บทที่ 5

การลดกำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง

5.1 คำนำ

การปฏิบัติงานในระบบไฟฟ้ากำลัง ได้ให้ความสนใจในเรื่องการวางแผนการปฏิบัติงานให้มีคุณภาพและประหยัดมากที่สุด กล่าวคือจะต้องมีความแน่นอนในการรักษาระดับแรงดันในระบบไฟฟ้าให้มีค่าอยู่ในขีดจำกัด(Limit) มาตรฐานตามที่กำหนดไว้ การผลิตและการจ่ายกำลังไฟฟ้าต้องพยายามให้เกิดกำลังสูญเสียน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยใช้หลักการ การจัดสรรกำลังรีแอกทีฟ ซึ่งได้กล่าวมาแล้วว่า การจัดสรรกำลังรีแอกทีฟอย่างเหมาะสมสามารถลดกำลังสูญเสียของระบบไฟฟ้ากำลังให้น้อยลงได้ พร้อมทั้งยังรักษาระดับแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังให้คงที่ควบคู่กันไป

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงการลดกำลังสูญเสียของระบบไฟฟ้ากำลังโดยการจัดสรรกำลังรีแอกทีฟ ซึ่งสามารถทำได้โดยการปรับขนาดของแรงดันที่บัสควบคุมแรงดัน และบัสอ้างอิง แทป (Tap) ของหม้อแปลงและการติดอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟเข้าไปที่โหลดบัสที่เหมาะสม การจัดสรรกำลังรีแอกทีฟมีลักษณะเป็นปัญหา Optimization โดยมีฟังก์ชั่นเป้าหมาย คือ การทำให้กำลังสูญเสียของระบบมีค่าต่ำสุด และ เป็นไปตามสมการบังคับ (Constraints) คือระบบมีการรักษาระดับแรงดันของโหลดบัส และมีการจ่ายกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ให้มีค่าอยู่ในขีดจำกัด(Limit) ที่กำหนดไว้ ปัญหาการลดกำลังสูญเสียของระบบไฟฟ้ากำลังนี้ใช้เทคนิคการโปรแกรมเชิงเส้นตรง มาช่วยในการหาผลตอบที่เหมาะที่สุด(Optimum Solution)

5.2 รูปแบบแทนระบบปัญหา การออปติไมซ์กำลังงานสูญเสียในระบบ

ปัญหาการลดกำลังสูญเสียให้น้อยที่สุดนี้ จะต้องมีการจัดรูปแบบโครงสร้างระบบปัญหาให้เหมาะสมกับการใช้เทคนิคการโปรแกรมเชิงเส้นตรงที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ซึ่งประกอบ

ด้วยฟังก์ชั่นเป้าหมาย (Objective Function) และ สมการแสดงขอบข่าย (Constraints) และตัวแปรต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. สมการเป้าหมาย (Objective Function) หรือ (f(u,x))

สมการเป้าหมาย คือ การทำกำลังงานสูญเสียของระบบไฟฟ้าให้มีค่าน้อยที่สุด สามารถเขียนเป็นรูปสมการดังนี้

$$f(u,x) = \text{Min } P_L \qquad (5.1)$$

2. ตัวแปรควบคุมของระบบ (Controlled Variables) หรือ [X]

ตัวแปรควบคุมของระบบที่ใช้ในสมการลดกำลังงานสูญเสียให้น้อยที่สุดนี้มีอยู่ 3 ตัวแปรคือ

2.1 การเปลี่ยนแปลงแทป (Tap) หรืออัตราส่วนการแปลง (Transformation ratio) ของหม้อแปลงไฟฟ้า

2.2 ขนาดของแรงดันที่บัสควบคุมแรงดันและบัสอ้างอิง (V_{Gi} , i = SW+PV Bus)

2.3 กำลังรีแอกทีฟที่ผลิตขึ้นจากบัสที่ต่อกับอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟ (Switchable VAR Sources, Q_{xi})

3. ตัวแปรสถานะของระบบ (State Variables) หรือ [X]

ในสมการเป้าหมายนี้ ใช้ตัวแปรสถานะอยู่ 2 ตัวแปร คือ

3.1 ขนาดของแรงดันที่โหลดบัส (V_{Li} , i = PQ Bus)

3.2 กำลังรีแอกทีฟที่ผลิตของบัสควบคุมแรงดันและบัสอ้างอิง (Q_{Gi} , i = SW+PV bus)

4. เงื่อนไขบังคับแบบอสมการของตัวแปรควบคุมของระบบ หรือ (h,(u,x))

คือขีดจำกัด (Limit) ของตัวแปรควบคุมต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง คือการปรับแทปของหม้อแปลง (T_{ij}) ขนาดของแรงดันที่บัสควบคุมแรงดันและบัสอ้างอิง (V_{Gi}, i = SW + PV Bus) และกำลังรีแอกทีฟที่ผลิตจากบัสที่ต่อกับอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอคทีฟ (Q_{xi}) โดยการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมต่าง ๆ จะมีค่าไม่เกินค่าสูงสุดหรือต่ำสุด ซึ่งเขียนในรูปอสมการดังนี้

$$T_{ijmin} \leq T_{ij} \leq T_{ijmax} \qquad (5.2)$$

$$V_{Gimin} \leq V_{Gi} \leq V_{Gimax} \qquad (5.3)$$

$$Q_{ximin} \leq Q_{xi} \leq Q_{ximax} \qquad (5.4)$$

5. เงื่อนไขบังคับแบบอสมการของตัวแปรสถานะของระบบ (h_2 (u,x))

คือขีดจำกัด (Limit) ของตัวแปรสถานะของระบบไฟฟ้ากำลัง คือขนาดของแรงดันที่โหลดบัส (V_{Li}, i = PQ Bus) และกำลังรีแอกทีฟที่ผลิตของบัสควบคุมแรงดันและบัสอ้างอิง (Q_{Gi}, i = SW+PV Bus) หรือเขียนในรูปอสมการได้ เป็น

$$V_{Li\min} \leq V_{Li} \leq V_{Li\max} \quad (i = \text{PQ Bus}) \tag{5.5}$$

$$Q_{Gi\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi\max} \quad (i = \text{SW+PV Bus}) \tag{5.6}$$

5.3 รายละเอียดของรูปแบบแทนระบบปัญหาของการลดกำลังการสูญเสียให้มีค่าน้อยที่สุด

5.3.1 สมการเป้าหมาย (Objective Function)

ในเรื่องการวางแผนการปฏิบัติงานของระบบไฟฟ้า (Power System Planning) การผลิตและการจ่ายกำลังไฟฟ้าต้องพยายามให้มีค่าของกำลังสูญเสีย และเงินลงทุนในการปฏิบัติงานมีค่าต่ำสุดเท่าที่จะทำได้ เราสามารถเขียนสมการของเงินลงทุนทั้งหมดของระบบโดย รวมกับกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในการจ่ายกำลังงานไฟฟ้าได้ดังนี้

$$f = P_L * K1 + \text{Investment Cost} \tag{5.7}$$

เมื่อ f คือ ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการผลิตกำลังงานไฟฟ้า (เงินลงทุนรวมกับกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้น)

K1 คือ แฟคเตอร์การเปลี่ยนค่ากำลังงานสูญเสียของระบบ (MW) ให้เป็นจำนวนเงิน (Baht/MW)

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เราศึกษาถึงการลดกำลังสูญเสียของระบบอย่างพื้นฐานเท่านั้น เราจึงถือว่าฟังก์ชั่นของเงินลงทุน (Investment Cost) มีค่าคงที่ และให้แฟคเตอร์ K1 มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นสมการเป้าหมาย(Objective Function)ของ ปัญหาการจัดสรรกำลังรีแอกทีฟหรือการลดกำลังการสูญเสียของระบบ (P_L) สามารถเขียนได้ในรูปดังต่อไปนี้

$$f_q (U_q, X) = P_L \tag{5.8}$$

แต่ค่าของกำลังสูญเสียของระบบ (P_L) หาได้จากผลรวมของกำลังจริงของทุกบัส หรือ

$$P_L = \sum_{i}^{NB} P_i$$

$$= P_{sw} + \sum_{i \neq SW}^{NB} P_i \qquad (5.9)$$

เนื่องจากโหลด (P_{Di}) มีค่าคงที่ และในการจัดสรรกำลังรีแอกทีฟเราจะกำหนดให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายกเว้น ที่บัสอ้างอิง (P_{Gi} ,i≠ SW) มีค่าคงที่ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของ P_{sw} จะมีผลเหมือนกับการเปลี่ยนแปลงของ P_L ของระบบทั้งหมด เพราะฉะนั้น เราจึงสามารถใช้ค่ากำลังจริงที่บัสอ้างอิงมาเป็น Objective Function ของการจัดสรรกำลังรีแอกทีฟได้ กล่าวคือ

$$f_q (U_q, X) = P_{sw} \qquad (5.10)$$

ดังได้กล่าวมาแล้วว่า ตัวแปรควบคุมของระบบที่มีผลต่อการลดกำลังสูญเสียมีอยู่ 3 ชนิดคือ

1. การปรับแทปของหม้อแปลง (T_{ij})
2. ขนาดแรงดันที่บัสควบคุมแรงดันและบัสอ้างอิง (V_{Gi}, i=SW+PV Bus)
3. กำลังรีแอกทีฟที่ผลิตจากอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟ(Switchable VAR Sources)

เนื่องจากการทำ Minimization คือการหาค่าตัวแปรควบคุมของระบบ [U] ที่ทำให้ Objective Function คือกำลังสูญเสียของระบบมีค่าน้อยที่สุด แต่เนื่องจากสมการเป้าหมายจริงๆ แล้ว เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear equation) การวิเคราะห์สมการเป้าหมายโดยใช้เทคนิคการโปรแกรมเชิงเส้นตรง จึงต้องพิจารณาสมการในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นช่วงสั้นๆ ซึ่งเราใช้สัญญลักษณ์ Δ แทนการเปลี่ยนแปลงตัวแปรควบคุมในช่วงระยะเวลาสั้นๆ และมีความสัมพันธ์อย่างหนึ่งกับการเปลี่ยนแปลงกำลังสูญเสียของระบบ ความสัมพันธ์นี้คือค่าสัมประสิทธิ์ความไวของกำลังสูญเสีย (Loss Sensitivity) นั่นเอง เราต้องเปลี่ยนสมการเป้าหมายใหม่ให้อยู่ในรูปค่าความไวของกำลังสูญเสีย และการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมของระบบ กล่าวคือ

Minimize

$$\Delta P_L = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial t_{ij}} & \frac{\partial P_L}{\partial V_{G1}} & \cdots & \frac{\partial P_L}{\partial V_{Gm}} & \frac{\partial P_L}{\partial Q_{x1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta t_{ij} \\ \Delta V_{G1} \\ \Delta V_{Gm} \\ \Delta Q_{x1} \end{bmatrix} \qquad (5.11)$$

ดังได้กล่าวมาแล้วว่า อนุพันธ์ของ P_{sw} หรือ P_1 จะมีผลเหมือนกับอนุพันธ์ของ P_L เราจึงสามารถเขียนสมการได้ใหม่ได้ดังนี้

Minimize

$$\Delta P_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial t_{ij}} & \frac{\partial P_1}{\partial V_{G1}} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial V_{Gm}} & \frac{\partial P_1}{\partial Q_{x1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta t_{ij} \\ \Delta V_{G1} \\ \Delta V_{Gm} \\ \Delta Q_{x1} \end{bmatrix} \qquad (5.12)$$

เมื่อบัสที่ 1 คือบัสอ้างอิง (Reference Bus หรือ Swing Bus)

บัสที่ 2,....,m คือ บัสที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Bus) หรือบัสควบคุมแรงดันนั่นเอง

และสำหรับตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

$\partial P_1/\partial t_{ij}$ คือค่าความไวของการสูญเสีย (Loss Sensitivity) อันเนื่องมาจากการปรับแทปของหม้อแปลงที่ต่ออยู่ระหว่างบัส i และบัส j

$\partial P_1/\partial V_{Gi}$ คือค่าความไวของการสูญเสีย (Loss Sensitvity) อันเนื่องมาจากขนาดแรงดันที่บัสควบคุมแรงดันและบัสอ้างอิง (V_i, i=SW+PV Bus)

และ$\partial P_1/\partial Q_{xi}$ คือค่าความไวของการสูญเสีย (Loss Sensitivity) อันเนื่องมาจากกำลังวีแอกทีฟที่ผลิตมาจากอุปกรณ์จ่ายกำลังวีแอกทีฟ (Switchable VAR

Source) ซึ่งต่ออยู่ที่บัส x_1

และ Δt_{ij} , ΔV_{Gi} , ΔQ_{xi} คือการเปลี่ยนแปลงตัวแปรควบคุมทั้ง 3 ชนิด ตามลำดับ กล่าวโดยสรุปฟังก์ชั่นเป้าหมาย คือการลดค่ากำลังงานสูญเสีย ซึ่งสามารถวิเคราะห์แทนได้ด้วยกำลังจริงของบัสอ้างอิง (ΔP_1) โดยอาศัยการแทนค่าความเปลี่ยนแปลง ของตัวแปรควบคุมของระบบที่เหมาะสมที่สุด ที่จะทำให้กำลังงานสูญเสียของระบบมีค่าน้อยที่สุด

สำหรับรายละเอียดค่าความไวของการสูญเสีย(Loss Sensitivity)สามารถหามาได้จากสมการโหลดโฟลว์และจาโคเบียนเมทริกซ์ ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวต่อไป

5.3.2 เงื่อนไขบังคับ (Constraints)

5.3.2.1 เงื่อนไขบังคับแบบอสมการของตัวแปรควบคุมของระบบ

จากหัวข้อ 5.2 ที่ได้กล่าวมาแล้วว่า เงื่อนไขบังคับของตัวแปรควบคุมคือ ขีดจำกัด (Limit) ของระบบต่างๆ นั่นเอง แต่เนื่องจากตัวแปรในสมการเป้าหมายอยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุม (Δt_{ij} , ΔV_{Gi} และ ΔQ_{xi}) ดังนั้นจากสมการที่ (5.2) ,(5.3) และ (5.4) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\Delta T_{ijmin} \leq \Delta T_{ij} \leq \Delta T_{ijmax} \qquad (5.13)$$

$$\Delta V_{Gimin} \leq \Delta V_{Gi} \leq \Delta V_{Gimax} \quad (i= SW + PV\ Bus) \qquad (5.14)$$

$$\Delta Q_{ximin} \leq \Delta Q_{xi} \leq \Delta Q_{ximax} \qquad (5.15)$$

ค่าต่างๆ เหล่านี้ สามารถหามาได้จากสมการที่ (5.2) ,(5.3) และ (5.4) เช่นกัน โดยพิจารณาจากขีดจำกัดของตัวแปรนั้น ๆคือ

$$\Delta T_{ijmax} = T_{ijmax} - T_{ij} \qquad (5.16)$$

$$\Delta T_{ijmin} = T_{ijmin} - T_{ij} \qquad (5.17)$$

$$\Delta V_{Gimax} = V_{Gimax} - V_{Gi} \qquad (5.18)$$

$$\Delta V_{Gimin} = V_{Gimin} - V_{Gi} \qquad (5.19)$$

$$\Delta Q_{ximax} = Q_{ximax} - Q_{xi} \qquad (5.20)$$

$$\Delta Q_{ximin} = Q_{ximin} - Q_{xi} \qquad (5.21)$$

5.3.2.2 เงื่อนไขบังคับแบบอสมการของตัวแปรสถานะของระบบ

เงื่อนไขบังคับของตัวแปรสถานะของระบบ จำเป็นจะต้องเปลี่ยนรูปใหม่ด้วยเหตุผล

เช่นเดียวกันกับข้อ 5.3.2.1 ดังนั้นจากสมการ (5.5) และ (5.6) สามารถเขียนได้ใหม่ คือ

$$\Delta V_{Limin} \leq \Delta V_{Li} \leq \Delta V_{Limax} \quad (i= PQ\ Bus) \qquad (5.22)$$

$$\Delta Q_{Gimin} \leq \Delta Q_{Gi} \leq \Delta Q_{Gimax} \quad (i= SW + PV\ Bus) \qquad (5.23)$$

โดย ค่าต่างๆ เหล่านี้ สามารถหามาได้จากสมการ (5.5) และ (5.6) หรือ

$$\Delta V_{Limax} = V_{Limax} - V_{Li} \qquad (5.24)$$

$$\Delta V_{Limin} = V_{Limin} - V_{Li} \qquad (5.25)$$

$$\Delta Q_{Gimax} = Q_{Gimax} - Q_{Gi} \qquad (5.26)$$

$$\Delta Q_{Gimin} = Q_{Gimin} - Q_{Gi} \qquad (5.27)$$

หลังจากการแปลงปัญหา (Problem Transformation) และเงื่อนไขบังคับของอสมการ รูปแบบแทนระบบปัญหาของการลดกำลังสูญเสียของระบบให้น้อยที่สุด โดยใช้เทคนิคการโปรแกรมเชิงเส้นตรง ซึ่งมีสมการเป้าหมาย และสมการบังคับ ของระบบดังนี้

สมการเป้าหมาย

Minimize

$$\Delta P_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial t_{ij}} & \frac{\partial P_1}{\partial V_{G1}} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial V_{Gm}} & \frac{\partial P_1}{\partial Q_{x1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta t_{ij} \\ \Delta V_{G1} \\ \Delta V_{Gm} \\ \Delta Q_{x1} \end{bmatrix} \qquad (5.28)$$

อสมการบังคับหรือสมการขอบข่าย

$$\Delta T_{ijmin} \leq \Delta T_{ij} \leq \Delta T_{ijmax}$$

$$\Delta V_{Gimin} \leq \Delta V_{Gi} \leq \Delta V_{Gimax} \quad (i= SW + PV\ Bus)$$

$$\Delta Q_{ximin} \leq \Delta Q_{xi} \leq \Delta Q_{ximax}$$

$$\Delta V_{Limin} \leq \Delta V_{Li} \leq \Delta V_{Limax} \quad (i= PQ\ Bus)$$

$$\Delta Q_{Gimin} \leq \Delta Q_{Gi} \leq \Delta Q_{Gimax}$$

ระบบปัญหาของการลดกำลังงานสูญเสียนี้ได้นำไปใช้ในการคำนวณ หาค่าตัวแปรควบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คุมของระบบ (Δt_{ij} , ΔV_{Gi} , ΔQ_{xi}) ที่เหมาะสมที่ทำให้ Objective Function คือกำลังสูญเสียของระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อยที่สุดต่อไป

5.4 ค่าความไวของการสูญเสีย (Loss Sensitivity)

ค่าความไวของกำลังสูญเสีย (Loss Sensitivity) เป็นค่าที่แสดงความไว (Sensitive) ของ Objective Function เทียบกับการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมของระบบ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. ค่าความไวของการสูญเสียอันเนื่องมาจากการปรับแทปของหม้อแปลง
2. ค่าความไวของการสูญเสียอันเนื่องมาจากปรับขนาดแรงดันของบัสควบคุมแรงดันและบัสอ้างอิง
3. ค่าความไวของการสูญเสียอันเนื่องมาจากกำลังรีแอกทีฟที่ผลิตมาจากอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟ

ในสมการโหลดโฟลว์โดยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน เรามีการหาค่าเมทริกซ์ความไว (Sensitivity Matrix) ของการเปลี่ยนแปลงกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ เมื่อเทียบกับขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่างๆ เมทริกซ์นี้คือจาโคเบียนเมทริกซ์หรือเมทริกซ์[J]นั่นเอง จากสมการที่ 3.22 ซึ่งแสดงถึงสมาชิกของเมทริกซ์ [J] ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial P/\partial \delta & \partial P/\partial V_L \\ \partial Q_L/\partial \delta & \partial Q_1/\partial V_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V_L \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

ในสมการของจาโคเบียนเมทริกซ์ได้พิจารณาถึงการไหลของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟเมื่อเทียบกับขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่างๆ แต่ไม่ได้พิจารณาถึงการไหลของกำลังจริงที่บัสอ้างอิงและการไหลของกำลังรีแอกทีฟที่บัสอ้างอิงและ บัสควบคุมแรงดันเอาไว้ เมทริกซ์ความไว (Sensitivity Matrix) ได้รวมการพิจารณาพวกนี้เข้าไปด้วย ถ้ากำหนดให้สัญลักษณ์ของบัสหมายเลข 1 เป็นบัสอ้างอิง(Reference Bus หรือ Swing Bus) สมการที่ (3.22) เมทริกซ์ความไวสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P \\ \Delta Q_{L1} \\ \Delta Q_{G1} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} A & B \\ \hline J & D \\ \hline E & F \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V_{L1} \\ \Delta V_{G1} \\ \Delta T \end{bmatrix} \qquad (5.29)$$

โดยสมาชิกของแต่ละเมทริกซ์มีความสัมพันธ์กับค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

เมทริกซ์ [A] คือ เมทริกซ์ที่มีสมาชิกประกอบด้วยค่าของอนุพันธ์ของการไหลของกำลังจริงที่บัสอ้างอิงเมื่อเทียบกับมุมของแรงดันบัสต่างๆยกเว้นบัสอ้างอิงและเทียบกับขนาดของแรงดันที่โหลดบัสต่างๆ

$$[A] = \begin{bmatrix} \partial P_1 / \partial \delta & \partial P_1 / \partial V_L \end{bmatrix} \qquad (5.30)$$

เมทริกซ์ [B] คือ เมทริกซ์ที่มีสมาชิกประกอบด้วยค่าของอนุพันธ์ของการไหลของกำลังจริงที่บัสอ้างอิงเมื่อเทียบกับขนาดของแรงดันของบัส ควบคุมแรงดันและบัสอ้างอิง และเทียบกับการปรับแทปของหม้อแปลง

$$[B] = \begin{bmatrix} \partial P_1 / \partial V_G & \partial P_1 / \partial T \end{bmatrix} \qquad (5.31)$$

เมทริกซ์ [J] คือ จาโคเบียนเมทริกซ์ในสมการโหลดโฟลว์นั่นเอง ซึ่งนำมาจากสมการที่ (3.22)

เมทริกซ์ [D] คือ เมทริกซ์ที่มีสมาชิกประกอบด้วยค่าของอนุพันธ์ 2 ค่า คือค่าอนุพันธ์ของกำลังจริงที่บัสต่างๆ ยกเว้นบัสอ้างอิงกับค่าอนุพันธ์ของกำลังรีแอกทีฟที่โหลดบัส เมื่อเทียบกับขนาดของแรงดันบัสควบคุมและบัสอ้างอิงและการปรับแทปของหม้อแปลง

$$[D] = \begin{bmatrix} \partial P/\partial V_G & \partial P/\partial T \\ \partial Q_L/\partial V_G & \partial Q_L/\partial T \end{bmatrix} \qquad (5.32)$$

เมทริกซ์ [E] คือ เมทริกซ์ที่มีสมาชิกประกอบด้วยค่าอนุพันธ์ของกำลังรีแอกทีฟที่บัสควบคุมแรงดันและบัสอ้างอิง เมื่อเทียบกับมุมของแรงดันบัสต่างๆ ยกเว้น

บัสอ้างอิง และเทียบกับขนาดแรงดันของโหลดบัสต่างๆ

$$[E] = [\ \partial Q_G / \partial \delta \qquad \partial Q_G / \partial V_L\ ] \tag{5.33}$$

เมทริกซ์ [F] คือ เมทริกซ์ที่มีสมาชิกประกอบด้วยค่าอนุพันธ์ของกำลังรีแอกทีฟที่บัสควบคุมแรงดันและบัสอ้างอิง เมื่อเทียบกับขนาดของแรงดันของบัสควบคุมแรงดันและบัสอ้างอิง และเทียบกับการปรับแทปของหม้อแปลง

$$[F] = [\ \partial Q_G / \partial V_G \quad \partial Q_G / \partial T\ ] \tag{5.34}$$

สำหรับการหาค่าอนุพันธ์ของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ เมื่อเทียบกับขนาดของแรงดันกับมุมที่บัสต่างๆ สามารถหาค่าได้เช่นเดียวกันกับการหาค่าของสมาชิกของจาโคเบียนเมทริกซ์ คือ จากสมการ (3.23),(3.24),(3.25)และ(3.26) ส่วนการหาค่าอนุพันธ์ของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ เมื่อเทียบกับการปรับแทปของหม้อแปลง นั้นได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ข.

จากสมการที่ (5.9) เมื่อเราย้ายตัวแปร ($\Delta P, \Delta Q_L$) สลับข้างกับตัวแปร ($\Delta P_1, \Delta \delta$) เราสามารถเขียนสมการที่ (5.29) ได้ใหม่อยู่ในรูปดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta \delta \\ \Delta V_{L1} \\ \Delta Q_{G1} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} AJ^{-1} & B-AJ^{-1}D \\ \hline J^{-1} & -J^{-1}D \\ \hline EJ^{-1} & F-EJ^{-1}D \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q_{L1} \\ \Delta V_{G1} \\ \Delta T \end{bmatrix} \tag{5.35}$$

สำหรับรายละเอียดการจัดรูปแบบเมทริกซ์จากสมการที่ (5.29) มาเป็นสมการที่ (5.35) นั้นได้อธิบายไว้แล้วในภาคผนวก ก.

เนื่องจากเราถือว่าระบบมีกำลังการผลิตจริงคงที่ (ยกเว้นบัสอ้างอิง) ดังนั้น ค่าของ ΔP ในเมทริกซ์สมการ (5.35) จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ เช่นเดียวกัน สำหรับกำลังรีแอกทีฟที่โหลดบัสจะมีค่าคงที่ยกเว้นในโหลดบัสที่ต่อกับอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟ ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงกำลังรีแอกทีฟเนื่องมาจากการจ่ายกำลังรีแอกทีฟของอุปกรณ์เหล่านี้ กำลังรีแอกทีฟของโหลดบัสที่มีค่าคงที่จะมีค่าเท่ากับศูนย์ เราสามารถแบ่ง $[\Delta Q_L]$ ออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

$$[\Delta Q_{L1}]^t = [\ 0\ ;\ \Delta Q_{x1}\ ]^t \tag{5.36}$$

จากที่กล่าวมาแล้วค่าของ [ΔP_1] นี้ก็คือค่าของกำลังสูญเสียทั้งหมดของระบบ (ΔP_1) นั่นเอง ทั้งนี้เนื่องจากกำลังจริงของบัสอื่นๆ มีค่าคงที่ สำหรับการเปลี่ยนแปลงของมุมที่แรงดันบัสต่างๆ ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับระบบปัญหาการออปติไมซ์ ค่าของสมาชิกของเมทริกซ์ [OBJ] และ [CONST] ในสมการที่ (5.37) ต่อไปนี้ จะเป็นค่าที่จะนำไปใช้ในการคำนวณปัญหาออปติไมซ์ต่อไป และ [X] คือเมทริกซ์ใด ๆ ที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับระบบปัญหาการออปติไมซ์

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ X \\ \Delta V_{L1} \\ \Delta Q_{G1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & \multicolumn{2}{c}{[OBJ]} \\ X & X & X \\ X & & \\ X & \multicolumn{2}{c}{[CONST]} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta Q_{x1} \\ \Delta V_{G1} \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (5.37)$$

จากสมการที่ (5.37) สมาชิกของเมทริกซ์ [OBJ] ก็คือค่าสัมประสิทธิ์ความไวของกำลังสูญเสียของตัวแปรควบคุมต่างๆ ของระบบนั่นเอง สำหรับสมาชิกของเมทริกซ์ [CONST] เราสามารถนำไปใช้แทนค่าในสมการที่ (5.22) และ (5.23) ได้ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{Limin} \\ \Delta Q_{Gimin} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} [CONST] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_{x1} \\ \Delta V_{G1} \\ \Delta T \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta V_{Limax} \\ \Delta Q_{Gimax} \end{bmatrix} \quad (5.38)$$

เมื่อเรานำเอาค่าของเมทริกซ์ [OBJ] และสมการที่ (5.38) ไปแทนในสมการที่ (5.28)หรือเราก็จะได้สมการเป้าหมายที่เหมาะกับการคำนวณด้วยวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นตรง (Linear Programming)

สมการเป้าหมาย

Minimize

$$\Delta P_1 = \begin{bmatrix} [OBJ] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_{x1} \\ \Delta V_{G1} \\ \Delta T_{1J} \end{bmatrix} \qquad (5.39)$$

อสมการบังคับ

Subject to:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{L1min} \\ \Delta Q_{G1min} \\ \hline \Delta Q_{x1min} \\ \Delta V_{G1min} \\ \Delta Q_{T1jmin} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} [CONST] \\ \hline 1 \\ & 1 \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_{x1} \\ \Delta V_{G1} \\ \Delta T_{1J} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta V_{L1max} \\ \Delta Q_{G1max} \\ \hline \Delta Q_{x1max} \\ \Delta V_{G1max} \\ \Delta T_{1jmax} \end{bmatrix}$$

5.5 การปรับปรุงสมการเป้าหมาย (Improvements To Basic Model)

5.5.1 ช่วง (Step Size) ของตัวแปรควบคุมของระบบ

เนื่องจากสมการเป้าหมายหรือกำลังสูญเสีย (P_L) ของระบบ มีรูปแบบสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Equation) เมื่อเรานำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคของการโปรแกรมเชิงเส้นตรง ช่วง (Step Size) ในการออปติไมซ์ของตัวแปรควบคุมต่างๆ ของระบบจะต้องมีช่วงที่ไม่กว้างมากจนเกินไป มิฉะนั้นแล้ว การหาผลตอบจุดต่ำสุดของฟังก์ชั่น จะทำได้ยากมาก เนื่องจากอาจเกิดการแกว่งขึ้นได้และไม่สามารถเข้าไปสู่ผลลัพธ์ที่เหมาะสมได้(Optimal Solution) ช่วงของตัวแปรควบคุมต่างๆ ของระบบ ในสมการที่ (5.2),(5.3) และ(5.4) จึงจำกัดลงมาให้อยู่ในช่วง Step Size ที่ทำให้ฟังก์ชั่นของสมการเป้าหมายกับ ตัวแปรควบคุมของระบบมีความสัมพันธ์เป็นแบบใกล้เคียงเส้นตรงมากที่สุด

$$(t_{ij} - T_{step} , t_{ij} + T_{step}),(V_{Gi} + V_{step}),(Q_{xi} - Q_{step} ,Q_{xi} +Q_{step}) \quad (5.40)$$

จากการศึกษาที่ผ่านมา [9,10,11,12]ค้นพบว่าช่วงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมต่างๆ ของระบบที่เหมาะสม กับปัญหาออปติไมซ์อยู่ในช่วงต่อไปนี้

1. สำหรับช่วงการปรับแทปของหม้อแปลง $(T_{ij} - T_{step} , T_{ij} + T_{step})$ จะต้องใช้การเปลี่ยนแปลง (Tstep). ไม่เกิน 0.05 หรือ (5%)ของแทป (Tap) หม้อแปลงนั้น

2. สำหรับช่วงการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันของบัสควบคุมแรงดันและบัสอ้างอิง จะต้องใช้การเปลี่ยนแปลง (Vstep) ไม่เกิน 0.025 pu

3. สำหรับช่วงการเปลี่ยนแปลงขนาดของกำลังรีแอกทีฟของบัสที่ต่อกับอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟ จะต้องใช้ช่วงการเปลี่ยนแปลง (Q_{step}) ไม่เกิน 5MVARS

จากช่วงที่ได้กล่าวมานี้เมื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ (5.40),(5.13),(5.14)และ (5.15) อสมการเงื่อนไขบังคับของตัวแปรสถานะของระบบ จะเปลี่ยนเป็นดังนี้

$$\text{Max}(\Delta T_{ijmin} ,- T_{step}) \leq \Delta T_{ij} \leq \text{Min}(\Delta T_{ijmax} , T_{step}) \quad (5.41)$$

$$\text{Max}(\Delta V_{Gimin} ,- T_{step}) \leq \Delta V_{Gi} \leq \text{Min}(\Delta V_{Gimax} , T_{step}) \quad (5.42)$$

$$\text{Max}(\Delta Q_{ximin} ,- T_{step}) \leq \Delta Q_{xi} \leq \text{Min}(\Delta Q_{ximax} , T_{step}) \quad (5.43)$$

5.5.2 การทำให้ตัวแปรทุกตัวต้องมีค่ามากกว่าศูนย์ (All Positive Value)

เนื่องจากการออปติไมซ์ โดยใช้การเทคนิคการโปรแกรมเชิงเส้นตรง ตัวแปรทุกตัวต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ ตัวแปรควบคุมของระบบจึงต้องมีการปรับปรุงให้มีค่ามากกว่าศูนย์ จากสมการ (5.41),(5.42) และ (5.43) สามารถทำให้อยู่ในรูป All Positive Value ได้ดังนี้

$$0 \leq [\Delta T_{ij} - (\text{Max}(\Delta T_{ijmin} ,- T_{step})] \leq [\text{Min}(\Delta T_{ijmax} , T_{step})- \text{Max}(\Delta T_{ijmin} ,- T_{step})] \quad (5.44)$$

$$0 \leq [\Delta V_{Gi} - (\text{Max}(\Delta V_{Gimin} ,- V_{step})] \leq [\text{Min}(\Delta V_{Gimax} , V_{step})- \text{Max}(\Delta V_{Gimin} ,- V_{step})] \quad (5.45)$$

$$0 \leq [\Delta Q_{xi} - (\text{Max}(\Delta Q_{ximin} ,- Q_{step})] \leq [\text{Min}(\Delta Q_{ximax} , Q_{step})- \text{Max}(\Delta Q_{ximin} ,- Q_{step})] \quad (5.46)$$

เราจะแทนค่าผลต่างของสมการ(5.44),(5.45) และ(5.46) ด้วยตัวแปร

ΔTT_{ij} , ΔVV_{Gi} , ΔQQ_{xi} สมการจึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$0 \leq \Delta TT_{ij} \leq \Delta TT_{ijmax} \qquad (5.47)$$

$$0 \leq \Delta VV_{Gi} \leq \Delta VV_{Gimax} \qquad (5.48)$$

$$0 \leq \Delta QQ_{xi} \leq \Delta QQ_{xi} \qquad (5.49)$$

สมการเป้าหมายของการออปติไมซ์กำลังสูญเสีย ในสมการที่ (5.39) จะเปลี่ยนไปเช่นกัน เพื่อให้ตัวแปรทุกค่า ในรูปแบบปัญหาของการออปติไมซ์เป็นบวกทุกตัว สำหรับรายละเอียดของการจัดรูปปัญหาให้เป็นแบบ All Positive Values อยู่ในค่าภาคผนวก ค.

กล่าวโดยสรุปแล้วในการออปติไมซ์กำลังงานสูญเสียในระบบให้น้อยที่สุด รูปแบบสมการเป้าหมาย ที่ใช้ในการคำนวณจริงๆ คือ

สมการเป้าหมาย

Minimize

$$\Delta P_1 = \begin{bmatrix} [OBJ] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta QQ_{xi} \\ \Delta VV_{Gi} \\ \Delta TT_{ij} \end{bmatrix} \qquad (5.50)$$

อสมการบังคับ:

$$\begin{bmatrix} [CONST] \\ \hline [-CONST] \\ \hline 1 \\ \quad 1 \\ \quad\quad 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta QQ_{xi} \\ \Delta VV_{Gi} \\ \Delta TT_{ij} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta VV_{Limax} \\ \Delta QQ_{Gimax} \\ \hline -\Delta VV_{Limin} \\ -\Delta QQ_{Gimin} \\ \hline \Delta QQ_{ximax} \\ \Delta VV_{Gimax} \\ \Delta TT_{ijmax} \end{bmatrix}$$

5.6 การเลือกติดตั้งอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟ

การพิจารณาเลือกติดตั้งอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟ เข้าไปในโหลดบัสที่เหมาะสมของระบบไฟฟ้ากำลัง เป็นส่วนสำคัญมากอย่างหนึ่ง เนื่องจากการเลือกติดตั้งเข้าไปในบัสที่ต่างกันจะมีผลต่อการลดกำลังสูญเสียของระบบแตกต่างกันไปด้วย ในหัวข้อนี้จะได้เสนอวิธีการพิจารณาค่าดัชนี (Index) บ่งชี้[13,19] เพื่อใช้เป็นแนวทางการเลือกติดตั้งอุปกรณ์รีแอกทีฟเข้าไปในบัสที่เหมาะสมเพื่อให้กำลังสูญเสียของระบบที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำสุด อนึ่งวิธีการพิจารณาค่าดัชนีที่จะได้กล่าวต่อไปนี้เป็นเพียงการคาดคะเนโดยใช้การเลือกติดตั้งอุปกรณ์ในบัสที่มีค่าดัชนีสูงกว่า

การพิจารณาเลือกตำแหน่งโหลดบัสที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการติดตั้งอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟ จะพิจารณาด้วยค่าดัชนี (Index) ที่ได้มาจากลักษณะของระบบไฟฟ้ากำลัง(System Performance) ค่าดัชนีเหล่านี้มีอยู่ด้วยกัน 3 อย่าง คือ

1. ค่าดัชนีที่ได้จากการพิจารณา Steady State Stability ของระบบ (S.index)
2. ค่าดัชนีที่ได้จากการพิจารณาVoltage Performance Indexของระบบ (V.index)
3. ค่าดัชนีที่ได้จากการพิจารณา Power Loss ของระบบ (L.index)

5.6.1 การพิจารณาค่าดัชนีเอส (S.index)

เนื่องจากการพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังสามารถพิจารณาได้จากเครื่องหมายของค่าดีเทอร์มิแนนท์ของจาโคเบียนเมทริกซ์ [20] ที่ได้มาจากสมการโหลดโฟลว์ของนิวตัน-ราฟสัน ซึ่งระบบจะมีเสถียรภาพได้ก็ต่อเมื่อเครื่องหมายของค่าดีเทอร์มิแนนท์ของระบบในเวลาใด ๆ เหมือนกับเครื่องหมายของดีเทอร์มิแนนท์ของระบบที่จุด Initial Operating Point ในทำนองเดียวกันผลของการเปลี่ยนแปลงกำลังรีแอกทีฟจะมีผลต่อเสถียรภาพของระบบโดยพิจารณาจากค่าของการเปลี่ยนแปลงกำลังรีแอกทีฟเมื่อเทียบกับขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ (สมาชิกของ $\partial Q/\partial V$ ในจาโคเบียนเมทริกซ์)ถ้ามีค่าเข้าใกล้ศูนย์แล้วระบบจะไม่มีเสถียรภาพ พิจารณาจากสมการที่ (3.22)

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial P/\partial \delta & \partial P/\partial V \\ \partial Q/\partial \delta & \partial Q/\partial V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \qquad (3.22)$$

จากคุณสมบัติที่น่าสนใจของระบบไฟฟ้าประการหนึ่งก็คือ การเปลี่ยนแปลงมุมของแรงดันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังรีแอกทีฟน้อยมาก และการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังจริงน้อยมาก คุณสมบัตินี้เรียกว่าการดีคัปเปิลระหว่างกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ จากคุณสมบัติดังกล่าวนี้ทำให้สามารถประมาณได้ว่า $\partial Q/\partial V$ และ $\partial Q/\partial \delta$ มีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงกำลังรีแอกทีฟเราจะได้ว่า

$$[\Delta Q] = [\partial Q/\partial V][\Delta V] \qquad (5.51)$$

เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นใน ΔQ และ ΔV ค่าของสมาชิกในแนวทแยง (Diagonal Elements) ของ $\partial Q_i / \partial V_i$ จะเป็นค่าดัชนีตัวบ่งชี้ (Stability Index) ของระบบ ถ้าเราจะพิจารณาเฉพาะโหลดบัส สมการที่ (5.51) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$[\Delta Q_L] = [\partial Q_L / \partial V_L][\Delta V_L] \qquad (5.52)$$

เพราะฉะนั้นโหลดบัสใดก็ตามที่มีค่าของ $\partial Q_i / \partial V_i$ มากย่อมจะสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังรีแอกทีฟโดยจะไม่ทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะไม่มีเสถียรภาพ ได้มากกว่าโหลดบัสที่มีค่า $\partial Q_i / \partial V_i$ น้อยกว่า การพิจารณาเลือกตำแหน่งโหลดบัสที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการติดตั้งอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟ สำหรับการพิจารณาค่า S.index จะพิจารณาจากค่าของ $\partial Q_i / \partial V_i$ ของโหลดบัสใดๆ โดยเรียงลำดับจากโหลดบัสที่มีค่า $\partial Q_i / \partial V_i$ น้อยกว่าไปสู่ค่ามากกว่า เพราะว่าบัสใดที่จะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะไม่มีเสถียรภาพก่อน จำเป็นจะต้องติดตั้งอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟก่อนบัสอื่น ๆ

$$[S.index] = [S_1, S_2, \ldots\ldots, S_L] \qquad (5.53)$$

โดย $S_1, S_2, \ldots\ldots, S_L$ คือตำแหน่งของโหลดบัสที่มีค่า $\partial Q_i / \partial V_i$ เรียงจากค่าจากน้อยไปหามาก และค่า S.index นี้จะถูกนำไปพิจารณารวมกับค่าดัชนีอื่นๆ ต่อไป โดยใช้เวกเตอร์ของ Weighting Factor เรียงจากค่ามากไปหาค่าน้อยเพื่อเน้นความสำคัญ (Priority Order) ในการเลือกติดตั้งอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟ

$$[W.S] = [W_1, W_2, \ldots\ldots, W_L]$$

โดยที่ $W_1 > W_2 > ____ > W_L$

5.6.2 การพิจารณาค่าดัชนีวี (V.index)

เนื่องจากสมการเป้าหมายของการลดกำลังสูญเสียของระบบ มีเงื่อนไขบังคับคือการพยายามรักษาระดับแรงดันที่บัสต่างๆ ให้คงที่มากที่สุด การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่บัสต่างๆ เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงกำลังรีแอกทีฟ ย่อมมีส่วนสำคัญในการตัดสินใจ เลือกติดตั้งอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟ ถ้าเราพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน(ΔV) เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงกำลังรีแอกทีฟ(ΔQ) สมการที่ (5.51) จะกลายเป็น

$$[\Delta V] = [\partial Q/\partial V][\Delta Q] \qquad (5.54)$$

เนื่องจากเราพิจารณาการเลือกติดตั้งอุปกรณ์กำลังรีแอกทีฟเฉพาะที่โหลดบัส สมการที่ (5.54) จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$[\Delta V_L] = [J_V][\partial Q_L] \qquad (5.55)$$

ค่าของสมาชิกแนวทะแยง (Diagonal Elements) ของเมทริกซ์ $[J_V]$ เช่น J_{ii} จะเป็นตัวบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันของบัส i ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงกำลังรีแอกทีฟที่บัสนั้น ส่วนค่าของสมาชิกนอกแนวทะแยง (Off Diagonal) J_{vji} จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่บัส j เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงกำลังรีแอกทีฟที่บัส i ค่าดัชนี [V.index] จะเป็นตัวบ่งชี้ว่าบัสใดจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดัน(Voltage Variation)มากกว่า ถ้าเกิดมีการเปลี่ยนแปลงกำลังรีแอกทีฟที่บัสในระบบไฟฟ้ากำลัง เราจำเป็นจะต้องเลือกติดตั้งอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟที่บัสนั้นก่อนบัสอื่น ๆ เพื่อป้องกันระบบเข้าสู่สภาวะไม่มีเสถียรภาพเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดัน (Voltage Variation)มาก

$$[V.index] = (Norm)_i - (\delta)_i \qquad (5.56)$$

โดยที่ $(Norm)_i$ คือ ค่านอมร์มาไลซ์ (Normalize) ของสมาชิกคอลัมน์ที่ i ของเมทริกซ์ $[J_V]$

$(\delta)_i$ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสมาชิกในคอลัมน์ i ของเมทริกซ์ $[J_V]$ รอบค่าเฉลี่ย

ค่าของ $(Norm)_i$ และ$(\delta)_i$ นี้เป็นค่าที่ได้มาจากการนอมร์มาไลซ์ (Normalize) จากโหลดบัสทั้งหมดของระบบไฟฟ้า

และเช่นเดียวกันกับค่าของ [S.index]

$$[V.index] = [V_1, V_2, \ldots\ldots, V_L] \qquad (5.57)$$

$$[W.V] = [W_1, W_2, \ldots\ldots, W_L] \quad (5.58)$$

โดยที่ $V_1 > V_2 > ____ > V_L$ และ $W_1 > W_2 > ____ > W_L$

5.6.3 การพิจารณาดัชนีแอล (L.index)

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงกำลังรีแอกทีฟที่บัสต่างๆ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังงานสูญเสียทั้งหมดของระบบ จากการพิจารณาสมการที่ (5.37) เราสามารถหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียของระบบ (ΔP_1 หรือ ΔP_L) เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงกำลังรีแอกทีฟที่โหลดบัสต่างๆ จากสมการดังต่อไปนี้

$$[\Delta P_L] = [\partial P_L / \partial Q_L][\Delta Q_L] \quad (5.59)$$

การพิจารณาค่าดัชนี L.index จะพิจารณามาจากบัสที่มีค่าความชันของ $\partial P_L / \partial Q_L$ มากกว่า เนื่องจากค่าความชันของ $\partial P_L / \partial Q_L$ จะเป็นตัวชี้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังรีแอกทีฟที่โหลดบัส บัสใดจะมีการเปลี่ยนแปลงกำลังงานสูญเสียมากกว่ากันและทำให้ระบบมีกำลังงานสูญเสียเกิดขึ้นน้อยที่สุด เราจำเป็นจะต้องเลือกติดตั้งอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟที่บัสนั้นก่อนบัสอื่น ๆ และเช่นเดียวกับค่าดัชนีอื่นๆ เราสามารถเขียนค่าของ L.index ได้ดังนี้

$$[L.index] = [L_1, L_2, \ldots\ldots, L_L] \quad (5.60)$$

$$[W.L] = [W_1, W_2, \ldots\ldots, W_L] \quad (5.61)$$

โดยที่ $L_1 < L_2 < ____ < L_L < 0$

และ $W_1 > W_2 > ____ > W_L$

5.6.4 การพิจารณาเลือกบัสที่เหมาะสมสำหรับการติดอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟ

เราจะพิจารณาจากการรวมค่าดัชนีทั้ง 3 แบบที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยใช้ Weighting Factor Vector เป็นหลักในการพิจารณา บัสที่มีค่าดัชนีรวมมากกว่าจะเป็นบัสที่เหมาะสำหรับการเลือกมากที่สุด

ตัวอย่างในการพิจารณาเช่น ข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลัง 6 บัส 5 สายส่ง และมีหม้อแปลง 2 ตัว จะมีค่าดัชนีต่างๆ ดังต่อไปนี้

[S.index] = [5,6,3,4] ; [W.S] = [4,3,2,1]

[V.index] = [6,4,3,5] ; [W.V] = [4,3,2,1]

[L.index] = [5,3,6,4] ; [W.L] = [4,3,2,1]

เมื่อพิจารณารวมค่าดัชนีทั้ง 3 แบบ จะได้ค่าดัชนีรวม (T.index) และ Total Weight ดังต่อไปนี้

ดัชนีรวม: [T.index] = [5,6,3,4]

Total Weight: [W.T] = [9,9,7,5]

จากค่าดัชนีรวม (T.index)นี้ทำให้เราสามารถตัดสินใจเลือกบัสที่เหมาะสมกับการติดอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟ ได้โดยพิจารณาที่บัส 5,6,3 และ 4 ตามลำดับ การพิจารณาจากค่าดัชนีรวมนี้เป็นเพียงการคาดคะเนเท่านั้นโดยผลจากการคาดคะเน อาจคลาดเคลื่อนได้บ้าง ในกรณีที่บัสมีค่า Total Weight ใกล้เคียงกัน สำหรับค่าของ Weighting Factor Vector นั้นเราไม่จำเป็นที่จะให้มีค่าแบบตัวอย่างก็ได้ ถ้าเกิดในแต่ละบัสมีความสำคัญแตกต่างกัน (Priority Order) ในการติดตั้ง ตัวอย่างเช่น มีบัสตำแหน่งที่ไม่สามารถติดอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟได้เลย เราก็จะให้ค่า Weighting Factor มีค่าเท่ากับศูนย์ ในค่าดัชนีทั้ง 3 แบบ

5.7 อัลกอลิทึมของการออปติไมซ์กำลังสูญเสียของระบบ

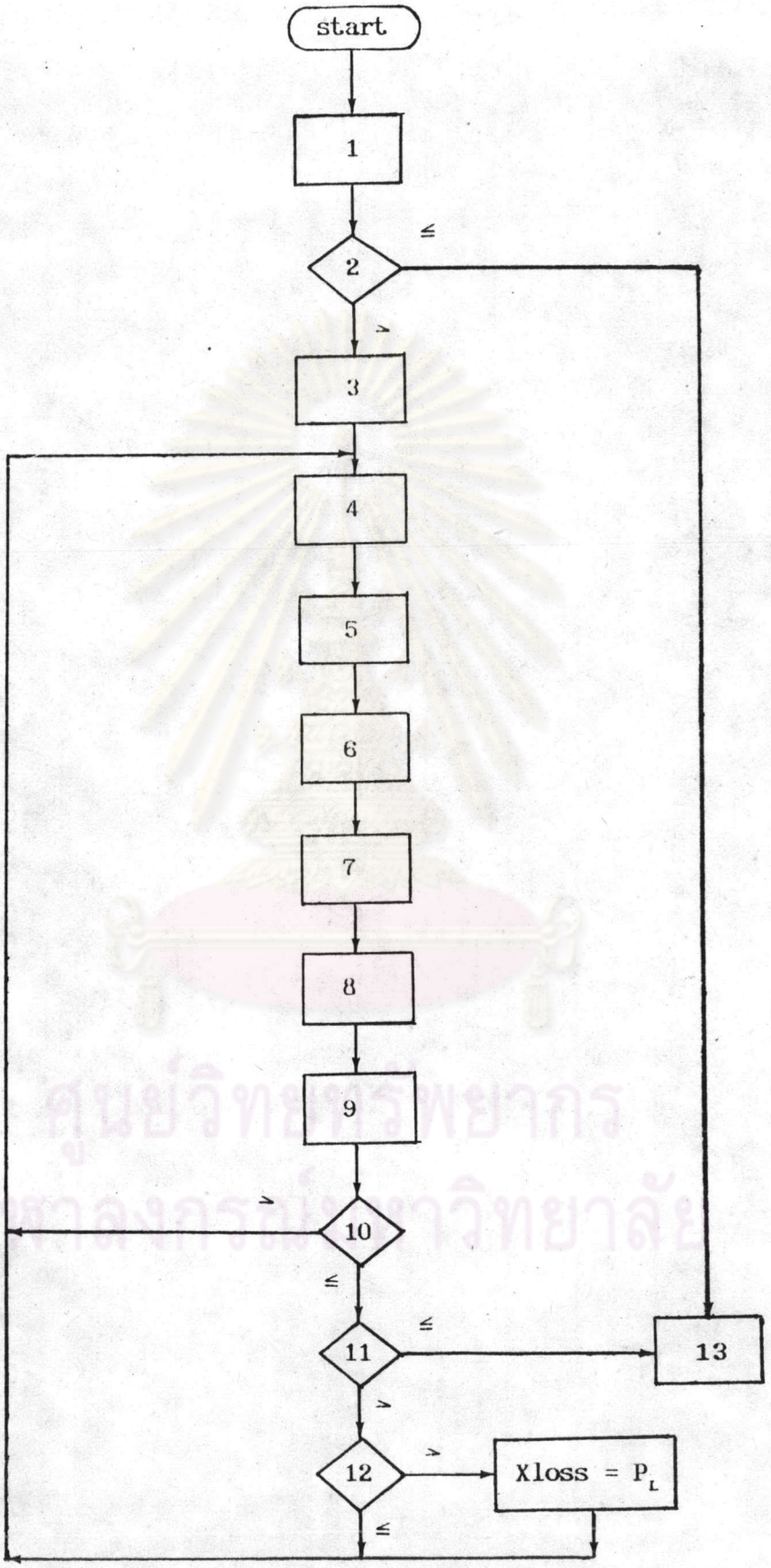
อัลกอลิทึมสำหรับการออปติไมซ์กำลังสูญเสียของระบบ แสดงในรูปที่ (5.1) โดยมีขั้นตอนการคำนวนดังนี้

1.คำนวณโหลดโฟลว์ ซึ่งเป็นการศึกษาพื้นฐานในการวิเคราะห์ (Base Case Load Flow) และกำหนดให้ค่า Xloss เท่ากับ 999

2.เช็คลักษณะของระบบ (System Performance) ว่าระบบต้องการลดกำลังงานสูญเสียของระบบ และการปรับปรุงระดับแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังหรือไม่ โดยเช็คขนาดแรงดันที่โหลดบัส และกำลังรีแอกทีฟของบัสที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ว่าอยู่ในขีดจำกัด (Limit) หรือไม่ ถ้าต้องการให้ไปทำในขั้นตอนที่ 3 ต่อไปถ้าไม่ต้องการให้ไปทำในขั้นตอนที่ 13

3. คำนวณหาค่าดัชนี ตามสมการในหัวข้อที่(5.6) เพื่อใช้ในการเลือกติดตั้งอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอคทีฟเข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลัง

4. คำนวณหาค่าความไวของกำลังสูญเสียของระบบที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรควบคุมต่าง ๆ ตามสมการที่ (5.35) เพื่อนำไปใช้ในสมการเป้าหมาย



รูปที่ 5.1 อัลกอลิทึมสำหรับการออปติไมซ์กำลังสูญเสียของระบบ

5. คำนวณหาอสมการเงื่อนไขบังคับของระบบ จากสมการที่ (5.37)

6. ปรับปรุงสมการออปติไมซ์ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณจริง ๆ ตามหัวข้อที่ (5.5)และ (5.6) กล่าวคือ

6.1 เปลี่ยนเงื่อนไขบังคับตัวแปรสถานะของระบบ ให้อยู่ในรูปตัวแปรควบคุมของระบบ

6.2 ปรับปรุงเงื่อนไขบังคับระบบ โดยคำนึงถึงผลกระทบของช่วง (Step Size) ของตัวแปรควบคุมของระบบที่มีต่อกำลังสูญเสีย

6.3 ปรับปรุงสมการของเงื่อนไขบังคับของระบบ โดยให้อยู่ในรูปสมการแบบ (Non-negative Equation) หรือตัวแปรทุกตัวในสมการต้องมีค่ามากกว่าศูนย์ (All Positive Value)

7. แก้ปัญหาการออปติไมซ์กำลังสูญเสียของระบบให้น้อยที่สุด โดยอาศัยเทคนิคของการโปรแกรมเชิงเส้นตรง ตามสมการที่ได้กล่าวแล้วในบทที่ 4

8. เปลี่ยนตัวแปรควบคุมใหม่ โดยใช้ค่าที่ได้จากการออปติไมซ์ คือค่าของ $\Delta TT_{ij}'$ $\Delta VV_{Gi}'$,$\Delta QQ_{xi}'$ โดยการนำเอาค่าตัวแปรเหล่านี้ไปคำนวณหาค่าตัวแปรควบคุมได้จากสมการ

$$\Delta TT_{ij} = \Delta TT_{ij}' + Max(\Delta t_{ijmin}', - T_{step}) \quad (5.47)$$

$$\Delta VV_{Gi} = \Delta VV_{Gi}' + Max(\Delta V_{Gimin}', - V_{step}) \quad (5.48)$$

$$\Delta QQ_{xi} = \Delta QQ_{xi}' + Max(\Delta Q_{ximin}', - Q_{step}) \quad (5.49)$$

และนำตัวแปรควบคุมใหม่เหล่านี้ไปทำการคำนวณ ขั้นตอนที่ 9 ต่อไป

9. คำนวณโหลดโฟลว์ โดยใช้องค์ประกอบไฟฟ้ากำลังที่ได้จากการออปติไมซ์

10. เช็คลักษณะของระบบ (System Performance) คือค่าของขนาดแรงดันที่โหลดบัสและกำลังรีแอคทีฟของบัส ที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ว่าอยู่ในเงื่อนไขบังคับของระบบหรือไม่ ถ้าระบบไม่อยู่ในเงื่อนไขให้กลับทำขั้นตอนที่ 4 ถ้าอยู่ในเงื่อนไขให้ทำในขั้นตอนต่อไป

11. หาค่าสมบูรณ์ระหว่างผลต่างของ Xloss กับกำลังสูญเสียที่ได้จากสมการโหลดโฟลว์ในขั้นตอนที่ 9 ว่ามีค่ามากกว่าค่าที่ยอมรับหรือไม่ ถ้ามากกว่าให้ไปทำในขั้นตอนที่ 12 ต่อไป แต่ถ้าค่าของผลต่างนี้มีค่าน้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ ค่าของ Xloss นี้คือค่ากำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุดที่ทำได้จากการออปติไมซ์ แล้วไปทำในขั้นตอนที่ 13

12. เปรียบค่าระหว่างXlossกับกำลังสูญเสียที่ได้จากขั้นตอนที่ 9 ว่ามีค่ามากกว่าหรือไม่ ถ้าค่า Xloss มีค่ามากกว่า ให้กำหนดค่า Xloss เท่ากับค่ากำลังสูญเสีย แล้วไปทำตามขั้นตอนที่

4,5,6,7,8 และ 9 ต่อไป

13. หยุดโปรแกรม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย