

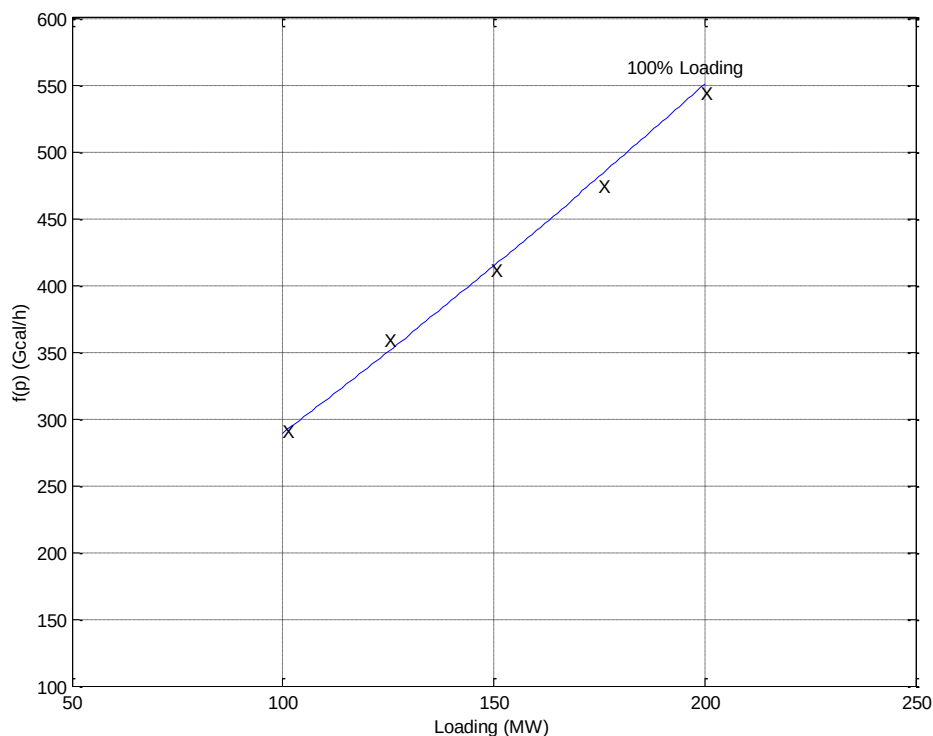
บทที่ 2

การจัดกำลังการผลิตไฟฟ้าที่คุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์

ในบทนี้ กล่าวถึงที่มาและวิธีการแก้ปัญหาการจัดกำลังการผลิตไฟฟ้าที่คุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ทั้งในลักษณะสถิตและไดนามิก ซึ่งพิจารณาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าประเภทต่างๆ เป็นส่วนสำคัญ รวมถึงข้อจำกัดในการผลิตไฟฟ้าที่มีอยู่ เช่น ผลกระทบจากควาล์วปิด/เปิดไอน้ำของหน่วยผลิตพลังงานความร้อน เป็นต้น

2.1 ต้นทุนการผลิตไฟฟ้า

ต้นทุนการผลิตไฟฟ้า โดยทั่วไปประกอบด้วยต้นทุนเชื้อเพลิง, ต้นทุนการจัดการผลิต, และต้นทุนการบำรุงรักษา แต่ในส่วนของการวิเคราะห์การจัดกำลังการผลิตไฟฟ้านั้น เราจะพิจารณาเพียงต้นทุนเชื้อเพลิงในลักษณะต้นทุนผันแปรที่เกิดขึ้นในการผลิตไฟฟ้า ตลอดช่วงกำลังการผลิตของหน่วยผลิตไฟฟ้า สำหรับหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังงานความร้อนและพลังงานความร้อนร่วมนั้น ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าอาจแสดงอยู่ในสมการราคาเชื้อเพลิงที่ใช้รายชั่วโมง เทียบเป็นฟังก์ชันกับกำลังการผลิตที่ได้รับจากหน่วยผลิตนั้น โดยสัมประสิทธิ์ในสมการดังกล่าวจะคำนวณมาจากข้อมูลดิบที่ได้จากการทดสอบหน่วยผลิตไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างฟังก์ชันควอดราติกที่ได้จากประมาณข้อมูลการทดสอบหน่วยผลิตไฟฟ้า

2.2 กราฟคุณลักษณะการผลิตไฟฟ้าของหน่วยผลิต

2.2.1 กราฟอินพุต-เอาต์พุต

กราฟอินพุต-เอาต์พุตแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่หน่วยผลิต (อินพุต) เทียบกับกำลังการผลิตที่ได้จากหน่วยผลิตนั้น (เอาต์พุต) โดยที่หน่วยวัดปริมาณความร้อนที่นิยมใช้คือ “พันล้านแคลอรี” หรือ “ล้านบีทียู” และหน่วยวัดกำลังการผลิตคือ “เมกะวัตต์” ซึ่งแสดงอยู่ในเทอมสมการควอดราติกอันดับสอง ดังต่อไปนี้

$$F_i(P_{g,i}) = a_i + b_i * P_{g,i} + c_i * P_{g,i}^2 + \dots \quad (2.1)$$

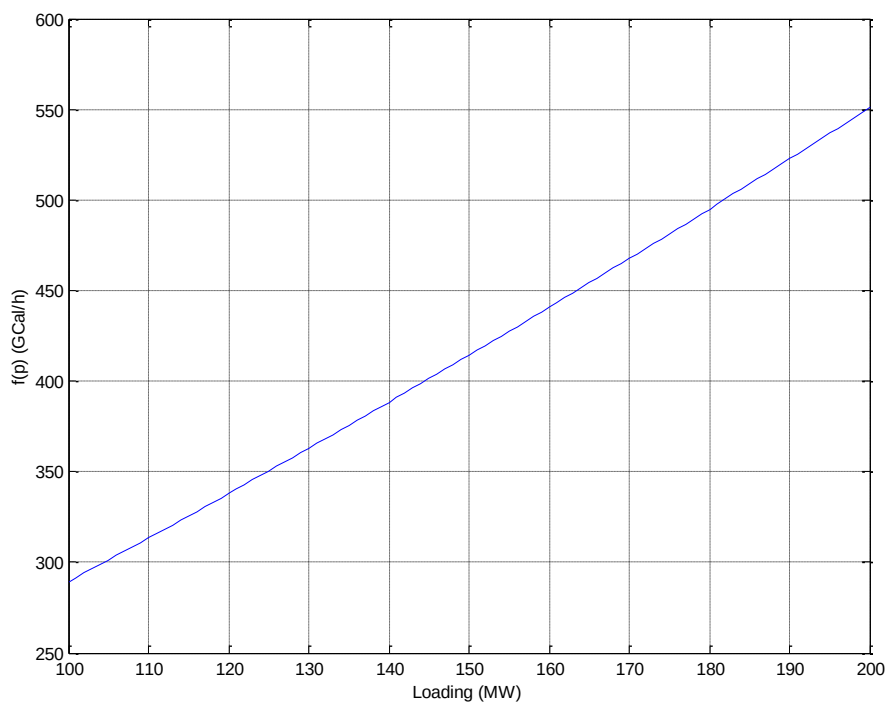
สำหรับโรงไฟฟ้าบางประเภทอาจจะแสดงในรูปของสมการที่เป็นเชิงเส้น

$$\begin{aligned} F_i(P_{g,i}) &= a_i + b_i * P_{g,i}; \quad P_{g,i}^{\min} \leq P_{g,i} < P_{g,i}^{\text{int}} \\ &= c_i + d_i * P_{g,i}; \quad P_{g,i}^{\text{int}} \leq P_{g,i} \leq P_{g,i}^{\max} \end{aligned} \quad (2.2)$$

โดยที่ $F_i(P_{g,i})$ คือ ฟังก์ชันปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่หน่วยผลิตไฟฟ้าลำดับ i สำหรับการผลิตไฟฟ้าในระดับ $P_{g,i}$ (เมกะวัตต์) ในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง (พันล้านแคลอรี/ชั่วโมง หรือ ล้านบีทียู/ชั่วโมง)

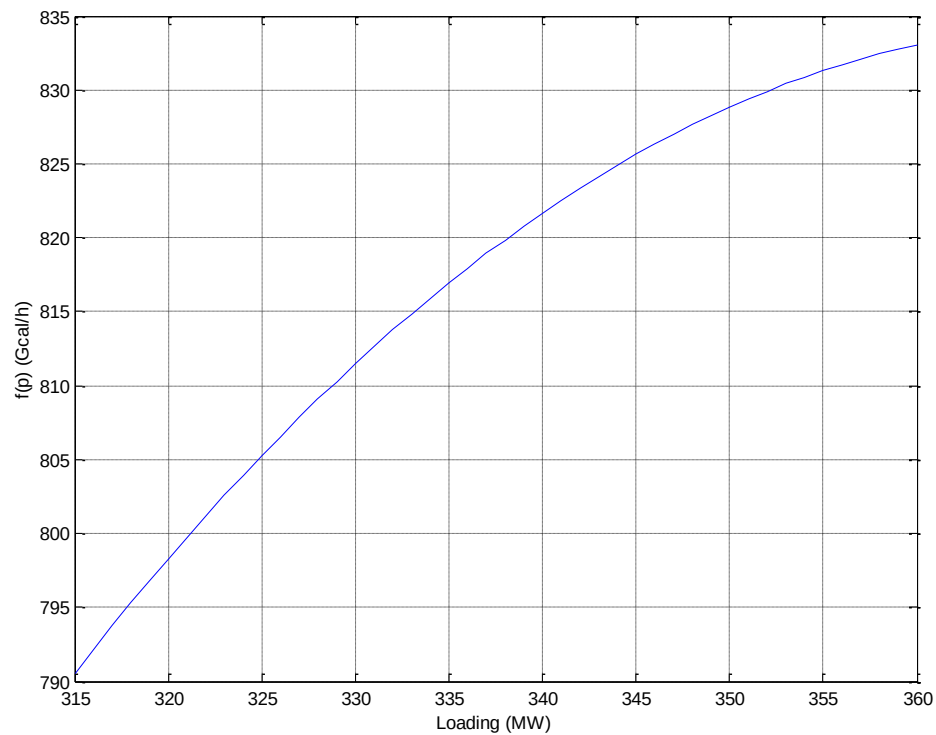
$P_{g,i}$ คือ กำลังการผลิตของหน่วยผลิตไฟฟ้าลำดับ i (เมกะวัตต์)

a_i, b_i, c_i, d_i คือ สัมประสิทธิ์ของสมการ



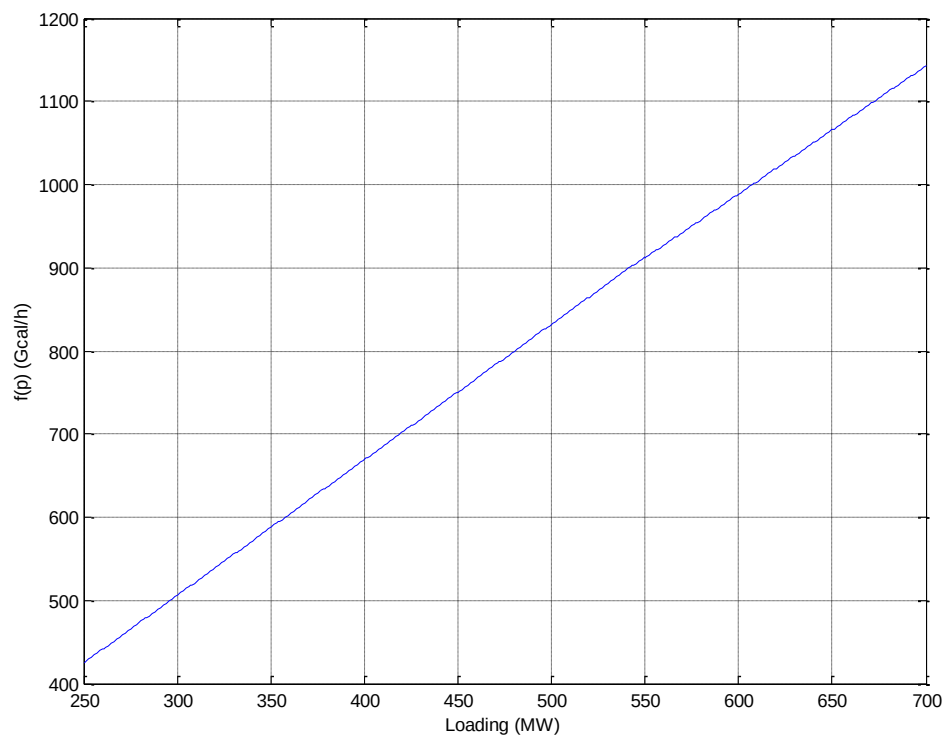
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างกราฟอินพุต-เอาต์พุตของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังความร้อน

$$(SB-T1: f(p) = 72.69 + 1.94 * p + 0.002255 * p^2)$$



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างกราฟอินพุต-เอาต์พุตของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม

$$(BPK-C1: f(p) = -1212.21 + 11.09558 \cdot p - 0.01504 \cdot p^2)$$



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างกราฟอินพุต-เอาต์พุตของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม

$$(RB-C1: f_1(p) = 17.08 + 1.63 \cdot p; 250 \leq p < 550)$$

$$f_2(p) = 64.67 + 1.54 \cdot p; 550 < p \leq 700)$$

2.2.2 กราฟต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิต

กราฟต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตแสดงความสัมพันธ์ระหว่างราคาเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตเทียบกับกำลังการผลิตที่ได้จากหน่วยผลิตนั้น ซึ่งแสดงอยู่ในเทอมสมการควอดราติกอันดับสองดังต่อไปนี้

$$C_i(P_{g,i}) = FC_i * F_i(P_{g,i}) \quad (2.3)$$

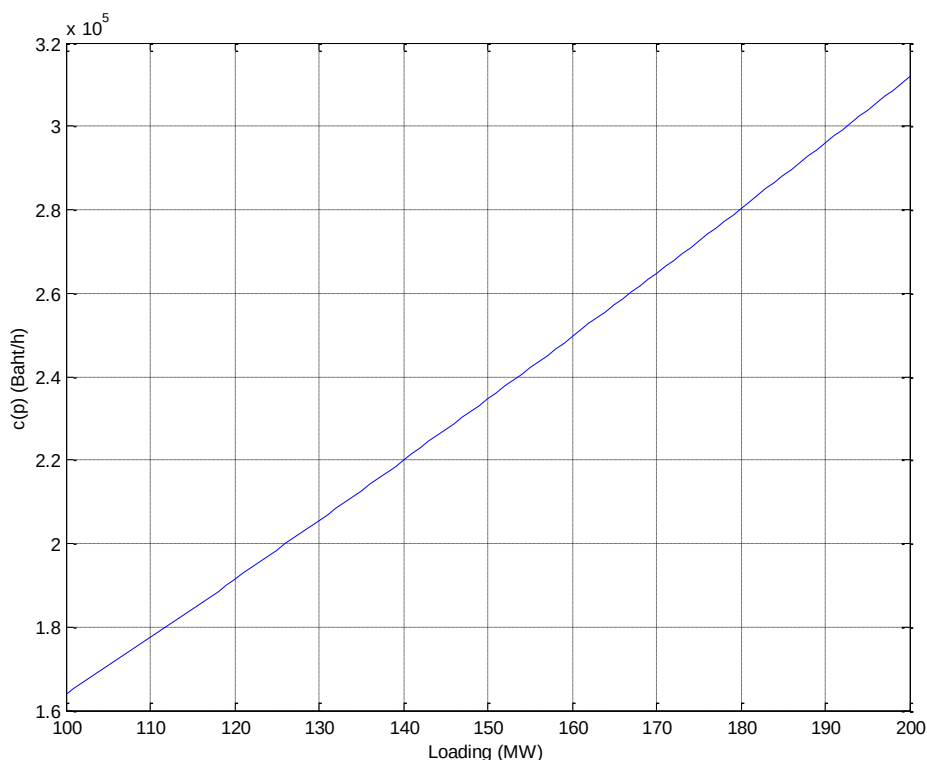
$$C_i(P_{g,i}) = FC_i * (a_i + b_i * P_{g,i} + c_i * P_{g,i}^2 + \dots) \quad (2.4)$$

สำหรับโรงไฟฟ้าบางประเภทอาจจะแสดงในรูปของสมการที่เป็นเชิงเส้น

$$\begin{aligned} C_i(P_{g,i}) &= FC_i(a_i + b_i * P_{g,i}) \quad P_{g,i}^{\min} \leq P_{g,i} < P_{g,i}^{\text{int}} \\ &= FC_i(c_i + d_i * P_{g,i}) \quad P_{g,i}^{\text{int}} \leq P_{g,i} \leq P_{g,i}^{\max} \end{aligned} \quad (2.5)$$

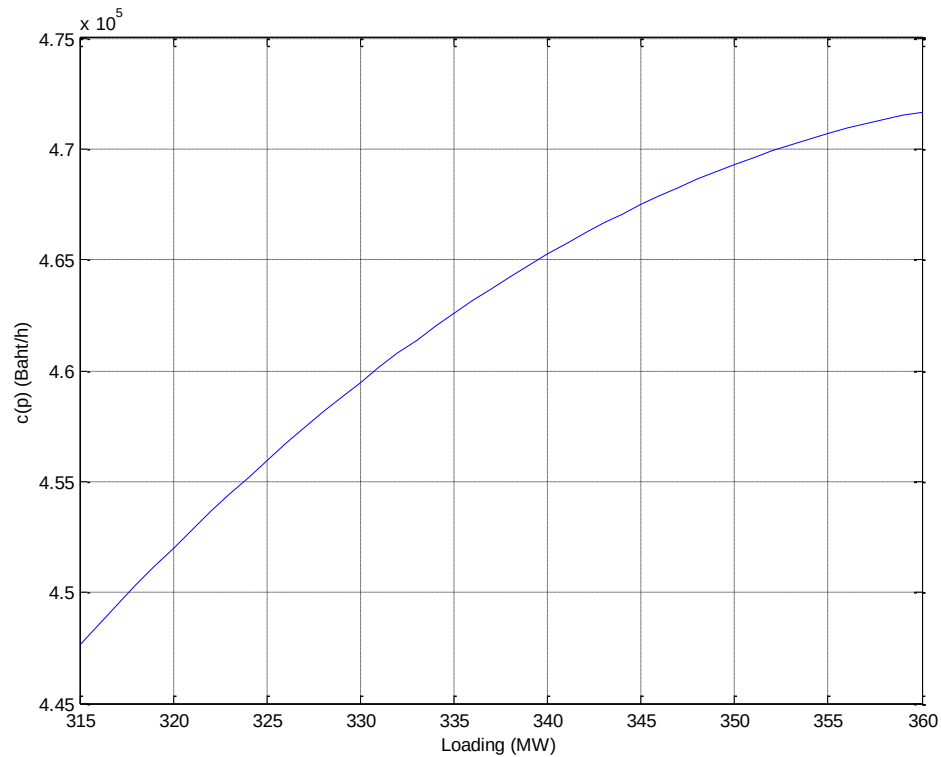
โดยที่ $C_i(P_{g,i})$ คือ ฟังก์ชันต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่ใช้ในหน่วยผลิตไฟฟ้าลำดับ i สำหรับผลิตไฟฟ้าในระดับ $P_{g,i}$ (เมกะวัตต์) ในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง (บาท/พันล้านแคลอรี หรือ บาท/ล้านบีทียู)

FC_i คือ ราคาเชื้อเพลิงต่อหน่วยพลังงานความร้อน (บาท/ชั่วโมง)



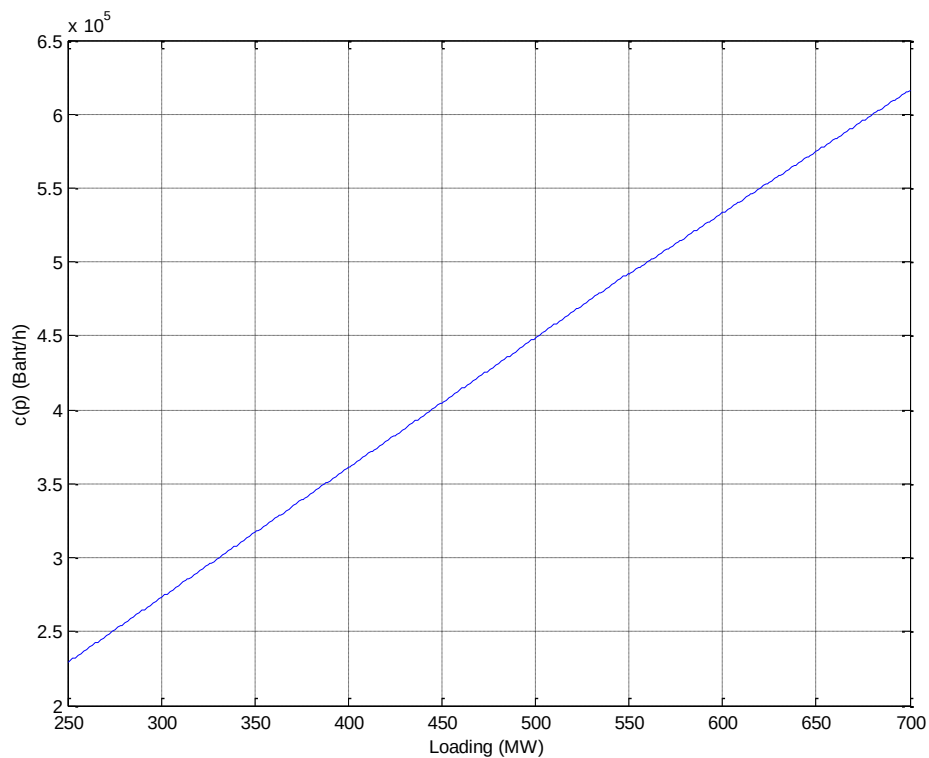
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างกราฟต้นทุนราคาเชื้อเพลิงของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังความร้อน

$$(SB-T1: c(p) = 566.23 * (72.69 + 1.94 * p + 0.002255 * p^2))$$



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างกราฟต้นทุนราคาเชื้อเพลิงของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม

$$(BPK-C1: f(p) = 566.23 \cdot (-1212.21 + 11.09558 \cdot p - 0.01504 \cdot p^2))$$



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างกราฟต้นทุนราคาเชื้อเพลิงของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม

$$(RB-C1: c1(p) = 539.36 \cdot (17.08 + 1.63 \cdot p); 250 \leq p < 550)$$

$$c2(p) = 539.36 \cdot (64.67 + 1.54 \cdot p); 550 \leq p \leq 700)$$

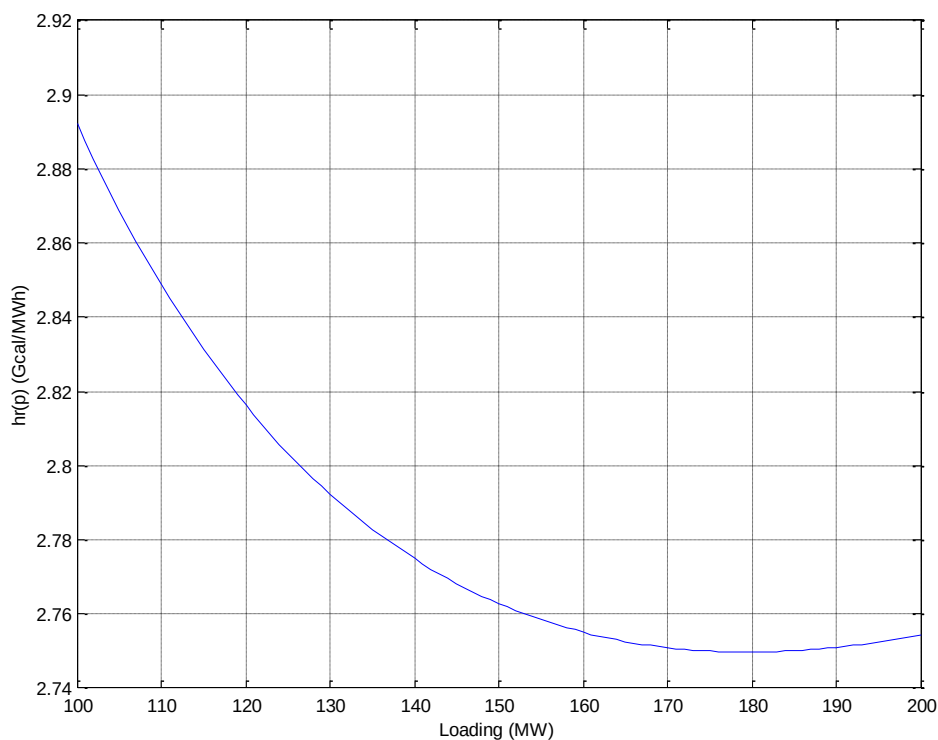
2.2.3 กราฟอัตราความร้อน

กราฟอัตราความร้อนแสดงอัตราการใช้พลังงานความร้อนโดยเฉลี่ยเมื่อเทียบกับกำลังการผลิตที่ได้จากหน่วยผลิตนั้น ค่าจากอัตราความร้อนนี้สามารถใช้ในการสะท้อนถึงประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของหน่วยผลิตไฟฟ้านั้น โดยที่ตำแหน่งที่มีค่าต่ำสุดจะพิจารณาเป็นตำแหน่งที่หน่วยผลิตมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงสุด

$$HR_i(P_{g,i}) = \text{พลังงานความร้อนที่ป้อนเข้าสู่หน่วยผลิต} / \text{กำลังการผลิตที่ได้} \quad (2.6)$$

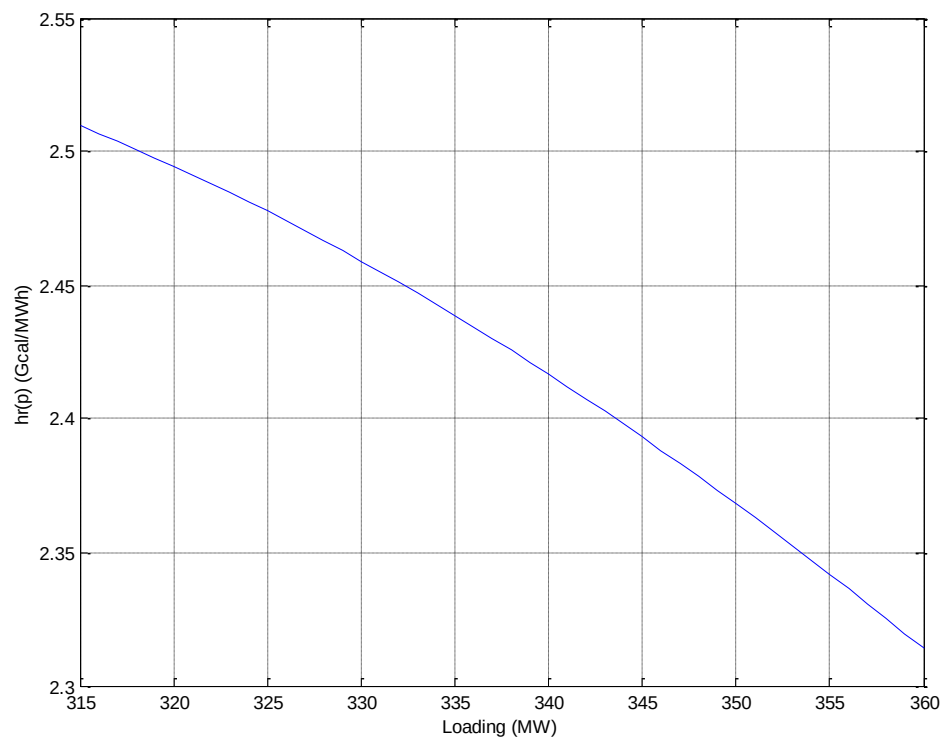
$$= F_i(P_{g,i}) / P_{g,i} \quad (2.7)$$

โดยที่ $HR_i(P_{g,i})$ คือ ฟังก์ชันอัตราความร้อนเฉลี่ยที่ใช้ในหน่วยผลิตไฟฟ้าลำดับ i สำหรับผลิตไฟฟ้าในระดับ $P_{g,i}$ (เมกกะวัตต์) (พันล้านแคลอรี/เมกกะวัตต์-ชั่วโมง หรือ ล้านบีทียู/เมกกะวัตต์-ชั่วโมง)



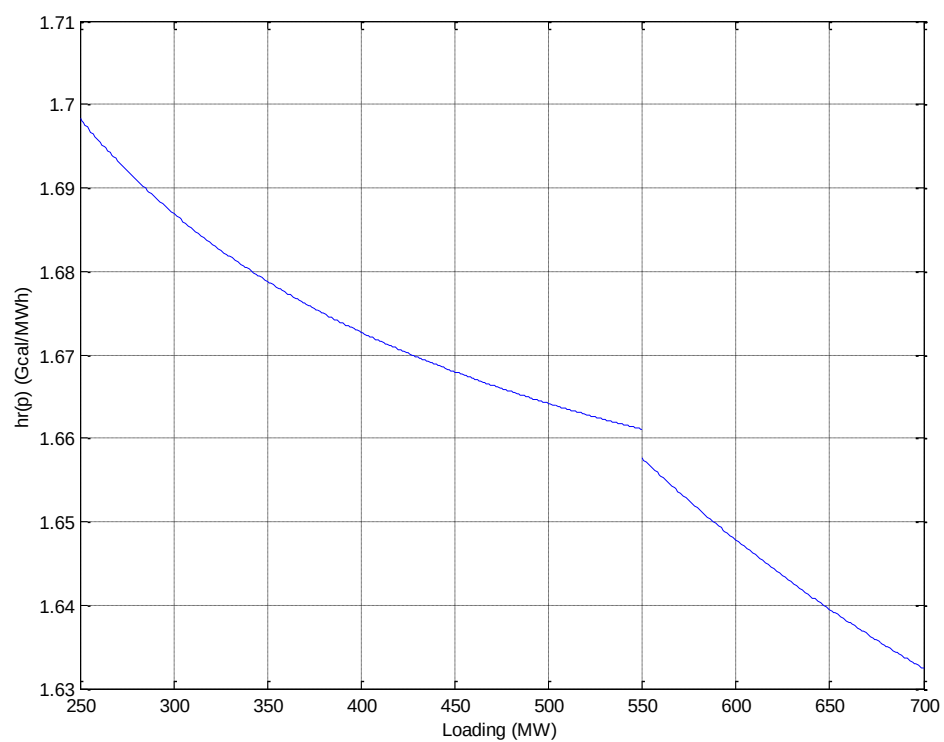
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างกราฟอัตราความร้อนของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังความร้อน

(SB-T1: $hr(p) = f(p)/p$)



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างกราฟอัตราความร้อนของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม

(BPK-C1: $hr(p) = f(p)/p$)



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างกราฟอัตราความร้อนของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม

(RB-C1: $hr(p) = f(p)/p$)

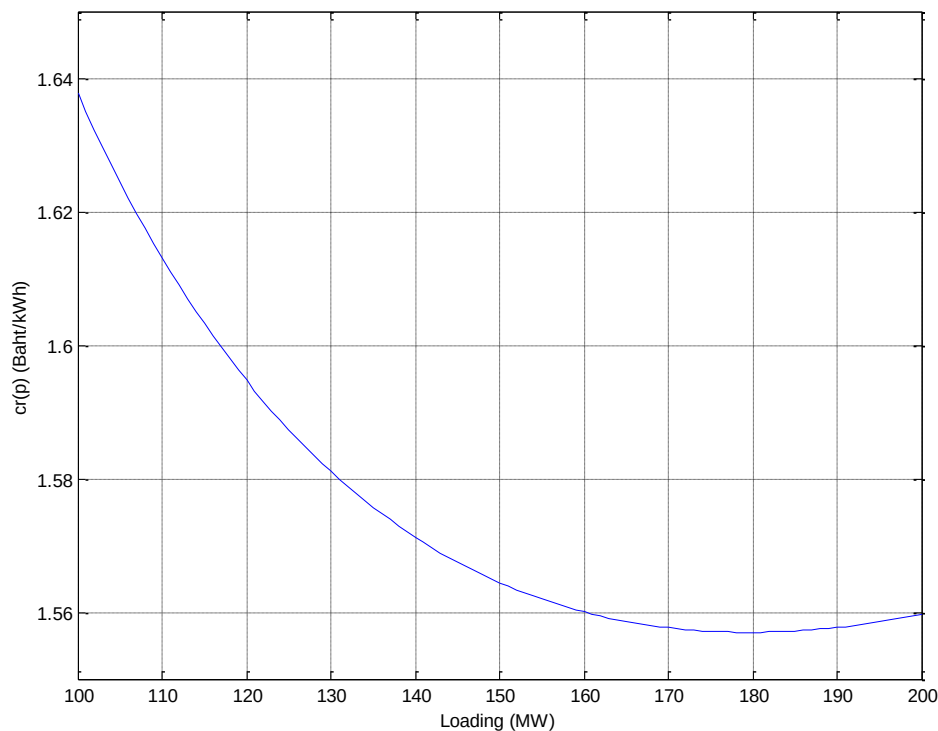
2.2.3 กราฟอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิง

กราฟอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงแสดงอัตราต้นทุนเฉลี่ยเมื่อเทียบกับกำลังการผลิตที่ได้จากหน่วยผลิตนั้น ในลักษณะคล้ายคลึงกับค่าอัตราความร้อน ค่าจากอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงนี้สามารถใช้ในการสะท้อนถึงประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของหน่วยผลิตไฟฟ้านั้น โดยที่ตำแหน่งที่มีค่าต่ำสุดจะพิจารณาเป็นตำแหน่งที่หน่วยผลิตมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงสุด

$$CR_i(P_{g,i}) = \text{ต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิต} / \text{กำลังการผลิตที่ได้} \quad (2.8)$$

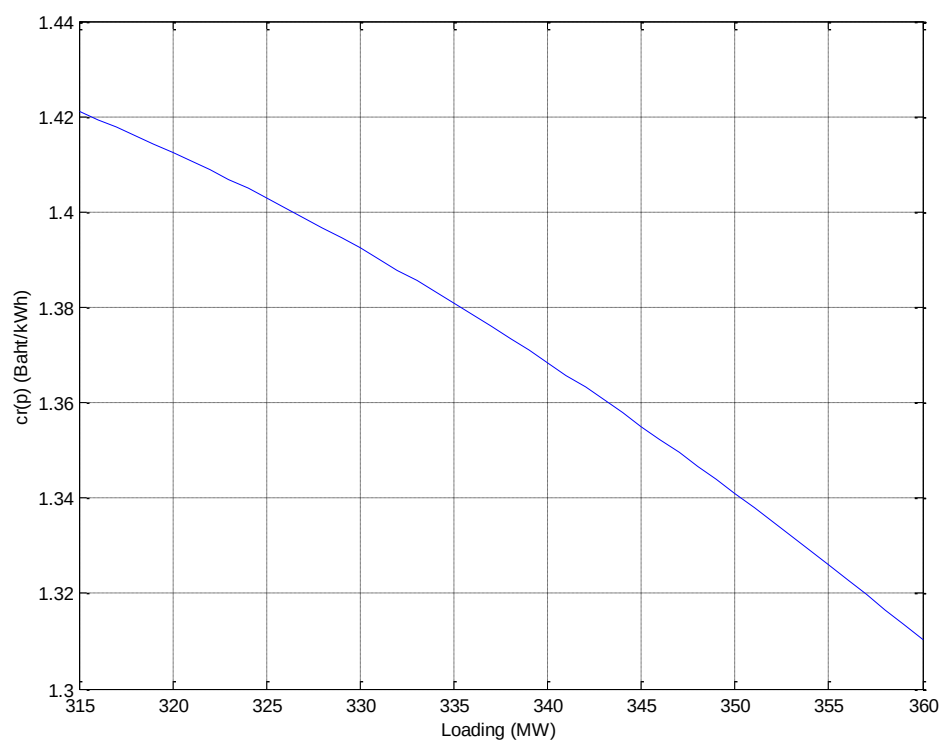
$$= C_i(P_{g,i}) / P_{g,i} \quad (2.9)$$

โดยที่ $CR_i(P_{g,i})$ คือ ฟังก์ชันต้นทุนราคาเชื้อเพลิงเฉลี่ยที่ใช้ในหน่วยผลิตไฟฟ้าลำดับ i สำหรับผลิตไฟฟ้าในระดับ $P_{g,i}$ (เมกะวัตต์) (บาท/เมกะวัตต์-ชั่วโมง)

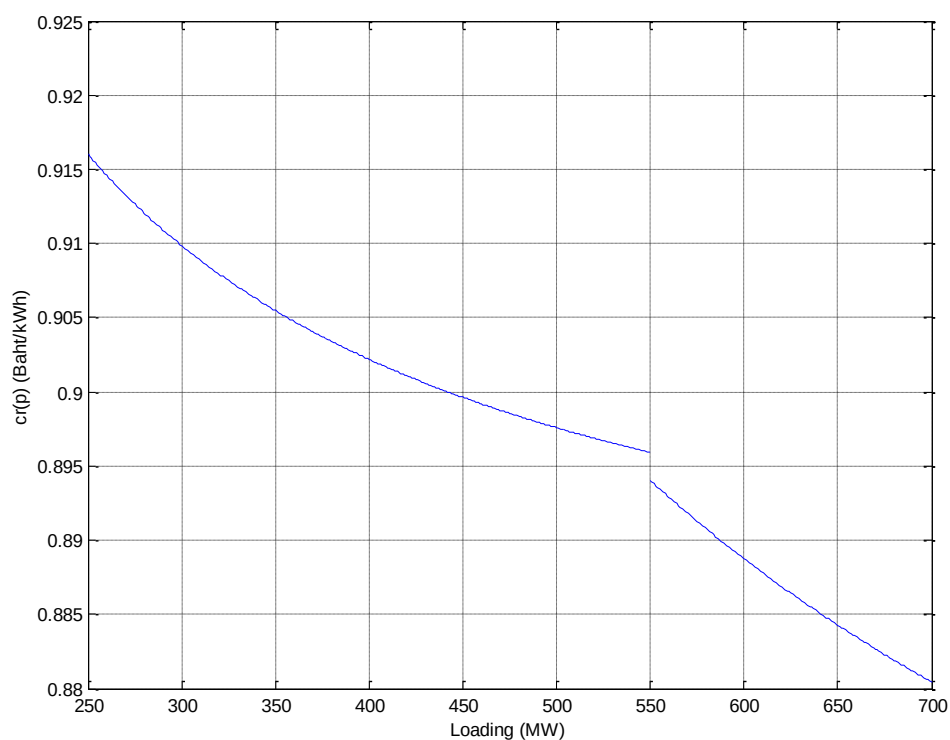


รูปที่ 2.11 ตัวอย่างกราฟอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังความร้อน

(SB-T1: $cr(p) = c(p)/p$)



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างกราฟอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม
(BPK-C1: $cr(p) = c(p)/p$)



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างกราฟอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม
(RB-C1: $cr(p) = c(p)/p$)

2.2.5 กราฟอัตราพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้น

กราฟอัตราพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้นแสดงอัตราการใช้พลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้นจากหน่วยผลิตนั้น โดยสามารถคำนวณได้จาก

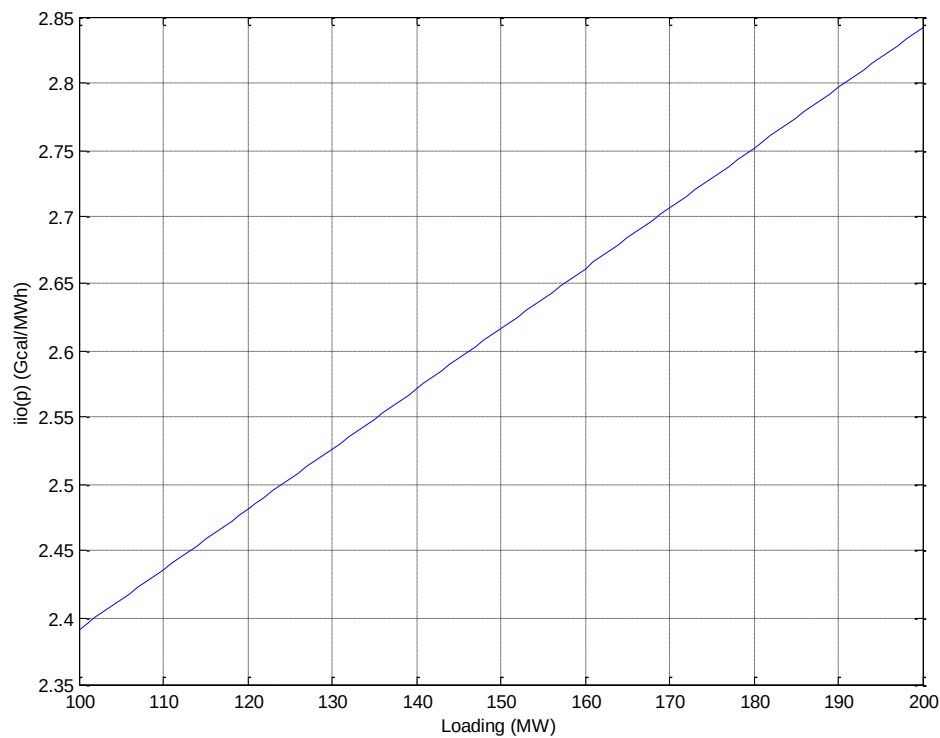
$$IIO_i(P_{g,i}) = \text{อัตราพลังงานความร้อนที่ใช้เพิ่มขึ้น} / \text{กำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้น} \quad (2.10)$$

$$= \partial(F_i(P_{g,i}))/\partial P_{g,i} \quad (2.11)$$

โดยที่ $IIO_i(P_{g,i})$ คือ ฟังก์ชันอัตราพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้น ในหน่วยผลิตไฟฟ้าลำดับ i

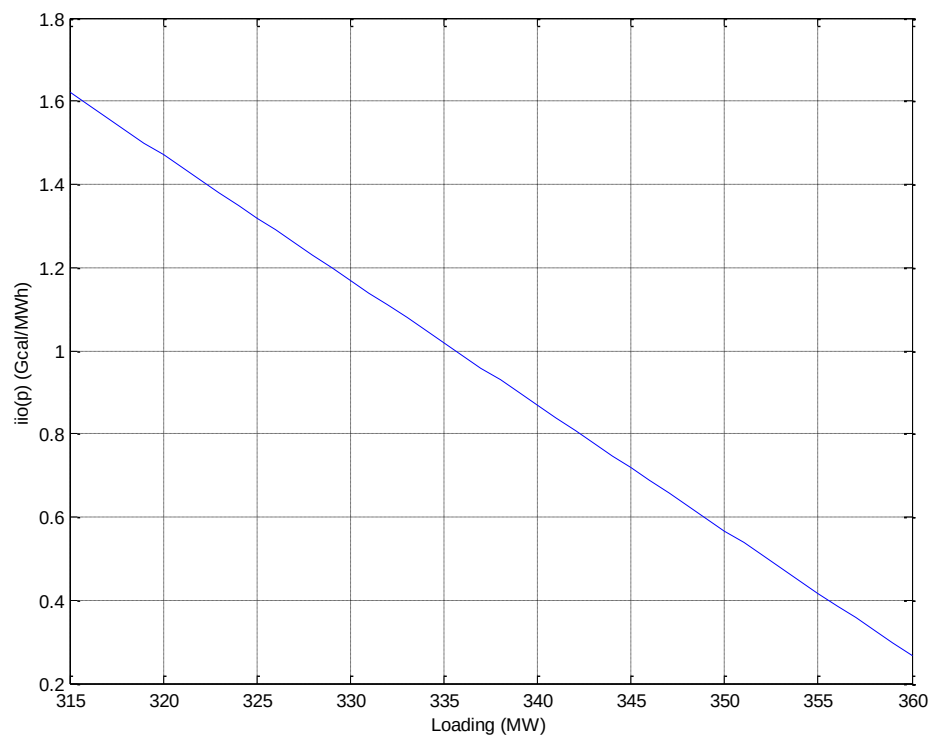
สำหรับการผลิตไฟฟ้าในระดับ $P_{g,i}$ (เมกะวัตต์) (พันล้านแกลอรี/

เมกะวัตต์-ชั่วโมง หรือ ล้านบีทียู/เมกะวัตต์-ชั่วโมง)



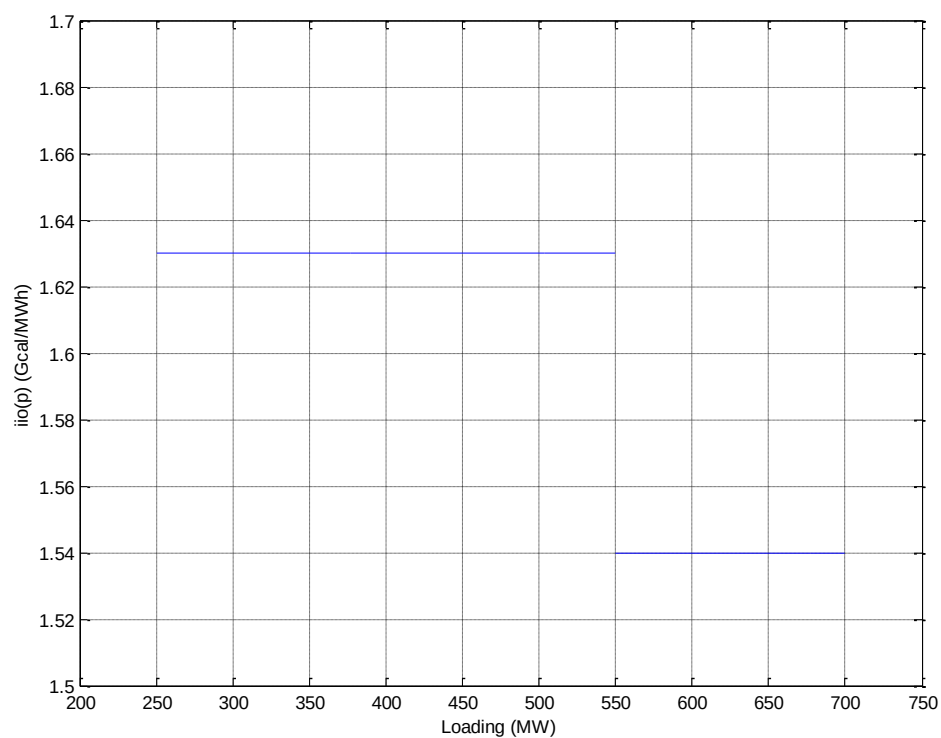
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างกราฟอัตราพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้นของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังงานความร้อน

(SB-T1: $iio(p) = 1.94 + 0.002255 \times 2 \times p$)



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างกราฟอัตราพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้นของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลัง

ความร้อนรวม (BPK-C1: $iio(p) = 11.09558 - 0.01504 \times 2 \times p$)



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างกราฟอัตราพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้นของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลัง

ความร้อนรวม (RB-C1: $iio1(p) = 1.63$; $250 \leq p < 550$)

$iio2(p) = 1.54$; $550 < p \leq 700$)

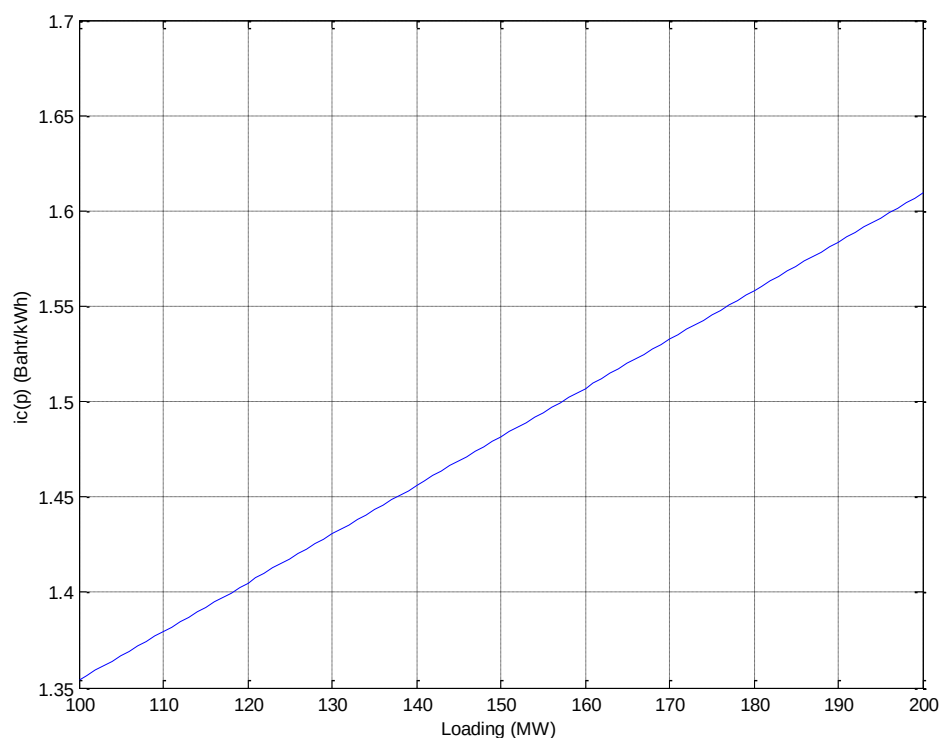
2.2.6 กราฟอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น

กราฟอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นแสดงอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้นจากหน่วยผลิตนั้น โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$IC_i(P_{g,i}) = \text{อัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่ใช้เพิ่มขึ้น} / \text{กำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้น} \quad (2.12)$$

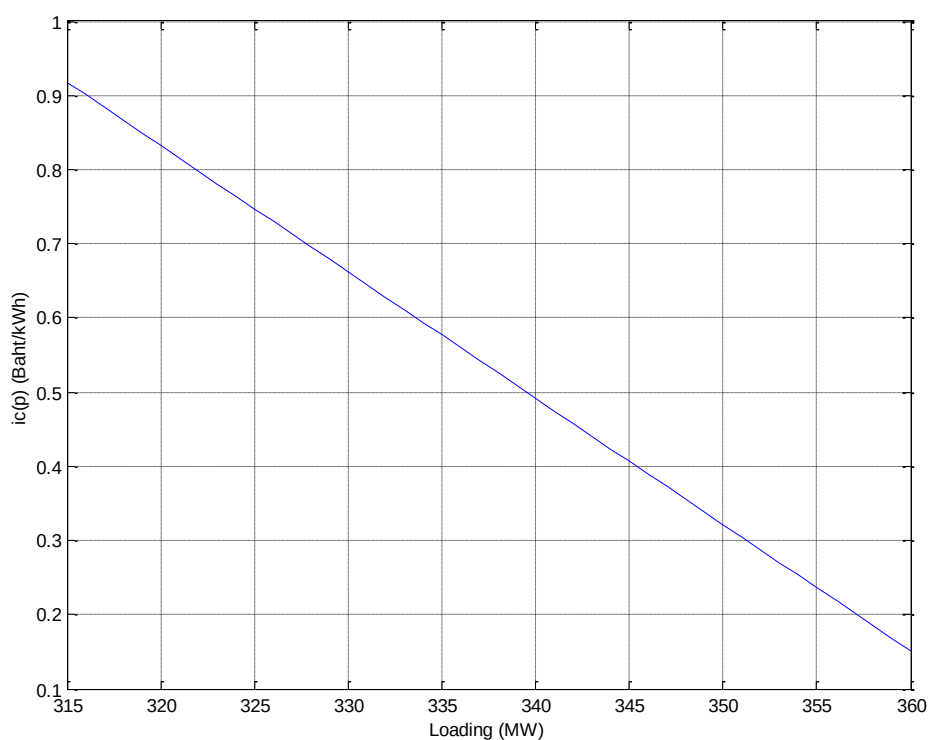
$$= \partial(C_i(P_{g,i})) / \partial P_{g,i} \quad (2.13)$$

โดยที่ $IC_i(P_{g,i})$ คือ ฟังก์ชันอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นในหน่วยผลิตไฟฟ้าลำดับ i
สำหรับการผลิตไฟฟ้าในระดับ $P_{g,i}$ (เมกะวัตต์) (บาท/เมกะวัตต์-ชั่วโมง)



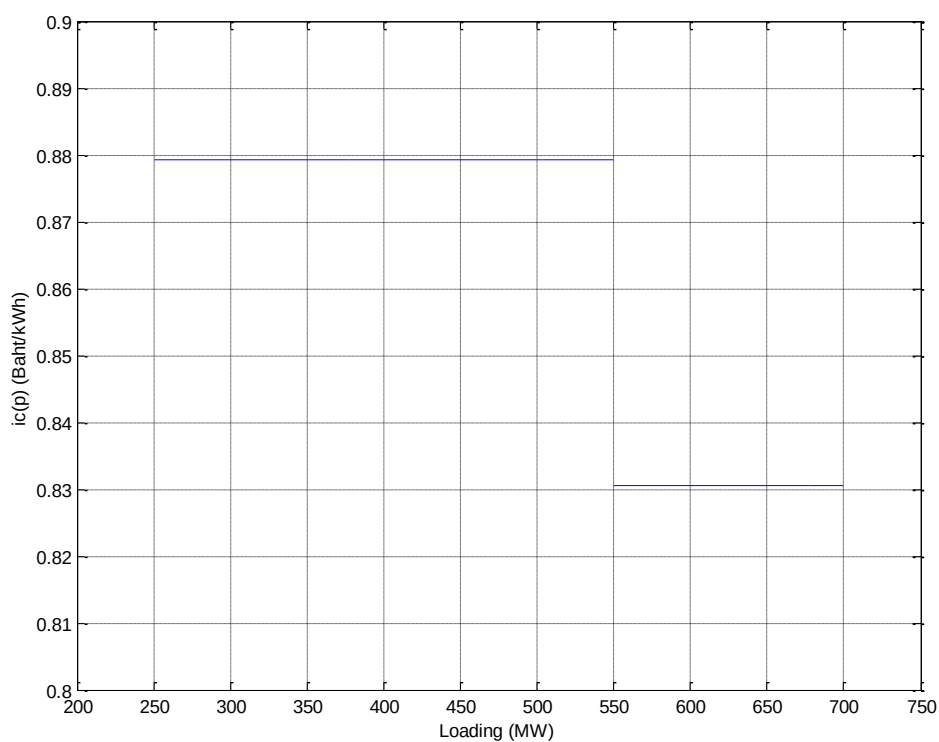
รูปที่ 2.17 ตัวอย่างกราฟอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นของหน่วยผลิตไฟฟ้า

พลังความร้อน (SB-T1: $ic(p) = 566.23 \cdot (1.94 + 0.002255 \cdot 2 \cdot p)$)



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างกราฟอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นของหน่วยผลิตไฟฟ้า

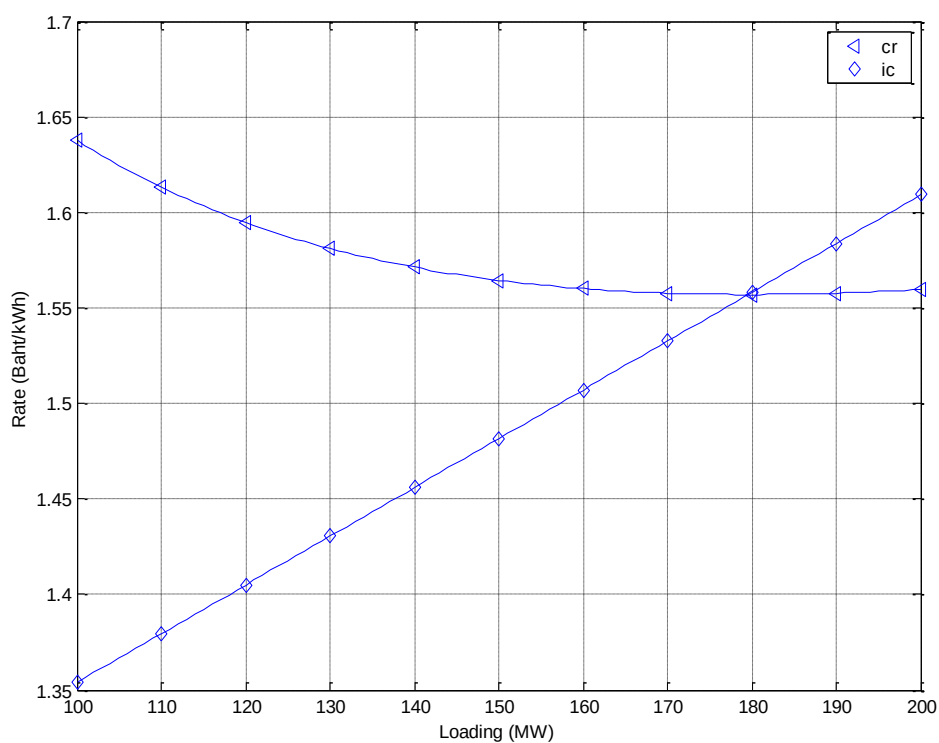
พลังความร้อนร่วม (BPK-C1: $ic(p) = 566.23 * (11.09558 - 0.01504 * p^2)$)



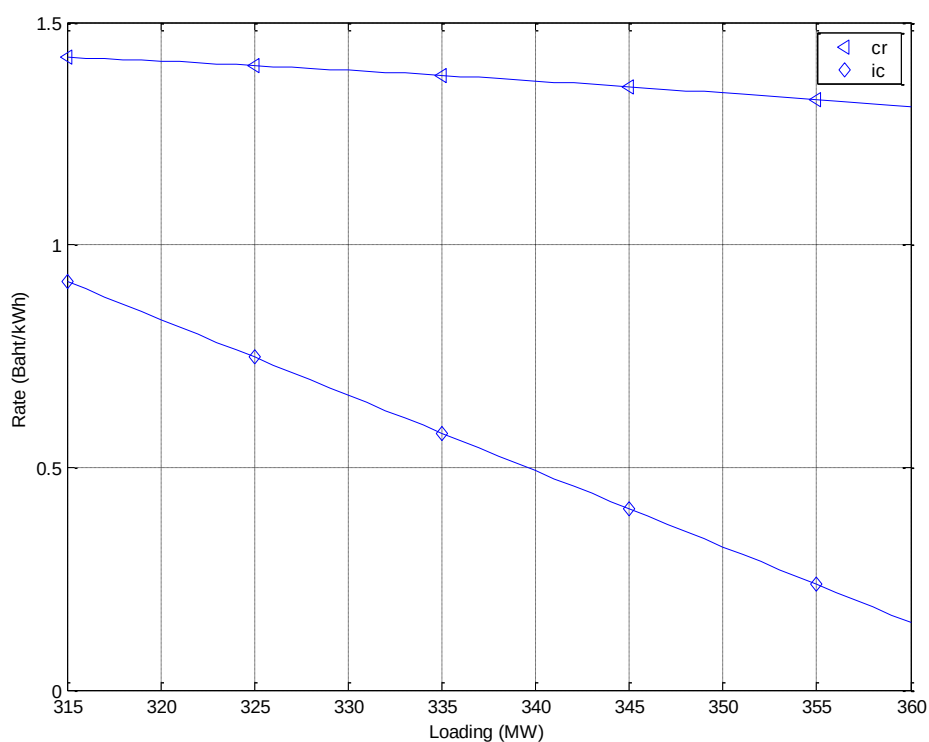
รูปที่ 2.19 ตัวอย่างกราฟอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นของหน่วยผลิตไฟฟ้า

พลังความร้อนร่วม (RB-C1: $ic1(p) = 539.36 * 1.63$; $250 \leq p < 550$)

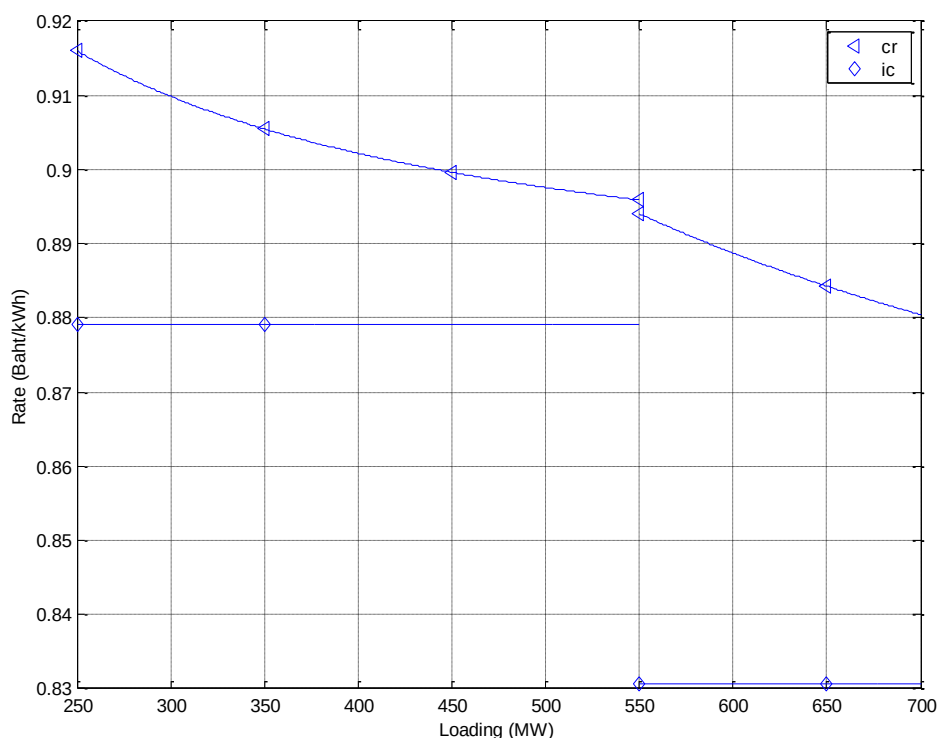
$ic2(p) = 539.36 * 1.54$; $550 < p \leq 700$)



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างกราฟอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงและอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังความร้อน (SB-T1)



รูปที่ 2.21 ตัวอย่างกราฟอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงและอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม (BPK-C1)



รูปที่ 2.22 ตัวอย่างกราฟอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงและอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นของหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม (RB-C1)

2.3 ลักษณะความสัมพันธ์ที่สำคัญระหว่างอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงและอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น

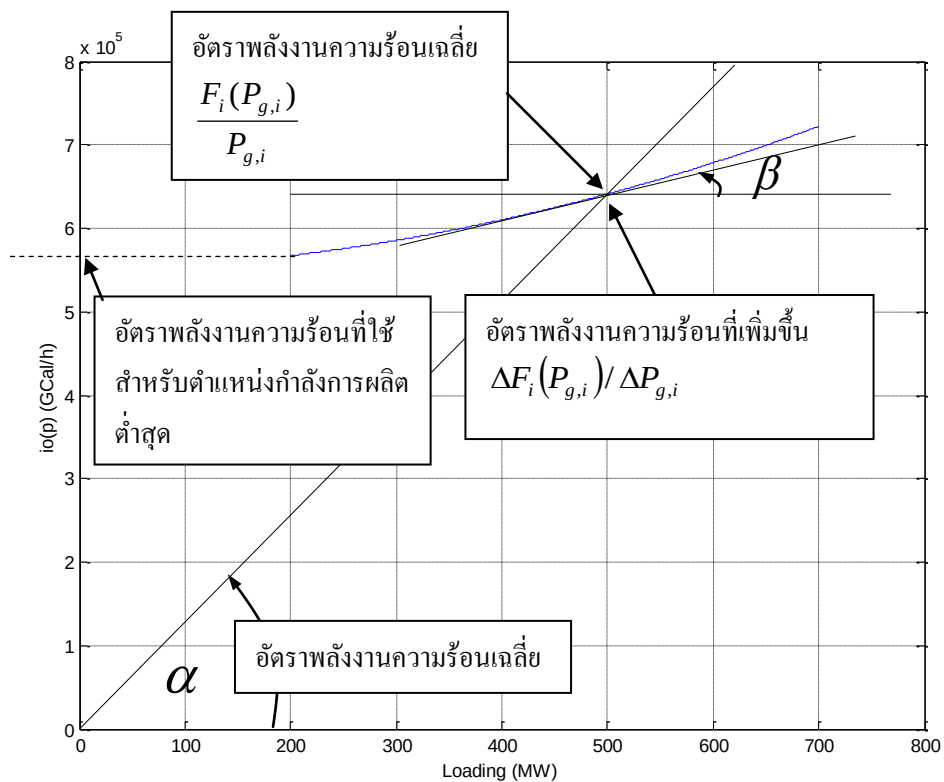
เมื่อพิจารณาถึงกราฟคุณลักษณะเฉพาะของหน่วยผลิตไฟฟ้า ซึ่งมีรูปร่างแตกต่างกันไปตามชนิดของหน่วยผลิตไฟฟ้า ลักษณะทางกายภาพของหน่วยผลิตไฟฟ้า รวมถึงค่าราคาเชื้อเพลิงตามประเภทต่างๆ สามารถแบ่งกลุ่มตามลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของมุมที่สำคัญได้ดังนี้

2.3.1 กลุ่มโรงไฟฟ้าโดยทั่วไป

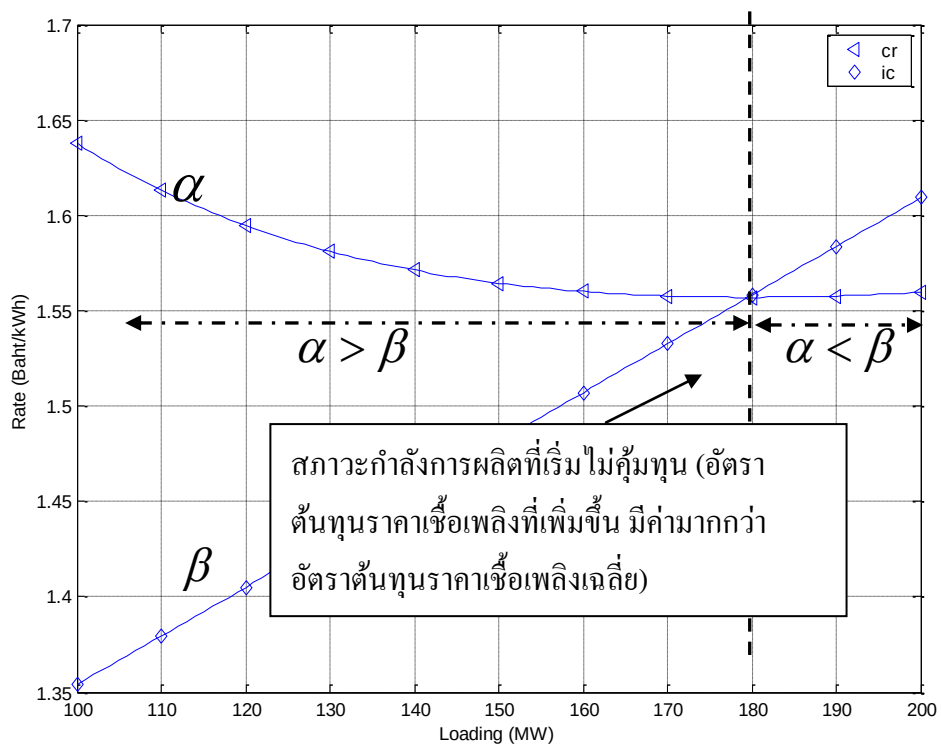
- ค่าอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงเฉลี่ย จะมีค่าลดลงเมื่อกำลังผลิตสูงขึ้น ($\alpha_2 < \alpha_1$)
- ค่าอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังผลิตสูงขึ้น ($\beta_2 > \beta_1$)
- ค่าอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น จะมีค่าน้อยกว่าค่าอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงเฉลี่ย ($\beta_2 < a_2$)

2.3.2 กลุ่มโรงไฟฟ้าบางประเภท

- จะมีตำแหน่งการผลิตหนึ่งที่ ค่าอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงเฉลี่ย จะมีค่าเท่ากับค่าอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น ($\beta_1 = \alpha_1$)
- สำหรับตำแหน่งที่มีกำลังการผลิตสูงขึ้นไป ค่าอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงเฉลี่ย จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังผลิตสูงขึ้น ($\alpha_2 > \alpha_1$) และค่าอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น จะมีค่ามากกว่าค่าอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงเฉลี่ย ($\beta_2 > \alpha_2$)



รูปที่ 2.23 ลักษณะพารามิเตอร์ที่สำคัญของของฟังก์ชันอินพุต-เอาต์พุต



รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงเฉลี่ย (α) และค่าอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น (β)

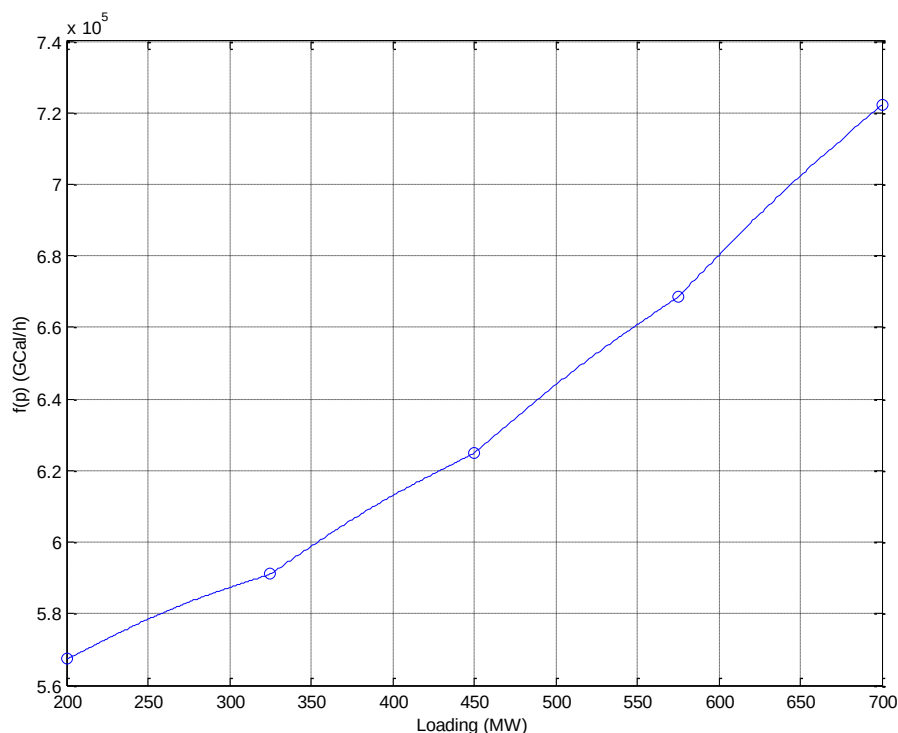
2.4 ผลกระทบจากวาล์วปิด/เปิดไอน้ำ

สำหรับหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังความร้อนขนาดใหญ่ นั้น จะประกอบไปด้วยวาล์วปิด/เปิดไอน้ำ จำนวนหลายตัว สำหรับการควบคุมปริมาณไอน้ำที่ป้อนเข้าสู่เทอร์ไบน์ โดยเมื่อหน่วยผลิตไฟฟ้าเพิ่ม กำลังการผลิตให้สูงขึ้น จะต้องใช้ปริมาณไอน้ำมากขึ้น ซึ่งอัตราการใช้พลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้น จะมี ลักษณะที่ลดลงในช่วงการปิด/เปิดวาล์ว และในขณะที่เริ่มเปิดวาล์วไอน้ำ ความสูญเสียจากวาล์วปิด/เปิดไอน้ำจะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้อัตราการใช้พลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้น มีค่าสูงขึ้นอย่างมาก โดยเมื่อพิจารณาผลกระทบดังกล่าวต่อกราฟอินพุต-เอาต์พุตที่ได้ตลอดช่วงการผลิต จะพบว่ากราฟจะมี ลักษณะไม่เรียบ และกราฟอัตราพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้นก็มีลักษณะที่ไม่ต่อเนื่อง ทำให้ไม่สามารถ นำไปรวมคำนวณการส่งเดินหน่วยผลิตไฟฟ้าด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ต้องการกราฟคุณลักษณะคอนเวกซ์ หรือวิธีการอื่นที่ต้องคำนวณหาค่าอนุพันธ์จากกราฟดังกล่าว

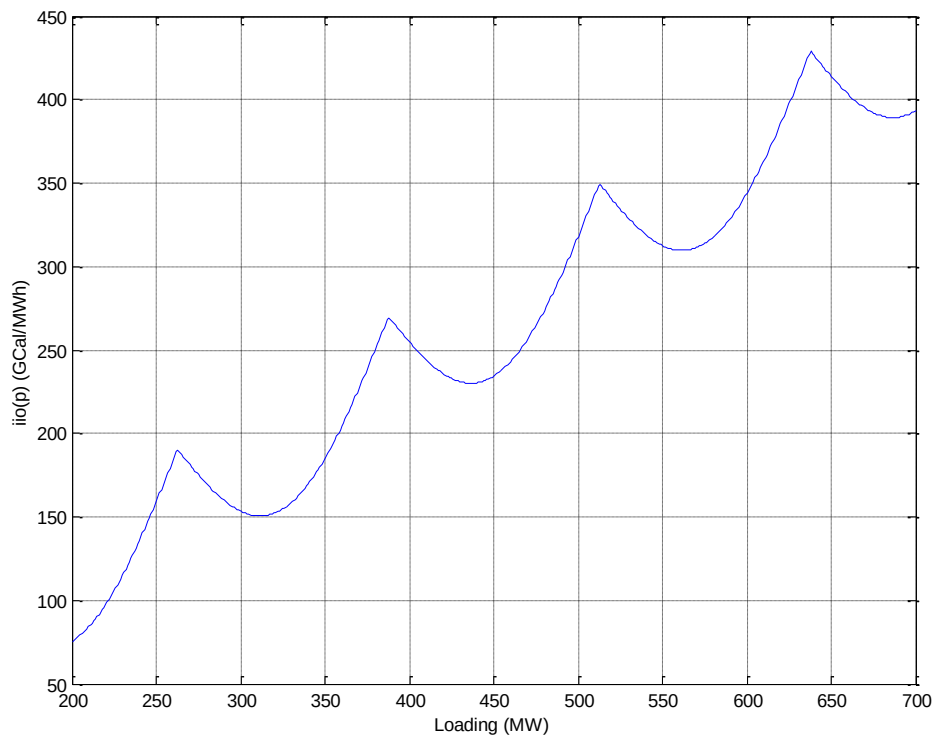
สำหรับการจำลองผลกระทบจากวาล์วปิด/เปิดไอน้ำสำหรับการคำนวณในคอมพิวเตอร์นั้น โดยทั่วไปจะใช้การเพิ่มเทอมที่เป็นรูปคลื่นไซน์ รวมเข้ากับฟังก์ชันอินพุต-เอาต์พุตหลัก โดยแสดงได้ ดังต่อไปนี้

$$F_i(P_{g,i}) = a_i + b_i * P_{g,i} + c_i * P_{g,i}^2 + |d_i * \sin(e_i * (P_{g,i}^{\min} - P_{g,i}))| \quad (2.14)$$

โดยที่ a_i, b_i, c_i, d_i, e_i คือ สัมประสิทธิ์ของสมการ



รูปที่ 2.25 ตัวอย่างกราฟอัตราอินพุต-เอาต์พุตหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังความร้อน เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบจากวาล์วปิด/เปิดไอน้ำ



รูปที่ 2.26 ตัวอย่างกราฟอัตราพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้น สำหรับหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังงานความร้อน เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบจากวาล์วปิด/เปิดไอน้ำ

2.5 ผลกระทบจากช่วงการผลิตไฟฟ้าต้องห้าม

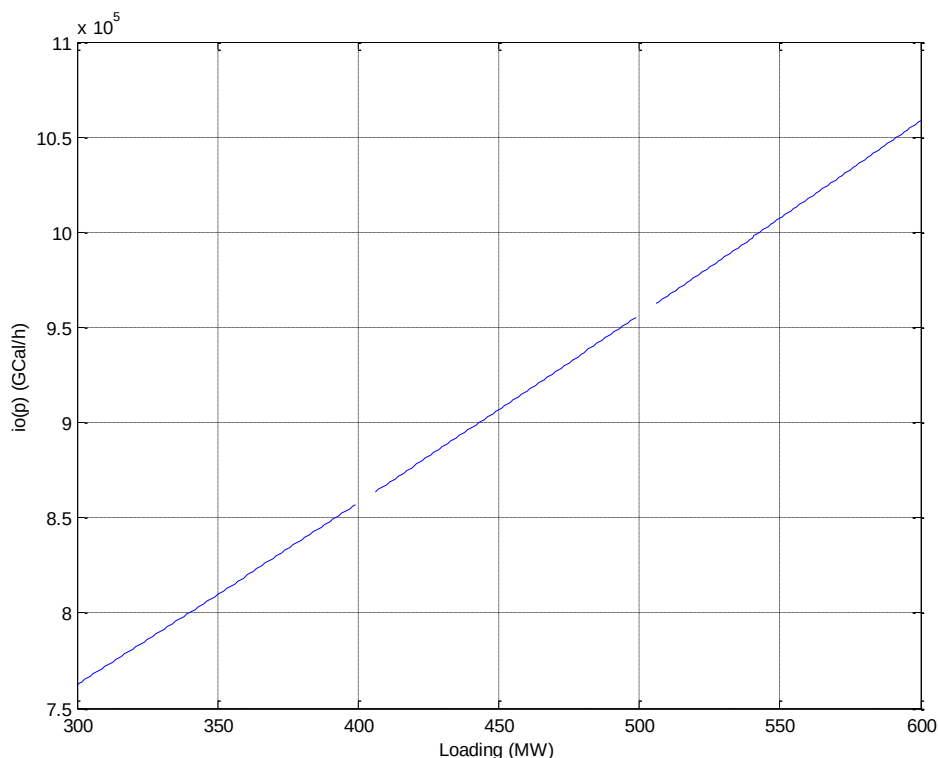
สำหรับหน่วยผลิตไฟฟ้าบางประเภทนั้น จะมีช่วงการผลิตในช่วงหนึ่งซึ่งอาจก่อให้เกิดการสั่นตัวของแกนเพลลาที่เชื่อมต่อระหว่างเทอร์ไบน์และแกนโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือเกิดความไม่เสถียรภาพในการผลิตไฟฟ้าในช่วงการผลิตหนึ่ง จากการที่การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ชนิดอื่น ส่งผลให้หน่วยผลิตไฟฟ้าไม่สามารถผลิตไฟฟ้าในช่วงการผลิตดังกล่าวได้ หรือถ้ามีความสามารถในการผลิตไฟฟ้าได้แต่จะทำให้อายุการใช้งานของหน่วยผลิตไฟฟ้านั้นสั้นลง

ข้อจำกัดดังกล่าวส่งผลกระทบโดยตรงสำหรับกราฟอินพุต-เอาต์พุตหลัก ซึ่งมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง และไม่อยู่ในลักษณะคอนเวกซ์ทำให้ไม่สามารถนำไปรวมคำนวณการสั่งเดินหน่วยผลิตไฟฟ้าด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ต้องคำนวณหาค่าอนุพันธ์จากกราฟดังกล่าว เช่น ทฤษฎีการหาค่าแลมabda ของระบบให้เท่ากัน เป็นต้น

สำหรับการจำลองผลกระทบจากช่วงการผลิตไฟฟ้าที่ไม่สามารถผลิตได้ สำหรับการคำนวณในคอมพิวเตอร์นั้น สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 F_i(P_{g,i}) &= a_i + b_i * P_{g,i} + c_i * P_{g,i}^2 + \dots; \quad P_{g,i}^{\min} \leq P_{g,i} \leq P_{g,i}^{\max} \\
 &= \infty; \quad P_{g,i} \in P_{g,i}^{PZ}
 \end{aligned}
 \quad (2.15)$$

โดยที่ $P_{g,i}^{PZ}$ คือช่วงตำแหน่งการผลิตไฟฟ้าที่ไม่สามารถผลิตได้สำหรับหน่วยผลิตลำดับ i



รูปที่ 2.27 ตัวอย่างกราฟอัตราอินพุต-เอาต์พุตหน่วยผลิตไฟฟ้าพลังความร้อน เมื่อพิจารณาถึงช่วงการผลิตไฟฟ้าต้องห้าม

2.6 ปัญหาการจัดกำลังการผลิตไฟฟ้าในลักษณะสเตติก

2.6.1 เมื่อไม่คำนึงถึงความสูญเสียจากการส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

การจัดกำลังการผลิตไฟฟ้าให้มีความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ คือการจัดกำลังการผลิตไฟฟ้าสำหรับแต่ละหน่วยผลิต ให้มีต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าต่ำที่สุด โดยกำลังการผลิตไฟฟ้ารวมจะต้องมีปริมาณเพียงพอต่อความต้องการ รวมถึงการชดเชยความสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบส่ง

ประเด็นที่สำคัญสำหรับการพิจารณาปัญหานี้คือ การปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตของแต่ละเครื่องที่ขนานอยู่ในระบบ ณ. ขณะนั้น ให้อยู่บนพื้นฐานของต้นทุนราคาเชื้อเพลิงของหน่วยผลิตไฟฟ้าในลักษณะรวมทั้งระบบ โดยคำนึงถึงความแตกต่างของต้นทุนราคาเชื้อเพลิงในแต่ละหน่วยผลิตเมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน

การจัดกำลังการผลิตไฟฟ้าให้มีความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์นั้น จะนำมาพิจารณาในสถานะที่การควบคุมระบบไฟฟ้านั้นอยู่ในสถานะปกติ กล่าวคือสถานะที่ไม่เกิดเหตุการณ์ที่ผิดปกติขึ้น และสายส่งไฟฟ้าทุกเส้นมีความสามารถในการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าได้โดยค่าการไหลของพลังงานในขณะนั้นไม่เกินขีดจำกัดทางความร้อนของสายส่งไฟฟ้า โดยพิจารณาเฉพาะหน่วยผลิตไฟฟ้าที่ขนานเครื่องอยู่ในระบบ

ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจะเป็นแผนการส่งเดินเครื่องสำหรับหน่วยผลิตไฟฟ้าทุกหน่วยที่มีค่าเหมาะสมที่สุดตามสภาพระบบขณะนั้น โดยมีค่าการปรับเปลี่ยนตามตำแหน่งการผลิตเดิม

$$P_{g,i,desired} = P_{g,i,base} + pf_i * \Delta P_{g,total} \quad (2.16)$$

โดยที่แฟกเตอร์การผลิตไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป

$$pf_i = \Delta P_{g,i} / \Delta P_{g,total} \quad (2.17)$$

โดยที่ $P_{g,i,desired}$ คือ กำลังการผลิตที่ต้องการสำหรับหน่วยผลิตไฟฟ้าลำดับ i (เมกกะวัตต์)

$P_{g,i,base}$ คือ กำลังการผลิตของหน่วยผลิตไฟฟ้าลำดับ i ที่ผลิตอยู่เดิม (เมกกะวัตต์)

pf_i คือ แฟกเตอร์ส่วนแบ่งการจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำหรับหน่วยผลิตไฟฟ้าลำดับ i

$\Delta P_{g,i}$ คือ ปริมาณกำลังการผลิตที่เปลี่ยนแปลงสำหรับหน่วยผลิตไฟฟ้าลำดับ i (เมกกะวัตต์)

$\Delta P_{g,total}$ คือ ปริมาณกำลังการผลิตที่เปลี่ยนแปลงรวมทั้งระบบ

เมื่อพิจารณาถึงสมการต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งระบบ แสดงถึงฟังก์ชันเป้าหมายของปัญหาการจัดกำลังการผลิตไฟฟ้าที่คุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์

$$C_t = C_1(P_{g,1}) + C_2(P_{g,2}) + \dots + C_n(P_{g,n}) = \sum_{i=1}^n C_i(P_{g,i}) \quad (2.18)$$

$$C_t = \sum_{i=1}^n (F_i(P_{g,i})) * FC_i \quad (2.19)$$

โดยคำนวณหาค่าที่ต่ำสุดของ

$$C_t = \sum_{i=1}^n C_i(P_{g,i,desired}) \quad (2.20)$$

ภายใต้ข้อจำกัดกำลังการผลิตรวม จะต้องมีความเท่ากับความต้องการใช้ไฟฟ้า

$$\sum_{i=1}^n P_{g,i,desired} = P_{demand} \quad (2.21)$$

ทั้งนี้ กำลังการผลิตที่ต้องการจะต้องมีค่าอยู่ภายใต้ขีดจำกัดสูงสุดและขีดจำกัดต่ำสุดของหน่วยผลิต ที่มีความสามารถในการผลิตได้

$$P_{g,i,desired} \geq P_{g,i}^{\min}, \quad (2.22)$$

$$P_{g,i,desired} \leq P_{g,i}^{\max}, \quad (2.23)$$

อีกทั้งกำลังการผลิตที่ต้องการจะต้องมีค่าเพิ่มขึ้น (ลดลง) จากตำแหน่งการผลิตเดิมไม่เกินค่า อัตรากำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้น (ลดลง) ได้ภายในช่วงเวลาหนึ่ง

$$P_{g,i,desired} \leq P_{g,i,base} + UR_i, \quad (2.24)$$

$$P_{g,i,desired} \geq P_{g,i,base} - DR_i, \quad (2.25)$$

โดยที่ n คือ จำนวนหน่วยผลิตไฟฟ้าที่ขนานเครื่องเข้ามาในระบบ

$C_T()$ คือ ฟังก์ชันต้นทุนราคาเชื้อเพลิง (บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

P_{demand} คือ จำนวนความต้องการพลังงานไฟฟ้ารวมในระบบ

$P_{g,i}^{\min}$ คือ ค่ากำลังการผลิตต่ำสุดของหน่วยผลิตไฟฟ้าลำดับ i ที่สามารถผลิตได้ (กิโลวัตต์)

$P_{g,i}^{\max}$ คือ ค่ากำลังการผลิตสูงสุดของหน่วยผลิตไฟฟ้าลำดับ i ที่สามารถผลิตได้ (กิโลวัตต์)

UR_i คือ ค่ากำลังการผลิตที่หน่วยผลิตไฟฟ้าลำดับ i สามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้ในช่วงเวลาหนึ่ง (กิโลวัตต์)

DR_i คือ ค่ากำลังการผลิตที่หน่วยผลิตไฟฟ้าลำดับ i สามารถลดกำลังการผลิตได้ในช่วงเวลาหนึ่ง (กิโลวัตต์)

2.6.1.1 การแก้ปัญหาด้วยวิธีสมการลากรางจ์

วิธีสมการลากรางจ์ เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการแก้ปัญหการจัดกำลังการผลิตไฟฟ้าที่คุ้มทุนในทางเศรษฐศาสตร์ โดยใช้การแปลงสมการข้อจำกัดการผลิตไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการ และสมการเป้าหมายเดิมให้อยู่ในรูปแบบของสมการลากรางจ์ โดยใช้ตัวคูณลากรางจ์เข้ามาปรับค่าสมการข้อจำกัดการผลิตไฟฟ้าเดิม ซึ่งแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$L(P_{g,i,desired}, \lambda) = \sum_{i=1}^n C_i(P_{g,i,desired}) + \lambda \left(P_{demand} - \sum_{i=1}^n P_{g,i,desired} \right) \quad (2.26)$$

โดยที่ $L()$ คือ สมการลากรางจ์

λ คือ ตัวคูณลากรางจ์

และจากสภาวะการคำนวณหาค่าที่เหมาะสม

$$\frac{\partial L(P_{g,i,desired}, \lambda)}{\partial P_{g,i,desired}} = \frac{\partial C_i(P_{g,i,desired})}{\partial P_{g,i,desired}} + \lambda(-1) = 0 \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial L(P_{g,i,desired}, \lambda)}{\partial \lambda} = P_{demand} - \sum_{i=1}^N P_{g,i,desired} = 0 \quad (2.28)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ 2.28 ใหม่จะได้สมการที่แสดงถึงข้อจำกัดในการผลิตไฟฟ้า (สมการ 2.21) และสำหรับสมการที่ 2.27 เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\lambda = \frac{\partial C_i(P_{g,i,desired})}{\partial P_{g,i,desired}} = b_i + 2 * c_i * P_{g,i,desired} + \dots \quad (2.29)$$

$$\lambda_{syst} = \frac{\partial C_1(P_{g,1,desired})}{\partial P_{g_1}} = \frac{\partial C_2(P_{g,2,desired})}{\partial P_{g_2}} = \dots \quad (2.30)$$

โดยถ้าหน่วยผลิตไฟฟ้าใดมีกำลังผลิตสูงถึงขีดจำกัดของการผลิตไฟฟ้าจากสมการ 2.24

$$\lambda_{syst} \geq \frac{\partial C_i(P_{g,i,desired})}{\partial P_{g_i}} \quad (2.31)$$

และถ้าหน่วยผลิตไฟฟ้าใดมีกำลังผลิตต่ำถึงขีดจำกัดของการผลิตไฟฟ้าจากสมการ 2.25

$$\lambda_{syst} \leq \frac{\partial C_i(P_{g,i,desired})}{\partial P_{g_i}} \quad (2.32)$$

2.6.1.2 หลักการการจัดค่าแลมปด้าให้มีระดับเท่ากันทั้งระบบ

จากสมการที่ 2.30 แสดงให้เห็นว่า สภาวะต้นทุนราคาเชื้อเพลิงรวมในการผลิตไฟฟ้ามีค่าต่ำที่สุด จะเกิดขึ้นเมื่อค่าอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น ของแต่ละหน่วยผลิตไฟฟ้ามีระดับมีระดับที่เท่ากันทั้งระบบ โดยที่ค่าแลมปด้าของระบบ สะท้อนให้เห็นถึงต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นของทั้งระบบ ณ. ขณะนั้น และการจัดกำลังการผลิตในลักษณะดังกล่าวนี้ เรียกว่าหลักการ “การจัดค่าแลมปด้าให้มีระดับเท่ากันทั้งระบบ” หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าหลักการ “อีควอล์แลมปด้า”

2.6.2 เมื่อคำนึงถึงความสูญเสียจากการส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

2.6.2.1 การแก้ปัญหาด้วยวิธีสมการลากรางจ์

2.6.2.2 หลักการการจัดค่าแลมabdaให้มีระดับเท่ากันทั้งระบบ

เมื่อพิจารณาการจัดกำลังการผลิตที่รวมผลกระทบจากความสูญเสียในระบบส่ง สามารถพิจารณาได้ดังต่อไปนี้ โดยจากสมการที่ 2.21 เขียนอยู่ในรูปใหม่ได้เป็น

$$\sum_{i=1}^n P_{g,i,desired} = P_{demand} + P_{loss} \quad (2.33)$$

โดยที่ P_{loss} คือ ค่าความสูญเสียพลังงานไฟฟ้ารวมในระบบส่ง (เมกะวัตต์) และถ้าทำการปรับสมการลากรางจ์ (สมการที่ 2.26) ใหม่ ด้วยสมการ 2.33 จะได้

$$L(P_{g,i,desired}, \lambda) = \sum_{i=1}^n C_i(P_{g,i,desired}) + \lambda \left(P_{demand} + P_{loss} - \sum_{i=1}^n P_{g,i,desired} \right) \quad (2.34)$$

และจากสภาวะการคำนวณหาค่าที่เหมาะสม

$$\frac{\partial L(P_{g,i,desired}, \lambda)}{\partial P_{g,i,desired}} = \frac{\partial C_i(P_{g,i,desired})}{\partial P_{g,i}} + \lambda \left(\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_{g,i,desired}} - 1 \right) = 0 \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial L(P_{g,i,desired}, \lambda)}{\partial \lambda} = P_{demand} + P_{loss} - \sum_{i=1}^N P_{g,i,desired} = 0 \quad (2.36)$$

ในลักษณะคล้ายกับสมการ 2.28 เมื่อจัดรูปสมการที่ 2.36 ใหม่จะได้สมการที่แสดงถึงข้อจำกัดในการผลิตไฟฟ้า (สมการ 2.33) และสำหรับสมการที่ 2.35 เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\lambda = \left(\frac{1}{1 - \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_{g,i,desired}}} \right) * \frac{\partial C_i(P_{g,i,desired})}{\partial P_{g,i,desired}} \quad (2.37)$$

$$\lambda = PF_i * \frac{\partial C_i(P_{g,i,desired})}{\partial P_{g,i,desired}} \quad (2.38)$$

$$\lambda_{syst} = PF_1 * \frac{\partial C_1(P_{g,1,desired})}{\partial P_{g_1}} = PF_2 * \frac{\partial C_2(P_{g,2,desired})}{\partial P_{g_2}} = \dots \quad (2.39)$$

โดยที่ PF_i คือ ค่าแฟกเตอร์การปรับค่าจากผลกระทบของความสูญเสียในระบบส่ง จากหน่วยผลิตลำดับ i และในการคำนวณโดยทั่วไป

$PF_i > 1.0$ ถ้ากำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้นจากหน่วยผลิตนั้นทำให้เกิดความสูญเสียในระบบมากขึ้น

$PF_i = 1.0$ ถ้ากำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้นจากหน่วยผลิตนั้นไม่ทำให้เกิดความสูญเสียในระบบ

$PF_i < 1.0$ ถ้ากำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้นจากหน่วยผลิตนั้นทำให้เกิดความสูญเสียในระบบลดลง

ตัวอย่างเช่นถ้าโหลดส่วนใหญ่ที่อยู่ในเขตภาคกลางของประเทศไทยต้องการกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 1 เมกกะวัตต์ ซึ่งถ้าทำการเพิ่มกำลังการผลิตของหน่วยผลิตไฟฟ้าที่อยู่ไกลออกไป เช่นหน่วยผลิตไฟฟ้าแม่เมาะเนื่องจากมีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าต่ำ เพื่อให้ระบบมีความสมดุลในสถานะการไหลของพลังงานและชดเชยค่าความถี่ที่เบี่ยงเบนออกไป จะพบว่าจะต้องมีการส่งผ่านพลังงานผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเข้ามาสู่ศูนย์กลางโหลดมากขึ้น ทำให้เกิดความสูญเสียพลังงานอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นถ้าพิจารณาผลของค่าแฟกเตอร์การปรับโทษร่วมกับค่าอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นในแต่ละหน่วยผลิต ดังสมการที่ 2.39 จะมีการปรับเปลี่ยนค่าจากผลของแฟกเตอร์ดังกล่าวให้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงโดยสะท้อนตามค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ เช่นจากสถานะตามตัวอย่างการเพิ่มกำลังการผลิตที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ ทำให้ความสูญเสียในระบบมีค่ามากขึ้น ดังนั้นค่าแฟกเตอร์การปรับโทษจะมีค่ามากกว่า 1 และเมื่อพิจารณาร่วมกับค่าอัตราต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าดังกล่าวมีค่าสูงขึ้นจากเดิม ส่งผลให้การพิจารณาตั้งเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป โดยพิจารณาค่าจากหน่วยผลิตไฟฟ้าอื่นที่มีค่าถูกกว่า ทั้งนี้หน่วยผลิตไฟฟ้าที่อยู่ใกล้จุดศูนย์กลางโหลดอาจจะได้รับการสั่งเพิ่มกำลังการผลิต ถ้าค่าผลของการปรับโทษดังกล่าวมีค่าถูกกว่าค่าจากหน่วยผลิตไฟฟ้าที่อยู่ไกลออกไป ซึ่งค่าแฟกเตอร์การปรับโทษอาจมีค่าน้อยกว่า 1 ได้ ถ้าการเพิ่มกำลังการผลิตของหน่วยผลิตนั้นทำให้เกิดความสูญเสียในระบบส่งน้อยลงจากเดิม ซึ่งอาจพบเห็นได้มากในหน่วยผลิตที่อยู่ใกล้กับศูนย์กลางโหลด ทั้งนี้ ถ้าหน่วยผลิตไฟฟ้าใดมีกำลังผลิตสูงถึงขีดจำกัดของการผลิตไฟฟ้าจากสมการ 2.24

$$\lambda_{\text{syst}} \geq PF_i * \frac{\partial C_i(P_{g,i,\text{desired}})}{\partial P_{g_i}} \quad (2.31)$$

และถ้าหน่วยผลิตไฟฟ้าใดมีกำลังผลิตต่ำถึงขีดจำกัดของการผลิตไฟฟ้าจากสมการ 2.25

$$\lambda_{\text{syst}} \leq PF_i * \frac{\partial C_i(P_{g,i,\text{desired}})}{\partial P_{g_i}} \quad (2.32)$$

รูปที่ 2.28-2.30 แสดงตัวอย่างการจัดกำลังการผลิตไฟฟ้าในระบบขนาด 7 บัส โดยเมื่อพิจารณาการจัดกำลังการผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ด้านบน ซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่องจ่ายไฟฟ้าเข้าในระบบ รูปที่ 2.28 แสดงตัวอย่างการจัดกำลังการผลิตของแต่ละหน่วยผลิตรวมถึงสถานะการ

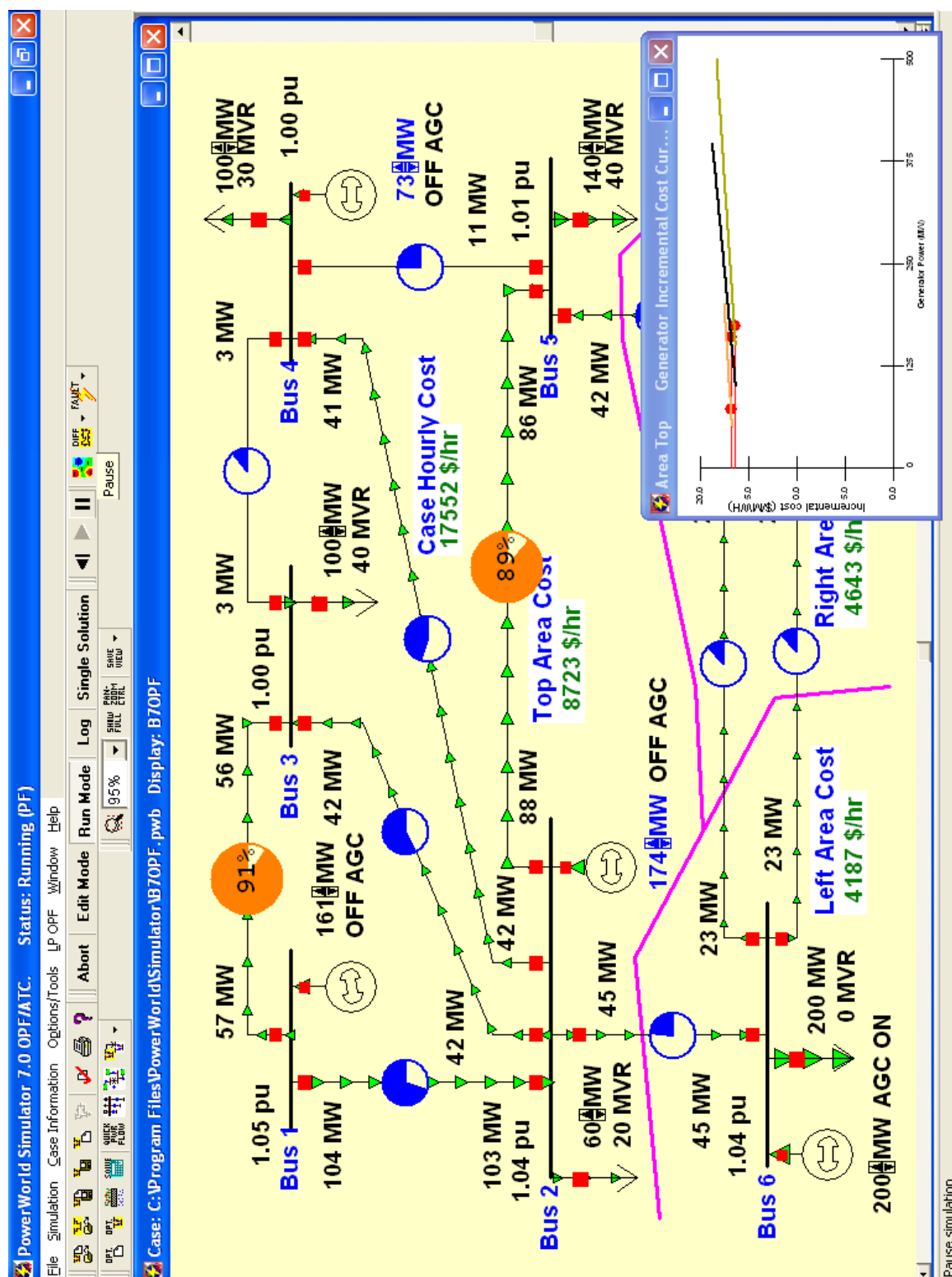
ไหลของพลังงานในระบบเมื่อการจัดกำลังการผลิตดังกล่าวไม่คำนึงความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งจะพบว่าต้นทุนการผลิตรวมที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า ณ. เวลาดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 8,723 เหรียญ (สหรัฐอเมริกา) ต่อชั่วโมง แต่ถ้าจัดกำลังการผลิตในแต่ละหน่วยผลิตใหม่ให้ค่าแลมป์ดาของทุกหน่วยมีค่าเท่ากัน ดังรูปที่ 2.29 จะพบว่าต้นทุนการผลิตรวมมีค่าลดลงเหลือ 8,667 เหรียญต่อชั่วโมง โดยที่ระบบยังคงสามารถจ่ายกำลังงานไฟฟ้าตามค่าโหลดที่ต้องการได้ รูปที่ 2.30 แสดงสถานะการจ่ายกำลังงานไฟฟ้าที่มีค่าสูงขึ้น แต่ยังจัดกำลังการผลิตตามหลักการจัดค่าแลมป์ดาให้มีค่าเท่ากันระบบ ซึ่งส่งผลให้เกิดของสถานะการไหลของพลังงานไฟฟ้าที่เกิดพิถัยความสามารถของสายส่งไฟฟ้าที่รองรับได้ (สายส่งจากบัส 2 ไปยังบัส 5) ซึ่งเป็นจุดค้อยของวิธีการจัดกำลังการผลิตโดยจัดค่าแลมป์ดาให้มีค่าเท่ากันทั้งระบบ ที่ไม่สามารถรองรับข้อจำกัดดังกล่าว โดยต้องปรับรูปแบบการจัดกำลังการผลิตใหม่โดยใช้วิธีอื่น เช่น การจัดกำลังการผลิตให้มีรูปแบบการไหลของพลังงานที่เหมาะสม (ออปติมอลเพาเวอร์โฟลว์) เป็นต้น

2.7 ปัญหาการจัดกำลังการผลิตไฟฟ้าในลักษณะไดเนมิก

เป้าหมายของการจัดกำลังการผลิตให้คุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์คือการปรับกำลังการผลิตของหน่วยผลิตไฟฟ้าที่ขนานอยู่ในระบบ ให้เพียงพอต่อความต้องการโหลดสุทธิในพื้นที่ โดยให้ต้นทุนราคาเชื้อเพลิงรวมทุกหน่วยผลิต มีค่าต่ำที่สุด ถ้าพิจารณาการจัดกำลังการผลิตโดยทั่วไปที่จัดอยู่ในลักษณะ “สเตติก” นั้น ไม่สามารถใช้วางแผนการผลิตล่วงหน้า (ร่วมกับค่าพยากรณ์แนวโน้มความต้องการโหลด) ได้ ซึ่งการจัดกำลังการผลิตล่วงหน้า หรือการจัดกำลังการผลิตในลักษณะ “ไดเนมิก” นอกจากจะช่วยลดปัญหาต่างๆ จากการจัดกำลังการผลิตแบบเดิม เช่น ปัญหาความแตกต่างระหว่างค่าความต้องการโหลดที่เปลี่ยนแปลงอยู่ ณ. เวลาจริงและค่าความต้องการโหลดที่นำมาใช้ในการคำนวณ แล้ว จะยังช่วยปรับกำลังการผลิตให้สอดคล้องกับโหลดที่จะเกิดขึ้นในอนาคตอันใกล้อีกด้วย โดยคำนึงถึงข้อจำกัดอัตราการเพิ่ม/ลดกำลังผลิตไฟฟ้าในช่วงเวลาหนึ่ง อีกทั้งถ้าโหลดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว การจัดกำลังการผลิตในลักษณะ “ไดเนมิก” จะช่วยให้การวางแผนการปรับกำลังการผลิต รวมทั้งการควบคุมการผลิตไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ มีประสิทธิภาพสูงขึ้น จากการพิจารณาค่าความต้องการโหลดปัจจุบันร่วมกับค่าความต้องการโหลดในอนาคตอันใกล้

กรรมวิธีการคำนวณการจัดกำลังการผลิตไฟฟ้าในลักษณะไดเนมิก เป็นการปรับกำลังการผลิตไฟฟ้าล่วงหน้าโดยนำผลการทำนายการเปลี่ยนแปลงของโหลดระยะสั้นมาใช้ในการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตของหน่วยผลิตไฟฟ้า ในคาบเวลาที่พิจารณา ภายใต้ข้อจำกัดในการเพิ่ม/ลดกำลังการผลิตในช่วงระยะเวลาหนึ่งจากหน่วยผลิตไฟฟ้านั้น

ถ้ากำหนดให้มีจำนวนหน่วยผลิตไฟฟ้าที่สามารถควบคุมกำลังการผลิตได้เท่ากับ n และมีความต้องการโหลดล่วงหน้าจากการทำนายโหลด (ประมาณ 1-2 ชั่วโมง หรือ มากกว่านั้น) ในลักษณะเป็นขั้นตามช่วงเวลา $t = 0, 1, 2, \dots$ จนถึงคาบเวลาในการคำนวณ T การคำนวณการจัดกำลังการผลิต



รูปที่ 2.28 ตัวอย่างสถานะการควบคุมระบบเมื่อไม่คำนึงถึงความคุ้มทุนในทางเศรษฐศาสตร์

ไฟฟ้าจะพิจารณาค่าความต้องการโหลดสุทธิในพื้นที่ รวมถึงปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่แลกเปลี่ยนจากพื้นที่อื่น ดังสมการต่อไปนี้

$$\sum_{i=1}^n P_{g,i}(t) = NETG(t), \quad t = 0, 1, \dots, T \quad (2.33)$$

โดยที่กำลัการผลิตของหน่วยผลิตไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

$$P_{g,i}(t+1) = P_{g,i}(t) + \Delta P_{g,i}(t) \quad (2.34)$$

อีกทั้งอัตราการเปลี่ยนกำลัการผลิตจะต้องอยู่ในขีดจำกัดที่หน่วยผลิตไฟฟ้าสามารถผลิตได้จริง

$$DR_i \leq \Delta P_{g,i} \leq UR_i \quad (2.35)$$

และสิ่งที่สำคัญที่พิจารณา คือค่าต้นทุนราคาเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าตลอดคาบที่พิจารณา

$$C_{T,i} = \sum_{t=1}^T C_i(P_{g,i}(t)) \quad (2.36)$$

การจัดกำลัการผลิตในลักษณะ “ไดแนมิก” นั้น จะคำนวณหากำลัการผลิตที่เหมาะสมตลอดคาบเวลาที่พิจารณา จากค่ากำลัการผลิตของทุกหน่วยที่เปลี่ยนแปลงไปตามขั้นเวลา ($\Delta P_{g,i}(t)$) โดยที่หน่วยผลิตไฟฟ้ามีค่ากำลัการผลิตเริ่มต้นเท่ากับ $P_{g,i}(0)$ โดยการคำนวณหาที่น้อยที่สุดของสมการต้นทุนราคาเชื้อเพลิงรวม

$$C_T = \sum_{i=1}^n C_{T,i} = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T C_i(P_{g,i}(t)) \quad (2.37)$$

ภายใต้ข้อจำกัดในการผลิตไฟฟ้าตามสมการข้อจำกัดต่างๆ

2.8 สมการความสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในระบบส่ง

ขบวนการที่สำคัญในการคำนวณหาสภาวะการจัดกำลัการผลิตที่คุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์คือการหาสมการความสูญเสียในระบบส่งให้อยู่ในฟังก์ชันของกำลัการผลิตในแต่ละหน่วยผลิตไฟฟ้า ซึ่งโดยทั่วไปนั้นจะสามารถคำนวณหาฟังก์ชันดังกล่าวได้หลายวิธี โดยที่วิธีหนึ่งซึ่งถูกนำเสนอโดย Kron และ Kirchmayer ได้นำมาใช้คำนวณหาสัมประสิทธิ์ความสูญเสียในระบบส่งไฟฟ้า แสดงได้ดังต่อไปนี้

ถ้ากำหนดให้จำนวนกำลัไฟฟ้าปรากฏ, S_i , โหลดเข้าที่บัส i ดังสมการ

$$S_i = P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2.38)$$

ผลรวมของกำลังไฟฟ้าในทุกบัสจะแสดงถึงค่าความสูญเสียในระบบส่งไฟฟ้า ดังสมการ

$$P_L + jQ_L = \sum_{i=1}^n V_i I_i^* = V_{bus}^T I_{bus}^T \quad (2.39)$$

โดยที่ P_L คือ ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าแอกทีฟของระบบส่งไฟฟ้าทั้งระบบ
 Q_L คือ ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของระบบส่งไฟฟ้าทั้งระบบ
 V_{bus} คือ เวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัส
 I_{bus} คือ เวกเตอร์ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่บัส

ถ้าจัดรูปเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าใหม่ให้อยู่ในรูป

$$V_{bus} = Y_{bus}^{-1} I_{bus} = Z_{bus} I_{bus} \quad (2.40)$$

โดยที่ส่วนกลับของเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์ในสมการ 2.39 แสดงถึงเมตริกซ์บัสอิมพีแดนซ์ และค่าของเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์จะมีลักษณะไม่เป็นซิงกูลาร์ถ้ามีส่วนของโครงข่ายที่ต่อขนานโดยตรงกับกราวด์ (บัสลำดับ 0) เช่นค่าชั้สเซบแดนซ์ของคาปาซิเตอร์

โดยทั่วไปนั้นเมตริกซ์บัสแอดมิตแตนซ์จะมีลักษณะสปราย กล่าวคือ ค่าในเมตริกซ์จะรวมอยู่ในค่าทแยงมุม ($Y_{bus}(i, j): i = j$) เป็นส่วนใหญ่ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมโยงของบัสต่างๆ ที่อยู่ใกล้กัน

ถ้าแทนสมการ 2.40 ลงในสมการ 2.39 จะได้

$$\begin{aligned} P_L + jQ_L &= [Z_{bus} I_{bus}]^T I_{bus}^* \\ &= I_{bus}^T Z_{bus}^T I_{bus}^* \end{aligned} \quad (2.41)$$

เมตริกซ์ Z_{bus} ที่ได้มีลักษณะสมมาตร ดังนั้น $Z_{bus} = Z_{bus}^T$ และสมการความสูญเสียในระบบส่งจะกลายเป็น

$$P_L + jQ_L = I_{bus}^T Z_{bus} I_{bus}^* \quad (2.42)$$

โดยที่สมการดังกล่าวสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของดัชนีเมตริกซ์ดังนี้

$$P_L + jQ_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_i Z_{ij} I_j^* \quad (2.43)$$

และจากคุณลักษณะความสมมาตรของเมตริกซ์บัสอิมพีแดนซ์ จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$P_L + jQ_L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Z_{ij} (I_i I_j^* + I_j I_i^*) \quad (2.44)$$

จะพบว่าค่าในวงเล็บจากสมการ 2.44 จะเป็นค่าจำนวนจริง ดังนั้นค่าความสูญเสียในระบบส่งสามารถแยกออกได้เป็นส่วนประกอบค่าจำนวนจริงและค่าจำนวนจินตภาพ ดังต่อไปนี้

$$P_L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} (I_i I_j^* + I_j I_i^*) \quad (2.45)$$

$$Q_L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{ij} (I_i I_j^* + I_j I_i^*) \quad (2.46)$$

โดยที่ค่า R_{ij} และ X_{ij} คือส่วนประกอบค่าจำนวนจริงและค่าจำนวนจินตภาพของเมตริกซ์บัสอิมพีแดนซ์ ตามลำดับ และถ้า $R_{ij} = R_{ji}$ สมการความสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริงในระบบส่งสามารถแปลงกลับไปเป็น

$$P_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_i R_{ij} I_j^* \quad (2.47)$$

หรือถ้าจัดให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ จะได้

$$P_L = I_{bus}^T R_{bus} I_{bus}^* \quad (2.48)$$

โดยที่ R_{bus} คือส่วนประกอบค่าจำนวนจริงของเมตริกซ์บัสอิมพีแดนซ์

ในการสร้างสมการของความสูญเสียในระบบส่งให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของกำลังไฟฟ้าแอคทีฟในแต่ละหน่วยผลิตนั้น จะพิจารณาได้จากกระแสโหลดรวม ดังสมการ

$$I_{L1} + I_{L2} + \dots + I_{Ln_d} = I_D \quad (2.49)$$

โดยที่ n_d คือจำนวนของบัสโหลด และ I_D คือกระแสโหลดรวม

ถ้ากำหนดให้ค่ากระแสไหลในแต่ละบัสมีค่าเป็นสัดส่วนกับค่ากระแสไหลรวม

$$I_{Lk} = l_k I_D \quad k=1, 2, \dots, n_d \quad (2.50)$$

และถ้ากำหนดบัส 1 เป็นบัสอ้างอิง (สแลคค์บัส) จะได้สมการ

$$V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 + \dots + Z_{1n}I_{Ln} \quad (2.51)$$

ซึ่งถ้ากำหนดให้ n_g คือจำนวนบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สมการข้างต้นสามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของกระแสไหลและกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นดังนี้

$$V_1 = \sum_{i=1}^{n_g} Z_{1i} I_{gi} + \sum_{k=1}^{n_d} Z_{1k} I_{Lk} \quad (2.52)$$

แทน I_{Lk} ในสมการ 2.50 ลงในสมการ 2.52 จะได้

$$\begin{aligned} V_1 &= \sum_{i=1}^{n_g} Z_{1i} I_{gi} + I_D \sum_{k=1}^{n_d} l_k Z_{1k} \\ &= \sum_{i=1}^{n_g} Z_{1i} I_{gi} + I_D T \end{aligned} \quad (2.53)$$

โดยที่

$$T = \sum_{k=1}^{n_d} l_k Z_{1k} \quad (2.54)$$

ถ้ากำหนดให้ I_0 คือค่ากระแสที่ไหลออกจากบัส 1 โดยที่กระแสไหลที่บัสอื่นมีค่าเป็น 0 จะทำให้

$$V_1 = -Z_{11}I_0 \quad (2.55)$$

แทนค่าสมการ V_1 ในสมการ 2.53 และคำนวณหาค่า I_D จะได้

$$I_D = -\frac{1}{T} \sum_{i=1}^{n_g} Z_{1i} I_{gi} - \frac{1}{T} Z_{11} I_0 \quad (2.56)$$

จากนั้นแทนค่า I_D ที่ได้ลงในสมการ 2.50 ค่ากระแสไหลคสามารถเขียนได้เป็น

$$I_{Lk} = -\frac{l_k}{T} \sum_{i=1}^{n_g} Z_{1i} I_{gi} - \frac{l_k}{T} Z_{11} I_0 \quad (2.57)$$

ซึ่งถ้า

$$\rho = -\frac{l_k}{T} \quad (2.58)$$

ดังนั้น

$$I_{Lk} = \rho_k \sum_{i=1}^{n_g} Z_{1i} I_{gi} + \rho_k Z_{11} I_0 \quad (2.59)$$

ค่ากระแสทั้งหมดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_{g1} \\ I_{g2} \\ \vdots \\ I_{gn_g} \\ I_{L1} \\ I_{L2} \\ \vdots \\ I_{Ln_d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ \rho_1 Z_{11} & \rho_1 Z_{12} & \cdots & \rho_1 Z_{1n_g} & \rho_1 Z_{11} \\ \rho_2 Z_{11} & \rho_2 Z_{12} & \cdots & \rho_2 Z_{1n_g} & \rho_2 Z_{11} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \rho_k Z_{11} & \rho_k Z_{12} & \cdots & \rho_k Z_{1n_g} & \rho_k Z_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{g1} \\ I_{g2} \\ \vdots \\ I_{gn_g} \\ I_0 \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

ถ้าแทนเมตริกซ์ข้างต้นด้วยตัวแปร C จะได้

$$I_{bus} = CI_{new} \quad (2.61)$$

นำค่า I_{bus} แทนค่าลงในสมการ 2.48 ดังนั้น

$$\begin{aligned} P_L &= [CI_{new}]^T R_{bus} C^* I_{new}^* \\ &= I_{new}^T C^T R_{bus} C^* I_{new}^* \end{aligned} \quad (2.62)$$

โดยถ้า S_{gi} คือค่ากำลังไฟฟ้าที่บัส i กระแสของหน่วยผลิตไฟฟ้าคือ

$$I_{gi} = \frac{S_{gi}^*}{V_i^*} = \frac{P_{gi} - jQ_{gi}}{V_i^*} \quad (2.63)$$

$$1 - j \frac{Q_{gi}}{P_{gi}} = \frac{P_{gi}}{V_i^*} P_{gi}$$

หรือ

$$I_{gi} = \psi_i P_{gi} \quad (2.64)$$

โดยที่

$$\psi_i = \frac{1 - j \frac{Q_{gi}}{P_{gi}}}{V_i^*} \quad (2.65)$$

ถ้าเพิ่มค่ากระแส I_0 ลงในเวกเตอร์กระแส I_{gi} จะได้

$$\begin{bmatrix} I_{g1} \\ I_{g2} \\ \vdots \\ I_{gn_g} \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \psi_2 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \psi_{n_g} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & I_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ \vdots \\ P_{gn_g} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.66)$$

หรือ

$$I_{new} = \Psi P_{G1} \quad (2.65)$$

โดยที่

$$P_{G1} = \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ \vdots \\ P_{gn_g} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.66)$$

นำสมการ 2.65 แทนลงในสมการ 2.62 สมการความสูญเสียในระบบส่งจะได้เป็น

$$\begin{aligned} P_L &= [\Psi P_{G1}]^T C^T R_{bus} C^* \Psi^* P_{G1}^* \\ &= P_{G1}^T \Psi^T C^T R_{bus} C^* \Psi^* P_{G1}^* \end{aligned} \quad (2.67)$$

โดยค่าเมตริกซ์ที่ได้นั้นจะอยู่ในรูปค่าตัวประกอบเชิงซ้อน ซึ่งถ้าพิจารณาค่าความสูญเสียในระบบส่งที่อยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้าแอคทีฟเพียงอย่างเดียว จะได้จากส่วนประกอบจำนวนจริงจากสมการข้างต้น

$$P_L = P_{G1}^T \Re[H] P_{G1}^* \quad (2.68)$$

โดยที่

$$H = \Psi^T C^T R_{bus} C^* \Psi^* \quad (2.69)$$

เนื่องจากส่วนประกอบของเมตริกซ์ H เป็นค่าจำนวนเชิงซ้อน ดังนั้นจะใช้เพียงส่วนประกอบค่าจำนวนจริงในการคำนวณหาค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าแอมป์ในระบบส่ง โดยเมตริกซ์ H จะเรียกว่าเฮอริมีตเตียนต์เมตริกซ์ ซึ่งหมายความว่าเมตริกซ์ H มีลักษณะสมมาตร และ $H = H^*$ ดังนั้นค่าจำนวนจริงของเมตริกซ์ H จะสามารถคำนวณได้จาก

$$\Re[H] = \frac{H + H^*}{2} \quad (2.70)$$

ถ้าเขียน $\Re[H]$ ให้อยู่ในรูปเมตริกซ์

$$\Re[H] = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1n_g} & B_{01}/2 \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2n_g} & B_{02}/2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ B_{n_g 1} & B_{n_g 2} & \cdots & B_{n_g n_g} & B_{0n_g}/2 \\ B_{01}/2 & B_{02}/2 & \cdots & B_{0n_g}/2 & B_{00} \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

แทนค่าลงในสมการ 2.68 จะได้

$$P_L = \begin{bmatrix} P_{g1} & P_{g2} & \cdots & P_{gn_g} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1n_g} & B_{01}/2 \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2n_g} & B_{02}/2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ B_{n_g 1} & B_{n_g 2} & \cdots & B_{n_g n_g} & B_{0n_g}/2 \\ B_{01}/2 & B_{02}/2 & \cdots & B_{0n_g}/2 & B_{00} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ \cdots \\ P_{gn_g} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

หรือ

$$P_L = \begin{bmatrix} P_{g1} & P_{g2} & \cdots & P_{gn_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1n_g} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2n_g} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{n_g 1} & B_{n_g 2} & \cdots & B_{n_g n_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ \cdots \\ P_{gn_g} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{g1} & P_{g2} & \cdots & P_{gn_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{01}/2 \\ B_{02}/2 \\ \cdots \\ B_{0n_g}/2 \end{bmatrix} + B_{00} \quad (2.73)$$

โดยสมการความสูญเสียพลังงานไฟฟ้าดังกล่าวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{i,desired} B_{ij} B_j + \sum_{i=1}^n B_{i0} P_{i,desired} + B_{00} \quad (2.74)$$

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_{i,desired}} = \frac{1}{1 - 2 \sum_j B_{ij} P_j - B_{i0}} \quad (2.75)$$

โดยที่ B_{ij}, B_{i0}, B_{00} คือ สัมประสิทธิ์ความสูญเสียในระบบส่งไฟฟ้า