บทที่ 5

การคำนวณค่าตัวแปรของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์

ในบทนี้จะแสดงถึงวิธีการในการคำนวณหาค่าตัวแปรของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ เนื่องจากค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าที่กำหนดไว้ 1 ค่า จะสามารถสร้างสมการที่ใช้หาค่าตัวแปรของอุปกรณ์ของสเตบิไลเซอร์ได้ 1 สมการ ซึ่งจะใช้คำนวณหาค่าตัวแปรได้ 1 ค่า จากแบบจำลองของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ตามรูปที่ 4.2 โดยปกติแล้วค่า T_1 และ T_2 จะถูกกำหนดไว้เป็นค่าคงที่สำหรับอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์แต่ละเครื่อง[18,21] ดังนั้นค่าตัวแปรของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ที่จะถูกปรับให้ได้ค่าเจาะจงตามที่กำหนดไว้จะมี 2 ค่าคือ ค่าอัตราขยาย (k) และค่าสัมประสิทธิ์ทางเวลา (t) ทำให้สามารถกำหนดค่าเจาะจงได้ 2 ค่าต่ออุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ 1 เครื่อง ถ้าในระบบไฟฟ้ากำลังมีการติดตั้งอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน m เครื่อง ก็จะสามารถกำหนดค่าเจาะจงได้ 2m ค่า

จากสเตทสเปซที่สามารถหาได้จาก บทที่ 4 ถ้าหาค่าเจาะจงของเมตริกซ์ **A** แล้ว ก็จะสามารถวิเคราะห์ได้ว่าระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพเชิงไดนามิคหรือไม่ตามที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ถ้าระบบไม่มีเสถียรภาพตามที่ต้องการ ก็จะทำการกำหนดค่าเจาะจงใหม่แทนค่าเจาะจงเก่าที่ไม่ต้องการ แล้วทำการคำนวณหาค่าอัตราขยายและค่าสัมประสิทธิ์ทางเวลาของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์แต่ละเครื่อง ซึ่งจากค่าตัวแปร k_i และ t_i ที่คำนวณได้ใหม่นี้ ถ้านำไปคำนวณหาเมตริกซ์ **A** ใหม่อีกครั้ง แล้วหาค่าเจาะจงของระบบออกมาใหม่ ก็จะเห็นได้ว่าระบบจะมีค่าเจาะจงใกล้เคียงตามที่ต้องการ

การแสดงวิธีการคำนวณในบทนี้ จะกำหนดให้ระบบเสมือนกับตัดอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ออกไปก่อน แล้วพิจารณาว่าเพิ่มอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องใดๆ ซึ่งจะนำเอาสัญญาณจากเอาท์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องนั้นมาป้อนกลับเข้าไปเป็นสัญญาณควบคุม ดังนั้นตัวแปรสถานะ , เมตริกซ์ **A** และ เมตริกซ์ **B** ที่กำหนดไว้ใน บทที่ 4 ต้องตัดส่วนที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ออกไปก่อน คือสมการสถานะจะประกอบด้วยเมตริกซ์ **A** ที่มีขนาด (5n x 5n) , เมตริกซ์ **B** มีขนาด (5n x n) โดยที่ n คือจำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ

$$\dot{\mathbf{X}}(s) = \mathbf{A}\,\mathbf{X}(s) + \mathbf{B}\,\mathbf{U}(s) \qquad (5.1)$$

เนื่องจากอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้านั้นจะเป็นชนิดดีเซนทรัลไลซ์ ซึ่งจะเอาสัญญาณออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องใดก็ตามมาเป็นสัญญาณเข้าสำหรับอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ ที่ติดตั้งที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องนั้น[4,6,7,8,9,17] ดังนั้น เมตริกซ์ U(s)สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\mathbf{U}(s) = [U_1(s) \ldots\ldots\ldots\ldots U_n(s)]$$

โดยที่

$$Ui(s) = Hi(s)Yi(s) \tag{5.3}$$

Yi(s) = สัญญาณออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่เป็นสัญญาณเข้าของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์

Hi(s) = ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชั่นของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ ตามสมการที่ (5.4)

$$Hi(s) = \{ sT_{1i} / (1 + sT_{1i}) \} * \{ k (1 + st_i)^2 / (1 + sT_{2i}) \}^2 \tag{5.4}$$

โดยทั่วไปแล้ว ค่า T_{1i} และ T_{2i} จะกำหนดมาให้ ดังนั้น ค่าตัวแปรที่จะทำการคำนวณหาคือ ค่า k_i และ t_i

แทนค่าสมการ (5.3) ใน (5.1) จะได้[4]

$$\dot{\mathbf{X}}(s) = \mathbf{A}\,\mathbf{X}(s) + \mathbf{B}\,\mathbf{H}(s)\mathbf{Y}(s) \tag{5.5}$$

โดยที่

$$\mathbf{H}(s) = \begin{bmatrix} H_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & H_n \end{bmatrix} \tag{5.6}$$

$$\mathbf{Y}(s) = \begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \tag{5.7}$$

เนื่องจาก

$$\mathbf{Y}(s) = \mathbf{C}(s)\,\mathbf{X}(s) \tag{5.8}$$

จะได้

$$\dot{\mathbf{X}}(s) = \mathbf{AX}(s) + \mathbf{BH}(s)\mathbf{C}(s)\mathbf{X}(s)$$

$$\dot{\mathbf{X}}(s) = [\mathbf{A} + \mathbf{BH}(s)\mathbf{C}(s)]\mathbf{X}(s) \tag{5.9}$$

ดังนั้น ค่าเจาะจงของระบบจะหาได้จากสมการลักษณะ (characteristic equation)[4,17,26] ดังนี้

$$\det [s\mathbf{I} - \{\mathbf{A} + \mathbf{BH}(s)\, \mathbf{C}(s)\}] \quad = \quad \mathrm{O} \tag{5.10}$$

ค่าเจาะจงที่ได้นี้ โดยปกติจะเป็นจำนวนเชิงซ้อนซึ่งใช้พิจารณาถึงเสถียรภาพเชิงไดนามิคของระบบโดยที่ค่าจริง (Real Part) ของค่าเจาะจงทุกค่าต้องเป็นค่าลบระบบจึงจะมีเสถียรภาพเชิงไดนามิค ยิ่งมีค่าจริงลบมากแสดงว่าระบบมีเสถียรภาพมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มเสถียรภาพเชิงไดนามิคให้แก่ระบบโดยการเปลี่ยนค่าเจาะจงตัวที่สำคัญ ให้มีค่าที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพดีขึ้นตามที่ต้องการ โดยการติดตั้งอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ให้แก่ระบบแล้วทำการคำนวณค่าตัวแปรของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ที่ทำให้ได้ค่าเจาะจงใหม่ตามที่ต้องการ

โดยปกติแล้วค่าเจาะจงที่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า มักจะเป็นโมดเชิงกล-ไฟฟ้า ที่มีการหน่วงไม่ดีพอ[4] ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการแกว่งของโรเตอร์ซึ่งถูกกำหนดโดยตัวแปรสภาวะ $\Delta\delta_i$ หรือ $\Delta\omega_i$

ถ้ามีค่าเจาะจง จำนวน 2m ค่าที่จะต้องทำการเปลี่ยนค่าจะต้องทำการสร้างสมการจำนวน 2m สมการ เพื่อนำมาใช้หาค่าตัวแปรของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

จาก (5.1) จะได้

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1(S) \\ \hline \dot{X}_2(S) \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} A_{11} & A_{12} \\ \hline A_{21} & A_{22} \end{array}\right] \begin{bmatrix} X_1(s) \\ \hline X_2(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ \hline B_2 \end{bmatrix} \mathbf{U}(s) \tag{5.11}$$

โดย

$$\mathbf{X}_1(s) = [\omega_1(s), \ldots\ldots, \omega_n(s)]$$

$$\mathbf{X}_2(s) = [\delta_1(s), \ldots, \delta_n(s), \mathbf{E}'_{q1}(s), \ldots, \mathbf{E}'_{qn}(s), \mathbf{E}_{FD1}(s), \ldots, \mathbf{E}_{FDn}(s), \mathbf{V}_{R1}(s), \ldots, \mathbf{V}_{Rn}(s)]$$

จาก

$$y_i(s) = \omega_i(s)$$

$$\mathbf{Y}(s) = \mathbf{X}_1(s) \tag{5.12}$$

จะได้

$$\mathbf{U}(s) = \mathbf{H}(s)\, \mathbf{X}_1(s) \tag{5.13}$$

$$\mathbf{U}(s) = [\mathbf{H}_1(s)\, \omega_i(s), \ \ , \mathbf{H}_n(s)\, \omega_n(s)]^T$$

$$\mathbf{B}_1 = [\,0\,]_{(n*n)} \tag{5.14}$$

$$
B_2 = \left[\begin{array}{ccc}
 & \mathbf{0}_{(n\times n)} & \\
\hline
 & \mathbf{0}_{(n\times n)} & \\
\hline
W_1 & & 0 \\
 & \ddots & \\
0 & & W_n \\
\hline
K_{A1}/T_{A1} & & 0 \\
 & \ddots & \\
0 & & K_{An}/T_{An}
\end{array}\right] \qquad (5.15)
$$

จาก (5.13) (5.14) และ (5.15) สมการ (5.11) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$
\left[\begin{array}{c} \dot{X}_1(S) \\ \hline \dot{X}_2(S) \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c|c} A_{11} & A_{12} \\ \hline A_{21} & A_{22} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} X_1(s) \\ \hline X_2(s) \end{array}\right] + \left[\begin{array}{c} 0_{(n\times n)} \\ \hline B'_2(s) \end{array}\right] X_1(S) \qquad (5.16)
$$

โดยที่

$$
\mathbf{B'_2(s)} = \mathbf{B_2\, H(s)} \qquad (5.17)
$$

จะได้

$$
\left[\begin{array}{c} \dot{X}_1(S) \\ \hline \dot{X}_2(S) \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c|c} A_{11} & A_{12} \\ \hline A_{21} + B'_2(s) & A_{22} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} X_1(s) \\ \hline X_2(s) \end{array}\right] \qquad (5.18)
$$

โดย

$$
\mathbf{\dot{X}_1(s)} = \mathbf{A_{11}\, X_1(s) + A_{12}\, X_2(s)} \qquad (5.19)
$$

$$
\mathbf{X_2(s)} = \mathbf{(sI - A_{22})^{-1}\, (A_{21} + B'_2(s))\, X_1(s)} \qquad (5.20)
$$

แทนค่า (5.20) ใน (5.19) จะได้

$$
\mathbf{\{[sI - A_{11} - A_{12}\, (sI - A_{22})^{-1}\, A_{21}] - A_{12}\, (sI - A_{22})^{-1}\, B'_2(s)\}\, X_1(s)} = 0 \qquad (5.21)
$$

ให้ค่า λ เป็นค่าเจาะจงที่มีความสัมพันธ์กับโมดเชิงกลไฟฟ้า ซึ่งควบคุมเวคเตอร์ $\mathbf{X_1(s)}$ อยู่ ซึ่งประกอบด้วยการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะได้

$$
\det\, [\mathbf{R(\lambda) - P(\lambda)\, B'_2(\lambda)}] = 0 \qquad (5.22)
$$

โดยที่

$$
\mathbf{R(\lambda)} = \mathbf{[\lambda I - A_{11} - A_{12}\, (\lambda I - A_{22})^{-1}\, A_{21}]_{(n*n)}} \qquad (5.23)
$$

$$
\mathbf{P(\lambda)} = \mathbf{[A_{12}\, (\lambda I - A_{22})^{-1}]_{(n*4n)}} \qquad (5.24)
$$

ให้

$$
\mathbf{P'(\lambda)} = \mathbf{-\, P(\lambda)\, B'_2\, (\lambda)} \qquad (5.25)
$$

แทนค่า (5.17) ใน (5.25) จะได้

$$\mathbf{p}'_i = -[\mathbf{H}_i(\lambda)\,(\mathbf{a}_i\,\mathbf{p}_{2n+i} + \mathbf{b}_i\,\mathbf{p}_{3n+i})] \tag{5.26}$$

หรือ
$$\mathbf{p}'_i = \mathbf{H}_i(\lambda)\,\mathbf{p}'' \tag{5.27}$$

โดยที่ $\mathbf{p}_{2n+1}$ = คอลัมน์ที่ (2n + i) ของ $\mathbf{P}(\lambda)$

$\mathbf{p}_{3n+1}$ = คอลัมน์ที่ (3n + i) ของ $\mathbf{P}(\lambda)$

และ $\mathbf{p}''_i = -\,\mathbf{a}_i\,\mathbf{p}_{2n+1} - \mathbf{b}_i\,\mathbf{p}_{3n+1}$ เป็นคอลัมน์ที่ i ของ $\mathbf{p}''(\lambda)$

แทนค่า (5.25) ใน (5.22) จะได้

$$\det[\mathbf{R}(\lambda) + \mathbf{P}'(\lambda)] = 0 \tag{5.28}$$

หรือ
$$\det[\mathbf{R}_1 + \mathbf{p}'_1, \ldots, \mathbf{R}_n + \mathbf{p}'_n] = 0 \tag{5.29}$$

โดย $\mathbf{R}_i$ = คอลัมน์ที่ i ของ $\mathbf{R}(\lambda)$

จากคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของดีเทอร์มิแนนท์ของเมตริกซ์ คือ[4]

$$\det[\mathbf{A}_1\,\mathbf{A}_2, \ldots, \mathbf{A}_i + k\mathbf{A}'_i, \ldots, \mathbf{A}_n] = \det[\mathbf{A}_1, \ldots, \mathbf{A}_i, \ldots, \mathbf{A}_n] + k\det[\mathbf{A}_1, \ldots, \mathbf{A}'_i, \ldots, \mathbf{A}_n] \tag{5.30}$$

จะได้

$$\det[R(\lambda)] + \sum_{\substack{m_1, m_2 = 1,..,n \\ m_1 \neq m_2}} d_{m_1 m_2} H_{m_1}(\lambda) H_{m_2}(\lambda) + \sum_{\substack{m_1, m_2, m_3 = 1,..,n \\ m_1 \neq m_2 \neq m_3}} d_{m_1 m_2 m_3} H_{m_1}(\lambda) H_{m_2}(\lambda) H_{m_3}(\lambda) + \sum_{\substack{m_1, .., m_n = 1,..,n \\ m_1 \neq .. \neq m_n}} d_{m_1 .. m_n} H_{m_1}(\lambda) \ldots H_{m_n}(\lambda) = 0 \tag{5.31}$$

โดยที่ $d_{m_1 \ldots m_n}\mathbf{H}(s)$ เป็นดีเทอร์มิแนนท์ของเมตริกซ์ ซึ่งเหมือนเมตริกซ์ $\mathbf{R}(\lambda)$แต่แทนที่ m_1, m_2 ด้วยค่าที่คอลัมน์เดียวกันของ $\mathbf{P}''(\lambda)$

เมื่อแทนค่าเจาะจงที่ต้องการจำนวน 2m ค่าลงไปในสมการ (5.31) จะได้สมการจำนวน 2m สมการ ซึ่งจะทำให้สามารถหาค่าตัวแปรของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ (k_1, $k_2 \ldots k_n$, t_1, $t_2 \ldots t_n$) จำนวนทั้งหมด 2m ค่าได้พร้อมกันทันที โดยการแก้สมการไม่เชิงเส้นนี้จะนำวิธีของ นิวตัน-ราล์ฟสัน (Newton-Raphson)[11] มาใช้

ในการคำนวณนั้น ค่าตัวแปรของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์จะมีได้หลายชุด โดยที่ค่าเจาะจงของระบบเป็นค่าเดียวกัน ทำให้สามารถเลือกใช้ชุดที่เหมาะสมตามความเป็นจริงในการปรับอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์