



บทที่ 3

ทฤษฎีการวิเคราะห์นิวตันราฟสันโหลดไฟลว์ โดยวิธีแยกเป็นส่วนย่อย

การวิเคราะห์โหลดไฟลว์ในระบบไฟฟ้ากำลัง เป็นการวิเคราะห์เพื่อศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง หม้อแปลงไฟฟ้าและแรงดันที่บัสต่าง ๆ ผลจากการวิเคราะห์โหลดไฟลว์จะใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง และใช้เป็นข้อมูลสำหรับการวางแผนขยายระบบ

ในอดีตการวิเคราะห์โหลดไฟลว์ใช้แบบจำลองจากระบบไฟฟ้ากำลัง (Network Analyzer) ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันต่อกับองค์ประกอบ (Element) ต่าง ๆ เช่น อิมพีแดนซ์ (Impedance) ฯลฯ การวิเคราะห์โดยวิธีนี้มีความยุ่งยากด้านการอ่านค่าต่าง ๆ และเสียเวลามากในการทำระบบจำลอง โดยเฉพาะเมื่อระบบไฟฟ้ากำลังมีขนาดใหญ่ขึ้น ในปัจจุบันการวิเคราะห์โหลดไฟลว์ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์นี้จะทำการแทนระบบไฟฟ้ากำลังด้วยสมการคณิตศาสตร์

3.1 องค์ประกอบของระบบไฟฟ้ากำลัง (3.9)

เนื่องจากการวิเคราะห์โหลดไฟลว์โดยทั่วไปเป็นการวิเคราะห์ระบบในสภาวะทำงานปกติ ซึ่งในสภาวะนี้ระบบจะสมดุลทั้ง 3 เฟส ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า 3 เฟสด้วยวงจรสมมูลย์ 1 เฟส ซึ่งอาจแทนด้วยแผนภูมิเส้นเดี่ยว (Single Line Diagram) ในแผนภูมิเส้นเดี่ยวจะบอกรายละเอียดต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า เช่น ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง ค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือโหลด ค่าแรงดันที่บัส ฯลฯ โดยที่การวิเคราะห์โหลดไฟลว์มีวิธีการแทนองค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนี้

3.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) (3)

ในการวิเคราะห์โหลดไฟลว์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่จ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าไปในบัสซึ่งจะถือเป็นค่าบวก (+) โดยทั่วไปกำลังไฟฟ้าจริง (Real Power) จะคงที่ ยกเว้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อกับสลัคบัส (Slack Bus) ส่วนกำลังไฟฟ้านี้ออกติฟ (Reactive Power) จะเปลี่ยนแปลงได้เพื่อควบคุมแรงดันที่บัสให้ได้ตามกำหนด แต่ทั้งนี้

ต้องไม่เกินค่าขีดจำกัดสูงสุด (Maximum Available Vars) หรือน้อยกว่าขีดจำกัดต่ำสุด (Minimum Available Vars)

3.1.2 ซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ (Synchronous Condenser)

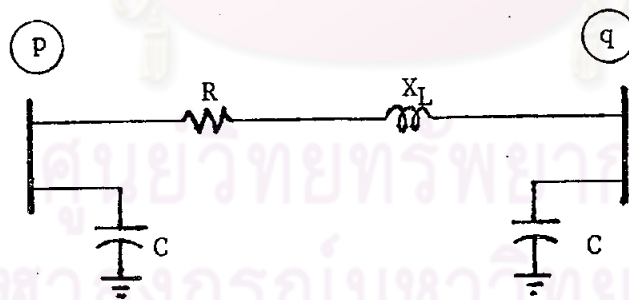
ซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ถือเป็นแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่กำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับศูนย์ และมีกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เปลี่ยนแปลงได้เพื่อควบคุมแรงดันที่บัส

3.1.3 โหลด (Load) ⁽³⁾

โหลดเป็นอุปกรณ์ที่รับกำลังไฟฟ้าออกจากบัส ซึ่งจะถือเป็นค่าลบ (-) โดยมีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟคงที่ในการวิเคราะห์โหลดโพลาร์

3.1.4 สายส่งไฟฟ้า (Transmission Line) ⁽³⁾

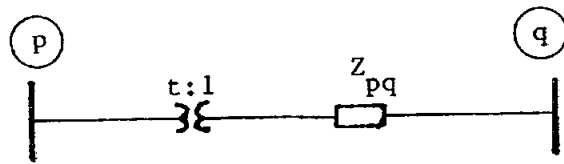
สายส่งไฟฟ้าที่เชื่อมระหว่างบัสสามารถแทนได้ด้วยวงจรสมมูลพาย (Equivalent Pi Circuit) ซึ่งประกอบด้วยความต้านทานต่ออนุกรมกับอินดักทีฟ รีแอกแตนซ์ (Inductive Reactance) เชื่อมอยู่ระหว่างบัส 2 บัสที่สายส่งไฟฟ้านี้เชื่อมอยู่ และมีชั๊นท์คาปาซิแตนซ์ (Shunt Capacitance) ซึ่งมีค่าซิสเซปแตนซ์ (Susceptance) เท่ากับครึ่งหนึ่งของชั๊นท์คาปาซิแตนซ์ของสายส่งทั้งหมดตลอดสายต่ออยู่ที่บัสแต่ละบัส



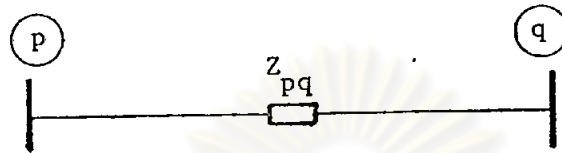
รูปที่ 3.1 แสดงวงจรสมมูลพายที่ใช้แทนสายส่ง

3.1.5 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) ^(3,9)

หม้อแปลงที่มีค่าอัตราส่วนจำนวนรอบ (Turn Ratio) เป็นปกติ (Nominal) สามารถแทนได้ด้วยอิมพีแดนซ์ หรือแอดมิทแตนซ์ (Admittance) ของหม้อแปลงเชื่อมอยู่ระหว่างบัสทั้งสอง

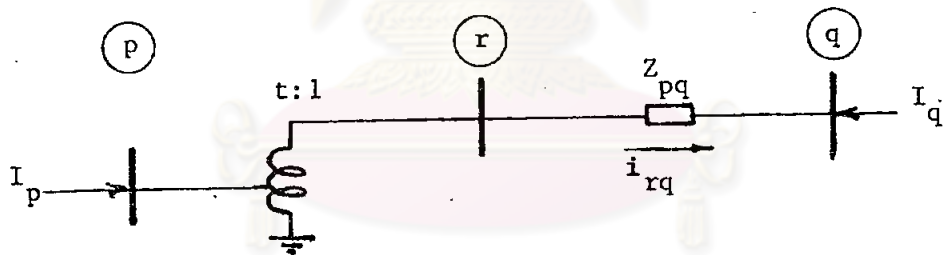


รูปที่ 3.2 ก หม้อแปลงที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบเป็นปกติ มีค่า $t = 1$

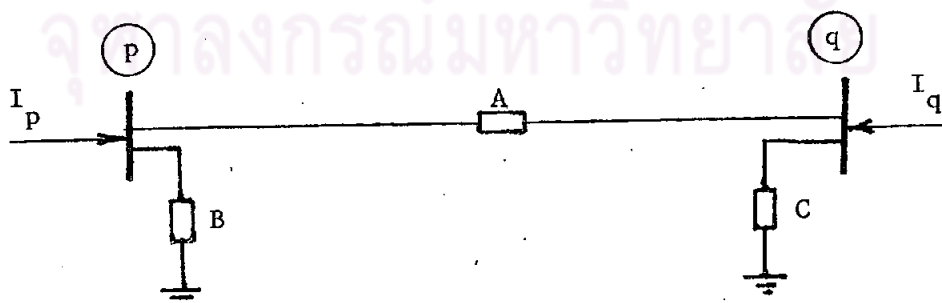


รูปที่ 3.2 ข วงจรสมมูลของหม้อแปลงที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบเป็นปกติ

สำหรับหม้อแปลงซึ่งมีค่าอัตราส่วนจำนวนรอบผิดจากปกติ (Off-Nominal Turn Ratio) แทนได้ด้วยอิมพีแดนซ์ หรือ แอดมิตแตนซ์ค่อนุกรมกับหม้อแปลงอุดมคติ (Ideal Transformer) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ค ในการวิเคราะห์ไหลลวดไฟลว์ จะเปลี่ยนอิมพีแดนซ์ และหม้อแปลงอุดมคติให้อยู่ในรูปวงจรสมมูลย์หาย ดังรูปที่ 3.2 ง.



รูปที่ 3.2 ค แสดงหม้อแปลงอุดมคติค่อนุกรมกับอิมพีแดนซ์ ใช้แทนหม้อแปลงที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบผิดจากปกติ



รูปที่ 3.2 ง แสดงวงจรสมมูลย์หาย

ค่า A, B และ C ในวงจรสมมูลย์พายจากรูปที่ 3.2 ง สามารถหาได้ดังนี้

$$A = \frac{y_{pq}}{t} \quad (3.1)$$

$$B = \frac{1}{t} \left(\frac{1}{t} - 1 \right) y_{pq} \quad (3.2)$$

$$C = \left(1 - \frac{1}{t} \right) y_{pq} \quad (3.3)$$

3.1.6 ชั้นทอิลิเมนต์ (Shunt Element) (3)

ชั้นทอิลิเมนต์ จะทำหน้าที่เป็นโหลดที่มีอิมพีแดนซ์คงที่ ชั้นทอิลิเมนต์ที่ใช้งานกันในระบบไฟฟ้ากำลังคือ คาปาซิเตอร์ (Capacitor) และรีแอคเตอร์ (Reactor) ในระบบไฟฟ้ากำลังมักจะมีการติดตั้งคาปาซิเตอร์ที่สถานีไฟฟ้าย่อยปลายทาง ทั้งนี้เพื่อยกระดับแรงดันปลายทางและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งลง คาปาซิเตอร์นี้จะทำหน้าที่เหมือนกับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคตีฟให้กับบัส หรือในบางจุดจะมีการติดตั้งรีแอคเตอร์เพื่อลดระดับแรงดันที่จุดนั้นเสมือนกับเป็นตัวรับกำลังไฟฟ้ารีแอคตีฟ ชั้นทอิลิเมนต์ต่าง ๆ เหล่านี้สามารถแทนได้ด้วยอิมพีแดนซ์ที่มีค่าคงที่ต่อขนานกับบัส

3.1.7 ชนิดของบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง (3)

บัสต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแบ่งเป็น 3 ชนิด ดังนี้

(1) บัสชนิดที่ 1 (Bus Type 1) หรือโหลดบัส (Load Bus) หรือบัส PQ บัสนี้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคตีฟมีค่าคงที่ ซึ่งทราบค่า ส่วนขนาดและมุมของแรงดันบัสไม่ทราบค่า

(2) บัสชนิดที่ 2 (Bus Type 2) หรือบัสควบคุมแรงดัน (Voltage Controlled Bus) หรือบัส PV บัสนี้กำหนดให้ขนาดของแรงดันบัสและกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่บัสมีค่าคงที่ ส่วนมุมของแรงดัน และกำลังไฟฟ้ารีแอคตีฟที่ไหลเข้าสู่บัสไม่ทราบค่า

(3) บัสชนิดที่ 3 (Bus Type 3) หรือสลैคบัส (Slack Bus) หรือบัสอ้างอิง (Reference Bus) บัสนี้กำหนดให้ขนาดและมุมของแรงดันบัสมีค่าคงที่ ส่วนกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอคตีฟที่ไหลเข้าสู่บัสไม่ทราบค่า



3.2 สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow Equation) (3.9)

สมการซึ่งบรรยายการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง อาจเขียนในระบบอ้างอิงบัส (Bus Frame of Reference) ในรูปแอดมิตแตนซ์ คือ

$$I_{BUS} = Y_{BUS} E_{BUS} \quad (3.4)$$

โดยที่ I_{BUS} คือ เวกเตอร์ของกระแสที่ไหลเข้าสู่บัส
 E_{BUS} คือ เวกเตอร์ของแรงดันบัสเทียบกับกราวนด์
 Y_{BUS} คือ บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์

กำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่บัส p คือ

$$P_p + jQ_p = E_p I_p^*$$

$$\text{หรือ } P_p - jQ_p = E_p^* I_p \quad (3.5)$$

โดย P_p คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่บัส p
 Q_p คือ กำลังไฟฟ้าร์แอดคิฟที่ไหลเข้าสู่บัส p
 E_p คือ แรงดันที่บัส p เทียบกับกราวนด์
 I_p คือ กระแสที่ไหลเข้าสู่บัส p

จากสมการ (3.4) สามารถกระจายเพื่อเขียนสมการของ I_p ได้ดังนี้คือ

$$I_p = \sum_{q=1}^n y_{pq} E_q \quad (3.6)$$

n คือ จำนวนบัสทั้งหมดของระบบไฟฟ้ากำลัง

y_{pq} คือ สมาชิกตำแหน่ง (p,q) ของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์

แทนค่า I_p ในสมการ (3.5)

$$P_p - jQ_p = E_p^* \sum_{q=1}^n y_{pq} E_q \quad (3.7)$$

สมการ (3.7) เรียกว่าสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow Equation) ซึ่งมีลักษณะไม่เชิงเส้น ดังนั้นการวิเคราะห์สมการนี้จึงต้องใช้วิธีอิตเอร์ทีฟ (Iterative Method) ซึ่งมีหลายแบบ เช่น แบบเกาส์ (Gauss Method) แบบเกาส์ไซเดิล (Gauss-Seidel Method) และแบบนิวตันราฟสัน^(3.9) (Newton-Raphson Method) ซึ่งแบบนิวตันราฟสัน เป็นแบบที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์โหลดโวลต์มากที่สุด

จากสมการ (3.7) สามารถเขียนในรูปพิกัดเชิงขั้ว (Polar Coordinate) ได้ดังนี้

$$\text{ให้ } E_p = |E_p| e^{j\delta_p}$$

$$\text{และ } y_{pq} = |y_{pq}| e^{-j\theta_{pq}}$$

แทนค่า E_p, y_{pq} ในสมการ (3.7)

$$P_p - jQ_p = \sum_{q=1}^n |E_p E_q y_{pq}| e^{-j(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q)}$$

ดังนั้น

$$P_p = \sum_{q=1}^n |E_p E_q y_{pq}| \cos(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \quad (3.8)$$

$$Q_p = \sum_{q=1}^n |E_p E_q y_{pq}| \sin(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q)$$

3.3 การวิเคราะห์นิวตันราฟสัน โหลดโวลต์

การวิเคราะห์โหลดโวลต์แบบนิวตันราฟสันใช้วิธีเปลี่ยนแปลงสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าให้อยู่ในลักษณะเชิงเส้น ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |E| \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

โดยที่ ΔP คือ ค่าความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าจริงที่โหลดเข้าบัส ซึ่งคำนวณได้จากค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่กำหนด ลบด้วยค่ากำลังไฟฟ้าจริง ที่คำนวณได้นั้น คือ

$$\Delta P = P_{\text{กำหนด}} - P_{\text{คำนวณ}} \quad (3.10)$$

ΔQ คือ ค่าความแตกต่างของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลเข้าบัสซึ่งคำนวณได้จากค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่กำหนดลบด้วยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่คำนวณได้ นั่นคือ

$$\Delta Q = Q_{\text{กำหนด}} - Q_{\text{คำนวณ}} \quad (3.11)$$

J_1, J_2, J_3, J_4 คือสมาชิกของจาโคเบียนเมตริกซ์ (Jacobian Matrix) ซึ่งคำนวณได้จาก^(๑)

J_1 : สมาชิกในตำแหน่งนอกแนวทแยงมุม (Off Diagonal Elements)

$$\frac{\partial P_p}{\partial \delta_q} = \left| E_p E_q y_{pq} \right| \sin (\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \quad q \neq p \quad (3.12)$$

สมาชิกในตำแหน่งแนวทแยงมุม (Diagonal Elements)

$$\frac{\partial P_p}{\partial \delta_p} = - \sum_{q=1}^n \left| E_p E_q y_{pq} \right| \sin (\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \quad (3.13)$$

$q \neq p$

J_2 : สมาชิกในตำแหน่งนอกแนวทแยงมุม

$$\frac{\partial P}{\partial |E_q|} = \left| E_p y_{pq} \right| \cos (\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \quad q \neq p \quad (3.14)$$

สมาชิกในตำแหน่งแนวทแยงมุม

$$\frac{\partial P_p}{\partial |E_p|} = 2 \left| E_p y_{pp} \right| \cos \theta_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n \left| E_q y_{pq} \right| \cos (\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \quad (3.15)$$

J_3 : สมาชิกในตำแหน่งนอกแนวทแยงมุม

$$\frac{\partial Q_p}{\partial \delta_q} = - \left| E_p E_q y_{pq} \right| \cos (\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \quad q \neq p \quad (3.16)$$

สมาชิกในตำแหน่งแนวทแยงมุม

$$\frac{\partial Q_p}{\partial \delta_p} = \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n \left| E_p E_q y_{pq} \right| \cos (\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \quad (3.17)$$

J_4 : สมาชิกในตำแหน่งนอกแนวทะแยงมุม

$$\frac{\partial Q_p}{\partial |E_q|} = |E_p y_{pq}| \sin(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \quad q \neq p \quad (3.18)$$

สมาชิกในตำแหน่งแนวทะแยงมุม

$$\frac{\partial Q_p}{\partial |E_p|} = 2 |E_p y_{pp}| \sin \theta_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n |E_q y_{pq}| \sin(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \quad (3.19)$$

$\Delta \delta$ คือ ค่าของมุมที่เปลี่ยนแปลง ในการทำอิเทอเรตีฟ

$\Delta |E|$ คือ ค่าของขนาดแรงดันที่เปลี่ยนแปลง ในการทำอิเทอเรตีฟ

การวิเคราะห์โหลดโพลว์แบบนิวตันราฟสันสามารถสรุปได้ ดังนี้

3.5.1 จำนวน P_p, Q_p จากค่าแรงดันบัสที่สมมุติในตอนเริ่มต้น หรือจากค่าแรงดันบัสที่คำนวณได้ในการอิเทอเรตีฟ ครั้งที่ผ่านมา

3.5.2 จำนวน $\Delta P, \Delta Q$ ถ้าค่าความแตกต่างนี้น้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ (Tolerance) แสดงว่าค่าแรงดันบัสซึ่งใช้จำนวน P_p, Q_p นี้คือ ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลว์

3.5.3 ถ้า $\Delta P, \Delta Q$ มีค่ามากกว่าค่าที่ยอมรับได้ จะต้องคำนวณ $\Delta \delta, \Delta |E|$ เพื่อคำนวณแรงดันบัสค่าใหม่จาก

$$\delta^{k+1} = \delta^k + \Delta \delta^k \quad (3.20)$$

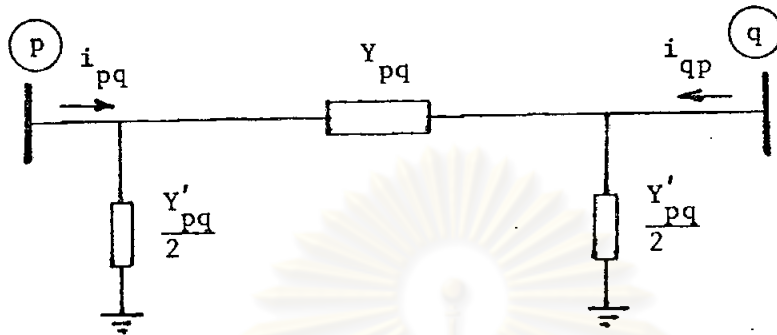
$$|E|^{k+1} = |E|^k + \Delta |E|^k$$

ซึ่ง k คือหมายเลขอิเทอเรตีฟ

3.5.4 กลับไปทำขั้นตอน (3.5.1) ใหม่จนกระทั่งได้ผลลัพธ์

3.4 กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งไฟฟ้า (3.9)

พิจารณาสายส่งไฟฟ้าที่เชื่อมระหว่างบัส p และบัส q ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงวงจรสมมูลย์ของสายส่ง

กระแสที่ไหลจากบัส p ไปบัส q ให้เป็น i_{pq} หาได้จาก

$$i_{pq} = (E_p - E_q) Y_{pq} + E_p \frac{Y'_{pq}}{2} \quad (3.21)$$

โดยที่ Y_{pq} คือ แอดมิทแตนซ์ของสายส่ง (Line Admittance)

Y'_{pq} คือ ค่าลายน้ชาร์จซึ่งของสายส่ง (Line Charging)

ดังนั้น กำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบัส p ไปยังบัส q จะหาได้จาก

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

หรือ

$$P_{pq} - jQ_{pq} = E_p^* (E_p - E_q) Y_{pq} + E_p^* E_p \frac{Y'_{pq}}{2} \quad (3.22)$$

ในทำนองเดียวกันกำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบัส q ไปยังบัส p จะหาได้จาก

$$P_{qp} - jQ_{qp} = E_q^* (E_q - E_p) Y_{pq} + E_q^* E_q \frac{Y'_{pq}}{2} \quad (3.23)$$

3.5 การวิเคราะห์นิวตันกราฟเส้นโหลดโพลว์โดยวิธีแยกเป็นส่วนย่อย (1,4,6,7,8)

การวิเคราะห์นิวตันกราฟเส้นโหลดโพลว์ โดยวิธีแยกเป็นส่วนย่อยนั้น ทำได้โดยการแบ่งระบบไฟฟ้ากำลังทั้งหมดออกเป็นระบบย่อยทั้งหมด N ระบบ หลังจากนั้นจะวิเคราะห์โหลดโพลว์ในแต่ละระบบย่อยด้วยวิธีนิวตันกราฟเส้น ซึ่งขั้นตอนของการวิเคราะห์ในแต่ละระบบย่อยจะเหมือนกันทุกประการกับขั้นตอนการวิเคราะห์นิวตันกราฟเส้นโหลดโพลว์ที่กล่าวมาในหัวข้อ 3.3 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์โหลดโพลว์ในแต่ละระบบย่อย จะนำมาใช้คำนวณหาค่า $E_T^{(0)}$ ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของแต่ละระบบย่อย ซึ่งขั้นตอนนี้คือขั้นตอนที่ 1 ของการใช้วิธีไดอะคอปติกวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1 หลังจากนั้นจะคำนวณหาค่า $E_T^{(1)}$ ซึ่งเป็นส่วนแรงดันบัสที่เกิดขึ้น เนื่องจากผลของการแบ่งระบบไฟฟ้ากำลังออกเป็นระบบย่อย โดยใช้ขั้นตอนที่ 2,3,4 และ 5 ของวิธีการไดอะคอปติก ในขั้นตอนที่ 6 ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายของวิธีการไดอะคอปติกจะทำการรวมผลลัพธ์ $E_T^{(0)}$ กับ $E_T^{(1)}$ ก็จะได้แรงดันบัสที่ต้องการ

ขั้นตอนโดยละเอียดของการวิเคราะห์นิวตันกราฟเส้นโหลดโพลว์โดยวิธีแยกเป็นส่วนย่อย มีดังนี้คือ

3.5.1 สมมุติค่าเริ่มต้นของแรงดันบัส สำหรับบัสที่มีการควบคุมแรงดัน ค่าเริ่มต้นก็คือค่าแรงดันที่กำหนดให้

3.5.2 เริ่มต้นทำการอิเทอเรทีฟ โดยมีลำดับขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

3.5.2.1 คำนวณกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่บัสแต่ละบัสในแต่ละระบบย่อย โดยที่ กำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่บัสในระบบย่อยนั้น จะประกอบด้วยกำลังไฟฟ้า 2 ส่วน คือส่วนหนึ่งเกิดจากกระแสที่ไหลในคัทลายนี่ ซึ่งคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$P_p^{tie} + jQ_p^{tie} = E_p \left[\sum_{pq} I_{pq}^{tie} \right]^* \quad (3.24)$$

โดยที่ P_p^{tie} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่บัส p อันเนื่องมาจากกระแสในคัทลายนี่

Q_p^{tie} คือ กำลังไฟฟ้าร์แอกตีฟที่ไหลเข้าสู่บัส p อันเนื่องมาจากกระแสในคัทลายนี่

I_{pq}^{tie} คือ กระแสที่ไหลในคัทลายนี่ โดยไหลจากบัส p ไปยังบัส q ซึ่งคำนวณได้จากสมการ ดังนี้



$$I_{pq}^{tie} = [E_p - E_q] Y_{pq}^{tie} \tag{3.25}$$

โดยที่ Y_{pq}^{tie} คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ของคัทลายนที่ค่ออยู่ระหว่างบัส p และบัส q

สำหรับกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่บัสอีกส่วนหนึ่ง เกิดจากแหล่งจ่ายกระแสในแต่ละระบบย่อยนั้นเอง ซึ่งกำลังไฟฟ้าส่วนนี้คำนวณได้จากสมการของกำลังไฟฟ้า

$$P_p = \sum_{q=1}^n \left| E_p E_q Y_{pq} \right| \cos (\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \tag{3.26}$$

$$Q_p = \sum_{q=1}^n \left| E_p E_q Y_{pq} \right| \sin (\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q)$$

โดยที่ n คือ จำนวนบัสในแต่ละระบบย่อยนั้น

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่บัส ซึ่งได้จากการคำนวณก็คือ

$$P_{p, calculate} = P_p + P_p^{tie} \tag{3.27}$$

$$Q_{p, calculate} = Q_p + Q_p^{tie}$$

3.5.2.2 คำนวณค่าความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่บัส โดยใช้

สมการ

$$\Delta P_p = P_{p, scheduled} - P_p - P_p^{tie} \tag{3.28}$$

$$\Delta Q_p = Q_{p, scheduled} - Q_p - Q_p^{tie}$$

3.5.2.3 เปรียบเทียบค่าความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่บัส ถ้า

หากมีค่าน้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ แสดงว่าค่าแรงดันที่สมมุติขึ้นและใช้คำนวณกำลังไฟฟ้าในขั้น

ตอนที่ 3.5.2.1 คือ ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โหลดไหลในระบบย่อย และข้ามไปทำ

ขั้นตอนต่อไป คือคำนวณค่า $E_T^{(0)}$ ซึ่งถือว่าเป็นผลลัพธ์ของระบบย่อยโดยวิธีไดอะคอปติก

แต่ถ้าค่าความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่บัส มีค่ามากกว่าค่าที่ยอมรับได้ แสดงว่า

การวิเคราะห์โหลดไหลในระบบย่อยดังกล่าว ยังไม่ได้ผลลัพธ์ตามต้องการ ให้วิเคราะห์ใน

ขั้นตอนต่าง ๆ ต่อไป

3.5.2.4 สร้างจาโคเบียนเมตริกซ์ของระบบย่อยจากค่าแรงดันที่บัสต่าง ๆ กับค่าแอดมิตแตนซ์ของสายส่ง หรือหม้อแปลงในระบบย่อย และจะรวมค่าแอดมิตแตนซ์ของคัทลายนส์เข้าไปด้วย โดยที่ค่าสมาชิกต่าง ๆ J_1 , J_2 , J_3 และ J_4 ของจาโคเบียนเมตริกซ์สามารถคำนวณหาได้ดังนี้

J_1 : สมาชิกในตำแหน่ง นอกแนวทแยงมุม

$$\frac{\partial P_p}{\partial \delta_q} = \left| E_p E_q y_{pq} \right| \sin(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \quad q \neq p \quad (3.29)$$

สมาชิกในตำแหน่ง ในแนวทแยงมุม

$$\frac{\partial P_p}{\partial \delta_p} = -\sum_{q=1}^N \left| E_p E_q y_{pq} \right| \sin(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) - \sum \left| E_p E_t Y_{pt} \right| \sin(\theta_{pt} + \delta_p - \delta_t) \quad q \neq p \quad (3.30)$$

โดยที่ Y_{pt} คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ของคัทลายนส์ที่อยู่ระหว่างบัส p และบัส t

$$Y_{pt} = \left| Y_{pt} \right| e^{-j\theta_{pt}} \quad (3.31)$$

J_2 : สมาชิกในตำแหน่ง นอกแนวทแยงมุม

$$\frac{\partial P_p}{\partial |E_q|} = \left| E_p y_{pq} \right| \cos(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \quad q \neq p \quad (3.32)$$

สมาชิกในตำแหน่ง ในแนวทแยงมุม

$$\frac{\partial P_p}{\partial |E_p|} = 2 \left| E_p y_{pp} \right| \cos \theta_{pp} + \sum_{q=1}^N \left| E_q y_{pq} \right| \cos(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) + \sum \left| E_t Y_{pt} \right| \cos(\theta_{pt} + \delta_p - \delta_t) \quad (3.33)$$

J_3 : สมาชิกในตำแหน่ง นอกแนวทแยงมุม

$$\frac{\partial Q_p}{\partial \delta_q} = - \left| E_p E_q y_{pq} \right| \cos(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \quad q \neq p \quad (3.34)$$

สมาชิกในตำแหน่ง ในแนวทะแยงมุม

$$\frac{\partial Q_p}{\partial \delta_p} = \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^N |E_p E_q y_{pq}| \cos(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) + \sum |E_p E_t Y_{pt}| \cos(\theta_{pt} + \delta_p - \delta_t) \quad (3.35)$$

J_4 : สมาชิกในตำแหน่ง นอกแนวทะแยงมุม

$$\frac{\partial Q_p}{\partial |E_q|} = |E_p y_{pq}| \sin(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \quad q \neq p \quad (3.36)$$

สมาชิกในตำแหน่ง ในแนวทะแยงมุม

$$\frac{\partial Q_p}{\partial |E_p|} = 2 |E_p y_{pp}| \sin \theta_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^N |E_q y_{pq}| \sin(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) + \sum |E_t Y_{pt}| \sin(\theta_{pt} + \delta_p - \delta_t) \quad (3.37)$$

จะเห็นว่า ค่าแอดมิตแตนซ์ของคัทลายนั้น จะมีผลเฉพาะค่าสมาชิกในตำแหน่ง ในแนวทะแยงมุมของจาโคเบียนเมตริกซ์ เท่านั้น

3.5.2.5 หลังจากสร้างจาโคเบียนเมตริกซ์เรียบร้อยแล้ว แก๊สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ถูกแปลงให้เป็นสมการเชิงเส้นโดยวิธีของนิวตันราฟสัน ผลที่ได้ก็คือค่าความแตกต่างของมุมและขนาดของแรงดันบัส $\Delta \delta$, $\Delta |E|$ ซึ่งจะนำไปปรับปรุงค่าแรงดันบัสค่าใหม่ ที่จะนำไปใช้คำนวณในการทำอิเทอเรตีฟรอบต่อไป

3.5.2.6 คำนวณค่าแรงดันบัสค่าใหม่ที่จะใช้สำหรับคำนวณในรอบต่อไป จากสมการ

$$\delta_p^{k+1} = \delta_p^k + \Delta \delta_p^k \quad (3.38)$$

$$|E_p|^{k+1} = |E_p|^k + \Delta |E_p|^k$$

โดยที่ k คือ หมายเลขจำนวนรอบของการทำอิเทอเรตีฟ

3.5.2.7 หลังจากทำขั้นตอน 3.5.2.6 เรียบร้อยแล้ว จะได้ค่าแรงดันบัสต่าง ๆ ในระบบย่อยนั้น แต่ค่าแรงดันบัสดังกล่าวยังไม่ถือว่าเป็นผลลัพธ์ของระบบย่อยโดยวิธีไดอาคอปติก ทั้งนี้เพราะว่าค่าแรงดันบัสดังกล่าว ได้คำนวณมาโดยรวมผลของกระแสในคัทลายน์เข้าไปด้วย ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของระบบย่อยโดยวิธีไดอาคอปติก ให้หักผลของแรงดันบัสดังกล่าวด้วยค่าของแรงดันบัสที่เกิดจากกระแสในคัทลายน์ นั่นคือ

$$E_T^{(0)} = E_T - Z_{TT} I_T^{tie} \quad (3.39)$$

โดยที่ E_T คือค่าแรงดันบัสที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 3.5.2.6

และ $Z_{TT} I_T^{tie}$ คือค่าแรงดันบัสที่เกิดจากกระแสในคัทลายน์

ซึ่งขั้นตอนนี้ก็คือนขั้นตอนที่ 1 ของวิธีการไดอาคอปติกที่ใช้วิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1

หลังจากนั้นจะต้องวิเคราะห์ให้ครบทุกระบบย่อย ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ $E_T^{(0)}$ ของทุกระบบย่อย

3.5.2.8 คำนวณขั้นตอนที่ 2 ของวิธีการไดอาคอปติก คือคำนวณแรงดันที่คร่อมคัทลายน์

$$E_{L_{pq}}^{(0)} = E_T^{(0)}_p - E_T^{(0)}_q \quad (3.40)$$

3.5.2.9 คำนวณขั้นตอนที่ 3 ของวิธีไดอาคอปติก คือคำนวณกระแสที่ไหลในคัทลายน์

$$i_c = Z_4^{-1} E_{L_{pq}}^{(0)} \quad (3.41)$$

3.5.2.10 คำนวณขั้นตอนที่ 4 ของวิธีไดอาคอปติก คือ เปลี่ยนกระแสที่ไหลในคัทลายน์ i_c เป็นกระแสที่ไหลเข้าสู่บัสในระบบย่อย I_T'

3.5.2.11 คำนวณขั้นตอนที่ 5 ของวิธีไดอาคอปติก คือคำนวณแรงดันบัสที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสในคัทลายน์

$$E_T^{(1)} = Z_{TT} I_T' \quad (3.42)$$

3.5.2.12 จำนวนชั้นตอนที่ 6 ของวิธีไดอะคอปติก คือรวมผลลัพธ์ของแรงดันบัสเข้าด้วยกัน นั่นคือ

$$E_T = E_T^{(0)} + E_T^{(1)} \quad (3.43)$$

3.5.2.13 ทำการอิเทอเรทีฟในรอบถัดไป โดยกลับไปเริ่มต้นที่ขั้นตอน

3.5.2.1 ใหม่จนกระทั่งได้ผลลัพธ์ตามต้องการ

3.5.3 จำนวนกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง และหม้อแปลงไฟฟ้า แล้วคำนวณกำลังผลิตที่สแลคคัส (Slack Bus)

สำหรับรายละเอียดของไฟลว์ชาร์ดการวิเคราะห์นิวตันราฟสันโหลดไฟลว์ โดยวิธีแยกเป็นส่วนย่อยนี้ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.9

ผลจากการแบ่งระบบไฟฟ้ากำลังออกเป็นระบบย่อย จะทำให้จาโคเบียนเมตริกซ์ของระบบไฟฟ้ากำลังทั้งหมดอยู่ในลักษณะของกลุ่มเมตริกซ์แนวทแยงมุม ดังแสดงในสมการ

$$J = \begin{array}{c} \begin{array}{c} A \\ B \\ \vdots \\ N \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{c} A \\ B \\ \dots \\ N \end{array} \end{array} \begin{array}{c} J_A \\ J_B \\ \dots \\ J_N \end{array} \end{array} \quad (3.44)$$

โดยที่ J_A, J_B, \dots, J_N จาโคเบียนเมตริกซ์ของระบบย่อย A, B, \dots, N ตามลำดับ

จากสมการ (3.44) จะเห็นว่า จำนวนหน่วยความจำที่ใช้เก็บข้อมูลของจาโคเบียนเมตริกซ์จะลดลงไป เพราะว่าจะเก็บเฉพาะ J_A, J_B, \dots, J_N เท่านั้น และเนื่องจากการวิเคราะห์นิวตันราฟสันโหลดไฟลว์ในแต่ละระบบย่อย จะวิเคราะห์โดยใช้หน่วยความจำร่วมกัน นั่นคือ J_A, J_B, \dots, J_N จะเก็บในหน่วยความจำร่วมกัน ดังนั้นการวิเคราะห์นิวตันราฟสัน

โพลดิโพลว์ โดยวิธีแยกเป็นส่วนย่อยจึงสามารถลดจำนวนหน่วยความจำลงได้มากกว่าวิธีนิวตัน
ราฟสันตามปกติ อย่างไรก็ตามก็ดี ความเร็วในการเข้าสู่คำตอบ (Convergence) และความแม่นยำ
ของคำตอบ (Accuracy) ก็ใกล้เคียงกัน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย