

บทที่ 3

วิธีการประมาณค่าตัวแปรในระบบไฟฟ้ากำลัง

ตั้งแต่ในอดีตที่ผ่านมา มีผู้นำเสนอวิธีการในการแก้ปัญหาการประมาณค่าตัวแปรสถานะในระบบไฟฟ้ากำลังไว้หลายวิธี อย่างไรก็ตามวิธีการต่างๆ เหล่านี้ขึ้นอยู่กับพื้นฐานของการแก้ปัญหาด้วยวิธีการกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted Least Square; WLS) ในหัวข้อนี้จะนำเสนอวิธีการในการประมาณค่าตัวแปรสถานะแบบดั้งเดิม และวิธีการที่นำเสนอ

3.1 วิธีการประมาณค่าแบบดั้งเดิม

การประมาณสถานะของระบบนั้น คือ การกำหนดค่าตัวแปรที่เหมาะสมให้กับตัวแปรที่เราไม่ทราบค่าโดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากการวัดจำนวนหนึ่ง หลักการที่จะนำมาใช้ในการกำหนดค่าสำหรับการประมาณสถานะ ก็คือ หลักของกำลังสองน้อยสุดแบบถ่วงน้ำหนัก โดยจะเริ่มต้นจากการกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective Function) [1],[2],[3] ดังนี้

$$\min_{\mathbf{x}} J(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{N_m} w_i [z_i - f_i(\mathbf{x})]^2 \quad (3.1)$$

โดยที่	$J(\mathbf{x})$	คือ	ฟังก์ชันจุดประสงค์
	w_i	คือ	ค่าถ่วงน้ำหนักความแม่นยำของการวัดค่าที่ i
	$f_i(\mathbf{x})$	คือ	ฟังก์ชันที่ใช้ในการคำนวณค่าได้การตรวจวัดด้วยการวัดค่าที่ i
	N_m	คือ	จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการวัดเพื่อใช้ในการประมาณค่าตัวแปรสถานะ
	z_i	คือ	ค่าจากการวัดค่าที่ i
	\mathbf{x}	คือ	เวกเตอร์ของตัวแปรสถานะ

เราสามารถหาคำตอบของสมการดังกล่าวได้ โดยอาศัยวิธีการเชิงเลขของ Newton โดยคำตอบจะอยู่ในรูปแบบดัง (3.2)

$$\Delta \mathbf{x} = -[\nabla_{\mathbf{x}}^2 J(\mathbf{x})]^{-1} [\nabla_{\mathbf{x}} J(\mathbf{x})] \quad (3.2)$$

โดย $\nabla_x J(\mathbf{x})$ สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \nabla_x J(\mathbf{x}) &= \left[\frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial x_1} \quad \frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial x_2} \quad \dots \quad \frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial x_n} \right]^T \\ &= -2 \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_{N_n}(\mathbf{x})}{\partial x_1} \\ \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_{N_n}(\mathbf{x})}{\partial x_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_n} & \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial x_n} & \dots & \frac{\partial f_{N_n}(\mathbf{x})}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & w_2 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & w_{N_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [z_1 - f_1(\mathbf{x})] \\ [z_2 - f_2(\mathbf{x})] \\ \vdots \\ [z_{N_n} - f_{N_n}(\mathbf{x})] \end{bmatrix} \\ &= -2[H]^T[W] \begin{bmatrix} [z_1 - f_1(\mathbf{x})] \\ [z_2 - f_2(\mathbf{x})] \\ \vdots \\ [z_{N_n} - f_{N_n}(\mathbf{x})] \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.3)$$

โดยที่

$$[H] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_{N_n}(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_{N_n}(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_{N_n}(\mathbf{x})}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$[W] = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & w_2 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & w_{N_n} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

เพื่อทดสอบความซับซ้อนในการคำนวณค่าจาโคเบียนของ $\nabla_x J(\mathbf{x})$ เราจะทำการประมาณให้ $[H]$ มีค่าคงที่ และทำการหา $\nabla_{xx}^2 J(\mathbf{x})$

$$\begin{aligned} \nabla_{xx}^2 J(\mathbf{x}) &= \nabla_x \left\{ -2[H]^T[W] \begin{bmatrix} [z_1 - f_1(\mathbf{x})] \\ [z_2 - f_2(\mathbf{x})] \\ \vdots \\ [z_{N_n} - f_{N_n}(\mathbf{x})] \end{bmatrix} \right\} \\ &= -2[H]^T[W][-H] \\ &= 2[H]^T[W][H] \end{aligned} \quad (3.6)$$

จากนั้นนำค่าที่ได้จาก (3.3) และ (3.6) มาแทนค่าในสมการ (3.2) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{x} &= \frac{1}{2} [[H]^T [W] [H]]^{-1} \left\{ 2[H]^T [W] \begin{bmatrix} [z_1 - f_1(\mathbf{x})] \\ [z_2 - f_2(\mathbf{x})] \\ \vdots \\ [z_{N_n} - f_{N_n}(\mathbf{x})] \end{bmatrix} \right\} \\ &= [[H]^T [W] [H]]^{-1} [H]^T [W] \begin{bmatrix} [z_1 - f_1(\mathbf{x})] \\ [z_2 - f_2(\mathbf{x})] \\ \vdots \\ [z_{N_n} - f_{N_n}(\mathbf{x})] \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.7)$$

จาก (3.7) แสดงถึงการคำนวณซ้ำเพื่อหาคำตอบของการประมาณค่าตัวแปรสถานะด้วยวิธีการเชิงเลขนั่นเอง

3.2 วิธีที่นำเสนอในงานวิจัย

เนื่องจากวิธีการแก้ปัญหากลางสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนักที่ใช้ในวิธีการแก้ปัญหแบบนี้ดั้งเดิมนั้นยังมีข้อเสียอยู่บางประการ เช่น ไม่สามารถรับประกันการคำนวณว่าจะสามารถหาคำตอบสุดท้ายจากชุดข้อมูลที่เลือกมาได้เสมอ หรือรับประกันการหาค่าอินเวอร์สของเมทริกซ์ในการคำนวณได้ทุกกรณี ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้การหาคำตอบด้วยวิธีการคำนวณซ้ำแบบ BFGS [13] (Broyden – Fletcher – Goldfarb – Shanno) ร่วมกับการประมาณค่าอนุพันธ์ด้วยวิธีการเชิงเลข เข้ามาช่วยในการหาคำตอบ วิธีการหาคำตอบแบบคำนวณซ้ำแบบ BFGS นั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

วิธีการ BFGS ถือเป็นวิธีการแก้ปัญหเชิงเลขแบบ Quasi – Newton วิธีหนึ่ง โดยเราจะทำการประมาณค่าอนุพันธ์อันดับสองของสมการที่เราสนใจ ($[\nabla^2 f(\mathbf{x}_k)]^{-1}$) ด้วยเมทริกซ์ H_k ที่สามารถคำนวณหาได้ง่ายกว่า จากนั้นทำการหาเวกเตอร์ทิศทาง (Search Direction ; \mathbf{p}_k) ด้วยการแก้สมการจาก (3.8)

$$\mathbf{p}_k = -H_k \nabla f(\mathbf{x}_k) \quad (3.8)$$

เริ่มต้นที่การพิจารณา $f''(x_k)$ ในระบบตัวแปรเดียว (One-dimensional system)

$$f''(x_k) \approx \frac{f'(x_k) - f'(x_{k-1})}{x_k - x_{k-1}} \quad (3.9)$$

เมื่อทำการพิจารณาในระบบหลายตัวแปร (Multidimensional system) แล้วทำการจัดรูปสมการจะได้ดัง (3.10)

$$\nabla^2 f(\mathbf{x}_k)[\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1}] \approx \nabla f(\mathbf{x}_k) - \nabla f(\mathbf{x}_{k-1}) \quad (3.10)$$

สำหรับวิธีการ BFGS เราจะทำการประมาณ $(\nabla^2 f(\mathbf{x}))^{-1}$ ด้วย H_k ดัง (3.11)

$$[\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1}] = H_k [\nabla f(\mathbf{x}_k) - \nabla f(\mathbf{x}_{k-1})] \quad (3.11)$$

และในการคำนวณ BFGS ในแต่ละรอบนั้นเราจะทำการปรับปรุง H_k โดยการใช้เวกเตอร์ทิศทางจาก (3.8) ทำให้สามารถหาค่า H_{k+1} ได้ดังนี้

$$H_{k+1} = (I - \rho_k \mathbf{s}_k \mathbf{y}_k^T) H_k (I - \rho_k \mathbf{y}_k \mathbf{s}_k^T) + \rho_k \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^T \quad (3.12)$$

โดยที่

$$\mathbf{s}_k = \mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k$$

$$\mathbf{y}_k = \nabla f(\mathbf{x}_{k+1}) - \nabla f(\mathbf{x}_k)$$

$$\rho_k = \frac{1}{\mathbf{y}_k^T \mathbf{s}_k}$$

เราจะทำการคำนวณซ้ำจนกระทั่งความแตกต่างระหว่างตัวแปรสถานะในรอบที่ติดกันมีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และถือว่าค่าตัวแปรสถานะนั้นเป็นคำตอบของสมการจากชุดข้อมูลที่เราเลือกใช้ ขั้นตอนในการคำนวณหาคำตอบด้วยวิธี BFGS แบบปรับปรุงสามารถแสดงได้ดังแผนภาพรูปที่ 3.1

อย่างไรก็ดีจาก (3.7) เราจะเห็นได้ว่าการคำนวณด้วยวิธีดั้งเดิมนั้นเรามีข้อจำกัด 2 ประการในการคำนวณหาค่า $\nabla^2 J(\mathbf{x})$ นั่นคือ ในการคำนวณจะต้องมีจำนวนสมการ (หรือจำนวนข้อมูล) ที่มากกว่าหรือเท่ากับจำนวนของตัวแปรที่จะทำการประมาณค่าเท่านั้น และเราจะต้องหา นิพจน์ของอนุพันธ์ของสมการที่ใช้คำนวณค่าเพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ใช้ในการประมาณค่าได้ ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วการสร้างความสัมพันธ์ของอนุพันธ์ของฟังก์ชันเพื่อการเขียนโปรแกรมนั้น อาจจะทำให้เกิดข้อผิดพลาดได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเราทำการหาอนุพันธ์กับสมการที่มีความซับซ้อนมากย่อมทำให้โอกาสในการเกิดข้อผิดพลาดมีสูง แต่หากพิจารณาถึงวิธีที่นำเสนอ นั้น เราจะพบว่าวิธีที่นำเสนอสามารถกำจัดข้อจำกัดดังกล่าวไปได้ ผลคือทำให้เราสามารถทำการ

ประมาณค่าตัวแปรสถานะได้แม้ว่าจะมีจำนวนข้อมูลน้อยกว่าจำนวนตัวแปรสถานะที่เราจะทำการประมาณค่า

นอกจากนี้แล้วในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้การประมาณค่าเชิงเส้นในการคำนวณค่า $\nabla J(\mathbf{x})$ โดยหากเราพิจารณาในระบบตัวแปรเดียวการประมาณค่า $f'(x)$ จากนิยามจะได้ว่า

$$f'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h} \quad (3.13)$$

$$f'(x) \approx \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h} \quad \text{เมื่อ } h \text{ มีค่าน้อยมากๆ} \quad (3.14)$$

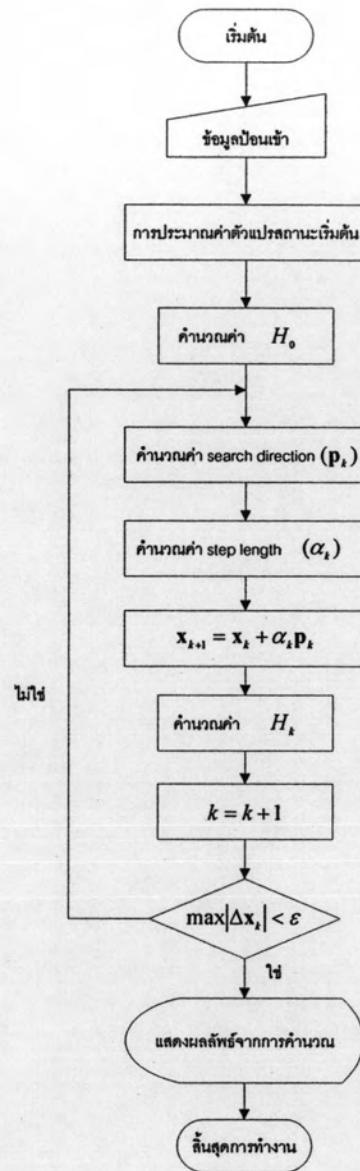
จาก (3.14) เราจะสามารถทำการประมาณค่า $\nabla J(\mathbf{x})$ เพื่อใช้ในการคำนวณได้ และจากขั้นตอนการคำนวณด้วยวิธี BFGS แบบปรับปรุงในรูปที่ 3.1 จะพบว่า มีขั้นตอน 3 ขั้นตอนที่ยังไม่ได้กล่าวถึง อันประกอบไปด้วยส่วนของการประมาณตัวแปรสถานะเบื้องต้น การคำนวณค่า H_0 และการคำนวณค่า Step length (α_k) โดยในแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 การประมาณค่าตัวแปรสถานะเริ่มต้น

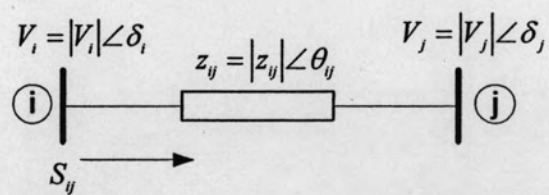
การประมาณค่าด้วยวิธีการที่ได้นำเสนอไปนั้น ค่าตัวแปรสถานะเริ่มต้นนั้นก็เป็ปัจจัยที่มีผลกับการประมาณค่า กล่าวคือถ้าเราเลือกจุดเริ่มต้นของค่าตัวแปรสถานะไม่เหมาะสมกับข้อมูลที่เราใช้ในการประมาณค่า ย่อมจะทำให้การประมาณค่าของเราได้ผลที่ไม่ใกล้เคียงกับค่าจริงด้วย

ในความเป็นจริงแล้วเมื่อเราพิจารณาระบบหนึ่งๆนั้น เราย่อมสามารถทราบได้ว่าตำแหน่งแต่ละตำแหน่งในระบบนั้นทำหน้าที่เป็นส่วนที่จ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าระบบ หรือ ส่วนที่รับกำลังไฟฟ้าจริงจากระบบ ดังนั้นเราจะนำข้อมูลในส่วนนี้มาช่วยในการพิจารณาค่าเริ่มต้นของระบบ และนอกจากนี้แล้วเรายังมีข้อมูลจากการติดตั้งเครื่องมือวัดซึ่งสามารถนำมาช่วยในการพิจารณาค่าเริ่มต้นของตัวแปรสถานะของระบบได้ โดยในการประมาณค่า นั้น เราจะอาศัยสมการการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจริง (Power Transfer Equation) ซึ่งจะเริ่มจากการพิจารณาการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งโดยไม่พิจารณาผลของความจุไฟฟ้าแบบขนาน (Shunt capacitance) ดังรูปที่ 3.2 และเราจะสามารถคำนวณหาค่ากำลังที่ส่งผ่านในสายส่ง (S_{ij}) ได้จาก

$$\begin{aligned} S_{ij} &= V_i \left[\frac{(V_i - V_j)}{z_{ij}} \right]^* \\ &= \frac{|V_i|^2 - V_i V_j^*}{z_{ij}^*} \\ &= \frac{|V_i|^2}{|z_{ij}|} \angle \theta_{ij} - \frac{|V_i| |V_j|}{|z_{ij}|} \angle (\delta_i - \delta_j + \theta_{ij}) \end{aligned} \quad (3.15)$$



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการหาคำตอบของวิธี BFGS



รูปที่ 3.2 แผนภาพสายส่งไฟฟ้ากำลังระหว่างบัส

จาก (3.15) เราจะสามารถหาค่ากำลังจริงที่ไหลผ่านสายส่งระหว่างบัส (P_y) ได้ดังนี้

$$P_y = \frac{|V_i|^2}{|Z_y|} \cos \theta_y - \frac{|V_i||V_j|}{|Z_y|} \cos(\delta_i - \delta_j + \theta_y) \quad (3.16)$$

$$P_y = \frac{|V_i|^2}{|Z_y|} \cos \theta_y - \frac{|V_i||V_j|}{|Z_y|} [\cos(\delta_i - \delta_j) \cos \theta_y - \sin(\delta_i - \delta_j) \sin \theta_y] \quad (3.17)$$

จากนั้น เราจะทำการประมาณค่า (3.17) ให้เป็นสมการเชิงเส้นเพื่อนำไปใช้ในการแก้ปัญหาค่าขีดสุดเพื่อประมาณค่าเริ่มต้นในการประมาณค่าตัวแปรสถานะในขั้นตอนต่อไป โดยเราจะให้ $(\delta_i - \delta_j)$ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งทำให้เราสามารถประมาณค่า $\cos(\delta_i - \delta_j)$ และ $\sin(\delta_i - \delta_j)$ ได้ดังนี้

$$\cos(\delta_i - \delta_j) \approx 1 \quad (3.18)$$

$$\sin(\delta_i - \delta_j) \approx (\delta_i - \delta_j) \quad (3.19)$$

นำค่าจาก (3.18) และ (3.19) แทนค่าใน (3.17) จะได้ค่าประมาณของกำลังจริงที่ไหลในสายส่งระหว่างบัส ดังนี้

$$P_y \approx \frac{|V_i|^2}{|Z_y|} \cos \theta_y - \frac{|V_i||V_j|}{|Z_y|} [\cos \theta_y - (\delta_i - \delta_j) \sin \theta_y] \quad (3.20)$$

$$P_y \approx M_1 + M_2 (\delta_i - \delta_j) \quad (3.21)$$

โดยที่

$$M_1 = \frac{|V_i|^2}{|Z_y|} \cos(\theta_y) - \frac{|V_i||V_j|}{|Z_y|}$$

$$M_2 = \frac{|V_i||V_j|}{|Z_y|} \sin(\theta_y)$$

ดังนั้นหากเราพิจารณาที่บัสใดบัสหนึ่ง เราจะสามารถประมาณค่ากำลังจริงที่บัสนั้นจ่ายเข้าสู่ระบบ (P_i) ได้โดยการรวมค่ากำลังจริงที่ส่งผ่านสายส่งทุกๆ เส้นที่ต่ออยู่กับบัสนั้นๆ นั่นคือ

$$P_i = \sum_{j=1}^{N_{bus}} P_{ij} \quad (3.22)$$

จาก (3.22) ประกอบกับข้อมูลเบื้องต้นที่แต่ละตำแหน่งในระบบ จะทำให้เราสามารถประมาณค่าเริ่มต้นสำหรับมุมของแรงดันในการคำนวณเพื่อประมาณสถานะของระบบได้ เนื่องจากคำตอบที่เป็นไปได้ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขดังกล่าวอาจมีอยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้น เราจะทำการเลือกคำตอบจากการประมาณค่าเริ่มต้นโดยอาศัยการแก้ปัญหาค่าซิดสุดดัง

$$\begin{aligned}
 \min \quad & \sum_{i \in N_{del}} \delta_i^2 \\
 \text{s.t.} \quad & \sum_{i, j \in N_{del}} M_{2,ij} (\delta_i - \delta_j) = P_k - \sum_{i, j \in N_{del}} M_{1,ij} && \text{Measured - bus} \\
 & - \sum_{i, j \in N_{del}} M_{2,ij} (\delta_i - \delta_j) \leq \sum_{i, j \in N_{del}} M_{1,ij} && \text{Generator - bus} \\
 & \sum_{i, j \in N_{del}} M_{2,ij} (\delta_i - \delta_j) \leq - \sum_{i, j \in N_{del}} M_{1,ij} && \text{Load - bus}
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

เมื่อ N_{del} คือ เซตของตัวแปรมุมของแรงดันที่จะทำการประมาณ
 $M_{1,ij}$ คือ ผลรวมของพารามิเตอร์ M_1 ณ บัสที่เราพิจารณา
 $M_{2,ij}$ คือ ผลรวมของพารามิเตอร์ M_2 ณ บัสที่เราพิจารณา

3.2.2 การหาเมตริกซ์ H_0

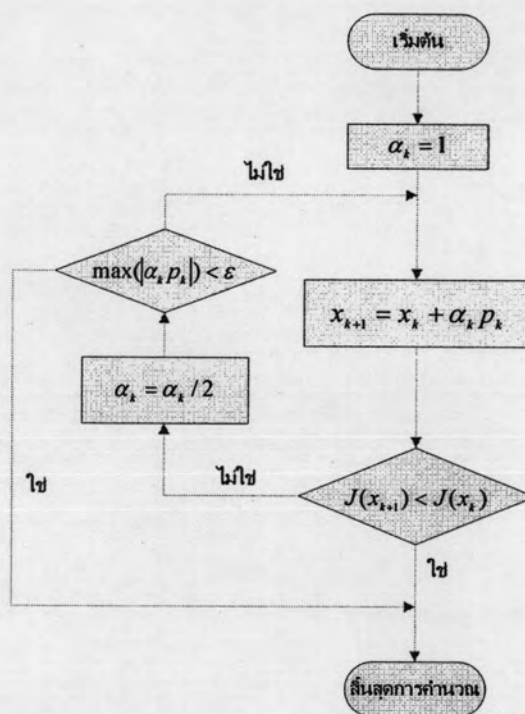
ในการหาเมตริกซ์ H_0 นั้น เราได้เลือก H_0 เป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์ (Identity Matrix) ที่มีขนาดเท่ากับจำนวนตัวแปรที่เราประมาณค่า เพื่อให้เมตริกซ์ H_0 มีคุณสมบัติตามแบบวิธีการคำนวณ BFGS แบบดั้งเดิมนั้นคือจะต้องเป็นเมตริกซ์จัตุรัสที่มีขนาดเท่ากับจำนวนตัวแปรที่เราต้องการจะหาค่า และเมตริกซ์ที่เราเลือกใช้นั้นจะต้องมีคุณสมบัติเป็นบวก (Positive definite)

3.2.3 หาค่า α_k ที่เหมาะสมในการคำนวณแต่ละรอบ

เนื่องจากการคำนวณด้วยวิธี BFGS ซึ่งเป็นการคำนวณแบบ Quasi-Newton นั้น เป็นการคำนวณโดยใช้การประมาณค่า Hessian ของสมการที่เราสนใจ $[\nabla^2 f(\mathbf{x})]$ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้ในบางรอบการคำนวณนั้น ค่าของเวกเตอร์ทิศทาง (\mathbf{p}_k) ที่คำนวณได้นั้นมีทิศทางที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นในการในการคำนวณแต่ละรอบเราจะต้องมีการทดสอบว่าค่า \mathbf{x}_{k+1} ที่ได้จากการปรับปรุงสมการนั้น ทำให้ค่าของฟังก์ชันเป้าหมายของเรามีค่าลดลงหรือไม่ ถ้าหากมีค่าลดลงเราจะถือว่าค่าตัวแปรสถานะใหม่ที่ได้จากการปรับปรุงนั้นเหมาะสม แต่ถ้าหากค่า \mathbf{x}_{k+1} นั้นทำให้ค่าฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าเพิ่มขึ้น หรือไม่ลดลงนั้นแปลว่าจุดๆนั้นไม่เหมาะสมต่อการปรับปรุงค่าตัวแปรสถานะของเราจะต้องมีการปรับปรุงค่า α_k ให้เหมาะสม แต่ถ้าหากการปรับปรุงค่าตัวแปรสถานะตามทิศทางของ \mathbf{p}_k ที่เราได้มานั้นไม่เหมาะสมเลย กล่าวคือการเคลื่อนที่ของคำตอบไปใน

ทิศทางดังกล่าวไม่ทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าลดลง เราจะต้องทำการหาค่า H_k ใหม่ที่เหมาะสมเฉพาะในรอบนั้นๆ จากนั้นจึงทำการคำนวณดังที่ได้กล่าวมาแล้วต่อไป ลำดับขั้นตอนการหาค่า α_k ที่เหมาะสมนั้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3

อย่างไรก็ดี หากค่าสูงสุดของขนาดของการปรับปรุงตัวแปรสถานะในระหว่างการคำนวณค่า α_k นั้นมีค่าน้อยมากๆ เราจะถือว่า p_k ที่เราใช้นั้นไม่เหมาะสม โปรแกรมจะทำการเลือกเมตริกซ์ H_k ใหม่ให้เป็นเมตริกซ์เอกลักษณะที่มีขนาดเท่ากับจำนวนตัวแปรที่เราพิจารณาแล้วทำการคำนวณในขั้นต่อไป



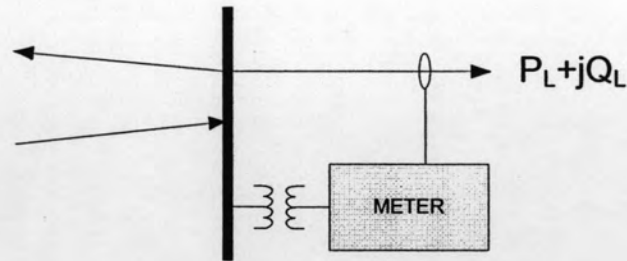
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการหาค่า α_k ในแต่ละรอบการคำนวณ

3.3 การประยุกต์วิธีที่นำเสนอกับการประมาณค่าตัวแปรสถานะระบบไฟฟ้ากำลัง

หัวข้อที่ผ่านมาเราได้นำเสนอถึงวิธีการประมาณค่าที่เราจะนำมาใช้ทดแทนวิธีการประมาณค่าตัวแปรสถานะที่มีมาในอดีตเพื่อที่จะแก้ไขจุดด้อยของวิธีการประมาณค่าดังกล่าว ส่วนในหัวข้อนี้เราจะได้นำวิธีการประมาณค่าที่เราได้นำเสนอมาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลัง โดยจะแบ่งส่วนที่พิจารณาออกเป็น

3.3.1 ลักษณะและตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือวัดในระบบ

ในงานวิจัยนี้เราจะกำหนดตำแหน่งของเครื่องมือวัด ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือวัด

เครื่องมือวัดที่พิจารณาในงานวิจัยนี้จะต้องวัดปริมาณพื้นฐานทางไฟฟ้าได้อย่างน้อย 3 ค่า คือ กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และขนาดของแรงดัน ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งได้ โดยตำแหน่งที่เราจะติดตั้งเครื่องมือวัดจะเป็นตำแหน่งที่เป็นจุดเชื่อมต่อของระบบซึ่งมีโหลดต่ออยู่

3.3.2 ข้อมูลจากเครื่องมือวัด

งานวิจัยนี้เราจะกำหนดให้ตัวแปรสถานะคือ ขนาดและมุมของแรงดันที่แต่ละบัส และ ข้อมูลที่เราได้จากการติดตั้งเครื่องมือวัดแต่ละตำแหน่ง คือ

- 1) โหลดกำลังจริง (Real Power Load ; P_L)
- 2) โหลดรีแอกทีฟ (Reactive Load ; Q_L)
- 3) ขนาดของแรงดัน

ปริมาณทั้ง 3 สามารถคำนวณได้จากตัวแปรสถานะของระบบดัง (3.24) - (3.26)

$$f_{P,i}(|V|, \delta) = P_{L,i} = -\sum_{j=1}^{N_{Bus}} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) + P_{G,i} \quad (3.24)$$

$$f_{Q,i}(|V|, \delta) = Q_{L,i} = \sum_{j=1}^{N_{Bus}} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.25)$$

$$f_{V,i}(|V|, \delta) = |V_i| \quad (3.26)$$

โดยที่ $P_{G,i}$ จะมีค่าเท่ากับ 0 สำหรับบัสที่ไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่

3.3.3 การปรับปรุงฟังก์ชันเป้าหมายที่ใช้ในการประมาณค่า

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าในระบบที่เราพิจารณาหนึ่งๆ นั้น เราสามารถทราบได้ว่าแต่ละตำแหน่งในระบบนั้นทำหน้าที่รับหรือส่งกำลังไฟฟ้าจริงได้ ดังนั้นการประมาณค่าตัวแปรสถานะในงานวิจัยนี้เราจึงได้นำข้อมูลส่วนนี้มาใช้ปรับปรุงฟังก์ชันเป้าหมายของเราเพื่อให้ค่าที่ได้จากการคำนวณนั้นมีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น ในงานวิจัยนี้เราได้เลือกใช้วิธี Penalty [15] เข้ามาปรับปรุงฟังก์ชันเป้าหมาย โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.3.3.1 วิธี Penalty

วิธี Penalty นั้นจะใช้ในการคำนวณหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของสมการเมื่อมีข้อจำกัด โดยทำการเพิ่มสมการบางอย่างเข้าไปที่ฟังก์ชันเป้าหมายเดิม โดยสมการที่เพิ่มเข้าไปจะมีค่ามากเมื่อค่าตัวแปรสถานะละเมิดข้อจำกัดนั้น และมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อตัวแปรสถานะอยู่ในเงื่อนไขข้อจำกัด ทั้งนี้เพื่อให้การคำนวณหาคำตอบนั้นเข้าสู่คำตอบบริเวณที่ไม่มีการละเมิดข้อจำกัดต่างๆ ในแต่ละรอบของการคำนวณซ้ำ รูปแบบของการปรับปรุงฟังก์ชันเป้าหมายด้วยวิธี Penalty นั้นสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.} \quad & g_1(\mathbf{x}) \leq 0 \\ & g_2(\mathbf{x}) \leq 0 \\ & \vdots \\ & g_m(\mathbf{x}) \leq 0 \end{aligned}$$

โดยที่ $f(\mathbf{x})$ คือ ฟังก์ชันเป้าหมายเดิมก่อนที่จะมีการปรับปรุง และ $g_i(\mathbf{x})$ คือ สมการข้อจำกัดข้อที่ i ในการคำนวณหาจุดต่ำสุดของฟังก์ชันเป้าหมาย เราจะกำหนดฟังก์ชัน Penalty ($Pen(\mathbf{x})$) ขึ้นมาเพื่อทำการปรับปรุงฟังก์ชันเป้าหมายโดยฟังก์ชันที่กำหนดมานั้นจะมีลักษณะดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น รูปแบบสมการ Penalty หนึ่งในที่นิยมใช้นั้นคือ ผลรวมของค่ากำลังสองของฟังก์ชัน Penalty ย่อยของแต่ละข้อจำกัด ($p_i(\mathbf{x})$) ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$Pen(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m (p_i(\mathbf{x}))^2 \quad (3.27)$$

$$p_i(\mathbf{x}) = \max(0, g_i(\mathbf{x})) = \begin{cases} 0 & \text{if } g_i(\mathbf{x}) \leq 0 \\ g_i(\mathbf{x}) & \text{if } g_i(\mathbf{x}) > 0 \end{cases} \quad (3.28)$$

จาก (3.27) และ (3.28) เราจะสามารถทำการปรับปรุงฟังก์ชันเป้าหมายของเราได้เป็น

$$\min f(x) + \gamma_k Pen(x) \quad (3.29)$$

โดยที่ γ_k คือ ค่าคงที่บวกใดๆ โดยเราจะเรียกว่า Penalty parameter โดยค่าของ γ_k นั้น จะค่อยเพิ่มขึ้นในแต่ละรอบการคำนวณเพื่อเป็นการเพิ่มความสำคัญให้กับส่วนของ Penalty ฟังก์ชัน ($Pen(x)$) ทำให้ผลการคำนวณตัวแปรสถานะเข้าสู่คำตอบที่ไม่ละเมิดข้อจำกัดที่เราสนใจ

3.3.3.2 การประยุกต์ใช้ Penalty กับการประมาณค่าตัวแปรในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในการประมาณค่าตัวแปรสถานะในงานวิจัยนี้เราได้ทำการประยุกต์วิธี Penalty เข้ากับ ฟังก์ชันเป้าหมายโดยได้เลือกใช้ข้อจำกัดต่างๆเพื่อปรับปรุงฟังก์ชันเป้าหมายดังนี้

1) ข้อมูลการรับ หรือ ส่งกำลังจริงแต่ละบัสในระบบ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2.1 ข้อมูลการรับหรือส่งกำลังจริงของแต่ละบัสเป็นข้อมูล เบื้องต้นที่เราควรทราบ ดังนั้นในการประมาณค่าตัวแปรสถานะจึงได้นำเอาข้อมูลในส่วนนี้มาเพื่อ ปรับปรุงฟังก์ชันเป้าหมายเพื่อให้คำตอบมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น โดยสามารถ นำไปประยุกต์ใช้ได้ดังนี้

$$\text{กำหนดให้} \quad g_i(x) = P_i(x) = \sum_{j=1}^{N_{bus}} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.30)$$

$$\begin{array}{ll} \text{จะได้ว่า} & -g_i(x) \leq 0 \quad \text{เมื่อเป็นบัสที่ส่งกำลังไฟฟ้าจริง} \\ & g_i(x) \leq 0 \quad \text{เมื่อเป็นบัสที่รับกำลังไฟฟ้าจริง} \end{array}$$

2) ข้อมูลการรับกำลังรีแอกทีฟที่ตำแหน่งโหนดบัส

เนื่องจากโดยปกติแล้วตำแหน่งที่เป็นโหนดบัสในระบบจะเป็นตำแหน่งที่รับกำลังรีแอกทีฟจากระบบเสมอ ดังนั้นข้อมูลในส่วนนี้จึงได้ถูกเลือกใช้เป็นข้อจำกัดอีกประการหนึ่งในการ คำนวณ โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในวิธี Penalty ได้ดังนี้

$$\text{กำหนดให้} \quad g_i(x) = Q_i = \sum_{j=1}^{N_{bus}} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.31)$$

$$\text{จะได้ว่า} \quad g_i(x) \leq 0 \quad \text{เมื่อเป็นบัสที่รับกำลังรีแอกทีฟ}$$

3) ขนาดแรงดันที่แต่ละบัส

ในสภาวะการทำงานปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง ขนาดแรงดันที่แต่ละบัสจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงดันใช้งานปกติ กล่าวคือจะมีขนาดอยู่ที่ประมาณ 1 p.u. โดยอาจจะมีค่ามาก หรือ น้อยกว่าค่านี้นิดหน่อย ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการกำหนดระดับแรงดันสูงสุด และ ระดับแรงดันต่ำสุดไว้เพื่อให้เป็นการกำจัดเซตคำตอบที่ไม่มีประสิทธิภาพออกไปจากการคำนวณ โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้ค่าขนาดของแรงดันมีขนาดอยู่ในช่วง 0.9 ถึง 1.1 โดยสามารถประยุกต์ใช้ได้ดังแสดง

$$\text{กำหนดให้} \quad g_i(x) = \begin{cases} 0.9 - |V_i| & ; |V_i| < 0.9 \\ |V_i| - 1.1 & ; |V_i| > 1.1 \\ 0 & ; 0.9 \leq |V_i| \leq 1.1 \end{cases} \quad (3.32)$$