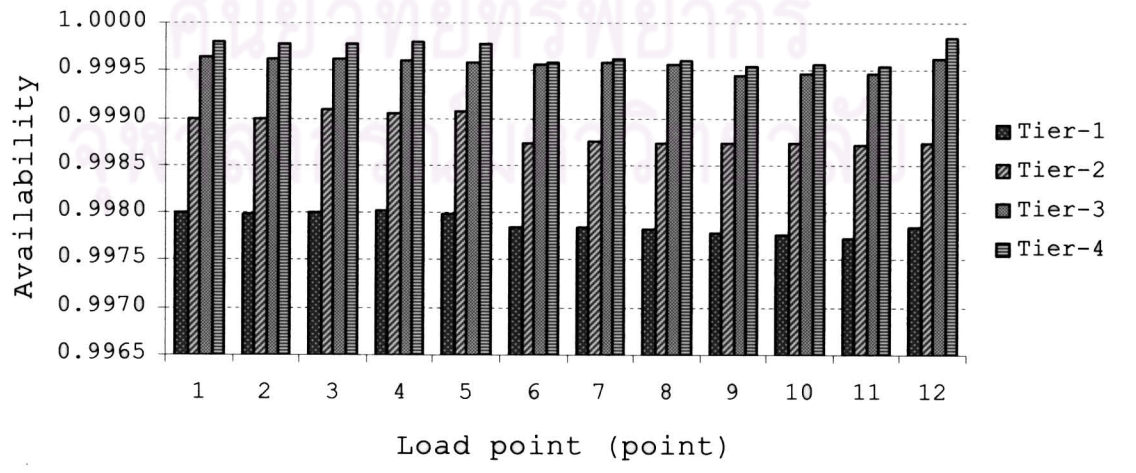
ที่ 3 (Tier 3) และระบบทดสอบระบบที่ 4 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 (Tier 4) โดยที่ทุกระบบใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติเดียวกันทั้งหมด เปลี่ยนแปลงเฉพาะโครงสร้างของระบบให้เป็นไปตามเงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับเท่านั้น

เปรียบเทียบดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลดของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ



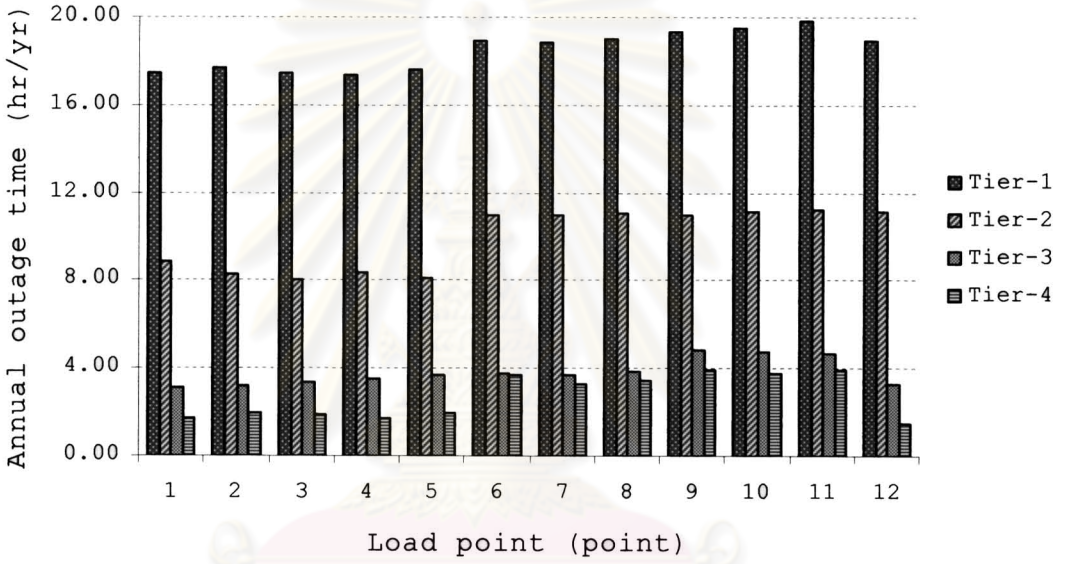
รูปที่ 8.34 การเปรียบเทียบอัตราการล้มเหลวของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ

จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาอัตราการล้มเหลว (Failure rate) ของจุดโหลดต่าง ๆ สำหรับการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ ดังแสดงในรูปที่ 8.34 จะเห็นได้ว่า ค่าอัตราการล้มเหลวมีค่าที่ลดน้อยลงตามลำดับ กล่าวคือระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ที่ดีขึ้นตามระดับของการจัดอันดับเทียร์นั่นเอง



รูปที่ 8.35 การเปรียบเทียบค่าความพร้อมมูลของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ

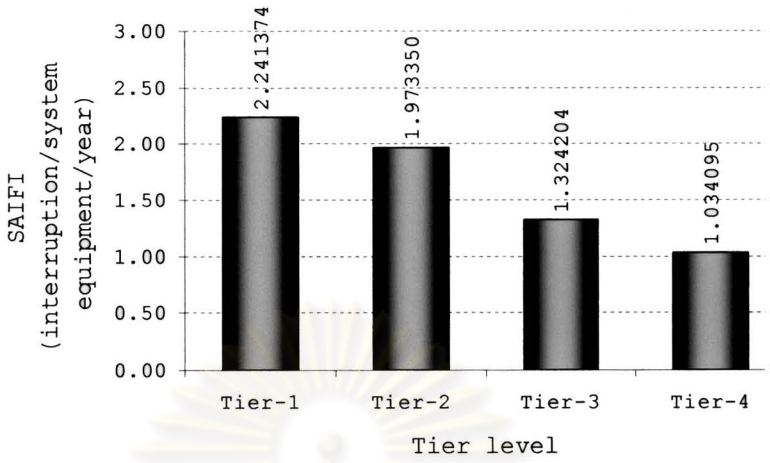
จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาค่าความพร้อมมูล (Availability) ของจุดโหลดต่าง ๆ สำหรับการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ ดังแสดงในรูปที่ 8.35 จะเห็นได้ว่า ค่าความพร้อมมูลมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ กล่าวคือระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ที่ดีขึ้นตามระดับของการจัดอันดับเทียร์ แต่เนื่องจากว่าการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับจะมีค่าความพร้อมมูลเป็นมาตรฐาน คือ 99.67%, 99.75%, 99.98% และ 99.99% สำหรับการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1, ระดับที่ 2, ระดับที่ 3 และระดับที่ 4 ตามลำดับ และเทียร์แต่ละระดับก็จะมีโครงสร้างของระบบที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับว่าผู้ออกแบบจะเลือกคุณสมบัติของอุปกรณ์ภายในระบบอย่างไรเพื่อให้ระบบดังกล่าวมีค่าความพร้อมมูลที่ผ่านมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ



รูปที่ 8.36 การเปรียบเทียบช่วงระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในหนึ่งปี ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ

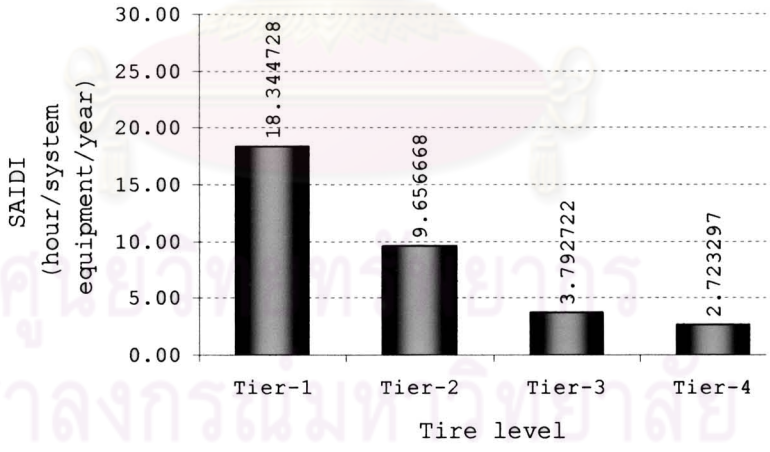
จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาช่วงระยะเวลาที่จุดโหลดนั้น ๆ ไม่ได้รับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าต่อปี (Annual outage time) ของจุดโหลดต่าง ๆ สำหรับการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ ดังแสดงในรูปที่ 8.36 จะเห็นได้ว่า ช่วงระยะเวลาที่จุดโหลดนั้น ๆ ไม่ได้รับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าต่อปีมีค่าที่ลดน้อยลงตามลำดับ กล่าวคือระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ที่ดีขึ้นตามระดับของการจัดอันดับเทียร์ ซึ่งผู้ออกแบบสามารถพิจารณาเลือกติดตั้งโหลดโดยอาจพิจารณาจากความสำคัญของโหลดได้ตามความเหมาะสม

เปรียบเทียบดัชนีความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ไฟฟ้าของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ



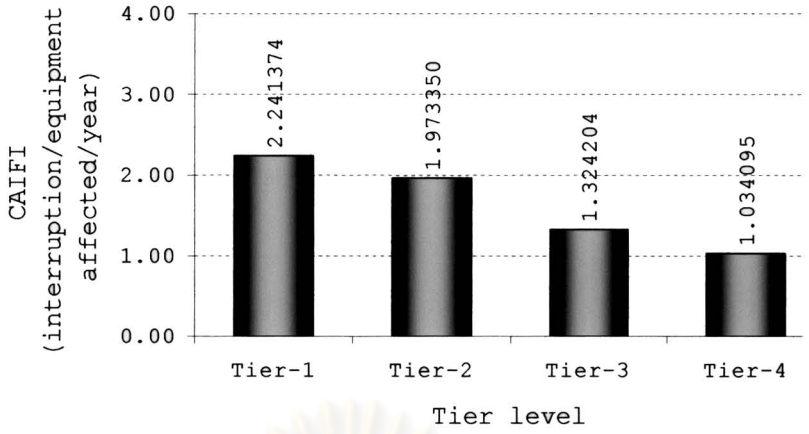
รูปที่ 8.37 การเปรียบเทียบ SAIFI ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ

จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาดัชนีแสดงความถี่ของการเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับของระบบโดยเฉลี่ย (System average interruption frequency index: SAIFI) ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ ดังแสดงในรูปที่ 8.37 จะเห็นได้ว่าดัชนีดังกล่าวมีค่าที่ลดน้อยลงตามลำดับ กล่าวคือระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ที่ดีขึ้นตามระดับของการจัดอันดับเทียร์นั่นเอง



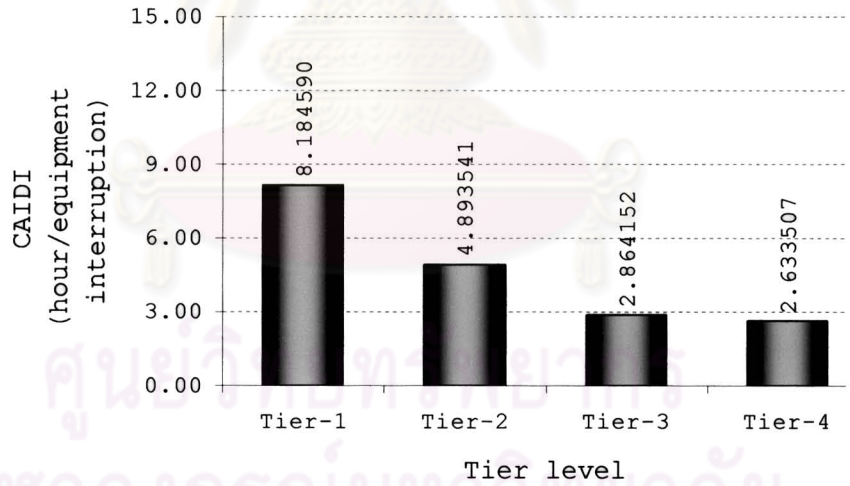
รูปที่ 8.38 การเปรียบเทียบ SAIDI ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ

จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาดัชนีแสดงช่วงระยะเวลาของการเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับของระบบโดยเฉลี่ย (System average interruption duration index: SAIDI) ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ ดังแสดงในรูปที่ 8.38 จะเห็นได้ว่าดัชนีดังกล่าวมีค่าที่ลดน้อยลงตามลำดับ กล่าวคือระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ที่ดีขึ้นตามระดับของการจัดอันดับเทียร์นั่นเอง



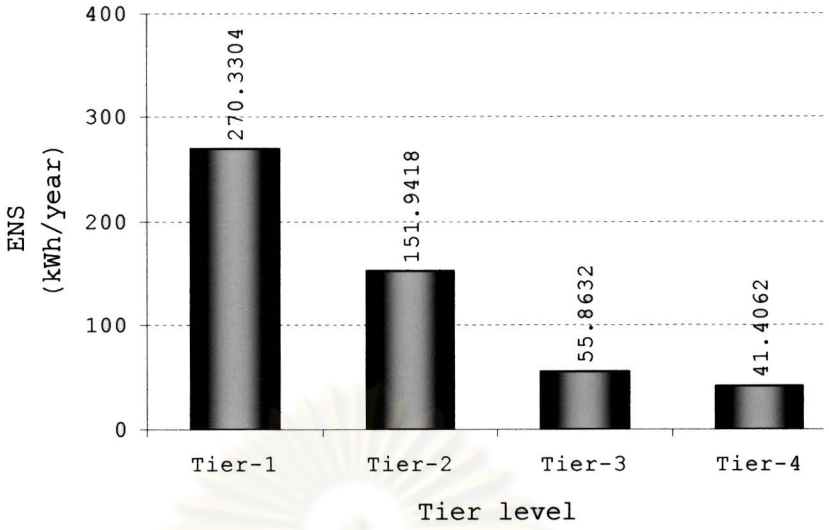
รูปที่ 8.39 การเปรียบเทียบ CAIFI ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ

จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาดัชนีแสดงความถี่ของการเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับของอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยเฉลี่ย (Customer average interruption frequency index: CAIFI) ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ ดังแสดงในรูปที่ 8.39 จะเห็นได้ว่าดัชนีดังกล่าวมีค่าที่ลดน้อยลงตามลำดับ กล่าวคือระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ที่ดีขึ้นตามระดับของการจัดอันดับเทียร์นั่นเอง



รูปที่ 8.40 การเปรียบเทียบ CAIDI ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ

จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาดัชนีแสดงช่วงระยะเวลาของการเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับของอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยเฉลี่ย (Customer average interruption duration index: CAIDI) ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ ดังแสดงในรูปที่ 8.40 จะเห็นได้ว่าดัชนีดังกล่าวมีค่าที่ลดน้อยลงตามลำดับ กล่าวคือระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ที่ดีขึ้นตามระดับของการจัดอันดับเทียร์นั่นเอง



รูปที่ 8.41 การเปรียบเทียบ ENS ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ

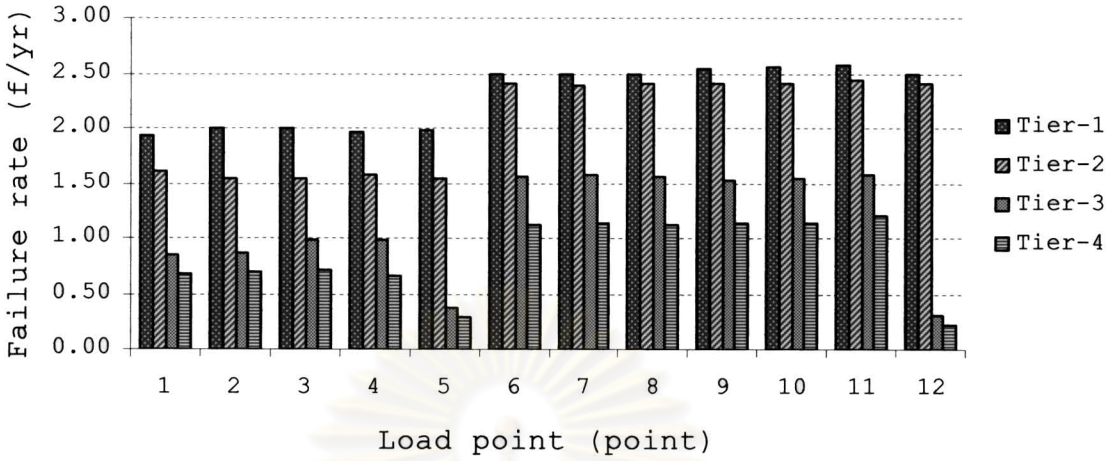
จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาดัชนีแสดงจำนวนพลังงานไฟฟ้าที่ไม่ได้จ่ายให้แก่อุปกรณ์ไฟฟ้า (Energy not supplied: ENS) ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ ดังแสดงในรูปที่ 8.41 จะเห็นได้ว่าดัชนีดังกล่าวมีค่าที่ลดน้อยลงตามลำดับ กล่าวคือระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ที่ดีขึ้นตามระดับของการจัดอันดับเทียร์นั่นเอง

8.1.5.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบการจัดอันดับเทียร์ทุกระดับโดยที่มีการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติบางตัวของอุปกรณ์ในระบบ

ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบของการจัดอันดับเทียร์ทุกระดับที่ได้ โดยทำการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของอุปกรณ์บางตัวในระบบของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 และการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 เพื่อให้ระบบทั้งสองมีค่าความพร้อมมูลผ่านมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์

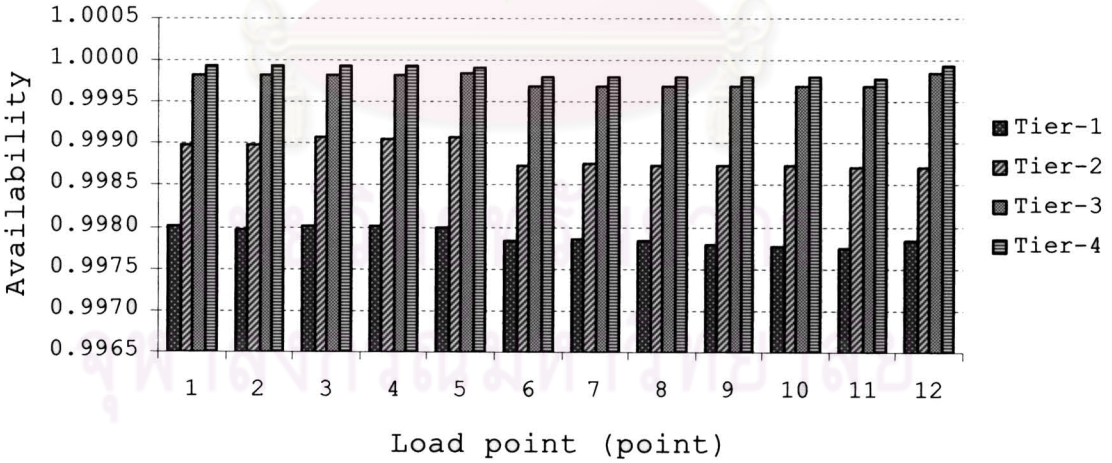
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เปรียบเทียบดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลดของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ



รูปที่ 8.42 การเปรียบเทียบอัตราการล้มเหลวของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ

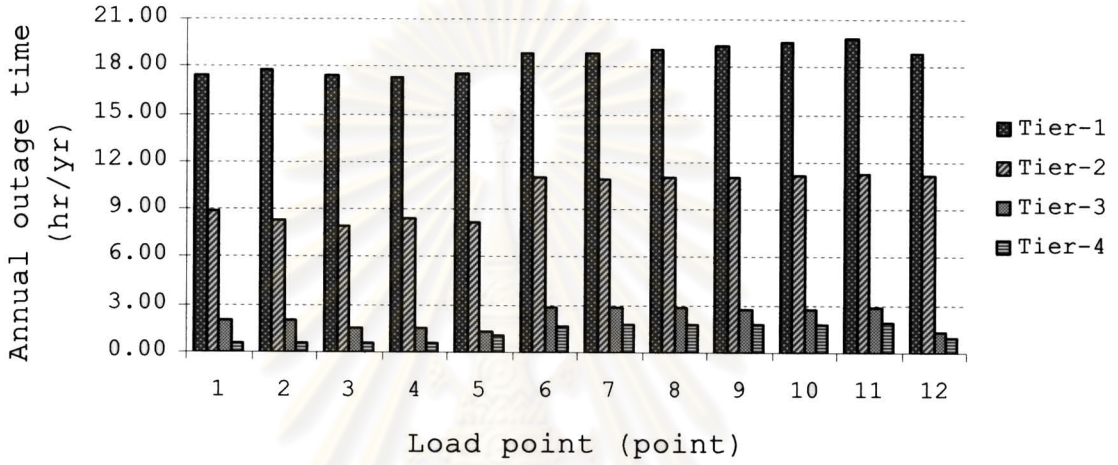
จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาอัตราการล้มเหลว (Failure rate) ของจุดโหลดต่าง ๆ สำหรับการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ ดังแสดงในรูปที่ 8.42 จะเห็นได้ว่า ค่าอัตราการล้มเหลวมีค่าที่ลดน้อยลงตามลำดับ กล่าวคือระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ที่ดีขึ้นตามระดับของการจัดอันดับเทียร์นั่นเอง



รูปที่ 8.43 การเปรียบเทียบค่าความพร้อมมูลของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ

จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาค่าความพร้อมมูล (Availability) ของจุดโหลดต่าง ๆ สำหรับการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ ดังแสดงในรูปที่ 8.43 จะเห็นได้ว่า ค่าความพร้อมมูลมีค่าที่

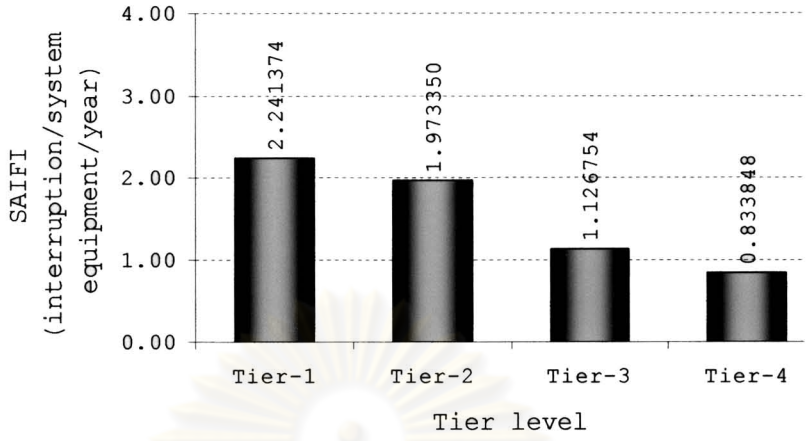
เพิ่มขึ้นตามลำดับ กล่าวคือระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ที่ดีขึ้นตามระดับของการจัดอันดับเทียร์ แต่เนื่องจากว่าการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับจะมีค่าความพร้อมมูลเป็นมาตรฐาน คือ 99.67%, 99.75%, 99.98% และ 99.99% สำหรับการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 1, ระดับที่ 2, ระดับที่ 3 และระดับที่ 4 ตามลำดับ และเทียร์แต่ละระดับก็จะมีโครงสร้างของระบบที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับว่าผู้ออกแบบจะเลือกคุณสมบัติของอุปกรณ์ภายในระบบอย่างไรเพื่อให้ระบบดังกล่าวมีค่าความพร้อมมูลที่ผ่านมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ



รูปที่ 8.44 การเปรียบเทียบช่วงระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในหนึ่งปี ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ

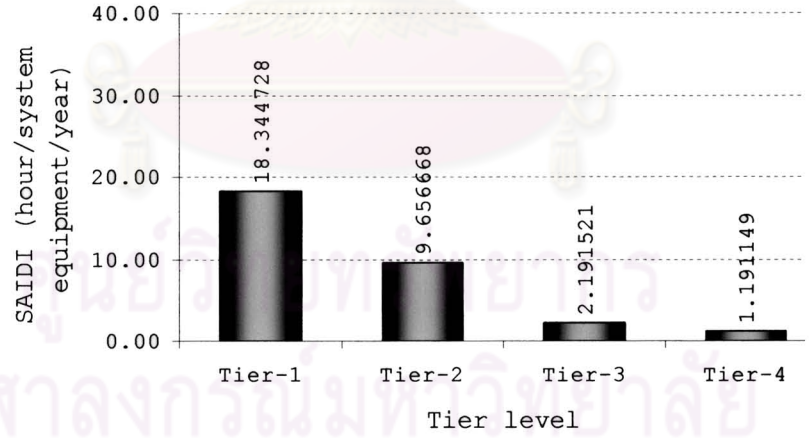
จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาช่วงระยะเวลาที่จุดโหลดนั้น ๆ ไม่ได้รับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าต่อปี (Annual outage time) ของจุดโหลดต่าง ๆ สำหรับการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ ดังแสดงในรูปที่ 8.44 จะเห็นได้ว่า ช่วงระยะเวลาที่จุดโหลดนั้น ๆ ไม่ได้รับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าต่อปีมีค่าที่ลดน้อยลงตามลำดับ กล่าวคือระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ที่ดีขึ้นตามระดับของการจัดอันดับเทียร์ ซึ่งผู้ออกแบบสามารถพิจารณาเลือกติดตั้งโหลดโดยอาจพิจารณาจากความสำคัญของโหลดได้ตามความเหมาะสม

เปรียบเทียบดัชนีความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ไฟฟ้าของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ



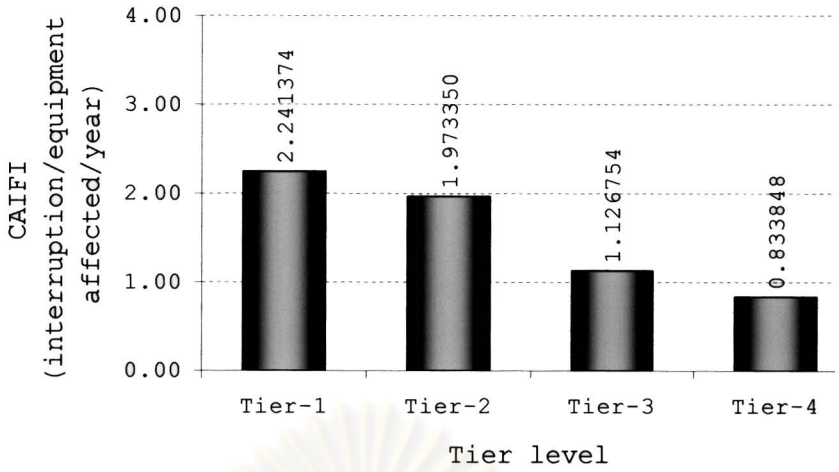
รูปที่ 8.45 การเปรียบเทียบ SAIFI ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ

จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาดัชนีแสดงความถี่ของการเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับของระบบโดยเฉลี่ย (System average interruption frequency index: SAIFI) ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ ดังแสดงในรูปที่ 8.45 จะเห็นได้ว่าดัชนีดังกล่าวมีค่าที่ลดน้อยลงตามลำดับ กล่าวคือระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ที่ดีขึ้นตามระดับของการจัดอันดับเทียร์นั่นเอง



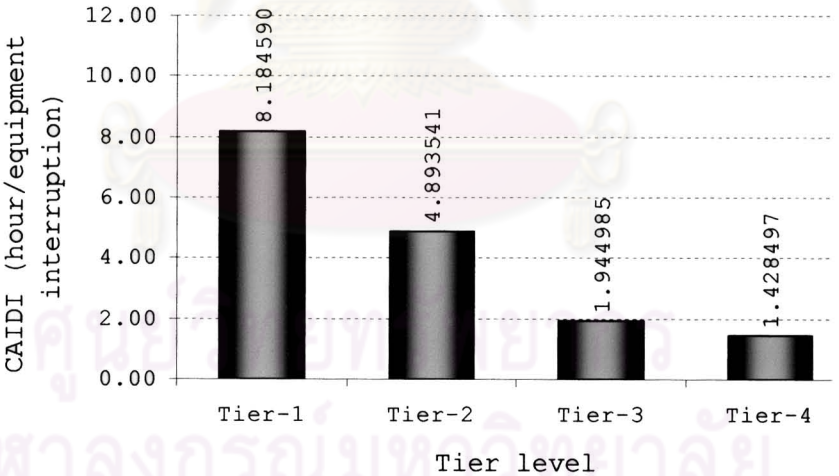
รูปที่ 8.46 การเปรียบเทียบ SAIDI ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ

จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาดัชนีแสดงช่วงระยะเวลาของการเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับของระบบโดยเฉลี่ย (System average interruption duration index: SAIDI) ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ ดังแสดงในรูปที่ 8.46 จะเห็นได้ว่าดัชนีดังกล่าวมีค่าที่ลดน้อยลงตามลำดับ กล่าวคือระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ที่ดีขึ้นตามระดับของการจัดอันดับเทียร์นั่นเอง



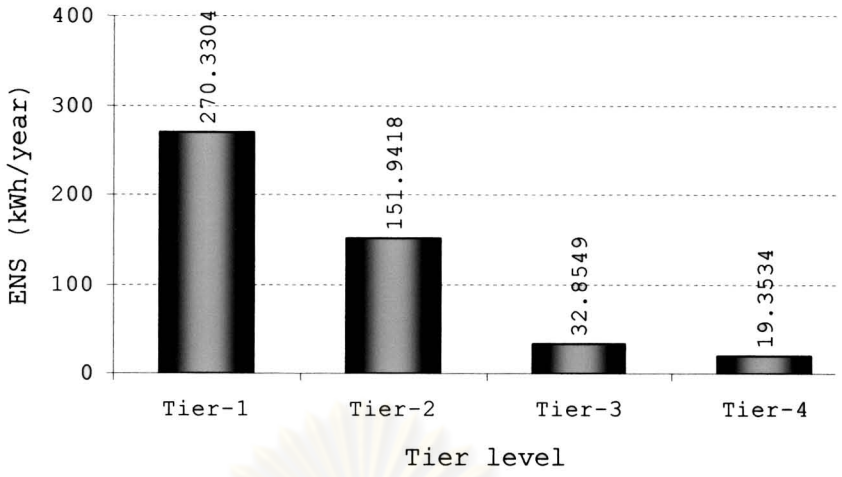
รูปที่ 8.47 การเปรียบเทียบ CAIFI ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ

จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาดัชนีแสดงความถี่ของการเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับของอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยเฉลี่ย (Customer average interruption frequency index: CAIFI) ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ ดังแสดงในรูปที่ 8.47 จะเห็นได้ว่าดัชนีดังกล่าวมีค่าที่ลดน้อยลงตามลำดับ กล่าวคือระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ที่ดีขึ้นตามระดับของการจัดอันดับเทียร์นั่นเอง



รูปที่ 8.48 การเปรียบเทียบ CAIDI ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ

จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาดัชนีแสดงช่วงระยะเวลาของการเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับของอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยเฉลี่ย (Customer average interruption duration index: CAIDI) ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ ดังแสดงในรูปที่ 8.48 จะเห็นได้ว่าดัชนีดังกล่าวมีค่าที่ลดน้อยลงตามลำดับ กล่าวคือระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ที่ดีขึ้นตามระดับของการจัดอันดับเทียร์นั่นเอง



รูปที่ 8.49 การเปรียบเทียบ ENS ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ

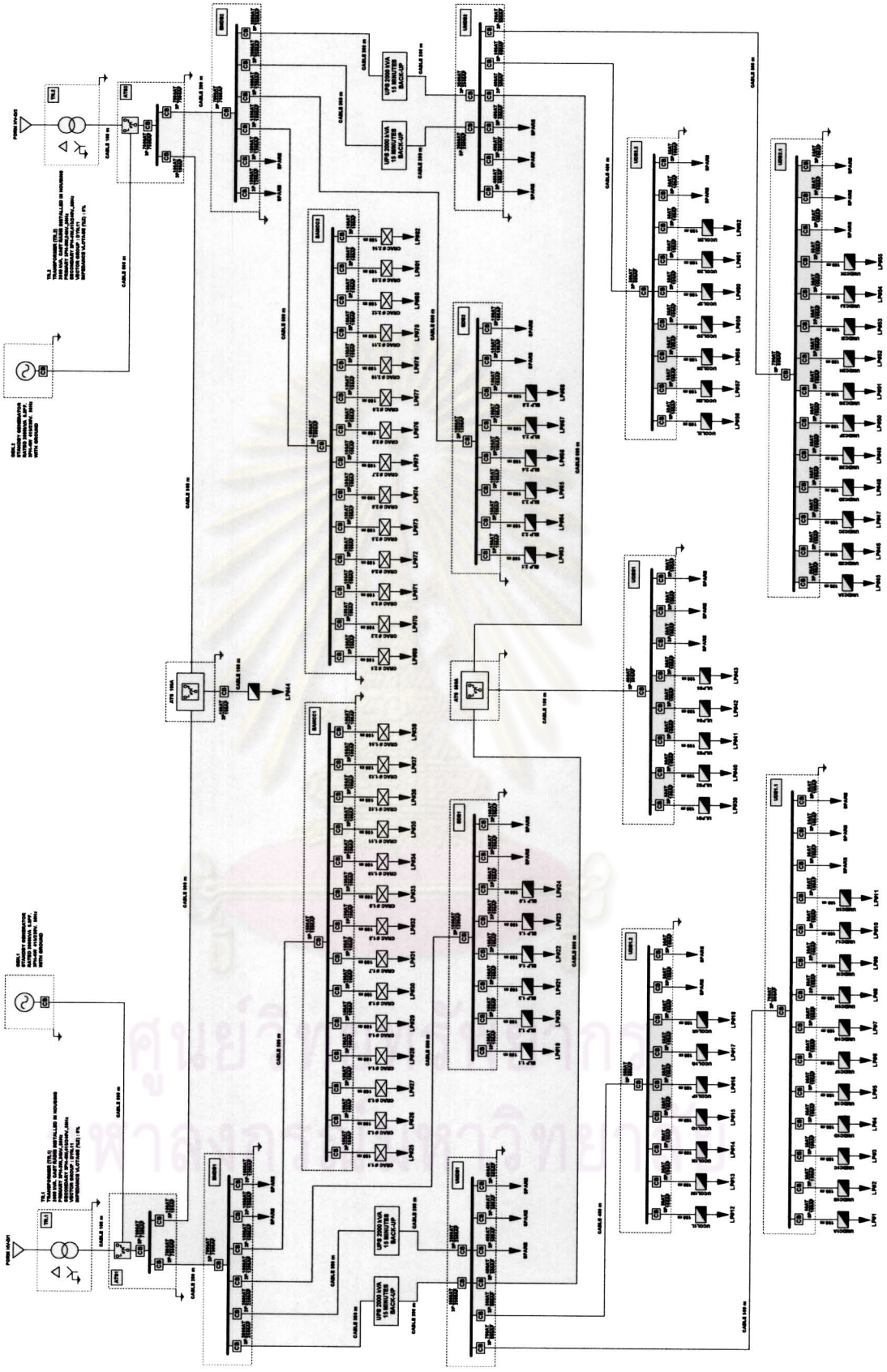
จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาดัชนีแสดงจำนวนพลังงานไฟฟ้าที่ไม่ได้จ่ายให้แก่อุปกรณ์ไฟฟ้า (Energy not supplied: ENS) ของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับ ดังแสดงในรูปที่ 8.49 จะเห็นได้ว่าดัชนีดังกล่าวมีค่าที่ลดน้อยลงตามลำดับ กล่าวคือระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ที่ดีขึ้นตามระดับของการจัดอันดับเทียร์นั่นเอง

8.2 การวิเคราะห์ผลจากระบบไฟฟ้าที่ใช้งานจริง

การวิเคราะห์ผลจากระบบไฟฟ้าที่ใช้งานจริงและระบบไฟฟ้านั้นมีลักษณะเข้าข่ายมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พิจารณาเลือกระบบไฟฟ้าของโรงงานที่มีลักษณะของระบบเข้าข่ายการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 (Tier 4) และการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 (Tier 3) ในระบบทดสอบระบบที่ 5 และระบบทดสอบระบบที่ 6 ตามลำดับ

8.2.1 ระบบทดสอบระบบที่ 5

ระบบทดสอบระบบนี้ คือ ระบบไฟฟ้าของโรงงานแห่งหนึ่งซึ่งเมื่อพิจารณาจากโครงสร้างของระบบแล้วจะเห็นได้ว่าระบบไฟฟ้าของโรงงานแห่งนี้อยู่ในมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 (Tier 4) ดังนั้นในการทดสอบระบบจึงได้พิจารณาเลือกมาตรฐานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบ แล้วทำการทดสอบระบบว่ามีผลเป็นอย่างไร มีค่าความพร้อมมูลที่จะสามารถผ่านมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 (Tier 4) หรือไม่ โดยระบบไฟฟ้าที่ทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.50



รูปที่ 8.50 แผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบระบบที่ 5

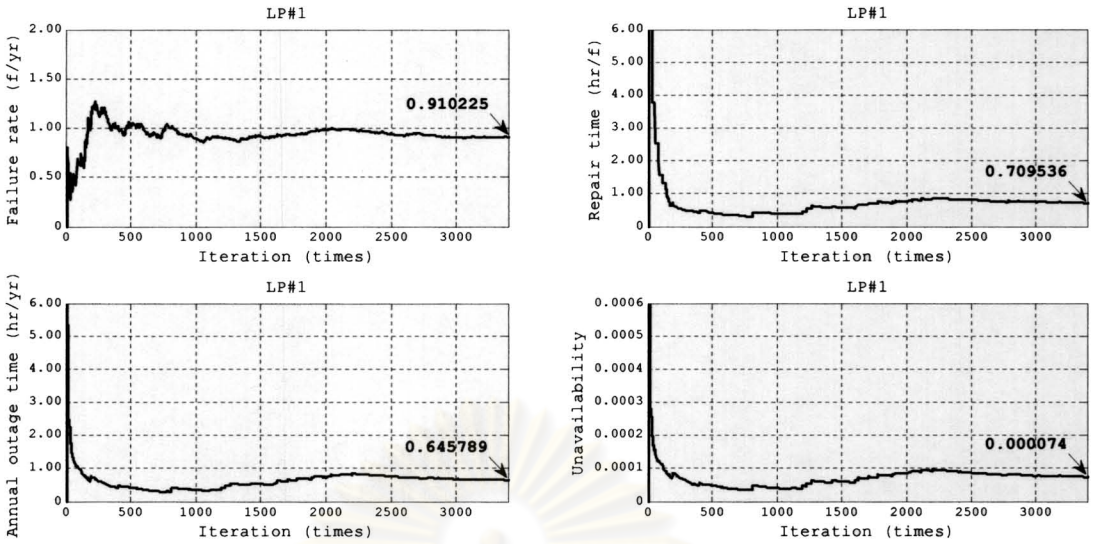
แผนภาพที่แสดงหมายเลขของอุปกรณ์และสายส่งแรงต่ำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.51

รูปที่ 8.51 แผนภาพแสดงหมายเลขของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 5

ในระบบทดสอบจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลายชนิด ดังนั้นผู้ออกแบบจึงได้เลือกคุณสมบัติของอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อให้ระบบทดสอบดังกล่าวมีความเชื่อถือได้ที่ดีพอที่จะสามารถผ่านมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 (Tier 4) โดยคุณสมบัติของอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE Std 493™-2007.[9] สามารถแสดงได้ตามตารางที่ 8.19

ตารางที่ 8.19 รายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบทดสอบระบบที่ 5

Item	Item description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
1	24 kV power source from electric utility	1.956000	1.3200	4479.85
2	Transformer, liquid, forced air, <=5000 kVA	0.01263	3.65	693748.2
3	Diesel engine generator, unpackaged, 250 kW to 1.5 MW, continuous	0.632990	24.0500	13839.2
4	Control panel, generator, wo/switchgear	0.01111	2.11	788570.6
5	Control panel, switch gear controls	0.019620	1.2700	446426.2
6	Uninterruptible power supply UPS rotary	0.009380	2.0000	933708
7	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.2900	923068.2
8	Switch automatic transfer : ATS, 0 to 600 A	0.085800	5.7400	102093.8
9	Circuit breaker, 600 V, drawout (metal clad), >600 A, n.c.	0.00185	0.5	4732057.8
10	Circuit breaker, 600 V, drawout (metal clad), <600 A, n.c.	0.00021	6	42129480
11	Cable, aboveground, no conduit, >600 V per 1000 ft	0.00076	4	11589564
12	Cable, aboveground, no conduit, <=600 V per 1000 ft	0.00012	2.5	72896904



รูปที่ 8.52 การลู่เข้าของค่าต่าง ๆ ณ จุดโหลดที่ 1 (LP#1)

ตารางที่ 8.20 ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด ของระบบทดสอบระบบที่ 5

จุดโหลด	λ (f/yr)	r (hr/f)	U (hr/yr)	Unavailability	Availability
LP#1	0.910225	0.709536	0.645789	0.000074	0.999926
LP#2	0.952177	0.730297	0.695316	0.000079	0.999921
LP#3	0.962304	0.702173	0.675652	0.000077	0.999923
LP#4	0.952179	0.751183	0.715202	0.000082	0.999918
LP#5	0.962309	0.746107	0.717926	0.000082	0.999918
LP#6	0.942055	0.814746	0.767468	0.000088	0.999912
LP#7	0.942047	0.733469	0.690908	0.000079	0.999921
LP#8	0.952178	0.742491	0.706927	0.000081	0.999919
LP#9	0.952179	0.751081	0.715105	0.000082	0.999918
LP#10	0.942047	0.731177	0.688749	0.000079	0.999921
LP#11	0.942047	0.736912	0.694151	0.000079	0.999921
LP#12	0.962296	0.627466	0.603766	0.000069	0.999931
LP#13	0.972426	0.622076	0.604881	0.000069	0.999931
LP#14	0.962296	0.627466	0.603766	0.000069	0.999931
LP#15	0.982567	0.719879	0.707272	0.000081	0.999919
LP#16	0.982562	0.680095	0.668184	0.000076	0.999924

ตารางที่ 8.20 ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด ของระบบทดสอบระบบที่ 5 (ต่อ)

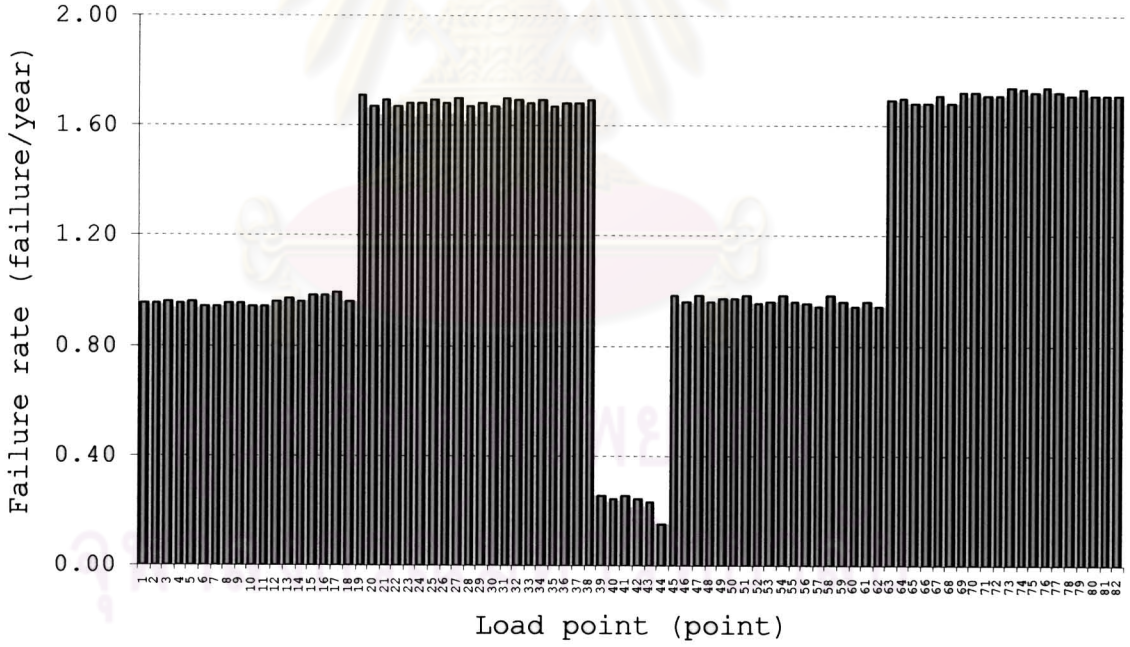
จุดโหลด	λ (f/yr)	r (hr/f)	U (hr/yr)	Unavailability	Availability
LP#17	0.992696	0.713700	0.708430	0.000081	0.999919
LP#18	0.962296	0.627466	0.603766	0.000069	0.999931
LP#19	1.712032	1.424173	2.437551	0.000278	0.999722
LP#20	1.671499	1.422475	2.377021	0.000271	0.999729
LP#21	1.691767	1.428035	2.415237	0.000276	0.999724
LP#22	1.671499	1.422475	2.377021	0.000271	0.999729
LP#23	1.681633	1.424710	2.395185	0.000273	0.999727
LP#24	1.681634	1.426426	2.398070	0.000274	0.999726
LP#25	1.691792	1.504911	2.545257	0.000291	0.999709
LP#26	1.681662	1.514435	2.546028	0.000291	0.999709
LP#27	1.701952	1.584513	2.695935	0.000308	0.999692
LP#28	1.671527	1.509081	2.521744	0.000288	0.999712
LP#29	1.681661	1.512831	2.543332	0.000290	0.999710
LP#30	1.671527	1.509081	2.521744	0.000288	0.999712
LP#31	1.701941	1.551066	2.639028	0.000301	0.999699
LP#32	1.691791	1.501249	2.539064	0.000290	0.999710
LP#33	1.681662	1.513095	2.543774	0.000290	0.999710
LP#34	1.691796	1.517400	2.566380	0.000293	0.999707
LP#35	1.671527	1.509081	2.521744	0.000288	0.999712
LP#36	1.681662	1.513790	2.544943	0.000291	0.999709
LP#37	1.681662	1.513728	2.544838	0.000291	0.999709
LP#38	1.691797	1.517881	2.567193	0.000293	0.999707
LP#39	0.253215	3.627427	0.918424	0.000065	0.999935
LP#40	0.243087	3.782803	0.919453	0.000065	0.999935
LP#41	0.253215	3.629530	0.918956	0.000065	0.999935
LP#42	0.243088	3.826381	0.973796	0.000071	0.999929
LP#43	0.232957	3.764661	0.876916	0.000060	0.999940
LP#44	0.151664	3.194501	0.520582	0.000008	0.999992

ตารางที่ 8.20 ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด ของระบบทดสอบระบบที่ 5 (ต่อ)

จุดโหลด	λ (f/yr)	r (hr/f)	U (hr/yr)	Unavailability	Availability
LP#45	0.982582	0.828306	0.813803	0.000093	0.999907
LP#46	0.962317	0.793218	0.763261	0.000087	0.999913
LP#47	0.982581	0.824620	0.810181	0.000092	0.999908
LP#48	0.962323	0.853087	0.820868	0.000094	0.999906
LP#49	0.972450	0.815552	0.793012	0.000091	0.999909
LP#50	0.972450	0.816272	0.793712	0.000091	0.999909
LP#51	0.982587	0.872830	0.857548	0.000098	0.999902
LP#52	0.952185	0.786009	0.748363	0.000085	0.999915
LP#53	0.962323	0.851052	0.818910	0.000093	0.999907
LP#54	0.982579	0.804983	0.790888	0.000090	0.999910
LP#55	0.962318	0.80478	0.774386	0.000088	0.999912
LP#56	0.952168	0.615357	0.585884	0.000067	0.999933
LP#57	0.942033	0.569632	0.536579	0.000061	0.999939
LP#58	0.982565	0.674905	0.663088	0.000076	0.999924
LP#59	0.962304	0.676932	0.651366	0.000074	0.999926
LP#60	0.942040	0.636872	0.599917	0.000068	0.999932
LP#61	0.962295	0.587794	0.565594	0.000065	0.999935
LP#62	0.942040	0.641290	0.604079	0.000069	0.999931
LP#63	1.691806	1.548021	2.618168	0.000299	0.999701
LP#64	1.701938	1.541690	2.623075	0.000299	0.999701
LP#65	1.681672	1.546656	2.600197	0.000297	0.999703
LP#66	1.681672	1.546656	2.600197	0.000297	0.999703
LP#67	1.712104	1.637377	2.802463	0.000320	0.999680
LP#68	1.681672	1.546656	2.600197	0.000297	0.999703
LP#69	1.722202	1.533226	2.639729	0.000301	0.999699
LP#70	1.722202	1.533434	2.640088	0.000301	0.999699
LP#71	1.712067	1.529541	2.617895	0.000299	0.999701
LP#72	1.712067	1.529541	2.617895	0.000299	0.999701

ตารางที่ 8.20 ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด ของระบบทดสอบระบบที่ 5 (ต่อ)

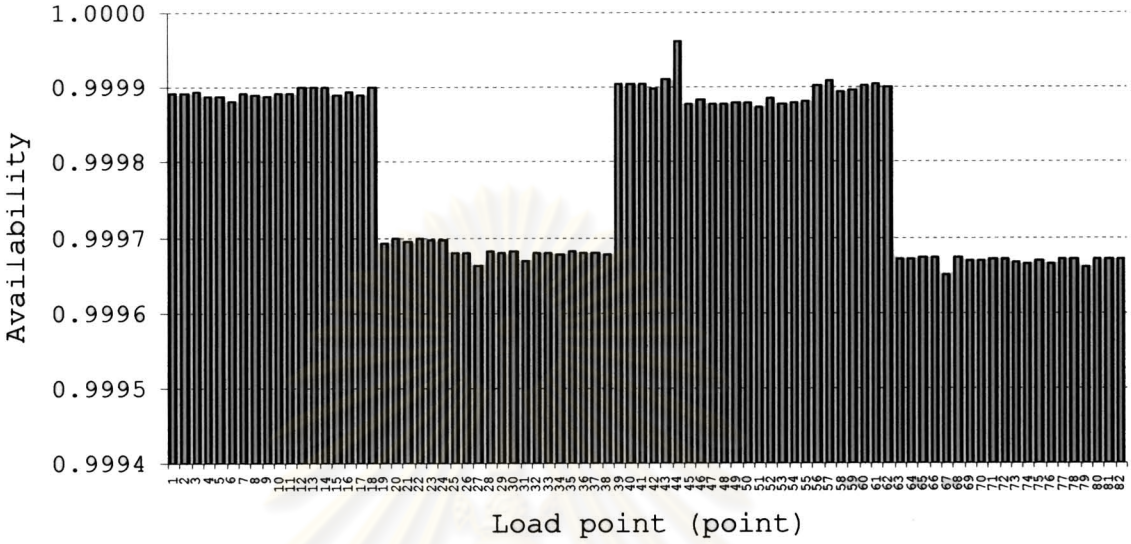
จุดโหลด	λ (f/yr)	r (hr/f)	U (hr/yr)	Unavailability	Availability
LP#73	1.742467	1.526207	2.658558	0.000303	0.999697
LP#74	1.732337	1.536013	2.660085	0.000304	0.999696
LP#75	1.722202	1.531740	2.637172	0.000301	0.999699
LP#76	1.742468	1.528174	2.661984	0.000304	0.999696
LP#77	1.722198	1.521183	2.618996	0.000299	0.999701
LP#78	1.712067	1.529541	2.617895	0.000299	0.999701
LP#79	1.732347	1.564078	2.708688	0.000309	0.999691
LP#80	1.712067	1.529541	2.617895	0.000299	0.999701
LP#81	1.712067	1.529541	2.617895	0.000299	0.999701
LP#82	1.712067	1.529541	2.617895	0.000299	0.999701



รูปที่ 8.53 การเปรียบเทียบอัตราการล้มเหลวของแต่ละจุดโหลด

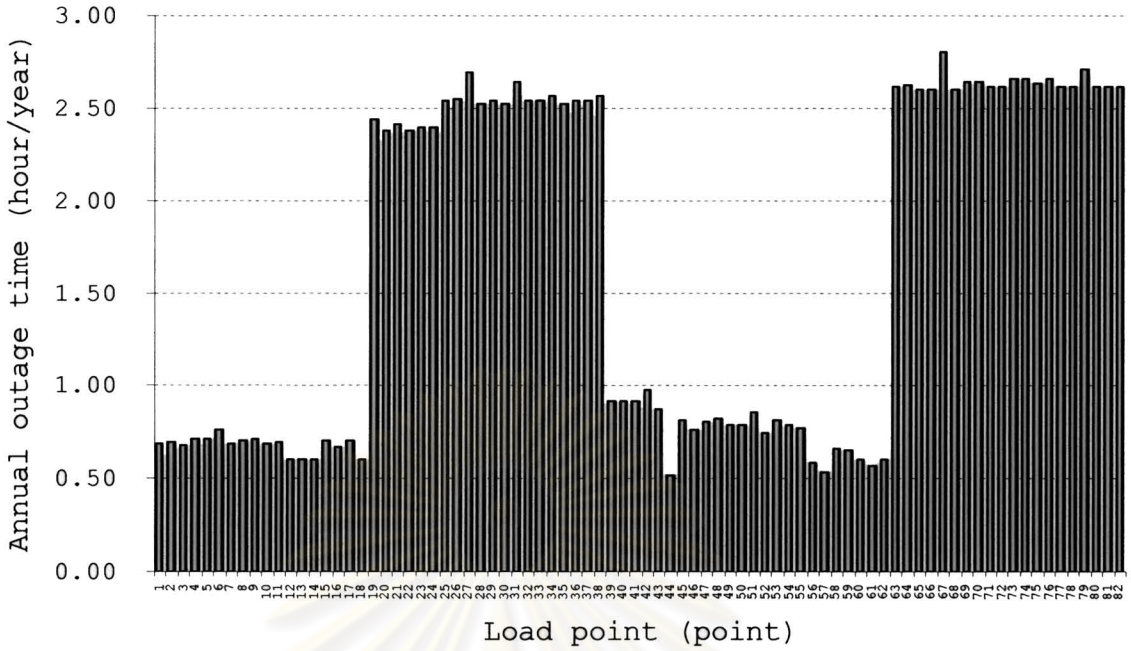
จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบระบบที่ 5 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 (Tier 4) และเมื่อทำการพิจารณาอัตราการล้มเหลว (Failure rate) ของแต่ละจุดโหลดดังแสดงในรูปที่ 8.53 จะเห็นได้ว่าแต่ละจุดโหลดมีค่าอัตราการล้มเหลวที่แตกต่างกัน

ดังนั้นผู้ออกแบบเลือกพิจารณาติดตั้งโหลดได้ตามความเหมาะสมขึ้นอยู่กับว่าต้องการให้โหลดดังกล่าวมีความเชื่อถือได้มากน้อยเพียงใด



รูปที่ 8.54 การเปรียบเทียบค่าความพร้อมมูลของแต่ละจุดโหลด

จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบระบบที่ 5 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 (Tier 4) และเมื่อทำการพิจารณาความพร้อมมูล (Availability) ของแต่ละจุดโหลดดังแสดงในรูปที่ 8.54 โดยในกรณีของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 นั้นค่าความพร้อมมูลของจุดโหลดที่พิจารณาต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 99.99% จากผลที่ได้มีเพียงบางจุดโหลดเท่านั้นที่มีค่าความพร้อมมูลไม่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานและถือว่าผ่านเกณฑ์ดังกล่าว ซึ่งก็เพียงพอที่จะรองรับโหลดที่สำคัญ ๆ ต่อระบบไฟฟ้าหนึ่งระบบได้ ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถเลือกอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ตามความเหมาะสมโดยอาจพิจารณาจากงบประมาณในการติดตั้งระบบ เพราะอุปกรณ์ที่มีความเชื่อถือได้ที่ดีก็ย่อมมีราคาสูงเช่นกัน

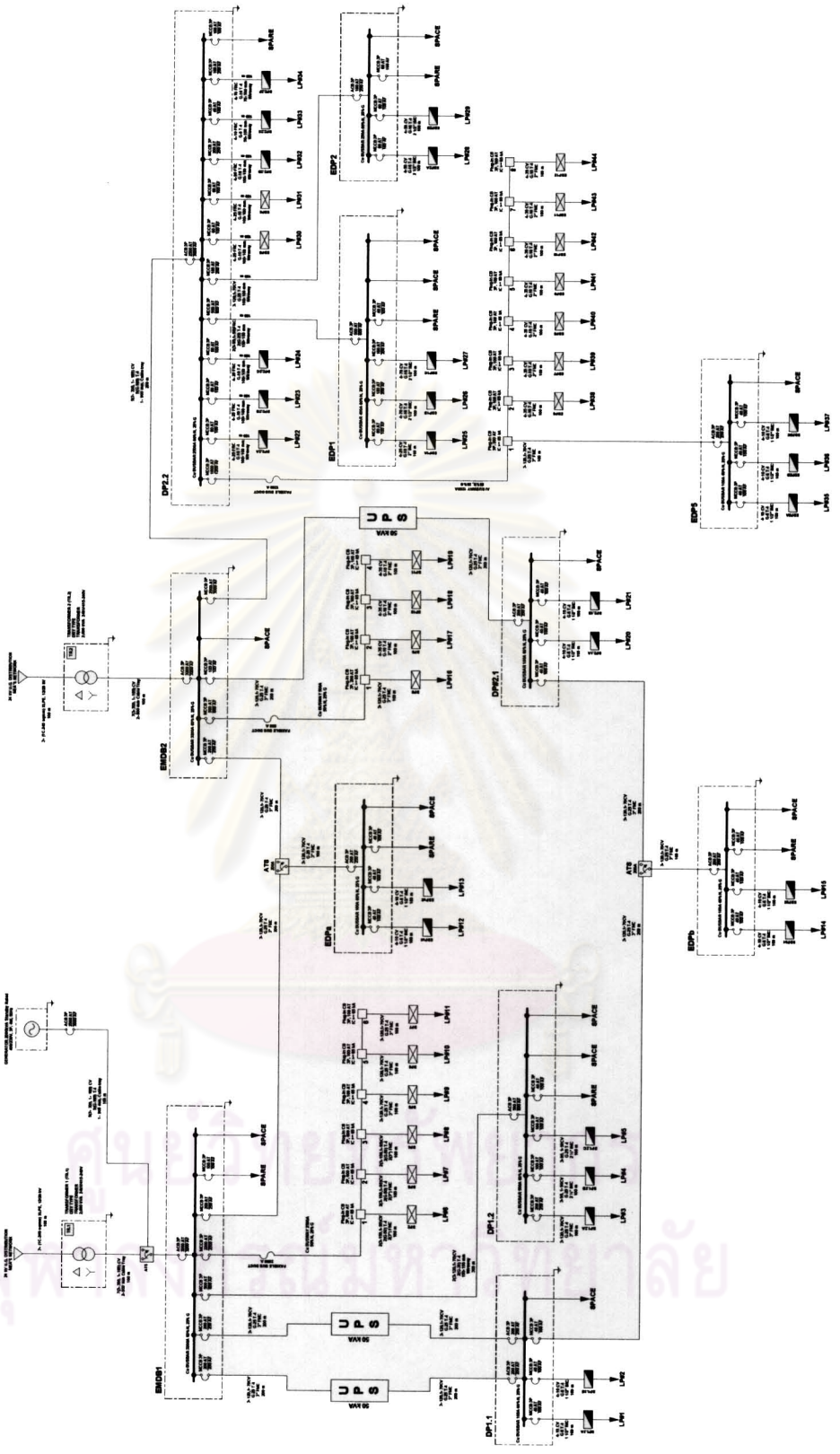


รูปที่ 8.55 การเปรียบเทียบระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในหนึ่งปีของแต่ละจุดโหลด

จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบระบบที่ 5 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 4 (Tier 4) และเมื่อทำการพิจารณาช่วงระยะเวลาที่จุดโหลดนั้น ๆ ไม่ได้รับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าต่อปี (Annual outage time) ของแต่ละจุดโหลดดังแสดงในรูปที่ 8.55 จะเห็นได้ว่าแต่ละจุดโหลดมีค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถเลือกติดตั้งโหลดได้ตามความเหมาะสม

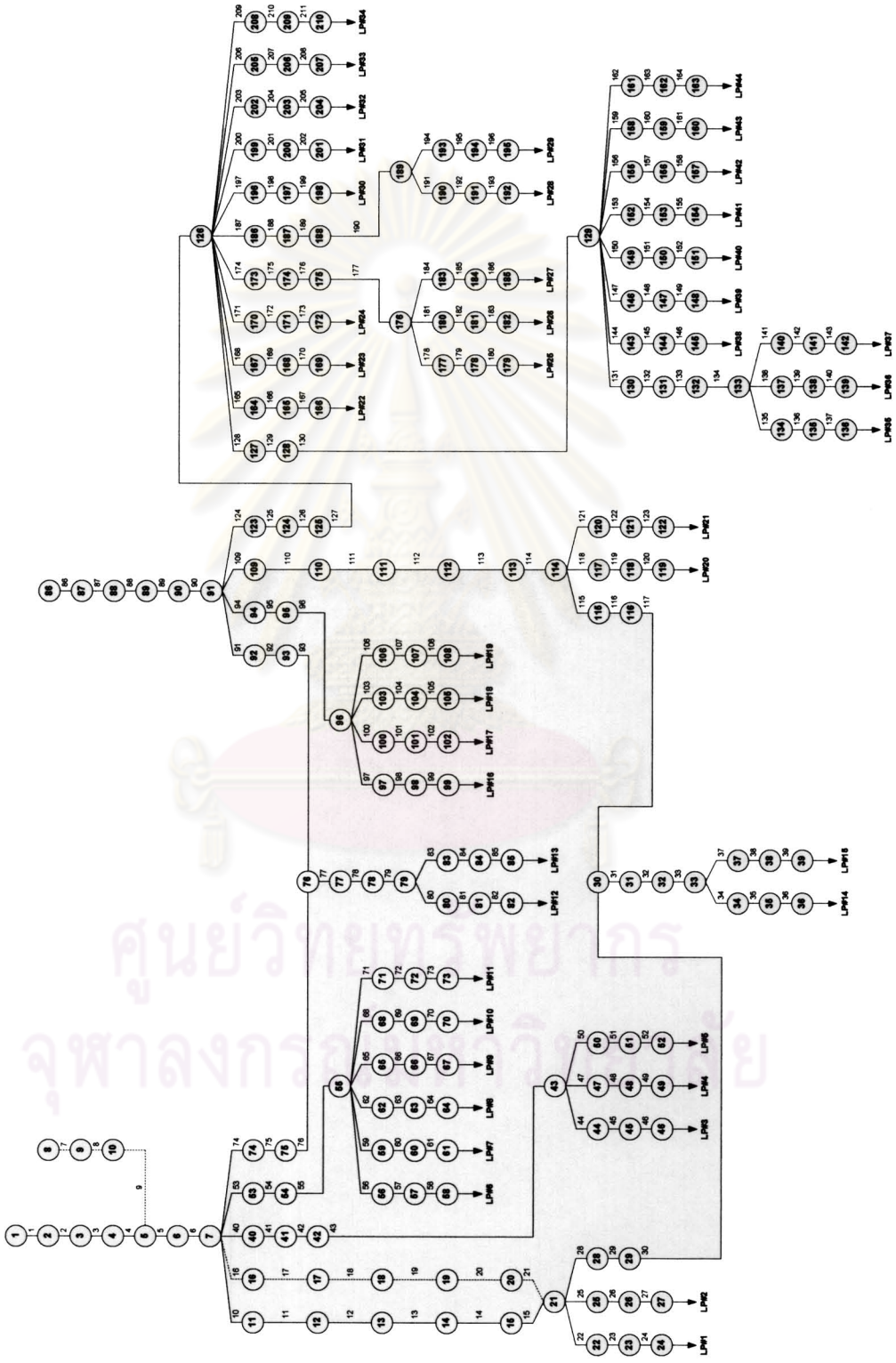
8.2.2 ระบบทดสอบระบบที่ 6

ระบบทดสอบระบบนี้ คือ ระบบไฟฟ้าของโรงงานแห่งหนึ่งซึ่งเมื่อพิจารณาจากโครงสร้างของระบบแล้วจะเห็นได้ว่าระบบไฟฟ้าของโรงงานแห่งนี้อยู่ในมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 (Tier 3) ดังนั้นในการทดสอบระบบจึงได้พิจารณาเลือกมาตรฐานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบ แล้วทำการทดสอบระบบว่ามีผลเป็นอย่างไร มีค่าความพร้อมมูลที่จะสามารถผ่านมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 (Tier 3) หรือไม่ โดยระบบไฟฟ้าที่ทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.56



รูปที่ 8.56 แผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบระบบที่ 6

กำหนดหมายเลขให้กับอุปกรณ์ทุกตัวและสายส่งแรงต่ำทุกเส้นในระบบทดสอบเพื่อที่จะใช้เป็นข้อมูลสำหรับกระบวนการของการคำนวณค่าดัชนีต่าง ๆ ของระบบ โดยแผนภาพที่แสดงหมายเลขของอุปกรณ์และสายส่งแรงต่ำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.57

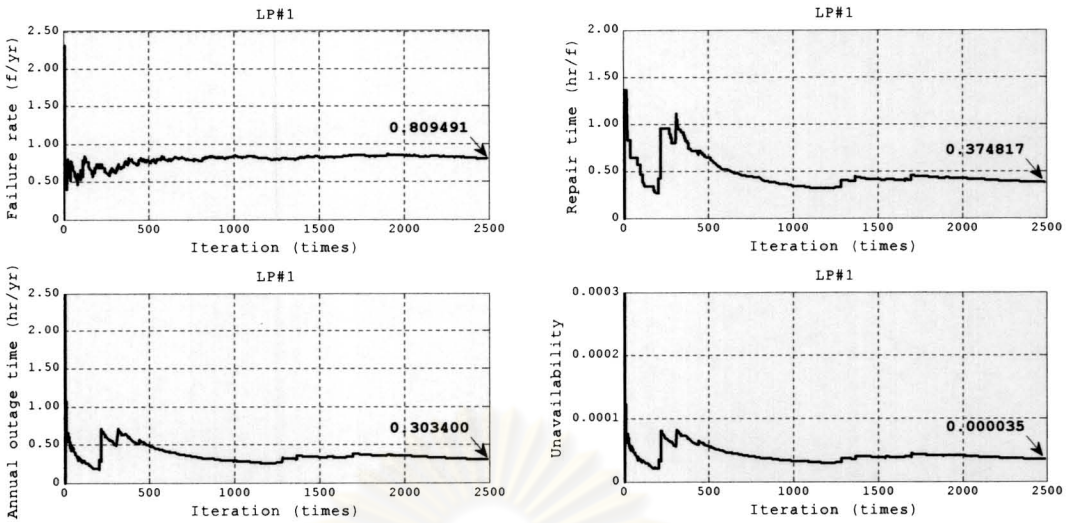


รูปที่ 8.57 แผนภาพแสดงหมายเลขของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 6

ในระบบทดสอบจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลายชนิด ดังนั้นผู้ออกแบบจึงได้เลือกคุณสมบัติของอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อให้ระบบทดสอบดังกล่าวมีความเชื่อถือได้ที่ดีพอที่จะสามารถผ่านมาตรฐานของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 6 (Tier 6) โดยคุณสมบัติของอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE Std 493™-2007.[9] สามารถแสดงได้ตามตารางที่ 8.21

ตารางที่ 8.21 รายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบทดสอบระบบที่ 6

Item	Item description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
1	24 kV power source from electric utility	1.956000	1.3200	4479.85
2	Transformer, liquid, forced air, <=5000 kVA	0.01263	3.65	693748.2
3	Diesel engine generator, unpackaged, 250 kW to 1.5 MW, continuous	0.632990	24.0500	13839.2
4	Control panel, generator, wo/switchgear	0.01111	2.11	788570.6
5	Control panel, switch gear controls	0.019620	1.2700	446426.2
6	Uninterruptible power supply UPS rotary	0.009380	2.0000	933708
7	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.2900	923068.2
8	Switch automatic transfer : ATS, 0 to 600 A	0.085800	5.7400	102093.8
9	Circuit breaker, 600 V, drawout (metal clad), >600 A, n.c.	0.00185	0.5	4732057.8
10	Circuit breaker, 600 V, drawout (metal clad), <600 A, n.c.	0.00021	6	42129480
11	Cable, aboveground, no conduit, >600 V per 1000 ft	0.00076	4	11589564
12	Cable, aboveground, no conduit, <=600 V per 1000 ft	0.00012	2.5	72896904



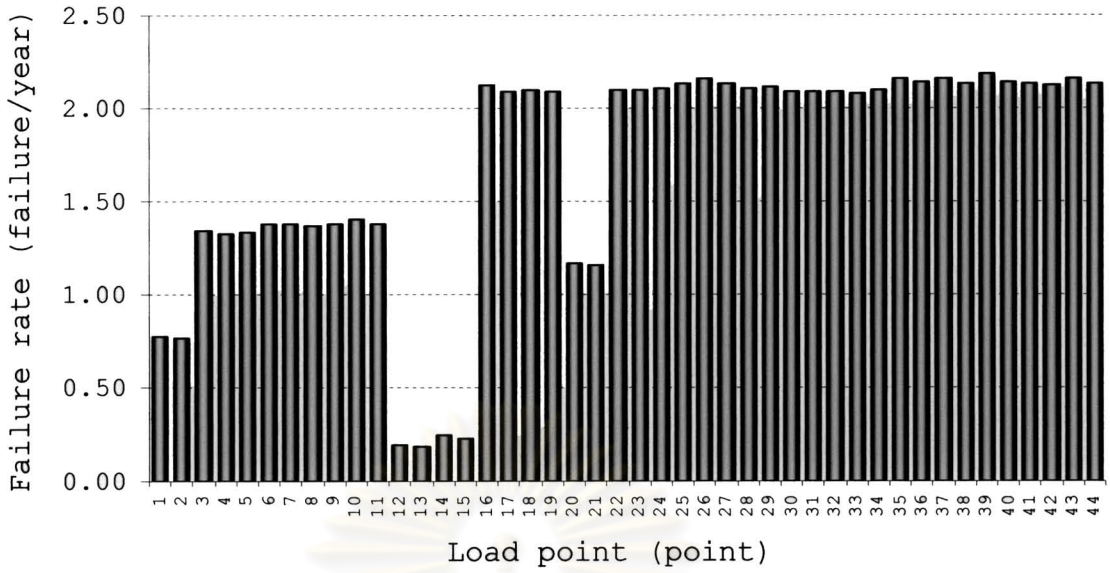
รูปที่ 8.58 การลู่เข้าของค่าต่าง ๆ ณ จุดโหลดที่ 1 (LP#1)

ตารางที่ 8.22 ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด ของระบบทดสอบระบบที่ 6

จุดโหลด	λ (f/yr)	r (hr/f)	U (hr/yr)	Unavailability	Availability
LP#1	0.809491	0.374817	0.303400	0.000035	0.999965
LP#2	0.759451	0.600464	0.455999	0.000052	0.999948
LP#3	1.345979	1.558464	2.097157	0.000239	0.999761
LP#4	1.326747	1.563911	2.074423	0.000237	0.999763
LP#5	1.336364	1.567686	2.094498	0.000239	0.999761
LP#6	1.37487	1.752965	2.409436	0.000275	0.999725
LP#7	1.374867	1.740630	2.392482	0.000273	0.999727
LP#8	1.365253	1.752144	2.391467	0.000273	0.999727
LP#9	1.374870	1.753927	2.410759	0.000275	0.999725
LP#10	1.403730	1.792702	2.515748	0.000287	0.999713
LP#11	1.374867	1.740583	2.392417	0.000273	0.999727
LP#12	0.192257	4.733265	0.909907	0.000104	0.999896
LP#13	0.183621	4.698453	0.895748	0.000106	0.999894
LP#14	0.249942	4.802215	1.200110	0.000137	0.999863
LP#15	0.230714	4.89695	1.129648	0.000129	0.999871
LP#16	2.124946	1.420163	3.016731	0.000344	0.999656
LP#17	2.086462	1.407985	2.915277	0.000333	0.999667

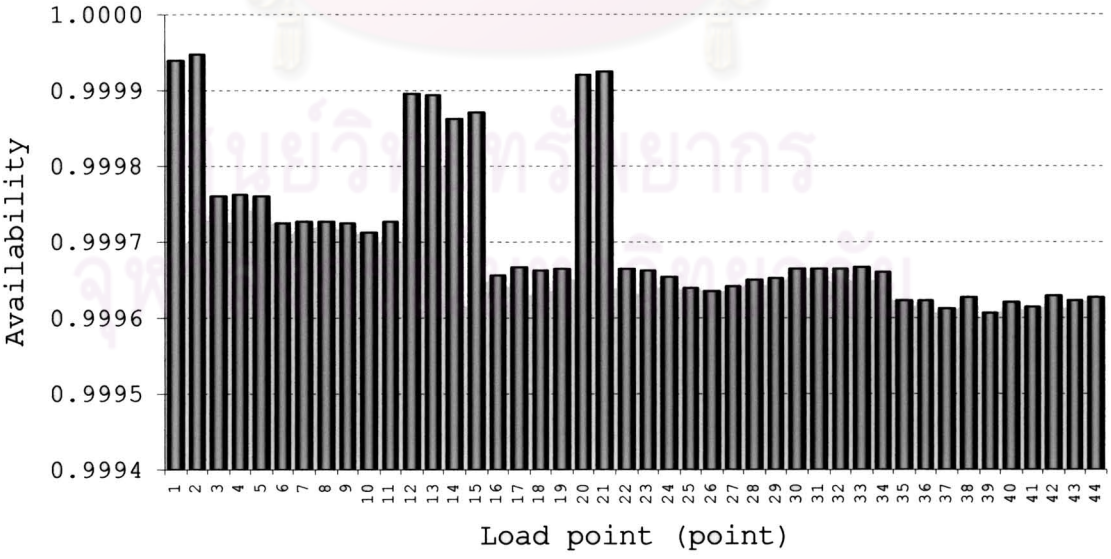
ตารางที่ 8.22 ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด ของระบบทดสอบระบบที่ 6 (ต่อ)

จุดโหลด	λ (f/yr)	r (hr/f)	U (hr/yr)	Unavailability	Availability
LP#18	2.096085	1.407985	2.950263	0.000337	0.999663
LP#19	2.086466	1.406950	2.934571	0.000335	0.999665
LP#20	1.163299	0.603404	0.701883	0.000080	0.999920
LP#21	1.153680	0.577842	0.666595	0.000076	0.999924
LP#22	2.096084	1.406068	2.946245	0.000336	0.999664
LP#23	2.096088	1.412830	2.960415	0.000338	0.999662
LP#24	2.105719	1.438505	3.028041	0.000346	0.999654
LP#25	2.134598	1.483226	3.164946	0.000361	0.999639
LP#26	2.153837	1.486019	3.199474	0.000365	0.999635
LP#27	2.134593	1.474200	3.145687	0.000359	0.999641
LP#28	2.105731	1.461861	3.077205	0.000351	0.999649
LP#29	2.115338	1.439558	3.044093	0.000347	0.999653
LP#30	2.086469	1.411485	2.944030	0.000336	0.999664
LP#31	2.086469	1.411430	2.943914	0.000336	0.999664
LP#32	2.086469	1.413162	2.947526	0.000336	0.999664
LP#33	2.076849	1.408338	2.923929	0.000334	0.999666
LP#34	2.096090	1.416871	2.968881	0.000339	0.999661
LP#35	2.153865	1.538512	3.312493	0.000378	0.999622
LP#36	2.144249	1.545265	3.312181	0.000378	0.999622
LP#37	2.153883	1.573765	3.388395	0.000387	0.999613
LP#38	2.134622	1.529170	3.262984	0.000372	0.999628
LP#39	2.182743	1.577475	3.441869	0.000393	0.999607
LP#40	2.144252	1.550114	3.322573	0.000379	0.999621
LP#41	2.134650	1.584567	3.381192	0.000386	0.999614
LP#42	2.125001	1.526372	3.242342	0.000370	0.999630
LP#43	2.153862	1.533073	3.300782	0.000377	0.999623
LP#44	2.134620	1.526266	3.256788	0.000372	0.999628



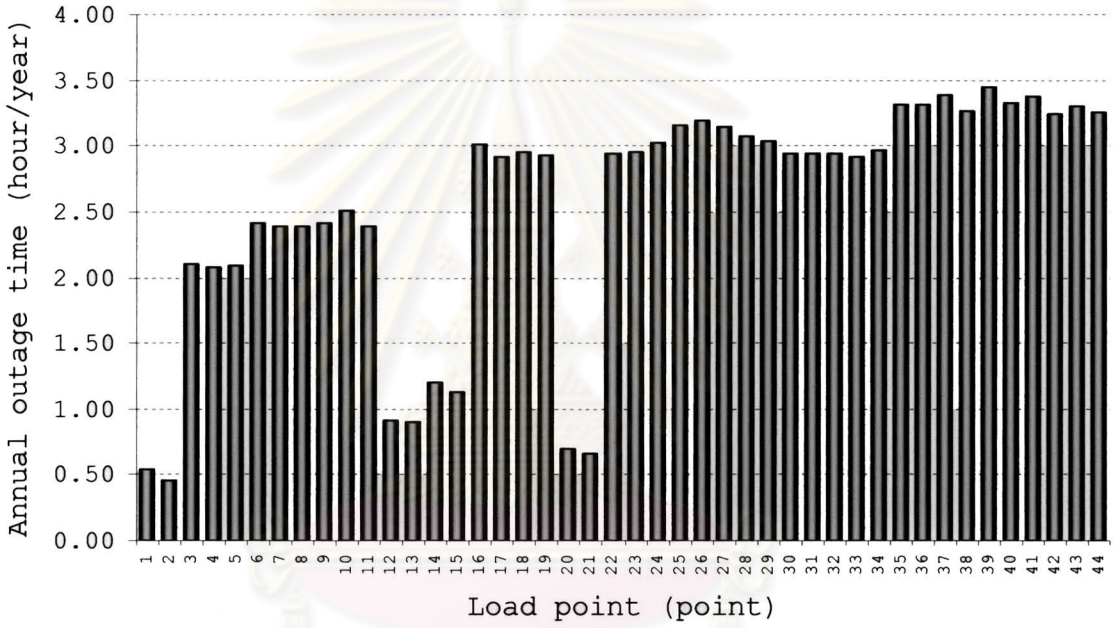
รูปที่ 8.59 การเปรียบเทียบอัตราการล้มเหลวของแต่ละจุดโหลด

จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบระบบที่ 6 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 (Tier 3) และเมื่อทำการพิจารณาอัตราการล้มเหลว (Failure rate) ของแต่ละจุดโหลดดังแสดงในรูปที่ 8.59 จะเห็นได้ว่าแต่ละจุดโหลดมีค่าอัตราการล้มเหลวที่แตกต่างกัน ดังนั้นผู้ออกแบบเลือกพิจารณาติดตั้งโหลดได้ตามความเหมาะสมขึ้นอยู่กับว่าต้องการให้โหลดดังกล่าวมีความเชื่อถือได้มากน้อยเพียงใด



รูปที่ 8.60 การเปรียบเทียบค่าความพร้อมมูลของแต่ละจุดโหลด

จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบระบบที่ 6 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 (Tier 3) และเมื่อทำการพิจารณาความพร้อมมูล (Availability) ของแต่ละจุดโหลดดังแสดงในรูปที่ 8.60 โดยในกรณีของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 นั้นค่าความพร้อมมูลของจุดโหลดที่พิจารณาต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 99.98% จากผลที่ได้มีเพียงบางจุดโหลดเท่านั้นที่มีค่าความพร้อมมูลไม่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานและถือว่าผ่านเกณฑ์ดังกล่าว ซึ่งก็เพียงพอที่จะรองรับโหลดที่สำคัญ ๆ ต่อระบบไฟฟ้าหนึ่งระบบได้ ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถเลือกอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ตามความเหมาะสมโดยอาจพิจารณาจากงบประมาณในการติดตั้งระบบ เพราะอุปกรณ์ที่มีความเชื่อถือได้ที่ดีก็ย่อมมีราคาสูงเช่นกัน



รูปที่ 8.61 การเปรียบเทียบระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในหนึ่งปีของแต่ละจุดโหลด

จากผลการทดสอบระบบไฟฟ้าของระบบทดสอบระบบที่ 6 ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ระดับที่ 3 (Tier 3) และเมื่อทำการพิจารณาช่วงระยะเวลาที่จุดโหลดนั้น ๆ ไม่ได้รับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าต่อปี (Annual outage time) ของแต่ละจุดโหลดดังแสดงในรูปที่ 8.61 จะเห็นได้ว่าแต่ละจุดโหลดมีค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถเลือกติดตั้งโหลดได้ตามความเหมาะสม

บทที่ 9

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

9.1 สรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาการประเมินความเชื่อถือได้ของการจัดอันดับเทียร์สำหรับการออกแบบระบบไฟฟ้าด้วยวิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลด้วยวิธีการสุ่มช่วงเวลาการทำงาน (State duration sampling) ส่วนระบบทดสอบมีทั้งหมด 6 ระบบ โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 ทำการออกแบบระบบไฟฟ้าเพื่อรองรับโหลดตามที่ต้องการ โดยออกแบบระบบตามเงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ทั้ง 4 ระดับ ดังนั้นจึงมีระบบทดสอบ 4 ระบบในกรณีแรก กรณีที่ 2 ทำการพิจารณาเลือกระบบไฟฟ้าของสถานที่ต่าง ๆ ที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขของการจัดอันดับเทียร์ ซึ่งในกรณีนี้จะมีระบบทดสอบ 2 ระบบ และจากผลการทดสอบระบบทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความเชื่อถือได้ของระบบการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับจะมีค่าที่แตกต่างกันดังนั้นผู้ออกแบบสามารถพิจารณาเลือกออกแบบระบบไฟฟ้าสำหรับสถานที่ต่าง ๆ ได้ตามความเหมาะสม ขึ้นอยู่กับว่าระบบไฟฟ้าสำหรับสถานที่ดังกล่าวนั้นต้องการความเชื่อถือได้ของระบบมากน้อยเพียงใด

2. การประเมินความเชื่อถือได้ของการจัดอันดับเทียร์สำหรับการออกแบบไฟฟ้าสามารถช่วยให้ทราบว่าจุดโหลดต่าง ๆ ภายในระบบมีความเชื่อถือได้ที่ดีหรือไม่และมีค่าแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถเลือกติดตั้งโหลดได้ตามความเหมาะสม โดยอาจพิจารณาจากปัจจัยได้หลายประการ เช่น

- ความสำคัญของโหลดดังกล่าว
- พฤติกรรมการใช้งานของโหลด
- งบประมาณในการติดตั้งระบบ เพราะการที่ระบบไฟฟ้าจะมีความเชื่อถือได้ที่ดีนั้น ประการแรกต้องส่งผลมาจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบต้องมีความเชื่อถือได้ที่ดีด้วย ซึ่งอุปกรณ์ที่มีความเชื่อถือได้ที่ดีก็ย่อมมีราคาสูงเช่นกัน ประการที่สองการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับมีโครงสร้างของระบบที่แตกต่างกัน โดยเทียร์ระดับที่สูงขึ้นนั้นมีความเชื่อถือได้ที่ดีขึ้น แต่อุปกรณ์ภายในระบบก็ย่อมมากขึ้นด้วย เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานดีเซล (Diesel engine generator) หรือเครื่องสำรองไฟฟ้า (UPS) เป็นต้น

3. การประเมินความเชื่อถือได้ของการจัดอันดับเทียร์สำหรับการออกแบบไฟฟ้าสามารถช่วยสร้างความมั่นใจให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้า และยังสามารถเตรียมการล่วงหน้าสำหรับการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นได้ สำหรับกรณีที่ผู้ใช้ไฟฟ้ารายนั้นมีความสำคัญ เช่น ธนาคาร โรงพยาบาล โรงงานอุตสาหกรรมและสถานที่สำคัญทางราชการต่าง ๆ ที่ต้องการความเชื่อถือได้ของระบบที่ดีเป็นต้น

9.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาและพัฒนาต่อไป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาการประเมินความเชื่อถือได้ของการจัดอันดับเทียร์สำหรับการออกแบบระบบไฟฟ้า และสามารถสรุปข้อเสนอแนะที่จะเป็นประโยชน์ต่อไปในอนาคตได้ดังนี้

1. ควรพิจารณาให้ครอบคลุมถึงข้อจำกัดอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในการปฏิบัติงานจริง เช่น แผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ เพื่อให้สอดคล้องกับความเป็นจริงมากขึ้น

2. วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาและพิจารณาเพียงความเชื่อถือได้เท่านั้น ซึ่งในการออกแบบระบบไฟฟ้านั้นมีมากกว่าด้านความเชื่อถือได้เพียงอย่างเดียว เช่น ความมั่นคงของระบบ การประหยัดงบประมาณในการติดตั้งระบบ ซึ่งจะเป็นประโยชน์มากยิ่งขึ้นหากพิจารณาสิ่งเหล่านี้ควบคู่ไปด้วย เพราะจะทำให้ช่วยตัดสินใจในการออกแบบได้ง่ายยิ่งขึ้น

3. ในการศึกษาการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้านั้น จำเป็นจะต้องมีข้อมูลสถิติของอุปกรณ์ต่าง ๆ มากมาย ดังนั้นถ้าหากมีการเก็บข้อมูลสถิติของอุปกรณ์ต่าง ๆ อย่างถูกต้องตามลักษณะการใช้งานจริงแล้ว ก็จะช่วยลดค่าความไม่แน่นอนของผลการทดสอบที่เกิดขึ้นและช่วยให้ผลการทดสอบที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

4. ควรที่จะทำการศึกษาในส่วนของความคุ้มค่าในการลงทุน เพราะการจัดอันดับเทียร์ที่ระดับที่สูงขึ้นนั้นมีค่าความเชื่อถือได้ของระบบที่ดีขึ้น แต่อุปกรณ์ในระบบก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบก็ย่อมสูงขึ้นด้วย จากสาเหตุดังกล่าวจึงควรพิจารณาในส่วนของงบประมาณที่ใช้ในการติดตั้งระบบของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับว่าแตกต่างกันอย่างไรและเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการล้มเหลวของการจัดอันดับเทียร์แต่ละระดับแล้วคุ้มค่ากับการลงทุนหรือไม่

รายการอ้างอิง

[1] กุลยศ อุดมวงศ์เสรี .การประเมินความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ด้วยวิธีการจำลองเหตุการณ์มอนติคาร์โลแบบสุ่มการเปลี่ยนสถานะของระบบ และการแบ่งแยกโครงข่ายไฟฟ้ากำลัง.วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

[2] Roy Billinton and Ronald N Allan. Reliability Evaluation of Power System. London: Pitman Advanced Publishing Program, 1984.

[3] Roy Billinton and Wenyuan Li. Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods. New York: A Division of Plenum Publishing Corporation, 1994.

[4] W. Pitt Turner IV, P.E., John H. Seader, P.E., and Kenneth G. Brill. Tier Classification Define Site Infrastructure Performance. The Uptime Institute, 1996.

[5] โสตถิพงศ์ พิชัยสวัสดิ์ .การประเมินความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าโดยการใช้วิธีการจำลองเหตุการณ์.วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

[6] วิทยา สุริยาสกล .การประเมิณผลของ UPFC ที่มีต่อความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

[7] ศิริพร คติธรรมารักษ์ .การประยุกต์ใช้หลักการฟัซซีในการประเมินค่าความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า .วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ,2543.

[8] Roy Billinton and Ronald N Allan. Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concept and Techniques. London: Pitman Advanced Publishing Program, 1985.

[9] IEEE Std 493™-2007. IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007.

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 รายละเอียดของแต่ละจุดโหลดของระบบทดสอบระบบที่ 1 (เทียร์ระดับที่ 1) ระบบทดสอบระบบที่ 2 (เทียร์ระดับที่ 2) ระบบทดสอบระบบที่ 3 (เทียร์ระดับที่ 3) และระบบทดสอบระบบที่ 4 (เทียร์ระดับที่ 4)

จุดโหลด	รายละเอียด	จำนวนอุปกรณ์ทั้งหมด ณ จุดโหลดนั้นๆ	กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย ณ จุดโหลดนั้นๆ	จำนวนอุปกรณ์ที่เกิดการล้มเหลว ณ จุดโหลดนั้นๆ
LP#1	คอมพิวเตอร์	20 เครื่อง	500 VA/เครื่อง	20 เครื่อง
LP#2	คอมพิวเตอร์	20 เครื่อง	500 VA/เครื่อง	20 เครื่อง
LP#3	คอมพิวเตอร์	20 เครื่อง	500 VA/เครื่อง	20 เครื่อง
LP#4	คอมพิวเตอร์	20 เครื่อง	500 VA/เครื่อง	20 เครื่อง
LP#5	คอมพิวเตอร์	20 เครื่อง	500 VA/เครื่อง	20 เครื่อง
LP#6	แสงสว่าง	20 สาขา	1000 VA/สาขา	20 สาขา
LP#7	เต้ารับ	15 สาขา	1400 VA/สาขา	15 สาขา
LP#8	ปรับอากาศ	10 เครื่อง	2000 VA/เครื่อง	10 เครื่อง
LP#9	แสงสว่าง	20 สาขา	1000 VA/สาขา	20 สาขา
LP#10	เต้ารับ	15 สาขา	1400 VA/สาขา	15 สาขา
LP#11	ปรับอากาศ	10 เครื่อง	2000 VA/เครื่อง	10 เครื่อง
LP#12	โหลดวิกฤติ	4 อุปกรณ์	3000 VA/อุปกรณ์	4 อุปกรณ์

หมายเหตุ 1 เครื่อง หมายถึง 1 อุปกรณ์

1 สาขา หมายถึง 1 อุปกรณ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 ตารางแสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE Std 493™-2007.

Item description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
Utility supply			
13.8 kV power source from electric utility	1.644	1.32	5329.79
24 kV power source from electric utility	1.9560	1.57	4480.1
Transformer, dry			
Air cooled			
Transformer, dry, air cooled, <=500 kVA	0.00022	4	38946258.8
Transformer, dry, air cooled, >500 kVA<=1500 kVA	0.00042	4	20979011.8
Transformer, dry, air cooled, >1500 kVA<=3000kVA	0.00061	6	14432242.4
Isolation			
Transformer, dry, isolation, delta wye, <600V	0.00284	21.26	3807252.6
Transformer, liquid			
Forced air			
Transformer, liquid, forced air, <=5000 kVA	0.01263	3.65	693748.2
Transformer, liquid, forced air, >5000 kVA<= 10000 kVA	0.00715	248	1225880
Transformer, liquid, forced air, >10000 kVA<=50000kVA	0.00569	1440	1540524
Non-forced air			
Transformer, liquid, non-forced air, <=3000 kVA	0.00111	5	7895436
Transformer, liquid, non-forced air, >3000 kVA<=10000 kVA	0.00524	1	1670904
Transformer, liquid, non-forced air, >10000 kVA<=50000 kVA	0.01753	6.09	499773.8
Diesel engine generator			
Packaged			
Diesel engine generator, unpackaged, 250 kW to 1.5 MW, continuous	0.58269	25.74	15033.8

ตารางที่ ข.1 ตารางแสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE Std 493™-2007. (ต่อ)

Item description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
Diesel engine generator, unpackaged, 250 kW to 1.5 MW, standby	0.1235	18.28	70932
Unpackaged			
Diesel engine generator, unpackaged, 750 kW to 7 MW, continuous	1.81573	25.08	4824.5
Diesel engine generator, unpackaged, 750 kW to 7 MW, standby	0.63299	24.05	13839.2
Circuit breaker			
3-phase, fixed			
Circuit breaker, 600 V, 3-phase, fixed, including molded case ,<=600 A, n.c.	0.00002	3	55821363
Circuit breaker, 600 V, 3-phase, fixed, including molded case ,<=600 A, n.o.	0.00011	18.67	77665552
Circuit breaker, 600 V, 3-phase, fixed, including molded case ,>600 A, n.c.	0.00001	14	15149685
Circuit breaker, 600 V, 3-phase, fixed, including molded case ,>600 A, n.o.	0.00343	37.5	2554428
Drawout (metal clad)			
Circuit breaker, 600 V, drawout (metal clad), <600 A, n.c.	0.00021	6	42129480
Circuit breaker, 600 V, drawout (metal clad), <600 A, n.o.	0.00255	6	3440004
Circuit breaker, 600 V, drawout (metal clad), >600 A, n.c.	0.00185	0.5	4732057.8
Circuit breaker, 600 V, drawout (metal clad), >600 A, n.o.	0.00553	2	1584631.2
Vacuum			
Circuit breaker, 600 V, vacuum,<600 A, n.c.	0.00281	8	3114792

ตารางที่ ข.1 ตารางแสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE Std 493™-2007. (ต่อ)

Item description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
Circuit breaker, 600 V, vacuum,<600 A, n.o.	0.00111	2	7870964.7
Circuit breaker, 600 V, vacuum,>600 A, n.c.	0.02352	14.8	372410.4
Circuit breaker, 600 V, vacuum,>600 A, n.o.	0.03976	9.39	220321.7
Switch			
Automatic transfer switch : ATS			
Automatic transfer switch : ATS, 0 to 600 A	0.08580	5.74	102093.8
Automatic transfer switch : ATS, > 600 A	0.03187	1.64	274853.5
Manual transfer switch : MTS			
Manual transfer switch : MTS, <=600 A	0.00208	1	4205411.8
Manual transfer switch : MTS, >600 A	0.0015	3	5848894.1
Static transfer switch : STS			
Static transfer switch : STS, 0 to 600 A	0.00105	1	8343764.7
Static transfer switch : STS, > 600 A <=1000A	0.00769	2	1138728
Static transfer switch : STS, > 1000 A	0.00368	24	2380392
Cable			
Aboveground			
Cable, aboveground, in conduit, <=600 V per 1000 ft	0.00007	8	12895993
Cable, aboveground, in conduit, >600 V per 1000 ft	0.00054	8.56	16315315.2
Cable, aboveground, no conduit, <=600 V per 1000 ft	0.00012	2.5	72896904
Cable, aboveground, no conduit, >600 V per 1000 ft	0.00076	4	11589564
Cable, aboveground, trays, <=600 V per 1000 ft	0.03204	5	273411.8
Cable, aboveground, trays, >600 V <= 5 kV, per 1000 ft	0.00283	7.3	3093176.5
Arial			
Cable, aerial, <=15 kV per mile	0.04717	1.82	185725.9
Cable, aerial, >15 kV per mile	0.00411	2.54	2130325.4
Belowground			
Cable, belowground, duct, <=600 V, per 1000 ft	0.00012	16.4	70080729.6

ตารางที่ ข.1 ตารางแสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE Std 493™-2007. (ต่อ)

Item description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
Cable, belowground, duct, >600 V <= 5 kV, per 1000 ft	0.01296	13.7	676000
Cable, belowground, in conduit, <=600 V, per 1000 ft	0.00201	11.22	4364479.8
Cable, belowground, in conduit, >600 V, per 1000 ft	0.00236	15.7	3718331
Cable, belowground, insulated, 0 to 600 V, per 1000 ft	0.0267	7.6	328089.9
Cable, belowground, insulated, > 5 kV, per 1000 ft	0.02071	5.13	434296.5
Insulated			
Cable, insulated, dc, per 1000 ft	0.00728	2	1203640
Control panel			
Generator			
Control, panel, generator, wo/switchgear	0.01111	2.11	788570.6
HVAC/chillers/AHU			
Control panel, HVAC/chillers/AHU, wo/switchgear	0.00015	1	57926964.7
Switchgear controls			
Control panel, switchgear controls	0.01962	1.27	446426.2
Uninterruptible power supply : UPS			
Rotary			
UPS, rotary	0.00402	6	2176564.7
Small computer room floor			
UPS, small computer room floor	0.00938	2	933708
Bus bar			
Bus duct all type per 100 ft	0.00949	7.29	923068.2

ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค.1 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 1

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
1	24 kV power source from electric utility	1.956000	1.32	4479.85
2	Transformer, liquide, <= 5000 kVA	0.012630	3.65	693748.2
3	Cable, in conduit, <=600 V (100 m)	0.002932	0.1131	2987721
4	Switch automatic transfer : ATS, 0 to 600 A	0.085800	5.74	102093.8
5	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
6	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
7	Diesel engine generator, continuous	0.632990	24.05	13839.2
8	Control panel, generator, wo/switchgear	0.01111	2.11	788570.6
9	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
10	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
11	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
12	UPS rotary	0.009380	2.0	933708
13	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
14	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
15	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
16	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
17	Cable, in conduit, <= 600 V (300m)	0.008795	0.3393	996020
18	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
19	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
20	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
21	Cable, in conduit, <=600 V (100 m)	0.002932	0.1131	2987721
22	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
23	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
24	Cable, in conduit, <=600 V (100 m)	0.002932	0.1131	2987721
25	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2

ตารางที่ ค.1 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 1 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
26	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
27	Cable, in conduit, <= 600 V (400m)	0.011727	0.4524	746994
28	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
29	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
30	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
31	Cable, in conduit, <=600 V (100 m)	0.002932	0.1131	2987721
32	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
33	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
34	Cable, in conduit, <=600 V (100 m)	0.002932	0.1131	2987721
35	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
36	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
37	Cable, in conduit, <= 600 V (500m)	0.014658	0.5655	597626
38	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
39	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
40	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
41	Cable, in conduit, <=600 V (100 m)	0.002932	0.1131	2987721
42	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
43	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
44	Cable, in conduit, <= 600 V (300m)	0.008795	0.3393	996020
45	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
46	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
47	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
48	Cable, in conduit, <=600 V (100 m)	0.002932	0.1131	2987721
49	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
50	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
51	Cable, in conduit, <=600 V (100 m)	0.002932	0.1131	2987721
52	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2

ตารางที่ ค.1 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 1 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
53	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
54	Cable, in conduit, <=600 V (100 m)	0.002932	0.1131	2987721
55	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
56	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
57	Cable, in conduit, <= 600 V (400m)	0.011727	0.4524	746994
58	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
59	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
60	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
61	Cable, in conduit, <=600 V (100 m)	0.002932	0.1131	2987721
62	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
63	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
64	Cable, in conduit, <=600 V (100 m)	0.002932	0.1131	2987721
65	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
66	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
67	Cable, in conduit, <=600 V (100 m)	0.002932	0.1131	2987721
68	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
69	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
70	Cable, in conduit, <= 600 V (500m)	0.014658	0.5655	597626
71	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
72	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
73	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
74	Cable, in conduit, <=600 V (100 m)	0.002932	0.1131	2987721
75	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2

ตารางที่ ค.2 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 2

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
1	24 kV power source from electric utility	1.956000	1.32	4479.85
2	Transformer, liquide, <= 5000 kVA	0.012630	3.65	693748.2
3	Cable, in conduit, <=600 V (100 m)	0.002932	0.1131	2987721
4	Switch automatic transfer : ATS, 0 to 600 A	0.085800	5.74	102093.8
5	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
6	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
7	Diesel engine generator, continuous	0.632990	24.05	13839.2
8	Control panel, generator, wo/switchgear	0.01111	2.11	788570.6
9	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
10	Diesel engine generator, continuous	0.632990	24.05	13839.2
11	Control panel, generator, wo/switchgear	0.01111	2.11	788570.6
12	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
13	Switch automatic transfer : ATS, 0 to 600 A	0.085800	5.74	102093.8
14	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
15	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
16	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
17	UPS rotary	0.009380	2.0	933708
18	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
19	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
20	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
21	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
22	UPS rotary	0.009380	2.0	933708
23	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
24	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
25	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
26	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
27	Cable, in conduit, <= 600 V (300m)	0.008795	0.3393	996020

ตารางที่ ค.2 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 2 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
28	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
29	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
30	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
31	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
32	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
33	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
34	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
35	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
36	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
37	Cable, in conduit, <= 600 V (400m)	0.011727	0.4524	746994
38	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
39	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
40	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
41	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
42	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
43	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
44	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
45	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
46	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
47	Cable, in conduit, <= 600 V (500m)	0.014658	0.5655	597626
48	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
49	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
50	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
51	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
52	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
53	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
54	Cable, in conduit, <= 600 V (300m)	0.008795	0.3393	996020

ตารางที่ ค.2 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 2 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
55	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
56	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
57	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
58	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
59	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
60	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
61	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
62	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
63	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
64	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
65	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
66	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
67	Cable, in conduit, <= 600 V (400m)	0.011727	0.4524	746994
68	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
69	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
70	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
71	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
72	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
73	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
74	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
75	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
76	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
77	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
78	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
79	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
80	Cable, in conduit, <= 600 V (500m)	0.014658	0.5655	597626
81	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2

ตารางที่ ค.2 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 2 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
82	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
83	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
84	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
85	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2

ตารางที่ ค.3 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 3

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
1	24 kV power source from electric utility	1.956000	1.32	4479.85
2	Transformer, liquide, <= 5000 kVA	0.012630	3.65	693748.2
3	Cable, in conduit, <=600 V (100 m)	0.002932	0.1131	2987721
4	Switch automatic transfer : ATS, 0 to 600 A	0.085800	5.74	102093.8
5	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
6	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
7	Diesel engine generator, continuous	0.632990	24.05	13839.2
8	Control panel, generator, wo/switchgear	0.01111	2.11	788570.6
9	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
10	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
11	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
12	UPS rotary	0.009380	2.0	933708
13	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
14	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
15	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
16	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
17	UPS rotary	0.009380	2.0	933708
18	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
19	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4

ตารางที่ ค.3 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 3 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
20	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
21	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
22	Cable, in conduit, <= 600 V (300m)	0.008795	0.3393	996020
23	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
24	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
25	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
26	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
27	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
28	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
29	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
30	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
31	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
32	Cable, in conduit, <= 600 V (300m)	0.008795	0.3393	996020
33	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
34	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
35	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
36	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
37	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
38	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
39	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
40	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
41	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
42	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
43	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
44	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
45	Cable, in conduit, <= 600 V (400m)	0.011727	0.4524	746994
46	Switch automatic transfer, 0 to 600 A	0.085800	5.74	102093.8

ตารางที่ ค.3 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 3 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
47	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
48	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
49	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
50	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
51	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
52	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
53	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
54	Cable, in conduit, <= 600 V (400m)	0.011727	0.4524	746994
55	Switch automatic transfer, 0 to 600 A	0.085800	5.74	102093.8
56	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
57	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
58	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
59	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
60	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
61	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
62	24 kV power source from electric utility	1.956000	1.32	4479.85
63	Transformer, liquide, <= 5000 kVA	0.012630	3.65	693748.2
64	Cable, in conduit, <=600 V (100 m)	0.002932	0.1131	2987721
65	Switch disconnect, enclosed > 600 A	0.002060	1.0	4253270.6
66	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
67	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
68	Diesel engine generator, continuous	0.632990	24.05	13839.2
69	Control panel, generator, wo/switchgear	0.01111	2.11	788570.6
70	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
71	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
72	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
73	UPS rotary	0.009380	2.0	933708

ตารางที่ ค.3 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 3 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
74	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
75	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
76	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
77	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
78	Cable, in conduit, <= 600 V (300m)	0.008795	0.3393	996020
79	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
80	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
81	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
82	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
83	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
84	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
85	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
86	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
87	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
88	Cable, in conduit, <= 600 V (300m)	0.008795	0.3393	996020
89	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
90	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
91	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
92	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
93	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
94	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
95	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
96	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
97	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
98	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
99	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
100	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2

ตารางที่ ค.3 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 3 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
101	Cable, in conduit, <= 600 V (400m)	0.011727	0.4524	746994
102	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
103	Cable, in conduit, <= 600 V (400m)	0.011727	0.4524	746994

ตารางที่ ค.4 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 4

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
1	24 kV power source from electric utility	1.956000	1.32	4479.85
2	Transformer, liquide, <= 5000 kVA	0.012630	3.65	693748.2
3	Cable, in conduit, <=600 V (100 m)	0.002932	0.1131	2987721
4	Switch automatic transfer : ATS, 0 to 600 A	0.085800	5.74	102093.8
5	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
6	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
7	Diesel engine generator, continuous	0.632990	24.05	13839.2
8	Control panel, generator, wo/switchgear	0.01111	2.11	788570.6
9	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
10	Diesel engine generator, continuous	0.632990	24.05	13839.2
11	Control panel, generator, wo/switchgear	0.01111	2.11	788570.6
12	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
13	Switch automatic transfer : ATS, 0 to 600 A	0.085800	5.74	102093.8
14	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
15	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
16	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
17	UPS rotary	0.009380	2.0	933708
18	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
19	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
20	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4

ตารางที่ ค.4 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 4 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
21	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
22	UPS rotary	0.009380	2.0	933708
23	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
24	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
25	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
26	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
27	Cable, in conduit, <= 600 V (300m)	0.008795	0.3393	996020
28	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
29	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
30	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
31	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
32	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
33	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
34	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
35	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
36	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
37	Cable, in conduit, <= 600 V (300m)	0.008795	0.3393	996020
38	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
39	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
40	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
41	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
42	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
43	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
44	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
45	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
46	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
47	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721

ตารางที่ ค.4 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 4 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
48	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
49	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
50	Cable, in conduit, <= 600 V (400m)	0.011727	0.4524	746994
51	Switch automatic transfer, 0 to 600 A	0.085800	5.74	102093.8
52	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
53	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
54	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
55	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
56	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
57	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
58	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
59	Cable, in conduit, <= 600 V (400m)	0.011727	0.4524	746994
60	Switch automatic transfer, 0 to 600 A	0.085800	5.74	102093.8
61	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
62	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
63	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
64	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
65	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
66	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
67	24 kV power source from electric utility	1.956000	1.32	4479.85
68	Transformer, liquide, <= 5000 kVA	0.012630	3.65	693748.2
79	Cable, in conduit, <=600 V (100 m)	0.002932	0.1131	2987721
70	Switch automatic transfer : ATS, 0 to 600 A	0.085800	5.74	102093.8
71	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
72	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
73	Diesel engine generator, continuous	0.632990	24.05	13839.2
74	Control panel, generator, wo/switchgear	0.01111	2.11	788570.6

ตารางที่ ค.4 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 4 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
75	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
76	Diesel engine generator, continuous	0.632990	24.05	13839.2
77	Control panel, generator, wo/switchgear	0.01111	2.11	788570.6
78	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
79	Switch automatic transfer : ATS, 0 to 600 A	0.085800	5.74	102093.8
80	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
81	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
82	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
83	UPS rotary	0.009380	2.0	933708
84	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
85	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
86	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
87	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
88	UPS rotary	0.009380	2.0	933708
89	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
90	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
91	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
92	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
93	Cable, in conduit, <= 600 V (300m)	0.008795	0.3393	996020
94	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
95	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
96	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
97	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
98	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
99	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
100	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
101	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2

ตารางที่ ค.4 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 4 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
102	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
103	Cable, in conduit, <= 600 V (300m)	0.008795	0.3393	996020
104	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
105	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
106	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
107	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
108	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
109	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
110	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
111	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
112	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
113	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
114	Control panel, switch gear control	0.019620	1.27	446426.2
115	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
116	Cable, in conduit, <= 600 V (400m)	0.011727	0.4524	746994
117	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
118	Cable, in conduit, <= 600 V (400m)	0.011727	0.4524	746994

ตารางที่ ค.5 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 5

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
1	24 kV power source from electric utility	1.956000	1.32	4479.85
2	Transformer, liquide, <= 3000 kVA	0.017530	6.09	499773.8
3	Cable, in conduit, <=600 V (100 m)	0.002932	0.1131	2987721
4	Switch disconnect, enclosed > 600 A	0.002060	1.0	4253270.6
5	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
6	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2

ตารางที่ ค.5 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 5 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
7	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
8	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
9	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
10	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
11	Diesel engine generator, Standby	0.632990	24.05	13839.2
12	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
13	Cable, in conduit, <= 600 V (600m)	0.017590	0.6786	498011
14	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
15	Cable, in conduit, <= 600 V (300m)	0.008795	0.3393	996020
16	UPS rotary	0.009380	2.0	933708
17	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
18	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
19	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
20	Cable, in conduit, <= 600 V (300m)	0.008795	0.3393	996020
21	UPS rotary	0.009380	2.0	933708
22	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
23	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
24	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
25	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
26	Cable, in conduit, <= 600 V (500m)	0.014658	0.5655	597626
27	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
28	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
29	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
30	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
31	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
32	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
33	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721

ตารางที่ ค.5 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 5 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
34	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
35	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
36	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
37	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
38	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
39	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
40	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
41	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
42	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
43	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
44	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
45	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
46	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
47	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
48	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
49	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
50	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
51	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
52	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
53	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
54	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
55	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
56	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
57	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
58	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
59	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
60	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721

ตารางที่ ค.5 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 5 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
61	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
62	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
63	Cable, in conduit, <= 600 V (400m)	0.011727	0.4524	746994
64	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
65	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
66	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
67	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
68	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
69	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
70	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
71	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
72	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
73	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
74	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
75	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
76	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
77	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
78	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
79	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
80	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
81	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
82	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
83	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
84	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
85	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
86	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
87	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2

ตารางที่ ค.5 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 5 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
88	Cable, in conduit, <= 600 V (600m)	0.017590	0.6786	498011
89	Switch automatic transfer, 0 to 600 A	0.085800	5.74	102093.8
90	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
91	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
92	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
93	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
94	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
95	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
96	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
97	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
98	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
99	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
100	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
101	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
102	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
103	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
104	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
105	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
106	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
107	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
108	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
109	Cable, in conduit, <= 600 V (600m)	0.017590	0.6786	498011
110	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
111	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
112	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
113	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
114	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6

ตารางที่ ค.5 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 5 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
115	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
116	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
117	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
118	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
119	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
120	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
121	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
122	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
123	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
124	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
125	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
126	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
127	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
128	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
129	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
130	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
131	Cable, in conduit, <= 600 V (500m)	0.014658	0.5655	597626
132	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
133	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
134	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
135	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
136	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
137	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
138	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
139	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
140	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
141	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721

ตารางที่ ค.5 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 5 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
142	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
143	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
144	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
145	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
146	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
147	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
148	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
149	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
150	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
151	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
152	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
153	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
154	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
155	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
156	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
157	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
158	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
159	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
160	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
161	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
162	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
163	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
164	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
165	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
166	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
167	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
168	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721

ตารางที่ ค.5 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 5 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
169	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
170	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
171	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
172	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
173	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
174	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
175	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
176	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
177	Cable, in conduit, <= 600 V (800m)	0.023453	0.9049	373513
178	Switch automatic transfer, 0 to 600 A	0.085800	5.74	102093.8
179	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
180	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
181	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
182	24 kV power source from electric utility	1.956000	1.32	4479.85
183	Transformer, liquide, <= 3000 kVA	0.017530	6.09	499773.8
184	Cable, in conduit, <=600 V (100 m)	0.002932	0.1131	2987721
185	Switch disconnect, enclosed > 600 A	0.002060	1.0	4253270.6
186	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
187	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
188	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
189	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
190	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
191	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
192	Diesel engine generator, Standby	0.632990	24.05	13839.2
193	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
194	Cable, in conduit, <= 600 V (600m)	0.017590	0.6786	498011
195	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4

ตารางที่ ค.5 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 5 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
196	Cable, in conduit, <= 600 V (300m)	0.008795	0.3393	996020
197	UPS rotary	0.009380	2.0	933708
198	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
199	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
200	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
201	Cable, in conduit, <= 600 V (300m)	0.008795	0.3393	996020
202	UPS rotary	0.009380	2.0	933708
203	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
204	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
205	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
206	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
207	Cable, in conduit, <= 600 V (500m)	0.014658	0.5655	597626
208	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
209	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
210	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
211	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
212	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
213	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
214	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
215	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
216	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
217	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
218	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
219	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
220	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
221	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
222	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2

ตารางที่ ค.5 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 5 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
223	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
224	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
225	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
226	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
227	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
228	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
229	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
230	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
231	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
232	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
233	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
234	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
235	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
236	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
237	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
238	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
239	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
240	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
241	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
242	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
243	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
244	Cable, in conduit, <= 600 V (400m)	0.011727	0.4524	746994
245	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
246	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
247	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
248	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
249	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6

ตารางที่ ค.5 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 5 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
250	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
251	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
252	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
253	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
254	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
255	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
256	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
257	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
258	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
259	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
260	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
261	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
262	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
263	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
264	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
265	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
266	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
267	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
268	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
269	Cable, in conduit, <= 600 V (600m)	0.017590	0.6786	498011
270	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
271	Cable, in conduit, <= 600 V (600m)	0.017590	0.6786	498011
272	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
273	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
274	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
275	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
276	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6

ตารางที่ ค.5 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 5 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
277	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
278	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
279	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
280	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
281	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
282	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
283	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
284	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
285	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
286	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
287	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
288	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
289	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
290	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
291	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
292	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
293	Cable, in conduit, <= 600 V (500m)	0.014658	0.5655	597626
294	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
295	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
296	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
297	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
298	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
299	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
300	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
301	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
302	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
303	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721

ตารางที่ ค.5 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 5 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
304	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
305	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
306	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
307	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
308	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
309	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
310	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
311	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
312	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
313	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
314	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
315	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
316	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
317	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
318	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
319	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
320	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
321	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
322	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
323	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
324	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
325	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
326	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
327	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
328	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
329	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
330	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721

ตารางที่ ค.5 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 5 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
331	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
332	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
333	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
334	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
335	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
336	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
337	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
338	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
339	Cable, in conduit, <= 600 V (800m)	0.023453	0.9049	373513

ตารางที่ ค.6 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 6

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
1	24 kV power source from electric utility	1.956000	1.32	4479.85
2	Cable, aerial, >15 kV (100 m)	0.004110	2.54	2130325.4
3	Transformer, liquide, <= 3000 kVA	0.017530	6.09	499773.8
4	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
5	Switch disconnect, enclosed > 600 A	0.002060	1.0	4253270.6
6	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
7	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
8	Diesel engine generator, Standby	0.632990	24.05	13839.2
9	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
10	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
11	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
12	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
13	UPS rotary	0.009380	2.0	933708
14	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115

ตารางที่ ค.6 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 6 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
15	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
16	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
17	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
18	UPS rotary	0.009380	2.0	933708
19	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
20	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
21	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
22	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
23	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
24	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
25	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
26	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
27	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
28	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
29	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
30	Switch automatic transfer, 0 to 600 A	0.085800	5.74	102093.8
31	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
32	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
33	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
34	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
35	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
36	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
37	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
38	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.11311	2987721
39	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
40	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
41	Cable, in conduit, <= 600 V (300m)	0.008795	0.3393	996020

ตารางที่ ค.6 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 6 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
42	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
43	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
44	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
45	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
46	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
47	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
48	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
49	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
50	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
51	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
52	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
53	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
54	Flexible Bust all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
55	Bus Way all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
56	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
57	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
58	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
59	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
60	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
61	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
62	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
63	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
64	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
65	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
66	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
67	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
68	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2

ตารางที่ ค.6 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 6 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
69	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
70	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
71	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
72	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
73	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
74	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
75	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
76	Switch automatic transfer, 0 to 600 A	0.085800	5.74	102093.8
77	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
78	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
79	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
80	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
81	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
82	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
83	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
84	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
85	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
86	24 kV power source from electric utility	1.956000	1.32	4479.85
87	Cable, aerial, >15 kV (100 m)	0.004110	2.54	2130325.4
88	Transformer, liquide, <= 3000 kVA	0.017530	6.09	499773.8
89	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
90	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
91	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
92	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
93	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
94	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
95	Flexible Bust all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2

ตารางที่ ค.6 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 6 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
96	Bus Way all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
97	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
98	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
99	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
100	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
101	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
102	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
103	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
104	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
105	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
106	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
107	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
108	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
109	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
110	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
111	UPS rotary	0.009380	2.0	933708
112	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
113	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
114	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
115	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
116	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
117	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
118	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
119	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
120	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
121	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
122	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6

ตารางที่ ค.6 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 6 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
123	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
124	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
125	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
126	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
127	Circuit breaker, 3-phase, > 600 A	0.023520	14.8	372410.4
128	Flexible Bust all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
129	Bus Way all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
130	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
131	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
132	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
133	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
134	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
135	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
136	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
137	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
138	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
139	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
140	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
141	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
142	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
143	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
144	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
145	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
146	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
147	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
148	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
149	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2

ตารางที่ ค.6 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 6 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
150	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
151	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
152	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
153	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
154	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
155	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
156	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
157	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
158	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
159	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
160	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
161	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
162	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
163	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
164	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
165	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
166	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
167	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
168	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
169	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
170	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
171	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
172	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
173	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
174	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
175	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
176	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2

ตารางที่ ค.6 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 6 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
177	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
178	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
179	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
180	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
181	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
182	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
183	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
184	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
185	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
186	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
187	Cable, in conduit, <= 600 V (200m)	0.005863	0.2262	1494115
188	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
189	Bus duct all type per 100 ft	0.009490	7.29	923068.2
190	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
191	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
192	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
193	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
194	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
195	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
196	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
197	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
198	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
199	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
200	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
201	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
202	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
203	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721

ตารางที่ ค.6 รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบทดสอบระบบที่ 6 (ต่อ)

Equipment Number	Equipment number description	Failure rate (f/yr)	MTTR (hr/f)	MTBF (hr/f)
204	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
205	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
206	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
207	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6
208	Circuit breaker, 3-phase, < 600 A	0.002810	8.0	311479.2
209	Cable, in conduit, <= 600 V (100m)	0.002932	0.1131	2987721
210	Control panel, switch gear control	0.011110	2.11	788570.6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุทธิพงษ์ รัตนาภากร เกิดวันที่ 4 มิถุนายน พ.ศ .2526 ที่จังหวัดสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2551 หลังจากสำเร็จการศึกษา ได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สังกัดห้องปฏิบัติการวิจัยระบบไฟฟ้ากำลัง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย