

บทที่ 3

การประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง

บทนี้จะกล่าวถึงหลักการและขั้นตอนการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง ด้วยการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล ซึ่งเป็นวิธีที่อาศัยการสุ่มสถานะของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ จากนั้นจะทำการวิเคราะห์หาสถานะของระบบแล้วคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบ และทำกระบวนการเหล่านี้ซ้ำๆ จนกระทั่งผลตอบลูเข้า ประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีการนี้ใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างสูงแต่ก็สามารถจัดการกับปัญหาที่ซับซ้อนได้ดี โดยรายละเอียดของวิธีการดังกล่าวมีดังต่อไปนี้

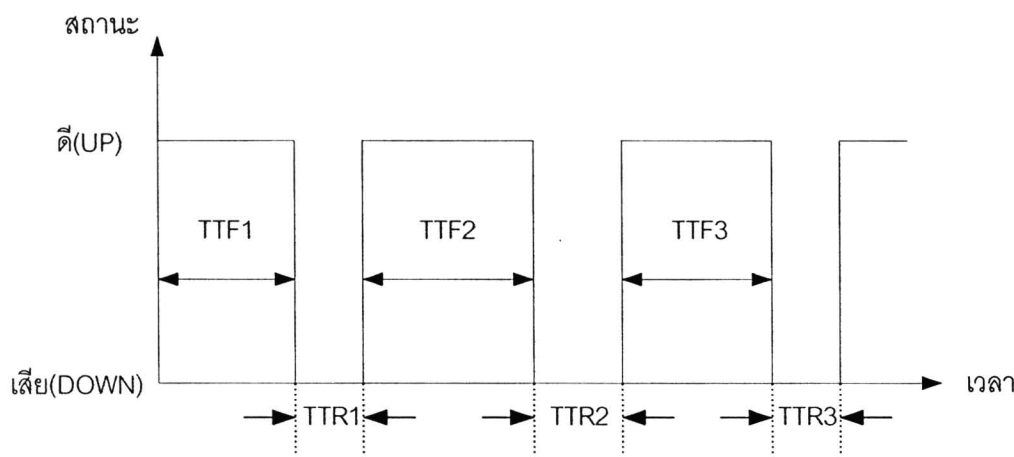
3.1 การจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล

โดยทั่วไป การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนและความเชื่อถือได้ระบบไฟฟ้ากำลังสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ ระเบียบวิธีการวิเคราะห์ (Analytical Method) และวิธีการจำลองเหตุการณ์ (Simulation Method) ในอดีตการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนและความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังนั้น ส่วนใหญ่มักใช้ระเบียบวิธีการวิเคราะห์โดยอาศัยทฤษฎีความน่าจะเป็น (Probability Theory) เป็นหลัก การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีการนี้มีจุดด้อยเนื่องจากการคำนวณจะมีความซับซ้อนมากหากระบบมีขนาดใหญ่ ทำให้บางครั้งในการคำนวณจะต้องกำหนดระดับความเชื่อถือได้ของระบบด้วยเกณฑ์อุปกรณ์ในสถานะเสียหนึ่งหรือสองอุปกรณ์ (N-1, N-2) ซึ่งอาจจะไม่ครอบคลุมเหตุการณ์ส่วนใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลัง [1], [15], [20]

สำหรับการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนและความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยการจำลองเหตุการณ์ จะอาศัยการสุ่มสถานะของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ และทำกระบวนการนี้ซ้ำด้วยคอมพิวเตอร์จนกระทั่งผลตอบลูเข้า การวิเคราะห์ด้วยวิธีการนี้ใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างสูงแต่ก็สามารถจัดการกับปัญหาที่ซับซ้อนได้ดี ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะอาศัยการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลซึ่งเป็นวิธีที่ยังคงประสิทธิภาพสูงแม้ว่าขนาดของระบบจะใหญ่ขึ้นมากก็ตาม การจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลมีหลายวิธี เช่น การสุ่มสถานะ การสุ่มช่วงเวลาการทำงาน การสุ่มการเปลี่ยนสถานะของระบบ เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้การสุ่มช่วงเวลาการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ เนื่องจากมีข้อดีคือ สามารถจำลองลักษณะฟังก์ชันการกระจายตัวของรอบการทำงานของอุปกรณ์โดยใช้ฟังก์ชันการกระจายตัวได้อย่างเหมาะสมและสามารถคำนวณดัชนีเกี่ยวกับความถี่และระยะเวลาได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ แต่มีข้อเสียที่ต้องใช้หน่วยความจำของคอมพิวเตอร์สูง ใช้เวลาการคำนวณมาก และมีความซับซ้อนสูง แต่เนื่องจากในปัจจุบัน สมรรถนะของคอมพิวเตอร์มีการพัฒนาให้สูงขึ้นมาก ข้อเสียเหล่านี้จึงไม่เป็นปัญหาในการใช้งานในปัจจุบัน

3.2 แบบจำลองรอบการทำงานของอุปกรณ์ในระบบ

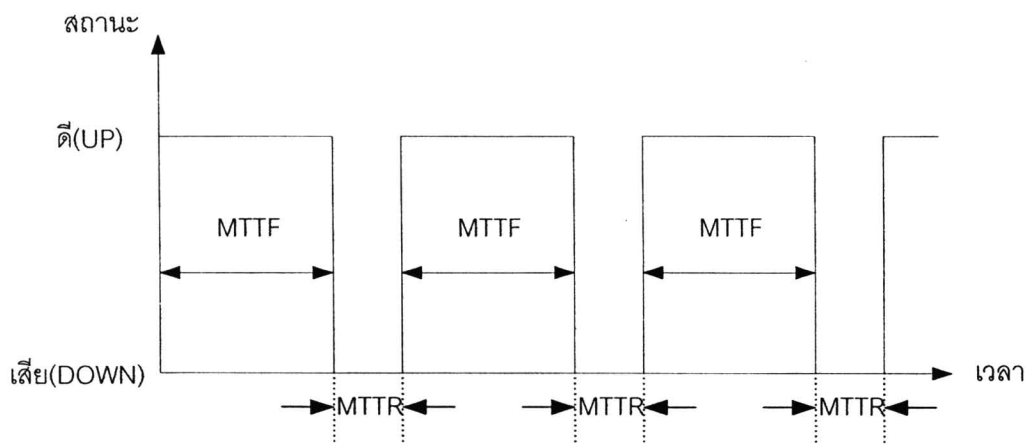
เมื่อพิจารณาในช่วงเวลาหนึ่ง จะพบว่าลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น จะมีค่าเป็นช่วงคาบเวลาที่ไม่สม่ำเสมอ (Non-periodic) ซึ่งประกอบด้วยสถานะการทำงานปกติ จากนั้นจะมีการซ่อมแซม "สถานะเสีย" สลับกับสถานะขัดข้อง "สถานะดี" จนสามารถใช้งานได้ดังเดิมเป็น "สถานะดี" ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะการทำงานของอุปกรณ์

โดยที่ TTF_i คือ เวลาที่อุปกรณ์จะเสีย หรือระยะเวลาที่อุปกรณ์สามารถทำงานได้ในครั้งที่ i
 TTR_i คือ เวลาในการซ่อมแซมอุปกรณ์ หรือระยะเวลาที่อุปกรณ์เสียในครั้งที่ i

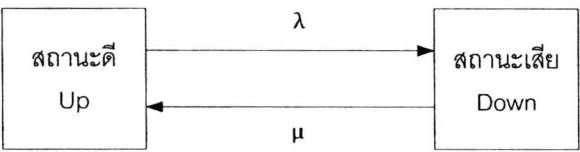
จากรูปที่ 3.1 จะเห็นว่าช่วงเวลาที่อุปกรณ์ทำงานได้กับช่วงเวลาที่เสียในแต่ละช่วงอาจจะมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นในการพิจารณารอบการทำงานของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อแทนการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวในระยะยาวจะใช้ค่าประมาณเป็นระยะเวลาเฉลี่ยในสถานะดี และ ระยะเวลาเฉลี่ยในสถานะเสีย ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การทำงานของอุปกรณ์เมื่อประมาณช่วงเวลาที่อุปกรณ์อยู่ในแต่ละสถานะเป็นค่าเฉลี่ย

- โดยที่ MTTF คือ ระยะเวลาโดยเฉลี่ยที่อุปกรณ์สามารถทำงานได้ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของ TTF และมีค่าเท่ากับ $1/\lambda$
- MTTR คือ ระยะเวลาโดยเฉลี่ยที่อุปกรณ์เสีย ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของ TTR และมีค่าเท่ากับ $1/\mu$
- λ คือ อัตราการเสีย (Failure Rate) หรืออัตราการออกจากสถานะดี
- μ คือ อัตราการซ่อม (Repair Rate) หรืออัตราการเข้าสู่สถานะดี

จากแนวความคิดดังกล่าวทำให้เราสามารถพิจารณาการทำงานของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังในช่วงเวลาที่สนใจได้เป็นสถานะของการทำงานตามแบบจำลองมาร์คอฟฟี 2 สถานะ ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งประกอบด้วย อัตราการเสีย (λ) และอัตราการซ่อมแซม (μ)



รูปที่ 3.3 แบบจำลองมาร์คอฟฟี 2 สถานะ

ซึ่งแบบจำลองดังกล่าว จะถูกใช้ในการคำนวณหาระยะเวลาที่แต่ละอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังอยู่ในสถานะหนึ่งๆ จนกระทั่งเปลี่ยนสถานะ ต่อไป

3.3 การสุ่มช่วงเวลาการทำงาน

การสุ่มช่วงเวลาการทำงานเป็นการจำลองการทำงานของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังตามแบบจำลอง 2 สถานะ โดยจะมีสมมติฐานให้ช่วงเวลาทำงานในแต่ละสถานะ เช่น “สถานะดี” หรือ “สถานะเสีย” และมีการแจกแจงที่อธิบายได้ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function) ที่เฉพาะเจาะจงหนึ่งๆ และเพื่อให้การจำลองเหตุการณ์นั้นมีความสมเหตุสมผล การใช้การแจกแจงที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญ ดังนั้น เราควรเลือกใช้การแจกแจงที่สอดคล้องกับพฤติกรรมของแต่ละอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง [1]

โดยทั่วไป ระยะเวลาที่อุปกรณ์หนึ่งๆ อยู่ในสถานะดี สามารถอธิบายได้ด้วยการแจกแจงแบบเอกโพเนนเชียล (Exponential Distribution Function) ดังสมการที่ (3.1)

$$f_T(t) = \lambda e^{-\lambda t} \tag{3.1}$$

- โดยที่ λ คือ อัตราความล้มเหลว
- T คือ เวลา

โดยที่ ค่าความไม่พร้อมมูล (U) ที่เวลา T สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.2)

$$U = F_T(T) = \int_0^T \lambda e^{-\lambda t} = 1 - e^{-\lambda T} \tag{3.2}$$

และสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$T = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - U) \tag{3.3}$$

แต่ $(1 - U)$ มีการกระจายเช่นเดียวกับ U ดังนั้น

$$T = -\frac{1}{\lambda} \ln(U) \tag{3.4}$$

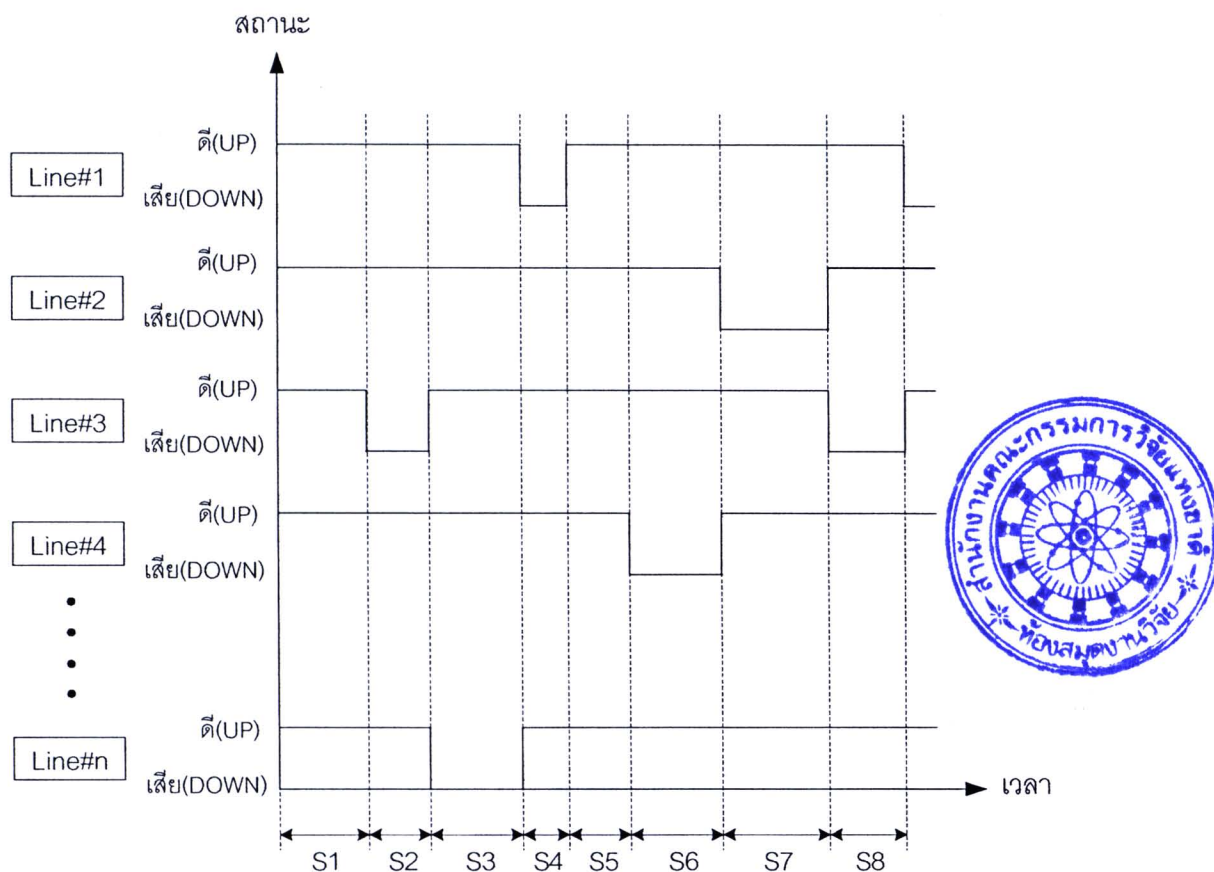
- โดยที่ T คือ เวลาที่อุปกรณ์จะเสีย หรือระยะเวลาที่อุปกรณ์สามารถทำงานได้ (TTF)
 U คือ ตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution)

ในทำนองเดียวกัน ช่วงเวลาในการซ่อมแซมอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังตั้งแต่อุปกรณ์ขัดข้องจนสามารถกลับมาใช้งานได้ สามารถอธิบายได้ด้วยการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) ซึ่งเป็นการแจกแจงที่เหมาะสม และสามารถคำนวณช่วงเวลากการซ่อมของอุปกรณ์ได้ดังสมการที่ (3.5)

$$T = r + Z \times \sigma_r \tag{3.5}$$

- โดยที่ T คือ เวลาในการซ่อมแซมอุปกรณ์ หรือระยะเวลาที่อุปกรณ์เสีย (TTR)
 r คือ ระยะเวลาในการซ่อมเฉลี่ย
 Z คือ ตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution)
 σ_r คือ ความแปรปรวนของระยะเวลาซ่อมแซม โดยปกติกำหนดให้มีค่าเท่ากับ $0.1 \times r$

ด้วยวิธีการดังกล่าวสามารถนำไปใช้สุ่มระยะเวลาที่แต่ละอุปกรณ์อยู่ในสถานะหนึ่งๆ จนกระทั่งเปลี่ยนสถานะ และเมื่อทำซ้ำจนครบทุกอุปกรณ์จนครบระยะเวลาที่ต้องการจะได้ข้อมูลของระบบดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ช่วงเวลาการทำงานของอุปกรณ์ ที่เกิดจากการสลับ

โดยที่ $S_1, S_2, \dots, S_8$ เป็นระยะเวลาที่อุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่งในระบบไฟฟ้ากำลังมีการเปลี่ยนสถานะ จากสถานะดีไปสู่สถานะเสียหรือจากสถานะเสียไปสู่สถานะดี ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ต้องใช้ในการคำนวณสถานะของระบบ ณ ช่วงเวลานั้นๆ

3.4 การใช้แบบจำลองโหลดโดยคำนึงถึงความไม่แน่นอนของโหลดรวมด้วย

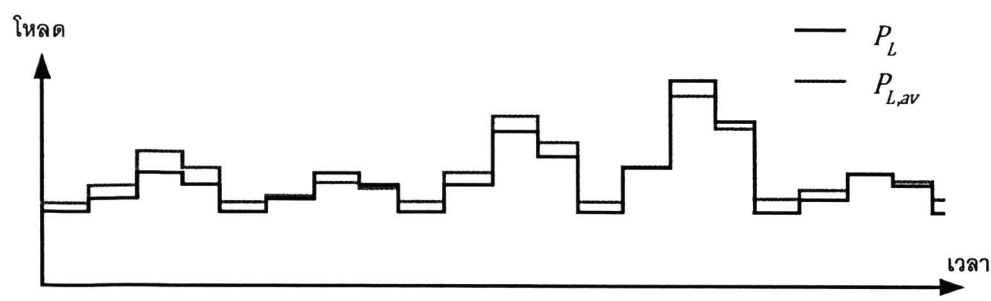
การนำแบบจำลองโหลดมาใช้ร่วมกับการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลโดยคำนึงถึงความไม่แน่นอนของโหลด (Load uncertainty) รวมด้วยนั้น จำเป็นต้องรู้ว่า โหลดมีระยะเวลาที่อยู่ในแต่ละสถานะนานเท่าไรและโหลดมีการเปลี่ยนแปลงสถานะด้วยปริมาณโหลดเท่าไร จากแบบจำลองโหลดที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 จะใช้วิธีการเฉลี่ยข้อมูลการใช้ไฟฟ้า (Load profile) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยแบบจำลองโหลดที่ได้นั้นจะมีระยะเวลาที่อยู่ในแต่ละสถานะที่แน่นอน นั่นคือ 6 ชั่วโมง และมีปริมาณโหลดเฉลี่ยที่แน่นอนในแต่ละช่วงเวลา แต่ในความเป็นจริงแล้วเราไม่สามารถทำนายจากข้อมูลที่มีได้อย่างแม่นยำว่า ในแต่ละช่วงเวลาจะมีปริมาณโหลดเท่าไร ดังนั้น เราจะใช้การสุ่มปริมาณโหลดในแต่ละช่วงเวลาด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่เหมาะสม

โดยทั่วไป ความไม่แน่นอนของโหลดสามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) [21] ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.6)

$$P_L = P_{L,av} + Z \times \sigma_r \tag{3.6}$$

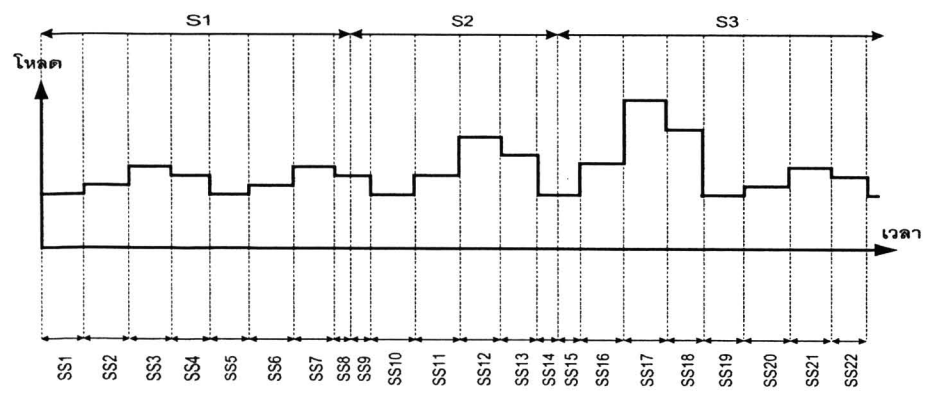
- โดยที่ P_L คือ ปริมาณโหลด
- $P_{L,av}$ คือ ปริมาณโหลดเฉลี่ย
- Z คือ ตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution)
- σ_r คือ ความแปรปรวนของปริมาณโหลด โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ $0.2 \times \sqrt{P_{L,av}}$

วิธีการดังกล่าวจะสามารถคำนวณปริมาณโหลดในแต่ละช่วงเวลาได้ ทำให้รู้ระยะเวลาและปริมาณโหลดในช่วงเวลานั้นๆ ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การสุ่มปริมาณโหลดในแต่ละช่วงเวลา

ซึ่งผลที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลของระบบที่ได้จากการสุ่มช่วงเวลาการทำงานของอุปกรณ์ ดังรูปที่ 3.6 โดยที่ระยะเวลาที่อุปกรณ์หรือโหลดในระบบไฟฟ้ากำลังมีการเปลี่ยนสถานะ นั่นคือ $SS_1, SS_2, \dots, SS_{22}$ เป็นระยะเวลาที่ต้องนำไปใช้ในการคำนวณหาสถานะของระบบ ณ ช่วงเวลาดังกล่าว

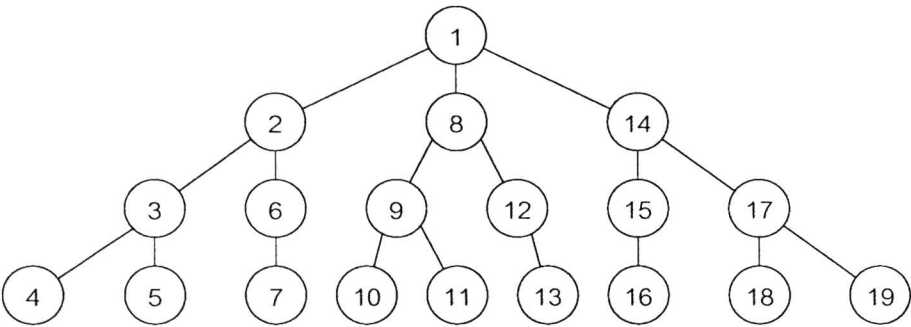


รูปที่ 3.6 ช่วงเวลาการทำงานของอุปกรณ์และช่วงเวลาโหลด

3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างระบบไฟฟ้ากำลัง

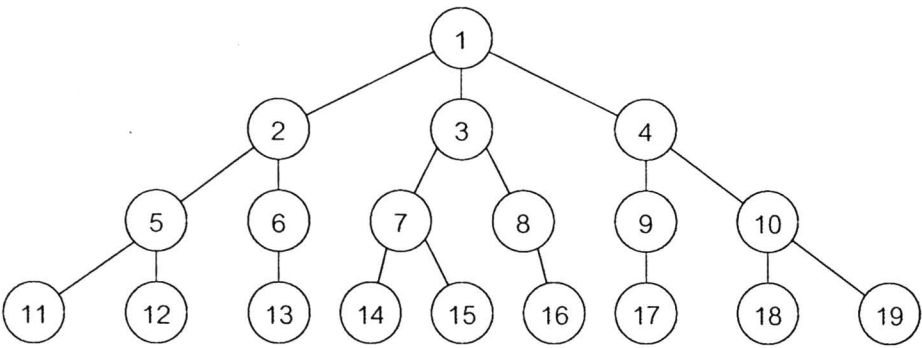
ในแต่ละรอบของการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลนั้น อุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลังมีโอกาสเสียพร้อมๆกันหลายอุปกรณ์ ซึ่งอาจจะส่งผลให้อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังไม่เชื่อมต่อกันแล้วทำให้ระบบแยกตัวออกเป็นกลุ่ม (Islanding) ทำให้การคำนวณหาสถานะของระบบนั้นจะต้องใช้วิธีการคำนวณทีละกลุ่ม แล้วนำผลที่ได้มาประมวลผลรวมกันว่าสถานะของระบบเป็นอย่างไร ดังนั้น จึงจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์โครงสร้างระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อดูว่าอุปกรณ์ตัวไหนในระบบไฟฟ้ากำลังยังเชื่อมต่อกันอยู่บ้างและยังเชื่อมต่อกันเป็นกลุ่มหรือไม่ ซึ่งวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างระบบไฟฟ้ากำลังที่นิยมใช้มี 2 วิธี [22] คือ

1) วิธีการค้นหาแบบลึกก่อน (Depth-first search) คือ การค้นหาที่กำหนดทิศทางจากตำแหน่งบนสุดไปจนถึงตำแหน่งล่างสุดคล้ายกับโครงสร้างของต้นไม้ โดยเริ่มต้นจากตำแหน่งรากซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่บนสุดแล้วค้นหาลงมาจนถึงตำแหน่งล่างสุด จากนั้นให้ย้อนขึ้นไปที่ตำแหน่งก่อนถึงตำแหน่งล่างสุดของกิ่งเดียวกันซึ่งมีกิ่งแยกและยังไม่ได้ค้นหา แล้วค้นหาลงมาจนถึงตำแหน่งล่างสุดอีก ทำเช่นนี้ซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งสำรวจครบทุกตำแหน่ง โดยการค้นหาแบบลึกก่อนจะมีลำดับการเดินตามตัวเลขที่กำกับไว้ในแต่ละตำแหน่ง ดังรูปที่ 3.7



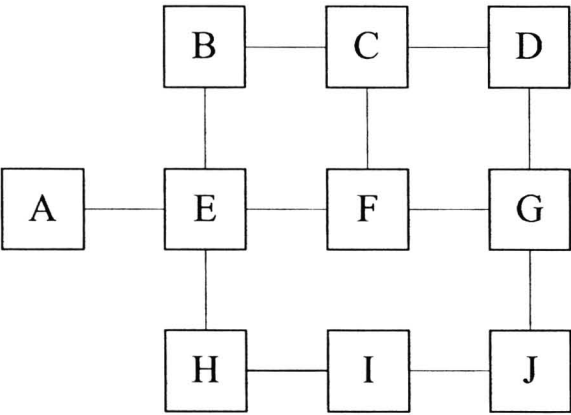
รูปที่ 3.7 ลำดับการเดินทางของการค้นหาแบบลึกก่อน

2) วิธีการค้นหาแบบกว้างก่อน (Breadth-first search) คือ การกำหนดทิศทางการค้นหาแบบทีละระดับของโครงสร้างต้นไม้ โดยเริ่มต้นจากตำแหน่งรากซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่บนสุดแล้วค้นหาลงมาหนึ่งระดับจากซ้ายไปขวา จากนั้นให้ค้นหาลงมาอีกหนึ่งระดับจากซ้ายไปขวา ทำเช่นนี้ซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งสำรวจครบทุกตำแหน่ง ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับการเรียงข้อมูลตามลำดับก่อนหลัง (Queue) โดยการค้นหาแบบกว้างก่อนจะมีลำดับการเดินตามตัวเลขที่กำกับไว้ในแต่ละตำแหน่ง ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ลำดับการเดินทางของการค้นหาแบบกว้างก่อน

วิธีการเหล่านี้มีข้อดีและข้อเสียที่ต่างกันไป ถึงแม้ว่าวิธีการค้นหาแบบลึกก่อนนั้นจะมีขั้นตอนการดำเนินการที่รวดเร็วกว่าวิธีการค้นหาแบบกว้างก่อน แต่เนื่องจาก วิธีการค้นหาแบบลึกก่อนเป็นวิธีการทำซ้ำ (Recursive) จึงมีข้อเสียคือ ต้องการหน่วยความจำมาก และมีความซับซ้อนมากกว่าวิธีการค้นหาแบบกว้างก่อน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีการค้นหาแบบกว้างก่อนในการวิเคราะห์โครงสร้างระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับตัวอย่างในการวิเคราะห์โครงสร้างระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีการค้นหาแบบกว้างก่อน จะเริ่มจากการพิจารณาระบบตัวอย่างเพื่อใช้ในการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ระบบตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างระบบ

ระบบตัวอย่างมีบัสทั้งหมด 10 บัส ซึ่งระบบนี้จะถูกแทนด้วยเมทริกซ์ A ซึ่งเป็นเมทริกซ์เชื่อมโยง (Connectivity matrix) ที่มีขนาด 10 แถว 10 หลัก โดยกำหนดให้ บัสที่มีการเชื่อมต่อกันมีค่าเป็น 1 และบัสที่ไม่มีการเชื่อมต่อกันมีค่าเป็น 0 ทำให้ได้เมทริกซ์ที่มีคุณสมบัติสมมาตรตามแนวทแยงมุม (Diagonal symmetry) และเป็นเมทริกซ์มากเลขศูนย์ (Sparse matrix) ดังนี้

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} A & B & C & D & E & F & G & H & I & J \end{matrix} \\ \begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \\ G \\ H \\ I \\ J \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

การสำรวจเริ่มต้นที่บัส A ให้นำบัสข้างเคียงคือบัส E ไปไว้ในคิว เมื่อสำรวจบัส A เสร็จแล้วให้นำข้อมูลในคิวลำดับแรก นั่นคือ บัส E ออกมาสำรวจ แล้วนำข้อมูลข้างเคียงคือบัส B, บัส F และบัส H ไปใส่ไว้ในคิว ตอนนี้คิวจะมีบัส B, บัส F และบัส H อยู่ เมื่อสำรวจบัส E เสร็จแล้วให้นำข้อมูลในคิวลำดับแรก นั่นคือ บัส B ออกมาสำรวจ แล้วนำข้อมูลข้างเคียงคือบัส C ไปใส่ไว้ในคิว ตอนนี้คิวจะมีบัส F, บัส H และบัส C อยู่ เมื่อสำรวจบัส B เสร็จแล้วให้นำข้อมูลในคิวลำดับแรก นั่นคือ บัส F ออกมาสำรวจ ทำเช่นนี้ซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งสำรวจครบทุกบัส ซึ่งจะได้ลำดับการสำรวจข้อมูลคือ (A E B F H C G I D J) ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การค้นหาแบบกว้างก่อน

บัสที่สำรวจ	คิว
A	E
E	B F H
B	F H C
F	H C G
H	C G I
C	G I D
G	I D J
I	D J
D	J
J	

จากตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่าบัส A, E, B, F, H, C, G, I, D และ J เชื่อมต่อกันอยู่และเป็นบัสที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 3.9

3.6 การวิเคราะห์ระบบด้วยการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

การจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลนั้นจะใช้ข้อมูลจากแบบจำลองมาร์คอฟ 2 สถานะ เพื่อใช้ในการจำลองรอบการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งในแต่ละช่วงการทำงานของอุปกรณ์นั้นจะต้องทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเพื่อใช้วิเคราะห์หาสถานะของระบบด้วย ดังนั้น การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าจึงมีบทบาทสำคัญในการจำลองเหตุการณ์

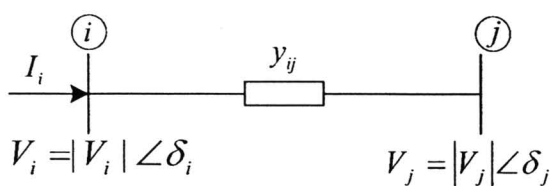
วิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน เป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้มากที่สุด เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ มีความน่าเชื่อถือ มีคุณสมบัติการลู่เข้าหาคำตอบที่รวดเร็วและจำนวนรอบของการทำซ้ำไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของระบบไฟฟ้า การใช้วิธีนี้ในการหาสถานะของระบบจะเริ่มต้นจากความรู้พื้นฐานทางไฟฟ้ากำลัง การคำนวณหาผลเฉลยของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน และการพิจารณาสถานะของระบบ [10]

เมื่อพิจารณาระบบไฟฟ้า N บัส ด้วยวิธีการตรวจพิจารณา (Inspection) แล้ว สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่บัส กับกระแสที่ฉีดเข้าบัส (Bus injected current) ได้ดังสมการที่ (3.7)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

โดยที่

$$I_i = \sum_{j=1}^N Y_{ij} V_j = \sum_{j=1}^N |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (3.8)$$



รูปที่ 3.10 บัสในระบบไฟฟ้ากำลัง

จากสมการที่ (3.8) กระแสที่ฉีดเข้าบัสที่ i ซึ่งเขียนในรูปของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ และจากรูปที่ 3.10 เราสามารถเขียนสมการของกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน (Power flow equation) สุทธิที่ไหลเข้าบัสที่ i ได้ดังนี้

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i = (|V_i| \angle -\delta_i) \sum_{j=1}^N |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (3.9)$$

เมื่อแยกพิจารณาส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าจะได้

$$P_{i,cal} = \sum_{j=1}^N |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.10)$$

$$Q_{i,cal} = \sum_{j=1}^N |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.11)$$

กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่คำนวณได้ตามสมการ (3.10) และ (3.11) จะเท่ากับกำลังไฟฟ้ารวมที่ได้รับการจัดสรรใช้ที่แต่ละบัส นั่นคือ

$$P_{i,sch} - P_{i,cal}(|V|, \delta) = 0 \quad (3.12)$$

$$Q_{i,sch} - Q_{i,cal}(|V|, \delta) = 0 \quad (3.13)$$

เราสามารถหาค่าเฉลยของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้านี้ด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน โดยการจัดรูปแบบปัญหาดังสมการที่ (3.14)

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_1^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{1,cal}^{(k)}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_{1,cal}^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_{1,cal}^{(k)}}{\partial |V_1|} & \dots & \frac{\partial P_{1,cal}^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_{n,cal}^{(k)}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_{n,cal}^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_{n,cal}^{(k)}}{\partial |V_1|} & \dots & \frac{\partial P_{n,cal}^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_{1,cal}^{(k)}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_{1,cal}^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_{1,cal}^{(k)}}{\partial |V_1|} & \dots & \frac{\partial Q_{1,cal}^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_{n,cal}^{(k)}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_{n,cal}^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_{n,cal}^{(k)}}{\partial |V_1|} & \dots & \frac{\partial Q_{n,cal}^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_1|^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta |V_n|^{(k)} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

จากเมตริกซ์ข้างบนสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ย่อย ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta |V_i| \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

เราเรียกเมตริกซ์ $J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}$ ว่า เมตริกซ์จาโคเบียน (Jacobian Matrix) โดยสมาชิกในเมตริกซ์จาโคเบียน คือ อนุพันธ์ย่อยของสมการที่ (3.10) และ (3.11) โดยที่ $J_1 = \frac{\partial P}{\partial \delta}$, $J_2 = \frac{\partial P}{\partial |V|}$, $J_3 = \frac{\partial Q}{\partial \delta}$ และ $J_4 = \frac{\partial Q}{\partial |V|}$ ซึ่งสามารถพิจารณาได้ดังนี้

สมาชิกในแนวทแยงมุมและนอกทแยงมุมของ J_1

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq i \quad (3.17)$$

สมาชิกในแนวทแยงมุมและนอกทแยงมุมของ J_2

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq i \quad (3.19)$$

สมาชิกในแนวทแยงมุมและนอกทแยงมุมของ J_3

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq i \quad (3.21)$$

สมาชิกในแนวทแยงมุมและนอกทแยงมุมของ J_4

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i| |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} - \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq i \quad (3.23)$$

โดยที่

$$\Delta P_i^{(k)} = P_{i,sch}^{(k)} - P_{i,cal}^{(k)} \quad (3.24)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_{i,sch}^{(k)} - Q_{i,cal}^{(k)} \quad (3.25)$$

จากสมการต่างๆที่กล่าวมาข้างต้น เราสามารถแก้สมการเพื่อหาค่า $\Delta \delta_i$ และ $\Delta |V_i|$ ได้จากสมการที่ (3.26)

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta |V_i| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$= \begin{bmatrix} J_a & J_b \\ J_c & J_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

ค่าแรงดันบัลที่ประมาณขึ้นใหม่จากวิธีนิวตัน-ราฟสันคือ

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta\delta_i^{(k)} \quad (3.28)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta|V_i^{(k)}| \quad (3.29)$$

กระบวนการจะดำเนินต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่า $\Delta P_i^{(k)}$ และ $\Delta Q_i^{(k)}$ (Power mismatch) น้อยกว่าค่าความละเอียดที่ยอมรับได้ (ε) นั่นคือ $|\Delta P_i^{(k)}| \leq \varepsilon$ และ $|\Delta Q_i^{(k)}| \leq \varepsilon$ หลังจากได้คำตอบแล้วเราสามารถวิเคราะห์หาสถานะของระบบได้ว่าเกิดเหตุขัดข้องหรือไม่ด้วยการพิจารณาว่ากำลังปรากฏในสายส่งเกินขีดจำกัดหรือไม่ แรงดันที่บัลต่ำกว่าหรือสูงกว่ามาตรฐานหรือไม่ และกำลังการผลิตเกินพิกัดหรือไม่ ถ้าไม่มีการละเมิดทุกเงื่อนไข นั้นแสดงว่าไม่มีเหตุขัดข้อง จะกำหนดให้สถานะของระบบในช่วงเวลานั้นเป็นสถานะ “ดี” แต่ถ้ามีการละเมิดเงื่อนไขใดๆก็ตาม นั้นแสดงว่ามีเหตุขัดข้อง จะใช้วิธีการแก้ไขเหตุขัดข้อง ซึ่งเมื่อแก้ไขเหตุขัดข้องแล้วไม่มีการตัดโหลด จะกำหนดให้สถานะของระบบในช่วงเวลานั้นเป็นสถานะ “ดี” ในทางตรงกันข้าม เมื่อแก้ไขเหตุขัดข้องแล้วมีการตัดโหลด จะกำหนดให้สถานะของระบบในช่วงเวลานั้นเป็นสถานะ “เสีย”

3.7 การแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดเหตุขัดข้อง

เนื่องจากอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลังมีข้อจำกัดในการทำงาน เช่น สายส่งสามารถรับกำลังไฟฟ้าได้ไม่เกินค่าที่กำหนด แรงดันที่บัลต้องไม่ต่ำกว่าและไม่สูงกว่าระดับแรงดันมาตรฐาน กำลังการผลิตไม่เกินพิกัด เป็นต้น ค่ากำหนดต่างๆเหล่านี้ถือเป็นเงื่อนไขบังคับ ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยของอุปกรณ์ต่างๆในระบบ ดังนั้นเมื่อเกิดเหตุขัดข้องแล้ว เราจำเป็นต้องทำการแก้ไขเหตุขัดข้อง ซึ่งวิธีการแก้ไขเหตุขัดข้องในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีหลายวิธีเช่น การจัดสรรกำลังการผลิตใหม่ การตัดโหลดออกจากระบบ การปรับแก้หม้อแปลง การปรับแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเฉพาะการจัดสรรกำลังการผลิตใหม่ พร้อมกับการตัดโหลดออกจากระบบและการปรับแก้หม้อแปลง เพื่อช่วยแก้ไขเหตุขัดข้องเท่านั้น ซึ่งในทางปฏิบัติ นั้นเมื่อเกิดเหตุขัดข้องแล้ว ผู้ควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังจะทำการแก้ไขเหตุขัดข้องด้วยวิธีการปรับแก้หม้อแปลงก่อน แล้วทำการจัดสรรกำลังการผลิตใหม่ และถ้าจำเป็นต้องทำการตัดโหลดก็จะทำการตัดโหลดโดยให้มีความสูญเสียโดยรวมน้อยที่สุด โดยการแก้ไขเหตุขัดข้องดังกล่าวจะพิจารณาปัญหาในรูปแบบการแก้ปัญหาค่าขีดสุด [21], [23], [24]

การแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดเหตุขัดข้องจะใช้วิธีการจัดสรรกำลังการผลิตใหม่ พร้อมกับการตัดโหลดออกจากระบบและการปรับแก้หม้อแปลงอย่างเหมาะสม ซึ่งเราสามารถคำนวณได้ด้วยการแก้ปัญหาค่าขีดสุด โดยมีฟังก์ชันจุดประสงค์ดังสมการที่ (3.30) คือการหาค่าที่ต่ำที่สุดของผลรวมของค่าการจัดสรรกำลังการผลิตใหม่ ค่าความสูญเสียจากการตัดโหลดและค่าจากการ

ปรับแก้ป้อนแปลง โดยกำหนดให้ผลกระทบจากการปรับแก้ป้อนแปลง (w_a) มีค่าน้อยมากๆ เมื่อเทียบกับผลกระทบจากการจัดสรรกำลังการผลิตเพิ่มหรือลดลง (C_i^{G+}, C_i^{G-}) และผลกระทบจากการตัดโหลด ($C_{L,i}$) เพื่อเป็นการบังคับให้ทำการแก้ไขเหตุขัดข้องด้วยวิธีการปรับแก้ป้อนแปลงก่อน แล้วทำการจัดสรรกำลังการผลิตใหม่ และถ้าจำเป็นต้องทำการตัดโหลดก็จะทำการตัดโหลดโดยให้มีความสูญเสียโดยรวมน้อยที่สุด และการแก้ปัญหาค่าขีดสุดนี้จะต้องพิจารณาเงื่อนไขบังคับร่วมด้วย โดยเงื่อนไขบังคับที่ต้องพิจารณามีดังต่อไปนี้ สมดุลกำลังไฟฟ้าจริง ขีดจำกัดของสายส่ง ขีดจำกัดแรงดันที่บัส ขีดจำกัดกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุด ขีดจำกัดกำลังการผลิตไฟฟ้าต่ำสุด ขีดจำกัดของแท่งหม้อแปลงที่สามารถปรับได้ ปริมาณโหลดที่สามารถตัดออกจากระบบได้ และกำหนดให้สัดส่วนการตัดโหลดมีค่าคงที่ ซึ่งเงื่อนไขเหล่านี้สามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังสมการที่ (3.31)- (3.38) ตามลำดับ

$$\text{Min } z = \sum_{i=1}^{NG} C_i^{G+} \Delta P_i^{G+} + \sum_{i=1}^{NG} C_i^{G-} \Delta P_i^{G-} + \sum_{i=1}^{NL} C_{L,i} \Delta P_{L,i} + w_a \sum_{t=1}^{NT} (\Delta a_t)^2 \quad (3.30)$$

s.t.

$$\sum_i^{NG} (P_i^{Go} + \Delta P_i^{G+} - \Delta P_i^{G-}) - \sum_i^{NL} (P_{L,i} - \Delta P_{L,i}) - (P_{Ls}^0 + \Delta P_{Ls}) = 0 \quad (3.31)$$

$$\Delta S_{ij} \leq S_{ij}^{limit} - S_{ij}^0 \quad (3.32)$$

$$V_i^{min} - V_i^0 \leq \Delta V_i \leq V_i^{max} - V_i^0 \quad (3.33)$$

$$\Delta P_i^{G+} \leq P_i^{G,max} - P_i^{Go} \quad (3.34)$$

$$\Delta P_i^{G-} \leq P_i^{Go} - P_i^{G,min} \quad (3.35)$$

$$a_{ij}^{min} - a_{ij}^0 \leq \Delta a_{ij} \leq a_{ij}^{max} - a_{ij}^0 \quad (3.36)$$

$$0 \leq \Delta P_{L,i} \leq P_{L,i} \quad (3.37)$$

$$\frac{\Delta Q_{L,i}}{\Delta P_{L,i}} = \frac{Q_{L,i}}{P_{L,i}} = \alpha_i \quad (3.38)$$

โดยที่	C_i^{G+}	คือ	ค่าใช้จ่ายเมื่อเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าที่บัส i
	ΔP_i^{G+}	คือ	กำลังการผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่บัส i
	C_i^{G-}	คือ	ค่าใช้จ่ายเมื่อลดกำลังการผลิตไฟฟ้าที่บัส i
	ΔP_i^{G-}	คือ	กำลังการผลิตไฟฟ้าที่ลดลงที่บัส i



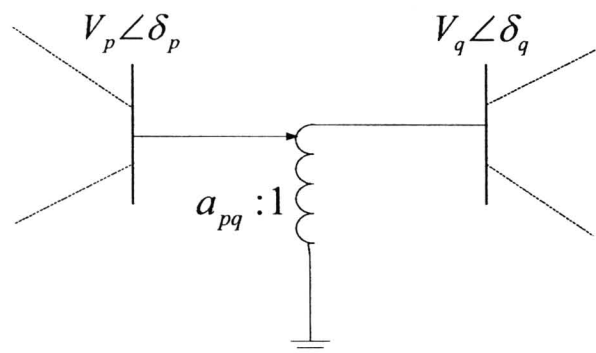
P_i^{Go}	คือ	กำลังการผลิตไฟฟ้าที่บัส i
$C_{L,i}$	คือ	ผลกระทบจากการตัดโหลดที่บัส i
$P_{L,i}$	คือ	ปริมาณโหลดที่บัส i
$\Delta P_{L,i}$	คือ	ปริมาณโหลดกำลังจริงที่ถูกตัดออกจากระบบที่บัส i
w_a	คือ	ผลกระทบจากการปรับแก้หม้อแปลง
Δa_t	คือ	แก้หม้อแปลงที่เปลี่ยนแปลงของหม้อแปลง t
P_{LS}^0	คือ	กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมทั้งระบบ
ΔP_{LS}	คือ	กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมทั้งระบบที่เปลี่ยนแปลง
S_{ij}^0	คือ	กำลังไฟฟ้าปรากฏในสายส่งจากบัส i ไปบัส j
ΔS_{ij}	คือ	กำลังไฟฟ้าปรากฏในสายส่งที่เปลี่ยนแปลงจากบัส i ไปบัส j
S_{ij}^{limit}	คือ	ข้อจำกัดกำลังไฟฟ้าปรากฏในสายส่งจากบัส i ไปบัส j
V_i^{min}	คือ	ข้อจำกัดแรงดันต่ำสุดที่บัส i
V_i^{max}	คือ	ข้อจำกัดแรงดันสูงสุดที่บัส i
V_i^0	คือ	แรงดันที่บัส i
ΔV_i	คือ	แรงดันที่เปลี่ยนแปลงที่บัส i
$P_i^{G,max}$	คือ	ข้อจำกัดกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดที่บัส i
$P_i^{G,min}$	คือ	ข้อจำกัดกำลังการผลิตไฟฟ้าต่ำสุดที่บัส i
a_{ij}^{min}	คือ	ข้อจำกัดแก้หม้อแปลงต่ำสุดที่เชื่อมต่อระหว่างบัส i กับบัส j
a_{ij}^{max}	คือ	ข้อจำกัดแก้หม้อแปลงมากที่สุดที่เชื่อมต่อระหว่างบัส i กับบัส j
a_{ij}^0	คือ	แก้หม้อแปลงที่เชื่อมต่อระหว่างบัส i กับบัส j
Δa_{ij}	คือ	แก้หม้อแปลงที่เปลี่ยนแปลงที่เชื่อมต่อระหว่างบัส i กับบัส j
$\Delta Q_{L,i}$	คือ	ปริมาณโหลดกำลังรีแอกทีฟที่ถูกตัดออกจากระบบที่บัส i
$Q_{L,i}$	คือ	ปริมาณโหลดกำลังรีแอกทีฟที่บัส i
α_i	คือ	สัดส่วนระหว่างปริมาณกำลังไฟฟารีแอกทีฟกับกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดที่บัส i (MVar/MW)
NG	คือ	จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดในระบบ
NL	คือ	จำนวนโหลดทั้งหมดในระบบ
NT	คือ	จำนวนหม้อแปลงที่สามารถปรับแก้ได้

การแก้ปัญหาค่าขีดสุดนี้จะใช้วิธีการประมาณฟังก์ชันขีดจำกัดต่างๆแบบเชิงเส้นให้อยู่ในรูปพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้ากำลังที่เราต้องทำการปรับค่า ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการแก้ปัญหาค่าขีดสุดแบบควอดราติก (Quadratic programming)

3.8 แบบจำลองหม้อแปลงที่สามารถปรับแท็ปได้

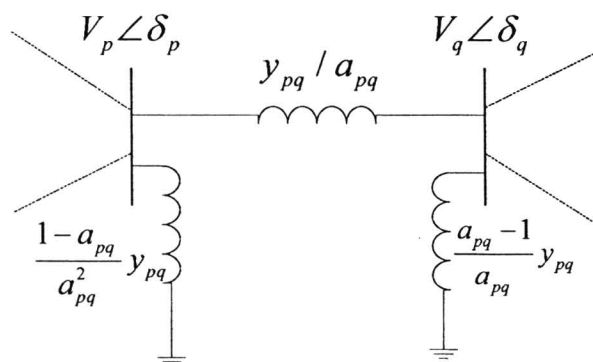
หม้อแปลงที่มีแท็ปนั้นจะสามารถปรับแท็ปเพื่อเพิ่มแรงดัน (Step up) หรือลดแรงดัน (Step down) ได้หลายระดับ โดยจะทำการปรับแท็ปเพื่อใช้ปรับเพิ่มแรงดันเมื่อเกิดแรงดันตก หรือปรับลดแรงดันเมื่อเกิดแรงดันเกิน โดยรักษาระดับแรงดันด้านแรงต่ำให้คงที่ ซึ่งในหม้อแปลงขนาดใหญ่จะการใช้การปรับแท็ปด้วยสวิตช์อัตโนมัติ

โดยทั่วไป หม้อแปลงที่สามารถปรับแท็ปได้นั้น จะมีอัตราส่วนของจำนวนรอบขดลวดแบบไม่ปกติ (Off-nominal turn ratio) ซึ่งเราสามารถพิจารณาให้เป็นหม้อแปลงที่สามารถปรับแท็ปได้เชิงอุดมคติได้ โดยมีอัตราส่วนของแท็ปเป็น $a_{pq} : 1$ [21] ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แบบจำลองหม้อแปลงที่สามารถปรับแท็ปได้

โดยที่แท็ปหม้อแปลง a_{pq} นั้น มีค่าเป็นจำนวนจริง และเมื่อพิจารณาจากแบบจำลองหม้อแปลงที่สามารถปรับแท็ปได้นั้น เราสามารถเปลี่ยนแบบจำลองหม้อแปลงที่สามารถปรับแท็ปได้ให้อยู่ในรูปแบบวงจรสมมูลแบบ π ได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรสมมูลแบบ π ของหม้อแปลงที่สามารถปรับแท็ปได้

จากวงจรสมมูลแบบ π ของหม้อแปลงที่สามารถปรับแท็ปได้นั้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ฉีดเข้าบัส กับแรงดันที่บัส ได้ดังสมการที่ (3.39)

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_{pq}}{a_{pq}^2} & -\frac{y_{pq}}{a_{pq}} \\ -\frac{y_{pq}}{a_{pq}} & y_{pq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_q \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจริงที่ฉีดเข้าที่บัสที่เชื่อมระหว่างหม้อแปลงที่สามารถปรับแท็ปได้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.40)- (3.41)

$$\begin{aligned} P_p &= V_p^2 G_{pp} + \sum_{k \neq q} V_p V_k (G_{pk} \cos(\delta_p - \delta_k) + B_{pk} \sin(\delta_p - \delta_k)) \\ &\quad + V_p V_q (G_{pq} \cos(\delta_p - \delta_q) + B_{pq} \sin(\delta_p - \delta_q)) \end{aligned} \quad (3.40)$$

$$\begin{aligned} P_q &= V_q^2 G_{qq} + \sum_{k \neq p} V_q V_k (G_{qk} \cos(\delta_q - \delta_k) + B_{qk} \sin(\delta_q - \delta_k)) \\ &\quad + V_q V_p (G_{qp} \cos(\delta_q - \delta_p) + B_{qp} \sin(\delta_q - \delta_p)) \end{aligned} \quad (3.41)$$

และกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่ฉีดเข้าที่บัสที่เชื่อมระหว่างหม้อแปลงที่สามารถปรับแท็ปได้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.42)- (3.43)

$$\begin{aligned} Q_p &= -V_p^2 B_{pp} + \sum_{k \neq q} V_p V_k (G_{pk} \sin(\delta_p - \delta_k) - B_{pk} \cos(\delta_p - \delta_k)) \\ &\quad + V_p V_q (G_{pq} \sin(\delta_p - \delta_q) - B_{pq} \cos(\delta_p - \delta_q)) \end{aligned} \quad (3.42)$$

$$\begin{aligned} Q_q &= -V_q^2 B_{qq} + \sum_{k \neq p} V_q V_k (G_{qk} \sin(\delta_q - \delta_k) - B_{qk} \cos(\delta_q - \delta_k)) \\ &\quad + V_q V_p (G_{qp} \sin(\delta_q - \delta_p) - B_{qp} \cos(\delta_q - \delta_p)) \end{aligned} \quad (3.43)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} G_{pp} &= G'_{pp} + \frac{g_{pq}}{a_{pq}^2} \\ B_{pp} &= B'_{pp} + \frac{b_{pq}}{a_{pq}^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_{pq} &= -\frac{g_{pq}}{a_{pq}} \\ B_{pq} &= -\frac{b_{pq}}{a_{pq}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_{qp} &= -\frac{g_{qp}}{a_{pq}} \\ B_{qp} &= -\frac{b_{qp}}{a_{pq}} \end{aligned}$$

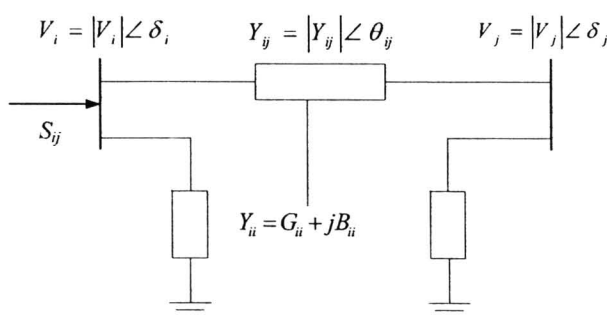
$$\begin{aligned} G_{qq} &= g_{qp} \\ B_{qq} &= b_{qp} \end{aligned}$$

3.9 การประมาณฟังก์ชันแบบเชิงเส้น

การประมาณเชิงเส้นคือ การประมาณระบบที่มีความสัมพันธ์กันแบบไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นระบบที่มีความสัมพันธ์แบบเป็นเชิงเส้น หลักการของการประมาณเชิงเส้นมาจากการประยุกต์ใช้ออนุกรมเทเลอร์ซึ่งเป็นการหาค่าการเปลี่ยนแปลงรอบจุดทำงานตั้งต้น การประมาณฟังก์ชันแบบเชิงเส้นสามารถช่วยให้การแก้ปัญหาค่าขีดสุดทำได้รวดเร็วขึ้น โดยเราจะทำการประมาณการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยค่าน้อยๆแล้วอาศัยการทำซ้ำหลายๆรอบเพื่อให้ได้คำตอบที่แม่นยำมากขึ้น [21], [23], [24] เมื่อพิจารณาปัญหาค่าขีดสุดจากสมการที่ (3.30) และเงื่อนไขบังคับต่างๆจากสมการที่ (3.31)-(3.38) พบว่า ฟังก์ชันที่สามารถใช้การประมาณแบบเชิงเส้นได้ คือ ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าปรากฏในสายส่ง ฟังก์ชันแรงดันที่บัส และฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมทั้งระบบ ด้วยการประมาณฟังก์ชันเหล่านี้ให้อยู่ในรูปพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้ากำลังที่เราต้องทำการปรับค่า นั่นคือ ปริมาณกำลังการผลิตที่ต้องการปรับเพิ่มหรือลดกำลังการผลิต ปริมาณโหลดที่ต้องถูกตัดออกจากระบบ และแท็ปหม้อแปลงที่ต้องปรับ ซึ่งการประมาณแบบเชิงเส้นของฟังก์ชันเหล่านี้สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

3.9.1 การประมาณเชิงเส้นของกำลังไฟฟ้าปรากฏในสายส่ง

กำลังไฟฟ้าปรากฏในสายส่งในรูปที่ 3.13 นั้นมีความสัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่ไหลในสายส่งดังสมการที่ (3.44) ซึ่งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟนี้ มีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าที่บัสต้นทางและบัสปลายทางดังสมการที่ (3.45) และ (3.46) ตามลำดับ



รูปที่ 3.13 กำลังไฟฟ้าปรากฏในสายส่ง

$$S_{ij} = \sqrt{p_{ij}^2 + q_{ij}^2} \quad (3.44)$$

โดยที่ $p_{ij} = |V_i|^2 |y_{ij}| \cos \theta_{ij} + G_{ii} |V_i|^2 - |V_i| |V_j| |y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$ (3.45)

$$q_{ij} = -|V_i|^2 |y_{ij}| \sin \theta_{ij} - B_{ii} |V_i|^2 - |V_i| |V_j| |y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (3.46)$$

การประมาณเชิงเส้นของกำลังไฟฟ้าปรากฏในสายส่งเมื่อเทียบกับขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้า สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.47), (3.50), (3.53) และ (3.56) ตามลำดับ

$$\frac{\partial S_{ij}}{\partial \delta_i} = \frac{1}{S_{ij}} \left(p_{ij} \frac{\partial p_{ij}}{\partial \delta_i} + q_{ij} \frac{\partial q_{ij}}{\partial \delta_i} \right) \quad (3.47)$$

โดยที่ $\frac{\partial p_{ij}}{\partial \delta_i} = |V_i||V_j||y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$ (3.48)

$$\frac{\partial q_{ij}}{\partial \delta_i} = -|V_i||V_j||y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (3.49)$$

$$\frac{\partial S_{ij}}{\partial \delta_j} = \frac{1}{S_{ij}} \left(p_{ij} \frac{\partial p_{ij}}{\partial \delta_j} + q_{ij} \frac{\partial q_{ij}}{\partial \delta_j} \right) \quad (3.50)$$

โดยที่ $\frac{\partial p_{ij}}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$ (3.51)

$$\frac{\partial q_{ij}}{\partial \delta_j} = |V_i||V_j||y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (3.52)$$

$$\frac{\partial S_{ij}}{\partial |V_i|} = \frac{1}{S_{ij}} \left(p_{ij} \frac{\partial p_{ij}}{\partial |V_i|} + q_{ij} \frac{\partial q_{ij}}{\partial |V_i|} \right) \quad (3.53)$$

โดยที่ $\frac{\partial p_{ij}}{\partial |V_i|} = 2|V_i|(|y_{ij}| \cos \theta_{ij} + G_{ii}) - |V_j||y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$ (3.54)

$$\frac{\partial q_{ij}}{\partial |V_i|} = -2|V_i|(|y_{ij}| \sin \theta_{ij} + B_{ii}) - |V_j||y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (3.55)$$

$$\frac{\partial S_{ij}}{\partial |V_j|} = \frac{1}{S_{ij}} \left(p_{ij} \frac{\partial p_{ij}}{\partial |V_j|} + q_{ij} \frac{\partial q_{ij}}{\partial |V_j|} \right) \quad (3.56)$$

โดยที่ $\frac{\partial p_{ij}}{\partial |V_j|} = -|V_i||y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$ (3.57)

$$\frac{\partial q_{ij}}{\partial |V_j|} = -|V_i||y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (3.58)$$

จากการศึกษางานวิจัยในอดีต [21] พบว่า การปรับแก้ป้อนแปลงนั้นมีผลต่อการไหลกำลังไฟฟ้าปรากฏในสายส่งน้อยมาก ซึ่งการแก้ปัญหาค่าขีดสุดในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่ นั้นควรที่จะคำนวณเฉพาะตัวแปรที่มีผลกับระบบและละเลยตัวแปรที่มีผลน้อยกับระบบ เพื่อให้คำตอบที่ได้นั้นมีค่าถูกต้อง ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้จะไม่ใช้การประมาณเชิงเส้นของกำลังไฟฟ้าปรากฏในสายส่งโดยเทียบกับแก้ป้อนแปลง

การประมาณเชิงเส้นของกำลังไฟฟ้าปรากฏในสายส่งในสมการที่ (3.47), (3.50), (3.53), และ (3.56) สามารถเขียนในรูปเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ (3.59) โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์

ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกำลังปรากฏกับการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโหลดที่ต้องถูกตัดออกจากระบบ และการปรับแก้หม้อแปลง ได้ดังนี้

$$[\Delta S_{ij}] = \left[\frac{\partial S_{ij}}{\partial \delta} \quad \frac{\partial S_{ij}}{\partial |V|} \right] \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta |V_i| \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

$$= \left[\frac{\partial S_{ij}}{\partial \delta} \quad \frac{\partial S_{ij}}{\partial |V|} \right] \begin{bmatrix} J_a & J_b \\ J_c & J_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

$$= [T_p][\Delta P_i] + [T_q][\Delta Q_i] \quad (3.61)$$

$$= [T_p][\Delta P_i^{G+} - \Delta P_i^{G-} - \Delta P_L] + [T_q][\Delta Q_G - \Delta Q_L] \quad (3.62)$$

$$= [T_p][\Delta P_i^{G+} - \Delta P_i^{G-} - \Delta P_L] + [T_q][0 - [\alpha]\Delta P_L]^* \quad (3.63)$$

$$= [T_p][\Delta P_i^{G+}] - [T_p][\Delta P_i^{G-}] - [T_p] + [T_q][\alpha] [\Delta P_L] \quad (3.64)$$

$$= [T_{G+}][\Delta P_i^{G+}] + [T_{G-}][\Delta P_i^{G-}] + [T_L][\Delta P_L] \quad (3.65)$$

*หมายเหตุ กำหนดให้กำลังรีแอกทีฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไม่มีผลกับ ΔS_{ij} ดังนั้น $\Delta Q_G \approx 0$ และการตัดโหลดกำหนดให้ตัดโหลดด้วยตัวประกอบกำลังคงที่ ดังนั้น $\Delta Q_L = [\alpha]\Delta P_L$

3.9.2 การประมาณเชิงเส้นของแรงดันที่บัส

เมื่อพิจารณาสมการการไหลกำลังไฟฟ้าในสมการที่ (3.26) สามารถประมาณเชิงเส้นของแรงดันที่บัสได้ในรูปเมตริกซ์จาโคเบียนแต่การประมาณเชิงเส้นนี้ยังไม่ได้คำนึงถึงผลที่ได้จากการปรับแก้หม้อแปลง ดังนั้นการประมาณเชิงเส้นของแรงดันที่บัสในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงการประมาณเชิงเส้นของแรงดันที่บัสได้ในรูปเมตริกซ์จาโคเบียนพร้อมกับพิจารณาผลจากการปรับแก้หม้อแปลงร่วมด้วย ซึ่งการประมาณเชิงเส้นสมการกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟเมื่อเทียบกับแก้หม้อแปลง สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\frac{\partial P_p}{\partial a_{pq}} = V_p^2 \left(-\frac{2g_{pq}}{a_{pq}^3} \right) + V_p V_q \left(\frac{g_{pq}}{a_{pq}^2} \cos(\delta_p - \delta_q) + \frac{b_{pq}}{a_{pq}^2} \sin(\delta_p - \delta_q) \right) \quad (3.66)$$

$$\frac{\partial P_q}{\partial a_{pq}} = V_p V_q \left(\frac{g_{pq}}{a_{pq}^2} \cos(\delta_q - \delta_p) + \frac{b_{pq}}{a_{pq}^2} \sin(\delta_q - \delta_p) \right) \quad (3.67)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial a_{pq}} = 0 \quad (3.68)$$

$$\frac{\partial Q_p}{\partial a_{pq}} = V_p^2 \left(\frac{2b_{pq}}{a_{pq}^3} \right) + V_p V_q \left(\frac{g_{pq}}{a_{pq}^2} \sin(\delta_p - \delta_q) - \frac{b_{pq}}{a_{pq}^2} \cos(\delta_p - \delta_q) \right) \quad (3.69)$$

$$\frac{\partial Q_q}{\partial a_{pq}} = V_p V_q \left(\frac{g_{pq}}{a_{pq}^2} \sin(\delta_q - \delta_p) + \frac{b_{pq}}{a_{pq}^2} \cos(\delta_q - \delta_p) \right) \quad (3.70)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial a_{pq}} = 0 \quad (3.71)$$

เมื่อพิจารณาในระบบไฟฟ้าที่มีขนาด N บัส สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ฉีดเข้าบัสกับมุมเฟสและขนาดแรงดันที่บัส ร่วมกับแท็บหม้อแปลง ได้ดังสมการที่ (3.72)

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta |V_i| \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial a_{ij}} & \frac{\partial Q_i}{\partial a_{ij}} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Delta a_{ij} \end{bmatrix} \quad (3.72)$$

จัดรูปแบบสมการให้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสและขนาดแรงดันที่บัสกับกำลังที่ฉีดเข้าบัสและแท็บหม้อแปลง ได้ดังสมการที่ (3.73)

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta |V_i| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_a & J_b \\ J_c & J_d \end{bmatrix} \left[\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial a_{ij}} & \frac{\partial Q_i}{\partial a_{ij}} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Delta a_{ij} \end{bmatrix} \right] \quad (3.73)$$

และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่บัสกับการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโหลดที่ต้องถูกตัดออกจากระบบ และการปรับแท็บหม้อแปลง ได้ดังสมการที่ (3.74)

$$\begin{bmatrix} \Delta |V_i| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_c & J_d \end{bmatrix} \left[\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial a_{ij}} & \frac{\partial Q_i}{\partial a_{ij}} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Delta a_{ij} \end{bmatrix} \right] \quad (3.74)$$

$$= [N_p] \Delta P_i + [N_q] \Delta Q_i - [N_a] \Delta a_{ij} \quad (3.75)$$

$$= [N_p] [\Delta P_i^{G+} - \Delta P_i^{G-} - \Delta P_L] + [N_q] [\Delta Q_G - \Delta Q_L] - [N_a] \Delta a_{ij} \quad (3.76)$$

$$= [N_p] [\Delta P_i^{G+} - \Delta P_i^{G-} - \Delta P_L] + [N_q] [0 - [\alpha] \Delta P_L] - [N_a] \Delta a_{ij} \quad (3.77)$$

$$= [N_p] [\Delta P_i^{G+}] - [N_p] [\Delta P_i^{G-}] - [N_p] [\alpha] \Delta P_L - [N_a] \Delta a_{ij} \quad (3.78)$$

$$= [N_{G+}] \Delta P_i^{G+} + [N_{G-}] \Delta P_i^{G-} + [N_L] \Delta P_L + [N_a] \Delta a_{ij} \quad (3.79)$$

*หมายเหตุ กำหนดให้กำลังรีแอคทีฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไม่มีผลกับ $\Delta |V_i|$ ดังนั้น $\Delta Q_G \approx 0$ และการตัดโหลดกำหนดให้ตัดโหลดด้วยตัวประกอบกำลังคงที่ ดังนั้น $\Delta Q_L = [\alpha] \Delta P_L$



3.9.3 การประมาณเชิงเส้นของกำลังไฟฟ้าสูญเสีย

วิธีการคำนวณหา กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น มีหลากหลายวิธีที่สามารถคำนวณหาได้ วิธีการหนึ่งที่นิยมใช้คือการคำนวณหา กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากผลรวมกำลังไฟฟ้าจริงที่ฉีดเข้าที่บัส ดังสมการที่ (3.80)

$$P_{ls} = \sum_{i=1}^N P_i = P_1 + P_2 + \dots + P_N \quad (3.80)$$

กำลังไฟฟ้าจริงที่ฉีดเข้าที่บัสนั้นจะเขียนให้อยู่ในรูปขนาดและมุมเฟสของแรงดันที่บัสเหมือนในสมการที่ (3.10) ดังนั้นการประมาณเชิงเส้นของกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยทั่วไปจะประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียเทียบกับขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าเท่านั้น แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้วิธีการประมาณเชิงเส้นของกำลังไฟฟ้าสูญเสียเทียบกับขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าพร้อมกับพิจารณาผลจากการปรับแก้ปห้มอแปลงร่วมด้วย

การประมาณเชิงเส้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียเทียบกับมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.81) โดยที่อนุพันธ์ย่อยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.16), (3.17)

$$\frac{\partial P_{ls}}{\partial \delta_k} = \frac{\partial P_1}{\partial \delta_k} + \frac{\partial P_2}{\partial \delta_k} + \dots + \frac{\partial P_N}{\partial \delta_k} \quad (3.81)$$

การประมาณเชิงเส้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียเทียบกับขนาดแรงดันไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.82) โดยที่อนุพันธ์ย่อยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.18), (3.19)

$$\frac{\partial P_{ls}}{\partial |V_k|} = \frac{\partial P_1}{\partial |V_k|} + \frac{\partial P_2}{\partial |V_k|} + \dots + \frac{\partial P_N}{\partial |V_k|} \quad (3.82)$$

การประมาณเชิงเส้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียเทียบกับแท็ปหม้อแปลงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.83) โดยที่อนุพันธ์ย่อยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.66)-(3.78)

$$\frac{\partial P_{ls}}{\partial a_{ij}} = \frac{\partial P_1}{\partial a_{ij}} + \frac{\partial P_2}{\partial a_{ij}} + \dots + \frac{\partial P_N}{\partial a_{ij}} \quad (3.83)$$

จากการประมาณเชิงเส้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียเทียบกับมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้า ขนาดแรงดันไฟฟ้า และแท็ปหม้อแปลง สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\Delta P_{ls} = \left[\sum_{i=1}^N \frac{\partial P_i}{\partial \delta_k} \quad \sum_{i=1}^N \frac{\partial P_i}{\partial |V_k|} \quad \sum_{i=1}^{NT} \frac{\partial P_i}{\partial a_{ij}} \right] \begin{bmatrix} \Delta \delta_k \\ \Delta |V_k| \\ \Delta a_{ij} \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูญเสียกับการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโหลดที่ต้องถูกตัดออกจากระบบ และการปรับแก้หม้อแปลงได้ ดังสมการที่ (3.85)

$$\Delta P_{ls} = \left[\sum_{i=1}^N \frac{\partial P_i}{\partial \delta_k} \quad \sum_{i=1}^N \frac{\partial P_i}{\partial |V_k|} \right] [\Delta \delta_k] + \left[\sum_{i=1}^{NT} \frac{\partial P_i}{\partial a_{ij}} \right] [\Delta a_{ij}] \quad (3.85)$$

$$= \left[\sum_{i=1}^N \frac{\partial P_i}{\partial \delta_k} \quad \sum_{i=1}^N \frac{\partial P_i}{\partial |V_k|} \right] \begin{bmatrix} J_a & J_b \\ J_c & J_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix} + \left[\sum_{i=1}^{NT} \frac{\partial P_i}{\partial a_{ij}} \right] [\Delta a_{ij}] \quad (3.86)$$

$$= [M_p][\Delta P_k] + [M_q][\Delta Q_k] + [M_a][\Delta a_{ij}] \quad (3.87)$$

$$= [M_p][\Delta P_i^{G+} - \Delta P_i^{G-} - \Delta P_L] + [M_q][\Delta Q_G - \Delta Q_L] + [M_a][\Delta a_{ij}] \quad (3.88)$$

$$= [M_p][\Delta P_i^{G+} - \Delta P_i^{G-} - \Delta P_L] + [M_q][0 - [\alpha]\Delta P_L] + [M_a][\Delta a_{ij}] \quad (3.89)$$

$$= [M_p][\Delta P_i^{G+}] - [M_p][\Delta P_i^{G-}] - [M_p + [M_q][\alpha]][\Delta P_L] + [M_a][\Delta a_{ij}] \quad (3.90)$$

$$= [M_{G+}][\Delta P_i^{G+}] + [M_{G-}][\Delta P_i^{G-}] + [M_L][\Delta P_L] + [M_A][\Delta a_{ij}] \quad (3.91)$$

*หมายเหตุ กำหนดให้กำลังรีแอกทีฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไม่มีผลกับ ΔP_{ls} ดังนั้น $\Delta Q_G \approx 0$ และการตัดโหลดกำหนดให้ตัดโหลดด้วยตัวประกอบกำลังคงที่ ดังนั้น $\Delta Q_L = [\alpha]\Delta P_L$

3.9.4 การจัดรูปของการประมาณเชิงเส้นเพื่อแก้ปัญหาค่าขีดสุด

จากการประมาณเชิงเส้นของทั้ง 3 ฟังก์ชัน ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น คือ 1.ฟังก์ชัน กำลังไฟฟ้าปรากฏในสายส่ง 2.ฟังก์ชันแรงดันที่บัส และ 3.ฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมทั้งระบบ ซึ่งฟังก์ชันเหล่านี้ถูกประมาณให้อยู่ในรูปพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้ากำลังที่เราต้องทำการปรับค่านั้นคือ ปริมาณกำลังการผลิตที่ต้องการปรับเพิ่มหรือลดกำลังการผลิต ปริมาณโหลดที่ต้องถูกตัดออกจากระบบ และแก้หม้อแปลงที่ต้องปรับ จากฟังก์ชันเป้าหมาย (3.30) และฟังก์ชันเงื่อนไข (3.31)-(3.38) ที่ได้ประมาณเชิงเส้นดังสมการที่ (3.65), (3.79) และ (3.91) สามารถนำมาจัดให้อยู่ในรูปฟังก์ชันอย่างง่ายสำหรับการนำไปใช้แก้ปัญหาค่าขีดสุดได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Min } z = [C^{G+} \ C^{G-} \ C_L \ 0][X] + [X]^T \text{diag}([0 \ 0 \ 0 \ w_a])[X] \quad (3.92)$$

s.t.

$$[1 - M_{G+} \ -1 - M_{G-} \ 1 - M_L \ -M_A][X] = [P_L] + [P_{Ls}^0] - [P^{G_0}] \quad (3.93)$$

$$[T_{G+} \ T_{G-} \ T_L \ 0][X] \leq [\Delta S_{ij}^{limit}] \quad (3.94)$$

$$[\Delta V_i^{min}] \leq [N_{G+} \ N_{G-} \ N_L \ N_A][X] \leq [\Delta V_i^{max}] \quad (3.95)$$

$$[1 \ 0 \ 0 \ 0][X] \leq [\Delta P_{limit}^{G+}] \quad (3.96)$$

$$[0 \ 1 \ 0 \ 0][X] \leq [\Delta P_{limit}^{G-}] \quad (3.97)$$

$$[\Delta a_{ij}^{min}] \leq [0 \ 0 \ 0 \ 1][X] \leq [\Delta a_{ij}^{max}] \quad (3.98)$$

$$[0 \ 0 \ 1 \ 0][X] \leq [\Delta P_L^{max}] \quad (3.99)$$

$$[X] = [\Delta P^{G+} \ \Delta P^{G-} \ \Delta P_L \ \Delta a]^T \quad (3.100)$$

โดยที่	C^{G+}	คือ	เมทริกซ์ของ C_i^{G+}
	C^{G-}	คือ	เมทริกซ์ของ C_i^{G-}
	C_L	คือ	เมทริกซ์ของ $C_{L,i}$
	P^{G+}	คือ	เมทริกซ์ของ P^{G+}
	ΔP^{G-}	คือ	เมทริกซ์ของ ΔP^{G-}
	ΔP_L	คือ	เมทริกซ์ของ ΔP_L
	Δa	คือ	เมทริกซ์ของ Δa_t
	P_L	คือ	เมทริกซ์ผลรวมของ $P_{L,i}$
	P^{G_0}	คือ	เมทริกซ์ผลรวมของ $P_i^{G_0}$
	$T_{G+}, \ T_{G-}, \ T_L$	คือ	เมทริกซ์สัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าปรากฏในสายส่งกับการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในระบบ

N_{G+} , N_{G-} , N_L , N_A คือ เมทริกซ์สัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันที่บัสกับการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในระบบ

M_{G+} , M_{G-} , M_L , M_A คือ เมทริกซ์สัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบกับการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในระบบ

3.10 การคำนวณค่าดัชนีความเชื่อถือได้

ดัชนีความเชื่อถือได้เป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อที่จะสามารถระบุได้ว่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังนั้นเป็นอย่างไร มีความเชื่อถือได้มากน้อยแค่ไหน ทำให้สามารถเปรียบเทียบกับระหว่างระบบต่างๆได้ ทำให้สามารถตั้งเป้าหมายที่จะปรับปรุงดัชนีความเชื่อถือได้ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และดำเนินการให้เป็นไปตามเป้าหมายได้ ดัชนีความเชื่อถือได้ที่สำคัญต่างๆ เช่น LOLP, LOLF, LOLD, SAIFI, SAIDI, EPNS, EENS และ EIC เป็นต้น โดยที่ดัชนีความเชื่อถือได้เหล่านี้จะถูกคำนวณในแต่ละรอบของการจำลองเหตุการณ์ ซึ่งในการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลนั้นสามารถคำนวณดัชนีต่างๆเหล่านี้ได้ จากนิยามดังต่อไปนี้ [1], [15], [20], [21]

-LOLP (Loss Of Load Probability) คือ ดัชนีที่แสดงถึงความเป็นที่ระบบอยู่ในสถานะเสีย

$$LOLP = \frac{\text{ระยะเวลาทั้งหมดที่ระบบอยู่ในสถานะเสียในการจำลองเหตุการณ์}}{\text{ระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์}} \tag{3.101}$$

-LOLF (Loss Of Load Frequency) คือ ดัชนีที่แสดงถึงความถี่ที่ระบบเกิดการเปลี่ยนสถานะจากดีไปสถานะเสีย มีหน่วยเป็น ครั้งต่อปี

$$LOLF = \frac{\text{จำนวนครั้งทั้งหมดที่ระบบเปลี่ยนจากสถานะดีไปสถานะเสียในการจำลองเหตุการณ์}}{\text{ระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์}} \tag{3.102}$$

-LOLD (Loss Of Load Duration) คือ ดัชนีที่แสดงถึงระยะเวลาที่ระบบอยู่ในสถานะเสียแต่ละครั้ง มีหน่วยเป็น ชั่วโมงต่อปี

$$LOLD = \frac{\text{ระยะเวลาทั้งหมดที่ระบบอยู่ในสถานะเสียในการจำลองเหตุการณ์}}{\text{จำนวนครั้งทั้งหมดที่ระบบเปลี่ยนจากสถานะดีไปสถานะเสีย}} \tag{3.103}$$

-SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) คือ ดัชนีที่แสดงถึงความถี่ที่ระบบอยู่ในสถานะเสียต่อจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ย มีหน่วยเป็น ครั้งต่อปีต่อราย

$$SAIFI = \frac{\text{จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ไม่ได้รับการจ่ายไฟฟ้า}}{\text{จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมด}} \tag{3.104}$$

-SAIDI (System Average Interruption Duration Index) คือ ดัชนีที่แสดงถึงระยะเวลาที่ระบบอยู่ในสถานะเสียต่อจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ย มีหน่วยเป็น ชั่วโมงต่อปีต่อราย

$$SAIDI = \frac{\text{จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ไม่ได้รับการจ่ายไฟฟ้า} \times \text{ระยะเวลาในสถานะนั้น}}{\text{จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมด}} \tag{3.105}$$

-EPNS (Expected Power Not Supplied) คือ ดัชนีที่แสดงถึงปริมาณโหลดที่คาดว่าจะไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า มีหน่วยเป็น MW

$$EPNS = \frac{\text{โหลดที่ไม่ได้รับการจ่าย} \times \text{ระยะเวลาในสถานะนั้น}}{\text{ระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์}} \tag{3.106}$$

-EENS (Expected Energy Not Supplied) คือ ดัชนีที่แสดงถึงปริมาณโหลดที่คาดว่าจะไม่ได้รับการจ่ายพลังงานไฟฟ้า มีหน่วยเป็น MWh/yr

$$EENS = EPNS \times 8760 \tag{3.107}$$

-EIC (Expected Interruption Cost) คือ ดัชนีที่แสดงถึงความสูญเสียของโหลดที่คาดว่าจะไม่ได้รับการจ่ายพลังงานไฟฟ้า มีหน่วยเป็น บาทต่อปี

$$EIC = IEAR \times EENS \tag{3.108}$$

โดยที่ *IEAR* คือ อัตราความสูญเสียของโหลดที่คาดว่าจะไม่ได้รับการจ่ายพลังงานไฟฟ้า (Interrupted Energy Assessment Rate) มีหน่วยเป็น บาท/MWh

โดยที่ดัชนี LOLP, LOLE, LOLD, SAIFI, SAIDI และ EPNS จะเป็นดัชนีที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป ส่วนดัชนี EENS และ EIC เป็นดัชนีที่คำนวณได้จากดัชนี EPNS โดยตรง ดังนั้น ดัชนี EENS และ EIC จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ เพื่อเป็นการลดขั้นตอนการคำนวณซ้ำซ้อน

3.11 เกณฑ์การหยุดคำนวณ (Stopping Criteria)

การวิเคราะห์หาจำนวนรอบของการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานนั้นจะอาศัยกฎการหยุดการจำลองเหตุการณ์ (Stopping rule) ซึ่งโดยทั่วไปมีเกณฑ์ที่ใช้ในการกำหนดจำนวนรอบการจำลองเหตุการณ์อยู่สองแบบ [1] คือ

1) การกำหนดจำนวนรอบสูงสุดในการจำลองเหตุการณ์ไว้ที่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง (Pre-specified number of trials) ซึ่งมีข้อเสีย คือ หากเราไม่เข้าใจระบบและพฤติกรรมของระบบที่ใช้ทำการจำลองเหตุการณ์อย่างดีพอ ก็จะส่งผลต่อความแม่นยำของผลลัพธ์

2) การกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดของดัชนีไว้ที่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง (Pre-specified precision) เป็นวิธีที่อาศัยหลักการทดสอบทางสถิติ ด้วยการตั้งค่าของระดับความแม่นยำ (Degree of precision) หรือตั้งช่วงความเชื่อมั่น (Confidence interval) แทน โดยจะทำการคำนวณหาคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ในแต่ละรอบการจำลองเหตุการณ์ ซึ่งจะทำให้การจำลองเหตุการณ์จนค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ที่คำนวณได้ต่ำกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุด จึงหยุดการคำนวณ

ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีการการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดของดัชนีไว้ที่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์แสดงไว้ในสมการที่ (3.109)

$$r = \frac{S}{\hat{x}\sqrt{n}}$$

(3.109)

โดยที่	r	คือ	ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative Uncertainty)
	S	คือ	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของดัชนี
	$\hat{x}$	คือ	ค่าเฉลี่ยของดัชนี
	n	คือ	จำนวนครั้งของการสุ่ม

3.12 ขั้นตอนการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล

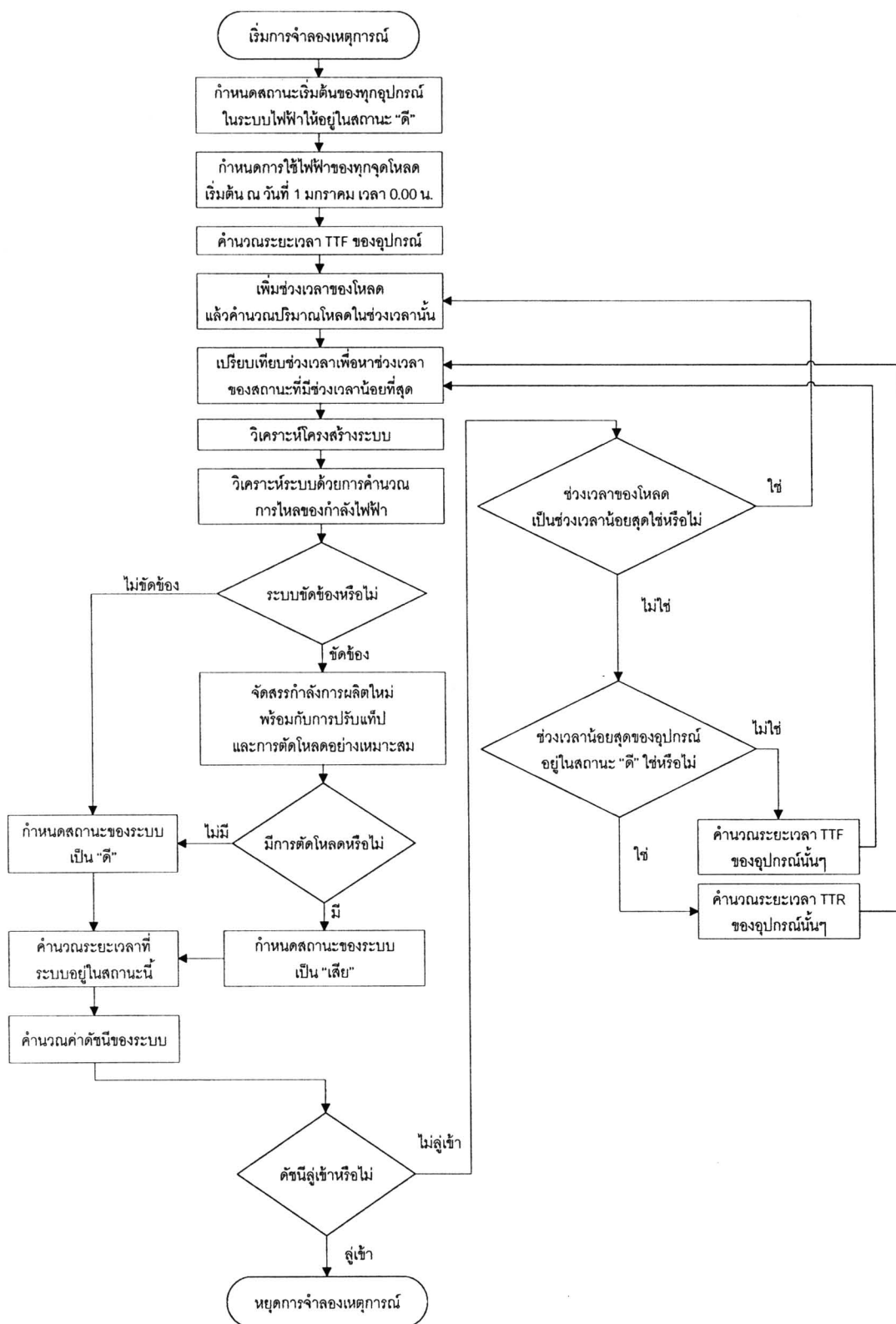
การประเมินความเชื่อถือได้ด้วยการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลนั้น จะใช้สุ่มสถานะของอุปกรณ์ต่างๆในระบบ จากนั้นจะทำการวิเคราะห์หาสถานะของระบบ แล้วคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบและทำการกระบวนการเหล่านี้ซ้ำๆ จนกระทั่งผลตอบลู่อเข้า ซึ่งมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. อ่านข้อมูลระบบ
2. กำหนดสถานะเริ่มต้นของทุกอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า ให้อยู่ในสถานะ “ดี”
3. กำหนดการใช้ไฟฟ้าของทุกจุดโหลด ให้เริ่มต้น ณ วันที่ 1 มกราคม เวลา 0.00 น.

4. สุ่มการเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์ ด้วยการคำนวณหา TTF
5. เพิ่มช่วงเวลาของโหลด แล้วคำนวณปริมาณโหลดโดยคำนึงถึงความไม่แน่นอนของโหลดในช่วงเวลานั้นๆ
6. เปรียบเทียบช่วงเวลา เพื่อหาช่วงเวลาของสถานะที่มีช่วงเวลาน้อยที่สุด ในกรณีช่วงเวลาของโหลดเท่ากับช่วงเวลาของอุปกรณ์ กำหนดให้ช่วงเวลาน้อยสุดเป็นช่วงเวลาของอุปกรณ์
7. วิเคราะห์โครงสร้างระบบ
8. วิเคราะห์สถานะของระบบ ด้วยการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า
9. พิจารณาว่า ระบบเกิดเหตุขัดข้องหรือไม่ ถ้าระบบไม่เกิดเหตุขัดข้อง จะกำหนดสถานะของระบบเป็น “ดี” ให้ข้ามไปทำตามขั้นตอนที่ 11 แต่ถ้าระบบเกิดเหตุขัดข้อง ให้แก้ปัญหาด้วยการจัดสรรกำลังการผลิตพร้อมกับการปรับแก้หม้อแปลงและตัดโหลดอย่างเหมาะสม ให้ทำตามขั้นตอนถัดไป
10. พิจารณาว่า แก้ปัญหาด้วยการจัดสรรกำลังการผลิตพร้อมกับการปรับแก้หม้อแปลงโดยมีการตัดโหลดหรือไม่ ถ้าไม่มีการตัดโหลด จะกำหนดสถานะของระบบเป็น “ดี” แต่ถ้ามีการตัดโหลด จะกำหนดสถานะของระบบเป็น “เสีย”
11. คำนวณระยะเวลาที่ระบบอยู่ในสถานะนี้
12. คำนวณค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบ
13. คำนวณความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของดัชนี
14. พิจารณาว่า ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของดัชนีมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่ ถ้าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของดัชนีมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ให้ทำตามขั้นตอนถัดไป แต่ถ้าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของดัชนีมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ให้หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ
15. พิจารณาว่า ช่วงเวลาของสถานะที่มีช่วงเวลาน้อยที่สุดนั้นเป็นช่วงเวลาของโหลดหรือช่วงเวลาของอุปกรณ์ ถ้าช่วงเวลาน้อยที่สุดนั้นเป็นช่วงเวลาของโหลด ให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 5 แต่ถ้าช่วงเวลาน้อยที่สุดนั้นเป็นช่วงเวลาของอุปกรณ์ ให้ทำตามขั้นตอนถัดไป
16. พิจารณาว่า สถานะของอุปกรณ์ที่อยู่ในช่วงเวลาน้อยที่สุดนั้นอยู่ในสถานะใด ถ้าสถานะของอุปกรณ์อยู่ในสถานะดี ให้คำนวณหา TTF แต่สถานะของอุปกรณ์อยู่ในสถานะเสีย ให้คำนวณหา TTR แล้วให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 6

ขั้นตอนดังกล่าวสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.14





รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการจำลองเหตุการณ์ด้วยวิธีมอนติคาร์โลแบบสุ่มช่วงเวลาการทำงาน