

วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของ PSS และตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้ง

การวิจัยนี้จะปรับปรุงเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าด้วยการติดตั้ง PSS ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่ต้องการเพิ่มค่าอัตราส่วนการหน่วง โดย PSS เป็นชนิดที่มีการชดเชยแบบนำหน้า(lead compensation) ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎี และวิธีการในการหาค่าพารามิเตอร์ของ PSS โดยใช้ทฤษฎีโมดอล คอนโทรล และการทำให้เหมาะสมที่สุดด้วยแพทเทิร์น-เสิร์ช(Pattern-search optimization) นอกจากนี้ในระบบเครื่องจักรหลายตัว จะต้องหาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหมาะสม ที่จะติดตั้ง PSS จึงจะช่วยปรับปรุงเสถียรภาพของระบบได้ดีที่สุด จึงขอกล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ แพกเตอร์ ซึ่งจะช่วยระบุเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหมาะสมในการติดตั้ง PSS ไว้ในที่นี้ด้วย

3.1 การหาค่าพารามิเตอร์ของ PSS โดยใช้ทฤษฎีโมดอล คอนโทรล

จากสมการสเตตเชิงเส้น(linearized state equations) ของระบบ

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.1.1)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (3.1.2)$$

โดยที่ x เป็นเวกเตอร์สเตต(state vector) ขนาด $n \times 1$, u เป็นเวกเตอร์ควบคุม(control vector-PSS output), y เป็นเวกเตอร์เอาต์พุต(output vector-PSS input) และ A , B , C เป็นเมตริกซ์ ขนาด $n \times n$, $n \times 1$, $1 \times n$ ตามลำดับ

สำหรับฟังก์ชันโอนย้าย(transfer function) ของ PSS ที่มีการชดเชยแบบนำหน้า และนิยมใช้กันทั่วไปคือ[2,3,6,7,8,17]

$$H(s) = K \frac{sT_w (1+sT_1)^2}{1+sT_w (1+sT_2)^2} \quad (3.1.3)$$

ทำการแปลงลาพลาซ(Laplace transform) สมการ (3.1.1) และ (3.1.2) จะได้สมการสเตต ในรูปของแกนความถี่(frequency domain) ดังนี้

$$sX(s) = AX(s) + BU(s) \quad (3.1.4)$$

$$Y(s) = CX(s) \quad (3.1.5)$$

อินพุตของระบบ $U(s)$ จะเป็นสัญญาณเอาต์พุตของ PSS แสดงได้ดังนี้

$$U(s) = H(s)Y(s) \quad (3.1.6)$$

โดยที่เอาที่พหุของระบบ $Y(s)$ จะเป็นสัญญาณอินพุตของ PSS

สมการ(3.1.4) เขียนใหม่ได้เป็น

$$X(s) = (sI - A)^{-1} BU(s) \quad (3.1.7)$$

รวมสมการ (3.1.5), (3.1.6) และ (3.1.7) จะได้

$$X(s) = (sI - A)^{-1} BH(s)CX(s) \quad (3.1.8)$$

หรือ

$$[I - (sI - A)^{-1} BH(s)C]X(s) = 0 \quad (3.1.9)$$

ถ้าให้ λ เป็นค่าเจาะจงของโมดที่มีอัตราส่วนการหน่วงต่ำ ดังนั้นสมการลักษณะเฉพาะ

(characteristic equation) ของระบบปิดคือ

$$\det[I - (\lambda I - A)^{-1} BH(\lambda)C] = 0 \quad (3.1.10)$$

ใช้เอกลักษณ์ของดีเทอร์มิแนนต์(identity of determinants)[2]

$$\det[I - EF] = \det[I - FE] \quad (3.1.11)$$

สมการ (3.1.10) เขียนได้เป็น

$$1 - C(\lambda I - A)^{-1} BH(\lambda) = 0 \quad (3.1.12)$$

$$\text{หรือ } H(\lambda) = [C(\lambda I - A)^{-1} B]^{-1} \quad (3.1.13)$$

จากสมการ (3.1.3) แทนค่า s ด้วย λ

$$H(\lambda) = K \frac{\lambda T_W (1 + \lambda T_1)^2}{1 + \lambda T_W (1 + \lambda T_2)^2} \quad (3.1.14)$$

สมการ (3.1.14) จะเท่ากับ (3.1.13) ดังนั้น

$$K \frac{\lambda T_W (1 + \lambda T_1)^2}{1 + \lambda T_W (1 + \lambda T_2)^2} = [C(\lambda I - A)^{-1} B]^{-1} \quad (3.1.15)$$

เมื่อเราทราบค่าเมตริกซ์ A , B , C และเลือกค่าเจาะจง λ ตามที่ต้องการ โดยที่สมการ (3.1.15) จะใช้หาได้สำหรับ 2 ตัวแปร โดยทั่วไปจะกำหนดค่าของ T_W และ T_2 [2,3,4,7] ทำการแก้สมการที่ (3.1.15) เพื่อหาค่า K และ T_1 โดยเงื่อนไขของขนาดและมุมดังนี้ [2]

ให้ $\lambda = \sigma + j\omega_d$ โดยที่ σ คือส่วนจริง และ ω_d คือส่วนจินตภาพ จากสมการ (3.1.15) จะได้

$$K \frac{(\sigma + j\omega_d) T_W [1 + (\sigma + j\omega_d) T_1]^2}{1 + (\sigma + j\omega_d) T_W [1 + (\sigma + j\omega_d) T_2]^2} = H(\sigma + j\omega_d)$$

$$K = \frac{(1+\sigma T_2 + j\omega_d T_2)^2}{(1+\sigma T_1 + j\omega_d T_1)^2} \left[1 + \frac{1}{(\sigma + j\omega_d)T_w} \right] H(\sigma + j\omega_d) \quad (3.1.16)$$

$$\text{ให้ } F\angle\theta = (1+\sigma T_2 + j\omega_d T_2)^2 \left[1 + \frac{1}{(\sigma + j\omega_d)T_w} \right] H(\sigma + j\omega_d) \quad (3.1.17)$$

แทนสมการ (3.1.17) ใน (3.1.16) จะได้

$$K = \frac{F\angle\theta}{(1+\sigma T_1 + j\omega_d T_1)^2} \quad (3.1.18)$$

$$\therefore K = F \left| (1+\sigma T_1 + j\omega_d T_1)^{-2} \right| \quad (3.1.19)$$

$$\begin{aligned} \text{และ } \theta &= \tan^{-1} \left[\frac{2\omega_d T_1 (1 + \sigma T_1)}{(1 + \sigma T_1)^2 - (\omega_d T_1)^2} \right] \\ \tan\theta &= \frac{2\omega_d T_1 (1 + \sigma T_1)}{(1 + \sigma T_1)^2 - (\omega_d T_1)^2} \\ (\sigma^2 \tan\theta - \omega_d^2 \tan\theta - 2\omega_d \sigma) T_1^2 + (2\sigma \tan\theta - 2\omega_d) T_1 + \tan\theta &= 0 \\ \therefore T_1 &= \frac{-(\sigma \tan\theta - \omega_d) \pm \omega_d \sqrt{1 + \tan^2 \theta}}{\sigma^2 \tan\theta - \omega_d^2 \tan\theta - 2\omega_d \sigma} \quad (3.1.20) \end{aligned}$$

ในการเลือกค่าเวลาคืนตัว(reset time) T_w จะเลือกค่าที่มากเพื่อที่จะให้ PSS ไม่รบกวนฟังก์ชันปกติของระบบควบคุมแรงดันขณะอยู่ในสถานะคงที่ และให้ PSS เริ่มทำงานก็ต่อเมื่อมีการแกว่งของความถี่ต่ำ(low-frequency oscillation) เกิดขึ้นในระบบ และจะหยุดทำงานอัตโนมัติเมื่อระบบไม่มีการแกว่ง นอกจากนี้ชุดคิ่้นตัวจะต้องไม่มีผลต่อการขยับเฟส(phase shift) หรืออัตราขยาย ขณะระบบเกิดการแกว่ง[17] สำหรับการชดเชยที่เป็นคู่แบบนำหน้า(lead compensation pair) เนื่องจากการขยับเฟสของการชดเชยมีข้อจำกัด ทำให้ไม่สามารถเลือก T_2 ที่มีขนาดต่ำมากๆ ได้ และ T_1 มากกว่า T_2 เพื่อให้แรงบิดหน่วง(damping torque) ΔT_c มีเฟสเดียวกันกับ $\Delta\omega$ มุมเฟสของการชดเชยแบบนำหน้ารวมกับมุมเฟสล่าช้าของฟังก์ชันโอนย้าย $\Delta E'_q / \Delta V_s$ จะต้องเท่ากับ 0 องศา ส่วนขนาดของค่า K จะต้องมากพอที่จะทำให้ได้ค่าอัตราส่วนการหน่วงของโมดที่ต้องการ และควรเป็นค่าที่น้อยที่สุดจะได้ไม่มีผลกระทบต่อแรงดันเมื่อเกิดการรบกวนต่อระบบ[2,3,6,17]

3.2 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการทำให้เหมาะสมที่สุดด้วยแพทเทิร์น-เสิร์ช

จากสมการสเตพเชิงเส้นของระบบทั่วไปจะได้เมตริกซ์ระบบ A ที่สมาชิกของ A จะเป็นฟังก์ชันของค่าคงที่, พารามิเตอร์ของระบบ, ค่าของอัตราขยาย และค่าคงที่เวลาของตัวควบคุม ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุม จะใช้การหาค่าเจาะจง และเทคนิคการทำให้เหมาะสมที่สุดไม่เชิงเส้น(non-linear optimization technique)[8] โดยจะแสดงเฉพาะในระบบ SMIB ได้แก่

3.2.1 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมป้อนกลับแบบลบ สำหรับตัวควบคุมป้อนกลับแบบลบของระบบควบคุมแรงดันจะใช้เมตริกซ์ระบบ A จากหัวข้อ 2.1.1 และฟังก์ชันที่ต้องการคือทำให้ค่าอัตราส่วนการหน่วงที่น้อยที่สุดของค่าเจาะจงเชิงซ้อน(complex eigenvalues) มีค่ามากที่สุด โดยที่ส่วนจริงของค่าเจาะจงทุกตัว มีค่าเป็นลบ เขียนในรูปของสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} F &= \text{real part} + \text{weight} \times \text{minimum damping} \\ \text{if } \text{real part} > 0 \text{ then} \\ F &= \text{real part} \end{aligned} \quad (3.2.1)$$

3.2.2 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ PSS ในส่วนของ PSS ที่มีการชดเชยแบบนำหน้าจะใช้เมตริกซ์ระบบ A ตัวใหม่จากหัวข้อ 2.1.2 โดยทั่วไปเมื่อต้องการปรับปรุงค่าของอัตราส่วนการหน่วงของโมดเครื่องกลไฟฟ้าจะรักษาค่าของความถี่ธรรมชาติของโมดนี้ไม่ให้เปลี่ยนแปลง[2] โดยฟังก์ชันที่ต้องการคือ ทำให้ค่าเจาะจงของโมดเครื่องกลไฟฟ้ามีค่าอัตราส่วนการหน่วงที่ต้องการ โดยเปลี่ยนค่าความถี่ธรรมชาติได้เล็กน้อย และให้ส่วนจริงมีค่าน้อยที่สุด(เป็นลบมากขึ้น)และส่วนจริงของค่าเจาะจงทุกตัวมีค่าเป็นลบ เขียนในรูปของสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{if } |\text{imaginary part} - \omega_d| < 0.1 \text{ then} \\ F &= \text{real part} + \text{weight} \times |\text{damping-design damping}| \\ \text{if } \text{real part} > 0 \text{ then} \\ F &= \text{real part} \end{aligned} \quad (3.2.2)$$

โดยที่ ω_d คือความถี่การหน่วง(damped frequency)

ในการจัดการตัวแปรบังคับ(constrain variables) จะเปลี่ยนเป็นตัวแปรที่ไม่มีขีดจำกัด(unconstrain variables)โดยที่

$$\text{ถ้า } \Phi_{li} \leq \Phi_i \leq \Phi_{ui}$$

เปลี่ยนตัวแปร Φ_i เป็น Φ'_i โดยที่

$$\Phi_i = \Phi_{li} + (\Phi_u - \Phi_{li}) \sin^2 \Phi'_i$$

$$\text{หรือ } 2\Phi_i = (\Phi_u + \Phi_{li}) - (\Phi_u - \Phi_{li}) \sin \Phi'_i$$

$$\text{จะได้ว่า } -\infty < \Phi'_i < \infty \quad (3.2.3)$$

กำหนดให้ Φ_i คือ ตัวแปรบังคับ $i = 1, 2, \dots$

Φ'_i คือ ตัวแปรใหม่ที่ไม่มีขีดจำกัด

Φ_{li} คือ ค่าต่ำสุดของตัวแปรบังคับ

Φ_u คือ ค่าสูงสุดของตัวแปรบังคับ

3.3 พาร์ทิชันเพนซ์ แฟกเตอร์

จากสมการสเตทของระบบอัตโนมัติเชิงเส้นที่ไม่เปลี่ยนตามเวลา (linear time-invariant autonomous system) [9]

$$\dot{x} = Ax \quad (3.3.1)$$

โดยที่ x คือ เวกเตอร์สเตท ที่มีตัวแปรสเตท n ตัว และ A คือเมตริกซ์ระบบขนาด $n \times n$

ให้ λ_i คือค่าเฉพาะของ A หาได้จาก

$$\det(\lambda_i I - A) = 0 \quad (3.3.2)$$

และสามารถหาเวกเตอร์ v_i คือเวกเตอร์เฉพาะขวา(right eigenvectors) จาก

$$[A - \lambda_i I] v_i = 0 \quad (3.3.3)$$

หรือ

$$Av_i = \lambda_i v_i \quad (3.3.4)$$

เมื่อมีค่าเฉพาะ n ตัว จากสมการ (3.3.4) แสดงได้ดังนี้

$$A \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & \dots & v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & \dots & v_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda_n \end{bmatrix} \quad (3.3.5)$$

กำหนดโมดอลเมตริกซ์(modal matrix)

$$M = \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & \dots & v_n \end{bmatrix} \quad (3.3.6)$$

และเมตริกซ์แนวทแยงมุมหลัก(diagonal matrix)

$$J = \text{diag}\{\lambda_i\} \quad (3.3.7)$$

จากสมการ (3.3.5) เขียนใหม่ได้เป็น

$$AM = MJ \quad (3.3.8)$$

$$M^{-1}AM = J \quad (3.3.9)$$

$$M^{-1}A = JM^{-1} \quad (3.3.10)$$

ให้หลักของ M^{-1} คือเวกเตอร์ w_i^T ดังนั้น

$$\begin{bmatrix} w_1^T \\ w_2^T \\ \vdots \\ w_n^T \end{bmatrix} A = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1^T \\ w_2^T \\ \vdots \\ w_n^T \end{bmatrix} \quad (3.3.11)$$

หรือ

$$w_i^T A = w_i^T \lambda_i \quad (3.3.12)$$

$$w_i^T (A - \lambda_i I) = 0 \quad (3.3.13)$$

เราเรียกเวกเตอร์ w_i ว่าเวกเตอร์เจาะจงซ้าย(left eigenvectors) ของ A
 สลับเปลี่ยน(transpose) สมการ (3.3.13) จะได้

$$(A - \lambda_i I)^T w_i = 0 \quad (3.3.14)$$

ดังนั้นเวกเตอร์เจาะจงซ้ายของ A ก็คือเวกเตอร์เจาะจงขวาของ A^T

สำหรับพาร์ทิซิเพชัน แฟกเตอร์ หาได้จาก[3,4,8,14]

$$|p_{ji}| = |w_{ji} v_{ji}| \quad (3.3.15)$$

โดยที่ j คือลำดับของตัวแปรสแตต x_j ใน i คือลำดับของค่าเจาะจง λ_i

ดังนั้นจะเห็นว่า v_{ji} จะเป็นตัวบอกพฤติกรรมของ x_j ในโหมด i (ค่าเจาะจง λ_i), w_{ji} จะเป็นการกระจายน้ำหนักของพฤติกรรมเหล่านั้นต่อโหมด i และ p_{ji} จะเป็นตัววัดพฤติกรรมรวมทั้งหมดของสแตต j ในโหมด i [14] นั่นคือในโหมด(ค่าเจาะจง) ที่เราสนใจเป็นพิเศษนั้น จะมีผลจากตัวแปรสแตตใดบ้างและมีผลต่อโหมดนั้นมากหรือน้อยอย่างไร[3,4]

การหาเวกเตอร์เจาะจงซ้าย โดยได้จากเวกเตอร์เจาะจงขวาของ A^T สำหรับวิธีนี้ลำดับของค่าเจาะจงจะมีการสลับตำแหน่งกัน จึงต้องมีการตรวจสอบค่าเจาะจงเป็นค่าเดียวกัน ที่เกี่ยวข้องกับเวกเตอร์เจาะจงขวาและซ้าย ที่หาได้จึงจะสามารถนำเวกเตอร์เจาะจงซ้ายและขวา มาคูณกันที่แต่ละตัวแปรสแตตเพื่อจะได้ค่าของพาร์ทิซิเพชัน แฟกเตอร์ ตามต้องการ