# บทที่ 4
# การหาสเตทสเปซ

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วใน บทที่ 2 ว่า การวิเคราะห์ระบบเชิงเส้นขนาดใหญ่นั้น จะใช้แบบจำลองสเตทสเปซ ซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง

$$\mathbf{dX}(t)/dt = \mathbf{AX}(t) + \mathbf{BU}(t) \qquad (4.1)$$

ถ้าใช้การแปลงลาปลาซ (Laplace Transformation) และให้สภาวะเริ่มต้น (Initial Condition) เป็นศูนย์ สมการ 4.1 จะกลายเป็นสมการในโดเมนของความถี่ตามสมการ 4.2

$$s\mathbf{X}(s) = \mathbf{AX}(s) + \mathbf{BU}(s) \qquad (4.2)$$

ในบทนี้จะแสดงถึงการหาสเตทสเปซ ของระบบไฟฟ้ากำลังใด ๆ ที่จะทำการวิเคราะห์โดยจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ตามที่แสดงรายละเอียดไว้ใน บทที่ 3 และจะทำการวิเคราะห์อย่างเป็นระบบ เพื่อนำไปใช้เป็นหลักในการทำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์นี้ด้วย การหาสมการสถานะ เพื่อให้ได้แบบจำลองสเตทสเปซของระบบใดระบบหนึ่ง สามารถหาได้หลายวิธี[26] เช่น จากสมการอนุพันธ์ของอินพุทและเอ้าท์พุท (Input - Output Differential equation) จากไดอะแกรมจำลอง (Simulation Diagram) จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชั่น กราฟเชิงเส้นของระบบ (System's Linear Graph) ซึ่งการวิเคราะห์ครั้งนี้จะหาสมการสถานะจากการหาสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งจากแบบจำลองของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ได้ทำไว้แล้ว

## 4.1 ตัวแปรสถานะ

การกำหนดตัวแปรสถานะสำหรับระบบหนึ่ง ๆ นั้น สามารถกำหนดได้มากมายหลายกลุ่ม ซึ่งตัวแปรสถานะแต่ละตัวก็มีระดับความยากง่ายต่อการสร้างสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งที่แตกต่างกัน แต่ทางด้านกายภาพแล้วตัวแปรสถานะที่จะเลือกนำมาทำการวิเคราะห์นั้น ควรจะต้องเป็นตัวแปรที่สามารถวัดค่าได้จริงจากระบบในขณะที่ทำงานอยู่ เพื่อที่จะสังเกตุเหตุการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นได้ และควรจะเป็นตัวแปรที่ต้องการศึกษาถึงผลกระทบกับระบบด้วย

ในกรณีของการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงไดนามิคของระบบไฟฟ้ากำลังนั้น อาจจะกำหนดตัวแปรสถานะได้เป็นจำนวนถึง 12 ตัวแปร ต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้ต้องการสมการสถานะถึง 12 สมการ[17,18] ถ้าเป็นระบบไฟฟ้าที่ใหญ่พอสมควรก็จะทำให้ต้องใช้เวลาในการคำนวณค่าต่าง ๆ นานมาก ดังนั้น จึงควรที่จะต้องพิจารณาเลือกจำนวนและชนิดของตัวแปรสถานะเท่าที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์ให้เหมาะสมกับระบบที่กำลังทำการศึกษาอยู่ เพื่อที่จะได้ผลการศึกษาใกล้เคียงความจริงและมีความแม่นยำ แต่ใช้เวลาในการคำนวณน้อย

ในวิทยานิพนธ์นี้ จะเลือกใช้ตัวแปรสถานะ 8 ตัว คือ มุมโรเตอร์ ($\delta$) ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ ($\omega$) แรงดันด้านออกของอุปกรณ์ปรับแรงดัน ($V_R$) แรงดันของขดลวดสนาม (field voltage, $E_{FD}$) แหล่งจ่ายแรงดันของวงจรสมมูลในช่วงทรานเซียนต์ หรือซับทรานเซียนต์ ($E'_q$ หรือ $E''_q$) แรงดันด้านออกของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ ($V_S$) และแรงดันภายในอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ ($V_1$ และ $V_2$) มาใช้ในการวิเคราะห์

การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงไดนามิค จะสามารถพิจารณาผลของการวิเคราะห์ได้จากการเกิดออสซิเลชั่นที่ความถี่ต่ำของโรเตอร์ ซึ่งเป็นออสซิเลชั่นที่เกิดจากโมด เชิงกล-ไฟฟ้า ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความถี่โดยตรง ซึ่งเป็นตัวแปรที่สามารถวัดค่าได้ และมีผลกระทบต่อระบบที่กำลังศึกษามากที่สุด นอกจากนั้น $V_S$ จะเป็นตัวแปรที่มีผลกระทบต่อระบบมากเช่นกัน เพราะการปรับแต่งค่าตัวแปรของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์จะมีผลทำให้ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งหมายถึงเสถียรภาพเชิงไดนามิคของระบบก็เปลี่ยนไปด้วย

นอกจากนั้น ในการคำนวณเพื่อกำหนดตำแหน่งของขั้ว (pole - placement) ควรจะเลือกตัวแปรสถานะที่เป็นอนุพันธ์กับตัวแปรสถานะตัวอื่นเพื่อที่จะทำให้ค่าตัวแปรของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ที่คำนวณออกมานั้น ทำให้ระบบทำงานได้ราบเรียบมากขึ้น[26] จึงเลือกมุมโรเตอร์ซึ่งเป็นอนุพันธ์กับความเร็วโรเตอร์มาเป็นตัวแปรสถานะ และเลือก $V_R$ กับ $E_{FD}$ ซึ่งเป็นตัวแปรของระบบเอกไซเตชั่น และเป็นอนุพันธ์กันมาเป็นตัวแปรสถานะด้วย พร้อมทั้งได้เอาแหล่งจ่ายแรงดันของวงจรสมมูลในแนวแกนตั้งฉาก ซึ่งเป็นตัวแปรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาใช้ด้วย

จากตัวแปรสถานะทั้งหมด จะเขียนเป็นเวคเตอร์สถานะ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เครื่อง ได้ดังนี้

$$\mathbf{X} = [\,\Delta\omega \quad \Delta\delta \quad \Delta E'_q \quad \Delta E_{FD} \quad \Delta V_R \quad \Delta V_1 \quad \Delta V_2 \quad \Delta V_S]^T \qquad (4.3.ก)$$

หรือ

$$\mathbf{X} = [\,\Delta\omega \quad \Delta\delta \quad \Delta E''_q \quad \Delta E_{FD} \quad \Delta V_R \quad \Delta V_1 \quad \Delta V_2 \quad \Delta V_S]^T \qquad (4.3.ข)$$

แต่ในที่นี้เพื่อความสะดวกจะละเลยการเขียน Δ ออกไป

## 4.2 สมการสถานะของความเร็วโรเตอร์

จากรูปที่ 3.16 จะสามารถหาความสัมพันธ์ของความเร็วโรเตอร์ได้ดังนี้

$$\omega = (T_M + T_X - T_e)\ (1 / (D + 2Hs)) \qquad (4.4)$$

โดย

$$T_M = - G_{GOV}(s) * \omega \qquad (4.5)$$

ซึ่งการวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้จะตัดผลของ $T_X$ และ $G_{GOV}$ ออกไป เพราะเป็นอุปกรณ์ที่สามารถตัดออกไปได้ในการพิจารณาออสซิเลชั่นเชิงกลไฟฟ้าซึ่งจะมีความถี่อยู่ในช่วง 0.5-3 เฮิร์ทซ์[10] และการคำนวณจะได้ไม่มีความยุ่งยากมากเกินไป ดังนั้นจะได้

$$\omega = - T_e\ (1 / (D + 2Hs)) \qquad (4.6)$$

$$D\omega + 2H\dot{\omega} = - T_e \qquad (4.7)$$

$$\dot{\omega} = - T_e / 2H - \omega * D/2H \qquad (4.8)$$

จาก

$$T_e = I_d V_d + I_q V_q \qquad (4.9)$$

ในแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบที่ 2 และ 4 ถ้าให้ $X'_d = X'_q$ จะได้[17]

$$T_e = I_d E'_d + I_q E'_q \qquad (4.10)$$

ทำให้เป็นเชิงเส้นจะได้[17]

$$T_e = I_{d0}\,E'_d + I_{q0} E'_q + E'_{d0} I_d + E'_{q0} I_q \qquad (4.11)$$

โดยค่า $I_{d0}$, $I_{q0}$, $E'_{d0}$ และ $E'_{q0}$ เป็นค่าที่สภาวะเริ่มต้น

ในแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบที่ 3 และ 5 ถ้าให้ $x''_d = x''_q$ จะได้[17]

$$T_e = I_d E''_d + I_q E''_q \qquad (4.12)$$

ทำให้เป็นเชิงเส้นจะได้[17]

$$T_e = I_{d0} E''_d + I_{q0} E''_q + E''_{d0} I_d + E''_{q0} I_q \qquad (4.13)$$

โดยที่ $I_{d0}$, $I_{q0}$, $E''_{d0}$ และ $E''_{q0}$ เป็นค่าที่สภาวะเริ่มต้น

แทนค่าสมการ (4.11) หรือ (4.13) ใน (4.8) โดยเลือกใช้ตามชนิดของแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะได้สมการสภาวะของความเร็วโรเตอร์ดังนี้

$$\dot{\omega} = (-D/2H)\,\omega - (1/2H)\,(I_{d0}\,E'_d + I_{q0}\,E'_q + E'_{d0}\,I_d + E'_{q0}\,I_q) \quad (4.14.ก)$$

หรือ

$$\dot{\omega} = (-D/2H)\,\omega - (1/2H)\,(I_{d0}\,E''_d + I_{q0}\,E''_q + E''_{d0}\,I_d + E''_{q0}\,I_q) \quad (4.14.ข)$$

4.3 <u>สมการสถานะของมุมโรเตอร์</u>

จากรูปที่ 3.16 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ จะหาความสัมพันธ์ของมุมโรเตอร์ได้ดังนี้

$$\delta = (\omega_B/s) * \omega \quad (4.15)$$

ดังนั้น

$$\dot{\delta} = \omega_B * \omega \quad (4.16)$$

จะได้สมการสถานะของมุมโรเตอร์ตามสมการที่ (4.16) $\omega_B$ คือ ความเร็วเชิงมุมฐานของโรเตอร์

$$\omega_B = 2\pi * \text{ความถี่ของระบบไฟฟ้า} \quad (4.17)$$

4.4 <u>สมการสถานะของแหล่งจ่ายแรงดันของวงจรสมมูลในแนวแกนตั้งฉากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า</u>

4.4.1 <u>แบบจำลองชนิดที่ 2 และ 4</u>

จากรูปที่ 3.6 ซึ่งเป็นบล็อกไดอะแกรม แสดงความสัมพันธ์ในแนวแกนตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 2 และ 4 จะได้

$$I_{FD} = I_d\,(x_d - x'_d) + E'_q\,(1 + F_S) \quad (4.18)$$

$$E'_q = (E_{FD} - I_{FD}) / sT'_{d0} \quad (4.19)$$

แทนค่า (4.18) ใน (4.19)

$$E'_q (sT'_{d0} + 1 + F_S) = E_{FD} - I_d (x_d - x'_d) \quad (4.20)$$

$$T'_{d0} \dot{E}'_q + E'_q + F_S E'_q = E_{FD} - I_d (x_d - x'_d) \quad (4.21)$$

$$\dot{E}'_q = ((1 + F_S) E'_q + E_{FD} - I_d (x_d - x'_d)) / T'_{d0} \quad (4.22)$$

จากตารางที่ 3.3 จะได้

$$x_d - x'_d = C_{3D} \quad (4.23)$$

ในที่นี้จะละเลยผลของการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก เพราะพิจารณาว่าค่ารีแอคแตนซ์และค่าคงตัวทางเวลาทั้งแบบธรรมดา แบบทรานเซียนต์และแบบซับทรานเซียนต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นได้มีการปรับผลของการอิ่มตัวที่สภาวะการทำงานนั้นๆมาแล้ว[1] ดังนั้นจะได้ $F_S = 0$ และแทน (4.23) ใน (4.22) จะได้ สมการสถานะดังนี้

$$\dot{E}'_q = (E'_q + E_{FD} - C_{3D} I_d) / T'_{d0} \quad (4.24)$$

4.4.2 <u>แบบจำลองชนิดที่ 3 และ 5</u>

จากรูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ในแนวแกนตรง ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 และ 5 จะได้

$$E''_q = \lambda_{SD} C_{7D} + \lambda_{FD} C_{6D} \quad (4.25)$$

$$\lambda_{FD} = (E_{FD} - I_{FD}) / sT_{FD0} \quad (4.26)$$

$$I_{FD} = C_{3D} I_d + \lambda_{FD} C_{1D} - \lambda_{SD} C_{2D} \quad (4.27)$$

แทน (4.27) ใน (4.26)

$$\lambda_{FD} = (E_{FD} - C_{3D} I_d - \lambda_{FD} C_{1D} + \lambda_{SD} C_{2D}) / sT_{FD0} \quad (4.28)$$

$$\lambda_{SD} = - I_{SD} / sT_{SD0} \quad (4.29)$$

$$- I_{SD} = - C_{5D} I_d - \lambda_{SD} C_{1D} + \lambda_{FD} C_{4D} \quad (4.30)$$

แทน (4.30) ใน (4.29)

$$\lambda_{SD} = (- C_{5D} I_d - \lambda_{SD} C_{1D} + \lambda_{FD} C_{4D}) / sT_{SD0} \quad (4.31)$$

$$\dot{\lambda}_{SD} = (- C_{5D} I_d - \lambda_{SD} C_{1D} + \lambda_{FD} C_{4D}) / T_{SD0} \quad (4.32)$$

แทน (4.28) ใน (4.25)

$$E''_q = \lambda_{SD} C_{7D} + (C_{6D} E_{FD} - C_{3D} C_{6D} I_d - C_{1D} C_{6D} \lambda_{FD} + C_{2D} C_{6D} \lambda_{SD}) / sT_{FD0} \quad (4.33)$$

$$\dot{E}''_q = C_{7D}\dot{\lambda}_{SD} + (C_{6D}E_{FD} - C_{3D}C_{6D}I_d - C_{1D}C_{6D}\lambda_{FD} + C_{2D}C_{6D}\lambda_{SD})/T_{FD0} \quad (4.34)$$

แทน (4.32) ใน (4.34)

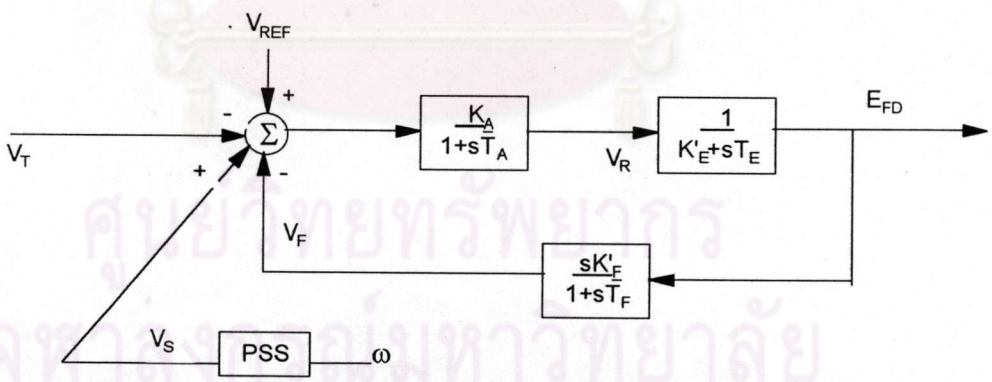
$$\dot{E}''_q = C_{7D}(-C_{5D}I_d - C_{1D}\lambda_{SD} + C_{4D}\lambda_{FD})/T_{SD0} + (C_{6D}E_{FD} - C_{3D}C_{6D}I_d - C_{1D}C_{6D}\lambda_{FD} + C_{2D}C_{6D}\lambda_{SD})/T_{FD0} \quad (4.35)$$

$$\dot{E}''_q = (C_{6D}/T_{FD0})E_{FD} + (-C_{5D}C_{7D}/T_{SD0} - C_{3D}C_{6D}/T_{FD0})I_d + (C_{4D}C_{7D}/T_{SD0} - C_{1D}C_{6D}/T_{FD0})\lambda_{FD} + (-C_{1D}C_{7D}/T_{SD0} + C_{2D}C_{6D}/T_{FD0})\lambda_{SD} \quad (4.36)$$

จะได้สมการสถานะตาม (4.36)

## 4.5 สมการสถานะของระบบเอกไซเตชั่น

จากรูปที่ 3.13 แบบจำลองทั่วไปของระบบเอกไซเตชั่น และตารางที่ 3.6 ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของระบบเอกไซเตชั่นชนิดต่าง ๆ โดยจะละเลยผลของค่า $T_B$, $T_C$ และผลของการอิ่มตัวเพราะปกติจะมีค่าน้อยมาก[14,17] ดังนั้นจึงสามารถจัดแบบจำลองได้ใหม่ ตามรูปที่ 4.1




**รูปที่ 4.1** แบบจำลองเชิงเส้นทั่วไปของระบบเอกไซเตชั่นที่จัดใหม่

ซึ่งสามารถนำมาหาสมการสถานะได้ดังนี้

$$V_R = (V_S - V_t - V_F + V_{REF})K_A/(1 + sT_A) \quad (4.37)$$

$$V_R + T_A\dot{V}_R = K_A(V_S - V_t - V_F + V_{REF}) \quad (4.38)$$

$$\dot{V}_R = (K_A/T_A)\, V_S - (1/T_A)\, V_R - (K_A/T_A)V_t - (K_A/T_A)V_F + (K_A/T_A)\, V_{REF} \quad (4.39)$$

$$E_{FD} = V_R/(K'_E + sT_E) \quad (4.40)$$

$$K'_E\, E_{FD} + T_E\, \dot{E}_{FD} = V_R \quad (4.41)$$

$$\dot{E}_{FD} = (1/T_E)V_R - (K'_E/T_E)\, E_{FD} \quad (4.42)$$

จะได้สมการสถานะตาม (4.39) และ (4.42) ถ้าแทนค่าจากตารางที่ 3.6 ก็จะได้สมการสถานะของระบบเอกไซเตชั่นชนิดต่าง ๆ จะมีในกรณีพิเศษ คือ ระบบเอกไซเตชั่นชนิดที่ 6 ที่ค่า $T_E = 0$ และ $K'_E = 1$ ดังนั้น จะทำให้ได้

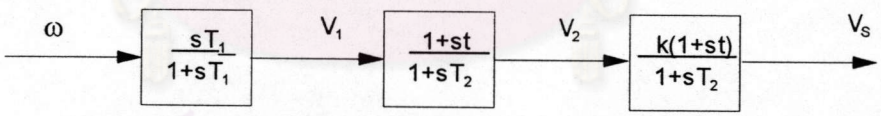
$$E_{FD} = V_R \quad (4.43)$$

ดังนั้น

$$\dot{E}_{FD} = \dot{V}_R \quad (4.44)$$

## 4.6 สมการสถานะของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์

จากแบบจำลองของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ตามรูปที่ 3.10 จะสามารถจัดรูปได้ใหม่เป็นตามรูปที่ 4.2




**รูปที่ 4.2** แบบจำลองของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ที่จัดรูปใหม่

จากรูปที่ 4.2 จะสามารถนำมาหาสมการสถานะได้ดังนี้

$$V_1 = \omega\, sT_1 / (1 + sT_1) \quad (4.45)$$

$$V_1 + T_1\dot{V}_1 = T_1\dot{\omega} \quad (4.46)$$

$$\dot{V}_1 = \dot{\omega} - (1/T_1)\, V_1 \quad (4.47)$$

$$V_2 = ((1 + st)/(1 + sT_2))\, V_1 \quad (4.48)$$

$$V_2 + T_2\dot{V}_2 = V_1 + t\dot{V}_1 \quad (4.49)$$

$$\dot{V}_2 = (t/T_2)\, \dot{V}_1 + (1/T_2)\, V_1 - (1/T_2)\, V_2 \quad (4.50)$$

$$V_S = (k\,(1 + st)/(1 + sT_2))\, V_2 \quad (4.51)$$

$$V_S + T_2 \dot{V}_S = kV_2 + kt \dot{V}_2 \quad (4.52)$$

$$T_2 \dot{V}_S = kt \dot{V}_2 + kV_2 - V_S \quad (4.53)$$

$$\dot{V}_S = (kt/T_2) \dot{V}_2 + (k/T_2) V_2 - (1/T_2) V_S \quad (4.54)$$

จะได้สมการสถานะตามสมการ (4.47), (4.50) และ (4.54) โดยที่ค่า k และ t เป็นค่าตัวแปรของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ที่สามารถปรับค่าได้ตามความเหมาะสม ซึ่งจะต้องทำการคำนวณค่าที่เหมาะสมออกมา เพื่อให้ได้จุดทำงานตามที่ต้องการ ส่วน $T_1$ และ $T_2$ เป็นค่าคงตัวทางเวลาของอุปกรณ์สเตบิไลเซอร์ ที่ถูกกำหนดหรือปรับค่าไว้แล้ว

## 4.7 การหา เมตริกซ์ A และ เมตริกซ์ B

จากหัวข้อ 4.2 ถึง 4.6 เราจะได้สมการสถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง ซึ่งสามารถนำมาเขียนเรียบเรียงใหม่โดยการตัดตัวแปรที่ไม่ได้เลือกให้เป็นตัวแปรสถานะออกไป และจะใส่เครื่องหมาย i ไว้ที่ตัวแปรแต่ละตัว ซึ่งจะหมายถึงว่าเป็นตัวแปรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i ในกรณีที่ศึกษาถึงระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายเครื่อง

$$\dot{\omega}_i = (-D_i/2H_i)\,\omega_i - (I_{q0i}/2H_i)\,E'_{qi} - (E'_{d0i}/2H_i)\,I_{di} - (E'_{q0i}/2H_i)\,I_{qi} \quad (4.55.ก)$$

$$\dot{\omega}_i = (-D_i/2H_i)\,\omega_i - (I_{q0i}/2H_i)\,E''_{qi} - (E''_{d0i}/2H_i)\,I_{di} - (E''_{q0i}/2H_i)\,I_{qi} \quad (4.55.ข)$$

$$\dot{\delta}_i = \omega_B\,\omega_i \quad (4.56)$$

$$\dot{E}'_{qi} = (1/T'_{d0i})\,E'_{qi} + (1/T'_{d0i})\,E_{FDi} - (C_{3D}/T'_{d0i})\,I_{di} \quad (4.57.ก)$$

$$\dot{E}''_{qi} = (C_{6Di}/T_{FD0i})\,E_{FDi} + (-C_{5Di}\,C_{7Di}/T_{SD0i} - C_{3Di}C_{6Di}/T_{FD0i})\,I_{di} \quad (4.57.ข)$$

$$\dot{V}_{Ri} = -(1/T_{Ai})\,V_{Ri} + (K_{Ai}/T_{Ai})\,V_{Si} - (K_{Ai}/T_{Ai})\,V_{ti} + (K_{Ai}/T_{Ai})\,V_{REF} \quad (4.58)$$

$$\dot{E}_{FDi} = (1/T_{Ei})\,V_{Ri} - (K'_{Ei}/T_{Ei})\,E_{FDi} \quad (4.59)$$

$$\dot{V}_{1i} = \dot{\omega}_i - (1/T_{1i})\,V_{1i} \quad (4.60)$$

$$\dot{V}_{2i} = (t_i/T_{2i})\,\dot{V}_{1i} + (1/T_{2i})\,V_{1i} - (1/T_{2i})\,V_{2i} \quad (4.61)$$

$$\dot{V}_{Si} = (k_i t_i/T_{2i})\,\dot{V}_{2i} + (k_i/T_{2i})\,V_{2i} - (1/T_{2i})\,V_{Si} \quad (4.62)$$

จะเห็นได้ว่ามีตัวแปร $I_{di}$, $I_{qi}$ และ $V_{ti}$ ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ระหว่างระบบไฟฟ้ากำลังกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง และมีความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องในระบบด้วย จึงต้องทำการหาสมการความสัมพันธ์ของ $I_{di}$, $I_{qi}$ และ $V_{ti}$ กับตัวแปร

สถานะออกมา เพื่อที่จะได้นำไปแทนที่ในสมการ (4.55.ก) ถึง (4.58) เพื่อขจัดตัวแปรที่ไม่ใช่ตัวแปรสถานะออกไป ส่วนสมการสถานะตามสมการ (4.60) ถึง (4.62) จะสามารถคำนวณได้ หลังจากที่ได้หา $\dot{\omega}_i$ $\dot{V}_{1i}$ และ $\dot{V}_{2i}$ แล้วตามลำดับ ส่วนตัวแปร $V_{REF}$ เป็นสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับระบบเท่านั้น สมการที่จะแสดงต่อไปนี้ถ้าสัญลักษณ์แสดงด้วยตัวหนา จะหมายถึงว่าเป็นเมตริกซ์ของตัวแปรนั้น ส่วนสัญลักษณ์ใดที่แสดงด้วยตัวอักษรธรรมดา แสดงว่าเป็นตัวแปรธรรมดาที่เป็นสเกลาร์

จาก

$$V_{ti}^2 = E_{di}^2 + E_{qi}^2 \tag{4.63}$$

ทำให้เป็นสมการเชิงเส้นจะได้[17]

$$V_{ti} = (E_{d0i}/V_{t0i})\, E_{di} + (E_{q0i}/V_{t0i})\, E_{qi} \tag{4.64}$$

จัดในรูปเมตริกซ์จะได้

$$V_{ti} = [E_{d0i}/V_{t0i} \quad E_{q0i}/V_{t0i}]\, [E_{di} \quad E_{qi}]^T \tag{4.65}$$

$$V_{ti} = [E_{d0i}/V_{t0i} \quad E_{q0i}/V_{t0i}]\, E_{mi} \tag{4.66}$$

และจากแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละแบบ จะสามารถหาความสัมพันธ์ของ $E_d$ และ $E_q$ ได้ดังนี้[1]

<u>แบบที่ 2</u>

$$E_d = -R_A I_d + X_q I_q \tag{4.67}$$

$$E_q = -X'_d I_d - R_A I_q + E'_q \tag{4.68}$$

<u>แบบที่ 3 และ 5</u>

$$E_d = -R_A I_d + X''_q I_q + E''_d \tag{4.69}$$

$$E_q = -X''_d I_d - R_A I_q + E''_q \tag{4.70}$$

<u>แบบที่ 4</u>

$$E_d = -R_A I_d + X'_q I_q + E'_d \tag{4.71}$$

$$E_q = -X'_d I_d - R_A I_q + E'_q \tag{4.72}$$

โดยสามารถจัดให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\mathbf{E}_{Mi} = \mathbf{rx}\,\mathbf{I}_{Mi} + \mathbf{E'}_{Mi} \tag{4.73}$$

โดย

$$\mathbf{E}_{Mi} = [\,E_{di} \quad E_{qi}\,]^T \tag{4.74}$$

$$\mathbf{I}_{Mi} = [\,I_{di} \quad I_{qi}\,]^T \tag{4.75}$$

และ $\mathbf{rx}$ , $\mathbf{E'}_{Mi}$ มีค่าตามแสดงในตารางที่ 4.1

| แบบจำลองชนิดที่ | 2 | 3 และ 5 | 4 |
|---|---|---|---|
| $\mathbf{rx}$ (1, 1) | $-R_A$ | $-R_A$ | $-R_A$ |
| $\mathbf{rx}$ (1, 2) | $x_q$ | $x''_q$ | $x'_q$ |
| $\mathbf{rx}$ (2, 1) | $-x'_d$ | $-x''_d$ | $-x'_d$ |
| $\mathbf{rx}$ (2, 2) | $-R_a$ | $-R_A$ | $-R_A$ |
| $\mathbf{E'}_{Mi}$ (1, 1) | 0 | $E''_d$ | $E'_d$ |
| $\mathbf{E'}_{Mi}$ (2, 1) | $E'_q$ | $E''_q$ | $E'_q$ |

**ตารางที่ 4.1** ค่าของ $\mathbf{rx}$ และ $\mathbf{E'}_{Mi}$

แทน (4.73) ใน (4.66)

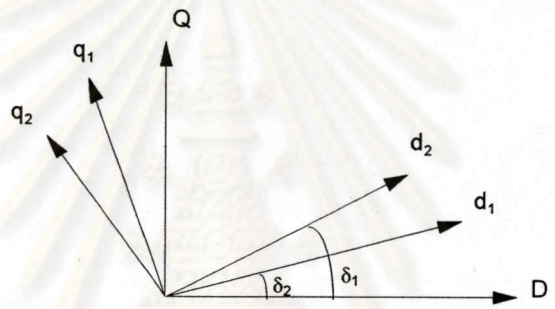
$$\mathbf{V}_{ti} = [E_{d0i}/V_{t0i} \quad E_{q0i}/V_{t0i}]\ \mathbf{rx}\ \mathbf{I}_{Mi} + [E_{d0i}/V_{t0i} \quad E_{q0i}/V_{t0i}]\ \mathbf{E'}_{Mi} \tag{4.76}$$

แทน (4.76) ใน (4.58) และละเลยตัวแปรที่ไม่ใช่ตัวแปรสถานะ จะได้

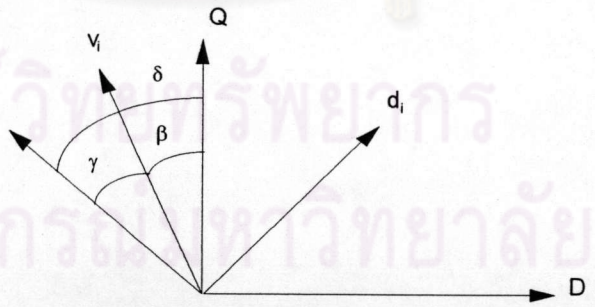
$$\dot{V}_{Ri} = -(K_{Ai}\,E_{q0i}/V_{t0i}\,T_{Ai})\,E'_{qi} - (1/T_{Ai})\,V_{Ri} + (K_{Ai}/T_{Ai})\,V_{Si} - (K_{Ai}/T_{Ai})\,[E_{d0i}/V_{t0i}\;E_{q0i}/V_{t0i}]\ \mathbf{rx}\ \mathbf{I}_{Mi} + (K_{Ai}/T_{Ai})\,V_{REF} \tag{4.77}$$

ทำให้สมการสถานะ (4.55.ก) (4.55.ข) (4.56) (4.57.ก) (4.57.ข) (4.59) และ (4.77) มีตัวแปร $I_{di}$ และ $I_{qi}$ เท่านั้นที่ไม่ใช่ตัวแปรสถานะ จึงจะทำการหาความสัมพันธ์ของ $I_{di}$ และ $I_{qi}$ กับตัวแปรสถานะ ซึ่งจะได้มาจากสมการโนด (node equation) ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ทำให้เป็นเชิงเส้น

เนื่องจากค่ากระแสและแรงดันของสมการสถานะเป็นการคำนวณเทียบกับแกนอ้างอิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง จึงต้องทำการปรับค่ากระแสและแรงดันให้เทียบกับแกนอ้างอิงของทั้งระบบ โดยให้ค่าตัวแปรใด ๆ ที่กำกับด้วย M จะเป็นตัวแปรที่เทียบกับแกนอ้างอิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง และค่าตัวแปรที่กำกับด้วย N จะเป็นตัวแปรที่เทียบกับแกนอ้างอิงของทั้งระบบ ในสภาวะอยู่ตัวแกนอ้างอิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่อง และแกนอ้างอิงของทั้งระบบจะหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมเท่ากัน ดังนั้น จะได้ค่า $\delta_i$ ซึ่งเป็นมุมระหว่างแกนอ้างอิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับแกนอ้างอิงของทั้งระบบหรือมุมของโรเตอร์ ตามรูปที่ 4.3 โดยให้แกน DQ เป็นแกนอ้างอิงของระบบ และแกน $dq_i$ เป็นแกนอ้างอิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใด ๆ[16,17]




**รูปที่ 4.3** มุมระหว่างแกนอ้างอิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับแกนอ้างอิงของระบบจากสมการโนด




**รูปที่ 4.4** มุมระหว่างแกนอ้างอิงของระบบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและแรงดันขั้ว

จากรูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงมุมระหว่างแกนอ้างอิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (dq) กับแกนอ้างอิงของระบบ (DQ) กับแรงดันขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใด ๆ จะได้ว่า

$$\delta = \gamma + \beta \qquad (4.78)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่ $\gamma$ คือ torque angle ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะได้[1]

$$\tan\gamma = (PX_{qi} - Q R_{Ai}) / (V^2_i + QX_{qi} + PR_{Ai}) \quad (4.79)$$

P คือ กำลังไฟฟ้าจริงของโหลด (วัตต์)

Q คือ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของโหลด (วาร์)

V คือ แรงดันของระบบส่ง (โวลท์)

$\beta$ คือ เฟสของแรงดันขั้วเทียบกับโนดอ้างอิง

และจาก[16,17]

$$\mathbf{I}_N = \mathbf{Y}_N \mathbf{E}_N \quad (4.80)$$

โดย $\mathbf{Y}_N$ คือ เมตริกซ์ของ $\mathbf{Y}_{bus}$ ที่ลดรูปให้เหลือแต่บัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมโยงอยู่ตามสมการ (4.81)[17]

$$\mathbf{Y}_N = (\mathbf{Y}_{nn} - \mathbf{Y}_{rr} \mathbf{Y}^{-1}_{rr} \mathbf{Y}_{rn}) \quad (4.81)$$

โดยที่ n คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ และ r คือจำนวนโนดที่เหลือและ

$$\mathbf{Y}_{bus} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{Y}_{nn} & \mathbf{Y}_{nr} \\ \hline \mathbf{Y}_{rn} & \mathbf{Y}_{rr} \end{array}\right] \quad (4.82)$$

และจากการปรับค่าจากแกนอ้างอิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องไปเป็นแกนอ้างอิงของระบบจะได้[16,17]

$$\mathbf{E}_N = \mathbf{T}\mathbf{E}_M \quad (4.83)$$

$$\mathbf{E}_N = [E_{D1}\ E_{Q1} \ldots\ldots\ldots E_{DN}\ E_{QN}]^T \quad (4.84)$$

$$\mathbf{E}_N = [E_{d1}\ E_{q1} \ldots\ldots\ldots E_{dn}\ E_{qn}]^T \quad (4.85)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\delta_{01} & -\sin\delta_{01} & & & 0 \\ \sin\delta_{01} & \cos\delta_{01} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \cos\delta_{0n} & -\sin\delta_{0n} \\ 0 & & & \sin\delta_{0n} & \cos\delta_{0n} \end{bmatrix} \quad (4.86)$$

ทำสมการ (4.83) ให้เป็นเชิงเส้นจะได้

$$\mathbf{E}_N = \mathbf{T}\,\mathbf{E}_M + \mathbf{II}\,\boldsymbol{\delta} \tag{4.87}$$

โดย

$$\mathbf{II} = \begin{bmatrix} -E_{d01}\sin\delta_{01} & -E_{q01}\cos\delta_{01} & & 0 \\ E_{d01}\cos\delta_{01} & -E_{q01}\sin\delta_{01} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & -E_{d0n}\sin\delta_{0n} & -E_{q0n}\cos\delta_{n} \\ & & -E_{q0n}\sin\delta_{0n} & -E_{q0n}\sin\delta_{0n} \end{bmatrix} \tag{4.88}$$

$$\boldsymbol{\delta} = [\delta_1 \ldots\ldots \delta_n]^T \tag{4.89}$$

จากความสัมพันธ์[16,17]

$$\mathbf{I}_M = \mathbf{T}^t\,\mathbf{I}_N \tag{4.90}$$

ทำให้เป็นเชิงเส้นจะได้[16]

$$\mathbf{I}_M = \mathbf{T}^t\,\mathbf{I}_N + \mathbf{JJ}\,\boldsymbol{\delta} \tag{4.91}$$

โดย

$$\mathbf{JJ} = \begin{bmatrix} I_{q01} & & 0 \\ -I_{d01} & \ddots & \\ & & I_{q0n} \\ 0 & & -I_{d0n} \end{bmatrix} \tag{4.92}$$

แทน (4.80) ใน (4.91) จะได้

$$\mathbf{I}_M = \mathbf{T}^t\,\mathbf{Y}_N\,\mathbf{E}_N + \mathbf{JJ}\,\boldsymbol{\delta} \tag{4.93}$$

แทน (4.87) ใน (4.93)

$$\mathbf{I}_M = \mathbf{T}^t\,\mathbf{Y}_N\,\mathbf{T}\,\mathbf{E}_M + (\mathbf{T}^t\,\mathbf{Y}_N\,\mathbf{II} + \mathbf{JJ})\,\boldsymbol{\delta} \tag{4.94}$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูป

$$\mathbf{I}_M = \mathbf{Y}_M\,\mathbf{E}_M + \mathbf{K}\,\boldsymbol{\delta} \tag{4.95}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมการ (4.95) เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ขั้วและมุมโรเตอร์ โดยคิดที่แกนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง ดังนั้นถ้าทำสมการ (4.73), (4.74) และ (4.75) ให้เป็นสมการสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า n เครื่องจะได้

$$\mathbf{E}_M = \mathbf{Rx}\,\mathbf{I}_M + \mathbf{E'}_M \tag{4.96}$$

โดย

$$\mathbf{Rx} = \begin{bmatrix} rx_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & rx_n \end{bmatrix} \tag{4.97}$$

แทน (4.97) ใน (4.96) และแทนลงใน (4.95) จะได้

$$\mathbf{I}_M = \mathbf{Y}_M\,\mathbf{Rx}\,\mathbf{I}_M + \mathbf{Y}_M\,\mathbf{E'}_M + \mathbf{K}\,\delta \tag{4.98}$$

$$(\mathbf{I} - \mathbf{Y}_M\,\mathbf{Rx})\,\mathbf{I}_M = \mathbf{Y}_M\,\mathbf{E'}_M + \mathbf{K}\,\delta \tag{4.99}$$

$$\mathbf{I}_M = (\mathbf{I} - \mathbf{Y}_M\,\mathbf{Rx})^{-1}\,\mathbf{Y}_M\,\mathbf{E'}_M + (\mathbf{I} - \mathbf{Y}_M\,\mathbf{Rx})^{-1}\,\mathbf{K}\,\delta \tag{4.100}$$

$$\mathbf{I}_M = \mathbf{C}\,\delta + \mathbf{D}\,\mathbf{E'}_M \tag{4.101}$$

ซึ่งเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมุมของโรเตอร์ คิดเทียบกับแกนอ้างอิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวแปรสถานะด้วย ดังนั้นจะสามารถปรับสมการสถานะ (4.55.ก) (4.55.ข) (4.56) (4.57.ก) (4.57.ข) (4.59) และ (4.77) ให้มีแต่ตัวแปรสถานะได้โดยการแทนสมการ (4.101) เข้าไป จากสมการสถานะที่ได้จะสามารถนำมาจัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปอย่างง่ายเป็น

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{a}\,\mathbf{X} + \mathbf{b}\,\mathbf{I}_M + \mathbf{BU} \tag{4.102}$$

หรือ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 16891600

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \\ \dot{X}_5 \\ \dot{X}_6 \\ \dot{X}_7 \\ \dot{X}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & & & & & & 0 \\ a_{21} & a_{22} & & & & & & \\ & & \ddots & & & & & \\ & & & \ddots & & & & \\ & & & & \ddots & & & \\ & & & & & \ddots & & \\ 0 & & & & & & a_{77} & a_{78} \\ & & & & & & a_{87} & a_{88} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \\ X_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \\ b_7 \\ b_{81} \end{bmatrix} I_{M(2n\times1)} + B_{(8n\times n)} U_{(n\times1)}$$

(4.103)

$$X_1 = [\omega_1 \ldots\ldots\ldots \omega_n]^T \quad (4.104)$$

$$X_2 = [\delta_1 \ldots\ldots\ldots \delta_n]^T \quad (4.105)$$

$$X_3 = [E'_{q1} \ldots\ldots\ldots E'_{qn}]^T \quad (4.106)$$

$$X_4 = [E_{FD1} \ldots\ldots\ldots V_{FDn}]^T \quad (4.107)$$

$$X_5 = [V_{R1} \ldots\ldots\ldots V_{Rn}]^T \quad (4.108)$$

$$X_6 = [V_{11} \ldots\ldots\ldots V_{1n}]^T \quad (4.109)$$

$$X_7 = [V_{21} \ldots\ldots\ldots V_{2n}]^T \quad (4.110)$$

$$X_8 = [V_{S1} \ldots\ldots\ldots V_{sn}]^T \quad (4.111)$$

$a_{11}$ - $a_{88}$ เป็นเมตริกซ์ย่อยของเมตริกซ์ **a** มีขนาด (n x n)

$b_1$ - $b_8$ เป็นเมตริกซ์ย่อยของเมตริกซ์ **b** มีขนาด (n x 2n)

ให้ $a_{i1}$ - $a_{i8}$ เป็นคอลัมน์เมตริกซ์ของ เมตริกซ์ **a** มีขนาด (8n x n) โดย

โดย $$a = [a_{i1}\ a_{i2}\ a_{i3}\ a_{i4}\ a_{i5}\ a_{i6}\ a_{i7}\ a_{i8}] \quad (4.112)$$

$$a_{i1} = [a_{11}.....a_{81}]^T,\ a_{i2} = [a_{12}.....a_{82}]^T,\ a_{i3} = [a_{13}.....a_{83}]^T,$$

$$a_{i4} = [a_{14}.....a_{84}]^T,\ a_{i5} = [a_{15}.....a_{85}]^T,\ a_{i6} = [a_{16}.....a_{86}]^T$$

$$a_{i7} = [a_{17}.....a_{87}]^T,\ a_{18} = [a_{18}.....a_{88}]^T \quad (4.113)$$

จะเขียนสมการ (4.102) ได้ในรูป

$$\dot{X} = [a_{i1}\ a_{i2}\ a_{i3}\ a_{i4}\ a_{i5}\ a_{i6}\ a_{i7}\ a_{i8}]\, X + b\, I_M + B\, U \quad (4.114)$$

แทน (4.101) ใน (4.114)

$$\dot{\mathbf{X}} = [a_{i1}\ a_{i2}\ a_{i3}\ a_{i4}\ a_{i5}\ a_{i6}\ a_{i7}\ a_{i8}]\,\mathbf{X} + \mathbf{b}\,\mathbf{C}\,\delta + \mathbf{b}\,\mathbf{D}\,\mathbf{E'_M} + \mathbf{B}\,\mathbf{U} \quad (4.115)$$

จะได้

$$\dot{\mathbf{X}} = [a_{i1}\ a_{i2}+bC\ a_{i3}+bD\ a_{i4}\ a_{i5}\ a_{i6}\ a_{i7}\ a_{i8}]\,\mathbf{X} + \mathbf{BU} \quad (4.116)$$

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\,\mathbf{X} + \mathbf{B}\,\mathbf{U} \quad (4.117)$$

โดย

$$\mathbf{A} = [a_{i1}\ a_{i2}+bC\ a_{i3}+bD\ a_{i4}\ a_{i5}\ a_{i6}\ a_{i7}\ a_{i8}] \quad (4.118)$$

$$\mathbf{a_{11}} = \begin{bmatrix} -D_1/2H_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & -D_n/2H_n \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{a_{21}} = \begin{bmatrix} \omega_{B1} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \omega_{Bn} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{a_{31}}, \mathbf{a_{41}}, \mathbf{a_{51}} = [0]$$

$$\mathbf{a_{12}}, \mathbf{a_{22}}, \mathbf{a_{32}}, \mathbf{a_{42}}, \mathbf{a_{52}} = [0]$$

$$\mathbf{a_{13}} = \begin{bmatrix} -I_{q01}/2H_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & -I_{q0n}/2H_n \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{a_{23}}, \mathbf{a_{43}} = [0]$$

$$\mathbf{a_{33}} = \begin{bmatrix} x_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & x_n \end{bmatrix}$$

โดยถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 2 และ 4 , $x = -1/T'_{d0}$

ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 และ 5 , $x = 0$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\mathbf{a}_{53} = \begin{bmatrix} -K_{A1}E_{q01} / T_{A1}V_{t01} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & -K_{An}E_{q0n} / T_{An}V_{t0n} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{a}_{14}, \mathbf{a}_{24}, \mathbf{a}_{54} = [0]$$

$$\mathbf{a}_{34} = \begin{bmatrix} Y_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & Y_n \end{bmatrix}$$

โดยที่ ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 2 และ 4 , $y = 1/T'_{d0}$

ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 และ 5 , $y = C_{6D}/T_{FD0}$

$$\mathbf{a}_{44} = \begin{bmatrix} -K'_{E1} / T_{E1} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & -K'_{En} / T_{En} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{a}_{15}, \mathbf{a}_{25}, \mathbf{a}_{35} = [0]$$

$$\mathbf{a}_{45} = \begin{bmatrix} 1 / T_{E1} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & 1 / T_{En} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{a}_{55} = \begin{bmatrix} -1 / T_{A1} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & -1 / T_{An} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{a}_{16}, \mathbf{a}_{26}, \mathbf{a}_{36}, \mathbf{a}_{46}, \mathbf{a}_{56} = [0]$$

$$\mathbf{a}_{17}, \mathbf{a}_{27}, \mathbf{a}_{37}, \mathbf{a}_{47}, \mathbf{a}_{57} = [0]$$

$$\mathbf{a}_{18}, \mathbf{a}_{28}, \mathbf{a}_{38}, \mathbf{a}_{48} = [0]$$

$$\mathbf{a}_{58} = \begin{bmatrix} K_{A1} / T_{A1} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & K_{An} / T_{An} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{a}_{61} - \mathbf{a}_{88}$ จะหาได้ตามสมการสถานะ (4.60) (4.61) และ (4.62)

$\mathbf{a}_{61} - \mathbf{a}_{65}$ = $\mathbf{a}_{11} - \mathbf{a}_{15}$ ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\mathbf{a}_{66} = \begin{bmatrix} 1/T_{11} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & 1/T_{1n} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{a}_{67}, \mathbf{a}_{68} = [0]$$

$$\mathbf{a}_{71} - \mathbf{a}_{75} = (\mathbf{a}_{66} + \mathbf{a}_{65}) \begin{bmatrix} t_1/T_{21} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & t_n/T_{2n} \end{bmatrix} \text{ ตามลำดับ}$$

$$\mathbf{a}_{76} = \mathbf{a}_{66} \begin{bmatrix} t_1/T_{21} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & t_n/T_{2n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/T_{21} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & 1/T_{2n} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{a}_{77} = \begin{bmatrix} -1/T_{21} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & -1/T_{2n} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{a}_{78} = [0]$$

$$\mathbf{a}_{81} - \mathbf{a}_{86} = (\mathbf{a}_{71} - \mathbf{a}_{77}) \begin{bmatrix} k_1t_1/T_{21} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & k_nt_n/T_{2n} \end{bmatrix} \text{ ตามลำดับ}$$

$$\mathbf{a}_{87} = \mathbf{a}_{77} \begin{bmatrix} k_1t_1/T_{21} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & k_nt_n/T_{2n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1/T_{21} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & k_n/T_{2n} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{a}_{88} = \begin{bmatrix} -1/T_{21} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & -1/T_{2n} \end{bmatrix}$$

และตามสมการ (4.44) ในกรณีที่แบบจำลองของระบบเอกไซเตชั่นเป็นชนิดที่ 6 สมการสถานะ (4.59) จะเป็น

$$\dot{E}_{FDi} = -(K_{Ai} E_{q0i}/V_{t0i} T_{Ai}) E'_{qi} - (1/T_{Ai}) E_{FD} + (K_{Ai}/T_{Ai}) V_{si} - (K_{Ai}/T_{Ai}) [E_{d0}i/V_{t0i} E_{q0i}/V_{t0i}] \mathbf{rx}_i I_{Mi} + (K_{Ai}/T_{Ai}) V_{REF} \quad (4.119)$$

ดังนั้น จะต้องปรับ $\mathbf{a}_{41} - \mathbf{a}_{48}$ ให้ถูกต้องตามสมการ (4.119)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

และเมตริกซ์ b จะมีค่าดังนี้

$$\mathbf{b}_1 = \begin{bmatrix} -E'_{d01}/2H_1 & -E'_{q01}/2H_1 & & 0 \\ & & \ddots & \\ 0 & & & -E'_{d0n}/2H_n \quad -E'_{q0n}/2H_n \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b}_2 , \mathbf{b}_4 , \mathbf{b}_6 , \mathbf{b}_7 , \mathbf{b}_8 = [0]$$

$$\mathbf{b}_3 = \begin{bmatrix} z_1 & 0 & & 0 \\ & & \ddots & \\ 0 & & & z_n \quad 0 \end{bmatrix}$$

โดยถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 2 และ 4 , $z = -C_{3D}/T'_{d0}$

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ 3 และ 5 , $z = -(C_{5D}C_{7D}/T_{SD0}) - (C_{3D}\,C_{6D}/T_{FD0})$

$$\mathbf{b}_5 \begin{bmatrix} -K_{A1}E_{d01}/T_{A1}V_{t01} & -K_{A1}E_{q01}/T_{A1}V_{t01} & & 0 \\ & & \ddots & \\ 0 & & & -K_{An}E_{d0n}/T_{An}V_{t0n} \quad -K_{An}E_{q0n}/T_{An}V_{t0n} \end{bmatrix} [\mathbf{Rx}]$$

และเมตริกซ์ **B** เป็นดังนี้

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0_{(3n\times n)} \\ \hline W_1 & & \\ & \ddots & \\ & & W_n \\ \hline K_{A1}/T_{A1} & & \\ & \ddots & \\ & & K_{An}/T_{An} \\ \hline 0_{(3n\times n)} \end{bmatrix}$$

โดยที่ถ้าแบบจำลองของระบบเอกไซเตชั่นเป็นชนิดที่ 6 , $W = K_{Ai}/T_{Ai}$

ถ้าแบบจำลองของระบบเอกไซเตชั่นเป็นชนิดที่ 1,2,3, $W = 0$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย