

บทที่ 3

วิธีการคำนวณจุดวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากเนื้อหาในบทที่ 1 และบทที่ 2 ซึ่งเป็นการอธิบายความหมายและวิธีการต่างๆทั้งหมดที่ใช้ในการแก้ปัญหาการคำนวณหาจุดวิกฤติของระบบอย่างคร่าวๆ ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการที่ใช้ในการคำนวณหาจุดวิกฤติ และวิธีที่เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้โดยละเอียด ดังต่อไปนี้

3.1 โหลดโฟลว์แบบนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Load Flow)

การคำนวณโหลดโฟลว์แบบดั้งเดิมซึ่งอาศัยวิธีการ นิวตัน-ราฟสัน เป็นวิธีการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของโหลดโฟลว์ที่บัสต่างๆในระบบ อันประกอบด้วย ขนาดของแรงดัน (Voltage Magnitude) ขนาดของมุมเฟส (Phase Angle) กำลังจริง (Real Power) กำลังรีแอกทีฟ (Reactive Power) โดยรายละเอียดของการคำนวณโดยวิธีการดังกล่าวพอจะสรุปได้ดังต่อไปนี้

จากสมการของกำลังที่บัส P

$$P_p - jQ_p = E_p^* I_p \quad (3.1)$$

โดยที่ P_p เป็นกำลังจริงที่ไหลเข้าสู่บัส P

Q_p เป็นกำลังรีแอกทีฟที่ไหลเข้าสู่บัส P

E_p เป็นขนาดของแรงดัน ณ บัส P ซึ่งสามารถ

แสดงอยู่ในรูปของ $E_p = e_p + j f_p$

และกระแสที่แต่ละบัสสามารถจะใช้แทนได้ในรูปของแรงดัน และค่าแอดมิตแตนซ์สมการที่ (3.2)

$$I_{BUS} = Y_{BUS} E_{BUS} \quad (3.2)$$

โดยที่ Y_{bus} คือเมตริกซ์ที่แสดงค่าแอดมิตแตนซ์ของระบบทดสอบ ที่ตำแหน่งระหว่างบัส P กับ

บัส Q ซึ่งสามารถเขียนได้รูป

$$Y_{bus} = G_{PQ} - jB_{PQ}$$

เมื่อนำสมการที่ (3.2) แทนลงในสมการที่ (3.1) จะได้

$$P_p - jQ_p = (e_p - jf_p) \sum_{q=1}^n (G_{pq} - jB_{pq})(e_q + jf_q) \quad (3.3)$$

หากต้องการที่จะแยกส่วนที่เป็นกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟออกจากกันจะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.4

$$P_p = \sum_{q=1}^n \{e_p(e_q G_{pq} + f_q B_{pq}) + f_p(f_q G_{pq} - e_q B_{pq})\} \quad (3.4)$$

$$Q_p = \sum_{q=1}^n \{f_p(e_q G_{pq} + f_q B_{pq}) + e_p(f_q G_{pq} - e_q B_{pq})\}$$

จากสมการต่าง ๆ ที่ (3.1) - (3.4) นั้นในกรณีของระบบที่มี n บัสจะทำให้เกิดสมการทั้งสิ้น $2(n-1)$ สมการ โดยบัสที่ไม่ต้องนำมาใช้ในการคำนวณเบื้องต้น คือ บัสที่ใช้อ้างอิง หรือ Slack Bus หลังจากจัดรูปของสมการเข้าอยู่ในรูปของเมตริกซ์และทำการหาอนุพันธ์ เทียบกับแรงดันของบัสจะได้เมตริกซ์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังจริง กำลังรีแอกทีฟ ทีฟและแรงดันของบัส หรือที่จะเรียกว่า จาโคเบียนเมตริกซ์ (Jacobian Matrix) ดังต่อไปนี้

ΔP_1	$\frac{\partial P_1}{\partial e_1}$	\dots	$\frac{\partial P_1}{\partial e_{n-1}}$	$\frac{\partial P_1}{\partial e_1}$	\dots	$\frac{\partial P_1}{\partial e_{n-1}}$	Δe_1
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
ΔP_n	$\frac{\partial P_{n-1}}{\partial e_1}$	\dots	$\frac{\partial P_{n-1}}{\partial e_{n-1}}$	$\frac{\partial P_{n-1}}{\partial e_1}$	\dots	$\frac{\partial P_{n-1}}{\partial e_{n-1}}$	Δe_{n-1}
ΔQ_1	$\frac{\partial Q_1}{\partial e_1}$	\dots	$\frac{\partial Q_1}{\partial e_{n-1}}$	$\frac{\partial Q_1}{\partial e_1}$	\dots	$\frac{\partial Q_1}{\partial e_{n-1}}$	Δe_1
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
ΔQ_{n-1}	$\frac{\partial Q_{n-1}}{\partial e_1}$	\dots	$\frac{\partial Q_{n-1}}{\partial e_{n-1}}$	$\frac{\partial Q_{n-1}}{\partial e_1}$	\dots	$\frac{\partial Q_{n-1}}{\partial e_{n-1}}$	Δe_{n-1}

(3.5)

ซึ่งจะสังเกตได้ว่า จาร์โคเบียนเมตริกซ์ที่แสดงตามสมการที่ (3.5) จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วนย่อย ๆ ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

จากสมการที่ (3.6) เราจะสามารถคำนวณค่าโดยละเอียดของจาร์โคเบียนเมตริกซ์ J1 J2 J3 และ J4 ได้ดังต่อไปนี้

จาร์โคเบียน J1

การพิจารณาจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของค่าเมตริกซ์ย่อยที่ไม่ได้อยู่ในแนวทแยงหลักและที่อยู่ในแนวทแยงหลักดังรายละเอียดมีดังนี้

ส่วนของค่าของเมตริกซ์ย่อยที่ไม่ได้อยู่ตามแนวทแยงหลัก (Diagonal)

$$\frac{\partial P_p}{\partial e_q} = e_p G_{pq} - f_p B_{pq} \quad (3.7)$$

สำหรับค่าของเมตริกซ์ย่อยตามแนวทแยงหลัก

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_p}{\partial e_p} &= 2e_p G_{pp} + f_p B_{pp} - f_q B_{pq} + \sum_{q=1}^n (e_p G_{pq} + f_q B_{pq}) \\ \frac{\partial P}{\partial f_q} &= e_p B_{pq} + f_p G_{pq} \end{aligned} \quad (3.8)$$

จาร์โคเบียน J2

ส่วนของค่าของเมตริกซ์ย่อยที่ไม่ได้อยู่ตามแนวทแยงหลัก (Diagonal)

$$\frac{\partial P}{\partial f_q} = e_p B_{pq} + f_p G_{pq} \quad (3.9)$$

สำหรับค่าของเมตริกซ์ย่อยที่อยู่ตามแนวทแยงหลัก

$$\frac{\partial P_p}{\partial f_p} = e_p B_{pp} + 2f_p G_{pp} - e_p B_{pq} + \sum_{q=1}^n (f_q G_{pq} - e_q B_{pq}) \quad (3.10)$$

จาร์โคเบียน J3

ส่วนของค่าของเมตริกซ์ย่อยที่ไม่ได้อยู่ตามแนวทแยงหลัก (Diagonal)

$$\frac{\partial Q_p}{\partial f_q} = e_p B_{pq} + f_p G_{pq} \quad q \neq p \quad (3.11)$$

ส่วนค่าของเมตริกซ์ย่อยที่อยู่ตามแนวทแยงหลัก

$$\frac{\partial Q_p}{\partial e_p} = f_p G_{pq} - 2f_p G_{pp} - e_p B_{pp} - \sum_{q=1}^n (f_q G_{pq} - e_q B_{pq}) \quad (3.12)$$

จาร์โคเบียน J4

ส่วนของค่าของเมตริกซ์ย่อยที่ไม่ได้อยู่ตามแนวทแยงหลัก (Diagonal)

$$\frac{\partial Q_p}{\partial f_q} = -e_p G_{pq} + f_p B_{pq} \quad q \neq p \quad (3.13)$$

ส่วนค่าของเมตริกซ์ย่อยที่อยู่ตามแนวทแยงหลัก

$$\frac{\partial Q_p}{\partial e_p} = e_p G_{pp} + 2f_p B_{pp} - e_p G_{pp} + \sum_{q=1}^n (e_q G_{pq} + f_q B_{pq}) \quad (3.14)$$

เมื่อนำค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.7) ถึง (3.14) แทนลงในสมการที่ (3.6) จะพบว่า หากพิจารณาตามสมการที่ (3.5) นั้นยังปรากฏว่ามีส่วนที่ยังรอการหาค่าอยู่อีก 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นค่าผิดพลาดของกำลังจริง (ΔP) และกำลังรีแอกทีฟ (ΔQ) ที่ต้องการ กับส่วนที่เป็นค่าผิดพลาดของแรงดัน (ΔE)

เมื่อทำการแทนค่าของแรงดันที่กำหนดขึ้นในขั้นเริ่มแรกของการคำนวณและค่าของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ ลงในสมการที่ (3.4) จะสามารถคำนวณค่ากำลังจริง และกำลังรีแอกทีฟของแต่ละบัส ซึ่งเมื่อเทียบกับกำลังจริง และกำลังรีแอกทีฟที่กำหนด $P_p(\text{Scheduled})$ $Q_p(\text{Scheduled})$ แล้วจะทำให้สามารถคำนวณค่าผิดพลาดของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟได้ดังต่อไปนี้

แต่ละบัส ซึ่งเมื่อเทียบกับกำลังจริง และกำลังรีแอกทีฟที่กำหนด $P_p(\text{Scheduled})$ $Q_p(\text{Scheduled})$) แล้วจะทำให้สามารถคำนวณค่าผิดพลาดของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\Delta P_p^k &= P_{p(\text{scheduled})} - P_p^k \\ \Delta Q_p^k &= Q_{p(\text{scheduled})} - Q_p^k\end{aligned}\quad (3.15)$$

เมื่อนำสมการดังกล่าวแทนลงในสมการที่ (3.5) ประกอบกับการแก้สมการโดยอาศัยหลักการของการอินเวอร์สเมตริกซ์ จะสามารถหาค่าผิดพลาดของแรงดันได้ดังสมการที่ (3.16) - (3.18) ดังแสดงต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta e_1 \\ \vdots \\ \Delta e_{n-1} \\ \Delta f \\ \vdots \\ \Delta f_{n-1} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_{n-1} \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta P_{n-1} \end{bmatrix}\quad (3.16)$$

เมื่อหาค่าผิดพลาดของแรงดันได้จะนำไปรวมกับค่าแรงดันเดิมเพื่อให้ค่าถูกต้องขึ้นดังสมการ

$$e_p^{k+1} = e_p^k + \Delta e_p^k \quad (3.17)$$

$$f_p^{k+1} = f_p^k + \Delta f_p^k \quad (3.18)$$

สำหรับเงื่อนไขที่ใช้หยุดการทำงานของโปรแกรม คือ ค่าผิดพลาดของพลังงานไฟฟ้าจะต้องอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ โดยในกรณีนี้จะต้องมีการตั้งค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ (ϵ) ขึ้นมาก่อน ซึ่งค่าจะมากหรือน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับต้องการความละเอียดของผลการคำนวณที่ต้องการ โดยทั่วไปจะใช้ 0.01 PU

วิธีการคำนวณโหลดฟลัวร์ธรรมดานอกจากจะมีวิธีการของนิวตัน-ราฟสันแล้วยังมีวิธีอื่นๆ อีก เช่น วิธีการโหลดฟลัวร์ของเกาส์-ไซเดล (Gauss-Seidel Loadflow) หรือวิธีการโหลดฟลัวร์แบบฟาสต์-ดีคัปเปิล (Fast Decouple Loadflow) แต่วิธีการแบบเกาส์-ไซเดลนั้นสำหรับระบบขนาดใหญ่แล้วจะต้องใช้เวลาในการคำนวณที่มากเกินไป ขณะที่วิธีการแบบฟาสต์-ดีคัปเปิลถึงแม้

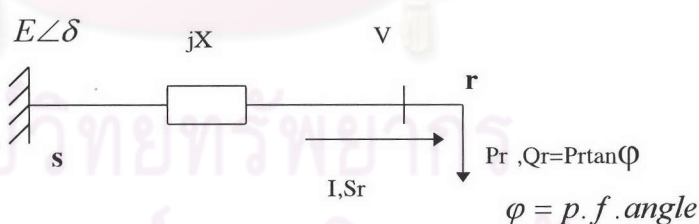
จะเป็นวิธีที่คำนวณได้เร็วแต่ก็มีข้อเสีย จะได้คำตอบที่มีความผิดพลาดมากกว่าวิธีอื่น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่กล่าวถึงทั้งสองวิธีดังกล่าว

3.2 วิธีโหลดโพลว์แบบต่อเนื่อง [6,11]

วิธีนี้เป็นการพัฒนาต่อเนื่องจากวิธีการคำนวณโหลดโพลว์แบบนิวตัน-ราฟสันมาโดยมีรายละเอียดของวิธีการดังกล่าวมีดังต่อไปนี้

3.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกราฟของกำลังจริงและแรงดันไฟฟ้า (P-V Curves) [5]

การวัดความสามารถในการจ่ายโหลด (Load ability) โดยการพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโหลด กับแรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่พิจารณา ในกรณีระบบขนาดใหญ่ที่มีจำนวนบัสมากๆ หากทำการเลือกบัสใดบัสหนึ่งขึ้นมาเป็นตัวแทนของระบบ โดยทั่วไปบัสที่ถูกเลือกขึ้นมาี้มักจะเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดของระบบ (Weakest Bus) ซึ่งการเลือกบัสดังกล่าวนี้มีวิธีการคัดเลือกจากหลักการที่ว่า ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ซึ่งมีการต่อถึงกันอยู่ตลอด การเพิ่มขึ้นของโหลด ณ บัสใดบัสหนึ่งจะส่งผลกระทบต่อบัสอื่นๆ ด้วย และเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ บัสที่อ่อนแอที่สุดย่อมจะเป็นบัสที่เข้าสู่จุดวิกฤติก่อน นั่นคือจะส่งผลกระทบต่อระบบเกิดการพังทลายของแรงดันได้ จากเหตุผลดังกล่าวจึงสามารถนำบัสที่อ่อนแอที่สุดในระบบมาเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลัง และแรงดันไฟฟ้า เมื่อพิจารณาตามวงจรสมมูลย์ของระบบไฟฟ้ากำลังดังรูปที่ 3.1 จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังจริงกับแรงดันและกำลังรีแอกทีฟกับแรงดันได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แสดงระบบที่ใช้คำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟกับแรงดัน

พิจารณาค่ากำลังปรากฏ ณ บัส r (Receiving End Bus)

$$S_r = P_r + jQ_r = \bar{V} I^*$$

จัดรูปของสมการโดยการแยกส่วนจริง (Real Part) และส่วนจินตภาพ (Imaginary Part) ออกจากกันจะได้

$$S_r = \frac{EV}{X} \sin \delta + j \left[\frac{EV \cos \delta - V^2}{X} \right]$$

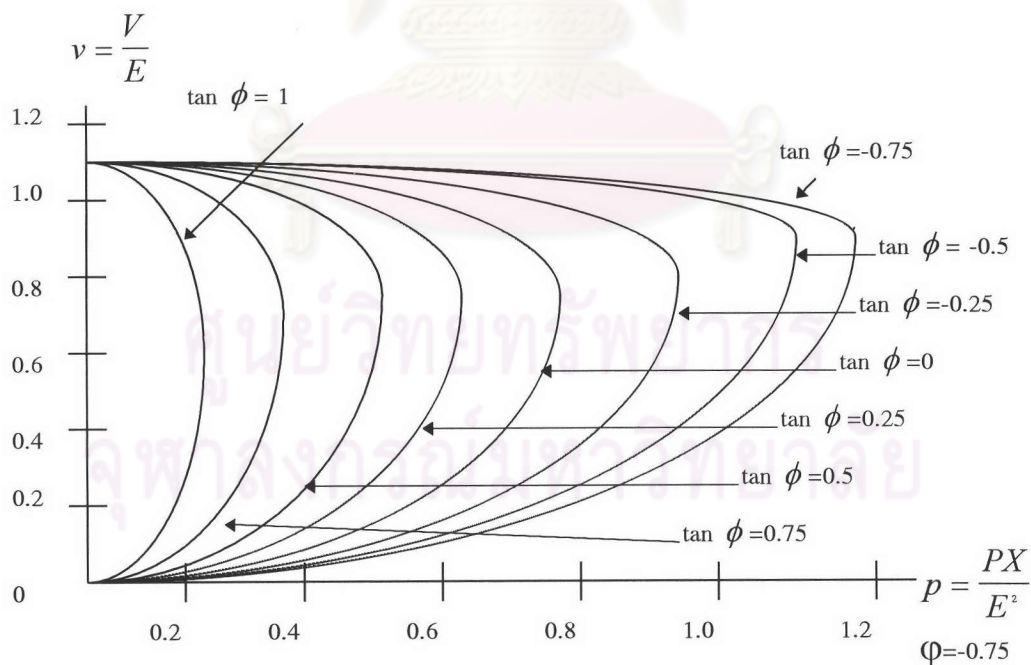
นั่นคือ สมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังจริงกับแรงดัน

$$P = \frac{EV}{X} \sin \delta \quad (3.19)$$

และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรีแอกทีฟกับแรงดัน

$$Q = \frac{EV \cos \delta}{X} - \frac{V^2}{X} \quad (3.20)$$

จากสมการที่ (3.19) เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดจริง จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังแสดงตามรูปที่ 3.2

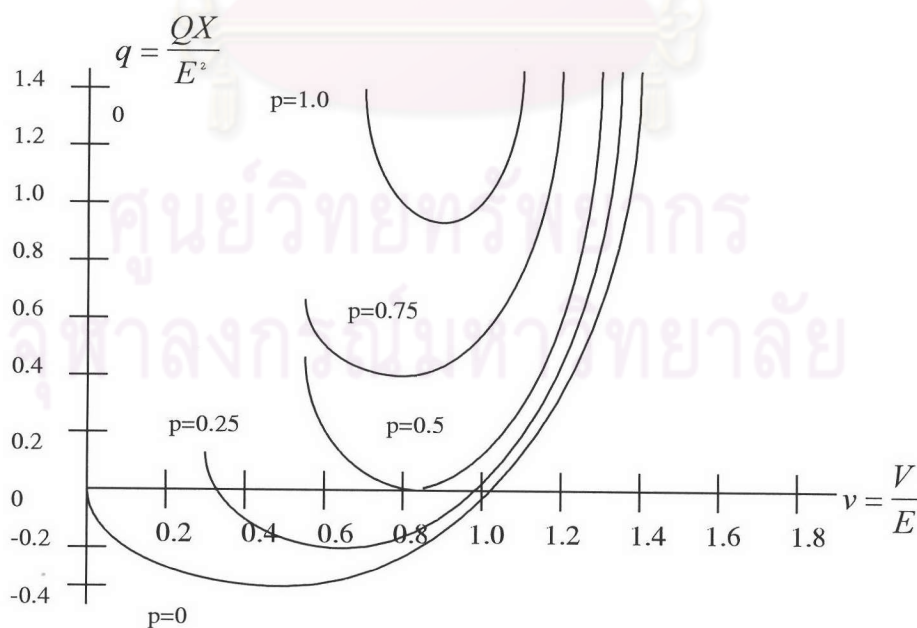


รูปที่ 3.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังจริงกับแรงดันที่ ค่าตัวประกอบกำลังต่างๆ

เมื่อสังเกตจากกราฟจะพบว่าจุดทำงาน (Operating Point) ของระบบมีทั้งจุดทำงานของระบบก่อนที่จะถึงจุดวิกฤติและ จุดทำงานของระบบเมื่อผ่านจุดวิกฤติไปแล้ว ซึ่งตามความเป็นจริงเมื่อระบบผ่านจุดวิกฤติไปแล้วจะไม่สามารถหาค่าของจุดทำงานได้อีกเพราะระบบได้สูญเสียเสถียรภาพไปแล้ว แต่ในที่นี้ได้ แสดงจุดทำงานดังกล่าวเอาไว้ เพื่อใช้ประกอบการหาค่าขอบเขตที่ปลอดภัย (Safety Margin) ของการปฏิบัติงาน เมื่อโหลดมีค่าเพิ่มขึ้น

3.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรีแอกทีฟกับแรงดันไฟฟ้า (Q-V Curve)

การใช้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรีแอกทีฟและแรงดันไฟฟ้าในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้านแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังจะใช้ในแง่ของการวิเคราะห์ความทนทานของระบบ(System Robustness) ตลอดจนใช้ การวิเคราะห์ขอบเขตระหว่างค่ากำลังรีแอกทีฟของโหลดและ ค่ากำลังรีแอกทีฟของจุดวิกฤติและศึกษาถึงผลกระทบเมื่อมีการชดเชยกำลังรีแอกทีฟให้แก่ระบบ โดยจุดที่พิจารณานั้นกำลังจริงมีค่าคงที่ที่ค่าใดค่าหนึ่งซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังจริงกับแรงดันแล้วจะสามารถแสดงรายละเอียดที่ต้องการได้น้อยกว่า ดังนั้นในวิทยานิพนธ์เรื่องนี้จะไม่อ้างอิงถึงกราฟดังกล่าว กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรีแอกทีฟกับแรงดัน จะเป็นไปตามสมการที่ (3.20) และ สามารถแสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้เป็นไปดังสมการตามรูปที่ (3.3) ต่อไปนี้



รูปที่ 3.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรีแอกทีฟกับแรงดันที่ ค่ากำลังจริงต่างๆ

3.2.5 เงื่อนไขและข้อกำหนดเบื้องต้นของวิธีโหนดโพลาร์แบบต่อเนื่อง
ภายใต้สมมติฐานที่ว่าแบบจำลองของโหนดมีลักษณะปกติและกำหนดให้

$$0 \leq \lambda \leq \lambda_{Critical} \quad (3.21)$$

โดยที่

λ คือตัวประกอบโหนด (Load Paramete)

$\lambda_{Critical}$ คือตัวประกอบโหนด ณ จุดวิกฤติ

ณ จุด $\lambda = 0$ คือ ค่าโหนดฐาน (Base Load) หรือโหนด ณ จุดทำงานปกติก่อนที่จะมีการเปลี่ยนแปลงของโหนด ซึ่งค่าต่างๆ ณ จุดนี้สามารถคำนวณหาค่า จากวิธีโหนดโพลาร์แบบธรรมดา ซึ่งเมื่อได้คำตอบจากการคำนวณแล้วนำมาสร้าง สมการของกำลังงานที่ บัสใดๆในสถานะสมดุลจะได้

$$0 = P_{Gi} - P_{Li} - P_n \quad (3.22)$$

$$0 = Q_{Gi} - Q_{Li} - Q_n \quad (3.23)$$

โดยที่

$$P_n = \sum_{i=1}^n V_i V_j y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) \quad (3.24)$$

$$Q_n = \sum_{i=1}^n V_i V_j y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) \quad (3.25)$$

P_n แสดงถึงกำลังงานจริงที่ถูกจ่ายเข้าไปสู่ระบบ

Q_n แสดงถึงกำลังงานรีแอกทีฟที่ถูกจ่ายเข้าไปสู่ระบบ

P_{Gi} แสดงถึงกำลังงานจริงที่ถูกจ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Q_{Gi} แสดงถึงกำลังงานรีแอกทีฟที่ถูกจ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

P_{Li} แสดงถึงกำลังงานจริงที่จ่ายให้กับโหนด

Q_{Li} แสดงถึงกำลังงานรีแอกทีฟที่จ่ายให้กับโหนด

δ_i คือมุมของแรงดันที่บัส i

y_{ij} คือค่า Σ ตำแหน่ง i, j ของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์

γ_{ij} คือมุมเฟส Σ ตำแหน่ง i, j ของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์

เนื่องจากจุดประสงค์ของการนำวิธีโหลดโพลว์แบบต่อเนื่องมาใช้ก็เพื่อวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาการเกิดการพังทลายของแรงดัน ซึ่งมีสาเหตุเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของโหลด ดังนั้นสมการที่เกี่ยวข้องกับโหลดในการวิเคราะห์โหลดโพลว์แบบต่อเนื่องนี้จะต้องครอบคลุมถึง ความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกันระหว่างกำลังไฟฟ้าของระบบ กับการเปลี่ยนแปลงของโหลดด้วย โดยมีพจน์ที่แสดงการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของโหลดเดิมเข้าไปในสมการของกำลังไฟฟ้า เดิมดังสมการที่ (3.26) และสมการที่ (3.27) ดังต่อไปนี้

$$P_{Li} = P_{Li0} + \lambda(K_{Li}S_{\Delta base} \cos \varphi_i) \quad (3.26)$$

$$Q_{Li} = Q_{Li0} + \lambda(K_{Li}S_{\Delta base} \sin \varphi_i) \quad (3.27)$$

โดยที่

- P_{Li0}, Q_{Li0} เป็นโหลดเดิมที่ติดตั้งอยู่กับบัส (Base Case)
- K_{Li} เป็นค่าคงที่ที่แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่บัส i
- φ_i เป็นค่ามุมของตัวประกอบกำลังที่บัส i
- $S_{\Delta BASE}$ เป็นค่ากำลังงานฐานซึ่งใช้เป็นหลักในการพิจารณา (Base Power)

เช่นเดียวกับทางด้านโหลด ทางด้านแหล่งกำเนิดจะสามารถแทนสมการการจ่ายกำลังงานของแหล่งกำเนิดซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของโหลดของระบบได้ดังสมการที่ (3.28) ดังต่อไปนี้

$$P_{Gi} = P_{Gi0} (1 + \lambda K_{Gi}) \quad (3.28)$$

โดยที่

- P_{Gi0} เป็นกำลังงานเดิมจากเจนเนอเรเตอร์ที่จ่ายให้โหลด
- K_{Gi} = ค่าคงที่ของเจนเนอเรเตอร์

เมื่อนำสมการที่ (3.24) ถึง (3.28) แทนลงในสมการ (3.22) และ (3.23) จะได้

$$0 = P_{Gi0} (1 + \lambda K_{Gi}) - P_{Li0} - \lambda(K_{Li}S_{\Delta base} \cos \varphi_i) - P_{Ti} \quad (3.29)$$

$$0 = Q_{G_0} (1 + \lambda K_{G_1}) - Q_{L_0} - \lambda (K_{L_1} S_{dbase} \sin \phi_1) - Q_T \quad (3.30)$$

ซึ่งสมการที่ (3.29) และสมการที่(3.30) นี้จะนำมาใช้เป็นสมการหลักของการคำนวณในขั้นตอนถัดไป

3.2.4 การประยุกต์สมการที่ปรับปรุงค่าโดยการรวมพจน์ที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงโหลดแล้วให้อยู่ในรูปของสมการกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง

จากสมการที่ (3.29) และ (3.30) พบว่าเป็นสมการของกำลังไฟฟ้าที่ถูกจัดรูปให้มีความสัมพันธ์กับการเพิ่มของโหลดเรียบร้อยแล้ว ซึ่งความหมายที่แท้จริงของสมการเหล่านี้ก็คือการประยุกต์สมการโหลดโพลว์แบบดั้งเดิมโดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของโหลดกับองค์ประกอบอื่นๆเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงการนำเอาวิธีโหลดโพลว์แบบต่อเนื่องมาใช้มีจุดมุ่งหมายหลักเพื่อที่จะวิเคราะห์หาจุดวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้นในหัวข้อต่อไปนี้จะมุ่งทำการประยุกต์รูปแบบสมการของกำลังไฟฟ้าที่ถูกจัดรูปให้มีความสัมพันธ์กับการเพิ่มของโหลดดังกล่าวให้สามารถหาค่า ณ จุดวิกฤติได้โดยใช้หลักการของกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่องดังนี้

ให้ F แทนเซตของสมการที่เกี่ยวข้องทั้งหมดซึ่งจะแสดงในรูปของเมตริกซ์
 δ แทนเซตของมุมของแรงดันบัส ดังนั้น
 เซตของสมการทั้งหมดจะเขียนได้ดังนี้

$$F(\delta, V, \lambda) = 0 \quad 0 \leq \lambda \leq \lambda_{critical} \quad (3.31)$$

จากสมการที่ (3.31) เราสามารถหาค่า $(\delta_0, V_0, \lambda_0)$ ได้จากการคำนวณโหลดโพลว์แบบธรรมดาซึ่งใช้เป็นจุดเริ่มต้นของการคำนวณโดยใช้หลักการของกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง จากนั้นจึงใช้วิธีการทำนายค่าและปรับค่าคำตอบของวิธีโหลดโพลว์แบบต่อเนื่องมาคำนวณหาค่าตอบ ณ จุดอื่นๆต่อไป

3.2.5 การคำนวณหาค่าที่จุดต่าง ๆ เมื่อโหนดเปลี่ยนแปลงไป

จากที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 การคำนวณหาค่า ณ สภาวะการจ่ายโหนดใดๆ ของระบบ สามารถกระทำได้โดยอาศัยแบ่งวิธีการคำนวณออกเป็น 2 ส่วนดังต่อไปนี้

3.2.5.1 การทำนายค่าในขั้นถัดไปโดยใช้ตัวทำนายค่า (Predictor)

หลักการของตัวทำนายค่าคือ ขั้นแรกทำการคำนวณหาความชันของกราฟ ณ จุดเริ่มต้นของกราฟกำลังจริง - แรงดัน ที่เป็นจุดเริ่มต้นของการคำนวณแล้วทำนายค่าออกไป โดยการลาก กราฟของการทำนายค่าออกไปในทิศทางเดียวกับความชันโดยกำหนด ความกว้างของการคำนวณ (Step Size) ค่าหนึ่ง เพื่อหาค่าโดยคร่าว ๆ ซึ่งค่าที่ทำนายได้จากการคำนวณ (Predicted Value) ดังกล่าวนี้อย่างไม่ถูกต้องเนื่องจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังจริง กับแรงดัน เป็นกราฟที่มีความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของแรงดันเทียบกับกราฟเพิ่มของโหนดแบบไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้นหลังจากทำนายค่าออกมาแล้วจึงใช้ตัวปรับค่า (Corrector) ปรับแต่ง ค่าให้ถูกต้องอีกทีหนึ่ง ดังสมการต่อไปนี้

$$d[F(\delta, V, \lambda)] = F_\delta d\delta + F_V dV + F_\lambda d\lambda = 0 \quad (3.32)$$

เมื่อนำสมการ (3.32) มาเขียนในรูปแบบเมตริกซ์จะได้

$$\begin{bmatrix} F_\delta & F_V & F_\lambda \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (3.33)$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial \lambda} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (3.34)$$

แต่เนื่องจากค่าต่างๆที่นำมาหาค่าจาร์โคเบียนเมตริกซ์มีเพียงสมการอนุพันธ์ของกำลังจริง และกำลังรีแอกทีฟเท่านั้น ขณะที่ตัวแปรที่ต้องการหาค่ามีถึง 3 ตัวคือ มุมเฟสของแรงดัน ขนาดของแรงดัน และโพลดพารามิเตอร์ ดังนั้นจึงต้องหาสมการเพิ่มเติมซึ่งเมื่อนำสมการดังกล่าวมาเพิ่มเข้าไปแล้วจะทำให้แก้สมการหาค่าได้ แต่ไม่ทำให้คำตอบมีค่าผิดพลาดไป

เมื่อลองพิจารณาค่าตัวแปรทั้ง 3 ตัวของสมการเมตริกซ์พบว่าแรงดันกับมุมเฟสเป็นค่าที่ต้องการหาค่าเมื่อโพลดมีขนาดเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าทั้ง 2 นี้ อาจจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ไม่แน่นอน ดังนั้นจึงมีการเติมค่าเมตริกซ์แถวขนาดหนึ่งหน่วยในแถวที่ 3 (Unit Metrix) ในจาร์โคเบียนเมตริกซ์เดิม อันจะมีผลทำให้โพลดมีค่าเพิ่มขึ้นทุก ๆ รอบของการคำนวณ ดังแสดงตามสมการที่ (3.35)

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial \delta}{\partial \delta} & \frac{\partial V}{\partial V} & \frac{\partial \lambda}{\partial \lambda} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} d \delta \\ d V \\ d \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

ซึ่งค่าในแถวที่ 3 ของเมตริกซ์ผลลัพธ์จะเป็น -1 หรือ 1 ขึ้นอยู่กับว่าจุดทำงานที่หาค่าได้นั้นผ่านจุดวิกฤติไปแล้วหรือไม่ ซึ่งถ้าจุดทำงานยังไม่ผ่านจุดวิกฤติค่าคงที่ตัวนี้จะมีค่าเท่ากับ 1 นั้นหมายถึงการพยายามหาค่าคำตอบในกรณีที่โพลดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้าจุดทำงาน นั้นผ่านจุดวิกฤติไปแล้วค่าคงที่ตัวนี้มีค่าเท่ากับ -1 ซึ่งหมายถึงการพยายามหาค่าคำตอบ เมื่อลดค่าของโพลดลงในรอบการคำนวณถัดไปนั่นเอง

จากสมการที่ (3.34) และวิธีการแก้สมการเมตริกซ์โดยใช้วิธีอินเวอร์สเมตริกซ์จะสามารถหาเมตริกซ์ซึ่งแสดงความชัน ณ จุดที่คำนวณหาค่า (Tangent Matrix) ได้ดังสมการที่ (3.36) ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} d \delta \\ d V \\ d \lambda \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

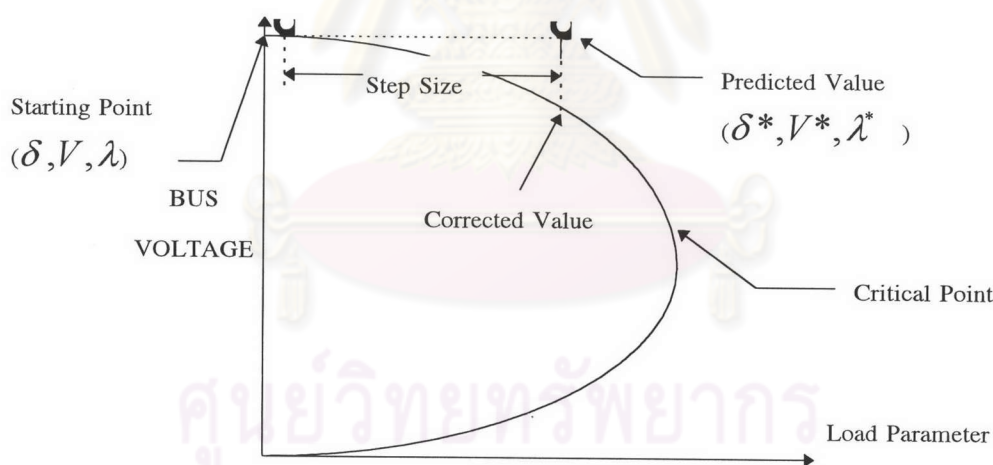
ดังนั้นค่าต่าง ๆ ของระบบที่ได้จากการทำนาย (Predicted Value) มีค่าเท่ากับค่าเดิมรวม ผลคูณระหว่างความกว้างของช่วงที่ใช้ในการคำนวณกับความชันของเส้นโค้งความ สัมพันธ์ดังแสดงตามสมการที่ (3.37)

$$\begin{bmatrix} \delta^* \\ V^* \\ \lambda^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \\ V \\ \lambda \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

โดยที่

= ความกว้างของช่วงที่ใช้ในการเพิ่มค่า (Step Size)

ซึ่งค่าความกว้างของช่วงที่ใช้ในการเพิ่มค่าในการคำนวณแต่ละรอบจะมีความสำคัญใน การหาค่าจุดวิกฤติของระบบมากเพราะจะมีผลต่อความเร็วและความแม่นยำในการ คำนวณ โดยสามารถแสดงการทำนายค่าได้ดังรูปที่ 3.4

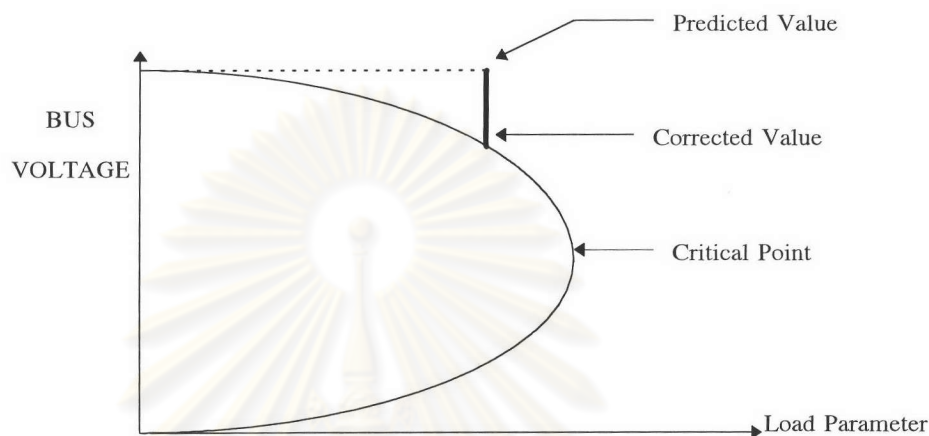


รูปที่ 3.4 แสดงจุดเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณและค่าที่ได้จากการทำนาย

3.2.5.2 การแก้ไขค่าให้ถูกต้องโดยใช้ตัวปรับค่า (Corrector)

ดังที่กล่าวไว้แล้วว่าค่าที่ได้จากการทำนายจะเป็นค่าที่ได้โดยประมาณเท่านั้น เพราะค่าที่ถูกต้องจริง ๆ จะต้องสอดคล้องกับสมการที่ (3.29) และ (3.30) หรือเป็น ค่าที่ สอดคล้องกับกราฟความสัมพันธ์นั่นเอง ดังนั้นหน้าที่ของตัวปรับค่าคือ พยายามจะ ปรับค่าที่ได้จากการทำนายเข้าสู่ค่าจริงให้ได้มากที่สุดหรือการดึงค่าที่ได้จากขั้นตอนของ

การทำนายค่ากลับเข้าสู่เส้นกราฟ ความสัมพันธ์ให้ได้มากที่สุด ดังแสดงการปรับค่าได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงการแก้ไขค่าจากการทำนายโดยใช้ตัวปรับค่า

โดยปกติการปรับค่าเพื่อลดความผิดพลาดของการคำนวณนี้จะพยายามปรับค่าเข้ามาอยู่ภายในช่วงที่ยอมรับได้ นั่นคือจะมีการตั้งเงื่อนไขค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ (ϵ) ขึ้นมาก่อนเพื่อเป็นจุดซึ่งใช้ยุติการคำนวณ ซึ่งตรวจสอบหาค่าผิดพลาดที่ยังมีอยู่ในแต่ละรอบของการคำนวณจะอาศัยหลักการที่ว่าโดยปกติค่าที่ถูกต้องของผลคูณจาโคเบียนเมตริกซ์กับเมตริกซ์ค่าผิดพลาดจะต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือน้อยกว่าค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ ดังนั้นในแต่ละรอบของการคำนวณ ถ้าค่าที่ได้จากการคำนวณถูกต้องแล้วผลคูณของสมการเมตริกซ์จะต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังแสดงตามสมการที่ (3.38)

$$\begin{bmatrix} F_{\delta}^* & F_{V}^* & F_{\lambda}^* \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f^*(x, \lambda) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

โดยที่

$f^*(x, \lambda)$ คือเมตริกซ์คำตอบของสมการซึ่งได้จากการแทน

ค่า $\begin{bmatrix} \delta^* \\ V^* \\ \lambda^* \end{bmatrix}$ ที่ได้จากการแทนสมการที่ (3.37) ลงในสมการที่ (3.26) และ (3.27)

ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \end{bmatrix}$$
 คือเมตริกซ์ค่าผิดพลาดที่ทำนายค่าผิดไปจากค่าจริง

$$\begin{bmatrix} F^* & F^* & F^* \\ -\delta & -V & -\lambda \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
 คือจาร์โคเบียนเมตริกซ์ที่ได้จากการแทนค่าที่ได้จากการทำนายลงไปในการโคเบียนเมตริกซ์เดิม

เพราะฉะนั้นจะได้ค่าที่จะต้องแก้ไข (Corrector Value) มีค่าดังสมการที่ (3.39) ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} F^* & F^* & F^* \\ -\delta & -V & -\lambda \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} f^*(x, \lambda) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

หากค่าที่ได้จากสมการที่ (3.39) ทั้ง 3 ค่าน้อยกว่าค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ (ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้ค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 0.01 [11]) และจะถือว่าค่าของ แรงดัน มุมเฟส ค่าคงที่ของโหลด ณ จุดนั้นถูกต้องแล้วและสามารถจะหยุดการคำนวณในรอบนั้น และนำคำตอบไปใช้ได้ แต่ถ้าค่าผิดพลาดยังมากกว่าขอบเขตที่ยอมรับได้ก็จะต้องนำค่าผิดพลาดที่ได้นี้ไปรวมกับค่าที่ได้จากการคำนวณในขั้นตอนของการแก้ไขค่าก่อนหน้านี้ เพื่อปรับค่าให้ถูกต้องขึ้นดังสมการที่ (3.40)

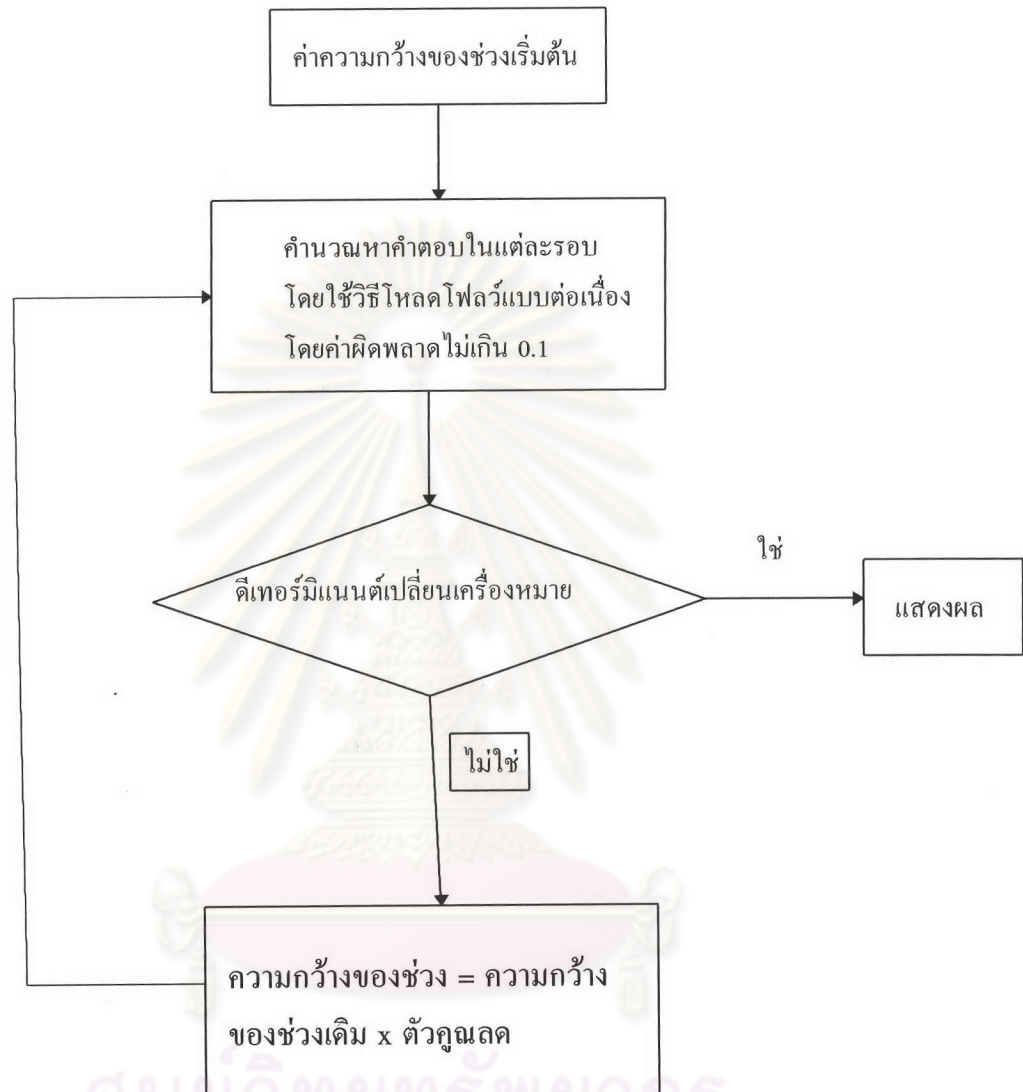
$$\begin{bmatrix} \delta' \\ V' \\ \lambda' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^* \\ V^* \\ \lambda^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

แล้วจึงเริ่มต้นคำนวณในขั้นตอนของการแก้ไขค่าใหม่อีกครั้งหนึ่ง

โดยที่

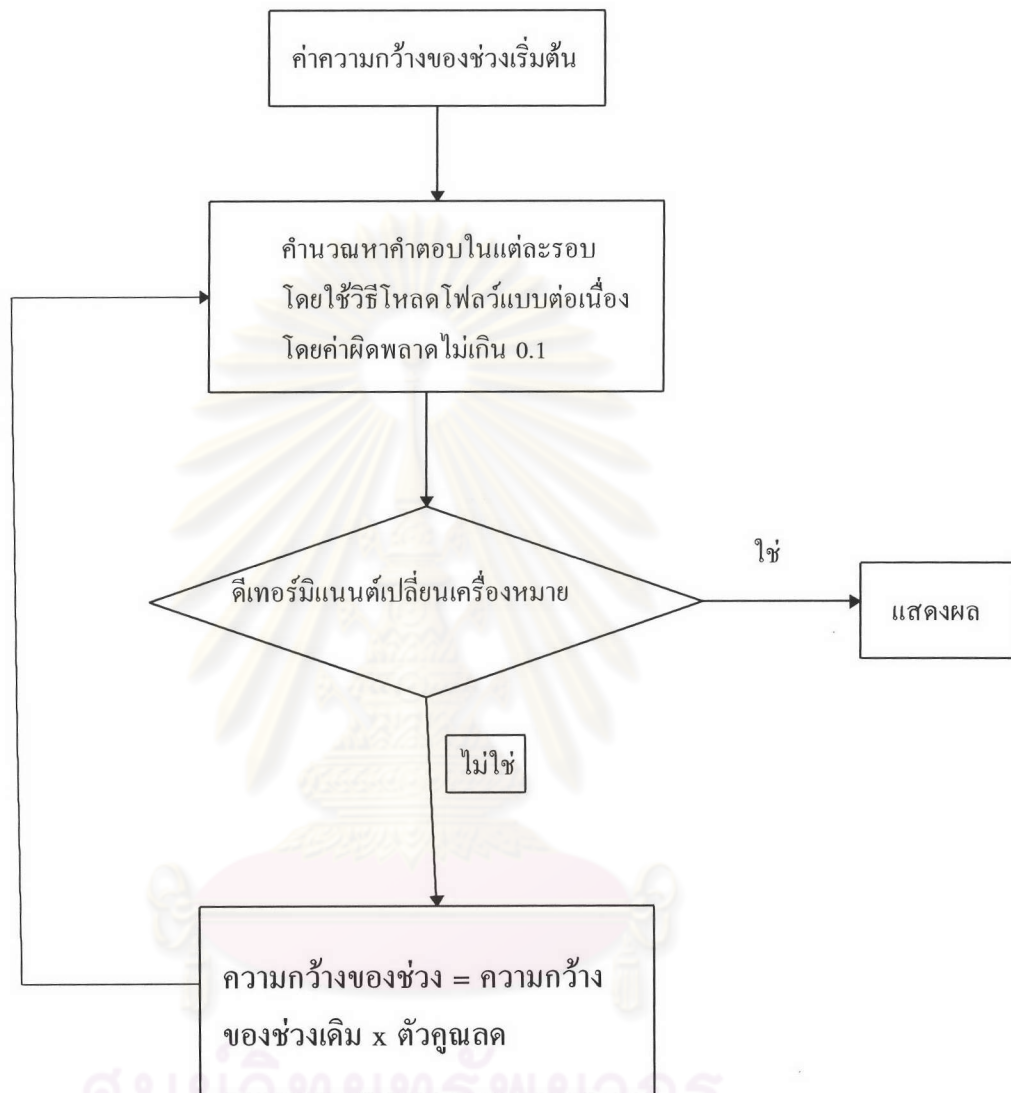
$$\begin{bmatrix} \delta' \\ V' \\ \lambda' \end{bmatrix}$$

คือเมตริกซ์คำตอบที่ได้รับการแก้ไขค่าแล้ว



รูปที่ 3.7 แสดงขั้นตอนในการหาความกว้างของช่วงก้ำที่เหมาะสม

จากหลักการดังกล่าว ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาโปรแกรมเพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าตัวคูณลดที่เหมาะสมในการหาจุดวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังโดยเรียงลำดับค่าของตัวคูณลดที่เป็นไปได้ ตั้งแต่ 0.51 จนถึง 0.99 แล้วจึงพิจารณาผลจากการทำงานของโปรแกรมหากค่าตัวคูณลดที่เหมาะสมในการหาจุดวิกฤติ ค่าผิดพลาดจากจุดวิกฤติสะสมจากการคำนวณ 20 ครั้ง และการลู่ออกจากผลการคำนวณ (ถ้ามี) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.2 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.7 แสดงขั้นตอนในการหาความกว้างของช่วงก้ำวที่เหมาะสม

จากหลักการดังกล่าว ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาโปรแกรมเพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าตัวคูณลดที่เหมาะสมในการหาจุดวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเรียงลำดับค่าของตัวคูณลดที่เป็นไปได้ ตั้งแต่ 0.51 จนถึง 0.99 แล้วจึงพิจารณาผลจากการทำงานของโปรแกรมดังกล่าวในรูปของเวลาในการคำนวณหาจุดวิกฤติ ค่าผิดพลาดจากจุดวิกฤติสะสมจากการคำนวณ 20 ครั้ง และการลู่ออกจากผลการคำนวณ (ถ้ามี) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.2 ดังต่อไปนี้

3.2.6 การหาค่าของระบบเมื่อถึงจุดวิกฤติ

ณ จุดวิกฤติ ปกติในวิธีโหลดโพล์แบบทั่วไปจะไม่สามารถหาค่าต่างๆเนื่องจากค่าดีเทอร์มิแนนท์ของจาร์โคเบียนเมตริกซ์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นหมายถึงไม่สามารถจะทำการอินเวอร์สจาร์โคเบียนเมตริกซ์เพื่อหาค่าคำตอบได้

วิธีโหลดโพล์แบบต่อเนื่องแก้ปัญหาจุดวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการปรับเปลี่ยนค่าในเมตริกซ์แถวที่เติมเข้ามา จากตำแหน่งหลักที่ 3 ซึ่งเดิมมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งตามความหมายที่แท้จริงคือพยายามที่จะเพิ่มโหลดขึ้นไปอีกให้มีค่าเป็นศูนย์ และเลือกหาค่าในหลักที่ 1 หรือหลักที่ 2 ให้มีค่าเป็นหนึ่งดังต่อไปนี้

กรณีที่ระบบยังไม่ถึงจุดวิกฤติ

$$[J] = \begin{bmatrix} F_s & F_v & F_\lambda \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

กรณีที่ระบบถึงจุดวิกฤติ

$$[J] = \begin{bmatrix} F_s & F_v & F_\lambda \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

หรือ

$$[J] = \begin{bmatrix} F_s & F_v & F_\lambda \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ซึ่งความหมายของการปรับค่าให้เป็นเป็นตัวอย่างดังกล่าวคือ ณ จุดวิกฤติค่าของโหลดที่จ่ายจะไม่สามารถเพิ่มได้อีกต่อไป เพราะระบบได้ถึงสูงสุดในการส่งผ่านพลังงานแล้ว แต่ค่าของแรงดันและมุมเฟสอาจจะเปลี่ยนแปลงได้ (นั่นคือการปรับค่าหลักที่ 1 ในแถวที่ 3 ของจาโคเบียนเมตริกซ์นั่นเอง) และเมื่อระบบผ่านจุดวิกฤติไปแล้วจะปรับค่าของเมตริกซ์ในตำแหน่งดังกล่าว อีกครั้งหนึ่งโดยให้หลักที่ 1 และ เท่ากับศูนย์เหมือนเดิม ส่วนหลักที่ 3 มีค่าเท่ากับ-1 ซึ่งหมายถึงโหลดของระบบกำลังลดลงดังแสดงต่อไปนี้

กรณีที่ระบบผ่านจุดวิกฤติไปแล้ว

$$[J] = \begin{bmatrix} F_s & F_v & F_\lambda \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

3.2.7 การตรวจสอบหาจุดวิกฤติของระบบ

วิธีที่ใช้ในการตรวจสอบหาค่าจุดวิกฤติของระบบมีหลายวิธีดังต่อไปนี้

3.2.7.1 การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของโหลดเพื่อหาจุดวิกฤติของระบบ

เนื่องจากที่จุดวิกฤติแรงดันจะลดลงอย่างรวดเร็วประกอบกับโหลดไม่สามารถจะเพิ่มได้อีก เมื่อตรวจสอบจากผลการคำนวณโดยวิธีการไหลไฟฟ้าแบบต่อเนื่องอัตรา การเปลี่ยนแปลงของโหลด ($d\lambda$) จะเท่ากับศูนย์

3.2.7.2 การใช้ค่าดีเทอร์มิแนนท์ของจาร์โคเบียนเมตริกซ์เพื่อตรวจสอบหาจุดวิกฤติของระบบ

จากการสังเกตพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าดีเทอร์มิแนนท์ของจาร์โคเบียนเมตริกซ์ จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงของโหลด นั่นคือขนาดดีเทอร์มิแนนท์ของจาร์โคเบียนเมตริกซ์จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อโหลดเพิ่มขึ้นและเท่ากับศูนย์ที่จุดวิกฤติ ซึ่งวิธีการหาจุดวิกฤติของระบบโดยวิธีนี้จะถูกนำมาใช้ใน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

3.2.8 การวิเคราะห์ห่าบัสที่อ่อนแอที่สุดในระบบ

ดังที่กล่าวไว้ในบทนำ คือ เมื่อระบบมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนบัสในระบบมีปริมาณมาก การคำนวณทุก ๆ บัสในระบบเพื่อคำนวณหาค่าจุดวิกฤติย่อมเป็นไปได้ยาก ทั้งนี้เพราะจะทำให้สิ้นเปลืองเวลามาก ดังนั้นจึงได้มีการคำนวณห่าบัสที่อ่อนแอที่สุดในระบบซึ่งหมายถึง จุดที่เสี่ยงที่สุดต่อการเกิดความไม่มีเสถียรภาพของแรงดันเพื่อเป็นตัวแทนของระบบ โดยมีวิธีการห่าบัสที่อ่อนแอที่สุด ดังต่อไปนี้

$$\text{Bus } J = \max \left[\left| \frac{dV_1}{cd\lambda} \right|, \left| \frac{dV_2}{cd\lambda} \right|, \dots, \frac{dV_n}{cd\lambda} \right] \quad (3.41)$$

$$\text{เมื่อ } cd\lambda = \sum dP_{Li} = \sum (K_{Li} S_{\Delta Base} \cos \phi_i) d\lambda$$

เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของโหลดทั้งระบบ

โดยการห่าค่าสูงสุดของอัตราการเปลี่ยนแปลงเทียบกับโหลดรวมหมายถึง การพิจารณาแนวโน้มอัตราการลดลงของแรงดันเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงนั่นเอง บัสใดมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเทียบกับโหลดสูงย่อมจะหมายถึง การเข้าสู่จุดวิกฤติที่เร็วกว่าบัส

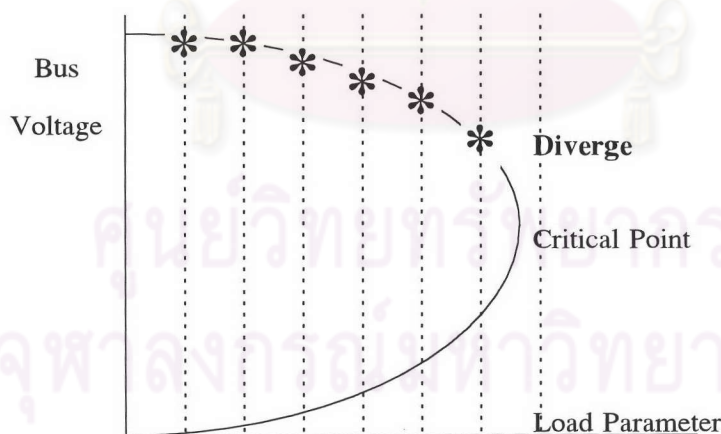
อื่น ๆ นั่นคือ บัสที่อ่อนแอที่สุดในระบบ ซึ่งเราจะนำมาเป็นตัวแทนของระบบในการวิเคราะห์เสถียรภาพของแรงดัน

3.3 การคำนวณหาจุดวิกฤติของระบบโดยใช้วิธีโพลโดแบบต่อเนื่องที่มีการปรับความกว้างของช่วงโดยอัตโนมัติ

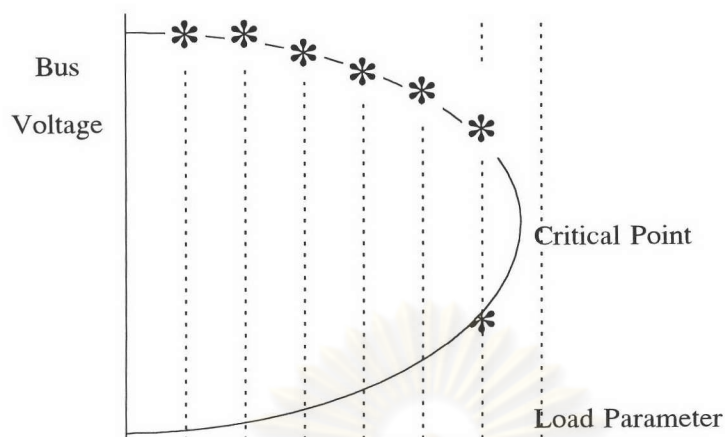
จากหัวข้อ 3.2.1 ที่กล่าวไว้ว่า การคำนวณหาจุดวิกฤติที่ดีที่สุดและเหมาะสมกับการปฏิบัติงานจริงจะต้องหาค่าจุดวิกฤติได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำนั้นวิธีโพลโดแบบธรรมดาและวิธีโพลโดแบบต่อเนื่องซึ่งมีความกว้างของช่วงคงที่จะไม่สามารถทำได้เนื่องจาก

- ทั้ง 2 วิธีข้างต้นใช้ช่วงความกว้างในการทำนายค่ามีค่าคงที่ซึ่งถ้าต้องการจะได้ค่าที่แม่นยำจะต้องกำหนดความกว้างของช่วงในการคำนวณแต่ละรอบให้มีค่าแคบ ๆ แต่ผลเสียที่ตามมาคือจะใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าจะถึงจุดที่ต้องการ

- ถ้ากำหนดให้ความกว้างของช่วงมีค่ามากขึ้นจะทำให้การคำนวณใช้เวลาน้อยลง แต่มักจะประสบกับปัญหาการเลยจุดวิกฤติ ซึ่งถ้าใช้วิธีโพลโดแบบธรรมดาจะทำให้การคำนวณเกิดการลู่ออก (Diverge) และไม่สามารถหาค่าต่อไปได้อีกดังแสดงตามรูปที่ 3.6(ก) แต่ถ้าเป็นวิธีโพลโดแบบต่อเนื่องจะได้คำตอบออกมาเป็นกราฟช่วงล่างที่เกิดหลังจากผ่านจุดวิกฤติไปแล้วดังรูปที่ 3.6(ข)



รูปที่ 3.6 (ก) แสดงผลการหาจุดวิกฤติโดยใช้วิธีโพลโดแบบธรรมดา



รูปที่ 3.6 (ข) แสดงผลการหาจุดวิกฤติโดยใช้วิธีโพลต์แบบต่อเนื่อง

จากวิธีโพลต์แบบต่อเนื่อง การปรับความกว้างของช่วงโดยอัตโนมัติจะอาศัยหลักการที่ว่า ณ จุดแรก ๆ ของการคำนวณที่ยังห่างจากจุดวิกฤติอยู่ ค่าความกว้างของช่วงก้าวควรจะมีค่ามาก ทั้งนี้เพื่อจะได้ประหยัดเวลาในการคำนวณ และเมื่อใกล้ถึงจุดวิกฤติ (ตรวจสอบได้จากค่าดีเทอร์มิแนนท์ของจาร์โคเบียนเมตริกซ์เข้าใกล้ศูนย์) ค่าความกว้างของช่วงควรจะมีค่าน้อยเพื่อที่จะหาค่าได้อย่างถูกต้อง ซึ่งหลักการหาความกว้างของช่วงนี้พอจะสรุปได้ดังนี้

3.3.1 ณ จุดเริ่มต้นของการคำนวณ ค่าเริ่มต้นเป็นค่าโพลฐาน (Base Case) ซึ่งได้จากการทำงานของโปรแกรมโพลต์แบบธรรมดา ณ จุดนี้ความกว้างของช่วงควรจะมีค่ามากเท่ากับค่าเริ่มต้นที่ใส่ไว้ในโปรแกรม

3.3.2 ทุกๆ จุดของการคำนวณ ตรวจสอบเครื่องหมายและค่าดีเทอร์มิแนนท์ของจาร์โคเบียนเมตริกซ์ว่าเท่ากับศูนย์หรือมีการกลับเครื่องหมายจากลบไปบวกหรือไม่ (ปกติในการคำนวณช่วงแรก เครื่องหมายของดีเทอร์มิแนนท์ของจาร์โคเบียนเมตริกซ์จะมีค่าเป็นลบเพราะกราฟกำลังลดลง) ซึ่งถ้ามีการกลับเครื่องหมายของจาร์โคเบียนเมตริกซ์ให้ทำการหยุดการคำนวณในรอบนั้น เนื่องจากแสดงว่าเลยจุดวิกฤติไปแล้ว - เริ่มคำนวณใหม่ โดยใช้ค่าเริ่มต้นค่าเดิมและทำการปรับค่าความกว้างของช่วงให้

$$\text{ความกว้างของช่วง} = \text{ความกว้างของช่วงเดิม} \times \text{ตัวคูณลด} \quad (3.42)$$

ซึ่งตัวคูณลดที่ใช้มีค่าเท่ากับ 0.90

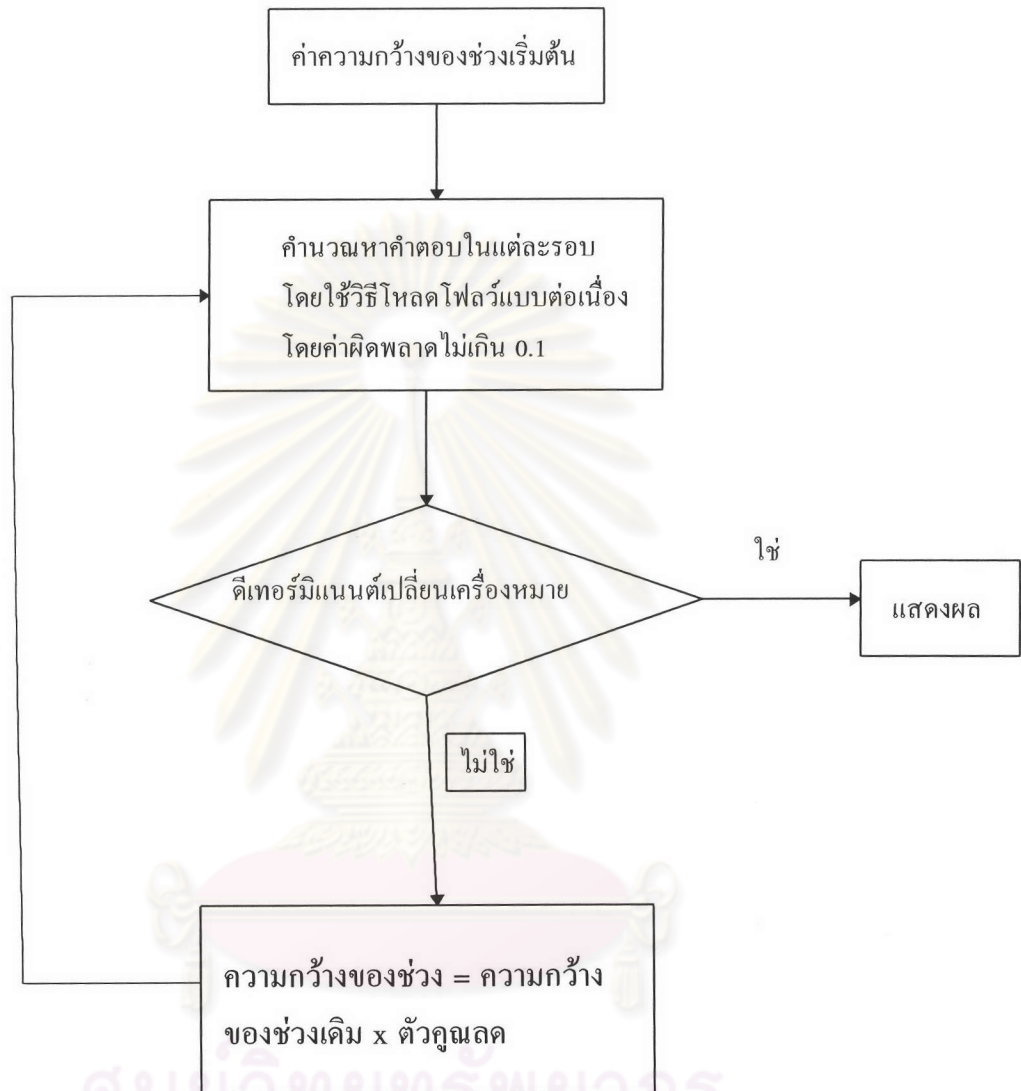
ซึ่งเมื่อก้าวถึงตัวคูณลด หลักการของตัวคูณลดที่ดี คือ จะต้องทำให้ผลของการคำนวณวิ่งเข้าสู่จุดวิกฤติได้อย่างรวดเร็ว แต่ในความเป็นจริงการวิ่งเข้าสู่จุดวิกฤติที่รวดเร็วของการคำนวณย่อมหมายถึง การตั้งค่าตัวคูณลดให้มีค่าน้อย (ต่ำกว่า 1 มาก ๆ) ซึ่งการกระทำดังกล่าวมักจะมีผลกระทบต่อการคำนวณตามมาคือ ก่อให้เกิดปัญหาการไม่วิ่งเข้าสู่จุดวิกฤติที่ต้องการ เพราะเนื่องจากการคำนวณเป็นวงรอบเช่นนี้เหมือนกับการยกกำลังค่าตัวคูณลดไปเรื่อย ๆ จนในที่สุดค่าของตัวคูณลดจะน้อยจนแทบจะไม่มีผลต่อการคำนวณหาจุดวิกฤติในแต่ละรอบการคำนวณ ทำให้ไม่สามารถคำนวณหาจุดวิกฤติได้ ดังแสดงการเปรียบเทียบค่าของตัวคูณลดค่าต่างๆ เมื่อรอบของการคำนวณมากขึ้นดังแสดงตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวคูณลดต่างๆเมื่อรอบของการคำนวณเพิ่มมากขึ้น

ตัวคูณลด รอบการคำนวณ	0.98	0.9	0.8	0.7	0.6	0.4
2	0.9604	0.8100	0.6400	0.4900	0.3600	0.1600
3	0.9412	0.7290	0.5120	0.3430	0.2160	0.0640
4	0.9224	0.6561	0.4096	0.2401	0.1296	0.0256
5	0.9039	0.5905	0.3277	0.1681	0.0778	0.0102
6	0.8858	0.5314	0.2621	0.1176	0.0467	0.0041
7	0.8681	0.4783	0.2097	0.0824	0.0280	0.0016

ดังนั้นการหาค่าตัวคูณลดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงอาศัยการหาจุดที่เหมาะสมระหว่างค่าความเร็วในการคำนวณและความถูกต้องของคำตอบโดยการใช้โปรแกรมคำนวณ หาค่าตัวคูณลดที่เหมาะสมออกมาโดยยึดหลักการดังนี้

- ค่าผิดพลาดของคำตอบที่ยอมรับได้ไม่เกิน 0.01
- ตัวคูณลดที่จะเลือกใช้จะต้องทำให้การคำนวณหาคำตอบที่ทุก ๆ ค่าเป้าหมายเป็นไปได้ (ค่าเป้าหมายได้มาจากการสุ่มตัวเลขใดๆขึ้นมา 20 ค่า)
- ตัวคูณลดที่ใช้เวลาน้อยที่สุดเฉลี่ย (ใช้ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของเวลา) และได้ผลการคำนวณที่มีค่าผิดพลาดเฉลี่ยน้อยที่สุดจะเป็น ตัวคูณลดที่ต้องการดังแสดงตามโพลีชาร์ต ที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงขั้นตอนในการหาความกว้างของช่วงก้ำวที่เหมาะสม

จากหลักการดังกล่าว ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาโปรแกรมเพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าตัวคูณลดที่เหมาะสมในการหาจุดวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังโดยเรียงลำดับค่าของตัวคูณลดที่เป็นไปได้ ตั้งแต่ 0.51 จนถึง 0.99 แล้วจึงพิจารณาผลจากการทำงานของโปรแกรมห้ปรากฏในรูปแบบของเวลาในการคำนวณหาจุดวิกฤติ ค่าผิดพลาดจากจุดวิกฤติสะสมจากการคำนวณ 20 ครั้ง และการลู่ออกจากผลการคำนวณ (ถ้ามี) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.2 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2 แสดงผลจากการใช้ตัวคูณลดต่างๆเพื่อคำนวณหาค่าจุดวิกฤติของระบบ

ตัวคูณลด	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ(วินาที)	ค่าผิดพลาด	หมายเหตุ
0.51	2.57	0.064	Diverge
0.52	6.38	0.045	Diverge
0.53	2.48	0.045	Diverge
0.54	6.85	0.049	Diverge
0.55	3.69	0.037	Diverge
0.56	5.61	0.041	Diverge
0.57	3.66	0.048	Diverge
0.58	1.72	0.049	Diverge
0.59	4.93	0.041	Diverge
0.60	3.43	0.036	Diverge
0.61	5.78	0.034	Diverge
0.62	5.32	0.034	Diverge
0.63	2.84	0.039	Diverge
0.64	4.13	0.038	Diverge
0.65	4.19	0.031	Diverge
0.66	2.58	0.028	Diverge
0.67	8.03	0.027	Diverge
0.68	7.61	0.031	Diverge
0.69	7.03	0.033	Diverge
0.70	6.23	0.028	Diverge
0.71	6.26	0.036	Diverge
0.72	6.87	0.029	Diverge
0.73	7.08	0.028	Diverge
0.74	7.46	0.031	Diverge
0.75	9.10	0.024	Diverge

ตารางที่ 3.2 แสดงผลจากการใช้ตัวคูณลดต่างๆเพื่อกำหนดหาค่าจุดวิกฤติของระบบ (ต่อ)

0.76	4.63	0.027	Diverge
0.77	6.74	0.027	Diverge
0.78	8.49	0.026	Diverge
0.79	5.29	0.025	Diverge
0.80	8.69	0.029	Diverge
0.81	6.65	0.029	Diverge
0.82	5.26	0.027	Diverge
0.83	10.01	0.026	Diverge
0.84	9.94	0.031	Diverge
0.85	9.30	0.026	Diverge
0.86	10.14	0.031	Diverge
0.87	7.08	0.029	Diverge
0.88	11.55	0.031	Diverge
0.89	11.19	0.032	Converge
0.90	10.10	0.035	Converge
0.91	13.73	0.036	Converge
0.92	16.78	0.037	Converge
0.93	16.13	0.038	Converge
0.94	18.90	0.041	Converge
0.95	24.22	0.043	Converge
0.96	25.04	0.044	Converge
0.97	35.41	0.045	Converge
0.98	52.07	0.047	Converge
0.99	105.21	0.049	Converge

ซึ่งจากผลการคำนวณหาค่าตัวคูณลดที่สามารถใช้ได้อยู่ในช่วง 0.89 ถึง 0.99 เท่านั้น เนื่อง จากค่าตัวคูณลด 0.89 กับ 0.99 ไม่มีปัญหาของการลู่ออกของคำตอบ นั้นหมายถึง ในการคำนวณ หาค่าตอบจะสามารถหาค่าได้ทุกกรณี และเมื่อลองพิจารณาผลของการใช้ตัวคูณลดที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.89 ถึง 0.99 พบว่าวิธีในการเลือกค่าตัวคูณลดมาใช้คือ ตัวคูณลดที่จะเลือกใช้ต้องเป็นตัวคูณลดที่มีค่าผิดพลาดน้อยที่สุดและใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด อันได้แก่ 0.89 หรือ 0.90 ตัวใดตัวหนึ่ง ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้ 0.89 เป็นตัวคูณลด

3.4 การใช้วิธีการทางด้านออปติไมเซชันในการหาจุดวิกฤติของระบบ

การใช้วิธีการทางด้านออปติไมเซชันในการหาจุดวิกฤติของระบบนี้จะใช้หลักของการ ออปติไมซ์กำลังรีแอกทีฟของระบบโดยกำหนดให้ กำลังจริงมีค่าคงที่และกำลังรีแอกทีฟขึ้นอยู่กับ แรงดันของระบบ ดังนั้นการคำนวณหาจุดวิกฤติของการจ่ายกำลังรีแอกทีฟย่อมหมายถึงจุดวิกฤติ ของระบบด้วย ดังแสดงตามสมการต่อไปนี้

ให้ Z เป็นบริเวณที่พิจารณา หาจุดวิกฤติของระบบไฟฟ้า

$$Q = \sum_{j \in Z} Q_j^* - \sum_{j \in Z} Q_j^0 \quad (3.42)$$

โดยที่

Q = ขอบเขตของกำลังรีแอกทีฟ (Reactive Power Margin)

Q_j^* = กำลังรีแอกทีฟที่จ่ายให้กับโหลด (Consumption)

Q_j^0 = กำลังรีแอกทีฟ ณ โหลดฐาน (Base Case Consumption)

เนื่องจากพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของโหลดเป็นโซนดังนั้นจะคิดว่าการเปลี่ยนแปลงของ โหลดทั้งโซนมี อัตราการเปลี่ยนแปลงเท่ากัน คือ

$$Q_j^* - Q_j^0 = \alpha_j Q \quad (3.43)$$

α_j ค่าสัมประสิทธิ์ร่วม (Participation Coefficients)

เมื่อจัดรูปสมการ โดยนำค่าสัมประสิทธิ์ร่วมเข้ามาพิจารณาค่าจะสามารถเขียนสมการที่ (2.22) ได้ใหม่ดังนี้

$$Q_j(V) - q_j(V_j) - \alpha_j Q \quad j=1 \dots n \quad (3.44)$$

จากสมการที่ (3.44) และวิธีการของลากราง (Lagrangian Optimization Method) ใ้ซึ่งจุดประสงค์ที่ต้องการหาค่า คือ กำลังรีแอกทีฟปริมาณเท่าไรจึงจะเป็นจุดสูงสุดในการจ่ายพลังงานไฟฟ้า (Max Q) จะได้

$$L = Q + \sum_{j=1}^N \lambda_j (Q_j(V) - q_j(V_j)) + \alpha_j Q \quad (3.45)$$

หาอนุพันธ์เทียบกับตัวแปรต่าง ๆ เพื่อหาคำตอบได้ดังนี้

$$\frac{\partial L}{\partial V} = 0 \quad \sum_{j=1}^N \lambda_j \frac{\partial Q_j}{\partial V} - \sum_{j=1}^N \frac{\partial q_j}{\partial V_j} e_j = 0 \quad (3.46)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \quad Q(V) - q(V) + Q\alpha = 0 \quad (3.47)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0 \quad + \sum_{j=1}^N \lambda_j \alpha_j = 0 \quad (3.48)$$

ซึ่งเมื่อแก้สมการที่ (3.46) ถึง (3.48) และนำไปแทนในสมการของกำลังไฟฟ้าจะสามารถหาค่าต่างๆ ซึ่งเป็นคำตอบออกมาได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย