

บทที่ 4

การประยุกต์เครือข่ายประสาทเทียมแบบฟังก์ชันมูลฐานแนวลรีศมี ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง

4.1 การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังแบบธรรมดา [17-19]

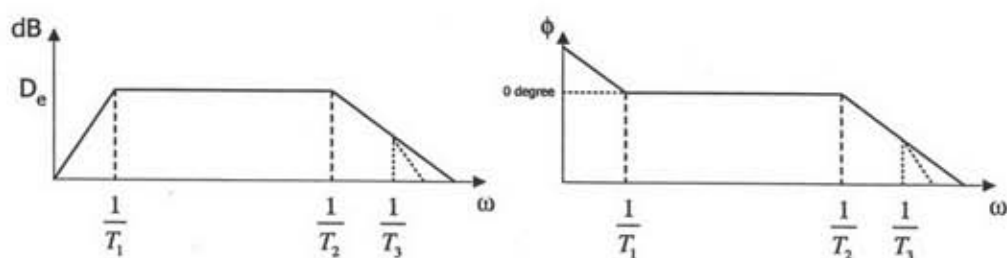
จากบทที่ 2 ตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังถือเป็นวิธีหนึ่งที่คุ้มค่าแก่การลงทุน และช่วยเสริมสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะการเพิ่มการหน่วงการแกว่งของอุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบไฟฟ้ากำลังได้เป็นอย่างดี โดยในหัวข้อนี้กล่าวถึงแนวคิดในการสร้างฟังก์ชันการหน่วงที่ใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อพัฒนาไปสู่การออกแบบตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังแบบธรรมดา และได้กล่าวถึงลำดับวิธีการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังแบบธรรมดาที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อใช้เป็นข้อมูลการฝึกฝนของเครือข่ายประสาทเทียมแบบฟังก์ชันมูลฐานแนวลรีศมีต่อไป

4.1.1 ฟังก์ชันการหน่วงที่ใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ [17]

เนื่องจากต้องการสร้างตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อให้ระบบควบคุมการกระตุ้นเพิ่มการหน่วงในช่วงความถี่การแกว่งในช่วงความถี่จำกัด กล่าวคือ ช่วงความถี่การแกว่งแบบเฉพาะที่ (Local) และแบบระหว่างพื้นที่ (Interarea) ซึ่งความถี่ดังกล่าวมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.1-2 Hz โดยหลักการของตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังแบบธรรมดาคือการสร้างแรงบิดหน่วงที่มีมุมเฟสเดียวกันกับความถี่ ดังนั้นจึงต้องกำหนดคุณลักษณะของฟังก์ชันการหน่วงที่สัญญาณความถี่เป็นสัญญาณเข้าและแรงบิดหน่วงเป็นสัญญาณออกในเชิงความถี่ดังต่อไปนี้

- มีมุมเฟสประมาณ 0 องศา ที่ช่วงความถี่ดังกล่าว คือประมาณ 0.1-2 Hz
- มีขนาดคงตัวตลอดช่วงความถี่ดังกล่าว และมีขนาดลดลงนอกช่วงความถี่ดังกล่าว เพื่อให้มีให้ส่งผลกระทบต่อช่วงความถี่ดังกล่าว

ซึ่งฟังก์ชันการหน่วงแบบอุดมคติ เป็นไปดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ฟังก์ชันการหน่วงอุดมคติ

ตามรูปที่ 4.1 เป็นผลตอบเชิงความถี่ระหว่างแรงบิดหน่วงและความเร็ว ซึ่งจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังต่อไปนี้

$$D(s) = \frac{D_e \cdot sT_1}{(1+sT_1)(1+sT_2)}$$

หรือ
$$D(s) = \frac{D_e \cdot sT_1}{(1+sT_1)(1+sT_2)(1+sT_3)} \quad (4.1.1)$$

โดยที่ D_e เป็นค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง ไม่มีหน่วยเนื่องจากสัญญาณเข้าและสัญญาณออกเป็นค่าเปอร์ยูนิตซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 20-30 ส่วน $1/T_1$ เป็นตัวกำหนดความถี่คัทออฟ (Cut-off frequency) ที่ความถี่ต่ำกว่า 0.1 Hz ในที่นี้ใช้ $T_1 = 3$ วินาที และ $1/T_2$ และ $1/T_3$ เป็นตัวกำหนดความถี่คัทออฟ (Cut-off frequency) ที่ความถี่สูงกว่า 2.0 Hz ในที่นี้ใช้ $T_2 = T_3 = 0.05$ วินาที

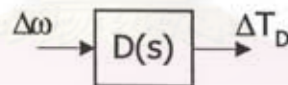
สาเหตุที่บางครั้งในการออกแบบตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังอาจมีการเพิ่มโพลที่มีค่าคงตัวเวลาสั้นๆ T_3 เข้าไปเพื่อป้องกันมิให้ขนาดของสัญญาณออกจากตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าสูงขึ้นตามความถี่ ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.1

4.1.2 การออกแบบตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง

ฟังก์ชันการหน่วง พัฒนามาจากสมการแรงบิดหน่วงทั่วไป กล่าวคือ

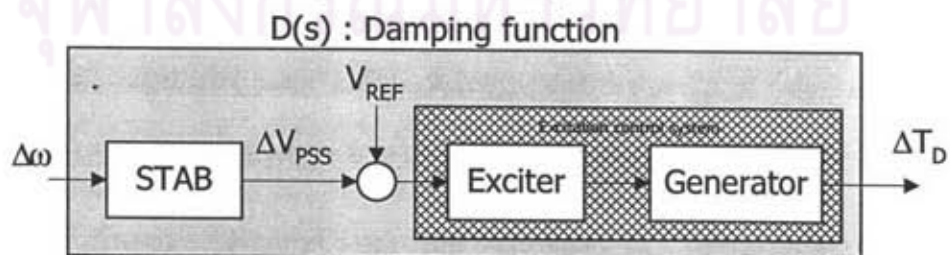
$$\Delta T_D(s) = D(s) \cdot \Delta \omega(s) \quad (4.1.2)$$

เมื่อพิจารณาเป็นแผนภาพกรอบจะได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนภาพกรอบแสดงความสัมพันธ์แรงบิดหน่วง

โดยตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังจะรับสัญญาณความเร็วที่เบี่ยงเบนไป (Speed deviation) เพื่อสร้างสัญญาณออกไปยังระบบควบคุมการกระตุ้น (Excitation control system) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสร้างแรงบิดหน่วงด้านการเบี่ยงเบนไปดังกล่าว ซึ่งสามารถขยายแผนภาพกรอบในรูปที่ 4.2 ได้ใหม่เป็นรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนภาพกรอบแสดงรายละเอียดการสร้างแรงบิดหน่วงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.3 จะได้ว่า

$$STAB = \frac{\Delta V_{PSS}}{\Delta \omega} \quad (4.1.3)$$

เมื่อ V_{REF} ถูกกำหนดไว้คงที่ จะได้ว่า $\Delta V_{PSS} = \Delta V_{REF}$ (4.1.4)

และ $D(s) = \frac{\Delta T_D}{\Delta \omega} = \left(\frac{\Delta T_D}{\Delta V_{REF}} \right) \left(\frac{\Delta V_{PSS}}{\Delta \omega} \right)$ (4.1.5)

แรงบิดหน่วงที่สร้างขึ้นมานี้อยู่ในรูปของแรงบิดทางไฟฟ้าแบบหนึ่ง กล่าวคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะสร้างแรงบิดทางไฟฟ้าออกมา 2 ลักษณะ ดังนี้

- แรงบิดเชิงโครนัส (T_s) แปรตามการเปลี่ยนแปลงของมุมโรเตอร์
- แรงบิดหน่วง (T_D) แปรตามการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\Delta T_E = \Delta T_s + \Delta T_D = K_s \Delta \delta + D \Delta \omega \quad (4.1.6)$$

เรียก K_s ว่าสัมประสิทธิ์เชิงโครนัส และ D ว่าสัมประสิทธิ์การหน่วง

เมื่อ $\Delta \delta = 0$ จะได้ว่า $\Delta T_E = \Delta T_D = D \Delta \omega$ (4.1.7)

ดังนั้นสมการ (4.1.5) สามารถถูกเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$D(s) = \frac{\Delta T_E}{\Delta \omega} \Big|_{\Delta \delta=0} = STAB \cdot \frac{\Delta T_E}{\Delta V_{REF}} \Big|_{\Delta \delta=0} \quad (4.1.8)$$

จะเห็นว่า ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังจะเป็นดังสมการข้างล่าง โดยการแทนค่าจาก (4.1.2) ลงไปใน (4.1.8) นั้นเอง

$$STAB = \frac{D_e \cdot sT_1}{(1+sT_1)(1+sT_2) \cdot \frac{\Delta T_E}{\Delta V_{REF}} \Big|_{\Delta \delta=0}} \quad (4.1.9)$$

หรือ $STAB = \frac{D_e \cdot sT_1}{(1+sT_1)(1+sT_2)(1+sT_3) \cdot \frac{\Delta T_E}{\Delta V_{REF}} \Big|_{\Delta \delta=0}}$ (4.1.10)

จาก (4.1.9) และ (4.1.10) ฟังก์ชันถ่ายโอน $\frac{\Delta T_E}{\Delta V_{REF}} \Big|_{\Delta \delta=0}$ มีความสำคัญต่อการออกแบบตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังเป็นอย่างมากทั้งในโครงสร้างของอุปกรณ์และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

กล่าวคือ หากฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวมีคุณลักษณะใกล้เคียงกับฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่หนึ่ง หรือ

$\frac{K}{1+sT}$ แล้วตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังจะเป็นไปตาม (4.1.9) แต่หากมีคุณลักษณะใกล้เคียงกับฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สอง หรือ

$\frac{K}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$ ตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังจะเป็นไปตาม (4.1.10) ทั้งนี้เพื่อป้องกันมิให้ขนาดสัญญาณออกของตัวสร้างเสถียรภาพมีค่าสูงเพิ่มขึ้นตามความถี่

โดยทั่วไปแล้ว สามารถประมาณแรงบิดไฟฟ้าให้เท่ากับกำลังไฟฟ้าในหน่วยเปอร์ยูนิต ได้เพื่อสะดวกในการวัดสัญญาณ ดังนั้นปกติมักหาความสัมพันธ์ของ $\left. \frac{\Delta P_E}{\Delta V_{REF}} \right|_{\Delta \delta=0}$ แทนโดย ประมาณผลตอบทางเวลาเป็นผลตอบอันดับที่สอง กล่าวคือ อยู่ในรูป (4.1.11)

$$\left. \frac{\Delta P_E}{\Delta V_{REF}} \right|_{\Delta \delta=0} = \frac{K}{1 + \left(\frac{2\xi}{\omega_n} \right) \cdot s + \left(\frac{s}{\omega_n} \right)^2} \approx \frac{K}{(1 + sT_a)(1 + sT_b)} \quad (4.1.11)$$

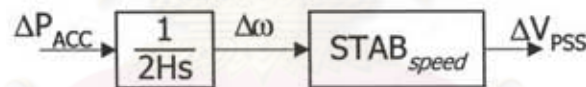
ดังนั้นแทนค่าใน (4.1.11) ลงใน (4.1.10) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังที่มีสัญญาณความเร็วเบี่ยงเบนเป็นสัญญาณเข้าตาม (4.1.12)

$$\begin{aligned} STAB_{speed} &= \frac{D_e \cdot sT_1}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)(1 + sT_3)} \cdot \frac{(1 + sT_a)(1 + sT_b)}{K} \\ &= \frac{D_e}{K} \cdot \left(\frac{sT_1}{1 + sT_1} \right) \cdot \left(\frac{1 + sT_a}{1 + sT_2} \right) \cdot \left(\frac{1 + sT_b}{1 + sT_3} \right) \end{aligned} \quad (4.1.12)$$

ในกรณีที่ตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังใช้กำลังเร่งเป็นสัญญาณเข้า สามารถดัดแปลง (4.1.12) โดยอาศัยความสัมพันธ์ใน (4.1.13)

$$\Delta \omega = \frac{1}{2Hs} \cdot \Delta P_{ACC} \quad (4.1.13)$$

เพื่อความเข้าใจง่ายขึ้น พิจารณาจากรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แผนภาพกรอบแสดงความสัมพันธ์กำลังเร่งกับความเร็ว

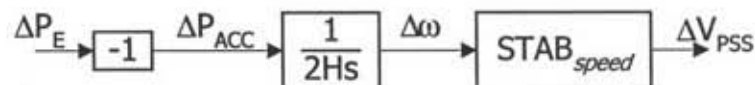
จะได้ตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังเป็นไปตามสมการ (4.1.14)

$$STAB_{ACC} = \frac{1}{2Hs} \cdot STAB_{speed} \quad (4.1.14)$$

ในกรณีที่ตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังใช้กำลังไฟฟ้าเป็นสัญญาณเข้า โดยพิจารณาว่ากำลังกลไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรือเปลี่ยนแปลงช้ามาก ๆ จะนำผลของกำลังไฟฟ้ามาใช้แทนกำลังเร่ง โดยอาศัยความสัมพันธ์ (4.1.15)

$$\Delta P_{ACC} = \Delta P_M - \Delta P_E \equiv -\Delta P_E \quad (\because \Delta P_M \approx 0) \quad (4.1.15)$$

เพื่อความเข้าใจง่ายขึ้น พิจารณาจากรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนภาพกรอบแสดงความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้ากับความเร็ว

จะได้ตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังเป็นไปตามสมการ (4.1.16)

$$STAB_{PELEC} = -\frac{1}{2Hs} \cdot STAB_{speed} \quad (4.1.16)$$

4.1.3 ขั้นตอนการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง [18-19]

จากการออกแบบตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง สิ่งสำคัญที่จำเป็นต้องทราบก่อนก็คือ คุณลักษณะของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมการกระตุ้น ซึ่งสามารถหาได้จากผลตอบทางเวลาหรือ ผลตอบทางความถี่ของกำลังไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงซึ่งเป็นสัญญาณเข้าตัวกระตุ้น (Exciter) แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ผลตอบทางเวลาในการประมาณฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมการกระตุ้น $\frac{\Delta P_E}{\Delta V_{REF}}$ โดยขั้นตอนการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังมีดังนี้

1. เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังมีความไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจำเป็นต้องกำหนดจุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต้องการติดตั้งตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังเสียก่อน เช่น พิจารณาจุดทำงานในช่วงโหลดสูงสุด (Peak Load) และโหลดต่ำสุด (Light Load) เป็นต้น โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการแปรค่ากำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 จ่ายอยู่ในช่วง 55-160 เมกะวัตต์ และแรงดันที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.9-1.1 เฟอร์ยูนิตซึ่งเป็นแรงดันที่ยอมรับกันทั่วไปในสถานะการทำงานที่อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังหลุดออกไปจากระบบ (Contingency) เช่น สายส่ง, เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น เพื่อใช้เป็นสถานะการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งเป็นชุดข้อมูลการฝึกฝนเครือข่ายประสาทเทียม
2. เนื่องจากความซับซ้อนของเครือข่ายไฟฟ้ากำลัง อาจทำการลดรูปเครือข่ายดังกล่าวให้อยู่ในลักษณะหนึ่งเครื่องจักรต่ออยู่กับบัสอนันต์ (SMB: Single Machine Connected to Infinite Bus) เพื่อความสะดวกในการหาคุณลักษณะของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมการกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้างกล่าว
3. ทำการทดลองโดยวิธีจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Computer Simulation) โดยปรับค่าแรงดันอ้างอิง ซึ่งเป็นสัญญาณเข้าของระบบการกระตุ้นไปเล็กน้อย (ประมาณ 0.005 p.u.) และกำหนดค่าคงที่เวลาความเฉื่อย (Inertia Time constant) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีค่าสูง (ประมาณ 9.9×10^{20}) เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงมุมมีค่าเล็กน้อยจนสามารถละเลยได้ ทำให้อำนาจไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเกิดจากกำลังหน่วงที่เกิดจากการเปลี่ยนความเร็วเท่านั้น
4. ประมาณผลตอบเชิงเวลาดังกล่าวในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน $1 + \left(\frac{2\zeta}{\omega_n}\right) \cdot s + \left(\frac{s}{\omega_n}\right)^2$ โดยหาค่าเวลาที่กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นไป 20%, 50%, 80% ของค่าสุดท้ายเพื่อประมาณค่าอัตรา

การหน่วง ζ (Damping ratio) และความถี่ธรรมชาติไร้การหน่วง ω_n (Undamped network frequency) โดยอาศัยตารางที่ 4.1

หมายเหตุ

จากตารางที่ 4.1 แสดงอัตราส่วนของเวลาที่ผลตอบขนาดต่างๆ ต่อเวลาที่ผลตอบมีขนาดครึ่งหนึ่งของค่าสุดท้าย ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้เวลาที่ผลตอบของกำลังไฟฟ้ามีขนาด 20%, 50% และ 80% ของค่าสุดท้ายตามลำดับเพื่อใช้ในการหาอัตราการหน่วงและความถี่ธรรมชาติ กล่าวคือ หากสมมติเวลาที่ผลตอบมีขนาด 50% และ 80% ของค่าสุดท้ายเป็น 0.4116 และ 0.7197 วินาที เราจะได้อัตราส่วนของเวลาที่ผลตอบมีขนาด 80% ของค่าสุดท้ายต่อเวลาที่ผลตอบมีขนาด 50% ของค่าสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 1.7488 ซึ่งประมาณอัตราการหน่วงในช่วง 0.8-1.00 ได้คือ 0.948 และจากค่าเวลาที่ผลตอบมีขนาด 50% ของค่าสุดท้ายและอัตราการหน่วงที่ประมาณได้ หาค่า (เวลา)* ในตารางเสียใหม่ในช่วง 1.51-1.68 แล้วนำไปหารด้วยค่าเวลาที่ผลตอบมีขนาด 50% ของค่าสุดท้ายจะได้เท่ากับ 3.957 rad/sec ทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สองอยู่ในรูปสมการ $\frac{K}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$ โดยค่า K สามารถคำนวณได้จาก $K = \frac{P_{(final)} - P_{(initial)} \text{ P.U.}}{\text{change in } V_{REF} \text{ P.U.}}$ (เทียบกับกำลังฐาน 100 MVA) ซึ่งนำค่าดังกล่าวไปใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังต่อไป

อัตราส่วนการ หน่วง	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
ขนาด									
0.2	0.60	0.57	0.54	0.52	0.49	0.46	0.44	0.42	0.40
(เวลา)*	(1.13)	(1.24)	(1.36)	(1.51)	(1.68)	(1.88)	(2.11)	(2.35)	(2.60)
0.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.8	1.36	1.41	1.51	1.63	1.79	1.93	2.04	2.11	2.17
1.0	1.60	1.75	2.04	2.76					
1.2	1.88	2.27							
	4.05	3.35							
1.4	2.25								
	3.45								

ตารางที่ 4.1 แสดงอัตราส่วนของเวลาที่ผลตอบขนาดต่างๆ ต่อเวลาที่ผลตอบมีขนาดครึ่งหนึ่งของค่าสุดท้ายเพื่อใช้ในการหาอัตราการหน่วงและความถี่ธรรมชาติไร้การหน่วง

ในกรณีที่อัตราकरणวงมีค่าสูงเกิน 1.8 สามารถประมาณฟังก์ชันการถ่ายโอนได้ในรูป $\frac{K}{1+sT}$ โดยหาค่าคงตัวทางเวลา T ได้จากเวลาที่กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นไป 63% ของค่าสุดท้าย

โดยนำฟังก์ชันถ่ายโอนที่หาได้จากข้อ 4. ไปแทนค่าใน (4.1.9) หรือ (4.1.10) ทั้งนี้โดยคำนึงถึงค่าเกินของตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังไม่ห้มีค่าสูงเพิ่มตามความถี่ จะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวสร้างเสถียรภาพไฟฟ้ากำลังแบบธรรมดา

ในกรณีที่ $1 + \left(\frac{2\zeta}{\omega_n}\right) \cdot s + \left(\frac{s}{\omega_n}\right)^2$ มีรากเป็นจำนวนเชิงซ้อน จะทำให้ไม่สามารถออกแบบตัวสร้างเสถียรภาพไฟฟ้ากำลังได้เนื่องจากโครงสร้างที่ตายตัวของตัวสร้างเสถียรภาพเป็นตัวชดเชยแบบนำหน้า-ล่าหลัง (lead-lag compensator) มีความจำเป็นต้องประมาณรากดังกล่าวให้เป็นจำนวนจริงโดยการปรับสมการเป็นกำลังสองสมบูรณ์เพื่อความสะดวก

4.2 การเลือกพารามิเตอร์ภายในเครือข่ายฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมี

จากบทที่แล้ว การเรียนรู้ของเครือข่ายฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีอาศัยการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนักด้วยวิธีการออปติไมซ์เชิงเส้น ซึ่งง่ายและสะดวกกว่าการเรียนรู้ของเครือข่ายประสาทเทียมแบบหน่วยรับรู้หลายชั้น แต่สิ่งสำคัญที่จะทำให้เครือข่ายฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีมีประสิทธิภาพในการทำงานคือ การเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมอันได้แก่ จุดศูนย์กลางและตัวประกอบการกระจายของฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีแต่ละปมภายในเครือข่ายประสาทเทียม กล่าวคือทำอย่างไรจึงจะเลือกค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีที่เหมาะสมภายในเครือข่ายประสาทเทียมได้ สำหรับข้อมูลจำนวนน้อยสามารถอาศัยจุดศูนย์กลางจากชุดข้อมูลสัญญาณเข้า แต่การทำเช่นนั้นไม่เหมาะสมกับชุดข้อมูลจำนวนมากเนื่องจากทำให้เครือข่ายฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีมีขนาดใหญ่ (จำนวนปมมาก) และฟังก์ชันที่ได้ไม่เป็นอิสระเชิงเส้น (Linear dependence) จึงได้มีการเสนอวิธีการกำลังสองน้อยสุดแบบตั้งฉาก [4] ขึ้นเพื่อลดขนาดของเครือข่ายให้เล็กลงและมีความสามารถอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ วิธีการต่างๆ ที่กล่าวถึงจะเน้นไปที่การเลือกจุดศูนย์กลางของฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีแต่ละปมภายในเครือข่ายประสาทเทียมเพียงอย่างเดียว โดยที่คงค่าตัวประกอบการกระจายไว้ที่ค่าใดค่าหนึ่ง ดังนั้นมีการเสนอวิธีการที่ปรับปรุงจากวิธีการกำลังสองน้อยสุดแบบตั้งฉากขึ้น [5] เพื่อให้สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีภายในเครือข่ายประสาทเทียมที่ได้จากข้อมูลการฝึกฝนชุดเดิมไปสู่ค่าใหม่ที่ดีกว่า ซึ่งในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงความสำคัญของการเลือกพารามิเตอร์ในเครือข่ายฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมี, วิธีการกำลังสองน้อยสุดแบบตั้งฉาก และวิธีการกำลังสองน้อยสุดแบบตั้งฉากที่มีการปรับค่าได้ เพื่อให้มีความเข้าใจเพิ่มขึ้นและนำวิธีการดังกล่าวมาประยุกต์ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังด้วยเครือข่ายฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีต่อไป

4.2.1 ความสำคัญของการเลือกพารามิเตอร์ในเครือข่ายฟังก์ชันมูลฐานแนวกวีซี

พิจารณาตัวอย่างความสัมพันธ์อย่างง่าย $\{(1,2), (2,6), (3,-1), (4,1)\}$ จากความสัมพันธ์นี้ เนื่องจากจำนวนชุดข้อมูลน้อยจึงสามารถสร้างเครือข่ายฟังก์ชันมูลฐานแนวกวีซีโดยการเลือกจุดศูนย์กลางจากชุดข้อมูลสัญญาณเข้าที่มีอยู่ คือ $\{1,2,3,4\}$ และคงค่าตัวประกอบการกระจายไว้ที่ค่าใดค่าหนึ่ง ซึ่งจะได้ดังสมการข้างล่าง

$$\begin{aligned}
 2 &= w_1 e^{\frac{(1-1)^2}{\beta^2}} + w_2 e^{\frac{(1-2)^2}{\beta^2}} + w_3 e^{\frac{(1-3)^2}{\beta^2}} + w_4 e^{\frac{(1-4)^2}{\beta^2}} \\
 6 &= w_1 e^{\frac{(2-1)^2}{\beta^2}} + w_2 e^{\frac{(2-2)^2}{\beta^2}} + w_3 e^{\frac{(2-3)^2}{\beta^2}} + w_4 e^{\frac{(2-4)^2}{\beta^2}} \\
 -1 &= w_1 e^{\frac{(3-1)^2}{\beta^2}} + w_2 e^{\frac{(3-2)^2}{\beta^2}} + w_3 e^{\frac{(3-3)^2}{\beta^2}} + w_4 e^{\frac{(3-4)^2}{\beta^2}} \\
 1 &= w_1 e^{\frac{(4-1)^2}{\beta^2}} + w_2 e^{\frac{(4-2)^2}{\beta^2}} + w_3 e^{\frac{(4-3)^2}{\beta^2}} + w_4 e^{\frac{(4-4)^2}{\beta^2}}
 \end{aligned} \tag{4.2.1}$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} 2 \\ 6 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{\frac{(1-1)^2}{\beta^2}} & e^{\frac{(1-2)^2}{\beta^2}} & e^{\frac{(1-3)^2}{\beta^2}} & e^{\frac{(1-4)^2}{\beta^2}} \\ e^{\frac{(2-1)^2}{\beta^2}} & e^{\frac{(2-2)^2}{\beta^2}} & e^{\frac{(2-3)^2}{\beta^2}} & e^{\frac{(2-4)^2}{\beta^2}} \\ e^{\frac{(3-1)^2}{\beta^2}} & e^{\frac{(3-2)^2}{\beta^2}} & e^{\frac{(3-3)^2}{\beta^2}} & e^{\frac{(3-4)^2}{\beta^2}} \\ e^{\frac{(4-1)^2}{\beta^2}} & e^{\frac{(4-2)^2}{\beta^2}} & e^{\frac{(4-3)^2}{\beta^2}} & e^{\frac{(4-4)^2}{\beta^2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{bmatrix} \tag{4.2.2}$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูปผลบวกเชิงเส้นของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} 2 \\ 6 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} = w_1 \begin{bmatrix} e^{\frac{(1-1)^2}{\beta^2}} \\ e^{\frac{(2-1)^2}{\beta^2}} \\ e^{\frac{(3-1)^2}{\beta^2}} \\ e^{\frac{(4-1)^2}{\beta^2}} \end{bmatrix} + w_2 \begin{bmatrix} e^{\frac{(1-2)^2}{\beta^2}} \\ e^{\frac{(2-2)^2}{\beta^2}} \\ e^{\frac{(3-2)^2}{\beta^2}} \\ e^{\frac{(4-2)^2}{\beta^2}} \end{bmatrix} + w_3 \begin{bmatrix} e^{\frac{(1-3)^2}{\beta^2}} \\ e^{\frac{(2-3)^2}{\beta^2}} \\ e^{\frac{(3-3)^2}{\beta^2}} \\ e^{\frac{(4-3)^2}{\beta^2}} \end{bmatrix} + w_4 \begin{bmatrix} e^{\frac{(1-4)^2}{\beta^2}} \\ e^{\frac{(2-4)^2}{\beta^2}} \\ e^{\frac{(3-4)^2}{\beta^2}} \\ e^{\frac{(4-4)^2}{\beta^2}} \end{bmatrix} \tag{4.2.3}$$

ในกรณีที่ค่าตัวประกอบการกระจายมีค่าต่างๆ กัน จะได้คำตอบที่แตกต่างกันออกไป ยกตัวอย่างเช่น

$$\begin{aligned}
 \beta = 0.1 &\Rightarrow w_1 = 2 & w_2 = 6 & w_3 = -1 & w_4 = 1 \\
 \beta = 0.5 &\Rightarrow w_1 = 1.890 & w_2 = 5.986 & w_3 = -1.128 & w_4 = 1.020 \\
 \beta = 1.0 &\Rightarrow w_1 = 0.889 & w_2 = 8.097 & w_3 = -4.945 & w_4 = 2.671
 \end{aligned} \tag{4.2.4}$$

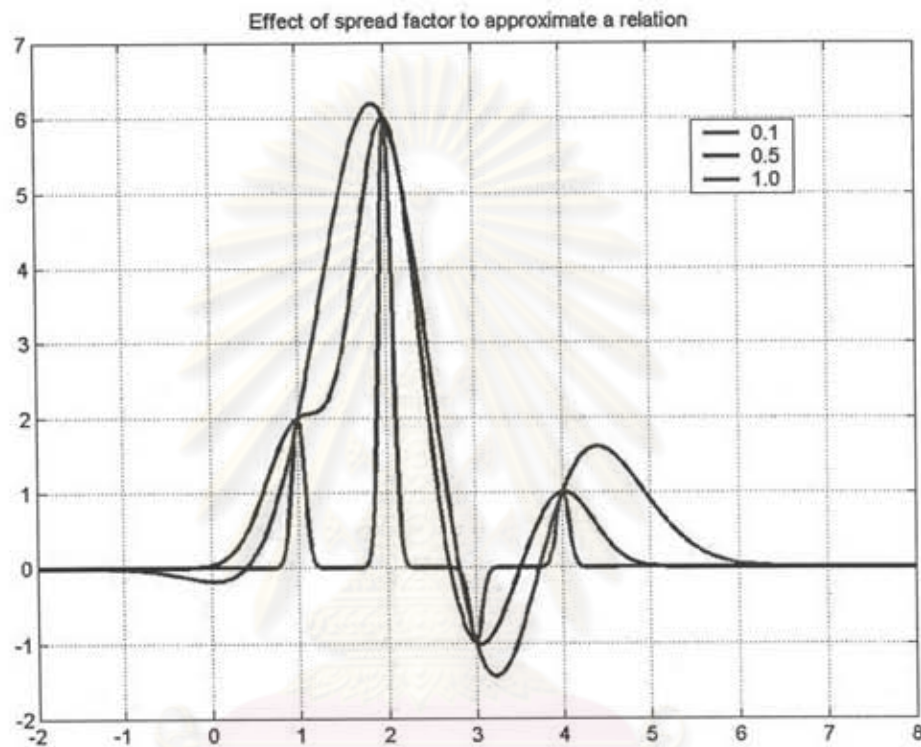
จาก (4.2.4) สรุปเครือข่ายฟังก์ชันมูลฐานแนวกวีซีที่มีตัวประกอบการกระจายต่างๆ กันได้ดังนี้

$$\beta = 0.1 \Rightarrow y = 2e^{\frac{(x-1)^2}{0.01}} + 6e^{\frac{(x-2)^2}{0.01}} - e^{\frac{(x-3)^2}{0.01}} + e^{\frac{(x-4)^2}{0.01}}$$

$$\beta = 0.5 \Rightarrow y = 1.890e^{\frac{(x-1)^2}{0.01}} + 5.986e^{\frac{(x-2)^2}{0.01}} - 1.128e^{\frac{(x-3)^2}{0.01}} + 1.020e^{\frac{(x-4)^2}{0.01}} \quad (4.2.5)$$

$$\beta = 1.0 \Rightarrow y = 0.889e^{\frac{(x-1)^2}{0.01}} + 8.097e^{\frac{(x-2)^2}{0.01}} - 4.945e^{\frac{(x-3)^2}{0.01}} + 2.671e^{\frac{(x-4)^2}{0.01}}$$

เมื่อนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์จะได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ (4.2.5)

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่า เมื่อจุดศูนย์กลางของฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีภายในเครือข่ายประสาทเทียมมีค่าคงตัวคือ ใช้ข้อมูลสัญญาณเข้าที่มีอยู่เป็นจุดศูนย์กลางแล้ว การเลือกค่าตัวประกอบการกระจายมีผลอย่างมากต่อการสร้างความสัมพันธ์จากชุดข้อมูลการฝึกฝนที่มีอยู่ โดยค่าตัวประกอบการกระจายที่มีขนาดเล็กจะทำให้เกิดกราฟที่มีลักษณะเป็นพัลส์ ขาดความต่อเนื่องดังในกรณี $\beta = 0.1$ แต่หากเลือกค่าตัวประกอบการกระจายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นมา จะทำให้กราฟมีลักษณะความต่อเนื่องและราบเรียบขึ้นดังในกรณี $\beta = 1.0$ ทำให้สรุปได้ว่าการเลือกเครือข่ายฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีที่มีการกำหนดจุดศูนย์กลางของฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีภายในเครือข่ายประสาทเทียมคงตัวมาใช้แทนความสัมพันธ์ต่างๆ จำเป็นต้องคำนึงถึงลักษณะของข้อมูลที่มีความต่อเนื่องมากน้อยเพียงใด ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าตัวประกอบการกระจายของฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมี

4.2.2 วิธีการกำลังสองน้อยสุดแบบตั้งฉาก [4]

จากตัวอย่างความสัมพันธ์ที่ผ่านมาเนื่องจากจำนวนชุดข้อมูลการฝึกฝนน้อย การเลือกจุดศูนย์กลางของฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีแต่ละปมภายในเครือข่ายประสาทเทียมกระทำโดยการเลือกชุดสัญญาณเข้ามาใช้เป็นจุดศูนย์กลางของฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีภายในเครือข่ายประสาทเทียม และคงค่าตัวประกอบการกระจายของฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีแต่ละปมภายในเครือข่ายประสาทเทียมไว้ที่ค่าใดค่าหนึ่ง แต่หากจำนวนชุดข้อมูลการฝึกฝนมีจำนวนมากแล้ว การทำเช่นนั้นจะทำให้ปมของเครือข่ายฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีมีจำนวนมากเกินความจำเป็น และอาจก่อให้เกิดปัญหาในการเรียนรู้ของเครือข่ายฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมี ซึ่งในการประยุกต์เครือข่ายฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีนั้นอาจไม่จำเป็นต้องการเครือข่ายใหญ่ หากแต่ต้องการให้เครือข่ายตอบสนองกับความต้องการที่จะใช้ให้ได้เกณฑ์ที่กำหนดไว้ก่อนหน้า เช่น มีความคลาดเคลื่อนของสัญญาณออกเมื่อเทียบกับสัญญาณที่ต้องการอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เป็นต้น ได้มีการเสนอวิธีการกำลังสองน้อยสุดแบบตั้งฉาก [4] ในการเลือกค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีภายในเครือข่ายประสาทเทียม ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 พิจารณาชุดข้อมูลการฝึกฝน n ชุด $\{(x_1, d_1), (x_2, d_2), \dots, (x_n, d_n)\}$ ในที่นี้ใช้ฟังก์ชันเกาส์เป็นฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมี โดย $x_i \in R^n$; $d_i \in R$

ขั้นตอนที่ 2 เริ่มแรกจะใช้ชุดข้อมูลสัญญาณเข้า $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ เป็นจุดศูนย์กลางจะได้ความสัมพันธ์คล้ายคลึงกับ (4.2.3)

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix} = w_1 \begin{bmatrix} e^{-\frac{|x_1-x_1|^2}{\beta^2}} \\ e^{-\frac{|x_2-x_1|^2}{\beta^2}} \\ \vdots \\ e^{-\frac{|x_n-x_1|^2}{\beta^2}} \end{bmatrix} + w_2 \begin{bmatrix} e^{-\frac{|x_1-x_2|^2}{\beta^2}} \\ e^{-\frac{|x_2-x_2|^2}{\beta^2}} \\ \vdots \\ e^{-\frac{|x_n-x_2|^2}{\beta^2}} \end{bmatrix} + \dots + w_n \begin{bmatrix} e^{-\frac{|x_1-x_n|^2}{\beta^2}} \\ e^{-\frac{|x_2-x_n|^2}{\beta^2}} \\ \vdots \\ e^{-\frac{|x_n-x_n|^2}{\beta^2}} \end{bmatrix} \quad (4.2.6)$$

หรือบ่อยครั้งอาจมีการใส่สัญญาณไบแอสเข้าไปด้วยใน (4.2.6) จะได้

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix} = w_1 \begin{bmatrix} e^{-\frac{|x_1-x_1|^2}{\beta^2}} \\ e^{-\frac{|x_2-x_1|^2}{\beta^2}} \\ \vdots \\ e^{-\frac{|x_n-x_1|^2}{\beta^2}} \end{bmatrix} + w_2 \begin{bmatrix} e^{-\frac{|x_1-x_2|^2}{\beta^2}} \\ e^{-\frac{|x_2-x_2|^2}{\beta^2}} \\ \vdots \\ e^{-\frac{|x_n-x_2|^2}{\beta^2}} \end{bmatrix} + \dots + w_n \begin{bmatrix} e^{-\frac{|x_1-x_n|^2}{\beta^2}} \\ e^{-\frac{|x_2-x_n|^2}{\beta^2}} \\ \vdots \\ e^{-\frac{|x_n-x_n|^2}{\beta^2}} \end{bmatrix} + w_{n+1} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.2.7)$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายเป็น

$$d = w_1 p_1 + w_2 p_2 + \dots + w_n p_n + w_{n+1} p_{n+1} \quad (4.2.8)$$

$$\text{โดยที่ } \mathbf{d} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix} \text{ และ } \mathbf{p}_i = \begin{bmatrix} e^{-\frac{|x_1 - x_i|^2}{\beta^2}} \\ e^{-\frac{|x_2 - x_i|^2}{\beta^2}} \\ \vdots \\ e^{-\frac{|x_n - x_i|^2}{\beta^2}} \end{bmatrix}; i = 1, 2, \dots, n \text{ และ } \mathbf{p}_{n+1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \text{ นั่นเอง}$$

ขั้นตอนที่ 3 จะเห็นว่าการแก้สมการหาคำตอบใน (4.2.8) จะต้องใช้ปฏิบัติการทางเมตริกซ์ ซึ่งจำนวนจุดศูนย์กลางมากขึ้นเพียงใด เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเพิ่มขึ้นมากเท่านั้น และบ่อยครั้งที่เวกเตอร์ \mathbf{p}_i ใน (4.2.8) มีลักษณะไม่เป็นอิสระเชิงเส้น (Linear dependence) ดังนั้นวิธีหนึ่งที่ใช้ได้ คือ การเลือกเวกเตอร์ \mathbf{p}_i ใดๆ ใน (4.2.8) เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีภายในเครือข่ายประสาทเทียม คือ การทำให้ความคลาดเคลื่อนของสัญญาณออกอันเกิดจากเวกเตอร์ \mathbf{p}_i มีค่าน้อยสุด ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนนี้สามารถหาได้จากสมการข้างล่าง

$$err_i = \left\| \mathbf{d} - \frac{\mathbf{p}_i^T \mathbf{d}}{\mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_i} \cdot \mathbf{p}_i \right\|^2 \quad (4.2.9)$$

ขั้นตอนที่ 4 หา i ที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวมีค่าน้อยสุด

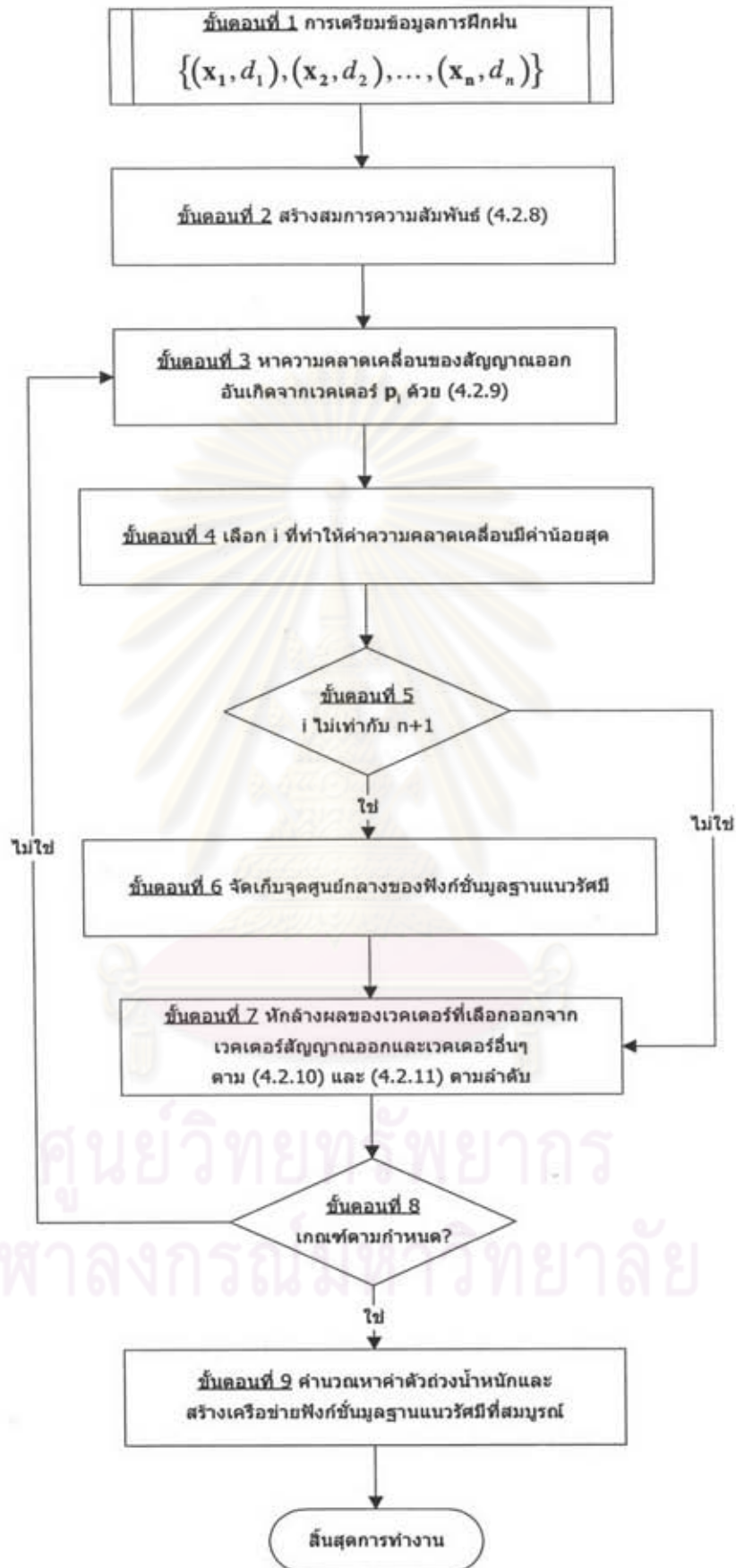
ขั้นตอนที่ 5 เมื่อได้เวกเตอร์ \mathbf{p}_i ที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยสุดแล้ว ต้องตรวจสอบก่อนว่า i ที่ได้เท่ากับ $n+1$ หรือไม่ การกระทำเช่นนี้เป็นการตรวจสอบว่าค่าความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากสัญญาณไบแอสหรือชุดสัญญาณเข้า ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากสัญญาณไบแอส ข้ามไปทำที่ขั้นตอนที่ 7

ขั้นตอนที่ 6 ถ้า i ไม่เท่ากับ $n+1$ แสดงว่าได้จุดศูนย์กลางของฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีเป็นชุดสัญญาณเข้า x_i นั่นเอง

ขั้นตอนที่ 7 หลังจากนั้นจะต้องนำเวกเตอร์ที่เลือกแล้วดังกล่าวไปหักล้างองค์ประกอบของมันในเวกเตอร์ที่ยังไม่ได้รับเลือกอื่นๆ รวมไปถึงเวกเตอร์สัญญาณออกด้วย เพื่อป้องกันมิให้ความคลาดเคลื่อนที่น้อยสุดในครั้งต่อไป มีผลขององค์ประกอบในทิศทางแนวเดียวกับเวกเตอร์ที่เลือกนั้น โดย

$$\mathbf{d} = \mathbf{d} - \frac{\mathbf{p}_i^T \mathbf{d}}{\mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_i} \cdot \mathbf{p}_i \quad (4.2.10)$$

$$\mathbf{p}_j = \mathbf{p}_j - \frac{\mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_j}{\mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_i} \cdot \mathbf{p}_i; j \neq i \quad (4.2.11)$$



รูปที่ 4.7 แผนผังแสดงขั้นตอนการใช้งานวิธีการกำลังสองน้อยสุดแบบตั้งจากอย่างง่าย

ขั้นตอนที่ 8 จากนั้นจะทำการตรวจสอบเงื่อนไขว่าได้เกณฑ์ตามกำหนดไว้หรือไม่ เกณฑ์ดังกล่าวได้แก่ ครบจำนวนรอบการทำงาน, ขนาดของเวกเตอร์สัญญาณออกมีขนาดเล็กกว่าค่าที่ตั้งไว้ เป็นต้น ถ้าไม่ได้เกณฑ์กำหนด ต้องย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 3 ต่อไป เพื่อกระทำวนซ้ำเช่นนี้เรื่อยไปจนได้เกณฑ์ที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 9 ถ้าได้เกณฑ์กำหนด แสดงว่าได้จุดศูนย์กลางของฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีภายในเครือข่ายประสาทเทียมเรียบร้อยแล้วโดยคงค่าตัวประกอบการกระจายไว้ที่ค่าใดค่าหนึ่ง ขั้นนี้จะเป็นการหาค่าตัวถ่วงน้ำหนักเพื่อสร้างเครือข่ายฟังก์ชันเครือข่ายฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีที่สมบูรณ์ด้วยวิธีความผิดพลาดกำลังสองน้อยสุดแบบเชิงเส้น (Linear Least Squares Error method)

จาก (4.2.11) พบว่าเวกเตอร์ p_j แต่ละตัวที่ได้จากวิธีการดังกล่าวข้างต้นจะมีลักษณะตั้งฉากซึ่งกับเวกเตอร์ p_i ซึ่งทำให้สะดวกในการหาค่าตัวถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมของเครือข่ายฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีต่อไป จึงเรียกวิธีการดังกล่าวว่า "วิธีการกำลังสองน้อยสุดแบบตั้งฉาก" (Orthogonal Least Square หรือ OLS)

4.2.3 วิธีการกำลังสองน้อยสุดแบบตั้งฉากที่มีการปรับค่าได้ [5]

จากวิธีข้างต้น สังเกตเห็นว่า การเลือกพารามิเตอร์ของฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีภายในเครือข่ายประสาทเทียมที่กล่าวมาแล้วข้างต้นเป็นการมุ่งเน้นไปที่เลือกจุดศูนย์กลางของฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีโดยคงค่าตัวประกอบการกระจายที่ค่าใดค่าหนึ่ง จากหัวข้อ 4.2.1 พบว่า เมื่อคงค่าจุดศูนย์กลางของฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีภายในเครือข่ายประสาทไว้ ค่าตัวประกอบการกระจายที่ใช้ในเครือข่ายฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีมีผลต่อการประมาณความสัมพันธ์ระหว่างชุดสัญญาณเข้าและสัญญาณออก ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ความสัมพันธ์มีความต่อเนื่องและราบเรียบ จะได้ว่าตัวประกอบการกระจายจะมีผลต่อขนาดของเครือข่ายฟังก์ชันมูลฐานอย่างมาก เนื่องจากหากค่าตัวประกอบการกระจายมีขนาดเล็กทำให้ได้ลักษณะความสัมพันธ์เป็นแบบพัลส์ส่งผลทำให้ขนาดของเครือข่ายใหญ่ ตรงกันข้ามหากค่าตัวประกอบการกระจายมีขนาดใหญ่ทำให้ได้ลักษณะความสัมพันธ์มีความต่อเนื่องและราบเรียบส่งผลทำให้ขนาดของเครือข่ายเล็ก เป็นต้น

ที่กล่าวไปทั้งหมดนั้น แสดงให้เห็นว่า ในการเลือกพารามิเตอร์ของฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีภายในเครือข่ายประสาทเทียม หากมีการเลือกค่าตัวประกอบการกระจายของฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีที่เหมาะสมพร้อมๆ กับการเลือกจุดศูนย์กลางของฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีที่เหมาะสมด้วย สามารถช่วยให้เครือข่ายฟังก์ชันมูลฐานมีขนาดที่เหมาะสมในการประมาณความสัมพันธ์ระหว่างชุดสัญญาณเข้าและสัญญาณออก จึงได้มีการเสนอวิธีการปรับค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติมในขั้นตอนที่ 6 ของวิธีการกำลังสองน้อยสุดแบบตั้งฉาก โดยมีการปรับค่าพารามิเตอร์ (ค่าตัวประกอบการ

กระจายและจุดศูนย์กลาง) ไปยังที่ๆ เหมาะสมกว่าค่าที่ได้จากชุดข้อมูลสัญญาณเข้าด้วยวิธีการ ออฟติไมซ์แบบเกรเดียนต์ลดลง (Gradient descent method) ซึ่งจะส่งผลต่อขนาดของเครือข่าย ฟังก์ชันมูลฐานแนวล้อมให้เล็กลงได้

สรุปขั้นตอนเพิ่มเติมจากวิธีการกำลังสองน้อยสุดแบบตั้งฉาก เป็นดังนี้

ขั้นตอนที่ 6.1 การปรับค่าตัวประกอบการกระจาย

หลังจากได้จุดศูนย์กลางและค่าตัวประกอบการกระจายของฟังก์ชันมูลฐานแนวล้อมภายในเครือข่ายประสาทเทียมด้วยวิธีการกำลังสองน้อยสุดแบบตั้งฉากในขั้นตอนที่ 6 เดิมแล้ว วิธีการใหม่นี้ได้ปรับค่าตัวประกอบการกระจาย β_i ด้วยวิธีการออฟติไมซ์แบบเกรเดียนต์ลดลงเพิ่มเติมอีกตามสมการข้างล่าง

$$\beta_i^{(k+1)} = \beta_i^{(k)} - \eta \frac{\delta err_i(\beta_i^{(k)})}{\delta \beta_i} \quad (4.2.12)$$

เมื่อ η มีค่าเป็นบวกใดๆ ในที่นี้ใช้ค่า η เท่ากับ 0.05 เพื่อป้องกันการแกว่งของค่าตัวประกอบการกระจาย โดยประมาณค่า $\frac{\delta err_i(\beta_i^{(k)})}{\delta \beta_i}$ ด้วยผลต่างจำกัด

โดย $\Delta \beta_i$ มีขนาดเล็กมากๆ ดังสมการข้างล่าง

$$\frac{\delta err_i(\beta_i^{(k)})}{\delta \beta_i} \approx \frac{err_i(\beta_i^{(k)} + \Delta \beta_i) - err_i(\beta_i^{(k)})}{\Delta \beta_i} \quad (4.2.13)$$

$$\text{โดยที่ } err_i(\beta_i^{(k)} + \Delta \beta_i) = \left\| \mathbf{d} - \frac{\mathbf{p}_{i\Delta\beta}^T \mathbf{d}}{\mathbf{p}_{i\Delta\beta}^T \mathbf{p}_{i\Delta\beta}} \cdot \mathbf{p}_{i\Delta\beta} \right\|^2 \text{ เมื่อ } \mathbf{p}_{i\Delta\beta} = \begin{bmatrix} e^{-\frac{|\mathbf{x}_1 - \mathbf{c}_i|^2}{(\beta_i^{(k)} + \Delta \beta_i)^2}} \\ e^{-\frac{|\mathbf{x}_2 - \mathbf{c}_i|^2}{(\beta_i^{(k)} + \Delta \beta_i)^2}} \\ \vdots \\ e^{-\frac{|\mathbf{x}_n - \mathbf{c}_i|^2}{(\beta_i^{(k)} + \Delta \beta_i)^2}} \end{bmatrix}$$

กระทำเช่นกันนี้ จนค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณออกลดลงมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ หรือครบจำนวนรอบที่กำหนดไว้ก่อนหน้า

ขั้นตอนที่ 6.2 การปรับค่าสมาชิกต่างๆ ในจุดศูนย์กลาง

ซึ่งหลังจากได้ปรับค่าตัวประกอบการกระจายของฟังก์ชันมูลฐานแนวล้อมภายในเครือข่ายประสาทเทียมในขั้นตอนที่ 6.1 แล้ว วิธีการนี้ได้ปรับสมาชิกที่ j ของจุดศูนย์กลาง c_j เมื่อ $j=1, 2, \dots, m$ ด้วยวิธีออฟติไมซ์แบบเกรเดียนต์ลดลงต่อไปตามสมการข้างล่าง

$$c_{ij}^{(k+1)} = c_{ij}^{(k)} - \eta \frac{\delta err_i(c_{ij}^{(k)})}{\delta c_{ij}} \quad (4.2.14)$$

เมื่อ η มีค่าเป็นบวกใดๆ ในที่นี้ใช้ค่า η เท่ากับ 0.05 โดยประมาณค่า $\frac{\delta err_i(c_{ij}^{(k)})}{\delta c_{ij}}$ ด้วยผลต่างจำกัด โดย Δc_{ij} มีขนาดเล็กมากๆ ดังสมการข้างล่าง

$$\frac{\delta err_i(c_{ij}^{(k)})}{\delta c_{ij}} \approx \frac{err_i(c_{ij}^{(k)} + \Delta c_{ij}) - err_i(c_{ij}^{(k)})}{\Delta c_{ij}} \quad (4.2.15)$$

$$\text{โดยที่ } err_i(c_{ij}^{(k)} + \Delta c_{ij}) = \left\| \mathbf{d} - \frac{\mathbf{p}_{i\Delta c_j}^T \mathbf{d}}{\mathbf{p}_{i\Delta c_j}^T \mathbf{p}_{i\Delta c_j}} \cdot \mathbf{p}_{i\Delta c_j} \right\|^2 \quad \text{เมื่อ } \mathbf{p}_{i\Delta c_j} = \begin{bmatrix} e^{-\frac{|x_1 - c_{i\Delta c_j}^{(k)}|^2}{\beta_i^2}} \\ e^{-\frac{|x_2 - c_{i\Delta c_j}^{(k)}|^2}{\beta_i^2}} \\ \vdots \\ e^{-\frac{|x_n - c_{i\Delta c_j}^{(k)}|^2}{\beta_i^2}} \end{bmatrix}$$

$$\text{และ } \mathbf{c}_{i\Delta c_j}^{(k)} = \begin{bmatrix} c_{i1}^{(k)} \\ \vdots \\ c_{ij}^{(k)} + \Delta c_{ij} \\ \vdots \\ c_{im}^{(k)} \end{bmatrix} \text{ ตามลำดับ}$$

กระทำเช่นกันนี้ จนครบ m สมาชิกในจุดศูนย์กลาง เพื่อให้ค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณออกลดลงให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ หรือครบจำนวนรอบที่กำหนดไว้ก่อนหน้า

ขั้นตอนที่ 6.3

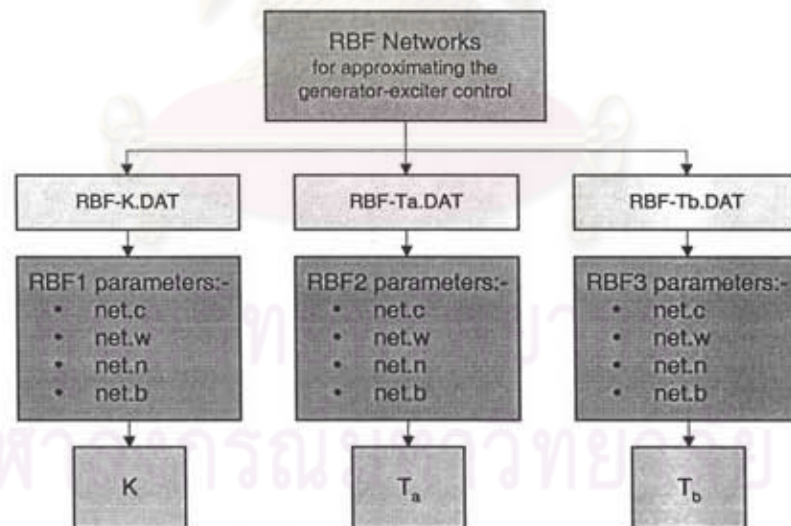
ตรวจสอบเงื่อนไขว่าได้ตามเกณฑ์กำหนดไว้หรือไม่ ถ้าได้ก็ทำขั้นตอนที่ 7 ต่อไป แต่ถ้าไม่ได้ ให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 6.1 ต่อไป สำหรับเกณฑ์กำหนดได้แก่ ความคลาดเคลื่อนที่ได้ไม่ลดลง หรือลดลงต่ำกว่าค่าที่กำหนด หรือครบจำนวนรอบที่กำหนด เป็นต้น

วิธีการที่แสดงดังกล่าวจึงเรียกวิธีนี้ว่า "วิธีการกำลังสองน้อยสุดแบบตั้งฉากที่มีการปรับค่าได้" (Adaptive Orthogonal Least Square หรือ Adaptive OLS) นั่นเอง ซึ่งใช้วิธีการนี้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อสร้างเครือข่ายประสาทเทียมแบบฟังก์ชันมูลฐานแวนรัสมี่ที่เหมาะสมในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังต่อไป

จากแนวคิดที่กล่าวข้างต้น วิธีประยุกต์เครือข่ายฟังก์ชันมูลฐานแวนรัสมี่เพื่อใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังคือ การจำลองคุณลักษณะของฟังก์ชัน

ถ่ายโอน $\frac{\Delta P_E}{\Delta V_{REF}}$ ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่สอง ณ สถานะการทำงานต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังแบบธรรมดาต่อไป โดยการจำลองคุณลักษณะของฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยการเก็บข้อมูลจำนวนมากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 ในระบบหนึ่งเครื่องจักรต่ออยู่กับบัสอนันต์ แต่เนื่องจากไม่มีหลักเกณฑ์ที่ตายตัวในการกำหนดจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการฝึกฝนเครือข่ายประสาทเทียม ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลในช่วงการทำงานที่สมมติว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้คือ กำลังผลิตช่วง 55-160 เมกะวัตต์ ภายใต้แรงดันที่ยอมรับได้ตลอดช่วงการทำงานที่ระบบไฟฟ้ากำลังเกิดปัญหากล่าวคือ แรงดันชั่วอยู่ในช่วง 0.90-1.10 เปอรียูนิต ซึ่งจะได้ข้อมูลการฝึกฝนเครือข่ายประสาทที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ในภาคผนวก ค. จากนั้นทำการสร้างเครือข่ายประสาทเทียมแบบฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีเพื่อเลือกค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีภายในเครือข่ายประสาทเทียมจากชุดข้อมูลการฝึกฝนดังกล่าวด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบตั้งฉากที่มีการปรับค่าได้ด้วยภาษาโปรแกรม MATLAB [20]

จากวิธีการดังกล่าว ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีเครือข่ายประสาทเทียมอยู่ 3 เครือข่ายเพื่อใช้ในการจำลองคุณลักษณะของระบบควบคุมการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ $\{K, T_a, T_b\}$ เป็นสัญญาณออกของเครือข่ายประสาทเทียมดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ข้อมูลพารามิเตอร์ของเครือข่ายฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีที่ใช้ในแบบจำลองของตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง

4.3 การปรับค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง (D_o) ของตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังแบบธรรมดา

การปรับค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง (D_o) เป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยให้การแกว่งของโรเตอร์หยุดได้เร็วขึ้นโดยอาศัยวิธีฮอปติไมซ์แบบเกรเดียนต์ลดลง (Gradient descent method) โดยพยายาม

ลดค่ากำลังสองของกำลังแรงให้มีค่าน้อยสุด ทั้งนี้หากค่ากำลังสองดังกล่าวมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ แสดงว่าระบบจะเข้าสู่สภาพสมดุลมากขึ้น ทำให้การแกว่งหยุดได้เร็วขึ้น ซึ่งพิจารณาได้ดัง (4.3.1)

$$\text{minimize } P_{ACC}^2 = (P_M - P_E)^2 \quad (4.3.1)$$

จะได้ว่า

$$D_e^{(k+1)} = D_e^{(k)} - \eta \cdot \frac{dP_{ACC}^2}{dD_e} \quad (4.3.2)$$

แต่เนื่องจากกำลังกลไม่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง (D_e) ดังกล่าว และจาก (4.1.6) จะได้ว่า

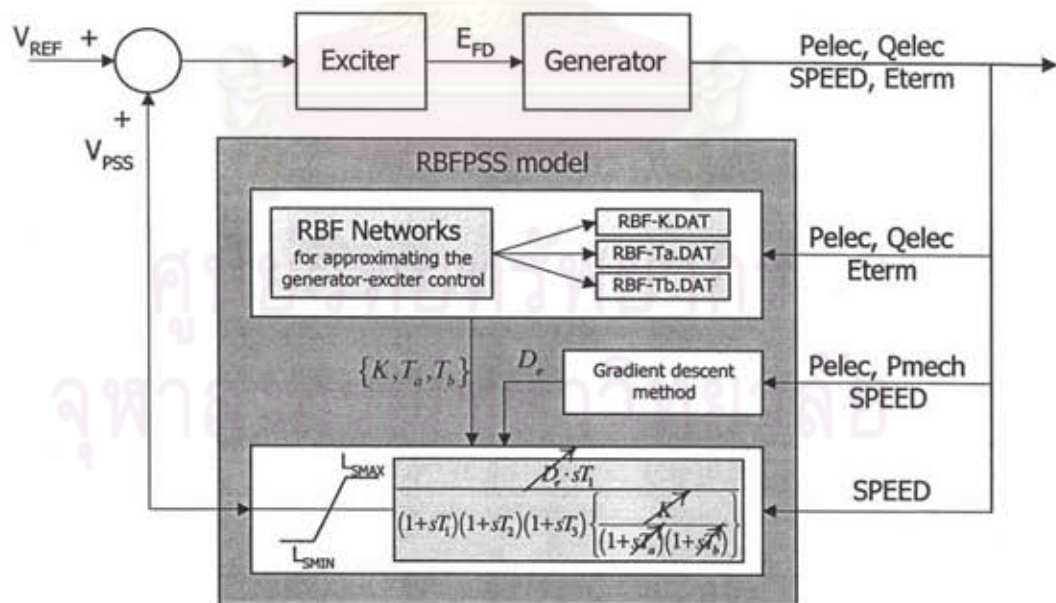
$$\begin{aligned} \frac{dP_{ACC}^2}{dD_e} &= 2P_{ACC} \frac{dP_{ACC}}{dD_e} = -2P_{ACC} \frac{dP_E}{dD_e} \\ &= -2P_{ACC} \Delta\omega \frac{dD}{dD_e} \end{aligned} \quad (4.3.3)$$

จาก (4.3.3) เนื่องจากโดยทั่วไป $\frac{dD}{dD_e} \geq 0$ ทำให้ทิศทางของเกรเดียนท์ของกำลังไฟฟ้าแรงกำลังสองเป็นดัง (4.3.4)

$$\frac{dP_{ACC}^2}{dD_e} \propto -2P_{ACC} \Delta\omega \quad (4.3.4)$$

ดังนั้น

$$D_e^{(k+1)} = D_e^{(k)} + 2\eta P_{ACC} \Delta\omega \quad (4.3.5)$$



รูปที่ 4.9 แบบจำลองของตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยเครือข่ายฟังก์ชันมูลฐานแนวรัศมีที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

จากรูปที่ 4.9 แสดงแบบจำลองของตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยเครือข่ายฟังก์ชันมูลฐานแนวกวีซีเอ็มที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยสัญญาณเข้าของเครือข่ายฟังก์ชันมูลฐานแนวกวีซีเอ็มเป็นค่าแสดงสถานะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคือ กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าวีแอกทีฟ และแรงดันขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งสัญญาณออกของเครือข่ายประสาทเทียมแบบฟังก์ชันมูลฐานแนวกวีซีเอ็มเป็นค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงคุณลักษณะของระบบควบคุมการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคือ $\{K, T_o, T_b\}$ ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ภายในตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังแบบธรรมดา นอกจากนี้ยังมีสัญญาณที่ใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง D_o เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหน่วงการแกว่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกด้วย

สำหรับการจำลองเหตุการณ์ทางพลวัตในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ใช้โปรแกรม Power System Simulator for Engineering หรือ PSS/E [21,22] โดยที่สร้างแบบจำลองของตัวสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังแบบธรรมดาที่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียมแบบฟังก์ชันมูลฐานแนวกวีซีเอ็มด้วยภาษา FLECS ซึ่งเป็นภาษาที่นิยมใช้กันในการสร้างแบบจำลองทางพลวัตที่ผู้ใช้งานเขียนขึ้น (User-written model) ในโปรแกรม PSS/E ดังกล่าว โดยผลการทดสอบได้กล่าวไว้ในบทที่ 5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย