บทที่ 3

การคำนวณการจัดสรรกำลังการผลิต

เนื่องจากการคำนวณราคาไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับผลของการจัดสรรกำลังการผลิตดังจะได้แสดงต่อไป ดังนั้นในบทนี้จะได้กล่าวถึงการจัดสรรกำลังการผลิต ซึ่งได้นำเสนอทั้งในส่วนของการจัดสรรกำลังการผลิตโดยทั่วไป และการจัดสรรกำลังการผลิตโดยพิจารณาถึงราคาไฟฟ้าจริงที่ผู้ซื้อไฟฟ้าจะต้องเสีย หรือ ผู้ขายไฟฟ้าจะได้รับ และในหัวข้อสุดท้ายได้แสดงการคำนวณค่าความไวของกำลังไฟฟ้าสูญเสียและค่าความไวของกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่งเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าสุทธิที่บัสต่างๆ ซึ่งค่าความไวเหล่านี้นอกจากจะมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการจัดสรรกำลังการผลิตแล้ว ยังมีความสำคัญต่อการคำนวณราคาไฟฟ้าอีกด้วย

โดยข้อจำกัดของระบบที่เป็นพื้นฐานในการคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ และ ส่งผลสำคัญต่อราคาไฟฟ้า คือ

ข้อจำกัดแบบสมการ : ข้อจำกัดของสมดุลกำลังไฟฟ้า ณ บัสต่างๆ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เปลี่ยนให้รูปแบบปัญหาการคำนวณง่ายขึ้น โดยใช้สมการสมดุลของกำลังไฟฟ้าทั้งระบบแทน

ข้อจำกัดแบบอสมการ : ข้อจำกัดพิกัดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และข้อจำกัดพิกัดการไหลของกำลังไฟฟ้าบนสายส่ง

3.1 การจัดสรรกำลังการผลิตโดยทั่วไป

หลังจากศูนย์ควบคุมระบบอิสระทำการรวบรวมข้อมูลการประมูลการซื้อขายไฟฟ้า จากผู้ซื้อและผู้ขายไฟฟ้าแล้ว ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ซึ่งเป็นเครื่องมือการคำนวณการจัดสรรกำลังการผลิตที่เป็นที่นิยมจะถูกนำมาใช้คำนวณผลการจัดสรรกำลังการผลิต

วัตถุประสงค์ของการจัดสรรกำลังการผลิตโดยทั่วไป คือ การจัดสรรกำลังการผลิตโดยให้มีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าต่ำที่สุด หรือก็คือการให้มีผลประโยชน์ของผู้ผลิตไฟฟ้ามากที่สุดนั่นเอง นอกจากนี้ยังส่งผลทำให้ราคาไฟฟ้าที่ผู้ซื้อไฟฟ้าจะต้องจ่ายมีค่าต่ำลงอีกด้วย

จากสมการที่ (2.1) ถึง (2.3) สมการการคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์โดยทั่วไปสามารถแสดงได้ดังนี้

$$Min\left\{C_t = \sum_{g=1}^{N_g} C_g\left(P_g\right)\right\} \tag{3.1}$$

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

s.t.

$$\left.\begin{aligned} P_i(|V|,\theta) - P_i^{net} &= 0 \\ Q_i(|V|,\theta) - Q_i^{net} &= 0 \end{aligned}\right\} \quad \textit{for each PQ (load) bus } i$$
$$P_k(|V|,\theta) - P_k^{net} = 0 \quad \textit{for each PV (gen.) bus } k \tag{3.2}$$

$$|S_t| \le S_{t,limit} \qquad t \in N_t \tag{3.3}$$

$$V_{i,min} \le |V_i| \le V_{i,max} \tag{3.4}$$

$$P_{g,min} \le P_g \le P_{g,max} \tag{3.5}$$

$$Q_{g,min} \le Q_g \le Q_{g,max} \tag{3.6}$$

โดยที่ C_t คือ ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าทั้งหมดของระบบ

$C_g(P_g)$ คือ ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ g

P_g คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ g

$|V|$ คือ เวกเตอร์ขนาดแรงดันไฟฟ้า

θ คือ เวกเตอร์มุมเฟสแรงดันไฟฟ้า

S_t คือ การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าปรากฏของสายส่ง t

$S_{t,limit}$ คือ พิกัดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าปรากฏของสายส่ง t

N_t คือ จำนวนสายส่งในระบบ

$|V_i|$ คือ ขนาดแรงดันแรงดันไฟฟ้า ณ บัส i

$V_{i,min}, V_{i,max}$ คือ พิกัดล่างและบนของขนาดแรงดันแรงดันไฟฟ้า ณ บัส i

$P_{g,min}, P_{g,max}$ คือ พิกัดล่างและพิกัดบนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ g

Q_g คือ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ g

$Q_{g,min}, Q_{g,max}$ คือ พิกัดล่างและพิกัดบนของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ g

อย่างไรก็ตามเพื่อความรวดเร็วในการคำนวณ และเนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณาเฉพาะกำลังไฟฟ้าค่าจริง เราสามารถลดรูปปัญหาการคำนวณโดยการแทนสมการสมดุลกำลังไฟฟ้าของแต่ละบัสด้วยสมการสมดุลกำลังไฟฟ้าของระบบ และทำการประมาณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าปรากฏของสายส่ง t ให้อยู่ในรูปกำลังไฟฟ้าจริง [11] ดังนี้

$$|S_t| = \left[P_t^2 + Q_t^2\right]^{1/2} = |P_t|\left[1+\tau^2\right]^{1/2} \approx |P_t| \tag{3.7}$$

โดย P_t และ Q_t แทนกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่ไหลผ่านสายส่ง t ตามลำดับ และกำหนดสมมติฐานให้ $\tau^2 = (Q_t / P_t)^2$ มีค่าต่ำมาก ณ สภาวะการทำงานปกติของระบบ

ด้วยวิธีการลดรูปปัญหาการคำนวณข้างต้น ตัวแปรสถานะทั้งหมดจะหายไปจากการคำนวณ และตัวแปรควบคุมจะเหลือเพียงกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องเท่านั้น ดังนั้นปัญหาการคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์จะลดรูปเป็นดังสมการ

$$Min\left\{C_t = \sum_{g=1}^{N_g} C_g\left(P_g\right)\right\} \tag{3.8}$$

$$\sum_{d=1}^{N_d} P_d + P_l - \sum_{g=1}^{N_g} P_g = 0 \tag{3.9}$$

$$\left|P_t\right| \le P_{t,limit} \qquad t \in N_t \tag{3.10}$$

$$P_{g,min} \le P_g \le P_{g,max} \tag{3.11}$$

โดย N_d คือ จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้า (โหลด)

P_d คือ กำลังไฟฟ้าที่ต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า d

P_l คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสียทั้งหมดในระบบ

N_g คือ จำนวนผู้จ่ายไฟฟ้า (เครื่องกำเนิดไฟฟ้า)

P_t คือ กำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่ง t

$P_{t,limit}$ คือ พิกัดกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่ง t

ปัญหาการคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ในสมการที่ (3.8) ถึง (3.11) สามารถแก้ได้โดยวิธีการคำนวณต่างๆ เช่น วิธีเกรเดียนท์ วิธีของนิวตัน วิธีการใช้จุดคำตอบภายใน วิธีโปรแกรมเชิงเส้น ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 2 อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เราจะใช้วิธีโปรแกรมเชิงเส้นในการแก้ปัญหา เนื่องจากวิธีโปรแกรมเชิงเส้นสามารถแก้ปัญหาการคำนวณได้แม้ว่าการคำนวณจะมีข้อจำกัดแบบอสมการ และ มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันไม่ต่อเนื่องอันเป็นผลมาจากข้อมูลการเสนอซื้อและเสนอขายไฟฟ้า

จะสังเกตเห็นว่า การคำนวณในสมการที่ (3.8) ถึง (3.11) นั้นพิจารณาเฉพาะการจัดสรรกำลังการผลิตทางด้านผู้ขายไฟฟ้าเท่านั้น โดยในขั้นต้นนี้สมมติให้ปริมาณความต้องการไฟฟ้ามีค่าคงที่โดยมีค่าเท่ากับความต้องการการใช้ไฟฟ้าที่ได้จากจุดตัดของกราฟการเสนอซื้อ และเสนอขายไฟฟ้า โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเรียกการจัดสรรกำลังการผลิตดังกล่าวว่าเป็น การจัดสรรกำลังการผลิตที่ไม่มีความยืดหยุ่นของการใช้ไฟฟ้า

อย่างไรก็ตาม ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการพิจารณาการจัดสรรกำลังการผลิตในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าทั้งกรณีที่ไม่มีความยืดหยุ่นของการใช้ไฟฟ้า และกรณีที่มีความยืดหยุ่นของการใช้ไฟฟ้า โดยได้นำแสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.1.1 และ 3.1.2 ตามลำดับ

3.1.1 การจัดสรรกำลังการผลิตที่ไม่มีความยืดหยุ่นของการใช้ไฟฟ้าโดยทั่วไป

ในตลาดกลางการซื้อขายไฟฟ้า หากความต้องการใช้ไฟฟ้าไม่มีความยืดหยุ่นต่อราคาไฟฟ้า การคำนวณการจัดสรรกำลังการผลิตจะเป็นการพิจารณาถึงต้นทุนในการผลิตของผู้จ่ายไฟฟ้าเท่านั้น ดังนั้นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในสมการที่ (3.8) จะถูกแทนที่ด้วยผลคูณของราคาไฟฟ้าเสนอขาย และปริมาณไฟฟ้าเสนอขาย หรือ พื้นที่ใต้กราฟการเสนอขาย ดังสมการต่อไปนี้

$$Min\left\{\sum_{g}^{N_g}\sum_{gb}^{N_{gb}}\left(p_{gb}\times Q_{gb}\right)\right\} \tag{3.12}$$

$$\text{s.t.}\quad \sum_{d}^{N_d} P_d + P_l - \sum_{g}^{N_g}\sum_{gb}^{N_{gb}}\left(Q_{gb}\right) = 0 \tag{3.13}$$

$$\left|P_l\right| - P_{l,limit} \le 0 \qquad t \in N_t \tag{3.14}$$

$$0 \le Q_{gb} \le Q_{gb,max} \tag{3.15}$$

โดย $\sum_{g}^{N_g}\sum_{gb}^{N_{gb}}\left(Q_{gb}\right) = \sum_{g}^{N_g} P_g$,

p_{gb} คือ ราคาเสนอช่วงที่ b ของผู้จ่ายไฟฟ้า g

Q_{gb} คือ ปริมาณเสนอช่วงที่ b ของผู้จ่ายไฟฟ้า g

N_{gb} คือ จำนวนช่วงการเสนอของผู้จ่ายไฟฟ้า g

$Q_{gb,max}$ คือ พิกัดกำลังไฟฟ้าเสนอช่วงที่ b ของผู้จ่ายไฟฟ้า g

เนื่องจากสมการที่ (3.13) และ (3.14) มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ดังนั้นเทคนิคการทำให้เป็นเชิงเส้นรอบจุดทำงานจะถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาดังนี้

$$Min\left\{\sum_{g}^{N_g}\sum_{gb}^{N_{gb}}\left[p_{gb}\times\left(Q_{gb}^{0}+\Delta Q_{gb}\right)\right]\right\}$$

$$\Rightarrow Min\left\{\sum_{g}^{N_g}\sum_{gb}^{N_{gb}}\left(p_{gb}\times Q_{gb}^{0}\right)+\sum_{g}^{N_g}\sum_{gb}^{N_{gb}}\left(p_{gb}\times\Delta Q_{gb}\right)\right\}$$

$$\Rightarrow Min\left\{\sum_{g}^{N_g}\sum_{gb}^{N_{gb}}\left(p_{gb}\times\Delta Q_{gb}\right)\right\} \tag{3.16}$$

$$\text{s.t.}\quad \sum_{d=1}^{N_d} P_d + \left[P_l^0 + \sum_{g}^{N_g}\gamma_g\sum_{gb}^{N_{gb}}\Delta Q_{gb}\right] - \left[\sum_{g}^{N_g}\sum_{gb}^{N_{gb}}\left(Q_{gb}^{0}+\Delta Q_{gb}\right)\right] = 0 \tag{3.17}$$

$$\left|P_l^0 + \sum_{g}^{N_g}\beta_{l,g}\sum_{gb}^{N_{gb}}\Delta Q_{gb}\right| - P_{l,limit} \le 0 \qquad t \in N_t \tag{3.18}$$

$$0 \le Q_{gb}^{0} + \Delta Q_{gb} \le Q_{gb,max} \tag{3.19}$$

โดย Q_{gb}^{0} คือ ปริมาณเสนอช่วงที่ b ของผู้จ่ายไฟฟ้า g ณ จุดทำงานเริ่มต้น

ΔQ_{gb} คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาณเสนอช่วงที่ b ของผู้จ่ายไฟฟ้า g

P_{i}^{0} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสียทั้งหมดในระบบ ณ จุดทำงานเริ่มต้น

γ_{g} คือ ความไวของกำลังสูญเสียในระบบเมื่อเทียบกับผู้จ่ายไฟฟ้า g

$\beta_{l,g}$ คือ ความไวของกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่ง t เมื่อเทียบกับผู้จ่ายไฟฟ้า g

ความไวของกำลังสูญเสียในระบบ และความไวของกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่งเมื่อเทียบกับผู้จ่ายไฟฟ้า g ซึ่งนิยามโดย $\partial P_{l} / \partial P_{g}$ และ $\partial P_{t} / \partial P_{g}$ สามารถคำนวณได้โดยวิธีการที่พัฒนาจาก [3,5,10] โดยอาศัยการวิเคราะห์ เอ.ซี. นิวตัน-ราฟสัน กับเทคนิคการหาอนุพันธ์แยกส่วนและเทคนิคกฎลูกโซ่ ดังแสดงต่อไปในหัวข้อที่ 3.3

3.1.2 การจัดสรรกำลังการผลิตที่มีความยืดหยุ่นของการใช้ไฟฟ้าโดยทั่วไป

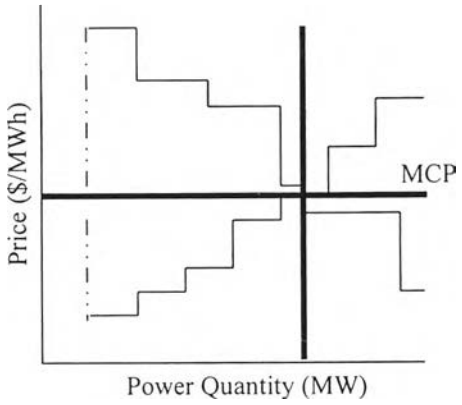
การจัดสรรกำลังการผลิตในกรณีที่มีความยืดหยุ่นของการใช้ไฟฟ้านี้จะแตกต่างจากกรณีที่ไม่มีความยืดหยุ่นของการใช้ไฟฟ้า คือ สามารถนำหลักการการหาค่าสูงสุดของผลประโยชน์รวมของระบบ (Social welfare) มาใช้ได้ [14-17] ในกรณีนี้รายได้ของผู้ใช้ไฟฟ้า คือ รายได้หรือผลตอบแทนจากการซื้อหรือใช้ไฟฟ้า ซึ่งมีความหมายในลักษณะเดียวกับต้นทุนการผลิตของผู้จ่ายไฟฟ้า กล่าวคือ รายได้และต้นทุนนี้ก็คือมูลค่าของพลังงานไฟฟ้าสำหรับผู้ใช้ และผู้จ่ายไฟฟ้า ตามลำดับ

เมื่อกำหนดให้ $B(d)$ คือ รายได้หรือผลตอบแทนจากการใช้ไฟฟ้า และ $C(s)$ คือ ค่าใช้จ่ายหรือต้นทุนจากการผลิตไฟฟ้า ผลประโยชน์รวมของระบบ $S(d,s)$ สามารถนิยามได้เป็น

$$S(d,s) = B(d) - C(s) \tag{3.20}$$

โดย d และ s คือ ปริมาณการใช้และการผลิตไฟฟ้า ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม สำหรับตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าซึ่งมีสมมติฐานให้เป็นตลาดในอุดมคติ (Ideal market) ดังนั้น รายได้หรือผลตอบแทนจากการใช้ไฟฟ้า และ ค่าใช้จ่ายหรือต้นทุนจากการผลิตไฟฟ้า ก็คือราคาเสนอซื้อ และ ราคาเสนอขายไฟฟ้า ตามลำดับ นั่นเอง ดังนั้นการอธิบายการคำนวณผลประโยชน์รวมของระบบสามารถทำได้โดยรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ผลประโยชน์รวมของระบบ

จากรูปที่ 3.1 พื้นที่ใต้กราฟการเสนอซื้อไฟฟ้า คือ ผลตอบแทนจากการใช้ไฟฟ้า $B(d)$ ส่วนพื้นที่ใต้กราฟการเสนอขาย คือ ต้นทุนจากการผลิตไฟฟ้า $C(s)$ โดยผลประโยชน์รวมของระบบคือผลต่างระหว่างพื้นที่ทั้งสองหรือพื้นที่ระหว่างกราฟนั่นเอง โดย MCP (Market clearing price) คือ ราคาไฟฟ้าที่ได้จากจุดตัดของกราฟ ซึ่งสมมติให้เป็นราคาที่ใช้ในการซื้อขายพลังงานไฟฟ้า

การจัดสรรกำลังการผลิตในกรณีนี้มีวัตถุประสงค์ คือ หาค่าสูงสุดของผลประโยชน์ของผู้ใช้ไฟฟ้า และ หาค่าต่ำสุดของต้นทุนของผู้จ่ายไฟฟ้า ซึ่งก็คือการหาค่าสูงสุดของพื้นที่ที่อยู่ระหว่างกราฟการเสนอซื้อ และกราฟการเสนอขายนั่นเอง โดยหลักการการรวมปัญหาของความยืดหยุ่นในการใช้ไฟฟ้ามาร่วมพิจารณานั้น สามารถทำได้โดยการพิจารณาให้ผู้ใช้ไฟฟ้ามีค่าเสมือนหนึ่งเป็นผู้ผลิต เพียงแต่เป็นไปในลักษณะตรงกันข้ามกันเท่านั้น ดังนั้นปัญหาการคำนวณสามารถเขียนได้ดังนี้

$$Max\left\{\left[\sum_{d}^{N_d}\sum_{db}^{N_{db}}\left(p_{db}\times Q_{db}\right)\right]-\left[\sum_{g}^{N_g}\sum_{gb}^{N_{gb}}\left(p_{gb}\times Q_{gb}\right)\right]\right\} \tag{3.21}$$

s.t. $$\left[\sum_{d}^{N_d}\sum_{db}^{N_{db}}\left(Q_{db}\right)\right]+P_l-\left[\sum_{g}^{N_g}\sum_{gb}^{N_{gb}}\left(Q_{gb}\right)\right]=0 \tag{3.22}$$

$$\left|P_t\right|-P_{t,limit}\le 0 \qquad \text{for } t\in N_t \tag{3.23}$$

$$0\le Q_{db}\le Q_{db,max} \tag{3.24}$$

$$0\le Q_{gb}\le Q_{gb,max} \tag{3.25}$$

โดย $$\sum_{d}^{N_d}\sum_{db}^{N_{db}}\left(Q_{db}\right)=\sum_{d}^{N_d}P_d$$

p_{db} คือ ราคาเสนอช่วงที่ b ของผู้ใช้ไฟฟ้า d

Q_{db} คือ ปริมาณเสนอช่วงที่ b ของผู้ใช้ไฟฟ้า d

N_{db} คือ จำนวนช่วงการเสนอของผู้ใช้ไฟฟ้า d

$Q_{db,max}$ คือ พิกัดกำลังไฟฟ้าเสนอช่วงที่ b ของผู้ใช้ไฟฟ้า d

เนื่องจากสมการที่ (3.22) และ (3.23) มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ดังนั้นเทคนิคการทำให้เป็นเชิงเส้นรอบจุดทำงานจะถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาดังนี้

$$Max\left\{\left[\sum_{d}^{N_d}\sum_{db}^{N_{db}}\left(p_{db}\times\left(Q_{db}^{0}+\Delta Q_{db}\right)\right)\right]-\left[\sum_{g}^{N_g}\sum_{gb}^{N_{gb}}\left(p_{gb}\times\left(Q_{gb}^{0}+\Delta Q_{gb}\right)\right)\right]\right\}$$

$$\Rightarrow Max\left\{\left\{\sum_{d}^{N_d}\sum_{db}^{N_{db}}\left(p_{db}\times Q_{db}^{0}\right)+\sum_{d}^{N_d}\sum_{db}^{N_{db}}\left(p_{db}\times\Delta Q_{db}\right)\right\}-\left\{\sum_{g}^{N_g}\sum_{gb}^{N_{gb}}\left(p_{gb}\times Q_{gb}^{0}\right)+\sum_{g}^{N_g}\sum_{gb}^{N_{gb}}\left(p_{gb}\times\Delta Q_{gb}\right)\right\}\right\}$$

$$\Rightarrow Max\left\{\left[\sum_{d}^{N_d}\sum_{db}^{N_{db}}\left(p_{db}\times\Delta Q_{db}\right)\right]-\left[\sum_{g}^{N_g}\sum_{gb}^{N_{gb}}\left(p_{gb}\times\Delta Q_{gb}\right)\right]\right\} \tag{3.26}$$

$$\text{s.t.}\left[\sum_{d}^{N_d}\sum_{db}^{N_{db}}\left(Q_{db}^{0}+\Delta Q_{db}\right)\right]+\left[P_t^{0}-\sum_{d}^{N_d}\gamma_d\sum_{db}^{N_{db}}\Delta Q_{db}+\sum_{g}^{N_g}\gamma_g\sum_{gb}^{N_{gb}}\Delta Q_{gb}\right]$$

$$-\left[\sum_{g}^{N_g}\sum_{gb}^{N_{gb}}\left(Q_{gb}^{0}+\Delta Q_{gb}\right)\right]=0 \tag{3.27}$$

$$\left|P_t^{0}-\left(\sum_{d}^{N_d}\beta_{t,d}\sum_{db}^{N_{db}}\Delta Q_{db}\right)+\left(\sum_{g}^{N_g}\beta_{t,g}\sum_{gb}^{N_{gb}}\Delta Q_{gb}\right)\right|-P_{t,limit}\le 0 \qquad t\in N_t \tag{3.28}$$

$$0\le Q_{db}^{0}+\Delta Q_{db}\le Q_{db,max} \tag{3.29}$$

$$0\le Q_{gb}^{0}+\Delta Q_{gb}\le Q_{gb,max} \tag{3.30}$$

โดย Q_{db}^{0} คือ ปริมาณเสนอช่วงที่ b ของผู้ใช้ไฟฟ้า d ณ จุดทำงานเริ่มต้น

ΔQ_{db} คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาณเสนอช่วงที่ b ของผู้ใช้ไฟฟ้า d

γ_d คือ ความไวของกำลังสูญเสียในระบบเมื่อเทียบกับผู้ใช้ไฟฟ้า d

$\beta_{t,d}$ คือ ความไวของกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่ง t เมื่อเทียบกับผู้ใช้ไฟฟ้า d

เช่นเดียวกับกรณีผู้จ่ายไฟฟ้า ความไวของกำลังสูญเสียในระบบ และความไวของกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่งเมื่อเทียบกับผู้ใช้ไฟฟ้า d ซึ่งนิยามโดย $\partial P_l / \partial P_d$ และ $\partial P_t / \partial P_d$ โดยอาศัยการวิเคราะห์ เอ.ซี. นิวตัน-ราฟสัน กับเทคนิคการหาอนุพันธ์แยกส่วนและเทคนิคกฎลูกโซ่ ดังแสดงต่อไปในหัวข้อที่ 3.3

ข้อสังเกต :

1) หลักการสำคัญการจัดสรรกำลังการผลิตในกรณีที่การใช้ไฟฟ้ามีความยืดหยุ่นจะเหมือนกับการจัดสรรกำลังการผลิตในกรณีที่การใช้ไฟฟ้าไม่มีความยืดหยุ่น โดยส่วนที่แตกต่างกันคือ ตัวแปรการคำนวณในกรณีที่ไม่มีความยืดหยุ่นของการใช้ไฟฟ้าจะมีเพียงปริมาณเสนอขายในแต่ละช่วง Q_{gb} ในขณะที่ตัวแปรการคำนวณในกรณีที่การใช้ไฟฟ้ามีความยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้นในส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ผู้ซื้อจะได้รับการจัดสรรในแต่ละช่วงการเสนอ Q_{db}

2) ในส่วนของปริมาณไฟฟ้าที่ได้รับการจัดสรรกำลังการผลิต จะได้ว่าการจัดสรรกำลังการผลิตโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามสมการที่ (3.12) มีค่าเท่ากับการจัดสรรกำลังการผลิตโดยให้ผลประโยชน์ของผู้ผลิตไฟฟ้าสูงที่สุด เช่นเดียวกับการจัดสรรกำลังการผลิตโดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามสมการที่ (3.21) ก็จะให้ผลลัพธ์ของปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ได้รับการจัดสรรกำลังการผลิตมีค่าเท่ากับการจัดสรรกำลังการผลิตโดยให้ผลประโยชน์รวมของผู้ผลิตไฟฟ้ากับผลประโยชน์ของผู้ใช้ไฟฟ้าสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม ค่าและความหมายของราคาไฟฟ้าโนดที่ได้จะแตกต่างกัน โดยรายละเอียดของค่าและความหมายของราคาไฟฟ้าโนดนี้ สามารถอธิบายดังแสดงในบทที่ 4 ต่อไป

ขั้นตอนการคำนวณจัดสรรกำลังการผลิตโดยทั่วไปสามารถอธิบายได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : เริ่มต้นด้วยการเก็บรวบรวมข้อมูลการเสนอซื้อและเสนอขายจากสมาชิกในตลาด จากนั้นทำการสร้างกราฟการเสนอซื้อและเสนอขายรวม และทำการหาจุดตัดของกราฟทั้งสอง

ขั้นตอนที่ 2 : เลือกบัสอ้างอิงในระบบ โดยหลักการเลือกบัสอ้างอิง คือ จะเลือกบัสผลิตไฟฟ้าที่เป็นบัสรับผิดชอบการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าหน่วยสุดท้าย (Marginal bus) ที่มีราคาการเสนอขายต่ำที่สุด จากนั้นทำการหาจุดทำงานของระบบโดยการวิเคราะห์โหลดโฟลว์

ขั้นตอนที่ 3 : ตรวจสอบว่ามีสายส่งเส้นใดเกิดความแออัดขึ้น หากพบว่ามีความแออัดเกิดขึ้นก็จะนำอสมการพิกัดการไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับสายส่งเส้นนั้นมาเป็นข้อจำกัดเพิ่มขึ้น

ขั้นตอนที่ 4 : คำนวณค่าตัวประกอบความไวของกำลังสูญเสีย และ กำลังบนสายส่ง (ในกรณีที่มีความแออัดเกิดขึ้นบนสายส่ง) ตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.3

ขั้นตอนที่ 5 : จากข้อมูลการเสนอซื้อและเสนอขาย และค่าความไวที่คำนวณได้ ทำการสร้างชุดสมการการคำนวณที่ถูกทำให้เป็นเชิงเส้นตามสมการในหัวข้อที่ 3.1.1 และสมการในหัวข้อที่ 3.1.2 สำหรับกรณีที่การใช้ไฟฟ้าไม่มีความยืดหยุ่น และมีความยืดหยุ่น ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 6 : ทำการปรับค่าปริมาณกำลังการผลิตสำหรับกรณีที่การใช้ไฟฟ้าในระบบไม่มีความยืดหยุ่น หรือ ทั้งปริมาณกำลังการผลิตและปริมาณการใช้ไฟฟ้าในกรณีที่การใช้ไฟฟ้าในระบบมีความยืดหยุ่น

ขั้นตอนที่ 7 : เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 2 ทำการเลือกบัสอ้างอิงและวิเคราะห์โหลดโฟลว์เพื่อหาจุดทำงานของระบบ

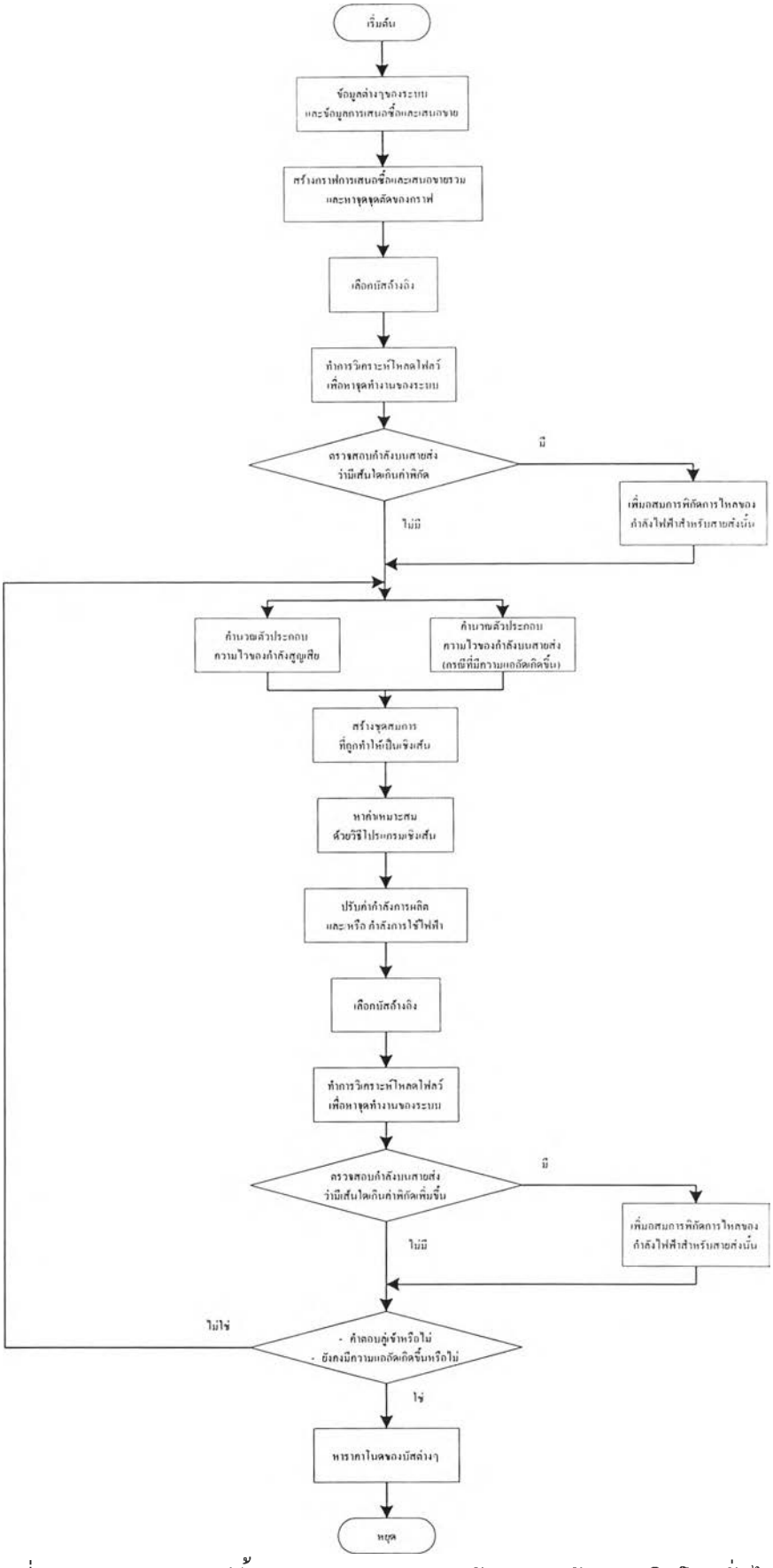
ขั้นตอนที่ 8 : ตรวจสอบว่าหลังจากการปรับค่าการจัดสรรกำลังไฟฟ้า มีสายส่งเส้นใดเกิดความแออัดเพิ่มขึ้นอีกหรือไม่ หากมีสายส่งเส้นใดเกิดความแออัดขึ้นก็จะนำอสมการพิกัดการไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับสายส่งเส้นนั้นมาเป็นข้อจำกัดเพิ่มขึ้น

ขั้นตอนที่ 9 : พิจารณาว่าคำตอบที่ได้เป็นที่ยอมรับหรือไม่ โดยพิจารณาจาก การลู่เข้าของจุดทำงานของระบบ และ การที่ไม่มีสายส่งเส้นใดในระบบเกิดความแออัดเพิ่มขึ้นอีก

ขั้นตอนที่ 10 : คำนวณราคาไฟฟ้าโนดของบัสต่างๆ และผลทางด้านการเงินที่ต้องการ

หมายเหตุ : ในขั้นตอนที่ 2 การเลือกบัสอ้างอิงโดยทั่วไปเมื่อระบบไม่มีความแออัดของระบบส่งเกิดขึ้น สามารถทำได้โดยให้บัสรับผิดชอบการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าหน่วยสุดท้ายซึ่งมีเพียงบัสเดียวเป็นบัสอ้างอิง ส่วนในกรณีที่ระบบมีความแออัดของระบบส่งเกิดขึ้น จะส่งผลให้บัสรับผิดชอบการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าหน่วยสุดท้ายมีมากกว่าหนึ่งบัส ดังนั้นจึงต้องทำการเลือกบัสรับผิดชอบการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าหน่วยสุดท้ายที่มีราคาการเสนอขายต่ำที่สุดเป็นบัสอ้างอิง

การคำนวณการจัดสรรกำลังการผลิตโดยทั่วไป สามารถสรุปเป็นขั้นตอนการคำนวณได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 Flowchart สรุปขั้นตอนการคำนวณการจัดสรรกำลังการผลิตโดยทั่วไป

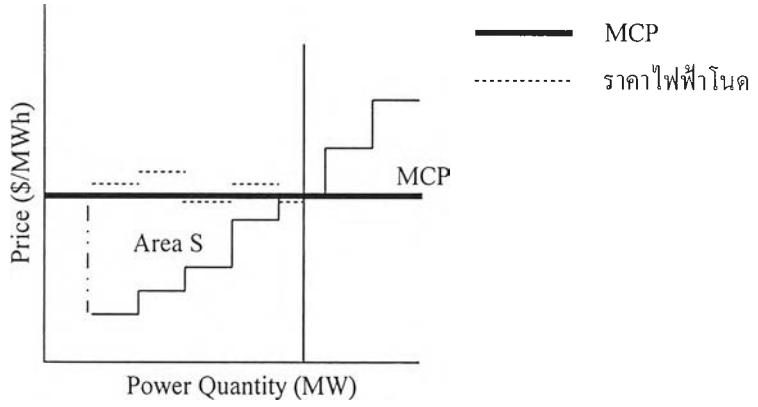
3.2 การจัดสรรกำลังการผลิตโดยพิจารณาถึงราคาไฟฟ้าจริง

เนื่องจากการซื้อขายพลังงานไฟฟ้าในตลาดกลางการซื้อขายไฟฟ้าในทางปฏิบัติ ราคาไฟฟ้าที่ผู้ใช้ไฟฟ้าต้องเสียและราคาไฟฟ้าที่ผู้จ่ายไฟฟ้าได้รับนั้น จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ตั้งในระบบของผู้ใช้ไฟฟ้าและผู้จ่ายไฟฟ้า ซึ่งราคาไฟฟ้านี้เรียกว่า ราคาแบบโนดหรือราคาแบบโซน ซึ่งขึ้นอยู่กับตลาดกลางการซื้อขายไฟฟ้าว่าจะเลือกใช้ระบบราคาไฟฟ้าแบบใด หรือการใช้แบบรวมกันทั้งสองระบบ โดยรายละเอียดการคำนวณราคาไฟฟ้าได้นำแสดงไว้ในบทที่ 4

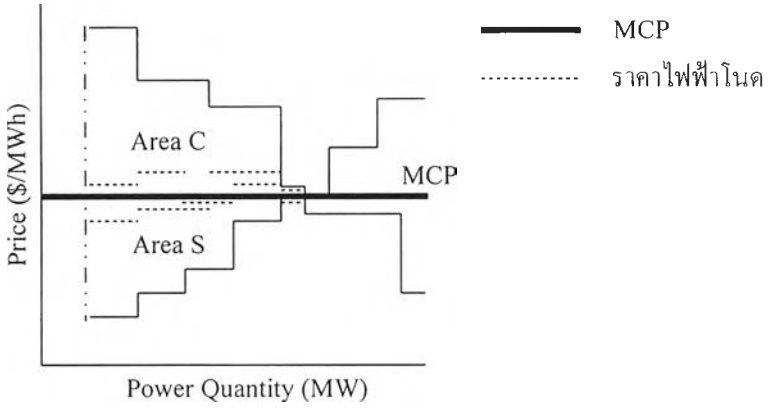
ดังนั้นการคำนวณการจัดสรรกำลังการผลิตโดยทั่วไปจึงไม่สามารถคำนวณผลประโยชน์รวมของระบบได้อย่างถูกต้อง เพราะวิธีการจัดสรรกำลังการผลิตโดยทั่วไปนั้น อาศัยหลักการบนพื้นฐานของตลาดกลางไฟฟ้าที่มีราคาไฟฟ้าค่าเดียว คือ MCP ซึ่งได้จากจุดตัดของกราฟการเสนอซื้อและเสนอขายของสมาชิกในตลาด ซึ่งในทางปฏิบัติราคาไฟฟ้าที่ได้จากจุดตัดของกราฟนี้จะมีค่าแตกต่างจากราคาไฟฟ้าทั้งแบบโนดหรือแบบโซน

โดยในหัวข้อนี้จะกำหนดสมมติให้การซื้อขายไฟฟ้าในตลาดกลางการซื้อขายไฟฟ้าของสมาชิกในตลาดทั้งหมดใช้ราคาไฟฟ้าแบบโนด เพื่อแสดงความชัดเจนของผลของราคาไฟฟ้าที่แตกต่างกันประจำแต่ละบัส

รูปที่ 3.3 และ 3.4 แสดงความแตกต่างของ MCP และราคาไฟฟ้าแบบโนดของสมาชิกในตลาดประจำแต่ละช่วงการเสนอ (เส้นประ) และ ความแตกต่างของพื้นที่ที่ได้รับ สำหรับกรณีที่ มีและไม่มีความยืดหยุ่นของการใช้ไฟฟ้า ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 ความแตกต่างของราคาไฟฟ้าโนดและ MCP
และพื้นที่ที่ได้รับ สำหรับกรณีที่ไม่มีความยืดหยุ่นของการใช้ไฟฟ้า



รูปที่ 3.4 ความแตกต่างของราคาไฟฟ้าโนดและ MCP
และพื้นที่ที่ได้รับ สำหรับกรณีที่มีความยืดหยุ่นของการใช้ไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.3 และ 3.4 จะพบว่า MCP (เส้นทึบ) จะมีค่าแตกต่างจากราคาไฟฟ้าที่ใช้ในการซื้อขายไฟฟ้าจริง ซึ่งส่งผลให้ผลประโยชน์รวมของทั้งฝ่ายผู้จ่ายไฟฟ้า (Area S) และผู้ใช้ไฟฟ้า (Area C) ซึ่งได้จาก MCP แตกต่างจากผลประโยชน์รวมของระบบที่แท้จริง ที่ได้จากราคาไฟฟ้าแบบโนด

ดังนั้นในหัวข้อนี้จะได้นำเสนอการจัดสรรกำลังการผลิตที่คำนึงถึงราคาไฟฟ้าจริงที่ใช้ในการซื้อขายไฟฟ้าของสมาชิกในตลาดทั้งหมด โดยพิจารณาแบ่งเป็นกรณีที่ตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้ามีและไม่มีความยืดหยุ่นของการใช้ไฟฟ้า ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.2.1 และ 3.2.2

3.2.1 การจัดสรรกำลังการผลิตที่ไม่มีความยืดหยุ่นของการใช้ไฟฟ้า โดยพิจารณาถึงราคาไฟฟ้าจริง

ในหัวข้อที่ 3.1.1 วัตถุประสงค์ของการจัดสรรกำลังการผลิต คือ การหาค่าต่ำสุดของต้นทุนการผลิตไฟฟ้า หรือ ผลคูณของราคาไฟฟ้าเสนอขาย และปริมาณไฟฟ้าเสนอขาย ซึ่งในการจัดสรรกำลังการผลิตที่ไม่มีความยืดหยุ่นของการใช้ไฟฟ้าโดยพิจารณาถึงราคาไฟฟ้าจริงจะเปลี่ยนฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นดังนี้

$$Objective\ function = \sum_{g}^{N_g} \left\{ \left[nodal\ \ price_g - offered\ \ price_g \right] \times offered\ \ quantity_g \right\} \tag{3.31}$$

โดย $nodal\ price_g$ มีค่าเป็นบวก

สมการที่ (3.31) สามารถเขียนได้ในรูปของปัญหาการคำนวณค่าเหมาะสมโดยใช้ข้อมูลการเสนอขายไฟฟ้าได้ดังนี้

$$Max\left\{\sum_{g}^{N_g}\sum_{gb}^{N_{gb}}\left[\left(\rho_g - p_{gb}\right)\times Q_{gb}\right]\right\} \tag{3.32}$$

โดย ρ_g คือ ราคาไฟฟ้าโนดที่ผู้จ่ายไฟฟ้าได้รับ และ มีข้อจำกัดเงื่อนไขของการจัดสรรกำลังการผลิตเหมือนกับในสมการที่ (3.13) ถึง (3.15)

3.2.2 การจัดสรรกำลังการผลิตที่มีความยืดหยุ่นของการใช้ไฟฟ้าโดยพิจารณาถึงราคาไฟฟ้าจริง

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาผลของความยืดหยุ่นในการใช้ไฟฟ้าในระบบ ซึ่งสามารถนำหลักการการหาค่าสูงสุดของผลประโยชน์รวมของระบบมาใช้ได้ เนื่องจากหลักการนี้ครอบคลุมถึงผลประโยชน์ของทางด้านผู้ใช้ไฟฟ้า ดังนั้นรูปแบบการคำนวณจะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

$$\begin{aligned} Objective\ \ function = & \sum_{d}^{N_d}\left\{\left[bid\ price_d - nodal\ price_d\right]\times\ bid\ quantity_d\right\} \\ & + \sum_{g}^{N_g}\left\{\left[nodal\ price_g - offered\ price_g\right]\times offered\ quantity_g\right\} \end{aligned} \tag{3.33}$$

โดยทั้ง $nodal\ price_d$ และ $nodal\ price_g$ มีค่าเป็นบวก

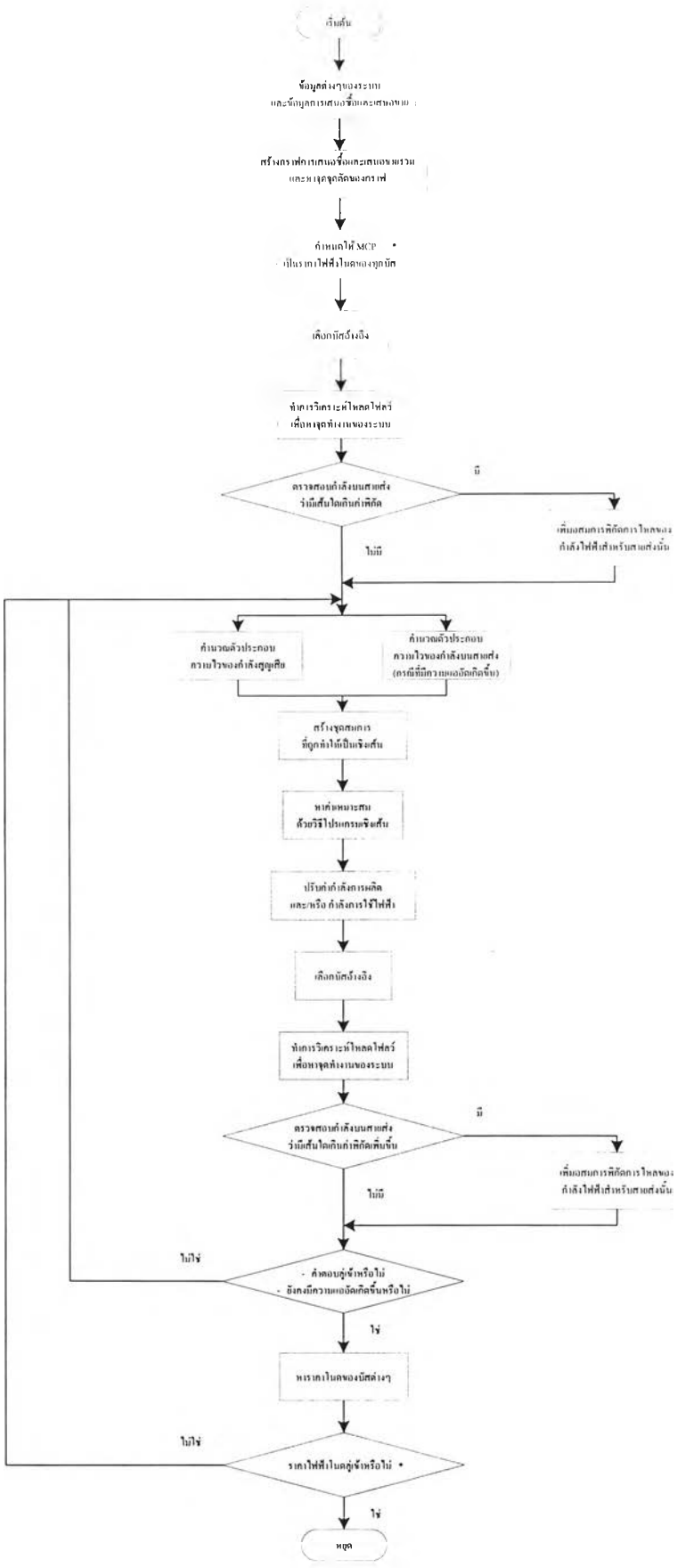
สมการที่ (3.33) สามารถเขียนได้ในรูปของปัญหาการคำนวณค่าเหมาะสมโดยใช้ข้อมูลการเสนอซื้อและเสนอขายไฟฟ้าได้ดังนี้

$$Max\left\{\left[\sum_{d}^{N_d}\sum_{db}^{N_{db}}\left(\left(p_{db} - \rho_d\right)\times Q_{db}\right)\right] + \left[\sum_{g}^{N_g}\sum_{gb}^{N_{gb}}\left(\left(\rho_g - p_{gb}\right)\times Q_{gb}\right)\right]\right\} \tag{3.34}$$

โดย ρ_d คือ ราคาไฟฟ้าโนดที่ผู้ใช้ไฟฟ้าต้องจ่าย และ มีข้อจำกัดเงื่อนไขของการจัดสรรกำลังการผลิตเหมือนกับในสมการที่ (3.22) ถึง (3.25)

การคำนวณหาคำตอบของปัญหาการจัดสรรกำลังการผลิตในหัวข้อ 3.2.1 และ 3.2.2 นี้ สามารถแก้ไขด้วยวิธีการเช่นเดียวกันกับกรณีการจัดสรรกำลังการผลิตโดยทั่วไป คือ การนำเทคนิคการทำให้เป็นเชิงเส้นรอบจุดทำงานมาใช้ในการแก้ปัญหา

ขั้นตอนในการคำนวณการจัดสรรกำลังการผลิตโดยพิจารณาถึงราคาไฟฟ้าจริงนี้จะคล้ายกับการจัดสรรกำลังการผลิตโดยวิธีทั่วไป ซึ่งสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการคำนวณการจัดสรรกำลังการผลิตโดยพิจารณาถึงราคาไฟฟ้าจริง

จากรูปที่ 3.5 จะพบว่าขั้นตอนต่างๆคล้ายกับการจัดสรรกำลังการผลิตโดยทั่วไป จะแตกต่างกันใน 2 ขั้นตอนที่มีเครื่องหมาย * นั่นคือ ขั้นตอนการกำหนดราคาไฟฟ้าโนดของบัสต่างๆให้มีค่าเท่ากับ ค่า MCP สำหรับการคำนวณในรอบแรก และ ขั้นตอนการตรวจสอบว่าราคาไฟฟ้าโนดของทุกบัสลู่เข้าหรือไม่

3.3 การคำนวณความไวของกำลังสูญเสียและความไวของกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่ง

ในหัวข้อนี้จะเป็นการแสดงการคำนวณค่าความไวของกำลังสูญเสียในระบบและกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่ง เทียบกับการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าสุทธิ ณ บัสต่างๆ ซึ่งนำไปใช้ในการจัดสรรกำลังการผลิตดังแสดงในหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 นอกจากนี้ค่าความไวของกำลังสูญเสียในระบบและกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่งยังมีผลต่าราคาไฟฟ้าแบบโนดดังที่จะนำเสนอในบทต่อไป

3.3.1 การคำนวณความไวของกำลังสูญเสียในระบบเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าสุทธิที่จ่ายเข้าบัสต่างๆ

การคำนวณความไวของกำลังสูญเสียในระบบสามารถทำการคำนวณได้ 2 วิธี คือ

1) การคำนวณโดยพิจารณาว่ากำลังสูญเสียในระบบได้รับการชดเชยจากบัสอ้างอิง

2) การคำนวณโดยพิจารณาว่ากำลังสูญเสียในระบบได้รับการชดเชยจากบัสต่างๆในระบบ

อย่างไรก็ตาม การคำนวณในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้การคำนวณในวิธีที่ 2 เนื่องจากในสภาวะของตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้านั้น สมาชิกในตลาดซึ่งอยู่ประจำบัสต่างๆ ควรมีความเท่าเทียมกันในการแข่งขัน ดังนั้นจึงควรพิจารณาให้บัสต่างๆมีส่วนร่วมในการชดเชยกำลังสูญเสียในระบบที่เกิดขึ้น

1) การคำนวณโดยพิจารณาว่ากำลังสูญเสียในระบบได้รับการชดเชยจากบัสอ้างอิง

การคำนวณค่าความไวของกำลังสูญเสียในระบบโดยวิธีนี้จะใช้สมมติฐานว่ากำลังสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบได้รับการชดเชยจากบัสอ้างอิง โดยวิธีการเลือกบัสอ้างอิงที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 3.1 ดังนั้นสามารถเขียนสมการแสดงการจ่ายกำลังไฟฟ้าของบัสอ้างอิงที่สัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ดังนี้

I20545812

$$P_{ref} = P_{ref\ load} + P_L \tag{3.35}$$

โดยที่ P_{ref} คือ กำลังไฟฟ้าจริงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสอ้างอิง

$P_{ref\ load}$ คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ร่วมจ่ายให้โหลดในระบบโดยบัสอ้างอิง

P_L คือ กำลังไฟฟ้าจริงทั้งหมดที่สูญเสียในระบบ

เนื่องจากค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ร่วมจ่ายให้โหลดในระบบโดยบัสอ้างอิง $P_{ref\ load}$ นี้มีค่าคงที่ จะได้ว่าการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่จ่ายโดยบัสอ้างอิงเท่ากับการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบดังนี้

$$\Delta P_{ref} = \Delta P_L \tag{3.36}$$

โดยการทำอนุพันธ์ (Differentiation) เทียบกับมุมเฟสของแรงดัน ณ บัส m ใดๆ จะได้

$$\frac{\partial P_{ref}}{\partial \delta_m} = \frac{\partial P_L}{\partial \delta_m} \tag{3.37}$$

และเทียบกับขนาดของแรงดัน ณ บัส m ใดๆ จะได้

$$\frac{\partial P_{ref}}{\partial |V_m|} = \frac{\partial P_L}{\partial |V_m|} \tag{3.38}$$

เนื่องจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดในระบบมีค่าขึ้นกับอยู่กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ ณ บัสต่างๆที่จ่ายเข้าสู่ระบบ โดยกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ ณ บัสต่างๆที่จ่ายเข้าสู่ระบบนี้ ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันและมุมเฟสของแรงดัน ณ บัส m ใดๆ ดังนั้นสมการที่ (3.37) และ (3.38) สามารถใช้ทฤษฎีอนุพันธ์แยกส่วน (Partial differentiation) และกฎลูกโซ่ (Chain rule) ได้ดังนี้

$$\frac{\partial P_{ref}}{\partial \delta_m} = \frac{\partial P_L}{\partial \delta_m} = \sum_{i=1}^{N}\left[\frac{\partial P_L}{\partial P_i}\cdot\frac{\partial P_i}{\partial \delta_m} + \frac{\partial P_L}{\partial Q_i}\cdot\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_m}\right] \tag{3.39}$$

และ

$$\frac{\partial P_{ref}}{\partial |V_m|} = \frac{\partial P_L}{\partial |V_m|} = \sum_{i=1}^{N}\left[\frac{\partial P_L}{\partial P_i}\cdot\frac{\partial P_i}{\partial |V_m|} + \frac{\partial P_L}{\partial Q_i}\cdot\frac{\partial Q_i}{\partial |V_m|}\right] \tag{3.40}$$

ซึ่งสามารถเขียนในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ref}}{\partial \delta_m} \\ \frac{\partial P_{ref}}{\partial |V_m|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \delta_m} & \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_m} \\ \frac{\partial P_i}{\partial |V_m|} & \frac{\partial Q_i}{\partial |V_m|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial P_i} \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} \end{bmatrix} \tag{3.41}$$

โดยที่ $\frac{\partial P_i}{\partial \delta_m}$, $\frac{\partial P_i}{\partial |V_m|}$, $\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_m}$, $\frac{\partial Q_i}{\partial |V_m|}$ คือ สมาชิกในเมตริกซ์จาโคเบียน ดังนั้นสมการที่ (3.41) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ref}}{\partial \delta_m} \\ \frac{\partial P_{ref}}{\partial |V_m|} \end{bmatrix} = \left[J^T\right] \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial P_i} \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} \end{bmatrix} \tag{3.42}$$

ดังนั้นค่าความไวของกำลังสูญเสียในระบบเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าสุทธิที่จ่ายเข้าบัสต่างๆ คือ

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial P_i} \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} \end{bmatrix} = \left[J^T\right]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ref}}{\partial \delta_m} \\ \frac{\partial P_{ref}}{\partial |V_m|} \end{bmatrix} \tag{3.43}$$

2) การคำนวณโดยพิจารณาว่ากำลังสูญเสียในระบบได้รับการชดเชยจากบัสต่างๆในระบบ

การคำนวณค่าความไวของกำลังสูญเสียในระบบโดยวิธีนี้จะใช้สมมติฐานว่ากำลังสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบได้รับการชดเชยจากบัสต่างๆในระบบ ดังนั้นสามารถเขียนสมการแสดงการจ่ายกำลังไฟฟ้าของบัสต่างๆที่สัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบได้ดังนี้

$$\left(P_1 - P_{1,load}\right) + \left(P_2 - P_{2,load}\right) + \ldots + \left(P_i - P_{i,load}\right) + \ldots + \left(P_N - P_{N,load}\right) = P_L \tag{3.44}$$

โดยที่ P_i คือ กำลังไฟฟ้าจริงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i

$P_{i,load}$ คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ร่วมจ่ายให้โหลดในระบบโดยบัส i

P_L คือ กำลังไฟฟ้าจริงทั้งหมดที่สูญเสียในระบบ

สมการที่ (3.44) สามารถเขียนได้ในรูปของกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และปริมาณโหลด ณ แต่ละบัสได้เป็น

$$\sum_{i_g=1}^{N_g} P_{i_g} + \sum_{i_l=1}^{N_l} P_{i_l} = P_L \tag{3.45}$$

โดยที่ P_{i_g} คือ ปริมาณการผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ i_g

P_{i_l} คือ ปริมาณโหลดจากโหลดที่ i_l

N_g คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดในระบบ

N_l คือ จำนวนโหลดทั้งหมดในระบบ

สมการดังกล่าวมีชื่อเรียกว่า สมการสมดุลกำลังไฟฟ้า (Power balance equation) และสามารถแทนผลรวมกำลังการผลิตและปริมาณโหลดด้านซ้ายของสมการด้วยสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow equation) ของทุกบัสในระบบ ดังนี้

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}|V_i||V_j|y_{ij}\left[cos\left(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}\right)\right] = P_L \tag{3.46}$$

เช่นเดียวกับการคำนวนโดยวิธีพิจารณาว่ากำลังสูญเสียในระบบได้รับการชดเชยจากบัสอ้างอิง โดยการใช้ทฤษฎีอนุพันธ์แยกส่วน (Partial differentiation) และกฎลูกโซ่ (Chain rule) จะได้

$$\frac{\partial P_L}{\partial \delta_m} = \sum_{i=1}^{N}\left[\frac{\partial P_L}{\partial P_i}\cdot\frac{\partial P_i}{\partial \delta_m} + \frac{\partial P_L}{\partial Q_i}\cdot\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_m}\right] \tag{3.47}$$

และ

$$\frac{\partial P_L}{\partial |V_m|} = \sum_{i=1}^{N}\left[\frac{\partial P_L}{\partial P_i}\cdot\frac{\partial P_i}{\partial |V_m|} + \frac{\partial P_L}{\partial Q_i}\cdot\frac{\partial Q_i}{\partial |V_m|}\right] \tag{3.48}$$

ซึ่งสามารถเขียนในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dfrac{\partial P_L}{\partial \delta_m} \\ \dfrac{\partial P_L}{\partial |V_m|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial P_i}{\partial \delta_m} & \dfrac{\partial Q_i}{\partial \delta_m} \\ \dfrac{\partial P_i}{\partial |V_m|} & \dfrac{\partial Q_i}{\partial |V_m|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dfrac{\partial P_L}{\partial P_i} \\ \dfrac{\partial P_L}{\partial Q_i} \end{bmatrix} \tag{3.49}$$

โดยที่ $\dfrac{\partial P_i}{\partial \delta_m}$, $\dfrac{\partial P_i}{\partial |V_m|}$, $\dfrac{\partial Q_i}{\partial \delta_m}$, $\dfrac{\partial Q_i}{\partial |V_m|}$ คือ สมาชิกในเมตริกซ์จาโคเบียน ดังนั้นสมการที่ (3.49) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \dfrac{\partial P_L}{\partial \delta_m} \\ \dfrac{\partial P_L}{\partial |V_m|} \end{bmatrix} = \left[J^T\right] \begin{bmatrix} \dfrac{\partial P_L}{\partial P_i} \\ \dfrac{\partial P_L}{\partial Q_i} \end{bmatrix} \tag{3.50}$$

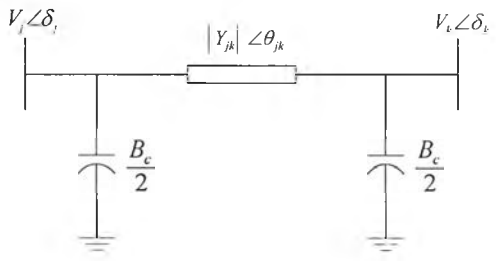
ดังนั้นค่าความไวของกำลังสูญเสียในระบบเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าสุทธิที่จ่ายเข้าบัสต่างๆ คือ

$$\begin{bmatrix} \dfrac{\partial P_L}{\partial P_i} \\ \dfrac{\partial P_L}{\partial Q_i} \end{bmatrix} = \left[J^T\right]^{-1} \begin{bmatrix} \dfrac{\partial P_L}{\partial \delta_m} \\ \dfrac{\partial P_L}{\partial |V_m|} \end{bmatrix} \tag{3.51}$$

โดย P_L ในสมการด้านขวาคือสมการที่ (3.46)

3.3.2 การคำนวณความไวของกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่งเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าสุทธิที่จ่ายเข้าบัสต่างๆ

โดยการพิจารณาสายส่ง ซึ่งต่ออยู่ที่บัส j และ k ดังแสดงในรูปที่ 3.6 สมการของกำลังปรากฏที่ไหลในสายส่งแสดงดังสมการที่ (3.52)



รูปที่ 3.6 แบบจำลองสายส่ง

$$S_{jk} = |V_j|^2 |Y_{jk}| \angle -\theta_{jk} - |V_j||V_k||Y_{jk}| \angle \delta_j - \delta_k - \theta_{jk} + j\frac{B_c}{2}|V_j||V_k| \tag{3.52}$$

จะได้ส่วนจริงในสมการ (3.52) เป็นดังนี้

$$P_{jk} = |V_j|^2 |Y_{jk}| \cos(\theta_{jk}) - |V_j||V_k||Y_{jk}| \cos(\delta_j - \delta_k - \theta_{jk}) \tag{3.53}$$

โดยที่ S_{jk} คือ กำลังปรากฏที่ไหลในสายส่ง j-k

P_{jk} คือ กำลังจริงที่ไหลในสายส่ง j-k

$|V_j|, |V_k|$ คือ ขนาดแรงดันที่บัส j และ k ตามลำดับ

δ_j, δ_k คือ มุมของแรงดันที่บัส j และ k ตามลำดับ

$Y_{jk} \angle \theta_{jk}$ คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ ของสายส่ง

B_c คือ ค่าซัสเซพแตนท์ของตัวอัดประจุสายส่ง

เช่นเดียวกับการคำนวณความไวของกำลังสูญเสียในระบบ สามารถคำนวณความไวของกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่งเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าสุทธิที่จ่ายเข้าบัสต่างๆ ได้ดังนี้

โดยการใช้ทฤษฎีอนุพันธ์แยกส่วน และกฎลูกโซ่ จะได้

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial \delta_m} = \sum_{i=1}^{N} \left[\frac{\partial P_{jk}}{\partial P_i} \cdot \frac{\partial P_i}{\partial \delta_m} + \frac{\partial P_{jk}}{\partial Q_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_m} \right] \tag{3.54}$$

และ

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial |V_m|} = \sum_{i=1}^{N} \left[\frac{\partial P_{jk}}{\partial P_i} \cdot \frac{\partial P_i}{\partial |V_m|} + \frac{\partial P_{jk}}{\partial Q_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial |V_m|} \right] \tag{3.55}$$

โดยที่ N คือ จำนวนบัสในระบบไฟฟ้า

P_i คือ กำลังไฟฟ้าจริงสุทธิที่ฉีดเข้าบัสที่ i

Q_i คือ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสุทธิที่ฉีดเข้าบัสที่ i

δ_m คือ มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส m

$|V_m|$ คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส m

ซึ่งสามารถเขียนในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{jk}}{\partial \delta_m} \\ \frac{\partial P_{jk}}{\partial |V_m|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \delta_m} & \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_m} \\ \frac{\partial P_i}{\partial |V_m|} & \frac{\partial Q_i}{\partial |V_m|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{jk}}{\partial P_i} \\ \frac{\partial P_{jk}}{\partial Q_i} \end{bmatrix} \tag{3.56}$$

โดยที่ $\frac{\partial P_i}{\partial \delta_m}$, $\frac{\partial P_i}{\partial |V_m|}$, $\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_m}$, $\frac{\partial Q_i}{\partial |V_m|}$ คือ สมาชิกในเมตริกซ์จาโคเบียน ดังนั้นสมการที่ (3.56) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{jk}}{\partial \delta_m} \\ \frac{\partial P_{jk}}{\partial |V_m|} \end{bmatrix} = \left[J^T\right] \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{jk}}{\partial P_i} \\ \frac{\partial P_{jk}}{\partial Q_i} \end{bmatrix} \tag{3.57}$$

ดังนั้นค่าความไวของกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่งเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าสุทธิที่จ่ายเข้าบัสต่างๆ คือ

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{jk}}{\partial P_i} \\ \frac{\partial P_{jk}}{\partial Q_i} \end{bmatrix} = \left[J^T\right]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{jk}}{\partial \delta_m} \\ \frac{\partial P_{jk}}{\partial |V_m|} \end{bmatrix} \tag{3.58}$$

โดยที่ $\frac{\partial P_{jk}}{\partial P_i}$ คือ ค่าความไวของกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่ง j-k เทียบกับกำลังไฟฟ้าจริงสุทธิที่จ่ายเข้าบัส i

$\frac{\partial P_{jk}}{\partial Q_i}$ คือ ค่าความไวของกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่ง j-k เทียบกับกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสุทธิที่จ่ายเข้าบัส i

สมการที่ (3.58) สามารถหาคำตอบได้โดยการแทนค่าอินเวอร์สของเมตริกซ์จาโคเบียน และ ค่าการหาอนุพันธ์แยกส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่งเทียบกับมุมและขนาดของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งค่าการหาอนุพันธ์แยกส่วนดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.53) ดังแสดง

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial \delta_m} = \begin{cases} 0 & for\ m \neq j\ and\ k \\ |V_j||V_k||Y_{jk}|\sin(\delta_j - \delta_k - \theta_{jk}) & for\ m = j \\ -|V_j||V_k||Y_{jk}|\sin(\delta_j - \delta_k - \theta_{jk}) & for\ m = k, \end{cases} \quad (3.59)$$

และ

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial |V_m|} = \begin{cases} 0 & for\ m \neq j\ and\ k \\ 2|V_j||Y_{jk}|\cos(\theta_{jk}) - |V_j||Y_{jk}|\cos(\delta_j - \delta_k - \theta_{jk}) & for\ m = j \\ -|V_j||Y_{jk}|\cos(\delta_j - \delta_k - \theta_{jk}) & for\ m = k \end{cases} \quad (3.60)$$

เมตริกซ์จาโคเบียนในสมการที่ (3.58) เป็นเมตริกซ์จาโคเบียนของระบบไฟฟ้าซึ่งได้จากการกำหนดบัสใดบัสหนึ่งในระบบให้เป็นบัสอ้างอิง ดังนั้นค่าความไวของกำลังไฟฟ้าบนสายส่ง j-k ใดๆ จะมีค่าเป็นศูนย์สำหรับพจน์ที่เทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสอ้างอิงที่กำหนดนั้น ซึ่งหมายความว่าการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงจะไม่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่ง j-k ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวนอกจากจะส่งผลต่อการจัดสรรกำลังการผลิตแล้ว ยังส่งผลต่อราคาไฟฟ้าที่ผู้ผลิตไฟฟ้าจะได้รับ หรือผู้ซื้อไฟฟ้าจะต้องจ่ายดังแสดงต่อไปในบทที่ 4

เนื่องจากการจัดสรรกำลังการผลิตในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าควรมีสภาพการแข่งขันที่สมบูรณ์ สมาชิกในตลาดทุกรายควรได้รับสิทธิ์ในการซื้อกำลังไฟฟ้าหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างเท่าเทียมกัน และควรมีส่วนร่วมในการรับผิดชอบผลที่เกิดกับระบบไฟฟ้าเหมือนกัน ดังนั้นการคำนวณค่าความไวของกำลังไฟฟ้าบนสายส่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้สมมติฐานที่ว่าบัสอ้างอิงในระบบต้องมีส่วนร่วมในระบบเช่นเดียวกับบัสอื่นๆ ผลที่ได้คือ ค่าความไวของกำลังไฟฟ้าบนสายส่งมีค่าไม่เท่ากับศูนย์สำหรับพจน์ที่ทำการอนุพันธ์เทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าบัสอ้างอิงที่กำหนด

การคำนวณค่าความไวของกำลังไฟฟ้าบนสายส่งโดยให้บัสอ้างอิงมีส่วนร่วมด้วย สามารถกระทำได้โดยใช้วิธีการบวกตัวประกอบเลื่อนค่า (Shift factor) ให้กับค่าความไวของกำลังไฟฟ้าบนสายส่งที่คำนวณได้เดิม ซึ่งการพิสูจน์แสดงใน [18] ซึ่งจะได้ค่าความไวของกำลังไฟฟ้าบนสายส่งค่าใหม่เป็น

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{jk}}{\partial P_i} \\ \frac{\partial P_{jk}}{\partial Q_i} \end{bmatrix}_{new} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{jk}}{\partial P_i} \\ \frac{\partial P_{jk}}{\partial Q_i} \end{bmatrix}_{old} + \begin{bmatrix} P\ shift\ factor \\ Q\ shift\ factor \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

โดยที่

$$P\ shift\ \ factor = -\frac{\left(\frac{\partial P_{jk}}{\partial P_j} + \frac{\partial P_{jk}}{\partial P_k}\right)_{old}}{2} \tag{3.62}$$

$$Q\ shift\ \ factor = -\frac{\left(\frac{\partial P_{jk}}{\partial Q_j} + \frac{\partial P_{jk}}{\partial Q_k}\right)_{old}}{2} \tag{3.63}$$