บทที่ 3

การจ่ายโหลดอย่างประหยัด

3.1 บทนำ

ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด(Economic Load Dispatch)เกิดขึ้นเมื่อมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากกว่า 1 เครื่องขึ้นไปจ่ายโหลดร่วมกันอยู่ จะต้องจัดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องใดจ่ายโหลดเท่าไร ระบบจึงจะมีประสิทธิภาพและประหยัดที่สุด คำว่าประหยัดที่สุดจะหมายความว่าต้นทุนการผลิตรวมของระบบมีค่าน้อยที่สุด

ในยุคแรก(ต้นทศวรรษที่ 1930) วิธีการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่ใช้กันคือ equal incremental cost load dispatch ซึ่งเป็นวิธีที่ละเลยกำลังสูญเสียในระบบส่ง (transmission loss) ต่อมาเมื่อระบบไฟฟ้ากำลังขยายใหญ่ขึ้น มีการส่งพลังงานไฟฟ้าไปเป็นระยะทางไกลๆ ทำให้กำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นและมีผลต่อการจ่ายโหลดอย่างประหยัด จึงได้มีการพัฒนาวิธีการที่จะนำเอาผลของกำลังสูญเสียมาคิดด้วย วิธีการที่ได้รับการนิยมในยุคนั้น(ค.ศ. 1940) คือวิธีการของKirchmayerและStaggที่นำงานของKronมาปรับปรุงวิธีการดังกล่าวเรียกว่าวิธีB-coefficient [1,2]

ในช่วงปลายทศวรรษที่ 1950 Newton-Raphson load flowได้รับการพัฒนาจนเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป จึงได้มีการพัฒนาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่คิดผลของกำลังสูญเสียจากโหลดโฟลว์ของระบบ วิธีการนี้สะดวกและเหมาะที่จะทำการคำนวนโดยคอมพิวเตอร์

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีแต่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบพลังความร้อน ทั้งแบบที่ไม่คิดกำลังสูญเสียและแบบที่คิดผลของกำลังสูญเสียจากโหลดโฟลว์ของระบบ ส่วนการจ่ายโหลดอย่างประหยัดของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำ จะอยู่ในภาคผนวก ก.

3.2 การจ่ายโหลดอย่างประหยัดกรณีที่ไม่คิดกำลังสูญเสีย [1,2,3]

3.2.1 ต้นทุนการผลิตของระบบ

ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดคือการที่จะจัดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องใดจ่ายโหลดเท่าไร จึงจะทำให้ต้นทุนการผลิตรวมของระบบต่ำที่สุด

ถ้าให้ C_i เป็นต้นทุนการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจะมีผลอย่างมากต่อต้นทุนการผลิต ดังนั้นต้นทุนการผลิตจะเป็นฟังก์ชันของกำลังไฟฟ้าที่ผลิต หรือ

$$C_i = C_i(P_{Gi}) \qquad (3.1)$$

โดยที่ P_{Gi} เป็นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i

ฟังก์ชันต้นทุนการผลิตตามสมการที่ 3.1 เรียกว่า cost function ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของฟังก์ชันโพลิโนเมียล(polynomial function)ดังสมการ

$$C_i = a_i + b_iP_{Gi} + c_iP_{Gi}^2 + d_iP_{Gi}^3 + \ldots \qquad (3.2)$$

ต้นทุนการผลิตรวมของระบบคือผลรวมของต้นทุนการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง หรือ

$$C = \sum_{i=1}^{N} C_i$$

$$= C_1(P_{G1}) + C_2(P_{G2}) + \ldots + C_N(P_{GN}) \qquad (3.3)$$

เมื่อ C เป็นต้นทุนการผลิตรวมของระบบ

จะเห็นได้ว่าต้นทุนการผลิตรวมของระบบเป็นฟังก์ชันของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง หรือ

$$C = C(P_{G1}, P_{G2}, \ldots, P_{GN}) \qquad (3.4)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เนื่องจากการจ่ายโหลดอย่างประหยัดคือการทำให้ต้นทุนการผลิตรวมของระบบมีค่าต่ำที่สุด ดังนั้นต้นทุนการผลิตรวมของระบบ(C)จึงเป็นobjective function

2.2.2 เงื่อนไขบังคับ(Constraints)

เนื่องจากระบบจะต้องจ่ายโหลดให้พอเพียง ดังนั้นถ้าหากไม่คิดกำลังสูญเสีย กำลังไฟฟ้าที่ผลิตรวมของระบบจะต้องเท่ากับโหลด หรือ

$$f = \sum_{i=1}^{N} P_{Gi} - P_D = 0 \qquad (3.5)$$

เมื่อ P_D เป็นโหลดจริงของระบบ ซึ่งเท่ากับผลรวมของโหลดที่แต่ละบัส หรือ

$$P_D = \sum_{i=1}^{N} P_{Di} \qquad (3.6)$$

เมื่อ P_{Di} เป็นโหลดจริงที่บัส i ซึ่งจะสมมติให้คงที่ตลอดการทำการจ่ายโหลดอย่างประหยัด สมการที่ 3.5 เป็นเงื่อนไขบังคับซึ่งเป็นเงื่อนไขบังคับแบบสมการ(equlity constraint)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องจะมีขีดจำกัด เช่น จะต้องจ่ายโหลดมากกว่าค่าๆหนึ่ง และจะจ่ายโหลดได้ไม่เกินค่าๆหนึ่ง หรือ

$$P_{Gimin} < P_{Gi} < P_{Gimax} \qquad (3.7)$$

อสมการที่ 3.7 เป็นเงื่อนไขบังคับแบบอสมการ(inequality constraint)

3.2.3 Equal Incremental Cost Load Dispatch

จากหัวข้อที่ 3.2.1 และ 3.2.2 การจ่ายโหลดอย่างประหยัดเป็นการทำให้ต้นทุนการผลิตของระบบไฟฟ้ากำลังต่ำที่สุด โดยการปรับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องและมีเงื่อนไขบังคับตามสมการที่ 3.6 และ 3.7 หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งการจ่ายโหลดอย่างประหยัดเป็นการทำconstrained optimization ตามหลักคณิตศาสตร์ constrained optimizationสามารถแปลงให้เป็นunconstrained optimization ได้โดยการสร้างobjective functionใหม่เป็น augmented opjective function (C^*)ตามสมการ

$$C^* = C - \lambda f \qquad (3.8)$$

เมื่อ λ เป็นค่าคงที่เรียกว่า Lagrange multiplier

จาก Kuhn-Tucker thereom สภาวะที่จุดที่ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดจะเป็นไปตามสมการ

$$\frac{\partial C^*}{\partial P_{G_i}} = \frac{\partial C}{\partial P_{G_i}} - \lambda \frac{\partial f}{\partial P_{G_i}} = 0 \qquad (3.9)$$

เนื่องจาก C_i เป็นฟังก์ชันของ P_{G_i} เท่านั้น ดังนั้น

$$\frac{\partial C}{\partial P_{G_i}} = \frac{dC_i}{dP_{G_i}} = IC_i \qquad (3.10)$$

dC_i/dP_{G_i} เรียกว่าincremental costของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i และมีสัญลักษณ์เป็น IC_i

จากสมการที่ 3.5 เมื่อโหลดคงที่ จะได้ว่า

$$\frac{\partial f}{\partial P_{G_i}} = 1 \qquad (3.11)$$

ดังนั้นสมการที่ 3.9 จะกลายเป็น

$$\frac{dC_i}{dP_{G_i}} = IC_i = \lambda \qquad (3.12)$$

ดังนั้นจะได้สภาวะที่จุดที่ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดตามสมการที่ 3.12 ซึ่งมีความหมายว่าถ้าจะให้ต้นทุนการผลิตรวมของระบบมีค่าต่ำที่สุด จะต้องให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดที่จุดที่ incremental costเท่ากันทุกเครื่อง หรือ

$$IC_1 = IC_2 = \ldots = IC_N = \lambda \qquad (3.13)$$

การจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยใช้หลักการตามสมการที่ 3.13 เรียกว่า "equal incremental load dispatch"

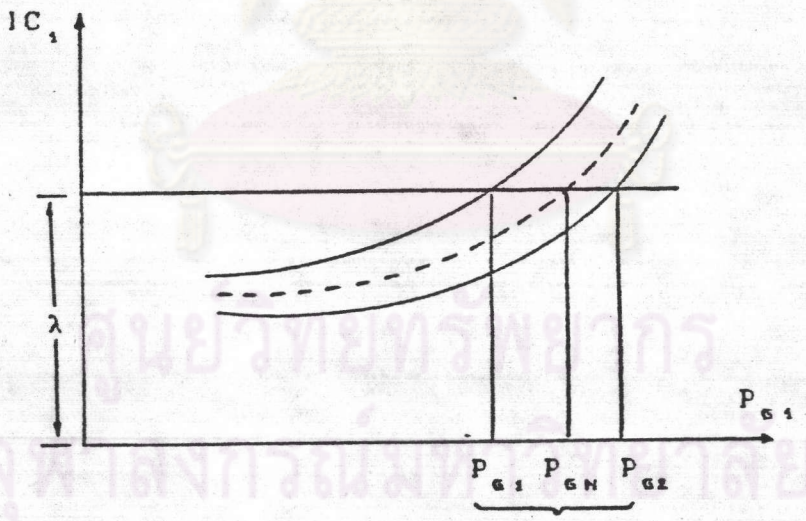
3.2.4 วิธีλ-อิทเทอร์เรชัน(λ-iteration Method)

การคำนวนค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องต่างๆ ตามหลักของequal incremental cost load dispatch สามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีหนึ่งที่ได้รับความนิยมคือวิธี λ-อิทเทอร์เรชัน ซึ่งเป็นวิธีnumerical

ถ้าให้ต้นทุนการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i (C_i) เป็นฟังก์ชันโพลีโนเมียลตามสมการที่ 3.2 IC_i ก็สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันโพลีโนเมียลได้ดังสมการ

$$IC_i = b_i + 2c_iP_{Gi} + 3d_iP_{Gi}^2 + \cdots \qquad (3.14)$$

หลักการของวิธีλ-อิทเทอร์เรชัน คือ สมมติค่า λ ขึ้น แล้วทดลองแทนลงในสมการที่ 3.14 เพื่อหาค่า PG_i ถ้าหากผลรวมของ PG_i มีค่าเท่ากับโหลด(P_D) แสดงว่าค่า λ ที่สมมติขึ้นมีค่าถูกต้อง แต่ถ้าไม่เท่าให้ทดลองสมมติค่า λ ใหม่ หลักการของวิธีλ-อิทเทอร์เรชัน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



ผลรวมของ P_{Gi} จะต้องเท่ากับ P_D

รูปที่ 3.1 รูปแสดงวิธีλ-อิทเทอร์เรชัน

ในหัวข้อที่ผ่านมา การทำการจ่ายโหลดอย่างประหยัดยังไม่ได้รวมผลของเงื่อนไขบังคับแบบอสมการเลย การรวมผลของเงื่อนไขบังคับแบบอสมการสามารถทำได้

โดยใช้หลักการง่ายๆดังต่อไปนี้

1. เมื่อคำนวนค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตที่จุดที่ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดตามวิธีการข้างต้นได้แล้ว ให้ตรวจสอบว่ามีกำลังไฟฟ้าที่ผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องใดมีค่าเกินขีดจำกัดหรือเปล่า

2. ถ้าพบว่ามีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องใดจ่ายโหลดเกิน P_{Gimax} หรือน้อยกว่า P_{Gimim} ก็ให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องนั้นมีค่าเท่ากับขีดจำกัดนั้น ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องอื่นๆ ยังคงเป็นไปตามหลักการ equal incremental cost load dispatch

จากหัวข้อข้างต้นที่ผ่านมา สามารถสรุปวิธีλ-อิทเทอร์เรชันเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. สมมติค่า λ
2. คำนวนค่า P_{Gi} ที่สอดคล้องกับค่า λ ตามสมการที่ 3.14
3. ตรวจสอบค่า P_{Gi} กับขีดจำกัด ถ้าหาก P_{Gi} มีค่าเกินขีดจำกัดใดก็ให้ P_{Gi} มีค่าเท่ากับขีดจำกัดนั้น
4. หาผลรวมของ P_{Gi} และเปรียบเทียบกับโหลด(P_D) ถ้าหากค่าผิดพลาดระหว่างผลรวมของ P_{Gi} และ P_D มีค่าน้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ แสดงว่าค่า λ ที่สมมติขึ้นถูกต้องและได้คำตอบแล้ว ถ้าค่าผิดพลาดมีค่ามากกว่าค่าที่ยอมรับได้ ให้ทำขั้นที่ 5 ต่อไป
5. ปรับค่า λ โดยใช้หลักดังต่อไปนี้ ถ้าผลรวมของ P_{Gi} มีค่ามากกว่า P_D แสดงว่าค่า λ ที่สมมติขึ้นมีค่ามากเกินไปให้ลดค่า λ ลง แต่ถ้าผลรวมของ P_{Gi} มีค่าน้อยกว่า P_D แสดงว่าค่า λ ที่สมมติขึ้นมีค่าน้อยเกินไปให้เพิ่มค่า λ ขึ้น เมื่อปรับค่า λ เรียบร้อยแล้วให้ย้อนไปทำขั้นที่ 2 ต่อไป

3.3 การจ่ายโหลดอย่างประหยัดกรณีคิดผลของกำลังสูญเสีย [2,3,4]

3.3.1 Incremental Transmission Loss

ถ้าหากคิดกำลังสูญเสีย กำลังไฟฟ้าที่ผลิตรวมของระบบจะต้องเท่ากับโหลดรวมกับกำลังสูญเสีย เงื่อนไขบังคับแบบสมการในสมการที่ 3.5 จะกลายเป็น

$$f = \sum_{i=1}^{N} P_{Gi} - P_D - P_L = 0 \qquad (3.15)$$

augmented objective functionตามสมการที่ 3.8 จะกลายเป็น

$$C^* = \sum_{i=1}^{N} C_i - \lambda[\sum_{i=1}^{N} P_{Gi} - P_D - P_L] \qquad (3.16)$$

สภาวะที่จุดต่ำที่สุดเป็นไปตามสมการ

$$\frac{\partial C^*}{\partial P_{Gi}} = \frac{\partial C_i}{\partial P_{Gi}} - \lambda + \frac{\partial P_L}{\partial P_{Gi}} = 0 \qquad (3.17)$$

$\partial P_L/\partial P_{Gi}$ เรียกว่าincremental transmission lossของบัสที่ i มีสัญญลักษณ์เป็น ITL_i ดังนั้นสมการที่ 3.17 กลายเป็น

$$IC_i = \lambda(1- ITL_i) \qquad (3.18)$$

หรือ

$$\lambda = \frac{1}{(1 - ITL_i)} IC_i \qquad (3.19)$$

$1/(1 - ITL_i)$ เรียกว่าpenalty factor มีสัญญลักษณ์เป็น Pf_i
จากสมการที่ 3.19 ถ้าจะให้ต้นทุนการผลิตรวมของระบบต่ำที่สุด การจ่ายโหลดจะต้องเป็นไปตามสมการ

$$Pf_1(IC_1) = Pf_2(IC_2) = \ldots = Pf_N(IC_N) \qquad (3.20)$$

3.2.2 <u>การหาค่าIncrementa1 Transmission Loss</u> [2]

กำลังสูญเสียของระบบสามารถหาได้จาก ผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตลบด้วยผลรวมของโหลด หรือเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_L = \sum_{i=1}^{N} (P_{Gi} - P_{Di})$$

$$= \sum_{i=1}^{N} P_i \qquad (3.21)$$

เมื่อ P_i เป็นกำลังจริงที่บัส i ตามสมการที่ 2.11

จากนิยามของ ITL_i ที่ว่า incremental transmission loss ของบัส i คือpartial derivativeของกำลังสูญเสียเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i ($\partial P_L / \partial P_{Gi}$) ดังนั้น ITL_i หมายถึงการเปลี่ยนแปลงกำลังสูญเสียเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตที่บัส i โดยที่กำลังไฟฟ้าที่ผลิตที่บัสอื่นๆคงที่ อย่างไรก็ตาม จากข้อสมมติที่ว่าโหลดคงที่ ดังนั้นถ้ามีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตที่บัส i กำลังไฟฟ้าที่ผลิตที่บัสอื่นๆจะคงที่หมดทุกบัสย่อมเป็นไปไม่ได้ จะต้องมีกำลังไฟฟ้าที่ผลิตที่บัสหนึ่งเปลี่ยนแปลง และบัสนั้นก็คือสวิงบัสหรือบัสอ้างอิง

สมมติว่า กำลังไฟฟ้าที่ผลิตที่บัส i เปลี่ยนแปลงไปเท่ากับΔP_{Gi} หรือ

$$P_{Gi}^{new} = P_{Gi}^{old} + \Delta P_{Gi} \qquad (3.22)$$

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตที่บัสอ้างอิงจะเปลี่ยนแปลงไปเท่ากับΔP_{Gsw} หรือ

$$P_{Gsw}^{new} = P_{Gsw}^{old} + P_{Gsw} \qquad (3.23)$$

ถ้ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตที่บัสอื่นๆนอกจากบัส i และบัสอ้างอิงคงที่ และไม่มีการเปลี่ยนแปลงอื่นๆ ΔP_{Gsw} ควรจะเท่ากับค่าลบของ ΔP_{Gi} แต่ที่แท้จริงแล้วเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตที่บัส i จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงกำลังสูญเสียด้วย ถ้ากำลังสูญเสียเปลี่ยนแปลงไปเท่ากับ ΔP_L จะได้ว่า

$$\Delta P_{Gsw} = -\Delta P_{Gi} + \Delta P_L \qquad (3.24)$$

หารตลอดสมการที่ 3.24 ด้วย $-\Delta P_{Gi}$ จะได้

$$-\frac{\Delta P_{Gsw}}{\Delta P_{Gi}} = 1 - \frac{\Delta P_L}{\Delta P_{Gi}} \qquad (3.25)$$

หรือ

$$-\frac{\partial P_{GSW}}{\partial P_{G1}} = 1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{G1}} \qquad (3.26)$$

จากกำลังที่บัสอ้างอิงเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตที่บัสอ้างอิงลบด้วยโหลดที่บัสอ้างอิง หรือ

$$P_{SW} = P_{GSW} - P_{DSW} \qquad (3.27)$$

หาpartial dirivativeของสมการที่ 3.27 เทียบกับ P_{G1} จะได้

$$\frac{\partial P_{SW}}{\partial P_{G1}} = \frac{\partial P_{GSW}}{\partial P_{G1}} + \frac{\partial P_{DSW}}{\partial P_{G1}} \qquad (3.28)$$

แต่เนื่องจากโหลดคงที่ ดังนั้น $\partial P_{DSW}/\partial P_{G1} = 0$ นั้นคือ

$$\frac{\partial P_{GSW}}{\partial P_{G1}} = \frac{\partial P_{SW}}{\partial P_{G1}} \qquad (3.29)$$

จากกฎลูกโซ่

$$\frac{\partial P_{SW}}{\partial P_{G1}} = \frac{\partial P_{SW}}{\partial P_1}\frac{\partial P_1}{\partial P_{G1}} \qquad (3.30)$$

แต่เนื่องจาก

$$\frac{\partial P_1}{\partial P_{G1}} = 1 \qquad (3.31)$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial P_{SW}}{\partial P_{G1}} = \frac{\partial P_{SW}}{\partial P_1} \qquad (3.32)$$

จากสมการที่ 3.26, 3.29 และ 3.32 จะได้ว่า

$$1 - ITL_1 = -\frac{\partial P_{SW}}{\partial P_1} \qquad (3.33)$$

จากสมการที่ 2.27 P_{SW} เป็นฟังก์ชันของขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

และจากกฎลูกโซ่ จะได้ว่า

$$\frac{\partial P_{sw}}{\partial P_1} = \frac{\partial P_{sw}}{\partial \theta_1}\frac{\partial \theta_1}{\partial P_1} + \cdots + \frac{\partial P_{sw}}{\partial \theta_N}\frac{\partial \theta_N}{\partial P_1} + \frac{\partial P_{sw}}{\partial V_1}\frac{\partial V_1}{\partial P_1} + \cdots + \frac{\partial P_{sw}}{\partial V_N}\frac{\partial V_N}{\partial P_1}$$

$$\vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots$$

$$\frac{\partial P_{sw}}{\partial P_N} = \frac{\partial P_{sw}}{\partial \theta_1}\frac{\partial \theta_1}{\partial P_N} + \cdots + \frac{\partial P_{sw}}{\partial \theta_N}\frac{\partial \theta_N}{\partial P_N} + \frac{\partial P_{sw}}{\partial V_1}\frac{\partial V_1}{\partial P_N} + \cdots + \frac{\partial P_{sw}}{\partial V_N}\frac{\partial V_N}{\partial P_N} \qquad (3.34)$$

และ

$$\frac{\partial P_{sw}}{\partial Q_1} = \frac{\partial P_{sw}}{\partial \theta_1}\frac{\partial \theta_1}{\partial Q_1} + \cdots + \frac{\partial P_{sw}}{\partial \theta_N}\frac{\partial \theta_N}{\partial Q_1} + \frac{\partial P_{sw}}{\partial V_1}\frac{\partial V_1}{\partial Q_1} + \cdots + \frac{\partial P_{sw}}{\partial V_N}\frac{\partial V_N}{\partial Q_1}$$

$$\vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots$$

$$\frac{\partial P_{sw}}{\partial Q_N} = \frac{\partial P_{sw}}{\partial \theta_1}\frac{\partial \theta_1}{\partial Q_N} + \cdots + \frac{\partial P_{sw}}{\partial \theta_N}\frac{\partial \theta_N}{\partial Q_N} + \frac{\partial P_{sw}}{\partial V_1}\frac{\partial V_1}{\partial Q_N} + \cdots + \frac{\partial P_{sw}}{\partial V_N}\frac{\partial V_N}{\partial Q_N} \qquad (3.35)$$

สมการที่ 3.34 และ 3.35 สามารถเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{sw}}{\partial P_1} \\ \hline \frac{\partial P_{sw}}{\partial Q_1} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} \frac{\partial \theta_1}{\partial P_1} & \frac{\partial V_1}{\partial P_1} \\ \hline \frac{\partial \theta_1}{\partial Q_1} & \frac{\partial V_1}{\partial Q_1} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{sw}}{\partial \theta_1} \\ \hline \frac{\partial P_{sw}}{\partial V_1} \end{bmatrix} \qquad (3.36)$$

เมทริกซ์ $[\partial\theta_1/\partial P_1, \partial V_1/\partial P_1, \partial\theta_1/\partial Q_1, \partial V_1/\partial Q_1]$ คืออินเวอร์สเมทริกซ์ของทรานสโพสของจาโคเบียนเมทริกซ์ หรือ

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{sw}}{\partial P_i} \\ \hline \frac{\partial P_{sw}}{\partial Q_i} \end{bmatrix} = [J^T]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{sw}}{\partial \theta_i} \\ \hline \frac{\partial P_{sw}}{\partial V_i} \end{bmatrix} \qquad (3.37)$$

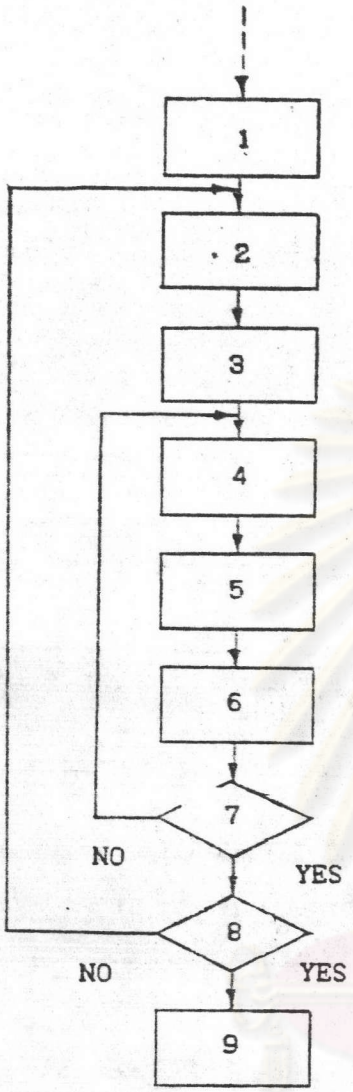
ในการคำนวนหาค่า$(1 - ITL_i)$เพื่อนำไปใช้ในการจ่ายโหลดอย่างประหยัดตามสมการที่ 3.20 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. คำนวนค่า$[\partial P_{sw}/\partial \theta_i]$และ$[\partial P_{sw}/\partial V_i]$ตามสมการที่ 2.42 และ 2.43
2. ทรานสโพสจาโคเบียนเมทริกซ์ซึ่งคำนวนไว้แล้วในโหลดโฟลว์
3. แก้สมการที่ 3.37 เพื่อหาค่า$[\partial P_{sw}/\partial P_i]$และ$[\partial P_{sw}/\partial Q_i]$ โดยใช้วิธีGaussian elimination [13]
4. คำนวนค่า$(1 - ITL_i)$ ซึ่งเท่ากับค่าลบของ$\partial P_{sw}/\partial P_i$ ที่ได้จากการคำนวนในขั้นที่ 3

3.3.3 อัลกอริทึมของการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยคิดผลของกำลังสูญเสียจากโหลดโฟลว์

อัลกอริทึมสำหรับการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยคิดกำลังสูญเสียจากโหลดโฟลว์แสดงในรูปที่ 3.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

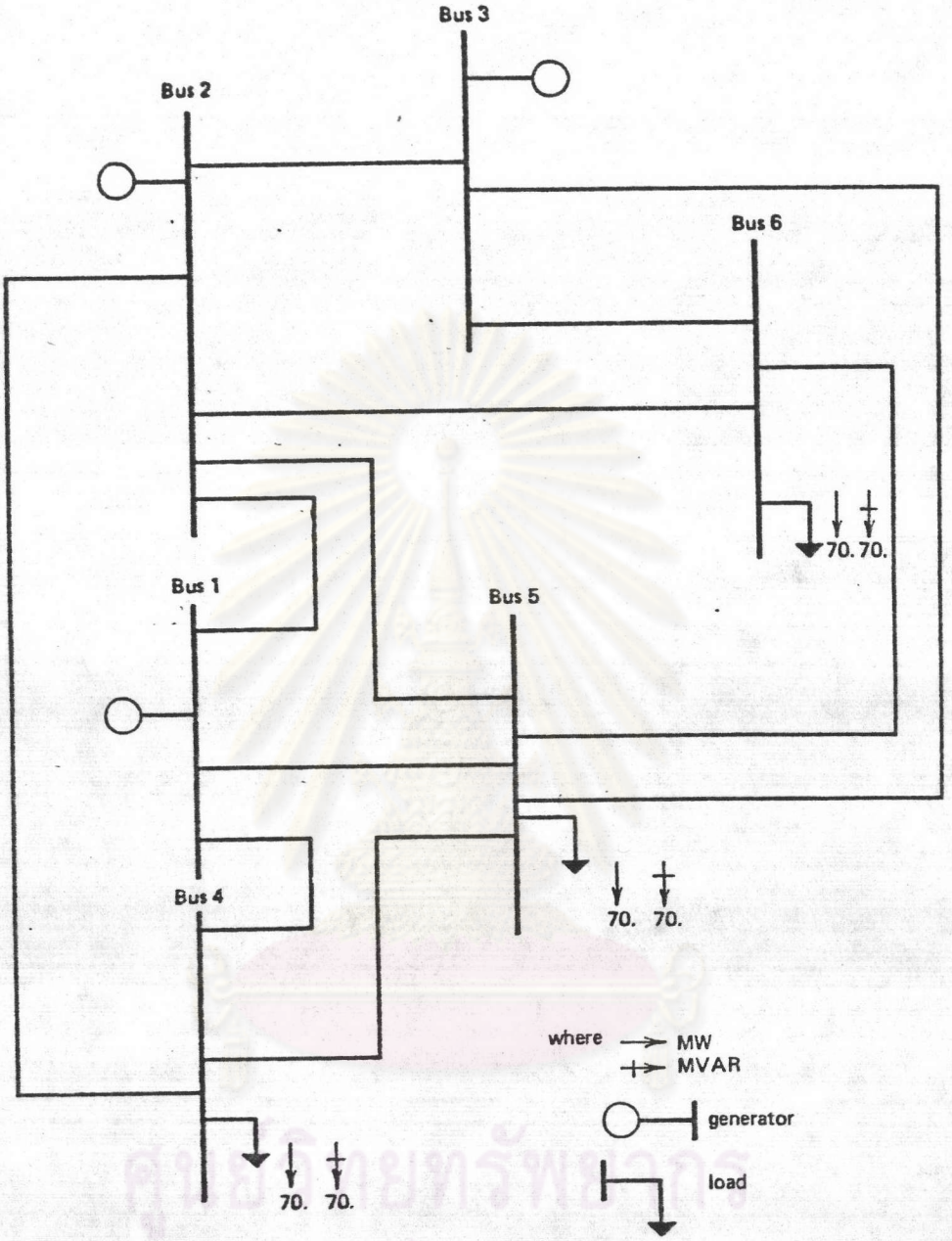


1) กำหนดค่าเริ่มต้น(initial value)
2) ทำโหลดโฟลว์เพื่อหากำลังไฟฟ้าที่ผลิตรวมและกำลังสูญเสีย
3) คำนวนค่า $(1- ITL_i)$ โดยใช้สมการที่ 3.33 และ 3.37
4) กำหนด(เดา)ค่า λ
5) คำนวณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง(P_{Gi}) โดยใช้สมการที่ 3.14 และ 3.19
6) ตรวจสอบว่า P_{Gi} มีค่าเกินขีดจำกัดหรือไม่ ถ้าเกิน ให้ P_{Gi} เท่ากับขีดจำกัดนั้น
7) คำนวณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตรวมและตรวจสอบว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตรวมเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตรวมที่ได้จากขั้นที่ 2 หรือไม่ถ้าไม่เท่าย้อนกลับไปทำขั้นที่ 2 (เดา λ ใหม่) ถ้าเท่าทำขั้นที่ 8 ต่อไป
8) ตรวจสอบว่า P_{Gi} ในอิทเทอร์เรชันปัจจุบันเท่ากับในอิทเทอร์เรชันที่แล้วหรือไม่ ถ้าไม่เท่าย้อนไปทำขั้นที่ 2 ถ้าเท่าทำขั้นที่ 9 ต่อไป
9) พิมพ์ผลแล้วหยุดหรือกลับสู่โปรแกรมหลัก

รูปที่ 3.2 อัลกอริทึมของการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยคิดผลของกำลังสูญเสียจากโหลดโฟลว์

3.4 ตัวอย่างและผล

ตัวอย่างที่ใช้แสดงการศึกษาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด เป็นระบบ 6 บัส 11 สายส่ง [2] single line diagramของระบบดังกล่าวแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ระบบไฟฟ้ากำลัง 6 บัส 11 สายส่ง

- ข้อมูลต่างๆของระบบไฟฟ้ากำลัง 6 บัส 11 สายส่ง

```
*** GENERAL DATA OF POWER SYSTEM ***

NUMBER OF BUSES =     6
NUMBER OF LINES =    11
BASE MVA =   100.00
MAX.ERROR =  .000100
ACCELERATING FACTOR =    1.000
MAX. ITERATION PERMISSIBLE =   25
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 18161893

*** BUSES DATA ***

BUS NO.	BUS TYPE	VOLT (PU)	BASE VOLT (KV)	GENERATION MW	GENERATION MVAR	LOAD MW	LOAD MVAR	SHUNT REACTANCE (PU)
1	3	1.00000	230.00	.00	.00	.00	.00	.00000
2	2	1.00000	230.00	50.00	.00	.00	.00	.00000
3	2	1.00000	230.00	60.00	.00	.00	.00	.00000
4	1	1.00000	230.00	.00	.00	70.00	70.00	.00000
5	1	1.00000	230.00	.00	.00	70.00	70.00	.00000
6	1	1.00000	230.00	.00	.00	70.00	70.00	.00000

NOTE: BUS TYPE 1 = LOAD BUS
2 = VOLTAGE CONTROLLED BUS
3 = REFERENCE BUS

*** LINES DATA ***

LINE NO.	SEND. BUS (P)	END. BUS (Q)	IMPEDANCE R	IMPEDANCE X	LINE CHARGING	TRANSF. RATIO	PHASE SHIFT (DEG.)
1	1	2	.1000	.2000	.0400	1.0000	.0000
2	1	4	.0500	.2000	.0400	1.0000	.0000
3	1	5	.0800	.3000	.0600	1.0000	.0000
4	2	3	.0500	.2500	.0600	1.0000	.0000
5	2	4	.0500	.1000	.0200	1.0000	.0000
6	2	5	.1000	.3000	.0400	1.0000	.0000
7	2	6	.0700	.2000	.0500	1.0000	.0000
8	3	5	.1200	.2600	.0500	1.0000	.0000
9	3	6	.0200	.1000	.0200	1.0000	.0000
10	4	5	.2000	.4000	.0800	1.0000	.0000
11	5	6	.1000	.3000	.0600	1.0000	.0000

*** THERMAL GENERATOR COST FUNCTION ***

BUS	COST = A + B*PG + C*PG**2		
NO.	A	B	C
1	213.10000	11.66900	.00533
2	200.00000	10.33300	.00889
3	240.00000	10.83300	.00741

*** LIMIT OF BUS VARIABLES ***

BUS	P-GEN. (MW)		Q-GEN. (MVAR)		VOLTAGE	
NO.	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN
1	200.00	50.00	150.00	-150.00	1.10	.90
2	150.00	37.50	125.00	-125.00	1.10	.90
3	180.00	45.00	135.00	-135.00	1.10	.90
4	.00	.00	.00	.00	1.10	.90
5	.00	.00	.00	.00	1.10	.90
6	.00	.00	.00	.00	1.10	.90

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.1 ผลของการทำโหลดโฟลว์

ผลของการทำโหลดโฟลว์ของระบบ 6 บัส 11 สายส่งโดยไม่ทำการจ่ายโหลดอย่างประหยัดเป็นดังนี้

*** BUS VOLTAGES AND POWER GENERATION ***

BUS	BUS	BUS VOLTAGE			GENERATION		LOAD		SHUNT
NO.	TYPE	PU	KV	DEG	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR
1	3	1.0000	230.00	.00	108.93	21.47	.00	.00	.00
2	2	1.0000	230.00	-4.12	50.00	97.29	.00	.00	.00
3	2	1.0000	230.00	-4.43	60.00	70.25	.00	.00	.00
4	1	.9338	214.78	-4.67	.00	.00	70.00	70.00	.00
5	1	.9216	211.98	-5.78	.00	.00	70.00	70.00	.00
6	1	.9373	215.57	-6.43	.00	.00	70.00	70.00	.00

*** LINE FLOW ***

LINE	FROM BUS	TO BUS	FLOW FROM BUS P		FLOW TO BUS Q		LOSS		LINE CHARG.
NO.	P	Q	MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR
1	1	2	29.26	-15.34	-28.23	13.41	1.03	2.07	4.00
2	1	4	43.91	21.66	-42.66	-20.43	1.24	4.98	3.74
3	1	5	35.76	15.15	-34.47	-15.87	1.29	4.82	5.55
4	2	3	2.05	-3.40	-2.05	-2.59	.00	.01	6.00
5	2	4	33.61	48.42	-31.83	-46.72	1.79	3.57	1.87
6	2	5	15.86	18.96	-15.17	-20.59	.69	2.07	3.70
7	2	6	26.70	19.91	-25.85	-22.17	.85	2.43	4.70
8	3	5	18.39	19.25	-17.42	-21.76	.97	2.11	4.62
9	3	6	43.65	53.59	-42.67	-50.58	.98	4.89	1.88
10	4	5	4.49	-2.85	-4.44	-3.94	.05	.09	6.89
11	5	6	1.51	-7.83	-1.47	2.75	.04	.11	5.18

*** SYSTEM TOTAL ***

	MW	MVAR
GENERATION	218.93	189.02
LOAD	210.00	210.00
STATIC CAPACITOR	.00	.00
LINE CHARGING	.00	48.13
LOSS	8.93	27.15
MISMATCH	.00	.00
PRODUCTION COST		3202.937

3.4.2 ผลของการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยไม่คิดกำลังสูญเสีย

ผลของการทำการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยไม่คิดกำลังสูญเสียของระบบ 6 บัส 11 สายส่งเป็นดังนี้

- รายละเอียดในแต่ละอิทเทอร์เรชัน

*** ITERATION DETAILS ***

ITER. NO.	λ	POWER GENERATION (MW)			
		BUS 1	BUS 2	BUS 3	TOTAL
1	12.0000	50.00	93.76	78.74	222.50
2	11.5000	50.00	65.64	45.01	160.65
3	11.8254	50.00	83.94	66.96	200.90
4	11.8805	50.00	87.04	70.68	207.72
5	11.8940	50.00	87.80	71.59	209.39
6	11.8976	50.00	88.00	71.84	209.84
7	11.8981	50.00	88.05	71.90	209.95
8	11.8988	50.00	88.07	71.92	209.99
9	11.8989	50.00	88.07	71.93	210.00

- คำตอบที่จุดที่ต้นทุนการผลิตของระบบต่ำที่สุด

*** SOLUTION ***

BUS NO.	POWER GEN. (MW)	COST
1	50.00	809.88
2	88.07	1175.01
3	71.92	1057.49
TOTAL	210.00	3046.37
INCREMENTAL COST		11.8989

3.4.3 ผลของการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยคิดผลของกำลังสูญเสีย

ผลของการทำการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยคิดผลของกำลังสูญเสียจากโหลดโฟลว์ของระบบ 6 บัส 11 สายส่งเป็นดังนี้

- รายละเอียดในแต่ละอิทเทอร์เรชัน

*** ITERATION DETAILS ***

ITER. NO.	λ	POWER LOSS (MW)	POWER GENERATION (MW)				TOTAL PRODUCTION COST
			BUS 1	BUS 2	BUS 3	TOTAL	
0		8.93	108.93	50.00	60.00	218.93	3137.959
1	11.3834	7.66	48.74	90.14	78.78	217.66	3137.587
2	12.0397	7.66	50.00	91.60	76.06	217.66	3137.749
3	12.0185	7.66	50.00	91.01	76.65	217.66	3137.760
4	12.0201	7.66	50.00	91.15	76.51	217.66	3137.765
5	12.0197	7.66	50.00	91.12	76.54	217.66	3137.751
6	11.0198	7.66	50.00	81.12	76.54	217.66	3137.744

- คำตอบของโหลดโฟลว์ที่จุดที่ต้นทุนการผลิตของระบบต่ำที่สุด

*** BUS VOLTAGES AND POWER GENERATION ***

BUS NO.	BUS TYPE	BUS VOLTAGE			GENERATION		LOAD		SHUNT
		PU	KV	DEG	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR
1	3	1.0000	230.00	.00	50.00	40.92	.00	.00	.00
2	2	1.0000	230.00	-.47	91.12	78.16	.00	.00	.00
3	2	1.0000	230.00	-.24	76.54	65.79	.00	.00	.00
4	1	.9312	214.18	-2.24	.00	.00	70.00	70.00	.00
5	1	.9207	211.75	-2.93	.00	.00	70.00	70.00	.00
6	1	.9375	215.61	-2.61	.00	.00	70.00	70.00	.00

*** LINE FLOW ***

LINE NO.	FROM BUS P	TO BUS Q	FLOW FROM BUS P MW	FLOW FROM BUS P MVAR	FLOW TO BUS Q MW	FLOW TO BUS Q MVAR	LOSS MW	LOSS MVAR	LINE CHARG. MVAR
1	1	2	3.32	-3.64	-3.30	-.33	.01	.03	4.00
2	1	4	25.33	26.41	-24.61	-27.24	.72	2.90	3.73
3	1	5	21.35	18.16	-20.63	-20.99	.72	2.71	5.54
4	2	3	-1.57	-2.68	1.57	-3.31	.00	.01	6.00
5	2	4	50.69	42.86	-48.45	-40.24	2.25	4.49	1.87
6	2	5	19.87	18.11	-19.07	-19.40	.80	2.40	3.70
7	2	6	25.42	20.20	-24.61	-22.57	.81	2.32	4.70
8	3	5	25.48	16.65	-24.26	-18.62	1.22	2.64	4.62
9	3	6	49.48	52.45	-48.42	-49.03	1.06	5.31	1.88
10	4	5	3.06	-2.52	-3.03	-4.29	.02	.05	6.86
11	5	6	-3.00	-6.69	3.03	1.60	.03	.09	5.18

*** SYSTEM TOTAL ***

	MW	MVAR
GENERATION	217.66	184.87
LOAD	210.00	210.00
STATIC CAPACITOR	.00	.00
LINE CHARGING	.00	48.07
LOSS	7.66	22.94
MISMATCH	.00	.01
PRODUCTION COST		3137.744

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย