หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 3

# ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์

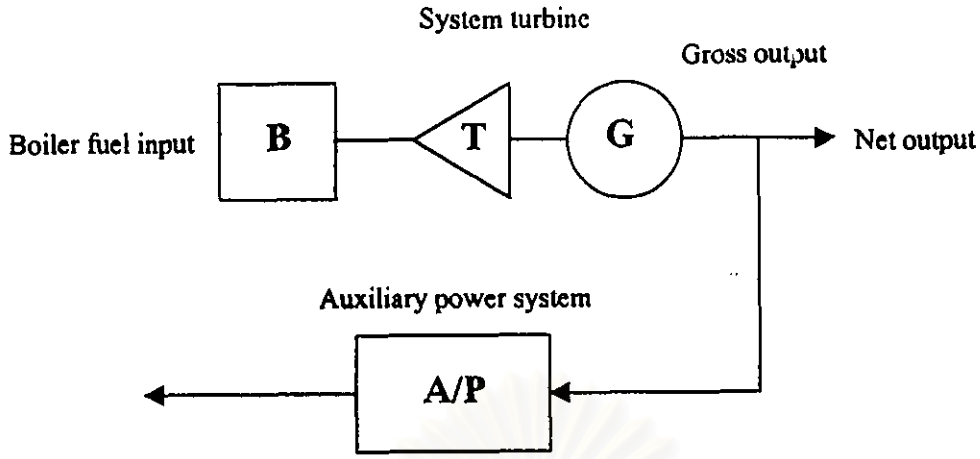
ปัจจุบันระบบไฟฟ้ากำลังทั่วไปมักมีขนาดใหญ่ทำให้เกิดเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนสูงมากเนื่องจากมีการเชื่อมต่อกันระหว่างระบบผลิต ระบบส่งจ่าย และระบบกระจายกำลังไฟฟ้าไปสู่ผู้ใช้ไฟ ส่งผลให้โรงจักรไฟฟ้า สายส่งกำลังไฟฟ้า ตลอดจนอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลังได้มีการเพิ่มจำนวนขึ้นตามความซับซ้อนของระบบ เมื่อความต้องการใช้ไฟเพิ่มสูงขึ้น การปล่อยให้ระบบไฟฟ้ากำลังปฏิบัติงานโดยไม่มีการควบคุมนั้นมีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดความผิดปกติขึ้นกับระบบได้ ดังนั้นการวางแผนการทำงานและควบคุมการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์จึงมีความจำเป็นเพื่อสร้างความเชื่อถือได้ ความมั่นคง และเสถียรภาพในการปฏิบัติงานของระบบไฟฟ้ากำลังและการให้บริการที่ต่อเนื่องต่อผู้ใช้ไฟ

ในการวางแผนการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังในช่วงแรกนั้นเน้นไปที่การจัดสรรกำลังผลิต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนการผลิตให้กับระบบผลิต ต่อมาได้มีการเพิ่มเงื่อนไขบังคับต่าง ๆ เช่น ขีดจำกัดของจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขีดจำกัดของแรงดันบัส ขีดจำกัดของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง ต่อมาได้มีการพิจารณาถึงการจัดสรรกำลังรีแอกทีฟซึ่งพบว่ามีผลกระทบต่อการสูญเสียในระบบซึ่งทำได้โดยการควบคุมแรงดันบัสที่บัสควบคุม การควบคุมค่าแท็ปของหม้อแปลงในระบบส่งจ่าย รวมทั้งอาจพิจารณาถึงการติดตั้งตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟด้วย ดังนั้นแนวคิดในการทำออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ได้ถูกเสนอโดย Dommel และ Tinney ในปี ค.ศ. 1968 [6] โดยพิจารณาถึงการจัดสรรกำลังผลิตจากโรงจักรไฟฟ้าร่วมกับการปรับค่าตัวแปรควบคุมในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้ต้นทุนการผลิตของระบบต่ำที่สุด มีกำลังสูญเสียในระบบต่ำที่สุด และระบบทำงานอยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัย

ระบบผลิตไฟฟ้าประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวนมาก สามารถแบ่งได้ตามลักษณะของแหล่งกำเนิดพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ 2 แบบ [7] ดังนี้

1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำ (Hydro unit) หมายถึง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ตามเขื่อนต่าง ๆ ซึ่งปล่อยให้น้ำจากเหนือเขื่อนไหลผ่านกังหันภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังความร้อน (Thermal unit) หมายถึง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งมีหม้อต้มน้ำ (Boiler) สำหรับผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูง เพื่อขับกังหันภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทั้งนี้ความร้อนที่ใช้ในการต้มน้ำได้มาจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ เช่น ก๊าซธรรมชาติ น้ำมันดีเซล หรือถ่านหิน เป็นต้น ดังแสดงให้เห็นตามแผนภาพการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังความร้อนในรูปที่ 3.1




รูปที่ 3.1 แผนภาพการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังความร้อน

## 3.1 คุณลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังความร้อน [7]

เราอาจพิจารณาตัวแปรทางด้านเข้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังความร้อนมาจากปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องใช้ในกระบวนการผลิต (Fuel input energy) ซึ่งมีหน่วยเป็น MBtu หรืออัตราการใช้พลังงานความร้อนต่อชั่วโมง (Fuel input energy rate) ซึ่งมีหน่วยเป็น MBtu/h หรือค่าใช้จ่ายเนื่องจากเชื้อเพลิงที่ต้องสูญเสียไป (Fuel cost) ในระหว่างการผลิตที่มีหน่วยเป็น ℜ/h โดยที่ ℜ แทนหน่วยของเงินตราที่ใช้ในการแลกเปลี่ยน และค่าทางด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคือกำลังไฟฟ้าซึ่งมีหน่วยเป็น MW

โดยปกติฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงจะได้มาจากการคำนวณตอนออกแบบหรือจากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยตรง โดยปกติข้อมูลที่ได้มานี้จะมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นจึงต้องมีการประมาณค่าของข้อมูลให้เป็นกราฟที่มีลักษณะต่อเนื่องและหาอนุพันธ์ได้โดยง่ายเพื่อความสะดวกในการนำไปใช้ต่อไป ซึ่งรูปแบบที่นิยมใช้กันแพร่หลายคือฟังก์ชันโพลิโนเมียลดังนี้

$$F_i(P_{Gi}) = a_0 + a_1 P_{Gi} + a_2 P_{Gi}^2 + \ldots + a_n P_{Gi}^n \qquad (3.1)$$

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

$a_0, a_1, \ldots, a_n$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดสอบหรือคำนวณ

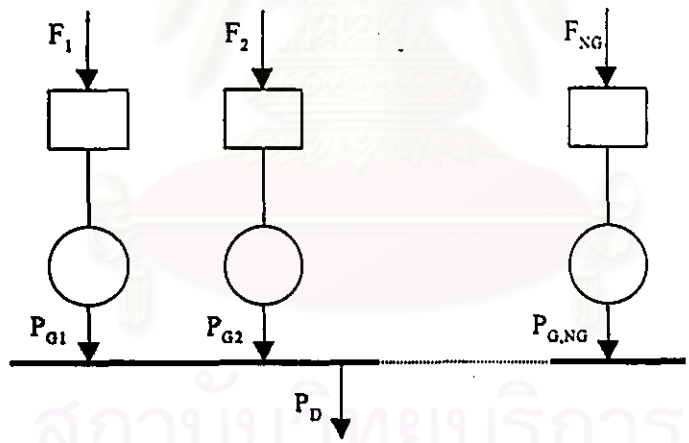
$P_{Gi}$ คือ กำลังจริงที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i

## 3.2 การจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic load dispatch) [7-9]

การจ่ายโหลดอย่างประหยัดเป็นปัญหาการทำออปติไมเซชันของระบบไฟฟ้ากำลังอย่างหนึ่ง โดยพิจารณาการจัดสรรกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังให้มีต้นทุนการผลิตโดยรวมต่ำที่สุดและระบบต้องทำงานในขอบเขตที่ปลอดภัย

### 3.2.1 การจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยไม่รวมผลของการสูญเสียและไม่รวมขีดจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เมื่อไม่พิจารณาการสูญเสียในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและขีดจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้ว แบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังสามารถลดรูปให้เหลือเพียงหนึ่งบัส โดยมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องในระบบต่ออยู่ที่บัสนี้ในที่นี้กำหนดให้มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่กับระบบทั้งหมด $N_G$ เครื่อง และทำการจ่ายโหลดรวมของระบบโดยตรงดังแสดงในรูปที่ 3.2




รูปที่ 3.2 แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลังกรณีไม่พิจารณาการสูญเสียของระบบ

ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดนั้นพิจารณาต้นทุนการผลิตโดยรวมของระบบไฟฟ้ากำลังเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังสมการที่ 3.2

$$F_T = \sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_{Gi}) \tag{3.2}$$

ในกรณีที่ไม่พิจารณาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าดังนั้นกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องรวมกันต้องมีค่าเท่ากับโหลดรวมของระบบ ซึ่งถือเป็นเงื่อนไขบังคับแบบสมการ และจะได้รูปแบบปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดในกรณีนี้ดังสมการที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

$$\text{Minimize} \qquad F_T \tag{3.3}$$

$$\text{Subject to} \qquad P_D - \sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi} = 0 \tag{3.4}$$

โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคตัวคูณลากรองซ์ (Lagrange multipliers) ในการแก้ปัญหา จะได้ฟังก์ชันของลากรองซ์(Lagrangian function) ดังสมการที่ 3.5

$$L = F_T + \lambda(P_D - \sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi}) \tag{3.5}$$

ในการแก้ปัญหานี้สามารถทำได้โดยการทำ Partial derivatives สมการที่ 3.5 แล้วกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์ตามสมการที่ 3.6 และ 3.7 จะได้สมการที่เรียกว่า Incremental cost (IC) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามสมการที่ 3.9 และในกรณีนี้ค่า IC ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับค่าตัวคูณของลากรองซ์ โดยปกติหลักการนี้จะเรียกว่าหลักการเท่ากันของค่าแลมบ์ดา (Equal lambda criteria) [7]

$$\frac{\partial L}{\partial P_{Gi}} = 0 \tag{3.6}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \tag{3.7}$$

เงื่อนไขตามสมการที่ 3.6 จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ

$$\frac{\partial F_T}{\partial P_{Gi}} + \lambda(0-1) = 0 \tag{3.8}$$

$$\frac{dF_i}{dP_{Gi}} = \lambda \qquad ;i = 1,2,\ldots,N_G \tag{3.9}$$

เงื่อนไขตามสมการที่ 3.7 คือเงื่อนไขบังคับแบบสมการซึ่งจะเท่ากับสมการที่ 3.4

### 3.2.2 การจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยรวมขีดจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ไม่รวมผลของการสูญเสีย

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องไม่สูงเกินค่ากำลังผลิตสูงสุดหรือต่ำกว่าค่ากำลังผลิตต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น ๆ เพื่อเสถียรภาพในการทำงานของหม้อต้มน้ำ (Boiler) ดังนั้นปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดกรณีนี้จึงเพิ่มการพิจารณาขีดจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นเงื่อนไขแบบอสมการตามสมการที่ 3.10 รวมกับสมการเดิมที่ใช้ในการแก้ปัญหาซึ่งได้แก่ สมการที่ 3.3 และ 3.4

$$P_{Gi}^{\min} \le P_{Gi} \le P_{Gi}^{\max} \quad ;i = 1,2,...,N_G \tag{3.10}$$

โดยที่ $P_{Gi}^{\min}, P_{Gi}^{\max}$ เป็นกำลังผลิตต่ำสุดและสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i ตามลำดับ

จากเงื่อนไข Kuhn-Tucker conditions จะได้สมการที่ใช้ในการแก้ปัญหาตามสมการที่ 3.11 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \frac{dF_i}{dP_{Gi}} &= \lambda \quad ;P_{Gi}^{\min} < P_{Gi} < P_{Gi}^{\max} \\ \frac{dF_i}{dP_{Gi}} &\le \lambda \quad ;P_{Gi} = P_{Gi}^{\max} \\ \frac{dF_i}{dP_{Gi}} &\ge \lambda \quad ;P_{Gi} = P_{Gi}^{\min} \end{aligned} \tag{3.11}$$

### 3.2.3 การจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยรวมผลของการสูญเสีย

เมื่อการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบส่งจ่ายที่มีระยะสั้น หรือโหลดมีค่าสูงแล้ว การสูญเสียในระบบส่งจ่ายจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านระบบไปสู่ผู้ใช้ไฟ สามารถที่จะละทิ้งค่าการสูญเสียนี้ได้ แต่เมื่อจำเป็นต้องจ่ายโหลดที่ระยะทางไกล หรือในเขตที่มีค่าโหลดไม่สูงมากนัก ผลของการสูญเสียจะมีผลกระทบต่อระบบมากจนไม่สามารถที่ละทิ้งได้ การรวมผลของการสูญเสียที่นิยมใช้ในงานวิจัยที่ผ่านมานั้นสามารถพิจารณาได้ง่าย โดยใช้ Kron's loss formula [10-12] แต่ในปัจจุบันความสามารถของอุปกรณ์คำนวณมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ดังนั้นการคำนวณการสูญเสียในที่นี้จะคำนวณจากการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยวิธี AC Newton-Raphson power flow [7,8] โดยตรง

การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดในกรณีนี้นั้นยังคงใช้การทำออปติไมเซชันตามสมการที่ 3.4 แต่เปลี่ยนเงื่อนไขบังคับแบบสมการโดยรวมกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยตามสมการที่ 3.12 ดังนี้

$$P_D + P_{LOSSES} - \sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi} = 0 \tag{3.12}$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการของลากรองซ์โดยรวมผลของการสูญเสียและขีดจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ดังสมการที่ 3.13

$$\begin{aligned} L = F_T + \lambda(P_D + P_{LOSSES} - \sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi}) + \sum_{i=1}^{N_G} \mu_i^{max}(P_{Gi} - P_{Gi}^{max}) \\ + \sum_{i=1}^{N_G} \mu_i^{min}(P_{Gi} - P_{Gi}^{min}) \end{aligned} \tag{3.13}$$

เมื่อแปลงปัญหาการทำออปติไมเซชันแบบมีเงื่อนไขให้เป็นการทำออปติไมเซชันแบบไม่มีเงื่อนไขโดยใช้ฟังก์ชันลากรองซ์ สามารถแก้ปัญหาได้โดยใช้เทคนิคการแก้ปัญหาออปติไมเซชันของฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นดังที่ได้เสนอไว้ในหัวข้อ 2.1

## 3.3 การแก้ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ (Optimal power flow solutions)

การวางแผนการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังนั้น ผู้ออกแบบระบบต้องการให้มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟได้อย่างต่อเนื่อง มีความน่าเชื่อถือ ความมั่นคง เสถียรภาพในการทำงานสูงสุด ตลอดจนต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุดด้วย การเลือกจุดทำงานที่เหมาะสมจึงมีความจำเป็นเพื่อให้ได้ตรงตามวัตถุประสงค์ดังกล่าว ดังนั้นจึงมีการนำเอาเทคนิคต่าง ๆ มาใช้ในการเลือกจุดการทำงานนี้ ดังนี้

1) <u>การจ่ายโหลดอย่างประหยัด</u>(Economic load dispatch) [7-9] เป็นวิธีการจัดสรรกำลังผลิตของระบบผลิตอย่างเหมาะสม โดยให้มีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด มีกำลังผลิตเพียงพอต่อโหลดตามที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ 3.2

2) <u>การจัดสรรกำลังรีแอกทีฟ</u>(Reactive power dispatch) [13-19] เป็นวิธีการที่ใช้การปรับค่าแรงดันที่บัสควบคุม และบัสอ้างอิง นอกจากนี้ยังใช้การปรับ Under load tap change transformer(ULTC) เพื่อให้เกิดกำลังงานสูญเสียในระบบน้อยที่สุด

3) <u>ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์</u>(Optimal power flow) [6-9] เป็นการนำเอาวิธีการจ่ายโหลดอย่างประหยัดและการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าด้วยกัน เพื่อให้ต้นทุนการผลิตและกำลังงานสูญเสียในระบบมีค่าต่ำที่สุด

ปัญหาการทำออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์มีลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ดังนั้น จึงมีการนำเอาเทคนิคการแก้ปัญหาแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear programming) มาใช้ดังแสดงใน [1] แต่เนื่องจากปัญหานี้เป็นปัญหาที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน ดังนั้นในอดีตจึงนิยมแบ่งปัญหาออกเป็น 2 ปัญหาย่อย คือ การจัดสรรกำลังจริง(P-problem) และการจัดสรรกำลังรีแอกทีฟ(Q-problm) โดยจะทำการแก้ปัญหาทั้ง 2 ปัญหาสลับกันไป

### 3.3.1 การจัดสรรกำลังจริง (P-problem) [14]

เป็นการทำออปติไมเซชันโดยใช้ต้นทุนการผลิตเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และใช้กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นตัวแปรควบคุม( Controlled variables) แรงดันที่บัสควบคุมและบัสอ้างอิง ค่าแท็ปหม้อแปลง เป็นตัวแปรคงที่(Fixed variables) เพื่อให้ได้ต้นทุนการผลิตต่ำสุด ดังนี้

พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลัง $N_B$ บัส และมีจำนวนโรงจักรไฟฟ้าในระบบ $N_G$ เครื่อง

1) ระบบไฟฟ้ามีจำนวน Voltage controlled bus จำนวน $N_{PV}$

2) ระบบไฟฟ้ามีจำนวน ULTC จำนวน $N_T$

3) ระบบไฟฟ้ามีบัสอ้างอิง 1 บัส

กำหนดให้ u เป็นตัวแปรควบคุม และ p เป็นตัวแปรคงที่

$$\underset{\sim}{u} = [P_{Gi}] \qquad \text{และ} \quad \underset{\sim}{p} = [V_j \; V_{ref} \; T_k]^T$$

โดยที่

$P_{Gi} \sim [P_{Gi}^{min}, P_{Gi}^{max}]$ ; i=1,2,...,$N_G$ -1

$V_j \sim [V_j^{min}, V_j^{max}]$ ; j=1,2,...,$N_{PV}$

$T_k \sim [T_k^{min}, T_k^{max}]$ ; k=1,2,...,$N_T$

$V_{ref} \sim [V_{ref}^{min}, V_{ref}^{max}]$

เมื่อ $V_j^{min}, V_j^{max}$ แทนขีดจำกัดต่ำสุดและสูงสุดของแรงดันที่บัสควบคุม

$T_k^{min}, T_k^{max}$ แทนขีดจำกัดต่ำสุดและสูงสุดของแท็ปหม้อแปลง

$V_{ref}^{min}, V_{ref}^{max}$ แทนขีดจำกัดต่ำสุดและสูงสุดของแรงดันที่บัสอ้างอิง

โดยมีรูปแบบของปัญหาเป็นดังนี้

Minimize $\sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_{Gi})$

Subject to power flow equations

ขอบเขตของตัวแปรควบคุม, ตัวแปรคงที่ และตัวแปรสถานะ

### 3.3.2 การจัดสรรกำลังรีแอกทีฟ(Q-problem) [14-18]

เป็นการทำออปติไมเซชันโดยใช้การสูญเสียของระบบเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แรงดันที่บัสควบคุมและบัสอ้างอิง ค่าแท็ปหม้อแปลง เป็นตัวแปรควบคุม(Controled variables) กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นตัวแปรคงที่(Fixed variables) เพื่อให้ระบบมีกำลังสูญเสียต่ำสุด ดังนี้

$$\underset{\sim}{u} = \left[V_j \; V_{ref} \; T_k\right]^T \quad \text{และ} \quad \underset{\sim}{p} = \left[P_{Gi}\right]$$

โดยมีรูปแบบปัญหาเป็นดังนี้

Minimize $\sum_{l=1}^{N_L} I_l^2 R_l$

Subject to power flow equations

ขอบเขตของตัวแปรควบคุม, ตัวแปรคงที่ และตัวแปรสถานะ

### 3.3.3 การทำออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์โดยวิธีรวมการจัดสรรกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟเข้าด้วยกัน [14,19]

ปัจจุบันความสามารถในการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทำให้การนำกระบวนการค้นหาจุดคำตอบที่เหมาะสมโดยใช้วิธีจำลองวิวัฒนาการตามธรรมชาติ เช่น การโปรแกรมเชิงวิวัฒนาการ กลยุทธ์วิวัฒนาการและเจนเนติกอัลกอริทึม มีความรวดเร็วมากกว่าเดิม นอกจากนี้การแก้ปัญหาออปติไมเซชันโดยใช้การคำนวณเชิงวิวัฒนาการนี้ ไม่ต้องการสมมติฐานทางคณิตศาสตร์ของปัญหามากนัก ต้องการเพียงค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์เท่านั้น การแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้ดังนี้

ตัวแปรที่ใช้ในการทำออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์โดยใช้วิธีการรวมการแก้ปัญหา P และ Q เข้าด้วยกัน มีดังนี้

$$\underset{\sim}{p} = \begin{bmatrix} P_{Gi} \\ V_j \\ T_k \\ V_{ref} \end{bmatrix} \tag{3.14}$$

รูปแบบของการแก้ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์สามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$\text{Minimize} \qquad F_T = \sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi}$$

Subject to

$$\begin{aligned} & P_{calc} - P_{sch} = 0 \\ & Q_{calc} - Q_{sch} = 0 \\ & P_{Gi}^{\min} \le P_{Gi} \le P_{Gi}^{\max} \\ & Q_{Gi}^{\min} \le Q_{Gi} \le Q_{Gi}^{\max} \\ & V_j^{\min} \le V_j \le V_j^{\max} \\ & T_k^{\min} \le T_k \le T_k^{\max} \\ & V_{ref}^{\min} \le V_{ref} \le V_{ref}^{\max} \end{aligned} \tag{3.15}$$

การแก้ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์โดยใช้การคำนวณเชิงวิวัฒนาการนั้นมีรูปแบบการประยุกต์ใช้ที่แตกต่างกัน [20-24] ซึ่งโดยหลักการคัดเลือกตามธรรมชาติดังที่ได้กล่าวมานั้นจะใช้ค่าความเหมาะสมของสมาชิกในกลุ่มประชากร ดังนั้นขั้นตอนการคำนวณค่าความเหมาะสมที่รัดกุมนั้นจะส่งผลให้กระบวนการคำนวณมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ในการคำนวณค่าความเหมาะสมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้นเป็นรูปแบบที่เน้นความง่ายในการคำนวณเป็นหลักจึงได้พิจารณาโดยการแบ่งสมาชิกออกเป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มที่อยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขบังคับทุกเงื่อนไขซึ่งจะเรียกว่า Feasible sets ($\psi$) และกลุ่มที่ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับอย่างน้อยหนึ่งเงื่อนไขซึ่งจะเรียกว่า Infeasible sets ($\vartheta$) ดังนั้นถ้ากำหนดค่าความเหมาะสมของสมาชิก $p_i$ ใด ๆ มีค่าเท่ากับ $W_p$ โดยมีหลักดังนี้

$$W_p = \begin{cases} F_T(p_i) & ; p_i \in \psi \\ F_T(p_i) + \gamma & ; p_i \in \vartheta \end{cases} \tag{3.16}$$

โดยที่ $\gamma$ แทนค่าปรับในกรณีสมาชิกที่กำลังพิจารณา มีคุณสมบัติไม่เป็นไปตามขอบเขตที่กำหนด ซึ่งเป็นค่าที่บวกเพิ่มเพื่อให้ค่าความเหมาะสมในกรณีนี้มีค่าสูง และจะถูกกำจัดไปด้วยกระบวนการคัดเลือกในที่สุด และเพื่อเป็นการรับประกันว่าค่าที่บวกเข้าไปนี้จะทำให้ค่าความเหมาะสมมีค่าสูงกว่าในกรณีปกติ ดังนั้นการเลือกค่า $\gamma$ ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้สมการที่ 3.17

$$\gamma \geq \underset{p_i}{Max} F_T(p_i) \tag{3.17}$$

งานวิจัยเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการคำนวณเชิงวิวัฒนาการในการประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาการทำงานที่เหมาะสมของระบบไฟฟ้ากำลัง [25] พบว่ากลยุทธ์วิวัฒนาการมีประสิทธิภาพดีที่สุด และโดยกระบวนการนี้มีขั้นตอนการแก้ปัญหาดังนี้

1) <u>สุ่มประชากรเริ่มต้น</u> $p_i \in \psi$ จำนวน $N_p$ โดยใช้การสุ่มแบบ Uniform random และเพื่อรับประกันว่าจำนวนประชากรที่ใช้สามารถให้คุณสมบัติการกระจายแบบปกติ ดังนั้น $N_p \geq 10$
2) <u>การสร้าง Offspring</u> $p_i'$ จะถูกสร้างจาก $p_i$ โดยที่ $p'_{i,j} = p_{i,j} + N(0,\sigma_j^2)$ ซึ่งจะเรียกการดำเนินการนี้ว่า Mutation โดยที่ $\sigma_j = \beta \frac{f_{pi}}{f_{\min}}(p_{j,\max} - p_{j,\min})$ และ $N(0,\sigma_j^2)$ แทน Guassian random variable ที่มีค่า $\mu = 0$ และ ค่าความแปรปรวนเท่ากับ $\sigma_j^2$ , $\beta$ แทนค่า Mutation scale factor จากงานวิจัย [25] $0 < \beta \leq 1$ แต่ค่าที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง $0.001 \leq \beta \leq 0.01$
3) <u>การแข่งขันและการคัดเลือก</u> สร้าง Competing pool จาก $p_i$ และ $p_i'$ สมาชิกทั้งหมดใน Competing pool จะมีจำนวนเป็น 2 เท่าของประชากรเริ่มต้น จากนั้นจะทำการเลือกสมาชิกที่มีค่าความเหมาะสมต่ำสุดจำนวน $N_p$ ให้อยู่รอดเพื่อใช้เป็นประชากรเริ่มต้นในรุ่นการถ่ายทอดถัดไป
4) <u>เงื่อนไขการหยุด</u> กระบวนการในการสร้างรุ่นการถ่ายทอดใหม่นั้น จะดำเนินการไปจนกระทั่งไม่สามารถที่จะลดค่าความเหมาะสมได้อีกแล้ว หรือเมื่อจำนวนรุ่นการถ่ายทอดถึงค่าสูงสุดที่ตั้งไว้

### 3.3.4 การทำออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์โดยใช้ Sequential quadratic programming จาก MATLAB's TOOLBOX [2]

ในการแก้ปัญหาออปติไมเซชันแบบมีเงื่อนไขโดยใช้ SQP นั้น โปรแกรม MATLAB มีการสร้าง M-files เพื่อใช้ในการแก้ปัญหานี้ นั่นคือ "constr.m" และมีรูปแบบคำสั่งใช้งานดังนี้

$X_0$=[$P_{G0}$,$V_0$,$T_0$,$V_{ref0}$]; % กำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรควบคุม

options=foptions;

options(2)=accuracy_x; % กำหนดค่าความถูกต้องของตัวแปรควบคุม

options(3)=accuracy_f; % กำหนดค่าความถูกต้องของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

options(13)=2*$N_B$; % กำหนดจำนวนของเงื่อนไขบังคับแบบสมการ

VLB=[$P_{Gi}^{min}$,$V^{min}$,$T^{min}$,$V_{ref}^{min}$]; % ขีดจำกัดล่างของตัวแปรควบคุม

VUB=[$P_{Gi}^{max}$,$V^{max}$,$T^{max}$,$V_{ref}^{max}$]; % ขีดจำกัดบนของตัวแปรควบคุม

[$X_F$,options,lambda]=constr('fun',$X_0$,options,VLB,VUB);

% $X_F$ แทนคำตอบที่เหมาะสมของตัวแปรควบคุมจากการทำ OPF

% lambda แทนค่าตัวคูณของลากรองซ์จากการทำ OPF

% ก่อนการใช้งานต้องเขียนไฟล์ 'fun.m' โดยกำหนดให้มีการคำนวณและส่งค่า f และ g กลับ โดยที่ f แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ g แทนค่าเงื่อนไขบังคับแบบต่าง ๆ โดยใช้รูปแบบเวคเตอร์ เรียงลำดับจากเงื่อนไขบังคับแบบสมการแล้วตามด้วยเงื่อนไขบังคับแบบอสมการ โดยไม่ต้องใส่ข้อกำหนดของตัวแปรควบคุมเนื่องจากกำหนดไว้แล้วในการตั้งค่า VLB และ VUB

## 3.4 การคำนวณ Bus incremental cost และอัตราค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมในการขนส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบไฟฟ้าคนกลาง [7,26-30]

การจ่ายกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตผ่านระบบส่งกำลังไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟนั้น การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด หรือออปติมัลมัลเพาเวอณ์โฟลว์ ได้ถูกนำมาใช้เพื่อให้การปฏิบัติงานของระบบเป็นไปตามหลักเศรษฐศาสตร์ เมื่อมีการซื้อขายไฟ ราคาการซื้อขายไฟที่เหมาะสมจึงต้องมีการวิเคราะห์อย่างรัดกุม และในปัจจุบันได้ใช้หลักการที่มีพื้นฐานมาจากการคำนวณค่า Bus incremental cost โดยพิจารณาจากผลการทำออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ดังนี้

ในการทำ OPF ต้องสร้างฟังก์ชันของลากรองซ์ตามสมการต่อไปนี้

$$L = F_T + \lambda_{pi} PM_i + \lambda_{qi} QM_i + \sum_{i=1}^{N_G} \mu_{Gi}^{\max} (P_{Gi} - P_{Gi}^{\max}) + \sum_{i=1}^{N_G} \mu_{Gi}^{\min} (P_{Gi} - P_{Gi}^{\min}) + \sum_{i=1}^{N_B} \mu_{Vi}^{\max} (V_i - V_{Vi}^{\max}) + \sum_{i=1}^{N_B} \mu_{Vi}^{\min} (V_i - V_i^{\min}) + \ldots \quad (3.18)$$

โดยที่ $PM_i$ และ $QM_i$ แทนสมการ Power mismatch ที่บัส i [31,32]

ดังนั้น Bus incremental cost สามารถนิยามดังนี้ [7,26]

1) <u>บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า</u> เมื่อพิจารณาอัตราการซื้อขายกำลังไฟฟ้าจริง

$$BIC_{Gi} = \frac{\partial F_T}{\partial P_{Gi}} = \lambda_{pi} \quad (3.19)$$

2) <u>บัสโหลด</u> เมื่อพิจารณาอัตราการซื้อขายกำลังไฟฟ้าจริง

$$BIC_{Di} = \frac{\partial F_T}{\partial P_{Di}} = \lambda_{pi} \quad (3.20)$$

ในการทำ OPF ด้วยวิธี SQP นั้นสามารถคำนวณ Bus incremental cost ได้ง่าย โดยใช้ค่าตัวคูณของลากรองซ์สำหรับสมการ Power mismatch ที่บัสนั้นโดยตรง แต่ในการเลือกจุดทำงานที่ไม่ได้มีพื้นฐานมาจาก OPF หรือใช้วิธีการคำนวณเชิงวิวัฒนาการนั้น ไม่สามารถที่จะหาค่าตัวคูณของลากรองซ์ได้ ดังนั้น [33] ได้เสนอวิธีการ Finite difference ช่วยในการคำนวณซึ่งสรุปได้ดังนี้

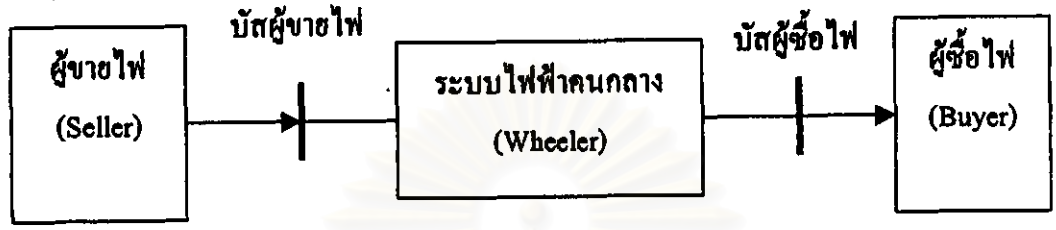
1) <u>บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า</u> คำนวณได้ดังนี้

$$BIC_{Gi} = \frac{F_T(P_{Gi} + \Delta P_{Gi}) - F_T(P_{Gi} - \Delta P_{Gi})}{2\Delta P_{Gi}} \quad (3.21)$$

2) <u>บัสโหลด</u> คำนวณได้ดังนี้

$$BIC_{Di} = \frac{F_T(P_{Di} + \Delta P_{Di}) - F_T(P_{Di} - \Delta P_{Di})}{2\Delta P_{Di}} \quad (3.22)$$

การกำหนดอัตราค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมในการขนส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบไฟฟ้าคนกลางนั้น อาศัยหลักการของ Marginal cost หรือ Bus incremental cost เมื่อไม่พิจารณาค่าบำรุงรักษาระบบ ค่าแรงงาน ค่าเสื่อมราคา ฯลฯ กำหนดการแบบจำลองการขนส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบไฟฟ้าคนกลาง ดังรูปที่ 3.3




รูปที่ 3.3 แบบจำลองการขนส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบไฟฟ้าคนกลาง

อัตราค่าใช้จ่ายในการขนส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบคนกลาง (Wheeling rate) คำนวณจากผลต่างของอัตราซื้อขายไฟที่บัสผู้ซื้อไฟกับบัสผู้ขายไฟ ดังสมการต่อไปนี้

$$\omega_R = BIC_B - BIC_S \tag{3.23}$$

โดยที่ $\omega_R$ คือ Wheeling rate ($\text{฿}/MWh$)

$BIC_B, BIC_S$ คือ Bus incremental cost ที่บัสผู้ซื้อและผู้ขายไฟตามลำดับ

ในการขนส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบไฟฟ้าคนกลางจำนวน $P_E$ MW ค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมในการขนส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบไฟฟ้าคนกลางคำนวณได้จากสมการที่ 3.24

$$\omega_C = \omega_R P_E \tag{3.24}$$

โดยที่ $\omega_C$ คือ ค่าใช้จ่ายในการขนส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบไฟฟ้าคนกลาง (Wheeling cost) มีหน่วยเป็น ฿/h

การขนส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบไฟฟ้าคนกลางนั้นอาจจะเกิดขึ้นหรือไม่เกิดขึ้นก็ได้ ขึ้นอยู่กับความสมเหตุสมผลในทางเศรษฐศาสตร์ และค่าความสมเหตุสมผลนี้จะวัดโดยใช้ Wheeler profit ซึ่งนิยามโดย

$$W_p = \omega_c - \Delta TPC \tag{3.25}$$

โดยที่ $W_p$ แทนค่า Wheeler profit

$\Delta TPC$ แทนค่าต้นทุนการผลิตโดยรวมของระบบ (Total production cost)

ระบบไฟฟ้าคนกลางจะยอมให้มีการขนส่งกำลังไฟฟ้าผ่านได้ก็ต่อเมื่อ $W_p > 0$ เท่านั้น ซึ่งหมายถึงราคาค่าใช้จ่ายในการขนส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบไฟฟ้าคนกลางที่เรียกเก็บจากคู่สัญญาต้องมีค่ามากกว่าต้นทุนการผลิตโดยรวมที่เพิ่มขึ้นของระบบ

## 3.5 การแก้ปัญหาออปติไมเซชันโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลายฟังก์ชัน [2]

การออกแบบทางวิศวกรรมโดยใช้หลักการออปติไมเซชันนั้น ทำให้สามารถออกแบบผลิตภัณฑ์หรือเลือกจุดทำงานให้มีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดได้ ซึ่งโดยทั่วไปปัญหาจะอยู่ในรูปฟังก์ชันวัตถุประสงค์หนึ่งฟังก์ชัน พร้อมด้วยเงื่อนไขบังคับต่าง ๆ ตามเงื่อนไขการออกแบบหรือการปฏิบัติงาน แต่ในกระบวนการผลิตบางประเภทอาจมีผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การปล่อยก๊าซที่เป็นมลพิษออกสู่บรรยากาศในระหว่างกระบวนการผลิตด้วย ทำให้เกิดผลเสียหายต่อสิ่งแวดล้อมชุมชนข้างเคียง ก่อให้เกิดปัญหามากมายที่จะตามมาในภายหลังได้ ทำให้ในบางกรณีมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากกว่าหนึ่งฟังก์ชัน ทำให้จุดการทำงานต้องเปลี่ยนไป และรูปแบบการแก้ปัญหาก็เปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน โดยทั่วไปการแก้ปัญหาออปติไมเซชันโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลายฟังก์ชันนั้น ใช้หลักการแปลงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งหมดให้เหลือเพียงฟังก์ชันวัตถุประสงค์หนึ่งฟังก์ชันเท่านั้น แล้วทำการแก้ปัญหาโดยอาศัยการแก้ปัญหาออปติไมเซชันตามวิธีปกติดังที่ได้เสนอไว้ในบทที่สอง

ปัญหาออปติไมเซชันโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลายฟังก์ชันนั้น มีรูปแบบปัญหาดังนี้

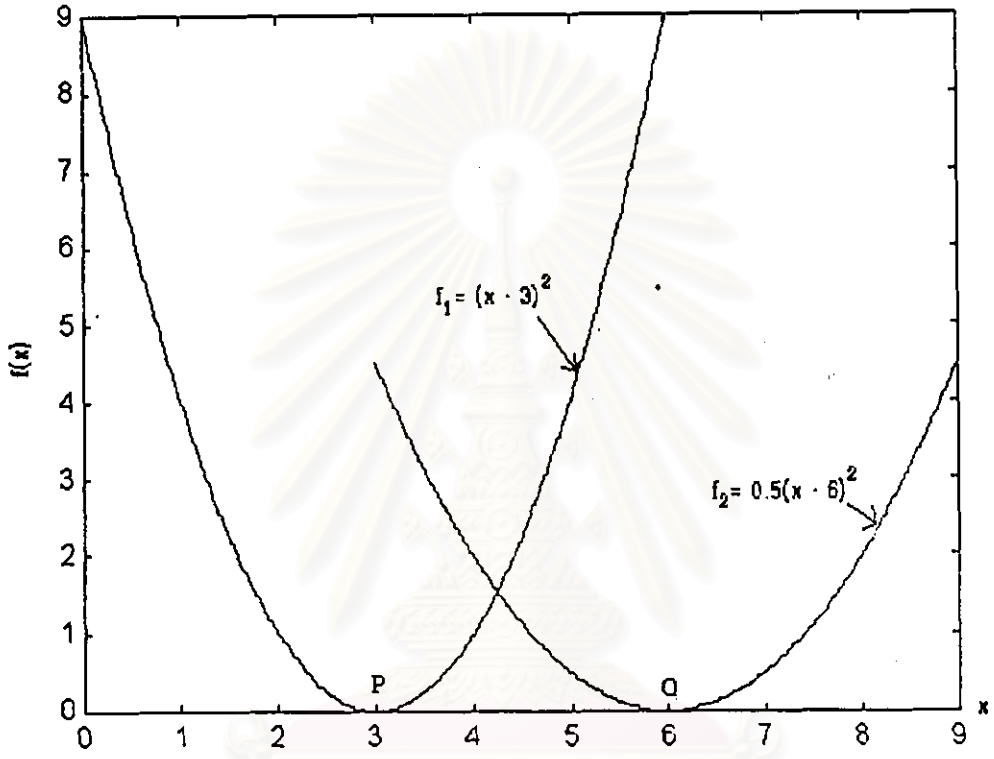
$$Mininmize \quad f_1(x), f_2(x), \ldots, f_k(x) \tag{3.26}$$

$$\text{Subject to} \quad g_i(x) = 0 \tag{3.27}$$

$$h_j(x) \le 0 \tag{3.28}$$

โดยปกติแล้วไม่สามารถที่จะทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งหมดมีค่าต่ำสุดพร้อมกันได้ ดังนั้นจึงได้มีการเสนอแนวคิดที่เรียกว่า Pareto optimum solution เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาออปติไมเซชันโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลายฟังก์ชัน โดยคำตอบที่เป็นไปได้ $x^*$ จะเรียกว่า pareto optimal

ก็ต่อเมื่อไม่สามารถที่จะหาคำตอบที่เป็นไปได้ y ใด ๆ ที่สามารถลดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์บางค่าโดยไม่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์อื่น ๆ มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างน้อยหนึ่งฟังก์ชัน ตัวอย่างเช่น ถ้ากำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้ $f_1=(x-3)^2$ และ $f_2=0.5(x-6)^2$ สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 3.4 และจุดที่อยู่บนเส้น PQ ถือว่าเป็น Pareto optimal solutions




รูปที่ 3.4 Pareto optimal solutions

มีหลายวิธีในการแก้ปัญหาออปติไมเซชันโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลายฟังก์ชันที่ใช้หลักการของ Pareto optimal solution วิธีการที่นำเสนอในที่นี้เป็นวิธีที่จะนำมาใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ โดยจะใช้วิธีการที่เรียกว่า Utility function method ซึ่งจะมีการกำหนด Utility function $U_i(f_i)$ ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์แต่ละฟังก์ชัน และนำมาสร้าง Overall utility function U ดังนี้

$$U = \sum_{i=}^{k} U_i(f_i) \tag{3.29}$$

จุดคำตอบที่เหมาะสมทำได้โดยการหาค่าสูงสุดของ U ตามสมการที่ 3.29 เทียบกับเงื่อนไขบังคับตามสมการที่ 3.27 และ 3.28 โดยรูปแบบของ Utility function อย่างง่ายที่ใช้จะอยู่ในรูป Weighting function ดังนี้

$$U = \sum_{i=1}^{k} U_i = -\sum_{i=1}^{k} w_i f_i(x) \tag{3.30}$$

โดยที่ $w_i$ แทนค่า Weighting factor ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i

วิธีนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่ในบางกรณี ฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลายฟังก์ชันไม่สามารถที่จะนำมาบวกกันโดยตรงได้และการกำหนดค่า Weighting factor ที่เหมาะสมนั้นค่อนข้างยุ่งยากในทางปฏิบัติ เพื่อให้การกำหนด Utility function เป็นไปอย่างเหมาะสมและง่ายในการสื่อความหมาย ในที่นี้จะอาศัยหลักการทำออปติไมเซชันของฟังก์ชันวัตถุประสงค์แยกทีละฟังก์ชันจะได้คำตอบที่เหมาะสมเทียบกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ลำดับที่ i ใด ๆ จะได้ $f_i^*$ เทียบกับคำตอบที่เหมาะสม $x_i^*$ และเพื่อให้ง่ายในการสื่อความหมายดังนั้นจะทำการปรับค่าของฟังก์ชัน $f_i(x)$ ใด ๆ ให้อยู่ในรูปดัชนีที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดย 0 แทนจุดที่ให้ค่าความสำคัญของฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้นน้อยที่สุด และที่ค่า 1 แทนจุดที่ให้ค่าความสำคัญของฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้นสูงที่สุด เพื่อให้เป็นไปตามดัชนีที่ได้กล่าวมาข้างต้นนี้ ดังนั้นการกำหนด Utility function ทำได้โดยใช้ฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียลประกอบการคำนวณดังนี้

$$U_i = \xi_i e^{\left(1-\frac{f_i(x)}{f_i^*(x)}\right)} \tag{3.31}$$

$$U = \sum_{i=1}^{k} U_i \tag{3.32}$$

โดยที่ $\xi_i$ แทนค่า Scaling factor ใช้กำหนดความสำคัญของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ปกติกำหนดค่าเป็น 1

ในการแก้ปัญหาออปติไมเซชันโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลายฟังก์ชันตามวิธีการที่กล่าวมาข้างต้นนี้สามารถทำได้ดังนี้

$$\text{Minimize} \quad -U \tag{3.33}$$

$$\text{Subject to} \quad g_i(x) = 0 \tag{3.34}$$

$$h_j(x) \le 0 \tag{3.35}$$

## 3.6 การแก้ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลายฟังก์ชัน [34-35]

การปฏิบัติการระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปนั้น ไม่สามารถที่จะทำให้เกิดค่าต่ำสุดของต้นทุนการผลิต และค่าสูงสุดของความน่าเชื่อถือและความมั่นคงในการให้บริการได้พร้อมกัน นอกจากนี้ ในปัจจุบันการพิจารณาถึงผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากโรงไฟฟ้าพลังความร้อน ได้เริ่มเข้ามามีบทบาทในการพิจารณาจุดทำงานของระบบไฟฟ้า ด้วย ในการเลือกจุดการทำงานที่เหมาะสมของระบบไฟฟ้า โดยพิจารณาถึงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นนี้สามารถทำได้โดยอาจจะพิจารณาถึงลำดับความสำคัญของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังกล่าวในสัดส่วนที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ

ในที่นี้ ได้เลือกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อนำมาใช้ในการทำออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ 3 ฟังก์ชัน ดังนี้ Economic objective function, Environmental objective function และ Transmission security objective function ในการแก้ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลายฟังก์ชันนั้น ต้องรวมฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 3 ฟังก์ชัน ให้เหลือเพียง 1 ฟังก์ชัน ในที่นี้ได้นิยามวิธีการคำนวณค่าดัชนีประกอบของแต่ละฟังก์ชัน หรือ Utility function ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) Economic objective function

ใช้ผลรวมของฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของแต่ละโรงจักรรวมกัน ดังนี้

$$F_{EC} = \sum_{i=1}^{N_G} f_{C,i}(P_i) \tag{3.36}$$

$f_{C,i}$ : ฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของยูนิตที่ i

$N_G$ : จำนวนยูนิตในระบบไฟฟ้า

ในที่นี้จะพิจารณาคำนวณค่า Economy index ดังนี้

$$f_{EC} = e^{(1-\mu_{EC})} = 2.7183\, e^{-\mu_{EC}} \tag{3.37}$$

โดยที่ $\mu_{EC} = F_{EC} / F_{EC}^{*}$ และ $F_{EC}^{*}$ ผลการคำนวณจากการทำ OPF โดยใช้เฉพาะ Economic objective function เท่านั้น

2) Environmental objective function [34,36-38]

ใช้ฟังก์ชันการปลดปล่อยก๊าซ $SO_2$ ของแต่ละยูนิตมาพิจารณาดังนี้

$$F_{EN} = \sum_{i=1}^{N_G} f_{E,i}(P_i) \tag{3.38}$$

เมื่อ $f_{E,i}$ คือ ฟังก์ชันการปลดปล่อยก๊าซ $SO_2$ ของยูนิต i

ค่า Environmental index คำนวณได้ดังนี้

$$f_{EN} = e^{(1-\mu_{EN})} = 2.7183e^{-\mu_{EN}} \tag{3.39}$$

โดยที่ $\mu_{EN} = F_{EN} / F_{EN}^{*}$ และ $F_{EN}^{*}$ ผลการคำนวณจากการทำ OPF โดยใช้เฉพาะ Environmental objective function เท่านั้น

3) Transmission security objective function [39-43]

ใช้ค่า ATC (Available transfer capacity) เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาดังนี้

$$F_S = \sum_{i=1}^{N_L} \left[ \frac{P_{F,i}^{max}}{P_{F,i}^{max} - P_{F,i}} \right] \tag{3.40}$$

เมื่อ $P_{F,i}^{max}$ คือ Transmission limits ของสายส่ง i

$P_{F,i}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง i

สามารถคำนวณ Transmission security index ดังนี้

$$f_{TS} = e^{(1-\mu_{TS})} = 2.7183e^{-\mu_{TS}} \tag{3.41}$$

โดยที่ $\mu_{TS} = F_S / F_S^{*}$ และ $F_S^{*}$ ผลการคำนวณจากการทำ OPF โดยใช้เฉพาะ Transmission security objective function เท่านั้น

จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 3 ฟังก์ชันสามารถนำมาเขียนเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ฟังก์ชันเดียวได้ ดังนี้

$$U = f_{EC} + f_{EN} + f_{TS} \tag{3.42}$$

ดังนั้น การแก้ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลายฟังก์ชัน สามารถทำได้ดังนี้

Minimize -U

Subject to

1. Equality constraints (Power flow equations)

$$P_{i,sch} - P_{i,calc} = 0 \tag{3.43}$$

$$Q_{i,sch} - Q_{i,calc} = 0 \tag{3.44}$$

2. Inequality constraints

$$V_{i,min} \le V_i \le V_{i,max} \quad ; i=1,2,\ldots,N_B$$

$$P_{i,min} \le P_i \le P_{i,max} \quad ; i=1,2,\ldots,N_G$$

$$Q_{i,min} \le Q_i \le Q_{i,max} \quad ; i=1,2,\ldots,N_G$$

$$T_{i,min} \le T_i \le T_{i,max} \quad ; i=1,2,\ldots,N_T$$

$$P_{F,i,min} \le P_{F,i} \le P_{F,i,max} \quad ; i=1,2,\ldots,N_L$$

$N_B$ : จำนวนบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง

$N_G$ : จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

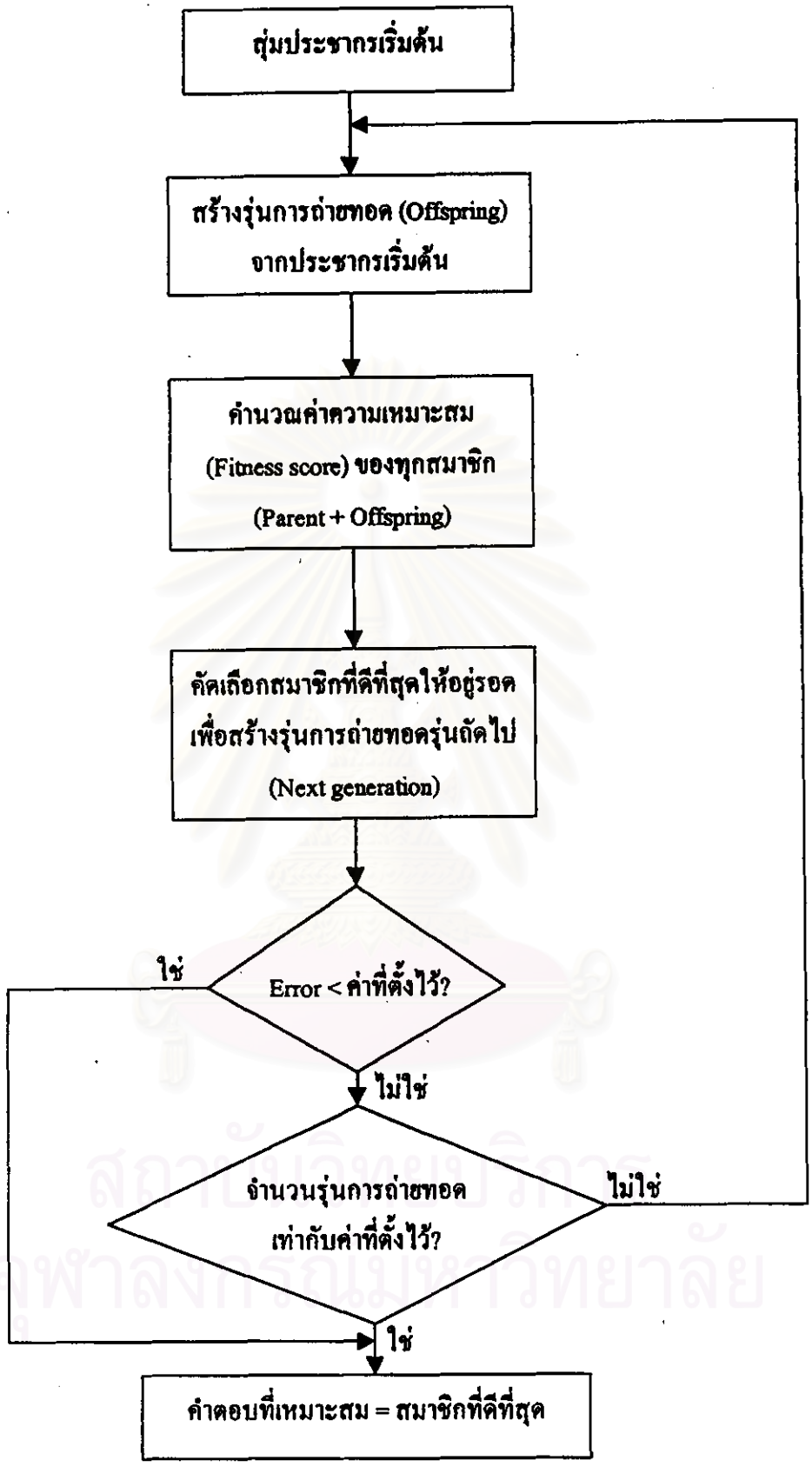
$N_T$ : จำนวน ULTC ในระบบไฟฟ้ากำลัง

$N_L$ : จำนวนสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลัง

นอกจากนี้ ในการแก้ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลายฟังก์ชันยังสามารถทำได้จากการพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 3 ฟังก์ชัน ด้วยลำดับความสำคัญไม่เท่ากันได้ ดังนี้

$$U = \xi_{EC} f_{EC} + \xi_{EN} f_{EN} + \xi_{TS} f_{TS} \ ; \ \xi_k \in \{0,1\}; \ k = EC, EN \text{ และ } TS \tag{3.45}$$

ตามแผนผังการแก้ปัญหาดังต่อไปนี้




รูปที่ 3.5 แผนผังการทำงานของกลยุทธ์วิวัฒนาการ

มีขั้นตอนการแก้ปัญหาดังนี้

1) พิจารณาปัญหา เลือกตัวแปรที่จะใช้ในการแก้ปัญหาซึ่งมีทั้งหมด $N_G+N_{PV}+N_T-1$ ตัว
2) เริ่มต้นโดยการสุ่มตัวแปรทั้งหมดจาก Feasible sets แบบ Uniform random พร้อมทั้งคำนวณค่าความเหมาะสมของแต่ละสมาชิก
3) สร้าง Offspring จากประชากรเริ่มต้น(Parents) พร้อมทั้งคำนวณค่า ความเหมาะสม
4) สร้าง Competing pool (Offspring+Parents) มีสมาชิก $2N_p$ เพื่อเลือกสมาชิกที่ดีที่สุดจำนวน $N_p$ ให้อยู่รอดเพื่อสร้าง Offspring ใน Generation ถัดไป
5) ตรวจสอบจำนวน Generation หรือค่าความคลาดเคลื่อนว่า อยู่ในเกณฑ์ที่ตั้งไว้หรือไม่ ถ้าไม่ให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 3, ถ้าใช่ให้ทำขั้นตอนถัดไป
6) ได้ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด

## 3.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการจ่ายโหลดอย่างประหยัด การแก้ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ ซึ่งถือว่าเป็นการเลือกจุดทำงานที่เหมาะสมของระบบไฟฟ้ากำลัง ภายใต้เงื่อนไขบังคับแบบต่าง ๆ ทำให้ระบบมีต้นทุนการผลิตโดยรวมต่ำ มีความเชื่อถือได้ ความมั่นคง ตลอดจนเสถียรภาพในการทำงานสูง นอกจากนี้ เมื่อมีการพิจารณาถึงผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม การแก้ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์สามารถปรับปรุงรูปแบบของปัญหาเพื่อใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพิ่มเติมจากเดิมที่ใช้ต้นทุนการผลิตโดยรวมเพียงอย่างเดียวได้ โดยใช้การแก้ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลายฟังก์ชัน

นอกจากนี้ ในบทนี้ได้มีการกล่าวถึงแนวคิดและวิธีการคำนวณอัตราการขนส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบไฟฟ้าคนกลางและการคำนวณค่า Bus incremental cost (BIC) โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเข้าช่วย เนื่องจากในกรณีที่มีการประยุกต์ใช้กระบวนการวิวัฒนาการมาแก้ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ ไม่สามารถคำนวณค่า BIC ได้โดยตรง