

บทที่ 4

การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า(Load flow)โดยอาศัยวิธีการดั้งเดิมเช่นวิธีนิวตัน-ราฟสัน จำเป็นต้องอาศัยวิธีการวนซ้ำ(Iterative) แต่เนื่องจากการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล จำเป็นต้องอาศัยการคำนวณโหลดโฟลว์ในการวิเคราะห์ผลของเหตุขัดข้องในแต่ละสถานะของระบบที่สุ่มได้ ดังนั้นระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณจึงยาวนานมาก ด้วยเหตุดังกล่าววิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำวิธีโหลดโฟลว์ซึ่งไม่ต้องใช้การวนซ้ำ(Non-iterative) มาใช้ในการวิเคราะห์ ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงในรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีโหลดโฟลว์

ก่อนที่จะกล่าวถึงรายละเอียดของการคำนวณวิธีโหลดโฟลว์ จะกล่าวถึงการคำนวณโหลดโฟลว์แบบเอซี (A.C. Load Flow) ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้กันอยู่ทั่ว ๆ ไปเพื่อความเข้าใจในเบื้องต้น ในหัวข้อ 4.1 เสียก่อนแล้วจึงกล่าวถึงวิธีโหลดโฟลว์(D.C. Load Flow)ในหัวข้อ 4.2 ต่อไป

4.1 เอซีโหลดโฟลว์

สำหรับการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบ เอ.ซี. มีหลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธีเกาส์ (Gauss method) วิธีเกาส์-ไซเดล (Gauss-Seidel method) และวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) แต่วิธีนิวตัน-ราฟสันได้รับความนิยมมาก เนื่องจากสามารถหาคำตอบได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีนิวตัน-ราฟสัน

สมการโหลดโฟลว์ สามารถเขียนในรูปของกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าบัส และแรงดันที่บัสได้ดังนี้[12]

$$P_i - jQ_i = V_i^* \cdot \sum_{n=1}^N Y_{in} \cdot V_n \quad (4.1)$$

โดยที่ P_i คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่บัส i
 Q_i คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลเข้าสู่บัส i
 V_i, V_n คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส i และ n ตามลำดับ

- V_i^* คือ สันยยุคเชิงซ้อนของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i
 Y_{in} คือ สมาชิกในตำแหน่งที่ (i,n) ของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์
 N คือ จำนวนบัสทั้งหมดในระบบกำลังไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาสมการที่ 4.1 จะสามารถเขียนสมการแสดงค่ากำลังจริง และกำลังรีแอกทีฟที่จ่ายเข้าไปยังบัส i ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบไปด้วยบัสจำนวน N บัส ได้ดังสมการที่ 4.2 และ 4.3

$$P_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (4.2)$$

$$Q_i = - \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (4.3)$$

โดยที่

P_i, Q_i = กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่จ่ายเข้าบัส i

$|V_i|, \delta_i$ = ขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัสที่บัส i

$|V_n|, \delta_n$ = ขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัสที่บัส n

$|Y_{in}|, \theta_{in}$ = สมาชิกตำแหน่ง (i,n) ของเมตริกซ์แอดมิตแตนซ์ของระบบ

สมการที่ 4.2 และ 4.3 เรียกว่าสมการโหลดโฟลว์ (Load flow equation) ซึ่งเป็นสมการที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น การวิเคราะห์โหลดโฟลว์โดยการใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน จะเปลี่ยนสมการโหลดโฟลว์ให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นโดยการใช้การกระจายของอนุกรมเทเลอร์ (Taylor series expansion) กระจายฟังก์ชันของ P และ Q รอบจุดประมาณเริ่มต้นและไม่คิดเทอมอันดับสองขึ้นไปโดยจะเขียนให้อยู่ในรูปของสมการความคลาดเคลื่อนของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟเป็นเมตริกซ์ ดังสมการที่ 4.4

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \dots \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & \vdots & J_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ J_3 & \vdots & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \dots \\ \frac{|\Delta V|}{V} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

- โดยที่ ΔP , ΔQ คือ เวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของแต่ละบัส
 $\Delta \delta$ คือ เวกเตอร์ของมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บัสซึ่งต้องทำการแก้ไข(Correction)
 $|\Delta V|$ คือ เวกเตอร์ของขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสซึ่งต้องทำการแก้ไข(Correction)
 J_1, J_2, J_3, J_4 คือ เมตริกซ์ จาโคเบียนย่อย (Sub Jacobian Matrix)

สมาชิกแต่ละสมาชิกของ ΔP และ ΔQ สามารถคำนวณได้จากสมการ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

$$\Delta P_i = (P_{gi} - P_{di}) - P_{i,calc} \quad (4.5)$$

$$\Delta Q_i = (Q_{gi} - Q_{di}) - Q_{i,calc} \quad (4.6)$$

- โดยที่ ΔP_i คือสมาชิกตัวที่ i ของเวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนกำลังจริง
 ΔQ_i คือสมาชิกตัวที่ i ของเวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนกำลังรีแอกทีฟ
 P_{gi} คือค่ากำลังจริงที่ผลิตได้จากบัส i
 P_{di} คือค่าความต้องการกำลังจริงของบัส i
 Q_{gi} คือค่ากำลังรีแอกทีฟที่ผลิตได้จากบัส i
 Q_{di} คือค่าความต้องการกำลังรีแอกทีฟของบัส i
 $P_{i,calc}$ คือค่ากำลังจริงที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2 สำหรับบัส i
 $Q_{i,calc}$ คือค่ากำลังรีแอกทีฟที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.3 สำหรับบัส i

และสำหรับสมาชิกแต่ละสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียนย่อย J_1 สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ 4.7 และ 4.8 สมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียนย่อย J_2 หาได้โดยใช้สมการที่ 4.9 และ

4.10 สมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียนย่อย J_3 หาได้โดยใช้สมการที่ 4.11 และ 4.12 และ สมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียนย่อย J_4 หาได้โดยใช้สมการที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ[12]

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i V_j Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -Q_i - |V_i|^2 B_{ii} \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i V_j Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = P_i - |V_i|^2 G_{ii} \quad (4.10)$$

$$|V_j| \frac{\partial P_i}{\partial V_j} = |V_j| |V_i Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (4.11)$$

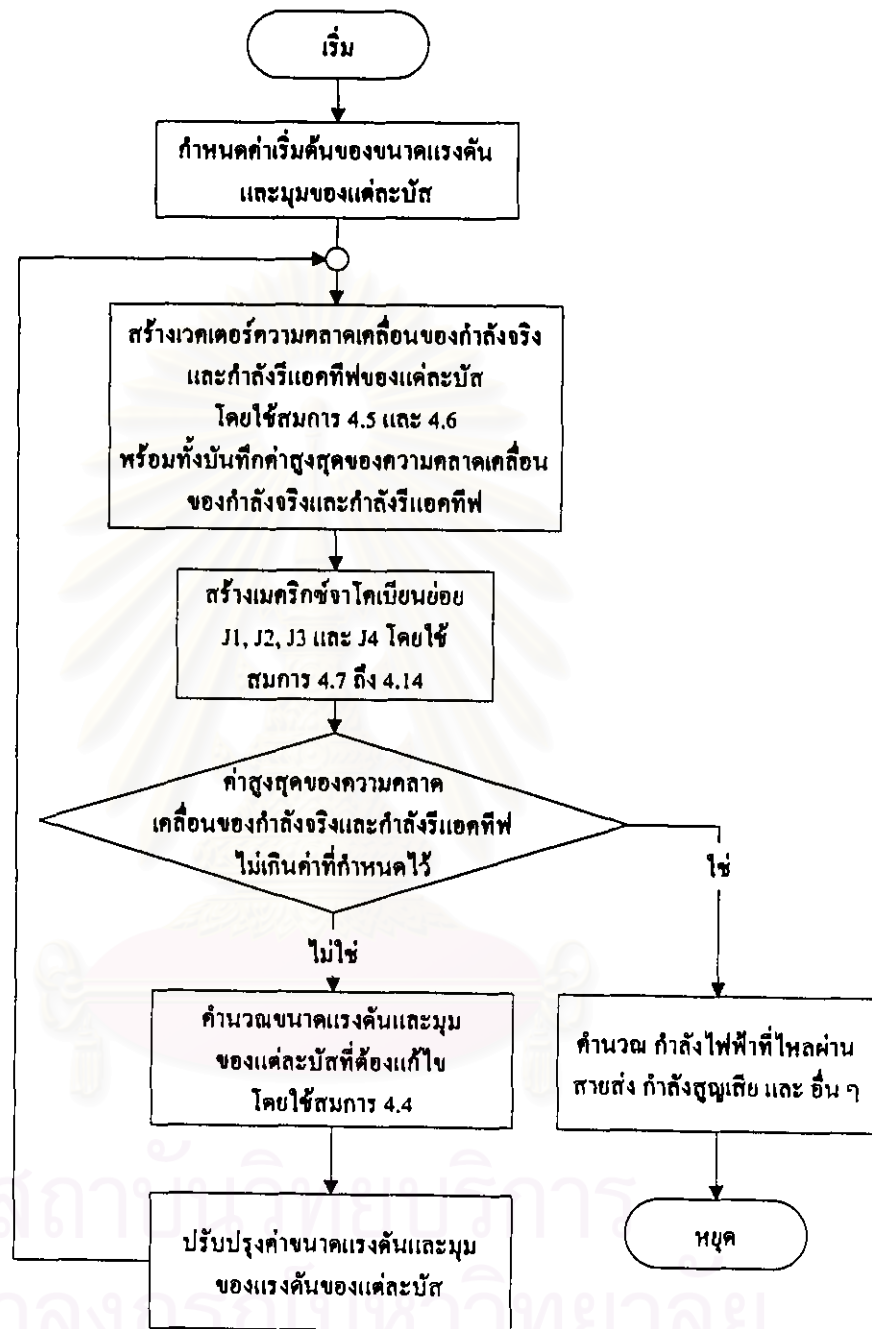
$$|V_i| \frac{\partial P_i}{\partial V_i} = P_i + |V_i|^2 G_{ii} \quad (4.12)$$

$$|V_j| \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = -|V_j| |V_i Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (4.13)$$

$$|V_i| \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = Q_i - |V_i|^2 B_{ii} \quad (4.14)$$

โดยค่าของ G_{ii} และ B_{ii} เป็นไปตามสมการ 4.15

$$Y_{ii} = |Y_{ii}| \angle \theta_{ii} = |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + j |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} = G_{ii} + j B_{ii} \quad (4.15)$$



รูป 4.1 ขั้นตอนการคำนวณโหลดโพล์ด้วยวิธี นิวตัน-ราฟสัน

การคำนวณโหลดโพล์ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน จะคำนวณซ้ำในสมการ 4.4 เพื่อหาค่าที่จะนำไปปรับเปลี่ยนค่ามุมกับขนาดแรงดันของแต่ละบัสได้แก่ $\Delta\delta$ และ $\frac{\Delta|V|}{V}$ แล้วนำไปใช้เป็นค่า

เริ่มต้นสำหรับการคำนวณในรอบถัดไป จนกระทั่งค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ทุกบัสในระบบน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ค่าหนึ่งจึงหยุดคำนวณ

จากขั้นตอนทั้งหมดดังกล่าวข้างต้นสามารถสรุปเป็นโฟลว์ชาร์ตแสดงขั้นตอนการคำนวณโหลดโฟลว์ตามวิธีนิวตัน-ราฟสัน ได้ดังรูป 4.1[11]

4.2 ดีซีโหลดโฟลว์

จากสมการโหลดโฟลว์ตามวิธีนิวตัน-ราฟสันดังสมการ 4.4 สามารถเขียนใหม่โดยใช้เทคนิค "ดีคัปเปิลโหลดโฟลว์"(Decoupled load flow) ได้เป็น 2 สมการคือสมการที่ 4.16 และสมการ 4.17 โดยมีสมมุติฐานดังนี้[11,3]

ก) การเปลี่ยนแปลงมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บัส ($\Delta\delta$) จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังรีแอกทีฟที่บัส (ΔQ) น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงของกำลังจริงที่บัส (ΔP)

ข) การเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส ($\Delta|V|$) จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังจริงที่บัส ΔP น้อยมากแต่จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่บัส ΔQ ค่อนข้างมาก

ค) ค่ามุมเฟสของแรงดันแต่ละบัสจะมีค่าใกล้เคียงกัน จะสามารถประมาณ $\cos\delta_p \approx 1$ และ $\sin\delta_{pq} \approx 0$

ง) ค่าความนำไฟฟ้า (Conductance) G_{pq} ของสายส่ง จะมีค่าน้อยกว่าค่าซัสเซปแตนซ์ (Susceptance) B_{pq} ของสายส่งมาก นั่นคือ $G_{pq} \ll B_{pq}$

จ) ค่ากำลังรีแอกทีฟ Q_p มีค่าน้อยกว่าค่า $B_{pq}|V_p|^2$ มาก นั่นคือ $Q_p \ll B_{pq}|V_p|^2$

ฉ) ละเลยผลของรีแอกแตนซ์ที่ต่อลงดิน (Shunt reactance) ทั้งหมด

ช) ละเลยผลของหม้อแปลงปรับเฟส (Phase shift transformers) ทั้งหมด

จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้สามารถประมาณได้ว่าค่าสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียน $[J_2]$ และ $[J_1]$ ในสมการที่ 4.4 มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการ 4.4 ได้ใหม่เป็น 2 สมการคือสมการที่ 4.16 และ 4.17 ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta P_1}{|V_1|} \\ \frac{\Delta P_2}{|V_2|} \\ \vdots \end{bmatrix} = [B'] \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta Q_1}{|V_1|} \\ \frac{\Delta Q_2}{|V_2|} \\ \vdots \end{bmatrix} = [B''] \begin{bmatrix} \Delta |V_1| \\ \Delta |V_2| \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

โดยที่

$$B'_{ik} = -\frac{1}{x_{ik}} \text{ หากมีกิ่งเชื่อมระหว่างโหนดที่ } i \text{ กับ โหนดที่ } k \text{ ไม่เช่นนั้น } B'_{ik} = 0$$

$$B'_{ii} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{x_{ik}}$$

$$B''_{ik} = \frac{-x_{ik}}{r_{ik}^2 + x_{ik}^2} \text{ หากมีกิ่งเชื่อมระหว่างโหนดที่ } i \text{ กับ โหนดที่ } k \text{ ไม่เช่นนั้น } B''_{ik} = 0$$

$$B''_{ii} = \sum_{k=1}^N \frac{x_{ik}}{r_{ik}^2 + x_{ik}^2}$$

เมื่อละเลยสมการที่ 4.17 และให้ $|V_i| = 1.0 \text{ perunit}$ จะได้สมการ "ดีซีโพลต์ไฟลว์" ซึ่งเป็นสมการเชิงเส้นดังสมการที่ (4.18) ซึ่งสามารถคำนวณผลตอบของระบบได้อย่างรวดเร็วมาก เพราะไม่มีการวนซ้ำ (non-iterative) เพื่อหาคำตอบของสมการ

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \end{bmatrix} = [B'] \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

และจะสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งจากบัส p ไปยังบัส q ได้ดังสมการที่ 4.19[11,3]

$$P_{pq} = \frac{1}{X_{pq}} (\delta_p - \delta_q) \quad (4.19)$$

โดยที่

δ_p = มุมเฟสของแรงดันที่บัส p

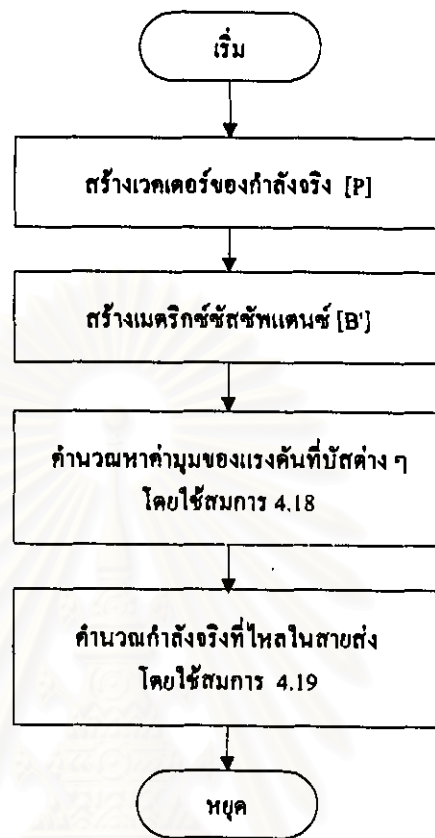
δ_q = มุมเฟสของแรงดันที่บัส q

X_{pq} = ค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่งระหว่างบัส p และบัส q

P_{pq} = ค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบัส p ไปยังบัส q

จากขั้นตอนทั้งหมดดังกล่าวข้างต้นสามารถสรุปเป็นโฟลว์ชาร์ตแสดงขั้นตอนการคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยวิธีดีซีโหลดโฟลว์ ได้ดังรูป 4.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 4.2 ขั้นตอนการคำนวณไหลดโพล์ด้วยวิธี ดิซีไหลดโพล์

เป็นที่ทราบกันทั่วไปว่า ถึงแม้ดิซีไหลดโพล์จะมีความรวดเร็วในการให้ผลตอบแต่ข้อเสียคือคือได้ละเลยการพิจารณาแรงคั้นไฟฟ้าของระบบดังนั้นคำตอบที่ได้จากวิธีดังกล่าวจึงอาจคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง แต่เนื่องจากขั้นตอนของการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังในระดับชั้นที่ 2 และการแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดเหตุขัดข้องจำเป็นต้องคำนวณไหลดโพล์ด้วยเสมอจึงจำเป็นต้องลดระยะเวลาในการคำนวณโดยการใช้ดิซีไหลดโพล์แทนเอซีไหลดโพล์ แต่ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวจะไม่มีผลต่อการนำค่าดัชนีไปใช้งานในทางปฏิบัติ ทั้งนี้เนื่องจากค่าดัชนีต่าง ๆ ที่จะนำไปใช้นั้นเป็นการใช้ในลักษณะเชิงเปรียบเทียบ(Relative index) ดังนั้นผลการคลาดเคลื่อนดังกล่าวจึงยอมรับได้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้การคำนวณไหลดโพล์ด้วยวิธีดิซีไหลดโพล์