การหาจำนวนครั้งในการบำรุงรักษาเชิงป้องกันด้วยค่าความพร้อมใช้ที่เหมาะสมของระบบจ่ายไฟฟ้าสำรองในการควบคุมการจราจรทางอากาศ

ศักดิ์ดา เหลืองสกุลทอง[1], สรินทิพย์ สถิตย์เสถียร[2] และ เจริญชัย โขมพัตราภรณ์[3]

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถ.ประชาอุทิศ บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140 โทรศัพท์ 0-2470-9175-6 โทรสาร 0-2872-9081

E-mails: [1] sakdape45@hotmail.com, [2] sarintip.s@gmail.com, [3] charoenchai.kho@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

การเดินทางและขนส่งทางอากาศเป็นรูปแบบการขนส่งที่ให้ความสำคัญความปลอดภัยของผู้โดยสารเป็นปัจจัยแรก ระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมการจราจรทางอากาศจึงต้องสามารถจ่ายไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องเพราะหากเกิดการขัดข้องจะมีผลต่อความปลอดภัยของผู้โดยสาร แต่ปัจจุบันท่าอากาศยานในประเทศไทยยังไม่มีการกำหนดการบำรุงรักษาตามสภาพการขัดข้องจริงของระบบจ่ายไฟฟ้า เป็นเพียงการบำรุงรักษาตามที่ผู้ผลิตแนะนำเท่านั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอการใช้หลักการทางวิศวกรรมความไว้วางใจเพื่อหากำหนดการการบำรุงรักษา ภายใต้ข้อจำกัดทางด้านเป้าหมายขั้นต่ำของค่าความพร้อมใช้ของระบบและงบประมาณ วิเคราะห์ผ่านค่าความพร้อมใช้ของระบบจ่ายไฟฟ้าโดยพิจารณา 1) ความสัมพันธ์ของเวลาเฉลี่ยระหว่างการขัดข้องและครั้งที่ซ่อม และ 2) ความสัมพันธ์ของอัตราการขัดข้องและรูปแบบการบำรุงรักษา โดยระบบจ่ายไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นระบบแบบซ้ำซ้อน ผลการวิจัยทำให้ได้แนวทางการกำหนดการบำรุงรักษาของระบบจ่ายไฟฟ้าตามข้อมูลสภาพการขัดข้องจริง

คำสำคัญ: ความพร้อมใช้ของระบบจ่ายกระแสไฟฟ้า; การจัดตารางการบำรุงรักษา; ระบบไฟฟ้าสำรองแบบซ้ำซ้อน (Standby Redundant System)

1.บทนำ

การเดินทางและขนส่งทางอากาศเป็นรูปแบบการขนส่งที่ให้ความสำคัญกับความปลอดภัยของผู้โดยสารเป็นปัจจัยแรก เมื่อต้องเผชิญกับสภาพอากาศที่เลวร้ายอาจเกิดอุบัติเหตุได้ง่ายและรุนแรง จึงต้องมีระบบการควบคุมการจราจรทางอากาศที่สามารถดำเนินงานได้อย่างต่อเนื่องเพื่อให้การขับเครื่องบินไปตามเส้นทางที่ปลอดภัย ระบบควบคุมการจราจรทางอากาศในประเทศไทยเกือบทั้งหมดควบคุมด้วยระบบที่ใช้ไฟฟ้า เมื่อเกิดไฟฟ้าขัดข้องระบบจ่ายไฟฟ้าสำรองจะทำงานทันที โดยระบบจ่ายไฟฟ้าสำรองนี้จะมีการบำรุงรักษาตามคำแนะนำของผู้ผลิต แต่อุปกรณ์ที่ใช้ในสภาพการใช้งานจริงอาจแตกต่างจากสภาพการทดสอบ ทำให้การบำรุงรักษาอาจต้องมีการปรับเปลี่ยนตามข้อมูลการขัดข้องจริง แต่ยังไม่มีท่าอากาศยานใดในประเทศไทยที่บำรุงรักษาอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าสำรองตามข้อมูลการขัดข้องจริง และได้ปรากฏว่าในวันที่ 11 กันยายน พ.ศ. 2551 เกิดเหตุการณ์จอแสดงผลข้อมูลเรดาร์ขัดข้อง ณ ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ เนื่องจากระบบไฟฟ้าสำรองขัดข้อง [1] ทำให้เกิดผลกระทบหลายประการ เช่น ความไม่พอใจจากผู้โดยสารและนักบินจากการที่ต้องรอสัญญาณลงจอดและบินขึ้นของเครื่องบิน เกิดค่าใช้จ่ายด้านน้ำมันเชื้อเพลิงเนื่องจาก

เครื่องบินที่กำลังจะร่อนลงต้องบินวนจนกว่าจะได้สัญญาณลงจอด และหากในอนาคตการจราจรทางอากาศมีความหนาแน่นมากกว่าในปัจจุบันอาจเกิดอุบัติเหตุขึ้นได้

เหตุการณ์ดังกล่าวเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่ต้องการป้องกันการเกิดเหตุการณ์ระบบไฟฟ้าสำรองขัดข้องซ้ำ โดยใช้หลักการวิศวกรรมความไว้วางใจ (Reliability Engineering) ผ่านการวิเคราะห์ค่าความพร้อมใช้ (Availability) เพื่อเป็นตัวชี้วัดที่สะท้อนถึงความพร้อมใช้ของระบบจ่ายไฟฟ้า นอกจากนี้ค่าความพร้อมใช้ยังสามารถนำไปใช้เพื่อหากำหนดการการบำรุงรักษา และกำหนดระยะเวลาในการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่แทนอุปกรณ์เดิม งานวิจัย [7-9] นำรูปแบบสำหรับความไว้วางใจ (Reliability Models) มาใช้กำหนดระดับในการรับประกันสินค้าเพื่อสร้างอำนาจในการแข่งขัน Sheriff และคณะ [2] วางแผนการบำรุงรักษาโดยใช้ค่าความพร้อมใช้เป็นเป้าหมาย และอีกหลายงานวิจัย [3-6] ที่ใช้เวลาโดยเฉลี่ยระหว่างการขัดข้องสำหรับผลิตภัณฑ์ที่สามารถซ่อมได้ (Mean Time Between Failure: MTBF) เวลาโดยเฉลี่ยในการซ่อม (Mean Time To Repair: MTTR) และเวลาโดยเฉลี่ยในการบำรุงรักษา (Mean Time Preventive Maintenance: MTPM) เพื่อหากำหนดการการบำรุงรักษา ความถี่ในการตรวจสอบ (Inspection) และการตัดสินใจเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่

งานวิจัยนี้สร้างกำหนดการการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของท่าอากาศยานสุวรรณภูมิโดยพิจารณาความสัมพันธ์ของรูปแบบและครั้งที่บำรุงรักษาภายใต้ข้อจำกัดด้านค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง เพื่อเพิ่มค่าความพร้อมใช้ของระบบไฟฟ้าสำรองในการบริการควบคุมจราจรทางอากาศให้ได้สูงที่สุด ภายใต้ข้อจำกัดของค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง โดยสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อกำหนดการการบำรุงรักษาใน 1 ปี ที่ระบุถึงรูปแบบและจำนวนครั้งในแต่ละรูปแบบการบำรุงรักษาจากการใช้ค่า MTBF, MTTR และ MTPM และแสดงการประยุกต์ใช้ผ่านกรณีศึกษา

2.ปัญหาวิจัย

ปัญหาของงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับระบบไฟฟ้าที่จ่ายไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ต่างๆ ในการควบคุมการจราจรทางอากาศของท่าอากาศยานระหว่างประเทศของไทยแห่งหนึ่ง โดยมีรายละเอียดโดยสังเขปดังนี้

2.1. ระบบไฟฟ้า

ระบบไฟฟ้ามีหน้าที่จ่ายไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ควบคุมการจราจรทางอากาศ เริ่มจากโรงผลิตไฟฟ้าส่งไฟฟ้าไปยังแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก (Main Power Supply) กรณีแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักเกิดการขัดข้องจะมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรอง (Generator) อยู่ 2 เครื่อง เครื่องสำรองไฟฟ้าเครื่องที่ 1 จะทำงานแทนทันทีที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักขัดข้อง แต่หากเครื่องสำรองไฟฟ้าเครื่องที่ 1 ขัดข้องด้วย เครื่องสำรองไฟฟ้าเครื่องที่ 2 จะทำงานแทนทันทีเช่นกันเพื่อให้มีไฟฟ้าป้อนไปยังอุปกรณ์ควบคุมการจราจรทางอากาศต่างๆ ระบบไฟฟ้าดังกล่าวสามารถแสดงโดยสังเขปดังรูปที่ 1

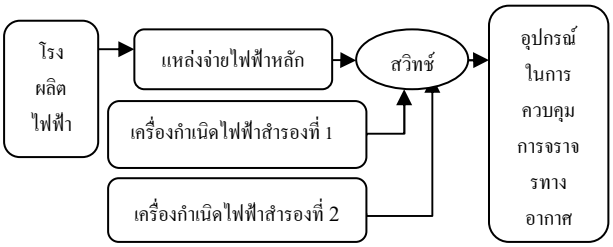
2.2. สภาพปัญหา

ปัญหาที่พบ คือ ระบบจ่ายไฟฟ้าเกิดการขัดข้องทั้งระบบ ทั้งแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองที่ 1 และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองที่ 2 ขัดข้องพร้อมกันทำให้ไม่สามารถส่งสัญญาณเรดาห์เพื่อควบคุมการจราจรทางอากาศได้

ข้อมูลช่วงระยะเวลาการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักในระยะเวลา 2 ปีที่ผ่านมา แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักเกิดการขัดข้องดังแสดงในตารางที่ 1 โดยสดมภ์แรกหมายถึง ลำดับรอบเวลาที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักจ่ายไฟฟ้าได้ต่อเนื่อง สดมภ์ที่ 2 หมายถึง ระยะเวลาที่ไฟฟ้าหลักจ่ายได้ต่อเนื่องไม่ขัดข้อง และสดมภ์ที่ 3 หมายถึง ระยะเวลาที่เครื่องสำรองไฟฟ้าทำงานแทนเมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักเกิดการขัดข้อง ยกตัวอย่างเช่น

รอบเวลาที่ 1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักทำงานต่อเนื่องเป็นเวลา 32 วัน จึงขัดข้องทำให้เครื่องสำรองไฟฟ้าทำงานแทนเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักจึงเริ่มทำงานเป็นปกติอีกครั้งหนึ่ง

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า รอบเวลาที่ 2, 3, 14 และ 15 แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักทำงานต่อเนื่องไม่เกิน 10 วันก่อนเกิดการขัดข้อง แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักนี้อยู่ในความรับผิดชอบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ส่วนระบบไฟฟ้าสำรองเป็นความรับผิดชอบของบริษัท วิทยุการบินแห่งประเทศไทย ซึ่งต้องบำรุงรักษาให้มั่นใจว่าระบบไฟฟ้าสำรองสามารถพร้อมใช้งานเมื่อเกิดเหตุการณ์แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าให้ได้ การบำรุงรักษาระบบการจ่ายไฟฟ้าของแหล่งไฟฟ้าสำรองในปัจจุบันเป็นเพียงการตรวจสอบตามรอบเวลาซึ่งไม่ได้สะท้อนค่าความพร้อมใช้ของระบบจ่ายไฟฟ้าจริงทั้งระบบ งานวิจัยนี้จึงนำค่าความพร้อมใช้มาประเมิน เพื่อสร้างกำหนดการการบำรุงรักษาแหล่งไฟฟ้าสำรองให้ได้ค่าความพร้อมใช้มากขึ้น



รูปที่ 1: ระบบการจ่ายไฟฟ้า

ตารางที่ 1: ระยะเวลาการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักในระยะเวลา 2 ปีที่ผ่านมา

ลำดับรอบเวลาที่	ระยะเวลาที่ไฟฟ้าหลักจ่ายได้ต่อเนื่อง (วัน)	ระยะเวลาที่ไฟฟ้าหลักขาดหายเครื่องสำรองไฟฟ้าทำงานแทน (นาที)
1	32	30
2	10	20
3	6	20
4	136	20
5	28	50
6	31	20
7	30	20
8	31	55
9	30	20
10	184	20
11	30	20
12	27	220

ตารางที่ 1: ระยะเวลาการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักในระยะเวลา 2 ปีที่ผ่านมา (ต่อ)

ลำดับรอบเวลาที่	ระยะเวลาที่ไฟฟ้าหลักจ่ายได้ต่อเนื่อง (วัน)	ระยะเวลาที่ไฟฟ้าหลักขาดหายเครื่องสำรองไฟฟ้าทำงานแทน (นาที)
13	58	20
14	3	20
15	6	335
16	35	20

3. ตัวแบบทางคณิตศาสตร์

ในการวิเคราะห์ระบบเริ่มจากการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ โดยวิเคราะห์ค่าความพร้อมใช้ของระบบจ่ายไฟฟ้าที่ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองทั้ง 2 เครื่อง เทียบกับค่าเป้าหมายในหัวข้อ 3.1 จากนั้นในหัวข้อ 3.2 อธิบายการสร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของค่าความพร้อมใช้ ในหัวข้อ 3.3 กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่าง MTBF กับครั้งที่ขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองและหัวข้อ 3.4 กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองกับครั้งที่ในกาบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรอง ในหัวข้อ 3.5 ได้นำความสัมพันธ์ในหัวข้อ 3.3 และ 3.4 มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง MTBF กับครั้งที่ในการบำรุงรักษาเพื่อหากำหนดการการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองในหัวข้อที่ 3.6

3.1. การวิเคราะห์ค่าความพร้อมใช้

ค่าความพร้อมใช้ คือ สัดส่วนระหว่างเวลาที่ระบบไม่ขัดข้อง (Up Time) กับ เวลาทั้งหมด (Total Time) ซึ่งเวลาทั้งหมด คือ เวลาที่ระบบไม่ขัดข้องรวมกับเวลาที่ระบบขัดข้อง (Down Time) ดังสมการ (1)

$$Availability = \frac{Up\ Time}{Total\ Time} = \frac{Up\ Time}{Up\ Time + Down\ Time} \quad (1)$$

จากการสำรวจข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2549 ถึง วันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2549 และ วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2551 ถึง วันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2552 (ในช่วงตั้งแต่ วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2550 ถึง วันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2550 ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้) ระยะเวลาที่ระบบจ่ายไฟฟ้าเกิดการขัดข้องไม่สามารถทำงานเท่ากับ 17 นาที และเวลารวมของระบบจ่ายไฟฟ้าเกิด (ทั้งที่ขัดข้องและไม่ขัดข้อง) เท่ากับ 1,226,880 นาที (852 วัน) หรือคิดเป็นค่าความพร้อมใช้เท่ากับ (1,226,880 – 17) / 1,226,880 = 0.9999861

บริษัท วิทยุการบินแห่งประเทศไทย จำกัด ได้กำหนดเป้าหมายค่าความต่อเนื่องของการให้บริการควบคุมการจราจรทางอากาศให้มีค่าเป็น 0.9997 ค่าความพร้อมใช้ของระบบจ่ายไฟฟ้าข้างต้นมีค่ามากกว่าค่าเป้าหมาย แต่หากเปรียบเทียบกับระดับคุณภาพของกระบวนการผลิตสินค้าในแนวทาง 6σ [10] ที่ใช้ค่าเป้าหมายเท่ากับ 6σ หรือ ระดับคุณภาพที่ทำให้มีโอกาสเกิดข้อบกพร่อง 3.4 ppm (คิดค่าเผื่อเล็กน้อยของการขยับของกระบวนการ หรือที่เรียกว่า Mean Shift [11]) คิดเป็นโอกาสที่ไม่เกิดข้อบกพร่องเท่ากับ 0.9999966 สังเกตได้ว่าค่าความพร้อมใช้ของระบบการจ่ายไฟฟ้าที่จ่ายไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ควบคุมการจราจรทางอากาศ มีค่าน้อยกว่าระดับคุณภาพ 6σ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตสินค้า ทั้งๆ ที่ระบบจ่ายไฟฟ้าดังกล่าวมีผลต่อความปลอดภัยของผู้โดยสาร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงกำหนดค่าความพร้อมใช้ของระบบจ่ายไฟฟ้าต้องมีค่าอย่างน้อย 0.9999966

ค่าความพร้อมใช้ของระบบการจ่ายไฟฟ้าขึ้นอยู่กับค่าความพร้อมใช้แต่ละส่วนของระบบการจ่ายไฟฟ้า ดังนั้นจึงคำนวณค่าความพร้อมใช้ในแต่ละส่วนดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1.1. แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก

เวลาที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักขัดข้องมีค่าเป็น 910 นาที และเวลาตลอดทั้งปี (ทั้งที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักขัดข้องและไม่ขัดข้อง) 1,226,880 นาที คิดเป็นค่าความพร้อมใช้ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก (1,226,880 – 910) / 1,226,880 = 0.9992583

3.1.2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 1

เวลาที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 1 ขัดข้อง 5,058 นาทีต่อปี (ทั้งที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักขัดข้องและไม่ขัดข้อง) 1,226,880 นาที คิดเป็นค่าความพร้อมใช้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 1 (1,226,880 – 5,058) / 1,226,880 = 0.9958774 ซึ่งหมายความว่า หากแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักขัดข้อง 1,000 ครั้ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 1 จะจ่ายไฟฟ้าแทนแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักประมาณ 996 ครั้ง ส่วนอีก 4 ครั้ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 1 เกิดการขัดข้องไม่สามารถทำงานแทนแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักได้

ช่วงเวลาที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 1 ขัดข้อง คำนวณจาก 1) เวลาที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองถูกทดสอบประจำสัปดาห์ (720 นาทีต่อปี) และประจำไตรมาส (120 นาทีต่อปี) 2) เวลาที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองได้รับการบำรุงรักษา และ 3) เวลาที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1 ขัดข้องไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าแทนแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักเมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักขัดข้อง ส่วนช่วงเวลาที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 1 ไม่ขัดข้อง คำนวณจาก 1) เวลาที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 1 ต้องทำงานแทนในกรณีที่ไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักขัดข้อง และ 2) เวลาที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 1 เตรียมพร้อมเพื่อจะจ่ายไฟฟ้าแทนแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักหากแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักขัดข้อง (Stand By) เนื่องจากเวลาดังกล่าว ถือว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 1 สามารถจ่ายไฟฟ้าแทนได้ การคำนวณค่าความพร้อมใช้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 2 จะคำนวณในแนวทางเดียวกับการคำนวณค่าความพร้อมใช้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 1 ค่าความพร้อมใช้ในแต่ละส่วนของระบบจ่ายไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 2

เนื่องจากไม่สามารถปรับปรุงค่าความพร้อมใช้ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักได้ และต้องให้ค่าความพร้อมใช้ของระบบจ่ายไฟฟ้ามีค่า 0.9999966 ตามเป้าหมาย จึงต้องเพิ่มค่าความพร้อมใช้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองทั้งสองเครื่อง

ตารางที่ 2: ค่าความพร้อมใช้ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าส่วนต่างๆ ในระบบ

แหล่งจ่ายไฟฟ้า	ค่าความพร้อมใช้	ระยะเวลารวม(นาที)	ระยะเวลาที่เกิดการขัดข้อง (นาที)
ระบบจ่ายไฟฟ้า	0.9999861	1,226,880	17
แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก	0.9992583	1,226,880	910
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองที่ 1	0.9958774	1,226,880	5,058
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองที่ 2	0.9834372	1,226,880	8,852

3.2. รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของค่าความพร้อมใช้

3.2.1. ค่าความพร้อมใช้ของระบบจ่ายไฟฟ้า

จากสมการ (1) ค่า Up Time สามารถพิจารณาเป็น MTBF (เวลาโดยเฉลี่ยระหว่างการขัดข้อง) ค่า Downtime สามารถพิจารณาเป็นเวลารวมของ MTTR (เวลาโดยเฉลี่ยในการซ่อม) และ MTPM (เวลาโดยเฉลี่ยในการบำรุงรักษา) ดังนั้นค่าความพร้อมใช้จึงสามารถคำนวณได้ดังสมการ (2)

$$Availability = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + MTPM} \tag{2}$$

3.2.2. ค่า MTBF ของระบบจ่ายไฟฟ้า

กำหนดให้ T เป็น ตัวแปรสุ่มของระยะเวลาระหว่างการขัดข้องที่มีการแจกแจงเป็นแบบเอกซ์โปเนนเชียล ซึ่งเป็นรูปแบบที่ใช้งานมากที่สุดในงานทางวิศวกรรม [12] มีฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function) $f(t)$ ดังสมการ (3) และฟังก์ชั่นความไว้วางใจ $R(t)$ คำนวณดังสมการ (4)

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \tag{3}$$

$$R(t) = P(T > t) = \int_t^{\infty} f(t)dt = e^{-\lambda t} \tag{4}$$

โดยที่ λ คือ อัตราการขัดข้องของอุปกรณ์ (จำนวนครั้งที่ขัดข้อง/ระยะเวลา) ค่า MTBF สามารถคำนวณได้จากฟังก์ชั่น $R(t)$ [13] ดังสมการ (5)

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t)\,dt \tag{5}$$

ระบบการจ่ายไฟฟ้าดังรูปที่ 1 เป็นรูปแบบระบบไฟฟ้าสำรองซ้ำซ้อน (Standby Redundant System : SRS) Kuo และคณะ [14] กล่าวว่า สำหรับ SRS ฟังก์ชั่น $R(t)$ ต้องคำนวณทั้ง 3 กรณีดังนี้ คือ 1) กรณีแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักใช้งานได้ หรือ 2) กรณีแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักขัดข้อง สวิทช์จึงเปลี่ยนให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 1 จ่ายไฟฟ้าแทน หรือ 3) กรณีแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 1 ขัดข้องพร้อมกัน สวิทช์จึงเปลี่ยนให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 2 จ่ายไฟฟ้าแทน ดังนั้นฟังก์ชั่น $R(t)$ จึงประกอบด้วย 3 พจน์ดังนี้ 1) พจน์ $t_m > t$ คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักใช้งานได้ในช่วงเวลา t โดย t_mคือ ระยะเวลาที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักทำงานได้ต่อเนื่อง 2) พจน์ ($t_m \leq t \cap t_1 > t - t_m$) คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักใช้งานได้ต่อเนื่องจนถึงเวลา t แล้วขัดข้อง สวิทช์จึงเปลี่ยนให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 1 จ่ายไฟฟ้าแทน โดย t_1 คือ ระยะเวลาที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 1 ทำงาน และ 3) พจน์ ($t_m \leq t \cap t_1 \leq t - t_m \cap t_2 > t - t_m - t_1$) คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 1 ใช้งานได้ต่อเนื่องจนถึงเวลา $t - t_m$ สวิทช์จึงเปลี่ยนให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 2 จ่ายไฟฟ้าแทน โดย t_2 คือ ระยะเวลาที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 2 ทำงาน ฟังก์ชั่น $R(t)$ ของ SRS เป็นดังสมการ (6)

$$\begin{aligned} R_{SRS}(t) &= P[(t_m > t) \cup (t_m \leq t \cap t_1 > t - t_m) \cup (t_m \leq t \cap t_1 \leq t - t_m \cap t_2 > t - t_m - t_1)] \\ &= e^{-\lambda_m t} + \frac{\lambda_m}{(\lambda_1 - \lambda_m)}\left[e^{-\lambda_m t} - e^{-\lambda_1 t}\right] \\ &+ \frac{\lambda_m \lambda_1}{(\lambda_2 - \lambda_m)(\lambda_2 - \lambda_1)}\left[e^{(\lambda_2 - \lambda_m - \lambda_1)t} - e^{-\lambda_m t} - e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t}\right] \end{aligned} \tag{6}$$

ดังนั้นค่า MTBF ของระบบ SRS เป็นดังสมการ (7)

$$
\begin{aligned}
MTBF_{SRS} &= \int_0^{\infty} R_{SRS}(t)\,dt \\
&= \left[\frac{-e^{-\lambda_m t}}{\lambda_m} - \frac{e^{-\lambda_m t}}{(\lambda_1-\lambda_m)} + \frac{\lambda_m e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_1(\lambda_1-\lambda_m)} + \frac{\lambda_m\lambda_1 e^{(\lambda_2-\lambda_m-\lambda_1)t}}{(\lambda_2-\lambda_m-\lambda_1)(\lambda_2-\lambda_m)(\lambda_2-\lambda_1)}\right. \\
&\quad \left. + \frac{\lambda_1 e^{-\lambda_m t}}{(\lambda_2-\lambda_m)(\lambda_2-\lambda_1)} + \frac{\lambda_m e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2-\lambda_m)(\lambda_2-\lambda_1)} - \frac{\lambda_m\lambda_1 e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2(\lambda_2-\lambda_m)(\lambda_2-\lambda_1)}\right]\Big|_0^{\infty} \\
&= \frac{1}{\lambda_m} + \frac{1}{(\lambda_1-\lambda_m)} - \frac{\lambda_m}{\lambda_1(\lambda_1-\lambda_m)} - \frac{\lambda_m\lambda_1}{(\lambda_2-\lambda_m-\lambda_1)(\lambda_2-\lambda_m)(\lambda_2-\lambda_1)} \\
&\quad - \frac{\lambda_1}{(\lambda_2-\lambda_m)(\lambda_2-\lambda_1)} - \frac{\lambda_m}{(\lambda_2-\lambda_m)(\lambda_2-\lambda_1)} + \frac{\lambda_m\lambda_1}{\lambda_2(\lambda_2-\lambda_m)(\lambda_2-\lambda_1)}
\end{aligned}
\tag{7}
$$

เมื่อ λ_m คือ อัตราการขัดข้องของแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก

λ_i คือ อัตราการขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ i = 1, 2

3.2.3. การคำนวณค่า MTTR ของระบบจ่ายไฟฟ้า

กิติศักดิ์ [10] ได้นิยาม MTTR คือ เวลาโดยเฉลี่ยระหว่างการปฏิบัติการซ่อม O'Connor และคณะ [15] กล่าวว่า MTTR ของอุปกรณ์หนึ่งชิ้นคำนวณได้ดังสมการที่ (8)

$$MTTR = \frac{\sum_{k=1}^{q}\lambda_k r_k}{\sum_{k=1}^{q}\lambda_k} \tag{8}$$

เมื่อมีอาการการขัดข้องทั้งสิ้น q อาการ โดยที่ λ_k คือ อัตราการขัดข้องด้วยอาการ k และ r_k คือ เวลาในการซ่อมเพื่อแก้ไขอาการขัดข้อง k เนื่องจากระบบไฟฟ้ามีรูปแบบ SRS ต้องใช้ค่าอัตราการขัดข้องเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 1 ด้วยอาการ k_1 และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 2 ด้วยอาการ k_2 λ_{SRS,k_1,k_2}โดย k_i เป็นอาการขัดข้องอาการ k ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ I ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1/MTBF_{SRS,k_1,k_2}$ โดยค่าของ $MTBF_{SRS,k_1,k_2}$ คำนวณตามสมการ (7) แต่เปลี่ยนค่า λ_i เป็น λ_{k_i} ในสมการ (7) ทำให้ค่า $MTBF_{SRS,k_1,k_2}$ คำนวณตามสมการ (9)

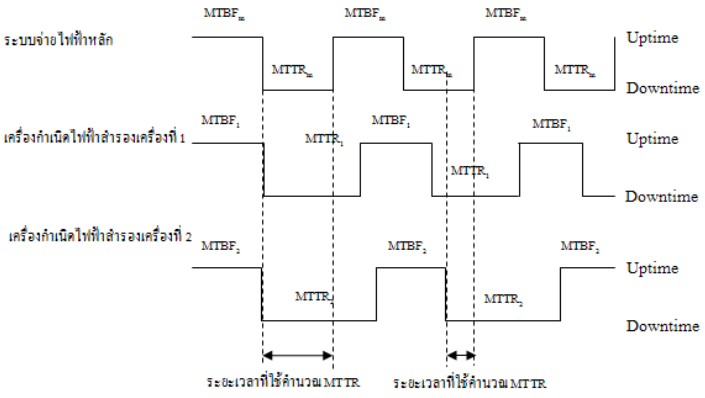
$$
\begin{aligned}
MTBF_{SRS,k_1,k_2} &= \frac{1}{\lambda_m} + \frac{1}{(\lambda_{k_1}-\lambda_m)} - \frac{\lambda_m}{\lambda_{k_1}(\lambda_{k_1}-\lambda_m)} - \frac{\lambda_m\lambda_{k_1}}{(\lambda_{k_2}-\lambda_m-\lambda_{k_1})(\lambda_{k_2}-\lambda_m)(\lambda_{k_2}-\lambda_{k_1})} \\
&\quad - \frac{\lambda_{k_1}}{(\lambda_{k_2}-\lambda_m)(\lambda_{k_2}-\lambda_{k_1})} - \frac{\lambda_m}{(\lambda_{k_2}-\lambda_m)(\lambda_{k_2}-\lambda_{k_1})} + \frac{\lambda_m\lambda_{k_1}}{\lambda_{k_2}(\lambda_{k_2}-\lambda_m)(\lambda_{k_2}-\lambda_{k_1})}
\end{aligned}
\tag{9}
$$

เมื่อ $MTBF_{SRS,k_1,k_2}$ คือ *MTBF* ของระบบไฟฟ้ามีรูปแบบ SRS เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 1 ด้วยอาการ k_1 และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 2 ด้วยอาการ k_2 โดยที่ k_1 และ k_2 เป็นอิสระต่อกัน

λ_{k_i} คือ อัตราการขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ i ด้วยอาการ k_i

นอกจากนั้นเวลาในการซ่อมเพื่อแก้ไขอาการ k จะต้องพิจารณาจากเวลาที่สั้นที่สุดที่ใช้ในการซ่อมอุปกรณ์ชิ้นใดชิ้นหนึ่งให้ใช้งานได้ เพราะระบบจะถูกพิจารณาว่าขัดข้อง เมื่ออุปกรณ์ 3 ชิ้น ได้แก่ แหล่งจ่าย

ไฟฟ้าหลัก และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองทั้ง 2 เครื่องขัดข้องพร้อมกันเท่านั้น เมื่ออุปกรณ์ชิ้นใดชิ้นหนึ่งใช้งานได้ระบบจะกลับมาทำงานเป็นปกติ กำหนดให้ $MTBF_m$ และ $MTTR_m$ คือ $MTBF$ และ $MTTR$ ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก $MTBF_i$ และ $MTTR_i$ คือ $MTBF$ และ $MTTR$ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ *i* ตัวอย่างการหาระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณ *MTTR* ของระบบจ่ายไฟฟ้า สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 และการคำนวณค่า *MTTR* ของระบบ SRS เป็นดังสมการ (10)



รูปที่ 2: ระยะเวลาที่ใช้คำนวณ MTTR ของระบบจ่ายไฟฟ้า

$$MTTR_{SRS} = \frac{\sum_{k_1=1}^{s}\sum_{k_2=1}^{s}\lambda_{SRS,k_1,k_2}\min(tr_{k_1},tr_{k_2})}{\sum_{k_1=1}^{s}\sum_{k_2=1}^{s}\lambda_{SRS,k_1,k_2}} \quad (10)$$

เมื่อ λ_{SRS,k_1,k_2} คือ อัตราการขัดข้องของระบบไฟฟ้ามีรูปแบบ SRS เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรอง เครื่องที่ 1 ด้วยอาการ k_1 และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 2 ด้วยอาการ k_2

tr_{k_1} คือ เวลาในการซ่อมบำรุงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 1 เมื่อเกิดอาการ k_1

tr_{k_1} คือ เวลาในการซ่อมบำรุงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 2 เมื่อเกิดอาการ k_2

min (x, y) คือ ค่าที่น้อยกว่าระหว่าง x และ y

3.2.4. การคำนวณค่า MTPM ของระบบจ่ายไฟฟ้า

MTPM คือ เวลาโดยเฉลี่ยระหว่างการดำเนินการบำรุงรักษา [10] MTPM ของอุปกรณ์หนึ่งชิ้นคำนวณได้จากสมการที่ (11) [15] เมื่อมีรูปแบบการบำรุงรักษาทั้งสิ้น *p* รูปแบบ โดยที่ v_j คือ อัตราการบำรุงรักษาของรูปแบบ *j* (จำนวนครั้งที่บำรุงรักษา/ระยะเวลา) และ tm_j คือ เวลาที่ใช้ในการบำรุงรักษาของรูปแบบ *j*

$$MTPM = \frac{\sum_{j=1}^{p} v_j tm_j}{\sum_{j=1}^{p} v_j} \quad (11)$$

เนื่องจากระบบไฟฟ้ามีรูปแบบ SRS ค่าอัตราการบำรุงรักษาต้องใช้ค่าอัตราการบำรุงรักษาของระบบ SRS (v_{SRS}) โดย v_{SRS} แบ่งเป็น 2 กรณี คือ 1) อัตราการบำรุงรักษาซึ่งเป็นกรณีที่ทำการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 1 ในเวลาเดียวกับทั้งแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 2 ขัดข้องกำหนดให้เป็น $v_{SRS,1}$ โดยคำนวณตาม λ_{SRS} แต่เปลี่ยน λ_{k_1} เป็น v_{j_1} ดังสมการ (12)

$$\frac{1}{v_{SRS_{1,j,k}}} = \frac{1}{\lambda_m} + \frac{1}{(v_{j_1} - \lambda_m)} - \frac{\lambda_m}{v_{j_1}(v_{j_1} - \lambda_m)} - \frac{\lambda_m v_{j_1}}{(\lambda_{k_2} - \lambda_m - v_{j_1})(\lambda_{k_2} - \lambda_m)(\lambda_{k_2} - v_{j_1})} - \frac{v_{j_1}}{(\lambda_{k_2} - \lambda_m)(\lambda_{k_2} - v_{j_1})} - \frac{\lambda_m}{(\lambda_{k_2} - \lambda_m)(\lambda_{k_2} - v_{j_1})} + \frac{\lambda_m v_{j_1}}{\lambda_{k_2}(\lambda_{k_2} - \lambda_m)(\lambda_{k_2} - v_{j_1})} \quad (12)$$

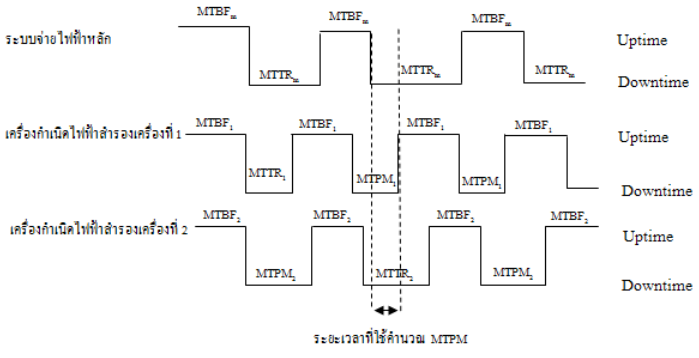
และกรณี 2) อัตราการบำรุงรักษาซึ่งเป็นกรณีที่ทำการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 2 ในเวลาเดียวกับทั้งแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 1 ขัดข้อง โดยค่า v_{SRS_2} คำนวณตาม λ_{SRS} แต่เปลี่ยน λ_{k_2} เป็น v_{j_2} ดังสมการ (13)

$$\frac{1}{v_{SRS_{2,j,k}}} = \frac{1}{\lambda_m} + \frac{1}{(\lambda_{k_1} - \lambda_m)} - \frac{\lambda_m}{\lambda_{k_1}(\lambda_{k_1} - \lambda_m)} - \frac{\lambda_m \lambda_{k_1}}{(v_{j_2} - \lambda_m - \lambda_{k_1})(v_{j_2} - \lambda_m)(v_{j_2} - \lambda_{k_1})} - \frac{\lambda_{k_1}}{(v_{j_2} - \lambda_m)(v_{j_2} - \lambda_{k_1})} - \frac{\lambda_m}{(v_{j_2} - \lambda_m)(v_{j_2} - \lambda_{k_1})} + \frac{\lambda_m \lambda_{k_1}}{v_{j_2}(v_{j_2} - \lambda_m)(v_{j_2} - \lambda_{k_1})} \quad (13)$$

การคำนวณค่า MTPM ของระบบ SRS เป็นดังสมการ (14)

$$MTPM_{SRS} = \frac{\sum_{k=1}^{q}\sum_{j=1}^{p}\sum_{i=1}^{2} v_{SRS_{i,j,k}}^{min\ (tm_{j_i}, tr_{k_i})}}{\sum_{j=1}^{t} v_{SRS_{i,j,k}}} \quad (14)$$

เวลาที่ใช้ในการบำรุงรักษาคำนวณได้จากเมื่อดำเนินการบำรุงรักษา แล้วระบบการจ่ายไฟฟ้าเกิดการขัดข้องทั้งระบบ อันได้แก่ การบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองที่ 2 (ที่ 1)ในเวลาเดียวกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองที่ 1 (ที่ 2) ขัดข้อง เนื่องจากในทางปฏิบัติการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองจะกระทำทีละเครื่อง ดังนั้นกรณีที่ดำเนินการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองทั้ง 2 เครื่องพร้อมกันจึงไม่พิจารณาในการศึกษาครั้งนี้ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณสมการ (14) ต้องเป็นช่วงเวลาที่สั้นที่สุดที่ใช้ในการบำรุงรักษาหรือการซ่อมเพราะเมื่อผ่านเวลาดังกล่าวระบบจะกลับมาทำงานได้เป็นปกติ ดังรูปที่ 3 โดย $MTPM_i$ คือ $MTPM$ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ *i*



รูปที่ 3: ระยะเวลาที่ใช้คำนวณ MTPM ของระบบจ่ายไฟฟ้า

อัตราในการบำรุงรักษาในงานวิจัยนี้ใช้หน่วย ครั้งต่อนาที เพราะฉะนั้นใน 1 ปี (คิดเป็น 525,600 นาที) สามารถคำนวณอัตราการบำรุงรักษา โดยนำครั้งที่บำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองที่ *i* ในรูปแบบที่ *j* (m_{j_i}) หารกับช่วงเวลาดังกล่าวดังสมการ (15) แล้วนำ v_{j_i} ไปใส่ใน $v_{SRS_{i,j,k}}$

$$\upsilon_{j_i} = \frac{m_{j_k}}{525,600} \quad (15)$$

3.3. ความสัมพันธ์ระหว่าง MTBF กับครั้งที่ซ่อมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรอง

Wang และคณะ [16] ได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างครั้งที่ซ่อมเครื่องยนต์กับ MTBF โดยครั้งที่ซ่อมบำรุงมากจะทำให้ MTBF ลดลงตามค่า α โดยที่ค่า $\alpha \in (0,1)$ หาก α ยิ่งมาก (ใกล้เคียง 1) แสดงว่าการซ่อมมีประสิทธิผลมาก เมื่อทำการซ่อมแล้วระยะเวลาที่เครื่องจะทำงานได้ต่อเนื่องใกล้เคียง MTBF ก่อนการซ่อม ดังสมการ (15) เมื่อ μ_1คือ MTBF เริ่มแรก และ *r* คือ ครั้งที่ซ่อมเครื่องยนต์

$$\text{เวลารวมที่เครื่องทำงาน} = \mu_1 + \alpha\mu_1 + \alpha^2\mu_1 + \cdots + \alpha^{r-1}\mu_1 = \frac{\mu_1(1-\alpha^{r-1})}{(1-\alpha)} \quad (16)$$

ดังนั้น MTBF สามารถคำนวณจากเวลารวมที่เครื่องทำงานตามสมการ (16) เทียบกับครั้งที่ซ่อมของเครื่องยนต์ *r* ดังสมการ (17)

$$MTBF = \frac{\mu_1(1-\alpha^{r-1})}{r(1-\alpha)} \quad (17)$$

การซ่อมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองแบ่งแยกตามอาการ การคำนวณค่า MTBF ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรอง จึงต้องนำค่า MTBF ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองที่ผ่านการซ่อมตามอาการ *k* ต่างๆ มาเฉลี่ยดังสมการที่ (18) จากสมการหากการซ่อมอากการ *k* มีประสิทธิผลมากหรือ α_{k_i} มีค่ามาก จะส่งผลให้จำนวนครั้งในการซ่อมของอาการ *k หรือ* r_{k_i}ลดลง

$$\tilde{\mu}_i = \frac{1}{\tilde{\lambda}_i} = \left\{\left[\sum_{k=1}^{q} \frac{(1-\alpha_{k_i}^{(r_{k_i}-1)})}{r_{k_i}(1-\alpha_{k_i})}\right]/q\right\}\mu_i \quad (18)$$

เมื่อ $\tilde{\mu}_i$ คือ MTBF ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ *i* ที่ผ่านการซ่อม

$\tilde{\lambda}_i$ คือ อัตราการขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ *i* ที่ผ่านการซ่อม

μ_i คือ MTBF เริ่มแรกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ *i* (MTBF ที่เก็บข้อมูลได้จากสภาพจริงสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3)

α_{k_i} คือ ค่าสัดส่วนปรับลด MTBF ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ *i* เมื่อเกิดขัดข้องด้วยอาการที่ *k* ซึ่ง $0 < \alpha_{k_i} < 1$

ตารางที่ 3: ค่า MTBF ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า

แหล่งจ่ายไฟฟ้า	ค่า MTBF (นาที)

แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก	60,570
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองที่ 1	107,200
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองที่ 2	168,000

การหาค่าสัดส่วนปรับลด α ดำเนินการโดยทำการซ่อมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองที่ขัดข้องด้วยอาการต่างๆ แล้วคำนวณสัดส่วนระหว่าง MTBF ก่อนและหลังการซ่อม เช่น MTBF ก่อนซ่อมเท่ากับ 1,000 นาที หลังจากซ่อมแล้ว MTBF เท่ากับ 900 นาที α มีค่าเท่ากับ 0.9 (ในทางปฏิบัติ MTBF ของอุปกรณ์ต่างๆ มักมีค่าสัดส่วนหลังการซ่อมแซม นั่นคือมักจะเสียเร็วขึ้นกว่าเดิม) แทนค่า $\lambda_{k_i} = \frac{r_{k_i}}{525,600}$ ในสมการที่ (18) ได้ผลดังสมการ (19)

$$\tilde{\mu}_i = \frac{1}{\tilde{\lambda}_i} = \left\{ \left[\sum_{k=1}^{q} \frac{(1-\alpha_{k_i}^{(525,600\lambda_{k_i}-1)})}{525,600\lambda_{k_i}(1-\alpha_{k_i})} \right] / q \right\} \mu_i \qquad (19)$$

<u>3.4. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองกับครั้งที่ของการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรอง</u>

อัตราในการขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองมีความสัมพันธ์ผกผันกับครั้งที่บำรุงรักษา กล่าวคือ โอกาสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองจะเกิดการขัดข้องน้อยถ้าครั้งที่บำรุงรักษามาก ส่งผลให้ค่า MTBF ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองที่บำรุงรักษามากครั้งมีค่ามากกว่าค่า MTBF ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองที่บำรุงรักษาน้อยครั้ง Jaturonnatee และคณะ [17] เสนอสมการที่ (20) เมื่อ λ_0 คือ อัตราการขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเริ่มแรก และ δ_j คือ ประสิทธิผลของการบำรุงรักษาครั้งที่ j

$$\lambda = \lambda_0 - \sum_{j=0}^{p} \delta_j \qquad \text{โดย } j = 0,1,2,..,p \qquad (20)$$

สมการดังกล่าวมีข้อจำกัดคือ กำหนดให้ประสิทธิผลของการบำรุงรักษาในแต่ละครั้งเท่ากันคือ δ_j ดังนั้นหากจำนวนการบำรุงรักษา m มากครั้ง จะส่งผลให้ค่าอัตราการขัดข้อง λ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอาจมีค่าติดลบ แต่อัตราการขัดข้องต้องมีค่าเป็นบวกเท่านั้น และเพื่อไม่ให้อัตราการขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองมีค่าเป็นลบ งานวิจัยนี้จึงปรับรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองกับครั้งที่บำรุงรักษาดังสมการที่ (21)

$$\lambda = \frac{(1-\beta^{m-1})}{m(1-\beta)} \lambda_0 \qquad (21)$$

จากสมการหากทำการบำรุงรักษามากครั้งจะส่งผลให้อัตราการขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองลดลง แต่มีค่าไม่น้อยกว่าศูนย์ หากทำการบำรุงรักษา j เป็นจำนวนอนันต์จะส่งผลให้อัตราการขัดข้อง λ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขัดข้อง λ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองกับครั้งที่บำรุงรักษา m มีความสัมพันธ์เป็นรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิต (Geometric) โดยมี β เป็นตัวปรับให้ค่าอัตราการ

ขัดข้อง λ มีค่าลดลงเมื่อทำการบำรุงรักษามากครั้ง เมื่อพิจารณาเพิ่มเติมถึงการบำรุงรักษา p รูปแบบ โดยรูปแบบการบำรุงรักษามีความสัมพันธ์กับครั้งที่ซ่อม ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองที่ขัดข้องแต่ละอาการ อัตราการขัดข้องของอาการ k ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ i คำนวณ λ_{k_i} ได้ดังสมการที่ (22)

$$\lambda_{k_i} = \left\{ \left[\sum_{j=1}^{p} \frac{(1-\beta_{jk_i}{}^{m_{j_i}-1})}{m_{j_i}(1-\beta_{jk_i})} \right] / p \right\} \lambda_i \qquad (22)$$

เมื่อ λ_i คือ อัตราการขัดข้องเริ่มแรกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ i และ β_{jk_i} คือ ประสิทธิผลของการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ i รูปแบบการบำรุงรักษาที่ j อาการที่ k_i

การบำรุงรักษาแต่ละรูปแบบให้ผลที่ต่างๆ กัน กล่าวคือ การบำรุงรักษารูปแบบที่ j อาจทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรอง i ขัดข้องด้วยอาการที่ k_i ลดลง แต่อาจไม่สามารถช่วยให้อาการขัดข้องอาการอื่นๆ ลดลงด้วย จึงต้องสร้างความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการบำรุงรักษากับอาการขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรอง โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถนำไปประมาณค่า β_{jk_i}

หากรูปแบบการบำรุงรักษาที่ j มีความสัมพันธ์กับอาการขัดข้อง k_i มาก ส่งผลให้อัตราการขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองอาการดังกล่าวลดลงมาก ส่วนค่า β_{jk_i} สามารถประมาณค่าจากสัดส่วนระหว่างอัตราการขัดข้องหลังและก่อนการบำรุงรักษาเช่น อัตราการขัดข้องก่อนบำรุงรักษารูปแบบที่ j ของอาการ k_i เท่ากับ 5 ครั้งต่อปี หลังจากบำรุงรักษารูปแบบ j ดังกล่าวแล้ว มีอัตราการขัดข้องของอาการ k_i เท่ากับ 2 ครั้งต่อปี ดังนั้น β_{jk_i} จึงมีค่าเท่ากับ 0.4

3.5. ความสัมพันธ์ระหว่าง MTBF กับจำนวนครั้งในการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรอง

ความสัมพันธ์ระหว่าง MTBF กับครั้งที่บำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองดังสมการที่ (23) ได้จากการนำสมการที่ (19) มารวมกับสมการที่ (22) โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง MTBF กับครั้งที่ซ่อมร่วมกับอัตราการขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองกับครั้งที่บำรุงรักษา

$$\mu_i = \frac{1}{\lambda_i} = \left\{ \left[\sum_{k=1}^{q} \frac{(1-\alpha_{k_i})^{\left(525{,}600 \left\{ \left[\sum_{j=1}^{p} \frac{(1-\beta_{jk_i}{}^{m_{j_i}-1})}{m_{j_i}(1-\beta_{jk_i})} \right] / p \right\} \lambda_i - 1 \right)}}{525{,}600 \left\{ \left[\sum_{j=1}^{p} \frac{(1-\beta_{jk_i}{}^{m_{j_i}-1})}{m_{j_i}(1-\beta_{jk_i})} \right] / p \right\} \lambda_i (1-\alpha_{k_i})} \right] / q \right\} \mu_i \qquad (23)$$

3.6. การกำหนดการบำรุงรักษา

การกำหนดการบำรุงรักษาคือการหาจำนวนครั้งบำรุงรักษาที่ให้ค่าความพร้อมใช้สูงที่สุดภายใต้งบประมาณในการบำรุงรักษาและซ่อมของบริษัท (Budget: B_0) และเป้าหมายค่าความพร้อมใช้ขั้นต่ำ 0.9999966 ซึ่งเทียบเท่ากับระดับคุณภาพ 6σ (A_0) โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Program) ดังนี้

maximize: Availability

subject to $Budget \leq B_0$

$Availability \geq A_0$

โดยตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables: k_{j_i}) คือ ครั้งที่บำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ i บำรุงรักษารูปแบบที่ j ใน 1 ปี และมีงบประมาณในการบำรุงรักษาและซ่อม B_0 ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรอง i รูปแบบ j (cm_{j_i}) และค่าใช้จ่ายในการซ่อมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรอง i อาการ k (cr_{k_i}) ดังสมการที่ (24)

$$Budget = \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{p} cm_{j_i} m_{j_i} + \sum_{i=1}^{2}\sum_{k=1}^{q} cr_{k_i} n_{k_i} \quad (24)$$

4.ตัวอย่างการประยุกต์ใช้

ในหัวข้อนี้ได้ประยุกต์ใช้รูปแบบทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 4 โดยเริ่มจากการตรวจสอบความถูกต้อง (Validate) ของรูปแบบทางคณิตศาสตร์กับค่าความพร้อมใช้จริง จากนั้นหากำหนดการบำรุงรักษาที่เหมาะสมภายใต้ข้อมูลที่กำหนด

กำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองมีอาการขัดข้อง 3 อาการ โดยใช้เวลาและค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงแต่ละอาการดังแสดงในตารางที่ 4 และประสิทธิผลการซ่อมบำรุงจากอาการทั้ง 3 แสดงไว้ในตารางที่ 5 ตารางที่ 6 แสดงเวลาและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา 5 รูปแบบ ซึ่งรูปแบบการบำรุงรักษาที่ 1 และ 2 เป็นรูปแบบบำรุงรักษาประจำสัปดาห์ ส่วนรูปแบบการบำรุงรักษาที่ 3 ถึง 5 เป็นรูปแบบบำรุงรักษาประจำปี ตารางที่ 7 แสดงค่าประสิทธิผลการบำรุงรักษาระหว่างรูปแบบบำรุงรักษา 5 รูปแบบกับอาการขัดข้อง 3 อาการ โดยกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างการบำรุงรักษากับอาการขัดข้องขึ้นกับค่าประสิทธิผลการบำรุงรักษา (β_{jk_i}) โดยความสัมพันธ์มาก ปานกลาง และน้อย มีค่า β_{jk_i} เท่ากับ 0.05, 0.1 และ 0.3 ตามลำดับ (ในการปฏิบัติงานจริงค่าประสิทธิผลการบำรุงรักษา β_{jk_i} สามารถหาได้จากวิธีทางสถิติของการหาค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างรูปแบบการบำรุงรักษาและอาการขัดข้องแต่ละรูปแบบ)

สำหรับการ Validate รูปแบบทางคณิตศาสตร์ ได้หาจากการแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในสมการคณิตศาสตร์ที่นำเสนอแล้วในเบื้องต้น พบว่าค่าความพร้อมใช้ของระบบจ่ายไฟฟ้าเท่ากับ 0.9998991 ค่าความพร้อมใช้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 1 มีค่าเป็น 0.9993531 ส่วนค่าความพร้อมใช้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 2 คำนวนได้เป็น 0.9997464 และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความพร้อมใช้จริง พบว่ามีค่าความคาดเคลื่อนไม่ถึง 2% ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 4: เวลาในการซ่อมบำรุงแต่ละอาการขัดข้อง และค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง

อาการขัดข้อง	อาการขัดข้อง	เวลาในการซ่อมบำรุง (นาที)	ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง (บาท)
1	ท่อยางน้ำมันเชื้อเพลิงรั่วซึม	30	400
2	สายพานขับขาด	60	1,000
3	หม้อน้ำรั่ว	240	5,000

ตารางที่ 5: ประสิทธิผลการซ่อมบำรุง

อาการขัดข้องที่	อาการขัดข้อง	ประสิทธิผลการซ่อมบำรุง	α

1	ท่อยางน้ำมันเชื้อเพลิงรั่วซึม	90%	0.9
2	สายพานขับขาด	95%	0.95
3	หม้อน้ำรั่ว	99%	0.99

ตารางที่ 6: รูปแบบ เวลา และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา

ประเภทการบำรุงรักษา	รูปแบบการบำรุงรักษาที่	รูปแบบการบำรุงรักษา	เวลาในการบำรุงรักษา (นาที)	ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา (บาท)
ประจำสัปดาห์	1	ตรวจน้ำมันหล่อลื่น	5	10
	2	ตรวจน้ำหล่อเย็น	10	50
	3	ตรวจน้ำมันเชื้อเพลิง	10	10
ประจำปี	4	อัดจาระบีลูกปืนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรอง	15	150
	5	เปลี่ยนที่กรองน้ำมันหล่อลื่น	30	200

ตารางที่ 7: ประสิทธิผลการบำรุงรักษาระหว่างรูปแบบการบำรุงรักษากับอาการขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรอง

รูปแบบการบำรุงรักษา	อาการขัดข้อง		
	1	2	3
1	0.3	0.1	0.3
2	0.3	0.3	0.05
3	0.05	0.3	0.1
4	0.3	0.05	0.3
5	0.1	0.1	0.05

ตารางที่ 8: การเปรียบเทียบค่าความพร้อมใช้จริงกับค่าที่ได้จากการคำนวน

แหล่งจ่ายไฟฟ้า	ค่าความพร้อมใช้จริง	ค่าความพร้อมใช้จากการคำนวณ	|ค่าคลาดเคลื่อน|	(|ค่าคลาดเคลื่อน|/ค่าความพร้อมใช้จริง)*100
ระบบจ่ายไฟฟ้า	0.9999861	0.9998991	0.0000870	0.0087
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองที่ 1	0.9958774	0.9993531	0.0034757	0.349
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองที่ 2	0.9834372	0.9997464	0.0163092	1.6584

สำหรับพารามิเตอร์เพื่อหารูปแบบการบำรุงรักษาที่ทำให้ค่าความพร้อมใช้สูงที่สุด กำหนดให้ค่าใช่จ่ายในการซ่อมและบำรุงรักษาไม่เกิน 50,000 บาท และค่าความพร้อมใช้ไม่น้อยกว่าเป้าหมาย 6σ ดังนี้

$$Budget \leq 50{,}000$$

$$Availability \geq 0.9999966$$

จากการหาค่าความพร้อมใช้สูงที่สุดภายใต้ข้อจำกัดข้างต้น ได้ผลกำหนดการการบำรุงรักษาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองดังแสดงในตารางที่ 9 เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองเครื่องที่ 1 ต้องถูกบำรุงรักษารูปแบบที่ 1 จำนวน 48 ครั้งต่อปี เป็นต้น กำหนดการการบำรุงรักษานี้ส่งผลให้ระบบจ่ายไฟฟ้ามีค่าความพร้อมใช้เท่ากับ 0.9999999175 โดยมีค่าใช้จ่ายในการซ่อมและบำรุงรักษาปีละ 8,000 บาท

ตารางที่ 9: กำหนดการการบำรุงรักษาภายใต้ข้อจำกัด

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรอง	รูปแบบการบำรุงรักษา	ครั้งที่บำรุงรักษาใน 1 ปี	ค่าใช้จ่าย (บาท/ปี)
1	1	48	480
	2	48	2,400
	3	48	480
	4	1	150
	5	1	200
2	1	52	520
	2	52	2,600
	3	52	520
	4	3	450
	5	1	200

5. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เสนอตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการกำหนดการการบำรุงรักษาของระบบจ่ายไฟฟ้าในการควบคุมการจราจรทางอากาศเพื่อให้ได้ค่าความพร้อมใช้สูงที่สุด ภายใต้ข้อจำกัดของค่าใช้จ่ายและค่าความพร้อมใช้ขั้นต่ำ ตัวแบบทางคณิตศาสตร์นี้ครอบคลุมถึงความสัมพันธ์ระหว่าง MTBF กับครั้งที่ซ่อมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรอง และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองกับครั้งที่ของการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรอง ซึ่งได้ปรับปรุงจากทฤษฎีที่มีอยู่เดิมและประยุกต์ใช้กับระบบจ่ายไฟฟ้าสำรองของท่าอากาศยานของประเทศไทย ระบบจ่ายไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยนี้เป็นรูปแบบซ้ำซ้อน (Standby Redundant System) ซึ่งมีความซับซ้อนในการคำนวณแต่สามารถสะท้อนสถานการณ์ถึงระบบจ่ายไฟฟ้าได้สมจริงกว่ารูปแบบอื่น รูปแบบทางคณิตศาสตร์นี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบงานซ่อมบำรุงทั่วไปของอุตสาหกรรมที่มีระบบประกอบไปด้วยเครื่องจักรหลักและเครื่องจักรสำรอง

ข้อแนะนำสำหรับการนำไปประยุกต์กับการใช้งานจริงเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เที่ยงตรงมากขึ้น ควรมีการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมและละเอียดอย่างน้อยระดับนาทีหรือวินาทีเพื่อให้การประมาณค่าพารามิเตอร์แม่นยำขึ้น นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้ยกตัวอย่างกรณีศึกษาที่มีรูปแบบการบำรุงรักษาเพียง 5 รูปแบบ ซึ่งน้อยกว่าใน

ปัจจุบันที่มีถึง 15 รูปแบบ ดังนั้นจึงควรเพิ่มจำนวนรูปแบบการบำรุงรักษา และอาการขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สะท้อนระบบจริง

เอกสารอ้างอิง

[1] โพสต์ทูเดย์, 12 กันยายน 2551, Available [13/09/2552] http://suvarnabhumiwatch.exteen.com/20080913/entry

[2] Sheriff YS , Smith ML, Optimal maintenance model for system subject to failure – A review, Naval Research Logistic Quarterly, 28/1, 1981, pp. 47-74

[3] Jardine AKS , Buzacott JA, Equipment reliability and maintenance, European Journal of Operation Research, 19, 1985, pp. 285-296

[4] Valdez-Flores C, Feldman RM, A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems, Naval Research Logistics, 36, 1989, pp. 419-446

[5] Pham H, Wang HZ, Imperfect maintenance, European Journal of Operational Research, 94, 1996, pp. 425-438

[6] Wang HZ, A survey of maintenance policies of deteriorating systems, European Journal of Operational Research, 139, 2002, pp. 469-489

[7] Brennan JR, Warranties: Planning Analysis and Implementation, 1994, McGraw-Hill, New York

[8] Sahin I,Polatogu H, Quality, Warranty and Preventive Maintenance, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998

[9] Bai J, Pham H, Cost analysis on renewable full-service warranties for multi-component systems, European Journal of Operational Research, 168/2, 2006, pp. 492-508

[10] กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจิญ, หลักการการควบคุมคุณภาพ, พิมพ์ครั้งที่ 2, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย–ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ

[11] วชิรพงษ์ สาลีสิงห์, ปฏิวัติกระบวนการทำงานด้วยเทคนิค Six Sigma ฉบับ Champion และ Black Belt, พิมพ์ครั้งที่ 1, สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ, กรุงเทพฯ

[12] กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจิญ, สถิติสำหรับงานวิศวกรรมเล่มที่ 1, พิมพ์ครั้งที่ 6, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย–ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ

[13] Modarres M, Reliability and Risk Analysis, Marcel Dekker, Inc., New York, 1993, pp.131

[14] Kuo W, Ming JZ, Optimal Reliability Modeling, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2003, pp.130

[15] O' Connor PDT, Practical Reliability Engineering, 4th Edition, John Wiley & Sons. Ltd., London, 2002

[16] Wang HZ, Pham H, A quasi renewal process and its application in the imperfect maintenance, International Journal of Systems Science, 27/10, 1996, pp. 1055-1062

[17] Jaturonnatee J, Murthy DNP and Boondiskulchok R, Optimal preventive Maintenance of leased equipment with corrective minimal repair, European Journal of Operational Research, 174, 2006, pp. 201-215