

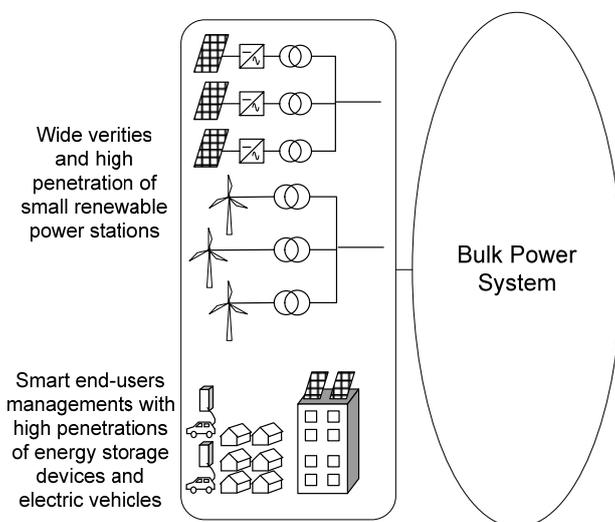
บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

จากการที่วิธีการคำนวณการไหลของกำลังงานไฟฟ้าแบบดั้งเดิมอยู่บนพื้นฐานของการมีบัลลัสแตกหนึ่งบัลลัสเพื่อเป็นการชดเชยความสูญเสียในระบบส่งที่ยังไม่ทราบค่าขณะที่คำนวณ ทำให้ค่ากำลังงานจริงในระบบมีการตอบสนองจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สแลคบัลลัสเพียงบัลลัสเดียวซึ่งในความเป็นจริงแล้วค่ากำลังงานที่ต้องชดเชยนี้จะตอบสนองกระจายกันไปโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัวในระบบไฟฟ้ากำลัง

นอกจากนี้ระบบไฟฟ้ากำลังยังมีความซับซ้อนที่มากขึ้นจากการที่ระบบมีโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มากขึ้น รวมทั้งยังมีการตอบสนองของผู้ใช้ไฟฟ้าและการเก็บสำรองพลังงานไฟฟ้าที่หลากหลายมากขึ้น ระบบไฟฟ้ากำลังจึงต้องทำงานในลักษณะของโครงข่ายอัจฉริยะเพื่อตอบสนองคุณลักษณะของระบบ ทั้งนี้ในอนาคตองค์ประกอบที่เพิ่มขึ้นในระบบไฟฟ้าจะประกอบด้วยโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน อุปกรณ์เก็บสำรองพลังงาน และเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีความชาญฉลาด

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีการวิเคราะห์การไหลของกำลังงานไฟฟ้าสำหรับโครงข่ายอัจฉริยะ โดยอยู่บนพื้นฐานของการวิเคราะห์การไหลของกำลังงานแบบกระจายบัลลัสแตก (Distributed Slack Bus Power Flow) ที่มีโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic Power Plant, PVPP) และโรงไฟฟ้าพลังงานลม (Wind Power Plant, WPP) รวมทั้งการตอบสนองของการใช้ไฟฟ้าตามแรงดัน (Voltage Dependence Load) ลักษณะโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังที่เป็นโครงข่ายอัจฉริยะในงานวิจัยนี้สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 3.1



ภาพประกอบ 3.1 ลักษณะโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังในอนาคต

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.1.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถแสดงแบบจำลองเป็นค่ากำลังงานไฟฟ้าจริงที่ต่อกับบัสที่สามารถควบคุมแรงดันได้โดยสามารถจำลองคุณสมบัติการตอบสนองในการผลิตกำลังงานได้โดยการพิจารณาให้กำลังงานไฟฟ้าจริงที่บัส i มีค่าเป็น

$$P_{Gi} = P_{Gseti} + P_{Gei}, \quad (3.1)$$

โดยที่

$$P_{Gi}^{\max} \geq P_{Gi} \geq P_{Gi}^{\min}, \quad (3.2)$$

เมื่อ

P_{Gi} เป็นค่ากำลังงานไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i (MW)

P_{Gi}^{\max} เป็นค่ากำลังงานไฟฟ้าจริงสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i (MW)

P_{Gi}^{\min} เป็นค่ากำลังงานไฟฟ้าจริงต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i (MW)

P_{Gseti} เป็นค่ากำลังงานไฟฟ้าจริงที่กำหนดไว้ที่บัส i (MW)

P_{Gei} เป็นค่ากำลังงานไฟฟ้าจริงจากการตอบสนองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i (MW)

ค่ากำลังงานไฟฟ้าจริงจากการตอบสนองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i สามารถคำนวณได้จาก

$$P_{Gei} = \alpha_i \Delta G, \quad (3.3)$$

เมื่อ

$$\sum_{i=1}^{NG} \alpha_i = 1.00, \quad (3.4)$$

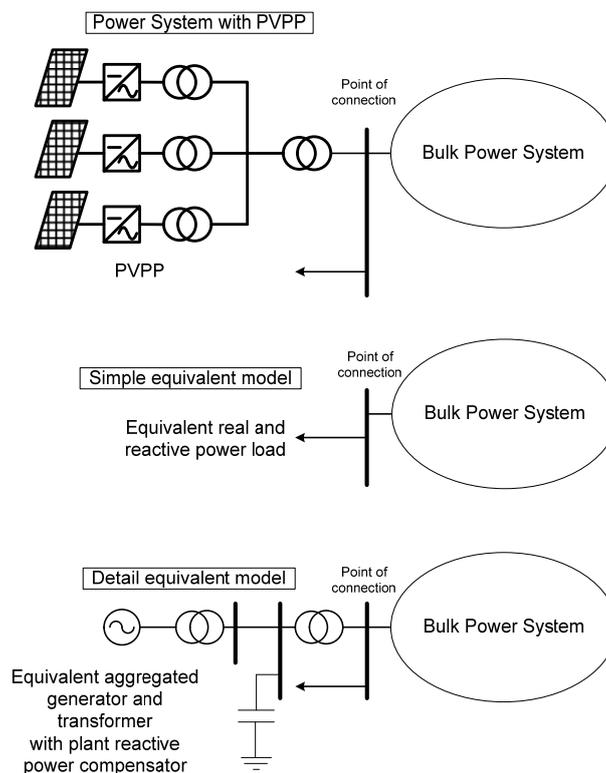
α_i เป็นค่าตัวประกอบการมีส่วนร่วม (participation factor) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i

ΔG เป็นค่ากำลังงานจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตอบสนอง (MW)

NG เป็นจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

3.1.2 แบบจำลองของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (PVPP)

แบบจำลองของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (PVPP) สามารถอ้างอิงได้จาก [Western Electricity Coordinating Council Modeling and Validation Work Group, 2010.] โดยสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้แผงเซลล์สุริยะ (Photovoltaic) นั้นจะเป็นการผลิตกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันที่ขั้วของแผงเซลล์สุริยะแปรตามการตกกระทบของแสงอาทิตย์ การเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังจะผ่านชุดแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นกระแสสลับ (Inverter)

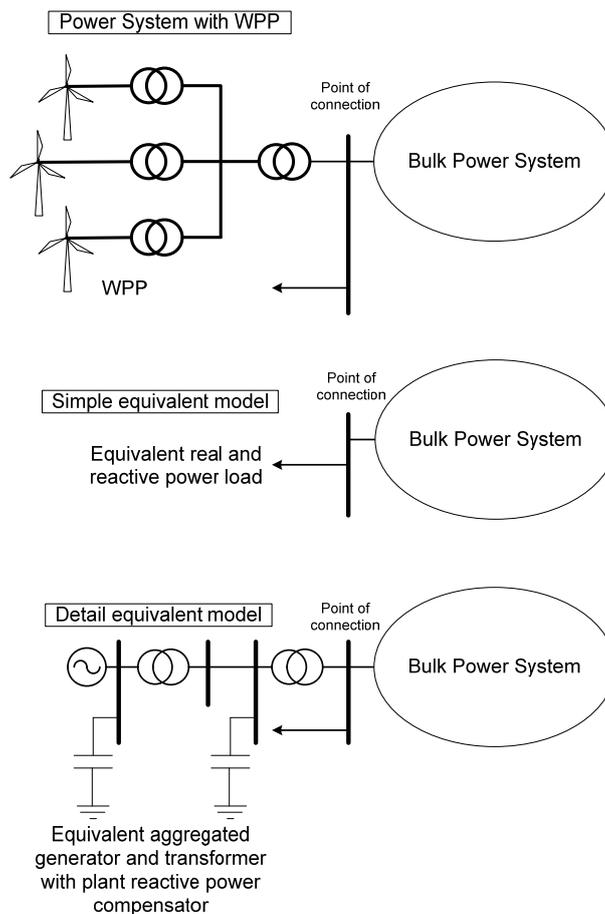


ภาพประกอบ 3.2 วงจรสมมูลของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้แผงเซลล์สุริยะ

ในแบบจำลองของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ จะแสดงได้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่มีค่าพิกัดกำลังงานเท่ากับกำลังงานรวมของชุดแปลงสัญญาณไฟฟ้าต่ออยู่กับหม้อแปลงสมมูลที่แทนหม้อแปลงทุกตัวในชุดรวมกำลังงานของระบบโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ รูปแบบจำลองนี้จะสามารถแสดงถึงกำลังงานที่ไหลของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ รวมทั้งกำลังงานจริงและกำลังงานรีแอกทีฟสูญเสียและแรงดันที่จุดเชื่อมต่อกับระบบของโรงไฟฟ้า ภาพประกอบ 3.2 เป็นการแสดงตัวอย่างการจำลองวงจรสมมูลของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการศึกษาการไหลของกำลังงานไฟฟ้าในสถานะคงตัว (Steady state power flow)

3.1.3 แบบจำลองของโรงไฟฟ้าพลังงานลม (WPP)

ในปัจจุบัน โรงไฟฟ้าพลังงานลมได้มีจำนวนและขนาดที่สูงขึ้น นอกจากนี้การติดตั้งโรงไฟฟ้าพลังงานลมยังมักจะมีการกระจายตัวไปตามพื้นที่ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ศักยภาพของพลังงานลม โรงไฟฟ้าพลังงานลมในปัจจุบันจะมีการออกแบบให้รองรับผลกระทบจากการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังและช่วยเพิ่มความเชื่อถือได้ให้กับระบบไฟฟ้ากำลังด้วย



ภาพประกอบ 3.3 วงจรสมมูลของโรงไฟฟ้าพลังงานลม

โดยปกติโรงไฟฟ้าพลังงานลมจะอาศัยแหล่งกำลังงานรีแอกทีฟในการจ่ายกำลังงานรีแอกทีฟเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมสามารถจัดประเภทได้เป็น [Western Electricity Coordinating Council Modeling and Validation Work Group, 2008]

- แบบที่ 1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (Cage rotor induction generators)
- แบบที่ 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบปรับค่าความต้านทานของโรเตอร์ได้ (Induction

generators with variable rotor resistance)

- แบบที่ 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแนวมอเตอร์โรตอร์แบบดับลิเฟดแบบมีคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ (Doubly-fed asynchronous generators with rotor-side converter)
- แบบที่ 4 การเชื่อมต่อแบบแปลงสัญญาณกำลังงานเต็ม (Full-power converter interface)

ในการจำลองโรงไฟฟ้าพลังงานลมในระบบไฟฟ้ากำลังจะสามารถแสดงค่าของสายส่ง หม้อแปลง และแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟของระบบแยกจากกันอย่างชัดเจนได้ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจะสามารถแสดงแทนด้วยกำลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดในระบบเชื่อมต่อของโรงไฟฟ้าพลังงานลม และในทำนองเดียวกันหม้อแปลงและแหล่งจ่ายกำลังงานรีแอกทีฟในระบบของโรงไฟฟ้าก็สามารถแทนได้ด้วยหม้อแปลงสมมูลรวมและแหล่งจ่ายกำลังงานรีแอกทีฟสมมูลรวมได้ดังแสดงในรูปที่ 3.3

3.1.4 แบบจำลองของโหลด

ในการคำนวณการไหลของกำลังงานไฟฟ้าแบบดั้งเดิมจะจำลองโหลดในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นค่ากำลังงานจริงและกำลังงานรีแอกทีฟคงที่ โดยบัสที่ไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่จะถูกพิจารณาให้เป็นบัสโหลดที่สามารถระบุค่ากำลังงานจริงและกำลังงานรีแอกทีฟได้ อย่างไรก็ตาม โหลดในระบบไฟฟ้าจริงอาจมีทั้งแบบที่เหมาะสมจะจำลองเป็นโหลดกำลังงานคงที่และแบบที่เป็นโหลดที่แปรตามแรงดัน (Voltage Dependence Load) โดยในทางคณิตศาสตร์แล้วโหลดกำลังงานจริงและกำลังงานรีแอกทีฟสามารถแสดงได้เป็น

$$P_{Li} = P_{Loi} \sum_{j=1}^{NPL_i} A_{ij} V_i^{NP_i}, \text{ for } i = 1, \dots, NB, \quad (3.5)$$

$$Q_{Li} = Q_{Loi} \sum_{j=1}^{NQL_i} B_{ij} V_i^{NQ_i}, \text{ for } i = 1, \dots, NB, \quad (3.6)$$

เมื่อ

P_{Li} , Q_{Li} คือค่ากำลังงานจริงของโหลดที่บัส i (MW)

P_{Loi} , Q_{Loi} คือค่ากำลังงานจริงและกำลังงานรีแอกทีฟของโหลดตามที่กำหนดไว้ที่บัส i (MW)

A_i , B_i , NP_i , NQ_i คือค่าคงที่แสดงคุณลักษณะของโหลดที่บัส i

NPL_i และ NQL_i คือเลขแสดงชนิดของโหลดกำลังงานจริงและกำลังงานรีแอกทีฟที่บัส i

3.2 สมการการไหลของกำลังงานไฟฟ้า (Power Flow Equations)

พิจารณาสมการสมดุลการไหลของกำลังงานไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังที่มี NB บัส ที่แยกแสดงส่วนของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ จะแสดงเป็นสมการจำนวน 2NB สมการ ที่สามารถหาคำตอบด้วยวิธีการนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) โดยสมการกำลังงานไฟฟ้าจะสามารถแสดงได้เป็น

$$S_i = (P_{G_{seti}} + P_{G_{ci}} - P_{Li}) + j(Q_{Gi} - Q_{Li}), \text{ for } i = 1, \dots, NB \quad (3.7)$$

สมการสมดุลการไหลของกำลังงานไฟฟ้าสามารถแสดงได้เป็น

$$P_i = \sum_{j=1}^{NB} |V_i| |V_j| |y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_{ij}), i = 1, \dots, NB, \quad (3.8)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^{NB} |V_i| |V_j| |y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_{ij}), i = 1, \dots, NB, \quad (3.9)$$

เมื่อ

NB คือจำนวนบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง

S_i คือกำลังงานปรากฏพุงเข้าที่บัส i (MVA)

P_i คือกำลังงานจริงพุงเข้าที่บัส i (MW)

Q_i คือกำลังงานรีแอกทีฟพุงเข้าที่บัส i (MVA_r)

Q_{Gi} คือกำลังงานรีแอกทีฟจ่ายโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i (MVA)

Q_{Li} คือกำลังงานรีแอกทีฟของโหลดที่บัส i (MVA)

$|V_i|$ คือขนาดของแรงดันที่บัส i (V)

$|y_{ij}|$ คือขนาดขององค์ประกอบ y_{ij} ในเมตริกซ์ Y_{bus} (mho)

θ_{ij} คือค่ามุมเฟสขององค์ประกอบ y_{ij} ในเมตริกซ์ Y_{bus} (radian)

δ_{ij} คือค่ามุมต่างเฟสระหว่างแรงดันที่บัส i และบัส j (radian)

พิจารณากำลังไฟฟ้าจริงพ่วงเข้าที่บัสจะไม่เปลี่ยนแปลงมากตามการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดัน และในทำนองเดียวกันค่ากำลังงานรีแอกทีฟที่บัสจะไม่เปลี่ยนแปลงมากตามการเปลี่ยนแปลงมุมเฟสของแรงดัน ดังนั้นสมการคำนวณแบบนิวตัน-ราฟสันสามารถสรุปได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{i,j \in Ref} \\ \Delta P_{i,j \in BS} \\ \Delta Q_{i,j \in BL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{i,j \in Ref}}{\partial G} & \frac{\partial P_{i,j \in Ref}}{\partial \delta_{i,j \in BS}} & \frac{\partial P_{i,j \in Ref}}{\partial |V|_{i,j \in BL}} \\ \frac{\partial P_{i,j \in BS}}{\partial G} & \frac{\partial P_{i,j \in BS}}{\partial \delta_{i,j \in BS}} & \frac{\partial P_{i,j \in BS}}{\partial |V|_{i,j \in BL}} \\ 0 & \frac{\partial Q_{i,j \in BL}}{\partial \delta_{i,j \in BS}} & \frac{\partial Q_{i,j \in BL}}{\partial |V|_{i,j \in BL}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta G \\ \Delta \delta_{i,j \in BS} \\ \Delta |V|_{i,j \in BL} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

เมื่อ

BS คือเซตของบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง

BL คือเซตของบัสโหลด

Ref คือบัสที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้เป็นจุดอ้างอิงมุมเฟสของแรงดัน

$\begin{bmatrix} \Delta P_{i,j \in BS} \\ \Delta Q_{i,j \in BL} \end{bmatrix}$ คือเมตริกซ์แบบคอลัมน์ที่แสดงค่าความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังงานรีแอกทีฟ

$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{i,j \in BS}}{\partial \delta_{i,j \in BS}} & \frac{\partial P_{i,j \in BS}}{\partial |V|_{i,j \in BL}} \\ \frac{\partial Q_{i,j \in BL}}{\partial \delta_{i,j \in BS}} & \frac{\partial Q_{i,j \in BL}}{\partial |V|_{i,j \in BL}} \end{bmatrix}$ คือเมตริกซ์จาโคเบียนในวิธีการนิวตัน-ราฟสัน

$\begin{bmatrix} \Delta \delta_{i,j \in BS} \\ \Delta |V|_{i,j \in BL} \end{bmatrix}$ คือเมตริกซ์แบบคอลัมน์แสดงผลต่างมุมเฟสและขนาดของแรงดัน ในวิธีการแบบนิวตัน-ราฟสัน

$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{i,j \in BS}}{\partial G} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{i,j \in Ref}}{\partial G} \end{bmatrix}$ คือเมตริกซ์แบบคอลัมน์แสดงค่าความไวของการเปลี่ยนแปลงกำลังงานจริงต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$\Delta P_{i,j \in Ref}$ คือค่ากำลังงานจริงแตกต่างของบัสอ้างอิง

$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{i,j \in Ref}}{\partial \delta_{i,j \in BS}} & \frac{\partial P_{i,j \in Ref}}{\partial |V|_{i,j \in BL}} \end{bmatrix}$ คือเมตริกซ์แบบแถวแสดงค่าความไวของการเปลี่ยนแปลงกำลังงานจริงของบัสอ้างอิงต่อการเปลี่ยนแปลงมุมเฟสและขนาดของแรงดัน

ค่ามุมเฟสและขนาดของแรงดันรวมทั้งค่า G จะสามารถประเมินค่าได้จากสมการ

$$\begin{bmatrix} \Delta G \\ \Delta \delta_{i,j \in BS} \\ \Delta |V|_{i,j \in BL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{i,Ref}}{\partial G} & \frac{\partial P_{i,Ref}}{\partial \delta_{i,j \in BS}} & \frac{\partial P_{i,Ref}}{\partial |V|_{i,j \in BL}} \\ \frac{\partial P_{i,j \in BS}}{\partial G} & \frac{\partial P_{i,j \in BS}}{\partial \delta_{i,j \in BS}} & \frac{\partial P_{i,j \in BS}}{\partial |V|_{i,j \in BL}} \\ 0 & \frac{\partial Q_{i,j \in BL}}{\partial \delta_{i,j \in BS}} & \frac{\partial Q_{i,j \in BL}}{\partial |V|_{i,j \in BL}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_{i,Ref} \\ \Delta P_{i,j \in BS} \\ \Delta Q_{i,j \in BL} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

เมื่อกำหนดค่า ΔG , $\Delta \delta_{i,j \in BS}$ และ $\Delta |V|_{i,j \in BL}$ แล้วจะสามารถนำมาปรับปรุงค่ากำลังงานจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่ามุมเฟสของแรงดันที่แต่ละบัส และค่าขนาดของแรงดันที่บัสโหลดได้ และนำไปคำนวณซ้ำจนกระทั่ง ΔP และ ΔQ เข้าสู่ค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนด (tolerance)

3.3 การหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดแบบความน่าจะเป็น (Probabilistic Optimal Power Flow, POPF)

การหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Power Flow, OPF) จะนำมาใช้เป็นการคำตบย่อในการหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดแบบความน่าจะเป็น (Probabilistic Optimal Power Flow, POPF) โดยในส่วนของ OPF จะแยกคำนวณเป็นการหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่มีต้นทุนการผลิตต่ำสุด (Total Operating Cost Minimization) และการหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่มีความสูญเสียในระบบส่งต่ำสุด (Real Power Loss Minimization) แบบจำลองความน่าจะเป็นของภาระไฟฟ้าใน POPF จะสร้างจากข้อมูลการใช้ไฟฟ้ารายชั่วโมงย้อนหลังตลอดปีทีนำมาแบ่งเป็นค่าความน่าจะเป็นในช่วงเวลาเดียวกันของแต่ละวัน วิธีการ POPF โดยรวมสามารถแสดงได้ดังนี้

3.3.1 ปัญหาการหาคำตอบ OPF

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่มีต้นทุนต่ำสุด (Total Operating Cost Minimization) สามารถแสดงได้เป็น [M. Huneault and F. Galiana, 1991],

$$\text{หาค่าต่ำสุดของ} \quad TFC = \sum_{i \in BG} FC(P_{Gi}), \quad (3.12)$$

โดยที่เป็นไปตามเงื่อนไขสมมูลกำลังงานไฟฟ้า

$$P_{Gi} - P_{Di} = \sum_{j=1}^{NB} |V_i| |V_j| |y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_{ij}), \quad i=1, \dots, NB, \quad (3.13)$$

และ
$$Q_{Gi} - Q_{Di} = -\sum_{j=1}^{NB} |V_i| |V_j| |y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_{ij}), i=1, \dots, NB, \quad (3.14)$$

ซึ่ง

$$0 \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, \text{ for } i \in BG, \quad (3.15)$$

และเป็นไปตามเงื่อนไขข้อจำกัดของระบบส่ง

$$|f_{w_l}| \leq f_{w_l}^{\max}, \text{ for } l=1, \dots, NC. \quad (3.16)$$

วัตถุประสงค์นี้สามารถหาคำตอบได้โดยใช้โปรแกรมควอดราติกหาคำตอบวนซ้ำสลับกับการหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.2

นอกจากนี้ยังมีวัตถุประสงค์การหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่มีความสูญเสียในระบบส่งต่ำสุด (Real Power Loss Minimization) คือ

หาค่าต่ำสุดของ
$$P_{loss} = \sum_{l=1}^{NL} G_{ij} (|V_i|^2 + |V_j|^2 - 2|V_i| |V_j| \cos(\delta_{ij})), \quad (3.17)$$

เมื่อ P_{loss} เป็นฟังก์ชันของขนาดของแรงดันที่บัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่และค่าการปรับแก้ปของหม้อแปลงกำลัง โดยในสมการสายส่ง l เป็นสายส่งระหว่างบัส i และ j

ในสมการที่ (3.17) กำลังงานจริงสูญเสียเป็นฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นของขนาดของแรงดันมุมเฟสของแรงดัน และค่าการปรับแก้ปของหม้อแปลง [K. H. Abdul-Rahman and S. M. Shahidehpour, 1993] อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรในสมการจะสามารถแสดงเฉพาะค่าการเปลี่ยนแปลงในช่วงแคบ ๆ ของขนาดของแรงดันและค่าการปรับแก้ปของหม้อแปลงเนื่องจากเป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ [N. I. Deep and S. M. Shahidehpour, 1991; K. H. Abdul-Rahman and S. M. Shahidehpour, 1993] ค่ามุมเฟสของแรงดันไม่ได้นำมาพิจารณาในการหาคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์เนื่องจากเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้และจะได้จากการคำนวณการไหลของกำลังงานไฟฟ้า

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ทำเป็นเชิงเส้นจะสามารถแสดงได้เป็น [N. I. Deep and S. M. Shahidehpour, 1991; K. H. Abdul-Rahman and S. M. Shahidehpour, 1993; M. K. Mangoli, K. Y. Lee, and Y. M. Park, 1993],

หาค่าต่ำสุดของ
$$\Delta P_{loss} = \left[\frac{dP_{loss}}{d|V|} \quad \frac{dP_{loss}}{dT} \right] \begin{bmatrix} \Delta |V| \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (3.18)$$

โดยที่เป็นไปตามสมการสมดุลของกำลังงานไฟฟ้าในสมการที่ (3.13) และ (3.14) และขอบเขตของขนาดของแรงดันและค่าการปรับแก้ปหม้อแปลงกำลัง ซึ่งสามารถแสดงได้เป็น

$$\Delta |V_i^{\min}| \leq \Delta |V_i| \leq \Delta |V_i^{\max}|, \text{ for } i = 1, \dots, NB, \quad (3.19)$$

$$\Delta T_i^{\min} \leq \Delta T_i \leq \Delta T_i^{\max}, \text{ for } i = 1, \dots, NT, \quad (3.20)$$

$$\Delta |V_i^{\min}| = |V_i^{\min}| - |V_i|, \text{ for } i = 1, \dots, NB, \quad (3.21)$$

$$\Delta |V_i^{\max}| = |V_i^{\max}| - |V_i|, \text{ for } i = 1, \dots, NB, \quad (3.22)$$

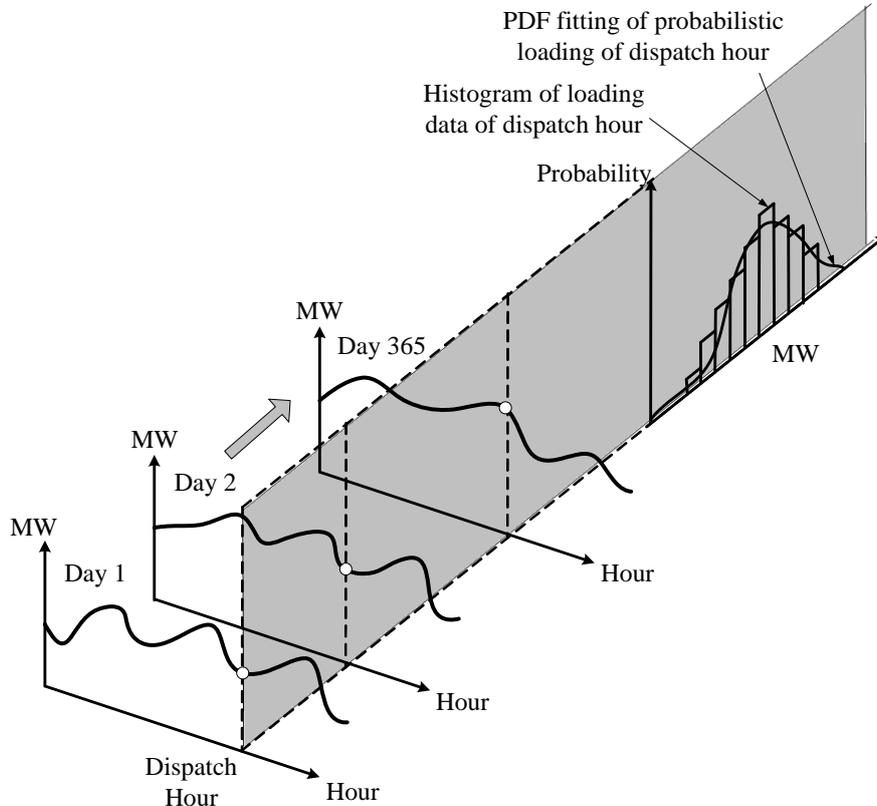
$$\Delta T_i^{\min} = T_i^{\min} - T_i, \text{ for } i = 1, \dots, NT, \quad (3.23)$$

$$\Delta T_i^{\max} = T_i^{\max} - T_i, \text{ for } i = 1, \dots, NT, \quad (3.24)$$

จากรูปแบบที่ทำการเป็นเชิงเส้นนี้จะสามารถหาคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ด้วยโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) และคำนวณแบบวนซ้ำสลับกับการหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้า

3.3.2 แบบจำลองความน่าจะเป็นของภาระไฟฟ้า

ในการสร้างแบบจำลองความน่าจะเป็นของภาระไฟฟ้าเพื่อคำนวณ POPF จะใช้ข้อมูลการใช้ไฟฟ้าย้อนหลังรายชั่วโมงตลอดปี โดยนำข้อมูลปริมาณการใช้ไฟฟ้าในแต่ละชั่วโมงของแต่ละวันมาวิเคราะห์หาฟังก์ชันการกระจายตัวของความน่าจะเป็น (Probabilistic Distribution Function, PDF) ดังแสดงในภาพประกอบ 3.4 จากนั้นนำแบบจำลองที่ได้ไปใช้ในการหาคำตอบ POPF ต่อไป



ภาพประกอบ 3.4 การสร้างแบบจำลองความน่าจะเป็นของภาระไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการ AIC [H. Akaike, 1974] ในการประเมินความแม่นยำของ PDF ที่ได้จากการจำลองภาระไฟฟ้าที่จะนำมาใช้เป็นตัวแทนภาระในการคำนวณ POPF โดยครุณี AIC สามารถแสดงได้เป็น

$$AIC = 2(\text{number of parameters}) - 2(\log \text{likelyhood}) \quad (3.25)$$

แนวคิดของ AIC คือการประเมินจากค่า log likelihood และจำนวนตัวแปร ว่า PDF ที่ใช้เป็นตัวแทนความน่าจะเป็นของตัวแปรจะมีความแม่นยำเพียงใด โดย AIC จะใช้ทั้งค่าความผิดพลาดที่ข้อมูลสูญเสียไป (log likelihood) และความซับซ้อนของแบบจำลองคือ (จำนวนตัวแปร) [H. Bozdogan, 2000] ในประเด็นของ POPF แล้ว AIC จะเป็นการแทนข้อมูลที่สูญเสียไปในการคำนวณแบบความน่าจะเป็นของภาระ ดังนั้นแบบจำลองที่ให้ค่า AIC ต่ำกว่าจะเป็นแบบจำลองที่ดีกว่าในการเป็นตัวแทนของข้อมูลที่คำนวณ

3.3.3 กระบวนการคำนวณ POPF

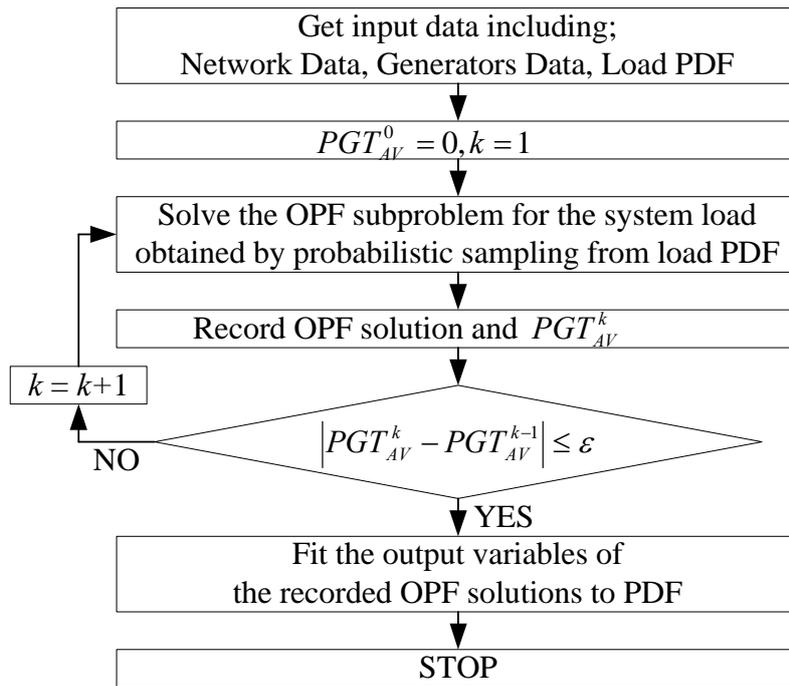
กระบวนการคำนวณที่พิจารณาประกอบด้วย 2 วิธีการคือวิธีการมอนติคาโล (Monte Carlo, MCS) [M. H. Kalos and P. A. Whitlock, 2008] และวิธีการประเมินพารามิเตอร์ของไวบูลล์โดยใช้เปอร์เซ็นต์ไทล์ (Weibull parameters from percentiles) [N. B. Marks, 2005]

3.3.3.1 วิธีการมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation, MCS)

ในการวิเคราะห์ทางสถิติและความน่าจะเป็นได้มีการใช้วิธีการมอนติคาร์โลในการจำลองการคำนวณการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้แบบจำลองความน่าจะเป็นทางสถิติของการใช้ไฟฟ้าที่จำลองด้วยวิธีในหัวข้อ 3.3.2 มาสุ่มทางสถิติ ในแต่ละรอบที่คำนวณจะคำนวณค่าเฉลี่ยของกำลังงานรวมในการผลิตเป็น

$$PGT_{AV}^k = \frac{\sum_{m=1}^k PGT^m}{k} \quad (3.26)$$

เมื่อ PGT^m เป็นกำลังงานไฟฟ้าจริงรวมที่ผลิตในการคำนวณรอบที่ m โดยการคำนวณจะวนรอบจนกว่า PGT_{AV}^k จะมีค่าใกล้เคียงกับกับค่าเฉลี่ยถึงการคำนวณรอบก่อน (PGT_{AV}^{k-1}) กระบวนการคำนวณได้แสดงไว้ดังภาพประกอบ 3.5 โดยค่า ε ที่ใช้มีค่าเป็น 0.0001



ภาพประกอบ 3.5 การวิเคราะห์ด้วยวิธีการ MCS

3.3.3.2 การประเมินค่าพารามิเตอร์ของไวบูลล์โดยใช้เปอร์เซนต์ไทล์

ในการวิจัยนี้ได้มีการศึกษาการใช้วิธีการคำนวณที่มีความเร็วมากขึ้นกว่าวิธีการ MCS ที่ต้องสุ่มคำนวณหลายรอบจนกว่าจะเข้าสู่หาคำตอบ โดยใช้วิธีการประเมินค่าตัวแปรของแบบจำลองไวบูลล์จากเปอร์เซนต์ไทล์ โดยจากสมการแบบจำลองไวบูลล์คือ

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{(-x/\beta)^\alpha}, \quad (3.27)$$

เมื่อ $f(x)$ เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function, PDF) ของตัวแปร x โดยที่ α และ β เป็นค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันแบบไวบูลล์ และฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสม (Cumulative Probability Function, CDF) จะแสดงได้เป็น

$$F(x) = 1 - e^{-(x/\beta)^\alpha}, \quad x > 0. \quad (3.28)$$

ดังนั้น

$$x = \beta[-\ln(1 - F(x))]^{1/\alpha}. \quad (3.29)$$

เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ P และ $(100-P)$ จะสามารถคำนวณได้จาก

$$x_p = \beta \left[-\ln \left(1 - \frac{P}{100} \right) \right]^{1/\alpha}, \quad (3.30)$$

$$x_{(100-P)} = \beta \left[-\ln \left(\frac{P}{100} \right) \right]^{1/\alpha}. \quad (3.31)$$

เมื่อ x_p และ $x_{(100-P)}$ เป็นค่าของตัวแปรในการคำนวณ OPF ที่ P และ $(100-P)$ ตามลำดับ ดังนั้นค่าตัวแปรของไวบูลล์ประกอบด้วย shape และ scale สามารถประเมินได้จาก [N. B. Marks, 2005]

$$\alpha_p = \frac{\ln \left[\frac{\ln \left(\frac{P}{100} \right)}{\ln \left(1 - \frac{P}{100} \right)} \right]}{\ln \left[\frac{x_{(100-P)}}{x_p} \right]}, \quad (3.32)$$

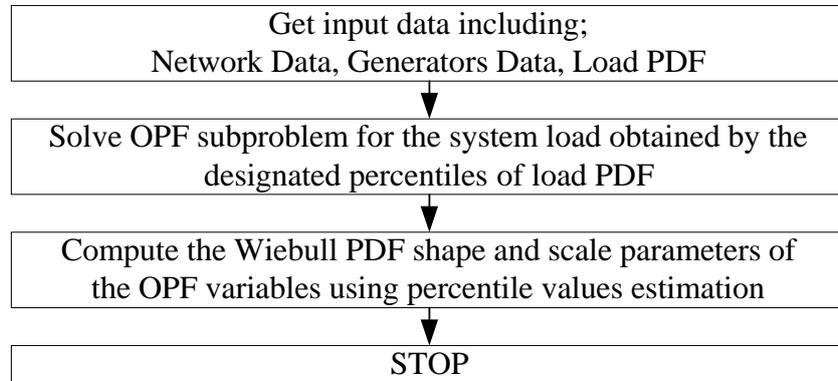
$$\beta_p = \frac{x_{(100-P)}}{\left[-\ln \left(\frac{P}{100} \right) \right]^{1/\alpha_p}}. \quad (3.33)$$

โดยที่ α_p และ β_p เป็นค่า shape และ scale ของฟังก์ชันไวบูลล์ที่ประเมินได้จากเปอร์เซ็นต์ไทล์ P และ $(100-P)$ ทั้งนี้การประเมินพารามิเตอร์ที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ต่างกันจะให้คำตอบที่ต่างกันและขึ้นอยู่กับลักษณะของการกระจายข้อมูล ดังนั้นเพื่อให้การคำนวณเป็นรูปแบบทั่วไปสำหรับกรณีการกระจายของความน่าจะเป็นที่ต่างกัน ค่าพารามิเตอร์จะคำนวณจากค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์การประเมินที่แต่ละเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่กำหนด คือ

$$\alpha = \frac{\sum_{P \in NP} \alpha_p}{\text{Number of } NP \text{ members}}, \quad (3.34)$$

$$\beta = \frac{\sum_{P \in NP} \beta_p}{\text{Number of } NP \text{ members}}. \quad (3.35)$$

เมื่อ NP เป็นจำนวนเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่นำมาคำนวณ กระบวนการคำนวณสามารถแสดงได้
ดังภาพประกอบ 3.6



ภาพประกอบ 3.6 กระบวนการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของไวบูลล์จากเปอร์เซ็นต์ไทล์