

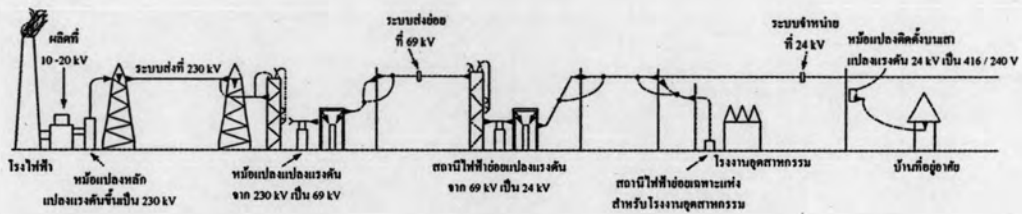
ความรู้พื้นฐานเพื่อใช้ในการวิจัย

2.1 ความรู้พื้นฐานในระบบไฟฟ้ากำลัง

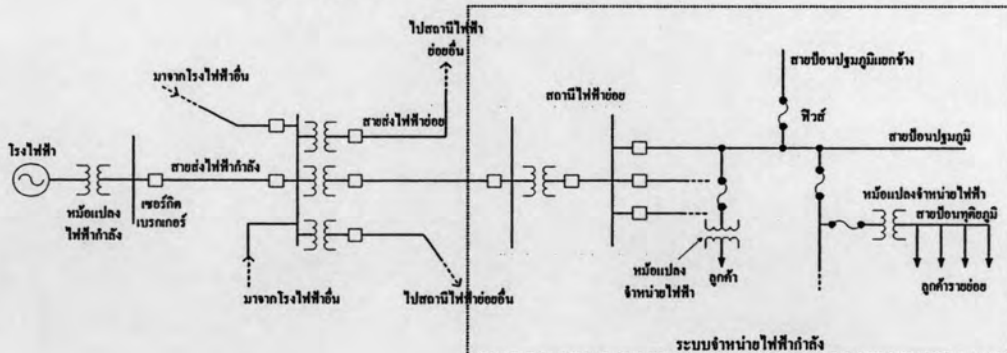
ระบบไฟฟ้ากำลังนั้นเริ่มต้นตั้งแต่การส่งกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตซึ่งก็คือ โรงไฟฟ้า ส่งผ่านไปยังระบบส่ง ระบบจำหน่าย และสุดท้ายไปสิ้นสุดที่ผู้ใช้ไฟ ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึง รายละเอียดของระบบส่งและระบบจำหน่ายโดยสังเขปเพื่อให้เกิดความเข้าใจที่มากยิ่งขึ้น

2.1.1 ระบบส่ง (Transmission System) [11]

ในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้า หรือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้า เช่น โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน หรือโรงไฟฟ้าพลังน้ำ เป็นต้นนั้น เราจะทำการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยแรงดันไม่สูงมาก และจะทำการปรับแรงดันให้สูงขึ้นโดยอาศัยหม้อแปลงไฟฟ้า จากนั้นจึงส่งพลังงานไฟฟ้าที่แรงดันสูงผ่านระบบส่งซึ่งจะเริ่มตั้งแต่ ลานไกไฟฟ้าสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ผ่านระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง แล้วไปสิ้นสุดที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 แผนภาพตัวอย่างระบบไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 2.2 แผนภาพเส้นเดียวของตัวอย่างระบบไฟฟ้ากำลัง

เนื่องจากว่าในสถานีไฟฟ้าย่อยแต่ละแห่ง จะมีอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่สถานี และมีการบันทึกเอาไว้อย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ดังนั้นทำให้เรามีข้อมูลทั้งจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า และข้อมูลจากสถานีไฟฟ้าย่อยค่อนข้างสมบูรณ์ กล่าวคือในระบบส่งนั้น การประมาณค่าสถานะนั้นอาจจะไม่มีความสำคัญเท่าใดนัก เนื่องจากเราสามารถทราบค่าของข้อมูลจริงที่ทุกตำแหน่งในระบบได้จากเครื่องมือวัดที่ได้ทำการติดตั้งไว้เรียบร้อยแล้ว

2.1.2 ระบบจำหน่าย (Distribution System)

ระบบจำหน่าย เป็นระบบที่จะรับกำลังไฟฟ้ามาจากสถานีไฟฟ้าย่อย (Sub-Station) เพื่อส่งต่อไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าในบริเวณต่างๆ โดยขอบเขตของระบบจำหน่ายนั้นเริ่มตั้งแต่สถานีไฟฟ้าย่อย สายป้อนปฐมภูมิ หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า สายป้อนทุติยภูมิไปสิ้นสุดที่ผู้ใช้ไฟฟ้าในบริเวณชุมชน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2

หากเราพิจารณาถึงข้อมูลในระบบจำหน่ายนั้น จะพบว่า มีข้อแตกต่างกับระบบผลิตและระบบส่งค่อนข้างมาก กล่าวคือ ในการผลิตและระบบส่งมีการติดตั้งเครื่องมือวัดครอบคลุมเกือบทุกตำแหน่งในระบบ แต่ในระบบจำหน่ายนั้นเรามีเพียงข้อมูลของกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านออกมาจากสถานีไฟฟ้าย่อยเท่านั้น ส่วนข้อมูลที่หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้านั้นไม่ได้มีการบันทึกไว้ จะมีก็แต่เพียงข้อมูลของหน่วยการใช้พลังงานไฟฟ้ารายเดือนของผู้ใช้แต่ละรายเท่านั้น ดังนั้นหากเราต้องการคำนวณเพื่อหาค่าของข้อมูลบางอย่างในระบบจำหน่าย เราจำเป็นจะต้องทำการติดตั้งเครื่องมือวัดที่ทุกๆจุดในระบบที่เราสนใจ ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาของค่าใช้จ่ายตามมา

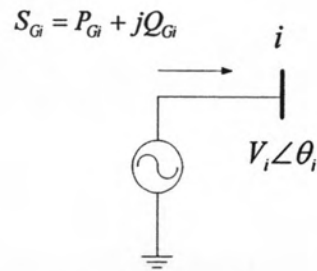
ในงานวิจัยนี้เราจะแก้ปัญหาดังกล่าวโดยนำเสนอวิธีการประมาณค่าสถานะของระบบโดยอาศัยข้อมูลจากจำนวนเครื่องมือวัดที่มีอยู่อย่างจำกัด

2.2 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow Calculation)

2.2.1 แบบจำลององค์ประกอบพื้นฐานในระบบไฟฟ้ากำลัง

2.2.1.1 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

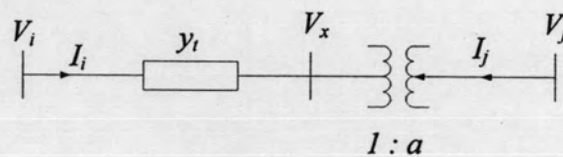
เราสามารถแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีกำลังผลิตเท่ากับ $S_{Gi} = P_{Gi} + jQ_{Gi}$ ได้ด้วยแหล่งกำเนิดที่จ่ายกำลังจริงขนาดคงที่ด้วยขนาดแรงดันคงที่ แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีลักษณะดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.2.1.2 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า

เราสามารถแทนหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนแบบปกติด้วย series admittance (y_i) และสามารถแทนหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนแบบ off-nominal (Off-nominal turn ratio) ได้โดยพิจารณาด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าเชิงอุดมคติที่มีอัตราส่วนของแทปเป็น a ต่อกันพร้อมกับแอดมิตแตนซ์ดังแสดงในรูปที่ 2.4

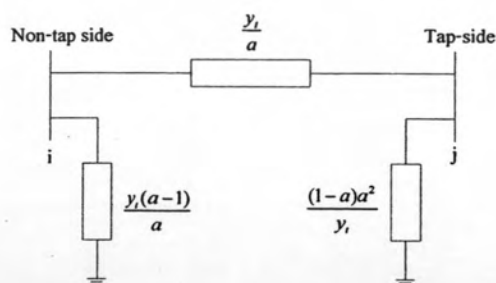


รูปที่ 2.4 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนแบบ off-nominal

สมการบัสแอดมิตแตนซ์สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้างกล่าวแสดงได้ดัง (2.1)

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_i & -\frac{y_i}{a} \\ -\frac{y_i}{a} & \frac{y_i}{|a|^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

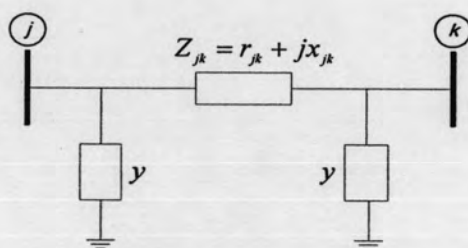
ในกรณีที่ a เป็นจำนวนจริง วงจรสมมูลแบบ π ของหม้อแปลงแบบ off-nominal จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลแบบ π ของหม้อแปลงแบบ off-nominal

2.2.1.3 แบบจำลองของสายส่งไฟฟ้า

สายส่งไฟฟ้าสามารถแทนได้ด้วยแบบจำลองสมมูลแบบ π ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) เท่ากับ $z_{jk} = r_{jk} + jx_{jk}$ และค่าชัณฑ์แอดมิตแตนซ์ (Shunt Admittance) เท่ากับ $y = g + jb$ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แบบจำลองของสายส่งไฟฟ้า

2.2.2 สมการแสดงคุณลักษณะของระบบไฟฟ้ากำลัง

โดยทั่วไป ความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตำแหน่งต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลังและกระแสที่ฉีดเข้าสู่ที่ตำแหน่งนั้นๆสามารถถูกอธิบายด้วย สมการปม (Node Equation) บัสแอดมิตแตนซ์ เมทริกซ์ (Y_{bus}) [12]

การคำนวณหา Y_{bus} ทำได้โดยอาศัยค่าประจำตัวของอุปกรณ์ หรือส่วนประกอบต่างๆ ซึ่งในทางวงจรไฟฟ้านั้นเราจะพิจารณาเป็นกิ่ง (Branch) ทั้งนี้ค่าประจำตัวเหล่านี้จะประกอบด้วย ค่าอิมพีแดนซ์ประจำตัว (primitive impedance, z) หรือแอดมิตแตนซ์ประจำตัว (primitive admittance, y) ของสายส่งหรือหม้อแปลงที่เชื่อมต่ออยู่ในระบบ

หลักการเบื้องต้นในการสร้าง Y_{bus} จากค่าประจำตัวของอุปกรณ์หรือส่วนประกอบแต่ละส่วน จะอาศัยสมมติฐานว่าส่วนประกอบต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลังไม่มีความเหนี่ยวนำร่วม

(Mutual inductance) ระหว่างกัน ซึ่งทำให้เราสามารถสร้าง Y_{bus} ได้โดยอาศัยวิธีการตรวจพิจารณา (Inspection) ซึ่งมีขั้นตอนในการพิจารณา 3 ขั้นตอนดังนี้

- 1) Y_{bus} เป็นเมตริกซ์สมมาตร
- 2) Y_{ii} (self-admittance) คือ ค่าในแนวทแยงมุมของเมตริกซ์ มีค่าเท่ากับผลรวมทั้งหมดของ primitive admittance ของส่วนประกอบที่ต่ออยู่กับโหนด i ทั้งหมด

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^n y_{ij} \quad ; j \neq i \quad (2.2)$$

$$y_{ij} = \frac{1}{z_{ij}} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}} \quad (2.3)$$

โดย z_{ij} คือค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างโหนด i และ j

- 3) Y_{ij} (mutual admittance) คือ ค่าที่อยู่นอกแนวทแยงมุมของเมตริกซ์มีค่าเท่ากับค่าลบของ primitive admittance ของส่วนประกอบทั้งหมดที่ต่ออยู่ระหว่างโหนด i และ j ถ้ามีส่วนประกอบทางไฟฟ้ามากกว่าหนึ่งส่วนประกอบที่ต่อขนานอยู่ระหว่าง 2 โหนดต้องจัดการรวมให้เรียบร้อยก่อนจะนำมาใส่ใน Y_{bus}

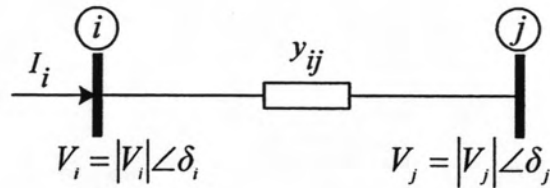
$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \quad (2.4)$$

จากวิธีการสร้าง Y_{bus} แบบตรวจพิจารณาสำหรับระบบ n บัส จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันประจำบัส (Node-Voltage equations) และกระแสที่ฉีดเข้าสู่โหนด (Node Injected Current) ดัง (2.5)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

2.2.3 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

พิจารณาค่าแห่งหนึ่งในระบบไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 2.7 บัสในระบบไฟฟ้ากำลัง

จากรูปที่ 2.7 กระแสที่ฉีดเข้าบัสที่ i นั้นเราสามารถเขียนในรูปของบัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ได้ดังนี้

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2.6)$$

ดังนั้นสมการของกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน (Power flow equation) สุทธิที่ไหลเข้าบัสที่ i คือ

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (2.7)$$

$$P_i - jQ_i = (|V_i| \angle -\delta_i) \left(\sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \right) \quad (2.8)$$

เมื่อแยกพิจารณาส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าจะได้

$$P_{i,calc} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.9)$$

$$Q_{i,calc} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.10)$$

กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่คำนวณได้ตาม (2.9) และ (2.10) จะเท่ากับกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ได้รับการจัดสรรใช้ที่แต่ละบัส ($P_{i,sch}, Q_{i,sch}$) นั่นคือ

$$P_{i,calc}(|V_i|, \delta_i) - P_{i,sch} = 0 \quad (2.11)$$

$$Q_{i,calc}(|V_i|, \delta_i) - Q_{i,sch} = 0 \quad (2.12)$$

จาก (2.11) และ (2.12) จะพบว่า ในการแก้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับบัสใดๆ โดยทั่วไปเราจะสนใจตัวแปรอยู่ 4 ตัว คือ ขนาดของแรงดันที่บัส ($|V|$) มุมเฟสของแรงดันที่บัส (δ) กำลังไฟฟ้าจริง (P) และ กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (Q) อย่างไรก็ตาม ที่แต่ละบัส เราจะมีสมการ

ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้ง 4 นี้อยู่เพียง 2 สมการเท่านั้น ดังนั้นเราจะต้องกำหนดค่าของตัวแปร 2 ตัวเพื่อที่จะคำนวณหาอีก 2 ตัวแปรที่เหลือได้ จากตัวแปรทั้ง 4 ดังกล่าวข้างต้น เราสามารถจำแนกประเภทของบัสได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

- 1) Slack bus or Reference bus เป็นบัสที่มีขนาดและมุมของแรงดันที่บัสมีค่าคงที่
- 2) Load bus เป็นบัสที่มีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าคงที่
- 3) Voltage-controlled bus เป็นบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่โดยกำลังจริงและขนาดของแรงดันที่บัสจะมีค่าคงที่

เราสามารถหาผลเฉลยของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้านี้ด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้มากที่สุด เนื่องจากมีคุณสมบัติการลู่ออกหาคำตอบที่รวดเร็วและจำนวนรอบของการทำซ้ำไม่ขึ้นอยู่กับการขนาดของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการจัดรูปแบบปัญหาดัง (2.13)

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_1^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{1,calc}^{(k)}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_{1,calc}^{(k)}}{\partial \delta_n} & \bigg| & \frac{\partial P_{1,calc}^{(k)}}{\partial |V_1|} & \dots & \frac{\partial P_{1,calc}^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \bigg| & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_{n,calc}^{(k)}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_{n,calc}^{(k)}}{\partial \delta_n} & \bigg| & \frac{\partial P_{n,calc}^{(k)}}{\partial |V_1|} & \dots & \frac{\partial P_{n,calc}^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \hline \frac{\partial Q_{1,calc}^{(k)}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_{1,calc}^{(k)}}{\partial \delta_n} & \bigg| & \frac{\partial Q_{1,calc}^{(k)}}{\partial |V_1|} & \dots & \frac{\partial Q_{1,calc}^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \bigg| & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_{n,calc}^{(k)}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_{n,calc}^{(k)}}{\partial \delta_n} & \bigg| & \frac{\partial Q_{n,calc}^{(k)}}{\partial |V_1|} & \dots & \frac{\partial Q_{n,calc}^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta V_1^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta V_n^{(k)} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

จากเมตริกซ์ดังกล่าวเราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสัญลักษณ์อย่างย่อได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

โดย $J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}$ คือ เมตริกซ์จาโคเบียน (Jacobian Matrix) ซึ่งสมาชิกในเมตริกซ์

จาโคเบียนก็คืออนุพันธ์ย่อยของ (2.11) และ (2.12) ซึ่งสามารถพิจารณาได้ดังนี้

สมาชิกในแนวทแยงมุมและนอกทแยงมุมของ J_1

$$\frac{\partial P_{i,calc}}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial P_{i,calc}}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) ; j \neq i \quad (2.16)$$

สมาชิกในแนวทแยงมุมและนอกทแยงมุมของ J_2

$$\frac{\partial P_{i,calc}}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial P_{i,calc}}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) ; j \neq i \quad (2.18)$$

สมาชิกในแนวทแยงมุมและนอกทแยงมุมของ J_3

$$\frac{\partial Q_{i,calc}}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial Q_{i,calc}}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) ; j \neq i \quad (2.20)$$

สมาชิกในแนวทแยงมุมและนอกทแยงมุมของ J_4

$$\frac{\partial Q_{i,calc}}{\partial |V_i|} = -2|V_i| |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} - \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial Q_{i,calc}}{\partial |V_j|} = -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) ; j \neq i \quad (2.22)$$

โดย $\Delta P_i^{(k)}$ และ $\Delta Q_i^{(k)}$ (Power mismatch) มีค่าดัง (2.23) และ (2.24) ตามลำดับ

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_{i,calc}^{(k)} \quad (2.23)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_{i,calc}^{(k)} \quad (2.24)$$

และค่าแรงดันบัลต์ที่ประมาณขึ้นใหม่โดยวิธีนิวตัน-ราฟสัน คือ

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta|V_i^{(k)}| \quad (2.25)$$

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta\delta_i^{(k)} \quad (2.26)$$

กระบวนการจะดำเนินต่อไปเรื่อยๆจนกระทั่งค่า $\Delta P_i^{(k)}$ และ $\Delta Q_i^{(k)}$ (Power mismatch) มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ $|\Delta P_i^{(k)}| \leq \varepsilon_1, |\Delta Q_i^{(k)}| \leq \varepsilon_2$