

### บทที่ 3

#### การประเมินความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่

แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังอาจมีลักษณะแตกต่างกันดังที่นำเสนอไว้ในหัวข้อ 2.6 แบบจำลองต่าง ๆ เหล่านี้ล้วนแล้วแต่มีผลต่อค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบ ดังนั้นการเลือกใช้แบบจำลองที่เหมาะสมแก่อุปกรณ์ต่าง ๆ จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรพิจารณา ในบทนี้จะนำเสนอการเลือกใช้แบบจำลองที่เหมาะสมกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ก่อน จากนั้นจะจึงนำเสนอ การประเมินความเชื่อถือได้ด้วยวิธีระบุเหตุขัดข้องที่มีการพิจารณาตรวจสอบเหตุขัดข้องก่อนทำการทดสอบต่อไป

#### 3.1 แบบจำลองของอุปกรณ์ที่ใช้ในการประเมินดัชนีความเชื่อถือได้

เนื่องจากอุปกรณ์ย่อยของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่ง และหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นการเลือกแบบจำลองสำหรับอุปกรณ์ย่อยแต่ละชนิด หรือกลุ่มของอุปกรณ์ย่อยที่มีผลเกี่ยวเนื่องกันในขณะเกิดเหตุขัดข้องขึ้นนั้น เราสามารถพิจารณาเลือกใช้ได้ตามคำอธิบายที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.6 ซึ่งตามปกติแล้วในการคำนวณหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ จะกำหนดให้แบบจำลองของอุปกรณ์ย่อยต่าง ๆ ในระบบเป็น 2 สถานะ คือ สถานะดี (Up state) และสถานะเสีย (Down state) [9]

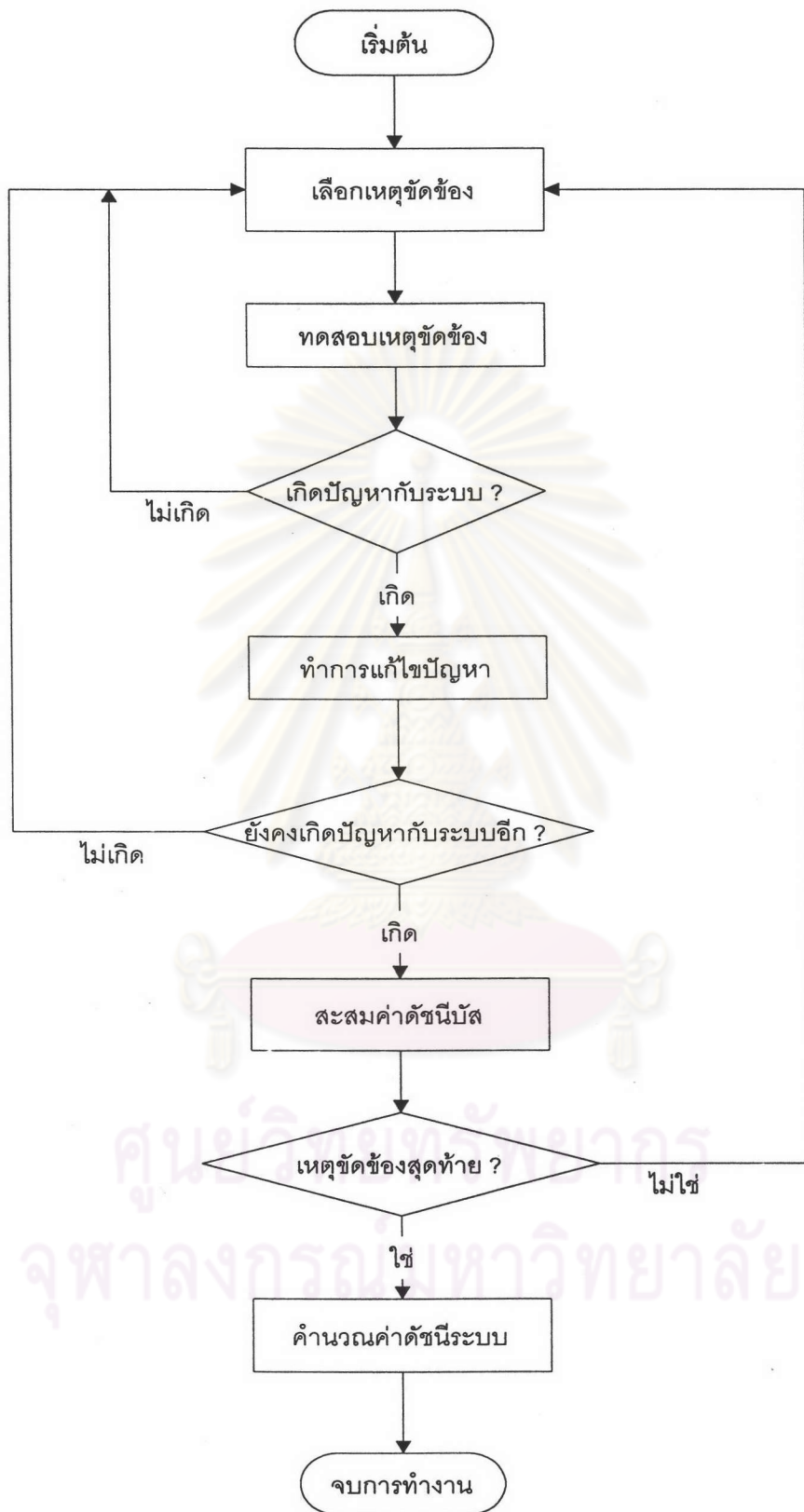
เมื่อได้แบบจำลองของอุปกรณ์ย่อยแล้ว ปัญหาที่สำคัญก็คือเนื่องจากในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่มีอุปกรณ์ย่อยเป็นจำนวนมาก ดังนั้นพฤติกรรมในกรณีเกิดเหตุขัดข้องที่ประกอบด้วย การเกิดขัดข้องในอุปกรณ์ย่อยพร้อมกันมากกว่า 1 อุปกรณ์ขึ้นไป อาจจะเป็นผลสืบเนื่องกันหรือไม่เกี่ยวข้องกันก็ได้ การสรุปหรือกำหนดพฤติกรรมในลักษณะดังกล่าวลงไปชัดเจนอย่างใดอย่างหนึ่งในการคำนวณอาจให้ผลที่ไม่สมบูรณ์นัก แต่ถ้าเป็นการใช้ศึกษาหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ในลักษณะเป็นความสัมพันธ์เชิงค่าดัชนี (Relative indices) แล้ว ผลการคำนวณก็เป็นที่ยอมรับได้ สำหรับเงื่อนไขในการประเมินค่าความเชื่อถือได้โดยวิธีความน่าจะเป็นในกรณีเกิดเหตุขัดข้องขึ้นกับอุปกรณ์ย่อยหลายอุปกรณ์พร้อมกันที่ใช้กันอยู่ทั่วไปคือ การเกิดเหตุขัดข้องแบบเป็นอิสระต่อกัน (Independent outages) โดยในแต่ละสถานะการเกิดเหตุขัดข้องของอุปกรณ์ย่อยต่าง ๆ

สามารถเกิดการขัดข้องได้พร้อม ๆ กันหลายอุปกรณ์โดยไม่เกี่ยวข้องกันเลย เช่น มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเสีย 1 เครื่อง ในขณะที่มีสายส่งหลุดออกไปจากระบบ 1 สายส่งพร้อม ๆ กัน เป็นต้น สมมติฐานดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการกำหนดจำนวนสถานะของระบบต่อไป ซึ่งจะกล่าวถึงในขั้นตอนของการเลือกเหตุขัดข้อง

### 3.2 การคำนวณค่าความเชื่อถือได้โดยวิธีระบุเหตุขัดข้องแบบวิธีการทั่วไป

ขั้นตอนการคำนวณค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ด้วยวิธีระบุเหตุขัดข้องนั้นแบบวิธีการทั่วไปนั้นจะทำการเลือกเหตุขัดข้องอย่างเป็นระบบ จากนั้นจึงทำการทดสอบเหตุขัดข้องที่เลือกโดยอาศัยวิธีไหลดไฟลว์ (Load flow) วิเคราะห์เพื่อตรวจสอบว่าจะส่งผลให้เกิดปัญหาต่อระบบไฟฟ้ากำลังหรือไม่เพียงใด ถ้าเหตุขัดข้องนั้นไม่ทำให้เกิดปัญหาใด ๆ ขึ้นแก่ระบบไฟฟ้ากำลัง ก็จะมีการเลือกเหตุขัดข้องถัดไปเพื่อทำการทดสอบ แต่หากถ้าเกิดปัญหาขึ้นกับบางส่วนของระบบหรือทั้งหมดของระบบซึ่งปัญหาที่อาจเกิดขึ้น เช่น การที่สายส่งมีโหลดเกิน หรือกำลังผลิตไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า เป็นต้น ก็จะมีการแก้ไขปัญหา (Remedial action) ที่เกิดขึ้นดังกล่าว ถ้าหากวิธีการแก้ไขเหล่านี้ไม่สามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้ ก็จะถือว่าระบบบางส่วนหรือว่าระบบทั้งหมดล้มเหลว (Fail) และจะทำการสะสม (Cumulative) ค่าดัชนีบัส (Bus indices) ของบัสซึ่งเกิดปัญหา จากนั้นก็จะทำการเลือกเหตุขัดข้องถัดไปมาทดสอบจนกว่าจะทดสอบครบทุกเหตุขัดข้อง เมื่อทดสอบเหตุขัดข้องจนครบทุกเหตุขัดข้องแล้วจะทำการคำนวณค่าดัชนีระบบ (System indices) ต่อไป รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการคำนวณหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่โดยใช้วิธีระบุเหตุขัดข้องแบบวิธีการทั่วไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่  
โดยใช้วิธีระบุเหตุขัดข้องแบบวิธีการทั่วไป

### 3.3 การเลือกเหตุขัดข้อง

พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ย่อยต่าง ๆ ที่แทนด้วยแบบจำลอง 2 สถานะ ได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และสายส่ง รวมเป็นจำนวน  $n$  อุปกรณ์ และการเกิดข้อขัดข้องของอุปกรณ์ย่อยในแต่ละสถานะเป็นอิสระต่อกัน จะได้ว่ามีแบบจำลองรวมของระบบที่เป็นไปได้ทั้งหมดจำนวน  $2^n$  สถานะ และมีเหตุขัดข้องที่ต้องพิจารณาเป็นจำนวน  $2^n - 1$  สถานะ โดยแต่ละสถานะมีความน่าจะเป็นและความถี่ที่จะเกิดดังสมการที่ 3.1 - 3.2 นอกจากนี้เพื่อเป็นการลดจำนวนสถานะที่จะใช้คำนวณต่อไป ก็จบรวมสถานะการเกิดเหตุขัดข้องที่ส่งผลกระทบต่อระบบเหมือนกัน (Identical states) เข้าด้วยกันโดยใช้สมการที่ 3.3 - 3.4

$$p_s = \prod_{i=1}^k A_i \prod_{j=1}^l U_j \quad (3.1)$$

$$f_s = p_s \left( \sum_{i=1}^k \lambda_i + \sum_{j=1}^l \mu_j \right) \quad (3.2)$$

$$\text{Departure rate to down state} = \lambda_- = \sum_{i=1}^k \lambda_i$$

$$\text{Departure rate to up state} = \lambda_+ = \sum_{j=1}^l \mu_j$$

$$P_s = \sum_{i=1}^n p_i \quad (3.3)$$

$$F_s = \sum_{i=1}^n f_i \quad (3.4)$$

โดยที่  $A_i$  หมายถึง ค่าความพร้อมใช้งานในระยะยาว (Long term availability) ของอุปกรณ์  $i$

$U_j$  หมายถึง ค่าความไม่พร้อมใช้งานในระยะยาว (Long term unavailability) ของอุปกรณ์  $j$

$\lambda_i$  หมายถึง อัตราการขัดข้อง (Failure rate) ของอุปกรณ์  $i$

$\mu_j$  หมายถึง อัตราการซ่อมแซม (Repair rate) ของอุปกรณ์  $j$

$k$  หมายถึง จำนวนอุปกรณ์ที่อยู่ในสถานะการทำงาน (Up state)

- I หมายถึง จำนวนอุปกรณ์ที่อยู่ในสถานะขัดข้อง(Down state)
- $P_s, p_s$  หมายถึง ความน่าจะเป็นหรือโอกาสที่จะเกิดสถานะ S, s
- $F_s, f_s$  หมายถึง ความถี่ที่จะเกิดสถานะ S, s
- n หมายถึง จำนวนสถานะย่อยที่เหมือนกัน

เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่จะมีอุปกรณ์ย่อยในระบบเป็นจำนวนมากซึ่งจะทำให้จำนวนสถานะการเกิดขัดข้องทั้งหมดมีค่าสูงมาก ( $2^n - 1$ ) ทำให้การคำนวณหาโหลดโพล์และค่าดัชนีความเชื่อถือได้ในแต่ละสถานะนั้นโดยคอมพิวเตอร์ต้องใช้เวลาานมากเกินไป และเกินความจำเป็น โดยที่ในบางสถานะซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดสถานะนั้นต่ำมากหรือโอกาสที่เกิดการขัดข้องในอุปกรณ์ย่อยพร้อมกันเป็นจำนวนมากซึ่งในทางปฏิบัติคงเป็นไปได้ ดังนั้นจึงต้องกำหนดระดับการเกิดเหตุขัดข้อง (Contingency level) เพื่อลดสถานะดังกล่าว

สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดระดับการเกิดเหตุขัดข้องดังนี้ [2]

- 1) ระดับการเกิดเหตุขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 3
- 2) ระดับการเกิดเหตุขัดข้องของสายส่งหรือหม้อแปลงไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 2
- 3) ระดับการเกิดเหตุขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารวมกับสายส่งหรือหม้อแปลง มีค่าเท่ากับ 3 โดยที่ในแต่ละเหตุขัดข้องที่พิจารณานั้น จะมีการขัดข้องของสายส่งหรือหม้อแปลงไฟฟ้าได้ไม่เกิน 2

ส่วนเหตุขัดข้องที่มีอันดับสูงกว่านี้จะถูกตัดออกไปไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากจะมีค่าความน่าจะเป็นและความถี่ของการขัดข้องต่ำมาก นอกจากจะตัดเหตุขัดข้องที่มีอันดับสูงออกไปแล้ว ยังสามารถลดจำนวนเหตุขัดข้องที่ต้องพิจารณาได้อีก โดยใช้กฎเกณฑ์การตัดออก (Cut off criteria) เพื่อตัดเหตุขัดข้องที่มีความน่าจะเป็นหรือมีความถี่ต่ำกว่าค่าที่กำหนดออกไป ทำให้สามารถที่จะลดจำนวนเหตุขัดข้องที่จะต้องพิจารณาลงและจะช่วยลดเวลาในการคำนวณลงไปได้ อีก โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้เกณฑ์การตัดออกเพื่อตัดเหตุขัดข้องที่มีความน่าจะเป็นต่ำกว่า  $10^{-8}$  หรือเหตุขัดข้องที่มีความถี่ต่ำกว่า  $10^{-6}$  ออกไป

### 3.4 เทคนิคการวิเคราะห์โหลดโพล์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

เนื่องจากภายหลังจากอุปกรณ์ย่อยในระบบเกิดเหตุขัดข้องขึ้นแล้ว เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจากระบบ (Generator outage) สายส่งหลุดออกจากระบบ (Line outage) เป็นต้น ทำให้โครงสร้างของระบบ (System configuration) เปลี่ยนแปลงไปมีผลทำให้ที่จุดโหลด (Load point) ต่าง ๆ ได้รับการจัดสรรกำลังไฟฟ้าที่แตกต่างไปจากเดิม ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการวิเคราะห์โหลดโพล์เพื่อคำนวณหา กำลังไฟฟ้าที่ส่งจากแหล่งผลิตไปยังจุดโหลดต่าง ๆ ภายในระบบใหม่เพื่อให้ทราบกำลังการผลิตที่จุดโหลดได้รับภายหลังจากเกิดเหตุขัดข้องขึ้นในระบบ

สำหรับเทคนิคที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์โหลดโพล์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แก่

- 1) วิธี เอ.ซี. โหลดโพล์ (A.C. load flow)
- 2) วิธี ดี.ซี. โหลดโพล์ (D.C. load flow)

#### 3.4.1 วิธี เอ.ซี. โหลดโพล์ (A.C. Load Flow) [2,17]

สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์โหลดโพล์วิธีนี้เป็นหลักเพื่อจะทำการศึกษาความเชื่อถือได้ที่เกี่ยวข้องกับแรงดันด้วย

##### 3.4.1.1 ชนิดของบัสในระบบกำลังไฟฟ้า (Type of bus)

ในการวิเคราะห์โหลดโพล์ จะแบ่งบัสต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. บัสอ้างอิง (Reference bus) หรือบัสสวิง (Swing bus) ที่บัสนี้จะทราบค่าขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัส ส่วนกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟจะได้จากการวิเคราะห์โหลดโพล์
2. บัสควบคุมแรงดัน (Voltage controlled bus) ที่บัสนี้จะทราบค่าขนาดของแรงดันบัสและกำลังจริง ส่วนมุมเฟสของแรงดันบัสและกำลังรีแอกทีฟจะได้จากการวิเคราะห์โหลดโพล์
3. บัสโหลด (Load bus) ที่บัสนี้จะทราบค่าขนาดของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟส่วนขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัสจะได้จากการวิเคราะห์โหลดโพล์

สำหรับการวิเคราะห์โหลดโพล์แบบ เอ.ซี. มีหลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธีเกาส์ (Gauss method) วิธีเกาส์-ไซเดิล (Gauss-Seidel method) และวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) [2,17,18] แต่วิธีนิวตัน-ราฟสันได้รับความนิยมมาก เนื่องจากสามารถหาคำตอบได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว

### 3.4.1.2 สมการโหลดโพลาร์โดยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

สมการโหลดโพลาร์ สามารถเขียนในรูปของกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าบัส และ แรงดันที่บัสได้ดังนี้

$$P_p - jQ_p = V_p^* \cdot \sum_{q=1}^N Y_{pq} \cdot V_q \quad (3.5)$$

โดยที่	$P_p$	คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่บัส $p$
	$Q_p$	คือ กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ไหลเข้าสู่บัส $p$
	$V_p, V_q$	คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส $p$ และ $q$ เทียบกับดินตามลำดับ
	$V_p^*$	คือ สังยุค (Conjugate) เชิงซ้อนของแรงดันไฟฟ้าที่บัส $p$
	$I_p$	คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่บัส $p$
	$Y_{pq}$	คือ สมาชิกในตำแหน่งที่ $(p,q)$ ของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์
	$N$	คือ จำนวนบัสทั้งหมดในระบบกำลังไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.5) ในรูปพิกัดเชิงขั้ว (Polar form) จะได้ว่ากำลังจริง และกำลังรีแอกทีฟที่จ่ายเข้าไปยังบัส  $p$  ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบไปด้วยบัสจำนวน  $N$  บัส สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.6 และ 3.7

$$P_p = \sum_{q=1}^N |V_p V_q Y_{pq}| \cos(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq})$$

$$= |V_p| \sum_{q=1}^N |V_q| (G_{pq} \cos \delta_{pq} + B_{pq} \sin \delta_{pq}) \quad (3.6)$$

$$Q_p = \sum_{q=1}^N |V_p V_q Y_{pq}| \sin(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq})$$

$$= |V_p| \sum_{q=1}^N |V_q| (G_{pq} \sin \delta_{pq} - B_{pq} \cos \delta_{pq}) \quad (3.7)$$

โดยที่

$$P_p, Q_p = \text{กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่จ่ายเข้าบัส } p$$

$$\begin{aligned}
 |V_p|, \delta_p &= \text{ขนาดและมุมเฟสของแรงดันบั้สที่บั้ส } p \\
 |V_q|, \delta_q &= \text{ขนาดและมุมเฟสของแรงดันบั้สที่บั้ส } q \\
 |Y_{pq}|, \theta_{pq} &= \text{สมาชิกตำแหน่ง } (p, q) \text{ ของเมตริกซ์แอดมิตแตนซ์ของระบบ} \\
 \delta_{pq} &= \delta_p - \delta_q \\
 G_{pq}, B_{pq} &= \text{ส่วนจริง และส่วนจินตภาพของเมตริกซ์แอดมิตแตนซ์}
 \end{aligned}$$

สมการที่ 3.6 และ 3.7 เรียกว่าสมการไหลดโฟลว์ (Load flow equation) ซึ่งเป็นสมการที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น การวิเคราะห์ไหลดโฟลว์โดยใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน จะเปลี่ยนสมการไหลดโฟลว์ให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นโดยใช้การกระจายของอนุกรมเทเลอร์ (Taylor series expansion) กระจายฟังก์ชันของ P และ Q รอบจุดประมาณเริ่มต้นและไม่คิดเทอมอันดับสองขึ้นไป โดยจะเขียนให้อยู่ในรูปของสมการความคลาดเคลื่อนของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟเป็นเมตริกซ์ ดังสมการที่ 3.8

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \dots \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & \vdots & J_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ J_3 & \vdots & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \dots \\ \Delta |V|/|V| \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

โดยที่  $\Delta P$ ,  $\Delta Q$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ

$\Delta \delta$  คือ ค่าเพิ่มขึ้นของมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บั้ส

$\Delta |V|$  คือ ค่าเพิ่มขึ้นของขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บั้ส

$J_1, J_2, J_3, J_4$  คือ เมตริกซ์ จาโคเบียนย่อย (Sub Jacobian Matrix)

#### 3.4.1.3 การปรับปรุงการวิเคราะห์ไหลดโฟลว์ด้วยเทคนิคฟาสต์ดีคัปเปิล [2,19]

เนื่องจากวิธีนิวตัน-ราฟสันเดิมมีขั้นตอนการคำนวณที่ยุ่งยากซับซ้อนมาก โดยเฉพาะขั้นตอนการคำนวณและการทำอินเวอร์สของเมตริกซ์จาโคเบียนซึ่งจะต้องกระทำการดังกล่าวทุก ๆ รอบการคำนวณ ทำให้ต้องใช้เวลาคำนวณค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตามวิธีนิวตัน-ราฟสันก็ยังคงเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในการใช้วิเคราะห์ไหลดโฟลว์จึงได้มีการพัฒนาวิธีนิวตัน-ราฟสันเพื่อแก้ไขจุดด้อยดังกล่าว สำหรับเทคนิคที่จะนำมาใช้พัฒนาวิธีนิวตัน-ราฟสันในที่นี้คือ



เทคนิคฟาสต์ดีคัปเปิล [2,19] ซึ่งอาศัยคุณสมบัติการดีคัปเปิลระหว่างกำลังจริง และกำลังรีแอกทีฟ ดังต่อไปนี้

ก) การเปลี่ยนแปลงมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บัส ( $\Delta\delta$ ) จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังรีแอกทีฟที่บัส ( $\Delta Q$ ) น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงของกำลังจริงที่บัส ( $\Delta P$ )

ข) การเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส ( $\Delta|V|$ ) จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังจริงที่บัส ( $\Delta P$ ) น้อยมากแต่จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่บัส ( $\Delta Q$ ) ค่อนข้างมาก

จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้สามารถประมาณได้ว่าค่าสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียน  $[J_2]$  และ  $[J_3]$  ในสมการที่ 3.8 มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการที่ 3.8 ได้ใหม่ โดยเขียนแยกออกเป็น 2 สมการ คือสมการที่ 3.9 และ 3.10

$$[\Delta P] = [J_1] \cdot [\Delta\delta] \quad (3.9)$$

$$[\Delta Q] = [J_4] \cdot [\Delta|V|/V] \quad (3.10)$$

โดยที่ค่าสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียน  $[J_1]$  และ  $[J_4]$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.11 ถึงสมการที่ 3.13

$$J_{1pq} = J_{4pq} = V_p V_q (G_{pq} \sin\delta_{pq} - B_{pq} \cos\delta_{pq}) \quad ; p \neq q \quad (3.11)$$

$$J_{1pp} = -B_{pp} V_p^2 - Q_{pp} \quad ; p = q \quad (3.12)$$

$$J_{4pp} = Q_{pp} - B_{pp} V_p^2 \quad ; p = q \quad (3.13)$$

โดยที่

$$Q_{pp} = V_p \sum_{q=1, q \neq p}^N V_q (G_{pq} \sin\delta_{pq} - B_{pq} \cos\delta_{pq})$$

และเนื่องจากระบบกำลังไฟฟ้าในทางปฏิบัติ สามารถอาศัยข้อสมมติฐานเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

- ค่าขนาดของแรงดันที่แต่ละบัสมีค่าใกล้เคียง 1.0 p.u. โดยประมาณ

$$\text{ดังนั้น } V_p = V_q \approx 1.0$$

- ค่ามุมเฟสของแรงดันแต่ละบัสจะมีค่าใกล้เคียงกัน

$$\text{ดังนั้น } \cos \delta_{pq} \approx 1 \text{ และ } \sin \delta_{pq} \approx 0$$

- ค่าความนำไฟฟ้า (Conductance)  $G_{pq}$  ของสายส่ง จะมีค่าน้อยกว่าค่าซัสเซพแตนซ์ (Susceptance)  $B_{pq}$  ของสายส่งมาก

$$\text{นั่นคือ } G_{pq} \ll B_{pq}$$

- ค่ากำลังรีแอกทีฟ  $Q_p$  มีค่าน้อยกว่าค่า  $B_{pq}|V_p|^2$  มาก

$$\text{นั่นคือ } Q_p \ll B_{pq}|V_p|^2$$

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการที่ 3.11 ถึง 3.13 จะทำให้สามารถเขียนสมการโหลดโพลร์ได้ใหม่ดังสมการที่ 3.14 และ 3.15

$$[\Delta P / V] = [B'] \cdot [\Delta \delta] \quad (3.14)$$

$$[\Delta Q / V] = [B''] \cdot [\Delta |V|] \quad (3.15)$$

โดยที่

$[B']$  คือ ส่วนจินตภาพของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ที่ได้จากการตัดแฉและหลักที่เกี่ยวข้องกับบัสอ้างอิงออกไป

$[B'']$  คือ ส่วนจินตภาพของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ที่ได้จากการเลือกเอาเฉพาะแฉและหลักที่เกี่ยวข้องกับจุดโหลดเท่านั้น

เนื่องจาก เมตริกซ์สัมประสิทธิ์  $[B']$  และ  $[B'']$  ในสมการที่ (3.14) และ (3.15) ซึ่งประกอบไปด้วยค่าซัสเซพแตนซ์ (Susceptances) ของระบบเท่านั้น จึงมีค่าคงที่ตลอดการคำนวณ จึงทำให้ไม่ต้องเสียเวลาในการคำนวณและการทำอินเวอร์สจาโคเบียนเมตริกซ์ใหม่ทุกรอบการคำนวณ ทำให้ลดขั้นตอนการคำนวณที่ซับซ้อนที่สุดออกไปจากวิธีนิวตัน-ราฟสันเดิม และยังลดหน่วยความจำลงด้วย โดยที่ยังคงได้คำตอบที่มีความละเอียดถูกต้องเป็นที่ยอมรับได้ การวิเคราะห์โหลดโฟลว์โดยใช้สมการที่ 3.14 และสมการที่ 3.15 นี้จะเรียกว่าการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบฟาสต์ดีคัปเปิล (Fast decoupled load flow) สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้การวิเคราะห์โหลดโฟลว์นี้เป็นหลักเพื่อใช้ในการทดสอบเหตุขัดข้องต่าง ๆ เพราะสามารถหาคำตอบได้อย่างรวดเร็วและให้ผลการคำนวณอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

สรุปขั้นตอนการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบฟาสต์ดีคัปเปิล

- 1) กำหนดค่าเริ่มต้นของ  $\delta_p$  และ  $|V_p|$
- 2) คำนวณค่า  $P_p$  และ  $Q_p$  โดยใช้สมการที่ 3.6 และ 3.7
- 3) ตรวจสอบค่าผิดพลาดที่มากที่สุด แล้วเปรียบเทียบว่ามีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าค่าผิดพลาด ( $\epsilon$ ) ที่ยอมรับได้ (Maximum Error)
  - ถ้า น้อยกว่า  $\epsilon$  ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 7
  - ถ้า มากกว่า  $\epsilon$  ให้ทำขั้นตอนที่ 4
- 4) คำนวณค่า  $[B']$  และ  $[B'']$
- 5) คำนวณค่า  $[\Delta\delta_p]$  และ  $[\Delta|V_p|]$  จากสมการที่ 3.14 และ 3.15
- 6) ปรับค่า  $\delta_p$  และ  $|V_p|$  แล้วย้อนกลับไปทำขั้นตอนที่ 2
- 7) คำนวณค่าอื่น ๆ ที่ต้องการ เช่น Line flow ถ้าไม่ต้องการให้ข้ามไปขั้นที่ 8
- 8) กลับสู่โปรแกรมหลัก

#### 3.4.2 วิธี ดี. ซี. โหลดโฟลว์ (D.C. load flow) [18]

การวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบดี.ซี. (D.C. load flow) เป็นการหาคำตอบของระบบไฟฟ้ากำลังโดยประมาณ โดยจะพิจารณาเฉพาะกำลังจริงเท่านั้นส่วนกำลังรีแอกทีฟจะไม่นำมาพิจารณา จึงทำให้สามารถคำนวณได้รวดเร็วเนื่องจากในการคำนวณไม่ต้องมีการคำนวณซ้ำ (Non-iteration)

พิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งแบบ  $\pi$  (Pi-equivalent circuit) ตามสมการที่ 3.16

$$P_{pq} = G_{pq}|V_p|^2 - G_{pq}|V_p||V_q|\cos(\delta_p - \delta_q) - B_{pq}|V_p||V_q|\sin(\delta_p - \delta_q) \quad (3.16)$$

การวิเคราะห์โหลดไฟฟ้แบบ ดี.ซี. จะอาศัยข้อสมมติฐานดังนี้

- ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บ้สต่าง ๆ มีค่าประมาณ 1.0 p.u. (Flat voltage profile)

$$\text{ดังนั้น } |V_p| = |V_q| = 1.0$$

- ระบบไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไป จะมีค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่งสูงกว่าค่าความต้านทานมาก ๆ นั่นคือ  $X_{pq} \gg R_{pq}$  ทำให้

$$G_{pq} = \frac{R_{pq}}{R_{pq}^2 + X_{pq}^2} \approx 0$$

$$B_{pq} = \frac{-X_{pq}}{R_{pq}^2 + X_{pq}^2} = \frac{-1}{X_{pq}}$$

- ค่ามุมเฟสของแรงดันบ้สที่แต่ละบ้สมีค่าใกล้เคียงกัน นั่นคือ

$$\cos(\delta_p - \delta_q) \approx 1 \text{ และ}$$

$$\sin(\delta_p - \delta_q) \approx (\delta_p - \delta_q)$$

ดังนั้นจากสมการ (3.16) จะได้ว่า

$$P_{pq} = \frac{1}{X_{pq}}(\delta_p - \delta_q) \quad (3.17)$$

สมการที่ (3.17) สมการของกำลังการไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งจากบ้ส  $p$  ไปยังบ้ส  $q$  โดยที่

$\delta_p$  = มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บ้ส  $p$

$\delta_q$  = มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บ้ส  $q$

$X_{pq}$  = ค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่งระหว่างบ้ส  $p$  และบ้ส  $q$

$P_{pq}$  = ค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบ้ส  $p$  ไปยังบ้ส  $q$

ส่วนค่ากำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลเข้าสู่บ้ส จะหาได้จากผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในทุก ๆ สายส่งที่ต่อกับบ้สนั้น ดังสมการที่ 3.18 และเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ 3.19

$$P_p = \sum_{q=1}^n P_{pq} = \sum_{q=1}^n \frac{1}{X_{pq}} (\delta_p - \delta_q) \quad (3.18)$$

$$[P] = [B][\delta] \quad (3.19)$$

โดยที่

$n$  = จำนวนบัสทั้งหมดที่ต่อกับบัส  $p$

$[B]$  = เมตริกซ์ซัสเซพแตนซ์

สมการที่ 3.19 เป็นสมการเชิงเส้น ค่าสมาชิกในเมตริกซ์  $[B]$  ส่วนใหญ่มีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากมีสายส่งเพียงจำนวนหนึ่งเท่านั้นที่ต่ออยู่กับแต่ละบัส สำหรับการคำนวณหาคำตอบของสมการ สามารถหาได้โดยตรงไม่ต้องมีการคำนวณซ้ำเป็นรอบเหมือนในกรณีการวิเคราะห์โหลดโพล์แบบเอ.ซี. ทำให้สามารถคำนวณหาค่ามุมเฟสที่แต่ละบัสได้อย่างรวดเร็ว เมื่อทราบค่ามุมเฟสของแต่ละบัสแล้วก็จะคำนวณหากำลังไฟฟ้าที่ไหลในแต่ละสายส่งได้โดยใช้สมการที่ 3.17 ทำให้สามารถตรวจสอบการเกิดโหลดเกินของสายส่งได้อย่างรวดเร็ว ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้การวิเคราะห์โหลดโพล์แบบดี.ซี. เพื่อตรวจสอบการเกิดโหลดเกินของสายส่ง ในกรณีที่การวิเคราะห์โหลดโพล์โดยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิลไม่สามารถหาคำตอบได้ (Divergence)

สรุปขั้นตอนการวิเคราะห์โดยวิธี ดี.ซี. โหลดโพล์

- 1) สร้างเวกเตอร์ของกำลังจริง  $[P]$
- 2) สร้างเมตริกซ์ซัสเซพแตนซ์  $[B]$
- 3) คำนวณหาค่ามุมเฟสจากสมการ 3.19
- 4) คำนวณกำลังจริงที่ไหลในสายส่งตามสมการ 3.17
- 5) กลับสู่โปรแกรมหลัก

### 3.5 การทดสอบเหตุขัดข้อง

เมื่อทำการเลือกเหตุขัดข้องเพื่อพิจารณาแล้วตามหัวข้อที่ 3.3 ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการทดสอบเหตุขัดข้องที่เลือกมาโดยการวิเคราะห์ไหลดโฟลว์ (Load flow analysis) เพื่อตรวจสอบว่าเหตุขัดข้องนั้นจะส่งผลให้เกิดปัญหาต่อระบบหรือไม่ รวมทั้งทำการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นด้วย ดังนั้นความแม่นยำสูงของคำตอบในการวิเคราะห์ไหลดโฟลว์จึงไม่ใช่สิ่งที่จำเป็นมากนักในที่นี่ แต่ความเร็วของการคำนวณจะมีความสำคัญมากกว่า เนื่องจากในการคำนวณหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่มีเหตุขัดข้องที่จะต้องทำการทดสอบด้วยการวิเคราะห์ไหลดโฟลว์เป็นจำนวนมาก จึงควรใช้วิธีการวิเคราะห์ไหลดโฟลว์แบบประมาณซึ่งใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยลง เพื่อเป็นการลดเวลาในการคำนวณค่าดัชนีลง

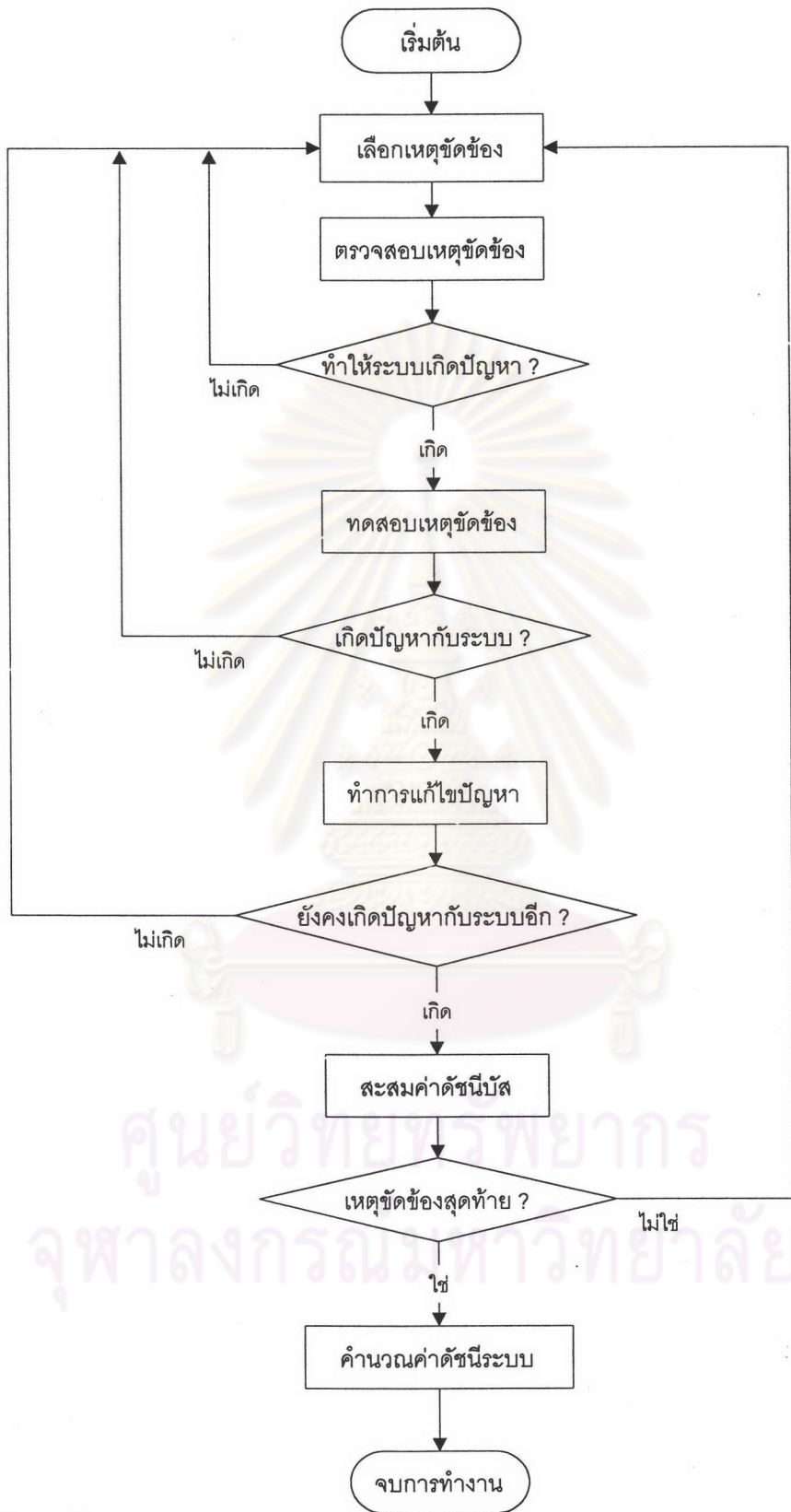
สำหรับวิธีการวิเคราะห์ไหลดโฟลว์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ การวิเคราะห์ไหลดโฟลว์แบบ เอ.ซี. (A.C. load flow) โดยใช้วิธีฟาสต์ดีคัปเปิล และการวิเคราะห์ไหลดโฟลว์แบบ ดี.ซี. (D.C. load flow) ซึ่งรายละเอียดการคำนวณทั้งสองวิธีได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.4 โดยจะใช้การวิเคราะห์ไหลดโฟลว์แบบฟาสต์ดีคัปเปิลเป็นหลักในการทดสอบเหตุขัดข้อง แต่ในกรณีที่ไม่สามารถหาคำตอบได้โดยใช้วิธีนี้นั้นก็จะใช้การวิเคราะห์ไหลดโฟลว์แบบ ดี.ซี. แทน

### 3.6 การตรวจสอบเหตุขัดข้อง

เมื่อพิจารณาขั้นตอนการคำนวณหาค่าความเชื่อถือได้โดยวิธีเดิมในรูปที่ 3.1 จะพบว่าเหตุขัดข้องที่ผ่านขั้นตอนการคัดเลือกจะถูกนำไปทดสอบทุกเหตุขัดข้อง แต่เนื่องจากในขั้นตอนของการทดสอบเหตุขัดข้องนั้นจะต้องมีการวิเคราะห์ไหลดโฟลว์ด้วย ดังนั้นจึงทำให้ต้องใช้เวลาในการคำนวณนาน ยิ่งระบบมีขนาดใหญ่ขึ้นเวลาก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ฉะนั้นจึงเกิดแนวความคิดที่จะทำการตรวจสอบเหตุขัดข้องที่ผ่านการคัดเลือกอย่างคร่าว ๆ ก่อนว่าเหตุขัดข้องนั้นจะทำให้ระบบเกิดปัญหาหรือไม่ เช่น เกิดโหลดเกินในสายส่ง หรือแรงดันที่บัสไม่อยู่ในช่วงที่กำหนดหรือไม่ ถ้าเหตุขัดข้องนั้นไม่ได้ทำให้ระบบเกิดปัญหาก็จะทำการตรวจสอบเหตุขัดข้องถัดไป แต่ถ้าเหตุขัดข้องนั้นทำให้ระบบเกิดปัญหาก็จะนำไปทดสอบอย่างละเอียดโดยการวิเคราะห์ไหลดโฟลว์ตามที่กล่าวในหัวข้อ 3.5 ต่อไป รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการคำนวณความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ด้วยวิธีการระบุเหตุขัดข้องที่มีการพิจารณาตรวจสอบเหตุขัดข้องก่อนทำการทดสอบซึ่งเป็นวิธีที่จะนำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำหรับการตรวจสอบเหตุขัดข้องจะอาศัยเทคนิคฟาสต์ดีคัปเปิลมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งพอจะสรุปขั้นตอนการตรวจสอบเหตุขัดข้องได้ดังนี้

- 1) คำนวณโหลดโพลาร์เฉพาะกรณีที่เกิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดขัดข้องเพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้น (Base case)
- 2) เลือกเหตุขัดข้องกรณีที่สายส่งเกิดขัดข้องเพิ่มเติมจากกรณี base case
- 3) ทำการคำนวณค่า  $[B']$  และ  $[B'']$  ใหม่เนื่องจากค่า Ybus เปลี่ยนแปลงไป
- 4) คำนวณค่า  $\Delta\delta$  จากสมการที่ 3.14
- 5) คำนวณค่า  $\delta_{\text{new}}$  จากสมการ  $\delta_{\text{new}} = \delta_{\text{base case}} + \Delta\delta$
- 6) คำนวณ Line flow พร้อมทั้งตรวจสอบว่าสายส่งมีโหลดเกินหรือไม่
  - ถ้าเกิน ให้ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 10)
  - ถ้าไม่เกิน ให้ทำขั้นตอนที่ 7)
- 7) คำนวณค่า  $\Delta V$  จากสมการที่ 3.15
- 8) คำนวณค่า  $V_{\text{new}}$  จากสมการ  $V_{\text{new}} = V_{\text{base case}} + \Delta V$
- 9) ตรวจสอบว่าแรงดันเกินค่าที่กำหนดหรือไม่
  - ถ้าเกิน ให้ทำขั้นตอนที่ 11)
  - ถ้าไม่เกิน ให้ทำขั้นตอนที่ 7)
- 10) ทำการทดสอบเหตุขัดข้อง
- 11) สายส่งเกิดขัดข้องเป็นเหตุขัดข้องสุดท้ายหรือไม่
  - ถ้าไม่ใช่ กลับไปทำขั้นตอนที่ 2)
  - ถ้าใช่ ทำขั้นตอนที่ 12)
- 12) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดขัดข้องเป็นเหตุขัดข้องสุดท้ายหรือไม่
  - ถ้าไม่ใช่ กลับไปทำขั้นตอนที่ 1)
  - ถ้าใช่ ออกสู่อุปกรณ์หลัก

ในการคำนวณหาค่า  $\Delta\delta$  นั้นสามารถหาได้จากสมการ  $[\Delta P / V] = [B'] \cdot [\Delta\delta]$  โดยการทำให้ Triangular factorization หรือจากสมการ  $[\Delta\delta] = [B']^{-1} \cdot [\Delta P / V]$  โดยใช้วิธีการปรับแต่งอินเวอร์สเมตริกซ์ของ เซอร์แมน-มอร์ริสัน (Sherman - Morrison Correction) [20] ก็ได้ แต่เวลาที่ในการคำนวณวิธีหลังจะน้อยกว่า รายละเอียดที่มาของวิธีการปรับแต่งอินเวอร์สเมตริกซ์นี้ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค สำหรับการคำนวณค่า  $\Delta V$  ก็สามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนหลักของการคำนวณความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ด้วยวิธีการที่นำเสนอ



### 3.7 วิธีการแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกิน (Remedial action)

เมื่อเหตุขัดข้องที่ผ่านการทดสอบโดยการวิเคราะห์โหลดโพล์แล้วพบว่าระบบเกิดปัญหา คือสายส่งมีโหลดเกิน ในทางปฏิบัติจะทำการแก้ไขได้โดยยอมให้สายส่งที่มีโหลดเกินนั้นทำงานต่อไปในภาวะโหลดเกินได้ จะทำให้ระบบมีความเชื่อถือได้ที่ดีกว่าความเป็นจริง ซึ่งจะทำให้ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง (Optimistic indices) โดยเฉพาะกรณีที่โหลดเกินมากและเกินอยู่เป็นเวลานาน แต่ถ้าหากให้ทำการปลดสายส่งที่มีโหลดเกินนั้นออกไปจากระบบ แล้วจึงทำการวิเคราะห์ระบบที่เหลือจนกว่าจะไม่มีอุปกรณ์ใดมีโหลดเกินหรือจนกว่าระบบล้นเหลว จะทำให้ระบบมีความเชื่อถือได้ที่แยกกว่าความเป็นจริง ซึ่งจะทำให้ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริง (Pessimistic indices) อาจจะทำให้ต้องตัดสินใจที่จะปรับปรุงระบบให้มีความเชื่อถือได้สูงขึ้น โดยเพิ่มค่าใช้จ่ายในการลงทุนให้มากขึ้น ทำให้ไม่เหมาะสมที่จะนำวิธีการดังกล่าวมาใช้สำหรับการหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่

สำหรับวิธีการแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกินที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้สำหรับการหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ ได้แก่ การจัดสรรกำลังผลิตใหม่ และ/หรือ การตัดโหลด (Generation rescheduling and load shedding) [13,14] โดยจะใช้ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์โหลดโพล์ด้วยวิธีนิวตันราฟสัน (Newton-Raphson load flow technique) หรือเทคนิคการวิเคราะห์โหลดโพล์ด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิล (Fast Decoupled load flow technique)

สำหรับวิธีการหารูปแบบการจัดสรรกำลังผลิตใหม่และการตัดโหลด เพื่อแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกินที่จะนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้นจะใช้ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์โหลดโพล์แบบฟาสต์ดีคัปเปิล [2,13,14] เพื่อให้สอดคล้องกับขั้นตอนการทดสอบเหตุขัดข้อง โดยจะใช้หลักการที่ว่า “การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งจะเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บัส ส่วนการที่จะเปลี่ยนแปลงขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บัสก็สามารถทำได้โดยเปลี่ยนแปลงค่ากำลังผลิตและโหลดที่บัสนั้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตและโหลดที่บัสอย่างเหมาะสม ก็จะทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งได้”

สำหรับขั้นตอนของวิธีการจัดสรรกำลังผลิตใหม่และการตัดโหลดเพื่อระงับปัญหาสายส่งมีโหลดเกิน จะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้น 2 ชุด [13,14] ได้แก่

### 3.7.1 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างกระแสในสายส่งกับตัวแปรสถานะ

ในการวิเคราะห์จะกำหนดให้ขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าเป็นตัวแปรสถานะ (State variables) และเนื่องจากกระแสที่ไหลในสายส่งจากบัส  $p$  ไปยังบัส  $q$  ในระบบแบบพาย ( $\pi$ -network) นั้นจะเป็นฟังก์ชันของขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่  $p$  และบัส  $q$  ดังสมการที่ 3.20

$$I_{pq} = \left[ \left( V_p \cos \delta_p - V_q \cos \delta_q \right) G_{pq} - \left( V_p \sin \delta_p - V_q \sin \delta_q \right) B_{pq} - B_c V_p \sin \delta_p \right] + j \left[ \left( V_p \sin \delta_p - V_q \sin \delta_q \right) G_{pq} + \left( V_p \cos \delta_p - V_q \cos \delta_q \right) B_{pq} + B_c V_p \cos \delta_p \right] \quad (3.20)$$

เมื่อ  $B_c$  = ครึ่งหนึ่งของไลน์ชาร์จิ้งแอดมิตแตนซ์ (Half line charging admittance)

โดยที่กระแสเกินที่ไหลในสายส่ง มีค่าดังสมการที่ 3.21

$$\Delta I_{pq} = \left( \frac{\partial I_{pq}}{\partial \delta_p} \right) \Delta \delta_p + \left( \frac{\partial I_{pq}}{\partial \delta_q} \right) \Delta \delta_q + \left( \frac{\partial I_{pq}}{\partial V_p} \right) \Delta V_p + \left( \frac{\partial I_{pq}}{\partial V_q} \right) \Delta V_q \quad (3.21)$$

ซึ่งสามารถเขียนเป็นเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ 3.22 และสมการที่ 3.23

$$\begin{bmatrix} \Delta I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial I}{\partial \delta} & \vdots & \frac{\partial I}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \dots \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta I_1 \\ \Delta I_2 \\ \vdots \\ \Delta I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & \\ & A & \\ & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \dots \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

โดยที่  $[A]$  เป็นเมตริกซ์ Partial derivative ของ  $I_{pq}$

### 7.3.2 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างการเพิ่มของกำลังผลิตและโหลดกับการเพิ่มขึ้นของตัวแปรสถานะ

เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ถูกจ่ายเข้าสู่บัส จะเป็นฟังก์ชันของขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บัส เมื่อกระจายอนุกรมเทเลอร์ ฟังก์ชัน  $P_j$  และ  $Q_j$  รอบ ๆ  $[\delta, V]^T$  และไม่คิดเทอมอันดับสองขึ้นไป จะได้สมการที่ 3.24 และสมการที่ 3.25 ตามลำดับ

$$\Delta P_j = \frac{\partial P_j}{\partial \delta_1} \Delta \delta_1 + \dots + \frac{\partial P_j}{\partial V_1} \Delta V_1 + \dots \quad (3.24)$$

$$\Delta Q_j = \frac{\partial Q_j}{\partial \delta_1} \Delta \delta_1 + \dots + \frac{\partial Q_j}{\partial V_1} \Delta V_1 + \dots \quad (3.25)$$

จากสมการ 3.24 และ 3.25 นั้นเมื่อใช้หลักการของการวิเคราะห์โหนดโพลาร์แบบฟาสต์คัปเปิลมาประยุกต์ใช้จะทำให้สามารถแยกสมการออกได้เป็น 2 ชุด คือ สมการที่ 3.26 และสมการที่ 3.27

$$[\Delta P/V] = [B'][\Delta \delta] \quad (3.26)$$

$$[\Delta Q/V] = [B'''][\Delta V] \quad (3.27)$$

เมื่อ  $[B''']$  คือ ส่วนจินตภาพของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ที่ได้จากการเลือกเอาเฉพาะแถวและหลักที่เกี่ยวข้องกับโหลดบัส และบัสควบคุมแรงดันไฟฟ้าเท่านั้น

โดยสมการที่ 3.26 จะมีลักษณะเหมือนกับสมการที่ 3.14 ส่วนสมการที่ 3.27 จะคล้ายกับสมการที่ 3.15 แต่จะมีการเพิ่มเติมสมการเข้าไปในส่วนของบัสควบคุมแรงดัน (Voltage controlled bus) เท่ากับจำนวนของบัสควบคุมแรงดัน ทำให้เมตริกซ์  $[B''']$  มีจำนวนสมาชิกมากกว่าเมตริกซ์  $[B'']$

สำหรับ  $\Delta P$  และ  $\Delta Q$  ที่ในสมการที่ 3.26 และ 3.27 นั้นจะหมายถึงค่าเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าที่จะจ่ายเข้าสู่บัสที่ต้องการ เพื่อแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกิน ไม่ได้หมายถึงค่าคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้า (Power mismatch)

สรุปขั้นตอนการแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกินโดยใช้วิธีการจัดสรรกำลังผลิตใหม่และการตัดโหลด มีขั้นตอนการคำนวณพอจะสรุปได้ดังต่อไปนี้

- 1) คำนวณโหลดไฟฟ้เริ่มต้น โดยใช้สมการที่ 3.20 และสมการที่ 3.21

$$[\Delta P/V] = [B'][\Delta \delta] \quad (3.20)$$

$$[\Delta Q/V] = [B''][\Delta V] \quad (3.21)$$

- 2) คำนวณหากระแสในสายส่ง ถ้าไม่มีสายส่งใดมีโหลดเกิน ให้ข้ามไปยังขั้นตอนที่ 10 ถ้าจำนวนรอบในการคำนวณเกินกว่าค่าที่ได้กำหนดไว้ ให้ข้ามไปยังขั้นตอนที่ 9 ส่วนกรณีอื่นให้ทำในขั้นตอนที่ 3

- 3) สร้างเมตริกซ์  $[A]$  และเวกเตอร์กระแสเกิน  $[\Delta I]$   
 4) คำนวณหาค่าเพิ่มขึ้นของมุมเฟสและขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสโดยใช้สมการที่ 3.22

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \dots \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & \\ & A & \\ & & \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \\ \Delta I \\ \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

- 5) คำนวณหา  $[\Delta P/V]$  และ  $[\Delta Q/V]$  โดยใช้สมการที่ 3.23 และ 3.24

$$[\Delta P/V] = [B'][\Delta \delta] \quad (3.23)$$

$$[\Delta Q/V] = [B''][\Delta V] \quad (3.24)$$

- 6) คำนวณหาการจัดสรรกำลังผลิตและโหลดใหม่  
 7) คำนวณหาค่าของตัวแปรสถานะใหม่ โดยใช้ค่าเพิ่มขึ้นของมุมเฟสและขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ได้จากขั้นตอนที่ 4

- 8) จำนวนโหลดโพลาร์โดยใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัส, กำลังผลิตและโหลดค่าล่าสุด แล้วกลับไปยังขั้นตอนที่ 2
- 9) ตัดโหลดที่บัสที่ต่ออยู่กับสายส่งที่มีโหลดเกินซึ่งกำลังไฟฟ้าไหลเข้าสู่บัสนั้น เป็นจำนวนเท่ากับ MVA ที่เกิน และลดกำลังผลิตที่บัสที่ต่อกับสายส่งนั้นซึ่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่สายส่ง เป็นจำนวน MVA ที่เกิน
- 10) ค้นหา กำลังผลิตที่บัสสวิง ถ้าไม่เกินค่าพิกัดจะจบการค้นหา แต่ถ้าเกินค่าพิกัด ให้ตัดโหลดที่บัสสวิง และ/หรือ บัสที่กำลังไฟฟ้าไหลไปจากบัสสวิง (บัสที่ต่อกับบัสสวิง)

สำหรับรายละเอียดของวิธีการจัดสรรกำลังผลิตใหม่และการตัดโหลดเพื่อรองรับปัญหาสายส่งมีโหลดเกินนี้ได้แสดงไว้ในเอกสารอ้างอิง [2] ซึ่งจะได้แสดงรายละเอียดอีกครั้งหนึ่ง ในภาคผนวก ข

### 3.8 วิธีการตัดโหลด(Load curtailment philosophy)

เนื่องจากในสถานะการเกิดเหตุการณ์ขัดข้องของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่บางสถานะ ซึ่งมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายเครื่องเกิดขัดข้องพร้อมกัน อาจจะทำให้กำลังการผลิตรวมของระบบไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า (ความต้องการโหลด) ของระบบ ในทางปฏิบัติ การแก้ไขปัญหาดังกล่าวสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตัวแปรประกอบสำคัญหลายอย่าง เช่น ความสำคัญของจุดโหลดในแต่ละจุดโหลดหรือพื้นที่ ขนาดของจุดโหลดแต่ละบัส เป็นต้น โดยตัวแปรดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้ในการปลด/ตัดโหลดบางส่วนออกจากระบบ(Load shedding) เพื่อช่วยรักษาสถานภาพของกำลังการผลิตและความต้องการโหลดในระบบให้มีความสมดุล ซึ่งมาตรการโดยทั่วไปดังกล่าว เพื่อใช้แก้ไขในกรณีกำลังการผลิตไม่เพียงพอเรียกว่า "วิธีการตัดโหลด" (Load curtailment philosophy) ดังนั้นวิธีการตัดโหลดในระบบไฟฟ้าแต่ละระบบจะมีวิธีการเฉพาะที่เหมาะสม แต่แนวความคิดหลักยังคงมีหลักการที่คล้ายกัน การเปรียบเทียบค่าดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด จะแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เมื่อกำหนดวิธีการตัดโหลดไม่เหมือนกัน สำหรับการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธีการตัดโหลดดังนี้

#### 3.8.1 จัดแบ่งความสำคัญของโหลดออกเป็น 3 ระดับได้แก่

3.8.1.1) โหลดที่สามารถตัดได้ (Interruptible/Curtailable Load) หมายถึง โหลดที่ไม่มีความสำคัญ ดังนั้นสามารถตัดได้ทันทีเมื่อระบบเกิดปัญหาโดยที่ผู้ใช้ไฟฟ้าไม่ได้เกิดความเสียหายมากนัก โหลดชนิดนี้จะกำหนดเป็น 2 ลักษณะ คือ

- Non-Conforming of Interruptible Load จะกำหนดเป็น MW
- Conforming of Interruptible Load จะกำหนดเป็นค่าร้อยละ (%)

ดังนั้นโหลดที่สามารถตัดได้ทั้งหมดจะมีค่า

$$\text{Interruptible} = \text{Non-Conform (MW)} + [\text{Load} - \text{Non-Conform (MW)}] * \text{conform (\%)} / 100$$

3.8.1.2) โหลดหลัก (Firm Load) หมายถึงโหลดที่มีความสำคัญมากกว่าโหลดที่สามารถตัดได้ การตัดโหลดประเภทนี้จะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ในระดับปานกลาง โหลดชนิดนี้จะกำหนดเป็น 2 ลักษณะเช่นกันได้แก่

- Non-Conforming of Firm Load จะกำหนดเป็น MW
- Conforming of Firm Load จะกำหนดเป็นค่าร้อยละ (%)

ดังนั้นโหลดหลักทั้งหมดจะมีค่า

$$\text{Firm} = \text{Non-Conform (MW)} + [\text{Load} - \text{Interruptible} - \text{Non-Conform (MW)}] * \text{conform (\%)} / 100$$

3.8.1.3) โหลดวิกฤติ (Critical Load) หมายถึงโหลดที่มีความสำคัญสูงสุด การตัดโหลดประเภทนี้จะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้มากที่สุด ดังนั้นโหลดวิกฤติทั้งหมดจะมีค่า

$$\text{Critical} = \text{Load} - \text{Interruptible} - \text{Firm}$$

3.8.2 กรณีที่เกิดเหตุขัดข้องแล้วทำให้กำลังการผลิตรวมของระบบไม่เพียงพอต่อความต้องการโหลดของระบบ จะทำการตัดโหลดเรียงตามลำดับดังนี้

3.8.2.1 Non-Conforming of Interruptible Load

3.8.2.2 Conforming of Interruptible Load

3.8.2.3 Non-Conforming of Firm Load

3.8.2.4 Conforming of Firm Load

3.8.2.5 Critical Load

3.8.3 กรณีเกิดการขัดข้องในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้วทำให้ระบบกำลังการผลิตไม่เพียงพอจ่ายโหลดจะตัดโหลดที่บัสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ ถ้าไม่เพียงพอให้ตัดโหลดที่บัสถัดไปที่เชื่อมด้วยสายส่ง 1 เส้นกับบัสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ ซึ่งจุดโหลดดังกล่าวรับกำลังไฟฟ้าจากบัสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดการขัดข้อง ถ้ายังไม่พออีกให้ตัดโหลดที่บัสที่เหลือเป็นสัดส่วนกับโหลดที่บัสนั้น ๆ

3.8.4 กรณีเกิดการขัดข้องในสายส่งกำลังไฟฟ้าแล้วจำเป็นจะต้องมีการตัดโหลดออกจากระบบจะตัดโหลดที่บัสที่เชื่อมต่อด้านปลายของสายส่งที่เกิดการขัดข้อง (Receiving-end buses) ถ้าไม่เพียงพอก็ตัดโหลดที่บัสถัดไปที่เชื่อมด้วยสายส่ง 1 เส้น ซึ่งรับกำลังไฟฟ้าจากบัสที่เชื่อมต่อด้านปลายของสายส่งที่เกิดการขัดข้อง และถ้าไม่เพียงพออีกก็ให้ตัดโหลดที่บัสถัดไปที่เชื่อมต่อด้านปลายของสายส่งอีกเส้น ซึ่งรับกำลังไฟฟ้าจากบัสที่เชื่อมต่อด้านปลายของสายส่งที่เกิดการขัดข้อง

3.8.5 กรณีเกิดการขัดข้องทั้งในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสายส่งกำลังไฟฟ้า วิธีการตัดโหลดจะครอบคลุมในกรณีทีแสดงในข้อ 3.8.3 และ 3.8.4

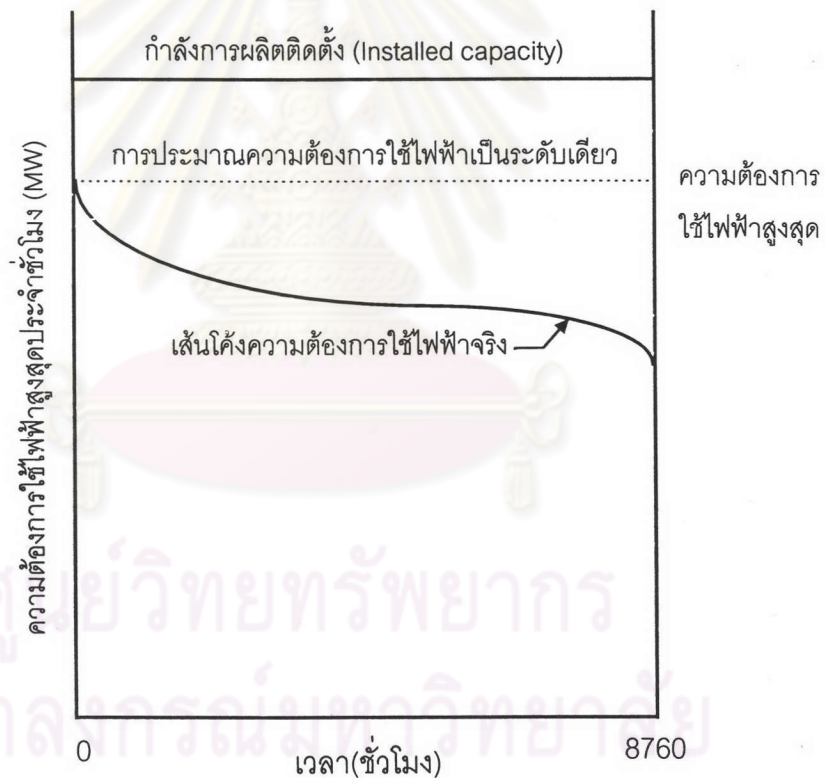
### 3.9 การคำนวณค่าดัชนีความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่

ในการคำนวณค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง หากแบบจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้าแทนด้วยค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าเพียงระดับเดียว [9] ซึ่งอ้างอิงบนแบบจำลองของคาบเวลา 1 ปีที่ทำการศึกษาดังรูปที่ 3.3 ดัชนีความเชื่อถือได้จะเรียกว่า ค่าดัชนีประจำปี (Annualized indices) ซึ่งโดยปกติแล้วค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าระดับเดียวที่กำหนดจะเป็นค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดประจำปี (Annual peak load) ค่าดัชนีที่คำนวณได้จะสูงกว่าค่าดัชนีรายปี (Annual indices) ซึ่งคำนวณโดยใช้แบบจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้าแบบหลายระดับซึ่งเกิดจากการประมาณเส้นโค้ง Load duration curve ดังแสดงในรูปที่ 3.4 สำหรับการคำนวณเมื่อใช้แบบจำลองโหลดหลายระดับนั้นจะมีลักษณะเหมือนกับการคำนวณโดยใช้แบบจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้าระดับเดียวแต่แตกต่างตรงที่ว่าจะต้องทำการคำนวณหลายรอบมากกว่า ซึ่งจำนวนรอบนี้ก็ขึ้นอยู่กับการประมาณระดับโหลดว่ามีกี่ระดับ ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการคำนวณค่าดัชนีความเชื่อถือได้โดยใช้แบบจำลองโหลดหลายระดับจึงมากกว่า แต่มีข้อดีที่ว่าค่าดัชนีที่ได้จะมีความถูกต้อง ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น

สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้แบบจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้าระดับเดียว เพื่อหาค่าดัชนีประจำปีโดยที่ค่าดัชนีความเชื่อถือได้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

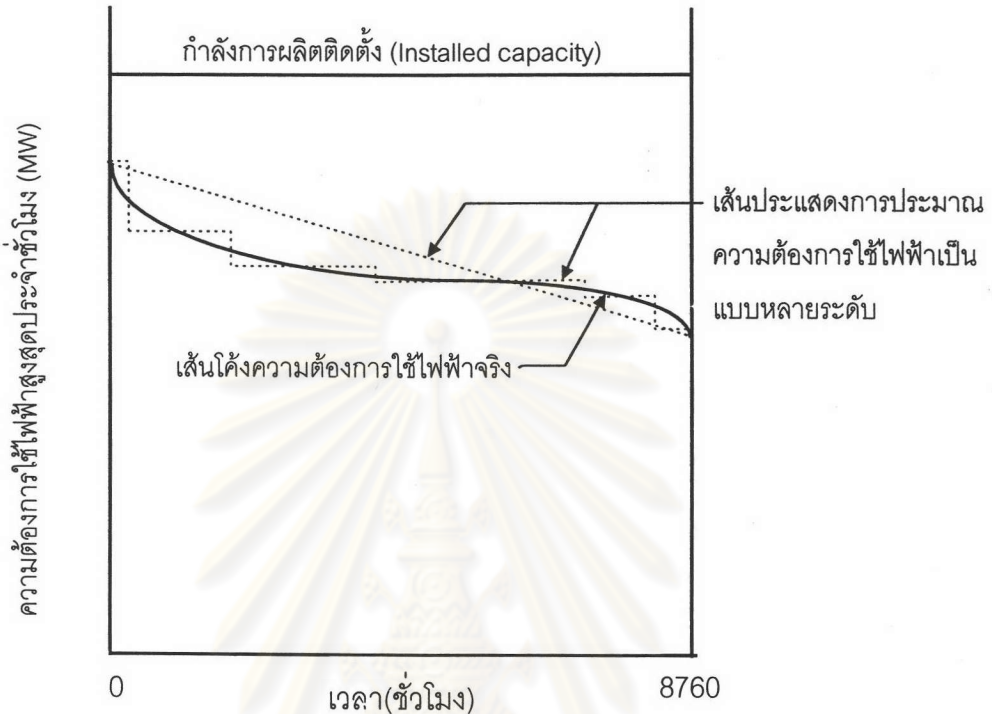
3.9.1) ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของจุดโหลด (Load point indices) แสดงถึงความน่าจะเป็น และความถี่ที่บัสนั้น ๆ จะเกิดการขัดข้องโดยไม่ได้รับกำลังไฟฟ้าอย่างเพียงพอ เพื่อการตอบสนองของโหลดที่บัส

3.9.2) ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของทั้งระบบ (Overall system indices) ได้จากการรวมผล (Aggregate) ของค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของจุดโหลดทั้งระบบ



รูปที่ 3.3 แบบจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้าระดับเดียว (Single-step load model)





รูปที่ 3.4 แบบจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้าหลายระดับ (Multi-step load model)

ปกติค่าทั้งสองนี้ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าร่วมกัน โดยค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของจุดโหลดจะแสดงถึงความพอเพียงของกำลัง และพลังงานไฟฟ้าที่จะจ่ายให้กับโหลดที่แต่ละบัสในระบบ และชี้ให้เห็นบัสที่เป็นจุดอ่อน หรือจุดแข็งของระบบ ส่วนค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบจะแสดงถึงความเพียงพอของกำลังการผลิตของระบบ ที่สามารถส่งผ่านระบบสายส่งไปจ่ายให้กับโหลดทั้งหมดของระบบ

ตารางที่ 3.1 และ 3.2 แสดงค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของจุดโหลด และของระบบที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน [1,2,9,12] โดยใช้แบบจำลองระดับเดียว อย่างไรก็ตามค่าดัชนีที่นิยมใช้ในการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบผลิตและส่งไฟฟ้า ทั้งของจุดโหลดและระบบ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่จะแสดงในหัวข้อที่ 3.9.3 และ 3.9.4 ตามลำดับ

### 3.4.3 การคำนวณค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของจุดโหลด (Load point indices calculation)

- ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความล้มเหลวที่บัส k (Probability of failure at bus k)

$$Q_k = \sum P_j P_{kj}$$

- ความถี่ที่จะเกิดความล้มเหลวที่บัส k (Frequency of failure at bus k)

$$F_k = \sum F_j P_{kj}$$

เมื่อ j คือ สถานะการเกิดเหตุขัดข้องของระบบ

$P_j$  คือ ความน่าจะเป็นที่จะเกิดของสถานะที่ j

$F_j$  คือ ความถี่ของการเกิดของสถานะที่ j

$P_{kj}$  คือ ความน่าจะเป็นของโหลดที่บัส k ซึ่งมีค่าเกินกว่าโหลดสูงสุดที่บัสจะสามารถได้รับจากสถานะที่ j

- จำนวนครั้งของการเกิดปัญหาในระบบเนื่องจากแรงดันผิดปกติ (Expected Number of Voltage Violation)

$$ENVV = \sum_{j \in V} F_j$$

- จำนวนครั้งที่จะต้องลด/ ตัดโหลด (Expected Number of Load Curtailments)

$$ENLC = \sum_{j \in x,y} F_j$$

- ค่าโหลดที่คาดว่าจะถูกตัดลดลง (Expected Load Curtailed)

$$ELC(\text{MW/year}) = \sum_{j \in x,y} L_{kj} F_j$$

---

ตารางที่ 3.1 ค่าดัชนีประจำปีของจุดโหลด (Annualized load point indices)

---

*Basic values*

- Probability of failure
- Expected frequency of failure
- Expected number of voltage violations
- Expected number of load curtailments
- Expected load curtailed
- Expected energy not supplied
- Expected duration of load curtailment

*Maximum values*

- Maximum load curtailed
- Maximum energy curtailed
- Maximum duration of load curtailment

*Average values*

- Average load curtailed
- Average energy not supplied
- Average duration of curtailment

*Bus isolation values*

- Expected number of load curtailment
  - Expected load curtailed
  - Expected energy not supplied
  - Expected duration of load curtailment
-

---

ตารางที่ 3.2 ค่าดัชนีประจำปีของระบบ (Annualized system indices)

---

*Basic values*

Bulk power interruption index

Bulk power supply average MW curtailment/disturbance

Bulk power energy curtailment index

Modified bulk power energy curtailment index

*Average values*

Average number of curtailments/load point

Average load curtailed/load point

Average energy curtailed/load point

Average duration of load curtailment/load point

Average number of voltage violations/load point

*Maximum values*

Maximum system load curtailed under any contingency condition

Maximum system energy not supplied under any contingency condition

---

- ค่าพลังงานที่คาดว่าจะไม่สามารถจัดสรรให้โหลดได้ (Expected Energy Not Supplied)

$$EENS(\text{MWh/year}) = \sum_{j \in x,y} L_{kj} P_j \times 8760$$

$$= \sum_{j \in x,y} L_{kj} F_j D_{kj}$$

- ช่วงเวลาที่คาดว่าจะระบบจะได้รับกำลังไฟฟ้าไม่เพียงพอ (Expected Duration of Load Curtailment)

$$EDLC(\text{hours}) = \sum_{j \in x,y} P_j \times 8760$$

เมื่อ  $j \in V$  หมายถึง ทุกเหตุการณ์ที่ทำให้แรงดันที่บัส  $k$  ไม่อยู่ในช่วงที่ได้กำหนดไว้

$j \in x$  หมายถึง ทุกเหตุการณ์ที่ทำให้สายส่งมีโหลดเกินซึ่งจะถูกแก้ไขปัญหาโดยการตัดโหลดที่บัส  $k$

$j \in y$  หมายถึง ทุกเหตุการณ์ที่ทำให้บัส  $k$  แยกออกจากระบบ

$L_{kj}$  หมายถึง ค่าโหลดที่ถูกตัด (Curtailed Load) ที่บัส  $k$  เพื่อช่วยแก้ปัญหาสายส่งมีโหลดเกินเนื่องจากการเกิดเหตุการณ์ที่สถานะ  $j$  หรือจุดโหลดที่ไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าเนื่องจากการแยกออกจากระบบที่บัส  $k$  อันเนื่องมาจากเกิดเหตุการณ์ที่สถานะ  $j$

$D_{kj}$  หมายถึง ระยะเวลาเป็นชั่วโมงของการตัดโหลดที่บัส  $k$  เนื่องจากการเกิดเหตุการณ์ที่สถานะ  $j$  หรือระยะเวลาเป็นชั่วโมงของการตัดโหลดที่บัส  $k$  เนื่องจากการแยกออกจากระบบที่บัส  $k$  อันเนื่องมาจากเกิดเหตุการณ์ที่สถานะ  $j$

- ค่าเฉลี่ยของโหลดที่ต้องลดหรือตัดออก (Average Load Curtailed)

$$ALC(\text{MW/curtailment}) = \frac{\sum_{j \in x,y} L_{kj} F_j}{\sum_{j \in x,y} F_j}$$

- พลังงานเฉลี่ยที่จ่ายไม่ได้ (Average Energy Not Supplied)

$$AENS(\text{MWh/curtailment}) = \frac{\sum_{j \in x,y} L_{kj} P_j \times 8760}{\sum_{j \in x,y} F_j}$$

- ช่วงเวลาเฉลี่ยของการลดหรือตัดโหลดออก (Average Duration of Load Curtailment)

$$\text{ADLC(hours/curtailment)} = \frac{\sum_{j \in x,y} P_j \times 8760}{\sum_{j \in x,y} F_j}$$

### 3.3.4 การคำนวณค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของทั้งระบบ (Overall system indices calculation)

ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบทั้งหมด อาจหาได้จากดัชนีความเชื่อถือได้ที่จุดโหลด โดยนำมารวมกันเพื่อให้ได้ดัชนีของระบบ ค่าดัชนีเหล่านี้ประกอบด้วย

- ดัชนีการขัดจังหวะพลังไฟฟ้าจำนวนมาก (Bulk Power Interruption Index)

$$\text{BPPI(MW/MW-year)} = \frac{\sum_k \sum_{j \in x,y} L_{kj} F_j}{L_s}$$

- ค่าเฉลี่ยพลังไฟฟ้าจำนวนมากที่ตัดออกคิดเป็น MW ต่อครั้ง (Bulk Power Supply Average MW Curtailment/Disturbance)

$$\text{BPSAC(MW/disturbance)} = \frac{\sum_k \sum_{j \in x,y} L_{kj} F_j}{\sum_{j \in x,y} F_j}$$

- ดัชนีการตัดพลังงานจำนวนมากออก (Bulk Power/Energy Curtailment Index)

$$\text{BPECI(MWh/MW-year)} = \frac{\sum_k \sum_{j \in x,y} L_{kj} P_j \times 8760}{L_s}$$

- ดัชนีการตัดพลังงานจำนวนมากที่ปรับปรุงแล้ว (Modified Bulk Power/Energy Curtailment Index)

$$\text{MBECI(MW/MW-year)} = \frac{\sum_k \sum_{j \in x,y} L_{kj} P_j}{L_s}$$

- ดัชนีความรุนแรง (Severity Index)

$$\text{SI(System-Mins)} = \frac{\sum_k \sum_{j \in x,y} L_{kj} P_j * 8760 * 60}{L_s}$$

เมื่อ  $L_s$  คือ โหลดทั้งหมดของระบบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย