บทที่ 3

การจัดสรรกำลังผลิตในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า

ปัจจุบันนี้ พลังงานไฟฟ้าจัดเป็นทรัพยากรสำคัญของมนุษย์ ความต้องการใช้ไฟฟ้าที่มีมากขึ้น ทำให้วิธีการจัดการใช้ไฟฟ้ายุ่งยากและซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เนื่องจากความสูญเสียทางเศรษฐกิจหรือความเสียหายต่อระบบสังคมที่อาจเกิดจากการขาดแคลนพลังงานไฟฟ้ามีมาก ดังนั้น เพื่อป้องกันปัญหา และความยุ่งยากที่จะตามมา ระบบไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องได้รับการควบคุมดูแลให้มีความมั่นคงและความเชื่อถือได้ กล่าวคือ ต้องทำการจัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้าให้ประเทศมีพลังงานไฟฟ้าใช้อย่างเพียงพอ

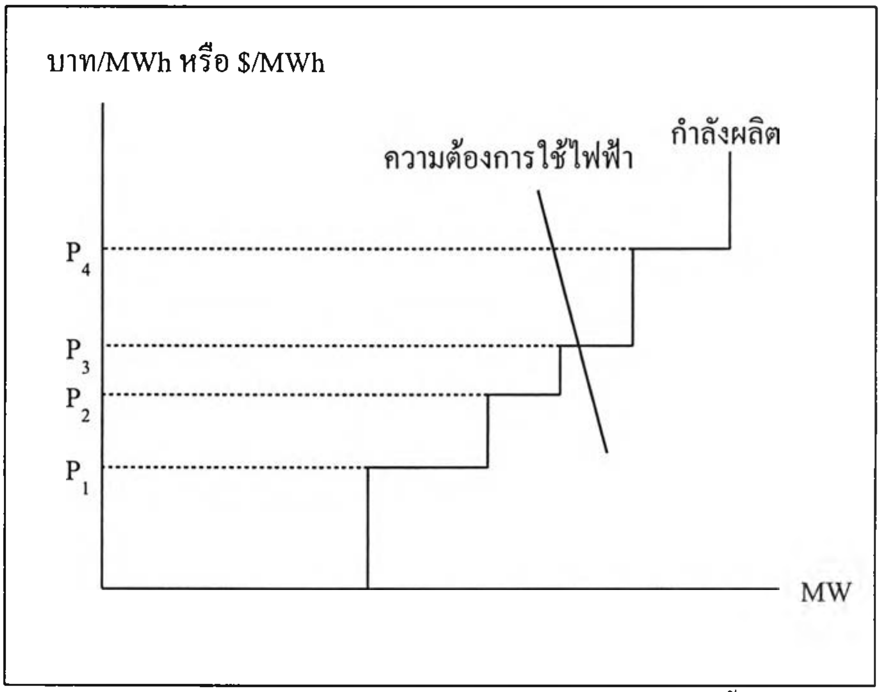
3.1 ภาพรวมของตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า

สินค้าหลักที่จะทำการซื้อขายกันในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าได้แก่ พลังงานไฟฟ้า แต่เนื่องจากความต้องการใช้ไฟฟ้า หรือโหลดของระบบไฟฟ้ามีความไม่แน่นอนสูง อีกทั้งอาจเกิดความขัดข้องของส่วนต่างๆ ในระบบ ซึ่งสามารถส่งผลให้ระบบไม่สามารถจ่ายโหลดได้ หรือกระทั่งระบบอาจขาดเสถียรภาพได้ ทำให้ ISO ซึ่งดูแลตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้ามีภาระหน้าที่ต้องควบคุมดูแลความเชื่อถือได้ และความมั่นคงของระบบ นอกเหนือจากดูแลการซื้อขายพลังงานไฟฟ้า ซึ่งหน้าที่ดังกล่าวนี้ทำให้ต้องมีการซื้อขายบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าเพิ่มเติมในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า เช่น การจัดสรรกำลังผลิตสำรองประเภทต่างๆ ไว้สำหรับกรณีเกิดความผิดปรกติขึ้นในระบบ หรือการจัดสรรการให้บริการควบคุมแรงดันและความถี่ เพื่อควบคุมดูแลค่าแรงดันและความถี่ในระบบไฟฟ้าให้เป็นไปตามมาตรฐาน เป็นต้น ศูนย์ควบคุมอิสระ หรือ ISO จะเป็นผู้ทำหน้าที่จัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้า และการจ่ายบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าให้กับผู้ผลิตไฟฟ้าต่างๆ เพื่อให้ระบบมีปริมาณกำลังการผลิตไฟฟ้า กำลังผลิตสำรอง และบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าเพียงพอซึ่งจะช่วยให้ระบบมีความมั่นคงและความเชื่อถือได้ [15]

3.2 หลักการในการคิดราคาค่าไฟฟ้าของตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า

โดยทั่วไป พลังงานไฟฟ้าจะถูกซื้อขายเป็นรายชั่วโมงในตลาด และก่อนจะเริ่มต้นชั่วโมงของการจ่ายไฟฟ้า ผู้ผลิตหรือผู้ขายไฟฟ้าจะทำการเสนอทั้งปริมาณและราคาขายไฟฟ้าที่ต้องการ ซึ่งผู้ผลิตเหล่านี้อาจทำการแบ่งปริมาณไฟฟ้าที่ต้องการขายทั้งหมดเป็นส่วนย่อยๆ เพื่อทำการประมูล

หลายๆ ราคา ทำให้ผู้ผลิตสามารถเสนอราคาขายสินค้าไฟฟ้าซึ่งสะท้อนถึงต้นทุนหน่วยสุดท้ายได้ ศูนย์ควบคุมอิสระ หรือ ISO จะเป็นผู้คำนวณ คาดการณ์ และประเมินความต้องการใช้ไฟฟ้าหรือโหลด หลังจากนั้น กำลังผลิตและราคาที่เสนอขายทั้งหมดจะถูกนำมาเรียง โดยเริ่มต้นที่ราคาที่ต่ำที่สุดก่อน และจุดที่เส้นโค้งของกำลังผลิตตัดกับเส้นแสดงความต้องการใช้ไฟฟ้าทั้งหมด จะนำไปใช้ในการกำหนดราคาพลังงานไฟฟ้าของตลาด ดังนั้น ผู้ผลิตที่ได้รับการพิจารณาให้ได้ขายไฟฟ้าในตลาดทั้งหมดจะได้รับการจ่ายค่าไฟฟ้าที่ราคานี้เหมือนกันหมด การกำหนดราคา(Clearing price)ได้นำแสดงไว้ดังรูปที่ 3.1 [16,17]



รูปที่ 3.1 กราฟแสดงกระบวนการคิดราคาค่าไฟฟ้าของตลาดซื้อขายไฟฟ้า

3.3 ประเภทสินค้าที่จะทำการจัดสรรในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาวิธีการและกระบวนการจัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้าในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า เพื่อพัฒนาระบบไว้รองรับตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าของประเทศไทยที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าของประเทศไทยกำลังอยู่ระหว่างการจัดตั้งขึ้น และได้มีการกำหนดประเภทของบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าออกเป็น 5 ประเภท [22] ได้แก่

1. การควบคุมการผลิตอัตโนมัติ(AGC)
2. การควบคุมด้วยตัวบังคับ(Governor control)
3. กำลังผลิตพร้อมจ่าย(Contingency reserve)

4. กำลังรีแอคทีฟ
5. System restart

จากการศึกษาตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าในต่างประเทศ พบว่า สินค้าหลายประเภททำการซื้อขายนอกตลาดกลาง จะมีเฉพาะเพียงบางประเภทเท่านั้นที่นิยมซื้อขายกันในตลาด ดังนั้น การศึกษานี้จึงได้ทำการกำหนดประเภทสินค้าของตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าที่จะทำการจัดสรรในตลาดออกเป็น 2 ชนิดได้แก่ 1. พลังงานไฟฟ้า(Energy) และ 2. บริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย การควบคุมการผลิตอัตโนมัติ(Automatic generation control - AGC) และกำลังผลิตพร้อมจ่าย(Contingency reserve)

บริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาการจัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้าในตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้ามี 2 ประเภท ได้แก่ การควบคุมการผลิตอัตโนมัติ และกำลังผลิตพร้อมจ่าย บริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภทแตกต่างกันที่ระยะเวลาในการผลิตไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ ดังนิยามในหัวข้อ 2.2

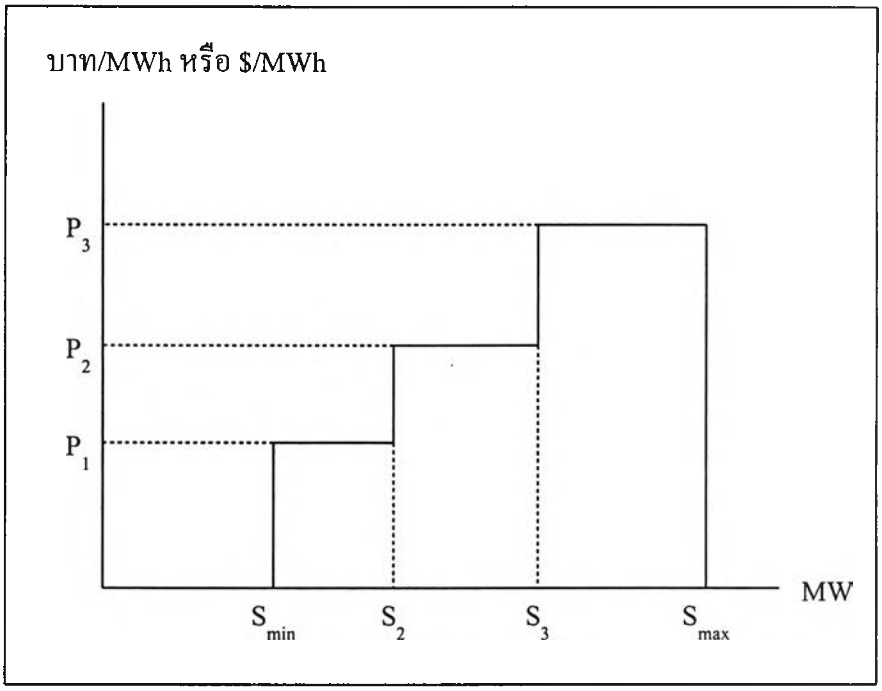
กำลังผลิตสำรองมีไว้เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า เพราะเมื่อโหลดไฟฟ้าสูงกว่ากำลังผลิตไฟฟ้า จะทำให้ความถี่ไฟฟ้าลดต่ำลง กำลังผลิตไฟฟ้าสำรองที่มีอยู่ต้องผลิตไฟฟ้าเพิ่มเติมเข้าสู่ระบบ ทำให้กำลังผลิตรวมของระบบสมดุลกับโหลดที่มีอยู่

ตามข้อกำหนดของตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าของประเทศไทย การควบคุมการผลิตอัตโนมัติ (AGC) หมายถึง ความสามารถของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการปรับเปลี่ยนระดับกำลังผลิตได้ภายในระยะไม่เกิน 5 นาที เพื่อสามารถรักษาความถี่ของระบบให้มีเสถียรภาพได้ ส่วนกำลังผลิตพร้อมจ่าย หมายถึง กำลังผลิตสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เดินเครื่องอยู่ หรือหยุดอยู่แต่สามารถเดินเครื่องขึ้นได้ภายในระยะเวลาไม่เกิน 10 นาที

3.4 การเสนอขายพลังงานไฟฟ้า และบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้า

การเสนอขายกำลังผลิตไฟฟ้าชนิดต่างๆ ในตลาด ผู้ที่จะได้รับการคัดเลือกให้ผลิตไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ นอกจากจะต้องเป็นผู้ที่เสนอราคาขายต่ำกว่ารายอื่น ยังต้องผ่านการพิจารณาถึงเงื่อนไขข้อจำกัดต่างๆ อาทิเช่น อัตราการเปลี่ยนระดับกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา ความสามารถในการทำหน้าที่บริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้า กำลังผลิตสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น [12,18]

การจัดสรรกำลังการผลิตในอดีตที่ควบคุมจากส่วนกลางจะใช้กราฟแสดงต้นทุนการผลิตของแต่ละโรงไฟฟ้ามาคำนวณ เพื่อพิจารณาจัดสรรกำลังการผลิตให้ระบบมีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด แต่สำหรับตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นการเสนอขายพลังงานไฟฟ้า หรือบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้า เช่น กำลังผลิตสำรองประเภทต่างๆ จะใช้ข้อมูลการเสนอขายไฟฟ้า ซึ่งเขียนได้ดังรูปที่ 3.2 [18] ที่เสนอโดยโรงไฟฟ้าแต่ละแห่ง เป็นบรรทัดฐานในการจัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้าในระบบ ซึ่งข้อมูลการเสนอขายไฟฟ้าดังกล่าวนี้สามารถแสดงในรูปตารางได้เช่นเดียวกับตารางที่ 2.1 ที่เสนอขายกำลังผลิตเป็นช่วง และจากรูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างการเสนอขายกำลังผลิต 3 ช่วง โดยแต่ละช่วงมีขนาดเท่ากับ $S_2 - S_{min}$, $S_3 - S_2$ และ $S_{max} - S_3$ MW ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงการเสนอขายพลังงานไฟฟ้าหรือบริการเสริมความมั่นคง

การเสนอขายไฟฟ้าในตลาด กำหนดให้เสนอขายกำลังผลิตเป็นช่วง(Bid block) โดยราคาจะเพิ่มขึ้นตามกำลังผลิตที่เพิ่มขึ้นเป็นลำดับชั้น เนื่องจากขณะที่ทำการศึกษานี้ ตลาดไฟฟ้าของประเทศไทยกำลังอยู่ในระหว่างจัดตั้ง ซึ่งยังไม่มีข้อกำหนดกฎเกณฑ์ที่แน่ชัดในการจัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้า ดังนั้น วิทยานิพนธ์จึงได้ตั้งสมมติฐานให้มีการเสนอขายทั้งพลังงานไฟฟ้าและบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าแยกจากกัน

3.5 ข้อกำหนดที่สำคัญของการจัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้าในตลาดจร

เนื่องจากเหตุผลด้านความมั่นคงของการผลิตไฟฟ้าป้อนเข้าสู่ระบบให้เพียงพอกับความต้องการใช้ไฟฟ้า และขีดจำกัดต่างๆของเครื่องและระบบส่งจึงจำเป็นต้องจัดแผนการผลิตล่วงหน้า 1 วัน(Day-ahead market) [21] เพื่อให้สามารถวางแผนการจัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

การสร้างแบบจำลองในการคำนวณการจัดสรรกำลังผลิตในตลาดจร(Spot market)ที่ทำการศึกษาครั้งนี้ เป็นการจัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้าโดยจะต้องยื่นเสนอราคาขายกำลังผลิตล่วงหน้าก่อนอย่างน้อย 1 วัน แม้จะทำการจัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้าล่วงหน้า 1 วัน แต่การจัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้าของ ISO นั้นจะต้องคำนวณหาราคาสินค้าไฟฟ้าแต่ละชนิดเป็นรายชั่วโมง [21]

การจัดสรรกำลังผลิตล่วงหน้า 1 วัน จะไม่นำงื่อนไขที่จะขัดขวางหรือบั่นทอนสภาพการแข่งขันตลาดไฟฟ้ามาคิดคำนวณด้วย เช่น ไม่คิดเงื่อนไขของระบบส่ง เพราะจะทำให้โรงไฟฟ้าบางโรงได้เปรียบหากว่าอยู่ใกล้โหลด เป็นต้น อีกทั้งจะไม่นำเงื่อนไขที่ยุ่งยากเกินความจำเป็นมาคิดคำนวณ เช่น เงื่อนไข minimum up-down time ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัว เพราะจะทำให้การคำนวณจัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้ามีความซับซ้อนและยุ่งยากเกินความจำเป็น ทั้งนี้เพื่อเพิ่มสภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการแข่งขันประมูลขายไฟฟ้าในตลาดไฟฟ้า

การจัดสรรกำลังผลิตในเบื้องต้นนั้น ISO จะไม่นำเงื่อนไข minimum up-down time ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องมาคำนวณด้วย โดยอาศัยหลักการว่าแต่ละโรงไฟฟ้าจะต้องทำแผนการเดินเครื่องเอง(Self schedule) แต่ถ้าผลการจัดสรรกำลังผลิตจาก ISO ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางเครื่องไม่ผ่านเงื่อนไข minimum up time หรือ minimum down time ของตนเองแล้ว ทางผู้ผลิตสามารถชี้แจง ISO และยื่นข้อเสนอใหม่อีกครั้งล่วงหน้าก่อนเวลาจริงอย่างน้อย 90 นาที เป็นต้น เพื่อให้ผู้ผลิตสามารถปรับเปลี่ยนกำลังผลิตในส่วนที่มีปัญหาดังกล่าวได้ หรืออาจใช้วิธีให้ผู้ขายที่ไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าในชั่วโมงนั้นๆ ได้ให้ไปทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้าจากผู้ผลิตรายอื่นๆ เพื่อจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบแทนตนเอง เป็นต้น

3.6 การจัดสรรกำลังการผลิตไฟฟ้าด้วยวิธีโปรแกรมเชิงเส้น

ในที่นี้จะเริ่มต้นจากการพิจารณาระบบที่มีการจัดสรรกำลังผลิตในส่วนของพลังงานไฟฟ้าและบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าเพียงประเภทเดียว คือ กำลังผลิตสำรองทั่วไป

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมมติให้เงื่อนไขในการจัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้าของระบบประกอบด้วย เงื่อนไขความเพียงพอในการจ่ายโหลดและการกำลังผลิตสำรองเท่านั้น เมื่อ $F(P_i)$ คือ ราคาเสนอขายพลังงานไฟฟ้า และ $G(R_i)$ คือ ราคาเสนอขายกำลังผลิตสำรอง โดย P_i , R_i แทนกำลังผลิตพลังงานไฟฟ้าและกำลังผลิตสำรองที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ i ได้รับการจัดสรรตามลำดับ และ n คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบที่ได้รับการจัดสรรกำลังผลิต การจัดสรรกำลังผลิตสามารถเขียนเป็นชุดสมการของโปรแกรมเชิงเส้นได้ดังนี้ [3]

$$\mathrm{Min}\{\sum_{i}^{n} [F(P_i)+G(R_i)]\} \quad .....(3.1)$$

Subject to

$$\sum_{i}^{n} P_i = P_D + P_{loss} \quad .....(3.2)$$

$$\sum_{i}^{n} R_i = R_D \quad .....(3.3)$$

$$P_i + R_i \leq P_{i,max} \quad .....(3.4)$$

$$P_i \geq P_{i,min} \quad .....(3.5)$$

โดย $R_i \geq 0$

หรือสามารถเขียนชุดสมการโปรแกรมเชิงเส้นโดยมีตัวแปร Lagrange Multipliers ร่วมในสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้เป็น

$$\mathrm{Min}\{\sum_{i}^{n} [F(P_i)+G(R_i)] + \lambda[\sum_{i}^{n} P_i - P_D + P_{loss}] + \mu[\sum_{i}^{n} R_i - R_D]\} \quad .....(3.6)$$

Subject to

$$P_i + R_i \leq P_{i,max} \quad .....(3.7)$$

$$P_i \geq P_{i,min} \quad .....(3.8)$$

โดย $R_i \geq 0$

และจากชุดสมการ (3.6) ถึง (3.8) เมื่อทำการแก้สมการด้วยวิธีโปรแกรมเชิงเส้น ค่า Lagrange multipliers ได้แก่ λ และ μ ที่คำนวณได้จะนำไปใช้กำหนดราคาพลังงานไฟฟ้าและกำลังผลิตสำรองของระบบไฟฟ้าตามลำดับ

3.7 การกำหนดราคาไฟฟ้าจากค่า Lagrange Multiplier

ค่า Lagrange Multiplier ที่ได้จากการคำนวณด้วยระบบวิธีโปรแกรมเชิงเส้น แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เมื่อสมการซึ่งสัมพันธ์อยู่กับค่า Lagrange Multiplier มีการ

เปลี่ยนแปลงไปหนึ่งหน่วย ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า ค่า Lagrange Multiplier เป็นเสมือนกับราคาแฝง (Shadow prices)ที่สมการดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของระบบ

พิจารณาระบบตัวอย่างที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบจำนวน 6 เครื่องซึ่งมีการเสนอขายไฟฟ้าดังตารางที่ 2.1 เมื่อทำการจัดสรรกำลังการผลิตไฟฟ้าโดยโปรแกรมเชิงเส้น(หัวข้อ 3.6) หรือวิธีการจัดสรรกำลังผลิตร่วมกัน(หัวข้อ 2.3.4) โดยกำหนดให้ความต้องการโหลดไฟฟ้ามีค่า 1040 MW และความต้องการบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้ามีค่า 100 MW จะได้ผลดังตาราง 2.4 (หัวข้อ 2.3.4) เมื่อกำหนดให้ความต้องการโหลดไฟฟ้ามีค่าเท่าเดิมคือ 1040 MW แต่ให้ความต้องการบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้ามีค่า 99 MW จะได้ผลการจัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้าดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการจัดสรรกำลังผลิตด้วยวิธีการจัดสรรกำลังผลิตร่วมกัน

เครื่อง	A	B	C	D	E	F
พลังงานไฟฟ้า (MWh)	12	132	100	470	276	50
บริการเสริมฯ (MW)	5	20	0	50	4	20
EMP	$3171.50		ASMP		$181.97	
ECP	$26/MWh		ASCP		$4.33/MW	

ค่าใช้จ่ายของพลังงานไฟฟ้าในตลาด(Energy market cost - EMC) คือ ค่าใช้จ่ายในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของตลาดซึ่งเป็นผลรวมของราคาเสนอขายพลังงานไฟฟ้าคูณกับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผู้ผลิตไฟฟ้าแต่ละรายได้รับจัดสรรให้ผลิตพลังงานไฟฟ้า ค่าใช้จ่ายของบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าในตลาด(Ancillary service market cost - ASMC) คือ ค่าใช้จ่ายในการผลิตบริการเสริมความมั่นคงฯ ของตลาด (คำนวณด้วยวิธีเดียวกับ EMC) ราคาพลังงานไฟฟ้า(Energy clearing price – ECP) คือ ราคาต่อหน่วย MWh ที่ตลาดรับซื้อพลังงานไฟฟ้าจากผู้ผลิต และราคาบริการเสริมความมั่นคงฯ (Ancillary service clearing price – ASCP) คือ ราคาต่อหน่วย MW ที่ตลาดรับซื้อบริการเสริมความมั่นคงฯ จากผู้ผลิต

ข้อสังเกตประการสำคัญอันหนึ่ง ได้แก่ การที่ ASCP มีค่าเท่ากับ $4.33/MW ซึ่งแตกต่างจากราคาที่เครื่องเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องเสนอขายตามที่แสดงในตารางที่ 2.1 ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเชื่อมโยงของพลังงานไฟฟ้าและบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้า ซึ่งราคา $4.33/MW นี้สื่อความหมายได้ว่า ถ้าความต้องการบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าลดลง 1 MW จะทำให้ค่าใช้จ่ายสินค้าไฟฟ้ารวมของทั้งระบบลดลง $4.33 ดังจะแสดงให้เห็นในตารางที่ 3.1

ซึ่งกำหนดความต้องการพลังงานไฟฟ้า และบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าเท่ากับ 1040 MW (เท่ากับกรณีเดิม) และ 99 MW(ต่ำกว่ากรณีเดิม 1 MW) ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 แสดงถึงการลดลงของราคาค่าไฟฟ้ารวมของทั้งระบบเป็นจำนวน $4.33 เมื่อเทียบกับตารางที่ 2.4 ซึ่งอธิบาย ได้ดังนี้

1) การลดลงของความต้องการบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้า 1 MW ทำให้เครื่อง E ได้รับการจัดสรรให้จ่ายบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าลดลง 1 MW ยังผลให้ราคาบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าโดยรวมของระบบลดลงไป $1.33 (พิจารณาข้อมูลเสนอขายบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าของเครื่อง E ในตารางที่ 2.1)
2) เมื่อเปรียบเทียบตารางที่ 2.4 กับตารางที่ 3.1 จะพบว่าเครื่อง E ได้รับการจัดสรรให้จ่ายพลังงานไฟฟ้าแทนเครื่อง B 1 MW ซึ่ง 1 MW ดังกล่าวนี้มีผลมาจากการที่เครื่อง E จ่ายบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าที่น้อยลง 1 MW เมื่อเทียบราคาพลังงานไฟฟ้าสำหรับ 1 MW ของเครื่อง B กับของเครื่อง E ซึ่งเท่ากับ $26 และ $23 ตามลำดับ จะพบว่า ผลต่างของราคาดังกล่าวทำให้ระบบลดต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายรวมทั้งระบบลงได้อีก $3

จาก 1) และ 2) ทำให้เห็นได้ว่า เมื่อความต้องการบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าลดลง 1 MW จะทำให้ต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายรวมของทั้งระบบลดลงเท่ากับ $1.33 + $3 = $4.33 ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้คำนวณจัดสรรกำลังผลิต คือ ค่าใช้จ่ายหรือต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของทั้งระบบ กล่าวคือ เป็นผลรวมของ EMP และ ASMP พิจารณาตารางที่ 2.4 ผลการจัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้ามีต้นทุนรวมทั้งระบบเท่ากับ $3,174.5 + $183.30 = $3,357.8 ขณะที่ตารางที่ 3.1 พบว่าระบบไฟฟ้ามีต้นทุนรวมเท่ากับ $3,171.5 + $181.97 = $3,353.47 ทำให้กล่าวได้ว่า กรณีแรก(ตารางที่ 2.4) มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าสูงกว่ากรณีที่สอง(ตารางที่ 3.1) เท่ากับ $3,357.8 -$3,353.47 = $4.33

เนื่องจากราคาบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าซึ่งกำหนดได้จากค่า Lagrange Multiplier ด้วยวิธีโปรแกรมเชิงเส้น และผลต่างของต้นทุนการผลิตไฟฟ้าทั้งสองกรณี(ซึ่งมีความต้องการบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าต่างกัน 1 MW ดังตารางที่ 2.4 และตารางที่ 3.1)มีค่าเท่ากับ $4.33 ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่า ถ้าความต้องการบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 1 MW จะทำให้ราคาค่าไฟฟ้ารวมของทั้งระบบเพิ่มขึ้น $4.33 หรืออีกในหนึ่งกล่าวได้ว่าบริการเสริมความมั่นคง 1 MW ที่เพิ่มขึ้นเสมือนกับมีราคาเท่ากับ $4.33 ซึ่งหมายความถึงราคาหน่วยสุด

ท้าย(Marginal price)ของบริการเสริมความมั่นคงนั่นเอง จากตัวอย่างข้างต้น ทำให้เห็นได้ชัดเจนว่า ค่า Lagrange Multiplier ที่ได้จากวิธีโปรแกรมเชิงเส้นนั้น แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ หรือราคาต้นทุนรวมในการจัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้าได้ ดังนั้น ในการจัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้าด้วยวิธีโปรแกรมเชิงเส้นจึงสามารถใช้ค่า Lagrange Multiplier นี้เป็นตัวกำหนดราคาหน่วยสุดท้ายของสินค้าไฟฟ้าแต่ละประเภทได้

ในกรณีของค่า Lagrage Multiplier ที่แสดงราคาหน่วยสุดท้ายของพลังงานไฟฟ้า(ECP) มีความหมายในทำนองเดียวกัน กล่าวคือ ถ้าระบบมีความต้องการโหลดไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 1 MW ราคาต้นทุนรวมค่าไฟฟ้าของทั้งระบบ(ฟังก์ชันวัตถุประสงค์)จะเพิ่มขึ้นเท่ากับค่า Lagrange Multiplier หรือ ECP พิจารณาตารางที่ 3.1 ค่า ECP มีค่าเท่ากับ $26/MWh หมายความว่า ถ้าความต้องการโหลดเพิ่มขึ้นจาก 1040 MW เป็น 1041 MW แล้ว ต้นทุนรวมค่าไฟฟ้าทั้งระบบจะเพิ่มขึ้นอีก $26 จึงเสมือนหนึ่งว่าพลังงานไฟฟ้า 1 MW หน่วยสุดท้ายนี้มีราคาเท่ากับ $26 นั่นเอง

3.8 ข้อกำหนดของระบบที่จะใช้ในการศึกษา [3,5,6,11-13,19-20]

การพิจารณาเงื่อนไขหรือข้อกำหนดที่จำเป็นสำหรับระบบไฟฟ้าโดยรวม สามารถแบ่งแยกพิจารณาได้เป็น 2 ประเภทได้แก่

1. ข้อกำหนดสำหรับภาพรวมของระบบไฟฟ้า เช่น ต้องมีกำลังผลิตพลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอกับความต้องการโหลด เป็นต้น
2. ข้อกำหนดสำหรับอุปกรณ์หรือส่วนย่อยต่างๆ ในระบบไฟฟ้า

อย่างไรก็ตาม ขอบเขตการศึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการพิจารณาเฉพาะในส่วนของภาคการผลิต โดยไม่รวมส่วนของระบบส่งและระบบจำหน่าย ดังนั้นจึงจะพิจารณาข้อกำหนดเฉพาะในส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เช่น ความสามารถในการผลิตสินค้าไฟฟ้าแต่ละประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อันได้แก่ อัตราการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังผลิตไฟฟ้า กำลังผลิตสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น ข้อกำหนดต่างๆ เหล่านี้จะเป็นพื้นฐานที่นำไปสู่การกำหนดเงื่อนไขในสร้างแบบจำลองสำหรับการพิจารณาจัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้าของระบบต่อไป

3.8.1 ข้อกำหนดสำหรับอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า

ข้อกำหนดสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีอยู่หลายประการ แต่สิ่งที่จะนำมาใช้ในการพิจารณาจัดสรรกำลังผลิตในวิทยานิพนธ์นี้ จะประกอบด้วย

- อัตราการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังผลิต(Ramp rate) คือ ความสามารถของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการเปลี่ยนระดับกำลังผลิตไฟฟ้าจากระดับหนึ่งไปสู่อีกระดับหนึ่ง ภายในระยะเวลาที่กำหนด
- ค่าพิกัดกำลังผลิต(Capacity) คือ ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับการจัดสรรให้จ่ายทั้งพลังงานไฟฟ้าและบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าแล้ว ผลรวมของทั้งพลังงานไฟฟ้าและบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าจะต้องมีค่าไม่เกินกำลังผลิตสูงสุด(capacity limit)ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นๆ
- กำลังผลิตสูงสุด(Maximum output) คือ ค่า MW สูงสุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจ่ายได้ในขณะนั้น หรือค่า MW สูงสุดที่ผู้ผลิตไฟฟ้ายินยอมที่จะขายให้ตลาดในเวลานั้นๆ
- กำลังผลิตต่ำสุด(Minimum output) คือ ค่า MW ต่ำสุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจ่ายได้ในขณะนั้น หรือค่า MW ต่ำสุดที่ผู้ผลิตไฟฟ้ายินยอมที่จะขายให้ตลาดในเวลานั้นๆ
- ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังผลิตพลังงานไฟฟ้าและบริการเสริมความมั่นคงฯ(Energy and ancillary service capacity-coupling) คือ ข้อจำกัดในการผลิตพลังงานไฟฟ้าและทำหน้าที่บริการเสริมความมั่นคงในเวลาเดียวกัน
- บริการเสริมความมั่นคงฯ(Ancillary service) คือ ความสามารถในการทำหน้าที่บริการเสริมความมั่นคงฯ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทั้งนี้เพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขีดจำกัดในการเปลี่ยนระดับกำลังผลิตไฟฟ้าภายในระยะเวลาจำกัด ดังนั้น จึงไม่สามารถใช้กำลังผลิตที่มีอยู่ทั้งหมดเป็นบริการเสริมความมั่นคงฯ ได้

3.8.2 ข้อกำหนดสำหรับภาพรวมของระบบไฟฟ้า

ระบบไฟฟ้าเป็นระบบที่ต้องการความมั่นคงและความเชื่อถือได้สูง ตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าจึงต้องทำการกำหนดเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับจัดการให้ระบบมีเสถียรภาพและดำเนินการจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดในระบบได้อย่างต่อเนื่อง ข้อกำหนดที่สำคัญที่จะนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองการจัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้าได้แก่

- สมดุลกำลังไฟฟ้า(Power balance) คือ พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบจะต้องเท่ากับโหลดรวมกับค่าความสูญเสียในระบบ
- ความต้องการบริการเสริมความมั่นคงฯ (Ancillary service requirement) คือ ระบบไฟฟ้าจะต้องมีบริการเสริมความมั่นคงฯ อยู่ในระดับที่ทำให้ระบบมีความมั่นคงและเชื่อถือได้

3.9 การจัดสรรกำลังการผลิตโดยใช้โปรแกรมเชิงเส้น

โปรแกรมเชิงเส้นที่ใช้ในการจัดสรรกำลังการผลิตของแต่ละตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าในประเทศต่างๆ จะมีความแตกต่างกันในรายละเอียด ทั้งนี้เพราะระบบไฟฟ้าในแต่ละแห่งมีพฤติกรรม หรือลักษณะเฉพาะแตกต่างกัน แต่เนื่องจากตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าของไทยยังไม่เกิดขึ้นจริง ทำให้ยังไม่มีการกำหนดรูปแบบของบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าที่จะให้มีการซื้อขายกันในตลาดได้อย่างชัดเจน อีกทั้งการศึกษาตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าในต่างประเทศ พบว่า สินค้าหลายประเภททำการซื้อขายนอกตลาด ดังนั้น การศึกษานี้จึงได้ทำการกำหนดประเภทสินค้าของตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าที่จะทำการจัดสรรในตลาดจรออกเป็น 2 ชนิดได้แก่

1. พลังงานไฟฟ้า
2. บริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย การควบคุมการผลิตอัตโนมัติ(AGC) และกำลังผลิตพร้อมจ่าย(Contingency Reserve)

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาขั้นพื้นฐานสำหรับตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าของประเทศไทย จึงได้ทำการกำหนดเงื่อนไขในแบบจำลองโดยอาศัยข้อกำหนดดังต่อไปนี้

3.9.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ของตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าจะทำการจัดสรรกำลังผลิตให้ระบบมีราคาค่าไฟฟ้าที่ต่ำสุด โดยระบบที่จะทำการศึกษาแบ่งสินค้าออกเป็น 2 ส่วนหลักได้แก่ 1) พลังงานไฟฟ้า และ 2) บริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้า ซึ่งได้แก่ การควบคุมการผลิตอัตโนมัติและกำลังผลิตพร้อมจ่าย ถ้าให้ $F(P_i)$ เป็นราคาเสนอขายพลังงานไฟฟ้า $G(R_i)$ เป็นราคาเสนอขายการควบคุมการผลิตอัตโนมัติ และ $H(S_i)$ เป็นราคาเสนอขายกำลังผลิตพร้อมจ่ายแล้ว ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\text{Min}\{ \sum_{i}^{n} [F(P_i)+ G(R_i) + H(S_i)] \} \qquad .....(3.9)$$

โดยที่ P_i , R_i , H_i แทนพลังงานไฟฟ้า ระบบควบการผลิตคุมการผลิตอัตโนมัติ และกำลังผลิตสำรองพร้อมจ่ายที่ได้รับการจัดสรรตามลำดับ

i แทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ i

n แทนจำนวนผู้ขายไฟฟ้าที่ได้รับการจัดสรรทั้งหมด

แต่เนื่องจากวิธีการเสนอราคาขายทั้งพลังงานไฟฟ้า และบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้า ใช้รูปแบบข้อมูลเสนอขายเป็นช่วง(ดังตารางที่ 2.1) หรือแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 3.2 ในการเสนอราคาขายสินค้าไฟฟ้าในตลาด ทำให้สามารถลดรูปสมการ (3.9) และเขียนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่ได้ดังนี้

$$\text{Min}\{ \sum_{mi}^{N}\sum_{i}^{n}\sum_{j}^{m}\sum_{k}^{q} [BMW(mi,i,j,k,t)*BP(mi,i,j,k,t)] \} \qquad .....(3.10)$$

โดยที่ i คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ i

j คือ ชนิดของสินค้าที่ขาย (j=1 คือพลังงานไฟฟ้า j=2 คือการควบคุมการผลิตอัตโนมัติ และ j=3 คือกำลังผลิตพร้อมจ่าย)

n คือ จำนวนผู้ผลิตไฟฟ้าทั้งหมด

m ได้แก่ จำนวนชนิดของสินค้าในตลาด(ในที่นี้ m=3, เพราะมีสินค้าอยู่ 3 ชนิดได้แก่ พลังงานไฟฟ้า การควบคุมการผลิตอัตโนมัติ และกำลังผลิตพร้อมจ่าย)

q หมายถึง จำนวนช่วงเสนอขายสินค้าในตลาด

N คือ จำนวนโนดทั้งหมดของระบบ

BMW(mi,i,j,k,t) หมายถึง จำนวน MW ของสินค้าไฟฟ้าในช่วงเสนอที่ k ของสินค้าชนิดที่ j ที่เครื่องที่ i ได้รับการจัดสรรให้จ่ายที่โนดหมายเลข mi ณ เวลา t

BP(mi,i,j,k,t) หมายถึง ราคาเสนอขายสินค้าไฟฟ้า($/MW) ในช่วงเสนอที่ k ของสินค้าชนิดที่ j ที่เครื่องที่ i ได้รับการจัดสรรให้จ่ายที่โนดหมายเลข mi ณ เวลา t

3.9.2 ขนาดกำลังผลิตประจำช่วง

ตามกฎตลาดกลางโดยทั่วไปนั้นได้กำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถแบ่งช่วงของการจ่ายกำลังไฟฟ้าออกเป็นช่วงต่างๆ 6-10 ช่วง เมื่อเสนอขายกำลังผลิตให้แก่ตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า เช่น ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้า A เสนอขายพลังงานไฟฟ้าในช่วงเสนอที่ 1 จำนวน 100 MW แล้วเครื่อง A จะได้รับการจัดสรรให้จ่ายพลังงานไฟฟ้าในช่วงเสนอนี้ไม่เกิน 100 MW หรือถ้าเสนอขายบริการเสริมความมั่นคงฯ ในช่วงเสนอที่ 1 จำนวน 10 MW เครื่องนี้จะได้รับการจัดสรรให้จ่ายบริการเสริมความมั่นคงฯ ในช่วงเสนอนี้ไม่เกิน 10 MW เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จะได้ว่า

$$0 \leq BMW(mi,i,j,k,t) \leq BMW^{max}(mi,i,j,k,t) \qquad .....(3.11)$$

โดยที่ $BMW^{max}(mi,i,j,k,t)$ คือ ค่า MW สูงสุดของแต่ละช่วงที่ผู้ผลิตเสนอขายในตลาด ที่เวลา t

3.9.3 สมดุลกำลังไฟฟ้า

การจัดสรรกำลังการผลิตไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้านั้น พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบจะต้องเท่ากับโหลดรวมกับค่ากำลังสูญเสียในระบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าที่ไหลอยู่ในสายตัวนำของระบบ อย่างไรก็ดี ในกรณีที่มีการละเลยผลจากการคิดคำนวณกำลังสูญเสียในระบบสายส่งหรือระบบจำหน่ายโดยตรงนั้น จึงสามารถใช้การประมาณกำลังสูญเสียในระบบโดยอาศัยค่าตัวประกอบโหลด หรือการประมาณในวิธีการอื่นๆ ได้ ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แม้ว่าจะละเลยการพิจารณาระบบสายส่งหรือระบบจำหน่าย แต่หากต้องการนำไปใช้ในทางปฏิบัติก็สามารถรวมผลการประมาณกำลังสูญเสียเข้ากับการพิจารณาได้เช่นกัน สมการแสดงสมดุลกำลังไฟฟ้าสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\sum_{i}^{n} P_i = \text{โหลด} + \text{กำลังสูญเสีย} \qquad .....(3.12)$$

$$\sum_{i}^{n} P_i = \sum_{mi}^{N}\sum_{i}^{n}\sum_{k}^{q} BMW(mi,i,j=1,k,t) \qquad .....(3.13)$$

โดย P_i คือกำลังผลิตที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องได้รับจัดสรรให้จ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ

3.9.4 อัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิต

เนื่องจากโหลดไฟฟ้าในระบบมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะได้รับการจัดสรรให้จ่ายพลังงานไฟฟ้าในปริมาณที่เปลี่ยนแปลงเช่นกัน ด้วยเหตุนี้ ความสามารถของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการเปลี่ยนระดับกำลังผลิตไฟฟ้าจากระดับหนึ่งไปสู่อีกระดับหนึ่ง ภายในระยะเวลาที่กำหนดได้ จึงต้องได้รับการนำมาพิจารณาในการจัดสรรกำลังผลิตด้วย ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ช่วงเวลาที่ทำการจัดสรรเท่ากับ 1 ชั่วโมง หรือกล่าวได้ว่า ใน 1 วันมีช่วงเวลาการจัดสรรเท่ากับ 24 ช่วง ซึ่งจะได้ว่า

กรณีการเพิ่มกำลังผลิต: $TEG(mi,i,t) - TEG(mi,i,t-1) \leq UpRR(mi,i,t)$ .....(3.14)

กรณีการลดกำลังผลิต: $TEG(mi,i,t-1) - TEG(mi,i,t) \leq DnRR(mi,i,t)$ .....(3.15)

$$TEG(mi,i,t) = \sum_{k}^{q} BMW(mi,i,j=1,k,t) \qquad .....(3.16)$$

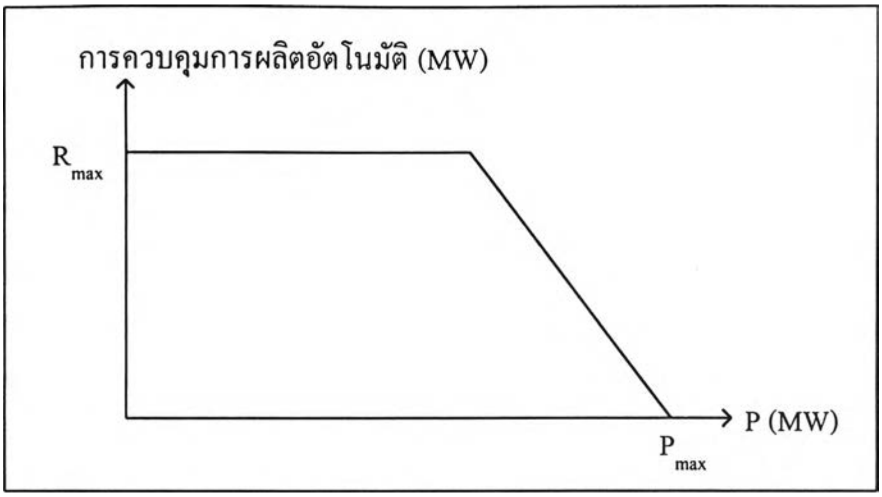
โดย TEG(mi,i,t) คือ กำลังไฟฟ้าที่เครื่องที่ i ได้รับการเลือกให้จ่ายที่โนดหมายเลข mi ณ เวลา t

UpRR(mi,i,t) คือ อัตราการเพิ่มกำลังผลิตสูงสุด(MW/hour) ของเครื่องที่ i ณ เวลา t

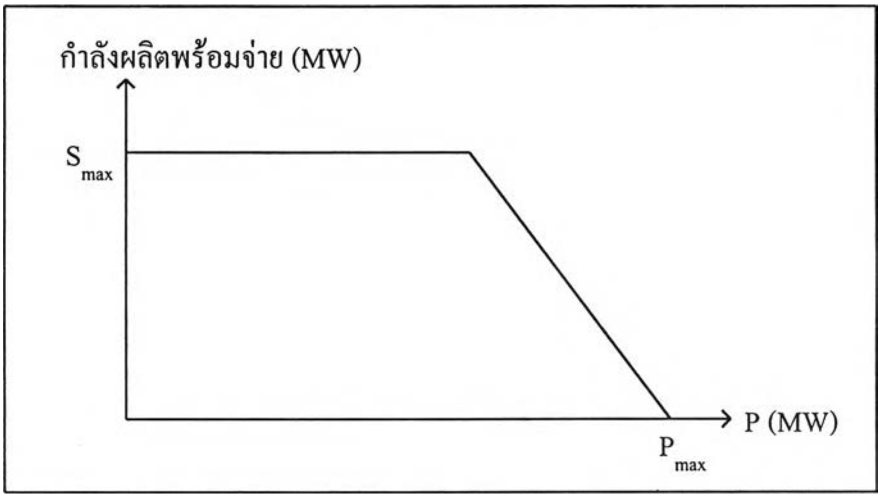
DnRR(mi,i,t) คือ อัตราการลดกำลังผลิตสูงสุด(MW/hour) ของเครื่องที่ i ณ เวลา t

3.9.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังผลิตพลังงานไฟฟ้าและบริการเสริมความมั่นคงฯ

ปกติเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีกำลังผลิตที่จำกัด ดังนั้น ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตพลังงานไฟฟ้าเต็มที่ จะทำให้ไม่เหลือกำลังผลิตสำหรับทำหน้าที่เป็นบริการเสริมความมั่นคงฯได้อีก ในทางกลับกัน ถ้าจัดกำลังผลิตไว้ทำหน้าที่เป็นบริการเสริมความมั่นคงฯ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดเช่นกัน ข้อจำกัดหรือความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแตกต่างกันไปสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องแต่ละชนิด อย่างไรก็ตาม ในวิทยานิพนธ์ได้อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างกำลังผลิตพลังงานไฟฟ้าและบริการเสริมความมั่นคงฯ อันได้แก่ การควบคุมการผลิตอัตโนมัติ (AGC)และกำลังผลิตพร้อมจ่าย(Contingency reserve)ในรูปทั่วไป [5] ดังรูปที่ 3.3 และ 3.4



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังผลิตพลังงานไฟฟ้ากับการควบคุมการผลิตอัตโนมัติ



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังผลิตพลังงานไฟฟ้ากับกำลังผลิตพร้อมจ่าย

เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขีดจำกัดในการเปลี่ยนระดับกำลังผลิตไฟฟ้า สมมติว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีกำลังผลิต 100 MW และมีอัตราการเพิ่มกำลังผลิตสูงสุดไม่เกิน 20 MW ภายใน 5 นาที ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับการจัดสรรให้ผลิตพลังงานไฟฟ้า 50 MW แม้ว่าจะเหลือกำลังผลิตอีก 50 MW แต่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่สามารถทำหน้าที่การควบคุมการผลิตอัตโนมัติได้ถึง 50 MW โดยจะสามารถเป็นการควบคุมการผลิตอัตโนมัติได้เพียง 20 MW เนื่องจากระยะเวลาในการเพิ่มกำลังผลิตของการควบคุมการผลิตอัตโนมัติกำหนดไว้ภายใน 5 นาทีเท่านั้น ดังนั้น การจัดสรรกำลังผลิตพลังงานไฟฟ้าและการควบคุมการผลิตอัตโนมัติ คำตอบของระบบจะต้องอยู่ภายในพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู(รูปที่ 3.3) ซึ่งจะเห็นได้ว่า แม้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะได้รับการจัดสรรกำลังผลิตพลังงานไฟฟ้าไม่มาก แต่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่สามารถทำหน้าที่การควบคุมการผลิตอัตโนมัติได้เกินค่า R_{max} ดังรูปที่ 3.3

ในทำนองเดียวกัน การจัดสรรกำลังผลิตพลังงานไฟฟ้าและกำลังผลิตพร้อมจ่าย คำตอบของระบบจะต้องอยู่ภายในพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู(รูปที่ 3.4) ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถทำหน้าที่เป็นกำลังผลิตพร้อมจ่ายได้ไม่เกิน S_{max} เท่านั้น

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังผลิตพลังงานไฟฟ้าและบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้า(รูปที่ 3.3 และ 3.4) สามารถนำไปเขียนชุดสมการสำหรับใช้ในโปรแกรมเชิงเส้น เพื่อคำนวณการจัดสรรกำลังการผลิตไฟฟ้าได้ดังนี้

$$h1_{i1}P_i + h1_{i2}R_i \leq \text{Coupling Limit ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ } i \quad .....(3.17)$$

$$h2_{i1}P_i + h2_{i2}S_i \leq \text{Coupling Limit ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ } i \quad .....(3.18)$$

เมื่อ

$$P_i = \sum_{k}^{q} \text{BMW(mi,i,j=1,k,t)} \quad .....(3.19)$$

$$R_i = \sum_{k}^{q} \text{BMW(mi,i,j=2,k,t)} \quad .....(3.20)$$

$$S_i = \sum_{k}^{q} \text{BMW(mi,i,j=3,k,t)} \quad .....(3.21)$$

โดยที่ $h1_{i1}$, $h1_{i2}$, $h2_{i1}$, $h2_{i2}$ แทนความสัมพันธ์เชิงเส้นของพลังงานไฟฟ้าและบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าทั้งสองชนิดดังกล่าว

3.9.6 เงื่อนไขเชิงระบบ

การจัดการระบบไฟฟ้า ไม่ใช่เพียงแค่จัดสรรกำลังผลิตให้เพียงพอกับโหลดเท่านั้น แต่ยังต้องคำนึงถึงความไม่แน่นอนและความเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้เสมอ ทั้งนี้เพื่อรักษาความมั่นคงและสร้างความน่าเชื่อถือของระบบให้สามารถตอบสนองต่อความเปลี่ยนแปลงต่างๆได้ ดังนั้น การจัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้าจึงต้องคำนึงถึงเงื่อนไขดังต่อไปนี้

ความต้องการกำลังผลิตของการควบคุมการผลิตอัตโนมัติ :

$$\sum_{mi}^{N}\sum_{i}^{n}\sum_{k}^{q} \text{BMW(mi,i,j=2,k,t)} \geq r(t) \quad .....(3.22)$$

โดยที่ r(t) คือ ปริมาณการควบคุมการผลิตอัตโนมัติที่ระบบกำหนดไว้ ณ เวลาที่ t

ความต้องการกำลังผลิตพร้อมจ่าย :

$$\sum_{mi}^{N}\sum_{i}^{n}\sum_{k}^{q} \text{BMW}(mi,i,j=3,k,t) \geq s(t) \qquad \text{.....(3.23)}$$

โดยที่ s(t) คือ ปริมาณกำลังผลิตพร้อมจ่ายที่ระบบกำหนดไว้ ณ เวลาที่ t

3.10 การสร้างแบบจำลองการจัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้าด้วยวิธีโปรแกรมเชิงเส้น

หลักการของวิธีโปรแกรมเชิงเส้น คือ การคำนวณหาผลตอบของระบบที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าต่ำที่สุด โดยคำตอบนั้นจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขข้อจำกัดต่างๆ รูปแบบทั่วไปของโปรแกรมเชิงเส้นที่นำมาใช้คำนวณจัดสรรกำลังผลิตแสดงได้ดังนี้

$$\text{Min } F(x) \qquad \text{.....(3.24)}$$

$$\text{Subject to} \quad bl \leq Ax \leq bu \qquad \text{.....(3.25)}$$

$$l \leq x \leq u \qquad \text{.....(3.26)}$$

โดย F(x) เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของระบบซึ่งเป็นการคำนวณต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายของพลังงานไฟฟ้าและบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้า ซึ่งได้แก่สมการ (3.10)

x เป็นตัวแปรของโปรแกรมเชิงเส้น ได้แก่ จำนวน MW พลังงานไฟฟ้าและบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าในแต่ละช่วง(bid block)ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับการจัดสรรให้จ่ายกำลังผลิต

A เป็นเมทริกซ์เงื่อนไขข้อจำกัด(Constraint-matrix) ซึ่งคำนวณได้จากการนำเอาสมการเงื่อนไขข้อจำกัดต่างๆ ซึ่งได้แก่สมการ (3.11) ถึง (3.23) มาสร้างเป็นเมทริกซ์

bl,bu เป็นขอบเขตล่างและบนของเมทริกซ์ Ax ตามลำดับ ซึ่งได้จากการนำเอาสมการเงื่อนไขข้อจำกัดต่างๆ ซึ่งได้แก่สมการที่ (3.11) ถึง (3.23) มาสร้างเป็นเมทริกซ์

l,u เป็นขอบเขตล่างและบนของตัวแปร x

สมการ (3.24) ถึง (3.26) สามารถสร้างได้โดยอาศัยสมการ (3.10) ถึง (3.23) ด้วยวิธีดังต่อไปนี้

จากสมการ(3.10) กำหนดให้ $F(x) = c^T x$ .....(3.27)

$$x = [x_{1,1,1,1} \cdots x_{1,1,j,k}\ x_{1,2,1,1} \cdots x_{1,2,j,k} \cdots\cdots x_{1,24,j,k}\ x_{2,1,1,1} \cdots x_{i,h,j,k} \cdots\cdots x_{i,24,j,k}]^T \qquad .....(3.28)$$

$$c = [c_{1,1,1,1} \cdots c_{1,1,j,k}\ c_{1,2,1,1} \cdots c_{1,2,j,k} \cdots\cdots c_{1,24,j,k}\ c_{2,1,1,1} \cdots c_{i,h,j,k} \cdots\cdots c_{i,24,j,k}]^T \qquad .....(3.29)$$

โดย $x_{i,h,j,k}$ คือ จำนวน MW ของสินค้าประเภท i ช่วงเสนอที่ k เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ j ชั่วโมงที่ h

i คือ ประเภทของสินค้าที่ขายในตลาดไฟฟ้า (i=1 คือพลังงานไฟฟ้า i=2 คือการควบคุมการผลิตอัตโนมัติ และ i=3 คือกำลังผลิตพร้อมจ่าย)

$c_{i,h,j,k}$ คือ ราคาเสนอขายของสินค้าประเภท i ช่วงเสนอที่ k เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ j ชั่วโมงที่ h

พิจารณาเงื่อนไขความพอเพียงในการจ่ายโหลดไฟฟ้าของระบบ

จากสมการ(3.12)

$$\sum_{h=1}^{24}\sum_{j=1}^{j}\sum_{k=1}^{k} x_{1,h,j,k} = \text{โหลดไฟฟ้าของระบบ} \qquad .....(3.30)$$

พิจารณาเงื่อนไขความพอเพียงของการควบคุมการผลิตอัตโนมัติของระบบ(AGC_{sys})

จากสมการ(3.22)

$$\sum_{h=1}^{24}\sum_{j=1}^{j}\sum_{k=1}^{k} x_{2,h,j,k} \geq AGC_{sys} \qquad .....(3.31)$$

พิจารณาเงื่อนไขความพอเพียงของกำลังผลิตพร้อมจ่ายของระบบ

จากสมการ(3.23)

$$\sum_{h=1}^{24}\sum_{j=1}^{j}\sum_{k=1}^{k} x_{3,h,j,k} \geq \text{กำลังผลิตพร้อมจ่ายของระบบ} \qquad .....(3.32)$$

เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้เกินกำลังผลิตสูงสุดของเครื่อง จึงเขียนเป็นสมการได้ว่า

กรณีจัดสรรกำลังผลิตพลังงานไฟฟ้าและกำลังผลิตพร้อมจ่าย :

$$\sum_{i=1}^{2}\sum_{k=1}^{k} x_{i,h,j,k} \le P_{max,j,h} \qquad .....(3.33)$$

กรณีจัดสรรกำลังผลิตพลังงานไฟฟ้า การควบคุมการผลิตอัตโนมัติ และกำลังผลิตพร้อมจ่าย :

$$\sum_{i=1}^{3}\sum_{k=1}^{k} x_{i,h,j,k} \le P_{max,j,h} \qquad .....(3.34)$$

พิจารณาเงื่อนไขอัตราการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังผลิตระหว่างชั่วโมงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากสมการ(3.14) $$\sum_{k=1}^{k} x_{1,h+1,j,k} - \sum_{k=1}^{k} x_{1,h,j,k} \le UpRR_{h,j} \qquad .....(3.35)$$

จากสมการ(3.15) $$\sum_{k=1}^{k} x_{1,h,j,k} - \sum_{k=1}^{k} x_{1,h+1,j,k} \le DnRR_{h,j} \qquad .....(3.36)$$

โดย $UpRR_{h,j}$ คือ อัตราการเพิ่มระดับกำลังผลิตสูงสุดของเครื่องที่ j ในชั่วโมงที่ h

$DnRR_{h,j}$ คือ อัตราการลดระดับกำลังผลิตสูงสุดของเครื่องที่ j ในชั่วโมงที่ h

พิจารณาเงื่อนไขความสัมพันธ์ระหว่างกำลังผลิตพลังงานไฟฟ้าและบริการเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้า จากรูปที่ 3.3 และ 3.4 พบว่า เงื่อนไขดังกล่าวมีลักษณะเป็นพื้นที่ปิดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ดังนั้น การกำหนดขอบเขตของพื้นที่คำตอบที่เป็นไปได้ของระบบจึงสามารถทำได้โดยใช้สมการเส้นตรงตรง 2 เส้นในการกำหนดพื้นที่ดังกล่าวได้ โดยเส้นตรงเส้นที่ 1 มีความชันเป็นศูนย์ เพื่อใช้กำหนดกำลังผลิตบริการเสริมความมั่นคงฯ สูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเส้นตรงเส้นที่ 2 มีค่าความชันไม่เท่ากับศูนย์ เพื่อใช้กำหนดขีดความสามารถในการทำหน้าที่บริการเสริมความมั่นคงฯ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับการจัดสรรให้จ่ายพลังงานไฟฟ้าในปริมาณมาก (วิธีกำหนดค่าความชันของเส้นตรงเส้นที่ 2 แสดงไว้ในหัวข้อ 4.6)

กรณีความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไฟฟ้าและการควบคุมการผลิตอัตโนมัติ

เส้นตรงเส้นที่ 1 : $$\sum_{k=1}^{k} x_{2,h,j,k} \le \text{การควบคุมการผลิตอัตโนมัติ}_{max,h,j} \qquad .....(3.37)$$

เส้นตรงเส้นที่ 2 : $m_j(\sum_{k=1}^{k} x_{1,h,j,k}) + \sum_{k=1}^{k} x_{2,h,j,k} \leq C_j$ .....(3.38)

โดย การควบคุมการผลิตอัตโนมัติ$_{max,h,j}$ คือ MW สูงสุดของการควบคุมการผลิตอัตโนมัติของเครื่องที่ j ในชั่วโมงที่ h

m_j คือ ค่าความชันของเส้นตรงที่ใช้กำหนดความสัมพันธ์ของเครื่องที่ j (หัวข้อ 4.6)

C_j คือ ค่าคงที่เฉพาะของเส้นตรงที่ใช้กำหนดความสัมพันธ์ของเครื่องที่ j (หัวข้อ 4.6)

กรณีความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไฟฟ้าและกำลังผลิตพร้อมจ่าย

เส้นตรงเส้นที่ 1 : $\sum_{k=1}^{k} x_{3,h,j,k} \leq$ กำลังผลิตพร้อมจ่าย$_{max,h,j}$ .....(3.39)

เส้นตรงเส้นที่ 2 : $m_j(\sum_{k=1}^{k} x_{1,h,j,k}) + \sum_{k=1}^{k} x_{3,h,j,k} \leq C_j$ .....(3.40)

โดย กำลังผลิตพร้อมจ่าย$_{max,h,j}$ คือ MW สูงสุดของกำลังผลิตพร้อมจ่ายของเครื่องที่ j ชั่วโมงที่ h

m_j คือ ค่าความชันของเส้นตรงที่ใช้กำหนดความสัมพันธ์ของเครื่องที่ j (หัวข้อ 4.6)

C_j คือ ค่าคงที่เฉพาะของเส้นตรงที่ใช้กำหนดความสัมพันธ์ของเครื่องที่ j (หัวข้อ 4.6)

จากสมการ (3.30) ถึง (3.40) สามารถนำค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร $x_{i,h,j,k}$ ไปสร้างเมทริกซ์ A ได้ โดยทำการเรียงลำดับค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละสดมภ์(Column)ให้ถูกต้องตามลำดับของ $x_{i,h,j,k}$ ในเมทริกซ์ x ดังสมการ (3.28) ทั้งนี้จำนวนแถว(Row)ของเมทริกซ์ A จะขึ้นอยู่กับจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและจำนวนสินค้าไฟฟ้าที่ทำการเสนอขายในตลาด ส่วนเมทริกซ์ bl และ bu สามารถคำนวณได้โดยอาศัยค่าคงที่ในสมการ (3.30) ถึง (3.40) ได้เช่นเดียวกัน

สำหรับเมทริกซ์ l และ u ซึ่งเป็นขอบเขตล่างและบนของเมทริกซ์ x นั้นจะมีขนาด (Dimension)เท่ากับเมทริกซ์ x เสมอ ซึ่งสามารถสร้างขึ้นได้ดังนี้

1. กรณีที่ $x_{i,h,j,k}$ มีค่าต่ำที่สุด ก็ต่อเมื่อ ช่วงเสนอใดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่ได้รับจัดสรรให้จ่ายกำลังผลิตเลย ดังนั้น จึงกำหนดให้สมาชิกในเมทริกซ์ l มีค่าเป็นศูนย์ทั้งหมด

I19914478

2. กรณีที่ $x_{i,h,j,k}$ มีค่าสูงสุด ก็ต่อเมื่อ ช่วงเสนอใดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับจัดสรรให้จ่ายกำลังผลิตสูงสุดตามที่ได้เสนอขายในช่วงเสนอนั้น ดังนั้น จึงกำหนดให้สมาชิกในเมทริกซ์ u มีค่าเท่ากับจำนวน MW ที่แต่ละเครื่องเสนอขายในแต่ละชั่วโมง

อย่างไรก็ดี การเรียงลำดับค่าของสมาชิกในเมทริกซ์ l และ u จะต้องถูกต้องตามลำดับของ $x_{i,h,j,k}$ ในเมทริกซ์ x ดังสมการ (3.28) ด้วย

โปรแกรมเชิงเส้นที่ใช้ในการจัดสรรกำลังผลิตไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์นี้จะอาศัยสมการ (3.24) ถึง (3.26) ซึ่งสร้างขึ้นได้ดังสมการ (3.30) ถึง (3.40) ในการคำนวณหาค่าต่ำที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งจะทำให้ค่าใช้จ่ายของสินค้าไฟฟ้าของตลาดไฟฟ้ามีค่าต่ำสุด โดยจุดคำตอบของระบบสมการ(ค่า x)จะต้องอยู่ภายในพื้นที่ที่เป็นไปได้ของคำตอบ(Feasible region) พื้นที่ดังกล่าวกำหนดโดยเงื่อนไขข้อจำกัดของตลาดซื้อขายไฟฟ้าที่แสดงด้วยสมการ (3.25) และ (3.26)