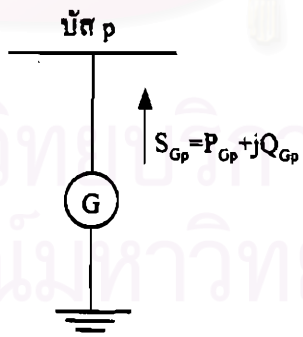
บทที่ 2
ความรู้พื้นฐานของระบบไฟฟ้ากำลัง

บทนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานของระบบไฟฟ้ากำลังได้แก่ วงจรสมมูลขององค์ประกอบในระบบไฟฟ้ากำลัง และวิธีการสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์โดยวิธีอิลิเมนต์สแตมป์ [12] เพื่อใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ดังจะกล่าวต่อไป

2.1 วงจรสมมูลขององค์ประกอบในระบบไฟฟ้ากำลัง

2.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ผลิตและจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง โดยทั่วไปกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะปรับให้มีค่าคงที่ ส่วนกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจะปรับเปลี่ยนได้เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้า แต่ต้องมีค่าไม่เกินค่าขีดจำกัดสูงสุดและไม่น้อยกว่าค่าขีดจำกัดต่ำสุด สำหรับวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะแทนด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่ออยู่ที่บัส ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยกำหนดให้ P_{Gp} และ Q_{Gp} เป็นบวกเมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง



P_{Gp} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายเข้าที่บัส p

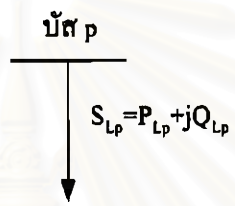
Q_{Gp} คือ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่จ่ายเข้าที่บัส p

S_{Gp} คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่จ่ายเข้าที่บัส p

รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.1.2 โหลด (Load)

โหลดเป็นอุปกรณ์ที่รับกำลังไฟฟ้าจากบัส ซึ่งจะถือเป็นค่าคงที่และมีค่าเป็นลบในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยสัญลักษณ์ที่ใช้แทนโหลดในวงจรสมมูล คือ ลูกศร ดังแสดงในรูปที่ 2.2



P_{Lp} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายแก่โหลดที่บัส p

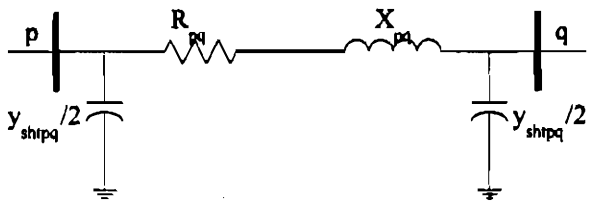
Q_{Lp} คือ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่จ่ายแก่โหลดที่บัส p

S_{Lp} คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่จ่ายแก่โหลดที่บัส p

รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของโหลด

2.1.3 สายส่งไฟฟ้า (Transmission line)

สายส่งไฟฟ้าที่เชื่อมระหว่างบัสสองบัสใดๆ เช่น ระหว่างบัส p และบัส q สามารถแทนได้ด้วยวงจรสมมูลพาย ซึ่งประกอบด้วยความต้านทาน (Resistance : R_{pq}) ต่ออนุกรมกับอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ (Inductive reactance : X_{pq}) เชื่อมอยู่ระหว่างสองบัสนั้นๆ และมีชั้นท์คาปาซิแตนซ์ (Shunt capacitance) ที่มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของไลน์ชาร์จจิ้งแอดมิตแตนซ์ (Half line charging admittance : $y_{shtpq}/2$) ของสายส่งทั้งหมดตลอดสายต่ออยู่ที่บัสแต่ละบัส ดังแสดงในรูปที่ 2.3



R_{pq} คือ ความต้านทานของสายส่งที่ต่อระหว่างบัส pq

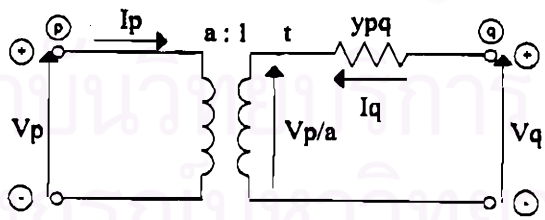
X_{pq} คือ อินดักทีฟรีแอคแตนซ์ของสายส่งที่ต่อระหว่างบัส pq

y_{shtpq} คือ ไลน์ชาร์จจิ้งแอดมิตแตนซ์ของสายส่งที่ต่อระหว่างบัส pq

รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลพายของสายส่งไฟฟ้า

2.1.4 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถแทนได้ด้วยอิมพีแดนซ์หรือแอดมิตแตนซ์ของหม้อแปลงต่ออนุกรมกับหม้อแปลงอุดมคติ (Ideal transformer) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก)

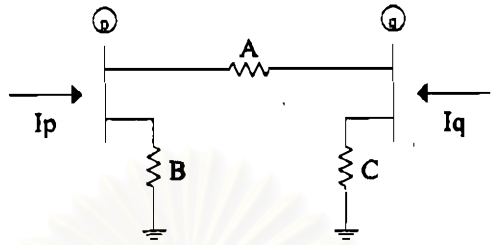


a คือ อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง

y_{pq} คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ของหม้อแปลง

รูปที่ 2.4 (ก) แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า

โดยวงจรสมมูลที่สอดคล้องกับแบบจำลองดังกล่าวเป็นแบบพาย ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข)



รูปที่ 2.4 (ข) วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

สำหรับพารามิเตอร์ A , B และ C ของวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าในรูปที่ 2.4 (ข) มีค่าดังนี้

$$A = \frac{y_{pq}}{a^*} \tag{2.1}$$

$$B = \frac{1}{a^*} \cdot \left(\frac{1}{a} - 1 \right) \cdot y_{pq} \tag{2.2}$$

$$C = \left(1 - \frac{1}{a^*} \right) \cdot y_{pq} \tag{2.3}$$

จากรูปที่ 2.4 (ก) หากพิจารณาในส่วนของหม้อแปลงอุดมคติจะได้ว่า กำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent power) ขาเข้าและขาออกจะต้องมีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$S_p = S_t \tag{2.4}$$

โดยที่ S_p คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลออกจากหม้อแปลงทางด้านบัส p มีค่าดังนี้

$$S_p = -V_p . I_p^* \tag{2.5}$$

S_t คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลเข้าสู่หม้อแปลงทางด้านบัส t มีค่าดังนี้

$$S_t = \frac{V_p}{a} . I_q^* \tag{2.6}$$

จากสมการที่ (2.4) , (2.5) และ (2.6) จะได้ว่า

$$-V_p . I_p^* = \frac{V_p}{a} . I_q^*$$

$$I_q^* = -a . I_p^*$$

$$I_q = -a^* . I_p \tag{2.7}$$

และจากกฎของเคอร์ชอร์ฟ สามารถคำนวณหากระแส I_q ได้ดังนี้

$$I_q = \left(V_q - \frac{V_p}{a} \right) . y_{pq}$$

$$I_q = y_{pq} . V_q - \frac{y_{pq}}{a} . V_p \tag{2.8}$$

จากสมการที่ (2.7) จะได้ว่า

$$I_p = \frac{-1}{a^*} . I_q \tag{2.9}$$

แทนค่า I_q จากสมการที่ (2.8) ลงในสมการที่ (2.9) จะได้ว่า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$I_p = \frac{-1}{a^*} \cdot \left(y_{pq} \cdot V_q - \frac{y_{pq}}{a} \cdot V_p \right)$$

$$= \frac{-y_{pq}}{a^*} \cdot V_q + \frac{y_{pq}}{|a|^2} \cdot V_p \qquad (2.10)$$

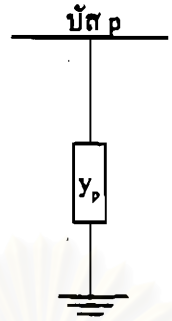
จากสมการที่ (2.8) และ (2.10) สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ด้านทั้งสองของหม้อแปลงในรูปของสมการเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_{pq}}{|a|^2} & \frac{-y_{pq}}{a^*} \\ \frac{-y_{pq}}{a} & y_{pq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_p \\ V_q \end{bmatrix} \qquad (2.11)$$

แอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ในสมการที่ (2.11) จะนำไปใช้ในการสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ต่อไป

2.1.5 ชั้นท์อิลิเมนต์ (Shunt element)

ชั้นท์อิลิเมนต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง ได้แก่ คาปาซิเตอร์ (Capacitor) และ รีแอคเตอร์ (Reactor) หน้าที่ของอุปกรณ์ดังกล่าวคือ ช่วยรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสให้อยู่ในช่วงการทำงานตามที่กำหนด สำหรับวงจรสมมูลของชั้นท์อิลิเมนต์ประกอบด้วย แอดมิตแตนซ์คงที่ Y_p ต่อระหว่างบัสและพื้นดินดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของชั้นท์อิลิเมนต์

2.2 การสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์โดยวิธีอิลิเมนต์สแตมป์ (Element stamp method)

การสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์โดยวิธีอิลิเมนต์สแตมป์ [12] เป็นการหาบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์โดยการเพิ่มองค์ประกอบของระบบไฟฟ้ากำลังเข้าไปทีละตัวจนครบทั้งหมด บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ที่ได้หลังจากเพิ่มองค์ประกอบตัวสุดท้ายเข้าไป จะเป็นบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ต้องการ โดยมีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

2.2.1 สายส่งไฟฟ้า

สำหรับสายส่งไฟฟ้าที่เชื่อมระหว่างบัส p และ q ตามรูปที่ 2.3 บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ใหม่จะเป็นดังสมการ

$$\left.\begin{aligned} Y_{pp}^{new} &= Y_{pp}^{old} + y_{serpq} + \frac{1}{2}\cdot y_{shtpq} \\ Y_{qq}^{new} &= Y_{qq}^{old} + y_{serpq} + \frac{1}{2}\cdot y_{shtpq} \\ Y_{pq}^{new} &= Y_{pq}^{old} - y_{serpq} \\ Y_{qp}^{new} &= Y_{qp}^{old} - y_{serpq} \end{aligned}\right\} \qquad (2.12)$$

โดย

Y_{pp}^{old} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก p ก่อนใส่สายส่งไฟฟ้า pq

Y_{pp}^{new} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก p หลังใส่สายส่งไฟฟ้า pq

Y_{qq}^{old} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว q และหลัก q ก่อนใส่สายส่งไฟฟ้า pq

Y_{qq}^{new} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว q และหลัก q หลังใส่สายส่งไฟฟ้า pq

Y_{pq}^{old} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก q ก่อนใส่สายส่งไฟฟ้า pq

Y_{pq}^{new} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก q หลังใส่สายส่งไฟฟ้า pq

Y_{qp}^{old} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว q และหลัก p ก่อนใส่สายส่งไฟฟ้า pq

Y_{qp}^{new} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว q และหลัก p หลังใส่สายส่งไฟฟ้า pq

y_{serpq} คือ แอดมิตแตนซ์อนุกรม (Series admittance) ของสายส่งไฟฟ้า pq มีค่าเท่ากับ

$$\frac{1}{R_{pq} + jX_{pq}}$$

y_{shtpq} คือ ไลน์ชาร์จจิ้งแอดมิตแตนซ์ (Line charging admittance) ของสายส่งไฟฟ้า pq

2.2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า

สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าที่เชื่อมระหว่างบัส p และ q ตามรูปที่ 2.4(ก) บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ใหม่จะเป็นดังสมการ

$$\left.\begin{aligned} Y_{pp}^{new} &= Y_{pp}^{old} + \frac{1}{|a|^2} \cdot y_{pq} \\ Y_{qq}^{new} &= Y_{qq}^{old} + y_{pq} \\ Y_{pq}^{new} &= Y_{pq}^{old} - \frac{1}{a^*} \cdot y_{pq} \\ Y_{qp}^{new} &= Y_{qp}^{old} - \frac{1}{a} \cdot y_{pq} \end{aligned}\right\} \qquad (2.13)$$

โดย

Y_{pp}^{old} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก p ก่อนใส่หม้อแปลงไฟฟ้า pq

Y_{pp}^{new} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก p หลังใส่หม้อแปลงไฟฟ้า pq

Y_{qq}^{old} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว q และหลัก q ก่อนใส่หม้อแปลงไฟฟ้า pq

Y_{qq}^{new} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว q และหลัก q หลังใส่หม้อแปลงไฟฟ้า pq

Y_{pq}^{old} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก q ก่อนใส่หม้อแปลงไฟฟ้า pq

Y_{pq}^{new} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก q หลังใส่หม้อแปลงไฟฟ้า pq

Y_{qp}^{old} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว q และหลัก p ก่อนใส่หม้อแปลงไฟฟ้า pq

Y_{qp}^{new} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว q และหลัก p หลังใส่หม้อแปลงไฟฟ้า pq

y_{pq} คือ แอดมิตแตนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า pq

a คือ อัตราส่วนการแปลงของหม้อแปลงไฟฟ้า pq

a^{*} คือ สังยุคเชิงซ้อน (Complex conjugate) ของ a

$|a|^2$ คือ ขนาดของ a ยกกำลังสอง

2.2.3 ชั้นท์อิลิเมนต์

สำหรับชั้นท์อิลิเมนต์ที่ต่ออยู่ที่บัส p ตามรูปที่ 2.5 บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ใหม่จะเป็นดังสมการ

$$Y_{pp}^{new} = Y_{pp}^{old} + y_p \qquad (2.14)$$

โดย

Y_{pp}^{old} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก p ก่อนใส่ชั้นท์อิลิเมนต์ที่บัส p

Y_{pp}^{new} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก p หลังใส่ชั้นท์อิลิเมนต์ที่บัส p

y_p คือ แอดมิตแตนซ์ของชั้นท์อิลิเมนต์ที่ต่อกับบัส p

2.2.4 ขั้นตอนการสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์โดยวิธีอิลิเมนต์สแตมป์

จากหลักการสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ดังที่กล่าวมาแล้ว สามารถสรุปเป็นขั้นตอนเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้ และสรุปเป็นแผนภาพดังแสดงในรูปที่ 2.6

1) อ่านข้อมูลของระบบ

2) กำหนดค่าเริ่มต้น $\left[Y_{pq}\right]=\left[0+j0\right]$ สำหรับทุกค่าของ p และ q

3) คำนวณสมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์สำหรับอุปกรณ์ที่เป็นสายส่งไฟฟ้า ตามสมการที่ (2.12)

4) ตรวจสอบว่ามีหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังหรือไม่

4.1) ถ้าไม่มีหม้อแปลงไฟฟ้า ให้ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 6

4.2) ถ้ามีหม้อแปลงไฟฟ้า ให้ทำขั้นตอนที่ 5 ต่อไป

5) คำนวณสมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์สำหรับอุปกรณ์ที่เป็นหม้อแปลงไฟฟ้า ตามสมการที่ (2.13)

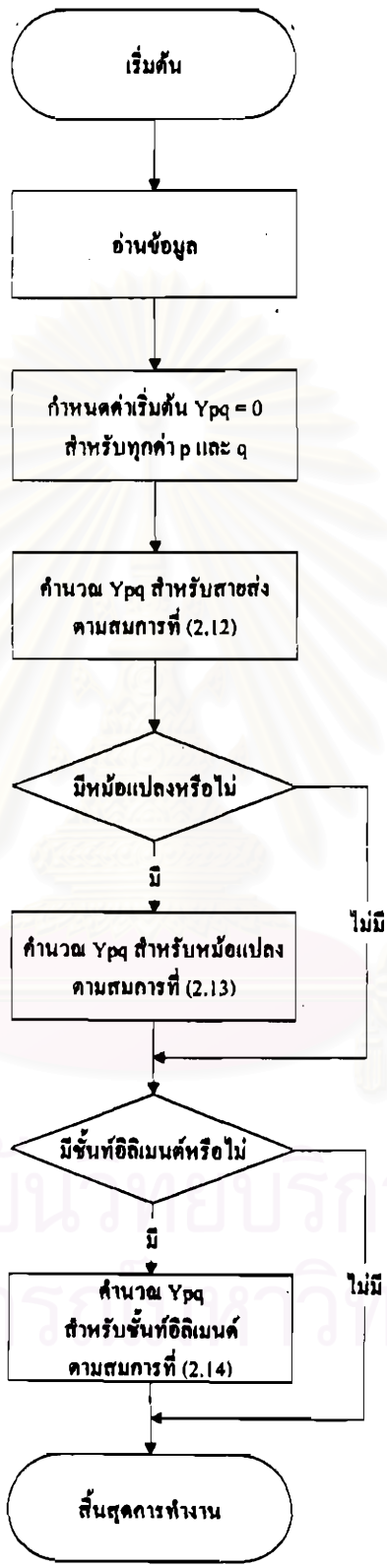
6) ตรวจสอบว่ามีชั้นท์อิลิเมนต์ในระบบไฟฟ้ากำลังหรือไม่

6.1) ถ้าไม่มีชั้นท์อิลิเมนต์ ให้ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 8

6.2) ถ้ามีชั้นท์อิลิเมนต์ ให้ทำขั้นตอนที่ 7 ต่อไป

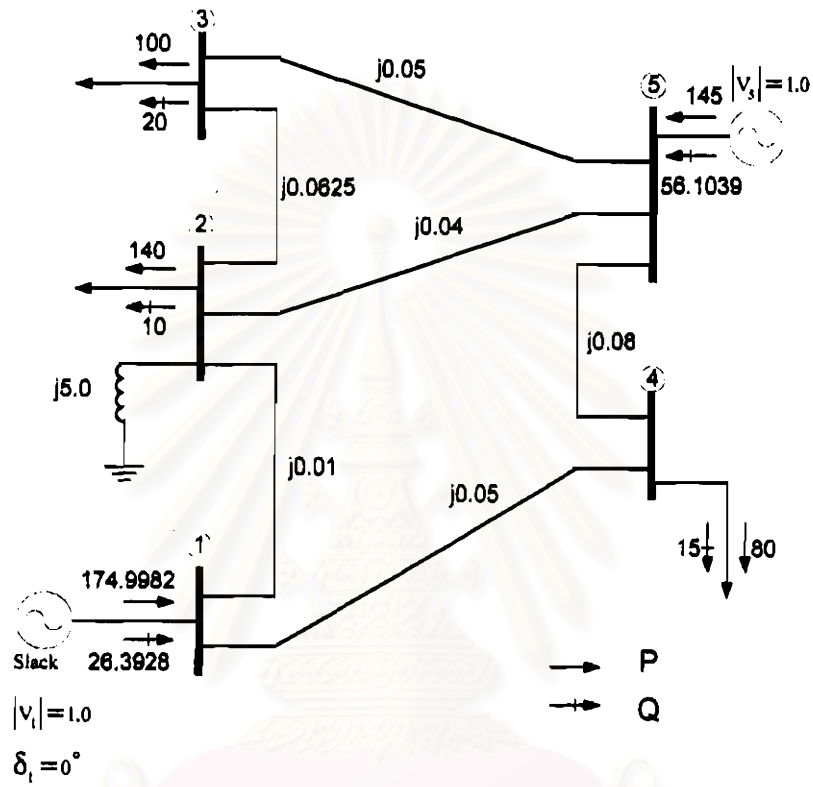
7) คำนวณสมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์สำหรับอุปกรณ์ที่เป็นชั้นท์อิลิเมนต์ ตามสมการที่ (2.14)

8) สิ้นสุดการสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์



รูปที่ 2.6 แผนภาพการสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์โดยวิธีอิลิเมนต์สแตมป์

ตัวอย่างที่ 2.1 รูปที่ 2.7 แสดงระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส สายส่ง 6 เส้น โดยสายส่งแต่ละเส้นแสดงในรูปของรีแอคแตนซ์อนุกรม สามารถคำนวณค่าบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ได้ดังนี้



รูปที่ 2.7 ระบบไฟฟ้ากำลังตัวอย่าง 5 บัส สายส่ง 6 เส้น

ระบบไฟฟ้ากำลังมี 5 บัส ดังนั้นจะได้บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์มีขนาด 5x5 ทำการคำนวณทีละขั้นตอนดังนี้

1) กำหนดค่าสมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ทุกตำแหน่งให้มีค่าเท่ากับ 0+j0
2) คำนวณค่าสมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์สำหรับสายส่งไฟฟ้า จะได้

$$Y_{11} = (1/j0.05) + (1/j0.1) = -j30$$

$$Y_{22} = (1/j0.1) + (1/j0.04) + (1/j0.0625) = -j51$$

$$Y_{33} = (1/j0.05) + (1/j0.0625) = -j36$$

$$Y_{44} = (1/j0.05) + (1/j0.08) = -j32.5$$

$$Y_{55} = (1/j0.05) + (1/j0.04) + (1/j0.08) = -j57.5$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -(1/j0.1) = j10$$

$$Y_{14} = Y_{41} = -(1/j0.05) = j20$$

$$Y_{23} = Y_{32} = -(1/j0.0625) = j16$$

$$Y_{25} = Y_{52} = -(1/j0.04) = j25$$

$$Y_{35} = Y_{53} = -(1/j0.05) = j20$$

$$Y_{45} = Y_{54} = -(1/j0.08) = j12.5$$

3) ตรวจสอบว่ามีหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังหรือไม่ พบว่าไม่มี ดังนั้น Y_{bus} มีค่าคงเดิม

4) ตรวจสอบว่ามีชั้นท์อิลิเมนต์ในระบบไฟฟ้ากำลังหรือไม่ พบว่ามีค่า j5.0 ต่ออยู่ที่บัสที่ 2 ดังนั้น

$$Y_{22}^{new} = Y_{22}^{old} + y_2$$

$$Y_{22}^{new} = -j51 + (1/j5.0) = -j51.2$$

5) สิ้นสุดการสร้างบัสแอดมิตแตนซ์ จะได้บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ คือ

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} -j30 & j10 & 0 & j20 & 0 \\ j10 & -j51.2 & j16 & 0 & j25 \\ 0 & j16 & -j36 & 0 & j20 \\ j20 & 0 & 0 & -j32.5 & j12.5 \\ 0 & j25 & j20 & j12.5 & -j57.5 \end{bmatrix}$$