บทที่ 2

การศึกษาโหลดโฟลว์

2.1 คำนำ

ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Stability) จำเป็นที่จะต้องทราบสภาวะเริ่มต้นหรือสภาวะคงตัว (Steady State) ของระบบก่อนที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในระบบนั้น โดยค่าที่ต้องการทราบคือค่าของขนาด และมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ ในระบบที่สภาวะเริ่มต้นนั้น ซึ่งค่าที่สภาวะเริ่มต้นนี้สามารถหาได้จากการศึกษาโหลดโฟลว์ (Load Flow) หรือ เพาเวอร์โฟลว์ (Power Flow) ของระบบ นอกจากนี้ ยังทราบค่าของกระแสที่ไหลในสายส่ง รวมทั้งค่ากระแสจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและกระแสที่ไหลไปยังโหลดในสภาวะคงตัวนั้นด้วย ค่ากระแสเริ่มต้นนี้จะทำให้เราสามารถหาสภาวะเริ่มต้นของเครื่องจักรกล (Machine) ต่าง ๆ ในระบบที่เราทำการศึกษานั้นได้

โดยแท้จริงแล้ว นอกจากการศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ยังมีการศึกษาอย่างอื่นอีกที่จำเป็นต้องใช้โหลดโฟลว์เป็นพื้นฐาน เช่น การวิเคราะห์ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง (Fault Analysis), การวางแผนระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Planning), การจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Load Dispatch) เป็นต้น ซึ่งแต่ก่อนที่จะมีเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เป็นดิจิตอลในการวิเคราะห์โหลดโฟลว์นั้นเราใช้ Network Analyzer เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ เมื่อเรามีคอมพิวเตอร์ที่เป็นดิจิตอลขึ้นมาวิธีการทางคณิตศาสตร์แบบต่าง ๆ ก็ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี แต่ในการศึกษานี้ใช้วิธีการศึกษาโหลดโฟลว์โดยวิธีของ Gauss-Seidel Iterative โดยใช้ Y_{bus} [4,5]

2.2 การกำหนดชนิดบัส [3,4]

ในการศึกษาโหลดโฟลว์จะเห็นได้ว่า ในแต่ละบัสของระบบที่ทำการศึกษาจะประกอบด้วยตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับบัสนั้นอยู่ 4 ค่า คือ กำลังจริง (Real Power, P_i), กำลังรีแอคทีฟ (Reactive Power, Q_i), ขนาดของแรงดัน (Voltage Magnitude, V_i) และมุมของแรงดัน (Phase Angle, δ_i) ซึ่งในการศึกษาจะมีการกำหนดค่าของตัวแปรให้ 2 ตัวเท่านั้นในแต่ละบัส และต้องคำนวณหาค่าตัวแปรที่เหลืออีก 2 ตัว ในการกำหนดค่าตัวแปร 2 ตัวในแต่ละบัสนั้น จะทราบได้จากสิ่งที่มาเชื่อมต่อกับบัสนั้น เช่น เมื่อเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่จะสามารถกำหนดค่า P_i และ V_i ได้ หรือถ้าเป็นบัสที่มีโหลดต่ออยู่ก็จะทราบค่า P_i และ Q_i ของบัสนั้น แต่เนื่องจากเราไม่สามารถกำหนดค่ากำลังสูญเสีย (Power Loss) ในระบบไฟฟ้ากำลังได้ เพื่อให้เกิดการสมดุลย์ในการคำนวณหาค่ากำลังจริง จึงจำเป็นต้องให้ค่าของ P_i ที่บัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่เป็นค่าลอยตัวเสียบัสหนึ่ง และให้บัสนั้นเป็นบัสอ้างอิงคือมีค่า δ_i เท่ากับศูนย์ และเรียกบัสนี้ว่า สวิงบัส (Swing Bus) หรือ บัสอ้างอิง (Reference Bus) นั่นเอง

ชนิดของบัสสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดดังนี้ คือ

1. บัสอ้างอิง (ReferenceBus), สวิงบัส (Swing Bus) หรือ แสล็คบัส (Slack Bus) เป็นบัสที่กำหนดค่า V_i, δ_i ให้ และมีค่าคงที่ (โดยทั่วไปจะกำหนดให้ $\delta_i=0$) ต้องหาค่า P_i, Q_i ซึ่งเราจะทราบค่านี้ได้ก็ต่อเมื่อทราบค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งทั้งหมดในระบบก่อน ในการศึกษาบัสอ้างอิงจะต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับระบบไฟฟ้าที่กำลังทำการศึกษาอยู่

2. บัสควบคุมแรงดัน (Voltage Controlled Bus หรือ PV Bus) เป็นบัสที่กำหนดค่า P_i, V_i ให้ และต้องการหาค่าของตัวแปรที่เหลือ คือ Q_i และ δ_i โดยบัสชนิดนี้เป็นบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่

3. โหลดบัส (Load Bus หรือ PQ Bus) เป็นบัสที่กำหนดค่า P_i, Q_i ให้ และต้องการหาค่าของตัวแปรที่เหลือ คือ V_i, δ_i โดยบัสชนิดนี้เป็นบัสที่มีโหลดต่ออยู่

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันบัส [3,4]

สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสบัส (Bus Current) และแรงดันบัส (Bus Voltage) เป็นไปตามสมการ

$$[I] = [Y_{bus}] [E] \qquad (2.3\text{-}1)$$

เมื่อ [I] เป็นเวกเตอร์ของกระแสบัส (Bus Current)

[E] เป็นเวกเตอร์ของแรงดันบัส (Bus Voltage)

$[Y_{bus}]$ เป็นบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ (Bus Admittance Matrix)

การหาบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์สามารถทำได้โดยมีหลักการดังนี้

1. Y_{ii} หรือสมาชิกในแนวทะแยง คือ ผลรวมของแอดมิตแตนซ์ที่ต่ออยู่กับบัส i ทั้งหมด (Line Admittance และ Admittance to Ground)

2. Y_{ij} หรือสมาชิกนอกแนวทะแยง คือ ค่าลบของแอดมิตแตนซ์ที่ต่ออยู่ระหว่างบัส i และบัส j (Line Admittance)

2.4 การหาโหลดโฟลว์โดยวิธี Gauss-Seidel Method ใช้ Y_{bus} [4,5]

สมการกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าบัสจะมีค่าเท่ากับแรงดันที่บัสคูณด้วยคอนจูเกตของกระแสที่บัสนั้น คือ

$$S_i = P_i - jQ_i = E_i^* I_i \qquad (2.4\text{-}1)$$

ในการคำนวณหาค่าโหลดโฟลว์เริ่มจากการสมมุติค่าเริ่มต้นของแรงดันที่ทุกบัส แล้วคำนวณหาแรงดันที่แท้จริงของทุกบัส ยกเว้นสวิงบัสที่จะถูกกำหนดและคงที่ตลอดการคำนวณ ค่ากระแส

ของทุกบัสสามารถคำนวณได้ดังนี้ (ยกเว้นสวิงบัส)

$$I_i = \frac{(P_i - jQ_i)}{E_i^*} \qquad i = 1,2,3,\ldots,n \quad i \neq s \qquad (2.4\text{-}2)$$

เมื่อ n คือจำนวนของบัส

และค่ากระแสที่บัสสามารถหาได้จากสมการที่ (2.3-1) ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมาชิกของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$I_i = \sum_{j=1}^{n} Y_{ij}E_j \qquad i = 1,2,3,\ldots,n \quad i \neq s \qquad (2.4\text{-}3)$$

$$E_i = \frac{1}{Y_{ii}}\left(I_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} Y_{ij}E_j\right) \qquad i = 1,2,3,\ldots,n \quad i \neq s \qquad (2.4\text{-}4)$$

เมื่อแทนค่าของกระแสที่บัส (I_i) ด้วยสมการที่ (2.4-2) จะได้สมการแรงดันไฟฟ้าดังนี้

$$E_i = \frac{1}{Y_{ii}}\left(\frac{(P_i - jQ_i)}{E_i^*} - \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} Y_{ij}E_j\right) \qquad i = 1,2,3,\ldots,n \quad i \neq s \qquad (2.4\text{-}5)$$

ซึ่งสมการที่ (2.4-5) นี้จะเกี่ยวข้องแต่เฉพาะแรงดันไฟฟ้าของบัสเท่านั้นและสามารถนำไปใช้หาค่าแรงดันไฟฟ้าที่แท้จริงของทุกบัสในระบบได้ (ยกเว้นสวิงบัสที่จะเป็นค่าคงที่) โดยใช้ Iterative Method ทางคณิตศาสตร์ ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ Modified Gauss-Seidel Method ในโปรแกรมที่ได้เขียนขึ้น เมื่อได้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสแล้ว ก็จะสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าที่บัสอ้างอิง และในสายส่งทุกเส้นในระบบได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เพื่อลดเวลาในการคำนวณลง โดยจะต้องทำให้เหลือจำนวนครั้งของการคำนวณใน Loop ให้น้อยลง โดยให้คำนวณส่วนที่สามารถกระทำได้ที่ภาวะเริ่มต้นก่อนที่จะทำการคำนวณใน Iteration จะต้องจัดรูปแบบของสมการใหม่ให้เหมาะสม โดย

ให้ $$\frac{1}{Y_{ii}} = L_i \qquad (2.4\text{-}6)$$

ดังนั้น $$E_i = \frac{(P_i - jQ_i)L_i}{E_i^*} - \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} Y_{ij}L_iE_j \qquad i = 1,2,3,\ldots,n \quad i \neq s \qquad (2.4\text{-}7)$$

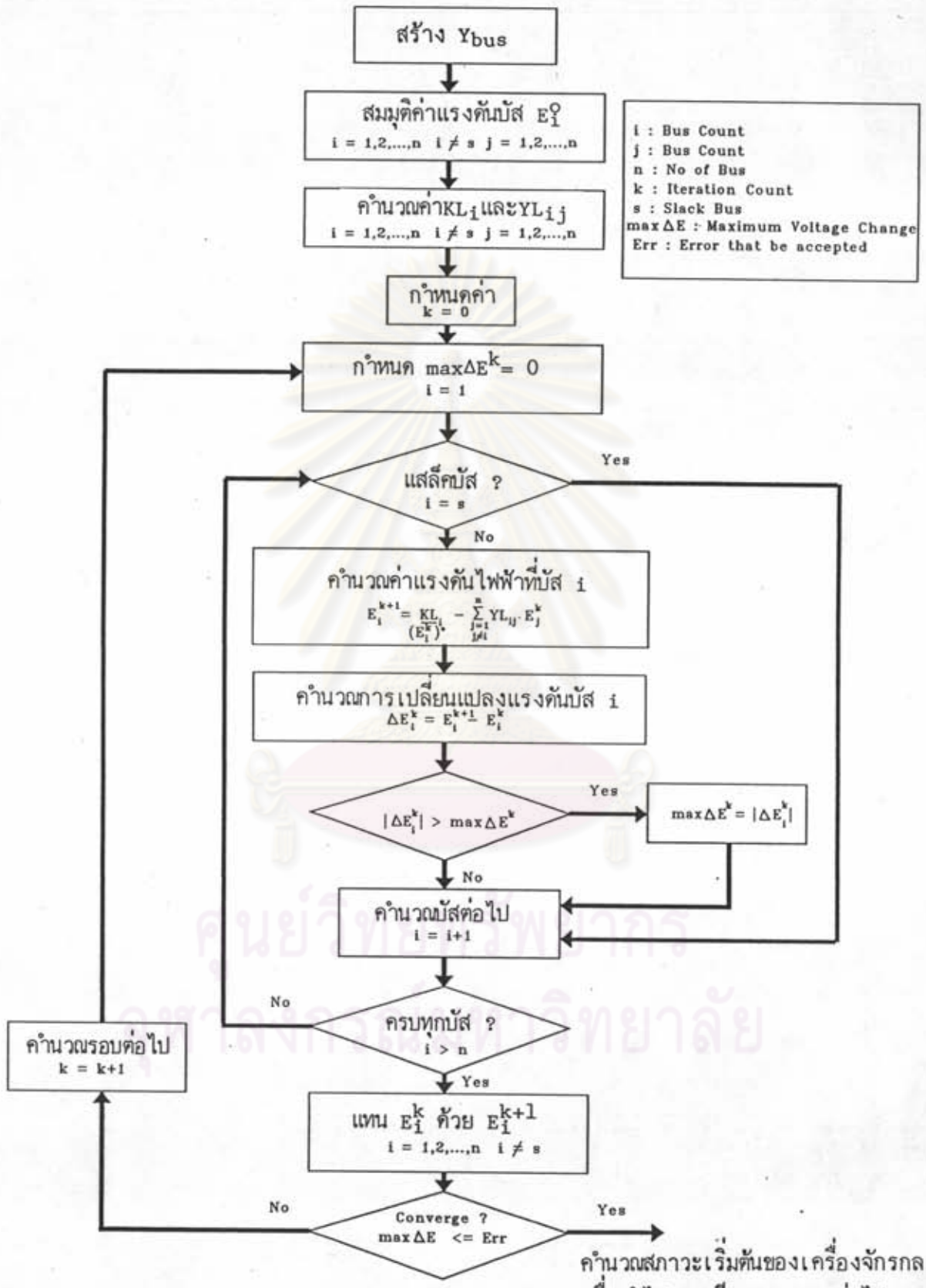
และให้ $$(P_i - jQ_i)L_i = KL_i \qquad (2.4\text{-}8)$$

$$Y_{ij}L_i = YL_{ij} \qquad (2.4\text{-}9)$$

จากสมการที่ (2.4-8) และ (2.4-9) เราจะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าในสมการ (2.4-7) ใหม่เป็นดังสมการที่ (2.4-10)

$$E_i = \frac{KL_i}{E_i^*} - \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} YL_{ij}E_j \qquad i = 1,2,3,\ldots,n \quad i \neq s \qquad (2.4\text{-}10)$$

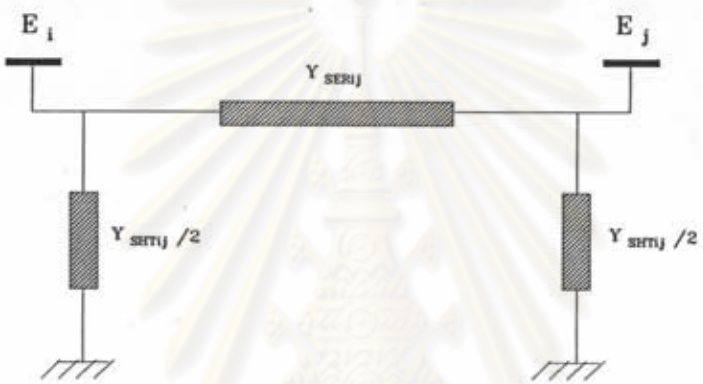
ในการศึกษาโหลดโฟลว์ เรากำหนดระบบว่าอยู่ในภาวะสมดุลย์ระหว่างเฟส ดังนั้นสามารถแทนระบบด้วยวงจรสมมูลย์หนึ่งเฟสที่ใช้แทน Positive Sequence Network ขั้นตอนของการคำนวณโหลดโฟลว์โดยวิธีGauss-Seidel ที่ใช้ Y_{bus} จะเป็นดังรูปที่ 2.4-1



รูปที่ 2.4-1 การคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยวิธี Gauss-Seidel โดยใช้ Y_{bus}

2.5 การหาค่ากำลังที่ไหลในสายส่ง (Line Flow) [3,4]

หลังจากทำการคำนวณโหลดโฟลว์แล้ว ก็จะทราบค่าขนาด (P_i) และมุม (δ_i) ของแรงดันที่บัสทุกบัส ซึ่งเราจะสามารถคำนวณกำลังจริง (P_{ij}) และกำลังรีแอคทีฟ (Q_{ij}) ที่ไหลในวงจรสมมูลย์ของสายส่งดังรูปที่ 2.5-1 ได้ดังนี้



รูปที่ 2.5-1 วงจรสมมูลของสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัส i และบัส j

พิจารณาวงจรสมมูลที่เชื่อมต่อระหว่างบัส i และบัส j ของสายส่ง ค่าของกระแสที่ไหลจากบัส i ไปยังบัส j (I_{ij}) หาได้จาก

$$I_{ij} = (E_i - E_j) Y_{SERij} + (E_i Y_{SHTij}/2) \qquad (2.5\text{-}1)$$

โดย Y_{SERij} คือ Line Admittance ระหว่างบัส i และบัส j

Y_{SHTij} คือ Line Charging Admittance ทั้งหมด ระหว่างบัส i และบัส j

$E_i Y_{SHTij}/2$ คือ ค่ากระแสที่ไหลเนื่องจาก Line Charging

ค่ากำลังจริงและกำลังรีแอคทีฟที่ไหลจากบัส i ไปยังบัส j (P_{ij} และ Q_{ij}) หาได้จาก

$$P_{ij} - jQ_{ij} = E_i^* I_{ij} \qquad (2.5\text{-}2)$$
$$= E_i^* (E_i - E_j) Y_{SERij} + (E_i^2 Y_{SHTij} / 2)$$

และในทำนองเดียวกันกำลังจริงและกำลังรีแอคทีฟที่ไหลจากบัส j ไปยังบัส i (P_{ji} และ Q_{ji}) หาได้จาก

$$P_{ji} - jQ_{ji} = E_j^* I_{ji} \qquad (2.5\text{-}3)$$
$$= E_j^* (E_j - E_i) Y_{SERij} + (E_j^2 Y_{SHTij} / 2)$$

และค่ากำลังสูญเสียในสายส่งระหว่างบัส i และ บัส j (P_{Lij}) หาได้จาก

$$P_{Lij} = P_{ij} + P_{ji} \qquad (2.5\text{-}4)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย