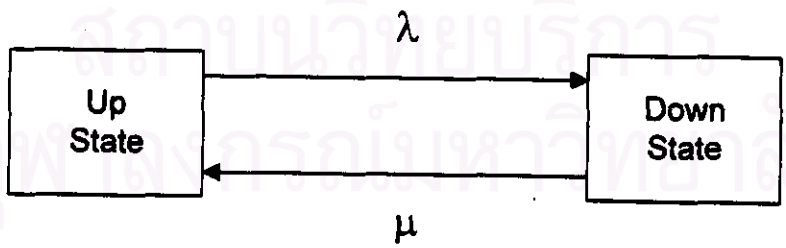
บทที่ 2
ความเชื่อถือได้ในระบบผลิตไฟฟ้ากำลัง

ความเชื่อถือได้ในระบบผลิตไฟฟ้ากำลัง โดยทั่วไปหมายถึงคุณภาพของระบบผลิตไฟฟ้ากำลังในด้านของความต่อเนื่องและความพอเพียง กล่าวคือ ระบบไฟฟ้าที่มีความเชื่อถือได้สูงจะมีโอกาสเกิดไฟฟ้าดับน้อยหากเกิดก็เป็นระยะเวลาสั้น และมีระยะเวลาที่ทำงานได้เป็นเวลานานจนกว่าจะเกิดขัดข้องขึ้น ในอดีตหลักเกณฑ์ที่นำมาพิจารณาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ามาจากหลักการตัดสินใจ (Deterministic Criteria) โดยพิจารณาจากพลังงานไฟฟ้าสำรอง (Reserve Capacity) เป็นปัจจัยสำคัญ การพิจารณาด้วยหลักการดังกล่าวสามารถแสดงออกได้ในเชิงคุณภาพคือ ระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้มากกว่าหรือน้อยกว่าเท่านั้น แต่ไม่สามารถแสดงถึงปริมาณความแตกต่างได้ การพิจารณาความเชื่อถือได้ในปัจจุบันจึงใช้หลักความน่าจะเป็น (Probabilistic Criteria) เนื่องจากเป็นหลักที่นำค่าสถิติของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ามาคำนวณเป็นความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ขึ้นอีก ดังนั้นจึงสามารถแสดงค่าในเชิงปริมาณได้ ในบทนี้จะนำเสนอถึงวิธีการคำนวณความเชื่อถือได้ในระบบผลิตไฟฟ้ากำลัง ซึ่งมีแบบจำลองที่สำคัญ 2 ส่วนคือ แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้า และแบบจำลองโหลด รายละเอียดของการสร้างแบบจำลองทั้งสองจะนำเสนอไว้ในส่วนถัดไป

2.1. แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้า (Generation model)

2.1.1. การเปลี่ยนแปลงสถานะ

อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังเช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่ง หม้อแปลง โดยทั่วไปมีสภาวะการทำงาน 2 สภาวะคือ ทำงานได้ (Up) และไม่สามารถทำงานได้ (Down) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 [2,3]



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนสถานะการทำงานของอุปกรณ์

เมื่อ λ คือ จำนวนครั้งที่เปลี่ยนสู่สภาวะไม่สามารถทำงานได้ต่อหน่วยเวลาสำหรับอุปกรณ์ใดๆ

μ คือ จำนวนครั้งที่เปลี่ยนสู่สภาวะทำงานได้ต่อหน่วยเวลาสำหรับอุปกรณ์ใดๆ

สำหรับอุปกรณ์ใดๆในช่วงเวลาแรกของการเดินเครื่อง ค่า λ จะมีค่าสูง และจะลดลงจนมีค่าคงที่เมื่ออุปกรณ์ทำงานที่สภาวะคงตัว (Steady state) แต่เมื่อใช้งานไปเป็นระยะเวลานาน ค่า λ ก็จะกลับมาสูงอีกครั้งหนึ่งเนื่องจากอายุการใช้งานของอุปกรณ์เริ่มหมดไป ดังนั้นจึงสรุปความสัมพันธ์ระหว่างค่า λ กบระยะเวลาการทำงานของอุปกรณ์ได้ในลักษณะดังรูปที่ 2.2 [2]

รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า λ และระยะเวลาการทำงานของอุปกรณ์

การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์จึงต้องพิจารณาที่สภาวะคงตัวเป็นสำคัญ สามารถคำนวณความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์จะทำงานต่อไปได้ และความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์จะไม่สามารถทำงานได้ได้ตามสมการ 2.1 และ 2.2 [2,3]

$$P_0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \tag{2.1}$$

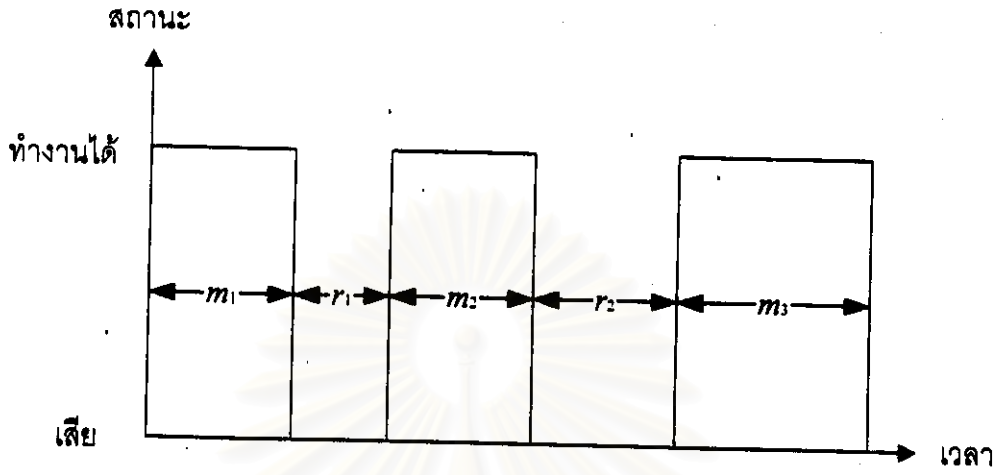
$$P_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \tag{2.2}$$

เมื่อ P_0 คือ ความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์จะสามารถทำงานต่อไปได้

P_1 คือ ความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์จะไม่สามารถทำงานต่อไปได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

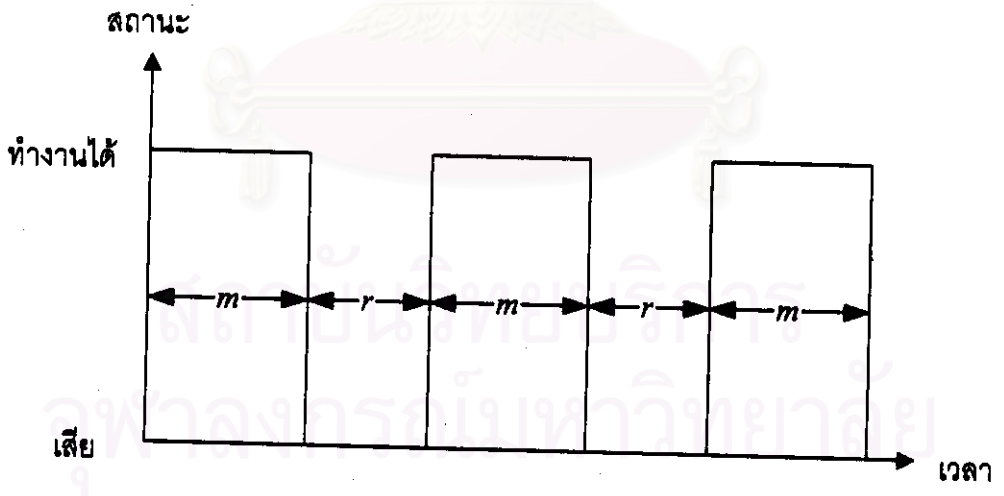
สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องใดๆ หากบันทึกระยะเวลาที่ทำงานได้และไม่สามารถทำงานได้จะมีลักษณะตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 [2] ซึ่งช่วงเวลาที่สามารถทำงานได้และช่วงเวลาที่ไม่สามารถทำงานได้แต่ละครั้งมีค่าไม่เท่ากัน หากนำช่วงเวลาที่อุปกรณ์ทำงานได้และช่วงเวลาที่อุปกรณ์ไม่สามารถทำงานได้มาเฉลี่ย จะได้รูปตัวแทนใหม่ดังแสดงในรูปที่ 2.4 [2]



รูปที่ 2.3 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เมื่อ m_i คือ ระยะเวลาที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถทำงานได้ครั้งที่ i

r_i คือ ระยะเวลาที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถทำงานได้ครั้งที่ i



รูปที่ 2.4 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
เมื่อพิจารณาช่วงเวลาที่ทำงานได้และไม่สามารถทำงานได้เป็นค่าเฉลี่ย

เมื่อ m คือ ระยะเวลาเฉลี่ยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถทำงานได้
(Mean Time To Failure, MTTF)

r คือ ระยะเวลาเฉลี่ยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถทำงานได้
(Mean Time To Repair, MTTR)

จากรูปที่ 2.4 สามารถคำนวณค่าความน่าจะเป็นของสภาวะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ดังสมการต่อไปนี้ [2,3]

$$P_u = \frac{m}{m+r} \tag{2.3}$$

$$P_i = \frac{r}{m+r} \tag{2.4}$$

จากสมการ 2.1 ถึง 2.4 สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาเฉลี่ยของสภาวะกับอัตราการเปลี่ยนแปลงสภาวะได้ดังสมการ 2.5 และ 2.6 [2,3]

$$\mu = \frac{1}{r} \tag{2.5}$$

$$\lambda = \frac{1}{m} \tag{2.6}$$

ค่าความน่าจะเป็นของการเกิดการขัดข้องในการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีหลายค่าซึ่งมีนิยามแตกต่างกัน ดังนี้

- การเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะในขณะที่อุปกรณ์กำลังทำงานได้ตามปกติ นิยามความน่าจะเป็นของการขาดกำลังผลิตว่า FOR (Forced Outage Rate)

- การเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะเกิดจากปัจจัยทั้งหมดที่มิได้คาดคิดไว้ก่อน ทั้งจากการเปลี่ยนสถานะโดยทันที และจากเหตุอื่นเช่น การหยุดบำรุงรักษายาวนานกว่าที่วางแผนไว้ เป็นต้น นิยามความน่าจะเป็นของการขาดกำลังผลิตว่า UOR (Unplanned Outage Rate)

- การเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะเกิดจากการวางแผนไว้เช่น การหยุดการบำรุงรักษา เป็นต้น นิยามการเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะว่า POR (Planed Outage Rate)

การนำนิยามใดไปใช้ในการบริหารระบบไฟฟ้ากำลังขึ้นกับจุดประสงค์และปัญหาที่พิจารณา โดยปกติในการกำหนดแผนการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำเป็นต้องพิจารณาถึงโอกาสผิดพลาดเนื่องจากการหยุดบำรุงรักษาไม่เป็นไปตามแผนที่ได้กำหนดไว้แล้วด้วย ดังนั้นในการกล่าวถึงต่อไปในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ค่า UOR มาคำนวณค่าดัชนีความเชื่อถือได้ และค่าพลัง

งานที่คาดว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะจ่าย เพื่อให้การกำหนดแผนการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆอย่างทั่วถึง

2.1.2. การสร้างแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในส่วนความน่าจะเป็น

การสร้างแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในส่วนความน่าจะเป็นหรือเรียกว่าตาราง COPT (Capacity Outage Probability Table) โดยการสร้างตาราง COPT สำหรับระบบไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวนมากจะอาศัยวิธีรีเคอร์ซีฟ (Recursive method) เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมและมีความรวดเร็วในการแก้ปัญหา หลักการของวิธีนี้คือการเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าไปในระบบทีละเครื่องจนครบทุกเครื่อง โดยคำนวณความน่าจะเป็นของขั้นสถานะต่างๆของแบบจำลองจากความน่าจะเป็นของขั้นสถานะก่อนการเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ปกติเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังจะมีจำนวนสถานะการทำงานอยู่ 2 ประเภทคือ มี 2 สถานะ (No derated states) และมีมากกว่า 2 สถานะ (Derated states) เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางเครื่องสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้บางส่วนหากมีปัญหาเกิดขึ้น

1) ประเภทที่มี 2 สถานะ

ความน่าจะเป็นสะสมของขั้นสถานะที่ขาดกำลังการผลิต X MW หลังจากเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด C MW และค่า UOR=U เข้าไปในระบบแล้ว จะได้ว่า [2]

$$P(X) = (1-U)P'(X) + UP'(X-C) \tag{2.7}$$

เมื่อ $P'(X)$ คือ ความน่าจะเป็นสะสมของขั้นสถานะกำลังผลิตขนาด X MW ก่อนเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด C MW

เมื่อ $P(X)$ คือ ความน่าจะเป็นสะสมของขั้นสถานะกำลังผลิตขนาด X MW หลังเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด C MW

โดยกำหนดค่าเริ่มต้น (Initial Condition) ดังนี้

$$P(X) = 1.0 \qquad X \le 0$$

$$P(X) = 0 \qquad X > 0$$

2) ประเภทที่มีมากกว่า 2 สถานะ

สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มี n สถานะ สามารถคำนวณความน่าจะเป็นสะสมด้วยวิธีรีเคอร์ซีฟได้ตามสมการ 2.8 [2]

$$P(X) = \sum_{i=1}^{n} p_i P'(X - C_i) \tag{2.8}$$

เมื่อ n คือ จำนวนสถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะเพิ่มเข้ามา

C_i คือ กำลังผลิตที่เกิดขัดข้องสถานะที่ i ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะเพิ่มเข้าไป

p_i คือ ความน่าจะเป็นของสถานะที่ i ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะเพิ่มเข้าไป

สมการที่กล่าวมาแล้วนั้นใช้เมื่อเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบทีละเครื่อง แต่ในการพิจารณาปัญหาการกำหนดแผนบำรุงรักษาจะมีลักษณะเป็นการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบ ดังนั้นสิ่งสำคัญคือ การเปลี่ยนแปลงของดัชนีความเชื่อถือได้ที่เปลี่ยนไป สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.9 ในกรณี 2 สถานะ และสมการ 2.10 ในกรณีมากกว่า 2 สถานะ [3]

$$P'(X) = \frac{P(X) - (U)P'(X - C)}{(1 - U)} \tag{2.9}$$

$$P'(X) = \frac{P(X) - \sum_{i=2}^{n} p_i P(X - C_i)}{p_1} \tag{2.10}$$

2.1.3. การสร้างตารางการขาดกำลังผลิตโดยวิธีความถี่และช่วงเวลา

การพิจารณาส่วนของความน่าจะเป็นเป็นการแสดงถึงโอกาสที่จะเกิดการขาดกำลังผลิต แต่มิได้แสดงถึงพฤติกรรมหรือลักษณะของการขาดการผลิตนั้น เช่น ไม่สามารถบ่งบอกถึงจำนวนครั้งที่เกิดการขาดกำลังผลิตขึ้น หรือไม่สามารถแสดงถึงระยะเวลาเฉลี่ยเมื่อเกิดการขาดกำลังผลิตได้ การสร้างตารางการขาดกำลังผลิตโดยวิธีความถี่และช่วงเวลาเป็นวิธีการที่สามารถแสดงถึงลักษณะของการขาดกำลังผลิตได้ ข้อมูลที่นำมาใช้ในการคำนวณต้องการข้อมูลเพิ่มเติมคือ อัตราการเปลี่ยนสถานะ (Transition rate) จากสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่ง สำหรับกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มี 2 สถานะอัตราการเปลี่ยนแปลงสถานะก็คือ อัตราการเสีย (λ) และอัตราการซ่อม (μ) นั่นเอง เช่นเดียวกับการคำนวณในส่วนความน่าจะเป็นอัลกอริธึมที่ใช้ต้องมีความเหมาะสมในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังนั้นสมการที่ใช้หลักรีเคอร์ซีฟจึงเหมาะสมในการใช้งาน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามสถานะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือ

1) กรณี 2 สถานะ

สมการรีเดอร์ซีฟหลังจากเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด C MW ที่มีค่า FOR=U เข้าไปในระบบ โดยมีค่า Failure rate เท่ากับ λ และ Repair rate เท่ากับ μ ดังสมการ 2.11 และ 2.12 [2]

$$\lambda_{+}(X) = \frac{p'(X)(1-U)\lambda_{+}'(X) + p'(X-C)U(\lambda_{+}'(X-C)+\mu)}{p(X)} \quad (2.11)$$

$$\lambda_{-}(X) = \frac{p'(X)(1-U)\lambda_{-}'(X) + p'(X-C)U(\lambda_{-}'(X-C)+\mu)}{p(X)} \quad (2.12)$$

เมื่อ X คือ ค่ากำลังผลิตที่ขัดข้อง

$\lambda_{+}(X)$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะที่กำลังการผลิตขัดข้องเท่ากับ X MW ไปยังสถานะที่เกิดขัดข้องน้อยกว่า X MW หลังจากเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$\lambda_{+}'(X)$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะที่กำลังการผลิตขัดข้องเท่ากับ X MW ไปยังสถานะที่เกิดขัดข้องน้อยกว่า X MW ก่อนเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$\lambda_{-}(X)$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะที่กำลังการผลิตขัดข้องเท่ากับ X MW ไปยังสถานะที่เกิดขัดข้องมากกว่า X MW หลังจากเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$\lambda_{-}'(X)$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะที่กำลังการผลิตขัดข้องเท่ากับ X MW ไปยังสถานะที่เกิดขัดข้องมากกว่า X MW ก่อนเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2) กรณีมีมากกว่า 2 สถานะ

หากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีสถานะมากกว่า 2 สถานะ หรือมีสถานะที่ทำงานได้บางส่วน (Derated states) สมการที่ใช้คำนวณค่า $\lambda_{+}(X)$ และ $\lambda_{-}(X)$ แสดงดังสมการ 2.13 และ 2.14 [2]

$$\lambda_{+}(X) = \frac{\sum_{i=1}^{n} p'(X-C_i)p_i(\lambda_{+}'(X-C_i)+\lambda_{+}(C_i))}{p(X)} \quad (2.13)$$

$$\lambda_{-}(X) = \frac{\sum_{i=1}^{n} p'(X-C_i)p_i(\lambda_{-}'(X-C_i)+\lambda_{-}(C_i))}{p(X)} \quad (2.14)$$

ทั้ง 2 กรณีเมื่อได้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงสถานะแล้ว สามารถนำค่านี้มาคำนวณความถี่แต่ละสถานะ (Individual frequency : $f(X)$) และความถี่สะสม (Cumulative frequency : $F(X)$) จากสมการ 2.15 และ 2.16 ตามลำดับ [2]

$$f(X) = p(X)(\lambda_{-}(X) + \lambda_{\cdot}(X)) \quad (2.15)$$

$$F(X) = F(Y) + p(X)(\lambda_{-}(X) - \lambda_{\cdot}(X)) \quad (2.16)$$

เมื่อ $f(X)$ คือ ความถี่ที่กำลังผลิตที่เกิดขัดข้องเท่ากับ X MW

Y คือ กำลังการผลิตที่เกิดขัดข้องมากกว่าหรือเท่ากับ X MW

$F(X)$ คือ ความถี่สะสมที่กำลังการผลิตที่เกิดขัดข้องเท่ากับ X MW

2.1.4. เทคนิคการทำราวด์ออฟ (Round-off) แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การคำนวณตารางการขาดกำลังผลิตหรือดัชนีความเชื่อถือได้นั้นใช้เวลาในการคำนวณมาก ทั้งนี้ขึ้นกับจำนวนสถานะที่มี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดจำนวนสถานะของตารางการขาดกำลังผลิตลง โดยความแม่นยำของผลการคำนวณดัชนีต่างๆอยู่ในเกณฑ์ดี วิธีการที่เหมาะสมในการใช้งานคือ วิธีราวด์ออฟ หากพิจารณาระบบไฟฟ้าทั่วไป ค่าแตกต่างของกำลังที่ขาดการผลิตแต่ละสถานะในตารางการขาดกำลังผลิตจะมีค่า 1 MW หากเพิ่มช่วงความแตกต่างของแต่ละสถานะให้มากขึ้นแล้ว จำนวนสถานะในตารางการขาดกำลังผลิตจะลดลง ลักษณะของกำลังที่ขาดการผลิตเป็นช่วงๆที่เพิ่มขึ้น (MW increment) นี้จำเป็นต้องปรับค่าของกำลังของสถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีกำลังของทุกสถานะเท่ากับกำลังที่เพิ่มขึ้นเป็นช่วงๆ โดยเทคนิคการราวด์ออฟที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีที่เรียกว่า Efficient round-off model [2]

วิธีนี้จะทำการปรับความน่าจะเป็นจากค่ากำลังผลิตที่เกิดเหตุขัดข้อง (Outage Capacity) โดยปรับค่ากำลังของสถานะและค่าความน่าจะเป็นของสถานะไปยังสถานะที่ใกล้เคียงที่สุดทั้งด้านบวกและลบ โดยอาศัยหลักการโมเมนต์อันดับที่ 1 โดยอาศัยสมการต่อไปนี้

$$p(X_{-}) = \frac{X_{-} - X}{MWIncrement} \times p(X) \quad (2.17)$$

$$p(X_{\cdot}) = \frac{X - X_{\cdot}}{MWIncrement} \times p(X) \quad (2.18)$$

เมื่อ X คือ สถานะที่มีการขาดกำลังผลิต X MW

X_{-} คือ สถานะจาก MW increment ที่สูงที่สุดที่มีการขาดกำลังผลิตต่ำกว่า X MW

$X_{\cdot}$ คือ สถานะจาก MW increment ที่ต่ำที่สุดที่มีการขาดกำลังผลิตมากกว่า X MW

MWIncrement คือ ขนาดของความแตกต่างของกำลังระหว่างสถานะที่อยู่ติดกัน

และสามารถแสดงได้ด้วยตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 2.1 กำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 42 MW มี 2 สถานะ โดยที่สถานะที่เกิดเหตุขัดข้องที่ 42 MW มีค่า UOR = 0.2

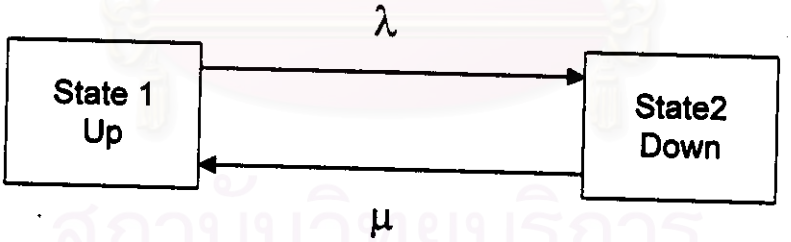
ในการราวด์ออฟโดยใช้ MW increment 10 MW ดังนั้นสามารถปรับสถานะ 42 MW เป็น 40 และ 50 MW และจากสมการ 2.17 และ 2.18 สามารถคำนวณค่าความน่าจะเป็นได้คือ

$$p(40) = 0.02 \times \frac{8}{10} = 0.016$$

$$p(50) = 0.02 \times \frac{2}{10} = 0.004$$

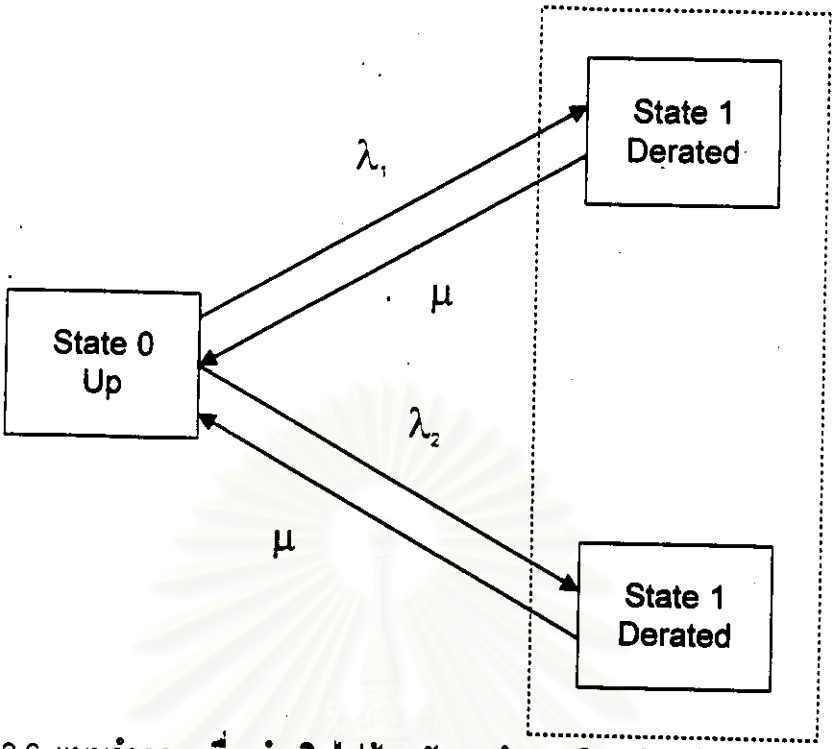
2.2.5. การปรับเปลี่ยนแบบจำลองเพื่อใช้คำนวณดัชนีความถี่และเวลา

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามวิธีที่กล่าวแล้วก็ตาม ยังไม่สามารถคำนวณค่าดัชนีความถี่และเวลาได้เนื่องจากยังไม่มีการเปลี่ยนค่าอัตราการเปลี่ยนสถานะไปตามสถานะที่เปลี่ยนไปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อปรับสถานะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเทคนิคการราวด์ออฟ พบว่าสถานะที่ทำงานได้จะมีกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นหรือเท่าเดิม และอาจมีสถานะใหม่ที่มีกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าสถานะที่ทำงานได้เดิม ลักษณะแบบจำลองแสดงก่อนและหลังการทำราวด์ออฟในรูปที่ 2.5 และ 2.6 [2] ซึ่งเรียกแบบจำลองลักษณะนี้ว่า แบบจำลองที่มีสถานะขนาน (Stage in parallel) จะสังเกตเห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนสถานะจากสถานะที่ 1 ไป 2 และจากสถานะที่ 2 ไป 1 ซึ่งสอดคล้องกับความเป็นจริงเนื่องจากในความเป็นจริงสถานะที่ 1 ไม่มีอยู่จริงจึงไม่มีการเปลี่ยนสถานะระหว่างสถานะที่ 1 และ 2



รูปที่ 2.5 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนการราวด์ออฟ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลังการทำราวด์ออฟโดยมีสถานะขนาน

สามารถคำนวณค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงสถานะ λ_1 และ λ_2 ได้จากสมการ 2.19 และ 2.20 [2]

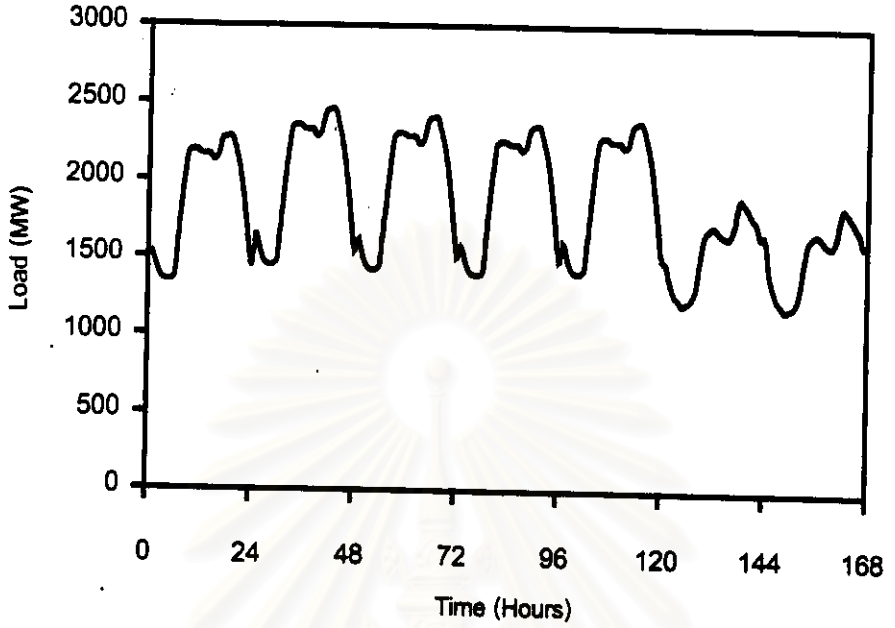
$$\lambda_1 = \frac{p_1 \mu}{p_0} \tag{2.19}$$

$$\lambda_2 = \frac{p_2 \mu}{p_0} \tag{2.20}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2. แบบจำลองของโหลด (Load model)

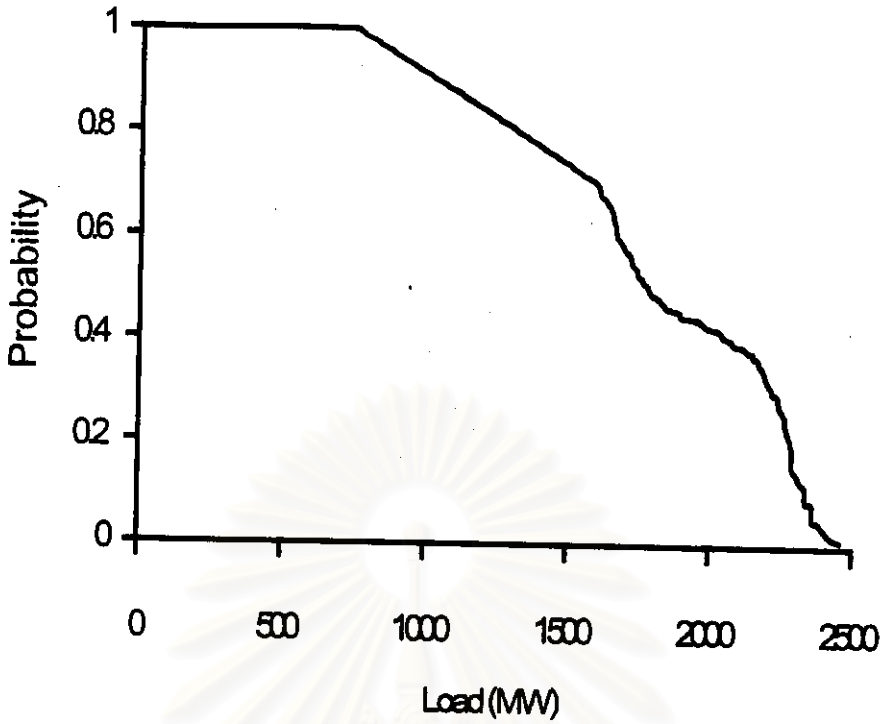
โหลดในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแสดงได้หลายลักษณะขึ้นกับวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งาน โหลดที่นำมาใช้จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงโหลดรายชั่วโมงใน 1 สัปดาห์



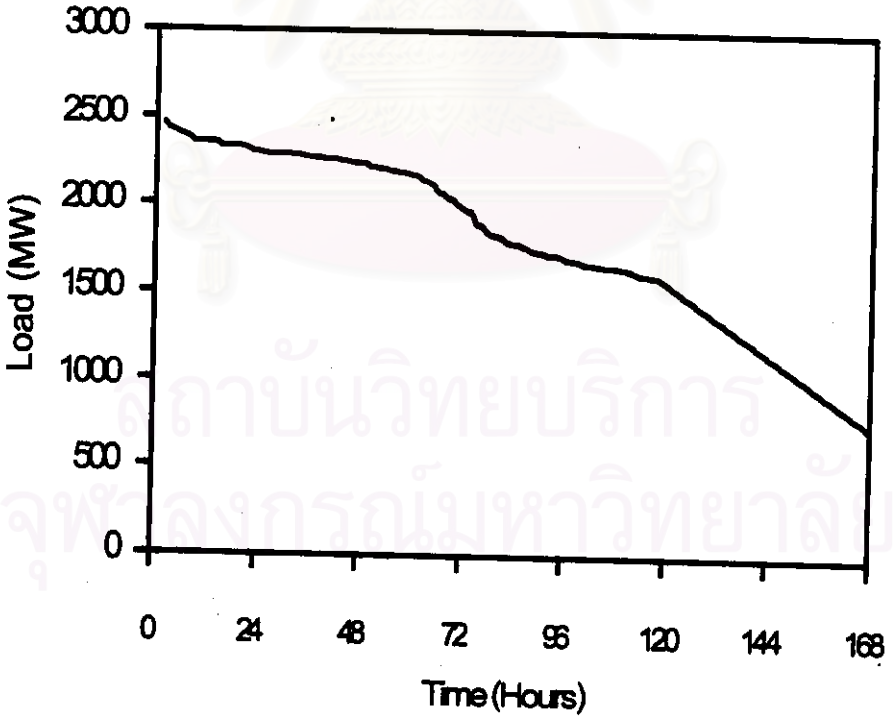
รูปที่ 2.7 แสดงรูปของโหลดรายชั่วโมงใน 1 สัปดาห์

จากรูปที่ 2.7 ลักษณะรูปโหลดเช่นนี้ไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้คำนวณดัชนี เนื่องจากต้องเสียเวลาคำนวณในระดับโหลดที่ซ้ำกัน แต่หากเปลี่ยนจากโหลดรายชั่วโมงไปเป็นเส้นโค้งช่วงเวลาโหลด (Load duration curve) ซึ่งแสดงเฉพาะค่าปริมาณพลังงานไฟฟ้า โหลดสูงสุด (Peak load) และโหลดต่ำสุด (Minimum load) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และสร้าง Load duration curve สำหรับคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.9

โดยทั่วไปนั้นในการคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้นั้นสามารถใช้แบบจำลองโหลดได้ทั้งแบบ Cumulative state load model และแบบ Individual state load model ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้แบบจำลองโหลดแบบ Cumulative เนื่องจากเหมาะสมต่อการพิจารณาผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดพลังงานจำกัด



รูปที่ 2.8 เส้นช่วงโค้งเวลาโหลด



รูปที่ 2.9 เส้นโค้งช่วงเวลาโหลดที่ถูกอินเวอร์ท

2.2.1. ความน่าจะเป็นของโหลดแต่ละระดับ

การคำนวณความน่าจะเป็นของโหลดคือ การคำนวณหาจำนวนการเกิดโหลดที่ระดับใดระดับหนึ่งในช่วงเวลาที่พิจารณาเทียบกับช่วงเวลาที่พิจารณาทั้งหมด [2-4] วิธีการคิดแสดงตามสมการ 2.21 สมการ 2.22 และตัวอย่างที่ 2.2

$$p_i(X) = \frac{\sum t_i(X)}{T} \qquad (2.21)$$

$$P_i(X) = \sum_i p_L(x_i) \qquad X \le x_i \qquad (2.22)$$

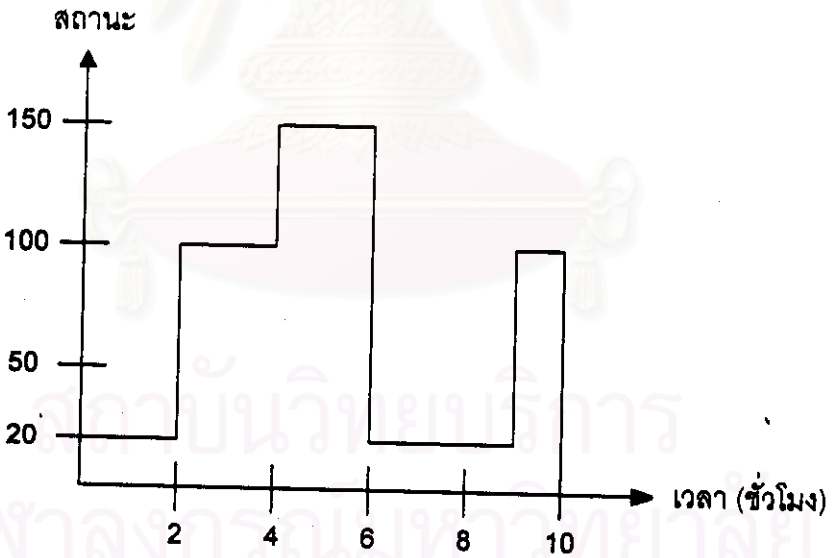
เมื่อ $P_L(X)$ คือ ความน่าจะเป็นสะสมของโหลดที่ระดับ X MW

$p_L(X)$ คือ ความน่าจะเป็นของโหลดที่ระดับ x_i MW

$t_i(X)$ คือ ช่วงเวลาที่เกิดโหลดขนาด X MW ครั้งที่ i

T คือ ช่วงเวลาทั้งหมดที่พิจารณา

ตัวอย่างที่ 2.2 จากรูปที่ 2.10 เป็นโหลดในช่วงเวลา 10 ชั่วโมง โดยมีโหลดต่ำสุด 20 MW และโหลดสูงสุด 150 MW



รูปที่ 2.10 รูปโหลดรายชั่วโมงตัวอย่างที่ 2.2

เมื่อทำการคำนวณตามสมการ 2.21 จะได้ผลตามตารางที่ 2.1

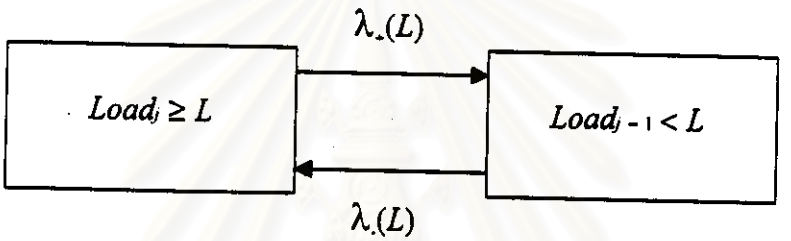
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่2.1 แบบจำลองความน่าจะเป็นของโหลด

ระดับโหลด	ความน่าจะเป็นของโหลด	ความน่าจะเป็นสะสมของโหลด
20	0.5	1.0
100	0.3	0.5
150	0.2	0.2

2.2.2. การคำนวณความถี่แต่ละระดับ

หากนิยาม $\lambda_{-}(L)$ แทนอัตราการเปลี่ยนแปลงจากโหลดที่สถานะต่ำกว่าไปยังสถานะที่สูงกว่า และ $\lambda_{+}(L)$ แทนอัตราการเปลี่ยนแปลงจากโหลดที่สถานะสูงกว่าไปยังสถานะที่ต่ำกว่า ซึ่งแสดงแบบจำลองในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แบบจำลองโหลดแบบ Cumulative state load model

เมื่อ $Load_j$ คือ ระดับโหลดที่เวลา j

$Load_{j-1}$ คือ ระดับโหลดที่เวลา j-1

และเขียนสมการของสถานะได้คือ

$$\begin{aligned} Load_j &\geq L \\ Load_{j-1} &< L \end{aligned} \qquad (2.23)$$

เมื่อพิจารณาตัวอย่างที่ 2.2 จะได้ค่าความถี่ของระดับโหลดตามตารางที่ 2.2

ระดับโหลด	จำนวนครั้งการเปลี่ยนแปลง	ความถี่ = จำนวนครั้ง / 10 ชม.
20	0	0
100	2	0.2
150	1	0.1

2.2.3. การทำราวด์ออฟ (Round-off) แบบจำลองของโหลด

การทำราวด์ออฟแบบจำลองโหลดจะทำคล้ายกับการราวด์ออฟแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้า โดยกระจายไปยังตำแหน่งที่เป็นช่วงของ MW Increment ที่ใกล้ที่สุด ตามหลักการโมเมนต์อันดับที่ 1 แสดงตัวอย่างการทำราวด์ออฟแบบจำลองโหลดในตัวอย่างที่ 2.3

ตัวอย่างที่ 2.3 กำหนด MW Increment เท่ากับ 5 MW ที่โหลด 37 MW ดังนั้นจึงต้องพิจารณาราวด์ออฟโหลดไปที่ 35 MW และ 40 MW โดย

$$p_L(35) = \frac{3}{5} = 0.6$$

$$p_L(40) = \frac{2}{5} = 0.4$$

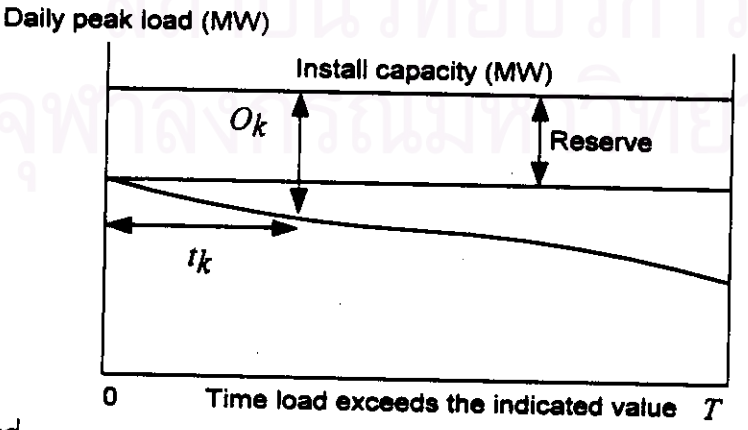
2.3. การคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลัง

2.3.1. แนวคิดในการคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้

การคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลัง ต้องนำแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าและแบบจำลองของโหลดมาพิจารณา โดยดัชนีความเชื่อถือได้ที่สำคัญที่ใช้ในการกำหนดแผนการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์นี้คือ ดัชนี Loss of Load Probability (LOLP) ดัชนี Expected Unserved Energy (EUE) และดัชนี Frequency และ Duration (F&D)

ดัชนี LOLP

เป็นดัชนีที่แสดงถึงความน่าจะเป็นที่ค่ากำลังผลิตไม่เพียงพอกับโหลด พิจารณารูปที่ 2.12 [2,3] หากกำลังผลิตต่ำกว่ากำลังโหลดสูงสุด หรือกำลังการผลิตที่ขัดข้อง O_k มากกว่ากำลังสำรองของระบบจะเกิดการสูญเสียโหลด ดัชนี LOLP คำนวณได้จากผลคูณของความน่าจะเป็นของสถานะที่เกิดเหตุขัดข้อง O_k กับระยะเวลาที่เกิดเหตุขัดข้อง จากรูปที่ 2.12 สามารถคำนวณค่าดัชนี LOLP ได้จากสมการ 2.24 [2,3]



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างโหลด ค่ากำลังการผลิต และค่ากำลังสำรอง

$$LOLP = \frac{\sum_{k=1}^{n} p_k t_k}{T} \qquad (2.24)$$

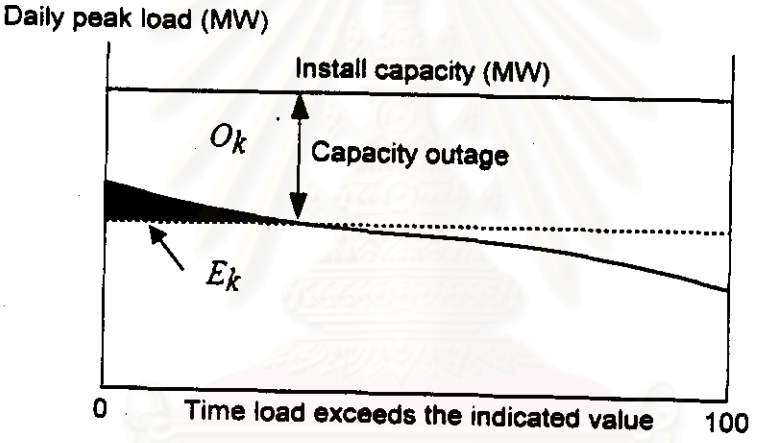
เมื่อ p_k คือ ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการขาดกำลังผลิต O_k

t_k คือ ระยะเวลาที่เกิดเหตุขัดข้องเมื่อเกิดการขาดกำลังผลิต O_k

T คือ ระยะเวลาทั้งหมดที่พิจารณา

ดัชนี EUE

เป็นดัชนีที่แสดงถึงการสูญเสียพลังงาน จากรูปที่ 2.13 [2,3] เมื่อพิจารณาค่ากำลังการผลิตที่ขัดข้อง O_k จะพบว่าพื้นที่ Ek คือพลังงานที่ไม่ได้รับการจ่าย เนื่องจากกำลังผลิตไม่เพียงพอ สามารถคำนวณดัชนี EUE ได้จากผลคูณความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุขัดข้อง O_k กับค่าพลังงานที่ไม่ได้รับการจ่ายตามสมการ 2.25



รูปที่ 2.13 พลังงานที่ไม่ได้รับการจ่ายเนื่องจากค่ากำลังผลิตไม่เพียงพอ

$$EUE = \sum_{k=1}^{n} E_k p_k \qquad (2.25)$$

ดัชนี F&D

เป็นดัชนีที่บ่งชี้ถึงจำนวนครั้งในการสูญเสียโหลดในรอบเวลาที่พิจารณา โดยคำนวณดัชนีความถี่และช่วงเวลาจะเกี่ยวข้องจะขึ้นกับความน่าจะเป็นและความถี่ของแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและแบบจำลองโหลด

2.3.2. การคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ด้วยวิธี Equivalent load

การคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ด้วยวิธี Equivalent load นั้น จะทำโดยนำแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าปรับสถานะเป็นค่าลบและนำไปรวมกับแบบจำลองของโหลด ซึ่งจะได้สถานะที่กำลังผลิตไม่เพียงพอกับโหลด วิธีนี้ทำให้ทราบการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีความเชื่อถือได้หลังจากเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบทีละเครื่อง หลังจากเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าไปในระบบครบทุกเครื่องแล้วผลลัพธ์สุดท้ายจะเป็นค่าดัชนีความเชื่อถือได้ คำนวณสถานะทั้งหมดได้จากสมการ 2.26

$$L^e_k = L_j - (C - X_i) \tag{2:26}$$

โดย C คือ กำลังผลิตติดตั้งของระบบ

X_i คือ กำลังผลิตที่ขัดข้อง

L_j คือ โหลดที่สถานะ j

L^e_k คือ ผลรวมของแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าและแบบจำลองโหลด

ในแต่ละสถานะสามารถคำนวณความน่าจะเป็น ความน่าจะเป็นสะสม และความถี่สะสมได้จากสมการ 2.27, 2.28, และ 2.29 [2-4] ตามลำดับ

$$p(L^e_k) = \sum_{i=0}^{N-1} p_g(X_i)\, p_L(L^e_k + C_i) \tag{2.27}$$

$$P(L^e_k) = \sum_{i=0}^{N-1} p_g(X_i) P_L(L^e_k + C_i) \tag{2.28}$$

$$\begin{aligned} F(L^e_k) &= F_L(L^e_k) + F_g(L^e_k) \\ &= \sum_{i=0}^{N-1} [P_g(X_i) - P_g(X_{i+1})] F_L(L^e_k + C_i) \\ &\quad + \sum_{i=0}^{N-1} [F_g(X_i) - F_g(X_{i+1})] P_L(L^e_k + C_i) \end{aligned} \tag{2.29}$$

โดย $p_g(.)$ คือ ความน่าจะเป็นของสถานะจากแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้า

$p_L(.)$ คือ ความน่าจะเป็นของสถานะจากแบบจำลอง โหลด

$P_g(.)$ คือ ความน่าจะเป็นสะสมของสถานะจากแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้า

$P_L(.)$ คือ ความน่าจะเป็นสะสมของสถานะจากแบบจำลองโหลด

$F_g(.)$ คือ ความถี่สะสมของสถานะจากแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้า

$F_L(.)$ คือ ความถี่สะสมของสถานะจากแบบจำลองระบบโหลด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสถานะของผลรวมที่ได้ หากพิจารณาพบว่า สถานะที่เป็นบวกสถานะแรกเป็นสถานะที่เริ่มมีกำลังผลิตไม่เพียงพอกับโหลด สามารถคำนวณดัชนีต่างๆได้จากสมการ 2.30 ถึง 2.34

$$LOLP = P(L^e_k) \tag{2.30}$$

$$Frequency = F(L^e_k) \tag{2.31}$$

$$EUE = \sum_{i=k}^{N} (L^e_i) p(L^e_i) \tag{2.32}$$

$$Duration = \frac{LOLP}{Frequency} \tag{2.33}$$

$$EES_{k+1} = EUE_k - EUE_{k+1} \tag{2.34}$$

โดย L^e_k คือ สถานะของ Equivalent load ที่สถานะที่ k ซึ่งเป็นสถานะแรกที่เป็นบวกในตาราง Equivalent load

EES_{k+1} คือ พลังงานที่คาดว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้า k+1 จะจ่าย (Expected Energy Supplied by unit k+1)

เนื่องจากการคำนวณด้วยวิธี Equivalent load ต้องคิดถึงสถานะที่เกิดขึ้นทั้งบวกและลบทุกสถานะ ดังนั้นหากต้องการลดเวลาในการคำนวณลงได้โดยตัดสถานะที่เป็นลบออกในการพิจารณาก่อนเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องถัดไปเข้าสู่ระบบ ซึ่งจะช่วยลดสถานะในการคำนวณลงได้ นอกจากนี้บางสถานะมีความน่าจะเป็นต่ำมากสามารถละเลยสถานะนั้นในการพิจารณาได้ จึงเป็นวิธีการที่สามารถลดเวลาในการคำนวณลงได้อีก

2.3.3. การคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้โดยวิธี Equivalent capacity table

วิธี Equivalent capacity table นี้เป็นวิธีที่สามารถลดเวลาในการคำนวณลงได้เมื่อเทียบกับวิธี Equivalent load โดยใช้หลักการแทนค่ากำลังผลิตที่เกิดเหตุขัดข้องหรือกำลังผลิตที่ใช้งานได้ด้วยอิมพัลส์ความน่าจะเป็น วิธีนี้จะสร้างตารางการขาดกำลังผลิตก่อนแล้วจึงนำอิมพัลส์ความน่าจะเป็นของโหลดมารวมกับตารางการขาดกำลังผลิตดังกล่าว ดัชนี EUE ความน่าจะเป็น และความถี่คำนวณได้จากสมการ 2.35 ถึง 2.38 [2] โดยในกรณีความน่าจะเป็นและความถี่จะแทน L_k ด้วย 1 เนื่องจากเป็นสถานะแรกที่กำลังผลิตไม่เพียงพอกับโหลด หากผลการคำนวณไม่มีสถานะที่ 1 MW ก็จะใช้ค่าถัดไปที่กำลังผลิตไม่เพียงพอแทน

$$EUE = \sum_{j=1}^{m}\left\{ p_{Lj}\sum_{i=1}^{n} O_i(X_i)\times\left[X_{Lj}-(TC_i - X_i)\right]\right\} \tag{2.35}$$

$$P(1) = \sum_{i=0}^{N-1} p_g(X_i)P_L(1+C_i) \tag{2.36}$$

$$\begin{aligned} F(1) &= FL(1) + Fg(1) \\ &= \sum_{i=0}^{N-1}\left[P_g(Xi) - P_g(X_{i+1})\right]F_L(1+C_i) \\ &\quad + \sum_{i=0}^{N-1}\left[F_g(Xi) - F_g(X_{i+1})\right]P_L(1+C_i) \end{aligned} \tag{2.37}$$

โดย X_i คือ กำลังไฟฟ้าที่เกิดขัดข้อง

$O_i(X_i)$ คือ ความน่าจะเป็นของแต่ละสถานะที่เกิดเหตุขัดข้อง

X_{Li} คือ ขนาดของโหลด

TC_t คือ กำลังผลิตติดตั้งทั้งหมดเมื่อเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องแล้ว

m คือ จำนวนระดับของโหลดทั้งหมด

n คือ จำนวนสถานะทั้งหมดในตารางการขาดกำลังผลิต

จากรายละเอียดการคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ที่กล่าวมาทั้งหมด เมื่อพิจารณาประกอบกับการกำหนดแผนการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดัชนีความเชื่อถือได้ที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ขึ้นกับเป้าหมายในการบำรุงรักษา โดยทั่วไปสถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการวางแผนระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่จะใช้แบบจำลองสองสถานะเนื่องจากสะดวกต่อการคำนวณในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ซึ่งมีความแตกต่างของระดับกำลังไฟฟ้ามาก หากไม่ทำการราวด์ออฟจะใช้เวลาในการคำนวณมาก การราวด์ออฟนั้นมีข้อจำกัดคือ หากขนาดกำลังไฟฟ้าในการราวด์ออฟมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เล็กที่สุดจะทำให้ผลการคำนวณผิดพลาด ขนาดของการราวด์ออฟจึงเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณา สำหรับวิธีการที่ใช้ในการคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบผลิตไฟฟ้ากำลังในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธี Equivalent load เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ผลการคำนวณถูกต้อง และใช้วิธี Equivalent capacity table ประกอบในการคำนวณเนื่องจากเป็นวิธีที่เพิ่มความเร็วในการคำนวณ