บทที่ 4

ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์โดยใช้เจเนติกอัลกอริทึม

เนื่องจากความต้องการในการใช้ไฟฟ้าในปัจจุบันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มกำลังและวางแผนการผลิตที่ดีเพื่อรองรับการเจริญเติบโตดังกล่าว ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดเกิดขึ้นเมื่อระบบผลิตนั้นมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากกว่าหนึ่งเครื่องและต่อเชื่อมโยงกันภายในระบบเพื่อช่วยกันจ่ายกำลังไฟฟ้าให้พอเพียงกับโหลดอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากในการผลิตต้นทุนต่อหน่วยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องจะไม่เท่ากัน ทำให้จำเป็นต้องทำการศึกษาปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดเพื่อช่วยให้สามารถกำหนดขนาดกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องได้อย่างเหมาะสมและเป็นการช่วยลดต้นทุนการผลิตของระบบโดยรวมให้ลดลงอีกด้วย

ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดเป็นปัญหาออปติไมซ์อย่างหนึ่งที่ต้องการหาจุดดำเนินงานที่ทำให้ต้นทุนการผลิตรวมของระบบต่ำที่สุด ดังนั้นในตอนต้นของบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและวิธีแก้ปัญหาออปติไมซ์ จากนั้นจึงจะกล่าวถึงรายละเอียดการจ่ายโหลดอย่างประหยัดในลำดับถัดไป

4.1 การออปติไมซ์ (Optimization)

การออปติไมซ์ [37] เป็นการทำให้ฟังก์ชันหนึ่งๆมีค่าเหมาะสม (มากที่สุดหรือน้อยที่สุด) โดยการปรับค่าตัวแปรที่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ (Constraints) ฟังก์ชันที่จะออปติไมซ์ เรียกว่า ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function) ส่วนตัวแปรของฟังก์ชันเป้าหมายมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิดคือ ตัวแปรควบคุม u (Control variable) และตัวแปรสถานะ x (State variable) และเงื่อนไขบังคับในการออปติไมซ์แยกออกได้เป็น 2 ชนิด คือเงื่อนไขบังคับแบบสมการ (Equality constraints) และเงื่อนไขบังคับแบบอสมการ (Inequality constraints)

ในการแก้ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ จะมีตัวแปรและเงื่อนไขบังคับต่างๆดังต่อไปนี้

1. ฟังก์ชันเป้าหมาย $f(u,x)$ ประกอบด้วย
   - ต้นทุนการผลิตรวมของระบบ (Total production cost)
   - กำลังสูญเสียในระบบ (Total system loss)
2. ตัวแปรควบคุม u ประกอบด้วย
   - กำลังจริงที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องยกเว้นที่บัสอ้างอิง
   - ขนาดของแรงดันที่บัสควบคุมแรงดันและบัสอ้างอิง
   - ค่าแท็ปของหม้อแปลง

3. ตัวแปรสถานะ x ประกอบด้วย

- มุมของแรงดันที่ทุกบัสยกเว้นที่บัสอ้างอิง
- ขนาดของแรงดันที่โหลดบัส
- กำลังจริงที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสอ้างอิง
- กำลังรีแอกทีฟที่จ่ายจากบัสควบคุมแรงดันและบัสอ้างอิง

4. เงื่อนไขบังคับแบบสมการ g(u,x) คือสมการความผิดพลาดของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่บัสต่างๆ ได้แก่

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_i - (P_{Gi} - P_{Di}) \\ Q_i - (Q_{Gi} - Q_{Di}) \end{bmatrix} = 0 \qquad (4.1)$$

โดยที่

P_{Gi} คือ กำลังจริงที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i

Q_{Gi} คือ กำลังรีแอกทีฟที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i

P_{Di} คือ โหลดจริงที่บัส i

Q_{Di} คือ โหลดรีแอกทีฟที่บัส i

P_i คือ กำลังจริงที่บัส i ซึ่งคำนวณได้จากการทำโหลดโฟลว์

Q_i คือ กำลังรีแอกทีฟที่บัส i ซึ่งคำนวณได้จากการทำโหลดโฟลว์

5. เงื่อนไขบังคับแบบอสมการ h(u,x) คือ ขีดจำกัดของตัวแปรต่างๆของระบบไฟฟ้ากำลัง ได้แก่

$$P_{Gimin} \leq P_{Gi} \leq P_{Gimax} \qquad (4.2)$$

$$Q_{Gimin} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gimax} \qquad (4.3)$$

$$V_{imin} \leq V_i \leq V_{imax} \qquad (4.4)$$

$$T_{kmin} \leq T_k \leq T_{kmax} \qquad (4.5)$$

โดยที่

P_{Gimin} , P_{Gimax} คือ ขีดจำกัดกำลังจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i

Q_{Gimin} , Q_{Gimax} คือ ขีดจำกัดกำลังรีแอกทีฟที่บัส i

V_{imin} , V_{imax} คือ ขีดจำกัดของแรงดันที่บัส i

T_{kmin} , T_{kmax} คือ ขีดจำกัดของหม้อแปลง

จากข้างต้นจะสังเกตได้ว่าตัวแปรควบคุมจะเป็นตัวแปรเดียวกับที่ต้องกำหนดในการทำโหลดโฟลว์ ส่วนตัวแปรสถานะที่ใช้ในการทำออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ ก็คือตัวแปรที่ต้องคำนวณหรือหามาจากการทำโหลดโฟลว์นั่นเอง

4.1.1 การแปลงปัญหา (Problem transformation)

สมมติว่าปัญหาออปติไมซ์ที่เราจะหาคำตอบมีฟังก์ชันเป้าหมายคือ f(u,x) และมีเงื่อนไขบังคับแบบสมการและอสมการเป็น g(u,x) และ h(u,x) ตามลำดับ

ฟังก์ชันเป้าหมาย $f(u,x)$

เงื่อนไขบังคับแบบสมการ $g(u,x) = 0$

เงื่อนไขบังคับแบบอสมการ $h(u,x) \leq 0$

จากปัญหาออปติไมซ์แบบมีเงื่อนไขบังคับข้างต้น สามารถแปลงให้เป็นปัญหาการออปติไมซ์แบบไม่มีเงื่อนไขบังคับได้โดยการแปลงฟังก์ชันเป้าหมายใหม่ให้เป็น

$$F(u,x) = f(u,x) + \lambda^T[g(u,x)] + W(u,x) \tag{4.6}$$

โดยที่ λ คือ ตัวคูณลากรองจ์ (Lagrangian multiplier)

$W(u,x)$ คือ ฟังก์ชันการปรับโทษ (Penalty function)

4.1.2 ฟังก์ชันการปรับโทษ (Penalty function)

ฟังก์ชันการปรับโทษเป็นเทคนิคที่ใช้รวมผลของเงื่อนไขบังคับของตัวแปรเข้ากับฟังก์ชันเป้าหมายในการออปติไมซ์ ฟังก์ชันการปรับโทษเป็นการทำให้ตัวแปรที่ใช้ในการออปติไมซ์มีค่าอยู่ในขอบเขตของตัวเองหรืออยู่นอกขอบเขตได้เพียงเล็กน้อยขึ้นกับขนาดของการปรับโทษ โดยทั่วไปฟังก์ชันการปรับโทษจะอยู่ในรูป

$$W(u,x) = r_k \sum_{j=1}^{M} (h_j(u,x))^q \tag{4.7}$$

โดยที่ r_k คือ สัมประสิทธิ์การปรับโทษ ซึ่งเป็นตัวกำหนดขนาดของการปรับโทษ

q คือ เลขจำนวนเต็ม

M เป็นจำนวนขีดจำกัดของตัวแปรสถานะ

$h_j(u,x)$ คำนวณได้จากสมการ

$$h_j(u,x) = \begin{cases} h_j(u,x) & \text{if } h_j(u,x) \geq 0 \\ 0 & \text{if } h_j(u,x) \leq 0 \end{cases} \tag{4.8}$$

การเลือกค่า r_k และ q มีหลักเกณฑ์ดังนี้

1) กรณีที่ $q \leq 1$ ขนาดของการปรับโทษจะน้อยเกินไปซึ่งทำให้คำตอบที่ได้อาจจะอยู่นอกขอบเขตของเงื่อนไขบังคับได้ ดังนั้นโดยทั่วไปนิยมใช้ $q \geq 1$

2) กรณีที่ $q = 1$ จะเรียกว่า Exact Penalty fuction [38] ทั้งนี้เนื่องจากจะมีค่า r_k ที่มากพออยู่ค่าหนึ่งที่ทำให้คำตอบของฟังก์ชันที่ถูกปรับโทษแล้วเป็นคำตอบจริงของฟังก์ชันเป้าหมายเดิม แต่ว่าการปรับโทษด้วยวิธีนี้จะทำให้ฟังก์ชันที่จะออปติไมซ์เปลี่ยนเป็นฟังก์ชันไม่ต่อเนื่องภายหลังการปรับโทษแล้ว ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้ได้กับเทคนิคออปติไมซ์ที่มีเงื่อนไขความต่อเนื่องของฟังก์ชันเป้าหมาย

3) กรณีที่ $q > 1$ ในกรณีนี้ฟังก์ชันที่จะออปติไมซ์จะเป็นฟังก์ชันต่อเนื่องภายหลังการปรับโทษดังนั้นจึงใช้ได้กับเทคนิคออปติไมซ์ทุกชนิด โดยปกติจะเลือกใช้ $q = 2$ แต่ว่าในการปรับโทษด้วยวิธีนี้ในทางทฤษฎีค่า r_k ต้องมีค่าอนันต์ (Infinity, ∞) เท่านั้นคำตอบของฟังก์ชันภายหลังการปรับโทษตามสมการที่ 4.6 จึงจะเป็นคำตอบจริงของปัญหาเดิม

4.1.3 เงื่อนไขที่จุดคำตอบ

จากหลักการของ Khun-Tucker [37] ที่จุดคำตอบจะมีเงื่อนไขดังนี้

$$\left[\frac{\partial F}{\partial x}\right] = \left[\frac{\partial f}{\partial x}\right] + \left[\frac{\partial g}{\partial x}\right]^T [\lambda] + \left[\frac{\partial W}{\partial x}\right] = 0 \tag{4.9}$$

$$\left[\frac{\partial F}{\partial u}\right] = \left[\frac{\partial f}{\partial u}\right] + \left[\frac{\partial g}{\partial u}\right]^T [\lambda] + \left[\frac{\partial W}{\partial u}\right] = 0 \tag{4.10}$$

$$\left[\frac{\partial F}{\partial \lambda}\right] = \left[g(u,x)\right] = 0 \tag{4.11}$$

4.1.4 ขั้นตอนการแก้ปัญหา

จากหัวข้อ 4.1.3 จะเห็นว่าสมการ 4.9 ถึง 4.11 เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น การแก้สมการทั้ง 3 จึงต้องใช้วิธีทางตัวเลข (Numerical method) มาช่วยในการแก้ปัญหา ซึ่งสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

สมมติค่าของตัวแปรควบคุม u ขึ้นมา และแทนลงไปในสมการที่ 4.11 เพื่อคำนวณค่าตัวแปรสถานะ x จากนั้นเมื่อได้ค่าของตัวแปรสถานะแล้วให้แทนค่าตัวแปรควบคุมและตัวแปรสถานะลงในสมการที่ 4.9 เพื่อหาค่า λ จากนั้นนำค่า x,u และ λ แทนลงในสมการที่ 4.10 เพื่อคำนวณหาค่า $\frac{\partial F}{\partial u}$ จากนั้นทดสอบค่า $\frac{\partial F}{\partial u}$ ว่าเท่ากับศูนย์หรือไม่ ถ้าเท่ากับศูนย์แสดงว่าค่า u ที่สมมติขึ้นมาถูกต้องแล้ว แต่ถ้าค่า $\frac{\partial F}{\partial u}$ ไม่เท่ากับศูนย์แสดงว่าเราต้องหาค่า u ขึ้นมาใหม่

ค่า $\frac{\partial F}{\partial u}$ ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.10 เป็นค่าที่บอกความไวของฟังก์ชันเป้าหมายต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุม โดยรวมผลของเงื่อนไขบังคับแบบสมการและการปรับโทษ ค่า $\frac{\partial F}{\partial u}$ นี้จะเรียกว่าเกรเดียนต์เวกเตอร์ ซึ่งจะเป็นค่าที่เราจะใช้พิจารณาเพื่อเปลี่ยนแปลงตัวแปรควบคุมให้เหมาะสมเพื่อให้ได้คำตอบที่ถูกต้องและรวดเร็ว

หากปัญหาออปติไมซ์ที่เราต้องการจะหาคำตอบนั้นเป็นการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันเป้าหมาย ดังเช่นปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ขั้นตอนการแก้ปัญหาสามารถแสดงเป็นข้อๆได้ดังนี้

1) สมมติค่า u ขึ้น

2) ทำโหลดโฟลว์เพื่อหาค่า x จากสมการที่ 4.11

3) คำนวณหา δ จากสมการ

$$[\lambda] = -\left[\left[\frac{\partial g}{\partial x}\right]^T\right]^{-1}\left[\left[\frac{\partial f}{\partial x}\right]+\left[\frac{\partial W}{\partial x}\right]\right] \qquad (4.12)$$

4) คำนวณเกรเดียนต์เวกเตอร์จากสมการ

$$\left[\frac{\partial F}{\partial u}\right] = \left[\frac{\partial f}{\partial u}\right] + \left[\frac{\partial g}{\partial u}\right]^T[\lambda] + \left[\frac{\partial W}{\partial u}\right] \qquad (4.13)$$

5) ตรวจสอบค่า $\frac{\partial F}{\partial u}$ ถ้าขนาดของ $\frac{\partial F}{\partial u}$ ที่ใหญ่ที่สุดมีค่าน้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ แสดงว่าได้จุดต่ำสุดแล้ว แต่ถ้าไม่ใช่ให้ทำขั้นที่ 6 ต่อไป

6) ปรับตัวแปรควบคุมโดยใช้สมการ

$$[u]^{\text{ใหม่}} = [u]^{\text{เก่า}} + [\Delta u] \tag{4.14}$$

โดยที่ $[\Delta u]$ คือ เวกเตอร์ที่ใช้ในการปรับค่าตัวแปรควบคุมในแต่ละรอบซึ่งสามารถหาได้หลายวิธี แต่วิธีที่สะดวกและนิยมใช้มากก็คือ การปรับค่าตัวแปรควบคุมไปในทิศทางที่ทำให้เกรเดียนต์มีค่าน้อยลง ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$[\Delta u] = -c\left[\frac{\partial F}{\partial u}\right] \tag{4.15}$$

โดยที่ c คือช่วงก้าวที่เหมาะสม

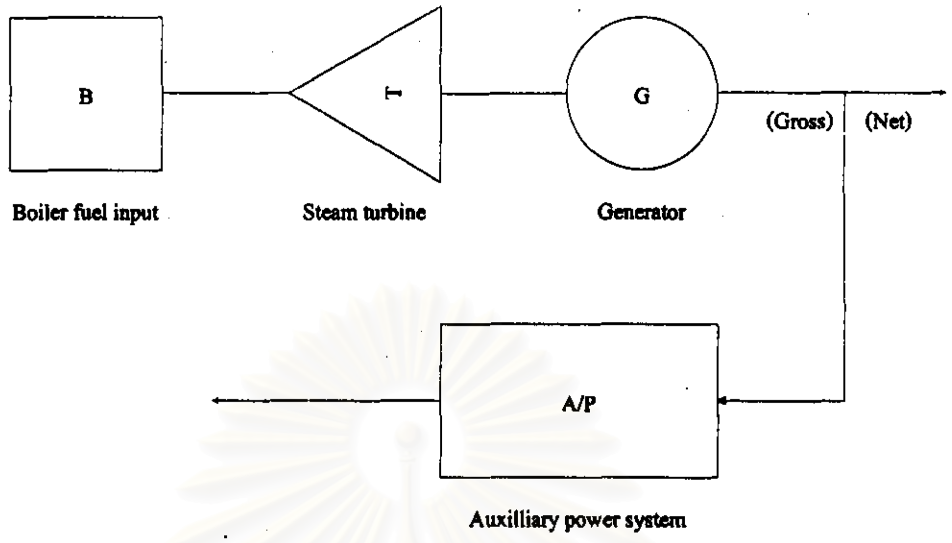
7) เมื่อปรับค่าตัวแปรควบคุมตามข้อ 6 แล้ว ให้ย้อนกลับไปทำข้อ 2

4.2 คุณลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าโดยทั่วไป จะประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวนมาก ซึ่งจะอาจแบ่งแยกประเภทตามลักษณะแหล่งกำเนิดพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ 2 แบบ

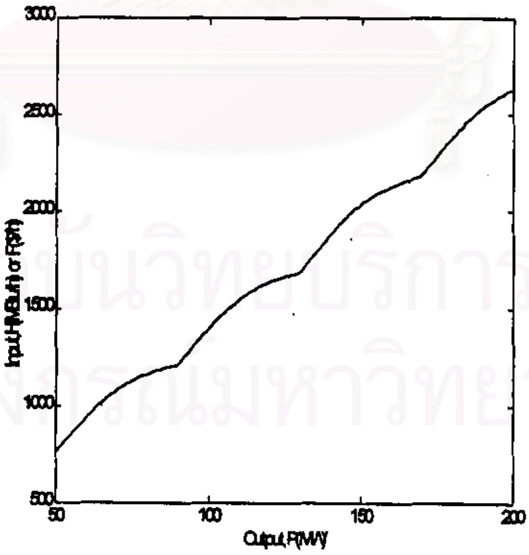
1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำ (Hydro unit) หมายถึง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ตามเขื่อนใขต่างๆ ซึ่งปล่อยให้น้ำไหลจากเหนือเขื่อนไหลผ่านกังหันภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังความร้อน (Thermal unit) หมายถึง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งมีหม้อต้มน้ำ สำหรับผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูง เพื่อขับกังหันภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทั้งนี้ความร้อนที่ใช้ในการต้มน้ำ ได้มาจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งแตกต่างกันไปตามแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เช่น ก๊าซธรรมชาติ น้ำมันดีเซล หรือ ถ่านหิน เป็นต้น รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นแผนภาพการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังความร้อน



รูปที่ 4.1 แผนภาพการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังความร้อน

เมื่อกล่าวถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังความร้อน สิ่งที่ต้องสนใจอย่างหนึ่งคือฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิง เป็นฟังก์ชันที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังจริงที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (เมกกะวัตต์) กับ ราคาเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิต (บาทต่อชั่วโมง) ดังเช่นแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังความร้อน

โดยปกติฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงจะได้มาจากการคำนวณตอนออกแบบหรือจากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยตรง ปกติข้อมูลที่ได้มานี้จะมีลักษณะเป็นจุด ไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นจึงต้องมีการประมาณจุดเหล่านี้ให้เป็นกราฟที่มีความต่อเนื่องและสามารถหาอนุพันธ์ได้ เพื่อนำไปใช้กับเทคนิคออปติไมซ์ในสมัยก่อนได้ โดยปกตินิยมประมาณฟังก์ชันเชื้อเพลิงให้มีลักษณะเป็นฟังก์ชันโพลีโนเมียลดังนี้

$$F_i(P_{Gi}) = a_0 + a_1 P_{Gi} + a_2 P_{Gi}^2 + \dots + a_m P_{Gi}^m \tag{4.16}$$

โดยที่ $F_i(P_{Gi})$ คือ ต้นทุนการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i

$a_0, a_1, \dots, a_m$ คือ ค่าคงที่ที่หาได้จากการทดสอบหรือคำนวณ

P_{Gi} คือ กำลังจริงที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i

4.3 การจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยไม่รวมผลของกำลังสูญเสีย

4.3.1 รูปแบบของปัญหา

การจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยไม่รวมผลของกำลังสูญเสีย คือการที่จะจัดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องใดจ่ายกำลังจริงเท่าไร เพื่อที่ให้พอเพียงกับความต้องการของทั้งระบบ โดยที่ฟังก์ชันเป้าหมายและเงื่อนไขบังคับมีดังต่อไปนี้

ฟังก์ชันเป้าหมาย คือ ต้นทุนการผลิตรวมของระบบ

$$F_T = \sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_{Gi}) \tag{4.17}$$

เงื่อนไขบังคับแบบสมการคือความสมดุลของกำลังไฟฟ้า

$$\phi = P_D - \sum_{i=1}^{N_B} P_{Gi} = 0 \tag{4.18}$$

เงื่อนไขบังคับแบบอสมการคือขีดจำกัดกำลังผลิตจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$P_{Gimin} \leq P_{Gi} \leq P_{Gimax} \tag{4.19}$$

โดยที่ F_T คือ ต้นทุนการผลิตรวมของระบบ

N_G คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ

N_B คือ จำนวนบัส

P_D คือ โหลดของระบบ

P_{Gimin} , P_{Gimax} , P_{Gi} , $F_i(P_{Gi})$ มีความหมายเดียวกับที่กล่าวในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2

4.3.2 ขั้นตอนการแก้ปัญหา

แปลงปัญหาออปติไมซ์แบบมีเงื่อนไขบังคับให้อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันลากรองจ์ (Lagrangian function) ดังนี้

$$L = F_T + \lambda\phi \tag{4.20}$$

โดยที่ L คือ ฟังก์ชันลากรองจ์

λ คือ ตัวคูณลากรองจ์ของเงื่อนไขบังคับ

ϕ คือ เงื่อนไขบังคับตามสมการ 4.18

จากหลักการของ Khun-Tucker ทำการหาอนุพันธ์ย่อย (Partial derivative) เทียบกับตัวแปรต่างๆ ซึ่งในปัญหานี้ได้แก่ P_{Gi} และ λ ดังในสมการที่ 4.21 และ 4.22

$$\frac{\partial L}{\partial P_{Gi}} = 0 ; i = 1 \text{ to } N_G \tag{4.21}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 = \phi \tag{4.22}$$

เนื่องจากต้นทุนการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใดๆ จะขึ้นกับกำลังจริงที่จ่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องนั้นๆ ดังนั้นสมการที่ 4.21 สามารถเขียนได้ว่า

$$\frac{\partial L}{\partial P_{Gi}} = \frac{dF_i(P_{Gi})}{dP_{Gi}} - \lambda = 0 ; i = 1 \text{ to } N_G \tag{4.23}$$

ดังนั้นคำตอบของปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ $\frac{dF_i(P_{Gi})}{dP_{Gi}}$ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องมีค่าเท่ากันและมีค่าเท่ากับ λ โดยหลักการนี้เรียกว่า หลักการเท่ากันของแลมดา (Equal lamda criteria) [2] ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังในสมการที่ 4.24

$$IC_i = \frac{dF_i(P_{Gi})}{dP_{Gi}} = \lambda \; ; i = 1 \text{ to } N_G \tag{4.24}$$

โดยที่ IC_i (Incremental cost) คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงต้นทุนในการผลิตต่อหน่วยการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i มีหน่วยเป็น บาทต่อเมกกะวัตต์

ในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องจ่ายกำลังจริงออกมาอยู่นอกขีดจำกัดของตัวเอง เพื่อให้มีอัตราการเปลี่ยนแปลงต้นทุนในการผลิตต่อหน่วยการผลิตกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับแลมดาตามหลักการข้างต้น เราจะต้องเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขตามสมการที่ 4.24 ให้เป็น

$$\left.\begin{aligned} \frac{dF_i(P_{Gi})}{dP_{Gi}} &= \lambda \quad \text{for } P_{Gimin} \le P_{Gi} \le P_{Gimax} \\ \frac{dF_i(P_{Gi})}{dP_{Gi}} &\ge \lambda \quad \text{for } P_{Gi} = P_{Gimin} \\ \frac{dF_i(P_{Gi})}{dP_{Gi}} &\le \lambda \quad \text{for } P_{Gi} = P_{Gimax} \end{aligned}\right\} \tag{4.25}$$

จากที่กล่าวข้างต้น สามารถสรุปวิธีการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยไม่รวมผลของกำลังสูญเสียด้วยหลักการเท่ากันของแลมดาเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

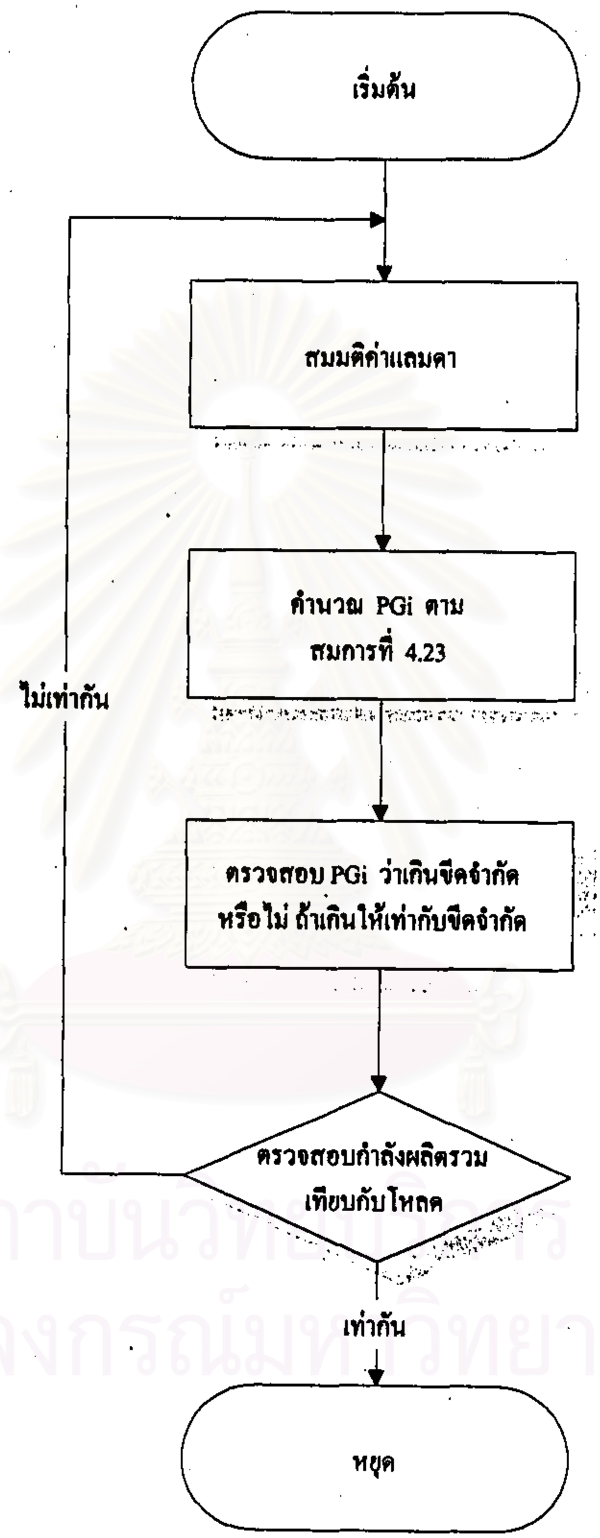
1) สมมติค่า λ เริ่มต้นขึ้นมา

2) คำนวณค่า P_{Gi} ที่สอดคล้องกับค่า λ ตามสมการที่ 4.23

3) ตรวจสอบค่า P_{Gi} กับขีดจำกัด ถ้าหากค่า P_{Gi} มีค่าสูงกว่าค่า P_{Gimax} ก็ให้ P_{Gi} มีค่าเท่ากับ P_{Gimax} แต่ถ้าค่า P_{Gi} มีค่าต่ำกว่าค่า P_{Gimin} ก็ให้ P_{Gi} มีค่าเท่ากับ P_{Gimin}

4) หาผลรวมของ P_{Gi} ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องในระบบ และเปรียบเทียบกับโหลด P_D ถ้าหากว่าผิดพลาดระหว่างผลรวมของ P_{Gi} และ P_D มีค่าน้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ แสดงว่าค่า λ ที่สมมติขึ้นถูกต้องก็จะได้คำตอบแล้ว แต่ถ้าค่าผิดพลาดมีค่ามากกว่าค่าที่ยอมรับได้ ปรับค่า λ ใหม่ตามขั้นตอนที่ 5

5) ปรับค่า λ โดยใช้หลักการดังนี้ ถ้าผลรวมของ P_{Gi} มีค่ามากกว่า P_D แสดงว่าค่า λ ที่สมมติขึ้นมีค่ามากเกินไปก็ให้ลดค่า λ ลงมา แต่ถ้าผลรวมของ P_{Gi} มีค่าน้อยกว่า P_D แสดงว่าค่า λ ที่สมมติขึ้นมีค่าน้อยเกินไป ก็ให้เพิ่มค่า λ ขึ้น เมื่อปรับค่า λ เรียบร้อยแล้วก็ให้ย้อนไปทำขั้นที่ 2 ต่อไป



รูปที่ 4.3 ขั้นตอนการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยไม่รวมผลของกำลังสูญเสีย

4.4 การจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยรวมผลของกำลังสูญเสีย

โดยทั่วไปแหล่งกำเนิดไฟฟ้าและโหลดมักจะกระจายอยู่ทั่วไปเป็นบริเวณกว้าง และแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเหล่านี้จะเชื่อมต่อถึงกันโดยสายส่งไฟฟ้า ดังนั้นการส่งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังโหลดจึงมีกำลังไฟฟ้าบางส่วนที่ต้องสูญเสียไปในระหว่างการส่งผ่าน ในทางทฤษฎีกำลังสูญเสียส่วนนี้ควรจะมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ดังนั้นการส่งกำลังไฟฟ้าจึงมักจะให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใกล้กับโหลดมากที่สุดทำการจ่ายโหลดก่อน ถ้าไม่เพียงพอจึงให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องอื่นในบริเวณข้างเคียงทำการจ่ายเพิ่มเติม การกระทำในลักษณะดังกล่าวจะมีกำลังสูญเสียในระบบน้อยที่สุดก็จริง แต่ต้นทุนในการผลิตอาจจะไม่น้อยที่สุดก็ได้ ทั้งนี้เพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่อยู่ใกล้กับโหลดอาจจะมีต้นทุนการผลิตต่อหน่วยที่สูงกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องอื่นที่อยู่ห่างไกลออกไป ดังนั้นในบางครั้งจึงมีความคุ้มค่าที่จะส่งกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่อยู่ไกลกว่าเพื่อมาจ่ายโหลด ถึงแม้จะมีกำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นก็ตาม

4.4.1 รูปแบบของปัญหา

การจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยรวมผลของกำลังสูญเสีย ก็จะมีจุดมุ่งหมายเพื่อลดต้นทุนการผลิตรวมของระบบให้ต่ำสุด ดังเช่นกรณีไม่รวมผลของกำลังสูญเสีย เพียงแต่เงื่อนไขบังคับจะต้องรวมผลของกำลังสูญเสียของระบบเข้าไปพิจารณาด้วย ดังนั้นรูปแบบของปัญหาจึงมีลักษณะเป็นดังนี้
ฟังก์ชันเป้าหมาย คือ ต้นทุนการผลิตรวมของระบบ

$$F_T = \sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_{Gi}) \tag{4.26}$$

เงื่อนไขบังคับแบบสมการคือ กำลังผลิตต้องเท่ากับโหลดของระบบรวมกับกำลังสูญเสีย

$$\phi = P_D + P_L - \sum_{i=1}^{N_B} P_{Gi} = 0 \tag{4.27}$$

โดยที่ P_L คือ กำลังสูญเสีย
เงื่อนไขบังคับแบบอสมการคือขีดจำกัดกำลังผลิตจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$P_{Gimin} \leq P_{Gi} \leq P_{Gimax} \tag{4.28}$$

4.4.2 ขั้นตอนการแก้ปัญหา

ทำได้โดยการแปลงปัญหาออปติไมซ์แบบมีเงื่อนไขบังคับดังกล่าวให้อยู่ในรูปฟังก์ชันลากรองจ์ เหมือนในกรณีไม่คิดกำลังสูญเสีย เพียงแต่เงื่อนไขบังคับแบบสมการจะเปลี่ยนแปลงไป โดยจะนำกำลังสูญเสียเข้ามาพิจารณาด้วย จะได้ว่า

$$L = F_T + \lambda\phi \tag{4.29}$$

โดยที่ L คือ ฟังก์ชันลากรองจ์

λ คือ ตัวคูณลากรองจ์

ϕ คือ เงื่อนไขบังคับตามสมการ 4.27

จากนั้นทำการหาอนุพันธ์ย่อยเทียบกับตัวแปร P_{Gi} และ λ จะได้ดังในสมการที่ 4.30 และ 4.31

$$\frac{\partial L}{\partial P_{Gi}} = 0 ; i = 1 \text{ to } N_G \tag{4.30}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 = \phi \tag{4.31}$$

เนื่องจากต้นทุนการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใดๆ จะขึ้นกับกำลังจริงที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องนั้นๆ ดังนั้นสมการที่ 4.30 สามารถเขียนได้ว่า

$$\frac{\partial L}{\partial P_{Gi}} = \frac{dF_i(P_{Gi})}{dP_{Gi}} - \lambda\left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{Gi}}\right) = 0 ; i = 1 \text{ to } N_G \tag{4.32}$$

$\dfrac{\partial P_L}{\partial P_{Gi}}$ (Incremental transmission loss) เรียกว่า อัตรากำลังสูญเสียในสายส่งต่อหน่วยการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i มีสัญลักษณ์เป็น ITL_i

จากหลักการเท่ากันของแลมดาในหัวข้อที่แล้ว คำตอบของปัญหานี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ

$$IC_i = \lambda(1 - ITL_i) \tag{4.33}$$

หรือ

$$\lambda = \frac{1}{(1 - ITL_i)} IC_i \tag{4.34}$$

$\dfrac{1}{(1 - ITL_i)}$ เรียกว่าตัวประกอบการปรับโทษ (Penalty factor) มีสัญลักษณ์เป็น Pf_i

จากสมการที่ 4.34 และหลักการเท่ากันของแลมดา ถ้าจะให้ต้นทุนการผลิตรวมของระบบต่ำที่สุด การจ่ายโหลดจะต้องเป็นตามสมการ

$$Pf_1 IC_1 = Pf_2 IC_2 = \ldots = Pf_N IC_N \tag{4.35}$$

ในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงออกมาอยู่นอกขีดจำกัดของตัวเอง เพื่อให้มีอัตราการเปลี่ยนแปลงต้นทุนในการผลิตต่อหน่วยการผลิตกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับแลมดาตามหลักการข้างต้น เราจะต้องเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขตามสมการที่ 4.35 ให้เป็น

$$\left.\begin{array}{ll} IC_i{*}Pf_i = \lambda & \text{for } P_{Gimin} \le P_{Gi} \le P_{Gimax} \\ IC_i{*}Pf_i \ge \lambda & \text{for } P_{Gi} = P_{Gimin} \\ IC_i{*}Pf_i \le \lambda & \text{for } P_{Gi} = P_{Gimax} \end{array}\right\} \tag{4.36}$$

4.4.3 การหาค่าอัตรากำลังสูญเสียในสายส่งต่อหน่วยการผลิตกำลังไฟฟ้า [2,12]

อัตรากำลังสูญเสียในสายส่งต่อหน่วยการผลิตกำลังไฟฟ้า คือ อนุพันธ์ย่อยของกำลังสูญเสียเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงกำลังสูญเสียเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่บัส i โดยที่กำลังไฟฟ้าที่ผลิตที่บัสอื่นๆคงที่ ยกเว้นที่บัสอ้างอิง

สมมติว่า กำลังไฟฟ้าที่จ่ายจากบัส i เปลี่ยนแปลงไปเท่ากับ ΔP_{Gi} หรือ

$$P_{Gi}^{new} = P_{Gi}^{old} + \Delta P_{Gi} \tag{4.37}$$

กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายจากบัสอ้างอิงจะเปลี่ยนแปลงไปเท่ากับ ΔP_{GSW} หรือ

$$P_{GRef}^{new} = P_{GRef}^{old} + \Delta P_{GRef} \tag{4.38}$$

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่บัส i จะทำให้มีการเปลี่ยนกำลังสูญเสียด้วย ถ้ากำลังสูญเสียเปลี่ยนแปลงไปเท่ากับ ΔP_L จะได้ว่า

$$\Delta P_{GRef} = -\Delta P_{Gi} + \Delta P_L \tag{4.39}$$

หารตลอดสมการที่ ด้วย $-\Delta P_{Gi}$ จะได้

$$-\frac{\Delta P_{GRef}}{\Delta P_{Gi}} = 1 - \frac{\Delta P_L}{\Delta P_{Gi}} \tag{4.40}$$

หรือ

$$-\frac{\partial P_{GRef}}{\partial P_{Gi}} = 1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{Gi}} \tag{4.41}$$

จากกำลังจริงที่บัสอ้างอิงมีค่าเท่ากับกำลังจริงที่ผลิตจากบัสอ้างอิงลบด้วยโหลดที่บัสอ้างอิง หรือ

$$P_{Ref} = P_{GRef} - P_{DRef} \tag{4.42}$$

หาอนุพันธ์ย่อยของสมการที่ 4.42 เทียบกับ P_{Gi} จะได้

$$\frac{\partial P_{Ref}}{\partial P_{Gi}} = \frac{\partial P_{GRef}}{\partial P_{Gi}} - \frac{\partial P_{DRef}}{\partial P_{Gi}} \tag{4.43}$$

แต่เนื่องจากสมมติฐานที่ว่าโหลดมีค่าคงที่ ดังนั้น $\frac{\partial P_{DRef}}{\partial P_{Gi}} = 0$ นั่นคือ

$$\frac{\partial P_{Ref}}{\partial P_{Gi}} = \frac{\partial P_{GRef}}{\partial P_{Gi}} \tag{4.44}$$

จากกฎลูกโซ่

$$\frac{\partial P_{Ref}}{\partial P_{Gi}} = \frac{\partial P_{GRef}}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial P_{Gi}} \tag{4.45}$$

แต่เนื่องจากโหลดคงที่ ให้ P_i คือกำลังจริงที่ไหลจากบัส i จะได้ว่า

$$\frac{\partial P_i}{\partial P_{Gi}} = 1 \tag{4.46}$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial P_{Ref}}{\partial P_{Gi}} = \frac{\partial P_{GRef}}{\partial P_i} \tag{4.47}$$

จากสมการที่ 4.41 , 4.44 และ 4.47 จะได้ว่า

$$1 - ITL_i = - \frac{\partial P_{Ref}}{\partial P_i} \tag{4.48}$$

แต่เนื่องจาก P_{Ref} เป็นฟังก์ชันของขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่างๆ ซึ่งสามารถเขียนได้ว่า

$$\begin{bmatrix} \dfrac{\partial P_{Ref}}{\partial P_i} \\ \dfrac{\partial P_{Ref}}{\partial Q_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial \delta_i}{\partial P_i} & \dfrac{\partial V_i}{\partial P_i} \\ \dfrac{\partial \delta_i}{\partial Q_i} & \dfrac{\partial V_i}{\partial Q_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dfrac{\partial P_{Ref}}{\partial \delta_i} \\ \dfrac{\partial P_{Ref}}{\partial V_i} \end{bmatrix} \tag{4.49}$$

จากสมการที่ 4.49 เมตริกซ์ $\left[\partial \delta_i / \partial P_i , \partial V_i / \partial P_i , \partial \delta_i / \partial Q_i , \partial V_i / \partial Q_i \right]$ คืออินเวอร์เมตริกซ์ของทรานสโพสของจาโคเบียนเมตริกซ์ ดังนั้นสมการ 4.49 จึงเขียนได้ว่า

$$\begin{bmatrix} \dfrac{\partial P_{Ref}}{\partial P_i} \\ \dfrac{\partial P_{Ref}}{\partial Q_i} \end{bmatrix} = \left[J^T \right]^{-1} \begin{bmatrix} \dfrac{\partial P_{Ref}}{\partial \delta_i} \\ \dfrac{\partial P_{Ref}}{\partial V_i} \end{bmatrix} \tag{4.50}$$

ดังนั้นในการการหาค่าอัตรากำลังสูญเสียในสายส่งต่อหน่วยการผลิตกำลังไฟฟ้า จึงสามารถทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) คำนวณค่า $\frac{\partial P_{Ref}}{\partial \delta_i}$ และ $\frac{\partial P_{Ref}}{\partial V_i}$ จากสมการโหลดโฟลว์

2) ทรานสโพสจาโคเบียนเมตริกซ์ซึ่งคำนวณไว้แล้วจากการทำโหลดโฟลว์

3) แก้สมการที่ 4.50 เพื่อหาค่า $\frac{\partial P_{Ref}}{\partial P_i}$ และ $\frac{\partial P_{Ref}}{\partial Q_i}$

4) คำนวณค่า ITL_i จากสมการที่ 4.48

จากที่กล่าวข้างต้น สามารถสรุปวิธีการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยรวมผลของกำลังสูญเสียด้วยหลักการเท่ากันของแลมดาเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1) กำหนดค่าเริ่มต้น

2) คำนวณโหลดโฟลว์เพื่อหากำลังผลิตรวมและกำลังสูญเสีย

3) คำนวณค่า $1 - ITL_i$ ตามสมการที่ 4.48 และ 4.50

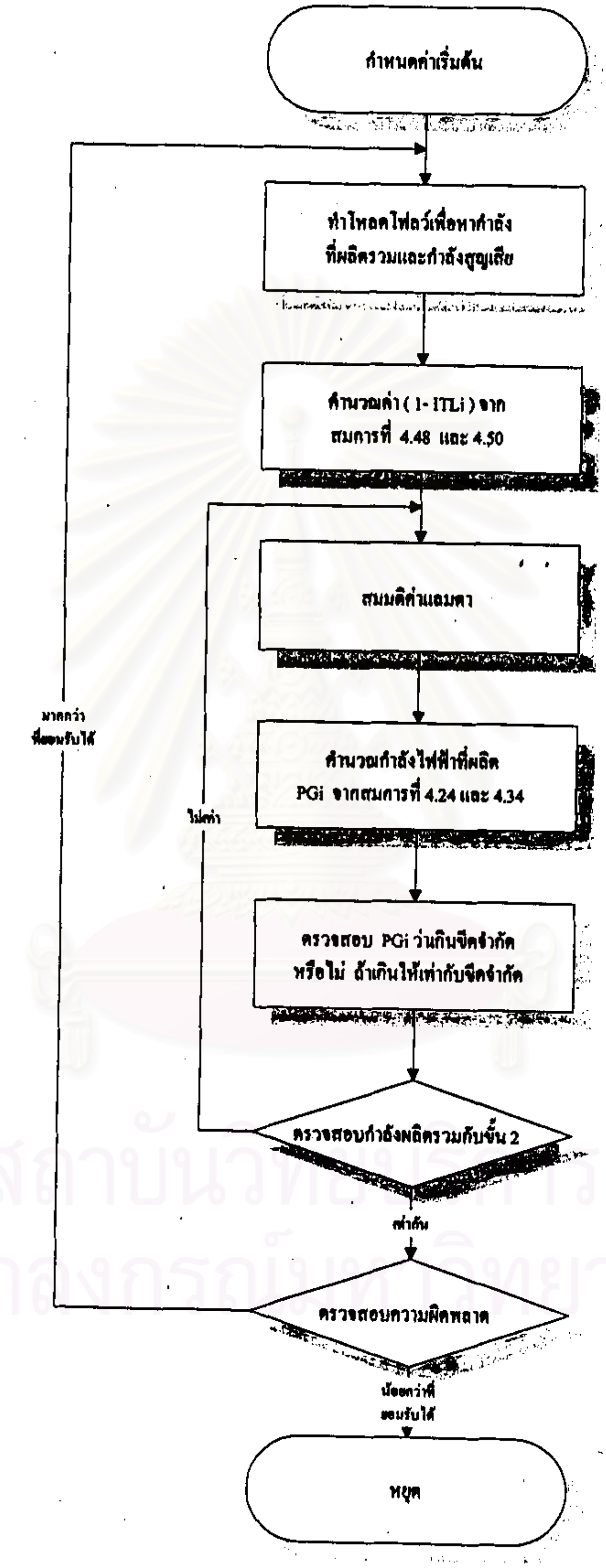
4) สมมติค่า λ เริ่มต้นขึ้นมา

5) คำนวณกำลังจริงที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง (P_{Gi}) โดยใช้สมการที่ 4.24 และ 4.34

6) ตรวจสอบค่า P_{Gi} ว่ามีค่าเกินขีดจำกัดหรือไม่ ถ้าเกินขีดจำกัดให้ P_{Gi} มีค่าเท่ากับขีดจำกัดนั้น

7) คำนวณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตรวมและตรวจสอบว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตรวมเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตรวมในขั้นที่ 2 หรือไม่ ถ้าไม่เท่าให้ย้อนกลับไปขั้นที่ 4 เพื่อกำหนดค่า λ ใหม่ขึ้น แต่ถ้าเท่าให้ทำขั้นที่ 8

8) ตรวจสอบค่า P_{Gi} ในรอบปัจจุบันว่าแตกต่างจากรอบที่แล้วมากน้อยขนาดไหน ถ้ายอมรับได้ก็จบการทำงาน ถ้ายอมรับไม่ได้ก็ย้อนไปทำขั้นที่ 2



รูปที่ 4.4 ขั้นตอนการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยรวมผลของกำลังสูญเสีย

4.5 ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์โดยใช้วิธีแยกกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ

การจ่ายโหลดอย่างประหยัดในหัวข้อที่ 4.3 และ 4.4 เป็นการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยใช้การจัดสรรกำลังจริงเพียงอย่างเดียว และไม่ได้คำนึงถึงผลของกำลังรีแอกทีฟ ทั้งๆที่การจัดสรรกำลังรีแอกทีฟสามารถลดกำลังสูญเสียของระบบไฟฟ้ากำลังและทำให้ต้นทุนการผลิตรวมของระบบต่ำลงไปอีก การจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยใช้การจัดสรรกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่สอดคล้องกับโฟลว์ของระบบเรียกว่าออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ (Optimal power flow) [2,5-7]

ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์เป็นปัญหาออปติไมซ์แบบไม่เชิงเส้นที่คำนวณหาจุดที่เหมาะสมในการดำเนินการผลิตและจ่ายไฟฟ้าโดยการปรับกำลังจริงที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แรงดันที่บัสควบคุมแรงดันและบัสอ้างอิง และค่าแท็ปของหม้อแปลงเพื่อให้ต้นทุนการผลิตรวมของระบบต่ำที่สุดและระบบยังคงทำงานอยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัย ที่ผ่านมาได้มีการนำเทคนิคออปติไมซ์ต่างๆมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ แต่เนื่องจากความซับซ้อนของปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์อีกทั้งตัวแปรแต่ละตัวก็มีผลต่อฟังก์ชันเป้าหมายไม่เท่ากัน เช่น แรงดันที่บัสอ้างอิงและบัสควบคุมแรงดันมีผลทางอ้อมต่อต้นทุนการผลิตของระบบแต่มีผลโดยตรงต่อกำลังสูญเสีย ดังนั้นในสมัยก่อนจึงนิยมแบ่งออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ออกเป็น 2 ปัญหาย่อยโดยอาศัยหลักการดีคัปเปิล (Decouple) [8-12] คือ การจัดสรรกำลังจริงหรือปัญหาพี (P-problem) และการจัดสรรกำลังรีแอกทีฟหรือปัญหาคิว (Q-problem) โดยจะแก้ปัญหา 2 อย่างนี้สลับกันไป โดยถ้าพิจารณาการจัดสรรกำลังจริงก็จะให้ตัวแปรควบคุมของการจัดสรรกำลังรีแอกทีฟคงที่ และหากพิจารณาการจัดสรรกำลังรีแอกทีฟก็จะให้ตัวแปรควบคุมของการจัดสรรกำลังจริงคงที่

4.5.1 การจัดสรรกำลังจริง หรือ ปัญหาพี (P-problem)

เป็นการออปติไมซ์โดยมีฟังก์ชันเป้าหมายคือต้นทุนการผลิตรวมของทั้งระบบ

$$F_T = \sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_{Gi}) \tag{4.51}$$

โดยที่ตัวแปรควบคุมของการจัดสรรกำลังจริง คือ กำลังจริงที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องยกเว้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่อยู่ที่บัสอ้างอิง ส่วนเงื่อนไขบังคับของการจัดสรรกำลังจริงประกอบด้วยเงื่อนไขบังคับของสมการโหลดโฟลว์และขีดจำกัดกำลังจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \hline \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_i - (P_{Gi} - P_{Di}) \\ \hline Q_i - (Q_{Gi} - Q_{Di}) \end{bmatrix} = 0 \tag{4.52}$$

$$P_{Gimin} \leq P_{Gi} \leq P_{Gimax} \tag{4.53}$$

ต้นทุนการผลิตรวมของทั้งระบบสามารถหาได้จากฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2

ในการแก้ปัญหาพีนี้ กำลังจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องยกเว้นที่บัสอ้างอิงเป็นตัวแปรควบคุม ดังนั้นขีดจำกัดกำลังจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหล่านี้สามารถทำให้อยู่ในขีดจำกัดได้เองอยู่แล้ว ในขณะที่กำลังผลิตจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงเป็นตัวแปรสถานะดังนั้น ขีดจำกัดกำลังจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้ต้องรวมเข้าไปเป็นฟังก์ชันการปรับโทษด้วย ดังนั้นฟังก์ชันเป้าหมายจึงเปลี่ยนเป็น

$$F_P = F_T + r_k \left|(P_{Ref} - P_{Reflim})\right| \tag{4.54}$$

โดยที่ F_P คือ ฟังก์ชันเป้าหมายในการแก้ปัญหาพี

F_T คือ ต้นทุนการผลิตรวมของระบบ

r_k คือ สัมประสิทธิ์การปรับโทษตามหัวข้อ 4.1.2

P_{Ref} คือ กำลังจริงที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสอ้างอิง

P_{Reflim} หาได้จากสมการ 4.55

$$P_{Reflim} = \begin{cases} 0\,;\, P_{Refmin} \leq P_{Ref} \leq P_{Refmax} \\ P_{Refmax}\,;\, P_{Ref} > P_{Refmax} \\ P_{Refmin}\,;\, P_{Ref} < P_{Refmin} \end{cases} \tag{4.55}$$

P_{Refmax} , P_{Refmin} คือ ขีดจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสอ้างอิง

4.5.2 การจัดสรรกำลังรีแอกทีฟ หรือ ปัญหาคิว (Q-problem)

เป็นการออปติไมซ์โดยมีฟังก์ชันเป้าหมายคือกำลังสูญเสียรวมของระบบ ซึ่งกำลังสูญเสียรวมของทั้งระบบนี้สามารถหาได้จากการคำนวณโหลดโฟลว์ โดยที่ตัวแปรควบคุมของการจัดสรรกำลังรีแอกทีฟ คือ ขนาดของแรงดันที่บัสควบคุมแรงดันและบัสอ้างอิง ค่าแท็ปของหม้อแปลง เงื่อนไขบังคับแบบสมการและแบบอสมการได้แก่

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta P}{\Delta Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{P_i - (P_{Gi} - P_{Di})}{Q_i - (Q_{Gi} - Q_{Di})} \end{bmatrix} = 0 \tag{4.56}$$

$$Q_{Gimin} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gimax} \tag{4.57}$$

$$V_{imin} \leq V_i \leq V_{imax} \tag{4.58}$$

$$T_{kmin} \leq T_k \leq T_{kmax} \tag{4.59}$$

ในการแก้ปัญหาคิวนี้ เงื่อนไขบังคับแบบสมการสามารถแก้ได้โดยการทำโหลดโฟลว์เหมือนในกรณีของปัญหาพีอยู่แล้ว ส่วนเงื่อนไขบังคับแบบอสมการซึ่งประกอบด้วยขีดจำกัดของตัวแปรควบคุมและขีดจำกัดของตัวแปรสถานะ ขีดจำกัดของตัวแปรควบคุมสามารถควบคุมได้โดยเทคนิคออปติไมซ์อยู่แล้ว แต่ขีดจำกัดของตัวแปรสถานะต้องรวมเข้าไปเป็นฟังก์ชันการปรับโทษด้วย ทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายเปลี่ยนเป็น

$$f_Q = P_L + \sum_{i=1}^{N_V} r_{ki} \left|(V_i - V_{ilim})\right| + \sum_{i=1}^{N_Q} r_{ki} \left|(Q_{Gi} - Q_{Gilim})\right| \tag{4.60}$$

โดยที่ f_Q คือ ฟังก์ชันเป้าหมายในการแก้ปัญหาคิว

r_{ki} คือ สัมประสิทธิ์การปรับโทษตามหัวข้อ 4.1.2

N_V คือ จำนวนโหลดบัส

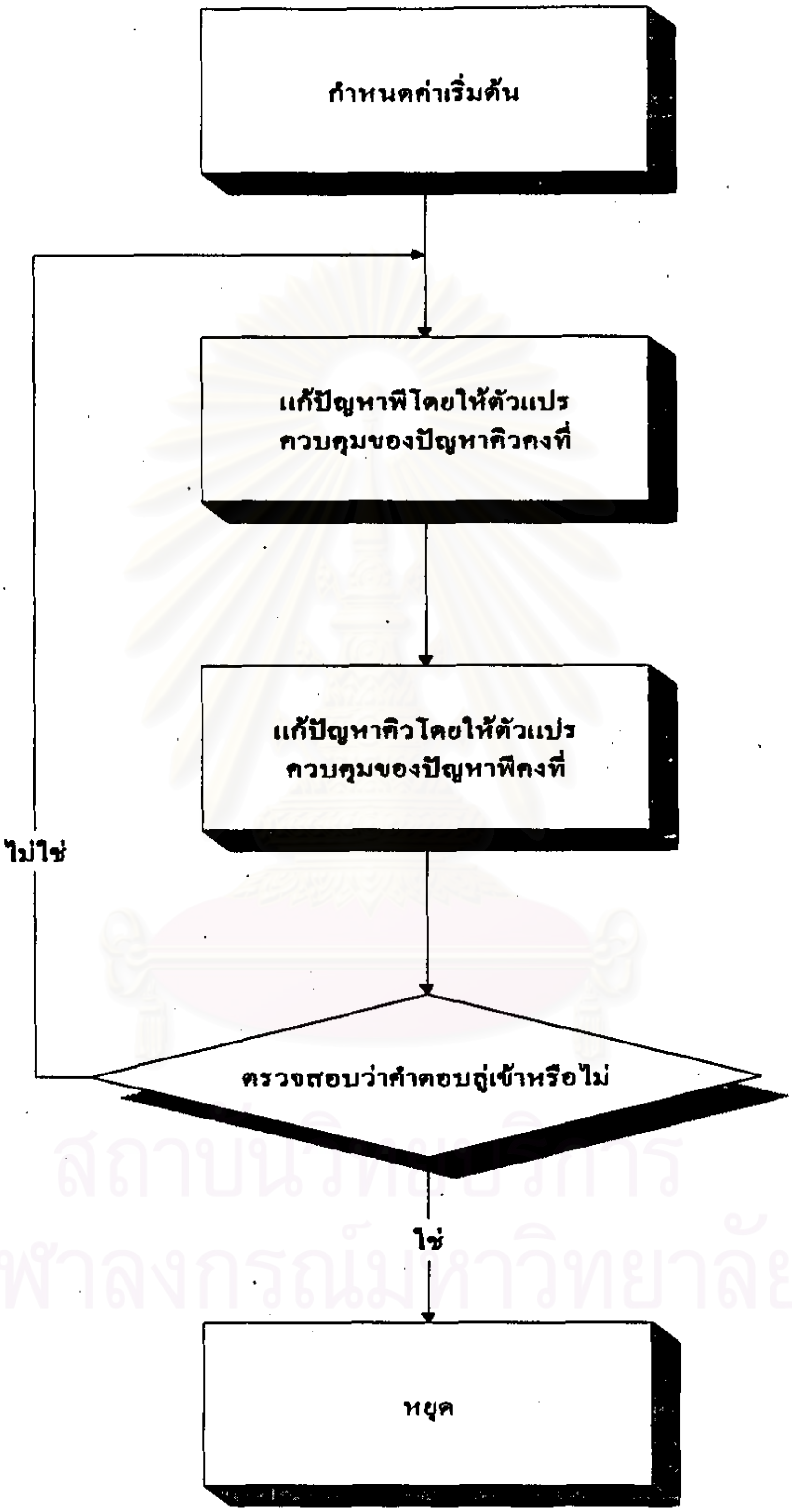
N_Q คือ จำนวนบัสควบคุมแรงดันและบัสอ้างอิง

V_{ilim} , Q_{Gilim} สามารถหาได้จากสมการ 4.61 และ 4.62 ตามลำดับ

$$V_{ilim} = \begin{cases} 0 ; V_{imin} \leq V_i \leq V_{imax} \\ V_{imax} ; V_i > V_{imax} \\ V_{imin} ; V_i < V_{imin} \end{cases} \tag{4.61}$$

$$Q_{Gilim} = \begin{cases} 0\,;\, Q_{Gimin} \le Q_{Gi} \le Q_{Gimax} \\ Q_{Gimax}\,;\, Q_{Gi} > Q_{Gimax} \\ Q_{Gimin}\,;\, Q_{Gi} < Q_{Gimin} \end{cases} \tag{4.62}$$

ในการแก้ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ โดยแยกออกเป็น 2 ปัญหาย่อยคือการจัดสรรกำลังจริงและการจัดสรรกำลังรีแอกทีฟนี้ เนื่องจากปัญหาย่อยทั้งสองมีตัวแปรสถานะเป็นตัวแปรเดียวกัน เมื่อนำปัญหาทั้งสองมารวมกันสามารถทำได้โดยการแก้ปัญหาทั้งสองสลับกันไป โดยที่เมื่อทำการจัดสรรกำลังจริงจะให้ตัวแปรควบคุมของปัญหาการจัดสรรกำลังรีแอกทีฟคงที่ และเมื่อทำการจัดสรรกำลังรีแอกทีฟก็จะให้ตัวแปรควบคุมของปัญหาการจัดสรรกำลังจริงคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยวิธีแยกการจัดสรรกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ

4.6 ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์โดยใช้เจเนติกอัลกอริทึม

ในหัวข้อที่ 4.5 ได้กล่าวถึงการแก้ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์โดยแยกปัญหาออกเป็นการจัดสรรกำลังจริงและการจัดสรรกำลังรีแอกทีฟ ก็เนื่องมาจากความสัมพันธ์อันซับซ้อนของตัวแปรและฟังก์ชันเป้าหมายนั่นเอง แต่เนื่องจากการแก้ปัญหาออปติไมซ์โดยใช้เจเนติกอัลกอริทึมนั้นจะใช้เพียงแค่ค่าของฟังก์ชันเป้าหมายเท่านั้นเป็นข้อมูลในการออปติไมซ์ไม่สนใจความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆในการออปติไมซ์ ดังนั้นการแก้ปัญหาออปติไมซ์โดยใช้เจเนติกอัลกอริทึมจึงสามารถใช้กับปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ซึ่งเป็นปัญหาที่มีความสัมพันธ์อันซับซ้อนระหว่างตัวแปรและฟังก์ชันเป้าหมายได้โดยตรงไม่จำเป็นต้องแยกออกเป็น 2 ปัญหาย่อยดังในหัวข้อที่ 4.5

4.6.1 รูปแบบของปัญหา

การแก้ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์โดยคิดการจัดสรรกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟไปพร้อมๆกันสามารถทำได้โดยการหาตัวแปรควบคุมซึ่งประกอบด้วย กำลังจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องยกเว้นที่บัสอ้างอิง แรงดันที่บัสอ้างอิงและบัสควบคุมแรงดันและการตั้งค่าแท็ปของหม้อแปลง โดยที่มีเป้าหมายคือ ทำให้ต้นทุนการผลิตรวมของระบบต่ำที่สุดและระบบยังคงดำเนินงานอยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัย ดังนั้นออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์โดยคิดการจัดสรรกำลังจริงและการจัดสรรกำลังรีแอก ทีฟไปพร้อมๆกันเป็นปัญหาออปติไมซ์ที่มีฟังก์ชันเป้าหมายคือต้นทุนการผลิตรวมของระบบ

$$F_T = \sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_{Gi}) \tag{4.63}$$

เงื่อนไขบังคับแบบสมการคือสมการความผิดพลาดของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_i - (P_{Gi} - P_{Di}) \\ Q_i - (Q_{Gi} - Q_{Di}) \end{bmatrix} = 0 \tag{4.64}$$

เงื่อนไขบังคับแบบอสมการคือขีดจำกัดของตัวแปรต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลัง

$$P_{Gimin} \leq P_{Gi} \leq P_{Gimax} \tag{4.65}$$

$$Q_{Gimin} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gimax} \tag{4.66}$$

$$V_{imin} \leq V_i \leq V_{imax} \tag{4.67}$$

$$T_{kmin} \leq T_k \leq T_{kmax} \tag{4.68}$$

เมื่อรวมผลขีดจำกัดของตัวแปรสถานะ ฟังก์ชันเป้าหมายในสมการที่ 4.63 ต้องเปลี่ยนเป็น

$$F_{Opf} = F_T + r_k \left|P_{Ref} - P_{Reflim}\right| + \sum_{i=1}^{N_V} r_{ki}\left|V_i - V_{ilim}\right| + \sum_{i=1}^{N_Q} r_{ki}\left|Q_{Gi} - Q_{Gilim}\right| \tag{4.69}$$

โดยที่ตัวแปรต่างๆมีความหมายเช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.5

4.6.2 ขั้นตอนการแก้ปัญหา

จากขั้นตอนการทำงานของเจเนติกอัลกอริทึมในรูปที่ 3.4 เมื่อนำมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาในหัวข้อ 4.6.1 ขั้นตอนการทำออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์สามารถแสดงเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

1) อ่านข้อมูลระบบทดสอบ

2) กำหนดประชากรเริ่มต้น ซึ่งประกอบไปด้วยโครโมโซมจำนวนเท่ากับขนาดประชากรที่เราจะใช้ โครโมโซมที่ใช้ในที่นี้ก็คือบิตสตริง (0 และ 1) ของตัวแปรควบคุม โดยที่ความยาวของบิตสตริงจะเป็นตัวกำหนดความละเอียดของตัวแปรแต่ละตัว

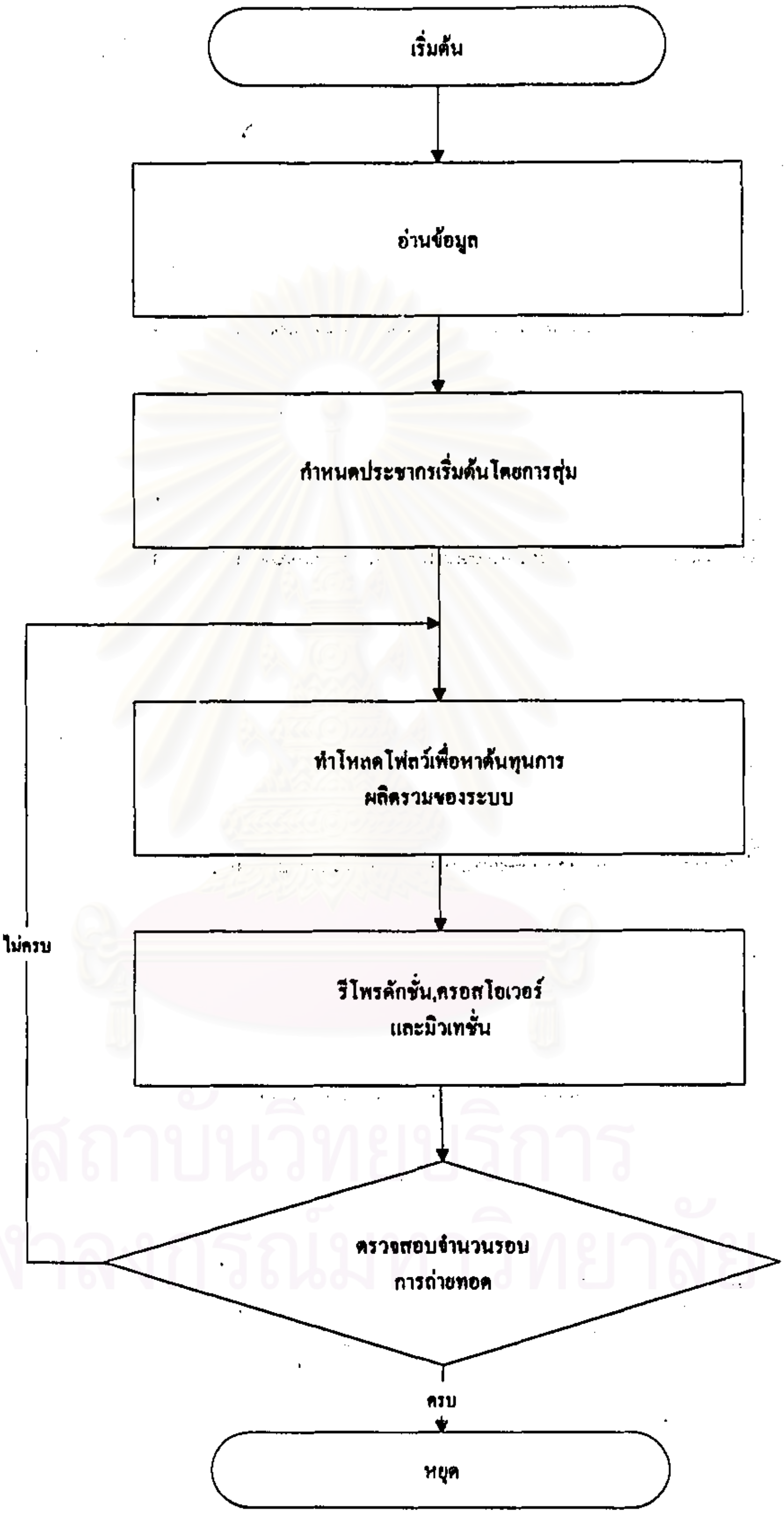
3) นำโครโมโซมแต่ละตัวมาถอดรหัสเป็นค่าพารามิเตอร์ในทางไฟฟ้ากำลัง เพื่อนำไปคำนวณโหลดโฟลว์

4) จากผลเฉลยโหลดโฟลว์ในขั้นที่ 3 คำนวณต้นทุนการผลิตรวมของทั้งระบบแล้วนำค่านี้ไปแทนเป็นค่าความเหมาะสมของโครโมโซมแต่ละตัว

5) จากโครโมโซมและค่าความเหมาะสมของโครโมโซมในขั้น 4 นำไปผ่านขั้นตอนถ่ายทอดของเจเนติกอัลกอริทึม ซึ่งประกอบไปด้วย การรีโพรดักชั่น การครอสโอเวอร์ และการมิวเทชั่น เพื่อให้กำเนิดโครโมโซมชุดใหม่

6) ตรวจสอบจำนวนรุ่นของการถ่ายทอดว่าถึงจำนวนรุ่นสูงสุดที่ตั้งไว้หรือยัง ถ้าถึงแล้วให้หยุด แต่ถ้ายังไม่ถึงให้ย้อนกลับไปทำขั้นที่ 3 ใหม่

จากขั้นตอนดังกล่าวสามารถสรุปเป็นแผนผังการทำงานได้ดังในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ขั้นตอนการแก้ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์โดยใช้เจเนติกอัลกอริทึม

4.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีของออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ ลักษณะของปัญหา รวมทั้งวิธีในการหาคำตอบ ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์นั้นเป็นปัญหาออปติไมซ์อย่างหนึ่ง ดังนั้นในการหาคำตอบเราจำเป็นต้องเลือกเทคนิคออปติไมซ์ที่เหมาะสมมาประยุกต์ใช้ เทคนิคออปติไมซ์ที่เราจะเลือกก็ต้องเหมาะสมกับปัญหานั้น รวมทั้งมีประสิทธิภาพในการหาจุดเหมาะสมโดยรวมด้วย เทคนิคการแก้ปัญหาดังกล่าวมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น หลักการเท่ากันของแลมดา การจัดสรรกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ รวมทั้งการนำเจเนติกอัลกอริทึมมาประยุกต์ใช้

ในวิทยานิพนธ์นี้จะมุ่งเน้นไปยังการแก้ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์โดยใช้เจเนติกอัลกอริทึม โดยที่ตัวอย่างการทดสอบจะแสดงให้เห็นในบทถัดไป