



ทฤษฎีหลักในการวิเคราะห์โหลดเกินและการลดภาระโหลดเกินในสายส่ง

1. การวิเคราะห์โหลดไหลของระบบ

การวิเคราะห์โหลดไหลของระบบ เป็นการศึกษาถึงการผลิตกำลังไฟฟ้า (Generation) การส่งกำลังไฟฟ้า (Power Distribution) และขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่มีสต่าง ๆ ของระบบ เพื่อให้ทราบถึงสถานะภาพในทางไฟฟ้าของระบบ ในขั้นต้นก่อนจะทำการวิเคราะห์ถึงภาระโหลดเกินในสายส่งและการลดภาระโหลดเกินที่เกิดขึ้นให้เข้าสู่ภาวะปกติ

1.1 สัญลักษณ์และการแทนค่าในการวิเคราะห์

1.1.1 แผนภูมิเส้นเดียว (Single Line Diagram)

ในการวิเคราะห์โหลดไหลของระบบนั้น ในเบื้องต้นจำเป็นต้องแสดงถึงลักษณะทั่วไปของระบบ โดยใช้แผนภูมิเส้นเดียว ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์และการคำนวณหาโหลดไหล ดังนั้นในระบบไฟฟ้า 3 เฟสและมีโหลด (Load) สมดุลย์กันทั้ง 3 เฟส การคำนวณเพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้า แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของระบบ สามารถคำนวณหาจากระบบไฟฟ้า 1 เฟสแทนได้ โดยใช้แผนภูมิเส้นเดียวแทนวงจรไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า 3 เฟส และในแผนภูมิเส้นเดี่ยวนี จะบอกถึงส่วนสำคัญและรายละเอียดต่าง ๆ ของระบบ อาทิเช่น ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง ค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาดของโหลด และแรงดันไฟฟ้ามีสต่าง ๆ เป็นต้น

1.1.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generators)

ในการวิเคราะห์โหลดไหลนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเป็นแหล่งสำหรับฉีดกำลังไฟฟ้า (Inject Power) ให้กับระบบโดยผ่านบัสที่ต่ออยู่ ซึ่งประกอบด้วยค่ากำลังไฟฟ้าแอคทีฟในการวิเคราะห์จะถือเป็นค่าบวก (+) และมีค่าคงที่ ยกเว้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อเชื่อมกับสวิงบัส (Swing Bus) ส่วนค่ากำลังไฟฟารีแอคทีฟ (Reactive Power) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ และในกรณีที่ เป็นบัสควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Voltage

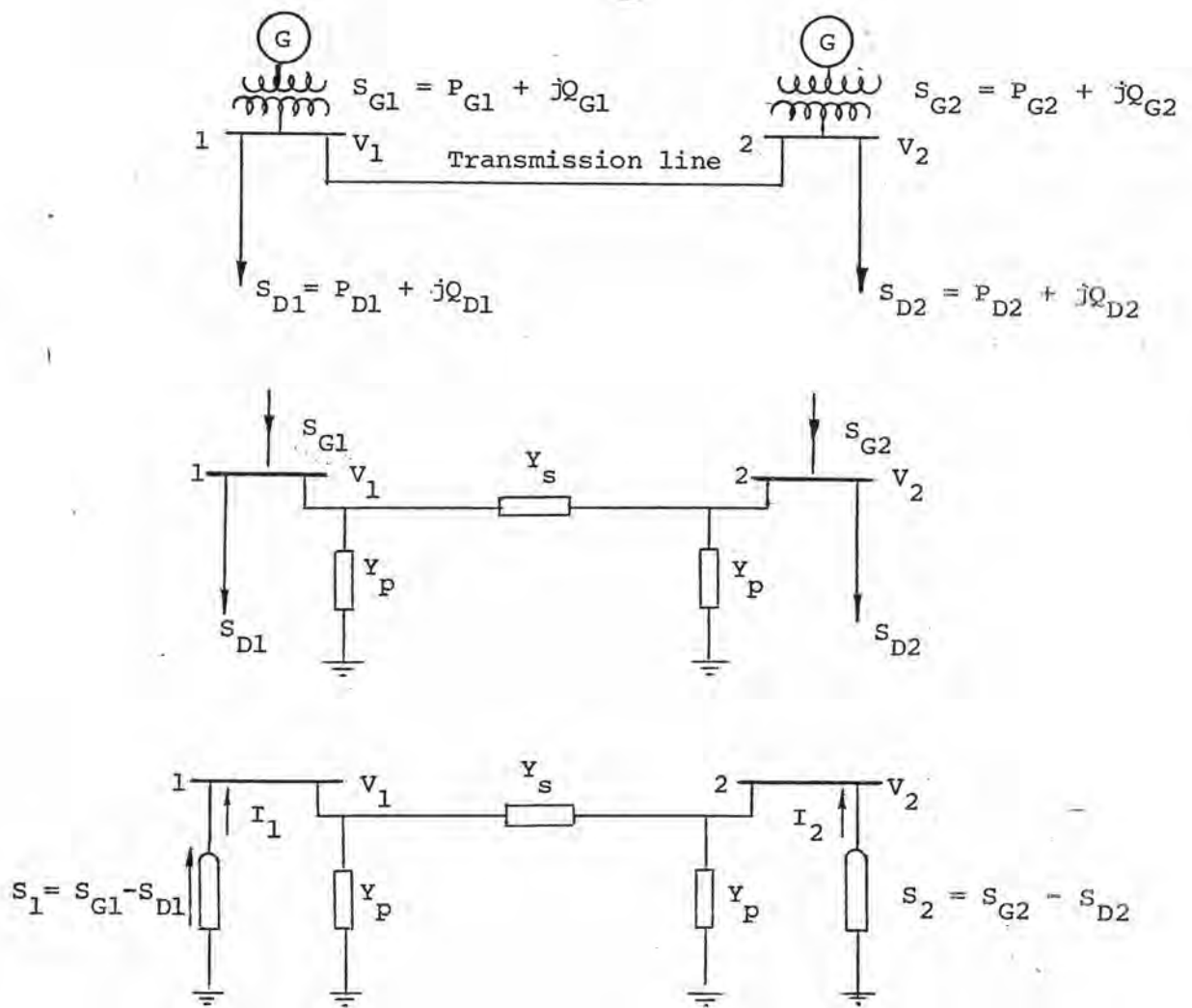
Control Bus) ที่มีสื่จะมี เครื่องหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่สามารถบ่อนกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟกับบัสนั้นได้ ตามต้องการ เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ (Synchronous Condenser) หรือคาปาซิเตอร์ (Capacitor) แต่ทั้งนี้ต้องมีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่บ่อนเข้าบัสไม่เกินพิกัดสูงสุด (Maximum Available Vars) หรือมีค่าไม่น้อยกว่าพิกัดต่ำสุด (Minimum Available Vars) ของเครื่องหรืออุปกรณ์นั้น และบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่จะกำหนดให้เป็นบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generating Bus) ด้วย

1.1.3 โหลด (Loads)

โหลดจะเป็นเสมือนแหล่งรับกำลังไฟฟ้าจากระบบ และถือกำลังไฟฟ้าของโหลดเป็นค่าลบ (-) ในการวิเคราะห์ โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าแอคทีฟและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของโหลดเป็นค่าคงที่ในการวิเคราะห์โหลดไหล บัสซึ่งมีโหลดต่ออยู่เพียงอย่างเดียวจะถือเป็นบัสของโหลด (Load Bus)

1.1.4 กำลังไฟฟ้ามัส (Bus Power)

กำลังไฟฟ้ามัสเป็นกำลังไฟฟ้าที่บ่อนเข้าบัสในระบบ ซึ่งใช้สำหรับในการวิเคราะห์โหลดไหล โดยค่ากำลังไฟฟ้ามัสนี้ได้จากการรวมค่ากำลังไฟฟ้าที่บ่อนเข้าบัสจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากบัสให้กับโหลดที่ต่ออยู่กับบัสนั้น และในกรณีที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือโหลดอย่างใดอย่างหนึ่งต่ออยู่ กำลังไฟฟ้ามัสจะแทนด้วยค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยมีค่าเป็น (+) หรือค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดซึ่งกำหนดให้มีค่าเป็น (-) ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 แสดงถึงกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 2 บัส

โดยที่

S_{G1} = กำลังไฟฟ้าของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 1

S_{D1} = กำลังไฟฟ้าของ โหลดที่จ่ายออกจากบัส 1

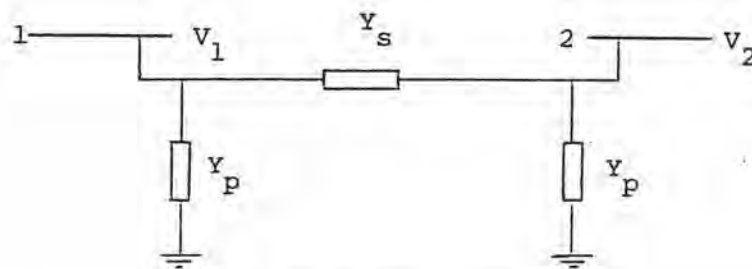
S_1 = กำลังไฟฟ้าที่บัส 1

จากรูป 2.1 ค่ากำลังไฟฟ้าของบัส 1 จะคำนวณได้จากสมการ (2.1)

$$S_1 = S_{G1} - S_{D1} \quad (2.1)$$

1.1.5 สายส่ง (Transmission Line)

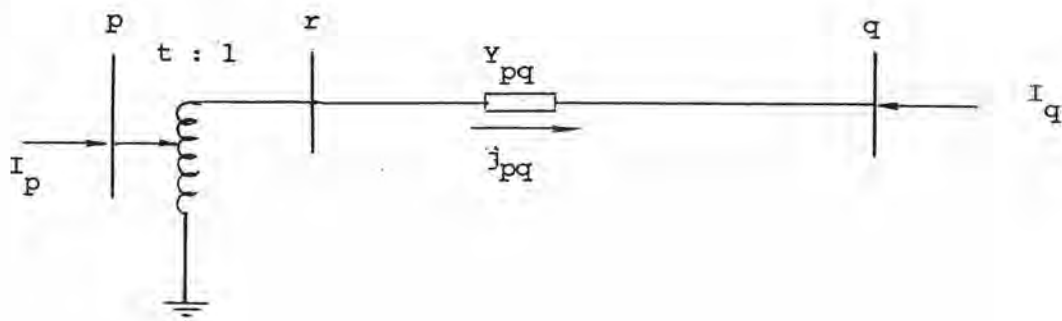
สายส่งที่ต่อเชื่อมระหว่างบัสในระบบสามารถแทนได้ ด้วยวงจรสมมูลย์พาย (Equivalent Pi Circuit) ซึ่งประกอบด้วยความต้านทานต่ออนุกรมกับอินดักแทนซ์ (Inductance) ของสายส่งที่ต่อเชื่อมระหว่างบัส 2 บัสถึงกัน และมีชั้นคาปาซิแทนซ์ (Shunt Capacitance) หรือมีค่าชั้ส เซบแทนซ์ (Susceptance) ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของชั้ส เซบแทนซ์ ของสายส่งตลอดสายที่ต่ออยู่ระหว่างบัสต่อบัส



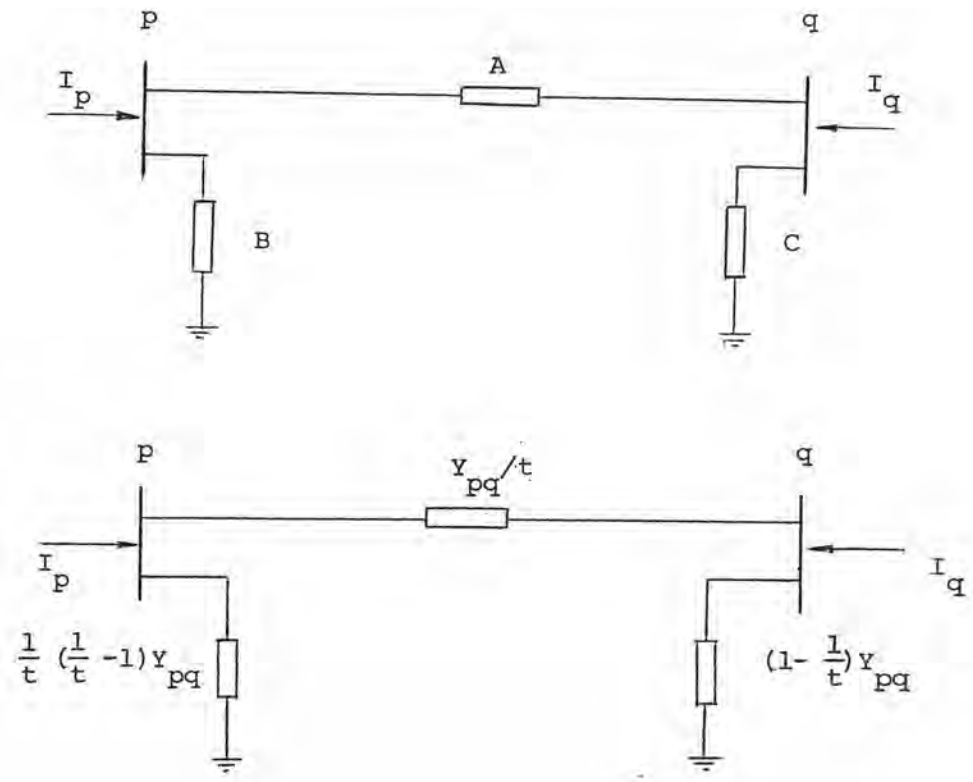
รูปที่ 2.2 แสดงถึงวงจรสมมูลย์พายที่ใช้แทนสายส่ง

1.1.6 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ต่ออยู่ในระบบ เพื่อปรับระดับแรงดันไฟฟ้าสำหรับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบโดยมีค่าอัตราส่วนจำนวนรอบ (Turn Ratio) เป็นปกติหรือผิดจากปกติ (Nominal or Off-Nominal) สามารถแทนหม้อแปลงไฟฟ้าได้ด้วยค่าอินพีแดนซ์ หรือแอมิตแทนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งต่ออนุกรมกับหม้อแปลงอุดมคติ (Ideal Transformer) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงถึงหม้อแปลงอุดมคติต่ออนุกรมกับแอมิตแทนซ์



รูปที่ 2.4 แสดงวงจรสมมูลย์พาย

โดยค่า A, B และ C ในวงจรสมมูลย์พายจากรูปที่ 2.4 สามารถแทนค่าได้ดังนี้

$$A = \frac{y_{pq}}{t} \tag{2.2}$$

$$B = \frac{1}{t} \cdot \left(\frac{1}{t} - 1\right) y_{pq} \tag{2.3}$$

$$C = \left(1 - \frac{1}{t}\right) y_{pq} \tag{2.4}$$

1.1.7 ชั้นอิลิเมนต์ (Shunt Element)

ชั้นอิลิเมนต์ที่อยู่ในระบบจะทำหน้าที่เสมือน เป็นโหลดที่มีค่าอิมพีแดนซ์คงที่ โดยจะติดตั้งใช้งานที่สถานีไฟฟ้าย่อยปลายทางโดยมีจุดประสงค์ เพื่อรักษาแรงดันปลายทางและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งลง ในระบบจะมีชั้นอิลิเมนต์อยู่ 2 ลักษณะ คาปาซิเตอร์ และรีแอกเตอร์ โดยตัวคาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งในสถานีไฟฟ้าย่อยปลายทางมีจุดประสงค์เพื่อยกแรงดันปลายทางและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งลง ซึ่งคาปาซิเตอร์นี้จะทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทิฟให้กับบัส ส่วนตัวรีแอกเตอร์ที่ติดตั้งในระบบ มีจุดประสงค์เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสซึ่งรีแอกเตอร์ต่ออยู่ โดยรีแอกเตอร์จะทำหน้าที่รับกำลังไฟฟ้ารีแอกทิฟจากระบบ ชั้นอิลิเมนต์นี้ สามารถแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์ซึ่งมีค่าคงที่ต่อขนานอยู่กับบัสที่ติดตั้ง

1.2 สมการกำลังไฟฟ้าของระบบ

กำลังไฟฟ้าที่ไหลย้อน เข้าสู่บัสในระบบ ทั้งที่เป็นกำลังไฟฟ้าแอกทิฟ และกำลังไฟฟ้ารีแอกทิฟ สามารถแสดงในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ ตามสมการที่ (2.5) และ (2.6) ตามลำดับ โดยสมการที่ (2.5) เป็นสมการสำหรับคำนวณหา กำลังไฟฟ้าแอกทิฟที่บัส p จากค่าของขนาดและมุมแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ ในระบบ และค่าคงที่บัสแอมิตแทนซ์ของระบบ ส่วนการคำนวณหา กำลังไฟฟ้าแอกทิฟที่บัสอื่นนั้นจะมีลักษณะเช่นเดียวกัน สมการที่ (2.6) เป็นสมการสำหรับคำนวณหา กำลังไฟฟ้ารีแอกทิฟที่บัส p จากค่าของขนาดและมุมแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ ในระบบและค่าคงที่บัสแอมิตแทนซ์ของระบบ สำหรับการคำนวณที่บัสอื่นจะมีลักษณะเช่นเดียวกัน

$$P_p = \sum_{q=1}^n \left| V_p V_q Y_{pq} \right| \cos(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) \quad (2.5)$$

$$Q_p = \sum_{q=1}^n \left| V_p V_q Y_{pq} \right| \sin(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) \quad (2.6)$$

โดยที่ P_p และ Q_p เป็นกำลังไฟฟ้าแอกทิฟและรีแอกทิฟที่บัส p

V_q และ δ_q เป็นขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส q

Y_{pq} และ θ_{pq} เป็นขนาดและมุมของแอมิตแทนซ์ของระบบที่ต่ออยู่ระหว่าง p และ q

1.3 เทคนิคการวิเคราะห์โหลดไหลแบบนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Load Flow Technique)

การหาค่าผลลัพท์โหลดไหลของระบบโดยใช้สมการหลัก (2.5) และ (2.6) มีเทคนิคการวิเคราะห์ เพื่อการคำนวณหาค่าผลลัพท์ได้หลายวิธีด้วยกัน สำหรับเทคนิคการวิเคราะห์โหลดไหลแบบนิวตัน-ราฟสัน⁽³⁾ นี้เป็นรูปแบบการคำนวณหาค่าผลลัพท์วิธีการหนึ่งในจำนวนหลายวิธี ซึ่งสามารถหาค่าผลลัพท์ได้รวดเร็ว หลักการของเทคนิคการวิเคราะห์โหลดไหลแบบนิวตัน-ราฟสัน นั้นจัดทำให้สมการโหลดไหลซึ่งมีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นตรงให้เป็นสมการที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงขึ้น โดยใช้อนุกรมเทลเลอร์ (Taylor Series) ขยายสมการกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟในสมการ (2.5) และ (2.6) เป็นสมการที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงขึ้น ดังแสดงในสมการที่ (2.7) หรือ (2.8) ในรูปของเมตริก

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_{n-1} \\ \vdots \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{n-1}} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_{n-1}} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial P_{n-1}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial \delta_{n-1}} & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial V_{n-1}} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_{n-1}} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_{n-1}} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial \delta_{n-1}} & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial V_{n-1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \vdots \\ \Delta \delta_{n-1} \\ \vdots \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \vdots \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & \vdots & J_2 \\ \vdots & & \vdots \\ J_3 & \vdots & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \vdots \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.8)$$



โดยที่

ΔP และ ΔQ เป็นค่าไม่สมดุลย์กันของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟ (Active and Reactive Power Mismatches)

$\Delta \delta$ และ ΔV เป็นตัวแปรสถานะ (State Variables) ของการเปลี่ยนแปลงค่ามุมและขนาดของแรงดันไฟฟ้า

$\frac{\partial P_p}{\partial \delta_q}, \frac{\partial P_p}{\partial V_q}$ เป็นอนุพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่มีส p ต่อการเปลี่ยนแปลงค่ามุมและขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่มีส q

$\frac{\partial Q_p}{\partial \delta_q}, \frac{\partial Q_p}{\partial V_q}$ เป็นอนุพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟที่มีส p ต่อการเปลี่ยนแปลงค่ามุมและขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่มีส q

J_1, J_2, J_3, J_4 เป็นกลุ่มสมาชิกของสัมประสิทธิ์จาโคเบียน เมตริก [J]

จากสมการไหลดโพล (2.7) และ (2.8) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างค่าไม่สมดุลย์กันของกำลังไฟฟ้า $[\Delta P : \Delta Q]^T$ ที่มีสต่าง ๆ กับตัวแปรสถานะ (State Variables) ของระบบ $[\Delta \delta : \Delta V]^T$ โดยมีสัมประสิทธิ์จาโคเบียน เมตริกเป็นส่วนสัมพันธ์ระหว่างกัน การวิเคราะห์ไหลดโพลแบบเทคนิคนิวตัน-ราฟสัน ว่าจะคำนวณหาผลลัพธ์โดยใช้วิธีคำนวณซ้ำ ๆ กันหลายครั้งหรือวิธีการอิตเอเรทีฟ (Iterative) เพื่อให้ค่าไม่สมดุลย์กันของกำลังไฟฟ้า ΔP_p และ ΔQ_p มีค่าต่ำมาก ๆ หรือเพื่อให้ค่ากำลังไฟฟ้ามี่ส P_p^{SP} มีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังไฟฟ้ามี่สซึ่งหาได้จากการคำนวณตามสมการกำลังไฟฟ้าของระบบและการคำนวณหาค่า ΔP_p และ ΔQ_p นั้น สามารถแสดงในรูปของสมการ ดังสมการที่ (2.9) และ (2.10)

$$\Delta P_p = P_p^{SP} - V_p \sum_{q=1}^n V_q (G_{pq} \cos \delta_{pq} + B_{pq} \sin \delta_{pq}) \quad (2.9)$$

$$\Delta Q_p = Q_p^{SP} - V_p \sum_{q=1}^n V_q (G_{pq} \sin \delta_{pq} - B_{pq} \cos \delta_{pq}) \quad (2.10)$$

โดยที่	
P_p^{sp}, Q_p^{sp}	เป็นขนาดกำลังไฟฟ้าบัลแอคทีฟและรีแอคทีฟที่เกิดขึ้นจริงที่บัล p
V_p, δ_p	เป็นขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัล p
δ_{pq}	เป็นขนาดผลต่างของมุมแรงดันไฟฟ้าระหว่างบัล p และบัล q
$G_{pq} + jB_{pq}$	เป็นขนาดของค่าบัลแอคทีฟแดนซ์ที่ต่อระหว่างบัล p และบัล q

การคำนวณหาสัมประสิทธิ์จาโคเบียนสำหรับการวิเคราะห์โหนดโพลแบบ
นิวตัน-ราฟสัน ในรูปของโพลาร์ ดังแสดงในสมการที่ (2.11) ถึง (2.18)

ค่าสัมประสิทธิ์จาโคเบียน J_1

$$\text{เมื่อ } p \neq q \quad \frac{\partial P_p}{\partial \delta_q} = V_p V_q (G_{pq} \sin \delta_{pq} - B_{pq} \cos \delta_{pq}) \quad (2.11)$$

$$\text{เมื่อ } p = q \quad \frac{\partial P_p}{\partial \delta_p} = V_p^2 B_{pp} - Q_{pp} \quad (2.12)$$

ค่าสัมประสิทธิ์จาโคเบียน J_2

$$\text{เมื่อ } p \neq q \quad V_p \frac{\partial P_p}{\partial V_p} = V_p V_q (G_{pq} \cos \delta_{pq} + B_{pq} \sin \delta_{pq}) \quad (2.13)$$

$$\text{เมื่อ } p = q \quad V_p \frac{\partial P_p}{\partial V_p} = V_p^2 G_{pp} + P_{pp} \quad (2.14)$$

ค่าสัมประสิทธิ์จาโคเบียน J_3

$$\text{เมื่อ } p \neq q \quad \frac{\partial Q_p}{\partial \delta_q} = V_p V_q (G_{pq} \cos \delta_{pq} - B_{pq} \sin \delta_{pq}) \quad (2.15)$$

$$\text{เมื่อ } p = q \quad \frac{\partial Q_p}{\partial \delta_p} = V_p^2 G_{pp} - P_{pp} \quad (2.16)$$

ค่าสัมประสิทธิ์จาโคเบียน J_4

$$\text{เมื่อ } p \neq q \quad \frac{\partial Q_p}{\partial V_q} = V_p V_q (G_{pq} \sin \delta_{pq} - B_{pq} \cos \delta_{pq}) \quad (2.17)$$

$$\text{เมื่อ } p = q \quad \frac{\partial Q_p}{\partial V_p} = -V_p^2 B_{pp} - Q_{pp} \quad (2.18)$$

โดยที่

$$P_{pp} = V_p \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n V_q (G_{pq} \cos \delta_{pq} + B_{pq} \sin \delta_{pq}) \quad (2.19)$$

$$Q_{pp} = V_p \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n V_q (G_{pq} \sin \delta_{pq} - B_{pq} \cos \delta_{pq}) \quad (2.20)$$

การหาผลลัพธ์ของโหลดโพลแบบนิวตัน-ราฟสัน ตามสมการที่ (2.8) นั้น

ผลลัพธ์ที่คำนวณได้จากสมการจะมีความถูกต้องมาก เพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของค่าไม่สมดุลย์กันของกำลังไฟฟ้า $[\Delta P : \Delta Q]^T$ กล่าวคือ ขนาดของค่าไม่สมดุลย์กันของกำลังไฟฟ้ามีค่าเข้าใกล้ศูนย์เพียงใดหรือมีขนาดต่ำกว่าค่าที่ยินยอมให้ผิดพลาดได้ (Tolerance) ก็จะทำให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

2. การวิเคราะห์กระแสไฟฟ้าเกินในสายส่ง

2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและตัวแปรสถานะ

ในสภาวะปกติ (Steady State) สายส่งในระบบ สามารถแทนด้วยค่าคงที่ของความต้านทานต่ออนุกรมกับอินดักแทนซ์ของสายส่งและค่าชั้นแอทมิคแทนซ์ของสายส่ง โดยในระบบซึ่งมีสายส่งระหว่างบัส มีขนาดความยาวมากแล้ว สามารถแทนค่าสายส่งด้วยค่าคงที่ในลักษณะของวงจรสมมูลย์พาย ดังนั้น ในการหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในสายส่งจากบัสหนึ่งไปยังอีกบัสหนึ่ง สามารถหาได้จากค่าขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสและค่าคงที่ของสายส่งซึ่งกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน หากกำหนดให้กระแสไฟฟ้าซึ่งไหลผ่านในสายส่งจากบัส p ไปยังบัส q เท่ากับ I_{pq} โดยค่ากระแสไฟฟ้า I_{pq} นี้ คำนวณได้ตามสมการที่ (2.21) และ (2.22)

$$I_{pq} = (|V_p| - |V_q|) |Y_{pq}| + |V_p| Y_c \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} I_{pq} = & [(V_p \cos \delta_p - V_q \cos \delta_q) G_{pq} - (V_p \sin \delta_p - V_q \sin \delta_q - \\ & B_c V_p \sin \delta_p] \\ & + j [(V_p \sin \delta_p - V_q \sin \delta_q) G_{pq} + (V_p \cos \delta_p - \\ & V_q \cos \delta_q) B_{pq} + V_p B_c \cos \delta_p] \end{aligned} \quad (2.22)$$

หรือ

$$I_{pq} = I_r + j I_j$$

โดยที่

I_{pq} เป็นขนาดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งที่ต่อเชื่อมระหว่างบัส p และบัส q

$G_{pq} + jB_{pq}$ เป็นขนาดของแอดมิตแทนซ์อนุกรม (Series Admittance) ของสายส่งที่ต่อเชื่อมระหว่างบัส p และ q

B_c เป็นค่าครึ่งหนึ่งของขนาดลายน์ชาร์จิงแอดมิตแทนซ์ (Line Charging Admittance)

I_r, I_j เป็นขนาดของค่าจริง (Real) และค่าจินตภาพ (Imaginary) ของกระแสไฟฟ้า I_{pq}

2.2 หลักการพิจารณากระแสไฟฟ้าเกินในสายส่ง

การพิจารณากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งจากบัสหนึ่งไปอีกบัสหนึ่งนั้น ว่ามีขนาดเกินขีดพิกัดของสายส่งนั้นหรือไม่ สามารถพิจารณาได้จากขนาดขีดพิกัดสูงสุดของสายส่งนั้น เป็นเกณฑ์สำคัญ ถ้ากำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านระหว่างบัส p และบัส q เท่ากับ I_{pq}° โดย I_{pq}° มีความสัมพันธ์กับกลุ่มของตัวแปร $\delta_p^{\circ}, \delta_q^{\circ}, V_p^{\circ}$ และ V_q° ของระบบ ดังแสดงในสมการ (2.22) และถ้าให้พิกัดกระแสไฟฟ้าสูงสุดของสายส่งที่ต่อเชื่อมระหว่างบัส p และ q เท่ากับ $I_{pq_{max}}$ การพิจารณากระแสไฟฟ้าเกินในสายส่ง หาได้จากการเปรียบเทียบระหว่างค่า I_{pq}° กับ $I_{pq_{max}}$ ในกรณีที่ I_{pq}° มีค่ามากกว่า $I_{pq_{max}}$ แล้วค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง

จะมีขนาดเกินขีดพิกัดของสายส่ง การแก้ไขภาวะกระแสไฟฟ้าเกินในสายส่ง ทำได้โดยลดระดับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งลงให้อยู่ในระดับต่ำกว่า $I_{pq_{max}}$ และเมื่อภายหลังการลดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งแล้วจะทำให้กลุ่มของตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า เปลี่ยนไปจากเดิม โดยสมมติให้เป็น δ_p, δ_q, V_p และ V_q แล้ว จะสามารถหาค่าของการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มตัวแปรสถานะ $[\Delta\delta : \Delta V]^T$ ซึ่งเกิดจากการลดระดับกระแสไฟฟ้าลงจากสภาวะเดิม เข้าสู่สภาวะใหม่ โดยคำนวณหาได้ตามสมการ (2.23)

$$\Delta I_{pq} = \frac{\partial I_{pq}}{\partial \delta_p} \cdot \Delta \delta_p + \frac{\partial I_{pq}}{\partial \delta_q} \cdot \Delta \delta_q + \frac{\partial I_{pq}}{\partial V_p} \cdot \Delta V_p + \frac{\partial I_{pq}}{\partial V_q} \cdot \Delta V_q \quad (2.23)$$

กำหนดให้

$$\Delta I_{pq} = I_{pq_{max}} - I_{pq}^o \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{pq}}{\partial \delta_p} &= \frac{I_r}{I_{pq}^o} [-G_{pq} V_p^o \sin \delta_p^o - B_{pq} V_p^o \cos \delta_p^o - B_c V_p^o \cos \delta_p^o] \\ &+ \frac{I_j}{I_{pq}^o} [G_{pq} V_p^o \cos \delta_p^o - B_{pq} V_p^o \sin \delta_p^o - B_c V_p^o \sin \delta_p^o] \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{pq}}{\partial \delta_q} &= \frac{I_r}{I_{pq}^o} [G_{pq} V_q^o \sin \delta_q^o + B_{pq} V_q^o \cos \delta_q^o] \\ &+ \frac{I_j}{I_{pq}^o} [-G_{pq} V_q^o \cos \delta_q^o + B_{pq} V_q^o \sin \delta_q^o] \end{aligned} \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{pq}}{\partial V_p} &= \frac{I_r}{I_{pq}^o} [G_{pq} \cos \delta_p^o - B_{pq} \sin \delta_p^o - B_c \sin \delta_p^o] \\ &+ \frac{I_j}{I_{pq}^o} [G_{pq} \sin \delta_p^o + B_{pq} \cos \delta_p^o + B_c \cos \delta_p^o] \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{pq}}{\partial V_q} &= \frac{I_r}{I_{pq}^0} [-G_{pq} \cos \delta_q^0 + B_{pq} \sin \delta_q^0] \\ &+ \frac{I_j}{I_{pq}^0} [-G_{pq} \sin \delta_q^0 - B_{pq} \cos \delta_q^0] \end{aligned} \quad (2.28)$$

โดยที่

ΔI_{pq} เป็นขนาดของกระแสไฟฟ้าที่เกินจากพิกัดสูงสุดของสายส่งซึ่งต่อระหว่างบัส p และบัส q

$\frac{\partial I_{pq}}{\partial \delta_p^0}$, $\frac{\partial I_{pq}}{\partial V_p^0}$ เป็นอนุพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งระหว่างบัส p และ q ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ามุมและขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส p

$I_{pq_{max}}$ เป็นขนาดพิกัดกระแสไฟฟ้าสูงสุดของสายส่งที่ต่อระหว่างบัส p และบัส q

I_{pq}^0 เป็นขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านระหว่างบัส p และ q

สมการที่ (2.25) ถึง (2.28) เป็นผลจากการจัดทำอนุพันธ์ (Derivatives) ขนาดของกระแสไฟฟ้า I_{pq} หรือเท่ากับรากที่สองของผลบวกกำลังสองของ I_r และ I_j ตามสมการที่ (2.29) จำนวนสายส่งที่กระแสไฟฟ้าเกินทุกสายจะสามารถแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในสายส่ง เท่ากับผลบวกของผลคูณระหว่าง เทอมของอนุพันธ์สี่เทอมกับการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะ (Increment State Variables) ตามแสดงในสมการ (2.23) หากระบบซึ่งประกอบด้วยจำนวนบัส "n" บัสและจำนวนสายส่งในระบบทั้งสิ้น "l" สาย โดยมีสายส่งที่มีกระแสไฟฟ้าไหลเกินขีดจำกัดเป็นจำนวน "j" สายแล้ว สามารถจัดทำสมการ (2.23) แสดงในรูปของเมตริกได้ดังสมการ (2.30)

$$I_{pq} = \sqrt{I_r^2 + I_j^2} \quad (2.29)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta I_1 \\ \Delta I_2 \\ \vdots \\ \Delta I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ \\ A \\ \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta V \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

เนื่องจากเมตริก [A] มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular) หรือมีจำนวนของแถว (Row) ไม่เท่ากับจำนวนคอลัมน์ (Column) คือ เมตริกจะมีจำนวนแถวเท่ากับจำนวนของสายส่งที่มีโหลดเกินและจำนวนคอลัมน์จะเท่ากับสองเท่าของจำนวนบัสลบด้วย 1 หรือ $2n-1$ โดยสมาชิก (Elements) ของเมตริก [A] จะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์อยู่เพียง 4 เทอมเท่านั้น สำหรับในแต่ละแถวและโดยที่การศึกษาโหลดไหลโดยทั่วไป จะมีสวิงบัสเป็นบัสอ้างอิง (Reference Bus) สำหรับบัสอื่น ๆ และค่ามุมแรงดันไฟฟ้าของสวิงบัสจะกำหนดให้เท่ากับศูนย์ ดังนั้น เวกเตอร์ตัวแปรสถานะ $[\Delta\delta : \Delta V]^T$ (State Variable Vector) ของสมการ (2.30) จึงไม่นับรวมตัวแปรสถานะของการเปลี่ยนแปลงค่ามุมแรงดันไฟฟ้า $\Delta\delta$ ของสวิงบัสในสมการนี้ด้วย ซึ่งจะทำให้เวกเตอร์ตัวแปรสถานะ $[\Delta\delta : \Delta V]^T$ ประกอบด้วยตัวแปรสถานะของการเปลี่ยนแปลงค่ามุมแรงดันไฟฟ้า $[\Delta\delta]$ เท่ากับ $n-1$ และตัวแปรสถานะของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้า $[\Delta V]$ เท่ากับ n

จากสมการที่ (2.30) สามารถจัดรูปแบบของสมการใหม่ได้ตามสมการ (2.31) ทั้งนี้ เนื่องจากตัวแปรสถานะของการเปลี่ยนแปลงค่ามุมและขนาดแรงดันไฟฟ้าเป็นสิ่งที่ต้องการหาค่าในสมการนี้ และเพื่อจัดรูปแบบของสมการ (2.30) ให้อยู่ในรูปของโพลาร์ (Polar Form) สำหรับเทคนิค นิวตัน-ราฟสัน จะจัดทำได้โดยใช้ $\Delta V/V$ แทน ΔV ซึ่งจะมีรูปแบบสมการ ดังในสมการ (2.32)

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \hline \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \hline \Delta V/V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

2.3 ส่วนกลับของเมตริก $[A_1]$ (Inverse of Matrix A_1)

จากหัวข้อที่ 2.2 เมตริก $[A_1]$ มีรูปลักษณะ เมตริก เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งมีขนาดของจำนวนแถว เท่ากับจำนวนสายส่งที่มีโหลด เกินและขนาดของจำนวนคอลัมน์ เท่ากับ $2n-1$ ในการทำส่วนกลับของเมตริก $[A_1]$ จึงไม่สามารถกระทำได้ ทั้งนี้เนื่องจากเมตริกที่จะทำส่วนกลับได้ต้องมีรูปลักษณะ เมตริก เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square Matrix) เท่านั้น เทคนิคสำหรับการทำส่วนกลับของ เมตริก ที่มีขนาดจำนวนแถวไม่เท่ากับจำนวนคอลัมน์ได้โดยใช้หลักการของ การทำส่วนกลับเทียมของเมตริก ⁽⁴⁾ (Pseudoinverse of Matrix) มาใช้จัดทำส่วนกลับของ เมตริก $[A_1]$ ในสมการ (2.32) เพื่อหาผลลัพธ์ที่ต้องการ ปกติเมตริก $[A_1]$ ที่มีขนาดของมิติ (Dimension) เท่ากับ $\ell \times (2n-1)$ และมีขนาดของแรงค์ (Rank) มากกว่าศูนย์ หรือสามารถจัดให้เมตริก $r > 0$ อยู่ในรูปของผลคูณของ เมตริกของแรงค์ ดังสมการ (2.23)

$$[A_1]^{\ell \times (2n-1)} = [B]^{\ell \times r} [C]^{r \times (2n-1)} \quad (2.33)$$

โดยที่เมตริก $[B]$ และ $[C]$ เป็นเมตริกของแรงค์ r การแยกเมตริก $[A_1]$ ออกเป็นผลคูณของเมตริก $[B]$ และ $[C]$ โดยกำหนดให้เมตริก $[B]$ มีจำนวนคอลัมน์ของเมตริก เท่ากับขนาดของเมตริก $[A_1]$ และเมตริก $[C]$ กำหนดทำให้สอดคล้องกับเมตริก $[B]$ เพื่อให้ได้ผลคูณเมตริก เท่ากับ เมตริก $[A_1]$ การจัดทำส่วนกลับเทียมสำหรับเมตริก $[A_1]$ จากสมการ (2.33) จะให้ผลลัพธ์ของการทำส่วนกลับเมตริกตามที่ได้แสดงไว้ในสมการ (2.34) และกรณีที่คอลัมน์หรือแถวของเมตริก $[A_1]$ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง เป็นอิสระต่อกัน (Linearly Independent) จะมีผลให้สมการ (2.34) จัดรูปแบบสมการอยู่ในรูปของสมการ (2.35) และ (2.36) ได้

$$A_1^* = C^T (CC^T)^{-1} (B^T B)^{-1} B^T \quad (2.34)$$

$$A_1^* = (A_1^T A_1)^{-1} A_1^T \quad (2.35)$$

$$A_1^* = A_1^T (A_1 A_1^T)^{-1} \quad (2.36)$$

เนื่องจากจำนวนแถวในเมตริก $[A]$ และ $[A_1]$ ของสมการ (2.31) และ (2.32) ตามลำดับ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงและเป็นอิสระระหว่างกัน ดังนั้น การจัดทำส่วนกลับของเมตริก $[A_1]$ จึงสามารถคำนวณหาได้โดยใช้สมการ (2.36)

3. เทคนิคการลดภาระโหลดเกินในสายส่ง

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการผลิตกำลังไฟฟ้า โหลด และตัวแปรสถานะ

การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของขนาดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในสายส่งซึ่งจำเป็นต้องลดภาระโหลดเกินลง ตามที่ได้กล่าวในหัวข้อ 2.2 และตามที่กำหนดให้ไว้ในสมการ (2.31) และ (2.32) นั้น จะนำมาเพื่อใช้ในการคำนวณหาขนาดกำลังไฟฟ้าของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต้องปรับการผลิตใหม่และขนาดกำลังไฟฟ้าของ โหลดที่ต้องตัดออกจากบัสของระบบ ถ้าให้ขนาดกำลังไฟฟ้าที่ป้อน เข้าบัสตามสมการกำลังไฟฟ้าที่บัส ซึ่งเป็นฟังก์ชัน (Function) ของมุมและขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสหรือ $[\delta^\circ : V^\circ]^T$ และกำหนดให้กำลังไฟฟ้าที่ป้อน เข้าบัส j เป็น P_j°, Q_j° หากมีการเปลี่ยนแปลงมุมและขนาดของแรงดันไฟฟ้า ไปจากเดิมตามขนาดการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะ $[\Delta\delta : \Delta V]^T$ แล้ว จะมีผลให้ขนาดของกำลังไฟฟ้า P_j° และ Q_j° เปลี่ยนแปลงสอดคล้องตามความสัมพันธ์ในสมการโหลดโพล ซึ่งสามารถคำนวณขนาดของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า $[\Delta P : \Delta Q]^T$ ได้ ดังแสดงในสมการ (2.37) และ (2.38) โดยปกติในการวิเคราะห์ที่โหลดโพลแบบนิวตัน-ราฟสัน เทอมของ ΔP และ ΔQ จะหมายถึงค่าไม่สมดุลย์กันของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟที่บัสต่าง ๆ และค่าของเทอมนี้จะมีค่าลดลงจนกระทั่งมีค่าต่ำสุดอยู่ในช่วงของค่าที่สามารถยินยอมให้ผิดพลาดได้ในการคำนวณหาค่าโหลดโพลของระบบ แต่สำหรับ ΔP และ ΔQ ในสมการ (2.37) และ (2.38) จะหมายถึงขนาดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ป้อน เข้าบัสหรือขนาดของค่าที่เพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าที่ป้อน เข้าบัส (Increment Power) เพื่อลดภาระโหลดเกินในสายส่ง โดยสมการที่ (2.37) และ (2.38) เป็นผลจากการขยายฟังก์ชันสมการกำลังไฟฟ้าบัส P_j และ Q_j ให้อยู่ในรูปของอนุกรมเทลเลอร์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงโดยรอบ (Neighborhood) ของค่า $[\delta^\circ : V^\circ]^T$ ทั้งนี้ เพื่อจัดทำให้สมการกำลังไฟฟ้ามีความสัมพันธ์ระหว่างกันเป็นเชิงเส้นตรง โดยไม่นำเทอมที่กำลังตั้งแต่ว่ากำลังสองขึ้นไปในอนุกรมเทลเลอร์มาคิดคำนวณด้วย

$$\Delta P_j = \frac{\partial P_j}{\partial \delta_i} \Delta \delta_i + \dots + \frac{\partial P_j}{\partial V_i} \Delta V_i + \dots \quad (2.37)$$

$$\Delta Q_j = \frac{\partial Q_j}{\partial \delta_i} \Delta \delta_i + \dots + \frac{\partial Q_j}{\partial V_i} \Delta V_i + \dots \quad (2.38)$$



- โดยที่
- ΔP_j เป็นขนาดของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่บัส เข้าบัส j
 - ΔQ_j เป็นขนาดของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟที่บัส เข้าสู่บัส j
 - $\frac{\partial P_j}{\partial \delta_i}, \frac{\partial P_j}{\partial V_i}$ เป็นอนุพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่บัส เข้าบัส j ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ามุมและขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i

จากสมการที่ (2.37) และ (2.38) สามารถเขียนเป็นรูปของเมตริกได้ตามสมการ (2.39) และจัดรูปแบบของสมการ (2.39) ให้อยู่ในรูปโพลาร์ โดยใช้ $\Delta V/V$ แทน ΔV ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องตรงกัน ดังแสดงในสมการ (2.40)

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \hline \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \hline \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \hline \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \hline \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phantom{\frac{\partial P}{\partial \delta}} & \phantom{\frac{\partial P}{\partial V}} \\ \hline \phantom{\frac{\partial Q}{\partial \delta}} & \phantom{\frac{\partial Q}{\partial V}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \hline \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

สมการ (2.40) จะคล้ายคลึงกับสมการ (2.7) ของเทคนิควิเคราะห์โพลแบบนิวตัน-ราฟสัน ยกเว้นมีข้อแตกต่างกัน ดังนี้

- ก. ขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่ามุมและขนาดของแรงดันที่บัส $[\Delta \delta : \Delta V/V]^T$ เป็นค่าที่ทราบอยู่ก่อนแล้ว
- ข. ขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟที่บัส เข้าบัส $[\Delta P : \Delta Q]^T$ เป็นค่าที่ต้องการหาในสมการนี้
- ค. สมการ (2.40) มีจำนวนแถวของ เมตริกมากกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากได้รวมตัวแปรการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟที่บัส เข้าบัสซึ่งเป็นบัลลูนความแรงดันด้วย

ง. จำนวนตัวแปรในเวกเตอร์ตัวแปรสถานะ $[\Delta\delta : \Delta V/V]^T$ มีจำนวนเพิ่มขึ้น เพื่อสอดคล้องกับจำนวนของตัวแปรการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น

จ. เวกเตอร์ตัวแปรสถานะ $[\Delta\delta : \Delta V/V]^T$ ที่หาได้จากสมการที่ (2.32) จะถูกนำมาคูณกับเมตริก $[J']$ เพื่อคำนวณหาค่า $[\Delta P : \Delta Q]^T$ ในสมการที่ (2.40)

โดยเมตริก $[J']$ เป็นเมตริกที่มีรูปลักษณะ เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีสมาชิกที่มีค่าเป็นศูนย์รวมอยู่ด้วย เมตริก $[J']$ สามารถหาได้โดยวิธีการอย่างใดอย่างหนึ่งดังต่อไปนี้

ก. โดยเพิ่มเต็มจำนวนแถวและคอลัมน์ขึ้นจากสัมประสิทธิ์จาโคเบียนเมตริก $[J]$ ที่ได้หาไว้ในเทคนิคการวิเคราะห์โหลดไฟโพลแบบนิวตัน-ราฟสัน หรือจากสมการ (2.7) ซึ่งจะเป็นการช่วยประหยัดเวลาในการคำนวณหา และหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์

ข. โดยคำนวณเมตริก $[J']$ ใหม่ทั้งหมด แต่ยังคงใช้พื้นที่ของหน่วยความจำของสัมประสิทธิ์จาโคเบียนเมตริก $[J]$ จากเทคนิคการวิเคราะห์โหลดไฟโพลแบบนิวตัน-ราฟสัน ทั้งนี้เพื่อประหยัดหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์

การเลือกใช้วิธีการหาเมตริก $[J']$ ตามข้างต้นนั้น จะคำนึงถึงขนาดของหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์และขนาดของระบบที่ทำการศึกษาระหว่างที่ตลอดจนค่าใช้จ่ายในการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นเกณฑ์สำคัญ

3.2 ขนาดของการปรับการผลิตรกำลังไฟฟ้าใหม่และการตัดโหลดออกเพื่อลดภาวะโหลดเกินในสายส่ง

ขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าที่บัสเข้าบัส คือ ΔP และ ΔQ ที่คำนวณได้จากสมการ (2.40) ที่บัสต่าง ๆ ของระบบนั้น จะหมายถึงการเปลี่ยนแปลงระหว่างกำลังไฟฟ้าในการผลิตและโหลดที่ต่ออยู่กับบัสนั้น ดังแสดงในสมการ (2.41)

$$\begin{aligned}\Delta P_j &= \Delta P_{Gj} + \Delta P_{Lj} \\ &= (P'_{Gj} - P^{\circ}_{Gj}) - (P'_{Lj} - P^{\circ}_{Lj})\end{aligned}\quad (2.41)$$

โดยที่

$$0 \leq \left| \Delta P_{Gj} \right| \leq \left| \Delta P_j \right| ; \text{ และ}$$

$$0 \leq \left| \Delta P_{Lj} \right| \leq \left| \Delta P_j \right|$$

เมื่อ

P_{Gj}° เป็นขนาดในการผลิตเดิมของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งต่ออยู่กับบัส j ก่อนจะทำการลดภาระโหลดเกินในสายส่ง

P_{Lj}° เป็นขนาดของโหลดเดิมที่ต่ออยู่กับบัส j ก่อนจะทำการลดภาระโหลดเกินในสายส่ง

P'_{Gj} เป็นขนาดในการผลิตใหม่ของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งต่ออยู่กับบัส j ภายหลังจากดำเนินการลดภาระโหลดเกินในสายส่งแล้ว

P'_{Lj} เป็นขนาดของโหลดใหม่ที่ บัส j สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ได้ภายหลังจากดำเนินการลดภาระโหลดเกินในสายส่งแล้ว

ΔP_{Gj} เป็นขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าที่ทำการผลิตของบัส j เมื่อลดภาระโหลดเกินในสายส่ง

ΔP_{Lj} เป็นขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าของ โหลดที่บัส j เมื่อลดภาระโหลดเกินในสายส่ง

จากสมการที่ (2.41) สามารถเขียนแยกเป็นสมการของขนาดกำลังไฟฟ้าแอคทีฟของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดได้ดังแสดงในสมการ (2.42) และ (2.43)

$$P'_{Gj} = P_{Gj}^{\circ} + \Delta P_{Gj} \quad (2.42)$$

$$P'_{Lj} = P_{Lj}^{\circ} - \Delta P_{Lj} \quad (2.43)$$

จากสมการที่ (2.42) ขนาดกำลังไฟฟ้าแอคทีฟในการผลิตใหม่ของบัสที่มี เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่จะต้องไม่เกินกว่าขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น และขนาดกำลังไฟฟ้าของโหลดใหม่ที่ต่ออยู่กับบัส ในสมการที่ (2.43) จะต้องไม่เกินขนาดของโหลดที่ต่ออยู่เดิม และในกรณีที่มีบัสเป็นโหลดบัสหรือมีโหลดต่ออยู่กับบัสเพียงอย่างเดียว ขนาดของ ΔP_{Lj} จะเท่ากับ ΔP_j

สำหรับการคำนวณหาค่าขนาดกำลังไฟฟ้ารแอคทีฟในการผลิตใหม่สำหรับ เครื่อง
กำเนิดไฟฟ้าและขนาดกำลังไฟฟ้ารแอคทีฟของโหลดใหม่ได้แสดงไว้ในสมการที่ (2.44) และ
(2.45) ตามลำดับ เนื่องจากขนาดกำลังไฟฟ้ารแอคทีฟที่ต้องผลิตเพิ่มขึ้นจากสมการ (2.44) นั้น
ในทางปฏิบัติไม่สามารถดำเนินการได้ ดังนั้น ΔQ_{Gj} จะถูกกำหนดให้เท่ากับศูนย์สำหรับมีส้นั้น หรือ
ไม่จำเป็นต้องคำนวณหาในที่นี้ ซึ่งจะ เป็นผลให้ขนาดกำลังไฟฟ้ารแอคทีฟของโหลดที่จะต้องตัดออก
จากมีสซึ่งมี เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่จะกำหนดให้ค่า ΔQ_{Lj} เท่ากับ ΔQ_{Gj}

$$Q'_{Gj} = Q^{\circ}_{Gj} + \Delta Q_{Gj} \tag{2.44}$$

$$Q'_{Lj} = Q^{\circ}_{Lj} - \Delta Q_{Lj} \tag{2.45}$$

4. รูปแบบคณิตศาสตร์หลักของเทคนิคการลดภาระโหลดเกินในสายส่ง

เทคนิคการวิเคราะห์โหลดเกินในสายส่งและ เทคนิคการลดภาระโหลดเกินในสายส่ง
ของระบบ โดยใช้รูปแบบจากเทคนิคการวิเคราะห์โหลดโพลแบบนิวตัน-ราฟสัน เป็นแนวทางใน
การวิเคราะห์ ซึ่งได้แสดงรายละเอียดและรูปแบบคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์มาเป็นลำดับ
แล้ว และรูปแบบคณิตศาสตร์หลักที่ใช้ในการวิเคราะห์โหลดเกินในสายส่งและการลดภาระโหลด
เกินในสายส่งนี้ตั้งในสมการ (2.7), (2.32), (2.40) ซึ่งสามารถจัดรวมรูปแบบคณิตศาสตร์
ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \hline \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \hline \Delta V/V \end{bmatrix} \tag{2.46}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \hline \Delta V/V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ A_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I \end{bmatrix} \tag{2.47}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \hline \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ \end{bmatrix} J' \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \hline \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

รูปคณิตศาสตร์ ตามข้างต้นทั้ง 3 สมการ จะเป็นรูปแบบคณิตศาสตร์หลักในการวิเคราะห์โหลดเกินในสายส่งและการลดภาระโหลดเกินในสายส่ง โดยประมาณการในรูปของสมการซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง