บทที่ 2
แนวคิดและทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีการวิเคราะห์ความเหมาะสมทางวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอทฤษฎีการวิเคราะห์ความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ซึ่งมีหัวข้อนำเสนอดังนี้

2.1.1 การวิเคราะห์การไหลของไฟฟ้ากำลัง (Power-flow Studies) (Stevenson , 1982 , pages 194-202) การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power-flow studies) เป็นสิ่งสำคัญในการวางแผนและออกแบบขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าเพิ่มเติมในอนาคต รวมถึงการใช้งานระบบส่งกำลังไฟฟ้าในสภาพปัจจุบันให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าจะแสดงขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่แต่ละบัส และกำลังไฟฟ้าจริงและรีแอคตีพที่ไหลในสายส่ง วิธีการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าสามารถทำได้หลายวิธี แต่ละวิธีจะให้ผลลัพธ์ในการวิเคราะห์เหมือนกันขึ้นอยู่กับการเลือกใช้

ทั้งเซลฟ์และมิวชวลแอดมิตแตนซ์บัส ซึ่งประกอบด้วยเมตริกซ์แอดมิตแตนซ์บัส Y_{bus} หรือจุดขับเคลื่อน (Driving point) และอิมพีแดนซ์ถ่ายโอนซึ่งประกอบด้วย Z_{bus} จะถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า แต่ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าจะพิจารณาระบบส่งกำลังไฟฟ้าอยู่ในรูปของเมตริกซ์แอดมิตแตนซ์ Y_{bus} ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบ (element) Y_{ij} เขียนแทนด้วยสมการ

$$Y_{ij} = |Y_{ij}|\angle\theta_{ij} = |Y_{ij}|\cos\theta_{ij} + j|Y_{ij}|\sin\theta_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \qquad (2.1)$$

นอกจากนั้นจะต้องทราบค่าอิมพีแดนซ์และพิกัดของหม้อแปลง, พิกัดของชั้นท์คาปาซิเตอร์ รวมถึงการตั้งแทปของหม้อแปลงอีกด้วย โดยในการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าจะแสดงขนาดของแรงดันที่บัสหรือกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านบัสต่างๆ ออกมา

สมมติให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัส i ใดๆ ในระบบส่งกำลังไฟฟ้า สามารถเขียนแทนด้วยสมการในรูปโพล่าร์ ดังนี้

$$V_i = |V_i|\angle\delta_i = |V_i|(\cos\delta_i + j\sin\delta_i) \qquad (2.2)$$

และแรงดันไฟฟ้าที่บัส j ใดๆ จะแทนตัวอักษร i ด้วย j นอกจากนั้นสามารถแทนค่ากระแสที่ไหลเข้าบัส i ใดๆ ให้อยู่ในรูปของผลรวมในเทอมขององค์ประกอบ Y_{ij} ของเมตริกซ์ Y_{bus} ได้ดังสมการ

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \ldots + Y_{iN}V_N = \sum_{n=1}^{N} Y_{in}V_n \tag{2.3}$$

เมื่อกำหนดให้ P_i และ Q_i แทนกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีเสมือนที่บัส i ใดๆ ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าที่บัส i ใดๆ สามารถเขียนในรูปการคอนจูเกต (conjugate) ได้ดังสมการ

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{n=1}^{N} Y_{in}V_n \tag{2.4}$$

แทนสมการที่ (2.1) และ (2.2) ลงในสมการที่ (2.4) จะได้

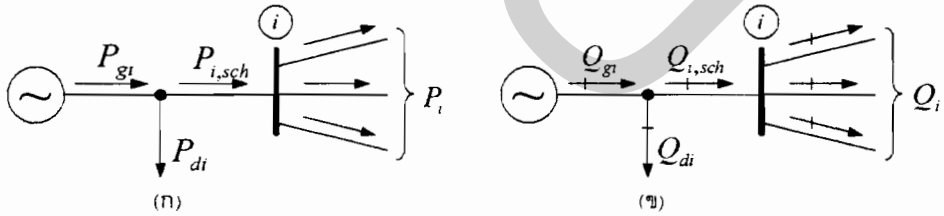
$$P_i - jQ_i = \sum_{n=1}^{N} |Y_{in}V_iV_n| \angle \theta_{in} + \delta_n - \delta_i \tag{2.5}$$

เมื่อแยกกำลังไฟฟ้าออกเป็นส่วนจริงและส่วนจินตภาพ จะเรียกว่า สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า (power-flow equation) สามารถเขียนแทนด้วยสมการ

$$P_i = \sum_{n=1}^{N} |Y_{in}V_iV_n| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \tag{2.6}$$

$$Q_i = \sum_{n=1}^{N} |Y_{in}V_iV_n| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \tag{2.7}$$

เมื่อพิจารณาที่บัส i ใดๆ ให้ P_{gi} แทนกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายเข้าบัส i ใดๆ และ P_{di} แทนกำลังไฟฟ้าจริงที่โหลดซึ่งต่อกับบัส i ใดๆ ดึงไปใช้ ดังนั้นจะได้ว่า $P_{i,sch} = P_{gi} - P_{di}$ แทนกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i ใดๆ ตามภาพที่ 2.1 (ก) ส่วนกำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัส i ใดๆ จะแทนด้วย $Q_{i,sch} = Q_{gi} - Q_{di}$ ตามภาพที่ 2.1 (ข)



ภาพที่ 2.1 แสดงกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัส i ใดๆ

ชนิดของบัสสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด โดยในแต่ละบัสจะประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ $P_i, Q_i, |V|, \angle\delta_i$ และแต่ละบัสจะทราบค่าพารามิเตอร์อย่างน้อย 2 ค่า ส่วนค่าพารามิเตอร์ที่เหลือจะได้มาจากการคำนวณ บัสทั้ง 3 ชนิด ประกอบด้วย

1. Slack Bus หรือเรียกอีกอย่างว่า Reference Bus หรือ Infinite Bus หรือ Floating Busโดยบัสชนิดนี้จะกำหนดขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ ส่วนค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคตีพที่จ่ายออกมาจะขึ้นอยู่กับความต้องการ โดยขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าจะ

ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดขนาดใหญ่ที่สามารถให้กำลังไฟฟ้าได้มาก โดยกำหนดให้ $|V| = 1, \angle\delta_i = 0°$

2. Generator Bus โดยทั่วไปบัสชนิดนี้จะกำหนดค่าขนาดของแรงดันและกำลังไฟฟ้า $|V|, P_i$ และบางครั้งเรียกบัสชนิดนี้ว่า Voltage-Controlled Bus หรือ P-V Bus บัสชนิดนี้เป็นบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่โดยควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าจริงและแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ ส่วนค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคตีพและมุมของแรงดันไฟฟ้าสามารถหาได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

3. Load Bus บัสชนิดนี้จะกำหนดค่าเป็นจำนวนเชิงซ้อนของกำลังไฟฟ้าไว้คือจะกำหนดในรูป $S = P + jQ$ และบางครั้งเรียกบัสนี้ว่า P-Q Bus เนื่องจากจะมีโหลดต่ออยู่ที่บัสชนิดนี้ โดยจะทราบค่า P_i, Q_i ส่วนขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสนี้สามารถหาได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

2.1.2 วิธีการนิวตันราฟสัน (Newton-Raphson Method) จะใช้ทฤษฎีการขยายอนุกรมของ Taylor มาใช้ในการแก้ปัญหาสมการที่มีตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป เริ่มต้นด้วยการอธิบายการแก้ปัญหาสมการทางคณิตศาสตร์ก่อนแล้วจึงวิเคราะห์ไปยังการแก้ปัญหาของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า จากทฤษฎีการขยายอนุกรมของ Taylor จะได้ว่า

ตัดทิ้ง

$$y = f(x) = f(x_0) + \frac{df(x_0)}{dx}.\Delta x' + \frac{d^2 f(x_0)}{d^2 x}.(\Delta x)^2 + \ldots \quad (2.8)$$

$$y = f(x) = f(x_0) + \frac{df(x_0)}{dx}.\Delta x' \quad (2.9)$$

จากสมการที่ (2.9) ให้ y เป็นฟังก์ชั่นของตัวแปร x โดยที่ $\Delta x'$ แทนค่า error แต่ในกรณีที่ฟังก์ชั่น y มีตัวแปรมากกว่า 1 โดยแทนฟังก์ชั่น y ด้วย $f(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ จะได้

$$y = f(x_1, x_2, \ldots, x_n) = f(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \ldots, x_n^{(0)}) + \left.\frac{\partial f(x_1, x_2, \ldots, x_n)}{\partial x_1}\right|_{(0)}.\Delta x_1^{(0)}$$
$$+ \left.\frac{\partial f(x_1, x_2, \ldots, x_n)}{\partial x_2}\right|_{(0)}.\Delta x_2^{(0)} + \ldots + \left.\frac{\partial f(x_1, x_2, \ldots, x_n)}{\partial x_n}\right|_{(0)}.\Delta x_n^{(0)} \quad (2.10)$$

$$\Delta y = y - f(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \ldots, x_n^{(0)}) = \left.\frac{\partial f(x_1, x_2, \ldots, x_n)}{\partial x_1}\right|_{(0)}.\Delta x_1^{(0)}$$
$$+ \left.\frac{\partial f(x_1, x_2, \ldots, x_n)}{\partial x_2}\right|_{(0)}.\Delta x_2^{(0)} + \ldots + \left.\frac{\partial f(x_1, x_2, \ldots, x_n)}{\partial x_n}\right|_{(0)}.\Delta x_n^{(0)} \quad (2.11)$$

DPU

เมื่อ $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \ldots, x_n^{(0)}$ เป็นค่าประมาณเริ่มต้นและ $\left.\frac{\partial f(x_1, x_2, \ldots, x_n)}{\partial x}\right|_{(0)}$ แทนค่าการอนุพันธ์บางส่วน (Partial Differentiate) แล้วแทนค่าด้วย $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \ldots, x_n^{(0)}$

ดังนั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ \vdots \\ \Delta y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} \tag{2.12}$$

$$[\Delta y] = [J][\Delta x]_n \tag{2.13}$$

โดยที่ [J] แทน Jacobian Matrix ซึ่งประกอบด้วยการอนุพันธ์บางส่วน

การนำวิธีการ Newton-Raphson ไปใช้ในการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า สามารถทำได้โดยหาค่า mismatch ของกำลังไฟฟ้าที่บัส i ใดๆ เมื่อกำหนดให้

$$Y_{ii} = G_{ii} + jB_{ii} \tag{2.14}$$

$$V_i = a_i + jb_i \tag{2.15}$$

จากสมการที่ (2.4) การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่บัส i ใดๆ จะได้ว่า

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{n=1}^{N} Y_{in} V_n = (a_i + jb_i) \sum_{n=1}^{N} (G_{in} - jB_{in})(a_n + jb_n)$$

$$P_{i,calc} = \mathrm{Re}\left[(a_i + jb_i) \sum_{n=1}^{N} (G_{in} - jB_{in})(a_n + jb_n) \right]$$

$$= \sum_{n=1}^{N} \left[a_i (a_n G_{in} + b_n B_{in}) + b_i (b_n G_{in} - a_n B_{in}) \right] \tag{2.16}$$

$$Q_{i,calc} = \mathrm{Im}\left[(a_i + jb_i) \sum_{n=1}^{N} (G_{in} - jB_{in})(a_n + jb_n) \right]$$

$$= \sum_{n=1}^{N} \left[b_i (a_n G_{in} + b_n B_{in}) - a_i (b_n G_{in} - a_n B_{in}) \right] \tag{2.17}$$

และสามารถหาค่า mismatch ของกำลังไฟฟ้าที่บัส i ใดๆ ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta P_i = P_{i,sch} - P_{i,calc} \tag{2.18}$$

$$\Delta Q_i = Q_{i,sch} - Q_{i,calc} \tag{2.19}$$

$$\Delta |V_i|^2 = |V_{i,sch}|^2 - |V_{i,calc}|^2 \tag{2.20}$$

DPU

เริ่มต้นต้องหา [J] เพื่อหาค่า mismatch ของแรงดันไฟฟ้าที่บัสใดๆ โดยจะทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆของบัสแต่ละชนิดและนำค่าพารามิเตอร์นี้มาสร้างเป็นฟังก์ชั่น เพื่อทำให้เข้าใจง่ายขึ้นจะเขียนสมการเมตริกซ์ในระบบที่มีบัสเพียง 3 บัส โดยสมมติให้บัสที่ 1 เป็น Slack Bus บัสที่ 2 เป็น Generator Bus และบัสที่ 3 เป็น Load Bus สามารถเขียนเป็นเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta|V_2|^2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial a_2} & \frac{\partial P_2}{\partial b_2} & \frac{\partial P_2}{\partial a_3} & \frac{\partial P_2}{\partial b_3} \\ \frac{\partial |V_2|^2}{\partial a_2} & \frac{\partial |V_2|^2}{\partial b_2} & \frac{\partial |V_2|^2}{\partial a_3} & \frac{\partial |V_2|^2}{\partial b_3} \\ \frac{\partial P_3}{\partial a_2} & \frac{\partial P_3}{\partial b_2} & \frac{\partial P_3}{\partial a_3} & \frac{\partial P_3}{\partial b_3} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial a_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial b_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial a_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial b_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta a_2 \\ \Delta b_2 \\ \Delta a_3 \\ \Delta b_3 \end{bmatrix} \tag{2.21}$$

โดยที่

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial a_2} & \frac{\partial P_2}{\partial b_2} & \frac{\partial P_2}{\partial a_3} & \frac{\partial P_2}{\partial b_3} \\ \frac{\partial |V_2|^2}{\partial a_2} & \frac{\partial |V_2|^2}{\partial b_2} & \frac{\partial |V_2|^2}{\partial a_3} & \frac{\partial |V_2|^2}{\partial b_3} \\ \frac{\partial P_3}{\partial a_2} & \frac{\partial P_3}{\partial b_2} & \frac{\partial P_3}{\partial a_3} & \frac{\partial P_3}{\partial b_3} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial a_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial b_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial a_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial b_3} \end{bmatrix} \tag{2.22}$$

จากสมการที่ (2.16) และ (2.17) แต่ละองค์ประกอบใน [J] หาได้จาก

$$\frac{\partial P_i}{\partial a_n} = a_i G_{in} - b_i B_{in} \qquad \text{เมื่อ} \quad n \neq i \tag{2.23}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial a_i} = 2a_i G_{ii} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^{N} (a_n G_{in} + b_n B_{in}) \tag{2.24}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial b_n} = a_i B_{in} + b_i G_{in} \qquad \text{เมื่อ} \quad n \neq i \tag{2.25}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial b_i} = 2b_i G_{ii} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^{N} (b_n B_{in} - a_n G_{in}) \tag{2.26}$$

DPU

$$\frac{\partial Q_i}{\partial a_i} = 2a_i B_{ii} - \sum_{\substack{n=1 \\ n\neq i}}^{N} (b_n G_{in} - a_n B_{in}) \tag{2.27}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial a_n} = a_i B_{in} + b_i G_{in} \qquad \text{เมื่อ} \qquad n \neq i \tag{2.28}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial b_i} = 2b_i B_{ii} + \sum_{\substack{n=1 \\ n\neq i}}^{N} (a_i G_{in} + b_i G_{in}) \tag{2.29}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial b_n} = -a_i G_{in} + b_i B_{in} \qquad \text{เมื่อ} \qquad n \neq i \tag{2.30}$$

$$\frac{\partial |V_i|^2}{\partial a_i} = 2a_i \tag{2.31}$$

$$\frac{\partial |V_i|^2}{\partial a_n} = 0 \qquad \text{เมื่อ} \qquad n \neq i \tag{2.32}$$

$$\frac{\partial |V_i|^2}{\partial b_i} = 2b_i \tag{2.33}$$

$$\frac{\partial |V_i|^2}{\partial b_n} = 0 \qquad \text{เมื่อ} \qquad n \neq i \tag{2.34}$$

จากนั้นจะต้องสมมติค่าเริ่มต้นของแรงดันที่บัสต่างๆ เพื่อคำนวณหาค่า mismatch ของกำลังไฟฟ้าที่บัสและแทนค่า mismatch ของกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ได้ เพื่อหาค่า $\Delta a_i, \Delta b_i$

หลังจากได้ค่า $\Delta a_i, \Delta b_i$ ก็สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าในรอบการคำนวณ k ใดๆ ได้จากสมการ

$$V_i^{(k)} = V_i^{(k-1)} + \Delta a_i^{(k)} + j\Delta b_i^{(k)} \tag{2.35}$$

ทำการคำนวณตามขั้นตอนหลายๆรอบการคำนวณจนกระทั่ง $\Delta P_i, \Delta Q_i, \Delta |V_i|^2$ มีค่าใกล้ศูนย์ ก็จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าของแต่ละบัสที่หาได้จากการคำนวณรอบสุดท้าย

2.1.3 การศึกษาการลัดวงจร (Short Circuit Studies) (Stevenson , 1982 , pages 248-272)

2.1.3.1 องค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) ในการแก้ปัญหาระบบไม่สมดุล n เฟส สามารถที่จะแทนด้วยระบบที่สมดุล n ระบบซึ่งในแต่ละระบบมีเฟสเซอร์ที่สมดุลอยู่ และเรียกวิธีนี้ว่า วิธีองค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) โดยในแต่ละชุดของเฟสเซอร์จะมีขนาดเท่ากันและมุมในระหว่างเฟสเซอร์ที่อยู่ใกล้กันจะมีค่าเท่ากัน วิธีการนี้สามารถใช้ได้กับระบบไม่สมดุลที่มี n เฟส แต่ในที่นี้จะพิจารณาในระบบไม่สมดุลที่มี 3 เฟสเท่านั้น ซึ่งวิธี

DPU

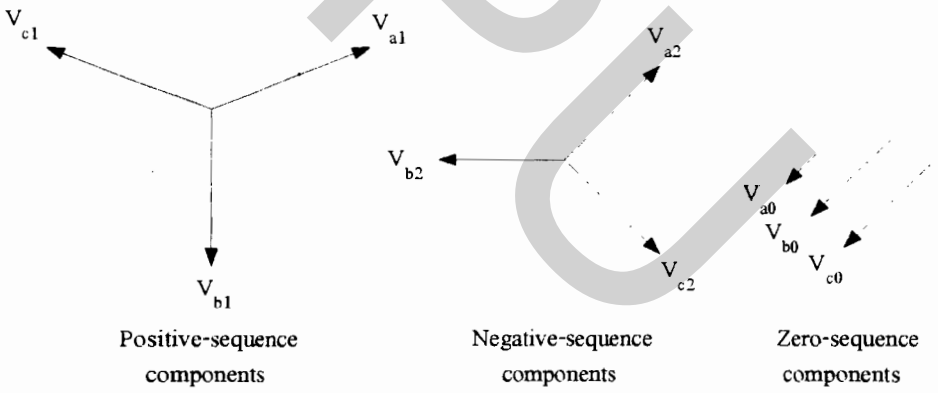
องค์ประกอบสมมาตรนี้จะใช้ในการแก้ปัญหาการเกิดการลัดวงจรแบบไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้า 3 เฟส จะมีประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ ได้แก่

1. องค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence Components) ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 ตัวที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมห่างกัน 120° โดยมีลำดับเฟส A, B และ C ตามเข็มนาฬิกา สัญลักษณ์แทนด้วย V_{a1}, V_{b1} และ V_{c1}

2. องค์ประกอบลำดับลบ (Negative Sequence Components) ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 ตัวที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมห่างกัน 120° โดยมีลำดับเฟส A, B และ C ทวนเข็มนาฬิกา สัญลักษณ์แทนด้วย V_{a2}, V_{b2} และ V_{c2}

3. องค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence Components) ประกอบด้วย เฟสเซอร์ 3 ตัวที่มีขนาดเท่ากันและมีทิศทางเดียวกัน สัญลักษณ์แทนด้วย V_{a0}, V_{b0} และ V_{c0}

โดยทั่วไปแล้ว การแก้ปัญหาองค์ประกอบสมมาตรจะแสดงเฟสทั้ง 3 เฟสของระบบไฟฟ้าด้วยตัวอักษร a b และ c ตามลักษณะลำดับเฟสของแรงดันและกระแสไฟฟ้า ภาพที่ 2.2 แสดงชุดองค์ประกอบสมมาตรทั้ง 3 ชุด



ภาพที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์ไม่สมดุล 3 เฟส

เมื่อเฟสเซอร์ไม่สมดุลแต่ละเฟสเป็นผลรวมขององค์ประกอบสมมาตรนั้น แล้วเฟสเซอร์เริ่มต้นจะแสดงตามเทอมขององค์ประกอบสมมาตรนั้น ได้ดังนี้

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \tag{2.36}$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \tag{2.37}$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \tag{2.38}$$

2.1.3.2 เอโอเปอเรเตอร์ (A-Operator) เนื่องจากในวิธีองค์ประกอบสมมาตร ค่ามุมที่ห่างกันของเฟสเซอร์ทั้งแรงดันและกระแสเป็น 120° เพื่อให้ง่ายต่อการเขียนและเข้าใจ จะใช้โอเปอเรเตอร์ a แทนค่ามุมเหล่านี้ โดยนิยามว่า

$$a = 1\angle 120° = -0.5 + j0.866 \tag{2.39}$$

จากสมการที่ (2.39) จะสามารถลดจำนวนปริมาณที่ไม่ทราบโดยการแทนองค์ประกอบ V_b และ V_c แต่ละตัวตามผลคูณของฟังก์ชั่นโอเปอเรเตอร์ a ดังนั้นจะหาความสัมพันธ์ได้จาก

$$V_{b1} = a^2 V_{a1} \tag{2.40}$$

$$V_{c1} = aV_{a1} \tag{2.41}$$

$$V_{b2} = aV_{a2} \tag{2.42}$$

$$V_{c2} = a^2 V_{a2} \tag{2.43}$$

$$V_{b0} = V_{a0} \tag{2.44}$$

$$V_{c0} = V_{a0} \tag{2.45}$$

แทนสมการที่ (2.40)-(2.45) ลงในสมการที่ (2.36)-(2.38) จะได้

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \tag{2.46}$$

$$V_b = a^2 V_{a1} + aV_{a2} + V_{a0} \tag{2.47}$$

$$V_c = aV_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0} \tag{2.48}$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \tag{2.49}$$

เพื่อความสะดวกแก่การใช้งาน จะกำหนดให้

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \tag{2.50}$$

DPU

ดังนั้น จะพิสูจน์อย่างง่ายๆ เป็น

$$A^{-1} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \tag{2.51}$$

จากนั้น คูณทั้งสองด้านของสมการที่ (2.49) ด้วย A^{-1} จะได้

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \tag{2.52}$$

ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาเฟสเซอร์ไม่สมมาตร 3 ตัวในองค์ประกอบสมมาตร โดยที่ความสัมพันธ์นี้สำคัญต่อการเขียนสมการให้แยกออกจากกัน จะเขียนได้ว่า

$$V_{a0} = \frac{1}{3}\left(V_a + V_b + V_c\right) \tag{2.53}$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3}\left(V_a + aV_b + a^2V_c\right) \tag{2.54}$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3}\left(V_a + a^2V_b + aV_c\right) \tag{2.55}$$

โดยที่องค์ประกอบ V_{b0}, V_{b1}, V_{b2}, V_{c0}, V_{c1} และ V_{c2} หาได้จากสมการที่ (2.40)-(2.45) และสมการดังกล่าวสามารถเขียนให้กระแสไฟฟ้าแทนแรงดันไฟฟ้าตามสมการสั้นๆ เป็น

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \tag{2.56}$$

$$I_b = a^2I_{a1} + aI_{a2} + I_{a0} \tag{2.57}$$

$$I_c = aI_{a1} + a^2I_{a2} + I_{a0} \tag{2.58}$$

$$I_{a0} = \frac{1}{3}\left(I_a + I_b + I_c\right) \tag{2.59}$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}\left(I_a + aI_b + a^2I_c\right) \tag{2.60}$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}\left(I_a + a^2I_b + aI_c\right) \tag{2.61}$$

ในระบบไฟฟ้า 3 เฟสนั้น ผลรวมทางเวคเตอร์ของกระแสในสายจะเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายนิวตรัล ดังนั้น

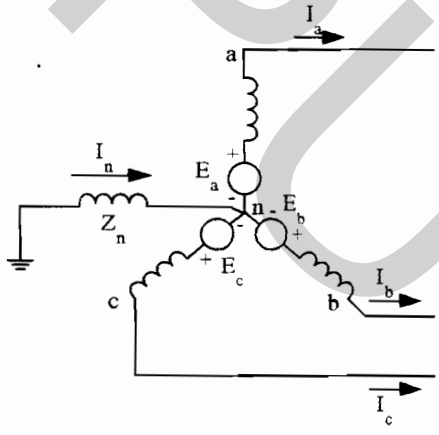
$$I_a + I_b + I_c = I_n \tag{2.62}$$

เมื่อแทนสมการที่ (2.62) ลงในสมการที่ (2.59) จะได้

$$I_n = 3I_{a0} \tag{2.63}$$

ดังนั้นหากระบบไฟฟ้า 3 เฟส ไม่มีการต่อสายนิวตรัลแล้ว กระแส I_n จะเป็นศูนย์ แสดงว่ากระแสในสายจะไม่มีองค์ประกอบลำดับศูนย์ ดังนั้นโหลดแบบเดลต้าซึ่งไม่มีการเชื่อมต่อลงนิวตรัล กระแสที่ไหลเข้าโหลดจะไม่มีองค์ประกอบลำดับศูนย์ด้วย

2.1.3.3 วงจรข่ายลำดับของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภาวะไร้โหลด ภาพที่ 2.3 แสดงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภาวะไร้โหลดจะมีการต่อกราวด์ผ่านรีแอคแตนซ์ โดยที่ emf ของแต่ละเฟสเป็น E_a, E_b และ E_c การเขียนวงจรข่ายลำดับนั้นจะมีแรงดันแหล่งกำเนิดเป็นลำดับบวกเท่านั้นเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสได้สมดุล ดังนั้นวงจรข่ายลำดับบวกจึงประกอบด้วย emf ต่ออนุกรมกับอิมพีแดนซ์ลำดับบวก ส่วนวงจรข่ายลำดับลบและศูนย์จะไม่มี emf ประกอบอยู่แต่จะรวมอิมพีแดนซ์ของกระแสลำดับลบและศูนย์ไว้ด้วยกันตามภาพที่ 2.4 จากภาพที่ 2.4 (จ) กระแสไฟฟ้าที่ไหลในอิมพีแดนซ์ Z_n ซึ่งต่อระหว่างจุดนิวตรัลและกราวด์จะเท่ากับ $3I_{a0}$ จะเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อมลำดับศูนย์จากจุด a ไปยังกราวด์เท่ากับ $-3I_{a0}Z_n - I_{a0}Z_{g0}$ โดยที่ Z_{g0} เป็นอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ต่อเฟส ดังนั้นวงจรข่ายลำดับศูนย์จะต้องมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ $3Z_n + Z_{g0}$ ตามภาพที่ 2.4 (ฉ) โดยที่อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ในวงจรข่ายลำดับศูนย์จะเท่ากับ



ภาพที่ 2.3 แสดงแผนภาพวงจรไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อกราวด์ผ่านรีแอคแตนซ์

$$Z_0 = 3Z_n + Z_{g0} \tag{2.64}$$

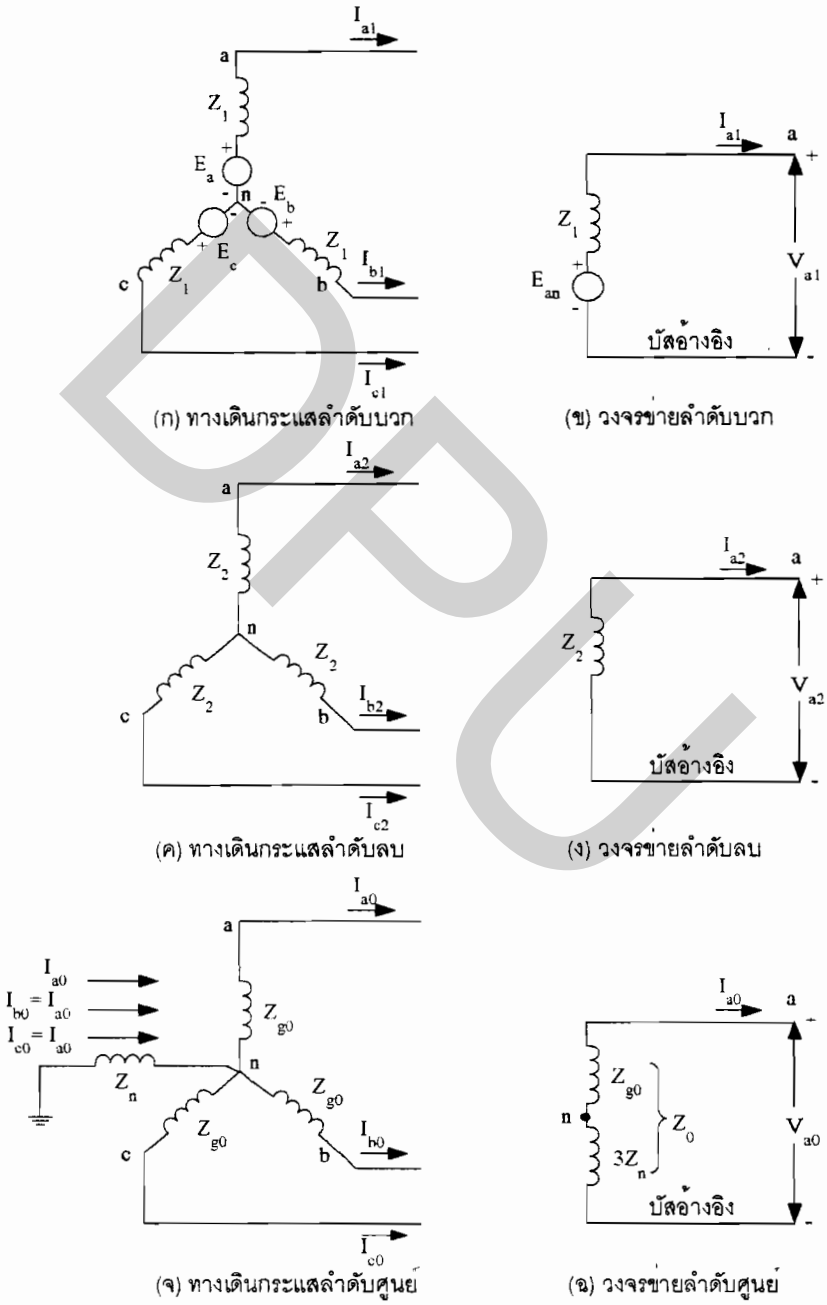
โดยทั่วไปแล้วจะพิจารณาเฉพาะสมการองค์ประกอบของกระแสและแรงดันไฟฟ้าสำหรับเฟส a ซึ่งหาได้จากวงจรข่ายลำดับต่างๆ ดังนั้นสมการองค์ประกอบแรงดันตกคร่อมจากจุด a ไปยังบัสอ้างอิง (Reference) จะได้ว่า

$$V_{a1} = E_a - I_{a1}Z_1 \tag{2.65}$$

$$V_{a2} = -I_{a2}Z_2 \tag{2.66}$$

$$V_{a0} = -I_{a0}Z_0 \tag{2.67}$$

เมื่อ E_a เป็นแรงดันไฟฟ้าภาวะไร้โหลดลำดับบวกเทียบกับนิวตรัล และ Z_1, Z_2 และ Z_0 แทนอิมพีแดนซ์ลำดับบวก ลบ และศูนย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามลำดับ



ภาพที่ 2.4 แสดงทางเดินกระแสไฟฟ้าของแต่ละลำดับในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและวงจรข่ายลำดับ

DPU

2.1.3.4 วงจรข่ายลำดับของหม้อแปลงไฟฟ้า วงจรข่ายลำดับสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสจะขึ้นอยู่กับลักษณะการต่อขดลวดทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ ลักษณะการต่อขดลวดแบบวายและเดลต้าแบบต่างกันจะเป็นตัวกำหนดคุณลักษณะของวงจรข่ายลำดับศูนย์และการเลื่อนเฟสในวงจรข่ายลำดับบวกและลำดับลบอีกด้วย

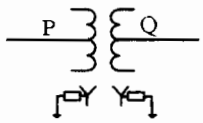
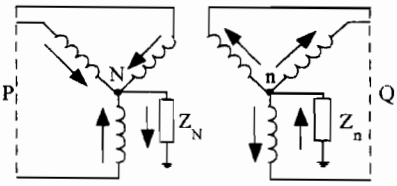
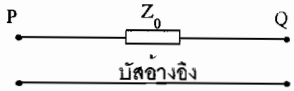
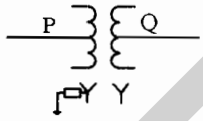
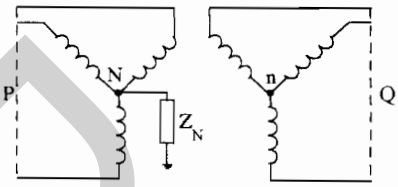
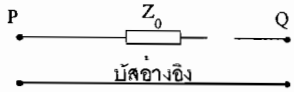
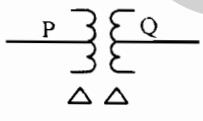
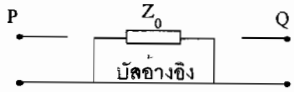
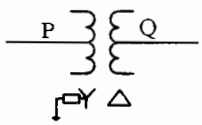
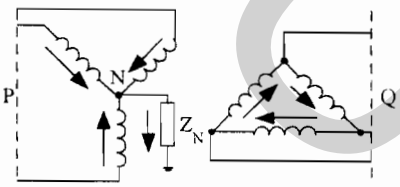
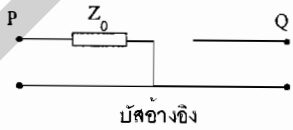
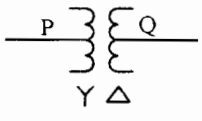
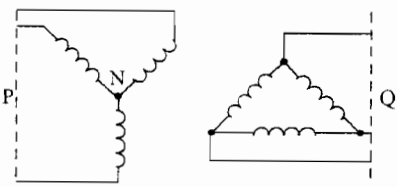
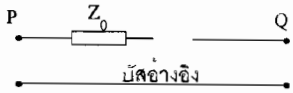
ในการวิเคราะห์การเชื่อมต่อหม้อแปลง 2 ขดลวด จะสามารถแบ่งออกได้ 5 แบบตามภาพที่ 2.5 โดยที่ลูกศรบนแผนภาพแสดงทิศทางการไหลของกระแสลำดับศูนย์ที่เกิดขึ้นได้ ส่วนที่ไม่มีลูกศรชี้แสดงว่าไม่มีกระแสลำดับศูนย์ไหลอยู่ในการเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบนั้น ซึ่งสามารถเขียนแทนด้วยวงจรข่ายสมมูลลำดับศูนย์โดยตัดส่วนของกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานขดลวดและกระแสแมกเนไตซิ่งออก ให้ P และ Q แทนจุดเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า วงจรสมมูลของการเชื่อมต่อหม้อแปลงทั้ง 5 แบบ ได้แก่

แบบที่ 1 : แบงค์ Y-Y ต่อนิวตรัลลงกราวด์ทั้งสองด้าน (Y-Y Bank, Both Neutrals Grounded) หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสที่เชื่อมต่อแบบ Y-Y และต่อนิวตรัลลงกราวด์ กระแสลำดับศูนย์สามารถไหลครบวงจรตามวงจรสมมูลในภาพที่ 2.5 ในวงจรข่ายลำดับศูนย์นั้นจุด P และ Q จะเชื่อมต่อกันโดยผ่านอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ในลักษณะเดียวกันกับวงจรข่ายลำดับบวกและลบ

แบบที่ 2 : แบงค์ Y-Y ต่อนิวตรัลลงกราวด์ด้านเดียว (Y-Y Bank, One Neutral Grounded) ถ้านิวตรัลด้านใดด้านหนึ่งของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสที่เชื่อมต่อแบบ Y-Y ไม่ต่อลงกราวด์แล้วกระแสลำดับศูนย์จะไม่สามารถไหลในขดลวดทั้งสองด้านได้ เปรียบเสมือนขดลวดด้านหนึ่งป้องกันกระแสจากอีกด้านหนึ่งไม่ให้ไหลผ่าน จะมีลักษณะเป็นการเปิดวงจรที่เชื่อมต่อระหว่างหม้อแปลงทั้งสองด้านสำหรับกระแสลำดับศูนย์

แบบที่ 3 : แบงค์ $\Delta - \Delta$ ($\Delta - \Delta$ Bank) ผลรวมทางเฟสเซอร์ของแรงดันระหว่างเฟสจะเท่ากับศูนย์ทั้งสองด้านของหม้อแปลง $\Delta - \Delta$ ดังนั้น $V_{AB0} = V_{ab0} = 0$ วงจรข่ายสมมูลลำดับบวกและลบสำหรับหม้อแปลง $\Delta - \Delta$ จะเหมือนกับหม้อแปลง Y-Y แต่เนื่องจากวงจร Δ จะไม่มีทางไหลย้อนกลับสำหรับกระแสลำดับศูนย์ จึงไม่มีกระแสลำดับศูนย์ไหลในอีกด้านหนึ่งของ $\Delta - \Delta$ ด้วย แม้ว่ากระแสนี้จะสามารถไหลวนภายในขดลวด Δ ได้ ดังนั้น $I_{A0} = I_{a0} = 0$

แบบที่ 4 : แบงค์ Y- Δ ต่อนิวตรัลลงกราวด์ด้าน Y (Y-Δ Bank, Grounded Y) เมื่อมีการต่อนิวตรัลของหม้อแปลง Y- Δ ลงกราวด์ด้าน Y กระแสลำดับศูนย์จะไหลผ่านขดลวดด้าน Y ลงกราวด์ได้เพราะกระแสเหนี่ยวนำที่ตรงกันสามารถไหลวนใน Δ ได้ วงจรสมมูลทางด้าน Y จะต่อผ่านอิมพีแดนซ์สมมูลลงสู่บัสอ้างอิง โดยที่ทางด้าน Δ เปิดวงจรไว้

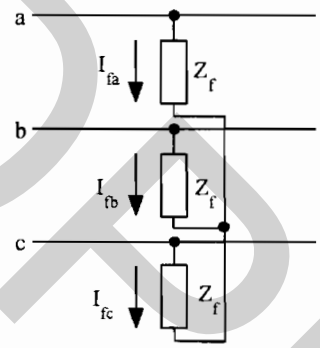
แบบที่	สัญลักษณ์	แผนภาพการต่อวงจร	วงจรข่ายสมมูลลำดับศูนย์
1			
2			
3			
4			
5			

ภาพที่ 2.5 แสดงวงจรข่ายสมมูลลำดับศูนย์ของการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส

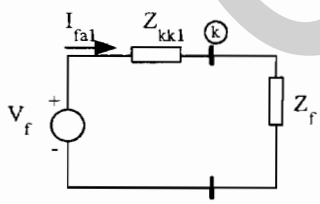
DPU

แบบที่ 5 : แบงค์ Y- Δ ไม่ต่อนิวตรัลลงกราวด์ด้าน Y (Y-Δ Bank, Ungrounded Y) จะเปรียบเสมือนมีอิมพีแดนซ์ Z_n ที่ต่อระหว่างนิวตรัลและกราวด์เป็นค่าอนันต์ ซึ่งทำให้อิมพีแดนซ์ $3Z_n$ ในวงจรสมมูลลำดับศูนย์ของการเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบที่ 4 เป็นค่าอนันต์ด้วย ทั้งนี้กระแสลำดับศูนย์จึงไม่สามารถไหลในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าได้

2.1.3.5 ภาวะผิดปกติแบบ 3 เฟส (Three Phase Faults) ภาวะผิดปกติแบบ 3 เฟสจะเป็นลักษณะการเกิดภาวะผิดปกติแบบสมมาตร (Symmetrical Faults) อาจเกิดจากสายตัวนำสามเฟสแตะกันซึ่งจะลงกราวด์หรือไม่ก็ได้ การเกิดภาวะผิดปกติแบบ 3 เฟสในระบบส่งกำลังไฟฟ้าจะมีค่ากระแสภาวะผิดปกติสูงสุด จึงต้องนำมาพิจารณาในการวิจัยนี้



ภาพที่ 2.6 แสดงแผนภาพจำลองการเชื่อมต่อสำหรับภาวะผิดปกติแบบ 3 เฟสผ่านอิมพีแดนซ์



ภาพที่ 2.7 แสดงการเชื่อมต่อวงจรสมมูลเทวินินของวงจรข่ายลำดับเพื่อจำลองการเกิดภาวะผิดปกติแบบ 3 เฟสที่บัส k ในระบบไฟฟ้า

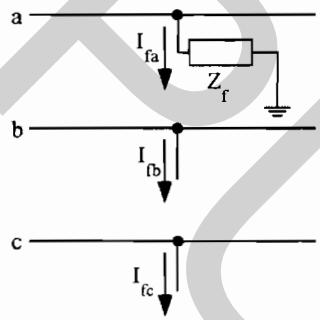
ภาพที่ 2.6 แสดงแผนภาพจำลองการเชื่อมต่อสำหรับภาวะผิดปกติชนิดสมมาตรแบบ 3 เฟส จะเห็นได้ว่าระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลจะยังคงรักษาสมมาตรเมื่อเกิดภาวะผิดปกติแบบ 3 เฟสที่บัส k เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างไลน์กับจุดต่อร่วมของแต่ละเฟสมีค่าเท่ากัน และจะมีเฉพาะกระแสลำดับบวกไหลเท่านั้น จากภาพที่ 2.7 ค่าภาวะผิดปกติอิมพีแดนซ์ Z_f จะมีค่าเท่ากันทุกเฟส ในการวิเคราะห์การลัดวงจรจะจำลองการเกิดภาวะผิดปกติแบบ 3 เฟสด้วย

วงจรสมมูลเทวินินลำดับบวก โดยจะเพิ่มอิมพีแดนซ์ Z_f เข้าไปในวงจรสมมูลเทวินินลำดับบวกของระบบที่บัส k ตามภาพที่ 2.9 และสามารถคำนวณค่ากระแสภาวะผิดปกติได้จากสมการ

$$I_{fa1} = \frac{V_f}{Z_{kk1} + Z_f} \tag{2.68}$$

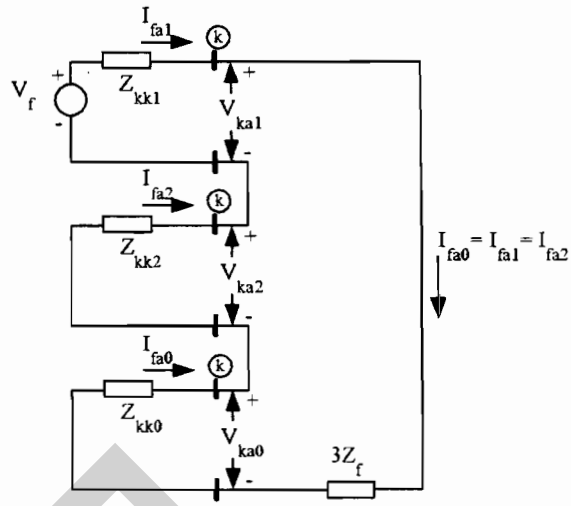
เมื่อ V_f แทนแรงดันที่บัส k ก่อนเกิดภาวะผิดปกติ และ Z_{kk1} แทนค่าอิมพีแดนซ์เทวินิน ของวงจรข่ายลำดับบวกที่วัดระหว่างบัส k และบัสอ้างอิง

2.1.3.6 ภาวะผิดปกติแบบไลน์เดี่ยวลงกราวด์ (Single Line-to-Ground Faults) ภาวะผิดปกติแบบไลน์เดี่ยวลงกราวด์จะเป็นลักษณะการเกิดภาวะผิดปกติแบบไม่สมมาตร (Unsymmetrical Faults) เป็นชนิดที่พบมากที่สุด จากสถิติการเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้องของ กฟภ. พบว่า 80% ของภาวะผิดปกติที่เกิดในระบบส่งกำลังไฟฟ้าของ กฟภ. เป็นภาวะผิดปกติแบบไลน์เดี่ยวลงกราวด์ ซึ่งอาจเกิดจากสาเหตุฟ้าผ่าหรือสายตัวนำแตะกับโครงสร้างที่เป็นกราวด์ จึงต้องนำมาพิจารณาในการวิจัยนี้เช่นเดียวกัน



ภาพที่ 2.8 แสดงแผนภาพจำลองการเชื่อมต่อสำหรับภาวะผิดปกติแบบไลน์เดี่ยวลงกราวด์ผ่านอิมพีแดนซ์

DPU



ภาพที่ 2.9 แสดงการเชื่อมต่อวงจรสมมูลเทวินินของวงจรข่ายลำดับเพื่อจำลองการเกิดภาวะผิดปกติแบบไลน์เดี่ยวลงกราวด์ที่บัส k ในระบบไฟฟ้า

แผนภาพจำลองการเชื่อมต่อสำหรับภาวะผิดปกติแบบไลน์เดี่ยวลงกราวด์ผ่านอิมพีแดนซ์ Z_f แสดงในภาพที่ 2.9 โดยสมมติให้เกิดภาวะผิดปกติเฟส a ลงกราวด์ ขึ้นที่บัส k จะมีเงื่อนไขประกอบด้วย

$$I_{fb} = 0 \qquad I_{fc} = 0 \qquad V_{ka} = Z_f I_{fa} \tag{2.69}$$

จากเงื่อนไข $I_{fb} = I_{fc} = 0$ สามารถเขียนองค์ประกอบสมมาตรของกระแสได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_{fa0} \\ I_{fa1} \\ I_{fa2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_{fa} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2.70}$$

จากเมตริกซ์ข้างต้น สามารถเขียนแยกสมการได้ว่า

$$I_{fa0} = I_{fa1} = I_{fa2} = \frac{I_{fa}}{3} \tag{2.71}$$

ย้ายข้างสมการที่ (2.71) จะได้ว่า

$$I_{fa} = 3I_{fa0} \tag{2.72}$$

จากภาพที่ 2.9 จะได้สมการขององค์ประกอบสมมาตรของแรงดันไฟฟ้า ดังนี้

$$\begin{aligned} V_{ka0} &= -Z_{kk0} I_{fa0} \\ V_{ka1} &= V_f - Z_{kk1} I_{fa0} \\ V_{ka2} &= -Z_{kk2} I_{fa0} \end{aligned} \tag{2.73}$$

แทนค่าสมการที่ (2.72) ลงในสมการที่ (2.59) จะได้ $V_{ka} = 3Z_f I_{fa0}$ จากนั้น

$$V_{ka} = V_{ka0} + V_{ka1} + V_{ka2} = V_f - (Z_{kk0} + Z_{kk1} + Z_{kk2})I_{fa0} = 3Z_f I_{fa0} \quad (2.74)$$

ย้ายข้างสมการที่ (2.74) สามารถหาค่ากระแสภาวะผิดปกติได้เท่ากับ

$$I_{fa0} = I_{fa1} = I_{fa2} = \frac{V_f}{Z_{kk0} + Z_{kk1} + Z_{kk2} + 3Z_f} \quad (2.75)$$

ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้โปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรม โดยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าจะเลือกใช้วิธีการนิวตันราฟสัน ซึ่งจะช่วยให้การลู่เข้าหาคำตอบสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่มีความซับซ้อนเร็วขึ้น

2.2 ทฤษฎีการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Reliability)

ทฤษฎีหลักที่ใช้ในการศึกษางานวิจัยนี้จะใช้ทฤษฎีเรื่องความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า (Power System Reliability) ในการวิจัยนี้จะศึกษากรณีเมื่อการเชื่อมโยงสายส่งของ กฟภ. จะมีลักษณะเป็นแบบวงรอบปิด การดำเนินงานในลักษณะนี้จะช่วยให้เกิดไฟฟ้าดับสำหรับผู้ใช้ไฟได้หรือหากทำการก่อสร้างสถานีแยกจ่ายไฟแล้ว และระบบป้องกันทำงานสมบูรณ์แล้วในทางอุดมคติจะไม่ทำให้เกิดไฟฟ้าดับเลย อย่างไรก็ตามการดำเนินงานลักษณะนี้ทำให้จำนวนครั้งที่เกิดไฟฟ้าดับของลูกค้าลดลง และจะส่งผลให้ระยะเวลาที่เกิดไฟฟ้าดับลดลง ดัชนีพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณความเชื่อถือได้ของระบบส่งกำลังไฟฟ้า ได้แก่

ความพร้อมใช้งาน (Availability :A) หมายถึง ความน่าจะเป็นที่ระบบสามารถจ่ายไฟได้

ความไม่พร้อมใช้งาน (Unavailability :U) หมายถึง ความน่าจะเป็นที่ระบบไม่สามารถจ่ายไฟได้ การคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้พื้นฐานของระบบกำลังไฟฟ้ามีดังนี้

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{m}{m + r} = \frac{m}{T} = \frac{f}{\lambda} \quad (2.76)$$

$$U = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{r}{r + m} = \frac{r}{T} = \frac{f}{\mu} \quad (2.77)$$

เมื่อ

$$m = \frac{1}{\lambda} \quad (2.78)$$

$$r = \frac{1}{\mu} \quad (2.79)$$

$$m + r = \frac{1}{f} \quad (2.80)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.81)$$

โดย λ คือ อัตราความเสียหายเฉลี่ย (Failure Rate)

μ คือ อัตราการซ่อมแซม (Repair Rate)

m คือ ช่วงเวลาที่ทำงานโดยเฉลี่ย (Mean Time to Fail : MTTF)

r คือ ช่วงเวลาในการซ่อมแซม (Mean Time to Repair : MTTR)

m+r คือ ช่วงเวลาระหว่างเกิดความเสียหาย

f คือ ความถี่ในการเกิดความเสียหาย

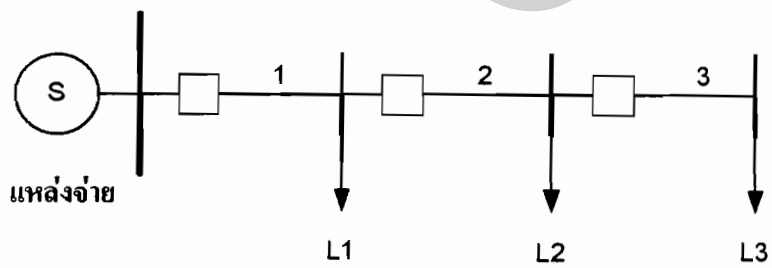
T คือ คาบเวลาในการเกิดความเสียหาย

2.2.1 ความเชื่อถือได้ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบเรเดียล ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบเรเดียล คือ ระบบที่ประกอบไปด้วยการต่อกันแบบอนุกรมของภาพที่ 21 ในการคำนวณจะใช้หลักการของระบบอนุกรม ดัชนีความเชื่อถือได้พื้นฐานของจุดโหลดที่นิยมใช้กันได้แก่

อัตราการล้มเหลวเฉลี่ย (Average Outage Time : λ) หมายถึง ช่วงระยะเวลาเฉลี่ยของการล้มเหลวหรือการไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ ณ จุดโหลดตามที่กำหนดไว้โดยเฉลี่ย ความถี่ดังกล่าวมักมีหน่วยเป็นจำนวนครั้งต่อหนึ่งปี

ระยะเวลาที่เกิดไฟฟ้าดับเฉลี่ย (Average Outage Time : r) หมายถึง ช่วงระยะเวลาเฉลี่ยที่เกิดเหตุขัดข้องหรือเกิดไฟฟ้าดับ ณ จุดโหลดนั้นในแต่ละครั้งจนระบบกลับคืนสู่สภาวะปกติ

ระยะเวลาที่เกิดไฟฟ้าดับในหนึ่งปี (Average Annual Outage Time : U) หมายถึงช่วงระยะเวลาที่เกิดเหตุขัดข้องรวมกันทั้งหมดในหนึ่งปี



ภาพที่ 2.10 ระบบส่งกำลังแบบเรเดียล

ในการคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบส่งกำลังไฟฟ้า ณ จุดโหลดของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าโครงข่ายเรเดียลมีดังนี้

$$\lambda_s = \sum_i \lambda_i \qquad (2.82)$$

$$U_s = \sum_i \lambda_i r_i \tag{2.83}$$

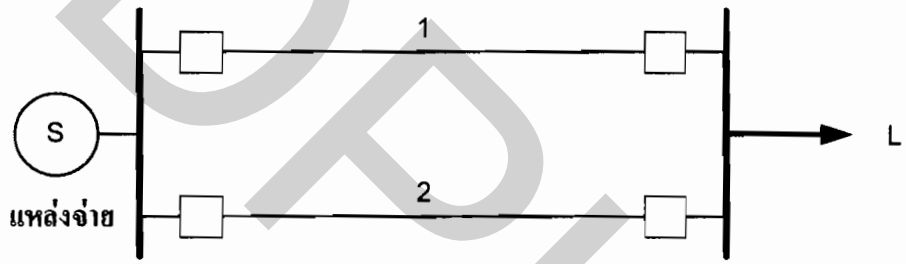
$$r_s = \frac{U_s}{\lambda_s} = \frac{\sum_i \lambda_i r_i}{\sum_i \lambda_i} \tag{2.84}$$

โดยที่ λ คือ อัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์

r คือ ระยะเวลาที่เกิดเหตุขัดข้องของอุปกรณ์

i คือ จำนวนอุปกรณ์ที่ต่ออนุกรม

2.2.2 ความเชื่อถือได้ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบขนาน ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบขนาน หมายถึง ระบบที่ประกอบด้วยการต่อขนานกันของอุปกรณ์ในระบบถ้าอุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่งเกิดความเสียหาย ระบบยังสามารถที่จะทำงานต่อไปได้



ภาพที่ 2.11 ระบบส่งกำลังแบบขนาน

จากภาพที่ 2.11 หากพิจารณาว่าอุปกรณ์ป้องกัน และบัสบาร์สามารถทำงานได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นอุปกรณ์ที่เราจะพิจารณาคือสายส่ง ซึ่งได้แก่อุปกรณ์ที่ 1 และ 2 ในการคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบส่งกำลังไฟฟ้า ณ จุดโหลดของระบบส่งกำลังไฟฟ้าโครงข่ายขนานมีรายละเอียดดังนี้

$$\lambda_{pp} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (r_1 + r_2)}{1 + \lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2} \tag{2.85}$$

$$\lambda_{pp} = \lambda_1 \lambda_2 (r_1 + r_2) \qquad \text{เมื่อ} \quad \lambda_1 r_1 << 1 \tag{2.86}$$

$$r_{pp} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \tag{2.87}$$

$$U_{pp} = \lambda_{pp} r_{pp} = \lambda_1 \lambda_2 r_1 r_2 \tag{2.88}$$

โดยที่ λ คือ อัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์

r คือ ระยะเวลาที่เกิดเหตุขัดข้องของอุปกรณ์

i คือ จำนวนอุปกรณ์ที่ต่ออนุกรม

2.2.3 การประเมินอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ จากการพัฒนาแบบจำลองความเสียหายเฉลี่ยจะนำค่าความเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับในแต่ละพื้นที่มาใช้ร่วมกับดัชนีสากล โดยใช้วิธีระบุเหตุขัดข้อง (Contingency Enumeration Method : CEM) วิธีนี้จะทำการคำนวณค่าปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายไฟได้ (Energy Not Supply : ENS) และมูลค่าความเสียหายทั้งหมดที่เกิดจากไฟดับ

ดัชนีแสดงปริมาณพลังงานไฟฟ้า ที่ไม่ได้รับการจ่ายของผู้ใช้ไฟ หรือจำนวนพลังงานที่ไม่ได้รับการจ่ายไฟ คำนวณโดย

$$ENS = \sum L_{av(i)} U_i \qquad (2.89)$$

เมื่อ ENS คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (MW/yr.) ที่ไม่ได้รับการจ่ายไฟของผู้ใช้ไฟ

i คือ จุดโหลดลำดับที่ i

$L_{av(i)}$ คือ โหลดเฉลี่ยที่ต่อจุดโหลด i

$U_{(i)}$ คือ ระยะเวลาที่เกิดไฟฟ้าดับในหนึ่งปี (นาที)

สำหรับมูลค่าความเสียหายทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการเกิดไฟฟ้าดับของผู้ใช้ไฟคำนวณโดย

$$ECOST = \sum_{j=1}^{N} C(r_j) L_{av} \lambda_j \qquad (2.90)$$

เมื่อ ECOST คือ มูลค่าความเสียหายทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการเกิดไฟฟ้าดับของผู้ใช้ไฟมีหน่วยเป็น (บาท/ปี)

$C(r_j)$ คือ ค่าความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับของเหตุการณ์ j (บาท/kW-เฉลี่ย)

N คือ สาเหตุของการเกิดไฟฟ้าดับ

r_j คือ ระยะเวลาไฟดับเฉลี่ยของเหตุการณ์ j (นาที)

λ_j คือ ความถี่ของการเกิดเหตุการณ์ j (ครั้ง/ปี)

2.2.4 การประเมินความสูญเสียทางด้านเทคนิค ความสูญเสียทางด้านเทคนิคซึ่งเกิดจากค่าความต้านทานในสายส่งสำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะอาศัยค่าผลต่างของความสูญเสียที่ได้รับเพิ่มขึ้นจากการปรับปรุงสายส่งมาคิดเป็นผลประโยชน์ที่ได้รับสามารถคำนวณได้จากสมการ

Total Annual Energy Loss (kWh) = Average Energy Loss (kW) x 8,760 (2.91)

เมื่อ Average Energy Loss (kW) คือ พลังงานสูญเสียทางเทคนิค

8,760 คือ จำนวนชั่วโมงในหนึ่งปี

2.2.5 การประเมินค่าเสียโอกาสในการจ่ายไฟเพื่อทำกำไร (Opportunity Benefit) หากเกิดกรณีที่ กฟภ. ไม่สามารถจ่ายไฟได้นั้น กฟภ. จะคิดค่าเสียโอกาสในการทำกำไรตามสมการ

$$\text{Opportunity Cost per year(บาท/ปี)} = \Delta\text{ENS} \times \text{Diff of Energy Cost} \quad (2.91)$$

เมื่อ Diff of Energy Cost คือ ค่าความแตกต่างของราคาพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยเฉลี่ยที่ บมจ. กฟผ. ขายให้กับ กฟภ.

ΔENS คือ ค่าความแตกต่างระหว่างค่า ENS ก่อนปรับปรุงระบบกับหลังปรับปรุงระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า

2.3 ทฤษฎีการวิเคราะห์ความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์

ทฤษฎีเศรษฐศาสตร์อยู่บนรากฐานความเชื่อที่ว่า พฤติกรรมการเลือกของบุคคลในการดำเนินกิจกรรมจะเป็นไปอย่างมีเหตุมีผล (Rational Behavior) เสมอ ในการตัดสินใจทุกครั้งบุคคลจะเปรียบเทียบผลประโยชน์ (Benefit) และต้นทุน (Cost) และดำเนินกิจกรรม เมื่อเขาคำนวณว่าผลประโยชน์มากกว่าต้นทุน การวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ (Cost Benefit Analysis) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์นโยบายหรือโครงการทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ทางสังคม (Social Cost-Benefit Analysis) มาจากพื้นฐานความคิดเดียวกัน แต่เป็นวิธีการคำนวณหามูลค่าทางเศรษฐศาสตร์เพื่อช่วยในการตัดสินใจของภาครัฐ ทั้งนี้ โดยการแทนที่ต้นทุนและผลประโยชน์ส่วนบุคคลด้วยต้นทุนและผลประโยชน์ทางสังคม

เมื่อส่วนต่างๆ ของระบบเศรษฐกิจต่างมีความเกี่ยวพันซึ่งกันและกัน การเปลี่ยนแปลงใดๆ ที่เกิดขึ้นในระบบเศรษฐกิจส่วนใดส่วนหนึ่ง จะส่งผลกระทบถึงการจัดสรรทรัพยากรในทุกๆ ส่วนที่เหลืออยู่ในระบบเศรษฐกิจ การจัดสรรทรัพยากรในระบบเศรษฐกิจที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลให้สวัสดิการของสังคมเพิ่มขึ้นหรือลดลง อันเป็นเรื่องของเศรษฐศาสตร์สวัสดิการที่เกี่ยวข้องกับการประเมินสถานภาพทางเศรษฐกิจของสังคมโดยส่วนรวม

2.3.1 การจัดสรรที่เป็นเลิศตามหลักการวิจารณญาณของพาเรโต้ หมายถึง สภาวการณ์ที่สังคมไม่สามารถปรับปรุงการจัดสรรให้ดีขึ้นได้อีก โดยที่ "ดีขึ้น" ตามหลักวิจารณญาณของพาเรโต้ คือ การที่สามารถทำให้บุคคลหนึ่งบุคคลใดหรือกลุ่มคนหนึ่งได้รับผลระโยชน์สูงขึ้นกว่าเดิม โดยไม่ทำให้ผู้อื่นต้องได้รับผลเสียหายหรือเสียผลประโยชน์ที่เคยได้รับแม้แต่คนเดียวสังคมที่ไม่มีทางปรับปรุงให้การจัดสรร "ดีขึ้น" ได้อีกตามหลักวิจารณญาณข้างต้นจึงถือได้ว่าสังคมนั้นๆ อยู่ในภาวะที่ดีที่สุดแล้ว สังคมที่มีการจัดสรรทรัพยากรที่มีประสิทธิภาพเป็นเลิศตามความหมายข้างต้นได้จะต้องบรรลุเงื่อนไขที่จำเป็น 3 ประการคือ

1. ความมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยน (Exchange efficiency) การจัดสรรแลกเปลี่ยนสินค้าและบริการต่างๆ ในหมู่ผู้บริโภคจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่ออัตราการทดแทนในการบริโภคหน่วยสุดท้ายระหว่างสินค้าและบริการต่างๆ ในหมู่ผู้บริโภคจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่ออัตราการทดแทนในการบริโภคหน่วยสุดท้ายระหว่างสินค้า 2 ชนิดใดๆ (ซึ่งในที่นี้สมมติให้เป็นสินค้า x และ y) หรือ Marginal Rate of Substitution ระหว่าง x และ y (MRS_{xy})[1] ของทุกๆ คนในสังคมเท่ากัน นั่นคือ

$$MRS^{A}_{xy} = MRS^{B}_{xy} = MRS^{C}_{xy} \ldots\ldots\ldots = MRS^{N}_{xy}$$

โดยที่ A, B, C,.....N คือ ผู้บริโภคในสังคม

และ x, y แทนสินค้า 2 ชนิดใดๆ

ดังนั้น ตราบเท่าที่ MRS_{xy} ของบุคคลในสังคมยังมีค่าไม่เท่ากัน การแลกเปลี่ยนที่จะนำไปสู่ความพอใจรวมที่สูงขึ้นย่อมทำได้ แสดงว่า ในภาวะที่ MRS_{xy} ของคนในสังคมไม่เท่ากัน ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนการบริโภคยังไม่ดีที่สุด สังคมสามารถที่จะแลกเปลี่ยนการบริโภคสินค้ากันเพื่อให้สังคมดีขึ้นได้ นั่นคือ สังคมยังไม่อยู่ ณ จุดดุลยภาพ แต่เมื่อใด MRS_{xy} ของสินค้าแต่ละคู่ของทุกๆ คนในสังคมมีค่าเท่ากัน การแลกเปลี่ยนต่อไปจะไม่ช่วยให้สังคมดีขึ้นแต่ประการใด เพราะการแลกเปลี่ยนนั้นจะทำให้คนหนึ่งมีความพอใจสูงขึ้น ในขณะที่อีกคนหนึ่งพอใจน้อยลงเสมอ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความพอใจในทิศทางตรงกันข้ามเช่นนี้ไม่สามารถระบุได้ว่าสังคมโดยรวมดีขึ้นตามหลักวิจารณญาณของพาเรโต้

2. ดุลยภาพทั่วไปและประสิทธิภาพในการผลิต (General equilibrium in Production and Production efficiency) การจัดสรรปัจจัยการผลิตชนิดต่างๆ ที่ระบบเศรษฐกิจมีอยู่ไปใช้ในการผลิตสินค้าและบริการต่างๆ จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่ออัตราการทดแทนในการใช้ปัจจัยหน่วยสุดท้าย หรือ Marginal Rate of Technical Substitution) ระหว่างปัจจัย L และ K (MRS_{LK})[2] เท่ากันในการผลิตสินค้าแต่ละชนิดนั่นคือ

$$MRS^{X}_{LK} = MRS^{Y}_{LK} = \ldots\ldots\ldots\ldots MRS^{Z}_{LK}$$

โดยที่ L คือ ปัจจัยแรงงาน

และ K คือ ปัจจัยทุนที่ใช้ในการผลิตสินค้า X, Y และ Z

3. ดุลยภาพทั่วไปทั้งการแลกเปลี่ยนและการผลิต หรือประสิทธิภาพในการกำหนดปริมาณการผลิต (General equilibrium in exchange and production of Output efficiency) จะเกิดขึ้นเมื่อเกิดประสิทธิภาพในการผลิตและการบริโภคที่สอดคล้องกัน อันนำไปสู่ภาวะดุลยภาพทั่วไป (General equilibrium) ของระบบเศรษฐกิจ และระบบเศรษฐกิจโดยรวมจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่ออัตราการทดแทนในการบริโภคหน่วยสุดท้ายของสินค้า 2 ชนิดใดๆ (MRS_{xy}) และอัตราการ

0190464

ทดแทนในการผลิตหน่วยสุดท้ายของสินค้า 2 ชนิดนั้นๆ (Marginal Rate of Transformation = MRT_{xy}) มีค่าเท่ากัน หรือ $MRS_{xy} = MRT_{xy}$ ในขณะที่ MRS_{xy} แสดงอัตราการทดแทนกันในความรู้สึกของผู้บริโภคระหว่างสินค้า 2 ชนิด

แม้ว่าเงื่อนไขทั้ง 3 ข้างต้นจะเป็นเงื่อนไขที่จำเป็น (Necessary conditions) ที่จะทำให้สังคมมีประสิทธิภาพที่สุดในการผลิตและการบริโภค แต่เงื่อนไขดังกล่าวไม่เพียงพอที่จะนำสังคมไปสู่เป้าหมายสวัสดิการสังคมสูงสุด (Welfare optimum) ซึ่งสังคมข้างต้นอาจเป็นสังคมที่อยู่ร่วมกันแบบสังคมนิยมหรือทุนนิยมก็ได้ ตราบเท่าที่สังคมนั้นๆ มีกลไกที่สามารถจัดสรรทรัพยากรเพื่อการผลิตและการบริโภคให้เป็นไปตามเงื่อนไขข้างต้นได้ทุกประการ

2.3.2 หลักการชดเชย (Compensation principle) ตามหลักวิจารณญาณของพาเรโต้ การเปลี่ยนแปลงที่จะทำให้สังคมดีขึ้นคือ การเปลี่ยนแปลงที่มีผลให้บุคคลอย่างน้อยหนึ่งคนดีขึ้นในขณะที่ไม่มีบุคคลใดเลยที่รู้สึกเลวลง แต่เกณฑ์ในการตัดสินข้างต้นมีขอบเขตการใช้ได้แคบมาก เพราะทุกวันนี้การเปลี่ยนแปลงใดๆ ย่อมก่อให้เกิดบุคคลหรือกลุ่มบุคคลได้รับประโยชน์ และบุคคลหรือกลุ่มบุคคลผู้สูญเสียผลประโยชน์เสมอ ในกรณีเช่นนี้ หลักวิจารณญาณของพาเรโต้ไม่สามารถตัดสินได้ว่าการเปลี่ยนแปลงนั้นๆ ทำให้สังคมโดยรวมดีขึ้นหรือเลวลง เพราะมีทั้งคนได้และคนเสีย แต่ในการเปลี่ยนแปลงที่มีทั้งคนที่ได้ผลประโยชน์และคนที่เสียผลประโยชน์ ถ้าสามารถพิสูจน์ได้ว่าขนาดของผลประโยชน์โดยรวมที่คนกลุ่มหนึ่งได้รับมากกว่าขนาดของผลประโยชน์ทั้งสิ้นที่คนอีกกลุ่มหนึ่งเสียไป การเปลี่ยนแปลงนั้นๆ ก็มีความเป็นไปได้ที่จะทำให้สังคมโดยรวมดีขึ้น นักเศรษฐศาสตร์เรียกกรณีเช่นนี้ว่า "Potential Pareto Improvement" ซึ่งแนวความคิดนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในโลกแห่งความเป็นจริงได้อย่างกว้างขวาง เมื่อเป็นเช่นนี้จึงเกิดแนวคิดที่จะใช้ในการทดสอบขนาดของผลประโยชน์และผลเสียที่บุคคลทั้งสองฝ่ายขัดแย้งกัน ซึ่งหลักการชดเชยของ Kaldor และ Hicks หรือที่รู้จักกันในชื่อว่า "Kaldor-Hicks criterion" เป็นวิธีการทดสอบวิธีหนึ่ง ซึ่งหลักการชดเชยของ Kaldor และ Hicks มีใจความว่า "ถ้าการเปลี่ยนแปลงใดมีผลให้บางคนในสังคมดีขึ้น บางคนในสังคมรู้สึกเลวลง และคนที่ดีขึ้นสามารถชดเชยคนที่เลวลงในลักษณะที่ดีที่สุดแล้วไม่มีใครเลวลง การเปลี่ยนแปลงนั้นน่าจะทำให้สังคมโดยรวมดีขึ้น (ถึงแม้จะไม่ต้องมีการชดเชยกันจริงเพียงแต่ทดสอบว่าการชดเชยในลักษณะดังกล่าวมีความเป็นไปได้)"

2.3.3 เกณฑ์การตัดสินใจเพื่อการลงทุนที่ให้ค่าของเงินต่างเวลาไม่เท่ากัน เนื่องจากข้อเท็จจริงที่ว่าโครงการส่วนใหญ่การลงทุนมีอายุมากกว่า 1 ปีขึ้นไป มูลค่าของต้นทุนและผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นต่างเวลาในแต่ละปีจะมีค่าไม่เท่ากัน ในการวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการลงทุนจึงต้องปรับมูลค่าของต้นทุนและผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นในอนาคตให้เป็นมูลค่าในปัจจุบัน (Present Value) จึงสามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ สำหรับการวิเคราะห์ทางเศรษฐกิจ ตัวปรับค่า

ศูนย์สนเทศและหอสมุด
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

ของเงินอนาคตให้เป็นเงินปัจจุบัน จะเรียกว่าอัตราคิดลดทางสังคม (Social rate of discount) หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจลงทุนที่ให้ค่าของเงินต่างเวลาไม่เท่ากันสามารถคำนวณได้ดังนี้

1. อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefit Cost Ratio : BCR) การที่โครงการปรับปรุงระบบส่งกำลังไฟฟ้าจะเป็นที่ยอมรับว่ามีความเหมาะสมหรือไม่มูลค่าผลประโยชน์ที่ได้หักลดแล้วควรมากกว่ามูลค่าของต้นทุนที่ได้หักลดแล้วเช่นกัน โดยหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$BCR = \frac{PWTB}{PWTC} = \frac{\sum_{t=1}^{n} \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{n} \frac{C_t}{(1+r)^t}} \qquad (2.92)$$

เมื่อ PWTB (Present Worth Total Benefit) คือ ผลประโยชน์ที่ได้รับจากการลงทุนทั้งหมด ณ ปีปัจจุบัน

PWTC (Present Worth Total Cost) คือ ค่าใช้จ่ายในการลงทุนทั้งหมด ณ ปีปัจจุบัน

หลักเกณฑ์การตัดสินใจมีดังนี้

B_t คือ ผลประโยชน์ในปีที่ t

C_t คือ ต้นทุนในปีที่ t

r คือ อัตราคิดลดของสังคม

n คือ ปีที่สิ้นสุดของโครงการ

BCR > 1 ยอมรับข้อเสนอของโครงการ

BCR < 1 ปฏิเสธข้อเสนอของโครงการ

BCR = 1 ไม่ว่าจะยอมรับหรือปฏิเสธโครงการก็ไม่มีผลกระทบใดๆ

2. หลักเกณฑ์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value : NPV)

มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ คือ มูลค่าปัจจุบันของกระแสผลตอบแทนสุทธิหรือแระแสเงินสดของโครงการ ซึ่งคำนวณด้วยการทำส่วนลดกระแสผลตอบแทนสุทธิตลอดชั่วอายุของโครงการให้เป็นมูลค่าปัจจุบันมีสูตรคำนวณ คือ

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} \frac{(B_t - C_t)}{(1+r)^t} \qquad (2.93)$$

ดังนั้นกฎการตัดสินใจก็คือ ควรรับหรืออนุมัติโครงการเมื่อ NPV $\geq$ 0 แต่หาก NPV ของโครงการติดลบหรือต่ำกว่าศูนย์ ก็ไม่ควรรับหรืออนุมัติโครงการ เพราะรายได้ไม่คุ้มกับค่าใช้จ่ายในการลงทุน

DPU

3. อัตราผลตอบแทนของโครงการทางเศรษฐกิจ (Internal Rate of Return : IRR) เป็นหลักเกณฑ์การประเมินโครงการที่นิยมมากที่สุดวิธีหนึ่ง เนื่องจากสอดคล้องกับอัตราผลกำไรของโครงการ หลักเกณฑ์นี้สามารถคำนวณได้โดยกำหนดให้ NPV = 0 และคำนวณค่า r หรือ IRR หากเป็นการวิเคราะห์โครงการทางเศรษฐกิจค่า IRR ที่ได้จะเป็นค่า EIRR (Economic Internal Rate of Return : EIRR) และยังสามารถคำนวณได้อีกวิธีหนึ่งโดย

$$EIRR = r_L + (r_H - r_L)\left[\frac{NPV_L}{NPV_L - NPV_H}\right] \tag{2.94}$$

โดยที่ r_L คือ อัตราคิดลดตัวต่ำ

r_H คือ อัตราคิดลดตัวสูง

NPV_H คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิที่คำนวณจาก r_H

NPV_L คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิที่คำนวณจาก r_L

กฎการตัดสินใจของการใช้หลักเกณฑ์นี้ คือ โครงการจะเป็นที่ยอมรับได้เมื่อ IRR มีค่ามากกว่าอัตราค่าเสียโอกาสของเงินลงทุน

4. การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) เป็นการวิเคราะห์โดยเลือกตัวแปรที่คาดว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงโดยอาจเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ไม่พึงประสงค์ เช่น อุปสงค์ของการใช้ไฟฟ้าลดลงจาก 10 เปอร์เซนต์/ ปี เป็น 7 หรือ 5 เปอร์เซนต์/ ปี เป็นต้น

5. Switching Value เป็นการทดสอบความไวประเภทหนึ่ง เพื่อตอบคำถามว่าค่าของตัวแปรจะเปลี่ยนไปมากน้อยแค่ไหนโครงการจึงจะยังคงมีความเป็นไปได้ในระดับต่ำสุด การทดสอบความไวโดยใช้ Switching Value มีสองด้าน คือ

การทดสอบความไวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงต้นทุน (Switching Value of Cost : SVC) จะบอกว่าต้นทุนเพิ่มขึ้นได้สูงสุดร้อยละเท่าใด ซึ่งหากค่าสูงกว่านี้แล้ว ผลตอบแทนโครงการจะไม่คุ้มค่ากับการลงทุน ถ้าค่า SVC ต่ำแสดงว่าโครงการมีความไวสูง (ไม่ดี)

$$SVC = \frac{PV_B - PV_C}{PV_C} \times 100 \tag{2.95}$$

การทดสอบความไวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงผลประโยชน์ (Switching Value of Benefit : SVB) จะบอกว่าผลประโยชน์ลดลงได้สูงสุดร้อยละเท่าใด ซึ่งหากค่าสูงกว่านี้แล้ว ผลตอบแทนโครงการจะไม่คุ้มค่ากับการลงทุน ถ้าค่า SVB ต่ำแสดงว่าโครงการมีความไวสูง (ไม่ดี) คำนวณโดย

$$SVB = \frac{PV_B - PV_C}{PV_B} \times 100 \tag{2.96}$$

2.3.4 อัตราการคิดลดทางสังคม(Social Rate of Discount) ส่วนใหญ่โครงการมักมีอายุโครงการมากกว่า 1 ปี เครื่องมือที่ช่วยในการปรับมูลค่าต้นทุนและผลประโยชน์ให้มีมูลค่าเป็นมูลค่า ณ ปีใดปีหนึ่งและตัดสินการลงทุนในโครงการนั้นๆ ก็คือ อัตราคิดลดทางสังคม ซึ่งมีแนวคิดต่างๆ กัน สามารถที่จะแบ่งแนวคิดเป็น 2 ฝ่ายหลักๆ คือ

1. การคิดอัตราชดเชยการบริโภคข้ามเวลาของสังคม (Social Rate of Time Preference: SRTP) หมายถึง การคิดอัตราเปรียบเทียบความพอใจในการบริโภคของสังคมในอนาคต กับการบริโภคของสังคมในปัจจุบัน ตัวอย่างเช่น สังคมหนึ่งมีการบริโภคเป็นมูลค่า 100 บาท ในปัจจุบัน สมมติว่าสังคมนี้จะต้องเลื่อนการบริโภคสินค้าและบริการมูลค่า 100 บาทออกไปอีก 1 ปี เพื่อให้สังคมมีความพึงพอใจกับการบริโภคในอนาคตเท่ากับการบริโภคในปัจจุบัน ปริมาณการบริโภคของสังคมในอนาคตจึงต้องมีมูลค่ามากกว่า 100 บาท สมมติมีมูลค่า 110 บาท ส่วนแตกต่างมูลค่า 10 บาท นี้เพื่อเป็นการชดเชยที่สังคมนี้ต้องรอคอยการบริโภคออกไปอีก 1 ปี ในตัวอย่างนี้อัตราการคิดลดของสังคมจึงเท่ากับร้อยละ 10 ทั้งนี้ โดยตั้งอยู่บนข้อสมมติที่ว่า โดยปกติแล้วบุคคลในสังคมชอบที่จะบริโภคในปัจจุบันมากกว่าในอนาคต

2. อัตราค่าเสียโอกาสของสังคม (Social Opportunity Cost Rate: SOCR) ตามหลักการนี้ อัตราผลตอบแทนจากการลงทุนในโครงการใดๆ ที่เกิดเพิ่มขึ้นใหม่หน่วยสุดท้าย (Marginal Project) ควรมากกว่าหรือเท่ากับค่าเสียโอกาสของทรัพยากรที่สังคมใช้ไปในโครงการนั้นๆ เช่น ถ้ารัฐนำทรัพยากรไปใช้เพื่อลงทุนในโครงการของรัฐ อัตราผลตอบแทนจากการลงทุนของรัฐอย่างน้อยที่สุดควรจะเท่ากับอัตราผลตอบแทนการลงทุนหน่วยสุดท้ายโดยภาคเอกชน

นอกจากนี้ ยังเป็นที่ยอมรับว่าอัตราค่าเสียโอกาสของสังคมควรเท่ากับอัตราผลตอบแทนการลงทุนในภาคเอกชนก่อนภาษี เพราะถึงแม้ว่าการเก็บภาษีรายได้ภาคเอกชนของรัฐบาลจะทำให้อัตราผลตอบแทนจากการลงทุนของภาคเอชนลดลง (ในความคิดของภาคเอกชน) แต่ถ้าพิจารณาสังคมโดยรวมแล้ว ผลประโยชน์ที่สังคมได้รับจากการลงทุนของภาคเอกชนยังคงเท่าเดิม เพียงแต่มีการถ่ายโอนผลประโยชน์บางส่วนจากภาคเอกชนไปสู่ภาครัฐ ดังนั้น อัตราการคิดลดของสังคมจึงควรจะเท่ากับอัตราผลตอบแทนการลงทุนหน่วยสุดท้ายของภาคเอกชนก่อนภาษี

2.3.5 วิธีกำหนดอัตราคิดลดของสังคมในทางปฏิบัติ อัตราที่ผู้วิเคราะห์โครงการนิยมใช้แทนอัตราชดเชยของการบริโภคต่างเวลาของสังคม SRTP คือ อัตราดอกเบี้ยพันธบัตรรัฐบาล ซึ่งโดยทั่วไปมักเป็นอัตราดอกเบี้ยต่ำสุดสำหรับพันธบัตรระยะยาว การที่บุคคลหนึ่งยังคงถือพันธบัตรรัฐบาลอยู่ทั้งๆ ที่ให้ผลตอบแทนต่ำ แสดงว่าอัตราการชดเชยการบริโภคต่างเวลาของคนกลุ่มนี้ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของสังคมอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่สูงไปกว่าอัตราดอกเบี้ยพันธบัตรรัฐบาล ส่วนกลุ่มคนอื่นๆ ที่ไม่ถือพันธบัตรรัฐบาลก็อาจมีอัตราชดเชยการบริโภคต่างเวลาไม่ต่างไปจากคนกลุ่มที่ถือพันธบัตร

รัฐบาลมากนัก ส่วนอัตราที่จะสะท้อนค่าเสียโอกาสของสังคม (SOCR) หรืออัตราผลตอบแทนจากการลงทุนหน่วยสุดท้ายในภาคเอกชนก่อนการหักภาษี ในทางปฏิบัติมักนิยมใช้อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ต่ำสุด (ที่ทางสถาบันการเงินคิดกับลูกค้าชั้นดี มีความเสี่ยงต่ำ เป็นค่าประมาณของอัตราผลตอบแทนจากการลงทุนที่มีความเสี่ยงต่ำหลังหักภาษีแล้ว แต่รวมเอาอัตราเงินเฟ้อเอาไว้ด้วย) อัตราผลตอบแทนการลงทุนก่อนหักภาษีจึงสามารถหาได้โดยปรับอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ต่ำสุดนั้นด้วยอัตราภาษีรายได้ธุรกิจ ผลที่ได้จะเป็นอัตราค่าเสียโอกาสที่ยังไม่ได้ขจัดอัตราเงินเฟ้อ ถ้าต้องการใช้อัตราคิดลดของสังคมที่เป็นอัตราที่แท้จริง (Real Rate) ต้องหักอัตราข้างต้นออกด้วยอัตราเงินเฟ้ออีกทีหนึ่งในการศึกษานี้จะใช้อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ต่ำสุดที่ธนาคารให้กับลูกค้าชั้นดี (Minimum Loan Rate : MLR) เป็นอัตราคิดลดทางสังคม

2.3.6 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจของโครงการ การวิเคราะห์ทางเศรษฐกิจ เป็นการตีมูลค่าต้นทุนและผลประโยชน์ด้วยราคาประสิทธิภาพ (Efficiency prices) และเป็นราคาที่ผู้ซื้อยินดีจ่าย (Willingness to pay) ราคาประสิทธิภาพนี้อาจเป็นราคาตลาดของสินค้าและบริการในตลาดที่มีการแข่งขันสมบูรณ์หรือเป็นราคาเงา (Shadow prices) ในกรณีที่ราคาถูกบิดเบือนไป (Distortion) ปัจจัยที่ทำให้ราคาตลาดบิดเบือนไปมีหลายประการ เช่น ตลาดอยู่ภายใต้การแข่งขันที่ไม่สมบูรณ์ รัฐบาลเข้าไปแทรกแซงตลาดในรูปแบบต่างๆ เกิดการประหยัดอันเนื่องมาจากขนาด (Economy of scale) สินค้าและบริการสาธารณะและผลกระทบภายนอก (Externalities) ที่เกิดจากโครงการ เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้ทำให้ราคาสินค้าและบริการไม่แสดงมูลค่าที่แท้จริง ดังนั้น ในการวิเคราะห์ทางเศรษฐกิจ นักเศรษฐศาสตร์จึงได้คำนวณราคาเงาขึ้นมา เพื่อตีมูลค่าต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการ เพราะการใช้ราคาเงาซึ่งเป็นราคาประสิทธิภาพจะมีผลทำให้การจัดสรรทรัพยากรมีประสิทธิภาพมากขึ้น

การวิเคราะห์ทางเศรษฐกิจจะเกี่ยวข้องกับการใช้ทรัพยากรที่แท้จริง(Real use of resources) ไม่เกี่ยวกับการโอนสิทธิทรัพยากรจากบุคคลหนึ่งไปยังอีกบุคคลหนึ่งในสังคม ซึ่งภาษีและเงินอุดหนุนซึ่งเป็นรายการประเภทเงินจ่ายโอนจึงไม่นับรวมว่าเป็นต้นทุนและผลตอบแทนทางเศรษฐกิจสำหรับประเทศไทยราคาตลาดของสินค้าและบริการส่วนใหญ่ถูกบิดเบือน ดังนั้น ในการวิเคราะห์ทางเศรษฐกิจของโครงการจะต้องคำนวณราคาเงาเป็นจำนวนมาก ทำให้ต้องสิ้นเปลืองเวลา ทางเลือกหนึ่งของการวิเคราะห์คือ ใช้ราคาตลาดตีมูลค่าต้นทุนและผลประโยชน์ ซึ่งมูลค่าต้นทุนและผลประโยชน์นี้เป็นมูลค่าทางการเงิน (Financial account) จากนั้นจึงแปลงค่าทางการเงินให้เป็นมูลค่าทางเศรษฐกิจ (Economic account) โดยใช้ตัวแปลงค่า

การปรับตัวแปลงค่าแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. ตัวแปลงค่ามาตรฐาน (SCF)

SCF คือ สัดส่วนระหว่างอัตราแลกเปลี่ยนทางการ (OER) กับอัตราแลกเปลี่ยนเงา (SER) หรือ

$$SCF = \frac{OER}{SER} \tag{2.97}$$

เมื่อ SCF = Standard Conversion Factor

SER = อัตราแลกเปลี่ยนเงา

OER = อัตราแลกเปลี่ยนทางการ

โดยหากถ้า SCF = 1 หมายถึง ไม่มีการบิดเบือนของอัตราแลกเปลี่ยนการคำนวณ

$$SCF = \frac{1+E}{(1+il)+(E+eE)} \tag{2.98}$$

โดยที่ E = มูลค่าสินค้าส่งออก

I = มูลค่าสินค้านำเข้า

i = อัตราเฉลี่ยของภาษีนำเข้า

e = อัตราเฉลี่ยภาษีขาออก

eE = มูลค่าภาษีขาออก

il = มูลค่าภาษีนำเข้า

ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า SCF คือ ตัวแปลงค่าของระบบเศรษฐกิจทั้งหมดที่รวมค่าของปัจจัยการผลิตและผลผลิตที่มีการซื้อขายระหว่างประเทศ

2. ตัวแปลงมูลค่าทางการเงินให้เป็นมูลค่าทางเศรษฐกิจ (Conversion factor: CF) จะแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

2.1 ตัวแปลงค่าเฉพาะ (Specific conversion factor: SCF) สินค้าใดคำนวณจาก

$$\text{CF} = \frac{\text{ราคาทางเศรษฐกิจของสินค้า}}{\text{ราคาทางการเงินของสินค้า}} = \frac{\text{ราคาเงา}}{\text{ราคาตลาด}} \tag{2.99}$$

โดยหากถ้า CF =1 (ราคาตลาดเท่ากับราคาเงา) แสดงว่าราคาตลาดไม่บิดเบือน

2.2 ตัวแปลงค่าทั่วไป (General conversion factor: GF)

เป็นตัวแปลงค่าเฉลี่ยของกลุ่มสินค้าและบริการ เช่น สินค้าบริโภค สินค้าทุน ขนส่ง ไฟฟ้า อาจแยกเป็นสินค้า Traded Goods และ Non-traded Goods โดยหากถ้าค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าการบิดเบือนของกลุ่มสินค้ามีน้อย วิธีการแปลงค่าทางการเงินให้เป็นมูลค่าทางเศรษฐกิจ

มูลค่าทางเศรษฐกิจ = มูลค่าทางการเงิน × ตัวแปลงค่า

DPU

2.4 การตรวจเอกสาร

ฮามดี หะยีแซะสาและ (2543) ได้ทำการศึกษาเรื่องครรชนีที่เกี่ยวข้องกับเศรษฐศาสตร์ของระบบเคเบิลใต้ดินในเขตเมืองท่องเที่ยวชายทะเล ได้ทำการศึกษาพื้นที่บริเวณหาดป่าตอง จังหวัดภูเก็ต โดยการศึกษาประกอบไปด้วยการพยากรณ์ปริมาณหน่วยการใช้ไฟฟ้า (kWh) ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปี ที่ขึ้นอยู่กับปริมาณของนักท่องเที่ยว โดยจำแนกตามประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า การจัดทำ Load Profile ของผู้ใช้ไฟแต่ละประเภท ศึกษามูลค่าปริมาณไฟฟ้าขัดข้องจากการสุ่มแบบสอบถามไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าโดยตรง รวมถึงประเภทธุรกิจต่างๆ ทำการศึกษาเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการรูปแบบเคเบิลใต้ดินแบบต่างๆ อันได้แก่การก่อสร้างแบบฝังตรง แบบกึ่งฝังตรง และแบบท่อคอนกรีต ทำการวิเคราะห์ถึงค่าบำรุงรักษา มูลค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากปริมาณการใช้ไฟฟ้า ทำการวิเคราะห์ตัวแปรทางการเงินและทางเศรษฐศาสตร์ได้แก่ NPV , B/C ratio , EIRR ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบส่วนดีส่วนเสียของการก่อสร้างสายเคเบิลใต้ดินแต่ละประเภท

จากการศึกษาได้ทำการสรุปความเหมาะสมของวิธีการก่อสร้างและหาดรรชนีที่เกี่ยวข้องทางด้านเศรษฐศาสตร์โดยเสนอ ปริมาณความหนาแน่นของผู้ใช้ไฟฟ้า (kW/km^2) และมูลค่าไฟฟ้าขัดข้อง (บาท/kW) ซึ่งนำมาใช้ในการตัดสินใจก่อสร้างระบบเคเบิลใต้ดิน

วิวัฒน์ ทิพยจร (2545) ได้ทำการศึกษาการจัดลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันให้สัมพันธ์กันในระบบสายส่งแบบวงรอบปิด ที่จ่ายจากสถานีไฟฟ้าบางปะอิน 2 ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งปัจจุบันยังคงจ่ายไฟแบบวงรอบเปิดโดยมีสายแยกจำนวนมาก ได้กล่าวว่าการจ่ายไฟเป็นแบบวงรอบปิดเป็นการจ่ายไฟในอุดมคติที่จะทำให้ระบบสายส่งมีความมั่นคงสูง ในการวิจัยได้กล่าวถึงข้อเสียของการจ่ายไฟแบบวงจรเปิด พร้อมทั้งได้ทำการศึกษาระบบป้องกันของการจ่ายไฟแบบวงรอบปิดเพื่อความมั่นคงแก่ระบบไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ ซึ่งมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันออกไป แต่อย่างไรก็ดีในการวิจัยได้สรุปว่าหาก กฟภ. มีความต้องการให้ระบบไฟฟ้ามีความมั่นคงมากที่สุดควรหลีกเลี่ยงการมีสายส่งแยกให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า

ทรงวุฒิ พรพันธ์เดชวิทยา (2547) ได้ทำการศึกษาวิธีการเลือกสายไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบจำหน่าย 22 เควี ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ได้นำเสนอแนวทางการศึกษา และการพัฒนาเครื่องมือและวิธีการเลือกสายไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ผู้ออกแบบโครงการใช้ในการพิจารณาเลือกสายไฟฟ้าให้เหมาะสมสำหรับระบบ 22 เควี ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพื่อให้เกิดการลงทุนที่คุ้มค่ามากที่สุด โดยการพิจารณาเงินลงทุนแบบราคาแบบวงรอบชีวิตมาใช้ให้เกิดความเหมาะสมในงานด้านวิศวกรรม เช่น แรงดันตกปลายสาย และกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่าน

การพิจารณาเงินลงทุนแบบราคาวงรอบชีวิต เป็นการคิดค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานทั้งหมด 3 ส่วนคือ ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเริ่มแรกต่อกิโลเมตร ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาทั้งหมดต่อ

กิโลเมตร และค่าใช้จ่ายจากพลังงานไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดต่อกิโลเมตร โดยค่าใช้จ่ายในสองส่วนแรกไม่แปรผันตามค่าพลังงานไฟฟ้าที่ส่งผ่านโดยค่าใช้จ่ายส่วนแรกเป็นค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเริ่มแรก (Fixed Cost) ค่าใช้จ่ายส่วนที่สองเป็นค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและการบำรุงรักษาทั้งหมดต่อกิโลเมตรที่ขึ้นกับกิจกรรมต่างๆ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ส่วนที่สามได้จากการประเมินพลังงานสูญเสียเฉลี่ย ซึ่งคำนวณจากตัวประกอบพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย โดยมีการพิจารณาผลของอัตราเงินเฟ้อเป็นส่วนประกอบ

วราวุธ จิตตพันธ์ (2547) ได้ทำการศึกษาการวางแผนโดยคำนึงถึงความเชื่อถือได้ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้ความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับของผู้ใช้ไฟ โดยทำการศึกษาถึงการวางแผนในระบบสายส่งระดับแรงดัน 115 เควี โดยการใช้วิธีการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าเพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นโดยคำนวณออกมาเป็นค่าดัชนีต่างๆ เช่น อัตราการล้มเหลวเฉลี่ย (Average Failure Rate) ระยะเวลาที่เกิดไฟฟ้าดับเฉลี่ย (Average Outage Time) ระยะเวลาเฉลี่ยที่เกิดไฟฟ้าดับในหนึ่งปี (Average Annual Outage Time) และจำนวนพลังงานที่ไม่ได้รับการจ่าย (Energy Not Supply) โดยเน้นที่การวางแผนที่เปรียบเทียบระหว่างค่าใช้จ่ายในการเพิ่มความเชื่อถือได้และประโยชน์ที่ได้รับนั้นแตกต่างกันอย่างไรเพื่อก่อให้เกิดความคุ้มค่าในการลงทุน

2.5 ลำดับขั้นตอนการศึกษา

ในการศึกษาวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์เพื่อการเชื่อมโยงระบบสายส่งไฟฟ้าวงรอบปิด จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางวิศวกรรมเพื่อวิเคราะห์และประเมินความความเป็นไปได้ทางวิศวกรรมศาสตร์ก่อน หลังจากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์และประเมินทางด้านเศรษฐกิจต่อ ลำดับขั้นตอนการศึกษาแบ่งออกได้เป็น 7 ลำดับขั้นตอน ตามภาพที่ 2.12 ดังนี้

2.5.1 ศึกษาสภาพการจ่ายไฟในขั้นตอนแรกเนื่องจาก กฟภ. เป็นหน่วยงานที่รับผิดชอบด้านการให้บริการในการจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับประชาชนทั่วประเทศดังนั้นระบบสายส่งและระบบจำหน่ายของ กฟภ. จึงมีเป็นจำนวนมาก การปรับปรุงระบบสายส่งไฟฟ้ากำลังเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดจึงจำเป็นต้องศึกษาสภาพการจ่ายไฟในภาพรวมทั้งหมดทั้ง 12 พื้นที่ กฟข. และวิเคราะห์ว่าเบื้องต้นว่าพื้นที่ใดมีความเหมาะสมในกรณีนี้จะคัดเลือกพื้นที่ที่มีการจ่ายไฟในลักษณะใกล้เคียงกับการเป็นวงรอบปิดให้มากที่สุดเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนเบื้องต้น เพราะโดยทั่วไปแล้วระบบไฟฟ้าของ กฟภ. จะเป็นแบบวงรอบเปิด จากนั้นจึงนำไปคัดเลือกในรายละเอียดในลำดับต่อไป

เป็นวงรอบปิด ซึ่งประกอบไปด้วยการพิจารณาถึงสิ่งต่างๆ ดังภาพที่ 21 นอกจากนี้ในการคัดเลือกระบบสายส่งได้พิจารณาถึงองค์ประกอบ 2 ส่วนที่สำคัญได้แก่

1. สถิติการเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้อง ซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงเนื่องจากเป็นตัวแปรที่ กฟภ. ถูกนำไปประเมินประสิทธิภาพ และภาพลักษณ์ขององค์กร ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องคำนึงถึงสถิติการเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้อง

2. ความสำคัญของกลุ่มโหลด เนื่องจากระบบสายส่งไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไปแล้วจะจ่ายโหลดให้กับกลุ่มผู้ใช้ไฟประเภทอุตสาหกรรม และผู้ใช้ไฟรายใหญ่ ซึ่งถือได้ว่าเป็นกลุ่มโหลดที่มีความสำคัญ และได้รับผลกระทบที่มีมูลค่าความเสียหายค่อนข้างสูงเนื่องจากปริมาณความต้องการพลังงานไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟกลุ่มนี้มีปริมาณสูงตามไปด้วย

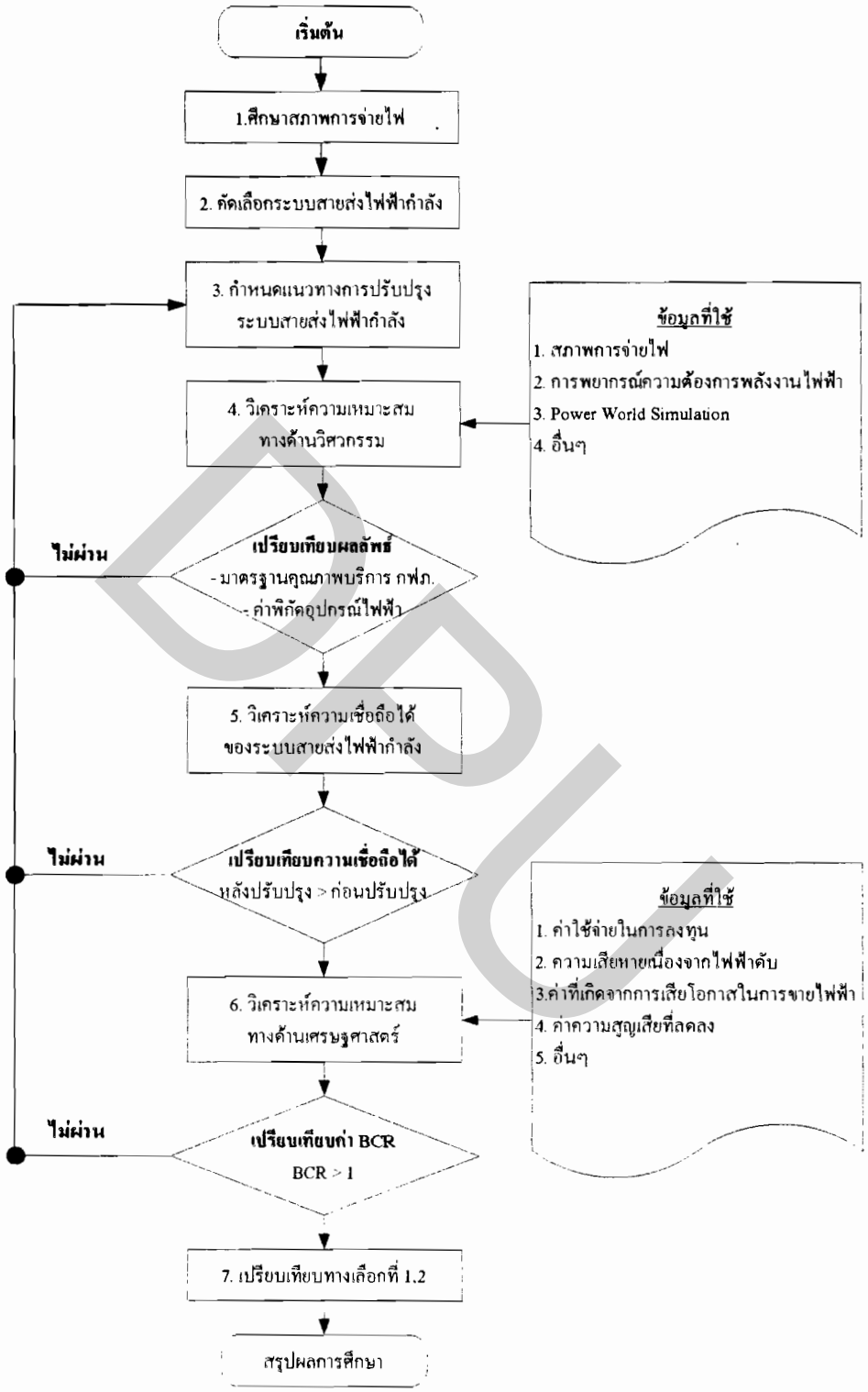
2.5.3 กำหนดแนวทางการปรับปรุงระบบสายส่งไฟฟ้ากำลัง ในการกำหนดแนวทางการปรับปรุงระบบสายส่งไฟฟ้ากำลังเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องทำการสำรวจความเป็นไปได้ในการดำเนินการ โดยพิจารณาสภาพแวดล้อมประกอบได้แก่

1. ความเป็นไปได้ในการปรับปรุงระบบสายส่งไฟฟ้ากำลัง เช่น การก่อสร้างสวิตช์เกียร์และอุปกรณ์ป้องกันรวมทั้ง ต้องสำรวจพื้นที่ในการติดตั้งอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าในพื้นที่ที่ต้องการและสำรวจจุดเชื่อมต่อสายส่งเข้ากับโครงสร้างสวิตช์เกียร์ เป็นต้น

2. การก่อสร้างสายส่งไฟฟ้ากำลังต้องสำรวจแนวถนนที่จะใช้ปักเสาพาดสาย เป็นต้น

3. ค่าใช้จ่ายในการลงทุนต้องอยู่ในภาวะที่หน่วยงานผู้รับผิดชอบจะสามารถดำเนินการได้

โดยแนวทางการปรับปรุงระบบสายส่งไฟฟ้ากำลังดังกล่าวเมื่อพิจารณาประกอบกันต้องสามารถดำเนินการได้จริงในทางปฏิบัติ



ภาพที่ 2.12 ลำดับขั้นตอนการศึกษา

2.5.4 วิเคราะห์ความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรม

การวิเคราะห์ความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรมทำเพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมในการปรับปรุงระบบสายส่งไฟฟ้ากำลัง โดยอาศัยทฤษฎีที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 1 ประกอบด้วย

1. การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า จะพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ โดยเปรียบเทียบกับค่าแรงดันมาตรฐานที่ กฟภ. รักษาให้กับผู้ใช้ไฟตามตารางที่ 2.1 ซึ่งเป็นตารางมาตรฐานแรงดันไฟฟ้าของ กฟภ. โดยการปรับปรุงระบบสายส่งไฟฟ้ากำลังต้องทำให้แรงดันไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ที่ กฟภ. กำหนด

2. การวิเคราะห์การลัดวงจร จะพิจารณาว่าเมื่อมีการปรับปรุงระบบสายส่งไฟฟ้ากำลังจะก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้าเกินกว่าที่อุปกรณ์ไฟฟ้าจะสามารถทนได้หรือไม่ โดยกระแสลัดวงจรต้องไม่เกินค่าในตารางที่ 2.2 ที่กำหนดจากผู้ผลิต

ตารางที่ 2.1 แสดงค่ามาตรฐานแรงดันไฟฟ้าระบบแรงดัน 115 kV ที่จุดจ่ายไฟของ กฟภ.

สภาวะการจ่ายไฟ	ค่ามาตรฐานระดับแรงดัน	แรงดันต่ำสุด (kV)	แรงดันสูงสุด (kV)
กรณีจ่ายไฟปกติ	±5%	109.2	120.7
กรณีจ่ายไฟฉุกเฉิน	±10%	103.5	126.5

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าพิกัดกระแสลัดวงจรของอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า

อุปกรณ์	Voltage Rating (kV)	Current Rating (A)	Interrupt Capacity (kA)
Circuit Breaker	123-145	2,000-3,150	31.5-40
Air Break Switch	123	2,000	40

ในการวิเคราะห์ความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรม ต้องอาศัยข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลในลักษณะทุติภูมิ ข้อมูลจากการสำรวจ ซึ่งประกอบไปด้วย

1. ค่าพารามิเตอร์ของสายไฟฟ้า ประกอบไปด้วย ชนิด ขนาด และความยาวของสาย โดยเป็นไปตามมาตรฐานของผู้ผลิตและ กฟภ. ซึ่งในการวิจัยนี้จะใช้มาตรฐานของสายส่ง เป็นแบบระบบสายส่งวงจรเดี่ยวตัวนำคู่ ซึ่งทำด้วยสายอลูมิเนียมเปลือยขนาด 400 ตร.มม. แบบวงจรเดี่ยวตัวนำคู่วางพาดบนเสาไฟฟ้าคอนกรีตขนาด 22 ม. แนวดิ่ง 3 เฟส ลักษณะตามภาพที่ 2.13 โดยมีค่าพารามิเตอร์ดังนี้

R_1 มีค่าเท่ากับ 0.043 Ω/km.

X_1 มีค่าเท่ากับ 0.305 Ω/km.

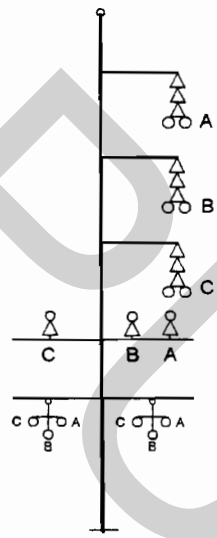
B_1 มีค่าเท่ากับ 4.35×10^{-6} Ω/km.

R_0 มีค่าเท่ากับ 0.2779 Ω/km.

X_0 มีค่าเท่ากับ 1.3246 Ω/km..

B_0 มีค่าเท่ากับ 2.07×10^{-6} Ω/km.

2. ข้อมูลโหลดจะใช้ข้อมูลโหลดสูงสุดของพื้นที่ศึกษาในรอบหนึ่งปีที่ผ่านมา (ปี พ.ศ. 2547) และนำมาหาข้อมูลโหลดเฉลี่ยของพื้นที่ศึกษา โดยอาศัยตัวประกอบโหลด (Load Factor) ซึ่งได้จากอัตราส่วนของโหลดเฉลี่ยต่อโหลดสูงสุดของพื้นที่ภาคกลางซึ่งเป็นพื้นที่ศึกษาที่เฉลี่ยมาจากผู้ใช้ไฟทุกประเภท (วราวุธ , 2547) มีค่าเท่ากับ 0.7 เพื่อคำนวณค่าแรงดัน ค่ากระแสลัดวงจร และค่าความสูญเสียเฉลี่ย



ภาพที่ 2.13 แบบจำลองระบบสายส่งไฟฟ้า 115 kV กำลังตามมาตรฐานระบบไฟฟ้าของ กฟภ. ที่ใช้ในการศึกษา

3. ค่าพารามิเตอร์ที่จุดขับเคลื่อน (Diving Point) เป็นข้อมูลพารามิเตอร์สมมูลเทวินินของสถานีไฟฟ้า บมจ. กฟผ. ที่จ่ายไฟให้กับ กฟภ. และค่าพารามิเตอร์ของหน่วยผลิตกำลังไฟฟ้าภาคเอกชน โดยข้อมูลจะแบ่งออกเป็นข้อมูลของปี ค.ศ. 2004 และปี ค.ศ.2010

ส่วนกรณีของการศึกษาภาวะลัดวงจรซึ่งมีการปรับค่าให้ใกล้เคียงกับค่ากระแสลัดวงจรนั้น เพื่อให้กระแสลัดวงจรในแบบจำลองใกล้เคียงกับภาวะปัจจุบันมากที่สุดแบบจำลองได้กำหนดค่าความต้านทานกรณีเกิดการลัดวงจร (R_f) ไว้ตามตารางที่ 2.3

DPU

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ ณ จุดเชื่อมต่อของ กฟผ. และบริษัทผลิตไฟฟ้าภาคเอกชน

ปี	พารามิเตอร์	R_1(p.u.)	X_1(p.u.)	R_0 p.u.)	X_0(p.u.)	R_f(p.u.)	
						1Φ-G	3Φ-G
2004	Diving Point	0.0040	0.0336	0.0109	0.0523	0.0250	0.0115
	บริษัทผลิตไฟฟ้าฯ	0.0500	0.2500	0.1500	1.000		
2010	Diving Point	0.0050	0.0333	0.0124	0.0500	0.0245	0.0110
	บริษัทผลิตไฟฟ้าฯ	0.0500	0.2500	0.1500	1.000		

หมายเหตุ : 1.ค่าแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าฐาน 115 kV , 100 MVA ตามลำดับ

: 2. ค่าพารามิเตอร์ Positive Sequence เท่ากับ Negative Sequence

4. ค่าการพยากรณ์ตามความต้องการพลังงานไฟฟ้าของ กฟภ. กรณีการเติบโตของภาวะเศรษฐกิจขยายตัวปานกลาง (Moderate Economic Growth : MEG) พื้นที่ศึกษาของ กฟภ.1 ซึ่งได้จากส่วนงานวางแผนของ กฟภ.

2.5.5 การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้จะอาศัยข้อมูลสถิติกระแสไฟฟ้าขัดข้องของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าที่คัดเลือกมาใช้ในการประเมินค่าความเชื่อถือได้ของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า ทั้งในสภาพปัจจุบันและสภาพอนาคตที่ใช้ในการปรับปรุงระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยคำนึงถึงความเชื่อถือได้ของระบบก่อนและหลังการปรับปรุงระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าเพื่อนำประโยชน์ที่เพิ่มขึ้นแปลงเป็นมูลค่าทางการเงินและทางเศรษฐกิจโดยค่าดัชนีความเชื่อถือได้ที่ใช้ในการประเมิน ได้แก่

1. อัตราการล้มเหลวเฉลี่ย (Average Outage Time : λ)
2. ระยะเวลาที่เกิดไฟฟ้าดับเฉลี่ย (Average Outage Time : r)
3. ระยะเวลาที่เกิดไฟฟ้าดับในหนึ่งปี (Average Annual Outage Time : U)
4. ค่าปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายไฟได้ (Energy Not Supply : ENS)
5. มูลค่าความเสียหายทางเศรษฐกิจเนื่องจากไฟฟ้าฟ้าดับ (Economic Outage Cost : ECOST)

โดยระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าจะมีค่าความเชื่อถือได้มากขึ้นเมื่อปรับปรุงระบบการจ่ายไฟให้เป็นแบบวงรอบปิด โดยค่า ENS และ ECOST จะลดลง ส่งผลให้เกิดผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นจากการปรับปรุงระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า

2.5.6 การวิเคราะห์ความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ เมื่อแนวทางการปรับปรุงระบบส่งกำลังไฟฟ้ามีความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรมและความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าดีขึ้น ขั้นตอนต่อไปจะวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนโดยใช้วิธีวิเคราะห์ต้นทุนผลประโยชน์ (Cost - Benefit Analysis) หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมิน คือ อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน มูลค่าปัจจุบันสุทธิ และอัตราผลตอบแทนภายใน ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ประกอบด้วย

1. ทรัพยากรที่ใช้ในการลงทุน ได้จากการสำรวจและประมาณการค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า ค่าบำรุงรักษารายปี

2. ผลประโยชน์ที่ได้รับจากการลงทุน ซึ่งเกิดจากการปรับปรุงระบบ ได้แก่

2.1 มูลค่าความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ (ECOST) ที่ลดลง

2.2 ค่าเสียโอกาสในการทำกำไรอันเนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่ไม่ได้รับการจ่ายไฟ (ENS) ที่ลดลง

2.3 มูลค่าความสูญเสียที่ลดลง (Technical Loss Saving)

3. ราคาทรัพยากรตามตารางภาคผนวก ข. , ค.และค่าไฟฟ้า ณ เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2548 มีค่าเฉลี่ยที่ กฟผ. ขายให้กับ กฟภ. เท่ากับ 2.0166 บาท/หน่วย กับราคาขายพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยเฉลี่ยให้กับผู้ใช้ไฟซึ่งประกอบไปด้วยผู้ใช้ไฟหลายประเภท ณ เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2548 มีค่าเท่ากับ 2.6111 บาท/หน่วย ดังนั้น Diff of Energy Cost จึงมีค่าเท่ากับ 0.5945 บาท/หน่วย

4. อัตราคิดลดเท่ากับค่าเฉลี่ยอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ขั้นต่ำ (Minimum Loan Rates : MLR) ที่ได้จากธนาคารแห่งประเทศไทย หักลบด้วยอัตราเงินเฟ้อเฉลี่ยที่ได้จากกรมการค้าภายในกระทรวงพาณิชย์ ย้อนหลัง 10 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2538 ถึงปี พ.ศ. 2547 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.63 % (9.00-3.37)

2.5.7 สรุปผลการศึกษา หลังจากทำการวิเคราะห์ความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรม วิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าและวิเคราะห์ความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ ขั้นตอนสุดท้ายจะนำผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์มาพิจารณาและสรุปผลการศึกษาและให้ข้อเสนอแนะแก่ กฟภ.