บทที่ 2

โหลดโฟลว์

2.1 บทนำ

โหลดโฟลว์(load flow) หรือเพาเวอร์โฟลว์(power flow) เป็นการวิเคราะห์ที่สำคัญและเป็นพื้นฐานของการศึกษาเรื่องต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลัง การวิเคราะห์โหลดโฟลว์ จะทำให้ทราบว่าที่สภาวะโหลดหนึ่งๆ ระบบไฟฟ้ากำลังจะมีค่าตัวแปรต่างๆเป็นเท่าใด ตัวแปรเหล่านั้นคือ ขนาดและมุมของแรงดัน กำลังไฟฟ้าที่ผลิตและกำลังรีแอกทีฟที่ผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ไหลในสายส่ง ฯลฯ

การศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้โหลดโฟลว์เป็นพื้นฐาน ได้แก่

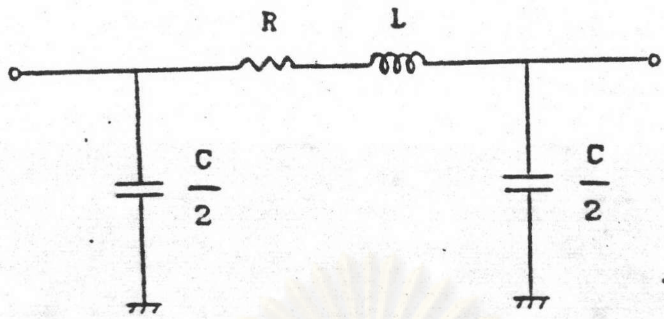
1 การวิเคราะห์ความผิดปรกติ (fault analysis)
2 การวิเคราะห์เสถียรภาพ (stability analysis)
3 การวางแผนระบบไฟฟ้ากำลัง (power system planning)
4 การจ่ายโหลดอย่างประหยัด (economic load dispatch)

ในบทนี้จะกล่าวถึง การวิเคราะห์โหลดโฟลว์ที่ได้รับความนิยม คือ การวิเคราะห์โหลดโฟลว์โดยใช้วิธีของนิวตัน-ราฟสัน(Newton-Raphson load flow) และฟาสต์ดีคัปเปิลโหลดโฟลว์(fast decouple load flow)

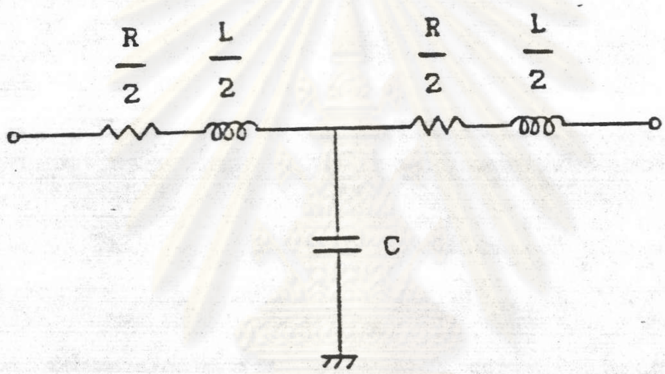
2.2 วงจรสมมูลขององค์ประกอบในระบบไฟฟ้ากำลัง

2.2.1 สายส่ง [7,8]

สายส่งในระบบไฟฟ้ากำลังส่วนใหญ่จะแทนด้วยวงจรสมมูลของสายส่งขนาดกลางซึ่งมีสองแบบคือแบบพายน์(π)และแบบที(T) ดังแสดงในรูปที่ 2.1ก และ 2.1ข



ก)



ข)

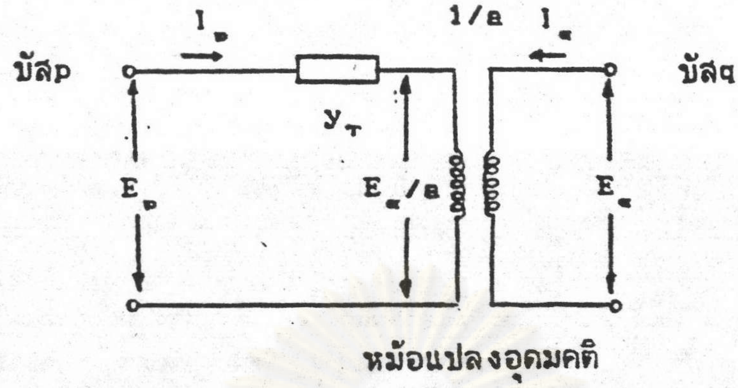
รูปที่ 2.1 ก) วงจรสมมูลของสายส่งขนาดกลางแบบพายน์ (π)
ข) วงจรสมมูลของสายส่งขนาดกลางแบบที (T)

2.2.2 <u>หม้อแปลง</u> [7,8]

หม้อแปลงในระบบไฟฟ้ากำลังจะถูกแทนด้วยหม้อแปลงอุดมคติและแอดมิตแตนซ์หรืออิมพิแดนซ์ ดังรูปที่ 2.2

เนื่องจากหม้อแปลงในรูปที่ 2.2 เป็นหม้อแปลงอุดมคติ ดังนั้นจะได้ว่ากำลังแอพเพียร์เรนต์(apperent power)เข้าและออกจะต้องเท่ากันหรือ

$$S_p' = S_s \qquad (2.1)$$



E_p, E_q เป็นแรงดันที่บัส p และ q ตามลำดับ

a เป็นอัตราส่วนการแปลง(transformation ratio)

y_T เป็นแอดมิตแตนซ์ของหม้อแปลง

รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลง

โดยที่ S_p' คือกำลังแอมเพียร์เรนต์เข้าหม้อแปลงอุดมคติทางบัส p หรือ

$$S_p' = \frac{E_q}{a} I_p^* \qquad (2.2)$$

และ S_q คือกำลังแอมเพียร์เรนต์ออกจากหม้อแปลงอุดมคติทางบัส q หรือ

$$S_q = -E_q I_q^* \qquad (2.3)$$

จากสมการที่ 2.1 จะได้ว่า

$$\frac{E_q}{a} I_p^* = -E_q I_q^* \qquad (2.4)$$

ดังนั้น จะได้ว่า

$$I_p = -a^* I_q \qquad (2.5)$$

กระแส I_p สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_p = (E_p - \frac{E_q}{a})y_T \qquad (2.6)$$

หรือ

$$I_p = E_p y_T - E_q \frac{y_T}{a} \qquad (2.7)$$

ส่วนกระแส I_q สามารถเขียนเป็นสมการได้ คือ

$$I_q = -\frac{1}{a^*}(E_p - \frac{E_q}{a})y_T \qquad (2.8)$$

ค่า $aa^* = |a|^2$ ดังนั้น สมการที่ 2.8 จะกลายเป็น

$$I_q = -E_p \frac{y_T}{a^*} + E_q \frac{y_T}{|a|^2} \qquad (2.9)$$

จากสมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9 สามารถเขียนเป็นบัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์(bus admittance matrix)ได้ดังนี้

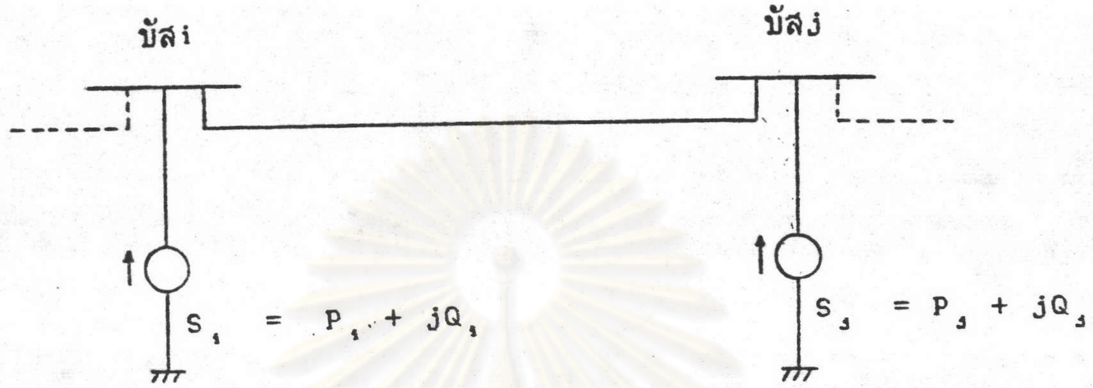
$$[Y_{bus}] = \left[\begin{array}{c|c} y_T & \dfrac{-y_T}{a} \\ \hline \dfrac{-y_T}{a^*} & \dfrac{y_T}{|a|^2} \end{array}\right] \qquad (2.10)$$

2.2.3 <u>เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด</u> [3]

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดจะแทนด้วยbus power source ตามรูปที่ 2.3 โดยที่

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} \qquad (2.11)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} \qquad (2.12)$$



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลด

เมื่อ P_{Gi} และ Q_{Gi} เป็นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตและกำลังรีแอกทีฟที่ผลิตที่บัส i ตามลำดับ

P_{Di} และ Q_{Di} เป็นโหลดจริงและโหลดรีแอกทีฟที่บัส i ตามลำดับ

P_i และ Q_i เป็นbus real power source และ bus reactive power source ที่บัส i ตามลำดับ

2.3 <u>กระแสบัสแรงดันบัสและบัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์</u> [9]

2.3.1 <u>ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสบัสและแรงดันบัส</u>

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสบัส(bus current) และแรงดันบัส(bus voltage)เป็นไปตามสมการ

$$[I] = [Y_{bus}][E] \qquad (2.13)$$

เมื่อ [I] เป็นเวกเตอร์ของกระแสบัส

[E] เป็นเวกเตอร์ของแรงดันบัส

$[Y_{bus}]$ เป็นบัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์(bus admittance matrix)

การหาบัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์สามารถทำได้โดยมีหลักการดังนี้

1. Y_{ii} หรือสมาชิกในแนวทแยงคือผลรวมของแอดมิตแตนซ์ที่ต่ออยู่กับบัส i ทั้งหมด

2. Y_{ij} หรือสมาชิกนอกแนวทแยงคือค่าลบของแอดมิตแตนซ์ที่ต่ออยู่ระหว่างบัส i และบัส j

2.3.2 <u>การหาบัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์โดยวิธีอิลิเมนต์สแตมป์(Element Stamp Method)</u> [8]

การหาบัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์โดยใช้วิธีอิลิเมนต์สแตมป์ เป็นวิธีการหาบัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์โดยการใส่องค์ประกอบ(element)ของระบบไฟฟ้ากำลังเข้าไปทีละตัวจนครบทุกตัว บัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์สุดท้ายที่ได้หลังจากใส่องค์ประกอบตัวสุดท้ายจะเป็นบัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ของระบบไฟฟ้ากำลัง

สำหรับสายส่ง ถ้าใส่สายส่ง ij (สายส่งที่ต่อระหว่างบัส i และบัสj) บัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ใหม่จะเป็นดังสมการ

$$Y_{ii}^{new} = Y_{ii}^{old} + y_{SERij} + \frac{y_{SHTij}}{2} \tag{2.14}$$

$$Y_{jj}^{new} = Y_{jj}^{old} + y_{SERij} + \frac{y_{SHTij}}{2} \tag{2.15}$$

$$Y_{ij}^{new} = Y_{ij}^{old} - y_{SERij} \tag{2.16}$$

$$Y_{ji}^{new} = Y_{ji}^{old} - y_{SERij} \tag{2.17}$$

เมื่อ Y_{ij}^{old} เป็นสมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์แถวที่ i หลักที่ j ก่อนใส่สายส่ง ij

Y_{ij}^{new} เป็นสมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์แถวที่ i หลักที่ j หลังใส่สายส่ง ij

y_{SERij} เป็นแอดมิตแตนซ์อนุกรมของสายส่ง ij

y_{SHTij} เป็นแอดมิตแตนซ์ของไลน์ชาร์จจิง(line charging)ของสายส่ง ij

สำหรับหม้อแปลง ถ้าใส่หม้อแปลง ij (หม้อแปลงที่ต่อระหว่างบัส i และบัส j) บัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ใหม่จะเป็นดังสมการ

$$Y_{ii}^{new} = Y_{ii}^{old} + y_{Tij} \tag{2.18}$$

$$Y_{jj}^{new} = Y_{jj}^{old} + \frac{y_{Tij}}{|a|^2} \tag{2.19}$$

$$Y_{ij}^{new} = Y_{ij}^{old} - \frac{y_{Tij}}{a} \tag{2.20}$$

$$Y_{ji}^{new} = Y_{ji}^{old} - \frac{y_{Tij}}{a^*} \tag{2.21}$$

เมื่อ y_{Tij} เป็นแอดมิตแตนซ์ของหม้อแปลง ij
a เป็นอัตราส่วนการแปลงของหม้อแปลง ij

ส่วนตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำ ถ้าใส่ตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำที่ต่อกับบัส i บัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ใหม่จะเป็นดังสมการ

$$Y_{ii}^{new} = Y_{ii}^{old} + y_i \tag{2.22}$$

เมื่อ y_i เป็นแอดมิตแตนซ์ของตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำที่ต่อกับบัส i

2.4 <u>สมการโหลดโฟลว์</u> [9]

จากกำลังแอพเพียร์เรนต์เท่ากับแรงดันคูณด้วยกระแสคอนจูเกตหรือ

$$S = P + jQ = EI^* \tag{2.23}$$

เขียนในรูปของเมทริกซ์

$$[S] = [E][I^*]^T \tag{2.24}$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสบัสและแรงดันบัสตามสมการที่ 2.13 ดังนั้น

$$[S] = [E][[Y_{bus}][I^*]]^T \tag{2.25}$$

หรือเขียนในรูปของสมาชิกของเมทริกซ์

$$P_i + jQ_i = E_i \sum_{j=1}^{N} Y_{ij}^{*}E_j^{*} \qquad (2.26)$$

ถ้าให้แรงดันที่บัส i (E_i) มีขนาดเป็น V_i และมีมุมเป็น θ_i และให้ G_{ij} และ B_{ij} เป็นส่วนจริงและส่วนจินตภาพของ Y_{ij} ตามลำดับ สมการที่ 2.26 สามารถเขียนแยกออกเป็นสองส่วนได้ดังนี้

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^{N} V_j(G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}) \qquad (2.27)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^{N} V_j(G_{ij}\sin\theta_{ij} - B_{ij}\cos\theta_{ij}) \qquad (2.28)$$

โดยที่ $$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j \qquad (2.29)$$

2.5 ตัวแปรและชนิดของบัส [3,9]

ที่บัสแต่ละบัสจะมีตัวแปรดังต่อไปนี้

1. กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ(P_i และ Q_i)
2. ขนาดและมุมของแรงดัน(V_i และ θ_i)

จะเห็นได้ว่า แต่ละบัสจะมีตัวแปรอยู่ 4 ตัว และแต่ละบัสมีสมการอยู่ 2 สมการคือสมการที่ 2.27 และ 2.28 ดังนั้นในระบบไฟฟ้ากำลังที่มี N บัส จะมีสมการอยู่ 2N สมการและมีตัวแปรอยู่ 4N ตัว ทำให้คำตอบของระบบไฟฟ้ากำลังไม่ได้มีเพียงคำตอบเดียว ดังนั้นจะต้องกำหนดตัวแปรที่แต่ละบัสเสีย 2 ตัว แล้วคำนวนหาตัวแปรที่เหลืออีก 2 ตัว

ในทางปฏิบัติ บัสที่มีแต่โหลดต่ออยู่จะทราบค่า P_i และ Q_i แต่จะไม่ทราบค่า V_i และ θ_i ส่วนบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่จะกำหนดค่า P_i และ V_i แต่เนื่องจากไม่ทราบค่ากำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้นจะต้องปล่อยให้ค่า P_i ของบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ลอยตัวอยู่บัสหนึ่ง และจะให้บัสนั้นเป็นบัสอ้างอิงคือมี θ_i เท่ากับ 0 และจะเรียกบัสนี้ว่า สวิงบัส(swing bus)หรือบัสอ้างอิง(reference bus)

ชนิดของบัสสามารถแยกได้เป็น 3 ชนิดดังนี้ คือ

1. โหลดบัส(load bus หรือ PQ bus) เป็นบัสที่กำหนดค่า P_i และ Q_i และต้องการหาค่า V_i และ θ_i

2. บัสควบคุมแรงดัน(voltage controlled bus หรือ PV bus) เป็นบัสที่กำหนดค่า P_i และ V_i และต้องการหาค่า Q_i และ θ_i

3. บัสอ้างอิง(reference bus)หรือสวิงบัส(swing bus) เป็นบัสที่กำหนดค่า V_i และ θ_i และต้องการหาค่า P_i และ Q_i

2.6 วิธีของนิวตัน-ราฟสัน(Newton-Raphson Method) [5,8,9,10]

เนื่องจากสมการโหลดโฟลว์หรือสมการ P,Q ตามสมการที่ 2.27 และ 2.28 เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น(non-linear equation) การแก้สมการโหลดโฟลว์จึงควรใช้วิธีnumerical วิธีnumericalที่นิยมใช้คือวิธีของนิวตัน-ราฟสัน

สมมติว่ามีฟังก์ชันหนึ่งคือ f(x) และต้องการหารากของฟังก์ชันนี้ หรือคือต้องการหาค่า x ที่ทำให้ค่าของฟังก์ชัน f(x) เท่ากับ 0 ตามวิธีของนิวตัน-ราฟสัน จะสมมติค่าของ x ขึ้นและให้เท่ากับ x° และให้ Δx° เป็นค่าผิดพลาด(error) ซึ่งคือค่าแตกต่างระหว่างค่า x° กับค่า x ที่ทำให้ฟังก์ชัน f(x) มีค่าเป็น 0 ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$f(x^{\circ} + \Delta x^{\circ}) = 0 \tag{2.30}$$

ใช้อนุกรมเทย์เลอร์กระจายรอบๆจุด x° จะได้ว่า

$$f(x^{\circ}) + (\Delta x^{\circ})\left(\frac{\partial f(x^{\circ})}{\partial x}\right) + \frac{1}{2}(\Delta x^{\circ})^2\left(\frac{\partial^2 f(x^{\circ})}{\partial x^2}\right) + \ldots = 0 \tag{2.31}$$

ถ้าตัดพจน์ที่มีอันดับสูงกว่าหนึ่งออกจะได้

$$f(x^{\circ}) + (\Delta x^{\circ})\left(\frac{\partial f(x^{\circ})}{\partial x}\right) = 0 \tag{2.32}$$

หรือ

$$\Delta x^{\circ} = - \frac{f(x^{\circ})}{\partial f(x^{\circ})/\partial x} \qquad (2.33)$$

เมื่อคำนวนค่าΔx°จากสมการที่ 2.33 ได้แล้ว จะนำไปปรับค่าสมมติของ x ใหม่ตามสมการ

$$x^{1} = x^{\circ} + \Delta x^{\circ}$$

$$= x^{\circ} - \frac{f(x^{\circ})}{\partial f(x^{\circ})/\partial x} \qquad (2.34)$$

นำเอาค่า x^{1} ไปทดลองแทนในฟังก์ชัน f(k) และทำเช่นนี้ไปเรื่อยจนได้ค่า x ที่ถูกต้อง ดังนั้นสมการที่ 2.34 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$x^{k+1} = x^{k} + \Delta x^{k}$$

$$= x^{k} - \frac{f(x^{k})}{\partial f(x^{k})/\partial x} \qquad (2.35)$$

เมื่อ k เป็นหมายเลขประจำอิทเทอร์เรชัน(iteration)

ในระบบไฟฟ้ากำลัง ตัวแปรที่ต้องการหา(x)จะอยู่ในรูปของเวกเตอร์[x] ซึ่งสามารถเขียนแยกได้เป็น 2 ส่วน คือ

$$[x] = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \hline V_1 \end{bmatrix} \qquad (2.36)$$

เนื่องจากทราบค่ามุมของแรงดันที่บัสอ้างอิง ดังนั้น[θ_1]จึงมีมิติ (N-1)x1 โดยที่ N เป็นจำนวนบัสทั้งหมดในระบบ ส่วน[V_1]มีมิติ NLx1 โดยที่ NL เป็นจำนวนโหลดบัสในระบบ การที่[V_1]มีมิติ NLx1 เป็นเพราะว่า ทราบค่าของขนาดของแรงดันที่บัสอ้างอิงและบัสควบคุมแรงดัน มิติรวมของ[x]จึงเท่ากับ (N+NL-1)x1

ในทำนองเดียวกัน ค่าผิดพลาด(Δx)จะอยู่ในรูปของเวกเตอร์[Δx] ซึ่งสามารถเขียนแยกเป็น 2 ส่วน คือ

$$[\Delta x] = \begin{bmatrix} \Delta\theta_i \\ \hline \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

มิติของ$[\Delta x]$เท่ากับมิติของ$[x]$

ส่วนฟังก์ชัน $f(x)$ จะอยู่ในรูปของเวกเตอร์$[f(x)]$ และสามารถเขียนแยกออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

$$[f(x)] = \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \hline \Delta Q_i \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

โดยที่

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \hline \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_i - (P_{Gi} - P_{Di}) \\ \hline Q_i - (Q_{Gi} - Q_{Di}) \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

เมื่อ P_{Gi} และ Q_{Gi} คือกำลังไฟฟ้าที่ผลิตและกำลังรีแอกทีฟที่ผลิตที่บัส i ซึ่งเป็นค่าที่กำหนด

P_{Di} และ Q_{Di} คือโหลดจริงและโหลดรีแอกทีฟที่บัส i ซึ่งเป็นค่าที่กำหนด

P_i และ Q_i คือกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่บัส i ซึ่งเป็นค่าที่คำนวนตามสมการที่ 2.27 และ 2.28

มิติของ$[\Delta P_i]$เท่ากับมิติของ$[\theta_i]$ และมิติของ$[\Delta Q_i]$เท่ากับมิติของ$[V_i]$ สมการที่ 2.39 เรียกว่า สมการความผิดพลาดของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่บัส(bus real and reactive power mismatch equations) ค่าของสมการนี้เท่ากับผลต่างของค่าของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่กำหนดให้($P_{Gi}, P_{Di}, Q_{Gi}, Q_{Di}$) กับค่ากำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ได้จากการคำนวนโดยใช้ตัวแปร(θ_i, V_i)ที่สมมติขึ้น ถ้าตัวแปรที่สมมติขึ้นนี้มีค่าถูกต้อง ค่าของสมการที่ 2.39 (Pi, Qi หรือ f(x)) จะมีค่าเป็น ø

เช่นเดียวกัน ค่า $\partial f/\partial x$ จะอยู่ในรูปของเมทริกซ์$[\partial f/\partial x]$ ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$\left[\frac{\partial f}{\partial x}\right] = \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_j} & \dfrac{\partial \Delta P_i}{\partial V_j} \\ \hline \dfrac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_j} & \dfrac{\partial \Delta Q_j}{\partial V_j} \end{array}\right]$$

$$= \left[\begin{array}{c|c} \dfrac{\partial P_i}{\partial \theta_j} & \dfrac{\partial P_i}{\partial V_j} \\ \hline \dfrac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} & \dfrac{\partial Q_i}{\partial V_j} \end{array}\right] \qquad (2.40)$$

เมทริกซ์$[\partial f/\partial x]$เรียกว่าจาโคเบียนเมทริกซ์ และมีสัญญลักษณ์เป็น$[J]$ แต่ละส่วนของ $[J]$ซึ่งมี 4 ส่วนจะมีสัญญลักษณ์เป็น$[J_1]$,$[J_2]$,$[J_3]$และ$[J_4]$ตามลำดับ หรือ

$$\left[\frac{\partial f}{\partial x}\right] = [J] = \left[\begin{array}{c|c} J_1 & J_2 \\ \hline J_3 & J_4 \end{array}\right] \qquad (2.41)$$

$[J_1]$มีมิติ $(N-1)x(N-1)$, $[J_2]$มีมิติ $(N-1)xNL$, $[J_3]$มีมิติ $NLx(N-1)$ และ$[J_4]$ มีมิติ$NLxNL$ ดังนั้นจาโคเบียนเมทริกซ์$[J]$มีมิติ $(N+NL-1)x(N+NL-1)$

สมาชิกของจาโคเบียนเมทริกซ์หาได้ดังนี้

- สมาชิกของ$[J_1]$

$$J_{1ij} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = V_i V_j (G_{ij}\sin\theta_{ij} - B_{ij}\cos\theta_{ij}) \quad i \neq j$$

$$J_{1ii} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = -Q_i - B_{ii}V_i^2 \qquad (2.42)$$

- สมาชิกของ$[J_2]$

$$J_{2ij} = \frac{\partial P_i}{\partial V_j} = V_i(G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}) \qquad i \neq j$$

$$J_{2ii} = \frac{\partial P_i}{\partial V_i} = \frac{P_i}{V_i} + G_{ii}V_i \qquad (2.43)$$

- สมาชิกของ$[J_3]$

$$J_{3ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = -V_iV_j(G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}) \qquad i \neq j$$

$$J_{3ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = P_i - G_{ii}V_i^2 \qquad (2.44)$$

- สมาชิกของ$[J_4]$

$$J_{4ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = V_i(G_{ij}\sin\theta_{ij} - B_{ij}\cos\theta_{ij}) \qquad i \neq j$$

$$J_{4ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = \frac{Q_i}{Vi} - B_{ii}V_i \qquad (2.45)$$

การคำนวนหาค่า$[\Delta x]$ จะคำนวนได้จากสมการ

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \hline \Delta Q_i \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \hline \Delta V_i \end{bmatrix} \qquad (2.46)$$

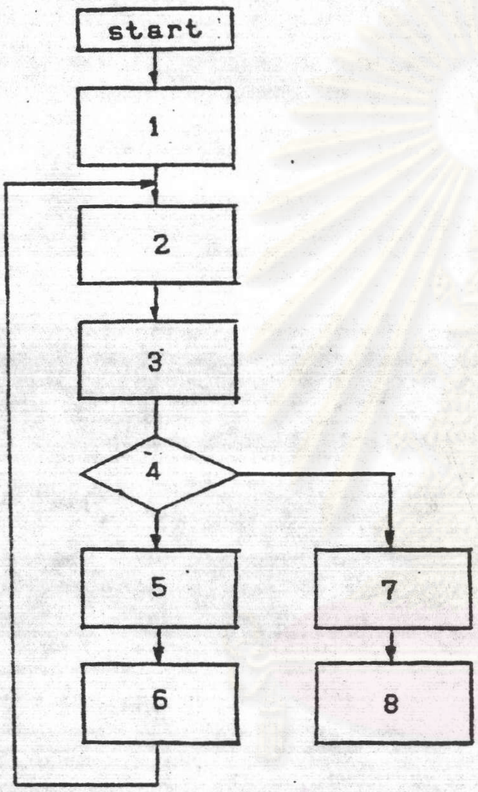
การหาค่า θ_i และ V_i ใหม่ จะหาได้จากสมการ

$$\theta_i^{new} = \theta_i^{old} - \Delta\theta_i$$

$$V_i^{new} = V_i^{old} - \Delta V_i \qquad (2.47)$$

2.7 อัลกอริทึมของโหลดโฟลว์โดยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน

จากหัวข้อ 2.6 สามารถสรุปการทำโหลดโฟลว์โดยวิธีของนิวตัน-ราฟสันเป็นอัลกอริทึมดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 อัลกอริทึมของโหลดโฟลว์โดยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน

1) กำหนดค่าเริ่มต้นของ θ_i และ V_i
2) คำนวณค่า P_i และ Q_i โดยใช้สมการที่ 2.27 และ 2.28
3) คำนวณค่า[ΔP_i]และ[ΔQ_i]โดยใช้สมการที่ 2.39
4) หาค่าผิดพลาด(ขนาดของ ΔP_i หรือ ΔQ_i)ที่มากที่สุด แล้วเปรียบเทียบว่ามากหรือน้อยกว่าค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ ถ้าน้อยกว่าแสดงว่าได้คำตอบแล้ว ($f(x) \approx 0$) ให้ข้ามไปทำขั้นที่ 7 ถ้ามากกว่า ให้ทำขั้นที่ 5 ต่อไป
5) คำนวณ[J]ตามสมการที่ 2.42-2.45 และแก้สมการ 2.46 เพื่อหาค่า[$\Delta\theta_i$] และ[ΔV_i]
6) ปรับค่า θ_i และ V_i โดยใช้สมการที่ 2.47 แล้วย้อนไปทำ
7) คำนวณค่าอื่นที่ต้องการ เช่น line flow หรือพิมพ์ผล
8) หยุดหรือกลับสู่โปรแกรมหลัก

2.8 การปรับปรุงวิธีของนิวตัน-ราฟสัน

2.8.1 การปรับปรุงการหาค่าจาโคเบียนเมทริกซ์ [8,10]

ในการทำโหลดโฟลว์โดยใช้วิธีของนิวตัน-ราฟสัน ขั้นตอนที่ใช้เวลาในการคำนวณมากที่สุดคือการคำนวณ[J] และการแก้สมการที่ 2.46 ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะปรับปรุงขั้นตอนดังกล่าว เพื่อให้การคำนวณรวดเร็วขึ้นและใช้หน่วยความจำน้อยลง

พิจารณาสมาชิกของ[J]ในสมการที่ 2.42 - 2.45 จะเห็นได้ว่าทุกสมาชิกมี V_i คูณอยู่ ถ้าหารตลอดด้วย V_i ที่สมนัยกับสมาชิกของ[J]แล้ว จะทำให้ขั้นตอนการคำนวนลดลง ดังนั้นสมการที่ 2.46 จะกลายเป็น

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i/V_i \\ \hline \Delta Q_i/V_i \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} J_1 & J_2 \\ \hline J_3 & J_4 \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta\theta_i \\ \hline \Delta V_i \end{bmatrix} \qquad (2.48)$$

จาโคเบียนเมทริกซ์ในสมการที่ 2.48 จะมีค่าไม่เท่ากับจาโคเบียนเมทริกซ์ในสมการที่ 2.46 สมาชิกของจาโคเบียนเมทริกซ์ในสมการที่ 2.48 จะหาได้ดังต่อไปนี้

- สมาชิกของ[J_1]

$$J_{1ij} = \frac{1}{V_i}\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = V_j(G_{ij}\sin\theta_{ij} - B_{ij}\cos\theta_{ij}) \qquad i \neq j$$

$$J_{1ii} = \frac{1}{V_i}\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = -\frac{Q_i}{V_i} - B_{ii}V_i \qquad (2.49)$$

- สมาชิกของ[J_2]

$$J_{2ij} = \frac{1}{V_i}\frac{\partial P_i}{\partial V_j} = (G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}) \qquad i \neq j$$

$$J_{2ii} = \frac{1}{V_i}\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = \frac{P_i}{V_i^2} + G_{ii} \qquad (2.50)$$

- สมาชิกของ[J_3]

$$J_{3ij} = \frac{1}{V_i}\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = -V_j(G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}) \qquad i \neq j$$

$$J_{3ii} = \frac{1}{V_i}\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = \frac{P_i}{V_i} - G_{ii}V_i \qquad (2.51)$$

- สมาชิกของ[J_4]

$$J_{4ij} = \frac{1}{V_i}\frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = (G_{ij}\sin\theta_{ij} - B_{ij}\cos\theta_{ij}) \qquad i \neq j$$

$$J_{4ii} = \frac{1}{V_i}\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = \frac{Q_i}{V_i^2} - B_{ii} \qquad (2.52)$$

2.8.2 วิธีดีคัปเปิลโหลดโฟลว์(Decouple Load Flow Method) [8,10]

คุณสมบัติที่น่าสนใจของระบบไฟฟ้ากำลังประการหนึ่งคือ การเปลี่ยนแปลงมุมของแรงดันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังรีแอกทีฟน้อยมาก และการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังจริงน้อยมาก คุณสมบัตินี้เรียกว่าการดีคัปเปิลระหว่างกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้สามารถประมาณได้ว่า$[J_2]$และ$[J_3]$มีค่าเป็น 0 ดังนั้นสมการที่ 2.48 จึงกลายเป็น

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i/V_i \\ \hline \Delta Q_i/V_i \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} J_1 & 0 \\ \hline 0 & J_4 \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta\theta_i \\ \hline \Delta V_i \end{bmatrix} \qquad (2.53)$$

หรือ

$$[\Delta P_i/V_i] = [J_1][\Delta\theta_i] \qquad (2.54)$$

$$[\Delta Q_i/V_i] = [J_4][\Delta V_i] \qquad (2.55)$$

โดยที่สมาชิกของ$[J_1]$และ$[J_4]$เป็นไปตามสมการที่ 2.49 และ 2.52

การทำโหลดโฟลว์โดยใช้สมการที่ 2.54 และ 2.55 เรียกว่าดีคัปเปิลโหลดโฟลว์ จะเห็นได้ว่าวิธีดีคัปเปิลโหลดโฟลว์ใช้เวลาในการสร้างจาโคเบียนเมทริกซ์น้อยลง คือสร้างเพียง$[J_1]$และ$[J_4]$เท่านั้น และเช่นเดียวกันหน่วยความจำที่ใช้ก็จะลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง

2.8.3 วิธีฟาสต์ดีคัปเปิลโหลดโฟลว์(Fast Decouple Load Flow) [8,10]

ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยทั่วไปจะพยายามรักษาให้ขนาดของแรงดันมีค่าเท่ากับ 1.0 pu. โดยประมาณ และโดยทั่วไปมุมของแรงดันที่บัสต่างๆมีค่าแตกต่างกันไม่มาก ถ้าเราใช้ข้อสมมติดังต่อไปนี้

1. $V_i = 1.0$ pu.
2. $\theta_i - \theta_j = 0.0$ Rad.
3. $Q_i << B_i$

สมาชิกของ$[J_1]$และ$[J_4]$ตามสมการที่ 2.49 และ 2.52 จะกลายเป็น

-สมาชิกของ$[J_1]$

$$J_{1ij} = -B_{ij}$$

$$J_{1ii} = -B_{ii} \tag{2.56}$$

-สมาชิกของ$[J_4]$

$$J_{4ij} = -B_{ij}$$

$$J_{4ii} = -B_{ii} \tag{2.57}$$

หรือ

$$[J_1] = -[B] \tag{2.58}$$

$$[J_4] = -[B] \tag{2.59}$$

เมื่อ [B] เป็นส่วนจินตภาพของบัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์$[Y_{bus}]$

ดังนั้นสมการที่ 2.54 และ 2.55 จึงกลายเป็น

$$[\Delta P_i/V_i] = -[B]\,[\Delta\theta_i] \tag{2.60}$$

$$[\Delta Q_i/V_i] = -[B]\,[\Delta V_i] \tag{2.61}$$

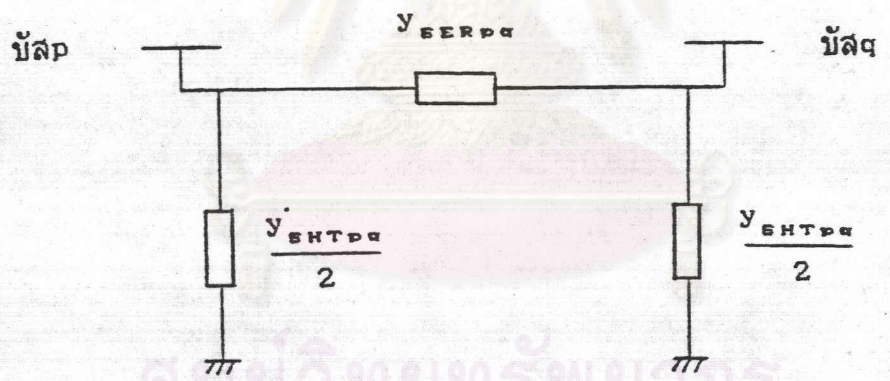
การทำโหลดโฟลว์โดยใช้สมการที่ 2.60 และ 2.61 เรียกว่า วิธีฟาสต์ดีคัปเปิลโหลดโฟลว์ ในวิธีการนี้จาโคเบียนเมทริกซ์มีค่าคงที่ทุกๆอิทเทอร์เรชัน และเป็นค่าที่ได้จาก $[Y_{bus}]$ ดังนั้นจึงไม่ต้องคำนวนหาจาโคเบียนเมทริกซ์ การทำ triangularize เพื่อแก้สมการที่ 2.60 และ 2.61 จะกระทำเพียงครั้งเดียว ทำให้การทำโหลดโฟลว์ด้วยวิธีการนี้รวดเร็วมาก

2.9 กำลังที่ไหลในสายส่งและหม้อแปลง [9]

เมื่อคำนวนมุมและขนาดของแรงดันได้แล้ว จะทำการคำนวนหากำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ไหลในสายส่งและหม้อแปลงต่อไป

2.9.1 กำลังที่ไหลในสายส่ง

พิจารณาวงจรสมมูลของสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัส p และบัส q ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัส p และบัส q

กระแสที่ไหลจากบัส p ไปยังบัส q (I_{pq}) หาได้จาก

$$I_{pq} = (E_p - E_q)y_{SERpq} + \frac{E_p y_{SHTpq}}{2} \qquad (2.62)$$

ดังนั้นกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ไหลจากบัส p ไปยังบัส q (P_{pq} และ Q_{pq}) หาได้จาก

$$P_{pq} - jQ_{pq} = E_p^* I_{pq}$$

$$= E_p^*(E_p - E_q)y_{SERpq} + \frac{E_p^{\,2}y_{SHTpq}}{2} \qquad (2.63)$$

ในทำนองเดียวกัน กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ไหลจากบัส q ไปยังบัส p (P_{qp} และ Q_{qp})หาได้จาก

$$P_{qp} - jQ_{qp} = E_q^* I_{qp}$$

$$= E_q^*(E_q - E_p)y_{SERpq} + \frac{E_q^{\,2}y_{SHTpq}}{2} \qquad (2.64)$$

กำลังสูญเสียในสายส่ง pq (P_{Lpq})หาได้จาก

$$P_{Lpq} = P_{pq} + P_{qp} \qquad (2.65)$$

2.9.2 <u>กำลังไหลในหม้อแปลง</u>

พิจารณาวงจรสมมูลของหม้อแปลงในรูปที่ 2.2 กระแสที่ไหลจากบัส p ไปยังบัส q (I_{pq}) ซึ่งก็คือ I_p ในรูปที่ 2.2 หาได้จาก

$$I_{pq} = (E_p - \frac{E_q}{a})y_T \qquad (2.66)$$

จากสมการที่ 2.5 กระแสที่ไหลจากบัส q ไปยังบัส p (I_{qp}) ซึ่งก็คือ I_q ในรูปที่ 2.2 หาได้จาก

$$I_{qp} = -\frac{I_{pq}}{a^*}$$

$$= \frac{1}{a^*}(\frac{E_q}{a} - E_p)y_T \qquad (2.67)$$

ดังนั้นกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ไหลจากบัส p ไปยังบัส q (P_{pq} และ Q_{pq}) หาได้จาก

$$P_{pq} - jQ_{pq} = E_p^*(E_p - \frac{E_q}{a})y_T \qquad (2.68)$$

ในทำนองเดียวกัน กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ไหลจากบัส q ไปยังบัส p (P_{qp} และ Q_{qp})หาได้จาก

$$P_{qp} - jQ_{qp} = \frac{E_q^*}{a^*}\left(\frac{E_q}{a} - E_p\right)y_T \qquad (2.69)$$

กำลังสูญเสียในหม้อแปลง pq หาได้จากสมการที่ 2.65 เช่นเดียวกับสายส่ง