หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าและการคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์

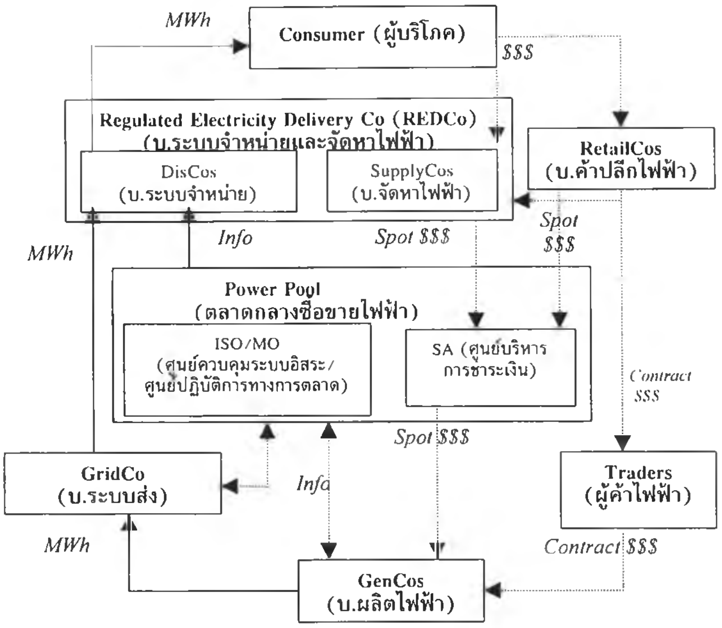
ในบทนี้จะได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานของตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า และพื้นฐานการคำนวณออปติมัลเพาวเวอร์โฟลว์ ดังแสดงในหัวข้อที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ ทั้งนี้เพื่อให้สามารถเห็นภาพรวมของตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า และสามารถคำนวณการจัดสรรกำลังการผลิตซึ่งจำเป็นสำหรับการคำนวณราคาไฟฟ้าต่อไป

2.1 ความรู้พื้นฐานตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานที่สำคัญของตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า โดยในส่วนแรกจะกล่าวถึงองค์ประกอบของโครงสร้างตลาดกลาง ทั้งนี้เพื่อให้เห็นถึงความสัมพันธ์และกิจกรรมระหว่างหน่วยงานต่างๆ จากนั้นในส่วนที่สองจะเป็นตัวอย่างข้อมูลการเสนอการประมูลซื้อและการประมูลขายไฟฟ้า ซึ่งสำคัญต่อการคำนวณการจัดสรรกำลังการผลิตและการคิดราคาไฟฟ้าดังที่จะได้แสดงในบทต่อๆไป

2.1.1 โครงสร้างและความสัมพันธ์ของตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า [1,2]

โครงสร้างของตลาดกลางการซื้อขายไฟฟ้าประกอบด้วยสมาชิกในตลาดทั้งฝ่ายที่เป็นผู้ซื้อหรือผู้ใช้ไฟฟ้า และฝ่ายที่เป็นผู้ขายหรือผู้ผลิตไฟฟ้า โดยมีหน่วยงานกลางซึ่งมีหน้าที่ในการกำหนดกฎเกณฑ์ของตลาด ประสานงานระหว่างผู้ซื้อและผู้ขายไฟฟ้า ควบคุมการดำเนินงานของระบบไฟฟ้า รวมถึงการจัดการทางด้านการเงิน โดยความสัมพันธ์ของสมาชิกในตลาดและหน่วยงานกลางสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างและความสัมพันธ์ของตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า

รายละเอียดของหน่วยงานต่างๆที่เกี่ยวข้องในโครงสร้างดังแสดงสามารถสรุปได้ดังนี้

ตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า (Power pool) :

ตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าประกอบด้วย ศูนย์ควบคุมระบบอิสระ (Independent System Operator : ISO) มีหน้าที่สั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า โดยจะประสานงานกับศูนย์ปฏิบัติการทางการตลาด (Market Operator : MO) โดยจะทำการเลือกโรงไฟฟ้าที่เสนอราคาต่ำที่สุดให้เดินเครื่องก่อน ศูนย์ควบคุมระบบอิสระจะเป็นผู้ควบคุมการปฏิบัติการของบริษัทระบบส่งไฟฟ้า และปฏิบัติงานร่วมกับศูนย์ปฏิบัติการทางการตลาด ส่วนศูนย์บริหารการชำระเงิน (Settlement Administrator : SA) ซึ่งทำหน้าที่ทำความตกลงทางด้านการชำระเงินค่าซื้อไฟฟ้า อาจจะรวมอยู่กับตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า หรืออาจจะแยกออกไปดำเนินการโดยเป็นองค์กรเอกเทศก็ได้

บริษัทผลิตไฟฟ้า (Generation Company : GenCo) :

บริษัทผลิตไฟฟ้ามีหน้าที่ในการผลิตไฟฟ้าเพื่อขายให้กับตลาดกลาง หรือ บริษัทระบบส่งไฟฟ้า โดยในส่วนที่ขายให้กับตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้านั้นจะมีการแข่งขันเพื่อที่จะประมูลเสนอราคาไฟฟ้า บริษัทผลิตไฟฟ้าเหล่านี้อาจจะเป็นโรงไฟฟ้าในปัจจุบันของ กฟผ. ผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ

(Independent Power Producer : IPP) ผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก (Small Power Producer : SPP) หรือ ผู้ผลิตไฟฟ้าจากประเทศเพื่อนบ้าน

บริษัทระบบส่งไฟฟ้า (GridCo) :

บริษัทระบบส่งไฟฟ้าจะเป็นเจ้าของและทำหน้าที่ดูแลและบำรุงรักษาระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงภายใต้สัญญาที่ทำกับศูนย์ควบคุมระบบอิสระ บริษัทระบบส่งไฟฟ้าจะต้องไม่มีความเกี่ยวข้องใดๆ กับหน่วยงานอื่นๆ โดยเฉพาะหน่วยงานที่ไม่อยู่ภายใต้การกำกับดูแลโดยองค์กรกำกับดูแลและควรจะเป็นคนละองค์กรกับศูนย์ควบคุมระบบ (System Operator)

บริษัทระบบจำหน่ายและจัดหาไฟฟ้า (Regulated Electricity Delivery Company : REDCo) :

บริษัทระบบจำหน่ายและจัดหาไฟฟ้านี้เกิดจากการรวมกันของบริษัทจัดหาไฟฟ้า (SupplyCos) และบริษัทระบบจำหน่ายไฟฟ้า (DisCos) ซึ่งอยู่ภายใต้การกำกับดูแลขององค์กรของรัฐ บริษัทระบบจำหน่ายและจัดหาไฟฟ้านี้มีหน้าที่จัดจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้า ณ ราคาตลาดในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า (Spot Prices) บวกด้วยอัตราค่าบริการจัดจำหน่าย (ซึ่งควบคุมโดยองค์กรกำกับดูแล)

บริษัทค้าปลีกไฟฟ้า (RetailCos) :

บริษัทค้าปลีกไฟฟ้าซึ่งเป็นบริษัทเอกชนและไม่อยู่ภายใต้การควบคุมของรัฐจะทำการแข่งขันในการจัดหาพลังงานไฟฟ้าและให้บริการแก่ลูกค้า โดยสามารถแข่งขันกันเสนอบริการเสริมต่างๆ เช่น บริการประกันราคาไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้า (Hedging) และบริการทางด้านการอนุรักษ์พลังงาน เป็นต้น

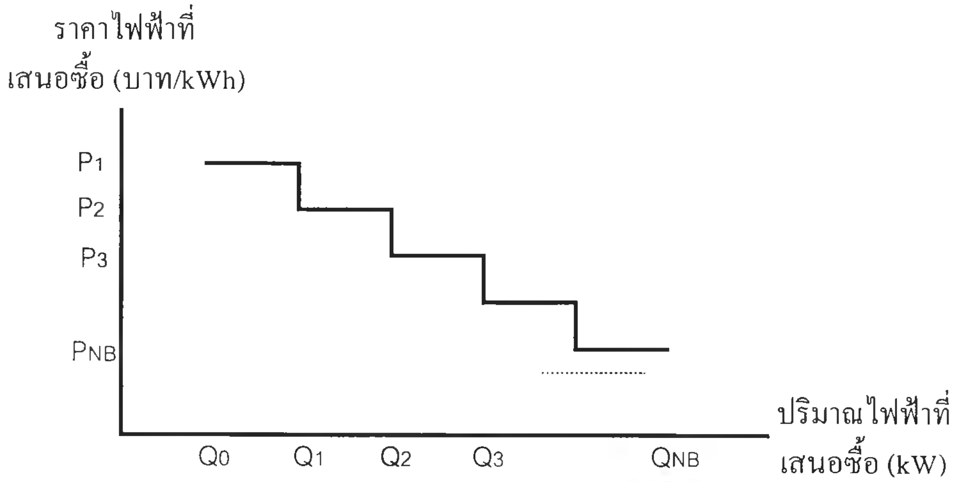
ผู้ค้าไฟฟ้า (Trader) :

ผู้ค้าไฟฟ้าเป็นหน่วยงานที่ซื้อหรือขายพลังงานโดยไม่มีหน่วยผลิตไฟฟ้าเป็นของตนเอง แต่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางระหว่างผู้ผลิตและผู้ใช้ไฟฟ้า หรือผู้ค้าปลีกไฟฟ้า หรือเป็นผู้บริหารสัญญาซื้อขายไฟฟ้าที่ กฟผ. ทำไว้กับผู้ผลิตไฟฟ้าภาคเอกชน (Power Purchase Agreements : PPAs) โดยดำเนินการในตลาดเสมือนว่า สัญญาซื้อขายนั้นเป็นโรงไฟฟ้าโรงหนึ่ง

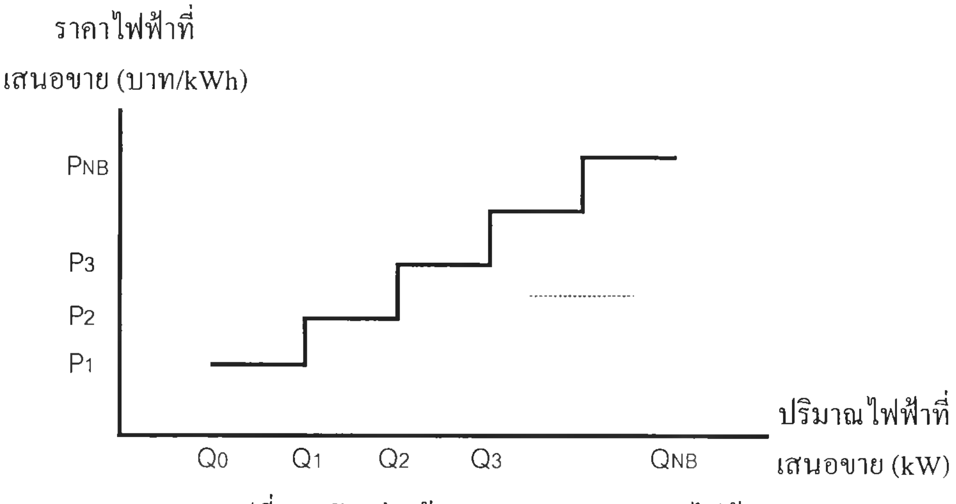
2.1.2 ตัวอย่างข้อมูลการเสนอซื้อและเสนอขายไฟฟ้า

ตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าจะทำการคัดเลือกผู้ซื้อและผู้ขายไฟฟ้าว่ารายใดจะมีสิทธิ์ในการได้รับหรือผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยการคัดเลือกนี้อาศัยหลักการทั่วไป คือ ผู้ซื้อไฟฟ้ารายใดเสนอราคาซื้อสูงก็จะมีสิทธิ์ได้รับพลังงานไฟฟ้าก่อน ในทำนองเดียวกัน ผู้ขายไฟฟ้ารายใดเสนอราคาไฟฟ้าขายต่ำก็จะมีสิทธิ์ได้จ่ายพลังงานไฟฟ้าก่อนเช่นกัน

รูปแบบการเสนอราคาไฟฟ้าถูกกำหนดให้มีลักษณะเป็นขั้นบันได [1,2] โดยการเสนอราคาซื้อจะเรียงลำดับราคาจากขั้นที่ราคาสูงที่สุดไปยังขั้นที่มีราคาต่ำที่สุด ในลักษณะตรงกันข้ามกับการเสนอราคาซื้อ การเสนอราคาขายจะเรียงลำดับราคาจากขั้นที่ราคาต่ำที่สุดไปยังขั้นที่มีราคาสูงที่สุด รูปที่ 2.2 และ รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างข้อมูลการเสนอราคาซื้อ และ ราคาขายไฟฟ้า ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างข้อมูลการเสนอราคาซื้อไฟฟ้า



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างข้อมูลการเสนอราคาขายไฟฟ้า

โดย NB คือ จำนวนช่วงทั้งหมดของการเสนอซื้อ (กรณีการเสนอซื้อ) หรือการเสนอขาย (กรณีการเสนอขาย)

2.2 การคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ (Optimal Power Flow : OPF)

สิ่งสำคัญในการศึกษา และจำลองตลาดกลางการซื้อขายไฟฟ้า คือ เครื่องมือที่สามารถคำนวณ เปรียบเทียบ และวิเคราะห์ผลของกิจกรรมต่างๆ ในตลาดได้ เช่น การจัดสรรกำลังการผลิตโดยคำนึงถึงข้อจำกัดของระบบ การคำนวณราคาไฟฟ้าทั้งราคาโนดและราคาโซน การพิจารณาผลของสัญญาการซื้อขายไฟฟ้า เป็นต้น เครื่องมือที่มีความสามารถดังกล่าวคือ ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์

ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ คือ การจัดสรรกำลังการผลิตให้สอดคล้องกับการหาค่าเหมาะสมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการ โดยคำนึงถึงสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow equation) และข้อจำกัดด้านต่างๆของระบบ โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์นี้ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ดำเนินการ (Operator) หรือ ผู้ที่ทำการวิเคราะห์

ตัวอย่างของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่นิยมใช้งานมีดังนี้ [3-6]

- ต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าจริง (Active power)
- กำลังสูญเสียรวมในระบบส่ง
- ขนาดหรือจำนวนการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆในระบบ
- การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง
- ต้นทุนด้านการเงินต่างๆ ที่สามารถสร้างความสัมพันธ์กับตัวแปรในระบบได้

อย่างไรก็ตามหากต้องการวิเคราะห์การจัดสรรกำลังการผลิตอย่างประหยัด เราสามารถใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นต้นทุนการผลิตกำลังไฟฟ้าจริง แต่เนื่องจากในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้านั้น ฟังก์ชันต้นทุนการผลิตจะถูกแทนที่ด้วยข้อมูลราคาการเสนอขาย ดังนั้นการคำนวณในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ข้อมูลราคาการเสนอขายแทนฟังก์ชันต้นทุนการผลิต

ส่วนข้อจำกัดต่างๆ ในระบบที่นอกเหนือจากสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า เช่น พิกัดกำลังของสายส่ง กำลังการผลิตส่งผ่านระหว่างบริเวณ (Power interchange) อัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต (Generation ramp rate) นั้น สามารถนำมาพิจารณาร่วมเป็นข้อจำกัดได้ หากผู้ทำการวิเคราะห์ต้องการการจัดสรรกำลังการผลิตที่สอดคล้องกับข้อจำกัดนั้นๆ

โดยสรุปผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ คือ การจัดสรรกำลังการผลิตที่เหมาะสม โดยที่ระบบสามารถปฏิบัติการได้จริงตามข้อจำกัดของระบบที่ได้กำหนดไว้

ความรู้พื้นฐานที่สำคัญในการวิเคราะห์ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

1) วิธีการคำนวณในการวิเคราะห์ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์
2) การวิเคราะห์โหลดโฟลว์ (Load flow)

2.2.1 วิธีการคำนวณในการวิเคราะห์ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์

วิธีการคำนวณในการวิเคราะห์ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์มีหลายวิธีการ โดยแต่ละวิธีการนั้นจะมีลักษณะและวิธีการใช้งานต่างกันออกไป ซึ่งในวิธีการคำนวณแต่ละแบบนั้น ต่างอาศัยหลักการพื้นฐานที่เหมือนกันคือ สมการลากรอง (Lagrange equation) และเงื่อนไขจำเป็น (Necessary condition) ของ Karush-Kuhn-Tucker (KKT) ในการแก้ปัญหาเพื่อคำนวณค่าเหมาะสม (Optimization) การคำนวณตามหลักการวิเคราะห์ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์สามารถเขียนรูปแบบของปัญหาในสมการทางคณิตศาสตร์ทั่วไปดังนี้ [3,7]

$$\textit{Minimize} \quad F(x) \tag{2.1}$$

$$\textit{subject to} \quad \boldsymbol{g}(x) = 0 \tag{2.2}$$

$$\boldsymbol{h}(x) \leq 0 \tag{2.3}$$

โดย $F(\boldsymbol{x})$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการคำนวณ ส่วนข้อจำกัด $g(\boldsymbol{x})$ และ $\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})$ คือ ข้อจำกัดหรือเงื่อนไขของระบบในรูปของสมการ และอสมการ ตามลำดับ

คำตอบของสมการที่ (2.1) ถึง (2.3) สามารถหาได้โดย เงื่อนไขจำเป็นของ Karush-Kuhn-Tucker (KKT) จากสมการลากรอง $L(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$ ดังแสดงต่อไปนี้

$$L(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = F(\boldsymbol{x}) + \boldsymbol{\lambda}^T \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}) + \boldsymbol{\mu}^T \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}) \tag{2.4}$$

กำหนดให้ $\boldsymbol{x}^*$, $\boldsymbol{\lambda}^*$, $\boldsymbol{\mu}^*$ เป็นเวกเตอร์ตัวแปร ณ จุดคำตอบของชุดสมการที่ (2.1) ถึง (2.3) จะได้ว่าสมการต่อไปนี้จะต้องเป็นจริง คือ

$$\frac{\partial L}{\partial x_r} = \frac{\partial\left(F(\boldsymbol{x}) + \boldsymbol{\lambda}^T \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}) + \boldsymbol{\mu}^T \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})\right)}{\partial x_r} \Big|_{\boldsymbol{x}^*, \boldsymbol{\lambda}^*, \boldsymbol{\mu}^*} = 0 \tag{2.5}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_s} = g_s(\boldsymbol{x}) \Big|_{\boldsymbol{x}^*} = 0 \tag{2.6}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu_t} = h_t(\boldsymbol{x})\big|_{x^*} = 0 \quad \text{เมื่อ } \mu_t > 0 \tag{2.7}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu_t} = h_t(\boldsymbol{x})\big|_{x^*} \le 0 \quad \text{เมื่อ } \mu_t = 0 \tag{2.8}$$

โดยสมการที่ (2.7), (2.8) สามารถเขียนได้อีกรูปแบบหนึ่ง คือ

$$\boldsymbol{\mu}^T \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}^*) = 0 \tag{2.9}$$

โดย $\mu_t \geq 0$ และ r, s, t คือ ลำดับที่สมาชิกของเวกเตอร์ $\boldsymbol{x}$, $\boldsymbol{\lambda}$, $\boldsymbol{\mu}$ ตามลำดับ

วิธีการหลักที่สำคัญในการคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์สามารถสรุปได้ดังนี้

1) วิธีการวนซ้ำเพื่อหาค่าแลมบ์ดา (Lambda iteration method) [3] :

วิธีการนี้เป็นวิธีการทั่วไปในการจัดสรรกำลังการผลิตอย่างประหยัด (Economic dispatch) โดยสมมติในกรณีที่ระบบมีข้อจำกัดสมดุลกำลังงานเพียงสมการเดียว หลักการในการคำนวณคือ เริ่มต้นด้วยการกำหนดค่าแลมบ์ดา จากนั้นหาค่ากำลังการผลิตของบัสต่างๆ จากสมการที่ (2.5) หากรวมกำลังการผลิตที่ได้แล้ว ไม่เท่ากับโหลดทั้งหมดของระบบก็จะทำการปรับค่าแลมบ์ดาใหม่ ทำซ้ำเช่นนี้จนกว่ากำลังการผลิตรวมจะเท่ากับโหลดทั้งหมดของระบบ

อย่างไรก็ตาม จะพบว่าหากใช้วิธีการนี้ในการคำนวณการวิเคราะห์ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ จะมีความยุ่งยากในการคำนวณซ้ำเกิดขึ้น เนื่องจากตัวคูณสัมประสิทธิ์ในสมการลากรองอาจมีได้หลายค่าขึ้นอยู่กับจำนวนสมการข้อจำกัดและอสมการข้อจำกัดที่มีผล (Active inequality constraint) การปรับค่าแลมบ์ดาใหม่ให้เหมาะสมจึงต้องอาศัยวิธีการที่เหมาะสม ซึ่งกระทำได้ไม่ง่าย

ความรวดเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบของวิธีการนี้ ขึ้นอยู่กับวิธีในการปรับค่าแลมบ์ดา หรือสัมประสิทธิ์ตัวคูณในสมการลากรองเป็นสำคัญ

2) วิธีการใช้เกรเดียนท์ (Gradient method) [3,7] :

หลักการของวิธีการใช้เกรเดียนท์ คือ การใช้เกรเดียนท์ของสมการลากรอง $L(\boldsymbol{x}, \lambda, \boldsymbol{\mu})$ เป็นเวกเตอร์กำหนดทิศทางในการลู่เข้าหาคำตอบ (Steepest descent direction) ดังสมการต่อไปนี้

$$\boldsymbol{x}^{i+1} = \boldsymbol{x}^i - \alpha \nabla L \tag{2.10}$$

โดย x^i เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรการคำนวณทั้งหมดในรอบที่ i และ α เป็นปริมาณสเกลาร์เพื่อกำหนดขนาดของการปรับค่าเข้าหาจุดคำตอบ ส่วน ∇L เป็นเวกเตอร์เกรเดียนท์ของสมการลากรอง $L(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$ ดังแสดงในสมการที่ (2.11)

$$\nabla L = \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial x_1} \\ \frac{\partial L}{\partial x_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial L}{\partial x_n} \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

โดย n คือ จำนวนตัวแปรในการคำนวณทั้งหมด

ข้อเสียของวิธีการใช้เกรเดียนท์ คือ ความล่าช้าในการลู่เข้าหาจุดคำตอบ และความไม่เหมาะสมในการคำนวณการวิเคราะห์ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ หากในการคำนวณนั้นมีข้อจำกัดแบบอสมการรวมอยู่ด้วย

3) วิธีการของนิวตัน (Newton's method) [3,7] :

ในวิธีการของนิวตันนี้เป็นการนำการกระจายอนุกรมเทเลอร์อันดับที่หนึ่งมาใช้ในการแก้ปัญหาสมการเงื่อนไขจำเป็นของ Karush-Kuhn-Tucker ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือ

$$\boldsymbol{x}^{i+1} = \boldsymbol{x}^{i} - \left[\frac{\partial \nabla L}{\partial \boldsymbol{x}}\right]^{-1} \nabla L \tag{2.12}$$

โดย x^i เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรในการคำนวณทั้งหมดในรอบที่ i ส่วน ∇L และ $\left[\frac{\partial \nabla L}{\partial x}\right]$ มีค่าตามสมการที่ (2.13) และ (2.14) ตามลำดับ

$$\nabla L = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial L}{\partial x_1} \\ \dfrac{\partial L}{\partial x_2} \\ \vdots \\ \dfrac{\partial L}{\partial x_n} \end{bmatrix} \tag{2.13}$$

$$\left[\frac{\partial \nabla L}{\partial \mathbf{x}}\right] = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial^2 L}{\partial x_1^2} & \dfrac{\partial^2 L}{\partial x_1 \partial x_2} & \cdots & \dfrac{\partial^2 L}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \dfrac{\partial^2 L}{\partial x_2 \partial x_1} & \dfrac{\partial^2 L}{\partial x_2 \partial x_2} & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dfrac{\partial^2 L}{\partial x_n \partial x_1} & & \cdots \cdots & \dfrac{\partial^2 L}{\partial x_{n1}^2} \end{bmatrix} \tag{2.14}$$

โดย n คือจำนวนตัวแปรการคำนวณทั้งหมด

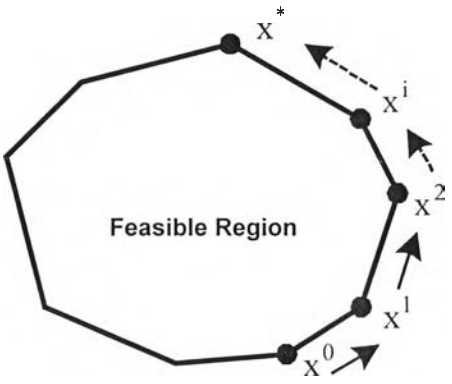
ในวิธีการของนิวตันนี้มีข้อได้เปรียบกว่าวิธีการของเกรเดียนท์คือ สามารถลู่เข้าหาคำตอบได้รวดเร็วกว่า อย่างไรก็ตามในวิธีการของนิวตันนี้ยังคงมีปัญหาในการคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ในกรณีที่ระบบมีข้อจำกัดแบบอสมการร่วมอยู่ด้วย

4) วิธีโปรแกรมเชิงเส้น (Linear programming method) [3,7-9] :

วิธีโปรแกรมเชิงเส้นนี้มีข้อได้เปรียบเหนือวิธีการทั้งสามข้างต้น คือ สามารถคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ได้ง่าย แม้ในระบบจะมีข้อจำกัดแบบอสมการร่วมอยู่ด้วย อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาข้อจำกัดของระบบทั้งที่เป็นสมการและอสมการจะพบว่ามีลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ เช่น สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า อสมการพิกัดการไหลของกำลังไฟฟ้าบนสายส่ง ซึ่งปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ได้โดยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization method)

โดยความรวดเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบจะขึ้นอยู่กับ จุดเริ่มต้นของระบบในการหาคำตอบและจำนวนข้อจำกัดของระบบ เนื่องจากจุดคำตอบของระบบสมการในการคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ จะอยู่บนจุดยอด (Vertex) ของบริเวณเซตของจุดคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible region)

โดยวิธีการหาคำตอบของวิธีโปรแกรมเชิงเส้น คือ การเคลื่อนจุดคำตอบไปตามจุดยอดต่างๆ จนกว่าจะพบคำตอบที่เป็นค่าเหมาะสมที่สุด ดังนั้นหากมีข้อจำกัดของระบบอยู่มาก และจุดเริ่มต้นของการคำนวณห่างไกลจุดคำตอบสุดท้าย จะทำให้จำนวนรอบการหาจุดคำตอบมากตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.4

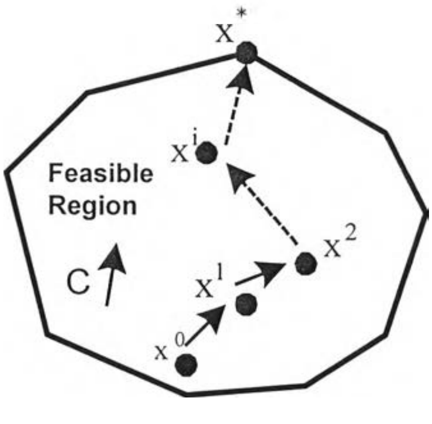


รูปที่ 2.4 การเคลื่อนจุดคำตอบไปตามจุดยอดต่างๆ จนถึงจุดคำตอบสุดท้าย

โดย $\mathbf{X}^0$ คือ เวกเตอร์จุดคำตอบเริ่มต้นในการคำนวณ และ $\mathbf{X}^*$ คือเวกเตอร์จุดคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในการคำนวณ

5) วิธีการใช้จุดคำตอบภายใน (Interior point method) [3,7,10,11] :

ในวิธีการนี้จุดคำตอบทุกๆรอบในการคำนวณจะอยู่ภายในบริเวณเซตของจุดคำตอบที่เป็นไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเคลื่อนจุดคำตอบภายใน Feasible Region จนถึงจุดคำตอบสุดท้าย

โดย $\mathbf{X}^0$ คือเวกเตอร์จุดคำตอบเริ่มต้นในการคำนวณ และ $\mathbf{X}^*$ คือเวกเตอร์จุดคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในการคำนวณ ส่วน C คือ ทิศทางในการลู่เข้าหาคำตอบ

โดยเทคนิคที่สามารถนำมาใช้งานในปัจจุบันมีมากมาย เช่น การใช้ฟังก์ชันลอการิทึม (Logarithm function) วิธีการพริมัล -ดูอัล (Primal-Dual method) เป็นต้น

วิธีการนี้สามารถคำนวณการวิเคราะห์ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ได้ง่าย แม้ในระบบมีข้อจำกัดแบบอสมการ เช่น เดียวกับวิธีโปรแกรมเชิงเส้น ส่วนความรวดเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบโดยทั่วไปสามารถลู่เข้าได้เร็ว อย่างไรก็ตามขึ้นอยู่กับวิธีการหาทิศทางการปรับค่าสู่จุดคำตอบด้วย

2.2.2 การวิเคราะห์โหลดโฟลว์ (Load flow) [3,12,13]

โหลดโฟลว์ หรือ เพาเวอร์โฟลว์ เป็นการวิเคราะห์ที่สำคัญในการวิเคราะห์ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ เนื่องจากสามารถให้ข้อมูลต่างๆของระบบได้ เช่น ขนาดของแรงดันบัส มุมของแรงดันบัส กำลังที่ไหลบนสายส่ง กำลังสูญเสียในระบบส่ง เป็นต้น ซึ่งข้อมูลต่างๆจะได้นำไปใช้ในการคำนวณออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ต่อไป

วิธีการหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบ เอ.ซี. ประกอบด้วย วิธีเกาส์ (Gauss method) วิธีเกาส์-ไซเดิล (Gauss-Seidel method) และวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) อย่างไรก็ตามมักนิยมใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน เนื่องจากสามารถหาคำตอบได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีนิวตัน-ราฟสัน เท่านั้น

สมการโหลดโฟลว์ สามารถเขียนในรูปของกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าบัส และแรงดันที่บัสได้ดังนี้

$$P_i - jQ_i = V_i^* \cdot \sum_{n=1}^{N} Y_{in} \cdot V_n \tag{2.15}$$

โดยที่ P_i คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่บัส i

Q_i คือ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่ไหลเข้าสู่บัส i

V_i, V_n คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส i และ n ตามลำดับ

V_i^* คือ สังยุคเชิงซ้อนของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i

Y_{in} คือ สมาชิกในตำแหน่งที่ (i,n) ของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์

N คือ จำนวนบัสทั้งหมดในระบบกำลังไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.15) จะสามารถเขียนสมการแสดงค่ากำลังจริง และกำลังรีแอคทีฟที่จ่ายเข้าไปยังบัส i ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบไปด้วยบัสจำนวน N บัส ได้ดังสมการที่ (2.16) และ (2.17)

$$P_i = \sum_{n=1}^{N} | Y_{in} V_i V_n | \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \tag{2.16}$$

$$Q_i = -\sum_{n=1}^{N} |Y_{in} V_i V_n| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \tag{2.17}$$

โดยที่ P_i , Q_i คือ กำลังจริงและกำลังรีแอคทีฟที่จ่ายเข้าบัส i

$|V_i|, \delta_i$ คือ ขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัสที่บัส i

$|V_n|, \delta_n$ คือ ขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัสที่บัส n

$|Y_{in}|, \theta_{in}$ คือ สมาชิกตำแหน่ง (i,n) ของเมตริกซ์แอดมิตแตนซ์ของระบบ

สมการที่ (2.16) และ (2.17) เรียกว่าสมการโหลดโฟลว์ ซึ่งเป็นสมการที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น การวิเคราะห์โหลดโฟลว์โดยการใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน จะเปลี่ยนสมการ โหลดโฟลว์ให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นโดยการใช้การกระจายของอนุกรมเทเลอร์ (Taylor series expansion) กระจายฟังก์ชันของ P และ Q รอบจุดประมาณเริ่มต้นและไม่คิดเทอมอันดับสองขึ้นไป โดยจะเขียนให้อยู่ในรูปของสมการความคลาดเคลื่อนของกำลังจริงและกำลังรีแอคทีฟเป็นเมตริกซ์ ดังสมการที่ (2.18)

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \cdots \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & \vdots & J_2 \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ J_3 & \vdots & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \cdots \\ \dfrac{|\Delta V|}{V} \end{bmatrix} \tag{2.18}$$

โดยที่ ΔP, ΔQ คือ เวคเตอร์ความคลาดเคลื่อนของกำลังจริงและกำลังรีแอคทีฟของแต่ละบัส

$\Delta\delta$ คือ เวคเตอร์ของมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บัสซึ่งต้องทำการแก้ไข

$\Delta|V|$ คือ เวคเตอร์ของขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสซึ่งต้องทำการแก้ไข

J_1, J_2, J_3, J_4 คือ เมตริกซ์ จาโคเบียนย่อย (Sub jacobian matrix)

แต่ละสมาชิกของ ΔP และ ΔQ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.19) และ (2.20) ตามลำดับ

$$\Delta P_i = (P_{gi} - P_{di}) - P_{i,calc} \tag{2.19}$$

$$\Delta Q_i = (Q_{gi} - Q_{di}) - Q_{i,calc} \tag{2.20}$$

โดยที่ ΔP_i คือ สมาชิกตัวที่ i ของเวคเตอร์ความคลาดเคลื่อนกำลังจริง
ΔQ_i คือ สมาชิกตัวที่ i ของเวคเตอร์ความคลาดเคลื่อนกำลังรีแอคทีฟ
P_{gi} คือ ค่ากำลังจริงที่ผลิตได้จากบัส i
P_{di} คือ ค่าความต้องการกำลังจริงของบัส i
Q_{gi} คือ ค่ากำลังรีแอคทีฟที่ผลิตได้จากบัส i
Q_{di} คือ ค่าความต้องการกำลังรีแอคทีฟของบัส i
$P_{i,calc}$ คือ ค่ากำลังจริงที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.16) สำหรับบัส i
$Q_{i,calc}$ คือ ค่ากำลังรีแอคทีฟที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.17) สำหรับบัส i

และสำหรับสมาชิกแต่ละสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียนย่อย J_1 สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (2.21) และ (2.22) สมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียนย่อย J_2 หาได้โดยใช้สมการที่ (2.23) และ (2.24) สมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียนย่อย J_3 หาได้โดยใช้สมการที่ (2.25) และ (2.26) และสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียนย่อย J_4 หาได้โดยใช้สมการที่ (2.27) และ (2.28) ตามลำดับ

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -\left|V_i V_j Y_{ij}\right| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \tag{2.21}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -Q_i - \left|V_i\right|^2 B_{ii} \tag{2.22}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -\left|V_i V_j Y_{ij}\right| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \tag{2.23}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = P_i - \left|V_i\right|^2 G_{ii} \tag{2.24}$$

$$\left|V_j\right| \frac{\partial P_i}{\left|\partial V_j\right|} = \left|V_j\right| \left|V_i Y_{ij}\right| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \tag{2.25}$$

$$\left|V_i\right| \frac{\partial P_i}{\left|\partial V_i\right|} = P_i + \left|V_i\right|^2 G_{ii} \tag{2.26}$$

$$|V_j|\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_j||V_i Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (2.27)$$

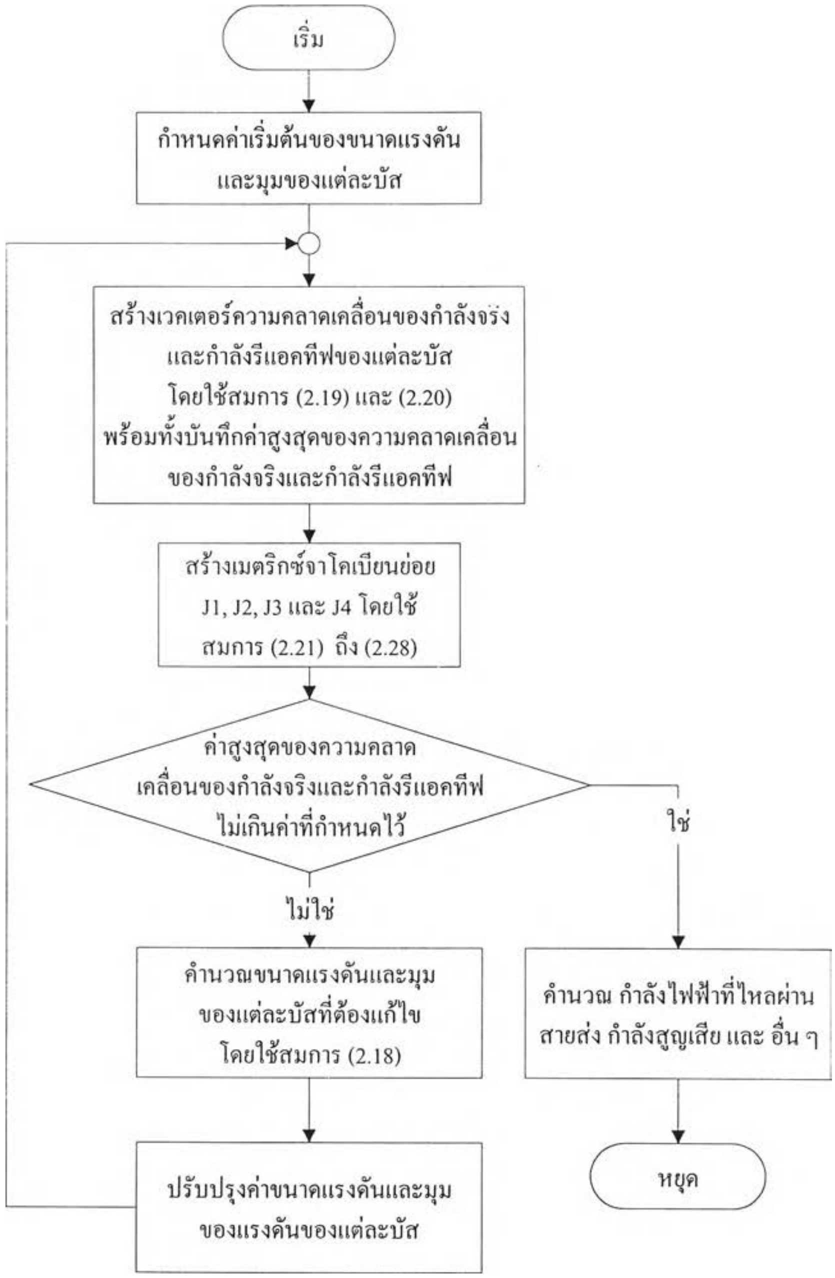
$$|V_i|\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = Q_i - |V_i|^2 B_{ii} \quad (2.28)$$

โดยค่าของ G_{ii} และ B_{ii} เป็นไปตามสมการที่ (2.29)

$$Y_{ii} = |Y_{ii}|\angle\theta_{ii} = |Y_{ii}|\cos\theta_{ii} + j|Y_{ii}|\sin\theta_{ii} = G_{ii} + jB_{ii} \quad (2.29)$$

การคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันนั้นจำเป็นต้องทำการคำนวณสมการที่ (2.18) ซ้ำเพื่อหาค่าที่จะนำไปปรับเปลี่ยนค่ามุมกับขนาดแรงดันที่แต่ละบัสได้แก่ $\Delta\delta$ และ $\frac{\Delta|V|}{V}$ จากนั้นจึงนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณในรอบถัดไป จนกระทั่งค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังจริงและกำลังรีแอคทีฟที่ทุกบัสในระบบน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ค่าหนึ่งจึงหยุดคำนวณ

จากขั้นตอนทั้งหมดดังกล่าวข้างต้นสามารถสรุปเป็นโฟลว์ชาร์ตแสดงขั้นตอนการคำนวณโหลดโฟลว์ตามวิธีนิวตัน-ราฟสัน ได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยวิธี นิวตัน-ราฟสัน