

บทที่ 4

การประยุกต์ใช้แบบจำลอง

4.1 คำนำ

ในเนื้อหาของบทที่ 3 ได้กล่าวถึงแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและแบบของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการศึกษานี้ โดยประกอบด้วยสมการแรงดันไฟฟ้าและสมการการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ทางไดนามิกส์ระหว่างโรเตอร์กับแรงบิด ในบทนี้จะกล่าวถึง การประยุกต์ใช้แบบจำลองโดยการลดรูป (Reduced-order Model) สมการแรงดันไฟฟ้าของทั้งเครื่องจักรกลซิงโครนัสและมอเตอร์เหนี่ยวนำ, การหาภาวะเริ่มต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตลอดจนการเชื่อมต่อแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำเข้ากับสมการระบบ (Network Performance Equation) ซึ่งอยู่บนแกนอ้างอิงซิงโครนัส

การที่มีการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่เป็นดิจิทัลกันอย่างแพร่หลาย ทำให้มีการศึกษาแบบจำลองเครื่องจักรกันมาก ในบางกรณีก็ใช้แบบจำลองอย่างละเอียดในการสร้างโปรแกรม แต่โดยส่วนมากแล้วจะมีการใช้แบบจำลองลดรูป ซึ่งในการศึกษาเครื่องจักรกลซิงโครนัสจะมีแบบจำลองการลดรูปอยู่หลายแบบที่เราใช้ในการจำลองคุณสมบัติทางไดนามิกส์ของเครื่องจักร ที่เรารู้จักกันเป็นอย่างดีคือ แบบจำลองของแรงดันไฟฟ้าหลังค่าทรานเซียนท์รีแอ็กแตนซ์ (Voltage behind Transient Reactance) และแบบจำลองการลดรูปอีกแบบหนึ่งที่ใช้กันเป็นอย่างมากคือ การไม่คิดค่าทรานเซียนท์ในสแตเตอร์ของสมการแรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษานี้ ส่วนในการศึกษามอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีแบบจำลองของการลดรูปอยู่แค่ 2 แบบ โดยแบบจำลองหนึ่งจะทำการไม่คิดค่าทรานเซียนท์ทั้งในวงจรสแตเตอร์และวงจรรโรเตอร์ แต่ในการศึกษานี้จะใช้แบบจำลองลดรูปที่ไม่คิดค่าทรานเซียนท์ในสแตเตอร์ของสมการแรงดันเท่านั้น เหมือนกับในกรณีของเครื่องจักรกลซิงโครนัสที่กล่าวข้างต้น

โดยส่วนมากแล้ว จะมีการใช้แบบจำลองลดรูปในการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่อง

คอมพิวเตอรฺ์ดิจิทัล ซึ่งแบบจำลองลครูปที่มีการใช้กันโดยส่วนมากจะอยู่ในรูปแบบของการไม่คิดค่าทรานเซียนท์ทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ในสมการแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจักรทุกตัว และในสมการแรงดันไฟฟ้าของส่วนประกอบของระบบไฟฟ้ากำลังทุกตัวที่เชื่อมต่อกับสเตเตอร์ (เช่น หม้อแปลง, สายส่ง เป็นต้น) ซึ่งผลของการลครูปนี้จะทำให้จำนวนการอินทิเกรตในโปรแกรมที่สร้างขึ้นลดลงอย่างมาก นั่นคือทำให้โปรแกรมทำงานได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

4.2 แบบจำลองการลครูปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้จะเป็นแบบซิงโครนิส (3.2.1) โดยเอ็กไซเตอร์จะเป็นแบบ IEEE Type 2 (3.2.2) และโทเวอร์เนอร์จะเป็นแบบกึ่งหน้ก้าช (3.2.3) ในส่วนของเครื่องจักรกลซิงโครนิสนั้น ในการศึกษานี้โรเตอร์ของเครื่องจักรกลซิงโครนิสจะประกอบด้วยขดลวดสนาม (Field Winding) 1 ขดและขดลวดหน่วง (Damper Winding) อีก 2 ขดเท่านั้น โดยขดลวดสนามและขดลวดหน่วง 1 ขด จะอยู่ใน d-axis ส่วนขดลวดหน่วงที่เหลืออีก 1 ขดจะอยู่ใน q-axis และไม่คิดค่าทรานเซียนท์ในสเตเตอร์ของสมการต่าง ๆ ในการสร้างแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนิส

4.2.1 แบบจำลองการลครูปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนิส [11, 15]

สมการแรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์ของเครื่องจักรแบบซิงโครนิสที่เขียนในแกนอ้างอิงใด ๆ (Arbitrary Reference Frame) เป็นดังสมการที่ (3.2.1-72) เราจะทำการลครูปสมการแรงดันนี้โดย

- ไม่คิดค่าทรานเซียนท์ในสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลซิงโครนิส ดังนั้นค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันแม่เหล็กคดลองขดลวดที่สเตเตอร์ตัดทิ้งได้
- ย้ายแกนอ้างอิงจากแกนอ้างอิงใด ๆ ไปยังแกนอ้างอิงโรเตอร์ ซึ่งสามารถกระทำได้โดย ให้ค่าของ $\omega = \omega_r$
- ลดจำนวนขดลวดหน่วง (Damper Winding) ในโรเตอร์ลงเหลือแค่ 2 ขดเท่านั้น โดยอยู่ใน d-axis และ q-axis อย่างละ 1 ขด และขดลวดหน่วงทั้ง 2 ขดจะถูกลัดวงจรอยู่

(ผลคือ $V'_{ka} = V'_{kd} = 0$)

ดังนั้น เราจะสามารถเขียนสมการแรงดันไฟฟ้า (3.2.1-72) ใหม่โดยการลดรูปในเทอมของฟลักซ์แม่เหล็กคล้องขดลวดต่อวินาทีได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} v'_{ea} \\ v'_{eb} \\ v'_{eq} \\ e'_{fd} \\ v'_{ed} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_s a_{11} & \frac{\omega_e}{\omega_b} & -r_s a_{12} & 0 & 0 \\ -\frac{\omega_e}{\omega_b} & -r_s b_{11} & 0 & -r_s b_{12} & -r_s b_{13} \\ r'_{kq} a_{21} & 0 & r'_{kq} a_{22} + \frac{p}{\omega_b} & 0 & 0 \\ 0 & X_{md} b_{21} & 0 & X_{md} b_{22} + \frac{X_{md} p}{r'_{fd} \omega_b} & X_{md} b_{23} \\ 0 & r'_{kd} b_{31} & 0 & r'_{kd} b_{32} & r'_{kd} b_{33} + \frac{p}{\omega_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi'_{ea} \\ \psi'_{eb} \\ \psi'_{eq} \\ \psi'_{fd} \\ \psi'_{ed} \end{bmatrix} \quad (4.2-1)$$

โดยที่ค่าของตัวแปรในเมทริกซ์คือ a_{ij} , b_{ij} , D_q และ D_d ดังในสมการที่ (3.2.1-79) - (3.2.1-82) จะถูกลดรูปด้วย ดังนี้

$$a_{ij} = \frac{1}{D_q} \begin{bmatrix} X'_{kq} & -X_{mq} \\ X_{mq} & -X_q \end{bmatrix} \quad (4.2-2)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{D_d} \begin{bmatrix} X'_{fd} X'_{kd} - X_{md}^2 & -X_{md} X'_{kd} + X_{md}^2 & -X_{md} X'_{fd} + X_{md}^2 \\ X_{md} X'_{kd} - X_{md}^2 & -X_d X'_{kd} + X_{md}^2 & X_d X_{md} - X_{md}^2 \\ X_{md} X'_{fd} - X_{md}^2 & X_d X_{md} - X_{md}^2 & -X_d X'_{fd} + X_{md}^2 \end{bmatrix} \quad (4.2-3)$$

$$D_q = X_{mq}^2 - X_q X'_{kq} \quad (4.2-4)$$

$$D_d = X_{md}^2 (X_d - 2X_{md} + X'_{fd} + X'_{kd}) - X_d X'_{fd} X'_{kd} \quad (4.2-5)$$

สมการแรงดันไฟฟ้าที่ได้ (4.2-1) นำไปสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังในภาคผนวก โดยวิธีคำนวณเชิงเลขที่ใช้คือ Modified Euler Method ซึ่งในแต่ละขั้นของเวลาที่จะได้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กคล้องขดลวดต่าง ๆ ที่เวลานั้น จึงนำค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้นั้นมาใช้หาค่าแรงบิดทาง

ไฟฟ้า ($T_e(t)$) ได้โดยใช้สมการที่ (3.2.1-86)

เมื่อได้ค่าแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ขึ้นของเวลานั้นแล้ว จะหาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้จากสมการ (3.2.1-83) ซึ่งนำมากล่าวในที่นี้ดังสมการที่ (4.2-6)

$$p\omega_r(t) = \frac{\omega_b}{2H} (T_{pm} - T_e(t)) \quad (4.2-6)$$

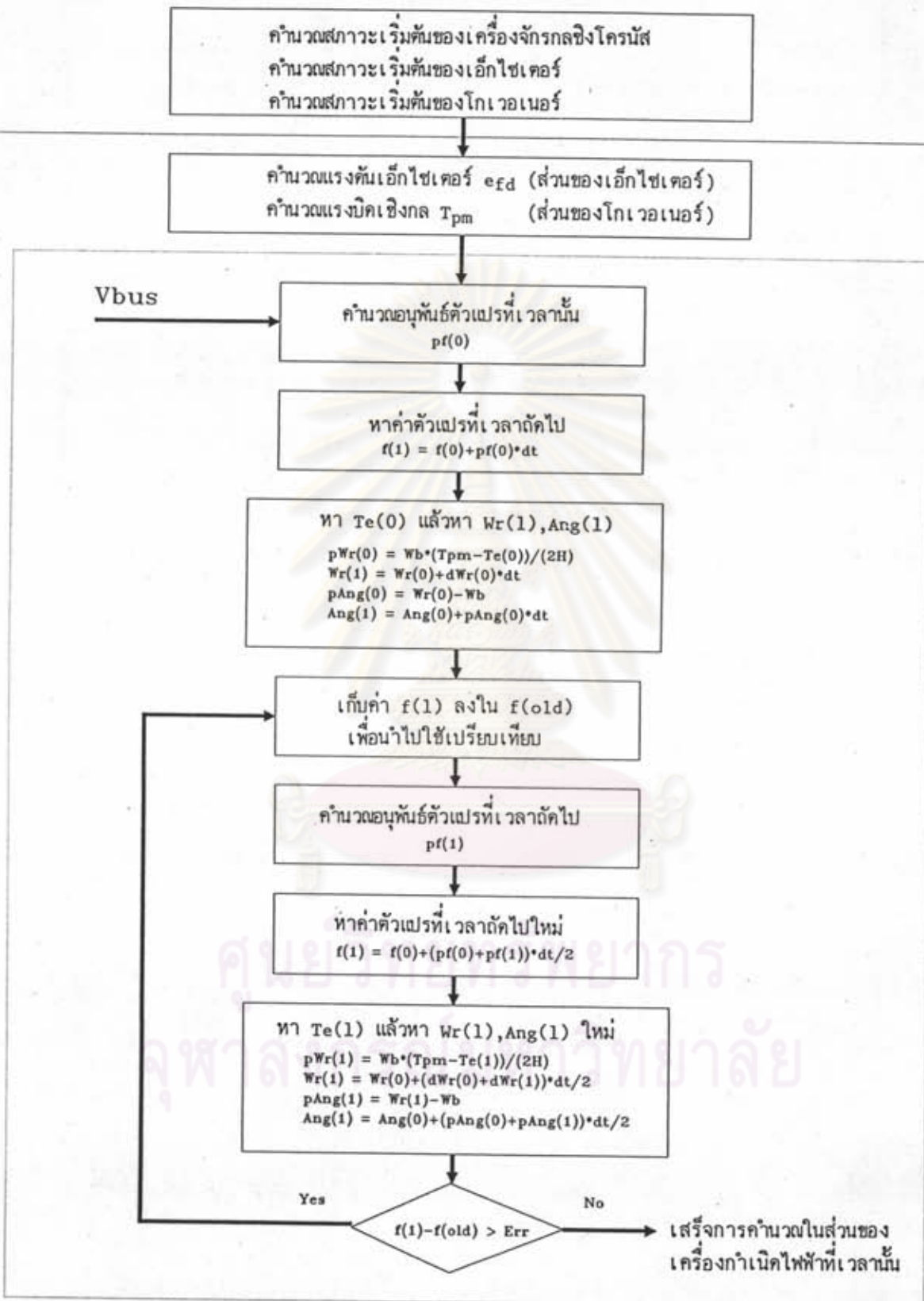
และหาอัตราการเปลี่ยนแปลงมุมของโรเตอร์ได้จากสมการ (3.2.1-84) ซึ่งนำมากล่าวในที่นี้ดังสมการที่ (4.2-7)

$$p\delta(t) = \omega_r(t) - \omega_b \quad (4.2-7)$$

เมื่อผ่านการคำนวณเชิงเลขที่แต่ละขั้นของช่วงเวลานั้นแล้ว ก็จะได้ค่ามุมของแรงดันภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและค่าพิกซ์แม่เหล็กคล่องขดลวดที่เวลานั้น ๆ ค่ามุมที่ได้สามารถนำไปใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ขั้นตอนการวิเคราะห์ส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นดังรูปที่ 4.2-1

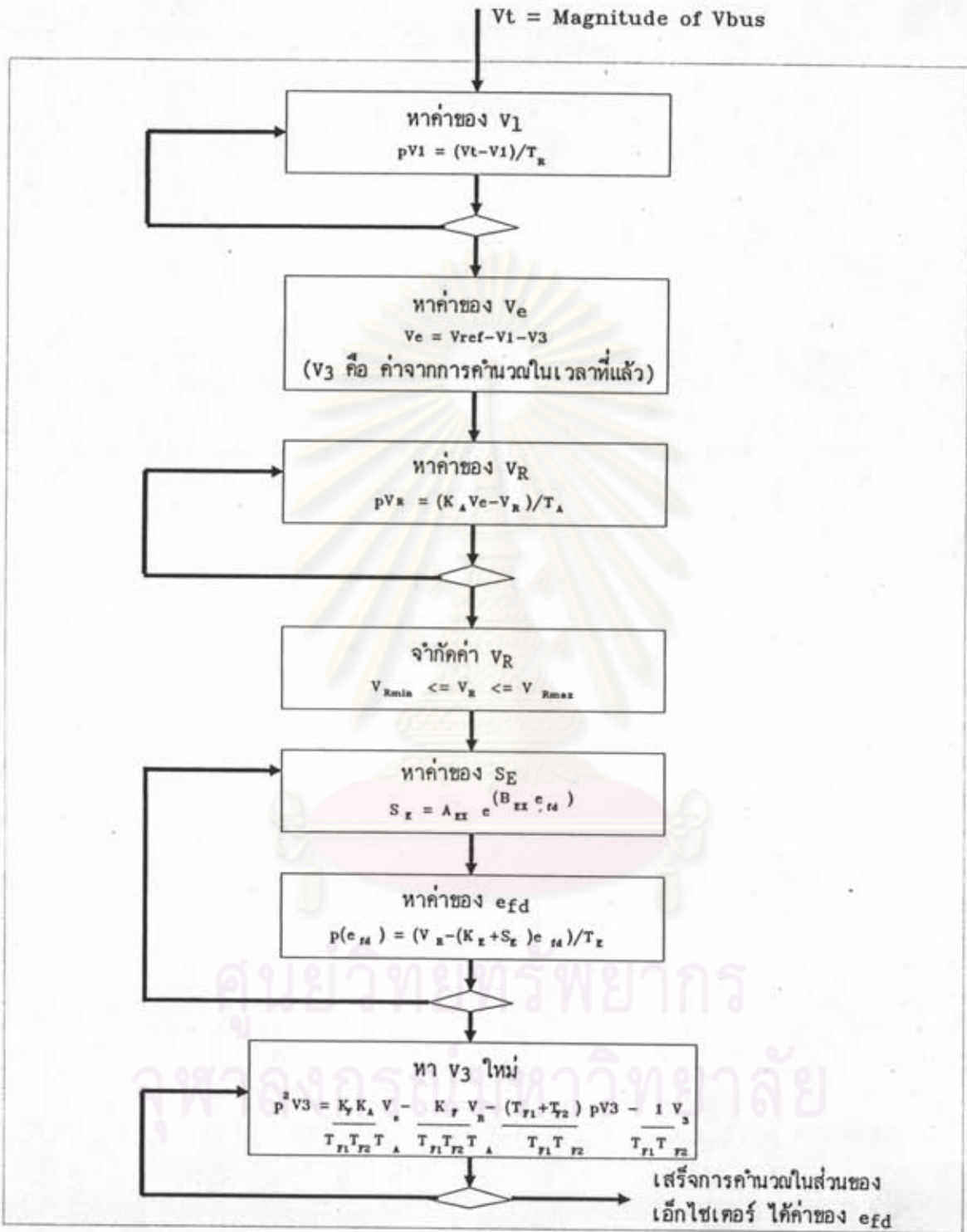
เอ็กไซเตอร์ (Exciter) เป็นอุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานโดยพยายามรักษาแรงดันขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีขนาดคงที่ โดยการควบคุมแรงดันเอ็กไซเตอร์ (e_{fd}) ที่ป้อนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบจำลองของเอ็กไซเตอร์จะเป็นดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2.2 สมการที่นำมาใช้คือ (3.3.2-1)-(3.3.2-5) โดยการนำค่าขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาเป็นค่าที่ป้อนเข้า เพื่อให้ได้แรงดันเอ็กไซเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เวลาถัดไป ขั้นตอนการวิเคราะห์ส่วนของเอ็กไซเตอร์เป็นดังรูปที่ 4.2-2

ทกเวอเนอร์ (Governor) เป็นอุปกรณ์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานโดยพยายามรักษาความเร็วของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีขนาดคงที่ โดยการควบคุมแรงบิด (T_{pm}) ที่ป้อนให้กับแกนโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบจำลองทกเวอเนอร์จะเป็นดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2.3 สมการที่นำมาใช้คือ (3.2.3-1)-(3.2.3-4) โดยค่าที่ต้องป้อนเข้าคือ ค่าความ



ในที่นี้ให้ $f = \psi_{ds}^r, \psi_{qs}^r, \psi_{kq}^r, \psi_{fd}^r, \psi_{kd}^r$

รูปที่ 4.2-1 แสดงขั้นตอนการคำนวณในส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



◊ คือ การหาค่าตัวแปรโดย Modified Euler Method
จนค่าของความแตกต่างน้อยมาก อยู่ในช่วงยอมรับได้

รูปที่ 4.2-2 แสดงขั้นตอนการคำนวณในส่วนของอิเล็กทรอนิกส์

เร็วที่เบี่ยงเบน ($\Delta \omega_r / \omega_b$) ออกจากความเร็วเชิงโคโรปัส และค่าอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงความเร็ว ($p \omega_r / \omega_b$) ของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อให้ได้ค่าแรงบิดเชิงกล (T_{pm}) ที่แกนโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เวลาถัดไปขั้นตอนการวิเคราะห์ส่วนของโกลเวอเนอร์เป็นดังรูปที่ 4.2-3

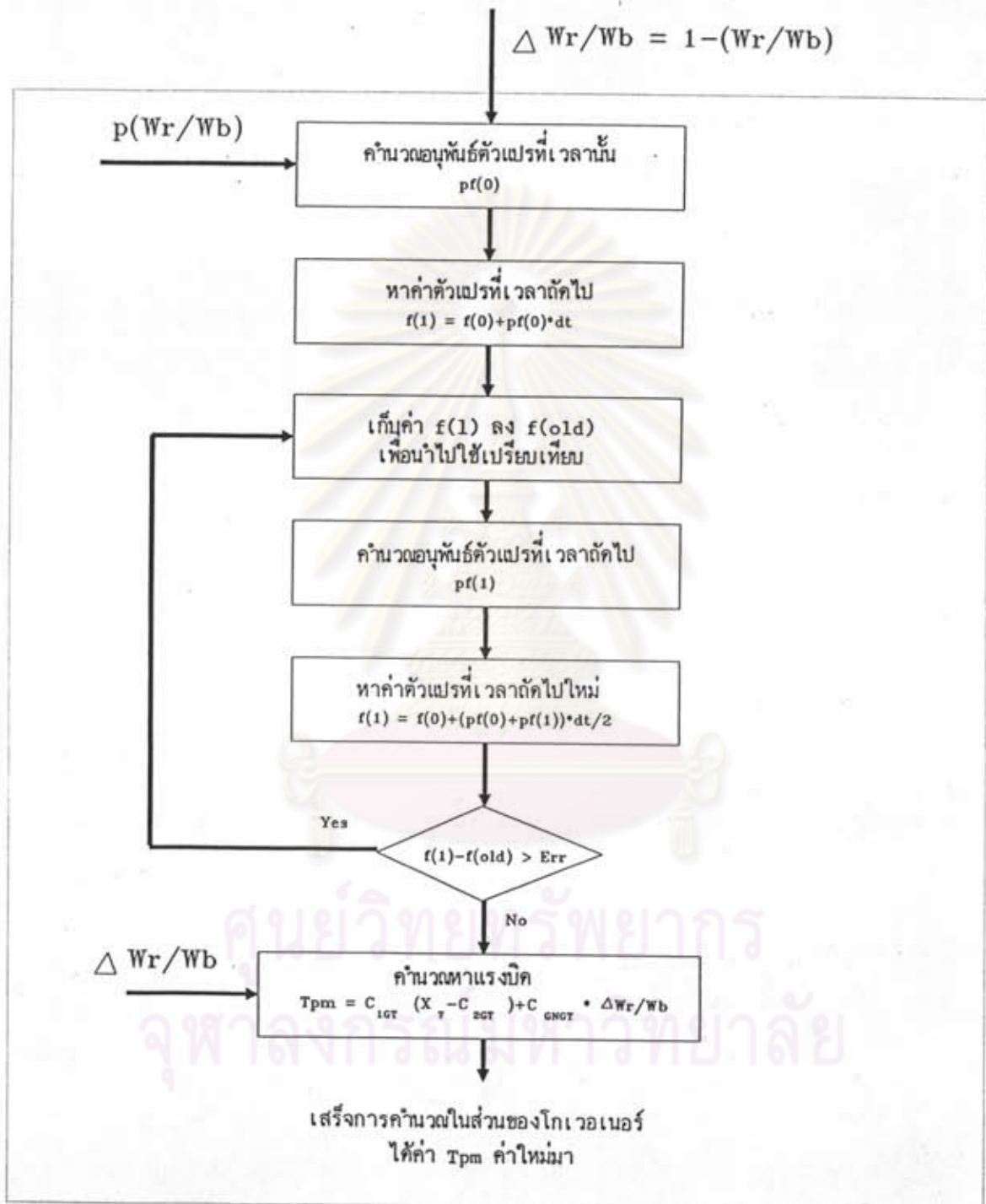
แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ประกอบด้วยเครื่องจักรกลเชิงโคโรปัส, เอ็กไซเตอร์ และโกลเวอเนอร์ จะเป็นดังรูปที่ 4.2-1 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าการเชื่อมต่อกับสมการระบบ (Network Performance Equations) จะกระทำโดยนำค่าแรงดันที่บัส (V_{qd}^e) ซึ่งอยู่ในแกนอ้างอิงเชิงโคโรปัสมาทรานส์ฟอร์มไปยังแกนอ้างอิงโรเตอร์ เพื่อบ่อนำกับแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ผลที่ได้ออกมาคือค่าของฟลักซ์ของขดลวดค่อวินาที และมุมของแรงดันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อนำไปเชื่อมต่อกับสมการระบบโดยส่งผลการเปลี่ยนแปลงไปยังระบบ ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อ 4.4

4.2.2 เงื่อนไขสภาวะเริ่มต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขั้นแรกจะต้องทำการหาค่าสภาวะเริ่มต้นของเครื่องจักร ซึ่งก็คือค่าของตัวแปร (ฟลักซ์แม่เหล็กของขดลวดค่อวินาทีในแกนต่าง ๆ) ในแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นเอง โดยจะนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ได้จากการหาโพลไฟล์และค่ารีแอกแตนซ์ต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มาหาค่าเริ่มต้นของตัวแปรต่าง ๆ ทางซ้ายมือของสมการที่ (4.2-8) และ (4.2-9) ซึ่งเป็นสมการลดรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์แม่เหล็กค่อวินาทีกับกระแส ดังที่กล่าวในสมการที่ (3.2.1-58) - (3.2.1-64) ในการลดรูปสมการดังกล่าว กระทำโดยคิดว่ามีขดลวดหน่วงในโรเตอร์เพียง 2 ชุดเท่านั้น ซึ่งขั้นตอนในการหาค่าเริ่มต้นของตัวแปรจะได้กล่าวในหัวข้อนี้

$$\begin{bmatrix} \psi_{qs}^f \\ \psi_{kq}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -X_q & X_{mq} \\ -X_{mq} & X'_{kq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^f \\ i_{kq}^f \end{bmatrix} \quad (4.2-8)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{ds}^f \\ \psi_{fd}^f \\ \psi_{kd}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -X_d & X_{md} & X_{md} \\ -X_{md} & X'_{fd} & X_{md} \\ -X_{md} & X_{md} & X'_{kd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^f \\ i_{fd}^f \\ i_{kd}^f \end{bmatrix} \quad (4.2-9)$$



ในที่นี้ให้ $f = X_4, X_6, X_7$

รูปที่ 4.2-3 แสดงขั้นตอนการคำนวณในส่วนของโกเวเนอร์

จากสมการที่ (4.2-8) และ (4.2-9) เราจะทราบค่าเริ่มต้นของฟลักซ์แม่เหล็กคล่องขดลวดต่อวินาที ($\psi^{r_{qs}}, \psi^{r_{kq}}, \psi^{r_{ds}}, \psi^{r_{fd}}, \psi^{r_{kd}}$) ได้ ก็ต่อเมื่อทราบค่ากระแส ($i^{r_{qs}}, i^{r_{kq}}, i^{r_{ds}}, i^{r_{fd}}, i^{r_{kd}}$) เสียก่อน ซึ่งขั้นตอนการค่ากระแสจะเป็นดังนี้

ในสภาวะเริ่มต้น เป็นสภาวะที่โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนด้วยความเร็วคงที่ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กคล่องขดลวดในขดลวดหนึ่งขด ดังนั้นจะไม่มีกระแสไหลในขดลวดหนึ่งขดทั้ง 2 ขดนั้นเลย

$$i^{r_{kq}} = i^{r_{kd}} = 0 \quad (4.2-10)$$

ค่ากระแสในสเตเตอร์ ($I^{r_{qs}}, I^{r_{ds}}$) หาได้จากค่ากำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายให้แก่ระบบในสภาวะเริ่มต้น และค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกาะอยู่ (ได้จากการคำนวณโวลตโพล์, $V_{terminal}$) โดยแรงดันไฟฟ้าหลังค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอรีส (E_a) คือ

$$\begin{aligned} E_a &= V_{terminal} + (r_s + jX_q)I_{as} \\ &= |E_a|/\delta \end{aligned} \quad (4.2-11)$$

โดย I_{as} คือ กระแสที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถหาได้จากกำลังจริง ($P_{machine}$) และกำลังรีแอกทีฟ ($Q_{machine}$) ของเครื่องจักรเชิงโรตอรีส ดังนี้

$$\begin{aligned} I_{as} &= \frac{P_{machine} - jQ_{machine}}{V_{terminal}} \\ &= |I_{as}|/\theta_{ei} \end{aligned} \quad (4.2-12)$$

$$\text{โดย } V_{terminal} = V/\theta_{ev} \quad (4.2-13)$$

จากสมการ (4.2-11) เราได้มุมของ rotor เราสามารถหาค่ากระแส $I^{r_{ds}}, I^{r_{qs}}$ จาก

$$I'_{ds} = -|I_{as}| \sin[\theta_{ei}(0) - \theta_{ev}(0) - \delta] \quad (4.2-14)$$

$$I'_{qs} = +|I_{as}| \cos[\theta_{ei}(0) - \theta_{ev}(0) - \delta] \quad (4.2-15)$$

จากนี้ก็จะสามารถหาแรงดันเอ็กไซเตชัน (Excitation Voltage, e'^{r}_{fd}) ได้โดย

$$E'^{r}_{fd} = \frac{\omega_b}{\omega_e} [|E_a| + (X_d - X_q)I'_{ds}] \quad (4.2-16)$$

และค่ากระแสเอ็กไซเตชัน (I'^{r}_{fd}) จาก

$$I'^{r}_{fd} = \frac{E'^{r}_{fd}}{r'_{fd}} \quad (4.2-17)$$

เมื่อนำสมการที่ (4.2-10), (4.2-14), (4.2-15) และ (4.2-17) แทนในสมการที่ (4.2-8) และ (4.2-9) เราจะได้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กค้ำของขดลวดค้ำวนาที่เริ่มต้นที่สถานะสมดุขยของเครื่องจักรกลได้ ถ้านำค่าฟลักซ์แม่เหล็กค้ำของขดลวดแทนในสมการแรงบิดทางไฟฟ้าในสมการที่ (3.2.1-86) ก็จะสามารถหาค่าแรงบิดทางไฟฟ้าเริ่มต้นได้ดังนี้

$$T_e(t) = [(a_{11} - b_{11})\psi'^{r}_{qs}\psi'^{r}_{ds} + \psi'^{r}_{ds}(a_{12}\psi'^{r}_{kq1} + a_{13}\psi'^{r}_{kq2}) - \psi'^{r}_{qs}(b_{12}\psi'^{r}_{fd} + b_{13}\psi'^{r}_{kd})] \quad (4.2-18)$$

ซึ่งที่สถานะเริ่มต้นนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนด้วยความเร็วคงที่ โดยค่าแรงบิดเชิงกล (T_{pm}) ที่บ่อน้ำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเท่ากับค่าแรงบิดทางไฟฟ้าเริ่มต้นนั้น

$$T_{pm} = T_e(t) \quad (4.2-19)$$

ส่วนควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประกอบด้วย 2 ส่วนคือ เอ็กไซเตชัน และโกวเวอร์เนอร์ โดยเอ็กไซเตชันจะควบคุมแรงดันเอ็กไซเตชัน (e'_{fd}) เพื่อรักษาระดับแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิด

เปิดไฟฟ้าให้มีแรงดันคงที่ตามที่ตั้งค่าไว้ ส่วนโกเวเนเตอร์จะควบคุมแรงบิดเชิงกล (T_{pm}) ที่ป้อนให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อที่จะพยายามรักษาความเร็วของโรเตอร์ให้คงที่

4.2.3 เงื่อนไขสภาวะเริ่มต้นของเอ็กไซเตอร์

ในการศึกษาแบบจำลองในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงแบบจำลองของเอ็กไซเตอร์ที่ใช้ในการศึกษานี้ไปแล้วซึ่งก็คือสมการที่ (3.2.2-11)–(3.2.2-15) ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการหาสภาวะเริ่มต้นของแบบจำลองดังกล่าว โดยจากสมการ (4.2-16) เราสามารถหาค่าแรงดันเอ็กไซเตอร์ (e_{fd}) ที่สภาวะอยู่ตัวหรือสภาวะเริ่มต้นได้ เราสามารถนำค่า e_{fd} ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาหาค่าเริ่มต้นของตัวแปรเอ็กไซเตอร์ได้ดังนี้

$$V_R(0) = (K_E + S_E) e_{fd} \quad (4.2-20)$$

$$V_e = \frac{V_R}{K_A} \quad (4.2-21)$$

$$V_3(0) = \frac{K_{FKA}}{V_A} V_e - \frac{K_F}{T_a} V_R(0) \quad (4.2-22)$$

$$pV_3(0) = 0 \quad (4.2-23)$$

$$V_{REF}(0) = V_e + V_{terminal} + V_3(0) \quad (4.2-24)$$

$$V_1(0) = V_{terminal} \quad (4.2-25)$$

โดย

$$S_E = A_{EX} e^{(B_{EX} e_{fd})} \quad (4.2-26)$$

$$e_{fd}(\text{Governor}) = e_{fd}(\text{Machine}) \quad (4.2-27)$$

4.2.4 เงื่อนไขสภาวะเริ่มต้นของโกเวเนเตอร์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการหาสภาวะเริ่มต้นของโกเวเนเตอร์ ซึ่งมีแบบจำลองดังที่กล่าวแล้วในบทที่ 3 ในสมการที่ (3.3.3-1)–(3.3.3-4) ในการหาสภาวะเริ่มต้นของแบบจำลองดังกล่าวเริ่มจากสมการ (4.2-19) เราจะได้ค่าแรงบิดเชิงกล (T_{pm}) ที่ป้อนเข้าแกนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สภาวะอยู่ตัว และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนด้วยความเร็วคงที่ ที่ความเร็วเชิงโรตัสซึ่งค่าของ $\frac{\Delta\omega_r}{\omega_b} = 0$ เราจะสามารถหาค่าเริ่มต้นของโกเวเนเตอร์ที่มีแบบจำลองดังรูปที่ 3.2-7 ได้ดังนี้

$$X_9 = T_{pm} \quad (4.2-28)$$

$$X_8 = \frac{T_{pm}}{C_{1GT}} \quad (4.2-29)$$

$$X_7(0) = \frac{T_{pm}}{C_{1GT}} + C_{2GT} \quad (4.2-30)$$

$$X_6(0) = X_7(0) \quad (4.2-31)$$

$$X_4(0) = \frac{T_{pm}}{C_{1GT}} + C_{2GT} - Wf \quad (4.2-32)$$

4.3 แบบจำลองการลดยุขของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเป็นดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3 โดยในที่นี้จะทำการลดยุขโดยไม่คิดทรานเซียนท์ในสเตเตอร์ และทำการย้ายแกนจากแกนอ้างอิงใด ๆ มายังแกนอ้างอิงเชิงโครบัสซึ่งอยู่ในสเตเตอร์ที่เชื่อมต่อกับระบบ โดยสมการระบบ (Network Performance Equations) จะอยู่บนแกนอ้างอิงเชิงโครบัสดังนี้ด้วย

4.3.1 แบบจำลองการลดยุขของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [11,15,16]

สมการแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นดังสมการ (3.3-35) เราจะทำการลดยุขสมการแรงดันนี้โดย

- ไม่คิดค่าทรานเซียนท์ในสเตเตอร์ ดังนั้นค่าอนุพันธ์ของฟลักซ์แม่เหล็กคล่องขดลวดที่สเตเตอร์ตัดทิ้งได้

- ย้ายแกนจากแกนอ้างอิงจากแกนอ้างอิงใด ๆ ไปยังแกนอ้างอิงเชิงโครบัส ซึ่งสามารถกระทำได้โดยให้ $\omega = \omega_e$

- ขดลวดในวงจรโรเตอร์ถูกสัดวางจรรอย ดังนั้นค่าของ $V_{dr} = V_{qr} = 0$

- เราถือว่าค่าของรีซิสแตนซ์ (Resistance) และรีแอกแตนซ์ (Reactance) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีค่าคงที่ ตลอดช่วงการสาร์ทหรือการเปลี่ยนแปลงของมอเตอร์

ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการแรงดันไฟฟ้า (3.3-35) ใหม่โดยการลดยุขในเทอมของฟลักซ์แม่เหล็กคล่องขดลวดต่อวินาที ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v'_{qr} \\ v'_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r_s X'_{rr}}{D} & \frac{\omega_e}{\omega_b} & -\frac{r_s X_M}{D} & 0 \\ -\frac{\omega_e}{\omega_b} & \frac{r_s X'_{rr}}{D} & 0 & -\frac{r_s X_M}{D} \\ -\frac{r'_r X_M}{D} & 0 & \frac{r'_r X_{ss}}{D} + \frac{p}{\omega_b} & \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \\ 0 & -\frac{r'_r X_M}{D} & -\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} & \frac{r'_r X_{ss}}{D} + \frac{p}{\omega_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \\ \psi'_{qr} \\ \psi'_{dr} \end{bmatrix} \quad (4.3-1)$$

$$D = X_{ss} X'_{rr} - X_M^2 \quad (4.3-2)$$

วิธีคำนวณเชิงเลขที่ใช้นี้คือ Modified Euler Method ซึ่งในแต่ละขั้นของเวลาที่จะได้ค่าพิกซ์แม่เหล็กคล่องขดลวดต่าง ๆ ที่เวลานั้น นำค่าพิกซ์แม่เหล็กคล่องขดลวดที่ได้มาหาค่าแรงบิดทางไฟฟ้า ($T_e(t)$) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยสมการ (3.3-41) ซึ่งนำมาใหม่แสดงดังนี้

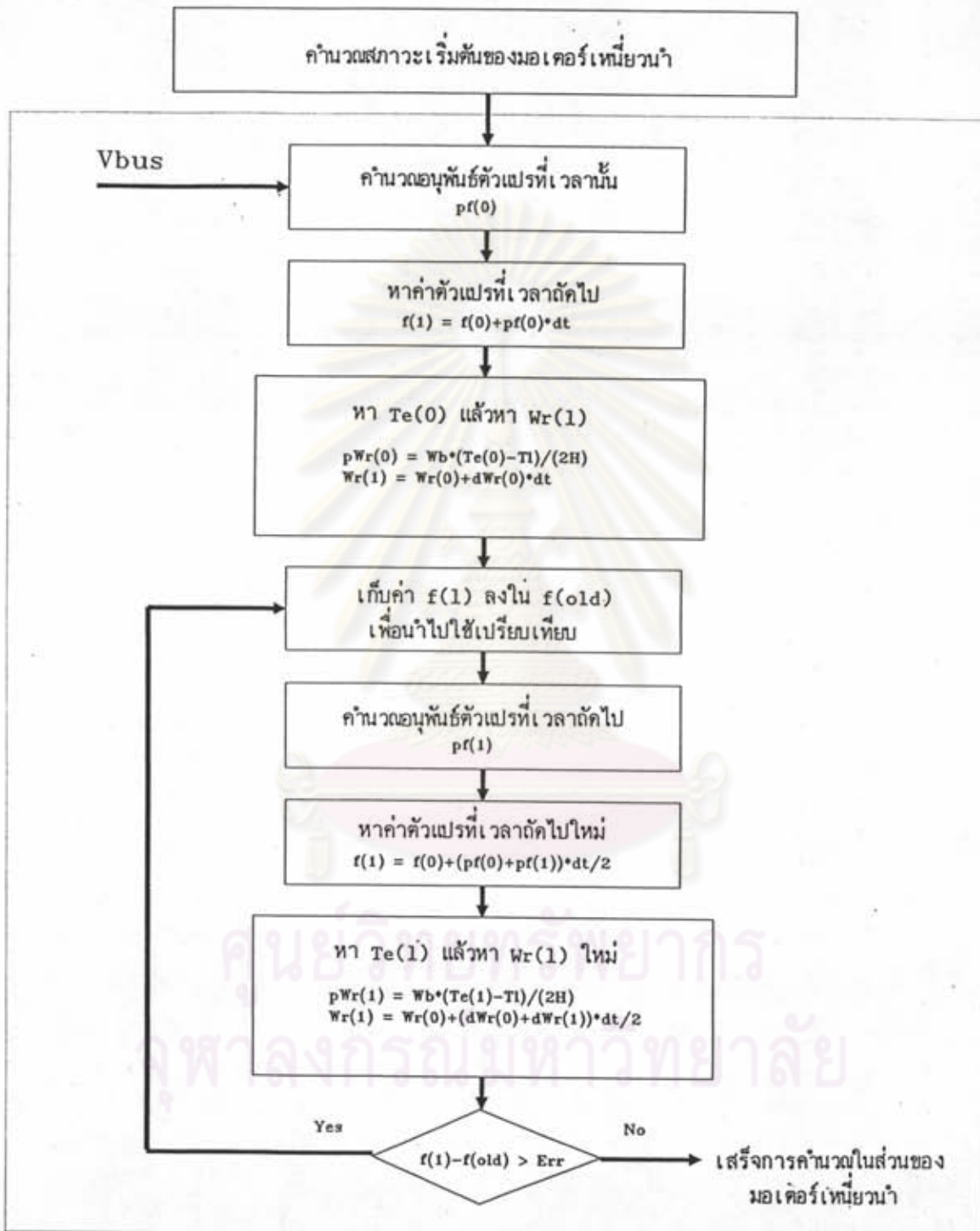
$$T_e(t) = \frac{X_M}{D} (\psi_{qs} \psi'_{dr} - \psi'_{qr} \psi_{ds}) \quad (4.3-3)$$

เมื่อได้ค่าแรงบิดทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ก็จะสามารถหาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วโรเตอร์ของมอเตอร์ได้จากสมการ (3.3-39) ซึ่งนำมาแสดงใหม่ดังนี้

$$p\omega_r = \frac{\omega_b}{2H} (T_e(t) - T_L) \quad (4.3-4)$$

เมื่อผ่านการคำนวณเชิงเลขที่เวลาใด ๆ แล้ว ก็จะได้ค่าพิกซ์แม่เหล็กคล่องขดลวดที่เวลานั้น ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งนำไปเชื่อมต่อกับสมการระบบในการส่งผลการเปลี่ยนแปลงไปยังระบบ ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 4.4 และขั้นตอนการวิเคราะห์หามอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นดังรูปที่ 4.3-1

ซึ่งในการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำบนแกนอ้างอิงอิงโครนิสจะเป็นแกนอ้างอิงเดียวกับสมการระบบ โดยเชื่อมต่อกับระบบโดยแรงดันไฟฟ้า (V^e_{qd}) ที่ป้อนจากขั้วห่มอเตอร์เหนี่ยวนำนั้น เกาะอยู่ได้โดยตรง



ในที่นี้ให้ $f = \psi_{qs}, \psi_{ds}, \psi_{qr}, \psi_{dr}$

รูปที่ 4.3-1 แสดงขั้นตอนการคำนวณในส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

4.3.2 เงื่อนไขสภาวะเริ่มต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การหาสภาวะเริ่มต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำคือ การหาค่าเริ่มต้นของตัวแปรซึ่งในที่นี้ก็คือ ค่าของฟลักซ์แม่เหล็กคล่องขดลวดต่อวินาที ($\psi_{qs}, \psi_{ds}, \psi'_{qr}, \psi'_{dr}$) นั้นเอง

ในสภาวะอยู่ตัวของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งมอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วคงที่ เราสามารถหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กของขดลวดต่อวินาทีซึ่งเป็นตัวแปรของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ โดยใช้ค่าแรงดันที่ป้อนที่มอเตอร์ค้อยู่ ($V_{qs} + jV_{ds}$) กับค่ากำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของมอเตอร์ ($P_L + jQ_L$) ในสภาวะอยู่ตัวนั้นโดย

$$P_L = V_{qs} i_{qs} + V_{ds} i_{ds} \quad (4.3-5)$$

$$Q_L = V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs} \quad (4.3-6)$$

จากสมการ (4.3-5) และ (4.3-6) เราจะได้ค่าของกระแสเดเตอร์ ($I_{qs} + jI_{ds}$) ที่มอเตอร์ในสภาวะเริ่มต้น นำค่ากระแสเดเตอร์มาแทนในสมการ (3.3-23) และ (3.3-24) โดยตัดค่าของอนุพันธ์ทิ้ง เนื่องจากมอเตอร์อยู่ในสภาวะอยู่ตัว (Steady State) จะได้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กคล่องขดลวดในสเตเตอร์ (ψ_{qs}, ψ_{ds}) ดังนี้

$$\psi_{qs} = \frac{\omega_b}{\omega_e} (V_{qs} - r_s i_{qs}) \quad (4.3-7)$$

$$\psi_{ds} = \frac{\omega_b}{\omega_e} (r_s i_{ds} - V_{ds}) \quad (4.3-8)$$

จากนั้นนำค่าฟลักซ์แม่เหล็กคล่องขดลวดในสเตเตอร์ไปแทนในสมการ (3.3-29) และ (3.3-30) เราสามารถหาค่ากระแสโรเตอร์ (I_{qr}, I_{dr}) ได้ดังนี้

$$i_{qr} = \frac{1}{X_M} (\psi_{qs} - (X_{ls} + X_M) i_{qs}) \quad (4.3-9)$$

$$i_{dr} = \frac{1}{X_M} (\psi_{ds} - (X_{ls} + X_M) i_{ds}) \quad (4.3-10)$$

นำค่ากระแสโรเตอร์และค่ากระแสสเตเตอร์แทนในสมการ (3.3-32) และ (3.3-33) จะได้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กคล้องขดลวดในโรเตอร์ ($\psi'_{qr} \cdot \psi'_{dr}$) ดังนี้

$$\psi_{qr} = X_r i_{qr} + X_M (i_{qs} + i_{qr}) \quad (4.3-11)$$

$$(4.3-12)$$

เมื่อเราได้ฟลักซ์แม่เหล็กคล้องขดลวดทั้งหมดแล้ว เราจะสามารถหาค่าแรงบิดของโหลด (T_L) ได้โดยจะมีค่าเท่ากับค่าแรงทางไฟฟ้า ($T_e(t)$) ที่สภาวะเริ่มต้นนั้น โดยค่าแรงบิดทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำหาได้จากสมการ (3.3-41) ซึ่งนำมากล่าวในที่นี้คือ

$$T_e(t) = \frac{X_M}{D} (\psi_{qs} \psi'_{dr} - \psi'_{qr} \psi_{ds}) \quad (4.3-13)$$

4.4 แบบจำลองระบบและการเชื่อมต่อแบบจำลอง [4,5,13]

(Network Model และ Model Interconnection)

ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบโคเจนเนอเรชันจะเห็นว่าประกอบไปด้วยการศึกษาแบบจำลองของเครื่องจักรกล ซึ่งความถูกต้องของการศึกษาขึ้นอยู่กับความละเอียดของแบบจำลองที่เราใช้ ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเชื่อมต่อแบบจำลองของเครื่องจักรกลเข้ากับแบบจำลองของระบบ ซึ่งจะเชื่อมต่อโดยค่ากระแสสั่งที่จะกล่าวต่อไป

ในที่นี้แบบจำลองของระบบที่ใช้อาศัยอยู่บนแกนอ้างอิงซิงโครนิส ดังนั้นการที่จะเชื่อมต่อแบบจำลองของเครื่องจักรกล จะต้องทำการแปลงตัวแปรของเครื่องจักรกลที่ใช้ในการเชื่อมต่อนั้นไปอยู่บนแกนอ้างอิงซิงโครนิสก่อน สมการแบบจำลองระบบที่ใช้ในการศึกษานี้ได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 2.3 นั้นคือ

$$[I_{bus}] = [Y_{bus}] [E_{bus}] \quad (4.4-1)$$

ซึ่งเมื่อเราเลือกกราวด์ (Ground) เป็นบัสอ้างอิง เราจะสามารถเขียนสมการแรงดันไฟฟ้าที่บัส
ทั้งหมดได้เป็น

$$E_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left(I_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} E_j \right) \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, 3, \dots, n \\ i \neq s \end{array} \quad (4.4-2)$$

$$\text{หรือ } E_i = \frac{1}{Y_{ii}} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{Lij} E_j \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, 3, \dots, n \\ i \neq s \end{array} \quad (4.4-3)$$

ซึ่งค่าของ I_p จะเป็นค่ากระแสที่บัส p นั้น โดยจะเป็นตัวเชื่อมต่อกับแบบจำลองของ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัส และแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำดังที่จะกล่าวต่อไป

จากสมการ 4.4-3 เราจะแทนโหลดที่บัสนั้นด้วย Static Admittance to
Ground โดยเราจะคิดว่าโหลดที่บัสเป็นโหลดที่มีกำลังคงที่ ($P_{LP} - jQ_{LP}$) และมีขนาดแรงดันไฟฟ้า
ที่บัสเท่ากับ $|E_p|$ ซึ่งค่าแอดมิทแตนซ์ (y_{po}) นี้สามารถหาได้จาก

$$y_{po} = \frac{(P_{LP} - jQ_{LP})}{|E_p|^2} \quad (4.4-4)$$

การเชื่อมต่อแบบจำลอง กระทำโดยใช้ค่ากระแสที่บัส (I_i) ซึ่งสัมพันธ์กับค่ากระแส
สเตเตอร์ของเครื่องจักรกล โดยเราจะต้องหาค่ากระแสสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลก่อน ซึ่งจะแยก
คิดเป็นกระแสสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ แต่
เนื่องจากเราทำการลดรูปแบบจำลองของเครื่องจักรกล โดยการตัดค่าการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่
เหล็กคล่องขดลวดในสเตเตอร์ถูกตัดทิ้ง ดังนั้นสมการแรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์ของเครื่องกำเนิด
ไฟฟ้าจะเกี่ยวข้องกับ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์กับค่ากระแสสเตเตอร์และค่า
ฟลักซ์แม่เหล็กคล่องขดลวดคว่ำนาที่ ซึ่งสมการแรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์สามารถเขียนในเทอมของ
แรงดันไฟฟ้าหลังอิมพีแดนซ์ (Voltage behind Impedance, e°_{qds}) ได้ดังนี้

$$V^{\circ}_{qds} = e^{\circ}_{qds} - Z_{qds} i^{\circ}_{qds} \quad (4.4-5)$$

ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (V^e_{qds}), แรงดันไฟฟ้าหลังอิมพีแดนซ์ (e^e_{qds}) และค่ากระแสที่สเตเตอร์ของเครื่องจักรกล (i^e_{qds}) จะอยู่ในรูปของคอสีนัสเมตริกซ์ที่อยู่ในแกนอ้างอิงซิงโครนัส ซึ่งสมการแรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์เหนี่ยวนำมีสัมพันธ์กับค่าฟลักซ์แม่เหล็กคล่องขดลวดต่อวินาทีดังนี้

4.4.1 การหาค่ากระแสสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส [13]

ในการคำนวณหาค่ากระแสสเตเตอร์ (i^e_{qds}) จะเริ่มจากหาค่าแรงดันไฟฟ้าหลังอิมพีแดนซ์ใน q-axis และ d-axis คือ e^e_{qs} และ e^e_{ds} ตามลำดับ โดยค่าของตัวแปรต่าง ๆ จะมาจากเครื่องจักรกลซิงโครนัส เช่น ค่าฟลักซ์แม่เหล็กคล่องขดลวดต่อวินาที ($\psi'^r_{fd}, \psi'^r_{kd}, \psi'^r_{kq}$) ซึ่งอยู่บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ และมุม δ คือมุมของโรเตอร์

$$e^e_{qs} = \frac{\omega_e}{\omega_b} [X_{bd} (\frac{\psi'^r_{fd}}{X'_{lfd}} + \frac{\psi'^r_{kd}}{X'_{lkd}}) \cos \delta - X_{bq} (\frac{\psi'^r_{kq}}{X'_{lkq}}) \sin \delta] \quad (4.4-6)$$

$$e^e_{ds} = -\frac{\omega_e}{\omega_b} [X_{bd} (\frac{\psi'^r_{fd}}{X'_{lfd}} + \frac{\psi'^r_{kd}}{X'_{lkd}}) \sin \delta + X_{bq} (\frac{\psi'^r_{kq}}{X'_{lkq}}) \cos \delta] \quad (4.4-7)$$

นอกจากนี้ยังต้องคำนวณหาค่าสมาชิกของอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ (Z_{qds}) ดังในสมการที่ (4.4-8) - (4.4-11) เพื่อหาค่าของแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ (Y_{qds}) ต่อไปดังในสมการที่ (4.4-15)

$$Z_{qds(1,1)} = r_s + \frac{\omega_e}{\omega_b} (X_{bd} - X_{bq}) \cos \delta \sin \delta \quad (4.4-8)$$

$$Z_{qds(1,2)} = \frac{\omega_e}{\omega_b} (X_{ls} + X_{bd} \cos^2 \delta + X_{bq} \sin^2 \delta) \quad (4.4-9)$$

$$Z_{qds(2,1)} = -\frac{\omega_e}{\omega_b} (X_{ls} + X_{bd} \sin^2 \delta + X_{bq} \cos^2 \delta) \quad (4.4-10)$$

$$Z_{qds(2,2)} = r_s - \frac{\omega_e}{\omega_b} (X_{bd} - X_{bq}) \cos \delta \sin \delta \quad (4.4-11)$$

$$X_{bq} = \left(\frac{1}{X_{mq}} + \frac{1}{X'_{lkq}} \right)^{-1} \quad (4.4-12)$$

$$X_{bd} = \left(\frac{1}{X_{md}} + \frac{1}{X'_{lfd}} + \frac{1}{X'_{lkd}} \right)^{-1} \quad (4.4-13)$$

เราสามารถหาค่ากระแสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (I^e_{qds}) ได้ดังในสมการที่ (4.4-14) ซึ่งตัวห้อย "n" บอกถึงลำดับที่ของเครื่องจักรกล

$$I^e_{qds,n} = J^e_{qds,n} - Y_{qds,n} V^e_{qds,n} \quad (4.4-14)$$

โดย $Y_{qds,n} = (Z_{qds,n})^{-1} \quad (4.4-15)$

$$J^e_{qds,n} = Y_{qds,n} e^e_{qds,n} \quad (4.4-16)$$

4.4.2 การหาค่ากระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [13]

ในทำนองเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เราสามารถเขียนแรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในเทอมของแรงดันไฟฟ้าหลังอิมพีแดนซ์ได้ดังสมการ (4.4-5) โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (e^e_{qs}, e^e_{ds}) สัมพันธ์กับฟลักซ์แม่เหล็กคอลล่วงขดลวดคดดังนี้

$$e^e_{qs} = \frac{\omega_e}{\omega_b} X_b \left(\frac{\psi^e_{dr}}{X'_{lr}} \right) \quad (4.4-17)$$

$$e^e_{ds} = -\frac{\omega_e}{\omega_b} X_b \left(\frac{\psi^e_{qr}}{X'_{lr}} \right) \quad (4.4-18)$$

โดย $Z_{qds}(1,1) = Z_{qds}(2,2) = r_s \quad (4.4-19)$

$$Z_{qds}(1,2) = Z_{qds}(2,1) = \frac{\omega_e}{\omega_b} (X_{ls} + X_b) \quad (4.4-20)$$

$$X_b = \left(\left(\frac{1}{X_m} + \frac{1}{X'_{lr}} \right) \right)^{-1} \quad (4.4-21)$$

เราสามารถหาค่ากระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้โดยใช้สมการเดียวกับการหากระแสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังสมการที่ (4.4-14) ถึง (4.4-16)

ที่ปัสแต่ละปัสอาจประกอบด้วยเครื่องจักรกลได้หลายตัว รวมทั้งอาจเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งเราสามารถหาค่ากระแสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลเหล่านั้นรวมกันได้ โดยสมมุติเครื่องจักรกล m ตัวที่ปัส i เราจะได้

$$I_{qd,i}^e = J_{qd,i}^e - Y_{qd,i} V_{qd,i}^e \quad (4.4-22)$$

$$Y_{qd,i} = \sum_{n=1}^m Y_{qdsn} \quad (4.4-23)$$

$$J_{qd,i}^e = \sum_{n=1}^m J_{qdsn}^e \quad (4.4-24)$$

ซึ่งค่าของกระแสเตเตอร์รวมของเครื่องจักรกล ($i_{qd,i}^e$) นี้คือ ค่ากระแสที่ปัส (I_i) ดังที่กล่าวในสมการที่ (4.4-3) นั้นเอง

4.5 สรุป

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองที่ใช้ในการสร้างโปรแกรมดังในภาคผนวก

4.5.1 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนิส

(Synchronous Generator Model)

4.5.1.1 แบบจำลองลดรูปของเครื่องจักรกลซิงโครนิส

(Reduced-order Model of Synchronous Machine) [11,13]

ได้กล่าวถึงแบบจำลองลดรูปของเครื่องจักรกลซิงโครนิสดังในสมการที่ (4.2-1) โดยได้นำมาแสดงใหม่ดังในสมการที่ (4.5-1) ซึ่งในการสร้างโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ระบบโคเจนเนอเรชันนี้ได้ใช้แบบจำลองลดรูปร่วมกับสมการการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ (4.2-6)-(4.2-7) ในการหาค่าของฟลักซ์แม่เหล็กคล้องขดลวดค่อวินาที และความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ที่เวลาใดใด

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_{qs} \\ \dot{v}_{ds} \\ \dot{v}_{kq} \\ \dot{v}_{fd} \\ \dot{v}_{kd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_s a_{11} & \frac{\omega_e}{\omega_b} & -r_s a_{12} & 0 & 0 \\ -\frac{\omega_e}{\omega_b} & -r_s b_{11} & 0 & -r_s b_{12} & -r_s b_{13} \\ r'_{kq} a_{21} & 0 & r'_{kq} a_{22} + \frac{p}{\omega_b} & 0 & 0 \\ 0 & X_{md} b_{21} & 0 & X_{md} b_{22} + \frac{X_{md} p}{r'_{fd} \omega_b} & X_{md} b_{23} \\ 0 & r'_{kd} b_{31} & 0 & r'_{kd} b_{32} & r'_{kd} b_{33} + \frac{p}{\omega_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi'_{qs} \\ \psi'_{ds} \\ \psi'_{kq} \\ \psi'_{fd} \\ \psi'_{kd} \end{bmatrix} \quad (4.5-1)$$

4.5.1.2 แบบจำลองเอ็กไซเตชันเตอร์ (Excitation Model) [9,14]

แบบจำลองเอ็กไซเตชันเตอร์ที่ใช้ในการสร้างโปรแกรมจะเป็นดังสมการที่ (3.2.2-1)-

(3.2.2-5) โดยได้นำมาแสดงใหม่ในสมการที่ (4.5-2)-(4.5-6)

$$pV_1 = \frac{1}{\tau_r} V_1 - \frac{1}{\tau_r} V_1 \quad (4.5-2)$$

$$pV_R = \frac{K_A}{\tau_A} V_e - \frac{1}{\tau_A} V_R \quad (4.5-3)$$

$$p efd = \frac{1}{\tau_e} V_R - \left[\frac{(KE + SE)}{\tau_e} \right] efd \quad (4.5-4)$$

$$p^2(V_3) = \frac{K_F K_A}{\tau_{F1} \tau_{F2} \tau_A} V_e - \frac{K_F}{\tau_{F1} \tau_{F2} \tau_A} V_R - \frac{(\tau_{F1} + \tau_{F2})}{\tau_{F1} \tau_{F2}} pV_3 - \frac{1}{\tau_{F1} \tau_{F2}} V_3 \quad (4.5-5)$$

$$V_e = V_{REF} + V_s - V_1 - V_3 \quad (4.5-6)$$

4.5.1.3 แบบจำลองโกเวอเนอร์กังหันก๊าซ

(Gas-turbine Governor System) [14]

แบบจำลองโกเวอเนอร์กังหันก๊าซที่ใช้ในการสร้างโปรแกรมจะเป็นดังสมการที่ (3.3.3-1)-

(3.3.3-4) โดยได้นำมาแสดงใหม่ในสมการที่ (4.5.7)-(4.5-10)

$$\begin{aligned} pX_4 &= X_3 \\ &= \left(\frac{K_C}{T_C}\right) \frac{\Delta\omega_r}{\omega_b} - K_C p \left(\frac{\omega_r}{\omega_b}\right) \end{aligned} \quad (4.5-7)$$

$$\begin{aligned} pX_6 &= \frac{(X_5 - X_6)}{T_{FV}} \\ &= \frac{(X_4 + W_{F10s} - X_6)}{T_{FV}} \end{aligned} \quad (4.5-8)$$

$$pX_7 = \frac{(X_6 - X_7)}{T_{FT}} \quad (4.5-9)$$

$$\begin{aligned} T_{pm} &= (X_9 + X_{10}) \\ &= C_{1GT}(X_7 - C_{2GT}) + C_{GNGT} \frac{\Delta\omega_r}{\omega_b} \end{aligned} \quad (4.5-10)$$

4.5.2 แบบจำลองลดรูปของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

(Reduced-order Model of Induction Motor)

ได้กล่าวถึงแบบจำลองลดรูปของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสมการที่ (4.3-1) โดยได้นำมาแสดงใหม่ในสมการที่ (4.5-11) ซึ่งในการสร้างโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบนี้ ได้ใช้แบบจำลองลดรูปร่วมกับสมการการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ (4.3-4) เพื่อหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กค้ำของขดลวดค่อวินาทีและความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เวลาใดเวลา

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v'_{qr} \\ v'_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r_s X'_{rr}}{D} & \frac{\omega_e}{\omega_b} & -\frac{r_s X_M}{D} & 0 \\ -\frac{\omega_e}{\omega_b} & \frac{r_s X'_{rr}}{D} & 0 & -\frac{r_s X_M}{D} \\ -\frac{r'_r X_M}{D} & 0 & \frac{r'_r X_{rs}}{D} + \frac{p}{\omega_b} & \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \\ 0 & -\frac{r'_r X_M}{D} & -\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} & \frac{r'_r X_{rs}}{D} + \frac{p}{\omega_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \\ \psi'_{qr} \\ \psi'_{dr} \end{bmatrix} \quad (4.5-11)$$

4.5.3 แบบจำลองระบบ (Network Model) [4,5]

ได้กล่าวถึงแบบจำลองระบบในบทที่ 4 นี้ ดังในสมการที่ (4.4-2) ซึ่งนำมาแสดงใหม่
ดังสมการที่ (4.5-12)

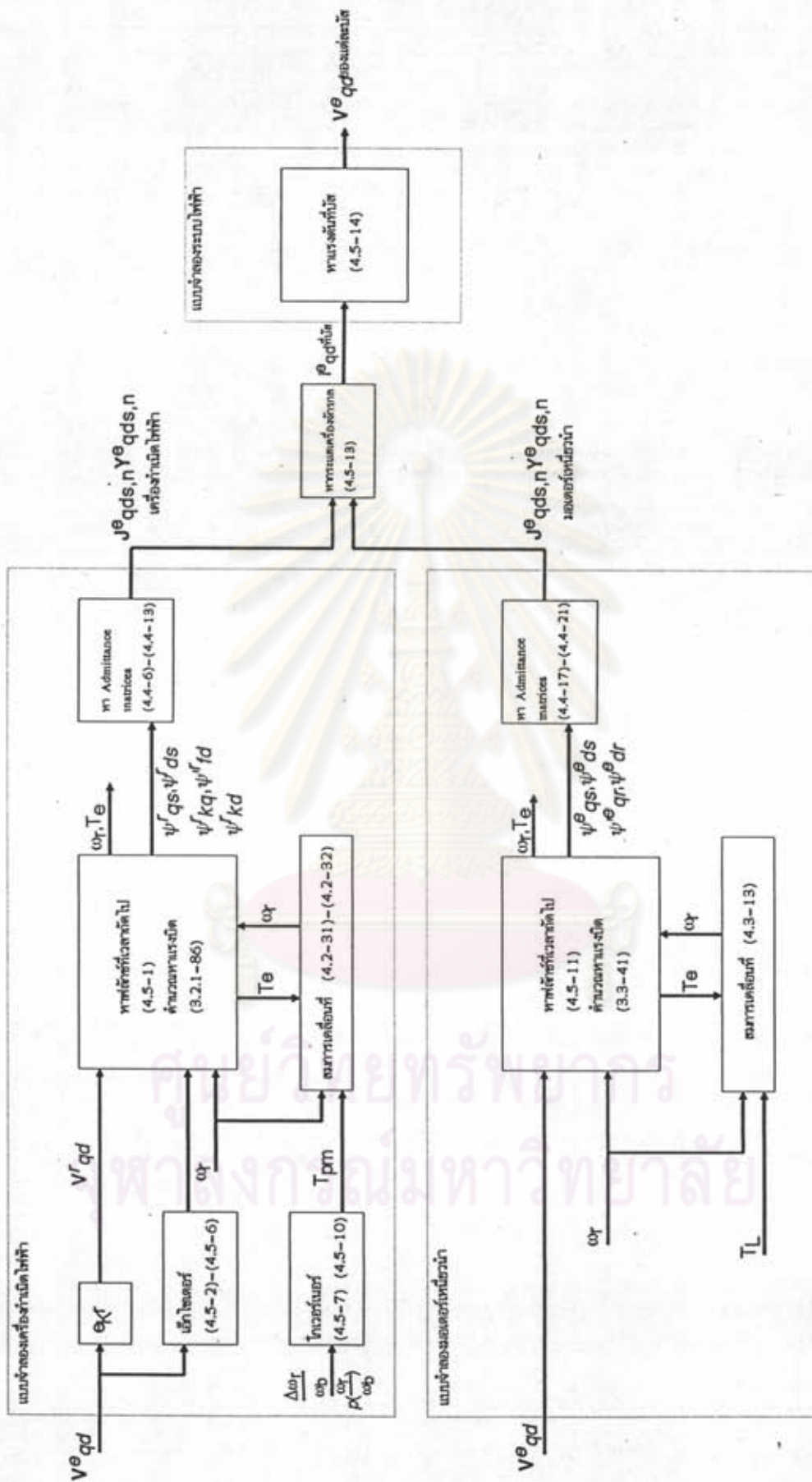
$$E_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left(I_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} E_j \right) \quad \begin{matrix} i = 1, 2, 3, \dots, n \\ i \neq s \end{matrix} \quad (4.5-12)$$

ซึ่งเราสามารถเชื่อมต่อสมการระบบเข้ากับสมการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนิส และของ
มอเตอร์เหนี่ยวนำได้โดยค่ากระแสที่บัส (I_i) จะเป็นผลรวมทางพีชคณิตของค่ากระแสของเครื่อง
จักรกลที่เกาะติดอยู่กับบัสนั้น โดยค่ากระแสของเครื่องจักรกลนี้คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนิส
และมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งเราสามารถหาค่าได้โดยสมการที่ (4.4-22) นำมาแสดงใหม่ดังใน
สมการที่ (4.5-13)

$$i_{qd,i}^e = J_{qd,i}^e - Y_{qd,i} V_{qd,i}^e \quad (4.5-13)$$

ตัวทึบ "e" บอกว่าตัวแปรนั้นอยู่บนแกนอ้างอิงเชิงโครนิสซึ่งเป็นแกนเดียวกับสมการระบบ และ
ตัวทึบ "i" แทนลำดับที่ของบัสที่มีอยู่ในระบบ

การเชื่อมต่อแบบจำลองต่าง ๆ จะเป็นดังในรูปที่ 4.5-1 ซึ่งเมื่อจบการคำนวณในแต่ละ
รอบจะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสใหม่ (V_{qd}^e) และในระหว่างการคำนวณของเครื่องจักรกลแต่ละ
ตัวจะได้ค่าสภาวะของตัวมันเอง (ฟลักซ์แม่เหล็กคล้องขดลวดต่อวินาที, ความเร็วเชิงมุมของโร
เตอร์ และขนาดมุมของโรเตอร์) ซึ่งค่าทั้งหมดนี้จะนำมาใช้ เป็นสภาวะ เริ่มต้นของการคำนวณใน
รอบถัดไป



รูปที่ 4.5-1 การเชื่อมต่อแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา