


การประเมินค่าความเชื่อถือได้ของการป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง



นาย กัญญ์ กิ่งวานสายชล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

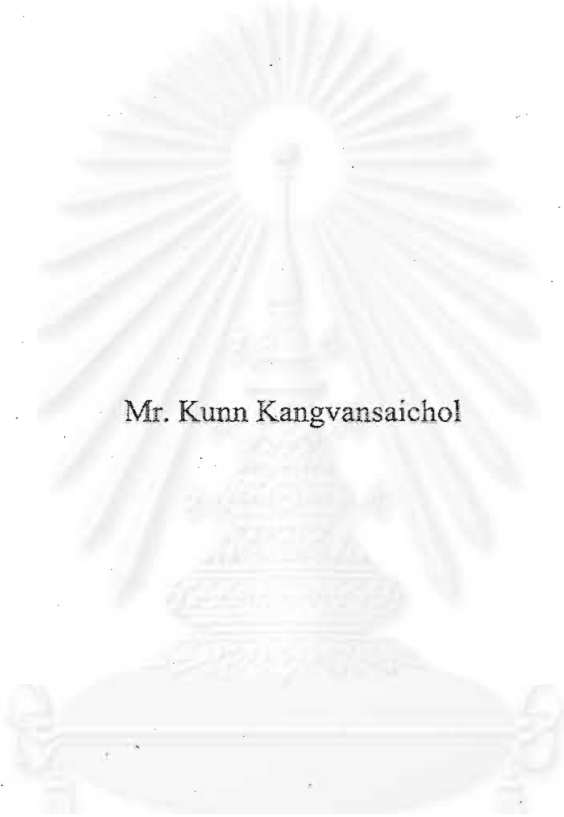
ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-346-380-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1194๒11๑๒

RELIABILITY EVALUATION FOR POWER SYSTEM PROTECTION



Mr. Kunn Kangvansaichol

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering


Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-346-380-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประเมินค่าความเชื่อถือได้ของการป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง
โดย นายกันย์ กังวานสายชล
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ไชยะ แซ่มช้อย)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

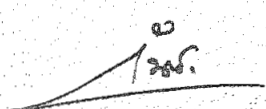
กันย์ กังวานสายชล : การประเมินค่าความเชื่อถือได้ของการป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง
อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์, 105 หน้า ISBN 974-346-380-1

วิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงวิธีการประเมินค่าความเชื่อถือได้ของระบบป้องกัน โดยอาศัยแบบจำลองของระบบป้องกันชนิดต่าง ๆ วิธีที่นำเสนอขึ้นนี้อาศัยพื้นฐานของวิธีแบบจำลองมาคอปแผนภาพกรอบของความเชื่อถือได้ และวิธีค้นไม้เหตุการณ์ ภายในวิทยานิพนธ์ได้ทำการศึกษาถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าความเชื่อถือได้ของระบบป้องกัน ได้นำเสนอการประมาณค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมเพื่อทำการทดสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน ทำการเปรียบเทียบค่าความเชื่อถือได้ของระบบป้องกันที่ใช้กันอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง และสุดท้ายได้เสนอข้อแนะนำในการทำการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบป้องกัน

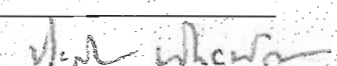
สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต 

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม "

4170216021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: PROTECTIVE SCHEME / MARKOV MODEL / RELIABILITY BLOCK DIAGRAM / EVENT TREE / ABNORMAL UNAVAILABILITY / OPTIMAL ROUTINE TEST INTERVAL

KUNN KANGVANSACHOL: RELIABILITY EVALUATION FOR POWER SYSTEM PROTECTION. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. PRASIT PITTAYAPAT. 105 pp. ISBN 974-346-380-1

In this thesis, reliability evaluation for power system protection is introduced using Markov model, reliability block diagram and event tree method. Results from analysis show that several parameters of each protective device have a great impact on overall system reliability and optimal routine test intervals. In addition, the comparisons of several protective schemes show that each scheme has its own abnormal unavailability and optimal routine test interval. Therefore, these comparisons will help power engineers design and maintain each particular protective scheme appropriately. Finally, several methods to improve protection system reliability are introduced.

Department Electrical Engineering Student's signature K. Kangvansaichol
Field of study Electrical Engineering Advisor's signature Prasit Pittayapat
Academic year 2000 Co-advisor's signature -

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สำเร็จลุล่วงไปได้หากไม่ได้รับความช่วยเหลือจาก ผศ.ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ในคำแนะนำ และข้อคิดเห็นในแง่มุมต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี และรศ.ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ ซึ่งให้คำปรึกษา และคำแนะนำเป็นอย่างมากในด้านการเขียนบทความ และในต้วงานวิจัย ทั้งนี้ต้องขอขอบพระคุณคณะกรรมการตรวจวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รศ.ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ และอาจารย์ไชยะ เข้มชัย

ขอขอบคุณสำหรับกำลังใจจากเพื่อนร่วมรุ่น รุ่นพี่ และรุ่นน้องในห้องวิจัยทุก ๆ คน และขอบคุณทางภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้การตั้ง การศึกษา และสิ่งดี ๆ ต่าง ๆ แก่ข้าพเจ้าเป็นอย่างมาก และอำนวยความสะดวกในการสร้างสรรค์ผลงานต่าง ๆ อีกด้วย

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณ และสำนึกในบุญคุณอันใหญ่หลวงของคุณพ่อผู้ล่วงลับไปแล้วของข้าพเจ้า และคุณแม่ผู้สนับสนุนข้าพเจ้าในทุก ๆ ด้านจนสำเร็จการศึกษา

กันย์ กังวานสายชล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ	ฐ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์	4
1.2 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์	4
1.3 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินงาน	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์	5
1.5 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์	5
2 การสร้างแบบจำลองของระบบ และการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบที่ไม่ซับซ้อน	7
2.1 แผนภาพกรอบของความเชื่อถือได้	7
2.1.1 ระบบอนุกรม	8
2.1.2 ระบบขนาน	9
2.1.3 ระบบอนุกรม-ขนาน และระบบขนาน-อนุกรม	10
2.1.4 ระบบสำรอง	12
2.2 ดันไม้เหตุการณ์	13
2.2.1 ดันไม้เหตุการณ์แบบสมบูรณ์	13
2.2.2 ดันไม้เหตุการณ์แบบลดรูป	14
2.3 สรุป	15
3 แบบจำลองมาคอฟ	16
3.1 กระบวนการมาคอฟแบบไม่ต่อเนื่อง	16
3.1.1 แนวคิดหลักทั่วไปของการสร้างแบบจำลอง	16
3.1.2 เมตริกซ์แสดงการเปลี่ยนสถานะแบบเฟ้นสุ่ม.....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.3 การประเมินค่าความน่าจะเป็นแบบขึ้นต่อเวลา	21
3.1.4 การประเมินค่าความน่าจะเป็นของค่าขอบเขตของสถานะ	22
3.2 กระบวนการมาคอฟแบบต่อเนื่อง	23
3.2.1 แนวคิดหลักทั่วไปของการสร้างแบบจำลอง	23
3.2.2 การประเมินค่าความน่าจะเป็นแบบขึ้นต่อเวลา	25
3.2.3 การประเมินค่าความน่าจะเป็นของค่าขอบเขตของแต่ละสถานะ ...	26
3.3 สรุป	27
4 การสร้างแบบจำลองของระบบป้องกัน	28
4.1 สันนิษฐาน และคำนิยามต่าง ๆ	28
4.1.1 สันนิษฐานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง	28
4.1.2 คำนิยามต่าง ๆ	29
4.2 แบบจำลองของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน	31
4.3 การรวมกันของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน	34
4.3.1 การรวมกันแบบอนุกรม.....	36
4.3.2 การรวมกันแบบขนาน.....	36
4.3.3 การรวมกันของส่วนที่ป้องกันด้าน A กับส่วนที่ป้องกันด้าน B หรือการรวมกันแบบ A-B.....	36
4.3.4 การรวมกันของส่วนที่ป้องกัน 2 ด้าน กับส่วนที่มีสถานะ 3 สถานะ หรือการรวมกันแบบ 3-AB.....	37
4.3.5 การรวมกันของส่วนที่ป้องกัน 2 ด้านกับส่วนที่ป้องกัน 2 ด้าน หรือการรวมกันแบบ AB-B.....	39
4.3.6 การรวมกันในรูปแบบที่ซับซ้อน.....	39
4.4 การสร้างแบบจำลองของระบบป้องกันรูปแบบต่าง ๆ	43
4.4.1 ระบบป้องกันที่มีการป้องกันด้านเดียว ของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน	44
4.4.2 ระบบป้องกันที่มีการป้องกัน 2 ด้าน ของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันแบบไม่อาศัยระบบไหลท	49

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.3 ระบบป้องกันที่มีการป้องกัน 2 ด้าน ของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันแบบอาศัยระบบ ไฟลอท	51
4.5 สรุป	55
5 การสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน และแบบจำลองของระบบป้องกันทั้งหมด	56
5.1 การสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน	56
5.2 การสร้างแบบจำลองของระบบป้องกันทั้งหมด	58
5.2.1 การสร้างแบบจำลองของระบบป้องกันทั้งหมด ที่ระบบป้องกันมี 3 สถานะ	58
5.2.2 การสร้างแบบจำลองของระบบป้องกันทั้งหมด ที่ระบบป้องกันมี 9 สถานะ	60
5.3 คอมมอนคอสเฟลเลียร์	62
5.3.1 หลักการทั่วไป	62
5.3.2 แบบจำลองที่รวมผลของคอมมอนคอสเฟลเลียร์	63
5.4 สรุป	65
6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และตัวอย่างการคำนวณ	66
6.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	66
6.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบป้องกันทั้งหมด ที่ระบบป้องกันมี 3 สถานะ	66
6.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบป้องกันทั้งหมด ที่ระบบป้องกันมี 9 สถานะ	68
6.2 ค่าเอนโทรปีมอลอันอเวลเลบิลิตี้	69
6.2.1 ค่าเอนโทรปีมอลอันอเวลเลบิลิตี้สำหรับ ระบบป้องกันทั้งหมดที่ระบบป้องกันมี 3 สถานะ	69
6.2.2 ค่าเอนโทรปีมอลอันอเวลเลบิลิตี้สำหรับ ระบบป้องกันทั้งหมดที่ระบบป้องกันมี 9 สถานะ	69
6.3 การหาค่าเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบระบบป้องกันแบบต่าง ๆ ...	70
6.4 สรุป	71

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7 ผลการศึกษา และวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน	73
7.1 วิธีการศึกษา	73
7.2 การศึกษาผลของการรวมกันแบบต่าง ๆ	74
7.2.1 การรวมกันแบบอนุกรม	74
7.2.2 การรวมกันแบบขนาน	76
7.3 การศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน	77
7.3.1 อัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน	78
7.3.2 ครรชนีประสิทธิผลของฟังก์ชันตรวจสอบตัวเอง	79
7.3.3 เวลาที่ใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ในระบบป้องกัน	80
7.3.4 เวลาในการซ่อมแซมอุปกรณ์ในระบบป้องกัน	81
7.4 การศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน	83
7.4.1 อัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน	83
7.4.2 อัตราการซ่อมแซมอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน	84
7.4.3 อัตราการสับสวิตซ์สำหรับการ สับอุปกรณ์ที่อยู่ข้างเคียงเข้าสู่บริการ	85
7.5 การศึกษาผลของ คอมมอนคอสเฟลลีย์	87
7.6 สรุป	88
8 ผลการเปรียบเทียบระบบป้องกันแบบต่าง ๆ	89
8.1 การเปรียบเทียบผลระหว่างระบบป้องกันที่ป้องกันอุปกรณ์เพียงด้านเดียว ..	89
8.2 การเปรียบเทียบผลระหว่างระบบป้องกันที่ป้องกันอุปกรณ์ทั้งสองด้าน	93
8.3 การปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบป้องกัน	96
8.4 สรุป	100
9 บทสรุป และข้อเสนอแนะ	101
9.1 บทสรุป	101
9.2 ข้อเสนอแนะ	102
รายการอ้างอิง	104
ประวัติผู้วิจัย	105

สารบัญญัตราสาร

ตารางที่	หน้า
3.1 ความน่าจะเป็นของแต่ละสถานะสำหรับระบบที่มี 2 สถานะ	19
4.1 ผลการรวมกันของตัวอย่างที่ 4.1	41
7.1 ค่าแอมป์นอร์มอลอันอเวลบิลิตี้ และช่วงเวลาที่เหมาะสม ในการทำการทดสอบอุปกรณ์สำหรับผลของอุปกรณ์ที่ทำงานกันแบบอนุกรม	75
7.2 ค่าแอมป์นอร์มอลอันอเวลบิลิตี้ และช่วงเวลาที่เหมาะสม ในการทำการทดสอบอุปกรณ์สำหรับผลของอุปกรณ์ที่ทำงานกันแบบขนาน	76
7.3 ค่าแอมป์นอร์มอลอันอเวลบิลิตี้ และช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการ ทดสอบอุปกรณ์สำหรับผลของอัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน..	78
7.4 ค่าแอมป์นอร์มอลอันอเวลบิลิตี้ และช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบอุปกรณ์ สำหรับผลของครรชนีประสิทธิผลของฟังก์ชันตรวจสอบตัวเอง ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน	80
7.5 ค่าแอมป์นอร์มอลอันอเวลบิลิตี้ และช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบอุปกรณ์ สำหรับผลของเวลาในการทดสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน	81
7.6 ค่าแอมป์นอร์มอลอันอเวลบิลิตี้ และช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบอุปกรณ์ สำหรับผลของเวลาในการซ่อมแซมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน	82
7.7 ค่าแอมป์นอร์มอลอันอเวลบิลิตี้ และช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบอุปกรณ์ สำหรับผลของอัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน	84
7.8 ค่าแอมป์นอร์มอลอันอเวลบิลิตี้ และช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบอุปกรณ์ สำหรับผลของอัตราการซ่อมแซมของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน	85
7.9 ค่าแอมป์นอร์มอลอันอเวลบิลิตี้ และช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบอุปกรณ์ สำหรับผลของอัตราการสับสวิตซ์สำหรับการสับอุปกรณ์ที่อยู่ข้างเคียง เข้าสู่บริการของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน	86
7.10 ค่าแอมป์นอร์มอลอันอเวลบิลิตี้ และช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบอุปกรณ์ สำหรับผลของคอมมอนคอสเฟลเกียร์ของระบบทั้งหมด	87
8.1 ตารางเปรียบเทียบค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทดสอบอุปกรณ์ ของระบบป้องกันที่ป้องกันอุปกรณ์เพียงด้านเดียว	91
8.2 ตารางเปรียบเทียบค่าแอมป์นอร์มอลอันอเวลบิลิตี้ที่น้อยที่สุด ของระบบป้องกันที่ป้องกันอุปกรณ์เพียงด้านเดียว	92

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
8.3 ตารางเปรียบเทียบค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทดสอบประจำ และค่า แอมป์นอร์มอลอันอเวลบิลิตี้ที่น้อยที่สุดของระบบป้องกัน ที่ป้องกันอุปกรณ์สองด้าน	95
8.4 ตารางเปรียบเทียบค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทดสอบประจำ และค่าแอมป์นอร์มอลอันอเวลบิลิตี้ที่น้อยที่สุดของการปรับปรุง ความเชื่อถือได้ของระบบป้องกัน	99



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 องค์ประกอบที่สำคัญ 3 องค์ประกอบของระบบไฟฟ้ากำลัง	1
2.1 ระบบอนุกรมของเอลเลอเมนต์ n เอลเลอเมนต์	8
2.2 ระบบขนานของเอลเลอเมนต์ n เอลเลอเมนต์	9
2.3 การเชื่อมต่อแบบอนุกรม-ขนาน	10
2.4 การเชื่อมต่อแบบขนาน-อนุกรม	11
2.5 ระบบสำรอง	12
2.6 ต้นไม้เหตุการณ์ของระบบที่อุปกรณ์ 2 อุปกรณ์ต่ออนุกรมกัน	13
2.7 การลดรูปต้นไม้เหตุการณ์ของระบบที่มีอุปกรณ์ 2 อุปกรณ์ต่ออนุกรมกัน	14
3.1 ระบบที่มี 2 สถานะ	16
3.2 แผนภาพต้นไม้ของระบบที่มี 2 สถานะ	18
3.3 พฤติกรรมชั่วคราวของระบบ	19
3.3 พฤติกรรมชั่วคราวของระบบ (ต่อ)	20
3.4 ระบบที่มีอุปกรณ์เดียวแบบซ่อมแซมได้	23
4.1 แบบจำลองมาคอฟแบบ 4 สถานะของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน	32
4.2 แบบจำลองมาคอฟแบบ 3 สถานะของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน	34
4.3 แบบจำลองมาคอฟของการรวมกันของอุปกรณ์ 2 อุปกรณ์	35
4.4 แบบจำลองมาคอฟของ 2 อุปกรณ์แบบ 3 สถานะ	36
4.5 การรวมกันแบบ 3-AB	37
4.5 การรวมกันแบบ 3-AB (ต่อ)	38
4.6 แบบจำลอง 9 สถานะของการรวมกันแบบ 3-AB	38
4.7 แผนภาพกรอบของตัวอย่างที่ 4.1	40
4.8 ระบบป้องกันที่มีการป้องกันด้านเดียวของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน	45
4.9 แผนภาพกรอบของระบบป้องกันแบบใช้รีเลย์กระแสเกิน (หรือแรงดันเกิน)	45
4.10 แผนภาพกรอบของ R2CT1PSU1	46
4.11 แผนภาพกรอบของ R2CT2PSU1	47
4.12 แผนภาพกรอบของ R2CT2TC2	47
4.13 แผนภาพกรอบของ R3CT1PSU1	48
4.14 แผนภาพกรอบของ R3CT3PSU1	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 แผนภาพกรอบของ R3CT3TC3	49
4.16 การป้องกันแบบใช้รีเลย์ผลต่าง	49
4.17 แผนภาพกรอบของการป้องกันแบบใช้รีเลย์ผลต่าง	50
4.18 แผนภาพกรอบของการป้องกันแบบใช้รีเลย์ระยะทาง แบบไม่อาศัยระบบไหลตอท	51
4.19 การป้องกันแบบ Permissive Overreach Transfer Trip (POTT)	52
4.20 แผนภาพกรอบของการป้องกัน แบบ Permissive Overreach Transfer Trip (POTT)	53
4.21 การป้องกันแบบ Permissive Underreach Transfer Trip (PUTT)	53
4.22 แผนภาพกรอบของการป้องกัน แบบ Permissive Underreach Transfer Trip (PUTT)	54
4.23 การป้องกันแบบ Direct Underreach Transfer Trip (DUTT)	54
4.24 แผนภาพกรอบของการป้องกัน แบบ Direct Underreach Transfer Trip (DUTT)	55
5.1 แบบจำลองของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันแบบ 4 เลขอร์	57
5.2 แบบจำลองของระบบป้องกันทั้งหมดเมื่อแบบจำลอง ของระบบป้องกันมี 3 สถานะ	59
5.3 แบบจำลองของระบบป้องกันทั้งหมดเมื่อแบบจำลอง ของระบบป้องกันมี 9 สถานะ	61
5.3 แบบจำลองของระบบป้องกันทั้งหมดเมื่อแบบจำลอง ของระบบป้องกันมี 9 สถานะ (ต่อ)	62
5.4 แบบจำลองของระบบทั้งหมดเมื่อรวมผลของคอมมอนคอสเฟลลิตี้	64
6.1 เมตริกซ์แสดงการเปลี่ยนสถานะแบบเฟ้นสุ่มสำหรับระบบป้องกันทั้งหมด ที่ระบบป้องกันมี 3 สถานะ	67
6.2 เมตริกซ์แสดงการเปลี่ยนสถานะแบบเฟ้นสุ่มสำหรับระบบป้องกันทั้งหมด ที่ระบบป้องกันมี 9 สถานะ	68
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมป์มอลต์อินอเวลเลบิลิตี้ และ ค่าช่วงเวลาในการทำการทดสอบระบบป้องกันในความสัมพันธ์แบบ Log-Log	71
7.1 ผลกระทบของการรวมกันแบบอนุกรม	75

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.2 ผลกระทบของการรวมกันแบบขนาน	76
7.3 ผลกระทบของอัตราการผลิตเหลวของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน	78
7.4 ผลกระทบของครรชนีประสิทธิผลของฟังก์ชันตรวจสอบตัวเอง	79
7.5 ผลกระทบของเวลาที่ใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ในระบบป้องกัน	81
7.6 ผลของเวลาในการซ่อมแซมอุปกรณ์ในระบบป้องกัน	82
7.7 ผลของอัตราการผลิตเหลวของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน	83
7.8 ผลของอัตราการผลิตซ่อมแซมของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน	85
7.9 ผลของอัตราการผลิตสวิตช์สำหรับการสับอุปกรณ์ที่อยู่ข้างเคียงเข้าสู่บริการ ของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน	86
7.10 ผลของคอมมอนคอสเฟลลีย์ของระบบทั้งหมด	87
8.1 ผลเปรียบเทียบระบบป้องกันด้านเดียวของอุปกรณ์ชุดที่ 1	90
8.2 ผลเปรียบเทียบระบบป้องกันด้านเดียวของอุปกรณ์ชุดที่ 2	90
8.3 ผลเปรียบเทียบเพื่อเป็นตัวช่วยในการออกแบบระบบป้องกัน	91
8.4 ผลเปรียบเทียบระบบป้องกันที่ป้องกันอุปกรณ์ 2 ด้าน ระหว่างการป้องกันแบบใช้รีเลย์ผลต่าง กับแบบใช้รีเลย์ระยะทาง	94
8.5 ผลเปรียบเทียบระบบป้องกันที่ป้องกันอุปกรณ์ 2 ด้าน ระหว่างการป้องกันแบบระยะทางแบบอาศัยระบบไหลล้น	94
8.6 ผลเปรียบเทียบระบบป้องกันที่ป้องกันอุปกรณ์ 2 ด้านทั้งหมด	95
8.7 ผลการเปรียบเทียบการปรับปรุงระบบป้องกัน โดยการเปลี่ยนรีเลย์เพียงอุปกรณ์เดียว	98
8.8 ผลการเปรียบเทียบการปรับปรุงระบบป้องกัน โดยการเปลี่ยนทุก ๆ อุปกรณ์ในระบบป้องกัน	98

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

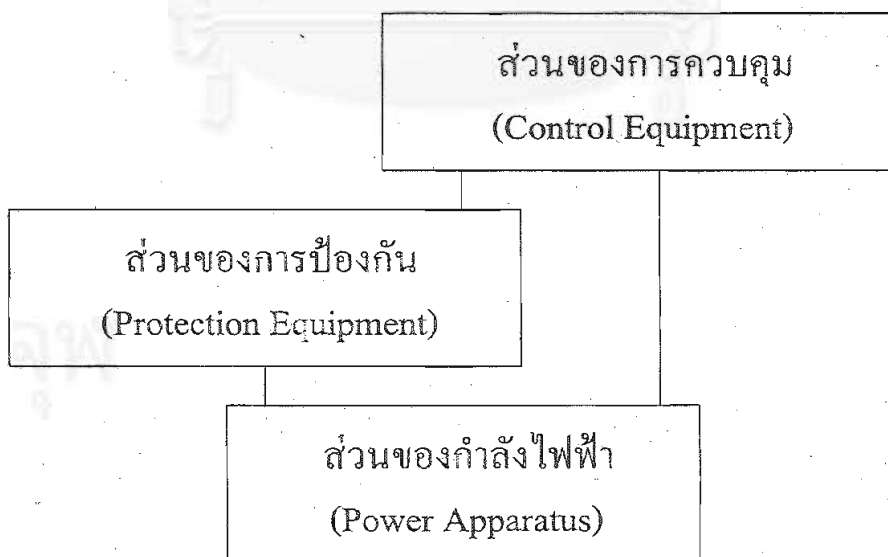
บทนำ

ระบบไฟฟ้ากำลังประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ต่อเชื่อมกันเป็นระบบ ซึ่งเราสามารถทำการแบ่งอุปกรณ์ต่าง ๆ เหล่านี้ออกเป็น 3 องค์ประกอบ ตามหน้าที่ในการทำงาน แสดงดังในรูปที่ 1.1 และมีคำอธิบาย ดังนี้ [9]

1. ส่วนของกำลังไฟฟ้า (Power apparatus) ได้แก่ ระบบกำเนิดไฟฟ้า (Generation) ระบบแปลงพลังงานไฟฟ้า (Transformation) และระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution)

2. ส่วนของการควบคุม (Control Equipment) ส่วนประกอบนี้จะทำการควบคุมให้ระบบทำงานตามปรกติ เช่น ควบคุมให้ระบบมีแรงดันคงที่ ควบคุมให้ระบบมีความถี่ที่เหมาะสม ควบคุมให้มีการจ่ายโหลดที่เพียงพอต่อการใช้งาน และบำรุงระบบที่มีการเชื่อมโยงให้มีความประหยัด และความมั่นคง

3. ส่วนของการป้องกัน (Protection Equipment) เป็นส่วนที่ทำการป้องกันอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบจากการเกิดความผิดปกติต่าง ๆ โดยที่ระบบป้องกันจะทำการตัดต่อวงจรผ่านอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น เซอร์คิตเบรกเกอร์ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปแบบโครงสร้างของระบบไฟฟ้า ในขณะที่ระบบควบคุมจะทำงานอย่างต่อเนื่องเพื่อที่จะปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของระบบเช่น แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 1.1 องค์ประกอบที่สำคัญ 3 องค์ประกอบของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากคำอธิบายข้างต้นจะเห็นได้ว่าระบบป้องกันเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดส่วนหนึ่งของระบบไฟฟ้ากำลังที่เราจะต้องให้ความสนใจในเรื่องของประสิทธิภาพในการทำงานไม่น้อยไปกว่าส่วนของกำลังไฟฟ้า และส่วนของการควบคุม

ในการออกแบบระบบป้องกันจะต้องคำนึงถึงความผิดปกติของระบบซึ่งถ้าตรวจไม่พบแล้วจะนำมาซึ่งความเสียหายของอุปกรณ์ หรืออาจทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องในการให้บริการ ดังนั้นการออกแบบระบบป้องกันที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ และจะต้องได้รับการออกแบบให้มีความคงทนต่อสภาพปกติของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลด และการทำงานของอุปกรณ์ที่มีการเปิดปิดวงจรอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นระบบป้องกันจึงมีความต้องการแตกต่างกันออกไปตามแต่สถานะแวดล้อมของระบบ โดยสามารถแบ่งความต้องการของระบบป้องกันออกเป็นหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้ [9]

1. ความเชื่อถือได้ของระบบป้องกัน (Reliability) คือ ระดับความเชื่อมั่นว่าอุปกรณ์จะทำงานตามความต้องการ ซึ่งแบ่งออกเป็นความพึ่งพาได้ (Dependability) และความมั่นคง (Security) ดังนี้

1.1 ความพึ่งพาได้ คือ ระดับความเชื่อมั่นที่บ่งบอกว่าระบบป้องกันจะทำงานอย่างถูกต้องเมื่อต้องการให้ทำงาน

1.2 ความมั่นคง คือ ระดับความเชื่อมั่นที่บ่งบอกว่าระบบป้องกันจะไม่ทำงานเมื่อไม่ต้องการให้ทำงาน

2. ความรู้จักเลือก (Selectivity) คือ ระบบป้องกันจะต้องมีความต่อเนื่องในการส่งจ่ายพลังงานมากที่สุด โดยที่การป้องกันจะตัดอุปกรณ์ที่ผิดปกติออกน้อยที่สุด

3. ความรวดเร็ว (Speed) คือ ระบบป้องกันจะต้องมีความรวดเร็วในการทำงานสูง เพื่อให้เกิดความเสียหายน้อยที่สุด

4. ความซับซ้อน (Simplicity) คือ ระบบป้องกันต้องมีจำนวนอุปกรณ์น้อยที่สุดที่เพียงพอสำหรับการป้องกันที่ต้องการ

5. ความประหยัด (Economics) คือ ระบบป้องกันต้องมีการป้องกันมากที่สุดโดยที่มีราคาต่ำที่สุด

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า นอกจากระบบป้องกันจะมีความสำคัญเป็นอย่างมากในระบบไฟฟ้ากำลังแล้ว และยังมีความต้องการต่าง ๆ มากมายในการออกแบบ ดังนั้นหากมีการออกแบบ และการบำรุงรักษาระบบป้องกันได้อย่างถูกต้องเหมาะสมแล้ว จะทำให้ระบบป้องกันสามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพมากที่สุด

จากการศึกษาที่ผ่านมา Anderson และ Agarwal [1] ได้ทำการนำเสนอคำนิยามที่ได้รับการปรับปรุงแล้วของ “อันเรดิเน็สหรือเบบิลิตี” (Unreadiness Probability) นอกจากนี้ยังนำเสนอแบบ

จำลองมาคอฟที่รวมทั้งระบบป้องกัน และอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันรวมเข้าด้วยกัน แต่อย่างไรก็ตามในแบบจำลองนี้ไม่ได้รวมผลของฟังก์ชันการตรวจสอบตัวเอง (Self-test function) ของอุปกรณ์ป้องกัน และนอกจากนี้ยังได้นำเสนอช่วงเวลาในการตรวจสอบประจำ (Routine Test Interval) ที่เหมาะสมด้วย

Kumm และคณะ [3] ได้แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของรีเลย์แบบทั่วไป (Traditional relay) กับดิจิทัลรีเลย์ (Digital relay) ที่มีฟังก์ชันการตรวจสอบตัวเองในด้านของช่วงเวลาในการตรวจสอบที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังได้ทำการปรับปรุงแบบจำลองให้เหมาะสมกับรีเลย์แบบต่าง ๆ ทั้งแบบธรรมดา และแบบที่มีฟังก์ชันการตรวจสอบตัวเอง และจากแบบจำลองนี้เองแสดงให้เห็นว่าถ้าใช้งานดิจิทัลรีเลย์ แล้วก็ไม่จำเป็นที่จะต้องทำการตรวจสอบบ่อยเหมือนกับการใช้รีเลย์ธรรมดา

Anderson และคณะ [4] ได้ทำการปรับปรุงแบบจำลองทางความเชื่อถือได้ของระบบป้องกันแบบ "รีดันแดนซ์" (Redundant Protective System) หรือมีระบบป้องกัน 2 ชุดทำงานพร้อมกัน ในการป้องกันอุปกรณ์เพียง 1 อุปกรณ์ โดยใช้แบบจำลองมาคอฟ และได้้นำเอา "ค่าเอ็บบนอร์มอล-อโนเวลบิลิตี" (Abnormal Unavailability) และอันเรดิเน็สพรีอบบิลิตี มาใช้เพื่อหาค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการตรวจสอบอีกด้วย ซึ่งจากบทความดังกล่าวพบว่า ระบบที่มีระบบป้องกัน 2 ชุดทำงานขนานกัน ไปจะช่วยเพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบโดยรวม

Schweitzer, III และ คณะ [4] ได้ทำการศึกษาถึงระบบป้องกันที่อาศัยระบบไหลตอแบบต่าง ๆ โดยใช้การสร้างแบบจำลองมาคอฟของระบบป้องกันแบบต่าง ๆ โดยเฉพาะ นอกจากนี้แล้วยังได้เปรียบเทียบแง่มุมต่าง ๆ ได้แก่ ความเชื่อถือได้ ความมั่นคง เวลาในการตัดสินใจ ความซับซ้อนของระบบป้องกัน และความครอบคลุมในการป้องกัน และสุดท้ายได้ทำการเสนอรูปแบบของระบบป้องกันที่อาศัยระบบไหลตอที่ได้ทำการปรับปรุงให้มีค่าตัวแปรต่าง ๆ ดีขึ้นด้วย

Pugh และคณะ [5,6] ได้ทำการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบป้องกันที่ใช้รีเลย์ผลต่างและรีเลย์ระยะทางที่ใช้ในระบบสายส่ง โดยการพิจารณาแยกอุปกรณ์ต่าง ๆ ออกจากกัน หลังจากนั้นก็ได้ทำการประเมินค่าความเชื่อถือได้ผ่านวิธีต้นไม้เหตุการณ์ (Event Tree Method) และทำการประเมินค่าความมั่นคงโดยใช้วิธีต้นไม้ความผิดพลาด (Fault Tree Method) ซึ่งสามารถทำการเปรียบเทียบระบบทั้งสองได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้แล้วแนวโน้มในอนาคตจะพยายามเพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบป้องกันด้วยการรวมระบบป้องกัน และระบบควบคุม ดังนั้นการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบป้องกันแบบเก่าที่ไม่ได้รวมระบบควบคุมจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการประเมินความคุ้มค่าในการปรับปรุงวิธีใหม่

จากบทความที่กล่าวมานี้ยังมีจุดที่น่าสนใจเพิ่มเติมดังนี้

1. ความแตกต่างของระบบป้องกันแบบต่าง ๆ ซึ่งความแตกต่างนี้เกิดจากความต้องการของระบบรีเลย์ประเภทต่าง ๆ ที่มีความต้องการองค์ประกอบที่แตกต่างกันออกไป ถึงแม้ใน [4] จะได้ทำการสร้างแบบจำลองของระบบป้องกันแบบต่าง ๆ ขึ้นมา แต่ก็เป็นการสร้างแบบจำลองที่มีรูปแบบ

เฉพาะสำหรับระบบป้องกันแบบโคแบบหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอการสร้างแบบจำลองของระบบป้องกันแบบต่าง ๆ โดยจะนำเสนอเป็นค่าความเชื่อถือได้ของระบบป้องกันแบบต่าง ๆ โดยที่จะอยู่บนพื้นฐานของแบบจำลองมาคอฟซึ่งมีข้อดีคือสามารถสร้างแบบจำลองได้ค่อนข้างละเอียด และวิธีต้นไม้ของเหตุการณ์ซึ่งแสดงให้เห็นลักษณะการทำงานของระบบป้องกันได้อย่างชัดเจนเหมือนใน [5,6] ซึ่งแบบจำลองของแต่ละระบบป้องกันจะสร้างขึ้นจากพื้นฐานของแบบจำลองแบบเดียวกัน และขึ้นอยู่กับระบบป้องกันนั้น ๆ ว่ามีอุปกรณ์อะไรบ้างประกอบกันขึ้นเป็นระบบนั้น ๆ

2. ในบทความที่กล่าวมา [1,2,3] กล่าวถึงช่วงเวลาที่เหมาะสมของการทำการทดสอบประจำระบบป้องกัน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำแบบจำลองที่ได้จากข้อแรกมาวิเคราะห์หาช่วงเวลาที่เหมาะสมของระบบป้องกันแบบต่าง ๆ ซึ่งนอกจากจะเป็นการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบโดยรวมแล้ว ยังมีประโยชน์ในการวางแผนเพื่อทำการซ่อมบำรุงระบบด้วย

1.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อนำเสนอการสร้างแบบจำลองของระบบป้องกันรูปแบบต่าง ๆ กัน โดยใช้วิธีแบบจำลองมาคอฟ และวิธีต้นไม้เหตุการณ์
2. ศึกษาผลกระทบของค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อค่าความเชื่อถือได้ และค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทดสอบประจำ
3. เปรียบเทียบระบบป้องกันรูปแบบต่าง ๆ ทางด้านความเชื่อถือได้ เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบป้องกันที่เหมาะสมกับความต้องการ
4. เพื่อทำการประมาณค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบประจำ สำหรับใช้เป็นแนวทางในการวางแผนบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่าง ๆ

1.2 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์

1. ทำการศึกษาระบบป้องกันที่ใช้รีเลย์กระแสเกินที่มีรูปแบบแตกต่างกัน
2. ทำการศึกษาระบบป้องกันที่ใช้รีเลย์ผลต่าง รีเลย์ระยะทาง และระบบป้องกันที่ใช้รีเลย์ระยะทางแบบไหลลทรูปแบบต่าง ๆ
3. พิจารณาเฉพาะผลในแง่ของความเชื่อถือได้เท่านั้น

1.3 ขั้นตอนการศึกษา และวิธีดำเนินงาน

1. ศึกษาวิธีการหาค่าความเชื่อถือได้แบบต่าง ๆ
2. ศึกษาระบบป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลังแบบต่าง ๆ
3. ศึกษาเรื่องความเชื่อถือได้ของระบบป้องกันจากบทความที่ตีพิมพ์ในตำรา และวารสารวิชาการต่าง ๆ
4. ทำการออกแบบ และพัฒนาโปรแกรมสำหรับหาค่าครรชนีต่าง ๆ ที่ต้องการ
5. ทำการศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน
6. เปรียบเทียบระบบป้องกันแบบต่าง ๆ ทั้งในแง่ของความเชื่อถือได้ และค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบประจำอุปกรณ์
7. วิเคราะห์ และสรุปผลที่ได้จากงานวิจัย
8. เรียบเรียงผลงานวิจัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับหาค่าครรชนีความเชื่อถือได้ของระบบป้องกัน
2. สามารถใช้ผลจากงานวิจัยในการวิเคราะห์ออกแบบระบบป้องกันได้อย่างเหมาะสม
3. สามารถดูแลรักษาระบบป้องกันได้อย่างเหมาะสม

1.5 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองที่รวมผลของฟังก์ชันการตรวจสอบตัวเอง เพื่อที่จะนำไปใช้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้อย่างหลากหลาย โดยรวบรวมข้อมูลทางสถิติของการทำงานไว้ในแบบจำลองนี้ค่อนข้างละเอียด หลังจากนั้นจะทำการรวมแบบจำลองย่อย ๆ นี้เข้าด้วยกันด้วยวิธีการรวมแบบอนุกรม และแบบขนานขึ้นอยู่กับรูปแบบขั้นตอนการทำงานของอุปกรณ์นั้น ๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งระบบป้องกันที่ต้องการ หลังจากนั้นจะกล่าวถึงระบบป้องกันแบบง่ายที่สุดได้แก่ ระบบป้องกันที่ใช้รีเลย์กระแสเกินในหลาย ๆ รูปแบบ เช่น มีรีเลย์ 1 ชุด หรือมีหม้อแปลงกระแส 2 ชุด ฯลฯ ระบบป้องกันที่ใช้รีเลย์ผลต่าง ระบบป้องกันที่ใช้รีเลย์ระยะทาง และระบบป้องกันที่ใช้รีเลย์ระยะทางแบบไหลทูลรูปแบบต่าง ๆ เมื่อได้แบบจำลองของระบบป้องกันก็จะนำมาารวมกับแบบจำลองของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันเพื่อให้ได้แบบจำลองสุดท้ายที่จะนำไปใช้ในการคำนวณต่อไป จากแนวความคิดที่ได้กล่าวข้างต้น ก็จะได้แบบจำลองที่ได้รับการปรับปรุงที่สามารถนำไป

ประยุกต์ใช้ได้กับระบบป้องกันแบบต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม ซึ่งเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบทจะสรุปได้ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึง ความเป็นมา บทความที่ผ่านมา วัตถุประสงค์ ขอบเขต ขั้นตอนการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึง หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้นของความเชื่อถือได้ ได้แก่ วิธีการสร้างแผนภาพกรอบของความเชื่อถือได้ วิธีการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ด้วยวิธีต้นไม้เหตุการณ์ รวมถึงการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของระบบที่ไม่ซับซ้อนด้วย

บทที่ 3 กล่าวถึง ทฤษฎีของแบบจำลองมาคอฟแบบไม่ต่อเนื่อง และแบบต่อเนื่อง โดยรวมถึงการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของระบบด้วยวิธีแบบจำลองมาคอฟ การประเมินค่าความน่าจะเป็นของค่าขอบเขตของระบบ

บทที่ 4 กล่าวถึง การนำเสนอการสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกันด้วยแบบจำลองมาคอฟ 4 สถานะ และทำการลดรูปเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณโดยลดรูปเหลือแบบจำลองมาคอฟ 3 สถานะ นอกจากนี้ยังกล่าวถึงการรวมกันรูปแบบต่าง ๆ เช่น แบบอนุกรม แบบขนาน ฯลฯ และสุดท้ายได้กล่าวถึงแบบจำลองของระบบป้องกันแบบต่าง ๆ ที่เกิดจากวิธีที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น

บทที่ 5 กล่าวถึง แบบจำลองของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน และแบบจำลองของระบบทั้งหมดที่เกิดจากการรวมแบบจำลองของระบบป้องกัน และแบบจำลองของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน

บทที่ 6 กล่าวถึง สมการที่ใช้ในการคำนวณครรชนีต่าง ๆ โดยรวมถึงการนำเสนอตัวอย่างการคำนวณอย่างง่าย

บทที่ 7 กล่าวถึง การศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในแบบจำลอง และทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษา

บทที่ 8 กล่าวถึง การนำเสนอความแตกต่างของระบบป้องกันแบบต่าง ๆ ทางด้านค่าความเชื่อถือได้ และช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ และยังรวมถึงการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบป้องกันด้วย

บทที่ 9 กล่าวถึง บทสรุป และข้อเสนอแนะในการทำการวิจัยต่อไป

บทที่ 2

การสร้างแบบจำลองของระบบ และการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบที่ไม่ซับซ้อน

ความเชื่อถือได้ของระบบป้องกันมีความสำคัญมากต่อความมั่นคงของระบบไฟฟ้ากำลัง เพราะความผิดพลาดสามารถเกิดขึ้นได้ในทุกสถานการณ์ โดยที่ระหว่างการเกิดเหตุการณ์ที่ไม่ได้คาดคิดเช่นนี้ ระบบป้องกันจะต้องทำงานได้อย่างไม่ผิดพลาด ดังนั้นระบบป้องกันจำเป็นที่จะต้องได้รับการออกแบบอย่างเหมาะสม และถูกต้องในการกำจัดความผิดพลาดเหล่านี้

ในบทที่ 2 นี้จะนำเสนอเทคนิคพื้นฐานต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบต่าง ๆ โดยจะกล่าวถึงแผนภาพกรอบของความเชื่อถือได้ และวิธีค้นหาเหตุการณ์ตามลำดับ

2.1 แผนภาพกรอบของความเชื่อถือได้ (Reliability Block Diagrams)

ในทุก ๆ ระบบ ค่าความเชื่อถือได้จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของระบบนั้น ๆ ได้แก่ การจัดวาง และการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ประกอบกันขึ้นเป็นระบบ การจัดวางในรูปแบบต่าง ๆ กันนี้จะนำไปสู่ค่าความเชื่อถือได้ที่แตกต่างกัน

แผนภาพกรอบของความเชื่อถือได้เป็นสิ่งที่แสดงรูปแบบการจัดวางของอุปกรณ์ต่าง ๆ และการเชื่อมต่อของระบบได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้แล้วลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ก็ยังสามารถแสดงอยู่ในแผนภาพกรอบนี้ได้ ยกตัวอย่างเช่น เราสามารถแสดงได้ว่าตัวควบคุมแบบดิจิทัลสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนที่ทำงานอนุกรมกันอยู่ ส่วนแรกได้แก่ ส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์ (Hardware) และส่วนของชุดคำสั่ง (Software) สิ่งที่จะเน้นในการแสดงด้วยแผนภาพนี้คือ “ตรรกะ” (Logic) ในการทำงานมากกว่าที่จะเป็นรูปแบบการเชื่อมต่อที่เห็นกันอยู่เพียงแค่สภาพภายนอก

กลุ่ม ๆ หนึ่งของส่วนต่าง ๆ ที่เชื่อมต่อจุด 2 จุดเข้าด้วยกันในแผนภาพกรอบของความเชื่อถือได้เข้าด้วยกันเรียกว่า “เส้นทาง” (Path) ซึ่งเส้นทางนี้จะแสดงความหมายของงานที่ได้รับมอบหมาย เช่นถ้ามีเส้นทางเป็นแบบเหลือเฟือ (Redundant) จะแสดงให้เห็นว่าความผิดพลาดที่เส้นทางใดเส้นทางหนึ่งจะไม่ก่อให้เกิดความผิดพลาดต่อทั้งระบบ

ส่วนต่าง ๆ ในเส้นทางหนึ่ง ๆ เรียกว่า “เอลเลอเมนต์” (Elements) ซึ่งอาจหมายถึงอุปกรณ์วงจร หรือแม้แต่ว่าระบบทั้งหมดก็ได้ ถ้าเอลเลอเมนต์เป็นแบบเหลือเฟือแสดงว่ามีอย่างน้อยหนึ่งการทำงานที่ซ้ำกัน

กำหนดให้

- R = ความเชื่อถือได้ หรือความน่าจะเป็นที่ระบบจะทำงานสำเร็จ
 Q = ความเชื่อถือไม่ได้ หรือความน่าจะเป็นที่ระบบจะล้มเหลว
 p = ความเชื่อถือได้ของเอลเลอเมนต์
 q = ความล้มเหลวของเอลเลอเมนต์

ในบางกรณีจะเป็นการสะดวกมากขึ้นในการตั้งชื่อเอลเลอเมนต์ด้วยตัวอักษร เช่น A, B, C, ก, ข ฯลฯ ซึ่งในกรณีนี้เราสามารถเขียนได้เป็น

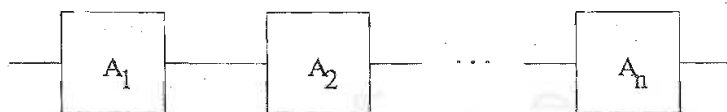
$\Pr(A)$ = เหตุการณ์ที่แสดงความสำเร็จของเอลเลอเมนต์ A = $\Pr\{A \text{ ทำงาน}\}$

$\Pr(\bar{A})$ = เหตุการณ์ที่แสดงความล้มเหลวของเอลเลอเมนต์ A = $\Pr\{A \text{ ล้มเหลว}\}$

ถึงแม้ว่าแผนภาพกรอบของความเชื่อถือได้จะง่ายต่อการเข้าใจ แต่อย่างไรก็ตามมันไม่สามารถที่จะแสดงรูปแบบที่ซับซ้อนได้ แต่ก็เพียงพอต่อการศึกษาระบบเล็ก ๆ

2.1.1 ระบบอนุกรม (Series Systems)

ให้ลองพิจารณาระบบที่ประกอบไปด้วยเอลเลอเมนต์ $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ ที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.1 ซึ่งเราเรียกระบบนี้ว่า “ระบบอนุกรม” (Series system) ไม่ใช่เอลเลอเมนต์เหล่านี้ต่อกันแบบอนุกรม (หรือบางทีอาจจะเป็นอนุกรม) แต่เป็นเพราะว่าเอลเลอเมนต์เหล่านี้ทำงานเป็นขั้นตอนกันแบบอนุกรมไปตลอดทั้งระบบ แผนภาพกรอบดังที่แสดงในรูปที่ 2.1 มักถูกเรียกว่า “แผนภาพวงจรข่าย” (Network diagrams) หรือ “แผนภาพกรอบของความเชื่อถือได้” (Reliability block diagrams)



รูปที่ 2.1 ระบบอนุกรมของเอลเลอเมนต์ n เอลเลอเมนต์

(A series system of n element)

ถ้าเราสมมติว่าทุก ๆ เอลเลอเมนต์ในระบบอนุกรมนี้เป็นอิสระต่อกันแล้ว ระบบทั้งหมดจะทำงานสำเร็จก็ต่อเมื่อ ทุก ๆ เอลเลอเมนต์อยู่ใน “สถานะสำเร็จ” (Success state) เช่นทุก ๆ เอลเลอเมนต์กำลังทำงานอยู่ กำหนดให้ A_i แทนความสำเร็จของเอลเลอเมนต์ลำดับที่ i

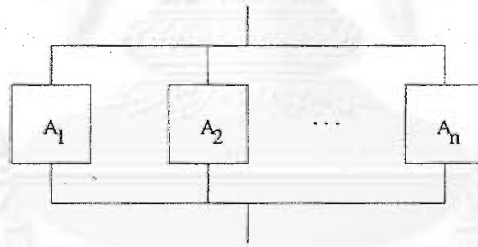
ดังนั้นความเชื่อถือได้ของระบบอนุกรมที่ประกอบไปด้วยเอลเลอเมนต์ที่เป็นอิสระต่อกัน จะได้อ้างอิงนี้

$$\begin{aligned} R_s &= \Pr(A_1 A_2 \dots A_n) = \Pr(A_1) \Pr(A_2) \dots \Pr(A_n) \\ &= R_1 R_2 \dots R_n = \prod_{i=1}^n R_i \end{aligned} \quad (2.1)$$

จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า สำหรับระบบอนุกรมแล้ว ความล้มเหลวของเอลเลอเมนต์ใดเอลเลอเมนต์หนึ่งจะเป็นสาเหตุให้เกิดความล้มเหลวต่อระบบทั้งหมด

2.1.2 ระบบขนาน (Parallel Systems)

สำหรับบางระบบแล้วจะมีเอลเลอเมนต์บางเอลเลอเมนต์ที่ทำงานอยู่ในสภาพระบบขนาน เช่นในรูปที่ 2.2 ซึ่งเอลเลอเมนต์จำนวน n เอลเลอเมนต์ทำงานขนานกัน ระบบโดยรวมจะทำงานสำเร็จถ้ามีเอลเลอเมนต์ใดเอลเลอเมนต์หนึ่งทำงานสำเร็จ ซึ่งระบบที่กล่าวมานี้เรียกว่า “ระบบขนาน”



รูปที่ 2.2 ระบบขนานของเอลเลอเมนต์ n เอลเลอเมนต์

(A parallel system of n element)

ความน่าจะเป็นที่ระบบขนานจะทำงานสำเร็จมีค่าเท่ากับความน่าจะเป็นของผลยูเนียนของเหตุการณ์ที่ทำงานสำเร็จทั้งหมด n เหตุการณ์ (probability of the union of the n successful events)

$$\begin{aligned} R_p &= \Pr(A_1 + A_2 + \dots + A_n) \\ &= [\Pr(A_1) + \Pr(A_2) + \dots + \Pr(A_n)] \\ &\quad - [\Pr(A_1 A_2) + \Pr(A_2 A_3) + \dots + \Pr(A_1 A_j)_{i \neq j}] \\ &\quad + \dots + (-1)^n \Pr(A_1 A_2 \dots A_n) \end{aligned} \quad (2.2)$$

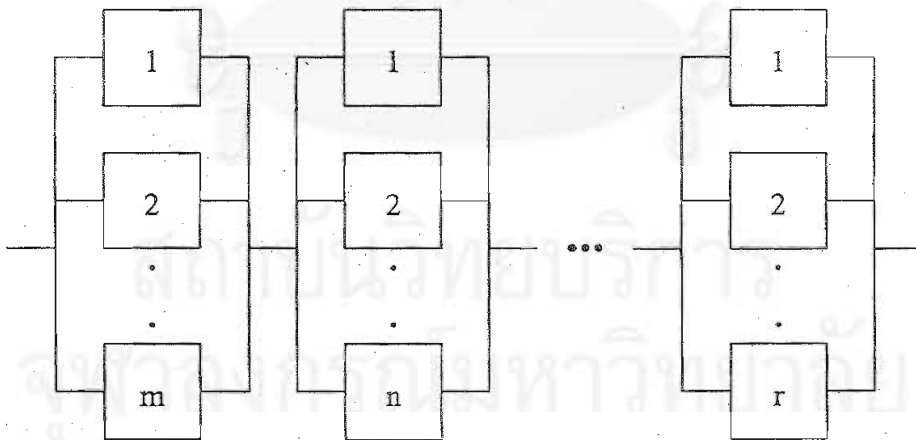
ถ้าสำหรับระบบขนานแล้วการคำนวณความน่าจะเป็นที่ระบบจะทำงานล้มเหลวจะทำได้ง่ายกว่าการคำนวณความน่าจะเป็นที่ระบบจะทำงานสำเร็จ เพราะเราสามารถกล่าวได้ว่าระบบขนานจะล้มเหลวก็ต่อเมื่อทุก ๆ เอลเมนต์การทำงานล้มเหลวดังสมการที่ 2.3 ดังนี้

$$R_p = 1 - \Pr(\bar{A}_1 \bar{A}_2 \dots \bar{A}_n) = 1 - Q_p = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i \quad (2.3)$$

ซึ่งก็แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าระบบจะทำงานได้สำเร็จ หากมีเพียงเอลเมนต์ใดเอลเมนต์หนึ่งทำงานสำเร็จ

2.1.3 ระบบอนุกรม - ขนาน และระบบขนาน - อนุกรม (Series-Parallel and Parallel-Series Systems)

ระบบต่าง ๆ สามารถจัดเรียงอยู่ในรูปแบบต่าง ๆ ได้มากมายหลายรูปแบบเช่น ระบบขนานหลาย ๆ ระบบต่ออนุกรมกันดังรูปที่ 2.3 ระบบในรูปนี้เรียกว่า “ระบบอนุกรม - ขนาน” (series-parallel system) แต่ละระบบขนานสามารถคำนวณค่าความเชื่อถือได้ตามสมการที่ 2.3 และหลังจากนั้นค่าที่ได้จากการคำนวณก็จะนำไปพิจารณาเป็นเอลเมนต์ของระบบอนุกรมต่อไป



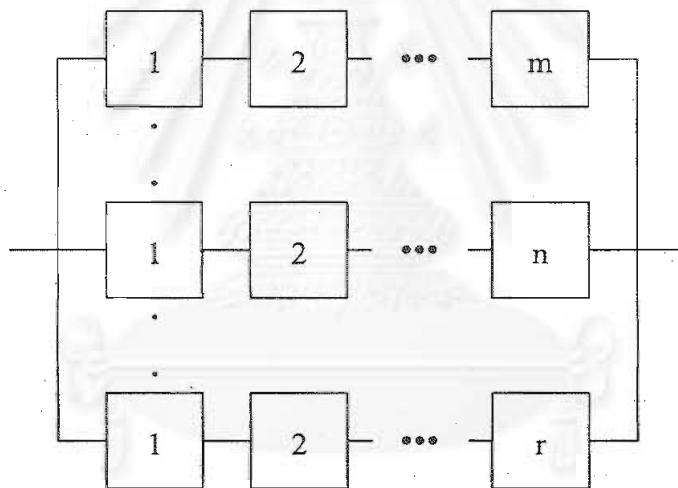
รูปที่ 2.3 การเชื่อมต่อแบบอนุกรม - ขนาน
(A series-parallel connection)

เรามาลองพิจารณากรณีพิเศษสำหรับระบบอนุกรม - ขนานที่ประกอบด้วยเอลเลอเมนต์ที่เหมือนกันทุกประการ และมีค่าความเชื่อถือได้ p จำนวน m เอลเลอเมนต์ประกอบกันเป็นระบบขนาน และระบบขนานเหล่านี้จำนวน n ระบบก็ประกอบกันขึ้นเป็นระบบอนุกรมดังสมการที่ 2.4

$$R = [1 - (1 - p)^m]^n \quad (2.4)$$

ในกรณีที่ค่า n และ p คงที่ ค่า R จะเพิ่มขึ้นเมื่อ m เพิ่มขึ้น แต่เมื่อค่า m และ p คงที่ ค่า R จะลดลงเมื่อ n เพิ่มขึ้น

สำหรับรูปแบบอีกรูปแบบหนึ่งของการนำระบบอนุกรม และระบบขนานมาประกอบกันเป็นระบบใหม่ขึ้น ได้แก่ “ระบบขนาน - อนุกรม” (A parallel-series system) ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 2.4 และสามารถวิเคราะห์ได้ใน 2 ขั้นตอนคือ ขั้นแรกพิจารณาระบบขนานอนุกรมก่อน และขั้นที่สองนำค่าที่ได้จากขั้นแรกมาพิจารณาเป็นระบบขนานอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 2.4 การเชื่อมต่อแบบขนาน - อนุกรม

(A parallel-series connection)

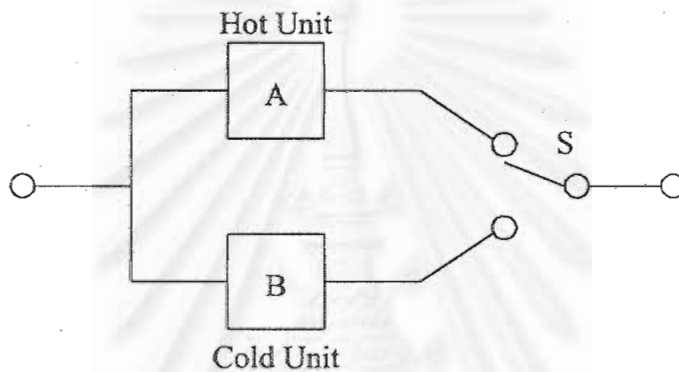
กรณีพิเศษสำหรับระบบขนาน - อนุกรมนี้จะประกอบไปด้วยเอลเลอเมนต์ที่เหมือนกันทุกประการ และมีค่าความเชื่อถือได้ p จำนวน n เอลเลอเมนต์ประกอบกันเป็นระบบอนุกรม และระบบอนุกรมเหล่านี้จำนวน m ระบบก็ประกอบกันขึ้นเป็นระบบขนานดังสมการที่ 2.5

$$R = [1 - (1 - p^n)]^m \quad (2.5)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ 2.5 จะสามารถวิเคราะห์ได้ว่า ถ้าค่า n และ p คงที่ ค่า R จะเพิ่มขึ้นเมื่อ m เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันถ้า m และ p คงที่ ค่า R จะลดลงเมื่อค่า n เพิ่มขึ้น

2.1.4 ระบบสำรอง (Standby Systems)

รูปที่ 2.5 แสดงการจัดเรียงแบบขนานของอุปกรณ์ซึ่งบางครั้งก็เรียกว่า “ระบบเหลือเฟือ” (Redundant system) ระบบสำรองนี้จะแตกต่างกับระบบขนานตรงที่ ในระบบขนานอุปกรณ์ทั้งสองจะทำงานพร้อมกัน แต่ในระบบสำรองอุปกรณ์ B จะทำงานเมื่ออุปกรณ์ A ไม่ทำงานและสวิทช์ S สับเปลี่ยนการทำงานมาที่อุปกรณ์ B



รูปที่ 2.5 ระบบสำรอง
(Standby Systems)

สำหรับสวิทช์ที่แสดงในรูปที่ 2.5 สามารถพิจารณาให้เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตัดสินใจ (Decision device) และอุปกรณ์ปิดเปิด (Switching device) เมื่อพิจารณาในกรณีที่ไม่นับกับเวลา เราสามารถแสดงค่าความเชื่อถือได้อยู่ในสมการดังนี้

$$Pr \{ \text{ผิดพลาด} \} = Pr \{ \text{ระบบผิดพลาดเมื่อสวิทช์ทำงาน} \} * Pr \{ \text{สวิทช์ทำงาน} \} + Pr \{ \text{ระบบผิดพลาดเมื่อสวิทช์ล้มเหลว} \} * Pr \{ \text{สวิทช์ล้มเหลว} \} \quad (2.6)$$

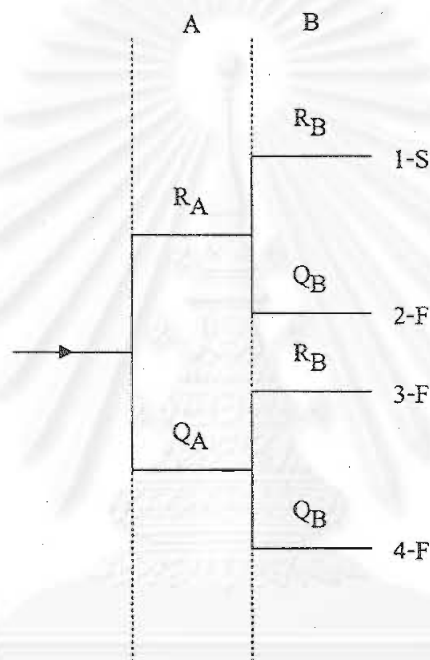
หรือเมื่อเราแทนความน่าจะเป็นของความผิดพลาดด้วย Q และ แทน $Pr \{ \text{สวิทช์ทำงาน} \}$ ด้วย P_s แล้ว จะสามารถเขียนได้ใหม่ดังที่แสดงอยู่ในสมการที่ 2.7

$$Q = Q_A Q_B P_s + Q_A (1 - P_s) \quad (2.7)$$

2.2 ต้นไม้เหตุการณ์ (Event tree)

วิธีต้นไม้เหตุการณ์เป็นการนำเสนอทางรูปภาพของทุก ๆ เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบ ที่วิธีนี้ถูกเรียกว่า “ต้นไม้เหตุการณ์” เพราะว่าวิธีนี้มีรูปแบบการนำเสนอคล้ายกับกิ่งของต้นไม้ วิธีต้นไม้เหตุการณ์นี้ถูกใช้เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลที่เกิดขึ้นที่เป็นไปได้เมื่อกำหนดเหตุการณ์เริ่มต้น

2.2.1 ต้นไม้เหตุการณ์แบบสมบูรณ์ (Complete Event Tree)



รูปที่ 2.6 ต้นไม้เหตุการณ์ของระบบที่อุปกรณ์ 2 อุปกรณ์ต่ออนุกรมกัน

ลองพิจารณารูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นถึงต้นไม้เหตุการณ์ที่อุปกรณ์ A และ B ต่ออนุกรมกัน อยู่ เส้นด้านบนหมายถึงอุปกรณ์นั้น ๆ ทำงานสำเร็จ และเส้นด้านล่างหมายถึงอุปกรณ์ทำงานผิดพลาด หรือไม่ทำงาน ความน่าจะเป็นที่ระบบจะทำงานสำเร็จเป็นดังนี้

$$R_S = \Pr(P_1) \quad (2.8)$$

โดยที่ $P(P_i)$ = ความน่าจะเป็นของการเกิดเส้นทางที่ i และ $\Pr(P_1) = R_A R_B$ ดังนั้น

$$R_S = \Pr(P_1) = R_A R_B \quad (2.9)$$

และความน่าจะเป็นที่ระบบจะทำงานผิดพลาดเป็นดังนี้

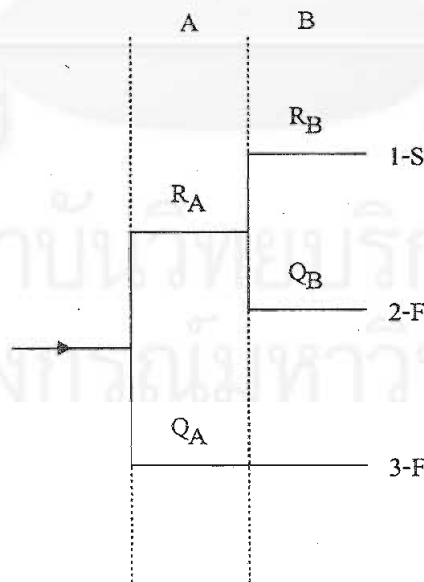
$$\begin{aligned} Q_S &= \Pr(P_2) + \Pr(P_3) + \Pr(P_4) \\ &= R_A Q_B + Q_A R_B + Q_A Q_B \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$Q_S = 1 - R_S \quad (2.11)$$

ลองประเมินค่าความน่าจะเป็นสำหรับกรณีที่อุปกรณ์ทั้งสองมีค่าความเชื่อถือได้เท่ากับ 0.99 จะได้ค่าความเชื่อถือได้ของระบบ $R_S = 0.9801$ และความเชื่อถือไม่ได้ของระบบ $Q_S = 0.0199$

2.2.2 ต้นไม้เหตุการณ์แบบลดรูป (Reduced Event Tree)

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.6 จะมีอุปกรณ์แค่ 2 อุปกรณ์ แต่ในความเป็นจริงอาจมีอุปกรณ์มากกว่านั้น และสถานะของแต่ละอุปกรณ์อาจมากกว่า 2 สถานะ ทำให้ผลที่เป็นไปได้ทั้งหมดมีมากมาย ซึ่งยากต่อการพิจารณา ดังนั้นจึงเกิดวิธีการลดรูปต้นไม้เหตุการณ์ดังจะเห็นจากรูปที่ 2.6 ว่าเมื่ออุปกรณ์ A ไม่ทำงาน หรือทำงานผิดพลาด ไม่ว่าอุปกรณ์ B จะมีผลการทำงานเป็นอย่างไร ผลที่ออกมาจะเป็นว่าระบบไม่ทำงาน ซึ่งสามารถลดรูปได้เป็นดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การลดรูปต้นไม้เหตุการณ์ของระบบที่มีอุปกรณ์ 2 อุปกรณ์ต่อกัน

เมื่อลองพิจารณาความเชื่อถือได้ของระบบจะได้เท่ากับตอนที่ยังไม่ได้ลดรูปดังนี้

$$R_S = \Pr(P_1)$$

หรือ
$$R_S = R_A R_B \quad (2.12)$$

และความน่าจะเป็นที่ระบบจะทำงานผิดพลาดเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} Q_S &= \Pr(P_2) + \Pr(P_3) \\ &= R_A Q_B + Q_A \end{aligned}$$

หรือ
$$Q_S = 1 - R_S \quad (2.13)$$

ซึ่งเมื่อลองประเมินค่าความน่าจะเป็นสำหรับกรณีที่อุปกรณ์ทั้งสองมีค่าความเชื่อถือได้เท่ากับ 0.99 จะได้ค่า $R_S = 0.9801$ และ $Q_S = 0.0199$ เท่ากับตอนที่ยังไม่ได้ลดรูปนั่นเอง

ผลที่ได้จากการลดรูปนี้จะทำให้การคำนวณ และพิจารณาทำได้รวดเร็วขึ้น เพราะจะสนใจเฉพาะค่าที่ต้องการเท่านั้น และค่าที่ได้ก็ไม่ต่างจากเมื่อพิจารณาด้วยต้นไม้เหตุการณ์แบบสมบูรณ์

2.3 สรุป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอพื้นฐานของการประเมินค่าความเชื่อถือได้ของระบบด้วยวิธีการสร้างแผนภาพกรอบของความเชื่อถือได้ และวิธีต้นไม้เหตุการณ์ ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมกับระบบที่ไม่มีความซับซ้อนมากนัก วิธีทั้งสองสามารถทำความเข้าใจได้ไม่ยากมากนักโดยมีพื้นฐานอยู่บนความน่าจะเป็นนั่นเอง

บทที่ 3

แบบจำลองมาคอฟ

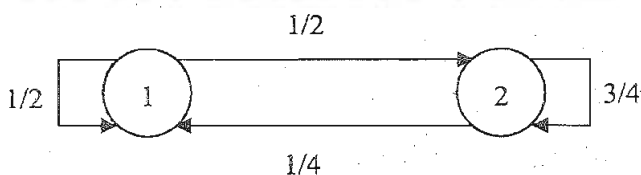
แบบจำลองมาคอฟ (Markov Model) [7] สามารถพิจารณาในกรณีที่อุปกรณ์ หรือระบบที่สามารถซ่อมแซมได้ (Repairable System) วิธีนี้สามารถนำไปใช้กับพฤติกรรมแบบสุ่ม (Random Behavior) ของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งแบบไม่ต่อเนื่อง และแบบต่อเนื่องระหว่างสถานะของระบบกับเวลาในการสังเกต การเปลี่ยนแปลงแบบสุ่มนี้เรียกว่า “กระบวนการสโตแคสติก” (Stochastic Process)

ในกรณีทั่วไปของแบบจำลองมาคอฟ ทั้ง “เวลา” (Time) และ “สเปซ” (Space) สามารถเป็นได้ทั้งแบบไม่ต่อเนื่อง และแบบต่อเนื่อง แต่ในกรณีสำหรับการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบ เราจะกำหนดให้ “สเปซ” เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง ในขณะที่ “เวลา” สามารถพิจารณาได้ทั้งสองแบบ โดยแบบที่เวลาถูกพิจารณาเป็นแบบไม่ต่อเนื่องเรียกกันว่า “มาคอฟเชน” (Markov Chain) และแบบต่อเนื่องซึ่งเรียกกันว่า “กระบวนการมาคอฟ” (Markov Process)

3.1 กระบวนการมาคอฟแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Markov Chains)

3.1.1 แนวคิดหลักทั่วไปของการสร้างแบบจำลอง

แนวคิดพื้นฐานสำหรับการสร้างแบบจำลองมาคอฟสามารถอธิบายโดยพิจารณาระบบที่ไม่ซับซ้อนดังในรูปที่ 3.1 ในระบบนี้สถานะทั้งสองของระบบถูกกำหนดอย่างชัดเจน โดยกำหนดเป็นสถานะที่ 1 และสถานะที่ 2 นอกจากนี้แล้วในรูปที่ 3.1 นี้เองยังแสดงค่าความน่าจะเป็นของการคงอยู่ และการออกจากสถานะใด ๆ ในเวลาที่กำหนดด้วย และค่าความน่าจะเป็นเหล่านี้จะสมมติให้มีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลาที่พิจารณา



รูปที่ 3.1 ระบบที่มี 2 สถานะ

(A two state system)

ดังที่แสดงในรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าเป็นรูปแบบของกระบวนการมาคอฟแบบไม่ต่อเนื่อง เพราะระบบมีสถานะคงที่อยู่ 2 สถานะ และการเปลี่ยนแปลงสถานะจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาแบบเป็นขั้น หรือ ไม่ต่อเนื่องนั่นเอง

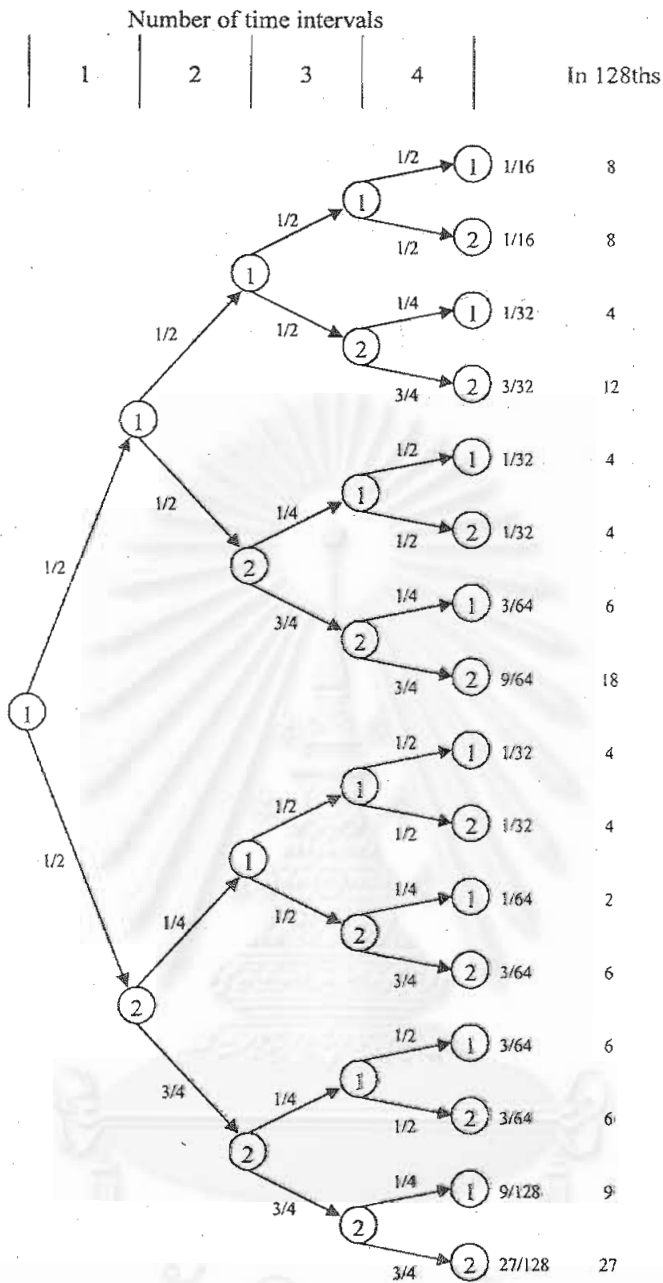
ลองพิจารณาในช่วงเวลาแรก และสมมติให้ระบบเริ่มต้นที่สถานะที่ 1 ระบบจะยังคงอยู่ที่สถานะเดิมด้วยความน่าจะเป็นเท่ากับ $1/2$ หรือไม่ก็เปลี่ยนสถานะไปเป็นสถานะที่ 2 ด้วยความน่าจะเป็นเท่ากับ $1/2$ เช่นกัน ตรงจุดนี้ก็สำคัญมากเช่นกันที่ผลรวมของความน่าจะเป็นเหล่านี้จะต้องมีค่าเท่ากับ 1 คือระบบจะต้องคงอยู่ในสถานะที่พิจารณาอยู่ หรือเปลี่ยนสถานะอย่างใดอย่างหนึ่ง หลักการนี้สามารถนำไปใช้ได้กับทุกระบบไม่ว่าระบบนั้นจะซับซ้อนเพียงใด

หลังจากนั้นระบบจะคงอยู่ในสถานะที่ 2 ซึ่งสามารถคงอยู่ในสถานะเดิมได้ด้วยความน่าจะเป็นเท่ากับ $3/4$ หรือไม่ก็เปลี่ยนสถานะด้วยความน่าจะเป็นเท่ากับ $1/4$ ระหว่างช่วงเวลาที่ถัดไป

ลักษณะการเกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้สามารถแสดงได้อย่างชัดเจน โดยใช้วิธี แผนภาพต้นไม้ (Tree Diagram) ดังในรูปที่ 3.2 ซึ่งในรูปนี้สมมติให้ระบบมีสถานะเริ่มต้นอยู่ในสถานะที่ 1 โดยแสดงช่วงเวลาทั้งหมด 4 ช่วงเวลา ความน่าจะเป็นของแต่ละเส้นทางสามารถคำนวณได้โดยการคูณค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมเข้าด้วยกันในแต่ละเส้นทาง เมื่อลองทำการรวมค่าความน่าจะเป็นทั้งหมดของทุก ๆ เส้นทางก็จะได้ผลเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานที่สำคัญ และสามารถนำไปตรวจสอบความถูกต้องได้ เมื่อลองรวมผลความน่าจะเป็นที่ระบบจะอยู่ในสถานะที่ 1 จะได้เท่ากับ $43/128$ ในขณะที่ความน่าจะเป็นที่ระบบจะอยู่ในสถานะที่ 2 เท่ากับ $85/128$

ถ้าได้ทำการพิจารณาถึงค่าความน่าจะเป็นในช่วงเวลาที่ถัดไปจะสามารถแสดงได้ในตารางที่ 3.1 ซึ่งสามารถนำไปแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.3 และจากรูปนี้เองแสดงให้เห็นว่า เมื่อช่วงเวลาเพิ่มขึ้น ค่าความน่าจะเป็นของสถานะใด ๆ จะลู่เข้าสู่ค่าคงที่ค่าใดค่าหนึ่ง หรือค่าขอบเขตนั่นเอง ลักษณะแบบนี้จะเกิดขึ้นกับระบบส่วนมาก และค่าขอบเขตนี้เป็นที่รู้จักกันในชื่อว่า “ค่าขอบเขตของสถานะ” (Limiting-state value) หรือ “ค่าที่ไม่ขึ้นกับเวลา” (Time-dependent value) สำหรับความน่าจะเป็นของสถานะต่าง ๆ

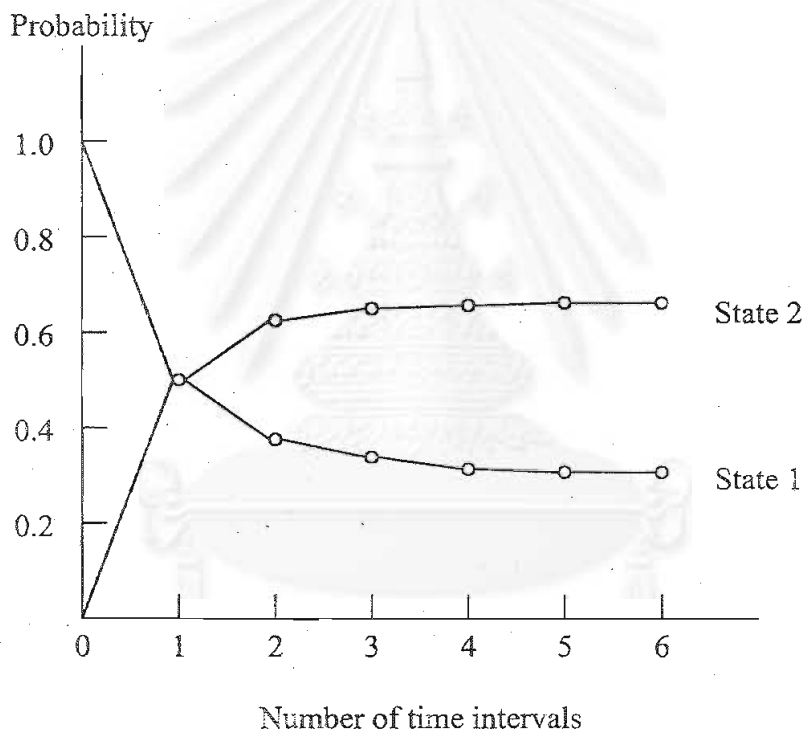
ในตัวอย่างนี้เราสมมติว่าระบบมีสถานะเริ่มต้นที่สถานะที่ 1 ซึ่งสถานะของระบบที่เวลาเท่ากับ 0 นี้เรียกว่า “สภาวะเริ่มต้น” (Initial conditions) สำหรับปัญหาการประเมินความเชื่อถือได้ส่วนมากเราจะรู้ค่าเริ่มต้นเหล่านี้ สภาพชั่วคราวนี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับสภาวะเริ่มต้นเป็นอย่างมาก โดยถ้าสมมติให้มีสภาวะเริ่มต้นที่สถานะที่ 2 บ้าง ก็จะพบว่าแม้ว่าสภาพชั่วคราวจะแตกต่างกัน แต่ค่าขอบเขตจะเหมือนกัน ไม่ขึ้นอยู่กับสภาวะเริ่มต้น แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับตัวระบบด้วยว่าเป็นระบบชนิดไหน เพราะว่ามีบางระบบเช่น ระบบที่มีสถานะอยู่สถานะหนึ่งเมื่อเข้าไปแล้วจะออกไม่ได้ ระบบแบบนี้จะมีค่าขอบเขตขึ้นอยู่กับสภาวะเริ่มต้นด้วย



รูปที่ 3.2 แผนภาพต้นไม้ของระบบที่มี 2 สถานะ

ตารางที่ 3.1 ความน่าจะเป็นของแต่ละสถานะสำหรับระบบที่มี 2 สถานะ

ช่วงเวลา	ความน่าจะเป็น	
	สถานะที่ 1	สถานะที่ 2
1	$1/2 = 0.500$	$1/2 = 0.500$
2	$3/8 = 0.375$	$5/8 = 0.625$
3	$11/32 = 0.344$	$21/32 = 0.656$
4	$43/128 = 0.336$	$85/128 = 0.664$
5	$171/512 = 0.334$	$341/512 = 0.666$



รูปที่ 3.3 พฤติกรรมชั่วคราวของระบบ

แม้ว่าค่าขอบเขต หรือค่าสถานะอยู่ตัวสำหรับสถานะใด ๆ ของระบบจะไม่ขึ้นอยู่กับสภาวะเริ่มต้น แต่ “อัตราในการลู่เข้า” (Rate of convergence) สามารถขึ้นอยู่กับสภาวะเริ่มต้นได้ และยังคงขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะด้วย

วิธีแผนภาพต้นไม้เป็นวิธีที่มีประโยชน์มากสำหรับอธิบายแนวคิดหลักของมาคอฟเชน แต่มันก็ไม่เหมาะสมกับระบบขนาดใหญ่ ดังนั้นระบบขนาดใหญ่จำเป็นต้องมีวิธีที่มารองรับ ซึ่งจะอธิบายในส่วนที่เหลือของบทนี้

3.1.2 เมตริกซ์แสดงการเปลี่ยนสถานะแบบเฟ้นสุ่ม

(Stochastic transitional probability matrix)

ในการวิเคราะห์ระบบแบบต่าง ๆ จะนำวิธีการแก้ปัญหาด้วยเมตริกซ์มาใช้ ในขณะที่วิธีการแก้ปัญหาแบบอื่นจะใช้ในการแก้ปัญหาได้ยากกว่า เพื่อที่จะประยุกต์เมตริกซ์เข้ากับการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบจำเป็นต้องสร้างเมตริกซ์ที่เป็นตัวแทนของความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะจากสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่งในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ

ลองพิจารณาระบบที่แสดงในรูปที่ 3.1 อีกครั้งหนึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะสามารถเขียนได้อยู่ในรูปเมตริกซ์ P ดังนี้

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{4} & \frac{3}{4} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

P_{ij} = ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนเป็นสถานะ j หลังจากช่วงเวลาที่กำหนด ซึ่งอยู่ในสถานะ i ตอนเริ่มต้นของช่วงเวลา

คำนิยามของ P_{ij} แสดงให้เห็นว่า ตัวเลขที่บอกแถวของเมตริกซ์จะแสดงถึงสถานะที่การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น และตัวเลขที่บอกคอลัมน์จะแสดงถึงสถานะหลังเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น สำหรับระบบที่มี n สถานะใด ๆ สามารถแสดงได้ในสมการที่ 3.2 ดังนี้

$$P = \begin{array}{c} \text{จากสถานะ} \\ \downarrow \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ n \end{array} \begin{array}{c} \rightarrow \text{ไปยังสถานะ} \\ \left[\begin{array}{cccccc} 1 & 1 & 1 & \dots & n \\ P_{11} & P_{12} & P_{13} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & \dots & \cdot \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ P_{n1} & \cdot & \cdot & \dots & P_{nn} \end{array} \right] \end{array} \quad (3.2)$$

เมตริกซ์ P เรียกว่า “เมตริกซ์แสดงการเปลี่ยนสถานะแบบเฟ้นสุ่ม” (Stochastic Transitional Probability Matrix) เพราะว่าเมตริกซ์นี้จะแสดงถึงค่าความน่าจะเป็นของกระบวนการสโตแคสติก นอกจากนี้ยังต้องคำนึงเสมอว่าผลรวมของค่าความน่าจะเป็นในแต่ละแถวของเมตริกซ์จะต้องเท่ากับ 1 เพราะว่าแถวที่ i แสดงค่าความน่าจะเป็นทั้งหมดที่อยู่ในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ

3.1.3 การประเมินค่าความน่าจะเป็นแบบขึ้นต่อเวลา (Time dependent probability evaluation)

เพื่อที่จะอธิบายถึงวิธีการประเมินพฤติกรรมสภาวะชั่วคราวของระบบโดยใช้เมตริกซ์แสดงการเปลี่ยนสถานะแบบเฟ้นสุ่ม ให้ลองพิจารณาระบบที่มี 2 สถานะที่แสดงในรูปที่ 3.1 อีกครั้ง เมตริกซ์สำหรับระบบนี้แสดงในสมการที่ 3.3 ให้คุณเมตริกซ์นี้ด้วยตัวมันเอง ซึ่งจะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 P^2 &= \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} P_{11}P_{11} + P_{12}P_{21} & P_{11}P_{12} + P_{12}P_{22} \\ P_{21}P_{11} + P_{22}P_{11} & P_{21}P_{12} + P_{22}P_{22} \end{bmatrix} \quad (3.3)
 \end{aligned}$$

ถ้าแทนค่า P_{11} , P_{12} , P_{21} และ P_{22} ลงในสมการที่ 3.4 จะได้ดังนี้

$$P^2 = \begin{bmatrix} \frac{3}{8} & \frac{5}{8} \\ \frac{5}{16} & \frac{11}{16} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

เมื่อลองพิจารณาแถวที่ 1 จากสมการที่ 3.4 กับผลที่ได้จากช่วงเวลาแรกจากตารางที่ 3.1 แล้วจะเห็นได้ว่ามีค่าเท่ากัน และเมื่อลองคูณด้วย P ต่อไปอีกก็จะได้ผลเช่นเดียวกัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ดังนี้

$$P(n) = P(0) P^n$$

โดยที่ $P(n) =$ ความน่าจะเป็นของสถานะต่าง ๆ ที่ช่วงเวลา n
 $P(0) =$ ความน่าจะเป็นของสถานะที่สถานะเริ่มต้น

เช่น เราสามารถหาค่าความน่าจะเป็นของสถานะต่าง ๆ ในช่วงเวลาที่ 2 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 P(2) &= P(0)P^2 \\
 &= [1 \quad 0] \begin{bmatrix} \frac{3}{8} & \frac{5}{8} \\ \frac{5}{16} & \frac{11}{16} \end{bmatrix} \\
 &= [3/8 \quad 5/8]
 \end{aligned}$$

3.1.4 การประเมินค่าความน่าจะเป็นของค่าขอบเขตของสถานะ

ค่าขอบเขต หรือค่าสภาวะคงตัวของสถานะต่าง ๆ สามารถหาได้จากวิธีการคูณเมตริกซ์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยที่เราสามารถศึกษาพฤติกรรมสภาวะชั่วคราวได้จากวิธีนี้ แต่ถ้าเราต้องการเพียงค่าขอบเขตวิธีการคูณเมตริกซ์จะใช้เวลาในการคำนวณมาก ดังนั้นในส่วนนี้จะอธิบายถึงวิธีในการแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพมากกว่าในการประเมินค่าความน่าจะเป็นของค่าขอบเขต

หลักการของวิธีนี้คือ เมื่อค่าที่คำนวณได้ถึงค่าขอบเขตแล้ว ไม่ว่าจะคูณเมตริกซ์เข้าไปอีกก็จะได้ค่าเท่าเดิม ดังนั้นสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.6 ดังนี้

$$\alpha \times P = \alpha \quad (3.6)$$

โดยที่ α แทน เมตริกซ์ค่าขอบเขต และ P แทนเมตริกซ์แสดงการเปลี่ยนสถานะแบบเป็นคู่

หลักการนี้สามารถนำไปประยุกต์กับระบบที่มี 2 สถานะ โดยกำหนดให้ P_1 และ P_2 เป็นความน่าจะเป็นของค่าขอบเขตของสถานะที่ 1 และ 2 ตามลำดับดังนี้

$$[P_1 \quad P_2]P = [P_1 \quad P_2]$$

หรือ

$$[P_1 \quad P_2] \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{4} & \frac{3}{4} \end{bmatrix} = [P_1 \quad P_2] \quad (3.7)$$

หรือสามารถจัดรูปใหม่ และเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2} P_1 + \frac{1}{4} P_2 = 0 \\ \text{และ} & \quad +\frac{1}{2} P_1 - \frac{1}{4} P_2 = 0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

ซึ่งเป็นสมการเดียวกัน หรือไม่เป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องมีสมการที่ 3 ดังนี้

$$P_1 + P_2 = 1 \quad (3.9)$$

และสามารถเขียนได้ดังนี้

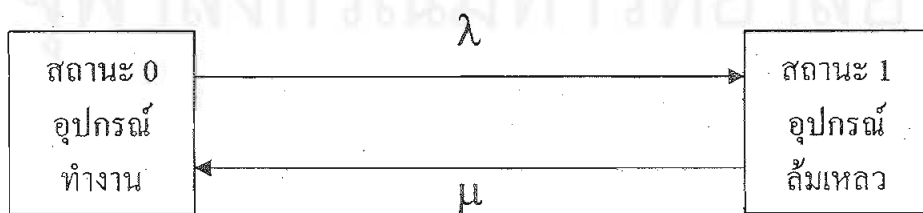
$$\begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{1}{4} \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

ซึ่งสมการที่ 3.10 นี้สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบของ $AX = b$ ซึ่งสามารถแก้สมการหาค่า X ได้โดย $X = A^{-1} b$ โดยที่ A^{-1} เป็นเมทริกซ์ส่วนกลับของ A หรือสามารถแก้สมการได้อีกวิธีหนึ่งคือ โดยใช้วิธีกฎของครเมอร์ซึ่งเหมาะกับการคำนวณด้วยมือ ถ้าเมทริกซ์มีขนาดเล็ก

3.2 กระบวนการมาคอฟแบบต่อเนื่อง (Continuous Markov processes)

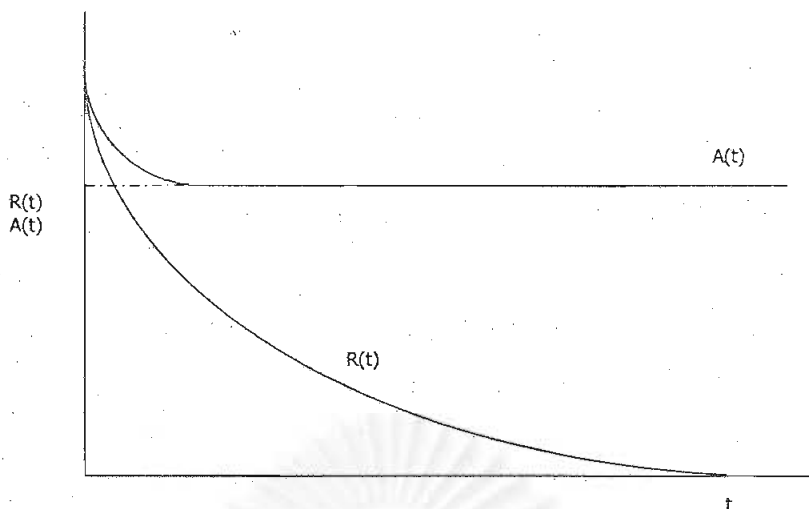
3.2.1 แนวคิดหลักทั่วไปของการสร้างแบบจำลอง

ลองพิจารณาอุปกรณ์ที่ซ่อมแซมได้ที่มีอัตราการล้มเหลว และอัตราการซ่อมแซมมีค่าคงที่ เช่นมีลักษณะการกระจายแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential distribution) รูปที่ 3.4 แสดงถึงแผนภาพของการเปลี่ยนสถานะ



(ก) สเตตสเปซไดอะแกรม (State space diagram)

รูปที่ 3.4 ระบบที่มีอุปกรณ์เดียวแบบซ่อมแซมได้



(ข) การเปลี่ยนแปลงของความเชื่อถือได้ และความคงอยู่ (Availability) ที่ขึ้นกับเวลา
รูปที่ 3.4 ระบบที่มีอุปกรณ์เดียวแบบซ่อมแซมได้ (ต่อ)

กำหนดให้

$P_0(t)$ = ความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์จะทำงานที่เวลา t

$P_1(t)$ = ความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์จะล้มเหลวที่เวลา t

λ = อัตราการล้มเหลว (Failure rate)

= อัตราส่วนระหว่างจำนวนครั้งในการล้มเหลวของอุปกรณ์ภายในช่วงเวลา
ที่กำหนดให้ ต่อช่วงเวลาทั้งหมดที่อุปกรณ์ทำงาน

μ = อัตราการซ่อมแซม (Repair rate)

= อัตราส่วนระหว่างจำนวนครั้งในการซ่อมแซมอุปกรณ์ภายในช่วงเวลา
ที่กำหนดให้ ต่อช่วงเวลาทั้งหมดที่อุปกรณ์ทำงาน

ฟังก์ชันความหนาแน่นของการล้มเหลว (Failure density function) และของการซ่อมแซม
(Repair density function) สำหรับอุปกรณ์ที่มีค่า λ และ μ ดังที่แสดงอยู่ในสมการที่ 3.11 ตาม
ลำดับ

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

และ

$$f(t) = \mu e^{-\mu t} \quad (3.11)$$

3.2.2 การประเมินค่าความน่าจะเป็นแบบขึ้นต่อเวลา

ในกรณีมาคอฟเชนมักจะนำเสนออยู่ในรูปแบบของความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะ แต่สำหรับกรณีกระบวนการมาคอฟแบบต่อเนื่องแล้วมักจะนำเสนออยู่ในรูปแบบของอัตราการเปลี่ยนแปลงสถานะมากกว่า ลองพิจารณาให้ช่วงเวลาที่แบ่งย่อย ๆ dt มีขนาดเล็กมากจนสามารถพิจารณาได้ว่าความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นภายในช่วงเวลาเล็ก ๆ นี้สามารถละเลยได้

จากรูปที่ 3.4 ก) ความน่าจะเป็นของการอยู่ในสถานะ 0 ที่อุปกรณ์ทำงานที่เวลา $t + dt$ จะเท่ากับ [ความน่าจะเป็นของการอยู่ในสถานะ 0 ที่เวลา t และไม่ล้มเหลวในช่วงเวลา dt] + [ความน่าจะเป็นของการอยู่ในสถานะ 1 ที่เวลา t และกำลังซ่อมแซมอยู่ในช่วงเวลา dt] ซึ่งสามารถเขียนได้อยู่ในสมการดังนี้

$$\begin{aligned} P_0(t + dt) &= P_0(t)(1 - \lambda dt) + P_1(t)(\mu dt) \\ \text{และ } P_1(t + dt) &= P_1(t)(1 - \mu dt) + P_0(t)(\lambda dt) \end{aligned} \quad (3.12)$$

ซึ่งสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{P_0(t + dt) - P_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) \quad (3.13)$$

และเมื่อให้ dt มีค่าเข้า 0 จะได้สมการดังนี้

$$\left. \frac{P_0(t + dt) - P_0(t)}{dt} \right|_{dt \rightarrow 0} = \frac{dP_0(t)}{dt} = P_0'(t) \quad (3.14)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 3.12 3.13 และ 3.14 จะได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} P_0'(t) &= -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) \\ \text{และ } P_1'(t) &= +\lambda P_0(t) - \mu P_1(t) \end{aligned} \quad (3.15)$$

ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$[P_0(t) \quad P_1(t)] = [P_0(t) \quad P_1(t)] \begin{bmatrix} -\lambda & \lambda \\ \mu & -\mu \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

เมตริกซ์ที่เห็นในสมการที่ 3.16 นี้ไม่ใช่เมตริกซ์แสดงการเปลี่ยนสถานะแบบเฟ้นสุ่มเพราะว่าในสมการที่ 3.16 ผลรวมของแต่ละแถวนั้นมีค่าเท่ากับ 0 ในขณะที่เมตริกซ์แสดงการเปลี่ยนสถานะแบบเฟ้นสุ่มจะต้องมีผลรวมของแต่ละแถวเท่ากับ 1

สมการทั้งสองสมการในสมการที่ 3.15 เป็นสมการผลต่างเชิงเส้นด้วยค่าสัมประสิทธิ์คงที่ โดยวิธีที่เลือกใช้ในการแก้ปัญหานี้คือวิธีการแปลงลาปลาซ (Laplace Transform) ซึ่งจะไม่กล่าวในวิทยานิพนธ์นี้ เมื่อแก้สมการแล้วจะได้สมการที่ 3.17 และ 3.18 ดังนี้

$$\text{จาก } P_0(0) + P_1(0) = 1$$

$$P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{e^{-(\lambda + \mu)t}}{\lambda + \mu} [\lambda P_0(0) - \mu P_1(0)] \quad (3.17)$$

$$P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} + \frac{e^{-(\lambda + \mu)t}}{\lambda + \mu} [\mu P_1(0) - \lambda P_0(0)] \quad (3.18)$$

และเมื่อเราแทนค่า $P_0(0)$ ด้วย 1 และ $P_1(0)$ เท่ากับ 0 จะได้สมการดังนี้

$$P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{e^{-(\lambda + \mu)t}}{\lambda + \mu} \quad (3.19)$$

$$P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} + \frac{e^{-(\lambda + \mu)t}}{\lambda + \mu} \quad (3.20)$$

3.2.3 การประเมินค่าความน่าจะเป็นของค่าขอบเขตของแต่ละสถานะ

จากสมการที่ 3.19 และ 3.20 เมื่อเราให้ค่า t มีค่าลู่เข้าสู่ค่าอนันต์ (∞) จะได้ค่า $P_0(\infty)$ และ $P_1(\infty)$ ดังนี้

$$P_0(\infty) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (3.21)$$

$$P_1(\infty) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (3.22)$$

หรือสามารถแก้สมการได้โดยตรงจากสมการที่ 3.19 และ 3.20 ก็จะได้ค่าเท่ากัน

3.3 สรุป

เมื่อเราได้พิจารณาถึงวิธีแบบจำลองมาคอฟทั้งสองแบบแล้วจะเห็นได้ว่า เราสามารถสร้างแบบจำลองของระบบต่าง ๆ ที่มีค่าพารามิเตอร์มากมายได้ค่อนข้างละเอียด ซึ่งนับเป็นข้อดีของวิธีแบบจำลองมาคอฟนี้ แต่ข้อดีที่ทำให้สามารถวิเคราะห์ระบบได้อย่างละเอียดก็ทำให้เกิดข้อเสียในการคำนวณค่าเช่นกัน ยิ่งระบบมีสถานะมากขึ้นเท่าไร ก็ต้องการวิธีการแก้ปัญหาที่ยากขึ้นไปด้วยเช่นกัน สำหรับการแก้ปัญหาของมาคอฟเซานั้นจะสามารถทำได้ด้วยวิธีเมตริกซ์ ซึ่งสามารถหาได้ทั้งค่าที่ช่วงเวลาต่าง ๆ และค่าขอบเขต แต่สำหรับแบบจำลองมาคอฟแบบต่อเนื่องนั้น การแก้ปัญหาที่ช่วงเวลาต่าง ๆ จะทำได้โดยวิธีการแปลงลาปลาซซึ่งยิ่งระบบมีความละเอียด หรือสถานะมากเท่าไร ก็ยิ่งแก้ปัญหาได้ยาก แต่ก็สามารถที่จะแก้สมการหาค่าขอบเขตได้ด้วยวิธีเมตริกซ์เช่นเดียวกับวิธีการแก้ปัญหามาคอฟเซน

ในวิทยานิพนธ์นี้ เนื่องจากข้อมูลที่ใช้ในการพิจารณาจะอยู่ในรูปของอัตราการเปลี่ยนแปลงสถานะ ดังนั้นจึงใช้แบบจำลองมาคอฟแบบต่อเนื่องในการพิจารณา แต่จะสนใจเฉพาะค่าขอบเขตของสถานะต่าง ๆ เท่านั้น ซึ่งจะทำให้ได้ด้วยการใช้วิธีเมตริกซ์ และคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์นั่นเอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การสร้างแบบจำลองของระบบป้องกัน

หลังจากที่เราได้ทำการศึกษาถึงทฤษฎีเบื้องต้นของการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ และแบบจำลองมาคอฟรูปแบบต่าง ๆ แล้ว ในบทนี้เราจะกล่าวถึงการนำทฤษฎีต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองสำหรับระบบป้องกันรูปแบบต่าง ๆ ที่เหมาะสมต่อการป้องกันอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งเป็นการนำเสนอรูปแบบที่มีความเหมาะสมหลายด้าน เช่น สามารถพิจารณาถึงฟังก์ชันการตรวจสอบตัวเองได้ สามารถพิจารณาถึงความผิดพลาดที่ซ่อนเร้นอยู่ ฯลฯ นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์เข้ากับระบบ หรืออุปกรณ์อื่น ๆ ที่มีรูปแบบใกล้เคียงกันด้วย

ในบทนี้เราจะเริ่มด้วยการให้คำนิยามสถานะต่าง ๆ และข้อสันนิษฐานที่มีผลต่อการสร้างแบบจำลอง หลังจากนั้นจะเป็นการนำเสนอการสร้างแบบจำลองสำหรับอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกันเช่น หม้อแปลงกระแส ขดลวดตัด รีเลย์ ฯลฯ เมื่อเราได้แบบจำลองของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เป็นพื้นฐานสำคัญในระบบป้องกันแล้วก็จะนำแบบจำลองเหล่านี้มารวมกันในรูปแบบพื้นฐานที่สำคัญได้แก่ การรวมกันแบบอนุกรม และการรวมกันแบบขนาน ซึ่งการรวมกันเหล่านี้จะนำไปสู่การสร้างแบบจำลองของระบบป้องกันรูปแบบต่าง ๆ เช่น การป้องกันแบบใช้รีเลย์กระแสเกิน ฯลฯ

4.1 สันนิษฐาน และคำนิยามต่าง ๆ

4.1.1 สันนิษฐานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

ก่อนที่จะทำการพัฒนาแบบจำลองมาคอฟให้เป็นไปตามความต้องการ เราจำเป็นต้องกำหนดข้อสันนิษฐานที่จำเป็นต่อระบบก่อน ซึ่งข้อสันนิษฐานต่าง ๆ มีดังนี้

1. อุปกรณ์ในระบบป้องกันจะทำการตรวจสอบแยกจากกันเป็นอิสระ
2. ในการตรวจสอบของอุปกรณ์ในระบบป้องกันใด ๆ ถ้ามีข้อบกพร่องในอุปกรณ์นั้น ๆ การตรวจสอบจะพบข้อบกพร่องนั้น ๆ เสมอ
3. อุปกรณ์ในระบบป้องกันจะถูกนำออกจากการบริการเมื่อมีการตรวจสอบอุปกรณ์นั้น ๆ เสมอ
4. สำหรับอุปกรณ์ที่มีระบบตรวจสอบตัวเอง ถ้ามีการตรวจพบความบกพร่อง อุปกรณ์นั้น ๆ จะถูกนำออกจากการบริการเพื่อทำการซ่อมแซม
5. การตรวจสอบจะไม่เป็นการสร้างความบกพร่อง
6. การซ่อมแซมจะทำให้อุปกรณ์นั้น ๆ กลับไปอยู่ในสภาพเหมือนใหม่ (As good as new)

7. อัตราการเปลี่ยนสถานะของทุกอุปกรณ์มีค่าคงที่
8. เมื่ออุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันเกิดความผิดปกติ ระบบป้องกันหลัก หรือระบบป้องกันสำรองจะทำการแยกเอาอุปกรณ์นั้น ๆ ออกจากการบริการก่อนที่จะเกิดความผิดปกติครั้งต่อไป ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสมมติให้ระบบป้องกันสำรองมีความเชื่อถือได้ 100%
9. อุปกรณ์ในระบบป้องกันจะไม่เกิดความเสียหายขึ้น ในขณะที่อุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันอยู่ในช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติ
10. อุปกรณ์ในระบบป้องกันสามารถที่จะเกิดข้อบกพร่องขึ้นในขณะที่ทำการซ่อมแซมอุปกรณ์ที่ทำการป้องกันอยู่
11. จะไม่มีการสับสวิทช์อุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันให้กลับไปให้บริการ ถ้าระบบป้องกันยังไม่พร้อมที่จะให้บริการ

4.1.2 คำนิยามต่าง ๆ

ก. นิยามสำหรับสถานะต่าง ๆ ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน

นอกจากสัณนิษฐานต่าง ๆ แล้วยังมีคำนิยามสำหรับอุปกรณ์ในระบบป้องกันดังต่อไปนี้

UP: หมายถึง อุปกรณ์นั้น ๆ อยู่ในบริการ และมีสภาพดี

DU: หมายถึง อุปกรณ์นั้น ๆ อยู่ในบริการ แต่อยู่ในสภาพที่มีข้อบกพร่อง และยังไม่มีการตรวจพบ ซึ่งจะพบความบกพร่องนี้ได้ก็ต่อเมื่อมีการตรวจสอบ หรือเกิดความผิดปกติแล้วระบบป้องกันไม่ทำงาน

DN: หมายถึง อุปกรณ์นั้น ๆ ไม่อยู่ในบริการ และอยู่ในสภาพที่มีข้อบกพร่อง แต่ตรวจพบแล้ว

ISO: หมายถึง อุปกรณ์นั้น ๆ กำลังอยู่ในการตรวจสอบ แต่ไม่พบข้อบกพร่องใด ๆ

ข. นิยามสำหรับสถานะต่าง ๆ ของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน

นอกจากคำนิยามสำหรับระบบป้องกันแล้ว ยังมีคำนิยามที่สำคัญสำหรับอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันดังต่อไปนี้

C UP: หมายถึง อุปกรณ์นั้น ๆ อยู่ในบริการ

C DN: หมายถึง สถานะที่อุปกรณ์นั้นเกิดสภาพผิดปกติ

C ISO: หมายถึง สถานะที่อุปกรณ์ถูกนำออกจากบริการ โดยระบบป้องกันปฐมภูมิ

C+X ISO: หมายถึง สถานะที่อุปกรณ์ที่สนใจ และอุปกรณ์ข้างเคียงถูกนำออกจากบริการ ด้วยระบบป้องกันสำรอง

ค. อัตราการล้มเหลว

- F_R = อัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ป้องกัน (ครั้งต่อปี)
(Protective device failures rate) (1/MTBF)
- ST = ดรรชนีประสิทธิผลของฟังก์ชันตรวจสอบตัวเอง (ต่อหน่วย)
(Self-test effectiveness index)
- F_{PP} = อัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ป้องกันที่ไม่ถูกตรวจพบโดยฟังก์ชัน
ตรวจสอบตัวเอง (ครั้งต่อปี) ($F_{PP} = Fr*(1-ST)$)
(Protective device failures not detected by self-test function)
- F_{ST} = อัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ป้องกันที่ถูกตรวจพบโดยฟังก์ชัน
ตรวจสอบตัวเอง (ครั้งต่อปี) ($F_{ST} = Fr* ST$)
(Protective device failures detected by self-test function)
- λ_p = อัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ป้องกันสำหรับแบบจำลอง 3 สถานะ
(Protective device failures, for a 3-state model)
- λ_C = อัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน (ครั้งต่อปี)
(Protected component failures)

ง. อัตราการซ่อมแซม

- R_T = เวลาที่ใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ในระบบป้องกัน
สำหรับแบบจำลอง 4 สถานะ
(Protective device inspection per hour for 4-state model)
- R_R = เวลาในการซ่อมแซมอุปกรณ์ป้องกันสำหรับแบบจำลอง 4 สถานะ
(Protective device repairs per hour for 4-state model)
- μ_p = อัตราการซ่อมแซมอุปกรณ์ในระบบป้องกันสำหรับแบบจำลอง 3 สถานะ
จากสถานะ DN ไปยังสถานะ UP
(Protective device repairs per hour for a 3-state model)
- $\mu\mu_p$ = อัตราการซ่อมแซมอุปกรณ์ในระบบป้องกันสำหรับแบบจำลอง 3 สถานะ
จากสถานะ DN ไปยังสถานะ DU
(Protective device repairs per hour for a 3-state model)
- μ_C = อัตราการซ่อมแซมอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน
(Protected component repairs per hour)

จ. อัตราการทดสอบ

- θ_{PM} = อัตราการทดสอบอุปกรณ์ป้องกัน
(Protection inspection rates)
- θ_p = อัตราการทดสอบอุปกรณ์ป้องกัน
จากสถานะ UP ไปยังสถานะ DN สำหรับแบบจำลอง 3 สถานะ
(Protection inspection rates from UP to DN state in 3-state model)
- $\theta\theta_p$ = อัตราการทดสอบอุปกรณ์ป้องกัน
จากสถานะ DU ไปยังสถานะ DN สำหรับแบบจำลอง 3 สถานะ
(Protection inspection rates from DU to DN state in 3-state model)

ฉ. อัตราการสับสวิตช์

- ψ_N, ψ_B = อัตราการสับสวิตช์สำหรับการแยกอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันออกจาก
ระบบแบบปรกติ และแบบสำรองตามลำดับ
(Normal, backup switching rates to isolate C)
- ψ_M = อัตราการสับสวิตช์สำหรับการสับอุปกรณ์ที่อยู่ข้างเคียงเข้าสู่บริการ
(Manual switching rates to isolate C and restore X)

ทั้งนี้สันนิษฐานต่าง และนิยามสถานะต่าง ๆ อยู่บนพื้นฐานของบทความ [1, 2, 3]

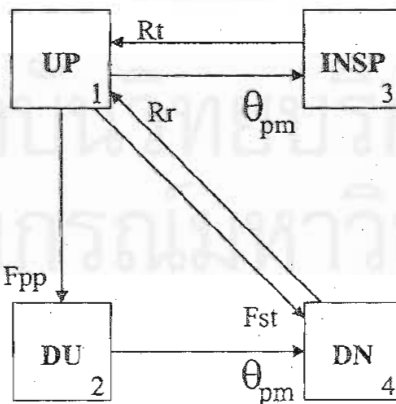
4.2 แบบจำลองของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน

เนื่องจากระบบป้องกันหนึ่ง ๆ จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ มากมาย เช่น หม้อแปลงกระแส หม้อแปลงแรงดัน รีเลย์ ฯลฯ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะแบ่งการพิจารณาอุปกรณ์ต่าง ๆ ออกเป็นหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้ [5, 6]

1. PSU ได้แก่ หน่วยจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Supply Unit) คือ ส่วนของเบตเตอร์รี่ หรือ ส่วนใด ๆ ที่ทำการจ่ายกระแสให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบป้องกันเช่น ดิจิตอลรีเลย์ เครื่องส่งสัญญาณ ฯลฯ
2. CT ได้แก่ หม้อแปลงกระแส (Current Transformer) เป็นอุปกรณ์ที่ทำการแปลงขนาดกระแสที่ตรวจวัดได้ให้เป็นขนาดกระแสตามที่ต้องการ
3. VT ได้แก่ หม้อแปลงแรงดัน (Voltage Transformer) เป็นอุปกรณ์ที่ทำการแปลงขนาดแรงดันที่ตรวจวัดได้ให้เป็นขนาดแรงดันตามที่ต้องการ

4. R ได้แก่ รีเลย์ (Relay) ในที่นี้กำหนดให้เป็นส่วนที่เรียกว่ารีเลย์ลอจิก (Relay Logic) ที่ทำการวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ที่ได้รับเข้ามา แล้วทำการตัดสินใจว่าเป็นเหตุการณ์ที่ต้องทำงานหรือไม่ มักประกอบไปด้วยตรรกะแบบต่าง ๆ เช่น AND OR ฯลฯ
5. DO ได้แก่ และตัวแปลงผันแอนะล็อกเป็นดิจิทัลในรีเลย์ (Digital Output) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในดิจิทัลรีเลย์เพราะว่า เป็นอุปกรณ์ที่ทำการแปลงสัญญาณที่ได้รับมาให้เป็นสัญญาณดิจิทัล แล้วทำการส่งสัญญาณนั้น ๆ ให้กับส่วนของรีเลย์ลอจิก หลังจากนั้นก็ทำการส่งสัญญาณที่ได้รับนั้น ไปให้กับขดลวดตัดต่อไป
6. TC ได้แก่ ขดลวดตัด (Trip Coil) เป็นส่วนของวงจรที่จะควบคุมให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงาน
7. BM ได้แก่ กลไกเบรกเกอร์ (Breaker Mechanism) เป็นส่วนหนึ่งของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ทำหน้าที่ "เปิด" หรือ "ปิด" วงจรให้เป็นไปตามที่ต้องการ
8. TR ได้แก่ เครื่องส่งสัญญาณ (Transmitter) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบป้องกันที่มีการใช้สัญญาณไหลตอ เพราะทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณตัดวงจรไปยังอีกฝั่งของการป้องกัน
9. REC ได้แก่ เครื่องรับสัญญาณ (Receiver) เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานร่วมกันกับเครื่องส่งสัญญาณ โดยทำหน้าที่รับสัญญาณที่ส่งมาจากเครื่องส่งสัญญาณ และทำการส่งสัญญาณนี้ไปยังลอจิกที่ได้รับการออกแบบไว้สำหรับระบบป้องกันรูปแบบต่าง ๆ ต่อไป

จากสันนิษฐานต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น และจากการศึกษาบทความต่าง ๆ สามารถนำเสนอแบบจำลองให้ออกมาอยู่ในรูปของแบบจำลองมาคอฟแบบ 4 สถานะได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แบบจำลองมาคอฟแบบ 4 สถานะของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงสถานะต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นสำหรับอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้ เริ่มต้นที่สถานะที่ 1 หรือสถานะ UP เมื่ออุปกรณ์ได้รับการทดสอบประจำก็จะเปลี่ยนสถานะเป็นสถานะที่ 3 หรือสถานะ INSP และจะกลับเข้าสู่สถานะ UP อีกครั้งเมื่อทำการตรวจสอบเสร็จสิ้นแล้ว จากสถานะ UP จะสามารถเปลี่ยนสถานะเข้าสู่สถานะที่ 4 ได้ 2 วิธีคือ วิธีที่ 1 คือผ่านสถานะที่ 2 หรือสถานะ DU โดยที่เมื่ออุปกรณ์เกิดข้อบกพร่องขึ้นก็จะเปลี่ยนสถานะเป็นสถานะ DU และเมื่อทำการทดสอบประจำก็จะพบความบกพร่องนี้ และทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะจากสถานะ DU เป็นสถานะที่ 4 หรือสถานะ DN และวิธีที่ 2 คือเปลี่ยนเข้าสู่สถานะ DN ได้โดยอาศัยฟังก์ชันตรวจสอบตัวเอง เมื่อฟังก์ชันนี้ตรวจพบความบกพร่องก็จะเปลี่ยนสถานะเป็นสถานะ DN ทันที และจากสถานะนี้เองเมื่อทำการซ่อมแซมเสร็จสิ้นแล้วก็จะเปลี่ยนกลับเข้าสู่สถานะ UP ดังเดิม

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองทั่วไปที่สามารถประยุกต์ไปใช้ได้ทั้งกับอุปกรณ์ที่ไม่มีฟังก์ชันตรวจสอบตัวเอง และอุปกรณ์ที่มีฟังก์ชันตรวจสอบตัวเองด้วยการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ ST เพียงตัวเดียวเท่านั้นดังนี้

“ดรรรชนีแสดงประสิทธิภาพของฟังก์ชันตรวจสอบตัวเอง” (Self-test effectiveness index หรือ ST) [3] คือ ดรรรชนีที่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำงานของฟังก์ชันตรวจสอบตัวเอง โดยแสดงเป็นตัวเลขตั้งแต่ 0 ถึง 1 ซึ่งมีผลต่ออัตราการเปลี่ยนสถานะดังนี้

$$F_{ST} = Fr * ST \quad (4.1)$$

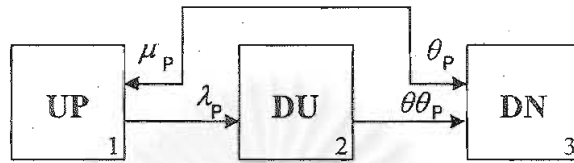
$$F_{PP} = Fr * (1 - ST) \quad (4.2)$$

โดยที่ถ้าค่า ST มีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าอุปกรณ์นี้ไม่มีระบบตรวจสอบตัวเอง และจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากสถานะ UP ไปสถานะ DN โดยทันที และถ้าค่า ST มีค่ามากกว่า 0 ไปจนถึงเท่ากับ 1 หมายความว่าอุปกรณ์นี้มีฟังก์ชันตรวจสอบตัวเอง โดยที่ยังมีค่าใกล้ 1 มากเท่าใดก็ยิ่งแสดงว่าฟังก์ชันทำงานมีประสิทธิภาพมากขึ้นเท่านั้น

จากแบบจำลองมาคอฟแบบ 4 สถานะซึ่งมีข้อดีก็คือ สามารถที่จะบอกรายละเอียดของอัตราการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ได้อย่างละเอียด สามารถแสดงผลของฟังก์ชันตรวจสอบตัวเองได้ และสามารถพิจารณาลักษณะต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจน

สมมติว่ามีอุปกรณ์ 4 อุปกรณ์ต่อกันอยู่ จะเกิดสถานะที่เป็นไปได้ทั้งหมด 4^4 หรือ 256 สถานะ ดังนั้นเป็นการลำบากที่จะแสดงสถานะทั้งหมดในวิธีต้นไม้เหตุการณ์ ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการพิจารณา เราจึงจำเป็นที่จะต้องลดรูปแบบจำลองนี้ลงเหลือ 3 สถานะ [2] เพราะว่าเป็นความจริงสถานะ INSP และสถานะ DN เป็นสถานะที่อุปกรณ์นั้น ๆ ไม่ได้อยู่ในการให้บริการเหมือนกัน ดังนั้นเราจึงรวมสถานะทั้งสองสถานะนี้เข้าด้วยกันด้วยเทคนิคของความถี่ และช่วงเวลา

[8] ดังรูปที่ 4.2 นอกจากนี้ที่โนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังคงสถานะทั้งหมดไว้ที่ 3 สถานะเป็นเพราะว่า ถ้าเราดูสถานะทั้งหมดเหลือ 2 สถานะคือ UP และ DN จะไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงความน่าจะเป็นของความคิดปรกติที่ซ่อนเร้นอยู่ได้ ดังนั้นจึงลดจำนวนสถานะจาก 4 สถานะเหลือจำนวนสถานะเพียงแค่ 3 สถานะเท่านั้นเอง



รูปที่ 4.2 แบบจำลองมาคอฟแบบ 3 สถานะของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน

ซึ่งสามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้

ให้ $P_4(i)$ เป็นค่าความน่าจะเป็นขอบเขตของสถานะที่ i ในแบบจำลองแบบ 4 สถานะ

$P_3(i)$ เป็นค่าความน่าจะเป็นขอบเขตของสถานะที่ i ในแบบจำลองแบบ 3 สถานะ

เมื่อทำการหาค่าความน่าจะเป็นขอบเขตของแบบจำลองแบบ 4 สถานะเรียบร้อยแล้ว เราสามารถแสดงค่าอัตราการเปลี่ยนสถานะต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$P_3(3) = P_4(3) + P_4(4)$$

$$\lambda_p = F_{pp}$$

$$\theta_p = F_{st} + \theta_{PM}$$

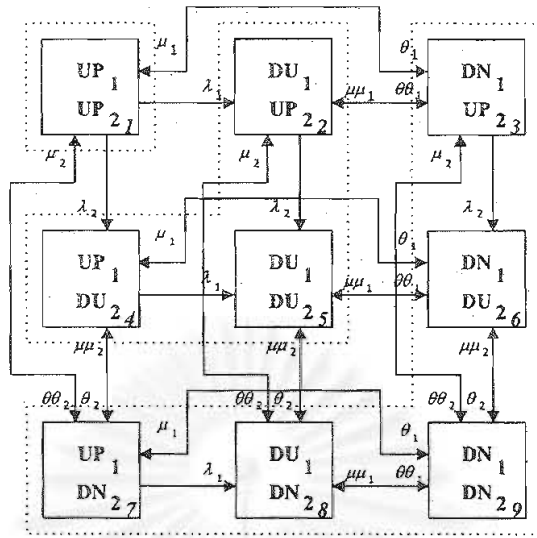
$$\theta\theta_p = \theta_{PM}$$

$$\mu_p = \frac{[P_4(4) \times R_t] + [P_4(3) \times R_r]}{P_3(3)}$$

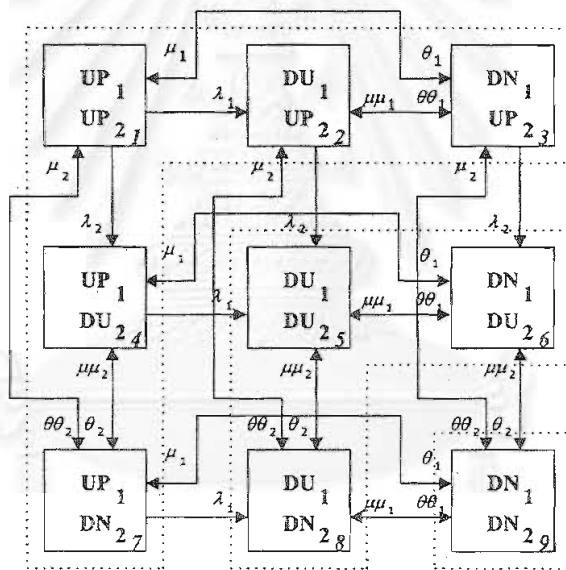
จากรูปที่ 4.2 นี้เป็นแบบจำลองที่จะนำไปใช้ในการพิจารณาต่อไปในการรวมอุปกรณ์ต่าง ๆ เข้าด้วยกันเป็นรูปแบบของการป้องกันแบบต่าง ๆ

4.3 การรวมกันของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการรวมกันของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกันซึ่งได้แก่ การรวมกันแบบอนุกรม และการรวมกันแบบขนาน ซึ่งการรวมกันนี้อยู่บนพื้นฐานของแบบจำลองมาคอฟแบบ 3 สถานะ โดยแสดงอยู่ในรูปที่ 4.3 ดังนี้



ก) การรวมกันแบบอนุกรม

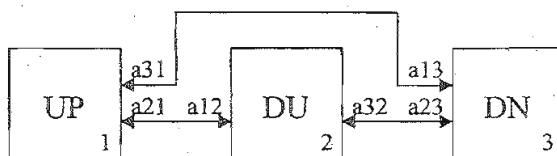


ข) การรวมกันแบบขนาน

รูปที่ 4.3 แบบจำลองมาคอพของการรวมกันของอุปกรณ์ 2 อุปกรณ์

รูปแบบที่ง่ายที่สุดในการรวมกันได้แก่ การรวมกันแบบอนุกรม และการรวมกันแบบขนาน ซึ่งเมื่ออุปกรณ์ 2 อุปกรณ์ที่แต่ละอุปกรณ์มี 3 สถานะจะได้สถานะที่เป็นไปได้ทั้งหมด 3^2 หรือ 9 สถานะนั้นเอง ซึ่งแบบจำลองแบบ 9 สถานะนั้นสามารถลดรูปได้เป็นแบบจำลอง 3 สถานะดังรูปที่

4.4



รูปที่ 4.4 แบบจำลองมาคอฟของ 2 อุปกรณ์แบบ 3 สถานะ

โดยอาศัยการพิจารณาถึงสถานะในการทำงานโดยรวม และเทคนิคทางความถี่ และช่วงเวลา [8] ดังนี้

กำหนดให้

$(STATE_{NEW}) =$ สถานะใหม่ที่จะเกิดขึ้นจากการรวมตัวกันของสถานะเก่าใน {...}

4.3.1 การรวมกันแบบอนุกรม

$(UP_{NEW}) = \{1\}, (DU_{NEW}) = \{2, 4, 5\}, (DN_{NEW}) = \{3, 6, 7, 8, 9\}$

4.3.2 การรวมกันแบบขนาน

$(UP_{NEW}) = \{1, 2, 3, 4, 7\}, (DU_{NEW}) = \{5, 6, 8\}, (DN_{NEW}) = \{9\}$

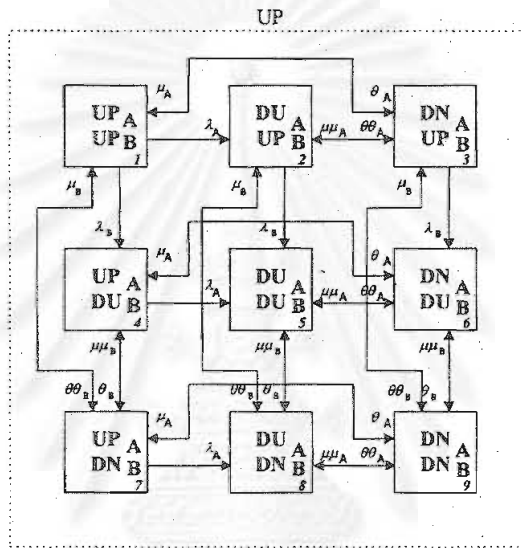
นอกจากการรวมตัวกันแบบอนุกรม และแบบขนานแล้วในการศึกษาวิจัยพบว่ายังมีรูปแบบที่จำเป็นในการศึกษาอีกได้แก่

4.3.3 การรวมกันของส่วนที่ป้องกันด้าน A กับส่วนที่ป้องกันด้าน B หรือการรวมกันแบบ A-B

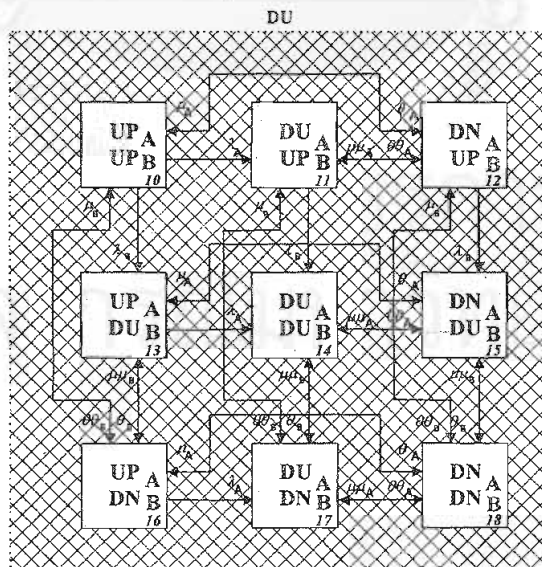
เป็นการรวมกันของอุปกรณ์ที่ทำการป้องกันด้าน A เข้ากับอุปกรณ์ที่ป้องกันด้าน B ซึ่งรูปแบบนี้จะเห็นได้ชัดเจนในระบบป้องกันที่ใช้รีเลย์ผลต่าง หรือรีเลย์ระยะทาง ในการรวมกันรูปแบบนี้จะรักษาสถานะไว้ที่ 9 สถานะ ดังรูป 4.3 เพื่อสะดวกต่อการพิจารณาต่อไป และจะเรียกว่า “การรวมกันแบบ A-B”

4.3.4 การรวมกันของส่วนที่ป้องกัน 2 ด้าน กับส่วนที่มีสถานะ 3 สถานะ
หรือการรวมกันแบบ 3-AB

เป็นการรวมกันที่จะเกิดขึ้นกับระบบป้องกันที่ใช้รีเลย์ผลต่างเท่านั้น ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนในแผนภาพกรอบของการป้องกันที่ใช้รีเลย์ผลต่าง เมื่อแบบจำลอง 9 สถานะของส่วนที่ป้องกัน 2 ด้านรวมกับส่วนที่มี 3 สถานะจะได้ทั้งหมด 27 สถานะดังรูปที่ 4.5 และสามารถลดรูปได้เป็นแบบจำลอง 9 สถานะดังรูปที่ 4.6 ดังเดิม หลังจากนั้นจะเรียกว่า “การรวมกันแบบ 3-AB”

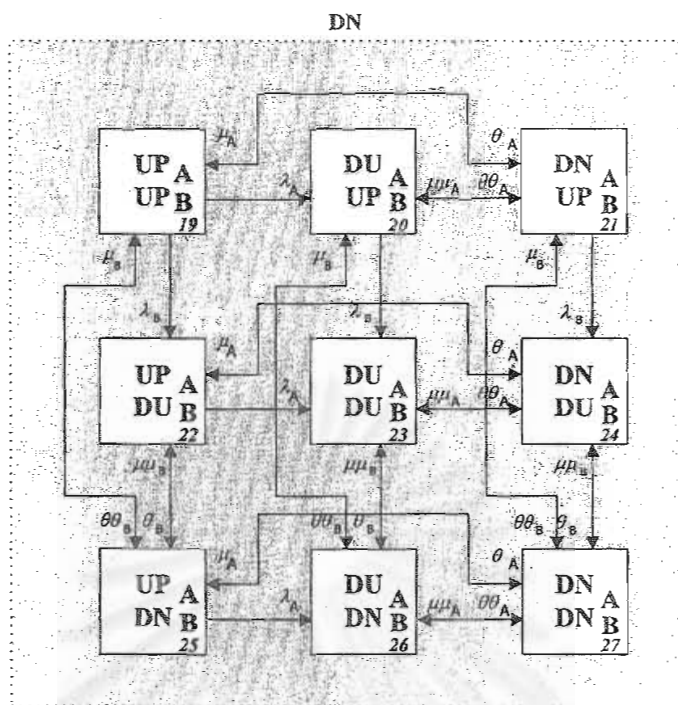


ก) สำหรับแบบจำลองที่อุปกรณ์ที่มี 3 สถานะมีมีสถานะ UP

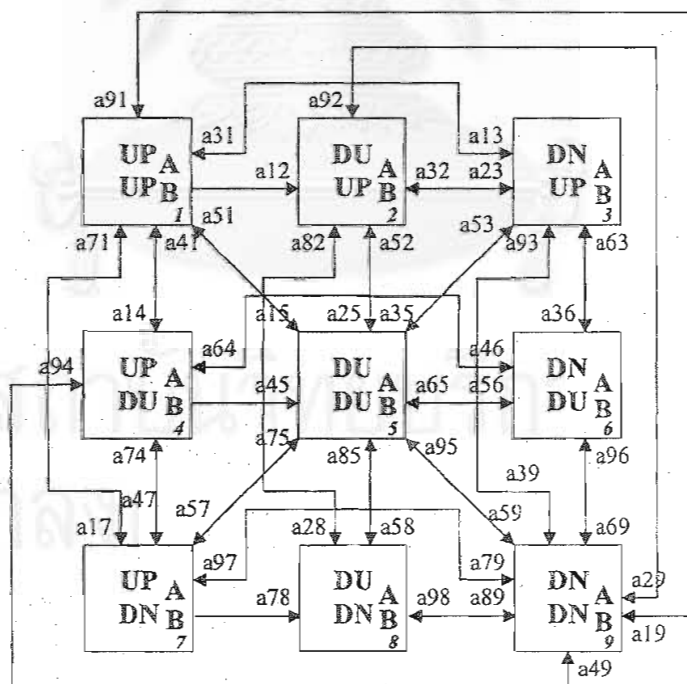


ข) สำหรับแบบจำลองที่อุปกรณ์ที่มี 3 สถานะมีมีสถานะ DU

รูปที่ 4.5 การรวมกันแบบ 3-AB



ค) สำหรับแบบจำลองที่อุปกรณ์ที่มี 3 สถานะมีมีสถานะ DN
รูปที่ 4.5 การรวมกันแบบ 3-AB (ต่อ)



รูปที่ 4.6 แบบจำลอง 9 สถานะของการรวมกันแบบ 3-AB

4.3.5 การรวมกันของส่วนที่ป้องกัน 2 ด้าน กับส่วนที่ป้องกัน 2 ด้าน หรือการรวมกันแบบ AB-AB

จะเกิดขึ้นในบางกรณีเท่านั้น ส่วนมากเกิดกับระบบป้องกันแบบไหลทที่มีรูปแบบการทำงานที่ซับซ้อน ซึ่งเมื่อรวมสถานะทั้งหมดแล้วจะได้ทั้งหมด 9^2 หรือ 81 สถานะนั้นเอง และเมื่อลดรูปแล้วจะได้ 9 สถานะดังรูปที่ 4.6 หลังจากนั้นจะเรียกว่า “การรวมกันแบบ AB-AB”

4.3.6 การรวมกันในรูปแบบที่ซับซ้อน

การรวมกันที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยรูปแบบพื้นฐานเช่น การรวมกันในระบบป้องกันที่อาศัยระบบไหลทส่งสัญญาณข้ามไปมาระหว่าง 2 ด้านของอุปกรณ์ป้องกันจะทำการรวมอุปกรณ์ต่าง ๆ เข้าด้วยกันโดยการนำวิธีต้นไม้เหตุการณ์มาประยุกต์เข้ากับวิธีทางความถี่ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

สำหรับการรวมกันในรูปแบบที่ซับซ้อนนี้สามารถรวมกันได้โดยอาศัยวิธีต้นไม้เหตุการณ์ซึ่งสามารถทำให้เราเห็นเหตุการณ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับทุก ๆ อุปกรณ์ในระบบ ซึ่งถ้าเราต้องการเพียงแค่ผลลัพธ์ว่าสุดท้ายแล้วจะเกิดเหตุการณ์ต่าง ๆ มีค่าความน่าจะเป็นเท่าไร แต่ในกรณีนี้เราต้องการมากกว่านั้น เพราะในแบบจำลองเรายังต้องการอัตราการเปลี่ยนสถานะที่เกิดขึ้นทั้งหมดเพื่อให้ได้การพิจารณาที่ละเอียด ดังนั้นนอกจากวิธีต้นไม้เหตุการณ์แล้ว ยังต้องอาศัยวิธีทางความถี่ และช่วงเวลาตามเอกสารอ้างอิง [7] ซึ่งสามารถหาค่าสถานะต่าง ๆ ที่รวมกันเป็นสถานะเดียวกันได้ และยังสามารถคำนวณค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงในสถานะที่เกิดใหม่ได้ โดยอาศัยอัลกอริทึมง่าย ๆ ดังนี้

$$P_{k_{\text{new}}}(\text{NEW}) \times \lambda_{k_{\text{newnew}}}(\text{NEW}) = \sum_{i=1}^n P_i(\text{OLD}) \times \lambda_{ij}(\text{OLD}) \quad (4.1)$$

กำหนดให้

$P_{k_{\text{new}}}(\text{NEW})$ = ความน่าจะเป็นของสถานะใหม่ที่ k ซึ่งเท่ากับ $\sum_{i=1}^n P_i(\text{OLD})$

$P_{i_{\text{old}}}(\text{OLD})$ = ความน่าจะเป็นของสถานะเก่าที่ i แต่ละสถานะ

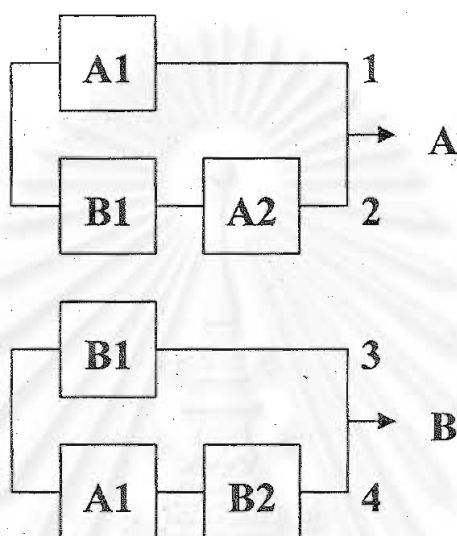
$\lambda_{k_{\text{newnew}}}(\text{NEW})$ = อัตราการเปลี่ยนสถานะระหว่างสถานะใหม่ k กับสถานะใหม่ l

$\lambda_{ij}(\text{OLD})$ = อัตราการเปลี่ยนสถานะระหว่างสถานะเก่า i กับสถานะเก่า j

ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ ผลคูณของความน่าจะเป็นของสถานะใหม่กับค่าอัตราการออกจากสถานะใหม่นั้นไปสู่สถานะข้างเคียง จะต้องมีค่าเท่ากับผลรวมของผลคูณของสถานะเก่าที่รวมกันเป็นสถานะใหม่นั้นคูณกับค่าอัตราการออกจากสถานะนั้น ๆ ไปยังสถานะข้างเคียงเดียวกันกับที่เกิดขึ้นกับสถานะใหม่นั้น ๆ

สำหรับการนำวิธีทั้งสองมาประยุกต์เข้าด้วยกันนั้นมีประโยชน์สำหรับการรวมกันที่ซับซ้อนที่ไม่สามารถทำการรวมกันได้ด้วยวิธีการรวมกันแบบต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นด้วยตัวอย่างที่ 4.1 ดังนี้

ตัวอย่างที่ 4.1 ระบบที่มีขั้นตอนการทำงานสามารถแสดงอยู่ในรูปของแผนภาพกรอบได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แผนภาพกรอบของตัวอย่างที่ 4.1

จากรูปที่ 4.7 A1 และ A2 เป็นอุปกรณ์ที่โดยทางกายภาพแล้วอยู่ด้าน A โดยที่ B1 และ B2 ก็เช่นเดียวกันคือมีพื้นฐานทางกายภาพอยู่ด้าน B แต่จากรูปจะเห็นได้ว่า B1 มีผลกระทบต่อการทำงานในด้าน A ในขณะที่ A1 ก็มีผลกระทบต่อด้าน B ด้วยเช่นกันซึ่งถ้าแบบจำลองมีเพียง 2 สถานะคือ UP และ DOWN สามารถที่จะแก้ปัญหานี้ได้ด้วยวิธีความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข (Conventional Probability) แต่จากการสร้างแบบจำลองโดยละเอียดซึ่งประกอบไปด้วยแบบจำลองที่มี 3 สถานะทำให้การใช้วิธีดังกล่าวเป็นไปได้อย่างยากลำบาก ดังนั้นจึงนำวิธีต้นไม้เหตุการณ์และวิธีทางความถี่มาประยุกต์เข้าด้วยกันดังนี้

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า A1 มีผลกระทบต่อเส้นทางที่ 1 และ 4 และ B1 มีผลกระทบต่อเส้นทางที่ 2 และ 3 ส่วน A2 และ B2 จะมีผลกระทบต่อเส้นทาง 2 และ 4 ตามลำดับเพียงเส้นทางเดียวดังนั้น จากการที่วิธีต้นไม้เหตุการณ์สามารถเขียนให้อยู่ในรูปตารางซึ่งคล้ายกับตารางค่าความจริง (Truth Table) ของวิชาตรรกศาสตร์ ซึ่งทำให้เราสามารถสร้างตารางที่แสดงผลของต้นไม้เหตุการณ์ได้ดังตารางที่ 4.1

เมื่อรวมสถานะต่าง ๆ เข้าด้วยกันโดยที่เส้นทางที่ 1 และ 2 รวมกันแบบขนานได้ผลลัพธ์เป็น AA และเส้นทางที่ 3 และ 4 รวมกันแบบขนานเช่นเดียวกันได้ผลลัพธ์เป็น BB หลังจากนั้นเมื่อรวม AA และ BB เข้าด้วยกันด้วยการรวมกันแบบ A-B ก็จะได้สถานะทั้งหมด 81 ซึ่งสามารถลดรูปโดยอาศัยสถานะใหม่ที่เกิดขึ้นเป็นตัวกำหนดสถานะในแบบจำลอง 9 สถานะ ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 4.1 นั้นเอง

ตารางที่ 4.1 ผลการรวมกันของตัวอย่างที่ 4.1

A1	B1	A2	B2	1	2	3	4	AA	BB	OLD STATE	NEW STATE
UP	UP	UP	UP	UP	UP	UP	UP	UP	UP	1	1
UP	UP	UP	DU	UP	UP	UP	DU	UP	UP	2	1
UP	UP	UP	DN	UP	UP	UP	DN	UP	UP	3	1
UP	UP	DU	UP	UP	DU	UP	UP	UP	UP	4	1
UP	UP	DU	DU	UP	DU	UP	DU	UP	UP	5	1
UP	UP	DU	DN	UP	DU	UP	DN	UP	UP	6	1
UP	UP	DN	UP	UP	DN	UP	UP	UP	UP	7	1
UP	UP	DN	DU	UP	DN	UP	DU	UP	UP	8	1
UP	UP	DN	DN	UP	DN	UP	DN	UP	UP	9	1
UP	DU	UP	UP	UP	DU	DU	UP	UP	UP	10	1
UP	DU	UP	DU	UP	DU	DU	DU	UP	DU	11	4
UP	DU	UP	DN	UP	DU	DU	DN	UP	DU	12	4
UP	DU	DU	UP	UP	DU	DU	UP	UP	UP	13	1
UP	DU	DU	DU	UP	DU	DU	DU	UP	DU	14	4
UP	DU	DU	DN	UP	DU	DU	DN	UP	DU	15	4
UP	DU	DN	UP	UP	DN	DU	UP	UP	UP	16	1
UP	DU	DN	DU	UP	DN	DU	DU	UP	DU	17	4
UP	DU	DN	DN	UP	DN	DU	DN	UP	DU	18	4
UP	DN	UP	UP	UP	DN	DN	UP	UP	UP	19	1
UP	DN	UP	DU	UP	DN	DN	DU	UP	DU	20	4
UP	DN	UP	DN	UP	DN	DN	DN	UP	DN	21	7
UP	DN	DU	UP	UP	DN	DN	UP	UP	UP	22	1
UP	DN	DU	DU	UP	DN	DN	DU	UP	DU	23	4
UP	DN	DU	DN	UP	DN	DN	DN	UP	DN	24	7
UP	DN	DN	UP	UP	DN	DN	UP	UP	UP	25	1
UP	DN	DN	DU	UP	DN	DN	DU	UP	DU	26	4

ตารางที่ 4.1 ผลการรวมกันของตัวอย่างที่ 4.1 (ต่อ)

A1	B1	A2	B2	1	2	3	4	AA	BB	OLD STATE	NEW STATE
UP	DN	DN	DN	UP	DN	DN	DN	UP	DN	27	7
DU	UP	UP	UP	DU	UP	UP	DU	UP	UP	28	1
DU	UP	UP	DU	DU	UP	UP	DU	UP	UP	29	1
DU	UP	UP	DN	DU	UP	UP	DN	UP	UP	30	1
DU	UP	DU	UP	DU	DU	UP	DU	DU	UP	31	2
DU	UP	DU	DU	DU	DU	UP	DU	DU	UP	32	2
DU	UP	DU	DN	DU	DU	UP	DN	DU	UP	33	2
DU	UP	DN	UP	DU	DN	UP	DU	DU	UP	34	2
DU	UP	DN	DU	DU	DN	UP	DN	DU	UP	35	2
DU	UP	DN	DN	DU	DN	UP	DN	DU	UP	36	2
DU	DU	UP	UP	DU	DU	DU	DU	DU	DU	37	5
DU	DU	UP	DU	DU	DU	DU	DU	DU	DU	38	5
DU	DU	UP	DN	DU	DU	DU	DN	DU	DU	39	5
DU	DU	DU	UP	DU	DU	DU	DU	DU	DU	40	5
DU	DU	DU	DU	DU	DU	DU	DU	DU	DU	41	5
DU	DU	DU	DN	DU	DU	DU	DN	DU	DU	42	5
DU	DU	DN	UP	DU	DN	DU	DU	DU	DU	43	5
DU	DU	DN	DU	DU	DN	DU	DU	DU	DU	44	5
DU	DU	DN	DN	DU	DN	DU	DN	DU	DU	45	5
DU	DN	UP	UP	DU	DN	DU	DU	DU	DU	46	5
DU	DN	UP	DU	DU	DN	DU	DU	DU	DU	47	5
DU	DN	UP	DN	DU	DN	DU	DN	DU	DN	48	8
DU	DN	DU	UP	DU	DN	DU	DU	DU	DU	49	5
DU	DN	DU	DU	DU	DN	DU	DU	DU	DU	50	5
DU	DN	DU	DN	DU	DN	DU	UP	DU	DN	51	8
DU	DN	DN	UP	DU	DN	DU	DU	DU	DU	52	5
DU	DN	DN	DU	DU	DN	DN	DU	DU	DU	53	5
DU	DN	DN	DN	DU	DN	DU	DU	DU	DN	54	8
DN	UP	UP	UP	DN	UP	UP	DN	UP	UP	55	1
DN	UP	UP	DU	DN	UP	UP	DN	UP	UP	56	1
DN	UP	UP	DN	DN	UP	UP	DN	UP	UP	57	1
DN	UP	DU	UP	DN	DU	UP	DN	DU	UP	58	2
DN	UP	DU	DU	DN	DU	UP	DN	DU	UP	59	2

ตารางที่ 4.1 ผลการรวมกันของตัวอย่างที่ 4.1 (ต่อ)

A1	B1	A2	B2	1	2	3	4	AA	BB	OLD STATE	NEW STATE
DU	UP	DU	DN	DN	DU	UP	DN	DU	UP	60	2
DN	UP	DN	UP	DN	DN	UP	DN	DN	UP	61	3
DN	UP	DN	DU	DN	DN	UP	DN	DN	UP	62	3
DN	UP	DN	DN	DN	DN	UP	DN	DN	UP	63	3
DN	DU	UP	UP	DN	DU	DU	DN	DU	DU	64	5
DN	DU	UP	DU	DN	DU	DU	DN	DU	DU	65	5
DN	DU	UP	DN	DN	DU	DU	DN	DU	DU	66	5
DN	DU	DU	UP	DN	DU	DU	DN	DU	DU	67	5
DN	DU	DU	DU	DN	DU	DU	DN	DU	DU	68	5
DN	DU	DU	DN	DN	DU	DU	DN	DU	DU	69	5
DN	DU	DN	UP	DN	DU	DU	DN	DU	DU	70	6
DN	DU	DN	DU	DN	DU	DU	DN	DU	DU	71	6
DN	DU	DN	DN	DN	DU	DU	DN	DU	DU	72	6
DN	DN	UP	UP	DN	DN	DN	DN	DN	DN	73	9
DN	DN	UP	DU	DN	DN	DN	DN	DN	DN	74	9
DN	DN	UP	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	75	9
DN	DN	DU	UP	DN	DN	DN	DN	DN	DN	76	9
DN	DN	DU	DU	DN	DN	DN	DN	DN	DN	77	9
DN	DN	DU	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	78	9
DN	DN	DN	UP	DN	DN	DN	DN	DN	DN	79	9
DN	DN	DN	DU	DN	DN	DN	DN	DN	DN	80	9
DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	81	9

หลังจากนั้นเมื่อใช้วิธีทางความถี่ และช่วงเวลาก็จะสามารถหาความน่าจะเป็นของสถานะต่าง ๆ และอัตราการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในสถานะอันใหม่ได้ด้วย

4.4 การสร้างแบบจำลองของระบบป้องกันรูปแบบต่าง ๆ

ในระบบไฟฟ้ากำลังจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ มากมายเช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า สายส่ง บัส ฯลฯ ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องมียระบบป้องกันรูปแบบที่เหมาะสมกับอุปกรณ์นั้น ๆ โดยที่รูปแบบต่าง ๆ จะเกิดขึ้นจากการร่วมกันทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้แก่ รีเลย์

หม้อแปลงกระแส ฯลฯ ดังนั้นในส่วนนี้จะกล่าวถึงรูปแบบต่าง ๆ ที่ได้ทำการศึกษา และวิธีในการสร้างแบบจำลองดังนี้

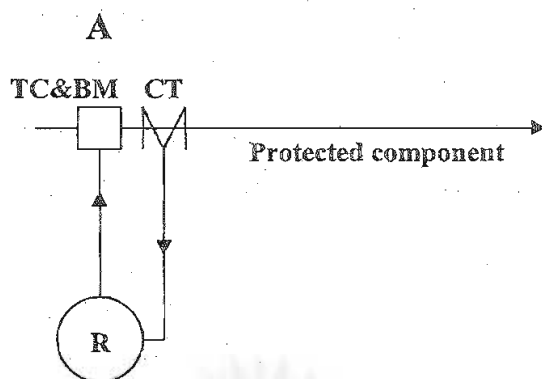
รูปแบบต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยระบบป้องกันรูปแบบต่าง ๆ ดังนี้

1. ระบบป้องกันที่มีการป้องกันด้านเดียวของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน จะประกอบไปด้วย การป้องกันแบบใช้รีเลย์กระแสเกิน หรือแรงดันเกินรูปแบบต่าง ๆ
2. ระบบป้องกันที่มีการป้องกัน 2 ด้านของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันแบบไม่อาศัยระบบไหลตอ จะประกอบไปด้วยการป้องกันแบบต่าง ๆ ดังนี้
 - ก. การป้องกันแบบใช้รีเลย์ผลต่างกระแส หรือผลต่างแรงดัน
 - ข. การป้องกันแบบใช้รีเลย์ระยะทางแบบไม่อาศัยระบบไหลตอ
3. ระบบป้องกันที่มีการป้องกัน 2 ด้านของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันแบบอาศัยระบบไหลตอ จะประกอบไปด้วยการป้องกันแบบต่าง ๆ ดังนี้
 - ก. การป้องกันแบบ POTT
 - ข. การป้องกันแบบ PUTT
 - ค. การป้องกันแบบ DUTT

ในการสร้างแบบจำลองของระบบป้องกันรูปแบบต่าง ๆ จำเป็นที่จะต้องเข้าใจขั้นตอนการทำงาน of ระบบป้องกันรูปแบบนั้น ๆ เสียก่อน โดยที่เราสามารถเขียนรูปแบบขั้นตอนการทำงานให้อยู่ในรูปแบบของแผนภาพกรอบเสี้ยก่อน หลังจากนั้นก็กำหนดถึงขั้นตอนในการรวมอุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นชั้น ๆ ดังที่จะแสดงในการสร้างแบบจำลองต่อ ๆ ไป เมื่อกำหนดขั้นตอนเสร็จสิ้นแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การสร้างแบบจำลองโดยวิธีมาคอฟดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในตอนที่ผ่านมา ซึ่งสุดท้ายแล้วจะได้แบบจำลองที่สมบูรณ์ของระบบป้องกันซึ่งมีจำนวนสถานะแตกต่างกันออกไปได้แก่ การป้องกันแบบใช้รีเลย์กระแสเกิน หรือแรงดันเกินจะมีสถานะทั้งหมดแล้ว 3 สถานะ เพราะทำการป้องกันเพียงด้านเดียวของอุปกรณ์ ส่วนระบบที่เหลือจะประกอบด้วยสถานะทั้งหมด 9 สถานะ หลังจากนั้นจะแยกกล่าวเป็นระบบป้องกันแบบต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ดังนี้

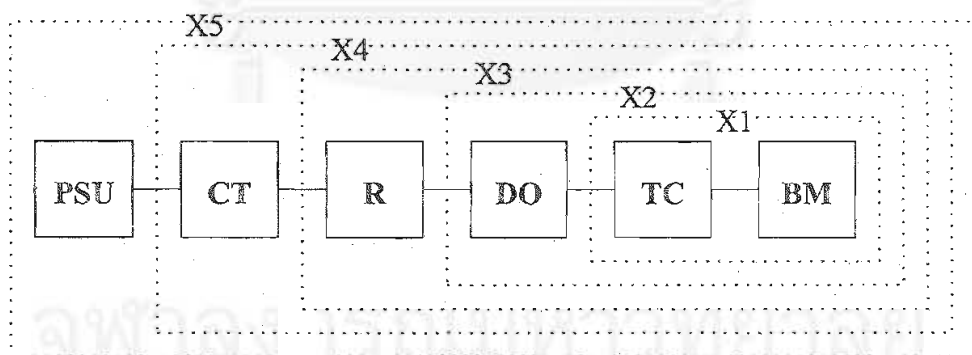
4.4.1 ระบบป้องกันที่มีการป้องกันด้านเดียวของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน

ระบบป้องกันที่มีการป้องกันด้านเดียวของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน ได้แก่ ระบบป้องกันที่ทำการตัดวงจรออกเพียงด้านใดด้านหนึ่งของอุปกรณ์ โดยที่อาจทำงานเป็นอิสระ หรือทำงานร่วมกับระบบอื่น ๆ จะ ได้แก่ รูปแบบการป้องกันแบบใช้รีเลย์กระแสเกิน หรือแรงดันเกินซึ่งเป็นรูปแบบการป้องกันที่ง่ายที่สุดในการป้องกันอุปกรณ์ โดยทั่วไปแล้วรูปแบบการป้องกันนี้จะใช้กับระบบจำหน่ายเป็นส่วนใหญ่ เพราะเหมาะสมกับระบบไฟฟ้าแบบรัศมี (Radial system) แสดงได้ดังรูปที่



รูปที่ 4.8 ระบบป้องกันที่มีการป้องกันด้านเดียวของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน

สำหรับหลักการการทำงานของระบบป้องกันแบบใช้รีเลย์กระแสเกิน (หรือแรงดันเกิน) จะมีขั้นตอนดังนี้ คือ เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น หม้อแปลงกระแส (หม้อแปลงแรงดัน) จะตรวจวัดสัญญาณกระแส (แรงดัน) ที่มีขนาดผิดปกติ แล้วส่งสัญญาณที่ได้นี้ไปยังรีเลย์ซึ่งจะทำหน้าที่วิเคราะห์ว่าเป็นความผิดปกติหรือไม่ เมื่อตรงกับค่าที่ตั้งไว้ว่าเป็นความผิดปกติก็จะส่งสัญญาณไปที่ตัวแปลงผันแอนะล็อกเป็นดิจิทัลในรีเลย์ เพื่อทำการแปลงสัญญาณเป็นดิจิทัล และส่งสัญญาณนี้ไปที่ขดลวดตัด เพื่อทำให้ครบวงจร ส่งผลให้กลไกเบรกเกอร์ทำงาน โดยมีเงื่อนไขว่า ขั้นตอนทั้งหมดนี้จะไม่เกิดขึ้นถ้าหน่วยจ่ายกำลังไฟฟ้ากำลังของระบบป้องกันนี้ไม่ได้อยู่ในบริการ ขั้นตอนทั้งหมดนี้สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบของแผนภาพกรอบได้ดังนี้



รูปที่ 4.9 แผนภาพกรอบของระบบป้องกันแบบใช้รีเลย์กระแสเกิน (หรือแรงดันเกิน)

หลังจากที่เราได้ทำการสร้างแผนภาพกรอบของระบบป้องกันแล้ว ก็มาสู่ขั้นตอนของการสร้างแบบจำลองมาคอป เริ่มต้นด้วยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในแบบจำลองแบบ 4 สถานะของอุปกรณ์ต่าง ๆ และทำการแปลงให้เป็นแบบจำลองแบบ 3 สถานะ เมื่อได้แบบจำลองแบบ 3

สถานะของอุปกรณ์ทั้งหมดแล้วก็ทำการรวมอุปกรณ์ต่าง ๆ เข้าด้วยกันดังนี้ เริ่มต้นด้วยการรวมกันแบบอนุกรมของ TC และ BM ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นแบบจำลอง 3สถานะ อีกชุดหนึ่งกำหนดให้เป็น X1 นำ X1 ไปรวมกับ DO แบบอนุกรมได้ออกมาเป็น X2 ทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนครบทุกอุปกรณ์ก็จะได้แบบจำลองที่สมบูรณ์ของระบบป้องกันแบบใช้รีเลย์กระแสเกิน (หรือแรงดันเกิน)

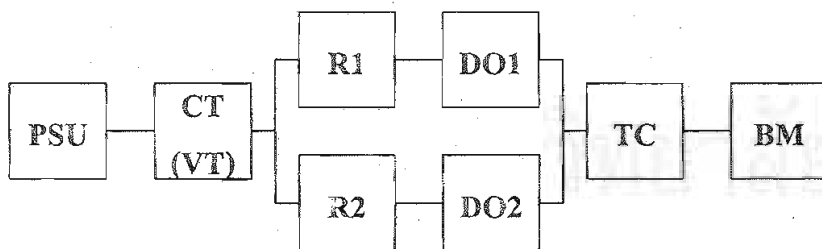
นอกจากนี้ระบบป้องกันแบบใช้รีเลย์กระแสเกิน (หรือแรงดันเกิน) ยังสามารถถูกจัดวางอยู่ในรูปแบบต่าง ๆ มากไปกว่านี้ โดยมากแล้วจะเป็นการเพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบด้วยการเพิ่มชุดรีเลย์เข้าไปเป็น 2ชุดหรือมากกว่านั้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาระบบป้องกันแบบใช้รีเลย์กระแสเกิน (หรือแรงดันเกิน)รูปแบบต่าง ๆ ดังนี้ [9]

ก. R1CT1PSU1

รูปแบบของระบบป้องกันแบบใช้รีเลย์กระแสเกิน (หรือแรงดันเกิน) ที่มีรีเลย์ 1ชุด หม้อแปลงกระแส (หม้อแปลงแรงดัน) 1 ชุด และหน่วยจ่ายกำลังไฟฟ้า 1 ชุด ซึ่งเป็นรูปแบบพื้นฐานที่สุดสำหรับระบบป้องกันรูปแบบนี้ สำหรับรูปแบบนี้ได้อธิบายขั้นตอนการทำงานไว้ข้างต้นแล้ว

ข. R2CT1PSU1

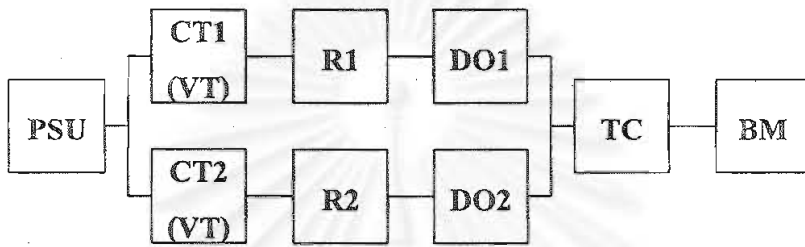
รูปแบบของระบบป้องกันแบบใช้รีเลย์กระแสเกิน (หรือแรงดันเกิน) ที่มีรีเลย์ 2 ชุด หม้อแปลงกระแส (หม้อแปลงแรงดัน) 1 ชุด และหน่วยจ่ายกำลังไฟฟ้า 1 ชุด โดยสามารถเขียนขั้นตอนการทำงานให้อยู่ในรูปของแผนภาพกรอบได้ดังนี้ คือในทุกขั้นตอนจะเหมือนกับที่ได้อธิบายไว้แล้วข้างต้น แต่แทนที่หม้อแปลงกระแส (หม้อแปลงแรงดัน) จะส่งสัญญาณไปให้รีเลย์ชุดเดียว ก็จะส่งไปให้รีเลย์ 2 ชุดพร้อม ๆ กันเพื่อช่วยกันทำงาน และจะแย่งกันส่งสัญญาณไปให้ขดลวดตัดชุดเดียวกันเพื่อทำงานต่อไป ซึ่งสามารถพิจารณาให้ชุดรีเลย์ทั้งสองชุดทำงานขนานกัน ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แผนภาพกรอบของ R2CT1PSU1

ค. R2CT2PSU1

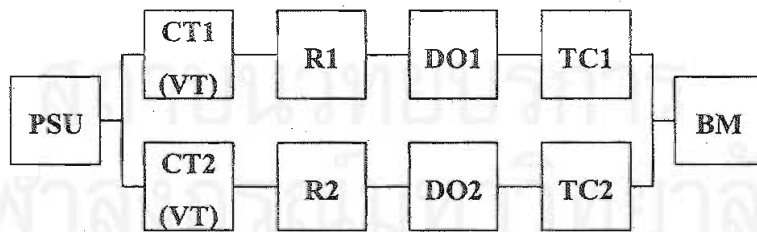
รูปแบบของระบบป้องกันแบบใช้รีเลย์กระแสเกิน (หรือแรงดันเกิน) ที่มีรีเลย์ 2 ชุด หม้อแปลงกระแส (หม้อแปลงแรงดัน) 2 ชุด และหน่วยจ่ายกำลังไฟฟ้า 1 ชุด มีขั้นตอนการทำงานดังนี้ คือจะมีหม้อแปลงกระแส (หม้อแปลงแรงดัน) 2 ชุด ทำงานพร้อมกันโดยส่งสัญญาณไปที่รีเลย์คนละชุดกัน และก็จะแย่งกันส่งสัญญาณไปให้ขดลวดตัดชุดเดียวกันเพื่อทำงานต่อไป สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แผนภาพกรอบของ R2CT2PSU1

ง. R2CT2TC2

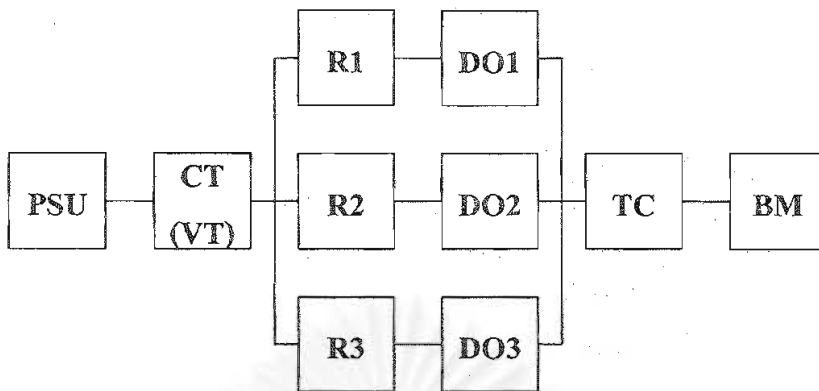
รูปแบบของระบบป้องกันแบบใช้รีเลย์กระแสเกิน (หรือแรงดันเกิน) ที่มีรีเลย์ 2 ชุด หม้อแปลงกระแส (หม้อแปลงแรงดัน) 2 ชุด ขดลวดตัด 2 ชุด และหน่วยจ่ายกำลังไฟฟ้า 1 ชุด จะมีขั้นตอนการทำงานเหมือน R2CT2PSU1 เพียงแต่มีขดลวดตัด 2 ชุด ที่จะทำงานพร้อมกันเพื่อทำให้กลไกเบรกเกอร์ทำงาน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แผนภาพกรอบของ R2CT2TC2

จ. R3CT1PSU1

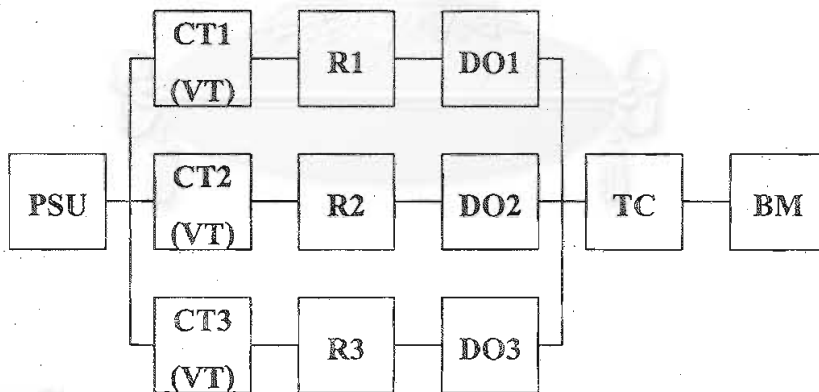
รูปแบบของระบบป้องกันแบบใช้รีเลย์กระแสเกิน (หรือแรงดันเกิน) ที่มีรีเลย์ 3 ชุด หม้อแปลงกระแส (หม้อแปลงแรงดัน) 1 ชุด และหน่วยจ่ายกำลังไฟฟ้า 1 ชุด จะมีขั้นตอนการทำงานเหมือนกับ R2CT1PSU1 ทุกขั้นตอนเพียงแต่มีชุดรีเลย์ 3 ชุดทำงานพร้อมกันดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แผนภาพกรอบของ R3CT1PSU1

ฉ. R3CT3PSU1

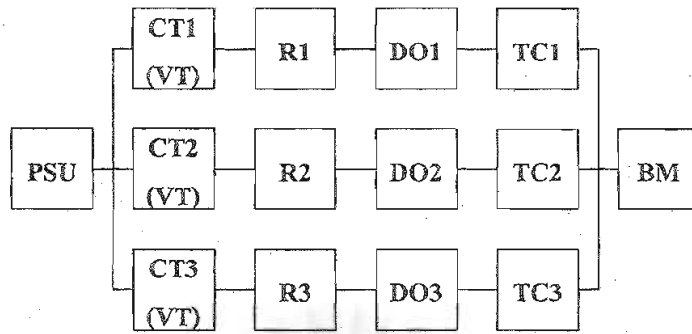
รูปแบบของระบบป้องกันแบบใช้รีเลย์กระแสเกิน (หรือแรงดันเกิน) ที่มีรีเลย์ 3 ชุด หม้อแปลงกระแส (หม้อแปลงแรงดัน) 3 ชุด และหน่วยจ่ายกำลังไฟฟ้า 1 ชุด จะมีขั้นตอนการทำงานเหมือนกับ R2CT2PSU1 เพียงแต่มีชุดรีเลย์ และหม้อแปลงกระแสเพิ่มเป็น 3 ชุดเท่านั้นเองดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แผนภาพกรอบของ R3CT3PSU1

ช. R3CT3TC3

รูปแบบของระบบป้องกันแบบใช้รีเลย์กระแสเกิน (หรือแรงดันเกิน) ที่มีรีเลย์ 3 ชุด หม้อแปลงกระแส (หม้อแปลงแรงดัน) 3 ชุด ขดลวดตัด 3 ชุด และหน่วยจ่ายกำลังไฟฟ้า 1 ชุด จะมีขั้นตอนการทำงานเช่นเดียวกันกับแบบ R2CT2TC2 แต่เพิ่มทุก ๆ อย่างเป็น 3 ชุด ดังรูปที่ 4.15



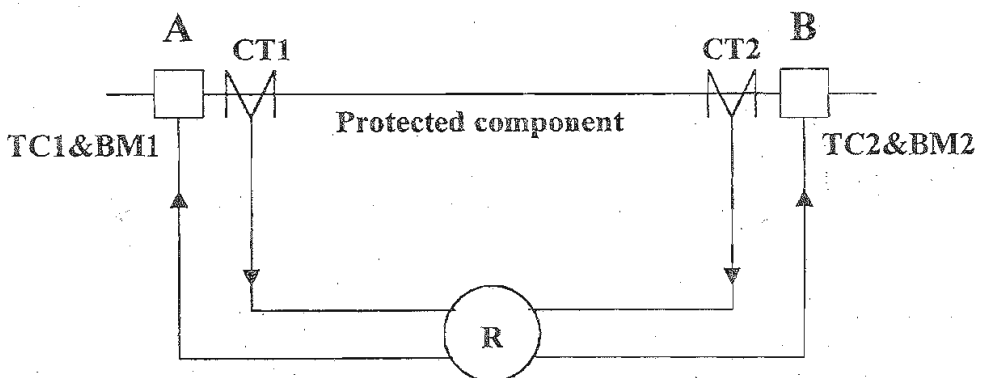
รูปที่ 4.15 แผนภาพกรอบของ R3CT3TC3

4.4.2 ระบบป้องกันที่มีการป้องกัน 2 ด้านของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันแบบไม่อาศัยระบบไหลของ

สำหรับการป้องกันที่มีการป้องกัน 2 ด้านของอุปกรณ์จะเป็นการป้องกันอุปกรณ์จำพวก บัส หม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ฯลฯ หรือบางครั้งสายส่งแรงสูงต่าง ๆ ก็จำเป็นที่จะต้องมีการป้องกันทั้งสองด้านเพราะระบบอาจต่อกันเป็นเครือข่ายซึ่งการตัดวงจรเพียงด้านเดียวไม่สามารถทำให้กำจัดความผิดปกติได้

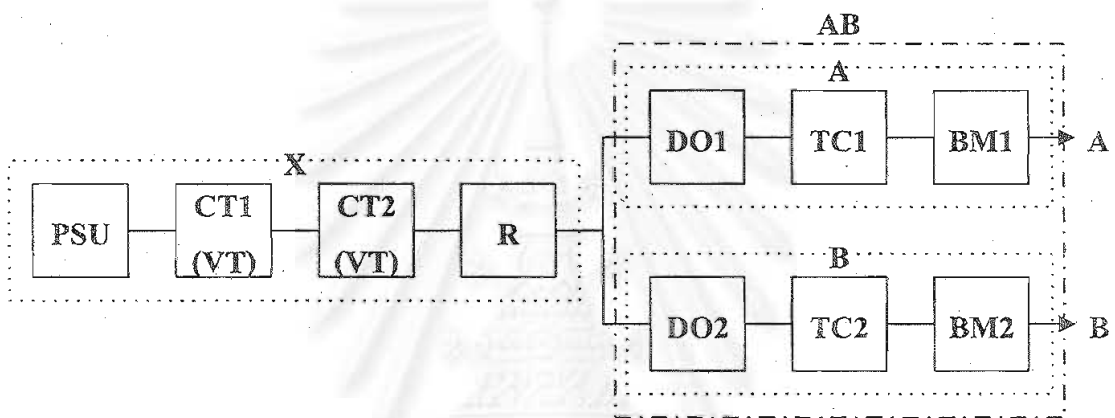
ก. การป้องกันแบบใช้รีเลย์ผลต่างกระแส หรือผลต่างแรงดัน

การป้องกันแบบใช้รีเลย์ผลต่างกระแส หรือผลต่างแรงดัน เป็นวิธีที่สำคัญในการป้องกัน โดยมีรูปแบบพื้นฐานดังรูปที่ 4.16 โดยมีแนวคิดหลักดังนี้ “ผลรวมของกระแสที่พุ่งเข้า จะต้องมามีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสที่พุ่งออกที่สถานะปกติของการทำงาน” ซึ่งแนวคิดนี้ใช้ได้กับทั้งการป้องกันแบบใช้ค่าผลต่างของกระแส และแบบใช้ค่าผลต่างของแรงดัน



รูปที่ 4.16 การป้องกันแบบใช้รีเลย์ผลต่าง

สำหรับขั้นตอนการทำงานของ การป้องกันแบบใช้รีเลย์ผลต่างกระแส (หรือผลต่างแรงดัน) จะมีขั้นตอนดังนี้ คือ หม้อแปลงกระแสทั้ง 2 ด้านของอุปกรณ์ที่ทำการป้องกันจะตรวจวัดค่ากระแสที่เกิดขึ้นทั้งสองค่าในระบบ และทำการส่งค่ากระแสทั้งสองนี้ที่วัดได้นี้ไปยังรีเลย์ผลต่าง รีเลย์ผลต่างจะวิเคราะห์ว่ามีความแตกต่างเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้าเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ก็จะพิจารณาว่าเกิดความผิดปกติในระบบ หลังจากนั้นก็แปลงสัญญาณเป็นดิจิทัลด้วยตัวแปลงผันแอนะล็อกเป็นดิจิทัลในรีเลย์ และทำการส่งสัญญาณนี้ไปยังขดลวดตัดทั้งสองข้างของอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน เพื่อให้เกิดการตัดอุปกรณ์นั้นออกจากระบบซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แผนภาพกรอบของการป้องกันแบบใช้รีเลย์ผลต่าง

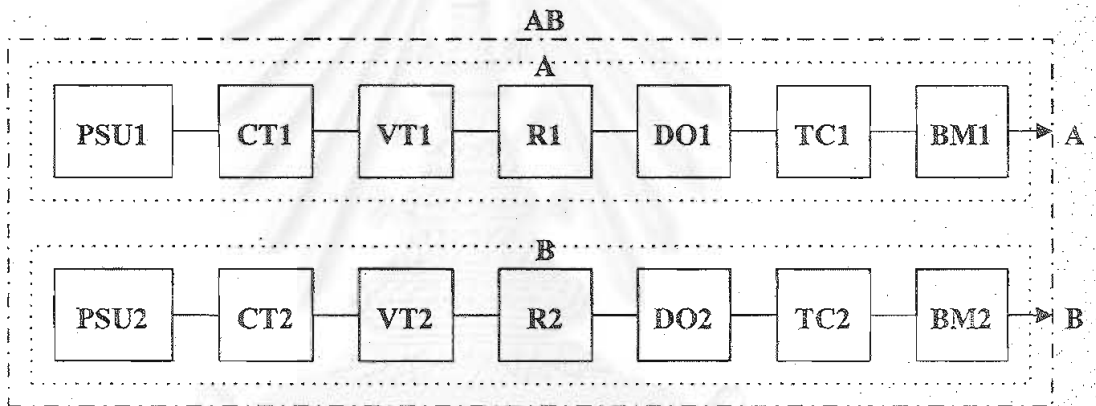
จากรูปที่ 4.17 เราเริ่มสร้างแบบจำลองจากการพิจารณา DO1 TC1 และ BM1 เป็นการต่อแบบอนุกรม และเรียกส่วนที่เป็นผลลัพธ์ 3 สถานะว่า "A" สำหรับ DO2 TC2 และ BM2 ก็เช่นเดียวกัน แต่เรียกว่า "B" และส่วนของ PSU CT1 CT2 และ R ก็พิจารณาเป็นการรวมกันแบบอนุกรมเช่นเดียวกัน และเรียกว่า "X" หลังจากนั้นนำส่วน A และ B มารวมกันแบบ A-B และนำส่วนที่เป็นผลรวมกันแบบ A-B นี้ไปรวมกับ X ด้วยการรวมแบบ 3-AB ซึ่งก็จะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นแบบจำลองของระบบป้องกันแบบใช้รีเลย์ผลต่างที่มี 9 สถานะ

ข. การป้องกันแบบใช้รีเลย์ระยะทางแบบไม่อาศัยระบบไหลออก

การป้องกันแบบใช้รีเลย์ระยะทาง หรือรีเลย์อิมพีแดนซ์ แบบไม่อาศัยระบบไหลออกเป็นวิธีการป้องกันรูปแบบหนึ่งที่อาศัยค่าตัวแปรทั้งค่ากระแส และค่าแรงดันเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความผิดปกติของระบบ โดยพิจารณาค่าตัวแปรทั้งสองมาหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายว่ามีค่าเปลี่ยน

แปลงไปเท่าใด และมีค่าเกินค่าที่กำหนดไว้หรือไม่ ทั้งนี้ในวิทยานิพนธ์จะกล่าวถึงเฉพาะการป้องกันในโซนที่ 1 เท่านั้น

สำหรับขั้นตอนการทำงานของ การป้องกันแบบใช้รีเลย์ระยะทางแบบไม่อาศัยระบบไหลตจะ มีขั้นตอนดังนี้ คือเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน ทั้งหมดแปลงกระแส และหม้อแปลงแรงดันจะตรวจวัดค่ากระแส และแรงดันตามลำดับแล้วส่งค่า นั้น ๆ ไปให้กับรีเลย์ระยะทางทั้งสองด้านของอุปกรณ์ที่ทำการป้องกัน หลังจากนั้นรีเลย์จะวิเคราะห์ และแปลงสัญญาณเป็นดิจิทัลเพื่อส่งสัญญาณนี้ไปยังวงจรตัดของแต่ละด้าน เมื่อขลวดตัดได้รับสัญญาณก็จะทำให้เกิดการทำงานเป็นผลให้กลไกเบรกเกอร์ทำงาน ทั้งนี้ไม่ได้คำนึงถึงเวลาในการทำงานว่าเป็นเท่าไร จะพิจารณาเฉพาะค่าความเชื่อถือได้ในการทำงานเท่านั้น ซึ่งแสดงขั้นตอนในการทำงานไว้ในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แผนภาพกรอบของการป้องกันแบบใช้รีเลย์ระยะทางแบบไม่อาศัยระบบไหลต

สำหรับรูปที่ 4.18 สามารถพิจารณาแยกเป็นสองส่วนคือ ด้าน A กับด้าน B คือทุกอุปกรณ์ในด้าน A ให้พิจารณาเป็นการรวมกันแบบอนุกรมทุก ๆ อุปกรณ์ ในด้าน B ก็เช่นเดียวกัน และหลังจากนั้นก็นำแบบจำลองทั้งสองด้านมารวมกันด้วยการรวมกันแบบ A-B ต่อไป ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็นแบบจำลองมาคอฟ 9 สถานะนั้นเอง

4.4.3 ระบบป้องกันที่มีการป้องกัน 2 ด้านของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันแบบอาศัยระบบไหลต

เนื่องจากการป้องกันแบบใช้รีเลย์ระยะทางแบบไม่อาศัยระบบไหลตยังคงมีปัญหาเรื่องของการความรวดเร็วในการแยกวงจร เนื่องจากมันมีความเป็นไปได้ที่ด้านใดด้านหนึ่งจะเห็นความผิดปกติอยู่ในเขตป้องกันที่ 1 (Zone 1) แต่อีกด้านจะมองเห็นเป็นเขตป้องกันที่ 2 (Zone 2) ซึ่งจะทำให้

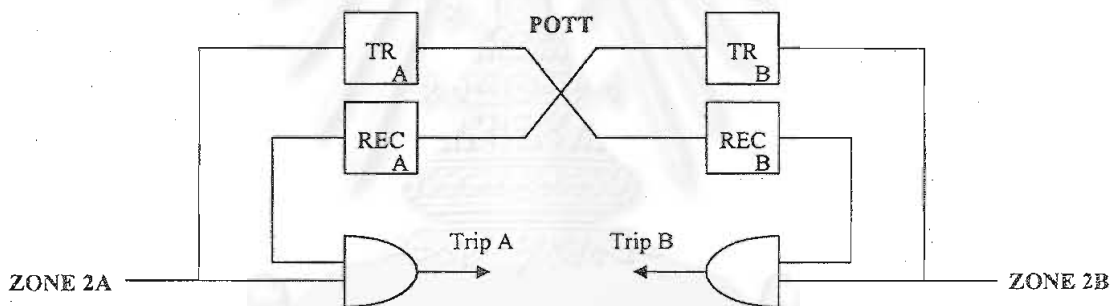
เกิดความล่าช้าในการแยกวงจรได้ และอาจก่อให้เกิดความเสียหายที่ประเมินค่าไม่ได้ [8] ดังนั้นจึงเกิดการพัฒนาระบบป้องกันแบบอาศัยระบบไหลทวนขึ้นเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องในจุดนี้ โดยที่ในปัจจุบันมีรูปแบบในการป้องกันมากมาย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์จะกล่าวถึงรูปแบบที่ใช้งานกันแพร่หลายดังนี้

- การป้องกันแบบ Permissive Overreach Transfer Trip (POTT)
- การป้องกันแบบ Permissive Underreach Transfer Trip (PUTT)
- การป้องกันแบบ Direct Underreach Transfer Trip (DUTT)

หลังจากที่ได้อธิบายตัวอย่างที่ 4.1 อย่างละเอียดแล้ว หลังจากนั้นจะเป็นการนำวิธีที่ได้อธิบายไว้ข้างต้นมาประยุกต์ใช้กับรูปแบบการป้องกันทั้งสามแบบที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นดังนี้

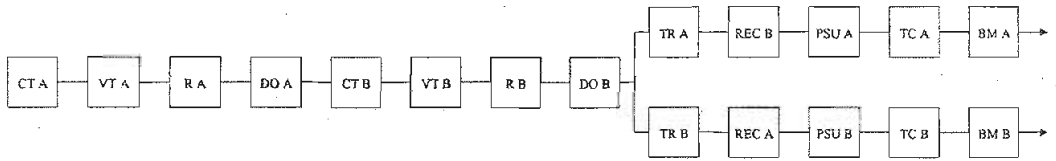
ก. การป้องกันแบบ Permissive Overreach Transfer Trip (POTT)

วิธีการป้องกันแบบ Permissive Overreach Transfer Trip (POTT) มีรูปแบบแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.19 การป้องกันแบบ Permissive Overreach Transfer Trip (POTT)

จากรูปที่ 4.19 สามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้ เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น ให้พิจารณาที่ด้าน A ก่อนดังนี้ รีเลย์ A จะตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้น และทำการส่งสัญญาณผ่านตัว TR_A ไปยังด้าน B โดยตัว REC_B เป็นตัวรับสัญญาณ ทางด้าน B ก็เช่นเดียวกัน หลังจากนั้นเมื่อด้าน A ได้รับสัญญาณจากด้าน B แล้วก็นำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ R_A ตรวจจับได้ด้วยตรรกะแบบ AND คือต้องได้รับสัญญาณสั่งให้ตัดวงจรจากทั้งด้าน A และด้าน B จึงจะทำการตัดวงจรด้าน A ทางด้าน B ก็เช่นเดียวกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าผลของการตรวจวัดสัญญาณ และการส่งสัญญาณของด้านตรงข้ามจะมีผลโดยตรงต่อการตัดวงจร ซึ่งจากขั้นตอนการทำงานดังกล่าวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแผนภาพกรอบได้ดังรูปที่ 4.20 ดังนี้

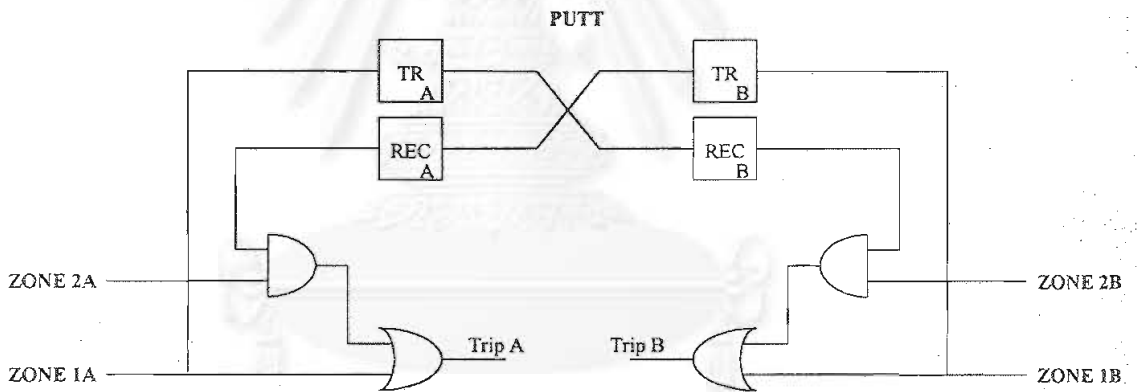


รูปที่ 4.20 แผนภาพกรอบของการป้องกันแบบ Permissive Overreach Transfer Trip (POTT)

สำหรับการป้องกันแบบ POTT นี้ยังไม่จำเป็นที่จะต้องใช้วิธีประยุกต์ของต้นไม้เหตุการณ์ เพราะเราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแผนภาพกรอบได้ในแบบที่ไม่ซับซ้อน และสามารถใช้ในการรวมกันตามธรรมดาได้

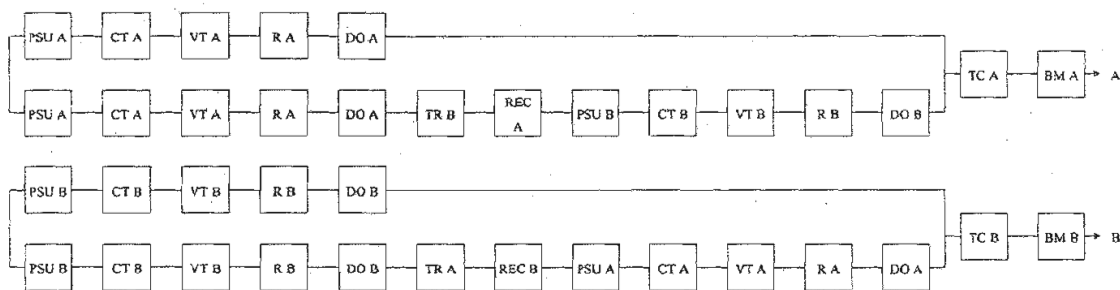
ข. การป้องกันแบบ Permissive Underreach Transfer Trip (PUTT)

สำหรับการป้องกันแบบ Permissive Underreach Transfer Trip (PUTT) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 การป้องกันแบบ Permissive Underreach Transfer Trip (PUTT)

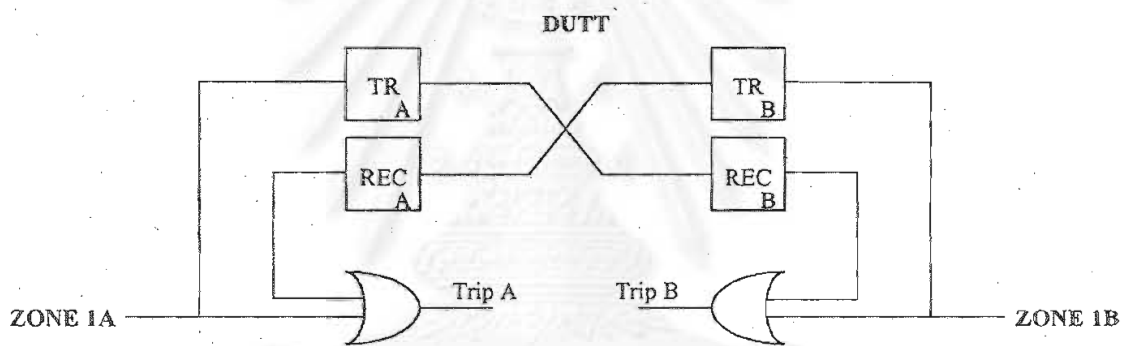
สำหรับการป้องกันแบบ Permissive Underreach Transfer Trip (PUTT) สามารถอธิบายขั้นตอนการทำงานได้ดังนี้ จะมีการส่งสัญญาณตัดวงจรไปยังขดลวดตัดด้านได้ 2 วิธีคือ เมื่อมีการส่งสัญญาณมาจากรีเลย์ A ในเขตป้องกันที่ 1 ของด้าน A หรือ เมื่อมีสัญญาณมาจากทั้งรีเลย์ A ในเขตป้องกันที่ 2 ของด้าน A และ สัญญาณที่ส่งมาจากรีเลย์ B ในเขตป้องกันที่ 1 ของด้าน B ผ่าน TR_B มายัง REC_A จากที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ก่อนที่จะทำการส่งสัญญาณไปยังขดลวดตัดจะมีการตรวจสอบสัญญาณจากหลาย ๆ ที่ซึ่งเป็นการเพิ่มความมั่นคงให้กับระบบป้องกัน จากขั้นตอนการทำงานข้างต้นสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบของแผนภาพกรอบได้ดังรูปที่ 4.22 ดังนี้



รูปที่ 4.22 แผนภาพกรอบของการป้องกันแบบ Permissive Underreach Transfer Trip (PUTT)

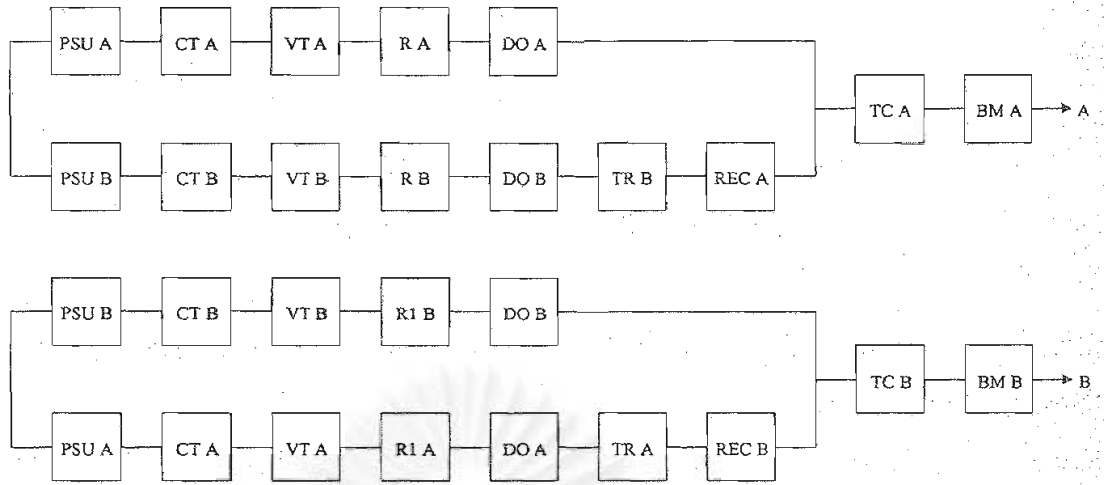
ค. การป้องกันแบบ Direction Underreach Transfer Trip (DUTT)

สำหรับการป้องกันแบบ Direction Underreach Transfer Trip (DUTT) นั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปได้ดังรูปที่ 4.23 ดังนี้



รูปที่ 4.23 การป้องกันแบบ Direct Underreach Transfer Trip (DUTT)

สำหรับขั้นตอนการทำงานมีดังนี้ เมื่อพิจารณาด้าน A ก่อนจะเห็นได้ว่าการส่งสัญญาณไปที่ขดลวดตัดจะเกิดขึ้นได้เมื่อได้รับสัญญาณจากรีเลย์ A ในเขตป้องกันที่ 1 ของด้าน A หรือได้รับสัญญาณจากรีเลย์ B ในเขตป้องกันที่ 1 ของด้าน B ที่ส่งผ่าน TR_B และ REC_A โดยที่ตรรกะที่ใช้ในรูปแบบการป้องกันนี้คือ OR GATE ซึ่งเมื่อมองเป็นการทำงานแล้ว สามารถพิจารณาให้เป็นการทำงานแบบขนานได้ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ดังนี้



รูปที่ 4.24 แผนภาพกรอบของการป้องกันแบบ Direct Underreach Transfer Trip (DUTT)

4.5 สรุป

ในบทนี้เราได้นำวิธีทางความเชื่อถือได้ซึ่งได้แก่ การสร้างแผนภาพกรอบของความเชื่อถือได้ วิธีต้นไม้เหตุการณ์ และแบบจำลองมาคอฟ มาทำการสร้างแบบจำลองโดยมีหลักการง่าย ๆ คือ เริ่มต้นด้วยการสร้างแบบจำลองของแต่ละอุปกรณ์ในระบบป้องกัน และทำการรวมอุปกรณ์ต่าง ๆ เข้าด้วยกันด้วยการสร้างแผนภาพกรอบ ซึ่งแสดงให้เห็นการทำงานเป็นขั้นตอนของระบบป้องกัน และวิธีต้นไม้เหตุการณ์นั้นก็นำมาประยุกต์สำหรับระบบที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น สุดท้ายก็จะได้แบบจำลองของระบบป้องกันแบบต่าง ๆ โดยที่การศึกษาถึงการสร้างแบบจำลองของระบบป้องกันแบบต่าง ๆ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มตามแบบจำลองที่จะเกิดขึ้นคือ แบบจำลองของระบบป้องกันแบบ 3 สถานะ และแบบจำลองของระบบป้องกัน 9 สถานะ ซึ่งจะนำแบบจำลองเหล่านี้ไปใช้ในการสร้างแบบจำลองของระบบทั้งหมดในบทต่อไป

บทที่ 5

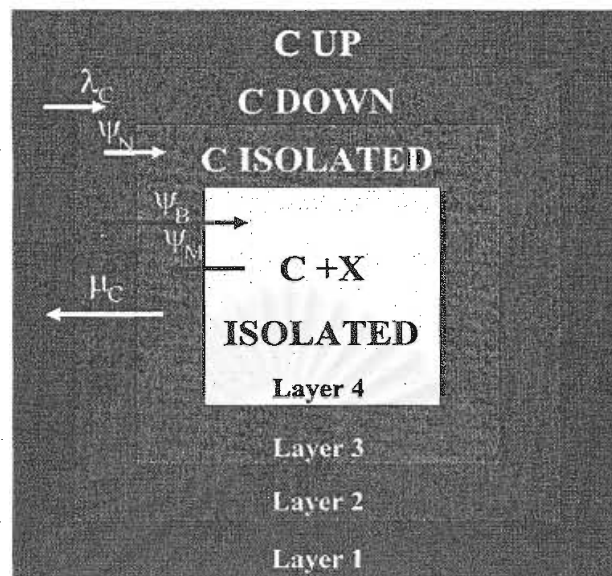
การสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน และแบบจำลองของระบบป้องกันทั้งหมด

อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ประกอบกันขึ้นเป็นระบบไฟฟ้ากำลังนั้นมีมากมายหลายอุปกรณ์ เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่ง ตัวเก็บประจุ บัส ฯลฯ ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันออกไปแล้วแต่การใช้งาน แต่เมื่อมองในแง่ของความเชื่อถือได้แล้วจะสามารถสร้างลักษณะร่วมกันได้ เช่น มีการล้มเหลวในการทำงาน มีช่วงเวลาในการทำการทดสอบต่าง ๆ เหมือนกัน ซึ่งเราสามารถนำจุดต่าง ๆ ที่เหมือนกันมาสร้างเป็นแบบจำลองร่วมกันได้

สำหรับบทที่ 5 นี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันโดยวิธีแบบจำลองมาคอฟ [2] และเมื่อได้แบบจำลองของอุปกรณ์ดังกล่าวแล้ว ก็จะนำเสนอการรวมแบบจำลองของระบบป้องกันที่ได้นำเสนอไปในบทที่แล้วเข้ากับแบบจำลองของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน และได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นแบบจำลองของระบบป้องกันทั้งหมดนั่นเอง หลังจากนั้นก็จะอธิบายถึงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบได้แก่ คอมมอนคอสเฟลเคเจอร์ (Common Cause Failure) ซึ่งมีผลต่อการทำงานของระบบโดยรวม

5.1 การสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน

ในระบบไฟฟ้ากำลังจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบต่าง ๆ มากมาย เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า ฯลฯ ซึ่งอุปกรณ์ต่าง ๆ เหล่านี้แม้ว่าจะมีลักษณะหน้าที่ในการทำงานแตกต่างกัน แต่ในเชิงของความเชื่อถือได้เราสามารถที่จะสร้างแบบจำลองโดยรวมของอุปกรณ์เหล่านี้โดยคำนึงถึงช่วงเวลาในการทำงาน ช่วงเวลาในการออกจากระบบ ฯลฯ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำแบบจำลองจาก [2] มาใช้ดังนี้



รูปที่ 5.1 แบบจำลองของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันแบบ 4 เลเยอร์

จากรูปที่ 5.1 สามารถแบ่งสถานะของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันได้ 4 สถานะดังนี้

เลเยอร์ที่ 1	:	C UP
เลเยอร์ที่ 2	:	C DOWN
เลเยอร์ที่ 3	:	C ISOLATED
เลเยอร์ที่ 4	:	C+X ISOLATED

จากรูปจะเห็นได้ว่าไม่ได้รวมผลของระบบป้องกันเข้าไปในชั้นตอนนี้ แต่จะกล่าวโดยรวมเมื่อทำการสร้างแบบจำลองของระบบทั้งหมดในชั้นตอนต่อไป

จากรูปที่ 5.1 สามารถอธิบายขั้นตอนการเปลี่ยนสถานะได้ดังนี้ คือเมื่ออุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน (Protected Component, C) หลังจากนี้จะเรียกอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันว่า “C” อยู่ในระหว่างการทำงาน หรืออยู่ในการบริการจะอยู่ในเลเยอร์ที่ 1 และเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น C ก็จะเปลี่ยนสถานะจากเลเยอร์ที่ 1 ไปยังเลเยอร์ที่ 2 ด้วยอัตราการเปลี่ยนสถานะเท่ากับ λ_C ซึ่งเป็นค่าอัตราล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน หลังจากนั้นเมื่อ C อยู่ในเลเยอร์ที่ 2 แล้วก็จะต้องได้รับการแยกออกจากระบบทั้งหมดไปยังเลเยอร์ที่ 3 ด้วยค่า ψ_N หรือ อัตราการสับสวิตซ์สำหรับการแยกอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันออกจากระบบแบบปรกติถ้ามีระบบป้องกันอย่างน้อย 1 ระบบป้องกัน C อยู่ แต่ถ้าไม่มีระบบป้องกันอยู่เลยก็จะเปลี่ยนสถานะจากเลเยอร์ที่ 2 ไปยังเลเยอร์ที่ 4 แทน

ด้วยค่า ψ_B หรือ อัตราการสับสวิตช์สำหรับการแยกอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันออกจากระบบแบบสำรอง ซึ่งค่า ψ_B นี้จะอาศัยระบบป้องกันสำรองซึ่งอาจเป็นได้ทั้งระบบป้องกันสำรองแบบโลคอล (Local Backup System) หรือระบบป้องกันสำรองแบบระยะไกล (Remote Backup System) ก็ได้ สำหรับกรณีนี้การเปลี่ยนจากเลเซอร์ที่ 2 ไปยังเลเซอร์ที่ 4 นี้ จะคงอยู่ที่สถานะที่ 4 นี้จนกระทั่ง X หรือส่วนประกอบข้างเคียงได้รับการสับสวิตช์กลับไปทำงานด้วยค่า ψ_M หรืออัตราการสับสวิตช์สำหรับการสับอุปกรณ์ที่อยู่ข้างเคียงเข้าสู่บริการนั่นเอง ซึ่งขั้นตอนการทำงานนี้เองทำให้ C เปลี่ยนสถานะการทำงานจากเลเซอร์ที่ 4 ไปยังเลเซอร์ที่ 3 ซึ่งค่า ψ_M นี้เองสามารถที่จะแปรเปลี่ยนได้ตั้งแต่เป็นนาฬิกา ชั่วโมง หรือเป็นวันก็ได้ และหลังจากนี้ขั้นตอนการซ่อมแซมจะเกิดขึ้นที่เลเซอร์ที่ 3 นี้เอง เมื่อทำการซ่อมแซม C เสร็จเรียบร้อยแล้วก็จะเปลี่ยนสถานะจากเลเซอร์ที่ 3 กลับไปยังเลเซอร์ที่ 1 ด้วยค่า μ_C หรืออัตราการซ่อมแซมอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน ซึ่งขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นได้ต้องเป็นไปตามสันนิษฐานที่กำหนดไว้ก็ต้องมีระบบป้องกันอย่างน้อย 1 ระบบอยู่ในการบริการ

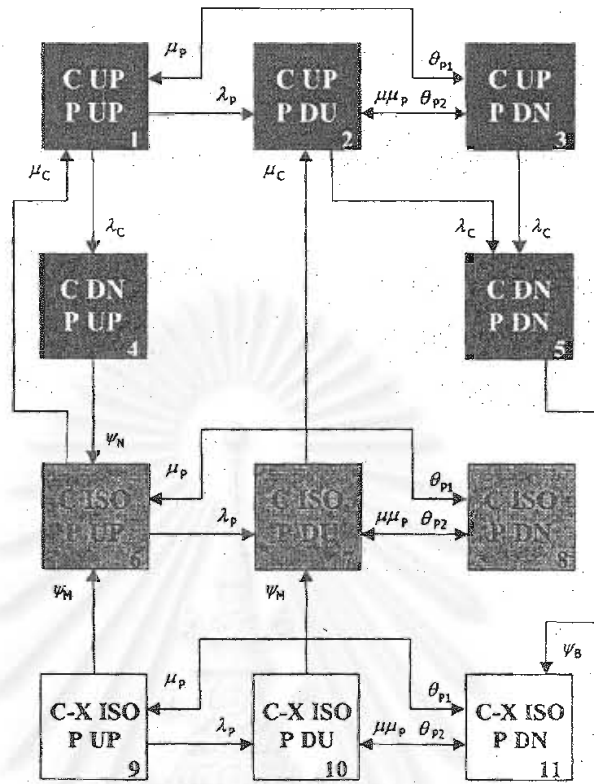
หลังจากนี้จะเป็นขั้นตอนการรวมกันของระบบป้องกันที่ได้อธิบายการสร้างแบบจำลองไว้ในบทที่แล้ว กับอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันซึ่งผลลัพธ์จะได้เป็นแบบจำลองของระบบป้องกันทั้งหมด

5.2 การสร้างแบบจำลองของระบบป้องกันทั้งหมด

จากบทที่แล้วจะเห็นได้ว่าเมื่อเราสร้างแบบจำลองของระบบป้องกันเสร็จแล้ว ผลที่ได้จะมีอยู่ 2 รูปแบบคือ แบบแรกคือแบบจำลองของระบบป้องกันที่มีการป้องกันด้านเดียวของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน ซึ่งจะได้แบบจำลองที่มีสถานะทั้งหมด 3 สถานะ และแบบที่สองคือ แบบจำลองของระบบป้องกันที่มีการป้องกัน 2 ด้านของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน ซึ่งจะมีสถานะทั้งหมด 9 สถานะซึ่งเกิดขึ้นกับทั้งระบบป้องกันที่อาศัยระบบไฟลอท และไม่อาศัยระบบไฟลอท ดังนั้นหลังจากนี้จะแบ่งการอธิบายออกเป็น 2 ส่วนตามรูปแบบของระบบป้องกันดังนี้

5.2.1 การสร้างแบบจำลองของระบบป้องกันทั้งหมดที่ระบบป้องกันมี 3 สถานะ

ในขั้นตอนการรวมกันสำหรับระบบป้องกันที่มี 3 สถานะนั้นเมื่อลองพิจารณาแล้วโดยไม่คำนึงถึงสันนิษฐานที่ตั้งไว้ในตอนต้นแล้ว จะมีสถานะที่เป็นไปได้ทั้งหมด 3×4 สถานะ หรือ 12 สถานะ แต่เมื่อคำนึงถึงผลของสันนิษฐานที่ตั้งไว้แล้วจะได้สถานะทั้งหมดดังรูปที่ 5.2 ดังนี้



รูปที่ 5.2 แบบจำลองของระบบป้องกันทั้งหมดเมื่อแบบจำลองของระบบป้องกันมี 3 สถานะ

จากรูปที่ 5.2 สามารถอธิบายขั้นตอนการทำงานได้ดังนี้ เมื่อพิจารณาในเลเซอร์แรกที่ C อยู่ในสถานะ UP ทุกสถานะที่เกิดขึ้นกับระบบป้องกัน ต่อจากนี้จะเรียกระบบป้องกันว่า “P” สามารถเกิดขึ้นได้ แต่เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น C จะเปลี่ยนสถานะไปยังเลเซอร์ที่ 2 ที่ C อยู่ในสถานะ DOWN ในสถานะนี้ P จะเป็นได้เพียงสถานะ UP กับสถานะ DOWN เท่านั้น เพราะว่าเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นถ้า P อยู่ในสถานะ UP แล้วก็จะอยู่ในสถานะ UP ต่อไป แต่ถ้าอยู่ในสถานะ DU หรือ DN มาก่อนก็จะเปลี่ยนสถานะเป็น DN เพราะในตอนนี้เรารู้แล้วว่าระบบป้องกันเสียหาย และจากสันนิษฐานข้อที่ 9 ที่ว่า จะไม่เกิดความเสียหายใด ๆ กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกันในขณะที่เกิดความผิดปกติของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน ดังนั้นจึงไม่มีการเปลี่ยนสถานะของ P ในเลเซอร์นี้ หลังจากนั้นก็จะเกิดการสับสวิตช์เพื่อแยกอุปกรณ์ที่เสียหายออกจากระบบซึ่งถ้าอุปกรณ์ป้องกันอยู่ในสถานะ UP ก็จะเปลี่ยนเข้าสู่เลเซอร์ที่ 3 แต่ถ้าระบบป้องกันอยู่ในสถานะ DN ก็จะเปลี่ยนเข้าสู่เลเซอร์ที่ 4 ซึ่งในเลเซอร์ที่ 3 และ 4 นี้ระบบป้องกันสามารถเกิดความผิดปกติต่าง ๆ ได้ ดังนั้นจึงเกิดการเปลี่ยนสถานะดังที่ให้เห็นในรูป หลังจากที่ทำกรซ่อมแซม C เสร็จเรียบร้อยแล้ว และระบบป้องกันอยู่ในการบริการ ซึ่งไม่จำเป็นว่าจะต้องอยู่ในสถานะ UP เสมอไป เพราะในที่นี้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นอาจเป็นไปได้ที่จะเกิดความผิดปกติขึ้นกับระบบป้องกันโดยรวมได้ หลังจาก

นั้นแบบจำลองก็จะเปลี่ยนกลับไปสู่เลขอร์ที่ 1 ต่อไป จะเห็นได้ว่าสถานะทั้งหมดที่เกิดขึ้นมีเพียง 11 สถานะ ซึ่งลดลงจากสถานะที่เป็นไปได้ทั้งหมด 12 สถานะ

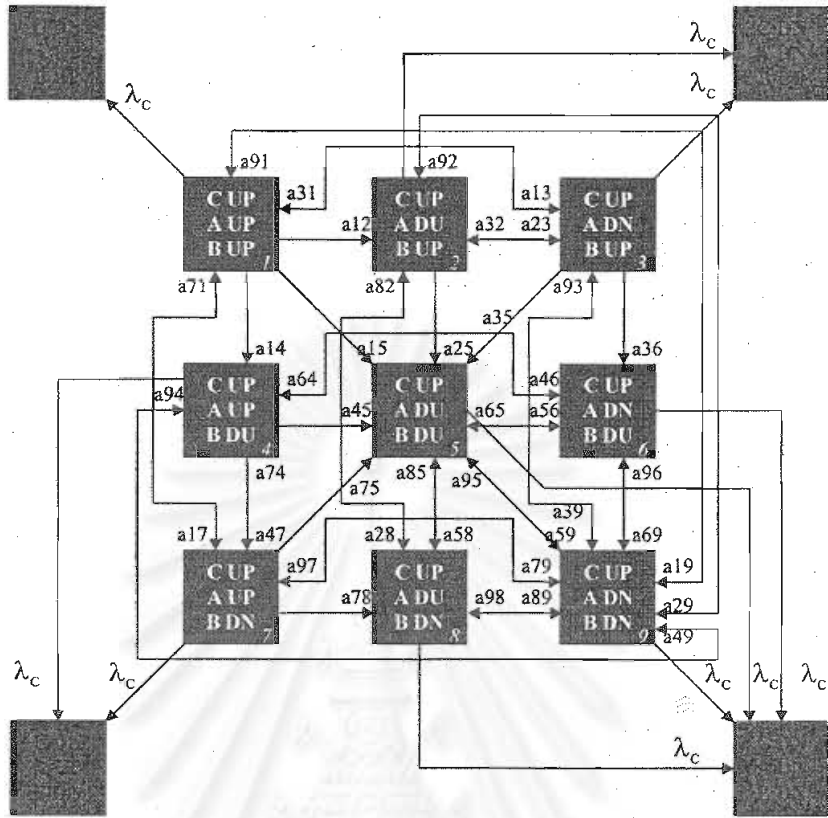
5.2.2 การสร้างแบบจำลองของระบบป้องกันทั้งหมดที่ระบบป้องกันมี 9 สถานะ

เมื่อลองพิจารณาระบบป้องกันที่มีสถานะ 9 สถานะ และอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันที่มี 4 สถานะแล้ว จะเกิดสถานะที่เป็นไปได้ทั้งหมด 9×4 หรือ 36 สถานะนั้นเอง แต่เป็นสถานะที่ไม่คำนึงถึงสันนิษฐานที่ได้ตั้งไว้ และเมื่อได้ลองพิจารณาตามสันนิษฐานแล้วจะได้แบบจำลองทั้งหมด 31 สถานะดังรูปที่ 5.3

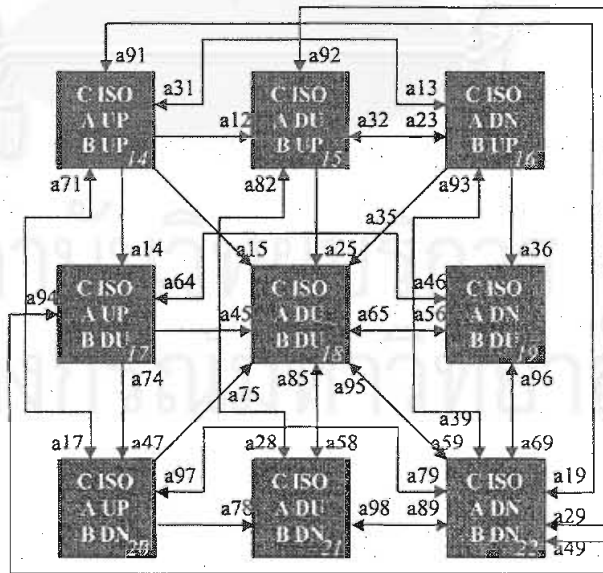
สำหรับในเลขอร์ที่ 1 เลขอร์ที่ 3 และเลขอร์ที่ 4 จะมีสถานะภายในที่เหมือนกัน เพราะว่าในสถานะของ C ซึ่งเป็น UP ISO และ C+X ISO นั้นตามสันนิษฐานแล้วเหตุการณ์ต่าง ๆ สามารถเกิดขึ้นได้ แต่สำหรับในเลขอร์ที่ 2 แล้วจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะภายในเลขอร์ที่ 2 นี้ตามสันนิษฐานข้อ 9 นั้นเอง

นอกจากอัตราการเปลี่ยนสถานะจะเป็นดังรูปที่ 5.3 แล้ว ยังมีอัตราการเปลี่ยนสถานะระหว่างเลขอร์อีกด้วยดังนี้ โดยที่ $a(m-n)$ หมายถึง อัตราการเปลี่ยนสถานะจากสถานะที่ m ไปยังสถานะที่ n

- จากเลขอร์ที่ 1 ไปยังเลขอร์ที่ 2 มีดังนี้ ได้แก่ $a(1-10)$, $a(2-11)$, $a(3-11)$, $a(4-12)$, $a(5-13)$, $a(6-13)$, $a(7-12)$, $a(8-13)$ และ $a(9-13)$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ λ_C
- จากเลขอร์ที่ 2 ไปยังเลขอร์ที่ 3 มีดังนี้ ได้แก่ $a(10-14)$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ ψ_N
- จากเลขอร์ที่ 2 ไปยังเลขอร์ที่ 4 มีดังนี้ ได้แก่ $a(11-25)$, $a(12-29)$ และ $a(13-31)$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ ψ_B
- จากเลขอร์ที่ 4 ไปยังเลขอร์ที่ 3 มีดังนี้ ได้แก่ $a(23-14)$, $a(24-15)$, $a(25-16)$, $a(26-17)$, $a(27-18)$, $a(28-19)$, $a(29-20)$, $a(30-21)$ และ $a(31-22)$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ ψ_M
- จากเลขอร์ที่ 1 ไปยังเลขอร์ที่ 2 มีดังนี้ ได้แก่ $a(14-1)$, $a(15-2)$, $a(17-4)$ และ $a(18-5)$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ μ_C

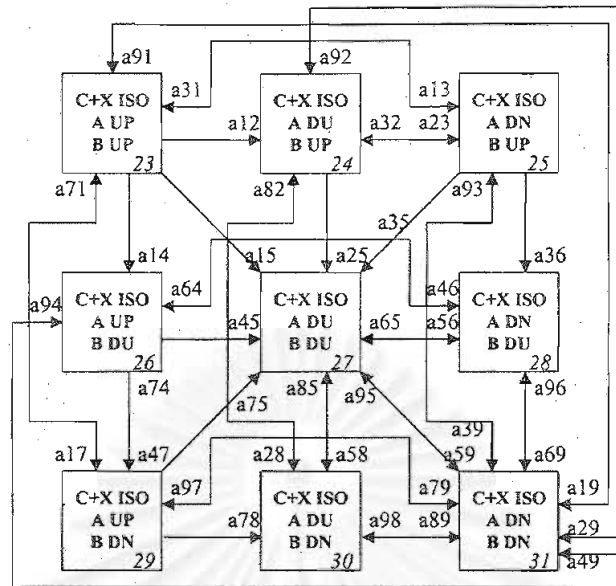


ก) เลขอร์ที่ 1 - C UP และเลขอร์ที่ 2 - C DN



ข) เลขอร์ที่ 3 - C ISO

รูปที่ 5.3 แบบจำลองของระบบป้องกันทั้งหมดเมื่อแบบจำลองของระบบป้องกันมี 9 สถานะ



ก) เลขอร์ที่ 4 - C+X ISO

รูปที่ 5.3 แบบจำลองของระบบป้องกันทั้งหมด
เมื่อแบบจำลองของระบบป้องกันมี 9 สถานะ (ต่อ)

5.3 คอมมอนคอสเฟลลีย์ (Common Cause Failure)

หลังจากที่อธิบายขั้นตอนการสร้างแบบจำลองอย่างละเอียดก็จะมาถึงการเพิ่มเติมรายละเอียดของส่วนต่าง ๆ เช่น ก่อนหน้านี้ที่เราได้อธิบายถึงการสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกันว่าสามารถที่จะแก้ไขพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้อย่างอิสระ ยกตัวอย่างเช่น เราสามารถที่จะเลือกได้ว่าอุปกรณ์ที่เราสนใจนั้นเป็นอุปกรณ์ที่มีระบบตรวจสอบตัวเองหรือไม่ หรือว่าอุปกรณ์นั้น ๆ มีอัตราการล้มเหลวเป็นเท่าไร ซึ่งอาจมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละอุปกรณ์ ฯลฯ ก็มาถึงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นบ้างในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นคือ “คอมมอนคอสเฟลลีย์” ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

5.3.1 หลักการทั่วไป [7]

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทต้น ๆ ว่าการเกิดความผิดพลาดของอุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นไปอย่างอิสระต่อกัน แต่ในความเป็นจริงแล้วจะพบว่าในบางครั้งระบบจะเกิดความผิดพลาดมากกว่าค่าที่คาดการณ์ไว้ในกรณีที่เป็นการอิสระต่อกัน ซึ่งไม่ได้หมายความว่าทฤษฎีความน่าจะเป็นจะใช้ไม่ได้ แต่

เป็นเพราะว่า ในการวิเคราะห์หน้าจะพลาดที่จะคำนึงถึงความผิดพลาดบางประการที่สำคัญ ซึ่งจากกรณีนี้เองทำให้ค่าที่ประเมินได้มีค่าต่ำกว่าที่เป็นจริง

รูปแบบของความผิดพลาดที่สำคัญ และเป็นรูปแบบที่ลดความเชื่อถือได้ของระบบเป็นอย่างมาก คือ “คอมมอนคอสเฟลลีย์” ซึ่งบางครั้งก็เรียกว่า “คอมมอนโหมดเฟลลีย์” (Common mode failure) ซึ่งเป็นความผิดพลาดที่รวมเหตุการณ์ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นพร้อม ๆ กันของอุปกรณ์มากกว่าหนึ่งอุปกรณ์ ที่นำมาลงพิจารณากรณีสัก 2 กรณีเพื่อความเข้าใจยิ่งขึ้นดังนี้

1. ไฟไหม้ที่โรงไฟฟ้าเป็นสาเหตุให้ทั้งระบบหล่อเย็นปรกติ และระบบหล่อเย็นฉุกเฉิน ล้มเหลวพร้อมกัน เพราะว่ามีน้ำของทั้งสองระบบอยู่ในเรือเดียวกัน
2. เครื่องบินตกเป็นสาเหตุให้เกิดความผิดพลาดของสายส่ง 2 เส้น เพราะสายส่งทั้งสอง อยู่บนทาวเวอร์เดียวกัน

สำหรับกรณีแรกแล้ว ระบบควรจะได้รับ การออกแบบให้ไม่เกิดความผิดพลาดคอมมอนคอสเฟลลีย์นี้เกิดขึ้น แต่สำหรับกรณีที่สองแล้วความผิดพลาดนี้เป็นที่ยอมรับได้ ซึ่งทำให้เราสามารถแบ่งคอมมอนคอสเฟลลีย์ได้ออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่กลุ่มแรกคือกลุ่มที่จะต้องแยกแยะ และกำจัดความบกพร่องนี้ให้ได้ถ้าเป็นไปได้ และกลุ่มที่สองคือกลุ่มที่สามารถยอมรับความผิดพลาดแบบคอมมอนคอสเฟลลีย์ แต่ต้องทำให้ผลที่เกิดขึ้นกระทบต่อระบบน้อยที่สุด

โดยทั่วไปแล้ว คอมมอนคอสเฟลลีย์ จะมีนิยามดังนี้ คือ “เหตุการณ์ที่เกิดจากสาเหตุภายนอกเพียงสาเหตุเดียวแต่ก่อให้เกิดความเสียหายหลายอย่างที่ไม่ได้เป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจากความเสียหายเหล่านั้นนั่นเอง” [7]

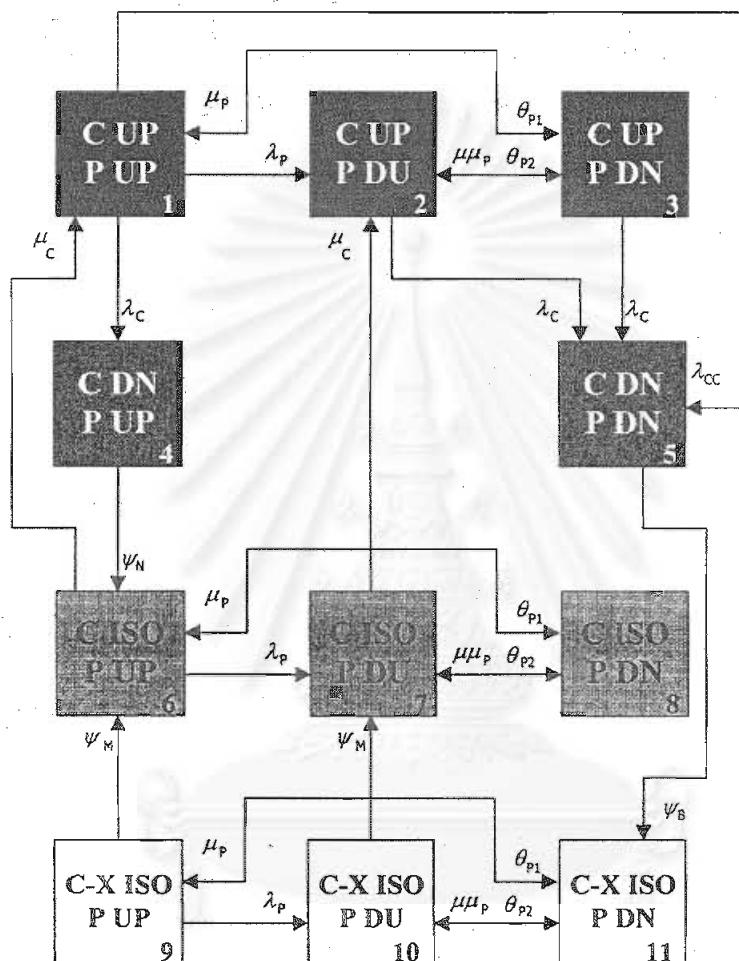
ลักษณะที่สำคัญของค่านิยามนี้มีดังนี้

1. สาเหตุที่ก่อให้เกิดจะต้องเป็นเหตุการณ์ภายนอกเพียงเหตุการณ์เดียว ที่ไม่รวมเหตุการณ์ภายในที่ก่อให้เกิดความผิดพลาด ซึ่งเหตุการณ์ภายในที่ได้กล่าวนี้เป็นความผิดพลาดแบบไม่อิสระ (Dependent failure) ซึ่งสามารถพิจารณาได้ด้วยทฤษฎีความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข (Conditional probability theory)
2. สาเหตุเพียงสาเหตุเดียวก่อให้เกิดผลกระทบหลายด้าน ซึ่งหมายถึงมีหลายอุปกรณ์ต้องเสียหายไปด้วย

5.3.2 แบบจำลองที่รวมผลของคอมมอนคอสเฟลลีย์

เมื่อได้ทราบถึงลักษณะของคอมมอนคอสเฟลลีย์ แล้วในแบบจำลองจึงจำเป็นที่จะต้องเพิ่มส่วนการวิเคราะห์ของการเปลี่ยนสถานะเนื่องจากคอมมอนคอสเฟลลีย์นี้ด้วย โดยสมมติให้

เหตุการณ์ภายนอกเกิดขึ้น และมีผลต่อทั้งระบบป้องกัน และอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน ซึ่งในแบบจำลองจะเพิ่มอัตราการเปลี่ยนสถานะดังนี้ โดยยกตัวอย่างจากรูปที่ 5.2 คือจากสถานะที่ 1 มายังสถานะที่ 5 ด้วยอัตราการเปลี่ยนสถานะเท่ากับ λ_{CC} ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แบบจำลองของระบบทั้งหมดเมื่อรวมผลของคอมมอนคอสเฟลเคียร์

สำหรับระบบป้องกันที่มีสถานะทั้งหมด 9 สถานะนั้นเมื่อรวมกับอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันเป็นระบบแล้วจะมีสถานะทั้งหมด 31 สถานะ และเมื่อรวมผลของคอมมอนคอสเฟลเคียร์แล้วจะมีอัตราการล้มเหลว λ_{CC} จากสถานะที่ 1 ไปยังสถานะที่ 13

5.4 สรุป

ในบทที่ 5 นี้กล่าวถึงแบบจำลองของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน และการรวมแบบจำลองของระบบป้องกัน และอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันเข้าด้วยกัน ซึ่งเป็นแบบจำลองขั้นสุดท้ายก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ต่อไป นอกจากนี้ยังกล่าวถึงผลของคอมมอนคอสเฟลเคียวร์ต่อแบบจำลอง ซึ่งแบบจำลองทั้งหมดนี้เกิดขึ้นตามข้อสันนิษฐานที่ได้กำหนดไว้ตั้งแต่เริ่มต้น



สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

และตัวอย่างการคำนวณ

จากบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองมาคอฟของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน อุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน และแบบจำลองของระบบป้องกันทั้งหมด ซึ่งเป็นแผนภาพสเตตสเปซ (State Space Diagram) ซึ่งจำเป็นจะต้องหาค่าความน่าจะเป็นของสถานะต่าง ๆ เพื่อทำการวิเคราะห์ ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำการคำนวณค่าความน่าจะเป็นของสถานะต่าง ๆ นอกจากนี้ยังจะกล่าวถึงกรณีที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้แก่ ค่าเอ็บบอร์มอลอันอเวลเลบิลิตี (Abnormal Unavailability) ในตอนท้ายของบทยังกล่าวถึงการนำค่ากรณีดังกล่าวไปใช้ในการหาค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบประจำสำหรับระบบป้องกันอีกด้วย

6.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model)

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะได้กล่าวในบทนี้จะเป็นการนำเมตริกซ์แสดงการเปลี่ยนสถานะแบบเฟ้นสุ่มมาใช้ในการแก้ปัญหา โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับแบบจำลองของระบบป้องกันทั้งหมดที่ระบบป้องกันมี 3 สถานะ และสำหรับแบบจำลองของระบบป้องกันทั้งหมดที่ระบบป้องกันมี 9 สถานะดังนี้

6.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบป้องกันทั้งหมดที่ระบบป้องกันมี 3 สถานะ

จากรูปที่ 5.2 ในบทที่ 5 สามารถเขียนอยู่ในรูปของเมตริกซ์แสดงการเปลี่ยนสถานะแบบเฟ้นสุ่มได้ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		λ_p	θ_{p1}	λ_c							
2			θ_{p2}		λ_c						
3	μ_p	$\mu\mu_p$			λ_c						
4						ψ_N					
5											ψ_B
6	μ_c						λ_p	θ_{p1}			
7		μ_c						θ_{p2}			
8						μ_p	$\mu\mu_p$				
9						ψ_M				λ_p	θ_{p1}
10							ψ_M				θ_{p2}
11									μ_p	$\mu\mu_p$	

รูปที่ 6.1 เมตริกซ์แสดงการเปลี่ยนสถานะแบบเฟ้นสุ่มสำหรับระบบป้องกันทั้งหมด
ที่ระบบป้องกันมี 3 สถานะ

โดยที่ยังมีสมการที่จำเป็นสำหรับรูปที่ 6.1 ดังนี้

$$a_{ii} = 1 - (\Delta t \times \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij}) \quad (6.1)$$

โดยที่

a_{ii} เป็นสมาชิกในแนวทแยงของเมตริกซ์สำหรับแถวที่ i คอลัมน์ที่ i ในรูปที่ 6.1

a_{ij} เป็นสมาชิกในแนวทแยงของเมตริกซ์สำหรับแถวที่ i คอลัมน์ที่ j ในรูปที่ 6.1

และสามารถแก้สมการหาค่าขอบเขตได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\alpha \times P = \alpha \quad (6.2)$$

$$(\alpha - I) \times P = 0 \quad (6.3)$$

และสมการที่สำคัญอีกสมการหนึ่งในการแก้สมการที่ (6.3) คือ ผลรวมของทุก ๆ สถานะ จะต้องมามีค่าเท่ากับ 1 ดังนี้

$$\sum_{i=1}^{11} P_i = 1 \quad (6.4)$$

และเพื่อให้สะดวกในการคำนวณจะกำหนดให้ Δt มีค่าเท่ากับ 1 สำหรับการแก้ปัญหสมการ $X \cdot [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_n]^T = b$ นั้นสามารถทำได้ด้วยการใช้กฎของเครเมอร์ (Kramer's Rule) นั้นเอง

6.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบป้องกันทั้งหมดที่ระบบป้องกันมี 9 สถานะ

จากรูปที่ 5.3 ในบทที่ 5 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์แสดงการเปลี่ยนสถานะแบบฟันสุ่มได้ดังนี้

	1	2	3	...	29	30	31
1	$a_{1,1}$	$a_{1,2}$	$a_{1,3}$	...	$a_{1,29}$	$a_{1,30}$	$a_{1,31}$
2	$a_{2,1}$	$a_{2,2}$	$a_{2,3}$	...	$a_{2,29}$	$a_{2,30}$	$a_{2,31}$
3	$a_{3,1}$	$a_{3,2}$	$a_{3,3}$	...	$a_{3,29}$	$a_{3,30}$	$a_{3,31}$
...
29	$a_{29,1}$	$a_{29,2}$	$a_{29,3}$	...	$a_{29,29}$	$a_{29,30}$	$a_{29,31}$
30	$a_{30,1}$	$a_{30,2}$	$a_{30,3}$	...	$a_{30,29}$	$a_{30,30}$	$a_{30,31}$
31	$a_{31,1}$	$a_{31,2}$	$a_{31,3}$	...	$a_{31,29}$	$a_{31,30}$	$a_{31,31}$

รูปที่ 6.2 เมทริกซ์แสดงการเปลี่ยนสถานะแบบฟันสุ่มสำหรับระบบป้องกันทั้งหมด ที่ระบบป้องกันมี 9 สถานะ

ซึ่งสามารถแก้ปัญหได้ด้วยวิธีเดียวกับที่ได้กล่าวไว้สำหรับระบบป้องกันที่มี 3 สถานะ

6.2 ค่าเฝ้าบนอร์มอลอันอเวเลเลบิลิตี้ (Abnormal Unavailability)

เมื่อเราได้ทั้งแบบจำลองของระบบป้องกันแบบต่าง ๆ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้ว คงจะไม่มีประโยชน์อันใดถ้าแบบจำลองเหล่านั้นไม่สามารถบอกอะไรได้ ดังนั้นจากเอกสารอ้างอิง [8] ได้ให้คำนิยามของครรรชนีค่าหนึ่งไว้ คือ “ค่าเฝ้าบนอร์มอลอันอเวเลเลบิลิตี้” ดังนี้

“ค่าเฝ้าบนอร์มอลอันอเวเลเลบิลิตี้ คือ ความน่าจะเป็นที่ระบบที่ได้รับการป้องกันจะไม่สามารถแยกแยะ และตอบสนองต่อการล้มเหลวของอุปกรณ์เพราะความไม่พร้อมของระบบป้องกัน” (หรือ “A probabilistic measure of the inability of a protected system to recognize and respond to a component failure because of protective system unreadiness”) ซึ่งสามารถอธิบายได้ ดังนี้คือ ค่าความน่าจะเป็นที่ทั้งระบบป้องกัน และอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันไม่อยู่ในการบริการ ซึ่งค่าครรรชนีค่านี้แสดงให้เห็นถึงลักษณะของระบบป้องกัน และสามารถหาได้จากแบบจำลองที่ได้กล่าวมาในบทที่แล้วดังนี้

6.2.1 ค่าเฝ้าบนอร์มอลอันอเวเลเลบิลิตี้สำหรับระบบป้องกันทั้งหมดที่ระบบป้องกันมี 3 สถานะ

สำหรับระบบป้องกันทั้งหมดที่ระบบป้องกันมี 3 สถานะ สามารถแสดงค่าครรรชนีดังกล่าวได้ดังนี้

$$AU = P_5 + P_8 + P_{11} \quad (6.5)$$

โดยที่ AU หมายถึง ค่าเฝ้าบนอร์มอลอันอเวเลเลบิลิตี้
 P_n หมายถึง ค่าความน่าจะเป็นของค่าขอบเขตของสถานะที่ n

6.2.2 ค่าเฝ้าบนอร์มอลอันอเวเลเลบิลิตี้สำหรับระบบป้องกันทั้งหมดที่ระบบป้องกันมี 9 สถานะ

สำหรับระบบป้องกันทั้งหมดที่ระบบป้องกันมี 9 สถานะสามารถแสดงค่าครรรชนีดังกล่าวได้ดังนี้

$$AU = P_{13} + P_{22} + P_{31} \quad (6.6)$$

โดยที่ AU หมายถึง ค่าเฝ้าบนอร์มอลอันอเวเลเลบิลิตี้
 P_n หมายถึง ค่าความน่าจะเป็นของค่าขอบเขตของสถานะที่ n

6.3 การหาค่าเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบระบบป้องกันแบบต่าง ๆ

จากการใช้แบบจำลองที่ได้กล่าวไว้ในบทที่แล้ว และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้แสดงไว้อย่างละเอียดในบทนี้ นำไปสู่การหาค่าประมาณของเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบประจำระบบป้องกันแบบต่าง ๆ เพราะว่าในแบบจำลองนั้นได้รวมผลของอุปกรณ์ต่าง ๆ ผลของระบบป้องกันสำรอง ผลของค่าอัตราล้มเหลว และอัตราซ่อมแซมของระบบที่ได้รับการป้องกัน และนอกจากนี้ยังสามารถรวมผลของคอมมอนคอสเฟลลิตี้ได้อีกด้วย

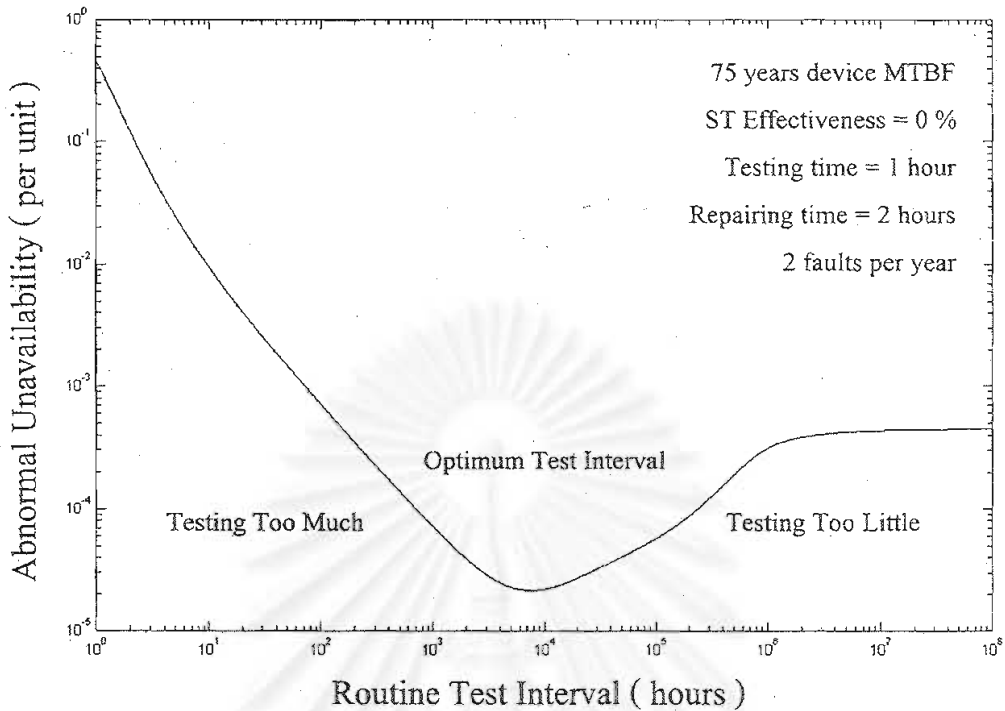
หลังจากนี้จะเป็นตัวอย่างแสดงถึงระบบป้องกันแบบง่าย ๆ ได้แก่ระบบป้องกันแบบที่ใช้รีเลย์กระแสเกินที่มีรีเลย์เพียงชุดเดียวดังรูปที่ 4.9 ในบทที่ 4

กำหนดค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 F_R &= 0.013 \text{ หรือ } 1/75 \text{ ครั้ง/ปี} \\
 ST &= 0 \text{ หน่วย} \\
 \lambda_C &= 2 \text{ ครั้ง/ปี} \\
 R_T &= 0.5 \text{ ครั้ง/ชั่วโมง} \\
 R_R &= 1 \text{ ครั้ง/ชั่วโมง} \\
 \mu_C &= 175 \text{ ครั้ง/ปี} \\
 \theta_{PM} &= \text{ตัวแปรอิสระ} \\
 \psi_N &= 43200 \text{ ครั้ง/ชั่วโมง} \\
 \psi_B &= 21600 \text{ ครั้ง/ชั่วโมง} \\
 \psi_M &= 0.1 \text{ ครั้ง/ชั่วโมง}
 \end{aligned}$$

โดยที่ระบบตัวอย่างนี้ทุก ๆ อุปกรณ์ในระบบป้องกันจะมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหมือนกันหมดทุกอุปกรณ์ แต่ในการวิเคราะห์ซึ่งอยู่ในบทถัดไปนั้นจะกล่าวถึงผลของการที่อุปกรณ์แต่ละอุปกรณ์มีค่าพารามิเตอร์ต่างกันออกไป

เมื่อเรานำค่าต่าง ๆ ไปใส่ในแบบจำลอง และทำการคำนวณค่าความน่าจะเป็นของสถานะต่าง ๆ โดยทำการเปลี่ยนค่า θ_{PM} ซึ่งเป็นตัวแปรอิสระไปเรื่อย ๆ ก็จะสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ได้ดังนี้



รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแบริบอร์มอลอันอเวลเลบิลิตี้

และค่าช่วงเวลาในการทำการทดสอบระบบป้องกันในความสัมพันธ์แบบ Log-Log

จากรูปที่ 6.3 จะเห็นได้ว่าเราสามารถหาค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบประจำระบบป้องกันในรูปแบบที่กำหนดได้ โดยที่ในรูปนี้มีค่าประมาณ 7,474 ชั่วโมง หรือ ประมาณ 311 วัน หรือ ประมาณ 10.38 เดือนโดยที่มีค่าครรชนีแบริบอร์มอลอันอเวลเลบิลิตี้เท่ากับ 2.14×10^{-5}

จากค่าที่ได้ทั้งสองค่าคือ ค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบระบบป้องกันแบบต่าง ๆ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบป้องกันรูปแบบต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง และสำหรับค่าแบริบอร์มอลอันอเวลเลบิลิตี้ของระบบป้องกันที่ช่วงเวลาทดสอบต่าง ๆ สามารถนำไปช่วยในการวางแผนการทดสอบประจำระบบป้องกันแบบต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม

6.4 สรุป

บทนี้เป็นการนำเสนอถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองที่ได้นำเสนอในบทผ่าน ๆ มา และได้ให้นิยามของครรชนีที่สำคัญในการวิเคราะห์สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นอกจากนี้

นี่ยังได้แสดงให้เห็นถึงช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบประจำ โดยการแสดงตัวอย่างการคำนวณระบบป้องกันแบบง่าย ๆ ซึ่งจากตัวอย่างนี้เอง สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่าระบบป้องกันจะมีค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบประจำอยู่ช่วงเวลาหนึ่ง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

ผลการศึกษา และวิเคราะห์ผล ของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน

ในบทที่ผ่านมา ๆ มาเราได้กล่าวถึงแบบจำลองของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน แบบจำลองของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน และระบบป้องกันทั้งหมด ซึ่งในแบบจำลองต่าง ๆ เหล่านี้มีค่าพารามิเตอร์หลายตัว เช่น การรวมกันแบบอนุกรม การรวมกันแบบขนาน F_R ST λ_p ฯลฯ ซึ่งพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้สามารถปรับแต่งค่าได้อย่างอิสระในวิธานิพนธ์นี้ และในบทที่ 6 เราได้กล่าวถึงวิธีในการหาค่าตรงขึ้นที่สำคัญ ได้แก่ ค่าแบริบอร์มอลอันอเวเลบิลิตี้ (Abnormal Unavailability) ดังนั้นในบทนี้เราจะกล่าวถึงการวิเคราะห์ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ (Sensitivity Study)

7.1 วิธีการศึกษา

ในการศึกษานี้จะให้ค่า θ_{PM} หรืออัตราการทดสอบอุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ตัวหนึ่งในแบบจำลองของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกันเป็นตัวแปรอิสระ และให้ค่าแบริบอร์มอลอันอเวเลบิลิตี้เป็นตัวแปรตาม โดยทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่สนใจ และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ มีค่าคงที่ และเมื่อได้ผลการทดลองออกมาแล้วก็จะนำมาทำการลงกราฟแบบความสัมพันธ์ Log-Log และทำการวิเคราะห์ผลต่อไป โดยการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ใน 2 แง่มุม คือ ในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีผลต่อค่าแบริบอร์มอลอันอเวเลบิลิตี้ และอีกเรื่องหนึ่งคือการเปลี่ยนแปลงนี้มีผลกระทบต่อช่วงเวลาในการทำการทดสอบประจำอย่างไร

โดยที่ในการศึกษาต่อไปนี้จะใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เป็นพื้นฐานดังนี้ [1-3]

F_R	=	1/75 ครั้ง/ปี หรือ MTBF = 75 ปี
ST	=	0.00 ต่อหน่วย (perunit)
λ_C	=	2 ครั้ง/ปี
R_T	=	2 ชั่วโมง
R_R	=	1 ชั่วโมง
μ_C	=	175 ครั้ง/ปี
θ_{PM}	=	ตัวแปรต้น (อยู่ระหว่าง 0.00000001 กับ 1.00)
ψ_N	=	43200 การทำงาน/ชั่วโมง (operations/hour)

$$\psi_B = 21600 \text{ การทำงาน/ชั่วโมง (operations/hour)}$$

$$\psi_M = 0.1 \text{ การทำงาน/ชั่วโมง (operations/hour)}$$

โดยที่ในการคำนวณจะต้องแปลงค่าต่าง ๆ เหล่านี้ให้มีหน่วยเดียวกันเสียก่อน ซึ่งในการวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้มีหน่วยเป็น ครั้ง/ชั่วโมง เพื่อให้สามารถคำนวณได้ในเมตริกนั่นเอง

7.2 การศึกษาผลของการรวมกันแบบต่าง ๆ

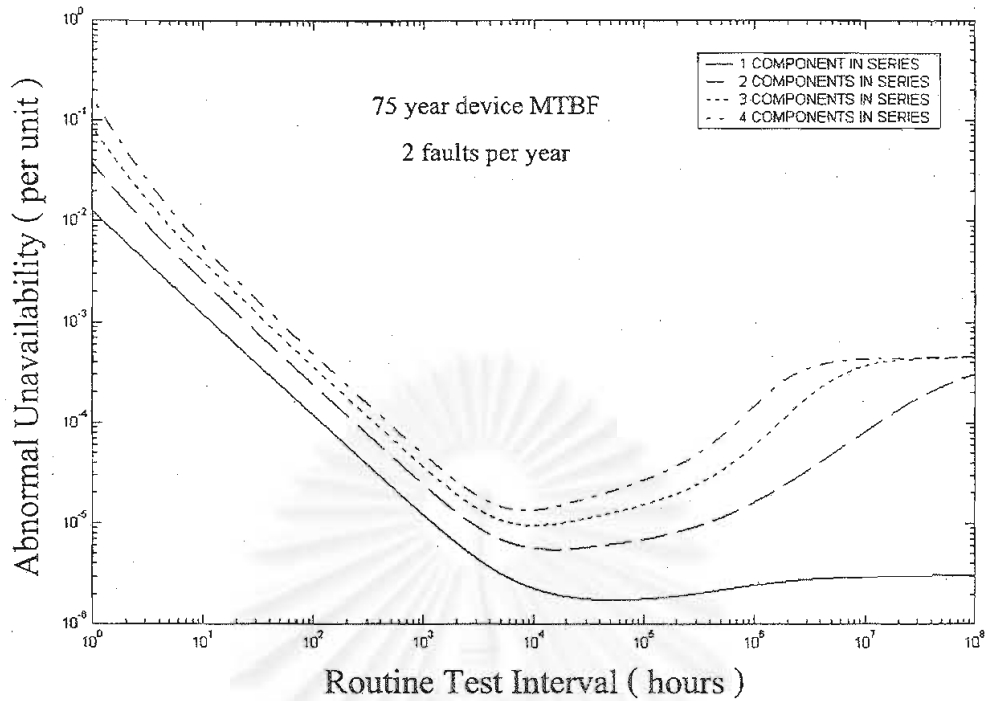
เราจะเริ่มต้นจากวิเคราะห์ผลของรูปแบบการรวมกันแบบพื้นฐาน ซึ่งได้แก่การรวมกันแบบอนุกรม และการรวมกันแบบขนาน เพราะว่าการรวมกันสองแบบนี้เป็นรูปแบบการรวมกันแบบพื้นฐานในระบบทั่วไปดังนั้นเราจะเริ่มด้วยการรวมกันแบบอนุกรมดังนี้

7.2.1 การรวมกันแบบอนุกรม

ในการทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนของอุปกรณ์ที่ทำการรวมกันแบบอนุกรมเป็นจำนวนเท่ากับ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับโดยที่พารามิเตอร์อื่น ๆ คงที่ ซึ่งได้ผลการศึกษาดังนี้

จากรูปที่ 7.1 และตารางที่ 7.1 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการรวมกันแบบอนุกรมมีผลกระทบต่อค่าแอ็บนอร์มอลอันอเวลเลบิลิตีของระบบโดยรวม โดยที่สามารถสรุปได้ดังนี้คือยังมีอุปกรณ์ในระบบป้องกันทำงานกันแบบอนุกรมมากเท่าไร ค่าแอ็บนอร์มอลอันอเวลเลบิลิตีของระบบยังมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเชื่อถือได้ที่ลดลงของระบบที่มีอุปกรณ์ทำงานกันแบบอนุกรม ทั้งนี้เป็นเพราะว่าการที่อุปกรณ์ต่ออนุกรมกันนั้นถ้ามีอุปกรณ์ใดเพียงอุปกรณ์เดียวล้มเหลว ทั้งระบบก็จะล้มเหลวด้วย ซึ่งสอดคล้องกันกับ [7]

นอกจากนี้แล้วในรูปที่ 7.1 ยังแสดงให้เห็นถึงการที่ระบบประกอบไปด้วยจำนวนอุปกรณ์ที่ทำงานกันแบบอนุกรมหลาย ๆ อุปกรณ์จะมีช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบประจำที่เปลี่ยนแปลงไปดังนี้คือ ยังมีอุปกรณ์ทำงานกันแบบอนุกรมมากเท่าไรจำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบประจำถี่ขึ้นไปตามจำนวนที่เพิ่มขึ้นของอุปกรณ์



รูปที่ 7.1 ผลกระทบของการรวมกันแบบอนุกรม

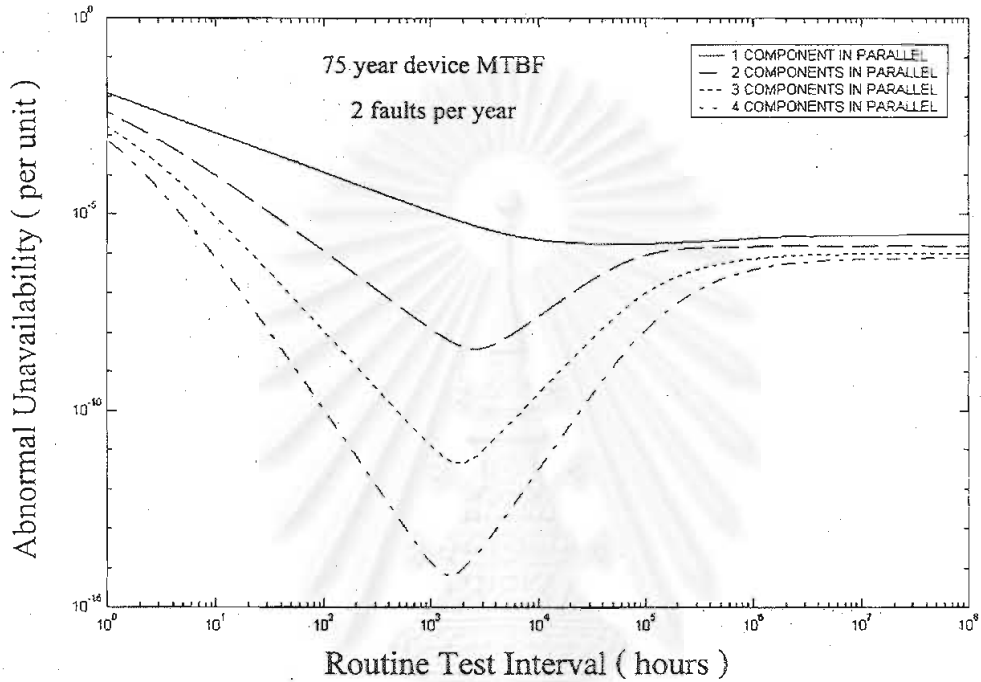
ตารางที่ 7.1 ค่าแอ็บนอร์มอลอวเนอเลบิลิตี และช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบอุปกรณ์ สำหรับผลของอุปกรณ์ที่ทำงานกันแบบอนุกรม

จำนวนอุปกรณ์ต่ออนุกรม	ORTI (Months)	Abnormal Unavailability
1	76.61	1.74E-06
2	20.79	5.48E-06
3	13.91	9.47E-06
4	11.85	1.35E-05

หมายเหตุ: ORTI หมายถึง ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบประจำ (Optimal routine test interval) มีหน่วยเป็น “เดือน”

7.2.2 การรวมกันแบบขนาน

ในการศึกษาผลของการรวมกันแบบขนานจะทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนของอุปกรณ์ที่ทำการรวมกันแบบขนานเป็นจำนวนเท่ากับ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ โดยที่พารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ มีค่าคงที่ โดยมีผลการศึกษาดังนี้



รูปที่ 7.2 ผลกระทบของการรวมกันแบบขนาน

ตารางที่ 7.2 ค่าแอมป์นอร์มอลอันอเวเลบิลิตี และช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบอุปกรณ์ สำหรับผลของอุปกรณ์ที่ทำงานกันแบบขนาน

จำนวนอุปกรณ์ต่อขนาน	ORTI (Months)	Abnormal Unavailability
1	76.61	1.74E-06
2	3.58	3.80E-09
3	2.54	4.63E-12
4	2.08	6.49E-15

จากรูปที่ 7.2 และตารางที่ 7.2 แสดงให้เห็นถึงผลของการรวมกันแบบขนานว่ามีผลกระทบทั้งต่อค่าแอมป์นอร์มอลอันอเวเลบิลิตี และค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบอุปกรณ์ดังนี้

สำหรับค่าแอ็บนอร์มอลอันอเวลบิลิตี้นั้นจะมีค่าลดลงตามจำนวนอุปกรณ์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงมีค่าความเชื่อถือได้สูงขึ้นตามจำนวนอุปกรณ์ที่ทำงานขนานกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าโอกาสที่จะทำงานล้มเหลวของทั้งระบบนั้นจะหมายถึงว่าทุกอุปกรณ์ทำงานล้มเหลว ซึ่งการล้มเหลวเพียงอุปกรณ์เดียวนั้นจะไม่ทำให้ทั้งระบบล้มเหลวซึ่งก็เป็นไปตาม [7]

นอกจากนี้แล้วค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำงานนั้นจะลดลงด้วยเช่นเดียวกันกับการรวมกันแบบอนุกรม ซึ่งแสดงว่าจะต้องทำการทดสอบประจำมากขึ้น ถ้ามีอุปกรณ์ทำงานกันแบบขนานเพิ่มขึ้น

ซึ่งจากผลกระทบของการรวมกันแบบต่าง ๆ นี้สามารถที่จะเปรียบเทียบกันได้ดังนี้ จะเห็นได้ว่าจากรูปที่ 7.1 และ 7.2 นั้น ผลของการรวมกันแบบอนุกรมจะทำให้ค่าแอ็บนอร์มอลอันอเวลบิลิตี้นั้นเพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามกับการรวมกันแบบขนาน แต่จะเห็นได้ว่าการรวมกันแบบขนานจะสามารถสังเกตเห็นผลได้ชัดเจนกว่า

อย่างไรก็ตามทั้งการรวมกันแบบอนุกรม และการรวมกันแบบขนานนั้นทำให้ค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทดสอบประจำสั้นขึ้น โดยที่การรวมกันแบบขนานยังคงมีผลกระทบต่อช่วงเวลานี้มากกว่าการรวมกันแบบอนุกรม ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ยังมีอุปกรณ์ประกอบกันเป็นระบบมากขึ้นเท่าไร ยิ่งที่จะทำให้ต้องมีการทดสอบประจำมากขึ้นเท่านั้น

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าระบบป้องกันที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ภายในระบบต่างกัน ซึ่งความแตกต่างนี้ประกอบไปด้วยจำนวนอุปกรณ์ และรูปแบบการรวมกัน จะมีค่าความเชื่อถือได้แตกต่างกัน และนอกจากนี้แล้วค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทดสอบประจำก็ยังคงแตกต่างกันด้วย

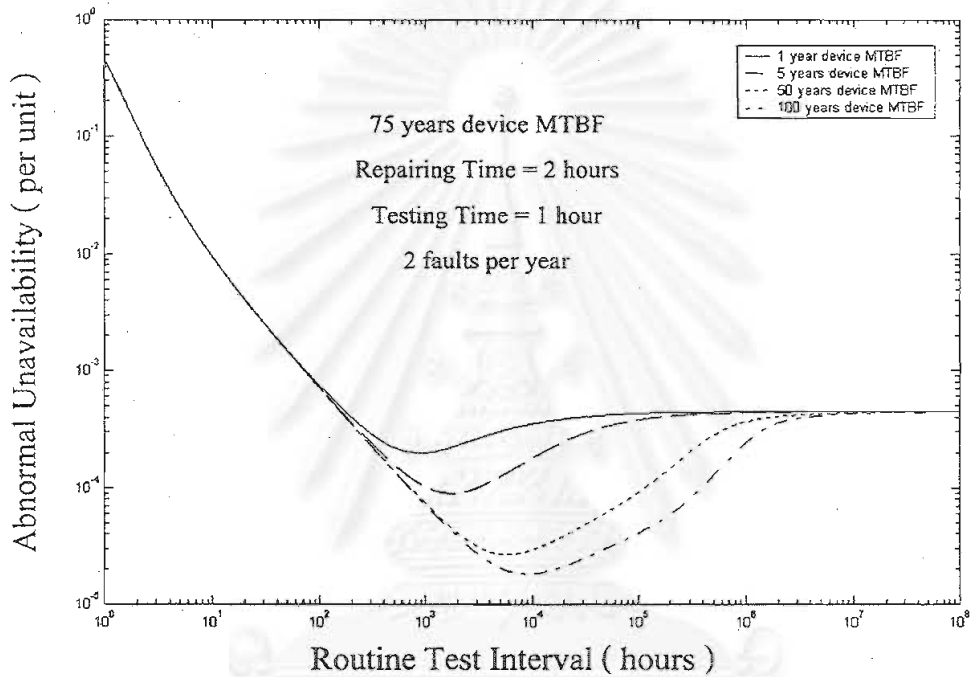
7.3 การศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน

เนื่องจากในแบบจำลองที่ได้นำเสนอไปนั้นมีอัตราการเปลี่ยนสถานะหลายอยู่หลายค่า ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ในแบบจำลอง ซึ่งพารามิเตอร์ที่จะนำเสนอในส่วนนี้มีดังนี้คือ F , STR , และ R

ในการศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อความเชื่อถือได้ของระบบป้องกัน ในวิทยานิพนธ์นี้จะนำระบบป้องกันที่มีรูปแบบที่ง่ายที่สุดได้แก่ ระบบป้องกันที่ใช้รีเลย์กระแสเกินแบบมีรีเลย์ชุดเดียว หรือ RICTIPSU1 ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบป้องกัน

7.3.1 อัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน

จากรูปที่ 7.3 เป็นการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการล้มเหลวของระบบป้องกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ต่าง ๆ มีผลกระทบอย่างมากในความสำเร็จได้โดยรวมของระบบ ซึ่งเป็นไปตามคาดการณ์ว่ายิ่งอุปกรณ์ต่าง ๆ มีค่าอัตราการล้มเหลวมากเท่าไร หรือว่ามีช่วงเวลาก่อนที่จะล้มเหลวสั้น จะทำให้ระบบโดยรวมมีค่าความสำเร็จได้ต่ำ ในทางตรงกันข้ามก็เป็นจริงเช่นเดียวกัน



รูปที่ 7.3 ผลกระทบของอัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน

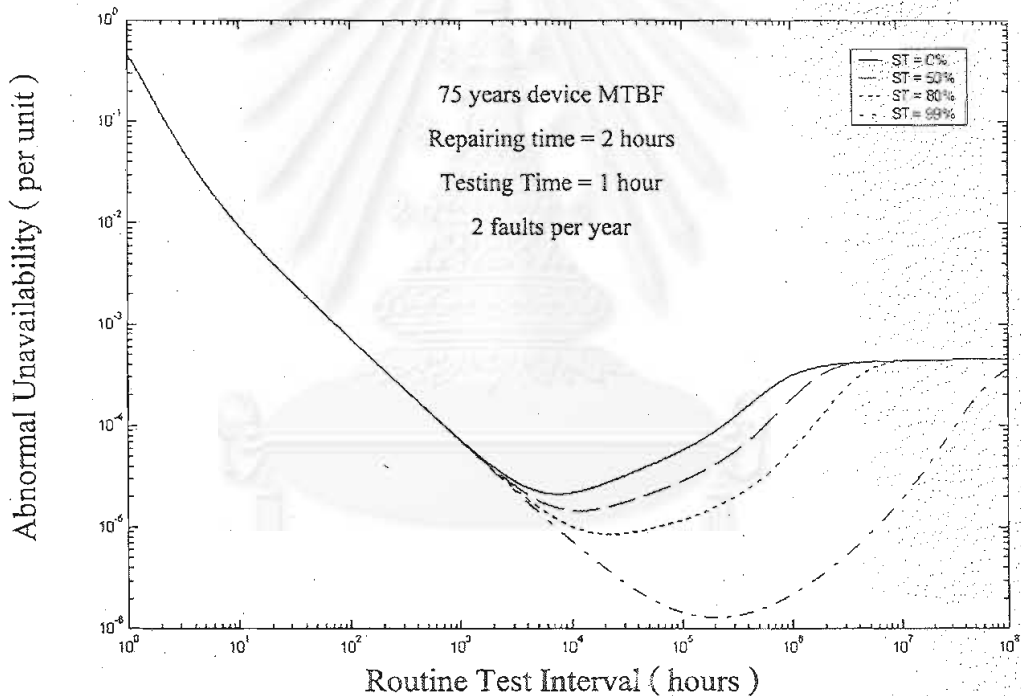
ตารางที่ 7.3 ค่าเอ็บบนอร์มอลอันอเวเลบิลิตี และช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบอุปกรณ์ สำหรับผลของอัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน

Fr (years MTBF)	ORTI (Months)	Abnormal Unavailability
1	1.22	1.99E-04
5	2.40	8.96E-05
50	8.11	2.68E-05
100	12.48	1.82E-05

นอกจากผลกระทบต่อค่าแอมป์นอร์มอลอันอเวเลบิลิตีแล้ว ยังมีผลกระทบต่อช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกันอีกด้วย โดยที่สามารถสรุปได้ดังนี้ คือ เมื่อค่าอัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ในระบบป้องกันมีค่ามาก ก็ยังมีความจำเป็นที่จะต้องทำการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในระบบนั้น ๆ มากยิ่งขึ้นด้วย

7.3.2 ธรรมชาติประสิทธิผลของฟังก์ชันตรวจสอบตัวเอง

จากรูปที่ 7.4 จะเห็นได้ว่าเป็นการศึกษาถึงผลของธรรมชาติประสิทธิผลของฟังก์ชันตรวจสอบตัวเอง ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในอุปกรณ์ที่มีฟังก์ชันตรวจสอบตัวเอง เพราะว่าเป็นตัวแสดงถึงประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในการตรวจจับความบกพร่องในอุปกรณ์นั้น ๆ เอง



รูปที่ 7.4 ผลกระทบของธรรมชาติประสิทธิผลของฟังก์ชันตรวจสอบตัวเอง

ผลจากรูปที่ 7.4 และตารางที่ 7.4 แสดงให้เห็นว่า ระบบที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่มีฟังก์ชันตรวจสอบตัวเองจะช่วยปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบป้องกัน โดยที่ยังมีประสิทธิภาพในการทำงานตรวจสอบสูงเท่าไรก็จะยิ่งช่วยให้ระบบมีค่าแอมป์นอร์มอลอันอเวเลบิลิตี้น้อยลงเท่านั้น

ตารางที่ 7.4 ค่าเฉลี่ยนอร์มอลอันอเวเลบิลิตี และช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบอุปกรณ์ สำหรับผลของครรชนีประสิทธิผลของฟังก์ชันตรวจสอบตัวเองของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน

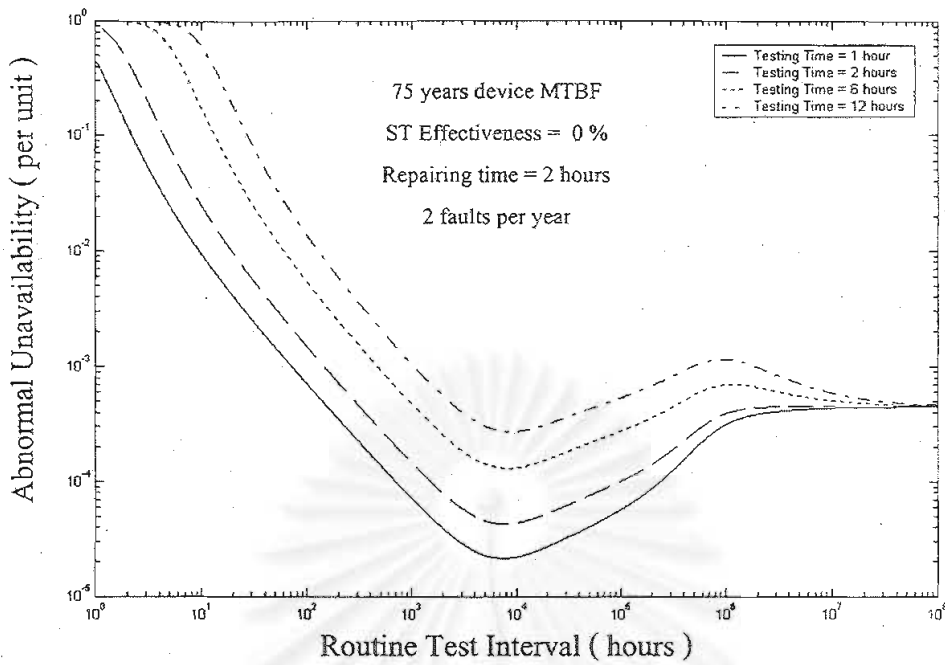
ST(%)	ORTI (Months)	Abnormal Unavailability
0	10.38	2.14E-05
50	16.09	1.46E-05
80	31.12	8.52E-06
99	280.72	1.29E-06

นอกจากนี้แล้วยังช่วยในด้านของการบำรุงรักษาอีกด้วย เพราะว่าจากตารางที่ 7.4 จะเห็นได้ว่ายิ่งฟังก์ชันตรวจสอบตัวเองมีประสิทธิผลมากเท่าไร ระบบก็จะต้องการการตรวจสอบประจำ น้อยลงเท่านั้น แต่ก็ยังมีข้อสังเกตว่า ถึงแม้ว่าอุปกรณ์ต่าง ๆ จะมีฟังก์ชันตรวจสอบตัวเองก็ตาม แต่ถ้าฟังก์ชันนั้น ๆ ไม่มีประสิทธิภาพที่ดีพอ ก็ยังคงจำเป็นที่จะต้องทำการตรวจสอบประจำอยู่ดี ซึ่งจะเห็นได้ดังในตารางที่ 7.4 ในอุปกรณ์ที่มีค่า ST เท่ากับ 50%

7.3.3 เวลาที่ใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ในระบบป้องกัน

จากรูปที่ 7.5 และตารางที่ 7.5 เป็นการแสดงผลการศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบอุปกรณ์แต่ละครั้งในระบบป้องกัน ซึ่งก็ได้ผลตามที่ควรจะเป็นดังนี้คือ ยิ่งการทดสอบอุปกรณ์กินเวลายาวนานเท่าไร ระบบป้องกันยิ่งมีค่าความเชื่อถือได้ลดน้อยลง หรือมีค่าเฉลี่ยนอร์มอลอันอเวเลบิลิตีมากขึ้นนั่นเอง ซึ่งค่าเวลาในการทดสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ นี้ค่อนข้างที่จะมีผลต่อความเชื่อถือได้ของระบบทั้งหมดมาก

สำหรับผลที่เกิดขึ้นกับค่าช่วงเวลาในการทำการทดสอบประจําวัน โดยรวมแล้วไม่ค่อยมีผลกระทบมากนัก เพราะจากผลที่เกิดขึ้นยังอยู่ในช่วง 10 - 12 เดือน



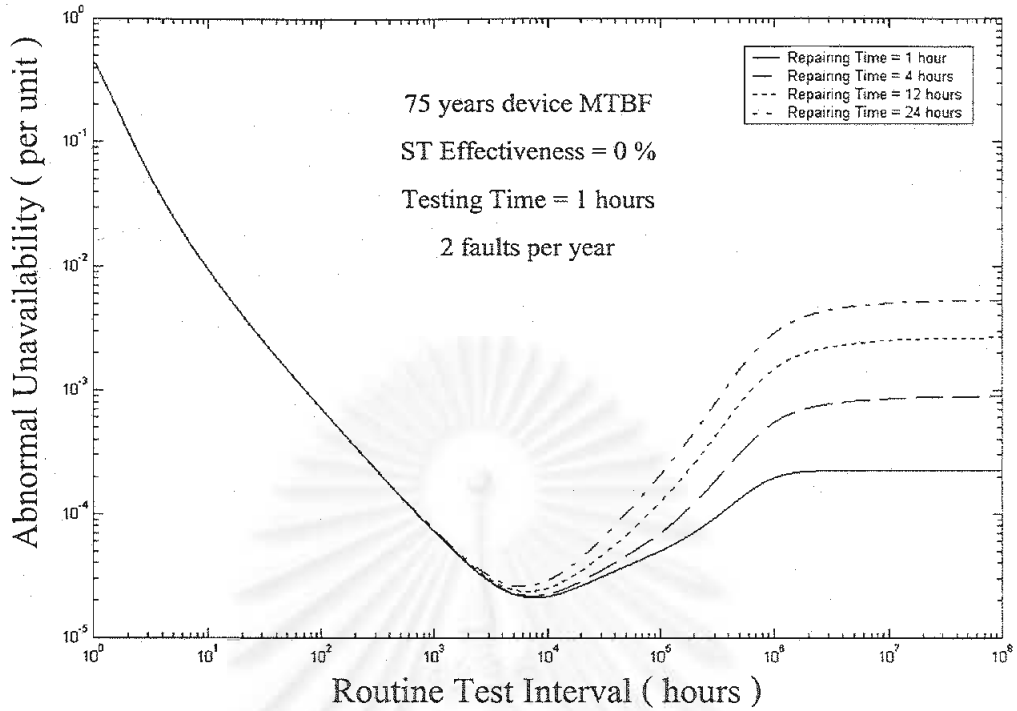
รูปที่ 7.5 ผลกระทบของเวลาที่ใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ในระบบป้องกัน

ตารางที่ 7.5 ค่าเอ็นบนอร์มอลอันอเวลบิลิตี้ และช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบอุปกรณ์ สำหรับผลของเวลาในการทดสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน

Rt (hours)	ORTI (Months)	Abnormal Unavailability
1	10.38	2.14E-05
2	10.69	4.27E-05
6	11.38	1.31E-04
12	12.25	2.72E-04

7.3.4 เวลาในการซ่อมแซมอุปกรณ์ในระบบป้องกัน

จากรูปที่ 7.6 และตารางที่ 7.6 แสดงให้เห็นถึงผลของการใช้เวลาในการซ่อมแซมอุปกรณ์ ซึ่งผลที่ได้ก็เป็นไปตามที่ควรจะเป็น เพราะว่ายิ่งเราใช้เวลาในการซ่อมแซมอุปกรณ์นานเท่าไร เราก็จะได้ระบบป้องกันที่มีค่าความเชื่อถือได้ต่ำลงไปเท่านั้น ดังนั้นการซ่อมแซมอุปกรณ์ควรทำให้เร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ถึงแม้ว่าจะมีผลต่อค่าเอ็นบนอร์มอลอันอเวลบิลิตี้ไม่มากนักก็ตามที่



รูปที่ 7.6 ผลของเวลาในการซ่อมแซมอุปกรณ์ในระบบป้องกัน

ตารางที่ 7.6 ค่าเอ็บนอร์มอลอันอเวเลบิลิตี้ และช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบ อุปกรณ์สำหรับผลของเวลาในการซ่อมแซมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน

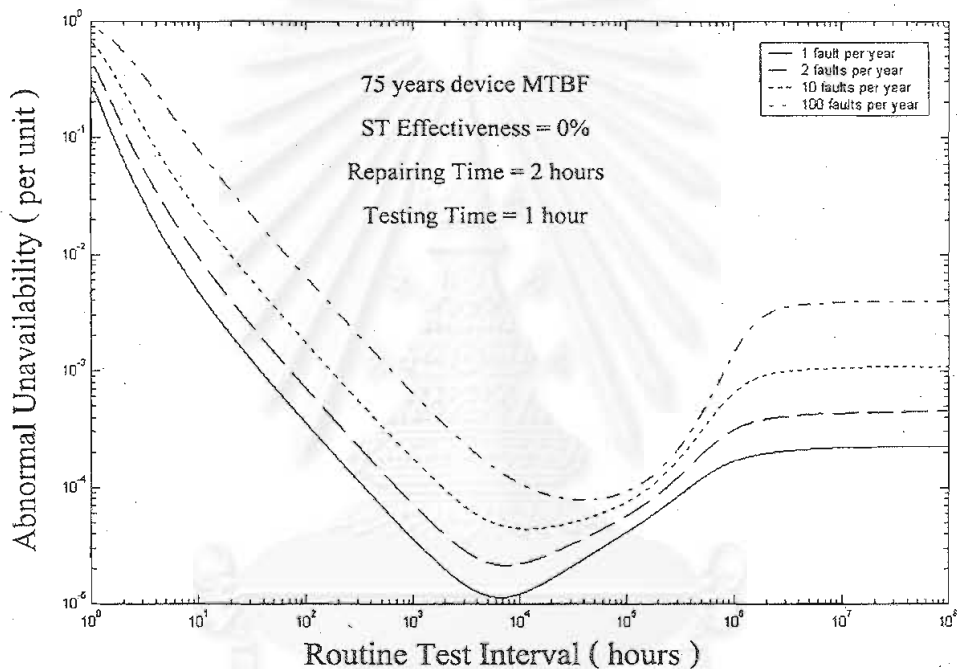
Rr (hours)	ORTI (Months)	Abnormal Unavailability
1	10.56	2.12E-05
4	10.08	2.19E-05
12	9.16	2.37E-05
24	8.29	2.61E-05

นอกจากนี้แล้วยังทำให้ช่วงเวลาในการทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงด้วย เพราะการซ่อมแซมที่รวดเร็วจะทำให้ไม่ต้องบำรุงรักษาบ่อยเท่ากับการซ่อมแซมแบบช้า

7.4 การศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน

สำหรับอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันแล้วจะมีพารามิเตอร์ให้ศึกษาดังต่อไปนี้ คือ λ_c , μ_c และ ψ_M ซึ่งพารามิเตอร์บางตัวเราไม่สามารถควบคุมได้ได้แก่ λ_c แต่สำหรับค่า μ_c และ ψ_M นั้นเราสามารถที่จะปรับปรุงได้ และจะทำให้มีผลต่อการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบโดยรวมด้วย

7.4.1 อัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน



รูปที่ 7.7 ผลของอัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน

ในรูปที่ 7.7 และตารางที่ 7.7 นั้นเป็นการแสดงให้เห็นถึงผลของอัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้คือ ยิ่งอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันเกิดความผิดปกติบ่อยครั้งเท่าไร ก็จะทำให้ระบบโดยรวมมีความเชื่อถือได้ลดน้อยลง ซึ่งผลที่ได้ก็ควรจะเป็นเช่นนั้น และก็เป็นไปตามบทความ [3]

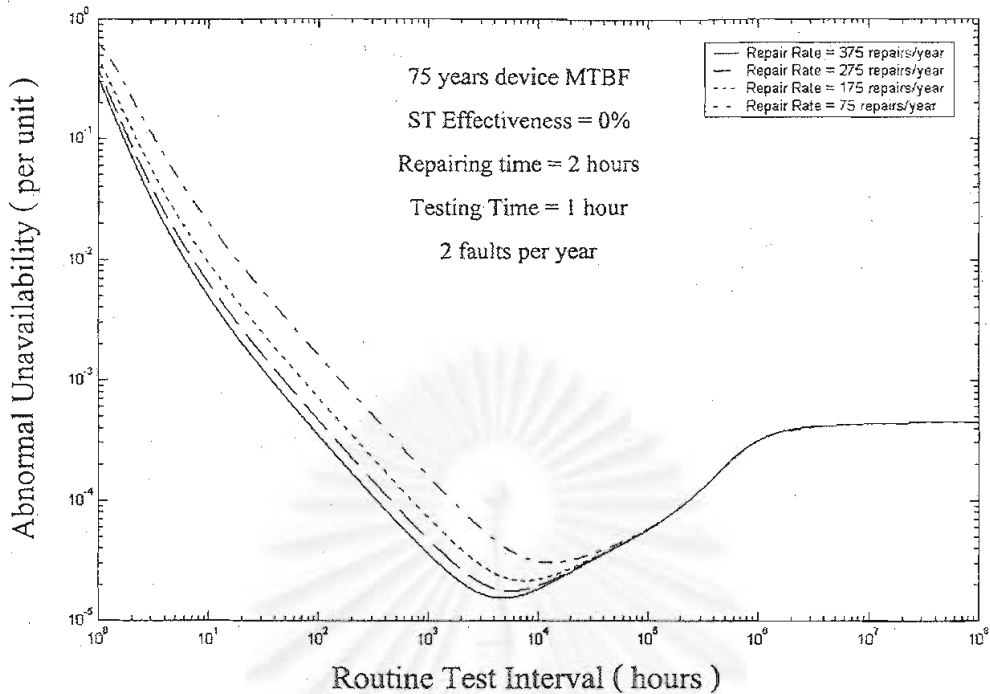
ตารางที่ 7.7 ค่าแอ็บนอร์มอลอันอเวเลบิลิตี้ และช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบอุปกรณ์ สำหรับผลของอัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน

Fc (faults/year)	ORTI (Months)	Abnormal Unavailability
1	9.19	1.14E-05
2	10.38	2.14E-05
10	16.05	4.40E-05
100	55.09	7.82E-05

นอกจากนี้แล้วยังได้ผลของช่วงเวลาที่เหมาะสม ซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าที่ทำให้ประหลาดใจมาก เพราะว่าแทนที่เกิดความผิดพลาดบ่อยน่าที่จะมีการทดสอบประจำมาก แต่กลับเป็นว่ายังมีค่าอัตราการล้มเหลวมากยิ่งทำให้ไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบประจำบ่อยนัก [3] ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะว่าจากข้อสันนิษฐานเบื้องต้นที่ว่า เมื่อเกิดความล้มเหลวขึ้นกับอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันแล้วจะพบความเสียหายที่เกิดขึ้นในระบบป้องกันเสมอ (ถ้าระบบป้องกันนั้นมีความเสียหายอยู่แล้วแต่ยังตรวจไม่พบ) และจะทำให้เกิดการซ่อมแซมอุปกรณ์ในระบบป้องกันให้กลับไปอยู่ในสภาพเหมือนใหม่ ซึ่งจาก 2 จุดนี้เองทำให้อุปกรณ์ป้องกันในระบบที่มีค่าอัตราการล้มเหลวสูงจะได้ระบบที่กลับไปอยู่ในสภาพเริ่มต้นบ่อยครั้งกว่า ทำให้ไม่ต้องการการทดสอบประจำมากนักนั่นเอง

7.4.2 อัตราการซ่อมแซมอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน

จากรูปที่ 7.8 และตารางที่ 7.8 นั้นเป็นการแสดงให้เห็นถึงผลของอัตราการซ่อมแซมอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ ในระบบที่สามารถทำการซ่อมแซมได้รวดเร็วจะทำให้มีค่าความเชื่อถือได้สูงกว่า ซึ่งผลที่คาดไว้ก็น่าจะเป็นเช่นนั้น



รูปที่ 7.8 ผลของอัตราการซ่อมแซมของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน

ตารางที่ 7.8 ค่าแอมป์นอร์มอลอันอเวเลบิลิตี และช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบอุปกรณ์ สำหรับผลของอัตราการซ่อมแซมของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน

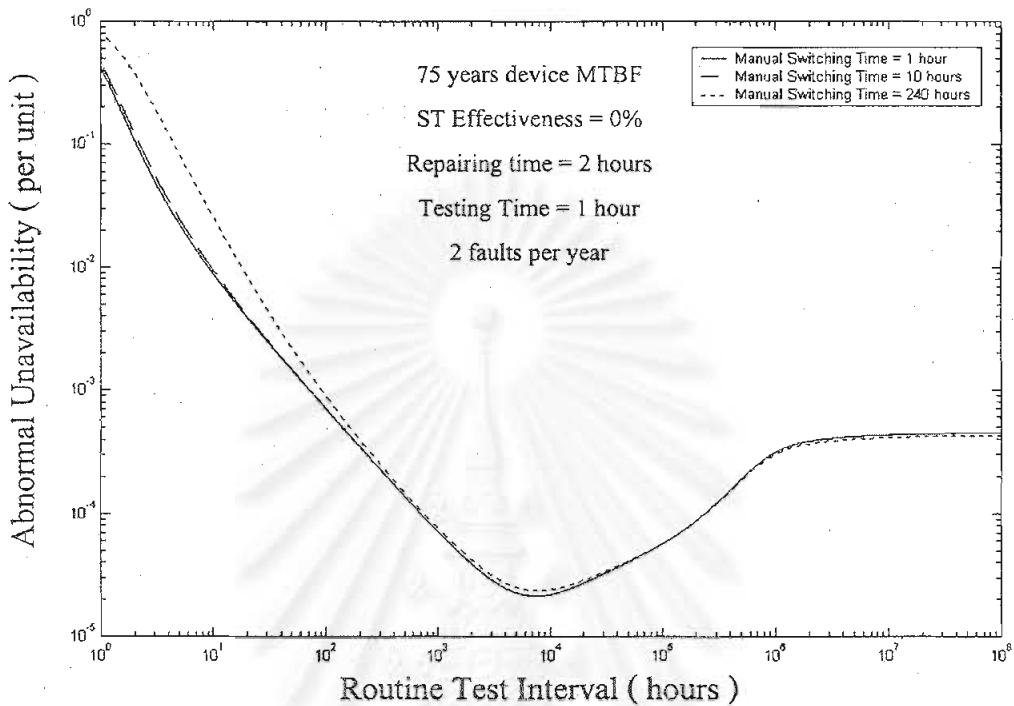
Rc (repairs/year)	ORTI (Months)	Abnormal Unavailability
375	6.62	1.54E-05
275	7.92	1.76E-05
175	10.38	2.14E-05
75	17.97	3.03E-05

โดยที่ผลของการซ่อมแซมนี้ค่อนข้างที่จะเกิดผลกระทบต่อค่าช่วงเวลาในการทดสอบ โดยที่ยังทำการซ่อมแซมได้รวดเร็วเท่าไร กลับที่จะต้องมีการทำการทดสอบประจำบ่อยขึ้นเท่านั้น

7.4.3 อัตราการสับสวิตซ์สำหรับการสับอุปกรณ์ที่อยู่ข้างเคียงเข้าสู่บริการ

จากรูปที่ 7.9 และตารางที่ 7.9 แสดงให้เห็นว่าการสับสวิตซ์อุปกรณ์ข้างเคียงนั้นไม่บ่อยที่จะมีผลกระทบต่อระบบที่สนใจ ลองสังเกตดูจากค่าที่แสดงในตารางที่ 7.9 จะเห็นได้ว่าค่าแอมป์นอร์-

มอลอันอเวลเลบิลิตี้นั้นสำหรับ 1 ชั่วโมง หรือ 10 ชั่วโมงนั้นค่าที่ได้แทบไม่แตกต่างกันเลย และสำหรับค่า 240 ชั่วโมงนั้นแสดงเพื่อเปรียบเทียบเท่านั้นว่าถ้าจะให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจะต้องใช้เวลาถึง 10 วัน ซึ่งไม่เป็นจริงทางปฏิบัติอยู่แล้ว



รูปที่ 7.9 ผลของอัตราการสับสวิตซ์สำหรับการสับอุปกรณ์ที่อยู่ข้างเคียงเข้าสู่บริการของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน

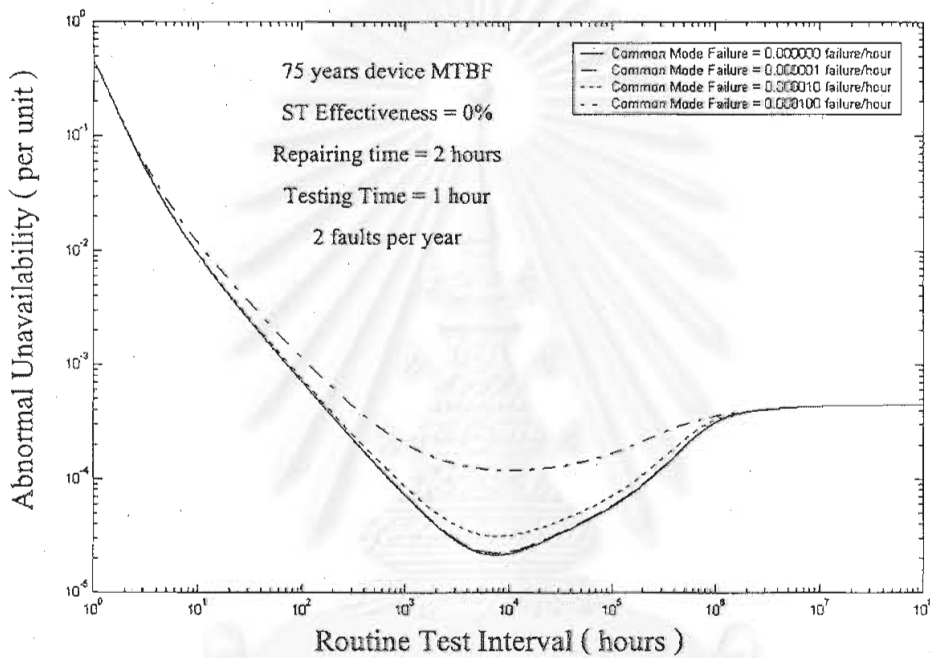
ตารางที่ 7.9 ค่าเอ็บนอร์มอลอันอเวลเลบิลิตี และช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบอุปกรณ์สำหรับผลของอัตราการสับสวิตซ์สำหรับการสับอุปกรณ์ที่อยู่ข้างเคียงเข้าสู่บริการของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน

Manual Switching Time	ORTI (Months)	Abnormal Unavailability
1 hour	10.36	2.1324E-05
10 hours	10.38	2.1409E-05
240 hours	10.83	2.3577E-05

และนอกจากว่าจะไม่ค่อยมีผลต่อค่าเอ็บนอร์มอลอันอเวลเลบิลิตีแล้ว ยังไม่ค่อยมีผลต่อค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบประจำด้วยเพราะจะเห็นได้ว่ามีค่าทั้งสามค่าอยู่ในช่วง

ประมาณ 10 เดือนทั้งสิ้น แต่ทั้งนี้เป็นเพราะว่าเรากำลังถึงเฉพาะอุปกรณ์หลักในการป้องกันเท่านั้น ดังนั้นการสับสวิตซ์อุปกรณ์ที่อยู่ข้างเคียงจึงไม่ค่อยมีผลมากนักต่อค่าความเชื่อถือได้มากนัก แต่ถ้าเรากำลังถึงความต่อเนื่องในการให้บริการด้วยแล้ว ก็ควรที่จะทำการสับสวิตซ์นี้ให้เร็วที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

7.5 การศึกษาผลของ คอมมอนคอสเฟลเลียร์



รูปที่ 7.10 ผลของคอมมอนคอสเฟลเลียร์ของระบบทั้งหมด

ตารางที่ 7.10 ค่าแอมบอร์มอลอันอเวเลบิลิตี้ และช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบอุปกรณ์ สำหรับผลของคอมมอนคอสเฟลเลียร์ของระบบทั้งหมด

Common Cause Failure (faults/year)	ORTI (Months)	Abnormal Unavailability
0.000000	10.38	2.14E-05
0.000001	10.42	2.24E-05
0.000010	10.79	3.14E-05
0.000100	14.79	1.19E-04

สำหรับค่าคอมมอนคอสเฟลเลียร์ หรือคอมมอนโหมคเฟลเลียร์นั้น จะเห็นได้จากรูปที่ 7.10 และตารางที่ 7.10 ว่าค่าคอมมอนคอสเฟลเลียร์นี้มีผลกระทบต่อค่าแอมพลิจูดอันอเวเลบิลิตี้ค่อนข้างมาก และก็เป็นไปตามความคาดหมายที่ว่าถ้ามีค่าคอมมอนคอสเฟลเลียร์ต่ำ ก็จะมีค่าแอมพลิจูดอันอเวเลบิลิตี้ต่ำไปด้วย ซึ่งก็หมายความว่าระบบจะมีความเชื่อถือได้สูงขึ้นนั่นเอง

ในขณะที่ผลกระทบต่อค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบประจำวันไม่ค่อยจะมีผลมากนัก โดยที่ค่าคอมมอนคอสเฟลเลียร์อยู่ระหว่าง 0.0000000 ถึง 0.000010 นั้นจะมีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 11 เดือนโดยประมาณ แต่อย่างไรก็ตามยิ่งค่าคอมมอนคอสเฟลเลียร์มากขึ้นเท่าไร ค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เพราะสาเหตุเดียวกันกับผลกระทบของค่าอัตราล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันนั่นเอง

7.6 สรุป

จากการศึกษาทั้งหมดที่ผ่านมาถึงผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ทุก ๆ ตัวล้วนมีผลต่อความเชื่อถือได้ของระบบโดยรวมทั้งสิ้น ซึ่งสามารถนำผลที่ได้จากการศึกษานี้ไปใช้งานกับการซ่อมบำรุงรักษา และปฏิบัติงานจริง นอกจากด้านความเชื่อถือได้แล้วยังมีผลต่อช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบประจำด้วย ซึ่งถ้าเราได้ค่าต่าง ๆ ในการใช้งานจริงแล้ว ก็จะหาได้ว่าค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมนี้ได้ถูกต้อง

แต่อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เต็มไปด้วยความไม่แน่นอน (Uncertainty) ดังนั้น ค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบประจำวันจึงอาจมีความไม่เที่ยงตรงอยู่บ้าง ดังนั้นเราสามารถแก้ไขได้โดยการทำการทดสอบอุปกรณ์นั้น ๆ ให้อยู่ภายในช่วงเวลาที่ทำให้ค่าความเชื่อถือได้มีค่ามาก ๆ แทน โดยที่ไม่จำเป็นต้องมีค่าตรงกับค่าที่คำนวณได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 8

ผลการเปรียบเทียบระบบป้องกันแบบต่าง ๆ

ในบทที่ 7 นั้นเราได้ทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ประกอบกันขึ้นเป็นระบบป้องกัน ซึ่งทำให้เราสามารถทราบผลต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับค่าแอมพลิจูดอินอเวเลบิลิตี และช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกันแบบง่าย ๆ คือ ระบบป้องกันที่ใช้รีเลย์กระแสเกิน 1 ชุด ในบทที่ 8 นี้จะทำการเปรียบเทียบระบบป้องกันแบบต่าง ๆ โดยที่มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น F_r R_r R_i ฯลฯ ของแต่ละอุปกรณ์เหมือนกัน แต่แตกต่างกันที่รูปแบบการจัดวาง

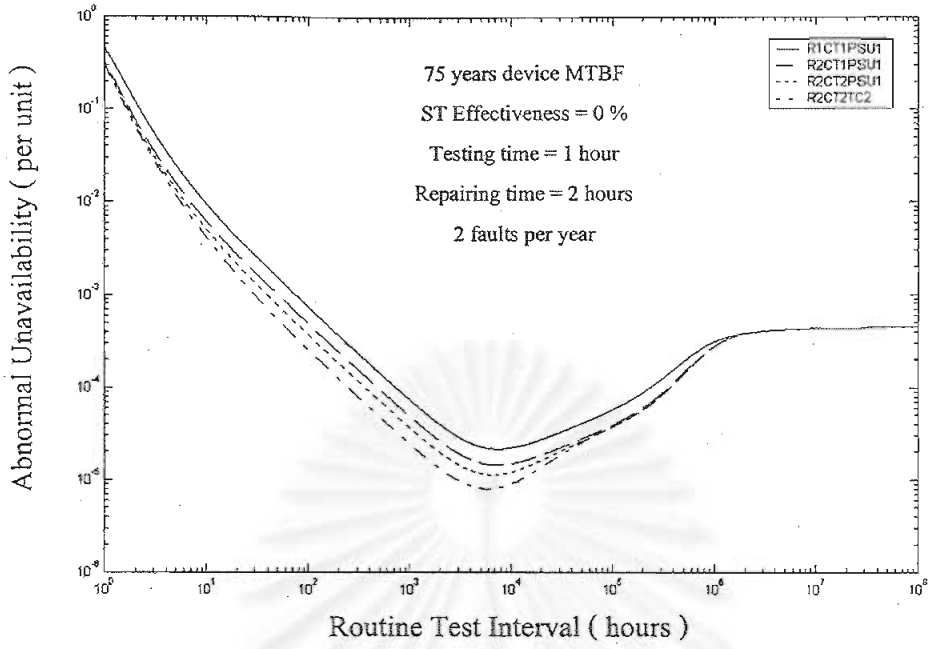
การเปรียบเทียบนี้จะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มได้แก่ กลุ่มแรกคือกลุ่มที่ป้องกันเพียงด้านเดียว หรือมีสถานะที่เป็นไปได้ทั้งหมด 11 สถานะ และกลุ่มที่สองคือกลุ่มที่ป้องกัน 2 ด้าน หรือมีสถานะที่เป็นไปได้ทั้งหมด 31 สถานะ

8.1 การเปรียบเทียบผลระหว่างระบบป้องกันที่ป้องกันอุปกรณ์เพียงด้านเดียว

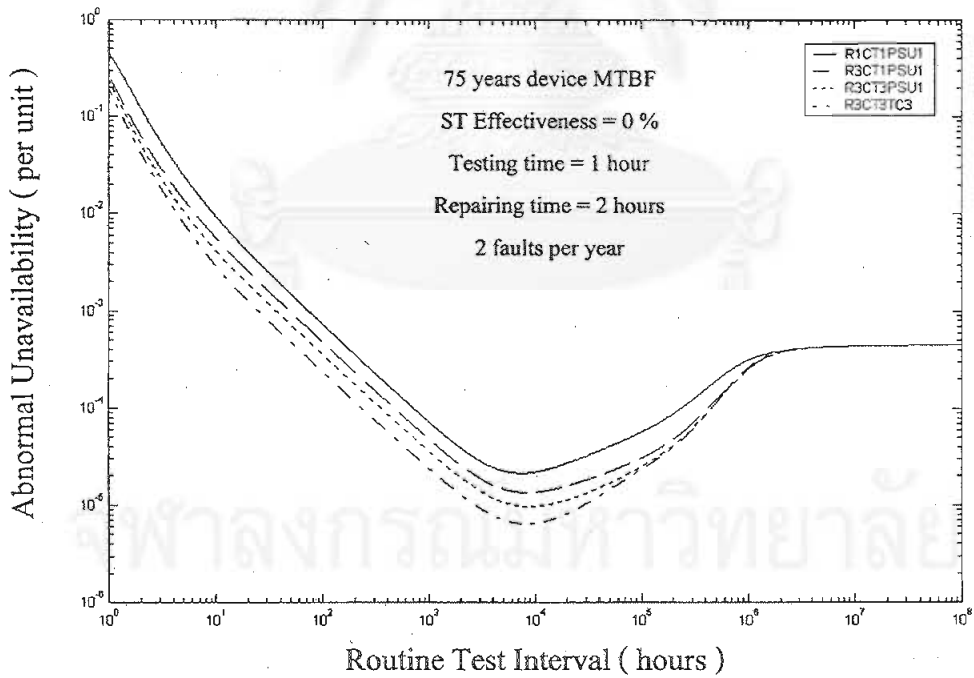
เนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เปรียบเทียบระบบป้องกันที่ป้องกันอุปกรณ์เพียงด้านเดียว จำนวน 7 รูปแบบ ซึ่งได้แก่รูปแบบต่าง ๆ ของการจัดวางในระบบป้องกันแบบใช้รีเลย์กระแสเกิน ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบจะขอแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มดังนี้ได้แก่

1. กลุ่มที่ 1 ประกอบไปด้วย R2CT1PSU1 R2CT2PSU1 และ R2CT2TC2 หรือเป็นกลุ่มที่มีรีเลย์ในระบบ 2 ชุดนั่นเอง
2. กลุ่มที่ 2 ประกอบไปด้วย R3CT1PSU1 R3CT3PSU1 และ R3CT3TC3 หรือเป็นกลุ่มที่มีรีเลย์ในระบบ 3 ชุดนั่นเอง

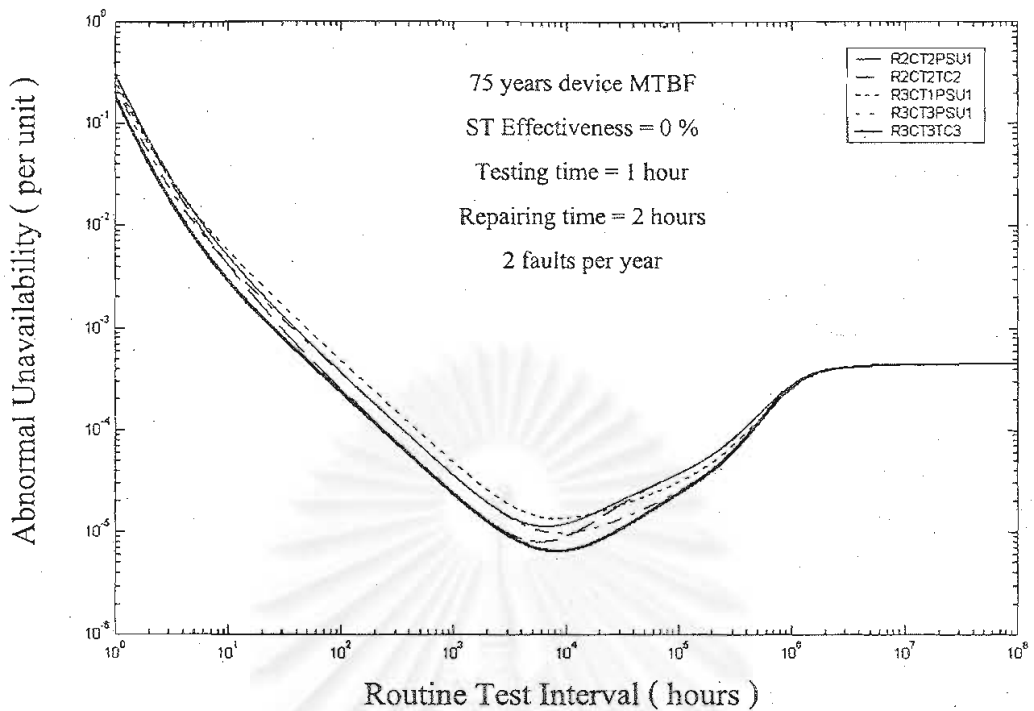
โดยที่มีระบบที่เป็นระบบป้องกันอ้างอิงได้แก่ ระบบป้องกันแบบ R1CT1PSU1 นั่นเอง โดยจะทำการเปรียบเทียบส่วนที่สำคัญ 2 ส่วนได้แก่ ค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบประจำ และค่าแอมพลิจูดอินอเวเลบิลิตีในจุดที่มีค่าน้อยที่สุด และการเปรียบเทียบนี้จะแสดงให้เห็นเป็น 2 รูปแบบได้แก่ แบบกราฟ Log-Log และแบบตารางเปรียบเทียบดังรูปที่ 8.1 ถึง 8.3 ตารางที่ 8.1 และตารางที่ 8.2



รูปที่ 8.1 ผลเปรียบเทียบระบบป้องกันด้านเดียวของอุปกรณ์ชุดที่ 1



รูปที่ 8.2 ผลเปรียบเทียบระบบป้องกันด้านเดียวของอุปกรณ์ชุดที่ 2



รูปที่ 8.3 ผลเปรียบเทียบเพื่อเป็นตัวช่วยในการออกแบบระบบป้องกัน

ตารางที่ 8.1 ตารางเปรียบเทียบค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทดสอบอุปกรณ์
ของระบบป้องกันที่ป้องกันอุปกรณ์เพียงด้านเดียว

No.	รูปแบบ	ST = 0%	ST = 50%	ST = 80%	ST = 99%
1	R1CT1PSU1	10.38	16.09	31.12	280.72
2	R2CT1PSU1	10.19	15.89	30.95	281.75
3	R2CT2PSU1	9.19	13.86	24.90	214.52
4	R2CT2TC2	8.17	12.01	20.26	135.60
5	R3CT1PSU1	11.68	19.49	43.04	366.66
6	R3CT3PSU1	12.39	21.57	49.23	421.76
7	R3CT1TC3	11.57	19.78	43.28	437.59

ตารางที่ 8.2 ตารางเปรียบเทียบค่าแอมป์นอร์มอลอันอเวลบิลิตีที่น้อยที่สุด
ของระบบป้องกันที่ป้องกันอุปกรณ์เพียงด้านเดียว

No.	รูปแบบ	ST = 0%	ST = 50%	ST = 80%	ST = 99%
1	R1CT1PSU1	2.14E-05	1.46E-05	8.52E-06	1.29E-06
2	R2CT1PSU1	1.44E-05	9.77E-06	5.70E-06	8.58E-07
3	R2CT2PSU1	1.13E-05	7.80E-06	4.69E-06	7.81E-07
4	R2CT2TC2	7.99E-06	5.57E-06	3.44E-06	6.75E-07
5	R3CT1PSU1	1.35E-05	8.95E-06	4.96E-06	6.94E-07
6	R3CT3PSU1	9.75E-06	6.31E-06	3.36E-06	4.53E-07
7	R3CT1TC3	6.46E-06	4.11E-06	2.13E-06	2.64E-07

จากรูปที่ 8.1 8.2 และตารางที่ 8.1 จะเห็นได้ว่าระบบป้องกันที่มีความแตกต่างกันจะมีค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบ และค่าแอมป์นอร์มอลอันอเวลบิลิตีแตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นเพราะว่าแต่ละระบบมีองค์ประกอบแตกต่างกันออกไปทั้งจำนวนอุปกรณ์ และจำนวนรูปแบบในการรวมกัน ซึ่งได้แสดงให้เห็นแล้วในบทที่ 7 ว่าความแตกต่างเหล่านี้จะทำให้ค่าทั้งสองดังกล่าวมีค่าแตกต่างกันออกไป

จากรูปที่ 8.1 เป็นไปตามความคาดหมายว่าระบบป้องกันที่มีทั้งรีเลย์ หม้อแปลงกระแส และขดลวดตัด 2 ชุด จะมีค่าแอมป์นอร์มอลอันอเวลบิลิตีที่น้อยที่สุด ซึ่งแสดงว่ามีความเชื่อถือได้สูงที่สุดในกลุ่มที่ 2 นี้ และรองลงมาได้แก่ R2CT2PSU1 R2CT1PSU1 และ R1CT1PSU1 ตามลำดับ สำหรับค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ก็เช่นเดียวกันจะได้ว่ายังมีอุปกรณ์ในระบบป้องกันมากเท่าไร ก็ยิ่งจำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบมากขึ้น ทั้งนี้ได้แสดงให้เห็นแล้วในบทที่ 7

จากรูปที่ 8.2 จะเห็นได้ว่า R3CT3TC3 จะเป็นระบบที่มีความเชื่อถือได้มากที่สุดในกลุ่มนี้ และไล่ไปตามลำดับดังนี้คือ R3CT3PSU1 R3CT1PSU1 และ R1CT1PSU1 ตามลำดับ ซึ่งก็เป็นไปตามที่ควรจะเป็น แต่สำหรับค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมนั้น เนื่องจากว่ามีจำนวนอุปกรณ์ และจำนวนการรวมกันที่แตกต่างกัน จึงทำให้มีค่าแตกต่างกันดังแสดงไว้ในตารางที่ 8.1

จากความเชื่อที่ว่ากรณีระบบป้องกันที่มีรีเลย์ และหม้อแปลงกระแสมากชุดจะมีความเชื่อถือได้มากที่สุดนั้นก็จริงส่วนหนึ่ง แต่จะต้องประกอบไปด้วยขดลวดตัดในจำนวนที่เท่า ๆ กันจึงจะทำให้ระบบนั้น ๆ มีค่าความเชื่อถือได้สูงที่สุด ทั้งนี้ขอให้ดูรูปที่ 8.3 และตารางที่ 8.1 และ 8.2 ประกอบกันไป จากรูปที่ 8.3 จะเห็นได้ว่าระบบป้องกัน R2CT2TC2 จะมีค่าแอมป์นอร์มอลอัน-

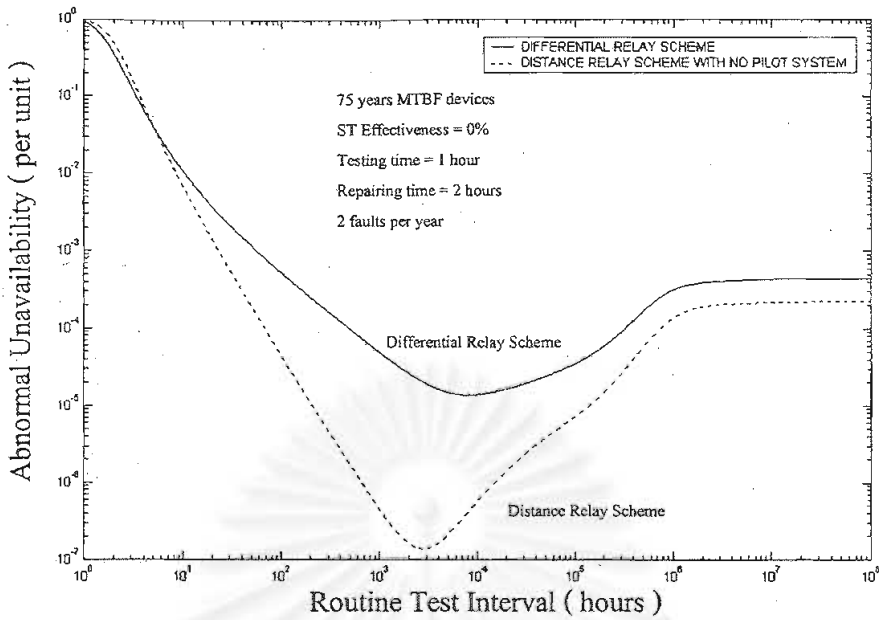
อเวเลบิลิตี้น้อยกว่าของระบบ R3CT3PSU1 ซึ่งมีรีเลย์ และหม้อแปลงกระแส 3 ชุด และ R3CT1PSU1 ที่มีรีเลย์ 3 ชุด แต่มีหม้อแปลงกระแส 1 ชุด ซึ่งระบบทั้งสองนี้ประกอบไปด้วยขดลวดตัดเพียง 1 ชุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่า R2CT2TC2 มีความเชื่อถือได้สูงกว่านั้นเอง นอกจากนี้แล้ว ระบบ R2CT2PSU1 ยังมีค่าแอมป์นอร์มอลอันอเวเลบิลิตี้น้อยกว่า R3CT1PSU1 ซึ่งก็แสดงว่ามีความเชื่อถือได้สูงกว่านั้นเอง แต่ผลอันหลังนี้เห็นไม่ชัดเหมือนกับอันแรก ดังนั้นจากผลดังกล่าวจะเห็นได้ว่า เนื่อง จากอุปกรณ์ต่าง ๆ มีราคาสูง ดังนั้นการออกแบบจะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบหลาย ๆ อย่าง เช่น จำนวนรีเลย์ที่เหมาะสม ฯลฯ ซึ่งมีผลต่อการลงทุนเป็นอย่างมาก และด้วยวิธีที่นำเสนอไปนี้ก็สามารถนำไปใช้ช่วยในการตัดสินใจได้ระดับหนึ่งในแง่มุมของความเชื่อถือได้

จากตารางที่ 8.1 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าระบบที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ดิจิทัลที่มีระบบตรวจสอบตัวเองนั้น จะสามารถขยายช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ออกไปได้ตามแต่ประสิทธิภาพของฟังก์ชันตรวจสอบตัวเองของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบนั้น ๆ ซึ่งจะสามารถเห็นได้ว่าถึงแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพเพียงแค่ 50% ก็ยังสามารถขยายเวลาในการทดสอบออกไปได้เป็นระยะเวลาเกือบ 2 ปีต่อการทดสอบ 1 ครั้ง ซึ่งก็ค่อนข้างจะช่วยลดต้นทุนเป็นอันมาก ในการทดสอบประจำอุปกรณ์

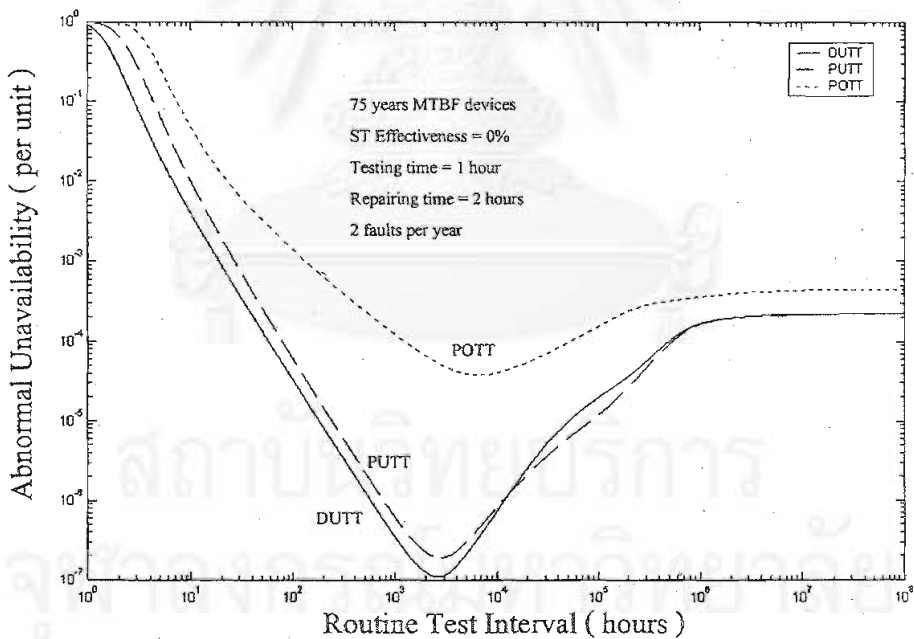
นอกจากตารางที่ 8.1 แล้ว ตารางที่ 8.2 ยังเปรียบเทียบค่าแอมป์นอร์มอลอันอเวเลบิลิตี้น้อยสำหรับค่าประสิทธิภาพของฟังก์ชันตรวจสอบตัวเองอีกด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ไม่ว่าฟังก์ชันนั้น ๆ จะทำงานแยกขนาดไหนก็ยังสามารถที่จะทำให้ความเชื่อถือได้ของระบบป้องกันโดยรวมดีขึ้นได้มาก น้อยตามแต่ประสิทธิภาพของฟังก์ชันตรวจสอบตัวเองนั้น ๆ

8.2 การเปรียบเทียบผลระหว่างระบบป้องกันที่ป้องกันอุปกรณ์ทั้งสองด้าน

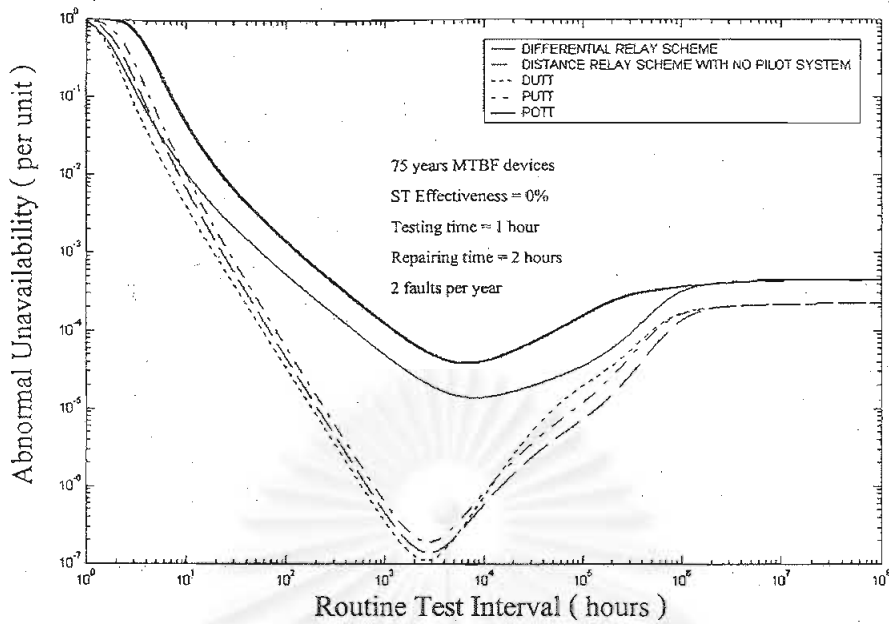
หลังจากที่ได้ทำการเปรียบเทียบระบบป้องกันที่ทำการป้องกันอุปกรณ์เพียงด้านเดียว เราก็มาสู่การเปรียบเทียบระบบที่ป้องกันอุปกรณ์ทั้งสองด้าน ซึ่งในขั้นแรกนี้จะทำการเปรียบเทียบระบบที่ไม่อาศัยระบบไหลทอก่อน ซึ่งได้แก่ระบบป้องกันที่ใช้รีเลย์ผลต่าง และรีเลย์ระยะทางนั่นเองซึ่งได้ผลดังรูปที่ 8.4



รูปที่ 8.4 ผลเปรียบเทียบระบบป้องกันที่ป้องกันอุปกรณ์ 2 ด้าน ระหว่างการป้องกันแบบใช้รีเลย์ผลต่าง กับแบบใช้รีเลย์ระยะทาง



รูปที่ 8.5 ผลเปรียบเทียบระบบป้องกันที่ป้องกันอุปกรณ์ 2 ด้าน ระหว่างการป้องกันแบบระยะทางแบบอาศัยระบบไหลตอ



รูปที่ 8.6 ผลเปรียบเทียบระบบป้องกันที่ป้องกันอุปกรณ์ 2 ด้านทั้งหมด

ตารางที่ 8.3 ตารางเปรียบเทียบค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทดสอบประจำ และค่าแอมบอร์มอลอันอเวเลบิลิตีที่น้อยที่สุดของระบบป้องกันที่ป้องกันอุปกรณ์สองด้าน

NO.	รูปแบบ	ORTI (Months)	Abnormal Unavailability
1	DIFFERENTIAL	11.30	1.38E-05
2	DISTANCE	3.85	1.39E-07
3	DUTT	3.60	1.11E-07
4	PUTT	3.83	1.91E-07
5	POTT	9.33	3.80E-05

หลังจากนั้นก็ทำการเปรียบเทียบระบบป้องกันที่อาศัยระบบไพลอตซึ่งได้แก่ ระบบ DUTT PUTT และ POTT ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 8.5 และหลังจากที่ได้ทำการเปรียบเทียบแยกกันแล้วก็ยังคงแสดงให้เห็นรวมกันทั้งหมดในรูปที่ 8.6 และแยกแยะออกมาเป็นตารางได้ดังตารางที่ 8.3

จากรูปที่ 8.4 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าระบบป้องกันแบบใช้รีเลย์ระยะทางนั้นมีค่าแอมบอร์มอลอันอเวเลบิลิตีต่ำกว่าระบบป้องกันที่ใช้รีเลย์ผลต่างอยู่ค่อนข้างมาก ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าถ้าพิจารณาเฉพาะด้านความเชื่อถือได้แล้ว ระบบป้องกันที่ใช้รีเลย์ระยะทางนี้จะมีค่าเชื่อถือได้สูงกว่า ทั้งนี้จะเป็นเพราะว่าการคำนวณของรีเลย์ผลต่างนั้นขึ้นอยู่กับรีเลย์เพียงตัวเดียว ในขณะที่

รีเลย์ระยะทางมีรีเลย์สองชุดในการทำการตัดวงจรแต่ละด้าน แต่ว่าก็ยังมีข้อที่น่าสังเกตอีกหนึ่งข้อ ซึ่งได้แก่ การทำการทดสอบประจำอุปกรณ์นั้น ระบบที่ใช้รีเลย์ระยะทางต้องการการทดสอบที่บ่อยกว่ามากคือประมาณ 4 เดือนต่อ 1 ครั้ง ในขณะที่แบบรีเลย์ผลต่างต้องการการทดสอบเพียงปีละครั้งเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามในการเปรียบเทียบครั้งนี้ทำในด้านของความเชื่อถือได้เท่านั้น ไม่ได้คำนึงถึงด้านอื่น ๆ เช่น ความมั่นคง หรือ ความประหยัด ฯลฯ

ในรูปที่ 8.5 จะสามารถบอกได้ว่า ระบบป้องกันแบบ DUTT นั้นจะมีความเชื่อถือได้สูงที่สุด รองลงมาได้แก่แบบ PUTT และ POTT ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะว่าลจิกในการทำงานนั้นอ้างอิงกันทั้งสองด้านของการป้องกัน ทำให้แม้ว่าด้านใดด้านหนึ่งล้มเหลว ก็ยังสามารถสั่งให้อีกด้านนั้นตัดวงจรได้ แต่ข้อเสียของระบบที่มีความเชื่อถือได้สูงก็คือจะมีความมั่นคงต่ำ ดังนั้นในแง่ของความมั่นคง และด้านอื่น ๆ จะอยู่ในงานวิจัยชิ้นต่อ ๆ ไปในอนาคต แต่เมื่อมีความเชื่อถือได้สูงก็จะมีความต้องการในการทำการทดสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ มากขึ้นไปด้วยดังจะเห็นได้จากตารางที่ 8.3 ซึ่ง DUTT และ PUTT นั้นต้องการการทดสอบประจำทุก ๆ 3-4 เดือน ในขณะที่ POTT ต้องการประมาณ 9 เดือนต่อครั้ง ซึ่งต่างกันประมาณ 2-3 เท่าทีเดียว

สำหรับการเปรียบเทียบทั้งหมดนั้นจะแสดงให้เห็นว่าระบบที่มีไหลทอนนั้นเชื่อว่ามีความเชื่อถือได้สูงที่สุด กลับเป็นระบบป้องกันที่ใช้รีเลย์ระยะทางแบบไม้อาศัยระบบไหลทอนที่มีความเชื่อถือได้สูงที่สุดแทน และ POTT มีความเชื่อถือได้ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับทั้งแบบใช้รีเลย์ผลต่าง และแบบใช้รีเลย์ระยะทาง ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะว่า ในตรรกะการทำงานของ POTT นั้นมีอุปกรณ์ในการทำงานเยอะกว่ามากทำงานอนุกรมกัน ดังนั้นจึงทำให้มีความเชื่อถือได้ต่ำที่สุด แต่อย่างไรก็ตามระบบ POTT ก็เชื่อว่าจะไม่ดี เพราะว่าถ้าเราพิจารณาด้านความมั่นคงแล้วจะเห็นได้ว่า POTT น่าจะมีความมั่นคงสูงสุด และไม่เชื่อว่าระบบที่อาศัยระบบไหลทอนจะไม่ดี แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้คำนึงถึงความรวดเร็วในการตัดวงจรซึ่งเป็นข้อดีอีกข้อของระบบไหลทอน ซึ่งในงานวิจัยชิ้นต่อ ๆ ไปหวังว่าจะรวมผลของเวลาในการตัดวงจร ความมั่นคง ฯลฯ ไว้ในการพิจารณา ซึ่งจะช่วยให้สามารถตัดสินใจเลือกระบบป้องกันที่เหมาะสมได้ในอนาคต

8.3 การปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบป้องกัน

การปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบป้องกันนอกจากจะสามารถทำได้ง่าย ๆ ด้วยการทำการทดสอบประจำด้วยค่าช่วงเวลาที่เหมาะสม หรือการปรับปรุงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบป้องกันซึ่งแสดงให้เห็นในบทที่ 7 แล้ว ยังสามารถที่จะปรับปรุงระบบป้องกันได้ด้วยการเปลี่ยนอุปกรณ์บางอย่าง ดังที่จะแสดงให้เห็นหลังจากนี้

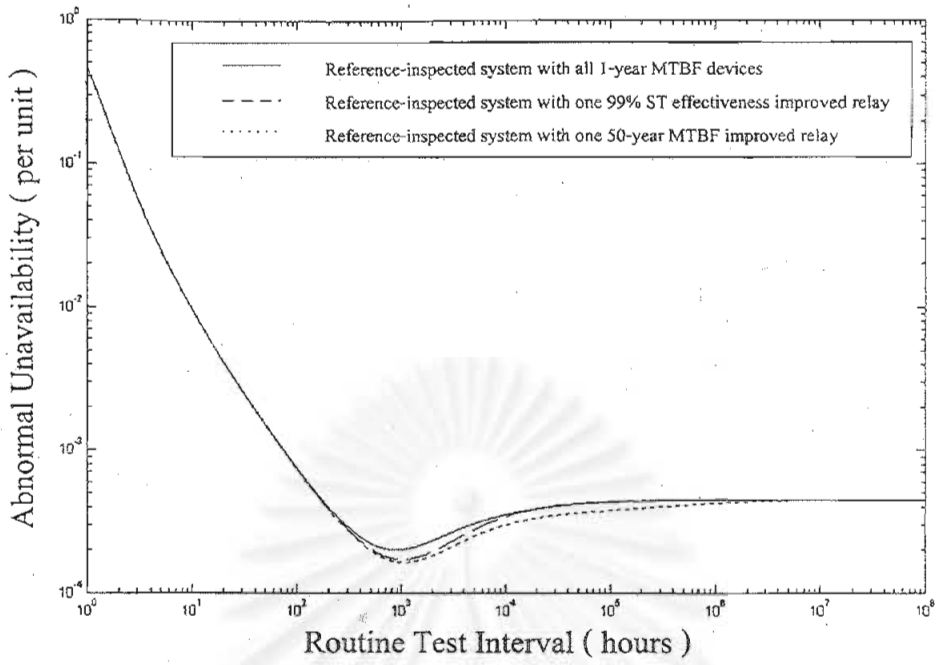
ในการปรับปรุงโดยการเปลี่ยนอุปกรณ์บางอย่างนั้น ในขั้นแรกจะสมมติระบบอ้างอิงโดยที่อุปกรณ์ต่าง ๆ มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

F_R	=	1 ครั้ง/ปี หรือ MTBF = 1 ปี
ST	=	0.00 ต่อหน่วย (perunit)
λ_C	=	2 ครั้ง/ปี
R_T	=	2 ชั่วโมง
R_R	=	1 ชั่วโมง
μ_C	=	175 ครั้ง/ปี
θ_{PM}	=	ตัวแปรต้น (อยู่ระหว่าง 0.00000001 กับ 1.00)
ψ_N	=	43200 การทำงาน/ชั่วโมง (operations/hour)
ψ_B	=	21600 การทำงาน/ชั่วโมง (operations/hour)
ψ_M	=	0.1 การทำงาน/ชั่วโมง (operations/hour)

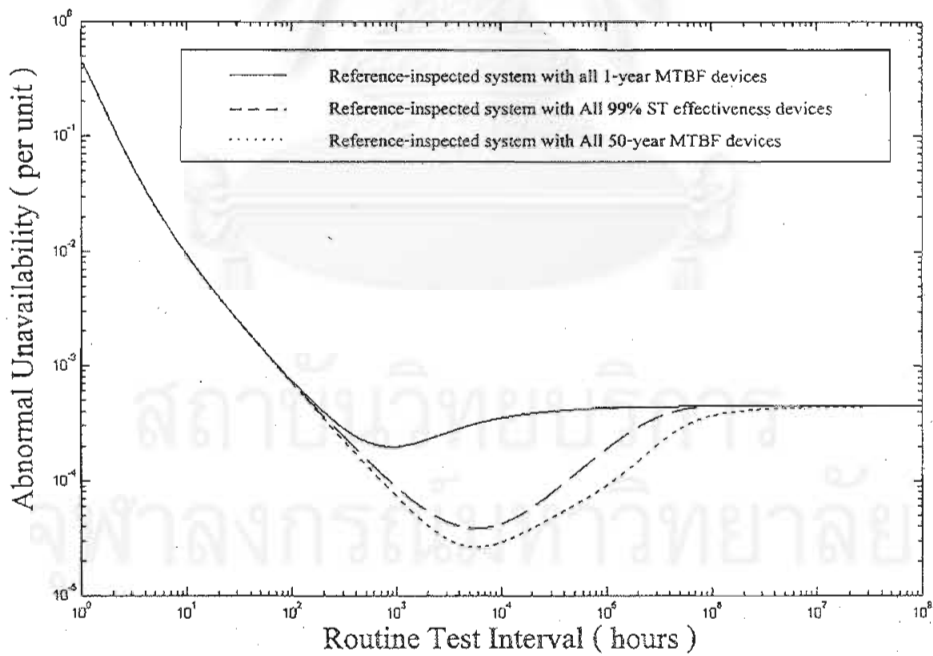
โดยที่ระบบอ้างอิงนี้เป็นระบบ RICTIPSU1 โดยที่อุปกรณ์ทุกชิ้นมีค่าดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น หลังจากนั้นก็จะทำการเปลี่ยนอุปกรณ์บางชิ้นซึ่งได้แก่ รีเลย์ทั่วไป (Traditional Relay) เปลี่ยนเป็น ดิจิตอลรีเลย์ (Digital Relay) ซึ่งมีฟังก์ชันตรวจสอบตัวเอง โดยในที่นี้กำหนดให้มีค่า ST เท่ากับ 99% และอีกกรณีหนึ่งคือ การเลือกใช้รีเลย์ที่มีคุณภาพสูงมาก คือมีค่า F_R เท่ากับ 50 ครั้ง/ปี โดยที่ไม่มีฟังก์ชันตรวจสอบตัวเอง หลังจากนั้นก็จะทำการหาค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบและค่าแอมบอร์มอลอันอเวเลบิลิตีที่จุดต่ำสุดด้วย เพื่อทำการเปรียบเทียบกัน ซึ่งผลการศึกษาที่ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 8.7

เมื่อทำการเปลี่ยนรีเลย์เพียงชุดเดียวแล้วก็จะทำการศึกษาต่อไปในการเปลี่ยนอุปกรณ์ทั้งระบบป้องกันก็จะทำการศึกษาเช่นเดียวกันกับการเปลี่ยนรีเลย์ชุดเดียว เพียงแต่สำหรับครั้งนี้จะเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ทุก ๆ อุปกรณ์ไปพร้อม ๆ กันซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงอยู่ในรูปที่ 8.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 8.7 ผลการเปรียบเทียบการปรับปรุงระบบป้องกัน โดยการเปลี่ยนรีเลย์เพียงอุปกรณ์เดียว



รูปที่ 8.8 ผลการเปรียบเทียบการปรับปรุงระบบป้องกัน โดยการเปลี่ยนทุก ๆ อุปกรณ์ในระบบป้องกัน

ตารางที่ 8.4 ตารางเปรียบเทียบค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทดสอบประจำ และค่าแบริบอร์มอลอันอเวเลบิลิตีที่น้อยที่สุดของการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบป้องกัน

รูปแบบการป้องกัน	ORTI (Months)	Abnormal Unavailability
Reference-inspected System	1.23	1.99E-04
Inspected System with ST-99% relay	1.44	1.71E-04
Inspected System with 50-year MTBF relay	1.39	1.63E-04
Inspected System with all ST-99% devices	8.11	3.89E-05
Inspected System with all 50-year MTBF devices	8.11	2.68E-05

จากรูปที่ 8.7 จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงระบบป้องกันโดยการเปลี่ยนอุปกรณ์เพียงอุปกรณ์เดียว หรือการเปลี่ยนมาใช้รีเลย์ที่มีค่าอัตราล้มเหลวลดลง หรือมีฟังก์ชันตรวจสอบตัวเอง จะช่วยปรับปรุงค่าความเชื่อถือได้ของระบบได้เล็กน้อย และนอกจากนี้ก็ยังช่วยขยายช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบออกไปได้เล็กน้อยดังค่าที่แสดงในตารางที่ 8.4

จากรูปที่ 8.8 เป็นการเปรียบเทียบการใช้อุปกรณ์ที่มีฟังก์ชันตรวจสอบตัวเองทุก ๆ อุปกรณ์ แต่มีค่าอัตราล้มเหลวเท่ากับ 1 ครั้ง/ปี กับการใช้อุปกรณ์ที่ไม่มีฟังก์ชันตรวจสอบตัวเอง แต่มีอัตราล้มเหลวเท่ากับ 0.02 ครั้ง/ปี ซึ่งก็จะเห็นได้ว่าทั้งสองแบบจะสามารถปรับปรุงระบบป้องกันได้อย่างเห็นได้ชัด และนอกจากนี้แล้วยังสามารถขยายช่วงเวลาในการทดสอบประจำออกไปได้เป็นประมาณ 8 เดือน จากปกติประมาณ 1 เดือน

จากตารางที่ 8.4 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการปรับปรุงเพียงอุปกรณ์เดียวนั้นจะสามารถปรับปรุงระบบป้องกันได้เพียงเล็กน้อย และเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนอุปกรณ์ทั้งหมดก็จะได้เห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ดังนั้นการปรับปรุงควรที่จะปรับปรุงไปทุก ๆ ด้านพร้อม ๆ กัน ได้แก่ การเปลี่ยนอุปกรณ์บางอุปกรณ์ การทำการทดสอบประจำในช่วงเวลาที่เหมาะสม การซ่อมแซมอุปกรณ์ต่าง ๆ ด้วยความรวดเร็ว ฯลฯ ซึ่งทั้งหมดก็ได้แสดงไว้ในบทที่ 7 และ 8 แล้ว

สุดท้ายนี้สามารถสรุปได้เป็นข้อเสนอต่าง ๆ ในการทำการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบป้องกันได้ดังนี้คือ

1. ควรทำการทดสอบประจำอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกันด้วยค่าช่วงเวลาที่เหมาะสม ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางต่าง ๆ ข้างต้น
2. ในการทำการทดสอบประจำอุปกรณ์ต่าง ๆ ควรจะทำได้ด้วยความรวดเร็ว เพราะความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยจะมีผลเป็นอันมากต่อความเชื่อถือได้ของระบบป้องกัน
3. ควรทำการซ่อมแซมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกันด้วยความรวดเร็ว

4. ควรทำการซ่อมแซมอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันด้วยความรวดเร็วเช่นเดียวกับข้อ 3 เพราะทั้งข้อ 3 และข้อ 4 นี้ มีผลเป็นอย่างมากต่อความเชื่อถือได้ของระบบโดยรวม แม้จะไม่มีผลกระทบมากนักต่อค่าช่วงเวลาในการทดสอบประจำก็ตาม
5. ควรเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีฟังก์ชันตรวจสอบตัวเองให้มากที่สุด เพราะอย่างยิ่งมีอุปกรณ์ที่มีฟังก์ชันนี้ทำงานอยู่ในระบบมากเท่าไร ระบบก็จะยิ่งมีความเชื่อถือได้สูงตามไปด้วย นอกจากนี้จะทำให้ระบบมีความเชื่อถือได้สูงขึ้นแล้ว ยังช่วยยี่ระยะเวลาในการทดสอบโดยรวมออกไปอีกด้วย ซึ่งเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระบบได้อีกด้วย

8.4 สรุป

จากการทำการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าวิธีที่ได้นำเสนอไปตั้งแต่ต้นนั้น สามารถที่จะแยกแยะความแตกต่างด้านความเชื่อถือได้ของระบบป้องกันแบบต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจน และนอกจากจะสามารถหาค่าความเชื่อถือได้แล้ว ยังสามารถนำวิธีที่เสนอนี้ไปใช้ในการหาค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทดสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกันได้ ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบป้องกัน นอกจากนี้แล้วยังได้เสนอข้อแนะนำต่าง ๆ สำหรับการปรับปรุงความเชื่อถือได้ด้วยวิธีต่าง ๆ ซึ่งผลที่ได้ก็น่าจะเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการออกแบบปรับปรุงระบบป้องกันต่าง ๆ

บทที่ 9

บทสรุป และข้อเสนอแนะ

9.1 บทสรุป

วัตถุประสงค์หลักของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือการนำเสนอวิธีการในการประเมินค่าความเชื่อถือได้ของระบบป้องกันแบบต่าง ๆ โดยวิธีที่ใช้ในการคำนวณค่าความเชื่อถือได้ก็คือ วิธีการสร้างแบบจำลองมาคอฟ และมีการนำวิธีค้น ไม้เหตุการณ์มาประยุกต์สำหรับระบบป้องกันที่ซับซ้อนมากขึ้น

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เริ่มด้วยการนำเสนอแบบจำลองที่เป็นแบบจำลอง 4 สถานะซึ่งใช้ได้กับอุปกรณ์ส่วนมากในระบบป้องกัน โดยที่แบบจำลองนี้ได้รวมผลของการมีฟังก์ชันตรวจสอบตัวเอง และเพื่อให้สะดวกในการคำนวณ และพิจารณาจึงทำการลดรูปแบบจำลองลงเหลือ 3 สถานะซึ่งใช้ในส่วนที่เหลือทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ หลังจากนั้นก็นำวิธีการสร้างแผนภาพกรอบของความเชื่อถือได้ เพื่อแสดงให้เห็นถึงขั้นตอนในการทำงานของระบบป้องกันแบบต่าง ๆ หลังจากนั้นก็สร้างแผนภาพกรอบของความเชื่อถือได้สำหรับระบบป้องกันแบบต่าง ๆ เช่น ระบบป้องกันที่ใช้รีเลย์กระแสเกิน ระบบป้องกันที่ใช้รีเลย์ระยะทาง ฯลฯ ต่อจากนั้นก็ทำการรวมอุปกรณ์ต่าง ๆ เข้าด้วยกันตามลำดับการทำงานที่ได้กำหนดไว้ สำหรับอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันก็เช่นเดียวกันได้นำแบบจำลองจากบทความ [2] มาใช้ซึ่งมีทั้งหมด 4 สถานะ และเพื่อให้ได้แบบจำลองของระบบทั้งหมดก็ทำการรวมระบบป้องกันแบบต่าง ๆ เข้ากันแบบจำลองของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน หลังจากที่เราได้แบบจำลองของระบบทั้งหมดแล้วก็ทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำการคำนวณความน่าเชื่อถือของระบบป้องกันแบบต่าง ๆ เพื่อใช้ในการหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบป้องกันแบบต่าง ๆ

ในการประเมินค่าความเชื่อถือได้ของระบบป้องกันแบบต่าง ๆ นี้จะอาศัยค่าแอมบอร์มอลอันอเวเลบิลิตี ยิ่งค่าความน่าเชื่อถือยิ่งมีค่าน้อยเท่าไร ระบบป้องกันโดยรวมก็จะยิ่งความเชื่อถือได้สูงมากขึ้นเท่านั้น และค่าที่ใช้ในการประเมินจะเป็นค่าความน่าเชื่อถือในตัวนี้ในตำแหน่งที่มีค่าต่ำที่สุด หรืออยู่ในช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการทดสอบประจำสำหรับอุปกรณ์ต่าง ๆ

จากการศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะพบว่าค่าพารามิเตอร์ส่วนมากเกือบทั้งหมดจะมีผลกระทบต่อทั้งค่าความน่าเชื่อถือของระบบป้องกันและช่วงเวลาในการทดสอบประจำของอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ นี้เป็นพื้นฐานที่ทำให้ระบบป้องกันแต่ละรูปแบบมีความแตกต่างกัน

หลังจากนั้นก็ทำการเปรียบเทียบระบบป้องกันแบบต่าง ๆ ได้แก่ ระบบป้องกันที่ใช้รีเลย์กระแสเกินรูปแบบต่าง ๆ กัน 7 รูปแบบ ระบบป้องกันที่ใช้รีเลย์ผลต่าง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ได้กับทั้งรีเลย์ผลต่างกระแส และผลต่างแรงดัน ระบบป้องกันที่ใช้รีเลย์ระยะทางแบบไม่อาศัย

ระบบไฟลอท และสุดท้ายก็ทำการเปรียบเทียบระบบป้องกันที่ใช้รีเลย์ระยะทางแบบอาศัยระบบไฟลอท 3 แบบ ได้แก่ DUTT PUTT และ POTT โดยการศึกษาเปรียบเทียบจะพิจารณาใน 2 ด้าน ได้แก่ ค่าครรชนีเอ็บนอร์มอลอันอเวลบิลิตี และค่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบป้องกัน

นอกจากนี้แล้วยังได้ทำการนำเสนอการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบป้องกัน ด้วยการเปรียบเทียบระบบป้องกันอ้างอิงกับระบบป้องกันที่เปลี่ยนรีเลย์จากรีเลย์ธรรมดาที่ไม่มีฟังก์ชันตรวจสอบตัวเอง มาเป็นดิจิตอลรีเลย์ที่มีฟังก์ชันตรวจสอบตัวเอง ซึ่งผลที่ได้ก็แสดงให้เห็นว่าทำให้ระบบป้องกันดีขึ้น แม้ว่าเมื่อมองในค่าครรชนีเอ็บนอร์มอลอันอเวลบิลิตีแล้วจะเป็นการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้แล้วยังช่วยให้ระบบป้องกันไม่ต้องมีการทดสอบประจำบ่อยครั้งมากนัก ซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาลงได้ไม่มากนัก และยังมีการปรับปรุงโดยการทำการทดสอบระบบป้องกันในช่วงเวลาที่เหมาะสมซึ่งวิธีนี้ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถทำได้โดยที่ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนอุปกรณ์ และผลที่ได้ก็สามารถเห็นได้อย่างชัดเจน ผลที่ได้จากการปรับปรุงนี้จะเป็นข้อเสนอแนะในการนำไปปฏิบัติจริง

9.2 ข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการศึกษาด้านความเชื่อถือได้ของระบบป้องกันแบบต่าง ๆ และยังสามารถที่จะนำหลักการนี้ไปใช้ในการสร้างรูปแบบใหม่ ๆ ของระบบป้องกันได้ แต่อย่างไรก็ตามวิธีที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ก็ยังคงมีปัญหายู้ง้างดังนี้

1. ในระบบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ส่วนใหญ่จะเป็นระบบที่ไม่มี ความซับซ้อนมากนัก แต่สำหรับระบบที่ซับซ้อนเช่น การป้องกันบัส นั้นไม่สามารถที่จะทำการสร้างแบบจำลองได้ง่ายนัก ดังนั้นน่าจะเป็นผลดีที่จะศึกษาถึงระบบป้องกันในระบบจำหน่ายอย่างละเอียด โดยวิธีต่าง ๆ ในการศึกษาความเชื่อถือได้ เช่นวิธีมอนติคาโล ซึ่งเหมาะกับการศึกษาระบบที่ซับซ้อน
2. ระบบรีโคสเซอร์ เป็นระบบที่สำคัญเป็นอย่างมากในระบบป้องกัน และมีผลค่อนข้างมากในด้านความเชื่อถือได้ และความมั่นคงของระบบโดยรวม ดังนั้นคงจะเป็นประโยชน์อย่างมากที่จะทำการศึกษาด้านความเชื่อถือได้ของระบบป้องกันที่รวมผลกระทบของรีโคสเซอร์
3. ในการศึกษาเรื่องผลของช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำการทดสอบประจำอุปกรณ์ต่าง ๆ นั้น ได้ทำการสมมติให้ทุก ๆ อุปกรณ์ในระบบได้รับการตรวจสอบที่ช่วงเวลาเดียวกัน ดังนั้นค่าที่ได้ อาจจะไม่ใช่ว่าที่ดีที่สุด แต่ก็เป็นค่าที่นำไปใช้งานได้ง่ายกว่า แต่อย่างไรก็ดี หากต้องการค่าที่ดีที่สุดจะต้องทำการทดสอบให้ทุก ๆ อุปกรณ์สามารถทำการทดสอบที่ช่วงเวลาต่างกันได้ เช่น ดิจิตอลรีเลย์ที่มีฟังก์ชันตรวจสอบตัวเอง อาจไม่จำเป็นต้องตรวจสอบ ในขณะที่อุปกรณ์อื่น ๆ อาจต้องตรวจ

สอบปีละครั้ง แต่ปัญหาของการศึกษาแบบนี้ก็คือ ความต้องการการเก็บข้อมูลที่มีจำนวนมหาศาลที่รวบรวมข้อมูลทั้งหมดของทุก ๆ อุปกรณ์ในระบบ ดังนั้นอาจจะต้องใช้วิธีอื่น ๆ ในการทำการศึกษา

4. ในการศึกษาที่ยังไม่ได้ศึกษาทั้งระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งจะมีผลกระทบด้านต่าง ๆ ให้ศึกษาเพิ่มเติมเช่น ความมั่นคงของระบบไฟฟ้า ผลของระบบป้องกันข้างเคียง ฯลฯ ซึ่งจะทำให้เห็นภาพรวมของระบบป้องกันของระบบไฟฟ้าทั้งหมดได้

5. การศึกษานี้จะพิจารณาเพียงด้านความเชื่อถือได้เท่านั้น ซึ่งความต้องการของระบบป้องกันนั้นมีมากกว่าด้านความเชื่อถือได้เพียงด้านเดียว เช่น ความมั่นคง ความซับซ้อน ความรวดเร็ว และความประหยัด ซึ่งจะเป็นประโยชน์มากยิ่งขึ้นหากพิจารณาสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ได้โดยคิดออกมาเป็นครรชนเชิงปริมาณ เพราะจะทำให้ช่วยตัดสินใจในการออกแบบได้ง่ายยิ่งขึ้น

6. ในการศึกษาจำเป็นที่จะต้องมึข้อมูลของอุปกรณ์ต่าง ๆ มากมาย ดังนั้นคงจะเป็นการดีถ้าได้มีการเริ่มเก็บข้อมูลต่าง ๆ อย่างจริงจัง เพราะผลที่ได้ตามทฤษฎีจะไม่มีประโยชน์หากไม่มีการนำไปใช้จริงทางปฏิบัติ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. P.M. Anderson and S.K. Agarwal. An Improved Model for Protective-System Reliability. IEEE Transactions of Reliability. Vol. R-41, No. 3, September 1992 : pp. 422-426.
2. P.M. Anderson, G.M. Chintaluri, S.M. Magbuhat and R.F. Ghajar. An Improved Reliability Model for Redundant Protective System – Markov Models. IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 12, No. 2, May 1997 : pp. 573-578.
3. J.J Kumm, M.S. Weber, D. Hou and E.O. Schweitzer, III. Predicting the Optimum Routine Test Interval for Protective Relays. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 10, No. 2, April 1995 : pp. 659-665.
4. Edmund O. Schweitzer, III and John J. Kumm. Statistical Comparison and Evaluation of Pilot Protection Schemes. 23rd Annual Western Protective Relay Conference. October 1996.
5. J.S. Pugh, L.R. Castro Ferreira, P.A. Crossley, R.N. Allan, J. Goody, F. Downes, M. Burt. The Reliability of Protection and Control Systems for Transmission Feeders. IEE Developments in Power System Protection. Conference Publication No. 434, 25-27th March 1997 : pp. 10-13.
6. Jason Pugh, Peter Crossley. Measuring the Reliability of a Protection Scheme used for Fault Clearance on a Transmission Feeders. IEE Colloquium, The Impact of Protection and Control on Quality of Supply. 28 Oct 1997 : pp. 4/1-4/6.
7. Roy Billinton and Ronald N. Allan. 1992. Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques. Second Edition. New York. : Plenum Press.,
8. Paul M. Anderson. 1999. Power System Protection. : IEEE Press.,
9. Stanley H. Horowitz and Arun G. Phadke. 1995. Power System Relaying. Second Edition. : Research Studies Press Ltd.,

ประวัติผู้เขียน

นายกันย์ กังวานสายชล เกิดเมื่อวันเสาร์ที่ 10 กันยายน พ.ศ. 2520 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2541

กันย์ กังวานสายชล มีผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ในงานประชุมทางวิชาการ 2 ฉบับ ซึ่งเป็นงานประชุมทางวิชาการระดับภูมิภาคเอเชีย - แปซิฟิก และระดับนานาชาติตามลำดับดังนี้

1. K. Kangvansaichol, P. Pittayapat and B. Eua-arporn. Optimum Routine Test Intervals for Differential and Distance Relay Schemes - Using Markov Model. CEPSI 2000, Phillipines
2. K. Kangvansaichol, P. Pittayapat and B. Eua-arporn. Routine Test Interval Decision for Protective Systems Based on Probabilistic Approach. POWERCON 2000, Australia

และยังมีผลงานที่ได้รับการตอบรับบทคัดย่อ และอยู่ระหว่างการคัดเลือกรอบสุดท้ายจากงานประชุมทางวิชาการนานาชาติอีก 1 แห่ง ซึ่งมีรายการดังต่อไปนี้

1. K. Kangvansaichol, P. Pittayapat and B. Eua-arporn. Optimal Routine Test Intervals for Pilot Protection Schemes Using Probabilistic Methods. DPSP 2001, Netherlands

กันย์ กังวานสายชลมีความสนใจเป็นพิเศษในด้านระบบป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง และด้านความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง มีความตั้งใจที่จะศึกษาจนจบปริญญาเอก และนำความรู้ที่ได้รับมานั้นกลับมาพัฒนาประเทศชาติต่อไปในอนาคต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย