หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีหลักในการวิเคราะห์โหลดโฟล

2.1 การใช้สัญญลักษณ์และการแทนค่าในระบบไฟฟ้า

2.1.1 แผนภูมิเส้นเดี่ยว (Single Line Diagram)

ในระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ไฟ 3 เฟส และมีโหลด (Load) สมดุลย์ การคำนวณค่ากระแสไฟฟ้า แรงดัน และกำลังไฟฟ้า สามารถคำนวณได้จากระบบไฟฟ้า 1 เฟสแทนได้ ดังนั้นจึงใช้แผนภูมิเส้นเดี่ยวแทนวงจรไฟฟ้า ของระบบไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งในแผนภูมิเส้นเดี่ยวนี้ จะบอกรายละเอียดต่างๆ ของระบบไฟฟ้าเช่น ค่าอิมพิแดนซ์ของสายส่งไฟฟ้า ค่าพลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือโหลด ค่าแรงดันที่บัส เป็นต้น

2.1.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)

ในการวิเคราะห์เรื่องโหลดโฟล เครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะเป็นเสมือนแหล่งกำเนิดกระแส (Current Source) ที่จ่ายกระแสเข้าไปในบัส ซึ่งค่าจะถือเป็นบวก (+) โดยทั่วไปค่าพลังไฟฟ้าแอคทีฟ (Active Power) จะคงที่ ยกเว้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมกับสวิงบัส (Swing Bus) ส่วนค่าพลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (Reactive Power) จะเปลี่ยนแปลงได้เพื่อควบคุมแรงดันที่บัสให้ได้ตามกำหนด แต่ทั้งนี้ต้องไม่เกินค่าขีดจำกัดสูงสุด (Maximum Available Vars) หรือน้อยกว่าขีดจำกัดต่ำสุด (Minimum Available Vars)

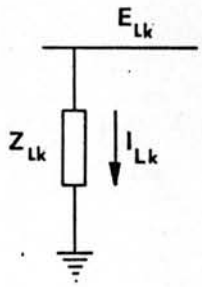
2.1.3 ซินโครนัสคอนเดนเซอร์ (Synchronous Condenser)

ซินโครนัสคอนเดนเซอร์ ถือเป็นแหล่งกำเนิดกระแสเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่ค่าพลังไฟฟ้าแอคทีฟจะเท่ากับศูนย์ และมีค่าพลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่เปลี่ยนแปลงได้เพื่อควบคุมแรงดัน

2.1.4 โหลด

โหลดเป็นเสมือนแหล่งที่รับกระแสออกจากบัส ซึ่งจะถือค่าเป็นลบ (-) โดยมีพลังไฟฟ้าแอคทีฟและพลังไฟฟ้ารีแอคทีฟคงที่ในการวิเคราะห์โหลดโฟลโดยใช้อิมพิแดนซ์

เมตริก (Z Matrix) และใช้กราวนด์ (Ground) เป็นบัสอ้างอิง ค่าพลังไฟฟ้าจะต้องเปลี่ยนเป็น อิมพิแดนซ์ที่สมมูลย์กับโหลด เรียกชื่อว่า กราวนด์-ทาย อิมพิแดนซ์ (Ground-Tie Impedance)[5]



รูปที่ 2.1 แสดงถึงกราวนด์-ทาย อิมพิแดนซ์ ที่สมมูลย์กับโหลด

ค่ากราวนด์-ทาย อิมพิแดนซ์ สามารถคำนวณหาได้ดังนี้

ที่บัส K โหลดที่เป็นพลังไฟฟ้าแอคทีฟ และพลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ คือ $P_{Lk} + jQ_{Lk}$

กระแสที่ไหลออกจาก บัส K

$$I_{Lk} = \frac{P_{Lk} - jQ_{Lk}}{E^*_{Lk}} \qquad (2.1)$$

เมื่อ E_{Lk} เป็นค่าแรงดันที่ Bus K

จากรูปที่ 2.1 ค่ากราวนด์-ทาย อิมพิแดนซ์ จะได้

$$Z_{Lk} = \frac{E_{Lk}}{I_{Lk}} \qquad (2.2)$$

จากสมการ (2.1) และ (2.2) ได้ว่า

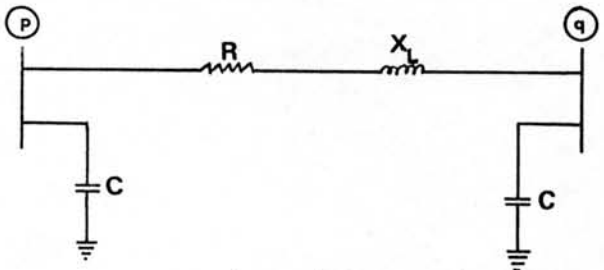
$$Z_{Lk} = \frac{|E_{Lk}|^2}{P_{Lk} - jQ_{Lk}} \qquad (2.3)$$

ค่ากราวนด์-ทาย อิมพิแดนซ์นี้ จะต้องเอาไปคิดรวมในการคำนวณหาอิมพิแดนซ์เมตริกด้วย

2.1.5 <u>สายส่งไฟฟ้า (Transmission Line)</u>

สายส่งไฟฟ้าที่เชื่อมระหว่างบัส สามารถแทนได้ด้วยวงจรสมมูลย์พาย

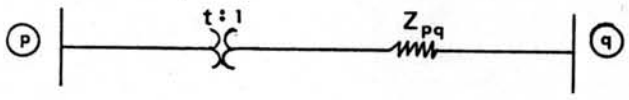
(Equivalent Pi Circuit) ซึ่งประกอบด้วย ความต้านทานต่ออนุกรมกับอินดักแทนซ์ (Inductance) เชื่อมอยู่ระหว่างบัส 2 บัสที่สายส่งไฟฟ้านี้เชื่อมอยู่ และมีชั้นคาปาซิแทนซ์ (Shunt Capacitance) ซึ่งมีค่าซัสเซบแทนซ์ (Susceptance) เป็นครึ่งหนึ่งของชั้นคาปาซิแทนซ์ของสายส่งทั้งหมดตลอดสายต่ออยู่ที่บัสแต่ละบัส



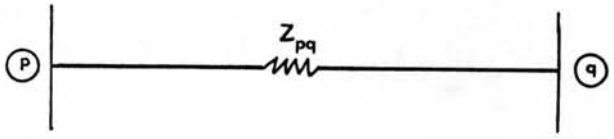
รูปที่ 2.2 แสดงถึงวงจรสมมูลย์พาย ที่ใช้แทนสายส่งไฟฟ้า

2.1.6 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

หม้อแปลงที่มีค่าอัตราส่วนจำนวนรอบ (Turn Ratio) เป็นปกติ (Nominal) สามารถแทนได้ด้วยอิมพีแดนซ์ หรือแอทมิตแทนซ์ ของหม้อแปลงเชื่อมอยู่ระหว่างบัสทั้ง 2



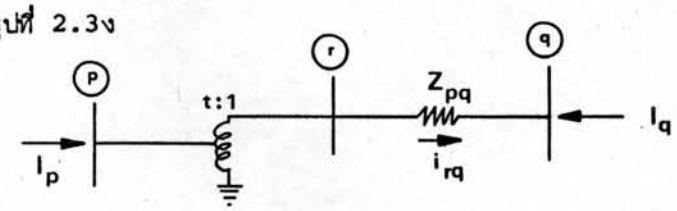
รูปที่ 2.3ก หม้อแปลงที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบเป็นปกติ มีค่า t = 1



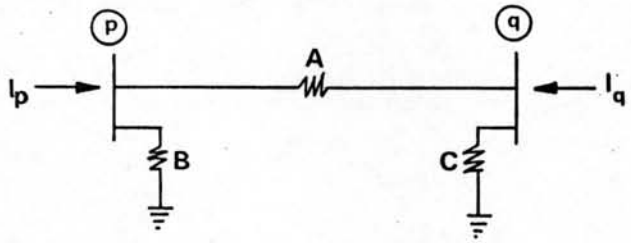
รูปที่ 2.3ข สมมูลย์ของหม้อแปลงที่มีค่า อัตราส่วนจำนวนรอบเป็นปกติ

สำหรับหม้อแปลงซึ่งมีค่า อัตราส่วนจำนวนรอบผิดจากปกติ (Off-Nominal) แทนได้ด้วยอิมพีแดนซ์ หรือ แอทมิตแทนซ์ ต่ออนุกรมกับหม้อแปลงอุดมคติ (Ideal Transformer) ดังแสดงในรูป 2.3ค ในการศึกษาเรื่อง

โหลดโฟล จะเปลี่ยนอิมพิแดนซ์และหม้อแปลงอุดมคติ ให้อยู่ในรูปของวงจรสมมูลย์พาย ดังรูปที่ 2.3ง



รูปที่ 2.3ค แสดงถึงหม้อแปลงอุดมคติต่ออนุกรมกับอิมพิแดนซ์ ใช้เขียนแทนหม้อแปลงที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบผิดจากปกติ



รูปที่ 2.3ง แสดงวงจรสมมูลย์พาย

ค่า A, B และ C ในวงจรสมมูลย์พายจากรูปที่ 2.3ง สามารถหาได้ดังนี้[1]

$$A = \frac{y_{pq}}{t} \qquad (2.4)$$

$$B = \frac{1}{t}\left(\frac{1}{t} - 1\right) y_{pq} \qquad (2.5)$$

$$C = \left(1 - \frac{1}{t}\right) y_{pq} \qquad (2.6)$$

2.1.7 ชั้นอิลิเมนท์ (Shunt Element)

ชั้นอิลิเมนท์ จะทำหน้าที่เป็นโหลดที่มีอิมพิแดนซ์คงที่ ชั้นอิลิเมนท์ที่ใช้งานกันในระบบไฟฟ้าก็คือ คาปาซิเตอร์ และรีแอคเตอร์ ในระบบไฟฟ้ามักจะมีการติดคาปาซิเตอร์ ที่สถานีไฟฟ้าย่อยปลายทาง ทั้งนี้เพื่อยกระดับแรงดันปลายทางและลดพลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งลง คาปาซิเตอร์นี้จะทำหน้าที่เหมือนกับจ่าย พลังไฟฟ้ารีแอคทีฟให้กับบัส หรือในบางจุดจะมีการติดรีแอคเตอร์ เพื่อลดแรงดันที่จุดนั้นเสมือนกับเป็นตัวรับพลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ ชั้นอิลิเมนท์ต่างๆ เหล่านี้สามารถแทน

ได้ด้วยอิมพิแดนซ์ที่มีค่าคงที่ต่อขนานกับบัส

2.2 สมการของระบบไฟฟ้า

2.2.1 สมการของแรงดัน

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่บัส สามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการดังนี้[1]

$$E_{BUS} = Z_{BUS} \quad I_{BUS} \tag{2.7}$$

โดยที่ E_{BUS} คือ เวคเตอร์ของแรงดันที่บัส เทียบกับ บัสอ้างอิง

I_{BUS} คือ เวคเตอร์ของกระแสที่ไหลเข้าบัส

Z_{BUS} คือ บัสอิมพิแดนซ์เมตริก (Bus Impedance Matrix) ซึ่งประกอบด้วย สมาชิกต่างๆ ค่า สมาชิกในแนวทะแยง (Diagonal element) เป็นไดรวิ่งพอยน์อิมพิแดนซ์ (Driving-Point Impedance) ส่วนค่าสมาชิกนอกแนวทะแยง (Off-diagonal element) เป็นทรานส์เฟอร์-อิมพิแดนซ์ (Transfer Impedance)

ในระบบไฟฟ้าที่ใช้กราวนด์ เป็นบัสอ้างอิง การคำนวณค่าสมาชิกของบัส-อิมพิแดนซ์เมตริก จะต้องคิดรวมผลของชั้นอิลิเมนท์ต่างๆ เช่น คาปาซิเตอร์, รีแอคเตอร์, ลายชาร์จจิ้ง (Line Charging) ชั้นอิลิเมนท์ซึ่งเกิดจากวงจรสมมูลย์พาย ของหม้อแปลง และค่ากราวนด์-ทาย อิมพิแดนซ์ ที่สมมูลย์กับโหลดด้วย[5]

จากสมการที่ (2.7) จะสามารถเขียนสมการแทนระบบไฟฟ้าที่มีจำนวนบัส เท่ากับ n บัสได้ดังนี้

$$E_1 = Z_{11}I_1+Z_{12}I_2+\ldots+Z_{1s}I_s+\ldots+Z_{1n}I_n \tag{2.8}$$

$$E_s = Z_{s1}I_1+Z_{s2}I_2+\ldots+Z_{ss}I_s+\ldots+Z_{sn}I_n \tag{2.9}$$

$$E_n = Z_{n1}I_1+Z_{n2}I_2+\ldots+Z_{ns}I_s+\ldots+Z_{nn}I_n \qquad (2.10)$$

โดยที่

E_1 คือ ค่าแรงดันที่บัส 1

E_s คือ ค่าแรงดันที่สวิงบัส (Swing Bus)

E_n คือ ค่าแรงดันที่บัส n

I_1 คือ ค่ากระแสที่ไหลเข้าที่บัส 1

I_s คือ ค่ากระแสที่ไหลเข้าที่สวิงบัส

I_n คือ ค่ากระแสที่ไหลเข้าที่บัส n

Z_{11} คือ ค่าไดรวิ่งพอยน์อิมพิแดนซ์ ที่บัส 1

Z_{nn} คือ ค่าไดรวิ่งพอยน์อิมพิแดนซ์ ที่บัส n

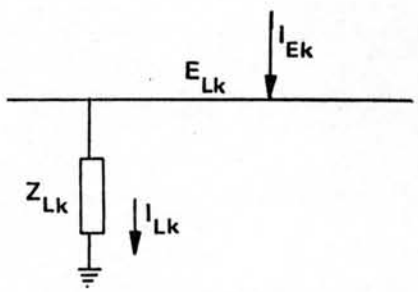
Z_{ij} คือ ค่าทรานส์เฟอร์อิมพิแดนซ์ $(i \neq j)$

ค่าแรงดันที่บัสใดๆ จะเขียนได้ดังนี้

$$E_i = \sum_{j=i}^{n} Z_{ij}I_j \qquad (2.11)$$

โดยที่ $i = 1,2,\ldots n$

2.2.2 <u>สมการของกระแส</u>



รูปที่ 2.4 แสดงกระแสที่ไหลเข้าบัสโหลด

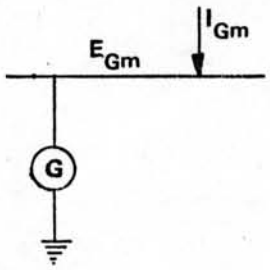
จากรูปที่ 2.4 กระแสที่ไหลเข้าบัสโหลดเป็นดังนี้[5]

$$I_{Ek} = -\left[\frac{P_{Lk} + jQ_{Lk}}{E_{Lk}} - \frac{E^*_{Lk}}{Z^*_{Lk}}\right]^* \qquad (2.12)$$

โดยที่ I_{Ek} เป็นกระแสที่ไหลเข้าที่บัส k

E_{Lk} เป็นแรงดันที่บัส k

Z_{Lk} เป็นกราวนด์-ทาย อิมพิแดนซ์ ของบัส k



รูปที่ 2.5 แสดงกระแสที่ไหลเข้าบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.5 กระแสที่ไหลเข้าบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นดังนี้

$$I_{Gm} = \left[\frac{P_{Gm} + jQ_{Gm}}{E_{Gm}}\right]^* \qquad (2.13)$$

ที่บัส n ใดๆ กระแสที่ไหลเข้าบัสทั้งหมด

$$I_n = I_{Gn} + I_{En}$$

$$= \left[\frac{P_{Gn} + jQ_{Gn}}{E_n}\right]^* - \left[\frac{P_{Ln} + jQ_{Ln}}{E_n} - \frac{E_n^*}{Z_{Ln}^*}\right]^*$$

$$= \left[\frac{P_{Gn} - P_{Ln}}{E_n} + j\,\frac{Q_{Gn} - Q_{Ln}}{E_n} + \frac{E_n^*}{Z_{Ln}^*}\right]^* \qquad (2.14)$$

2.3 บัสที่มีแรงดันคงที่ (Constant Voltage Bus)

2.3.1 สวิงบัสหรือแสลกบัส (Swing Bus หรือSlag Bus)

สวิงบัสหรือแสลกบัส คือบัสที่รักษาแรงดันคงที่ แต่ยอมให้ค่าพลังไฟฟ้าแอคทีฟและพลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ เปลี่ยนไป บัสนี้จะเป็นบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำหน้าที่ปรับกำลังผลิตในระบบให้สมดุลย์กับโหลด ค่าแรงดันที่สวิงบัสหาได้จากสมการ (2.9)

$$E_s = Z_{s1}I_1+Z_{s2}I_2+\ldots+Z_{ss}I_s+\ldots Z_{sn}I_n+\ldots \quad (2.15)$$

ที่บัส n ใดๆ ถ้ากระแสที่ไหลเข้าบัสเปลี่ยนไป ΔI_n ดังนั้นเพื่อจะรักษาค่า E_s ให้คงที่ กระแสที่ไหลเข้าสวิงบัส จะต้องเปลี่ยนไป ΔI_s สมการที่ (2.15) เขียนใหม่ได้เป็น

$$E_s = Z_{s1}I_1+Z_{s2}I_2+\ldots+Z_{ss}(I_s+\Delta I_s)+\ldots+Z_{sn}(I_n+\Delta I_n)+\ldots(2.16$$

จากสมการ (2.15) และ (2.16)

$$\Delta E_s = Z_{ss}\Delta I_s + Z_{sn}\Delta I_n = 0 \quad (2.17)$$

$$\Delta I_s = -\frac{Z_{sn}}{Z_{ss}}\cdot\Delta I_n \quad (2.18)$$

ค่ากระแสที่ไหลเข้าสวิงบัส จะต้องเปลี่ยนค่าใหม่ทุกครั้งที่ค่ากระแสที่ไหลเข้าบัสอื่นเปลี่ยน โดยหาได้จากสมการ (2.18)

2.3.2 <u>บัสควบคุมแรงดัน (Voltage Control Bus)</u>

บัสควบคุมแรงดัน คือ บัสที่รักษาขนาดของแรงดันคงที่ แต่ค่าพลังไฟฟ้าแอคทีฟที่บัสนั้นไม่เปลี่ยนแปลง คงเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าพลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ ที่บัสนี้จะมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือ ซินโครนัสคอนเดนเซอร์ต่ออยู่ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงค่าพลังไฟฟ้ารีแอคทีฟได้ในขอบเขตที่จำกัด คือ

$$Q_{min} \leq Q_{Gn} \leq Q_{max}$$

ค่าพลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ ที่เปลี่ยนแปลงนี้ จะทำให้กระแสที่ไหลเข้าบัส n เปลี่ยนแปลงไป ΔI_n ในขณะเดียวกันที่สวิงบัส กระแสที่ไหลเข้าสวิงบัส ต้องเปลี่ยนไป ΔI_s ด้วย

จากสมการ (2.10) ค่าแรงดันที่บัส n

$$|E_n|\angle\theta n = Z_{n1}I_1+\ldots+Z_{ns}I_s+\ldots+Z_{nn}I_n+\ldots \quad (2.19)$$

ค่าแรงดัน $|E_n|$ จะต้องรักษาให้เท่ากับแรงดันที่กำหนด $|\bar{E}_n|$

จากสมการ (2.19) จะได้

$$|\bar{E}_n|\angle\bar{\theta}_n = Z_{n1}I_1+\ldots Z_{ns}(I_s+\Delta I_s)+\ldots+Z_{nn}(I_n+\Delta I_n)+\ldots \quad (2.20)$$

สมการ (2.20) ลบด้วยสมการ (2.19) จะได้

$$|\bar{E}_n|\angle\bar{\theta}_n - |E_n|\angle\theta_n = Z_{nn}\cdot\Delta I_n+Z_{ns}\cdot\Delta I_s \quad (2.21)$$

แทนค่า ΔI_s จากสมการ (2.18)

$$|\bar{E}_n|\angle\bar{\theta}_n - |E_n|\angle\theta_n = \left[Z_{nn} - \frac{Z_{ns}^2}{Z_{ss}}\right].\Delta I_n$$

$$\Delta I_n = \frac{1}{Z_{nn}-\frac{Z_{ns}^2}{Z_{ss}}}\cdot\left[|\bar{E}_n|\angle\bar{\theta}_n - |E_n|\angle\theta_n\right] \quad (2.22)$$

ค่า ΔI_n ที่ได้จะนำไปใช้ก็ต่อเมื่อไม่ทำให้ค่า Q_{Gn} เกินขีดจำกัด ที่กำหนด ถ้าค่า Q_{Gn} เกินขีดจำกัด ที่กำหนด จะต้องใช้ค่า Q_{Gn} ที่กำหนดนั้น แล้วคำนวณหาค่า I_n ใหม่จากสมการที่ (2.14)

ค่า Q_{Gn} ที่พอดีทำให้ขนาดของแรงดันได้ตามกำหนดหาได้ดังนี้

จากสมการที่ (2.14)

$$(I_n+\Delta I_n)^* = \frac{1}{E}(P_{Gn}-P_{Ln}+jQ_{Gn}-jQ_{Ln}+j\frac{|E_n|^2}{Z_{Ln}^*})$$

$$jQ_{Gn} = E_n(I_n+\Delta I_n)^* - P_{Gn}+P_{Ln}+jQ_{Ln}-\frac{|E_n|^2}{Z_{Ln}^*}$$

$$Q_{Gn} = \mathrm{Im}\left[E_n(I_n+\Delta I_n)^* - \frac{|E_n|^2}{Z_{Ln}^*}\right]+Q_{Ln} \quad (2.23)$$

2.4 <u>สมการของพลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งและในหม้อแปลงไฟฟ้า (Line Flow Equations)</u>

ค่าพลังไฟฟ้าที่ไหลภายในสาย ซึ่งเชื่อมระหว่าง 2 บัส สามารถคำนวณได้ดังนี้

2.4.1 <u>สำหรับสายส่งไฟฟ้า หรือ หม้อแปลงที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบเป็นปกติ</u>

กระแสที่ไหลออกจากบัส p ในสายที่เชื่อมระหว่างบัส p และ q คือ

$$I_{pq} = (E_p - E_q)\, y_{pq} + E_p Y_{sp} \qquad (2.24)$$

โดยที่ y_{pq} เป็นค่าแอทมิตแทนซ์ของสาย

Y_{sp} เป็นผลรวมของค่าแอทมิตแทนซ์ ของ ชั้นอิลิเมนท์ ของสายที่ต่ออยู่ที่บัส

พลังไฟฟ้าที่ไหลออกจากบัส p ในสายที่เชื่อมระหว่างบัส p และ q ในเทอมของแอคทีฟ และ รีแอคทีฟ คือ

$$P_{pq} + jQ_{pq} = E_p I_{pq}^*$$

$$= E_p\left[(E_p - E_q)y_{pq} + E_p Y_{sp}\right]^* \qquad (2.25)$$

ทำนองเดียวกันพลังไฟฟ้าที่ไหลออกจากบัส q ไป บัส p จะเป็น

$$P_{qp} + jQ_{qp} = E_q\left[(E_q - E_p)y_{qp} + E_q Y_{sq}\right]^* \qquad (2.26)$$

2.4.2 <u>สำหรับหม้อแปลงที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบผิดจากปกติ</u>

การคำนวณพลังไฟฟ้าซึ่งไหลผ่านหม้อแปลง พิจารณาเมื่ออัตราส่วนจำนวนรอบ (t) อยู่ทางด้านบัส p ดูรูปที่ 2.3 ค - รูปที่ 2.3 ง

กระแสที่ไหลออกจากบัส p ไป บัส q

$$I_{pq} = (E_p - E_q)\frac{y_{pq}}{t} + E_p Y_{sp}$$

$$= (E_p - E_q)\frac{y_{pq}}{t} + E_p \cdot \frac{1}{t}\left(\frac{1}{t} - 1\right) y_{pq}$$

$$= \left(\frac{E_p}{t} - E_q\right)\frac{y_{pq}}{t} \qquad (2.27)$$

พลังไฟฟ้าที่ไหลออกจากบัส p ไปบัส q

$$P_{pq} + jQ_{pq} = E_p I_{pq}^*$$

$$= E_p\left[\left(\frac{E_p}{t} - E_q\right)\frac{y_{pq}}{t}\right]^* \qquad (2.28)$$

ทำนองเดียวกัน พลังไฟฟ้าที่ไหลออกจากบัส q ไป บัส p

$$P_{qp} + jQ_{qp} = E_q\left[(E_q\, t - E_p)\frac{y_{qp}}{t}\right]^* \qquad (2.29)$$