

บทที่ 2

การคำนวณโหลดโพล์

การคำนวณโหลดโพล์ถือเป็นสิ่งสำคัญและเป็นพื้นฐานของการศึกษากรณีต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลัง อันได้แก่ การวิเคราะห์ความผิดปกติ การวิเคราะห์เสถียรภาพ การวางแผนและการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของระบบกำลังไฟฟ้า เป็นต้น ค่าตอบที่ได้จากการวิเคราะห์โหลดโพล์ของสถานะโหลดหนึ่งในระบบกำลังไฟฟ้าจะได้ขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ผลิตโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ไหลผ่านในระบบ รวมทั้งกำลังสูญเสียในอุปกรณ์ต่างๆด้วย

2.1 สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์โหลดโพล์

2.1.1 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์โหลดโพล์เป็นระบบกำลังไฟฟ้าสมดุล 3 เฟส อยู่ในสถานะการทำงานปกติ (Steady state condition)

2.1.2 ในการสร้างแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์และสมการโหลดโพล์ในทีนี้จะยึดบัสเป็นกรอบอ้างอิง (Bus frame of reference)

2.1.3 ระบบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบมีบัสอ้างอิงเพียง 1 บัส

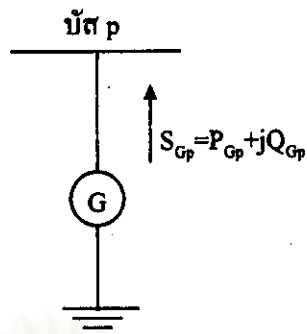
2.1.4 ให้ถือว่าโหลดทั้งหมดในระบบกำลังไฟฟ้าคงที่

2.1.5 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงและสายส่งเป็นแบบพาย (Equivalent pi circuit: π)

2.2 วงจรสมมูลย์ขององค์ประกอบในระบบกำลังไฟฟ้า

2.2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ผลิตและจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบกำลังไฟฟ้า โดยทั่วไปกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจะปรับให้มีค่าคงที่ ส่วนกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะปรับเปลี่ยนได้เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้า แต่ต้องไม่เกินค่าขีดจำกัดสูงสุดและไม่น้อยกว่าค่าขีดจำกัดต่ำสุด สำหรับวงจรสมมูลย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะแทนด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่อบัส ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยกำหนดให้ P_{Gp} และ Q_{Gp} เป็นบวกเมื่อจ่าย P_{Gp} และ Q_{Gp} เข้าสู่ระบบกำลังไฟฟ้า

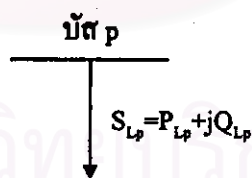


- P_{Gp} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตที่บัส p
 Q_{Gp} คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ผลิตที่บัส p
 S_{Gp} คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ผลิตที่บัส p

รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.2.2 โหลด (Load)

โหลดเป็นอุปกรณ์ที่รับกำลังไฟฟ้าจากบัส ซึ่งจะถือเป็นค่าคงที่และมีค่าเป็นลบในการคำนวณโหลดโฟลว์ โดยสัญลักษณ์ที่ใช้แทนโหลดในวงจรสมมูล คือ ลูกศร ดังแสดงในรูปที่ 2.2

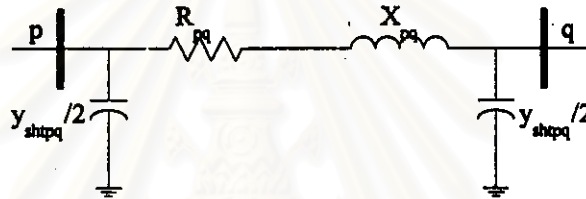


- P_{Lp} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายโหลดที่บัส p
 Q_{Lp} คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายโหลดที่บัส p
 S_{Lp} คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่จ่ายโหลดที่บัส p

รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของโหลด

2.2.3 สายส่งไฟฟ้า (Transmission line)

สายส่งไฟฟ้าที่เชื่อมระหว่างบัสสองบัสใดๆ เช่น ระหว่างบัส p และบัส q สามารถแทนได้ด้วย วงจรสมมูลพาสซีฟซึ่งประกอบด้วยความต้านทาน (Resistance : R_{pq}) ต่ออนุกรมกับอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ (Inductive reactance : X_{pq}) เชื่อมอยู่ระหว่างสองบัสนั้นๆ และมีขั้วคายประจุ (Shunt capacitance) เท่ากับครึ่งหนึ่งของไลน์ชาร์จิงแอดมิตแตนซ์ (Half line charging admittance : $y_{shpq}/2$) ของสายส่งทั้งหมดตลอดสายต่ออยู่ที่บัสแต่ละบัส ดังแสดงในรูปที่ 2.3



R_{pq} คือ ความต้านทานของสายส่ง pq

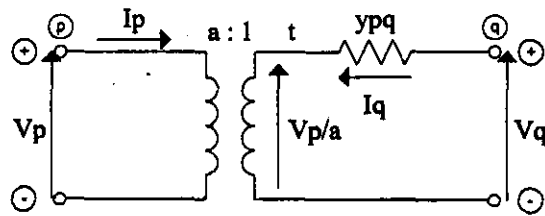
X_{pq} คือ อินดักทีฟรีแอกแตนซ์ของสายส่ง pq

y_{shpq} คือ ไลน์ชาร์จิงแอดมิตแตนซ์ของสายส่ง pq

รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลพาสซีฟที่ใช้แทนสายส่งไฟฟ้า

2.2.4 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถแทนได้ด้วยอิมพีแดนซ์หรือแอดมิตแตนซ์ของหม้อแปลงต่ออนุกรมกับหม้อแปลงอุดมคติ (Ideal transformer) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก)

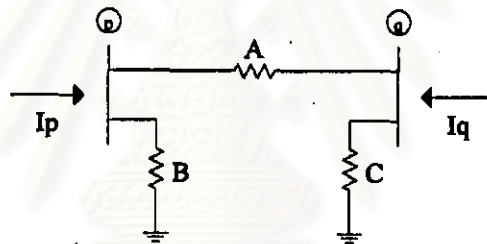


a คือ อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง

y_{pq} คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ของหม้อแปลง

รูปที่ 2.4 (ก) แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า

โดยวงจรสมมูลย์ที่สอดคล้องกับแบบจำลองดังกล่าวเป็นแบบพาส ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข)



รูปที่ 2.4 (ข) วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

สำหรับพารามิเตอร์ A, B และ C ของวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้าในรูปที่ 2.4 (ข) มีค่าดังนี้

$$A = \frac{y_{pq}}{a^*} \quad (2.1)$$

$$B = \frac{1}{a^*} \cdot \left(\frac{1}{a} - 1 \right) \cdot y_{pq} \quad (2.2)$$

$$C = \left(1 - \frac{1}{a^*} \right) \cdot y_{pq} \quad (2.3)$$

จากรูปที่ 2.4 (ก) พิจารณาในส่วนของหม้อแปลงอุดมคติจะได้ว่า กำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent power) เข้าและออกจะต้องเท่ากัน นั่นคือ

$$S_p = S_t \quad (2.4)$$

โดยที่ S_p คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลออกจากหม้อแปลงทางด้านบัส p มีค่าดังนี้

$$S_p = -V_p \cdot I_p^* \quad (2.5)$$

S_t คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลเข้าสู่หม้อแปลงทางด้านบัส t มีค่าดังนี้

$$S_t = \frac{V_p}{a} \cdot I_q^* \quad (2.6)$$

อาศัยสมการที่ (2.4), (2.5) และ (2.6) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} -V_p \cdot I_p^* &= \frac{V_p}{a} \cdot I_q^* \\ I_q^* &= -a \cdot I_p^* \\ I_q &= -a^* \cdot I_p \end{aligned} \quad (2.7)$$

อาศัยกฎของเคอร์ชอร์ฟ สามารถคำนวณหากระแส I_q ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} I_q &= \left(V_q - \frac{V_p}{a} \right) \cdot y_{pq} \\ I_q &= y_{pq} \cdot V_q - \frac{y_{pq}}{a} \cdot V_p \end{aligned} \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.7) จะได้ว่า

$$I_p = \frac{-1}{a^*} \cdot I_q \quad (2.9)$$

แทนค่า I_q จากสมการที่ (2.8) ลงในสมการที่ (2.9) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 I_p &= \frac{-1}{a^*} \cdot \left(y_{pq} \cdot V_q - \frac{y_{pq}}{a} \cdot V_p \right) \\
 &= \frac{-y_{pq}}{a^*} \cdot V_q + \frac{y_{pq}}{|a|^2} \cdot V_p
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

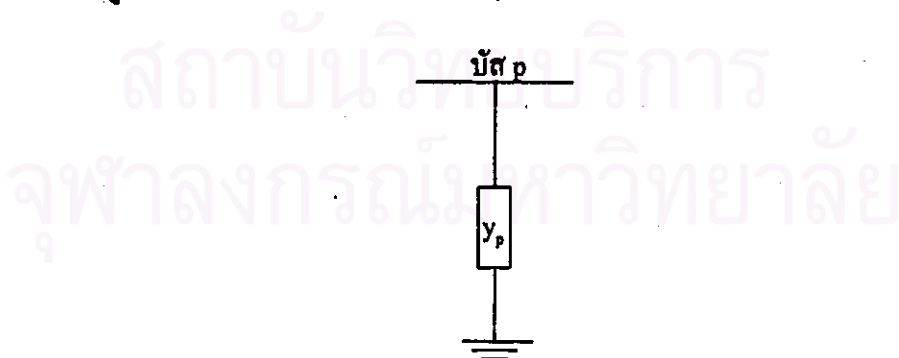
จากสมการที่ (2.8) และ (2.10) สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองด้านของหม้อแปลงในรูปของสมการเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_{pq}}{|a|^2} & \frac{-y_{pq}}{a^*} \\ \frac{-y_{pq}}{a} & y_{pq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_p \\ V_q \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

แอดมิตแดนซ์เมตริกซ์ในสมการที่ (2.11) จะนำไปใช้ในการสร้างบัสแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์ต่อไป

2.2.5 ชั้นที่อติเมนต์ (Shunt element)

ชั้นที่อติเมนต์ที่ใช้งานในระบบกำลังไฟฟ้า ได้แก่ คาปาซิเตอร์ (Capacitor) และ รีแอกเตอร์ (Reactor) หน้าที่ของอุปกรณ์ดังกล่าวคือ ช่วยรักษาแรงดันไฟฟ้าที่บัสให้อยู่ในช่วงการทำงานตามที่กำหนด สำหรับวงจรสมมูลย์ที่ใช้แทนชั้นที่อติเมนต์ ประกอบด้วย แอดมิตแดนซ์คงที่ Y_p ต่อเข้ากับบัสและลงพื้นดินดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลย์ของชั้นที่อติเมนต์

2.3 สมการพื้นฐานในการคำนวณโหลดโพล์

ตามสมมติฐานในหัวข้อ 2.1 สมการพื้นฐานในการคำนวณโหลดโพล์โดยการขีดยึดเป็นกรอบข้างอิง จะเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสบัส (Bus current) และแรงดันบัส (Bus voltage) ดังนี้

$$I_{BUS} = Y_{BUS} \cdot V_{BUS} \quad (2.12)$$

โดยที่ I_{BUS} คือ เวกเตอร์ของกระแสบัส
 V_{BUS} คือ เวกเตอร์ของแรงดันบัส
 Y_{BUS} คือ บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ (Bus admittance matrix)

สำหรับระบบกำลังไฟฟ้าขนาด n บัส เวกเตอร์ I_{BUS} , V_{BUS} และเมตริกซ์ Y_{BUS} จะมีมิติเท่ากับ $n \times 1$, $n \times 1$ และ $n \times n$ ตามลำดับ

2.4 การสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์โดยวิธีอีลิเมนต์สแตมป์ (Element stamp method)

การสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์โดยใช้วิธีอีลิเมนต์สแตมป์ [4] เป็นการหาบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์โดยการเพิ่มสายส่งของระบบไฟฟ้าเข้าไปที่ละเส้นจนครบ บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ที่ได้หลังจากใส่องค์ประกอบตัวสุดท้าย จะเป็นบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของระบบกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

2.4.1 สายส่งไฟฟ้า

สำหรับสายส่งไฟฟ้าที่เชื่อมระหว่างบัส p และ q ตามรูปที่ 2.3 บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ใหม่จะเป็นดังสมการ

$$\left. \begin{aligned} Y_{pp}^{new} &= Y_{pp}^{old} + y_{serpq} + \frac{1}{2} \cdot y_{shpq} \\ Y_{qq}^{new} &= Y_{qq}^{old} + y_{serpq} + \frac{1}{2} \cdot y_{shpq} \\ Y_{pq}^{new} &= Y_{pq}^{old} - y_{serpq} \\ Y_{qp}^{new} &= Y_{qp}^{old} - y_{serpq} \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

โดยที่	Y_{pp}^{old}	คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก p ก่อนใส่สายส่งไฟฟ้า pq
	Y_{pp}^{new}	คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก p หลังใส่สายส่งไฟฟ้า pq
	Y_{qq}^{old}	คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว q และหลัก q ก่อนใส่สายส่งไฟฟ้า pq
	Y_{qq}^{new}	คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว q และหลัก q หลังใส่สายส่งไฟฟ้า pq
	Y_{pq}^{old}	คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก q ก่อนใส่สายส่งไฟฟ้า pq
	Y_{pq}^{new}	คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก q หลังใส่สายส่งไฟฟ้า pq
	Y_{qp}^{old}	คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว q และหลัก p ก่อนใส่สายส่งไฟฟ้า pq
	Y_{qp}^{new}	คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว q และหลัก p หลังใส่สายส่งไฟฟ้า pq
	y_{serpq}	คือ แอดมิตแตนซ์อนุกรม (Series admittance) ของสายส่งไฟฟ้า pq มีค่าเท่ากับ

$$\frac{1}{R_{pq} + jX_{pq}}$$

y_{shpq} คือ โหลดขาร์จิงแอดมิตแตนซ์ (Line charging admittance) ของสายส่งไฟฟ้า pq

2.4.2 หม้อแปลงไฟฟ้า

สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าที่เชื่อมระหว่างบัส p และ q ตามรูปที่ 2.4(ก) บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ใหม่จะเป็นดังสมการ

$$\left. \begin{aligned} Y_{pp}^{\text{new}} &= Y_{pp}^{\text{old}} + \frac{1}{|a|^2} \cdot y_{pq} \\ Y_{qq}^{\text{new}} &= Y_{qq}^{\text{old}} + y_{pq} \\ Y_{pq}^{\text{new}} &= Y_{pq}^{\text{old}} - \frac{1}{a} \cdot y_{pq} \\ Y_{qp}^{\text{new}} &= Y_{qp}^{\text{old}} - \frac{1}{a} \cdot y_{pq} \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

โดย	Y_{pp}^{old}	คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก p ก่อนใส่หม้อแปลงไฟฟ้า pq
	Y_{pp}^{new}	คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก p หลังใส่หม้อแปลงไฟฟ้า pq

- Y_{qq}^{old} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์แถว q และหลัก q ก่อนใส่หม้อแปลงไฟฟ้า pq
- Y_{qq}^{new} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์แถว q และหลัก q หลังใส่หม้อแปลงไฟฟ้า pq
- Y_{pq}^{old} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก q ก่อนใส่หม้อแปลงไฟฟ้า pq
- Y_{pq}^{new} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก q หลังใส่หม้อแปลงไฟฟ้า pq
- Y_{qp}^{old} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์แถว q และหลัก p ก่อนใส่หม้อแปลงไฟฟ้า pq
- Y_{qp}^{new} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์แถว q และหลัก p หลังใส่หม้อแปลงไฟฟ้า pq
- y_{pq} คือ แอดมิตแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า pq
- a คือ อัตราส่วนการแปลงของหม้อแปลงไฟฟ้า pq
- a^* คือ ตั้งยุกเชิงซ้อน (Complex conjugate) ของ a
- $|a|^2$ คือ ขนาดของ a ยกกำลังสอง

2.4.3 ชั้นที่อิติเมนต์

สำหรับชั้นที่อิติเมนต์ที่ต่อกับบัส p ตามรูปที่ 2.5 บัสแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์ใหม่จะเป็นดัง
สมการ

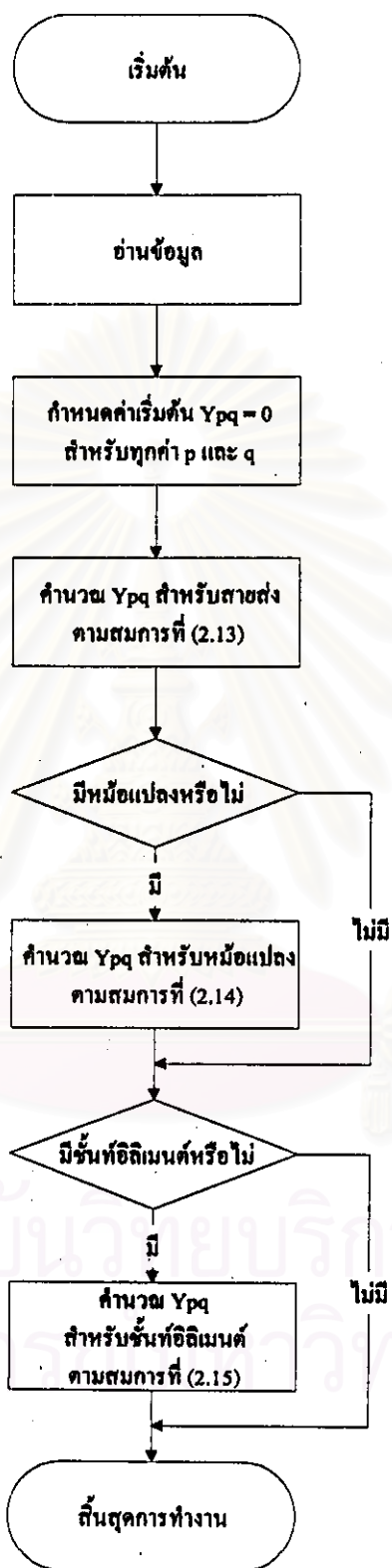
$$Y_{pp}^{\text{new}} = Y_{pp}^{\text{old}} + y_p \quad (2.15)$$

- โดย Y_{pp}^{old} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก p ก่อนใส่ชั้นที่อิติเมนต์ที่บัส p
- Y_{pp}^{new} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก p หลังใส่ชั้นที่อิติเมนต์ที่บัส p
- y_p คือ แอดมิตแดนซ์ของชั้นที่อิติเมนต์ที่ต่อกับบัส p

2.4.4 ขั้นตอนการสร้างบัสแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์โดยวิธีอิติเมนต์สแตมปี

จากหลักการสร้างบัสแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์ที่กล่าวมา สามารถสรุปเป็นขั้นตอนที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อการคำนวณโหลดโฟลว์ได้ดังนี้ และสรุปเป็นแผนภาพดังแสดงในรูปที่ 2.6

- 1) อ่านข้อมูลของระบบ
- 2) กำหนดค่าเริ่มต้น $\begin{bmatrix} Y \\ pq \end{bmatrix} = [0 + j0]$ สำหรับทุกค่าของ p และ q
- 3) คำนวณสมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์สำหรับอุปกรณ์ที่เป็นสายส่งไฟฟ้า ตามสมการที่ (2.13)
 - 4) ตรวจสอบว่ามีหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบกำลังไฟฟ้าหรือไม่
 - 4.1) ถ้าไม่มีหม้อแปลงไฟฟ้า ให้ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 6
 - 4.2) ถ้ามีหม้อแปลงไฟฟ้า ให้ทำขั้นตอนที่ 5 ต่อไป
 - 5) คำนวณสมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์สำหรับอุปกรณ์ที่เป็นหม้อแปลงไฟฟ้า ตามสมการที่ (2.14)
- 6) ตรวจสอบว่ามีชั้นที่โอติเมนต์ในระบบกำลังไฟฟ้าหรือไม่
 - 6.1) ถ้าไม่มีชั้นที่โอติเมนต์ ให้ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 8
 - 6.2) ถ้ามีชั้นที่โอติเมนต์ ให้ทำขั้นตอนที่ 7 ต่อไป
- 7) คำนวณสมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์สำหรับอุปกรณ์ที่เป็นชั้นที่โอติเมนต์ ตามสมการที่ (2.15)
- 8) ตีเ็นตุคการสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์



รูปที่ 2.6 แผนภาพการสร้างบัสแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์โดยวิธีโอติเมนต์สแตมปี

2.5 ชนิดของบัสในระบบกำลังไฟฟ้า

ชนิดบัสในระบบกำลังไฟฟ้าจำแนกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ประเภทที่ 1 บัสที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator bus) และประเภทที่ 2 บัสที่มีได้ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือนิยมเรียกกันว่า โหลดบัส (Load bus)

ประเภทที่ 1 บัสที่มีขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสสามารถกำหนดได้โดยการควบคุมของอุปกรณ์รักษาแรงดัน เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือ ชั้น์คาปาซิเตอร์ ที่คอยจ่ายกำลังรีแอกทีฟเพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าที่บัส ดังนั้น ในการวิเคราะห์ปัญหาทางโหลดโฟลว์ สำหรับบัสชนิดนี้ จะกำหนดให้ กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตและขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสมีค่าคงที่และเรียกบัสประเภทนี้ว่า บัสควบคุมแรงดัน (Voltage controlled bus) ในบรรดาบัสควบคุมแรงดันทั้งหมดจะเลือก 1 บัส ที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังการผลิตที่ใหญ่ที่สุดเป็นบัสอ้างอิง (Reference bus, slack bus or swing bus) เหตุที่จะต้องมีบัสอ้างอิงก็ด้วยความจำเป็น 2 ประการ กล่าวคือ ประการแรก เพื่อให้เป็นจุดอ้างอิงของระบบ เนื่องจากภายหลังการคำนวณโหลดโฟลว์มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ซึ่งได้มานั้นเป็นมุมเปรียบเทียบกับมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงทั้งสิ้น เพื่อให้สามารถบอกได้ว่า ที่บัสใดๆ จะมีมุมนำหน้า (Leading angle) หรือ ถ่าหลัง (Lagging angle) มากน้อยเพียงใดเมื่อเทียบกับมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสอ้างอิง กรณีทั่วไปมักนิยมให้มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงเป็น 0.00 องศา ประการถัดมา เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงจะต้องรับภาระในการชดเชยกำลังสูญเสียและกำลังไฟฟ้าของโหลดที่ยังไม่ได้รับการจ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องอื่นๆทั้งหมดในระบบ ทั้งนี้เนื่องจากก่อนการคำนวณโหลดโฟลว์ กำลังสูญเสียในระบบเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า จึงไม่อาจบอกได้ว่ามีค่ามากน้อยเพียงใด จึงควรเลือกบัสที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังการผลิตที่ใหญ่ที่สุดเป็นบัสอ้างอิง เพื่อให้สามารถชดเชยกำลังสูญเสียของระบบได้อย่างเพียงพอ

ประเภทที่ 2 บัสที่มีได้ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือนิยมเรียกกันว่า โหลดบัส อันได้แก่ บัสที่นอกเหนือไปจากบัสควบคุมแรงดันและบัสอ้างอิง ที่บัสประเภทนี้จะมีกำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟคงที่ ดังนั้นจากเหตุผลที่กล่าวมาในข้างต้น สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางโหลดโฟลว์จึงจำแนกบัสในระบบกำลังไฟฟ้าออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้

2.5.1 บัสอ้างอิง จะกำหนดให้ขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าคงที่ ส่วนกำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟที่ไหลเข้าสู่บัสเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า

2.5.2 บัสควบคุมแรงดัน จะกำหนดให้ขนาดของแรงดันและกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่บัสคงที่ ส่วนมุมของแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลเข้าสู่บัสเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า

2.5.3 โหลดบัส จะกำหนดให้กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟที่บัสคงที่ ส่วนขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า

ดังนั้นไม่ว่าจะเป็นบัสชนิดใดก็ตาม จะกำหนด 2 ปริมาณให้คงที่ และอีก 2 ปริมาณเป็นตัวแปรไม่ทราบค่าซึ่งจะต้องอาศัยการวิเคราะห์โหนดโพลาร์เพื่อคำนวณหาค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าดังกล่าว ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชนิดของบัสในระบบกำลังไฟฟ้า

ชนิดของบัส	ปริมาณที่ทราบค่า						ปริมาณที่ได้จากการวิเคราะห์โหนดโพลาร์			
	P_L	Q_L	P_G	Q_G	$ V $	δ	P_G	Q_G	$ V $	δ
บัสอ้างอิง	*	*			*	*	X	X		
บัสควบคุมแรงดัน	*	*	*		*			X		X
โหนดบัส	*	*	*	*					X	X

- โดยที่ $|V|$ คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส
 δ คือ มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส
 P_G คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตที่บัส
 Q_G คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ผลิตที่บัส
 P_L คือ กำลังไฟฟ้าจริงของโหนดที่บัส
 Q_L คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหนดที่บัส
 * คือ การระบุปริมาณที่ทราบค่า
 X คือ การระบุปริมาณที่ได้จากการวิเคราะห์โหนดโพลาร์

2.6 สมการโหนดโพลาร์ตามวิธีนิวตัน-ราฟสัน

ในวิชานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงการคำนวณโหนดโพลาร์ตามวิธีนิวตัน-ราฟสัน ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมแพร่หลายมากที่สุดเพราะมีข้อดีหลายประการคือ จำนวนรอบของการคำนวณไม่ขึ้นกับขนาดของระบบกำลังไฟฟ้า [4] อีกทั้งมีการเข้าสู่ของค่าตอบที่ดีด้วย

สำหรับระบบกำลังไฟฟ้าขนาด n บัส

สมการกำลังไฟฟ้าที่บัส p ใดๆ คือ

$$P_p - jQ_p = V_p^* \cdot I_p \quad (2.16)$$

โดยที่ กระแสไฟฟ้าที่บัส p มีค่าดังนี้

$$I_p = \sum_{q=1}^n Y_{pq} \cdot V_q \quad (2.17)$$

แทนค่า I_p จากสมการที่ (2.17) ลงในสมการที่ (2.16) จะได้ว่า

$$P_p - jQ_p = V_p^* \cdot \sum_{q=1}^n Y_{pq} \cdot V_q \quad (2.18)$$

- โดยที่
- P_p คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่บัส p
 - Q_p คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลเข้าสู่บัส p
 - V_p, V_q คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส p และ q ตามลำดับ
 - V_p^* คือ สังยุคเชิงซ้อน (Complex conjugate) ของแรงดันไฟฟ้าที่บัส p
 - I_p คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่บัส p
 - Y_{pq} คือ สมาชิกในตำแหน่งที่ (p,q) ของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์
 - n คือ จำนวนบัสทั้งหมดในระบบกำลังไฟฟ้า

กำหนดให้

$$V_p = e_p + jf_p \quad (2.19)$$

$$Y_{pq} = G_{pq} - jB_{pq} \quad (2.20)$$

แทนค่า V_p และ Y_{pq} จากสมการที่ (2.19) และ (2.20) ตามลำดับ ลงในสมการที่ (2.18) จะได้ว่า

$$P_p - jQ_p = (e_p - jf_p) \cdot \sum_{q=1}^n \left\{ (G_{pq} - jB_{pq}) (e_q + jf_q) \right\} \quad (2.21)$$

ทำการแยกส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสมการที่ (2.21) จะได้กำลังไฟฟ้าจริง P_p และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ Q_p สำหรับบัส p ใดๆที่เป็นโหนดบัส ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} P_p &= \sum_{q=1}^n \left\{ e_p \left(e_q G_{pq} + f_q B_{pq} \right) + f_p \left(f_q G_{pq} - e_q B_{pq} \right) \right\} \\ Q_p &= \sum_{q=1}^n \left\{ f_p \left(e_q G_{pq} + f_q B_{pq} \right) - e_p \left(f_q G_{pq} - e_q B_{pq} \right) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (2.22)$$

สำหรับบัส p ที่เป็นบัสควบคุมแรงดัน จะทำการคำนวณขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส $|V_p|$ แทนกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่บัส Q_p เพื่อให้สามารถตรวจสอบได้ว่า ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส $|V_p|$ มีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่กำหนดมากน้อยเพียงใดในการคำนวณแต่ละรอบ ดังนั้นสมการที่ใช้คำนวณสำหรับบัสควบคุมแรงดัน p เป็นดังนี้

$$\left. \begin{aligned} P_p &= \sum_{q=1}^n \left\{ e_p \left(e_q G_{pq} + f_q B_{pq} \right) + f_p \left(f_q G_{pq} - e_q B_{pq} \right) \right\} \\ |V_p|^2 &= e_p^2 + f_p^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

เนื่องจากสมการที่ (2.22) และ (2.23) มีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นในการแก้สมการโหนดโพล์ดังกล่าวจะต้องอาศัยการวิเคราะห์เชิงเลข (Numerical analysis) ตามวิธีนิวตัน-ราฟสัน โดยอาศัยเทคนิคการคำนวณซ้ำ (Iterative techniques) ด้วยการเริ่มต้นสมมติค่าตอบ คำนวณหาค่าปรับแต่ง (Correction) ของคำตอบ เพื่อนำไปสู่การประมาณค่าตอบในรอบถัดไป และจะดำเนินการคำนวณซ้ำเช่นนี้เรื่อยไปจนกว่าความคลาดเคลื่อนของค่าปรับแต่งคำตอบไม่เกินค่าความผิดพลาด (Tolerance) ที่กำหนดภายใต้จำนวนรอบที่ใช้คำนวณไม่เกินจำนวนรอบสูงสุดที่กำหนดไว้ และจะได้ว่าค่าประมาณในรอบการคำนวณสุดท้าย คือ ค่าตอบของสมการ

2.7 การประยุกต์วิธีนิวตัน-ราฟสันระบบพิกัดเชิงขั้วในการแก้ปัญหาทางโหนดโพล์

เนื่องจากสมการที่ (2.22) และ (2.23) มีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นในการแก้สมการดังกล่าวเพื่อให้ได้มาซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ จะต้องอาศัยหลักการแก้สมการพีชคณิตที่ไม่เป็นเชิงเส้นตามวิธีนิวตัน-ราฟสัน มาใช้ในการแก้ปัญหาทางโหนดโพล์และจะได้สมการที่เป็นเชิงเส้นซึ่งอยู่ในรูปของความคลาดเคลื่อนของปริมาณทางไฟฟ้าที่บัส ดังนี้

สำหรับระบบกำลังไฟฟ้าขนาด n บัส และมีจำนวนโหนดบัสเท่ากับ n_L กำหนดให้ แรงดันไฟฟ้าที่บัส p (V_p) และสมาชิกในตำแหน่งที่ (p,q) ของบัสแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์ (Y_{pq}) อยู่ในรูปพิกัดเชิงขั้ว ดังนี้

$$V_p = |V_p| e^{j\delta_p} \quad (2.24)$$

$$Y_{pq} = |Y_{pq}| e^{j\theta_{pq}} \quad (2.25)$$

โดยที่ $|V_p|$, δ_p คือ ขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส p ตามลำดับ

$|Y_{pq}|$, θ_{pq} คือ ขนาดและมุมของสมาธิในตำแหน่งที่ (p,q) ของบัสแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์

แทนค่า V_p และ Y_{pq} จากสมการที่ (2.24) และ (2.25) ตามลำดับ ลงในสมการที่ (2.18) จะได้ว่า

$$P_p - jQ_p = \left(|V_p| e^{-j\delta_p} \right) \cdot \sum_{q=1}^n \left\{ \left(|Y_{pq}| e^{j\theta_{pq}} \right) \left(|V_q| e^{j\delta_q} \right) \right\} \quad (2.26)$$

ทำการแยกส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสมการที่ (2.26) จะได้กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟที่บัส p ใดๆ ตามลำดับ ดังนี้

$$P_p = \sum_{q=1}^n |V_p| |V_q| |Y_{pq}| \cos(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) \quad \text{สำหรับบัส p ใดๆ ยกเว้นบัสอ้างอิง} \quad (2.27)$$

$$Q_p = \sum_{q=1}^n |V_p| |V_q| |Y_{pq}| \sin(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) \quad \text{สำหรับบัส p ที่เป็นโหลดบัส} \quad (2.28)$$

เนื่องจากสมการที่ (2.27) และ (2.28) มีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นในการวิเคราะห์โหลด โฟลว์ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน จะเปลี่ยนสมการดังกล่าวให้อยู่ในลักษณะที่เป็นเชิงเส้น โดยอยู่ในรูปของ สมการความคลาดเคลื่อนของปริมาณทางไฟฟ้าที่บัส ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

โดยที่ ΔP คือ เวกเตอร์ของค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส มีมิติเท่ากับ $(n-1) \times 1$ สำหรับบัส p ใดๆ ยกเว้นบัสอ้างอิง คำนวณได้จาก

$$\begin{aligned}\Delta P_p &= P_{p(\text{schedule})} - P_p \\ &= \left(P_{p(\text{gen})} - P_{p(\text{load})} \right) - P_p\end{aligned}\quad (2.30)$$

ΔQ คือ เวกเตอร์ของค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส มีมิติเท่ากับ $n_L \times 1$ สำหรับบัส p ใดๆที่เป็นโหลดบัส คำนวณได้จาก

$$\begin{aligned}\Delta Q_p &= Q_{p(\text{schedule})} - Q_p \\ &= \left(Q_{p(\text{gen})} - Q_{p(\text{load})} \right) - Q_p\end{aligned}\quad (2.31)$$

$\Delta \delta$ คือ เวกเตอร์ของค่าความคลาดเคลื่อนของมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส มีมิติเท่ากับ $(n-1) \times 1$

$\Delta |V|$ คือ เวกเตอร์ของค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส มีมิติเท่ากับ $(n-n_L-1) \times 1$ คำนวณได้จาก

$$\Delta |V_p|^2 = |V_p(\text{schedule})|^2 - |V_p|^2 \quad (2.32)$$

โดยที่ $|V_p(\text{schedule})|$ คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส p ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นไปตามการควบคุมหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (p.u.)

$|V_p|$ คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส p หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (p.u.)

J คือ จาโคเบียนเมตริกซ์ ประกอบด้วยจาโคเบียนเมตริกซ์ย่อย J_1, J_2, J_3 และ J_4 ดังสมการที่ (2.33) โดยที่สมาชิกใดๆของจาโคเบียนเมตริกซ์ย่อยเหล่านี้ ได้จากการหาอนุพันธ์ย่อยของกำลังไฟฟ้าจริงสุทธิที่บัส และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสุทธิที่บัส เทียบกับมุม δ และขนาด $|V|$ ของแรงดันไฟฟ้าที่บัส โดยมีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

$$\begin{bmatrix} J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

2.7.1 จาโคเบียนเมตริกซ์ย่อย J_1

$$J_1 = \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right]_{(n-1) \times (n-1)} \quad (2.34ก)$$

สมาชิกในตำแหน่งที่ (p,q) ของ J_1 สำหรับบัส p ใดๆ ยกเว้นบัสอ้างอิง ได้จากการหาอนุพันธ์ย่อยของกำลังไฟฟ้าจริงสุทธิที่บัส เทียบกับมุม δ ของแรงดันไฟฟ้าที่บัส คำนวณได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P_p}{\partial \delta_q} &= \left| V_p V_q Y_{pq} \right| \sin(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) && ; p \neq q \\ \frac{\partial P_p}{\partial \delta_p} &= - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n \left| V_p V_q Y_{pq} \right| \sin(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) && ; p = q \end{aligned} \right\} \quad (2.34ข)$$

2.7.2 จาโคเบียนเมตริกซ์ย่อย J_2

$$J_2 = \left[\frac{\partial P}{\partial |V|} \right]_{(n-1) \times n_L} \quad (2.35ก)$$

สมาชิกในตำแหน่งที่ (p,q) ของ J_2 สำหรับบัส p ใดๆ ยกเว้นบัสอ้างอิง ได้จากการหาอนุพันธ์ย่อยของกำลังไฟฟ้าจริงสุทธิที่บัส เทียบกับขนาด $|V|$ ของแรงดันไฟฟ้าที่บัส คำนวณได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P_p}{\partial V_q} &= \left| V_p Y_{pq} \right| \cos(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) && ; p \neq q \\ \frac{\partial P_p}{\partial V_p} &= 2 \left| V_p Y_{pp} \right| \cos \theta_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n \left| V_q Y_{pq} \right| \cos(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) && ; p = q \end{aligned} \right\} \quad (2.35ข)$$

2.7.3 จาโคเบียนเมตริกซ์ย่อย J_3

$$J_3 = \left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right]_{n_L \times (n-1)} \quad (2.36ก)$$

สมาชิกในตำแหน่งที่ (p,q) ของ J_3 สำหรับบัส p ใดๆ ที่เป็นโหนดบัส ได้จากการหาอนุพันธ์ย่อยของกำลังไฟฟ้านอกที่ฟลูทที่บัส เทียบกับมุม δ ของแรงดันไฟฟ้าที่บัส คำนวณได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q_p}{\partial \delta_q} &= - \left| \frac{V_p V_q Y_{pq}}{pq} \right| \cos(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) & ; p \neq q \\ \frac{\partial Q_p}{\partial \delta_p} &= \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n \left| \frac{V_p V_q Y_{pq}}{pq} \right| \cos(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) & ; p = q \end{aligned} \right\} \quad (2.36\text{v})$$

2.7.4 จาโคเบียนเมตริกซ์ย่อย J_4

$$J_4 = \left[\frac{\partial Q}{\partial |V|} \right]_{n_L \times n_L} \quad (2.37\text{ก})$$

สมาชิกในตำแหน่งที่ (p,q) ของ J_4 สำหรับบัส p ใดๆ ที่เป็นโหนดบัส ได้จากการหาอนุพันธ์ย่อยของกำลังไฟฟ้านอกที่ฟลูทที่บัส เทียบกับขนาด $|V|$ ของแรงดันไฟฟ้าที่บัส คำนวณได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q_p}{\partial V_q} &= \left| \frac{V_p Y_{pq}}{pq} \right| \sin(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) & ; p \neq q \\ \frac{\partial Q_p}{\partial V_p} &= -2 \left| \frac{V_p Y_{pp}}{pp} \right| \sin \theta_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n \left| \frac{V_q Y_{pq}}{pq} \right| \sin(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) & ; p = q \end{aligned} \right\} \quad (2.37\text{ข})$$

จากสมการที่ (2.29) สามารถคำนวณหาค่าปรับแต่งแรงดันไฟฟ้าที่บัส ในการคำนวณรอบที่ k ได้โดยแรงดันไฟฟ้าที่บัสใหม่ของการคำนวณในรอบที่ $k+1$ คำนวณได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} \delta_p^{(k+1)} &= \delta_p^{(k)} + \Delta \delta_p^{(k)} \\ |V_p|^{(k+1)} &= |V_p|^{(k)} + \Delta |V_p|^{(k)} \end{aligned} \right\} \quad (2.38)$$

เงื่อนไขการเข้าสู่ของคำตอบ คือ

$$\left. \begin{aligned} |\max \Delta P^{(k)}| &\leq \varepsilon_P \\ |\max \Delta Q^{(k)}| &\leq \varepsilon_Q \\ k &\leq k_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (2.39)$$

โดยที่ $|\max \Delta P^{(k)}|$ คือ ขนาดของความคลาดเคลื่อนที่มีค่ามากที่สุดทางกำลังไฟฟ้าจริงสำหรับการคำนวณในรอบที่ k ใดๆ

$|\max \Delta Q^{(k)}|$ คือ ขนาดของความคลาดเคลื่อนที่มีค่ามากที่สุดทางกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสำหรับการคำนวณในรอบที่ k ใดๆ

- ε_P คือ ค่าผิดพลาดที่กำหนดให้ยอมรับได้ทางกำลังไฟฟ้าจริง
- ε_Q คือ ค่าผิดพลาดที่กำหนดให้ยอมรับได้ทางกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ
- k คือ จำนวนรอบที่ใช้คำนวณเพื่อการเข้าสู่ของคำตอบ
- k_{\max} คือ จำนวนรอบสูงสุดที่กำหนดให้คำนวณได้

2.8 การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่โหลดและกำลังสูญเสียในสายส่งและหม้อแปลง

ภายหลังจากที่ใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน เพื่อคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆแล้ว สามารถคำนวณหา กำลังไฟฟ้าที่โหลดและกำลังสูญเสียในสายส่งและหม้อแปลงต่างๆ ได้ดังนี้

2.8.1 กำลังไฟฟ้าที่โหลดและกำลังสูญเสียในสายส่ง

พิจารณาสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัส p กับบัส q ดังรูปที่ 2.3 กระแสไฟฟ้าที่บัส p (i_p) คำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} i_p &= i_{\text{line}} + i_{\text{charging}} \\ &= (V_p - V_q) \cdot y_{\text{serpq}} + V_p \cdot \frac{y_{\text{shtpq}}}{2} \end{aligned} \quad (2.40)$$

- โดยที่ i_{line} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง pq
- i_{charging} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากบัส p ลงสู่พื้นดินตามไลน์ชาร์จิ่ง

V_p และ V_q คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส p และ q ตามลำดับ

y_{serpq} คือ ค่าแอดมิตแตนซ์อนุกรมของสายส่ง pq มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{R_{pq} + jX_{pq}}$

$\frac{y_{shpq}}{2}$ คือ ครึ่งหนึ่งของค่าไลน์ชาร์จิงแอดมิตแตนซ์ทั้งหมดของสายส่ง pq

กำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง pq จากบัส p ไปสู่อบัส q สามารถได้ดังนี้

$$P_{pq} - jQ_{pq} = V_p^* i_p \quad (2.41)$$

แทนค่า i_p จากสมการที่ (2.40) ลงในสมการที่ (2.41) จะได้ว่า

$$P_{pq} - jQ_{pq} = V_p^* (V_p - V_q) y_{serpq} + V_p^* V_p \frac{y_{shpq}}{2} \quad (2.42)$$

ในทำนองเดียวกัน กำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง pq จากบัส q ไปสู่อบัส p สามารถได้ดังนี้

$$P_{qp} - jQ_{qp} = V_q^* (V_q - V_p) y_{serpq} + V_q^* V_q \frac{y_{shpq}}{2} \quad (2.43)$$

กำลังสูญเสียในสายส่ง pq มีค่าเท่ากับ ผลรวมทางพีชคณิตของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลจากบัส p ไปสู่อบัส q และที่ไหลจากบัส q ไปสู่อบัส p ดังนี้

$$P_{loss(pq)} = P_{pq} + P_{qp} \quad (2.44)$$

2.8.2 กำลังไฟฟ้าที่ไหลและกำลังสูญเสียในหม้อแปลง

พิจารณาวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าในรูปที่ 2.4 (ก) กำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบัส p ไปสู่อบัส q คือ

$$P_{pq} - jQ_{pq} = \left(\frac{1}{a^*} \right) \cdot V_p^* \left[\left(\frac{1}{a} \right) \cdot V_p - V_q \right] \cdot y_{pq} \quad (2.45)$$

ในทำนองเดียวกัน กำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบัส q ไปสู่อบัส p คือ

$$P_{qp} - jQ_{qp} = V_q^* \left[V_q - \frac{V_p}{a} \right] \cdot y_{pq} \quad (2.46)$$

สำหรับกำลังสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้าที่เชื่อมอยู่ระหว่างบัส p และบัส q สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.44) ทำนองเดียวกับสายส่ง

2.9 ขั้นตอนการคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

จากหลักการที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น การคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน มีขั้นตอนดังนี้ และสามารถสรุปเป็นแผนภาพดังแสดงในรูปที่ 2.7

- 1) สร้างบัสแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์ ตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4
- 2) สมมติค่าแรงดันเริ่มต้นที่บัสต่างๆ ยกเว้นที่บัสอ้างอิง $V_p^{(0)}$
โดยที่ $p = 1, 2, \dots, n$ และ $p \neq \text{reference bus}$
- 3) ให้ $k = 0$
- 4) คำนวณปริมาณทางไฟฟ้าที่บัส ดังนี้

-ถ้าบัส p เป็นโหลดบัส แล้วคำนวณ $P_p^{(k)}$ และ $Q_p^{(k)}$ ตามสมการที่ (2.27) และ (2.28)

ตามลำดับ

-ถ้าบัส p เป็นบัสควบคุมแรงดัน แล้วคำนวณ $P_p^{(k)}$ ตามสมการที่ (2.27)

- 5) คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณทางไฟฟ้าที่บัส ดังนี้

-ถ้าบัส p เป็นโหลดบัส แล้วคำนวณ $\Delta P_p^{(k)}$ และ $\Delta Q_p^{(k)}$ ตามสมการที่ (2.30)

และ(2.31) ตามลำดับ

-ถ้าบัส p เป็นบัสควบคุมแรงดัน แล้วคำนวณ $\Delta P_p^{(k)}$ ตามสมการที่ (2.30)

6) ตรวจสอบเงื่อนไข ถ้าเงื่อนไขตามสมการที่ (2.39) เป็นจริง แล้วให้ไปทำขั้นตอนที่ 11 มิฉะนั้นให้เริ่มต้นทำขั้นตอนที่ 7

- 7) คำนวณจาโคเบียนเมตริกซ์ J จากสมการที่ (2.33) ถึงสมการที่ (2.37)
- 8) คำนวณค่าปรับแต่งแรงดันไฟฟ้าที่บัส $\Delta \delta$ และ $\Delta |V|$ จากสมการที่ (2.32)
- 9) คำนวณแรงดันไฟฟ้าที่บัสใหม่ ดังนี้ ตามสมการที่ (2.38)

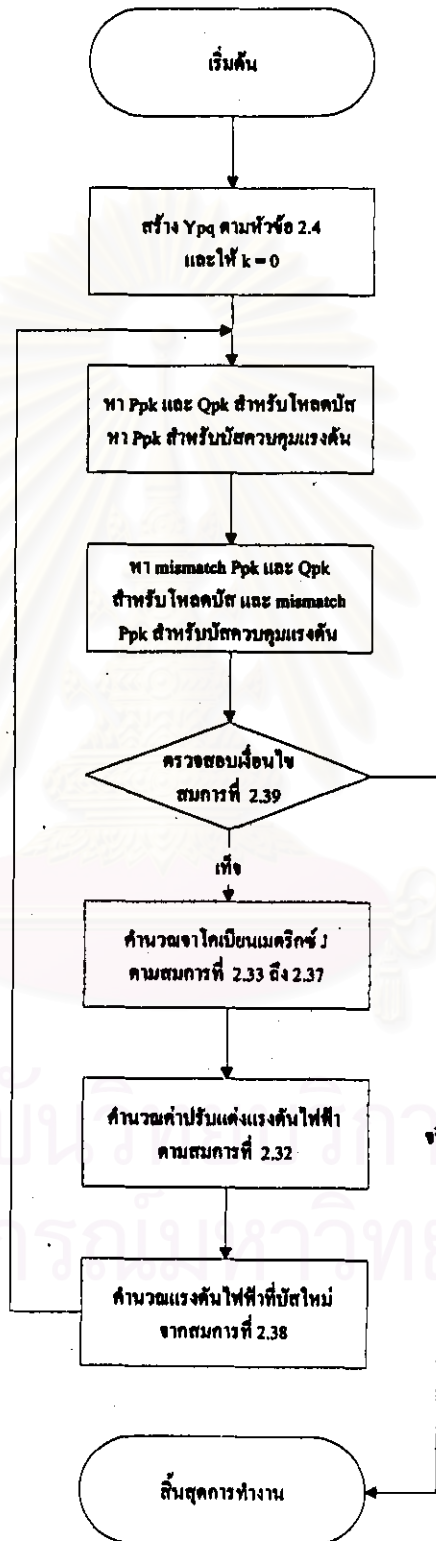
10) ให้ $k = k + 1$ แล้วย้อนกลับไปทำขั้นตอนที่ 4 โดยใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่บันทึกใหม่ซึ่งได้จากขั้นตอนที่ 9

11) คำนวณกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านและกำลังสูญเสียในสายส่งและหม้อแปลงต่างๆ ตามหัวข้อ 2.8 และสิ้นสุดการทำงาน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากขั้นตอนการคำนวณที่กล่าวมา สามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังนี้



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงการคำนวณโหลดไฟฟ้ตามวิธีนิวตัน-ราฟสัน

2.10 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการคำนวณโหลดไฟลต์ซึ่งถือเป็นสิ่งสำคัญพื้นฐานของการศึกษาระบบต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง ได้แก่ การวิเคราะห์เสถียรภาพ การวางแผนและการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของระบบกำลังไฟฟ้า

การคำนวณ โหลดไฟลต์ที่กล่าวถึงในที่นี้คือการคำนวณโหลดไฟลต์ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันแพร่หลายมากที่สุด ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากมีข้อดีหลายประการคือ จำนวนรอบของการคำนวณไม่ขึ้นกับขนาดของระบบทดสอบ โดยปกติทั่วไปจะได้คำตอบภายใน 2 - 5 รอบการคำนวณ นอกจากนี้ วิธีดังกล่าวยังมีการสู่เข้าของคำตอบที่เสถียร



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย