บทที่ 3
การวิเคราะห์เหตุขัดข้องด้วยวิธี Z_{bus}

เมื่อสายส่งถูกเพิ่มเข้าหรือปลดออกจากระบบไฟฟ้ากำลังจากการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ กระแสไฟฟ้าในสายส่งและแรงดันที่บัสต่างๆจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทั่วทั้งระบบ แรงดันที่บัสและกระแสในสายส่งที่สภาวะอยู่ตัวค่าใหม่หลังจากที่สายส่งถูกเพิ่มเข้าหรือปลดออกจากระบบนั้นสามารถทำนายหรือประมาณได้ด้วยวิธีการที่เรียกว่า การวิเคราะห์เหตุขัดข้อง (Contingency analysis) โดยอาศัยแบบจำลองระบบขนาดใหญ่ในการวิเคราะห์ ซึ่งผลตอบที่ได้รับอาจมิใช่เป็นค่าที่ถูกต้องแท้จริง เพราะเจ้าหน้าที่ทางด้านวางแผนหรือปฏิบัติการด้านระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะต้องทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากเหตุขัดข้องมากมายหลายเหตุการณ์ในเวลาอันรวดเร็ว จะสนใจว่าเกิดกระแสเกิน (Over current) ในสายส่ง หรือแรงดันมีค่าออกนอกขอบเขต (Out of limit) หรือไม่ มากกว่าที่จะสนใจค่าที่แท้จริงของกระแสหรือแรงดันที่เกิดขึ้น ดังนั้นการวิเคราะห์นี้จะเป็นการประมาณค่าที่น่าจะเกิดขึ้น และโดยทั่วไปแล้วจะไม่คิดค่าความต้านทานในสายส่ง ซึ่งจะทำให้ได้แบบจำลองระบบในลักษณะ purely reactive พร้อมกันนั้นจะทำการละเลยค่าไลน์ชาร์จจิ้งและอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง และในหลายกรณีจะใช้แบบจำลองแบบเส้นตรง (Linear model) และทฤษฎีบททับซ้อน (Superposition) ในการวิเคราะห์เหตุขัดข้องที่เกิดขึ้น วิธีการวิเคราะห์เหตุขัดข้องโดยใช้บัสอิมพิแดนซ์เมตริกซ์ Z_{bus} จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณโดยเฉพาะถ้าโหลดถูกพิจารณาเป็นกระแสคงที่ที่ฉีดเข้าที่บัสซึ่งโหลดนั้นต่ออยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง [10]

การปลดสายส่งออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง สามารถพิจารณาในแบบจำลองระบบได้โดยการเพิ่มอิมพิแดนซ์อนุกรมที่มีค่าลบของสายส่งเส้นนั้นที่ต่ออยู่ระหว่างบัสสองบัสของระบบ ดังนั้นในที่นี้จะแสดงวิธีการทดสอบผลของการเพิ่มสายส่งเข้าในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งสามารถพัฒนาต่อไปเป็นการวิเคราะห์เหตุขัดข้องเมื่อสายส่งหลุดออกจากระบบไฟฟ้ากำลังได้

3.1 การเพิ่มเข้าและปลดออกสายส่ง

จากสมการทั่วไปตามกฎเคอร์ชอฟ $V = ZI$ เมื่อสายส่งถูกเพิ่มเข้าหรือปลดออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง กระแสและกำลังไฟฟ้าที่ไหลอยู่ในสายส่ง และแรงดันที่บัสต่างๆ ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่สภาวะการทำงานปกติ ในการพิจารณาการเพิ่มเข้าหรือปลดสายส่งออกจากระบบไฟฟ้ากำลังนั้น เราไม่จำเป็นจะต้องทำการคำนวณ Z_{bus} ใหม่ หากว่าเราสนใจเพียงแค่ผลกระทบที่

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เกิดขึ้นกับแรงดัน กระแสและกำลังไฟฟ้าที่ไหลอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลังเท่านั้น ซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยวิธีการที่เรียกว่า การวิเคราะห์เหตุขัดข้องด้วยวิธี Z_{bus} โดยอาศัยหลักการที่ว่าจะมีการฉีด (inject) ของกระแสชดเชย (Compensating currents) เข้าสู่ระบบเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลังขึ้น ซึ่งมีหลักการดังนี้

เริ่มด้วยการสมมติว่า $V_1, V_2, ..., V_N$ และ $I_1, I_2, ..., I_N$ เป็นแรงดันที่บัสและกระแสที่ไหลเข้าสู่บัสในสภาวะการทำงานปกติตามลำดับ ซึ่งกระแสที่ไหลเข้าสู่บัสนี้มีค่าคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลของการเพิ่มสายส่งเข้าในระบบ เมื่อทำการเพิ่ม Z_a เข้าไประหว่างบัส p และบัส q ให้แรงดันที่บัสต่างๆ มีค่าเป็น $V_1', V_2', ..., V_N'$ ดังนั้นจะได้แรงดันที่เปลี่ยนไปที่บัส k เป็นไปตามสมการ

$$\Delta V_k = V_k' - V_k \tag{3.1}$$

และกระแส I_a ในสายส่งที่มีค่าอิมพิแดนซ์ Z_a ที่เพิ่มเข้าไปในระบบ จะสัมพันธ์อยู่กับแรงดันค่าใหม่ตามสมการ

$$Z_a I_a = V_p' - V_q' \tag{3.2}$$

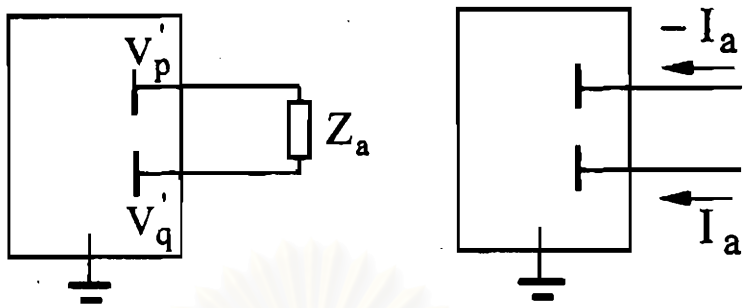
หรือ

$$\begin{matrix} & & p & & q & \\ Z_a I_a = [0 & ... & 1 & -1 & ... & 0] * [V_1' & ..... & V_N']^T \end{matrix}$$

$$Z_a I_a = A_c V' \tag{3.3}$$

โดย A_c = branch to node incidence matrix

กระแส I_a นี้มีผลต่อแรงดันของระบบเดิมเหมือนกับเป็นกระแสที่ถูกฉีดเข้าไปที่บัส ($-I_a$ ที่บัส p และ I_a ที่บัส q) ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งกระแสชดเชยนี้เมื่อรวมกับกระแส $I_1, I_2, ..., I_N$ เดิมในสภาวะการทำงานปกติของระบบ จะทำให้ได้แรงดันค่าใหม่ของระบบขึ้นมา คือ $V_1', V_2', ..., V_N'$ ซึ่งพิจารณาได้ว่าเหมือนกับการที่เราเพิ่มสายส่งที่มีค่าอิมพิแดนซ์ Z_a เข้าไปในระบบระหว่างบัส p และบัส q



รูปที่ 3.1 การเพิ่มสายส่งที่มีค่าอิมพิแดนซ์ Z_a เข้าในระบบ

กระแส $-I_a$ ที่บัส p และ I_a ที่บัส q นี้เรียกว่ากระแสชดเชย (Compensating currents) ซึ่งสามารถเขียนในรูปเมตริกซ์ได้ คือ

$$I_{comp} = [0....\overset{p}{-I_a} \quad \overset{q}{I_a} \quad ....0]^T = -A_c^T I_a \tag{3.4}$$

การเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่บัสต่างๆ ในระบบ จากสภาวะการทำงานปกติ สู่สภาวะการทำงานใหม่ภายหลังที่เพิ่มสายส่งเข้าในระบบสามารถพิจารณาได้โดยการคูณบัสอิมพิแดนซ์เมตริกซ์ด้วยเมตริกซ์กระแสชดเชย ดังนี้

และจากสมการ $V = Z_{bus} I$

จะได้ $$\Delta V = Z_{bus} I_{comp} = -Z_{bus} A_c^T I_a \tag{3.5}$$

ดังนั้น $$V' = V + \Delta V = V - Z_{bus} A_c^T I_a \tag{3.6}$$

คูณสมการที่ (3.6) ด้วย A_c แล้วแทน $A_c V'$ ด้วยสมการที่ (3.3) จะได้

$$Z_a I_a = A_c V - A_c Z_{bus} A_c^T I_a$$

$$\left(Z_a + A_c Z_{bus} A_c^T\right) I_a = A_c V = V_p - V_q$$

โดย $$Z = Z_a + A_c Z_{bus} A_c^T \qquad (3.7)$$

คือลูปอิมพิแดนซ์เมตริกซ์ (loop impedance matrix) ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยตรงจากบัสอิมพิแดนซ์เมตริกซ์ของระบบในสภาวะการทำงานปกติ

ซึ่งจะได้ $$I_a = \frac{(V_p - V_q)}{Z}$$

โดย $$A_c Z_{bus} A_c^T = (Z_{pp} - Z_{pq}) - (Z_{qp} - Z_{qq})$$

$$= Z_{pp} + Z_{qq} - Z_{pq} - Z_{qp} = Z_{th,pq}$$

ดังนั้นจะได้ $$I_a = \frac{(V_p - V_q)}{(Z_{th,pq} + Z_a)} \qquad (3.8)$$

จะเห็นได้ว่า เราสามารถหาค่าแรงดันใหม่หลังจากเพิ่มสายส่งที่มีค่าอิมพิแดนซ์ Z_a เข้าไปในระบบได้ โดยการคำนวณหา I_a จากสมการที่ (3.8) ก่อน จากนั้นจึงคำนวณหาค่าแรงดันใหม่ $V_1', V_2', ..., V_N'$ จากสมการที่ (3.6)

ในกรณีที่สายส่งหลุดออกจากระบบ เราสามารถทำการคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน เพียงแต่คิดว่าเป็นการเพิ่มสายส่งที่มีค่าอิมพิแดนซ์เป็นลบ $(-Z_a)$ เข้าไปในระบบ

จากสมการที่ (3.8) จะได้

$$I_a = \frac{(V_p - V_q)}{(Z_{th,pq} - Z_a)} \qquad (3.9)$$

และ

$$V' = V - Z_{bus} A_c^T I_a$$

ดังนั้น $$V_i' = V_i - (Z_{ip} - Z_{iq}) I_a \qquad (3.10)$$

ดังนั้น เมื่อสายส่งหลุดออกจากระบบ เราสามารถทำการคำนวณหาค่าแรงดันที่บัสต่างๆ หลังเกิดเหตุขัดข้องได้ดังแสดง

ตัวอย่างที่ 3.1 จากรูปที่ 2.7 แสดงถึงระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส สายส่ง 6 เส้น ผลที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังตัวอย่าง

Bus number	Base case power flow (voltage in p.u.)
1	1.0+j0.0
2	0.986301-j0.083834
3	0.984789-j0.095108
4	0.993653-j0.045583
5	0.998498-j0.054795

เมื่อเกิดเหตุขัดข้องกับสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 กับบัสที่ 2 เราสามารถคำนวณแรงดันที่บัสต่างๆ หลังเกิดเหตุขัดข้องได้ดังนี้

1) จากตัวอย่างที่ 2.1 สามารถคำนวณค่าบัสอิมพิแดนซ์เมตริกซ์ Z_{bus} ได้ด้วยการหาเมตริกซ์ผกผัน (inverse) ของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ Y_{bus} จะได้

$$Z_{bus} = \begin{bmatrix} j5.061466 & j5.0 & j5.006317 & j5.042198 & j5.011371 \\ j5.0 & j5.0 & j5.0 & j5.0 & j5.0 \\ j5.006317 & j5.0 & j5.035850 & j5.009476 & j5.014529 \\ j5.042198 & j5.0 & j5.009476 & j5.063298 & j5.017056 \\ j5.011371 & j5.0 & j5.014529 & j5.017056 & j5.026153 \end{bmatrix}$$

2) คำนวณค่าอิมพิแดนซ์เทวินิน $Z_{th,pq}$ โดย $p = 5$ และ $q = 2$

$$Z_{th,pq} = Z_{pp} + Z_{qq} - 2 * Z_{pq}$$

$$Z_{th,52} = Z_{55} + Z_{22} - 2 * Z_{52}$$

$$Z_{th,52} = j5.026153 + j5.0 - 2(j5.0) \quad = \quad j0.026153$$

3) คำนวณค่ากระแสชดเชย I_a ตามสมการที่ (3.9)

$$I_a = \frac{(V_p - V_q)}{(Z_{th,pq} - z_a)}$$

$$I_a = \frac{(V_5 - V_2)}{(Z_{th,52} - z_{52})}$$

$$I_a = \frac{[(0.998498 - j0.054795) - (0.986301 - j0.083834)]}{(j0.026153 - j0.04)}$$

$$= -2.0971 + j0.8808$$

4) คำนวณค่าแรงดันที่บัสต่างๆ หลังเกิดเหตุขัดข้องตามสมการที่ (3.10)

$$V_i' = V_i - (Z_{ip} - Z_{iq}) I_a$$

โดย

$$(Z_{ip} - Z_{iq}) = Z_{bus}^{(5-2)} = \begin{bmatrix} Z_{15} - Z_{12} \\ Z_{25} - Z_{22} \\ Z_{35} - Z_{32} \\ Z_{45} - Z_{42} \\ Z_{55} - Z_{52} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} j5.011371 - j5.0 \\ j5.0 - j5.0 \\ j5.014529 - j5.0 \\ j5.017056 - j5.0 \\ j5.026153 - j5.0 \end{bmatrix}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$= \begin{bmatrix} j0.011371 \\ 0 \\ j0.014529 \\ j0.017056 \\ j0.026153 \end{bmatrix}$$

ดังนั้น

$$V_i' = V_i - (Z_{i5} - Z_{i2}) I_a$$

$$= \begin{bmatrix} 1.0 + j0.0 \\ 0.986301 - j0.083834 \\ 0.984789 - j0.095108 \\ 0.993653 - j0.045583 \\ 0.998498 - j0.054795 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} j0.011371 \\ 0 \\ j0.014529 \\ j0.017056 \\ j0.026153 \end{bmatrix} * I_a$$

$$= \begin{bmatrix} 1.01 + j0.0238 \\ 0.9863 - j0.0838 \\ 0.9976 - j0.0646 \\ 1.0087 - j0.0098 \\ 1.0215 + j0.0001 \end{bmatrix}$$

3.2 การวิเคราะห์เหตุขัดข้องในระบบไฟฟ้ากำลัง

เมื่อสายส่งหรือหม้อแปลงถูกปลดออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง เราจะเรียกว่าเกิดเหตุขัดข้อง โดยเหตุขัดข้องต่างๆ นั้นอาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากการวางแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง หรือเกิดขึ้นเนื่องจากสภาพภูมิอากาศ ความผิดพร่อง (Faults) หรือเหตุขัดข้องอื่นๆ เมื่อเกิดเหตุการณ์นี้ขึ้นแล้ว กระแสและแรงดันทรานเซียนในระบบจะหายไปอย่างรวดเร็ว และระบบจะปรับตัวเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวตำแหน่งใหม่ (New steady-state) ซึ่งสภาวะอยู่ตัวตำแหน่งใหม่นี้ มีความสำคัญต่อเจ้าหน้าที่ทางด้านวางแผนและปฏิบัติการด้านระบบไฟฟ้ากำลัง ที่จะต้องทราบว่ากระแสและแรงดันที่บัสมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร ณ สภาวะอยู่ตัวตำแหน่งใหม่ ไม่ว่าจะเป็นการเกิด Overload เนื่องจากกระแสในระบบมากเกินไป หรือ แรงดันที่บัสมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เป็นสิ่งที่จะ

ต้องหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดขึ้นในระบบ เพราะจะทำให้ระบบอยู่ในสภาวะไม่มั่นคง อันอาจจะก่อให้เกิดเหตุขัดข้องแบบต่อเนื่อง (Cascading) ขึ้นได้

จำนวนเหตุขัดข้องที่เป็นไปได้มากมายนับร้อยๆ เหตุการณ์จะถูกทำการวิเคราะห์โดยวิธีการที่เรียกว่าการวิเคราะห์เหตุขัดข้อง ซึ่งเราจะไม่สนใจค่าที่ถูกต้องร้อยเปอร์เซ็นต์ในการวิเคราะห์นี้ เพราะว่าสิ่งที่เราสนใจอันดับแรกก็คือ เกิดสภาวะไม่มั่นคงในระบบ ณ สภาวะอยู่ตัวตำแหน่งใหม่หลังจากเกิดเหตุขัดข้องหรือไม่ ดังนั้นในการทดสอบผลกระทบที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากเหตุขัดข้องที่มีผลต่อแรงดันที่บัสต่างๆ และการไหลของกระแสในระบบ จึงใช้วิธีการประมาณ เพราะจะทำให้ได้ผลตอบในเวลาอันรวดเร็วในการทดสอบเหตุการณ์ต่างๆ จำนวนมาก

เริ่มการวิเคราะห์เหตุขัดข้องด้วยสภาวะอยู่ตัวของระบบก่อนเกิดเหตุขัดข้องโดยโหลดและกำลังไฟฟ้าทั้งหมดในระบบ จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ กระแสที่ฉีดเข้าที่บัสต่างๆ ซึ่งจะมีค่าคงที่ตลอดการวิเคราะห์ และกระแสในสายส่งแต่ละเส้นในระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลง ถ้ามีการฉีดของกระแสเข้าที่บัสใดบัสหนึ่ง แรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากกระแส ΔI_m ที่ถูกฉีดเข้าที่บัส m ในระบบ จะมีค่าเป็น

$$\left[\Delta V_1 ... \Delta V_i \Delta V_j ... \Delta V_N\right]^T = \left[V_1' - V_1, ..., V_i' - V_i, V_j' - V_j, ..., V_N' - V_N\right]^T \qquad (3.11)$$

โดย Z_{bus} เป็นค่าที่สภาวะปกติของระบบก่อนเกิดเหตุขัดข้อง

ดังนั้นจะได้ การเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่บัส i และบัส j คือ

$$\begin{aligned} \Delta V_i &= Z_{im} \Delta I_m \\ \Delta V_j &= Z_{jm} \Delta I_m \end{aligned} \qquad (3.12)$$

ถ้าสายส่งที่ต่อระหว่างบัส i และบัส j มีค่าอิมพิแดนซ์ Z_c การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลจากบัส i ไปบัส j ก็คือ

$$\Delta I_{ij} = \frac{\Delta V_i - \Delta V_j}{Z_c}$$

$$\Delta I_{ij} = \frac{Z_{im} - Z_{jm}}{Z_c} \Delta I_m \qquad (3.13)$$

ซึ่งจะได้ current-injection distribution factor $K_{ij,m}$ คือ

$$K_{ij,m} \triangleq \frac{\Delta I_{ij}}{\Delta I_m} = \frac{Z_{im} - Z_{jm}}{Z_c} \qquad (3.14)$$

ดังนั้นจะได้ว่า เมื่อใดก็ตามที่กระแสที่ถูกฉีดเข้าที่บัส m เปลี่ยนแปลงไป ΔI_m กระแสที่ไหลอยู่ในสายส่งจากบัส i ไปบัส j จะเปลี่ยนแปลงไป $\Delta I_{ij} = K_{ij,m} \Delta I_m$

ในระบบทั่วๆ ไป ถ้ากระแสในสายส่งเส้นใดเส้นหนึ่งมีค่ามากเกินไป เราอาจจะลดการ overload นี้ได้ด้วยการลดกระแสที่ฉีดเข้าระบบที่บัสหนึ่ง ในขณะที่ทำการเพิ่มกระแสที่ฉีดเข้าระบบอีกบัสหนึ่ง

สมมติว่า กระแสที่ฉีดเข้าที่บัส p มีการเปลี่ยนแปลงไป ΔI_p ขณะที่กระแสที่ฉีดเข้าที่บัส q มีการเปลี่ยนแปลงไป ΔI_q และจากทฤษฎีบททับซ้อนจะได้ว่า การเคลื่อนที่ (shift) ของกระแสที่ฉีดเข้าระบบจากบัส p ไปบัส q จะทำให้กระแสในสายส่งที่ต่อระหว่างบัส i และ j เปลี่ยนแปลงไป

$$\Delta I_{ij} = K_{ij,p} \Delta I_p + K_{ij,q} \Delta I_q \qquad (3.15)$$

ซึ่งในที่นี้จะเรียก current-injection distribution factor ว่า current-shift distribution factor

และในตอนท้ายของบทนี้จะแสดงให้เห็นว่า ในการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (DC power-flow model) การเคลื่อนที่ของกระแสที่ฉีดเข้าระบบจากบัสหนึ่ง ไปอีกบัสหนึ่งจะมีค่าเท่ากับการเคลื่อนที่ของกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายเข้าระบบ (Real power inputs) ระหว่างบัสทั้งสองนั้น ซึ่งจะเรียก current-shift distribution factor ว่า generation-shift distribution factor

เมื่อพิจารณาการปลดสายส่งที่มีค่าอิมพิแดนซ์ Z_a ซึ่งต่อระหว่างบัส m และบัส n ออกจากระบบ ซึ่งได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.1 แล้วว่า สามารถทำการวิเคราะห์ได้โดยการเพิ่มสายส่งที่มีค่าอิมพิแดนซ์ $-Z_a$ เข้าระหว่างบัสทั้งสองในระบบก่อนเกิดเหตุขัดข้องจะได้กระแสไหลวน I_a เมื่อ $Z_{mn} = Z_{nm}$ คือ

$$I_a = \frac{V_m - V_n}{(Z_{mm} + Z_{nn} - 2Z_{mn}) - Z_a}$$

$$I_a = \frac{V_m - V_n}{Z_{th,mn} - Z_a} \tag{3.16}$$

โดย V_m และ V_n คือค่าแรงดันที่บัส m และบัส n ก่อนเกิดเหตุขัดข้อง

และ $Z_{th.mn}$ คือค่าอิมพิแดนซ์เทวานินก่อนเกิดเหตุขัดข้องระหว่างบัส m และบัส n

$$Z_{th,mn} = Z_{mm} + Z_{nn} - 2Z_{mn} \tag{3.17}$$

กระแสไหลวน I_a มีผลต่อแรงดันของระบบเหมือนกับกระแสชดเชย 2 ค่า คือ

$\Delta I_m = -I_a$ ที่บัส m และ $\Delta I_n = I_a$ ที่บัส n

ซึ่งจะทำให้ได้ว่า กระแสที่ไหลระหว่างบัส i และบัส j เปลี่ยนแปลงไปตามสมการ

$$\Delta I_{ij} = K_{ij,m}\Delta I_m + K_{ij,n}\Delta I_n$$

$$\Delta I_{ij} = \frac{\left[(Z_{in} - Z_{im}) - (Z_{jn} - Z_{jm})\right]}{Z_c} I_a \tag{3.18}$$

เมื่อแทนค่า I_a จากสมการที่ (3.16) จะได้

$$\Delta I_{ij} = \frac{\left[(Z_{in} - Z_{im}) - (Z_{jn} - Z_{jm})\right]}{Z_c} \cdot \frac{V_m - V_n}{(Z_{th,mn} - Z_a)} \tag{3.19}$$

และเนื่องจากก่อนเกิดเหตุขัดข้องของสายส่งระหว่างบัส m และบัส n กระแสในสายส่งสัมพันธ์กับแรงดันที่บัสตามสมการ

$$I_{mn} = \frac{V_m - V_n}{Z_a} \tag{3.20}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3.19) และ (3.20) จะได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลในสายส่งที่ต่อระหว่างบัส i และบัส j เนื่องจากการเกิดเหตุขัดข้องของสายส่งที่ต่อระหว่างบัส m และบัส n เป็นไปตามสมการ

$$\Delta I_{ij} = \frac{Z_a}{Z_c}\left[\frac{(Z_{in} - Z_{im}) - (Z_{jn} - Z_{jm})}{Z_{th,mn} - Z_a}\right] I_{mn} \tag{3.21}$$

โดย $L_{ij,mn}$ คือ line-outage distribution factor (LODF)

$$L_{ij,mn} \triangleq \frac{\Delta I_{ij}}{I_{mn}} = -\frac{Z_a}{Z_c}\left[\frac{(Z_{im} - Z_{in}) - (Z_{jm} - Z_{jn})}{Z_{th,mn} - Z_a}\right] \tag{3.22}$$

และจะได้ว่า

$$I'_{ij} = I_{ij} + \Delta I_{ij} = I_{ij} + L_{ij.mn} I_{mn} \tag{3.23}$$

จะเห็นว่าเราสามารถคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสในสายส่งที่เหลือ เนื่องจากการเกิดเหตุขัดข้องของสายส่งเส้นใดเส้นหนึ่งในระบบได้จากแฟคเตอร์ดังกล่าว ซึ่งอาศัยเพียงค่าอิมพิแดนซ์ของสายส่งและค่าสมาชิกของอิมพิแดนซ์เมตริกซ์ Z_{bus} ของระบบในสภาวะปกติก่อนเกิดเหตุขัดข้อง ทำให้การคำนวณค่าดังกล่าวนั้นสามารถทำได้ในเวลาอันรวดเร็วมากกว่าที่จะต้องทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบใหม่ทั้งหมดเมื่อเกิดเหตุขัดข้องขึ้นในระบบซึ่งต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก

ตัวอย่างที่ 3.2 จากรูปที่ 2.7 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังขนาดเล็กที่ประกอบด้วยบัส 5 บัส และสายส่ง 6 เส้น สามารถทำการคำนวณกระแสในสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 และบัสที่ 3 เมื่อเกิดเหตุขัดข้องกับสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 และบัสที่ 2 และทำการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้กับค่าที่แท้จริงที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าภายหลังเกิดเหตุขัดข้องได้ดังนี้

วิธีคำนวณ

เมื่อเกิดเหตุขัดข้องกับสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 และบัสที่ 2 และต้องการคำนวณค่ากระแสที่ไหลในสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 และบัสที่ 3 จะต้องทำการคำนวณ LODF จากสมการ

$$L_{53.52} = \frac{\Delta I_{53}}{I_{52}}$$

$$= \frac{-z_{52}}{z_{53}} \left[\frac{(Z_{55} - Z_{52}) - (Z_{35} - Z_{32})}{(Z_{55} + Z_{22} - 2 * Z_{52}) - z_{52}} \right]$$

$$= 0.671533$$

จากค่าแรงดัน ณ สภาวะการทำงานปกติของระบบไฟฟ้ากำลังก่อนเกิดเหตุขัดข้องดังตารางที่ 3.1 กระแสที่ไหลในสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 และบัสที่ 2 และกระแสที่ไหลในสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 และบัสที่ 3 มีค่าดังนี้

$$I_{52} = \frac{V_5 - V_2}{z_{52}} = 0.725975 - j0.304925 \quad \text{p.u.}$$

$$I_{53} = \frac{V_5 - V_3}{z_{53}} = 0.806260 - j0.274180 \quad \text{p.u.}$$

ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของกระแสในสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 และบัสที่ 3 เมื่อเกิดเหตุขัดข้องกับสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 และบัสที่ 2 คือ

$$\Delta I_{53} = L_{53.52} I_{52} = 0.671533\,(0.725975 - j0.304925)$$

$$= 0.487516 - j0.204767 \quad \text{p.u.}$$

และจะได้กระแสที่ไหลในสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 และบัสที่ 3 หลังเกิดเหตุขัดข้องกับสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 และบัสที่ 2 มีค่าเป็น

$$I'_{53} = I_{53} + \Delta I_{53} = 1.380\angle -20.31° \quad \text{p.u.}$$

ตารางที่ 3.2 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าหลังเกิดเหตุขัดข้องของระบบไฟฟ้ากำลังตัวอย่าง

Bus number	Power flow (voltage in p.u.)
1	1.0+j0.0
2	0.968853-j0.108108
3	0.977822-j0.088536
4	0.994430-j0.033446
5	0.999734-j0.023079

เมื่อสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 และบัสที่ 2 หลุดออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง และเงื่อนไขต่างๆ ของระบบยังมีค่าคงเดิม ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าใหม่เป็นดังแสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งจากค่าดังกล่าว เราสามารถคำนวณกระแสที่ไหลในสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 และบัสที่ 3 ได้ดังนี้

$$I'_{53} = \frac{V'_5 - V'_3}{z_{53}} = 1.381\angle -18.51° \quad \text{p.u.}$$

จะพบว่าค่ากระแสที่คำนวณได้จาก LODF นั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าใหม่หลังเกิดเหตุขัดข้อง

3.3 การวิเคราะห์เหตุขัดข้องด้วยแบบจำลองกระแสตรง (Contingency analysis by DC model)

ในการวิเคราะห์เหตุขัดข้องในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น เราจะใช้การประมาณค่าที่น่าจะเกิดขึ้นหลังจากเกิดเหตุขัดข้อง มากกว่าที่จะต้องการค่าที่ถูกต้องแน่นอนร้อยเปอร์เซ็นต์ วิธีการหนึ่งที่จะนำมาใช้ในที่นี้คือ การวิเคราะห์เหตุขัดข้องด้วยแบบจำลองกระแสตรง

แบบจำลองกระแสตรงนั้นมีข้อสมมติอยู่ว่า

1. ไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้นในระบบ (lossless) และสายส่งแต่ละเส้นนั้นมีเฉพาะค่ารีแอคแตนซ์อนุกรม (series reactance)
2. แรงดันที่บัสต่างๆ มีค่าเท่ากับ 1.0 p.u. (per unit)
3. ความแตกต่างของค่ามุมของแรงดันของบัสที่อยู่ใกล้กัน เช่นบัส m และบัส n มีค่าน้อยมาก ซึ่งทำให้ได้ว่า

$$\cos\delta_m = \cos\delta_n$$
$$\sin\delta_m - \sin\delta_n = \delta_m - \delta_n \qquad (3.24)$$

จากข้อสมมติดังกล่าวทำให้ได้ว่า กระแสที่ไหลจากบัส m ไปบัส n ในหน่วย per unit ในสายส่งที่มีค่ารีแอคแตนซ์ jX_a per unit คือ

$$I_{mn} = \frac{V_m - V_n}{jX_a} = \frac{|V_m|(\cos\delta_m + j\sin\delta_m) - |V_n|(\cos\delta_n + j\sin\delta_n)}{jX_a}$$
$$I_{mn} \cong \frac{(\cos\delta_m - \cos\delta_n) + j(\sin\delta_m - \sin\delta_n)}{jX_a} \cong \frac{\delta_m - \delta_n}{X_a} \quad \text{per unit} \qquad (3.25)$$

และ กำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งเส้นนี้ในหน่วย per unit จะมีค่าเป็น

$$P_{mn} = \frac{|V_m V_n|}{X_a}\sin(\delta_m - \delta_n) \cong \frac{\delta_m - \delta_n}{X_a} \quad \text{per unit} \qquad (3.26)$$

จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าจริงมีความหมายเหมือนกับกระแสในสายส่งในหน่วย per unit ในการวิเคราะห์เหตุขัดข้องด้วยแบบจำลองกระแสตรง เมื่อแทนเครื่องหมายประมาณด้วยเครื่องหมายเท่ากับ จะได้ว่ากระแสในสายส่งระหว่างบัส i และบัส j ที่มีค่าอิมพิแดนซ์ jX_c per unit จะมีค่าตามสมการ

$$I_{ij} = \frac{\delta_i - \delta_j}{X_c} \quad \text{per unit} \qquad (3.27)$$

และหากเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่ามุมของแรงดันที่บัส กระแสในสายส่งจะเปลี่ยนแปลงไป

$$\Delta I_{ij} = \frac{\Delta(\delta_i - \delta_j)}{X_c} = \frac{\Delta\delta_i - \Delta\delta_j}{X_c} \quad \text{per unit} \qquad (3.28)$$

แทนค่าอิมพิแดนซ์ทั้งหมดในสมการที่ (3.22) ด้วยค่ารีแอคแตนซ์ จะได้ line-outage distribution factor เป็นดังสมการ

$$L_{ij,mn} = \frac{\Delta I_{ij}}{I_{mn}} = -\frac{X_a}{X_c}\left[\frac{(X_{im} - X_{in}) - (X_{jm} - X_{jn})}{X_{th,mn} - X_a}\right] \qquad (3.29)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงในหน่วย per unit กับกระแสในสายส่งในหน่วย per unit ข้างต้น เราจะได้ว่า

$$L_{ij,mn} = \frac{\Delta P_{ij}}{P_{mn}} = -\frac{X_a}{X_c}\left[\frac{(X_{im} - X_{in}) - (X_{jm} - X_{jn})}{X_{th,mn} - X_a}\right] \qquad (3.30)$$

และจากสมการที่ (3.23) จะได้ว่า

$$P'_{ij} = P_{ij} + \Delta P_{ij} = P_{ij} + L_{ij,mn} P_{mn}{}' \qquad (3.31)$$

จากสมการข้างต้น จะเห็นว่าเราสามารถนำสมการ line-outage distribution factor จากหัวข้อที่ 3.2 มาดัดแปลงเพื่อใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งที่เหลือในระบบไฟฟ้ากำลัง เมื่อเกิดเหตุขัดข้องกับสายส่งเส้นใดเส้นหนึ่งได้

ตัวอย่างที่ 3.3 จากรูปที่ 2.7 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังขนาดเล็กที่ประกอบด้วยบัส 5 บัส และสายส่ง 6 เส้น สามารถทำการคำนวณกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 และบัสที่ 3 เมื่อเกิดเหตุขัดข้องกับสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 และบัสที่ 2 ด้วยแบบจำลองกระแสตรง และทำการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้กับค่าที่แท้จริงที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าภายหลังเกิดเหตุขัดข้องได้ดังนี้

วิธีคำนวณ

เมื่อเกิดเหตุขัดข้องกับสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 และบัสที่ 2 และต้องการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 และบัสที่ 3 จะต้องทำการคำนวณ LODF จากสมการที่ (3.30)

$$L_{53,52} = \frac{\Delta P_{53}}{P_{52}}$$

$$= \frac{-x_{52}}{x_{53}}\left[\frac{(X_{55}-X_{52})-(X_{35}-X_{32})}{(X_{55}+X_{22}-2*X_{52})-x_{52}}\right]$$

$$= 0.671533$$

จากค่าแรงดัน ณ สภาวะการทำงานปกติของระบบไฟฟ้ากำลังก่อนเกิดเหตุขัดข้องดังตารางที่ 3.1 กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 และบัสที่ 2 และกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 และบัสที่ 3 มีค่าดังนี้

$$P_{mn} = \frac{|V_m V_n|}{X_a}\sin(\delta_m - \delta_n)$$

$$P_{52} = \frac{1(0.9899)}{0.04}\sin(\delta_5 - \delta_2)$$

$$P_{52} = 0.7423 \quad \text{p.u.}$$

$$P_{53} = \frac{1(0.9894)}{0.05}\sin(\delta_5 - \delta_3)$$

$$P_{53} = 0.8210 \quad \text{p.u.}$$

ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 และบัสที่ 3 เมื่อเกิดเหตุขัดข้องกับสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 และบัสที่ 2 คือ

$$\Delta P_{53} = L_{53.52}P_{52} = 0.671533\ (0.7423)$$

$$= 0.4985 \quad \text{p.u.}$$

และจะได้กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 และบัสที่ 3 หลังเกิดเหตุขัดข้องกับสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 และบัสที่ 2 มีค่าเป็น

$$P'_{53} = P_{53} + \Delta P_{53} = 0.8210 + 0.4985$$

$$P'_{53} = 1.3195 \quad \text{p.u.}$$

เมื่อสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 และบัสที่ 2 หลุดออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง และเงื่อนไขต่างๆ ของระบบยังมีค่าคงเดิม ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าใหม่เป็นดังแสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 5 และบัสที่ 3 มีค่า

$$P'_{53} = \frac{1(0.9818)}{0.05}\sin(\delta'_5 - \delta'_3)$$

$$P'_{53} = 1.3185 \quad \text{p.u.}$$

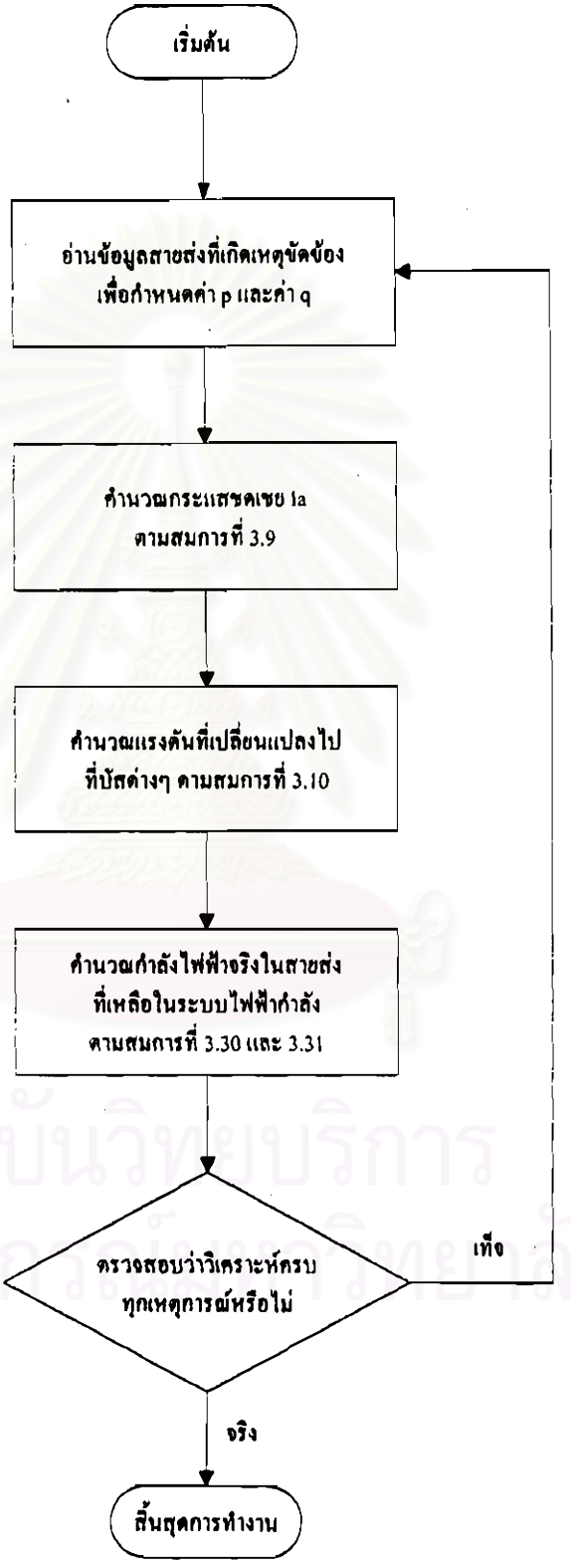
จะพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่คำนวณได้จาก LODF นั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าใหม่หลังเกิดเหตุขัดข้อง

3.4 การวิเคราะห์เหตุขัดข้องด้วยวิธี Z_{bus}

จากหลักการที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปขั้นตอนและวิธีการวิเคราะห์เหตุขัดข้องด้วยวิธี Z_{bus} เมื่อสายส่งหลุดออกจากระบบไฟฟ้ากำลังได้ดังนี้ และสามารถสรุปเป็นแผนภาพดังแสดงในรูปที่ 3.2

1) คำนวณค่ากระแสชดเชย I_a ตามสมการที่ (3.9)
2) คำนวณค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปที่บัสต่างๆ ตามสมการที่ (3.10)
3) คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งที่เหลือในระบบ ตามสมการที่ (3.30) และ (3.31)
4) ตรวจสอบจำนวนเหตุขัดข้องที่ทำการวิเคราะห์ว่าครบทุกเหตุการณ์แล้วหรือไม่ หากยังไม่ครบให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 3
5) สิ้นสุดการทำงาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงการวิเคราะห์เหตุขัดข้องด้วยวิธี Z_{bus}