

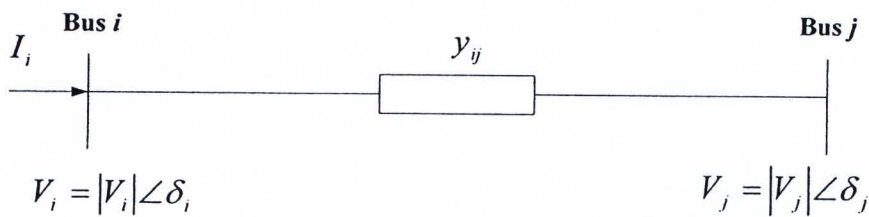
การวิเคราะห์การทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง

ในสภาวะการทำงานหนึ่งๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังหากเราต้องการทราบว่า ขนาดของแรงดันที่บัส มุมของแรงดันที่บัส ขนาดกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านในสายส่ง ฯลฯ จำเป็นต้องใช้การคำนวณที่เรียกว่าการคำนวณโหลดโฟลว์ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์การทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งวิทยานิพนธ์นี้จะแบ่งออกเป็น 2 การวิเคราะห์ ได้แก่ 1) การวิเคราะห์เอชไอโหลดโฟลว์ และ 2) การวิเคราะห์โหลดโฟลว์เมื่อติดตั้งเอชวีดีซี

4.1 การวิเคราะห์เอชไอโหลดโฟลว์

ในการวิเคราะห์เอชไอโหลดโฟลว์นั้นมีวิธีการคำนวณหลักๆ ด้วยกัน 3 วิธีคือ วิธีเกาส์ (Gauss method) วิธีเกาส์-ไซเดล (Gauss-Seidel method) และวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) ซึ่งวิธีนิวตัน-ราฟสัน ได้รับความนิยมในการใช้อย่างมากเนื่องจากให้คำตอบที่แม่นยำ และมีการคำนวณที่รวดเร็ว ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้เฉพาะการคำนวณเอชไอโหลดโฟลว์โดยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

เริ่มต้นพิจารณาดำแหน่งหนึ่งในระบบไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 4.1 บัสและสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลัง

จากรูปที่ 4.1 สามารถเขียนกระแสไฟฟ้าที่ฉีดเข้าที่บัส i ในรูปของเมทริกซ์บัสแอดมิแตนซ์ได้ดังนี้

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (4.1)$$

ดังนั้นสมการของกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน (Power flow equation) สูตรที่ไหลเข้าบัสที่ i คือ

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (4.2)$$

$$P_i - jQ_i = (|V_i| \angle -\delta) \left(\sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \right) \quad (4.3)$$

เมื่อแยกพิจารณาส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าจะได้

$$P_{i,calc} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (4.4)$$

$$Q_{i,calc} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (4.5)$$

กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่คำนวณได้ตามสมการ (4.4) และ (4.5) จะเท่ากับกำลังไฟฟ้ารวมที่ได้รับการจัดสรรใช้ที่แต่ละบัส นั่นคือ

$$P_{i,calc}(|V|, \delta) - P_{i,sch} = 0 \quad (4.6)$$

$$Q_{i,calc}(|V|, \delta) - Q_{i,sch} = 0 \quad (4.7)$$

จาก (4.6) และ (4.7) จะพบว่า ในการแก้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับบัสใดๆ โดยทั่วไปเราจะสนใจตัวแปรอยู่ 4 ตัว คือ ขนาดของแรงดันที่บัส ($|V|$) มุมเฟสของแรงดันที่บัส (δ) กำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) อย่างไรก็ตามที่แต่ละบัสเราจะมีสมการที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้ง 4 นี้อยู่เพียง 2 สมการเท่านั้น ดังนั้นเราจะต้องกำหนดค่าของตัวแปร 2 ตัว เพื่อที่จะคำนวณหาอีก 2 ตัวแปรที่เหลือได้จากตัวแปรทั้ง 4 ดังกล่าวข้างต้น เราสามารถจำแนกประเภทของบัสได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. Slack bus หรือ Reference bus เป็นบัสที่ขนาดของแรงดัน และมุมของแรงดันที่บัสมีค่าคงที่
2. Load bus เป็นบัสกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัสมีค่าคงที่
3. Voltage-controlled bus เป็นบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ โดยกำลังไฟฟ้าจริงและขนาดของแรงดันที่บัสจะมีค่าคงที่

เราสามารถหาคำตอบของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้านี้ด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน โดยการจัดรูปแบบปัญหาดังสมการที่ (4.8)

3.6 การคำนวณกระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้ากำลังที่ติดตั้งเอชวีดีซี

การคำนวณกระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้ากำลังที่ติดตั้งเอชวีดีซี จำเป็นต้องพิจารณาผลของเอชวีดีซี ขณะที่เกิดการลัดวงจร ซึ่งการทำงานในช่วงนี้เอชวีดีซีจะทำงานในโหมดควบคุมกระแสตามเส้นคุณลักษณะที่ปรับได้ ดังนั้นสามารถแทนแบบจำลองของระบบ HVDC ในขณะเกิดการลัดวงจรเป็น แหล่งจ่ายกระแส นั่นคือ เอชวีดีซีจะไม่จ่ายกระแสลัดวงจรเข้าสู่ระบบไม่ว่ากรณีใดๆ ดังนั้นการคำนวณกระแสลัดวงจรจึงมองได้ว่า สายส่งกระแสตรงที่เชื่อมระหว่างบัลเบรกติฟายเออร์ และ บัสอินเวอร์เตอร์ ในระบบกระแสลับถูกทริปออก (Open line) นั่นเอง

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_1^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{1,calc}^{(k)}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_{1,calc}^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_{1,calc}^{(k)}}{\partial |V_1|} & \dots & \frac{\partial P_{1,calc}^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_{n,calc}^{(k)}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_{n,calc}^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_{n,calc}^{(k)}}{\partial |V_1|} & \dots & \frac{\partial P_{n,calc}^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \hline \frac{\partial Q_{1,calc}^{(k)}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_{1,calc}^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_{1,calc}^{(k)}}{\partial |V_1|} & \dots & \frac{\partial Q_{1,calc}^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_{n,calc}^{(k)}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_{n,calc}^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_{n,calc}^{(k)}}{\partial |V_1|} & \dots & \frac{\partial Q_{n,calc}^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta V_1^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta V_n^{(k)} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

จาก (4.8) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปย่อ ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

โดยเมตริกซ์ $J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}$ เรียกว่า เมตริกซ์จาโคเบียน (Jacobian Matrix) โดยสมาชิก

ในเมตริกซ์จาโคเบียนก็คือ อนุพันธ์ย่อยของ (4.6) และ (4.7) ซึ่งสามารถพิจารณาได้ดังนี้

สมาชิกในแนวทแยงมุมและนอกทแยงมุมของ J_1 สามารถเขียนได้ดังสมการ (4.10) และ (4.11) ตามลำดับ

$$\frac{\partial P_{i,calc}}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial P_{i,calc}}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad ; \quad j \neq i \quad (4.11)$$

สมาชิกในแนวทแยงมุมและนอกทแยงมุมของ J_2 สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4.12) และ (4.13) ตามลำดับ

$$\frac{\partial P_{i,calc}}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial P_{i,calc}}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad ; \quad j \neq i \quad (4.13)$$

สมาชิกในแนวทแยงมุมและนอกทแยงมุมของ J_3 สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4.14) และ (4.15) ตามลำดับ

$$\frac{\partial Q_{i,calc}}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial Q_{i,calc}}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad ; \quad j \neq i \quad (4.15)$$

สมาชิกในแนวทแยงมุมและนอกทแยงมุมของ J_4 สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4.16) และ (4.17) ตามลำดับ

$$\frac{\partial Q_{i,calc}}{\partial |V_i|} = -2|V_i| |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} - \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial Q_{i,calc}}{\partial |V_j|} = -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad ; \quad j \neq i \quad (4.17)$$

โดย $\Delta P_i^{(k)}$ และ $\Delta Q_i^{(k)}$ (Power mismatch) มีค่าดัง (4.18) และ (4.19) ตามลำดับ

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_{i,calc}^{(k)} \quad (4.18)$$

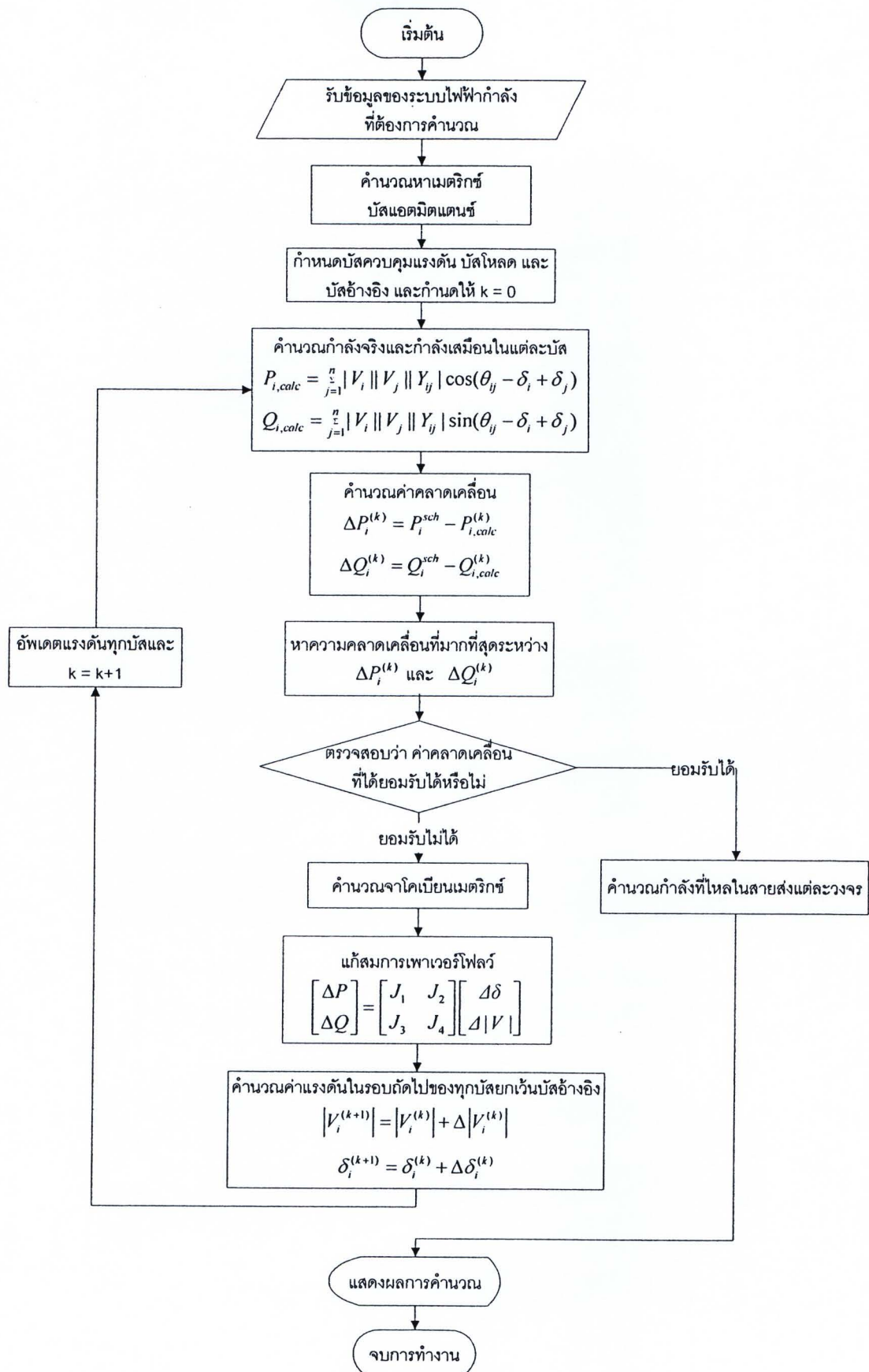
$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_{i,calc}^{(k)} \quad (4.19)$$

และค่าขนาดและมุมของแรงดันที่บัสประมาณขึ้นใหม่โดยวิธีนิวตัน-ราฟสัน คือ

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (4.20)$$

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (4.21)$$

กระบวนการจะดำเนินการต่อไปเรื่อยๆจนกระทั่งค่า $\Delta P_i^{(k)}$ และ $\Delta Q_i^{(k)}$ (Power mismatch) มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ $|\Delta P_i^{(k)}| \leq \varepsilon_1$, $|\Delta Q_i^{(k)}| \leq \varepsilon_2$ โดยกระบวนการการวิเคราะห์โหลดโฟลว์สามารถสรุปเป็นแผนผังได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนผังกระบวนการคำนวณเฮซีโหลดโฟลว์โดยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

4.2 การวิเคราะห์โหลดโพล์เมื่อติดตั้งเซมิคอนดักเตอร์

โดยทั่วไปการวิเคราะห์โหลดโพล์เมื่อติดตั้งเซมิคอนดักเตอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี [11] คือ

- วิธีคำนวณตามลำดับ (Sequential method)
- วิธีคำนวณแบบรวม (Unified method)

โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการประยุกต์ใช้วิธีคำนวณตามลำดับร่วมกับวิธีคำนวณแบบรวมเพื่อความสะดวกในการคำนวณ โดยการคำนวณโหลดโพล์ในระบบไฟฟ้ากำลังที่ติดตั้งเซมิคอนดักเตอร์นั้น ใช้วิธีการคำนวณเช่นเดียวกันกับระบบไฟฟ้ากำลังทั่วไปนั่นคือการคำนวณด้วยวิธีการวนซ้ำ ซึ่งให้แรงดันฝั่งกระแสกลับเป็นข้อมูลป้อนเข้าสำหรับแก้สมการฝั่งกระแสตรง และ กำลังจากฝั่งกระแสตรงเป็นข้อมูลป้อนเข้าสำหรับแก้สมการฝั่งกระแสกลับในรอบถัดไป โดยสามารถแทนบัลที่เชื่อมต่อกับระบบเซมิคอนดักเตอร์ให้เป็นบัลโหลด โดยที่บัลที่เป็นเรกติฟายเออร์แทนเป็นบัลโหลดที่มีการจ่ายกำลังจริง และบัลที่เป็นอินเวอร์เตอร์แทนเป็นบัลโหลดที่มีการรับกำลังจริง (ค่าโหลดติดลบ)

โดยสมการภายในระบบเซมิคอนดักเตอร์ขึ้นอยู่กับโหมดการทำงานของระบบเซมิคอนดักเตอร์ ซึ่งมีอยู่ 3 โหมดการทำงานได้แก่

1) โหมดการทำงานในสภาวะปกติ

โหมดการทำงานนี้เรกติฟายเออร์จะทำงานในโหมดควบคุมกระแสคงที่ และ อินเวอร์เตอร์จะทำงานในโหมดควบคุมมูดากระแสคงที่

2) โหมดการทำงานในสภาวะผิดปกติ

โหมดการทำงานนี้ จะทำงานเมื่อเกิดสภาวะผิดปกติในระบบกระแสกลับ ซึ่งทำให้เกิดแรงดันตกในระบบกระแสกลับ หรือไม่สามารถคำนวณโหลดโพล์ในโหมดแรกได้ ระบบเซมิคอนดักเตอร์จึงพยายามรักษาระดับแรงดันฝั่งเรกติฟายเออร์เพื่อให้สามารถส่งกำลังได้ตามปกติ โดยที่ เรกติฟายเออร์จะทำงานในโหมดควบคุมมูดาจุดชวอนคงที่ และ อินเวอร์เตอร์จะทำงานในโหมดควบคุมกระแสคงที่

3) โหมดปรับเปลี่ยนคุณลักษณะ

ในกรณีสภาวะผิดปกติ หรือไม่สามารถคำนวณโหลดโพล์จากโหมดการทำงานทั้งสองโหมดได้ ทำให้ระบบเซมิคอนดักเตอร์ปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของอินเวอร์เตอร์ ดังนั้น เรกติฟายเออร์จะทำงานในโหมดควบคุมมูดาจุดชวอนคงที่ และ อินเวอร์เตอร์จะทำงานในโหมดตามเส้นคุณลักษณะที่ได้ปรับเปลี่ยน

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะคำนวณโหลดโพล์จากโหมดการทำงานในสภาวะปกติเท่านั้น ซึ่งในโหมดนี้มีเงื่อนไขการคำนวณดังต่อไปนี้

- มูดาจุดชวอนฝั่งอินเวอร์เตอร์ต้องปรับเพื่อให้ได้มูดาจุดชวอนกระแสต่ำสุด (γ_{min})
- มูดาจุดชวอนฝั่งเรกติฟายเออร์ต้องปรับเพื่อให้ได้ค่ากระแสตรงคงที่ (I_{ord})

- แท็บหม้อแปลงฝั่งเรกติฟายเออร์ต้องปรับเพื่อให้ได้มุมจุดชนวนในช่วงที่ต้องการ
- แท็บหม้อแปลงฝั่งอินเวอร์เตอร์ต้องปรับเพื่อให้ได้แรงดันตามที่ต้องการ

จากเงื่อนไขดังกล่าวหากต้องการควบคุมกำลังไหลเข้าฝั่งอินเวอร์เตอร์ สามารถหาค่ากระแสตรงที่ได้ตามสมการ (4.22)

$$I_{ord} = \frac{P_{di_desired}}{V_{di_desired}} \quad (4.22)$$

ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ฝั่งอินเวอร์เตอร์สามารถคำนวณได้จากแรงดันกระแสสลับดังสมการที่ (4.23) – (4.27)

$$V_{doi} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a_i E_{aci} \quad (4.23)$$

$$V_{di,calc} = V_{doi} \cos(\gamma_{min}) - \frac{3}{\pi} X_{ci} I_{ord} \quad (4.24)$$

$$\varphi_i = \cos^{-1}\left(\frac{V_{di}}{V_{doi}}\right) \quad (4.25)$$

$$P_{di,calc} = V_{di} I_{ord} \quad (4.26)$$

$$Q_{di} = P_{di,calc} \tan(\varphi_i) \quad (4.27)$$

ในขณะเดียวกันค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ฝั่งเรกติฟายเออร์ก็สามารถคำนวณได้จากแรงดันกระแสสลับดังสมการที่ (4.28) – (4.32)

$$V_{dor} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a_r E_{acr} \quad (4.28)$$

$$V_{dr} = V_{dor} \cos(\alpha_{calc}) - \frac{3}{\pi} X_{cr} I_{ord} \quad (4.29)$$

$$\varphi_r = \cos^{-1}\left(\frac{V_{dr}}{V_{dor}}\right) \quad (4.30)$$

$$P_{dr} = V_{dr} I_{ord} \quad (4.31)$$

$$Q_{dr} = P_{dr} \tan(\varphi_r) \quad (4.32)$$

โดย ณ บัสที่ทำการติดตั้งเซมิคอนดักเตอร์ ค่ากำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะถูกปรับปรุงดังสมการที่ (4.33) - (4.36)

$$P_{sch_rec} = (P_{g_rec} - P_{d_rec}) - P_{drec_sch} = 0 \quad (4.33)$$

$$P_{sch_inv} = (P_{g_inv} - P_{d_inv}) + P_{dinv_sch} = 0 \quad (4.34)$$

$$Q_{sch_rec} = (Q_{g_rec} - Q_{d_rec}) - Q_{drec_sch} = 0 \quad (4.35)$$

$$Q_{sch_inv} = (Q_{g_inv} - Q_{d_inv}) - Q_{dinv_sch} = 0 \quad (4.36)$$

จากวิธีการคำนวณโหลดโพลาร์ในระบบไฟฟ้าที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.1 ผลเฉลยโหลดโพลาร์ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ติดตั้งระบบเซมิคอนดักเตอร์ สามารถหาได้ดังสมการที่ (4.37)

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_1^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_m^{(k)} \\ \Delta \alpha^{(k)} \\ \Delta V_{di}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{1,calc}^{(k)}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_{1,calc}^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_{1,calc}^{(k)}}{\partial |V_1|} & \dots & \frac{\partial P_{1,calc}^{(k)}}{\partial |V_m|} & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_{n,calc}^{(k)}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_{n,calc}^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_{n,calc}^{(k)}}{\partial |V_1|} & \dots & \frac{\partial P_{n,calc}^{(k)}}{\partial |V_m|} & \frac{\partial P_{r,calc}^{(k)}}{\partial \alpha_r} & \frac{\partial P_{i,calc}^{(k)}}{\partial \alpha_i} \\ \frac{\partial Q_{1,calc}^{(k)}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_{1,calc}^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_{1,calc}^{(k)}}{\partial |V_1|} & \dots & \frac{\partial Q_{1,calc}^{(k)}}{\partial |V_m|} & \vdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & 0 & 0 \\ \frac{\partial Q_{m,calc}^{(k)}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_{m,calc}^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_{m,calc}^{(k)}}{\partial |V_1|} & \dots & \frac{\partial Q_{m,calc}^{(k)}}{\partial |V_m|} & 0 & 0 \\ \frac{\partial \alpha^{(k)}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial \alpha^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial \alpha^{(k)}}{\partial |V_1|} & \dots & 0 & \frac{\partial \alpha^{(k)}}{\partial \alpha_r} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \frac{\partial V_{di,calc}^{(k)}}{\partial |V_i|} & \dots & 0 & 0 & \frac{\partial V_{di}^{(k)}}{\partial \alpha_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta V_1^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta V_m^{(k)} \\ \Delta \alpha_r^{(k)} \\ \Delta \alpha_i^{(k)} \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

จากสมการที่ (4.37) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปกะทัดรัดได้ดังสมการที่ (4.38)

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta y_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 & J_{dc,2} \\ J_3 & J_4 & 0 \\ 0 & J_{dc,3} & J_{dc,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \\ \Delta x_{dc} \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

โดยที่สมาชิกของ $J_{dc,1}$ สามารถคำนวณได้จากสมการ (4.39) และ (4.40) ตามลำดับ

$$\frac{\partial \alpha}{\partial a_r} = \frac{V_{dr} + X_{cr} I_{ord}}{\sqrt{2} E_{acr} a_r^2 \sin \alpha_{calc}} \quad (4.39)$$

$$\frac{\partial V_{di}}{\partial a_i} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_{aci} \cos \gamma_{\min} \quad (4.40)$$

สมาชิกของ $J_{dc,2}$ สามารถคำนวณได้จากสมการ (4.41) และ (4.42) ตามลำดับ

$$\frac{\partial P_r}{\partial a_r} = -\frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_{acr} I_{ord} \cos \alpha_{calc} \quad r \neq slack \quad (4.41)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial a_i} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_{aci} I_{ord} \cos \gamma_{\min} \quad i \neq slack \quad (4.42)$$

และสมาชิกของ $J_{dc,3}$ สามารถคำนวณได้จากสมการ (4.43) และ (4.44) ตามลำดับ

$$\frac{\partial \alpha}{\partial E_{acr}} = \frac{V_{dr} + X_{cr} I_{ord}}{\sqrt{2} a_r E_{acr}^2 \sin \alpha_{calc}} \quad r \in PQ \quad (4.43)$$

$$\frac{\partial V_{di}}{\partial E_{aci}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a_i \cos \gamma_{\min} \quad i \in PQ \quad (4.44)$$

เมื่อผลต่างของมุมจุดขนวนฝั่งเรกติฟายเออร์และขนาดแรงดันฝั่งอินเวอร์เตอร์เป็นไปตามสมการที่ (4.45) และ (4.46) ตามลำดับ

$$\Delta \alpha^{(k)} = \alpha_{desired} - \alpha_{calc}^{(k)} \quad (4.45)$$

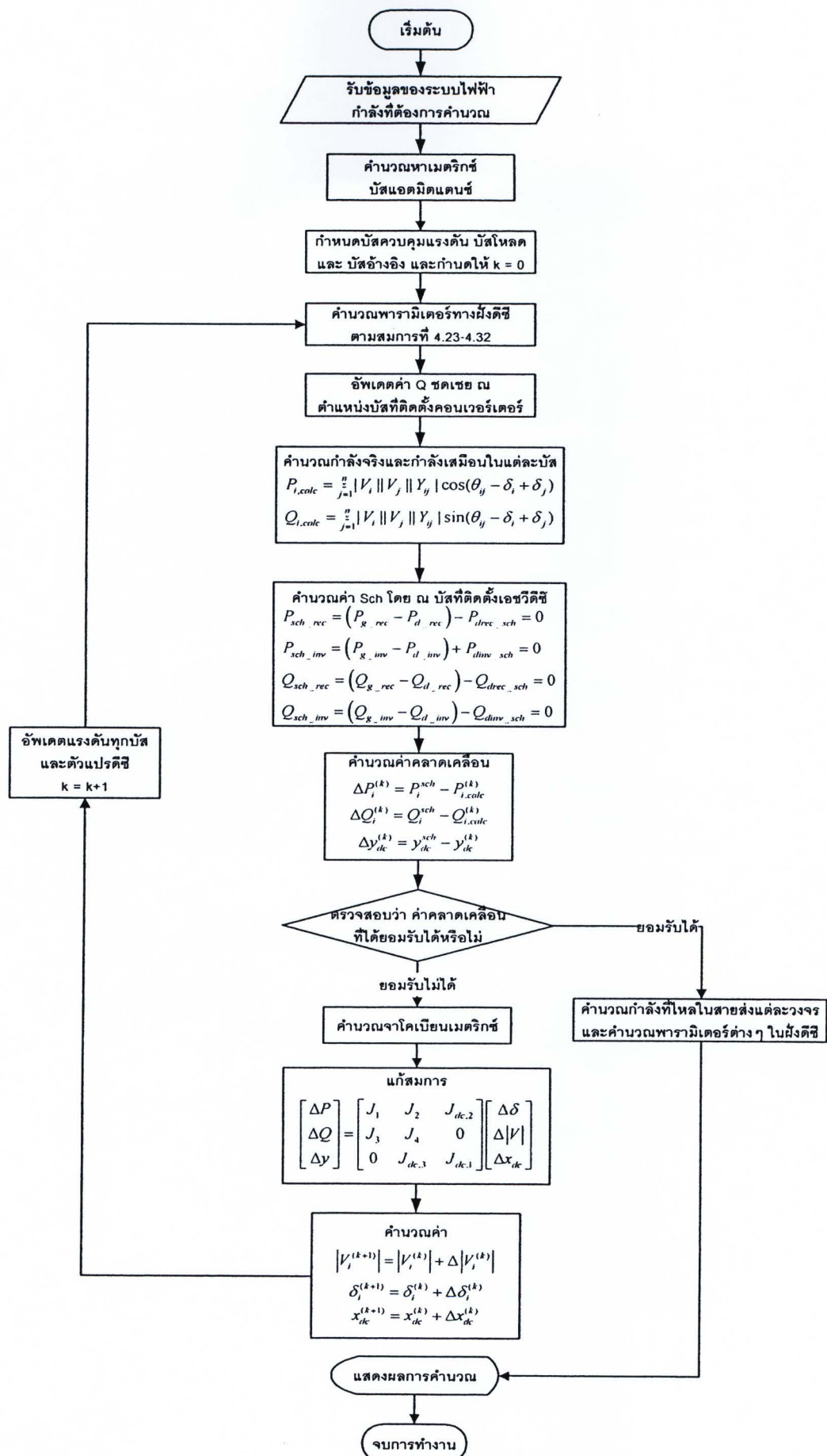
$$\Delta V_{di}^{(k)} = V_{di,desired} - V_{di,calc}^{(k)} \quad (4.46)$$

ดังนั้นค่าแท็บที่ฝั่งเรกติฟายเออร์และอินเวอร์เตอร์ที่ประมาณขึ้นใหม่จากวิธีนิวตัน-ราฟสันสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (4.47) และ (4.48)

$$a_r^{(k+1)} = a_r^{(k)} + \Delta a_r^{(k)} \quad (4.47)$$

$$a_i^{(k+1)} = a_i^{(k)} + \Delta a_i^{(k)} \quad (4.48)$$

คำนวณต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าความคลานเคลื่อนของกำลัง (Power mismatch) น้อยกว่าค่าความถูกต้องที่ยอมรับได้ $(\Delta P_i^{(k)} \leq \varepsilon, \Delta Q_i^{(k)} \leq \varepsilon, \Delta \alpha^{(k)} \leq \varepsilon, \Delta V_{di}^{(k)} \leq \varepsilon)$



รูปที่ 4.3 แผนผังกระบวนการคำนวณโหลดโพล์เมื่อติดตั้งเซมิคอนดักเตอร์