

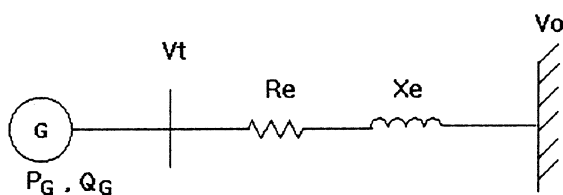
บทที่ 2

แบบจำลองเชิงเส้นของระบบกำลังไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์ระบบโดยทั่วไปเมื่อพิจารณาตัวแปรสเทตที่มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยรอบๆ จุดทำงานหรือสภาวะเริ่มต้น เราสามารถที่จะทำการที่เกี่ยข้องให้เป็นสมการเชิงเส้น และสร้างแบบจำลองเชิงเส้นของระบบได้ สำหรับการวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองเชิงเส้นที่นิยมใช้กันมาก 2 แบบ คือแบบจำลองเชิงเส้นของระบบ SMIB ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้เป็นพื้นฐานในการศึกษาเสถียรภาพระบบกำลังไฟฟ้า และแบบจำลองเชิงเส้นของระบบเครื่องจักรหลายตัว ซึ่งจะมีผลของการกระทำระหว่างกันทางพลศาสตร์ ของเครื่องจักรเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ทำให้ผลของการวิเคราะห์มีความถูกต้องยิ่งขึ้น ในแบบจำลองเชิงเส้นประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนของเครื่องจักรซิงโครนัสและส่วนของระบบควบคุมแรงดันในส่วน of ระบบควบคุมแรงดันจะใช้ชนิด IEEE type 1 ทั้งหมด สำหรับการวิจัยนี้เป็นการนำแบบจำลองมาใช้งาน เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ โดยการเขียนโปรแกรม ดังนั้นสมการที่นำมาเสนอจะเป็นสมการสำคัญที่ถูกรวบรวม และเกี่ยวข้องกับการเขียนโปรแกรมส่วนที่มาจากสมการสามารถดูได้จากเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง

2.1 แบบจำลองเชิงเส้นของระบบ SMIB

ระบบ SMIB ประกอบด้วยเครื่องจักรซิงโครนัสต่ออยู่กับระบบกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ซึ่งให้เป็นบัสอนันต์ โดยผ่านอิมพีแดนซ์ของสายส่ง แสดงได้ตามภาพที่ 2.1 และแสดงด้วยแผนภาพเฟเซอร์ ได้ตามภาพที่ 2.2 ซึ่งจะใช้ในการหาค่าภาวะทำงานขณะสถานะคงที่(steady-state operating conditions) หรือค่าสภาวะเริ่มต้น(initial condition) ที่จะใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ K_1 ถึง K_6 ของแบบจำลองเชิงเส้นของระบบ SMIB ซึ่งแสดงตามภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.1 แสดงแผนภาพอิมพีแดนซ์ของระบบ SMIB

$$\phi = \tan^{-1} \frac{Q_G}{P_G} \quad (2.1.2)$$

$$I_x = \frac{V_o - \sqrt{V_o^2 - 4 \left(X_e - \frac{Q_G}{P_G} R_e \right) \left[X_e I_r^2 - \frac{Q_G}{P_G} (V_o I_r + R_e I_r^2) \right]}}{2 \left(X_e - \frac{Q_G}{P_G} R_e \right)} \quad (2.1.3)$$

$$|I_a| = \sqrt{I_r^2 + I_x^2} \quad (2.1.4)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{I_x}{I_r} \quad (2.1.5)$$

$$V_{tr} = V_o - X_e I_x + R_e I_r \quad (2.1.6)$$

$$V_{tx} = X_e I_r + R_e I_x \quad (2.1.7)$$

$$|V_t| = \sqrt{V_{tr}^2 + V_{tx}^2} \quad (2.1.8)$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{V_{tx}}{V_{tr}} \quad (2.1.9)$$

$$\delta = \tan^{-1} \frac{(X_q + X_e) I_r + (R_g + R_e) I_x}{V_o - (X_q + X_e) I_x + (R_g + R_e) I_r} \quad (2.1.10)$$

$$\gamma = \delta - \beta + \phi \quad (2.1.11)$$

$$I_d = -|I_a| \sin \gamma \quad (2.1.12)$$

$$I_q = |I_a| \cos \gamma \quad (2.1.13)$$

$$\alpha = \delta - \beta \quad (2.1.14)$$

$$V_d = -|V_t| \sin \alpha \quad (2.1.15)$$

$$V_q = |V_t| \cos \alpha \quad (2.1.16)$$

$$E_q = V_q + R_g I_q - X_d I_d \quad (2.1.17)$$

$$E_{qa} = E_q + (X_d - X_q) I_d \quad (2.1.18)$$

เมื่อทราบค่าภาระทำงานขณะสถานะคงที่แล้วสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ K_1 ถึง K_6 ของแบบจำลองเชิงเส้นตามภาพที่ 2.3 โดย[1,6] ได้ดังนี้

$$K_1 = \frac{E_{qa} V_o}{A} \left[R_e \sin \delta + (X_e + X'_d) \cos \delta \right] + \frac{I_q V_o}{A} \left[(X_q - X'_d) (X_e + X_q) \sin \delta - R_e (X_q - X'_d) \cos \delta \right] \quad (2.1.19)$$

$$K_2 = \frac{R_e E_{qa}}{A} + I_q \left[1 + \frac{(X_e + X_q)(X_q - X'_d)}{A} \right] \quad (2.1.20)$$

$$K_3 = \left[1 + \frac{(X_e + X_q)(X_d - X'_d)}{A} \right]^{-1} \quad (2.1.21)$$

$$K_4 = \frac{V_o (X_d - X'_d)}{A} \left[(X_e + X_q) \sin \delta - R_e \cos \delta \right] \quad (2.1.22)$$

$$K_5 = -\frac{V_d}{V_t} X_q \left[\frac{R_e V_o \sin \delta + (X_e + X'_d) V_o \cos \delta}{A} \right] + \frac{V_q}{V_t} X'_d \left[\frac{R_e V_o \cos \delta - (X_e + X_q) V_o \sin \delta}{A} \right] \quad (2.1.23)$$

$$K_6 = \frac{V_q}{V_t} \left[1 - \frac{X'_d (X_e + X_q)}{A} \right] - \frac{V_d}{V_t} \frac{X_q R_e}{A} \quad (2.1.24)$$

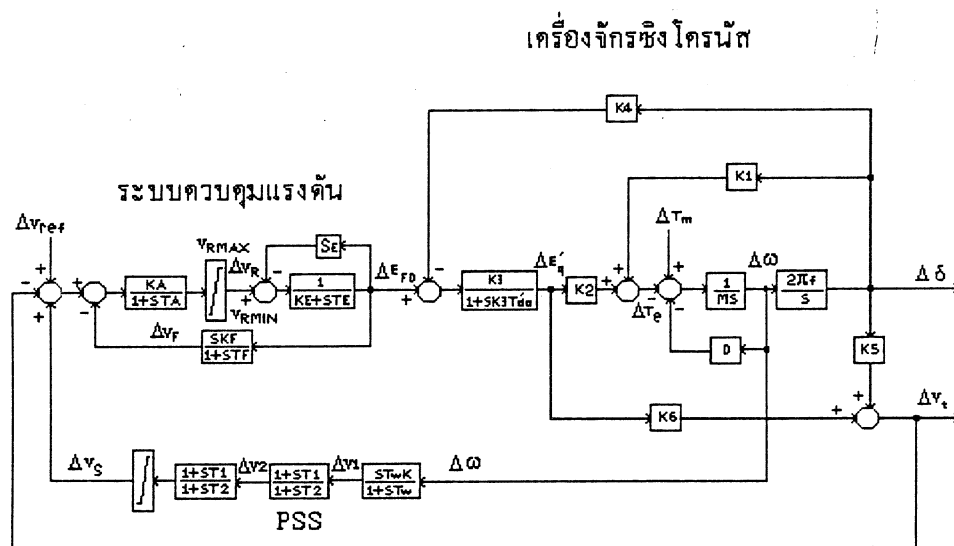
$$\text{เมื่อ } A = \left[R_e^2 + (X_e + X'_d)(X_q + X_e) \right] \quad (2.1.25)$$

โดยที่ K_1 เป็นการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดไฟฟ้าเมื่อมุมโรเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก โดยการเกี่ยวฟลักซ์แกนตรง(d-axis flux linkage) คงที่

K_2 เป็นการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดไฟฟ้าเมื่อการเกี่ยวฟลักซ์แกนตรงมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก โดยมุมโรเตอร์คงที่

K_3 เป็นแฟกเตอร์อิมพีแดนซ์

- K_4 เป็นผลการขจัดอำนาจแม่เหล็ก(demagnetizing effect) ของการเปลี่ยนแปลง มุมโรเตอร์
- K_5 เป็นการเปลี่ยนแปลงของแรงดันปลายสายเมื่อมุมโรเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง ขนาดเล็ก โดยการเกี่ยวฟลักซ์แกนตรงคงที่
- K_6 เป็นการเปลี่ยนแปลงของแรงดันปลายสายเมื่อการเกี่ยวฟลักซ์แกนตรงมีการ เปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก โดยมุมโรเตอร์คงที่



ภาพที่ 2.3 แสดงแบบจำลองเชิงเส้นของระบบ SMIB

จากภาพที่ 2.3 แสดงแบบจำลองเชิงเส้นของระบบ SMIB ซึ่งสามารถจัดระบบให้อยู่ในรูปสมการสเตต $\dot{x} = Ax + Bu$ ด้วยวิธีการควบคุมแผนใหม่(modern control) และเขียนในรูปเมตริกซ์ [5,13] ได้ดังนี้

2.1.1 สมการสแตทเจียนในรูปเมตริกซ์เมื่อไม่มี PSS

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta\omega & \Delta\delta & \Delta E'_q & \Delta E_{FD} & \Delta V_R & \Delta V_F \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{2\pi f} & -\frac{K_1}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_4}{T'_{do}} & -\frac{1}{K_3 T'_{do}} & \frac{1}{T'_{do}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{(K_E + S_E)}{T_E} & \frac{1}{T_E} & 0 \\ 0 & -\frac{K_A K_5}{T_A} & -\frac{K_A K_6}{T_A} & 0 & -\frac{1}{T_A} & -\frac{K_A}{T_A} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_F(K_E + S_E)}{T_F T_E} & \frac{K_F}{T_F T_E} & -\frac{1}{T_F} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{M} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{K_A}{T_A} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \Delta V_{ref} \\ \Delta T_m \end{bmatrix}$$

2.1.2 สมการสถานะเขียนในรูปเมตริกซ์เมื่อมี PSS

$$x = \begin{bmatrix} \Delta\omega & \Delta\delta & \Delta E'_q & \Delta E_{FD} & \Delta v_R & \Delta v_F & \Delta v_1 & \Delta v_2 & \Delta v_S \end{bmatrix}^T$$

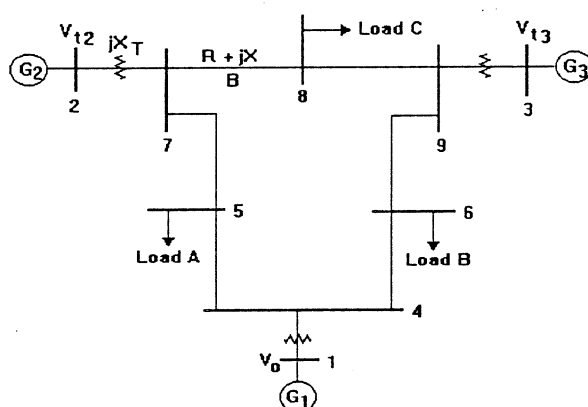
$$A = \begin{bmatrix} -\frac{D}{M} & -\frac{K_1}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_4}{T'_\phi} & -\frac{1}{K_3 T'_\phi} & \frac{1}{T'_\phi} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{(K_E + S_E)}{T_E} & \frac{1}{T_E} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_A K_5}{T_A} & -\frac{K_A K_6}{T_A} & 0 & -\frac{1}{T_A} & -\frac{K_A}{T_A} & 0 & 0 & \frac{K_A}{T_A} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_F(K_E + S_E)}{T_F T_E} & \frac{K_F}{T_F T_E} & -\frac{1}{T_F} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{KD}{M} & -\frac{KK_1}{M} & -\frac{KK_2}{M} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_w} & 0 & 0 \\ -\frac{T_1 KD}{T_2 M} & -\frac{T_1 KK_1}{T_2 M} & -\frac{T_1 KK_2}{T_2 M} & 0 & 0 & 0 & \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2 T_w}\right) & -\frac{1}{T_2} & 0 \\ -\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 \frac{KD}{M} & -\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 \frac{KK_1}{M} & -\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 \frac{KK_2}{M} & 0 & 0 & 0 & \frac{T_1}{T_2} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2 T_w}\right) & \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{(T_2)^2}\right) & -\frac{1}{T_2} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{M} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{K_A}{T_A} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K}{M} \\ 0 & \frac{T_1 K}{T_2 M} \\ 0 & \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 \frac{K}{M} \end{bmatrix}$$

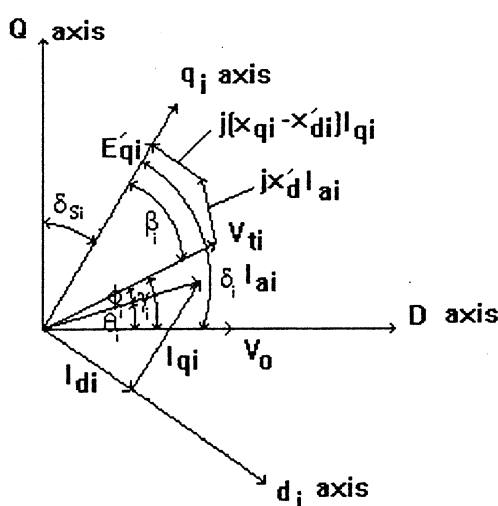
$$u = \begin{bmatrix} \Delta v_{ref} \\ \Delta T_m \end{bmatrix}$$

2.2 แบบจำลองเชิงเส้นของระบบเครื่องจักรหลายตัว

ระบบเครื่องจักรหลายตัวประกอบด้วยเครื่องจักรซิงโครนัสตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ต่อกันเป็นระบบโดยผ่านอิมพีแดนซ์ของสายส่ง และจะกำหนดให้เครื่องจักรตัวหนึ่ง เป็นเครื่องจักรอ้างอิง ยกตัวอย่างได้ตามภาพที่ 2.4 [1] เป็นแผนภาพเส้นเดียวของระบบกำลังไฟฟ้า 9 บัส ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 ตัว และมีบัสโหลดจำนวน 3 บัส กำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่ 1 เป็นเครื่องจักรอ้างอิง สำหรับค่าสถานะเริ่มต้นที่จะใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ K_{1ij} , K_{2ij} , ..., K_{6ij} ของแบบจำลองเชิงเส้นของระบบเครื่องจักรหลายตัว หาได้จากผลการไหลของโหลด(load flow) และแผนภาพเฟเซอร์ของระบบเครื่องจักรหลายตัว



ภาพที่ 2.4 แสดงแผนภาพเส้นเดียวของระบบกำลังไฟฟ้า 9 บัส



ภาพที่ 2.5 แสดงแผนภาพเฟเซอร์ของระบบเครื่องจักรหลายตัว

จากภาพที่ 2.5 แสดงแผนภาพเฟเซอร์ของเครื่องจักร i ในระบบเครื่องจักรหลายตัว โดยมีแกน d_i และ q_i เป็นของเครื่องจักร i และแกน D และ Q เป็นแกนร่วมของเครื่องจักรทั้งหมด [12,17] โดยที่แกน d_i และ q_i ของเครื่องจักรแต่ละตัวไม่จำเป็นต้องอยู่ในแนวเดียวกัน ในที่นี้กำหนดให้ แรงดันอ้างอิง(บัสอนันต์)อยู่บนแกน D จากผลการไหลของโพลได้ค่าของ V_u และ γ_i เมื่อกำหนดให้โพลที่ทุกบัสเป็นอิมพีแดนซ์คงที่ จึงสามารถเปลี่ยน P_L และ Q_L ที่ทุกบัสเป็นค่าแอดมิตแตนซ์ขนานของบัสได้[1] หลังจากนั้นทำการลดรูปเมตริกซ์แอดมิตแตนซ์ของระบบให้เหลือเฉพาะเมตริกซ์แอดมิตแตนซ์ที่เกี่ยวข้องกับกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า[1,17]

$$\text{จาก } [I] = [Y][V] \quad (2.2.1)$$

โดยที่

$$\begin{bmatrix} I_a \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{nn} & Y_{nr} \\ Y_{rn} & Y_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_t \\ V_r \end{bmatrix} \quad (2.2.2)$$

$$[I_a] = [Y_{nn} - Y_{nr} Y_{rr}^{-1} Y_{rn}] [V_t] \quad (2.2.3)$$

$$[I_a] = [Y_t] [V_t] \quad (2.2.4)$$

จากสมการ (2.2.4) ก็จะสามารถหากระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัว I_{ai} และ θ_i ได้สำหรับตัวแปรอื่นๆ หาค่าสถานะเริ่มต้นได้ดังนี้[1,17]

$$\phi_i = \theta_i - \gamma_i \quad (2.2.5)$$

$$\beta_i = \tan^{-1} \left(\frac{x_{qi} |I_{ai}| \cos \phi_i}{|V_{ti}| - x_{qi} |I_{ai}| \sin \phi_i} \right) \quad (2.2.6)$$

$$\delta_i = \beta_i + \gamma_i \quad (2.2.7)$$

$$\delta_{si} = 90^\circ - \delta_i \quad (2.2.8)$$

$$|V_{di}| = |V_{ti}| \sin \beta_i \quad (2.2.9)$$

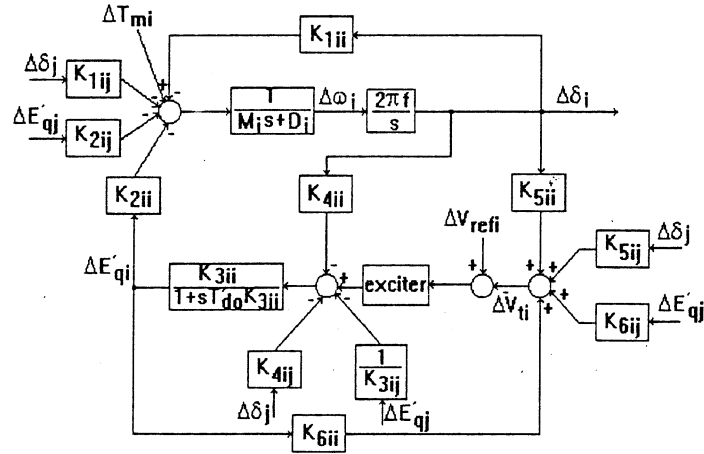
$$|V_{qi}| = |V_{ti}| \cos \beta_i \quad (2.2.10)$$

$$|I_{di}| = |I_{ai}| \sin(\beta_i - \phi_i) \quad (2.2.11)$$

$$|I_{qi}| = |I_{ai}| \cos(\beta_i - \phi_i) \quad (2.2.12)$$

$$|E'_{qi}| = |V_{qi}| + x'_{di} |I_{di}| \quad (2.2.13)$$

ใช้ค่าสถานะเริ่มต้นของตัวแปรเหล่านี้ ในการหาค่าพารามิเตอร์ K_{1ij} , K_{2ij} , ..., K_{6ij} ของแบบจำลองเชิงเส้นตามภาพที่ 2.6 โดยใช้วิธี[17] ได้ดังนี้



ภาพที่ 2.6 แสดงแบบจำลองเชิงเส้นของระบบเครื่องจักรหลายตัว

$$K_{1ii} = D_t F_{dii} + Q_t F_{qii} \quad (2.2.14)$$

$$K_{1ij} = D_t F_{dij} + Q_t F_{qij} \quad (2.2.15)$$

$$K_{2ii} = D_t Y_{dii} + Q_t Y_{qii} + I_{qi} \quad (2.2.16)$$

$$K_{2ij} = D_t Y_{dij} + Q_t Y_{qij} \quad (2.2.17)$$

$$\text{กำหนดให้ } D_t = (X_{qi} - X'_{di}) I_{qi} \quad (2.2.18)$$

$$Q_t = (X_{qi} - X'_{di}) I_{qi} + E'_{qi} \quad (2.2.19)$$

$$K_{3ii} = [1 + [X_{di} - X'_{di}] Y_{dii}]^{-1} \quad (2.2.20)$$

$$K_{3ij} = [[X_{di} - X'_{di}] Y_{dij}]^{-1} \quad (2.2.21)$$

$$K_{4ii} = [X_{di} - X'_{di}] [F_{dii}] \quad (2.2.22)$$

$$K_{4ij} = [X_{di} - X'_{di}] [F_{dij}] \quad (2.2.23)$$

$$[K_5] = [D_v] [X_q] [F_q] - [Q_v] [X'_d] [F_d] \quad (2.2.24)$$

$$[K_6] = [D_v] [X_q] [Y_q] - [Q_v] [X'_d] [Y_d] + [Q_v] \quad (2.2.25)$$

$$\text{กำหนดให้ } [D_v] = [V_t]^{-1} [V_d] \quad (2.2.26)$$

$$[Q_v] = [V_t]^{-1} [V_q] \quad (2.2.27)$$

โดยที่

$$[Y_d] = [Q_d] + [M_d] [Y_q] \quad (2.2.28)$$

$$[Y_q] = [L_q]^{-1} [Q_q] \quad (2.2.29)$$

$$[F_d] = [P_d] + [M_d] [F_q] \quad (2.2.30)$$

$$[F_q] = [L_q]^{-1} [P_q] \quad (2.2.31)$$

กำหนดให้

$$P_{dij} = -|Y_{sij}| \left[C_{ij} E'_{qj} + (X_{qj} - X'_{dj}) S_{ij} I_{qj} \right] \quad j \neq i \quad (2.2.32)$$

$$P_{qij} = -|Y_{sij}| \left[S_{ij} E'_{qj} - (X_{qj} - X'_{dj}) C_{ij} I_{qj} \right] \quad j \neq i \quad (2.2.33)$$

$$P_{dii} = - \sum_{j \neq i} P_{dij} \quad (2.2.34)$$

$$P_{qii} = - \sum_{j \neq i} P_{qij} \quad (2.2.35)$$

$$Q_{dij} = -|Y_{sij}| S_{ij} \quad j = 1, \dots, n \quad (2.2.36)$$

$$Q_{qij} = |Y_{sij}| C_{ij} \quad j = 1, \dots, n \quad (2.2.37)$$

$$L_{qij} = -|Y_{sij}| (X_{qi} - X'_{di}) S_{ij} \quad j \neq i \quad (2.2.38)$$

$$L_{qii} = 1 - |Y_{sii}| (X_{qi} - X'_{di}) S_{ii} \quad (2.2.39)$$

$$M_{dij} = |Y_{sij}| (X_{qj} - X'_{dj}) C_{ij} \quad j = 1, \dots, n \quad (2.2.40)$$

$$C_{ij} = \cos(\beta_{sij} + \delta_{sij}) \quad (2.2.41)$$

$$S_{ij} = \sin(\beta_{sij} + \delta_{sij}) \quad (2.2.42)$$

$$\delta_{sij} = \delta_{si} - \delta_{sj} \quad (2.2.43)$$

$$[Y_s] = \left[[Y_t]^{-1} + j[X'_d] \right]^{-1} \quad (2.2.44)$$

$$Y_{sij} = |Y_{sij}| e^{j\beta_{sij}} \quad (2.2.45)$$

จากภาพที่ 2.6 แสดงแบบจำลองเชิงเส้นของระบบเครื่องจักรหลายตัว และสามารถจัดระบบให้อยู่ในรูปสมการสแตต $\dot{x} = Ax + Bu$ ด้วยวิธีการควบคุมแผ่นใหม่ ได้เช่นเดียวกับระบบ SMIB แต่เนื่องจากมีตัวแปรสเตตมากขึ้น ทำให้เมตริกซ์ระบบ A มีขนาดใหญ่ขึ้นมาก จึงไม่สะดวกที่จะแสดงในรูปเมตริกซ์ ทางผู้เขียนจึงขอละไว้