

บทที่ 3

การไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด

บทนี้กล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์และแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Power Flow: OPF) ซึ่งจะกล่าวถึงรูปแบบทั่วไปของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ รวมไปถึงข้อจำกัดแบบสมการ (Equality constraints) และข้อจำกัดแบบอสมการ (Inequality constraints) อีกทั้งยังอธิบายถึงวิธีการที่ใช้เพื่อแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด ทั้งวิธีการแบบดั้งเดิม และวิธีการแบบใหม่ซึ่งรวมถึง วิธีการปัญญาประดิษฐ์

3.1 การไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม

3.1.1 รูปแบบปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม

ส่วนสำคัญของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด คือ การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในสถานะคงที่ โดยพิจารณาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ รวมทั้งขอบเขตเงื่อนไขบังคับที่เป็นตัวแปรควบคุม (Control variables) และตัวแปรสถานะ (State variables) รูปแบบโดยทั่วไปที่ใช้สำหรับกำหนดปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด คือ การหาค่าสูงสุด หรือการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สามารถแสดงได้ ดังต่อไปนี้

$$\text{Minimize } f(x,u) \quad (3.1)$$

$$\text{โดย } g(x,u) = 0 \quad (3.2)$$

$$\text{และ } h(x,u) \leq 0 \quad (3.3)$$

เมื่อ $f(x,u)$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

$g(x,u)$ คือ ข้อจำกัดแบบสมการ

$h(x,u)$ คือ ข้อจำกัดแบบอสมการ

x คือ ตัวแปรสถานะ

u คือ ตัวแปรควบคุม

3.1.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่ออธิบายถึงสภาวะการทำงานที่ดีที่สุดของระบบ ในกรณีที่มีหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์สามารถรวมเป็นฟังก์ชันประกอบแบบเดียว (Combined objective function) โดยใช้ค่าน้ำหนัก (Weigh) เป็นตัวกำหนดความสำคัญหรือความสัมพันธ์ของแต่ละฟังก์ชัน ตัวอย่างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่นำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ทางด้านระบบไฟฟ้ากำลังส่วนใหญ่สามารถจำแนกได้ ดังนี้

(1) ต้นทุนต่ำสุดในการผลิต (Minimum cost of Generation)

ฟังก์ชันการลดต้นทุนในการผลิตเป็นฟังก์ชันที่ใช้วิเคราะห์เพื่อหาค่าต่ำสุดในการเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รวมไปถึงต้นทุนทางด้านเชื้อเพลิงที่จะถูกนำมาพิจารณาร่วมด้วย เป็นรูปแบบที่มักจะใช้สำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน (Thermal plant) รูปแบบทั่วไปของฟังก์ชันสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.4) คือ

$$\text{minimize } f = \sum_i C_i(P_{Gi}) \quad (3.4)$$

โดยที่

$$f(x, u) = \sum_{i=1}^{NG} (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) \quad (3.5)$$

เมื่อ C คือ ฟังก์ชันเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ของต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าจริง
 P_{Gi} คือ กำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i
 a_i, b_i, c_i คือ สัมประสิทธิ์ต้นทุนเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนที่ i

(2) ลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบสายส่ง (Minimum active power transmission losses)

วัตถุประสงค์นี้จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คล้ายกับฟังก์ชันการลดต้นทุนในการผลิต คือ กำหนดให้ค่า P_G คงที่ ยกเว้นที่สแล็คบัส ซึ่งเป็นบัสที่จะถูกลดค่ากำลังไฟฟ้าจริง วิธีการนี้จะถูกจำกัดด้วยข้อจำกัดแบบสมการเมื่อพิจารณาแต่เพียงของหม้อแปลงรวมเข้าไปด้วย และคำนึงถึงค่า P_G ที่กำหนดไว้เริ่มต้นจะเป็นองค์ประกอบหลักที่ถูกกำหนดในการหากำลังไฟฟ้าสูญเสียภายในระบบ เพื่อช่วยลดสภาวะการทำงานเริ่มต้น ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดความสูญเสียในสายส่ง [37] มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ดังนี้

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} (P_i P_j + Q_i Q_j) + \beta_{ij} (Q_i P_j - P_i Q_j) \quad (3.6)$$

โดยที่ $\alpha_{ij} = \frac{r_{ij}}{V_i V_j} \cos(\delta_i - \delta_j), \beta_{ij} = \frac{r_{ij}}{V_i V_j} \sin(\delta_i - \delta_j)$

| | | | |
|-------|---------------------------|-----|--|
| เมื่อ | P_{loss} | คือ | กำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ |
| | P | คือ | กำลังไฟฟ้าจริงที่บัสใด ๆ |
| | Q | คือ | กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัสใด ๆ |
| | n | คือ | จำนวนบัสของระบบ |
| | α_{ij}, β_{ij} | คือ | ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสีย (Loss coefficients) |
| | r_{ij} | คือ | ความต้านทานของสายส่ง |
| | V, δ | คือ | ขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสใด ๆ |

(3) การละเมิดต่ำสุด (Minimum violations)

วิธีการที่จะบอกว่าระบบยังคงรักษาสภาพการทำงานแบบปกติในขณะที่สภาวะการทำงาน of ระบบเกินข้อจำกัดแบบสมการที่ตั้งไว้ คือ การนำค่าฟังก์ชันค่าปรับโทษ (Penalty functions) มาพิจารณาร่วม จากวิธีการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันก็จะส่งผลต่อขอบเขตของข้อจำกัดแบบสมการที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งขอบเขตดังกล่าวได้มาจากการคำนวณใหม่หรือทำซ้ำในขั้นตอนการแก้ปัญหาของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด จากตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับค่าที่เกินในระบบ [38] จะพิจารณาจากทั้งสองส่วน คือ แรงดันเกินในแต่ละบัส และพิกัดโหลดสูงสุดของแต่ละระบบ เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงได้ ดังนี้

(3.1) แรงดันเกินของระบบที่สามารถรองรับได้ (Expected voltage violations at each bus)

$$EVL = \sum_{i=1}^n f_{vi} d_{vi} m_{vi} \quad (3.7)$$

| | | | |
|-------|----------|-----|--|
| เมื่อ | f_{vi} | คือ | ความถี่ของการเกิดสภาวะแรงดันเกินในระบบ |
| | d_{vi} | คือ | ช่วงเวลาที่เกิดสภาวะแรงดันเกินในระบบ |
| | m_{vi} | คือ | ขนาดของแรงดันเกินในระบบ |
| | n | คือ | จำนวนครั้งที่เกิดแรงดันเกินในระบบ |

(3.2) พิกัดโหลดเกินในแต่ละวงจร (Expected overload at each circuit)

$$EOL = \sum_{i=1}^n f_{ci} d_{ci} m_{ci} \quad (3.8)$$

| | | | |
|-------|----------|-----|--------------------------------------|
| เมื่อ | f_{ci} | คือ | ความถี่ของการเกิดสภาวะโหลดเกินในวงจร |
| | d_{ci} | คือ | ช่วงเวลาที่เกิดสภาวะโหลดเกินในวงจร |
| | m_{ci} | คือ | ขนาดของโหลดที่เกินในวงจร |
| | n | คือ | จำนวนครั้งที่เกิดสภาวะโหลดเกินในวงจร |

3.1.3 ตัวแปรสถานะและตัวแปรควบคุม

(1) ตัวแปรสถานะ (State variables: x)

ตัวแปรสถานะ คือ ตัวแปรที่ไม่สามารถกำหนดค่าได้ และเปลี่ยนแปลงค่าไปตามการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า โดยพิจารณาจากบัสต่าง ๆ ได้ดังนี้

(1.1) สแล็คบัส ตัวแปรสถานะที่ไม่ทราบค่า คือ กำลังไฟฟ้าจริง (P_G) และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q_G)

(1.2) โหลดบัส ตัวแปรสถานะที่ไม่ทราบค่า คือ ขนาด ($|V|$) และมุม (δ) ของแรงดันไฟฟ้า

(1.3) บัสควบคุมแรงดัน ตัวแปรสถานะที่ไม่ทราบค่า คือ มุมของแรงดันไฟฟ้า (δ) และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q_G)

(2) ตัวแปรควบคุม (Control variables: u)

ตัวแปรควบคุม คือ ตัวแปรที่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าได้ เมื่อแยกพิจารณาตามประเภทของบัสต่าง ๆ ในระบบ สามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ

(1.1) สแล็คบัส (Slack bus) ตัวแปรควบคุมที่ทราบค่า คือ ขนาด ($|V|$) และมุม (δ) ของแรงดันไฟฟ้า

(1.2) โหลดบัส (P-Q bus) ตัวแปรควบคุมที่ทราบค่า คือ กำลังไฟฟ้าจริง (P_D) และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q_D)

(1.3) บัสควบคุมแรงดัน (P-V bus) ตัวแปรที่ทราบค่า คือ กำลังไฟฟ้าจริง (P_G) และขนาดของแรงดันไฟฟ้า ($|V|$)

จากตัวแปรสถานะและตัวแปรควบคุมที่แยกพิจารณาตามประเภทของบัส สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตาราง 3.1 ตัวแปรสถานะและตัวแปรควบคุมของบัสต่างๆ ในระบบ

| บัส | ตัวแปรควบคุม | | | | | | ตัวแปรสถานะ | | | |
|-----------------|--------------|-------|-------|-------|-------|----------|-------------|-------|-------|----------|
| | P_D | Q_D | P_G | Q_G | $ V $ | δ | P_G | Q_G | $ V $ | δ |
| สแล็คบัส | | | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | |
| โหลดบัส | ✓ | ✓ | | | | | | | ✓ | ✓ |
| บัสควบคุมแรงดัน | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | ✓ |

3.1.4 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบทั่วไป

การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นการคำนวณเพื่อหาตัวแปรที่ไม่ทราบค่า เช่น ขนาด (V) และมุม (δ) ของแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น ส่วนประกอบที่ใช้ในการวิเคราะห์และคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม เพื่อใช้คำนวณเพื่อหาตัวแปรที่ไม่ทราบค่าดังที่แสดงไว้ในตารางที่

3.1 จะใช้วิธีการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson power flow solution) โดยสมการสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริก ดังนี้

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (3.9)$$

เมื่อเขียนสมการให้อยู่ในรูปเชิงขั้ว สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.10)

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (3.10)$$

ดังนั้น สมการกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่บัส i คือ

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (3.11)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (3.10) ลงในสมการที่ (3.11) จะได้

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (3.12)$$

จากสมการที่ (3.12) สามารถเขียนแยกส่วนจริงและส่วนของจินตภาพได้ดังสมการที่ (3.13) และ (3.14) ดังนี้

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.13)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.14)$$

รูปแบบสมการของนิวตัน-ราฟสัน เขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.15)

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta |V_i| \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

3.1.5 ข้อจำกัดแบบสมการ

ข้อจำกัดแบบสมการของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม คือ สมการที่ใช้กำหนดปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าทั่ว ๆ ไปที่แสดงความสัมพันธ์ของสมการกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยความสัมพันธ์ของสมการกำลังไฟฟ้าจริงเป็นเงื่อนไขสำหรับทุก ๆ บัส ยกเว้นที่สแล็คบัส และสมการของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเป็นเงื่อนไขสำหรับโหลดบัสทั้งหมด ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.16) และ (3.17) ดังนี้

$$P_{G,i} - P_{D,i} - \sum_{j=1}^{N_B} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (3.16)$$

$$Q_{G,i} - Q_{D,i} + \sum_{j=1}^{N_B} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (3.17)$$

| | | | |
|-------|----------------------|-----|---|
| เมื่อ | $P_{G,i}$ | คือ | กำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i |
| | $Q_{G,i}$ | คือ | กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i |
| | $P_{D,i}$ | คือ | กำลังไฟฟ้าจริงของโหลดที่บัส i |
| | $Q_{D,i}$ | คือ | กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดที่บัส i |
| | N_B | คือ | จำนวนบัสของระบบ |
| | θ_{ij} | คือ | มุมแอดมิตแดนซ์จากบัส i ไปยังบัส j |
| | Y_{ij} | คือ | ขนาดของแอดมิตแดนซ์จากบัส i ไปยังบัส j |
| | V_i, V_j | คือ | แรงดันไฟฟ้าที่บัส i และบัส j ตามลำดับ |
| | δ_i, δ_j | คือ | มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i และบัส j ตามลำดับ |

ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของข้อจำกัดแบบสมการหรือตัวแปรตาม x ได้แก่ ขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัส และมุมของแรงดันที่บัสควบคุมแรงดัน เป็นต้น ส่วนตัวแปรที่เหลือจะเป็นตัวแปรอิสระ u ซึ่งหาได้จากจุดที่ทำงานได้ของระบบ (The system operating point) ได้แก่ กำลังไฟฟ้าจริงและแรงดันไฟฟ้าที่บัสควบคุมแรงดัน, มุมและขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่สแล็คบัส,

และการตั้งค่าเท็ปของหม้อแปลง เป็นต้น ซึ่งตัวแปรทั้งหมดสามารถระบุให้อยู่ในรูปสมการแบบเวกเตอร์ คือ $g(x, u) = 0$

3.1.6 ข้อจำกัดแบบอสมการ

ข้อจำกัดแบบอสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดสะท้อนให้เห็นถึงขีดจำกัดทางด้านกายภาพของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง ที่ถูกกำหนดขึ้นเพื่อบอกว่าระบบจะยังคงทำงานได้ตามปกติและมีความปลอดภัย ข้อจำกัดแบบอสมการส่วนใหญ่ที่นำมากำหนดขอบเขต สามารถแสดงได้ ดังต่อไปนี้

(1) กำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i

$$P_{G,i}^{\min} \leq P_{G,i} \leq P_{G,i}^{\max} \quad (3.18)$$

เมื่อ $P_{G,i}$ คือ กำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i
 $P_{G,i}^{\min}$ คือ พิกัดกำลังไฟฟ้าต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i
 $P_{G,i}^{\max}$ คือ พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i

(2) กำลังไฟฟารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i

$$Q_{G,i}^{\min} \leq Q_{G,i} \leq Q_{G,i}^{\max} \quad (3.19)$$

เมื่อ $Q_{G,i}$ คือ กำลังไฟฟารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i
 $Q_{G,i}^{\min}$ คือ พิกัดกำลังไฟฟารีแอกทีฟต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i
 $Q_{G,i}^{\max}$ คือ พิกัดกำลังไฟฟารีแอกทีฟสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i

(3) ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (3.20)$$

เมื่อ V_i คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส i
 V_i^{\min} คือ พิกัดแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่บัส i
 V_i^{\max} คือ พิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่บัส i

(4) กำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบ จะต้องไม่เกินกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สายส่งของระบบสามารถรับได้

$$|S_{Li}| \leq S_{Li}^{\max} \quad (3.21)$$

เมื่อ $|S_{Li}|$ คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลในสายส่ง i

S_{Li}^{\max} คือ พิกัดกำลังไฟฟ้าปรากฏสูงสุดที่ไหลผ่านสายส่ง

(5) การตั้งค่าแท็บของหม้อแปลงที่บัส i

$$t_i^{\min} \leq t_i \leq t_i^{\max} \quad (3.22)$$

เมื่อ t_i คือ แท็บของหม้อแปลงไฟฟ้าที่บัส i
 t_i^{\min} คือ พิกัดการตั้งค่าของแท็บหม้อแปลงต่ำสุดที่บัส i
 t_i^{\max} คือ พิกัดการตั้งค่าของแท็บหม้อแปลงสูงสุดที่บัส i

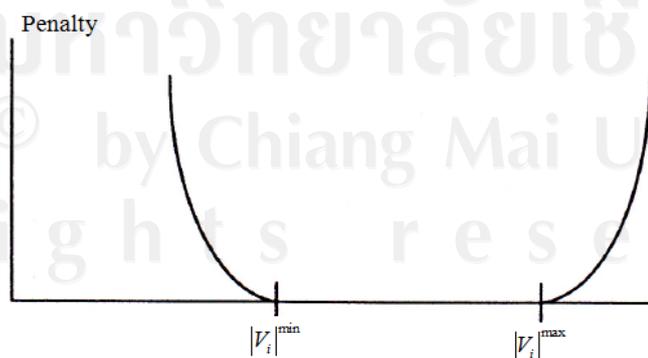
(6) กระแสสูงสุดที่ไหลได้ในระบบ

$$I_i \leq I_i^{\max} \quad (3.23)$$

เมื่อ I_i คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง i ของระบบ
 I_i^{\max} คือ พิกัดของกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลในสายส่ง i

3.1.7 ฟังก์ชันค่าปรับโทษ (Penalty functions)

ค่าฟังก์ชันปรับโทษถูกนำไปประยุกต์ใช้สำหรับข้อจำกัดแบบอสมการของระบบ การกำหนดค่าเริ่มต้นของค่าน้ำหนักปรับโทษจะแตกต่างกันออกไปตามระบบที่เลือกพิจารณา การเลือกค่าฟังก์ชันปรับโทษที่เหมาะสมจะส่งผลให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าอยู่ช่วงที่เหมาะสม ในการออกแบบตรรกะที่ใช้ในการเลือกหาค่าฟังก์ชันปรับโทษนั้นค่อนข้างทำได้ยาก แต่วิธีการที่ง่ายและสามารถทำได้ คือ ทดสอบการรันแบบสุ่มเพื่อหาค่าเริ่มต้นจากระบบทดสอบ ซึ่งจะช่วยให้ได้ค่าที่เหมาะสมออกมา โดยค่าฟังก์ชันปรับโทษที่มีลักษณะการทำงานที่ดี ได้แก่ ขนาดแรงดันไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้าจริง, และกระแสที่ไหลในระบบ เป็นต้น ซึ่งดีกว่าค่าฟังก์ชันปรับโทษของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและฟังก์ชันปรับโทษของกำลังไฟฟ้าปรากฏ



ภาพ 3.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับขอบเขตของขนาดแรงดันไฟฟ้า

ข้อจำกัดแบบอสมการทุก ๆ ค่า ยกเว้นตัวแปรควบคุมจะใช้วิธีการคุณค่าฟังก์ชันปรับโทษ โดยรูปแบบของค่าปรับโทษสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.24) ดังนี้ [39]

$$w = w(h^2) \quad (3.24)$$

โดยที่ $w > 0$ เมื่อ w คือ ค่าน้ำหนักปรับโทษ

ค่าน้ำหนักปรับโทษจะถูกเพิ่มเข้าไปในฟังก์ชันวัตถุประสงค์เมื่อข้อจำกัดแบบอสมการ h นั้นเกินขอบเขตที่กำหนด ยกตัวอย่างเช่น การใช้ค่าน้ำหนักปรับโทษกับขนาดของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัส [40] สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.25)

$$h(|V_i|) = \begin{cases} K(|V_i| - |V_i|^{\min})^2 & \text{for } |V_i| < |V_i|^{\min} \\ 0 & \text{for } V \text{ within limits} \\ K(|V_i|^{\max} - |V_i|)^2 & \text{for } |V_i| > |V_i|^{\max} \end{cases} \quad (3.25)$$

ฟังก์ชันค่าปรับโทษที่แสดงในภาพที่ 3.1 อธิบายได้ว่า ในขั้นตอนวิธีการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมภายใต้ข้อจำกัดแบบอสมการของแรงดันไฟฟ้า สามารถทำได้โดยการคุณค่าน้ำหนักเข้าไปในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าฟังก์ชันปรับโทษที่ได้จะมีค่ามากเกินขอบเขตที่กำหนด เมื่อขนาดแรงดันไฟฟ้ามีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าพิสัยของแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด คือ $|V_i|^{\min}$ และ $|V_i|^{\max}$ ดังนั้น ในขั้นตอนการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมจะพยายามบังคับให้การคำนวณอยู่ภายในขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดโดยการลดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมแบบดั้งเดิม ต้องพิจารณาถึงขนาดของระบบ, ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ รวมไปถึงข้อจำกัดแบบสมการและข้อจำกัดแบบอสมการที่เหมาะสม เนื่องจากปัญหาที่วิเคราะห์โดยทั่วไปเป็นปัญหาแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ที่มีความซับซ้อนในการหาคำตอบ จึงไม่สามารถใช้วิธีการทางพีชคณิตมาคำนวณเพื่อหาคำตอบได้ ดังนั้น ในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าจึงต้องใช้วิธีการเชิงตัวเลข (Numerical method) หรือวิธีปัญญาประดิษฐ์เข้ามาเพื่อช่วยวิเคราะห์และแก้ปัญหา ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะอธิบายไว้ในหัวข้อถัดไป

3.2 วิธีการแก้ปัญหาลำหรับการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการที่ใช้ในการแก้ปัญหาลำหรับการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด โดยแบ่งออกเป็นสองวิธีการหลักๆ คือ วิธีการแบบดั้งเดิม (Conventional methods) เช่น ระเบียบวิธีการโปรแกรมแบบไม่เป็นเชิงเส้น, ระเบียบวิธีการ โปรแกรมแบบควอดราติก, ระเบียบวิธีของนิวตัน, และระเบียบวิธีการโปรแกรมแบบเชิงเส้น เป็นต้น ส่วนอีกวิธีหนึ่ง คือ วิธีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence methods) เช่น วิธีการทางพันธุกรรม, กลยุทธ์เชิงวิวัฒนาการ, และการโปรแกรมเชิงวิวัฒนาการ เป็นต้น โดยทั้งสองวิธีสามารถอธิบายได้ ดังต่อไปนี้

3.2.1 วิธีการแบบดั้งเดิม

การประยุกต์ใช้เทคนิคเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาลำหรับการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้เพื่อหาค่าตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยพิจารณาตามข้อจำกัดและลักษณะทางกายภาพของระบบรวมด้วย โดยวิธีการแบบดั้งเดิมส่วนใหญ่มีจุดมุ่งหมายเพื่อลดต้นทุนในการดำเนินงาน โดยพิจารณาจากข้อจำกัดของสมดุลกำลังไฟฟ้า ทั้งกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ในเทอมของขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งประเภทของเทคนิคการคำนวณที่ถูกใช้ในการแก้ปัญหาลำหรับการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม สามารถจำแนกออกเป็นสี่วิธีการ ดังนี้

(1) ระเบียบวิธีการ โปรแกรมแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Programming method: NLP)

(1.1) รูปแบบฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของวิธีการ โปรแกรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น

(1.2) การกำหนดเขตของข้อจำกัดในวิธีการนี้จะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทั้งข้อจำกัดแบบสมการและข้อจำกัดแบบอสมการ

(1.3) ค่าความโค้ง (Convexity) ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะส่งผลกระทบต่อความยากในการหาค่าตอบมากกว่าปัญหาที่มีรูปแบบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นแบบเชิงเส้น

(2) ระเบียบวิธีการ โปรแกรมแบบควอดราติก (Quadratic Programming method: QP)

(2.1) การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของวิธีการ โปรแกรมแบบควอดราติก จะอยู่ในรูปของฟังก์ชันกำลังสอง (Quadratic function)

(2.2) การกำหนดเซตของข้อจำกัดในวิธีการนี้ ทั้งข้อจำกัดแบบสมการและข้อจำกัดแบบอสมการจะต้องเป็นรูปแบบเชิงเส้น

(2.3) ข้อดีของวิธีการนี้ คือ สามารถแก้ปัญหาที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นสมการกำลังสอง และรองรับปัญหาที่มีข้อจำกัดแบบสมการเป็นแบบเชิงเส้นได้ดี [41]

(3) ระเบียบวิธีของนิวตัน (Newton's method)

(3.1) รูปแบบฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของวิธีการแบบนิวตันจะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น

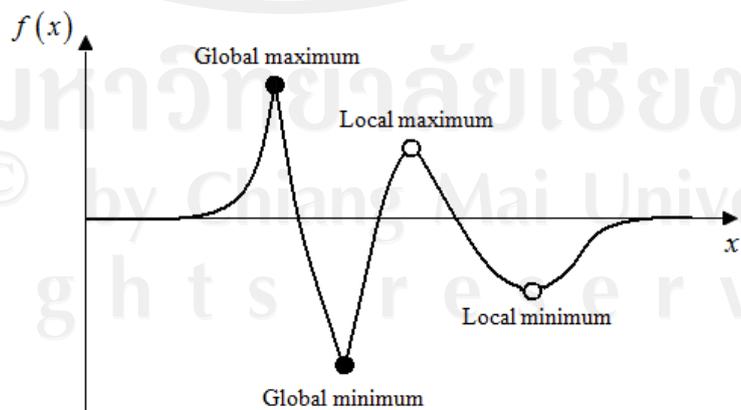
(3.2) การหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์จาโคเบียน (Jacobian matrix) และใช้วิธีการทำซ้ำ (Iterative methods) ในการแก้ปัญหของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

(3.3) ข้อดีของวิธีการนี้ คือ สามารถให้ผลในการหาค่าตอบที่รวดเร็วมาก แต่ก็ยังมีความยากในการพิจารณาปัญหาที่มีข้อจำกัดแบบอสมการ [41]

(4) ระเบียบวิธีการโปรแกรมแบบเชิงเส้น (Linear Programming method: LP)

(4.1) การกำหนดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของวิธีการนี้ จะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปแบบที่เป็นเชิงเส้น

(4.2) รูปแบบของข้อจำกัดทั้งส่วนของข้อจำกัดแบบสมการ และข้อจำกัดแบบอสมการ จะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปแบบที่เป็นเชิงเส้นเท่านั้น



ภาพ 3.2 จุดที่ดีที่สุดของทั้งหมดและจุดที่ดีที่สุดแบบเฉพาะส่วนของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

(4.3) ในกรณีที่ต้องการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์และข้อจำกัดที่มีรูปแบบไม่เป็นเชิงเส้น จะต้องใช้วิธีการทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์อยู่ในรูปแบบที่เป็นเชิงเส้น (Linearization) ก่อน วิธีการนี้จึงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย [41]

จากวิธีการแบบดั้งเดิมที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่ามีข้อดี คือ สามารถใช้แก้ปัญหาที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในรูปแบบเชิงเส้นและรูปแบบไม่เป็นเชิงเส้นได้ รวมทั้งให้ผลที่ผู้เข้าหาคำตอบได้อย่างแม่นยำ แต่เมื่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์และข้อจำกัดมีความซับซ้อนมากขึ้นวิธีการแบบดั้งเดิมจึงไม่สามารถแก้ปัญหาได้ [42]-[43] ดังนั้น จึงมีแนวคิดที่จะนำวิธีการใหม่ ๆ เข้ามาช่วยแก้ปัญหา โดยวิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย คือ วิธีการปัญหาประติมากรรม ซึ่งมีความยืดหยุ่นสูงในการหาคำตอบให้ได้ค่าที่ดีที่สุดของทั้งหมด (Global optimum) ของฟังก์ชัน โดยแบ่งออกเป็นสองลักษณะ คือ ค่าสูงสุดของทั้งหมด (Global maximum) และค่าต่ำสุดของทั้งหมด (Global minimum) โดยฟังก์ชันที่ต้องการหาอาจมีหลายจุดที่มีลักษณะคล้ายจุดที่สูงที่สุด หรือค่าสูงสุดเฉพาะส่วน (Local maximum) และคล้ายจุดที่ต่ำที่สุด หรือค่าต่ำสุดเฉพาะส่วน (Local minimum) ดังแสดงในภาพที่ 3.2 ในการแยกจุดที่ดีที่สุดทั้งหมดออกจากจุดที่ดีที่สุดเฉพาะส่วนนั้นทำได้ยากเมื่อใช้วิธีการแบบดั้งเดิม ดังนั้น จึงต้องนำวิธีการปัญหาประติมากรรมเข้ามาเพื่อช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว โดยรายละเอียดเบื้องต้นของวิธีปัญหาประติมากรรมจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3.2.2 วิธีปัญหาประติมากรรม

(1) วิธีการทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA)

วิธีการทางพันธุกรรมเป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยใช้หลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติ และหลักการทางสายพันธุ์ วิธีการทางพันธุกรรมเป็นการคำนวณอย่างหนึ่งที่สามารถกล่าวได้ว่า มีวิวัฒนาการอยู่ในขั้นตอนของการค้นหาคำตอบ และได้รับการจัดให้เป็นวิธีหนึ่งในกลุ่มของการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Computing) ซึ่งปัจจุบันเป็นที่ยอมรับในประสิทธิภาพ และมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด วัฏจักรของวิธีการทางพันธุกรรมโดยธรรมชาติแล้วประกอบไปด้วยสามกระบวนการที่สำคัญได้แก่ การคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection), ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (Genetic operation), และการแทนที่ (Replacement) เพื่อใช้ในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด

(2) กลยุทธ์เชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Strategies: ES)

กลยุทธ์เชิงวิวัฒนาการ เป็นกระบวนการที่จำลองการวิวัฒนาการแบบธรรมชาติอีกวิธีหนึ่ง โดยมีความแตกต่างไปจากวิธีการทางพันธุกรรม ตรงที่ได้รับการออกแบบสำหรับแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยเฉพาะ ข้อแตกต่างระหว่างกลยุทธ์เชิงวิวัฒนาการ กับหลักการคำนวณเชิงวิวัฒนาการทั่วไป คือ การเปลี่ยนแปลงคำตอบของระบบจะมาจากขั้นตอนการกลายพันธุ์ (Mutation) เท่านั้น ซึ่งจะได้รับการยอมรับก็ต่อเมื่อ ผลของการทำการกลายพันธุ์นั้นทำให้ค่าความเหมาะสม (Fitness) ของคำตอบที่ดีขึ้น กลยุทธ์เชิงวิวัฒนาการยังมีข้อแตกต่างอีกหนึ่งอย่าง คือ ประชากรรุ่นลูกสามารถเกิดจากประชากรต้นกำเนิดมากกว่าสองคำตอบของระบบได้ กลยุทธ์เชิงวิวัฒนาการสามารถใช้แก้ปัญหาได้หลากหลาย เช่น ปัญหาแบบมีเงื่อนไขบังคับ (Constrained), ปัญหาแบบไม่มีเงื่อนไขบังคับ (Unconstrained), และปัญหาแบบไม่เป็นเชิงเส้น เป็นต้น

(3) การโปรแกรมเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Programming: EP)

การโปรแกรมเชิงวิวัฒนาการเป็นกลยุทธ์การเพิ่มประสิทธิภาพแบบสโตคาสติก (Stochastic optimization strategy) ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับวิธีการทางพันธุกรรมและกลยุทธ์เชิงวิวัฒนาการ แม้ว่าทั้งสองจะมีวิธีการหาค่าตอบอย่างอิสระ การโปรแกรมเชิงวิวัฒนาการเป็นวิธีการที่มีประโยชน์ที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น ๆ ซึ่งวิธีการและขั้นตอนของการโปรแกรมเชิงวิวัฒนาการที่จะใช้ในการแก้ปัญหาจะกล่าวถึงในบทถัดไป

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม คือ การวิเคราะห์เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ได้ตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุดหรือต่ำสุดที่กำหนด และสอดคล้องกับข้อจำกัดแบบสมการและข้อจำกัดแบบอสมการที่นำมาพิจารณาร่วม อีกทั้งวิธีการที่จะนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมนั้นต้องมีความยืดหยุ่น จึงต้องนำวิธีการปัญญาประดิษฐ์เข้ามาเพื่อช่วยหาค่าตอบ ดังนั้น ในบทถัดไปจะนำเสนอวิธีการปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้ในการหาค่าตอบของปัญหาที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งที่ไม่เป็นเชิงเส้นและไม่ต่อเนื่องได้ ซึ่งวิธีการดังกล่าวมีวิธีการค้นหาคำตอบที่คล้ายคลึงกับวิธีการสโตคาสติกอื่น ๆ คือ มีการเริ่มต้นกระบวนการหาค่าตอบโดยการกำหนดข้อจำกัดหรือพารามิเตอร์บางตัวจากการสุ่ม ซึ่งจะทำให้มีโอกาสหาค่าที่เหมาะสมที่สุดได้ดียิ่งขึ้น