

การศึกษาแบบจำลอง

3.1 คำนำ

การศึกษาเสถียรภาพของระบบโศชนเนอเรชั่น เป็นการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้า, ค่ากระแส, ค่ากำลังไฟฟ้า, รวมทั้งความเร็วและแรงบิดของเครื่องจักรกลในระบบ ซึ่งเสถียรภาพของระบบจะเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาในขั้นตอนของการวางแผนระบบใหม่เพื่อให้ค่าความเชื่อถือได้ (Reliability) ของระบบมีค่าสูงพอ และเพื่อให้การทำงานของเครื่องจักรกลในระบบสามารถดำเนินงานได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นในการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลังจึงจำเป็นต้องออกแบบให้ระบบสามารถดำรงอยู่ได้ในภาวะของการรบกวนต่างๆ ที่เป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้นในระบบนั้น

ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบนั้น จะเริ่มต้นโดยการคำนวณหาค่าโพลคโพล์ของระบบ เพื่อที่เราจะได้ทราบสภาวะเริ่มต้น ซึ่งเป็นภาวะที่สมดุลก่อนเกิดการรบกวนขึ้นในระบบ ซึ่งในขั้นตอนของการคำนวณหาค่าโพลคโพล์นี้ องค์ประกอบของระบบที่ใช้ในการคำนวณจะประกอบด้วยบัสของระบบ, สายส่ง และหม้อแปลง เมื่อจะทำการคำนวณเสถียรภาพของระบบเราจะต้องรวมวงจรสมมูลของเครื่องจักรต่างๆและโพลคโพล์ที่อยู่ในระบบเข้าด้วย ดังนั้นหลังการคำนวณหาค่าโพลคโพล์ สมาชิกในแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ (Y_{bus}) จะต้องถูกปรับปรุงโดยการรวมผลของเครื่องจักรกลและโพลคโพล์นั้นเข้าไปด้วย

คุณลักษณะต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสและมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถแทนได้ โดยสมการอนุพันธ์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Differential Equations) ซึ่งจำนวนของสมการอนุพันธ์นี้จะแสดงถึงความละเอียดของแบบจำลอง ในที่นี้จะใช้แบบจำลองแบบละเอียดซึ่งจะทำให้เราสามารถสังเกตคุณสมบัติต่างๆ ทางไดนามิกส์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้เป็นอย่างดีสำหรับวิธีทางคณิตศาสตร์ที่สามารถนำมาใช้ในการแก้สมการอนุพันธ์นี้ อาจกระทำได้โดยวิธีของ

โมดิฟาย ออสมเลอร์ (Modified Euler Method) หรือ รังคุด้า (Runge-Kutta Method) ซึ่งเป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่จะคาดเดาค่าของตัวแปรอนุพันธ์ในเวลาถัดไปได้ ในลักษณะต่อเนื่องกับค่าเดิมที่มีอยู่ โดยการกำหนดตัวแปรที่ต้องการทราบค่าในช่วงเวลาถัดไปเป็นตัวแปรตาม (Dependent Variable) และค่าตัวแปรอื่นในสมการเป็นตัวแปรอิสระ (Independent Variable) โดยค่าของตัวแปรอิสระจะคงที่ตลอดช่วงของการคำนวณ ความแม่นยำของการคำนวณจะขึ้นกับการเลือกขนาดของช่วงในแต่ละช่วงที่ทำกรคำนวณ (ในที่นี้คือ ช่วงของเวลา Δt)

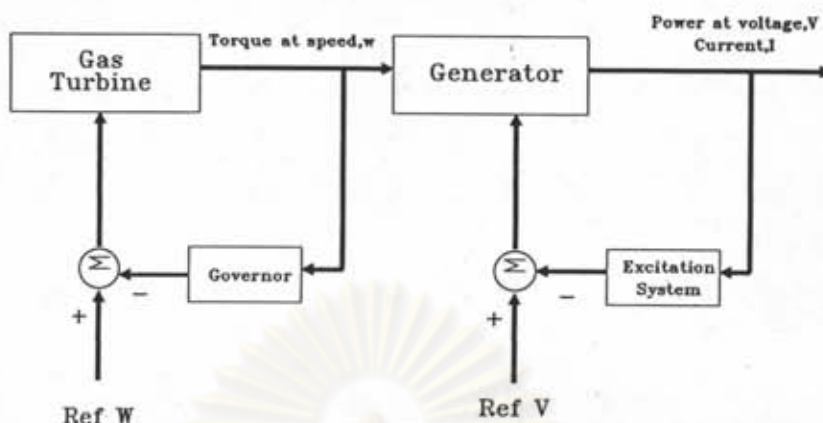
3.2 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ระบบโคเซ็นเนอเรชันจะเป็นระบบขนาดเล็กที่เชื่อมต่อกับระบบใหญ่ของรัฐ โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายในระบบเองมักจะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้านิถกัณฑ์กันก๊าซ (โดยเฉพาะในโรงงานอุตสาหกรรมประเภทปิโตรเคมี) เนื่องจากความต้องการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้สูงขึ้น โดยใช้ระบบความร้อนร่วม แต่คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านิถกัณฑ์กันก๊าซที่สำคัญ คือมักจะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดเล็ก ที่มีค่าของ Rotating Inertia ค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้านิถกัณฑ์อื่น ๆ ไม่ว่าจะเป็นกังหันไอน้ำ หรือกังหันพลังน้ำ

ในการศึกษาระบบโคเซ็นเนอเรชัน ได้ทำการสร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านิถกัณฑ์กันก๊าซ โดยมีองค์ประกอบดังรูปที่ 3.2-1 คือ

- แบบจำลองเครื่องจักรกลแบบซิงโครนัส (Synchronous Machine Model)
- แบบจำลองของเอ็กไซเตอร์ (Exciter Model)
- แบบจำลองโกเวเนอร์ (Governor Model)

ซึ่งจะกล่าวถึงแบบจำลองทั้งสามในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.2-1 องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.2.1 แบบจำลองเครื่องจักรกลแบบซิงโครนัส

(Synchronous Machine Model) [11,15]

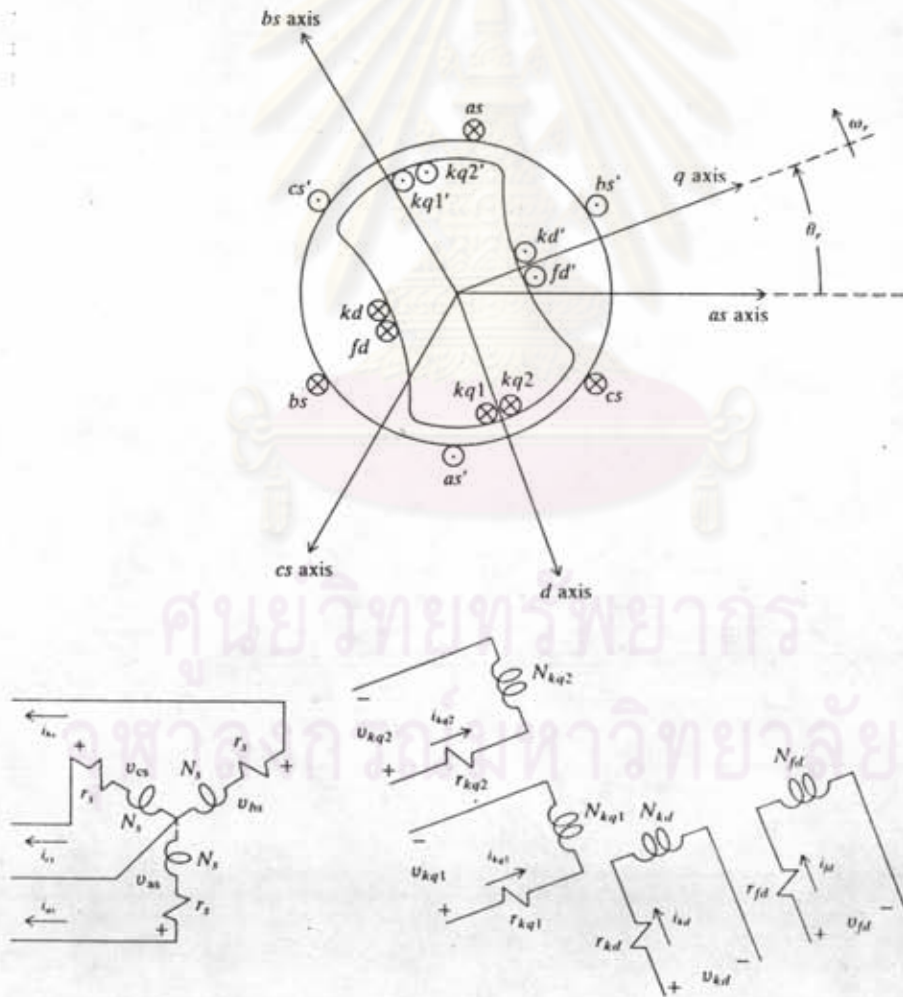
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกือบทั้งหมดที่มีใช้อยู่ จะประกอบด้วยเครื่องจักรกลแบบซิงโครนัส ซึ่งอาจจะขับเคลื่อนด้วยพลังน้ำ, พลังไอน้ำ, หรือเครื่องยนต์ประเภทสันดาป โดยเครื่องจักรกลแบบซิงโครนัสจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งในการศึกษาคุณสมบัติทาง Electromechanical ต่างๆ ของเครื่องจักรกลแบบซิงโครนัส สามารถกระทำได้โดยการสร้างแบบจำลองขึ้น

3.2.1.1 การจัดเรียงตัวของขดลวดในเครื่องจักรกลแบบซิงโครนัส

การจัดเรียงตัวของขดลวดในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส 2 ขั้ว, 3 เฟส, Wye Connected, Salient Pole จะเป็นดังรูปที่ 3.2-2 ซึ่งประกอบด้วยขดลวดสเตเตอร์จำนวน 3 ชุด ซึ่งแต่ละชุดจะแทนแต่ละเฟส คือ a_s , b_s และ c_s โดยขดลวดในแต่ละเฟสจะห่างกันเป็นมุม 120° มีจำนวนขดลวด N_s ชุด และมีค่าความต้านทาน r_s ส่วนในโรเตอร์จะประกอบด้วยขดลวดกำเนิดสนาม (Field Winding) 1 ชุด และขดลวดหน่วง (Damper Winding) จำนวน 3 ชุด ซึ่งขดลวดกำเนิดสนาม (fd) และขดลวดหน่วง (kd) 1 ชุดจะอยู่บนแกนแม่เหล็กเดียวกัน

คือ d -axis โดยขดลวดกำเนิดสนาม (ขดลวด fd) จะมีจำนวนขดลวดจำนวน N_{fd} ขด และมีค่าความต้านทาน r_{fd} และขดลวดหน่วงอีก 1 ชุด (ขดลวด kd) จะมีจำนวนขดลวดจำนวน N_{kd} ขด และมีค่าความต้านทาน r_{kd} ส่วนขดลวดหน่วง ($kq1, kq2$) อีก 2 ชุด จะอยู่บนแกนแม่เหล็ก q -axis โดยขดลวดหน่วง $kq1$ และขดลวดหน่วง $kq2$ จะมีจำนวนขดลวด N_{kq1} และ N_{kq2} ขดตามลำดับและมีค่าความต้านทาน r_{kq1} และ r_{kq2} ซึ่งแกนทั้งสองคือ d -axis และ q -axis จะต่างกันเป็นมุม 90° ทางไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.2-2 เรากำหนดบทบาทของเครื่องจักรกลเชิงโรตัสน์เป็นเซนเนอเรเตอร์ คือ ค่ากระแสเดเตอร์ทั้ง 3 เฟส (i_{as}, i_{bs}, i_{cs}) จะมีค่าบวกในทิศทางออกจากขั้วของเครื่องจักรกล ดังรูป



รูปที่ 3.2-2 เครื่องจักรกลแบบซิงโครตัส 2 ขั้ว, 3 เฟส, Wyne Connected, Salient Pole

จากรูปที่ 3.2-2 มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องคือ

i_{as}, i_{bs}, i_{cs}	คือ กระแสที่ไหลออกจากขดลวดสเตเตอร์ของแต่ละเฟส
v_{as}, v_{bs}, v_{cs}	คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าคล่องความต้านทานและอินดักแตนซ์ในแต่ละเฟสของสเตเตอร์
i_{kd}, i_{kq1}, i_{kqe}	คือ กระแสที่ไหลเข้าขดลวดหน่วงที่อยู่ในโรเตอร์
i_{fd}	คือ กระแสที่ป้อนให้แก่ขดลวดกำเนิดสนามที่อยู่ในโรเตอร์
v_{kd}, v_{kq1}, v_{kqe}	คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าคล่องความต้านทานและอินดักแตนซ์ในขดลวดหน่วงที่อยู่ในโรเตอร์
v_{fd}	คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าคล่องความต้านทานและอินดักแตนซ์ในขดลวดกำเนิดสนามที่อยู่ในโรเตอร์

สำหรับขดลวดหน่วงทั้ง 3 ขดนั้น ถึงแม้จากรูปที่ 3.2-2 จะแสดงในลักษณะการป้อนแรงดันไฟฟ้า (v_{kd}, v_{kq1}, v_{kqe}) เข้าไป แต่โดยแท้จริงแล้วจะถูกสังเคราะห์เข้าหากันในแต่ละขดของตัวเอง เพื่อเป็นเส้นทางของกระแสที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นในแต่ละขดของขดลวดหน่วง (i_{kd}, i_{kq1}, i_{kqe}) ซึ่งลักษณะกระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะคล้ายกับที่เกิดขึ้นในขดลวดกรงกระรอก (Squirrel-Cage Windings) ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.2.1.2 ทฤษฎีแกนอ้างอิง (Reference Frame Theory)

คุณสมบัติของเครื่องจักรกลเชิงโคโรนัส สามารถแสดงได้ด้วยสมการแรงดันไฟฟ้าซึ่งอยู่ในรูปของอนุพันธ์ ซึ่งเราพบว่าค่าอินดักแตนซ์ (Inductance) ของเครื่องจักรกลเป็นฟังก์ชันของความเร็วโรเตอร์ โดยค่าสัมประสิทธิ์ของสมการอนุพันธ์จะเป็นตัวแสดงคุณสมบัติของเครื่องจักรกลนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ยกเว้นแต่โรเตอร์ของเครื่องจักรกลอยู่กับที่ เราจะทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรเหล่านี้เพื่อลดความซับซ้อนของสมการอนุพันธ์ การเปลี่ยนค่าตัวแปรสามารถกระทำโดยการแปลงค่าไปยังแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วใด ๆ (Arbitrary Reference Frame) สำหรับในกรณีของเครื่องจักรกลเชิงโคโรนัส เราสามารถแปลงค่าตัวแปรของสเตเตอร์ไปยังแกนอ้างอิงใด ๆ ได้ แต่พบว่าค่าของอินดักแตนซ์ที่เปลี่ยนไปตามเวลาจะหมดไปก็ต่อเมื่อแกนอ้างอิงนี้อยู่ในโรเตอร์

การเปลี่ยนค่าของตัวแปรได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เครื่องจักรกล เพื่อตัดค่าของอินตีกแตนท์ที่เปลี่ยนไปตามเวลา โดยในที่นี้จะพูดถึงการแปลงค่าตัวแปรที่อยู่ในสเตเตอร์ (Stationary Circuits) ไปยังแกนอ้างอิงใด ๆ (Arbitrary Reference Frame) และนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับขดลวดโรเตอร์ ในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำ การเปลี่ยนค่าตัวแปร โดยการแปลงค่าตัวแปรทั้ง 3 เฟส ในวงจรสเตเตอร์ไปยังแกนอ้างอิงใด ๆ สามารถกระทำโดย

$$f_{qdos} = K_S f_{abcs} \quad (3.2.1-1)$$

โดย $(f_{qdos})^T = [f_{qs} \ f_{ds} \ f_{os}] \quad (3.2.1-2)$

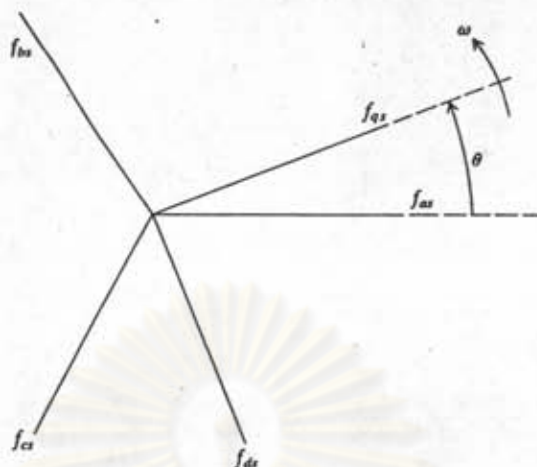
$$(f_{abcs})^T = [f_{as} \ f_{bs} \ f_{cs}] \quad (3.2.1-3)$$

$$K_S = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \theta & \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.2.1-4)$$

$$\theta = \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta(0) \quad (3.2.1-5)$$

จากสมการข้างต้น f แทนแรงดันไฟฟ้า, กระแส, ค่าฟลักซ์แม่เหล็ก หรือประจุไฟฟ้า ตัวอักษร "T" แทนค่าทรานสโพสของเมทริกซ์ ตัวห้อย "qs", "ds", "os" บอกว่าค่าของตัวแปรเป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับวงจรสเตเตอร์บน Quadrature-directed Axis และตัวห้อย "as", "bs", "cs" บอกถึงค่าตัวแปรเป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับวงจรสเตเตอร์บนแกนจริง คือ แกน abc

การแปลงค่าไปยังแกนอ้างอิงใด ๆ สามารถแสดงในรูปความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติระหว่างค่าตัวแปร ดังรูปที่ 3.2-3 ซึ่งการแปลงค่าตัวแปรของสมการนั้น f_{qs} , f_{ds} คือค่าตัวแปรที่ตั้งฉากกันและหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω ขณะที่ค่าตัวแปร f_{as} , f_{bs} , f_{cs} คือค่าตัวแปรที่วางตัวบนแกนของสเตเตอร์ ซึ่งแต่ละค่าห่างกันเป็นมุม 120°



รูปที่ 3.2-3 การแปลงค่าสำหรับวงจรสแตเตอร์โดยแสดงในรูปความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติ

จากรูปที่ 3.2-2 จะเห็นได้ว่า บนแกนสแตเตอร์ของเครื่องจักรกลเชิงโรตารีประกอบด้วย ความต้านทาน (r_s) และอินดักแตนซ์ในทั้ง 3 แกน ซึ่งเราจะทำการแปลงค่าความต้านทาน และอินดักแตนซ์ไปยังแกนอ้างอิงใด ๆ

การแปลงค่าความต้านทานในวงจรสแตเตอร์ไปยังแกนอ้างอิงใด ๆ

ในวงจรความต้านทาน 3 เฟส ค่าแรงดันไฟฟ้าจะขึ้นกับค่ากระแส ดังสมการ

$$V_{abc} = r_s i_{abc} \quad (3.2.1-6)$$

เราจะทำการแปลงค่าของตัวแปรไปยังแกนอ้างอิงใด ๆ ได้โดย

$$V_{qdos} = K_s r_s (K_s)^{-1} i_{qdos} \quad (3.2.1-7)$$

สมการข้างต้นจะอยู่ในรูปเมทริกซ์ r_s จะเป็นเมทริกซ์ไดอะกอนอล คือ

$r_s = \text{diag} [r_{aa}, r_{bb}, r_{cc}]$ โดยสมาชิกในแนวไดอะกอนอล จะมีค่าเท่ากัน ดังนั้น

$$K_S r_S (K_S)^{-1} = r_S \quad (3.2.1-8)$$

จะเห็นว่าเมตริกซ์ความต้านทานบนแกนอ้างอิงใด ๆ จะเหมือนกับเมตริกซ์ความต้านทานจริงบนแกนของสเตเตอร์ เมื่อในวงจรของสเตเตอร์มีค่าความต้านทานในแต่ละเฟสเหมือนกัน ดังนั้น สมการที่ (3.2.1.7) เราจะได้

$$V_{qdos} = r_S i_{qdos} \quad (3.2.1-9)$$

การแปลงค่าอินดักแตนซ์ในวงจรสเตเตอร์ไปยังแกนอ้างอิงใด ๆ

ในวงจรอินดักทีฟ 3 เฟส ค่าแรงดันไฟฟ้าจะขึ้นกับค่าอนุพันธ์ของฟลักซ์แม่เหล็กค้ำลองชดลวด ($p\lambda_{abcs}$) ค้ำลองชดลวดดังนี้

$$V_{abcs} = p\lambda_{abcs} \quad (3.2.1-10)$$

โดย p คือรูปของการอนุพันธ์เทียบกับเวลา (d/dt) ในกรณีของ Magnetic linear System เราสามารถกำหนดค่าฟลักซ์แม่เหล็กค้ำลองชดลวด ในรูปผลคูณของเมตริกซ์ระหว่างอินดักแตนซ์และกระแสก่อนจะทำการเปลี่ยนตัวแปร ซึ่งในกรณีของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ค่าของเมตริกซ์อินดักแตนซ์จะขึ้นกับตำแหน่งของโรเตอร์ ดังนั้นในรูปของตัวแปรที่ถูกแทนที่สมการที่ (3.2.1-10) จะเปลี่ยนเป็น

$$V_{qdos} = K_S p [(K_S)^{-1} \lambda_{qdos}] \quad (3.2.1-11)$$

ซึ่งสามารถเขียนในอีกรูปได้เป็น

$$V_{qdos} = K_S p [(K_S)^{-1}] \lambda_{qdos} + K_S (K_S)^{-1} p \lambda_{qdos} \quad (3.2.1-12)$$

ซึ่งค่า

$$p[(K_s)^{-1}] = \omega \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \\ -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \end{bmatrix} \quad (3.2.1-13)$$

และ

$$K_s p[(K_s)^{-1}] = \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.2.1-14)$$

ω คือ ค่าความเร็วเชิงมุมของแกนอ้างอิงใด ๆ
ดังนั้น สมการที่ (3.2.1-12) สามารถเขียนในรูปเมตริกซ์ ได้ดังนี้

$$V_{qdos} = \omega \lambda ds + p \lambda q ds \quad (3.2.1-15)$$

$$\text{โดย } (\lambda ds)^T = [\lambda ds \quad -\lambda qs \quad 0] \quad (3.2.1-16)$$

สมการ (3.2.1-14) สามารถเขียนกระจายออกได้เป็น

$$V_{qs} = \omega_r \lambda ds + p \lambda qs \quad (3.2.1-17)$$

$$V_{ds} = -\omega_r \lambda qs + p \lambda ds \quad (3.2.1-18)$$

$$V_{os} = p \lambda os \quad (3.2.1-19)$$

จากหลักในแปลงค่าความต้านทานและอินดักแตนซ์ในวงจรถ่ายไปยังแกนอ้างอิงใด ๆ สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับกรณีของเครื่องจักรกลเชิงโรตอรีส์ที่มีการจัดเรียงตัวของขดลวด ดังรูปที่ 3.2-2 จะเห็นว่าที่วงจรถ่ายในแต่ละเฟสจะประกอบด้วยความต้านทานและอินดักแตนซ์ซึ่งเราสามารถใส่สมการที่ (3.2.1-9) และสมการที่ (3.2.1-15) ในการแปลงค่าตัวแปร ดังนั้น สมการไฟฟ้าในแกนอ้างอิงใด ๆ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$V_{qs} = -r_s i_{qs} + \omega_r \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \quad (3.2.1-20)$$

$$V_{ds} = -r_s i_{ds} - \omega_r \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \quad (3.2.1-21)$$

$$V_{os} = -r_s i_{os} + p \lambda_{os} \quad (3.2.1-22)$$

3.2.1.3 สมการแรงดันไฟฟ้าในแกนอ้างอิงโรเตอร์ของเครื่องจักรกลซิงโครนัส [11, 15]

ในการสร้างแบบจำลองของเครื่องจักรกลแบบซิงโครนัสนี้ จะถือว่าการทำงานของเครื่องจักรกลเป็นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยให้ทิศทางของกระแสสแตเตอร์เป็นบวกในทิศทางที่ไหลออกจากขั้วของเครื่องจักรกล ดังที่แสดงในรูปที่ 3.2-2 ซึ่งสมการของแรงดันในรูปของตัวแปรของเครื่องจักรกลสามารถเขียนในรูปของเมตริกซ์ ได้ดังนี้

$$V_{abcs} = -r_s i_{abcs} + p \lambda_{abcs} \quad (3.2.1-23)$$

$$V_{qdr} = r_r i_{qdr} + p \lambda_{qdr} \quad (3.2.1-24)$$

โดย $(f_{abcs})^T = [f_{as} \ f_{bs} \ f_{cs}] \quad (3.2.1-25)$

$$(f_{qdr})^T = [f_{kq1} \ f_{kq2} \ f_{fd} \ f_{kd}] \quad (3.2.1-26)$$

จากสมการข้างบนตัวห้อย "s" และ "r" เป็นการบ่งบอกว่า ตัวแปรนั้นอยู่บนขดลวดสแตเตอร์ หรือขดลวดโรเตอร์ นอกจากนี้ r_s และ r_r จะอยู่ในรูปของเมตริกซ์แนวทแยง (Diagonal Matrices) คือ

$$r_s = \text{diag} [r_s \ r_s \ r_s] \quad (3.2.1-27)$$

$$r_r = \text{diag} [r_{kq1} \ r_{kq2} \ r_{fd} \ r_{kd}] \quad (3.2.1-28)$$

จากในหัวข้อ 3.2.1.1 เราสามารถทำการแปลงค่าตัวแปรในขดลวดสแตเตอร์ของสมการแรงดันไฟฟ้าในเครื่องจักรกลซิงโครนัสไปยังแกนอ้างอิงใด ๆ โดยใช้ผลที่ได้จากสมการที่ (3.2.1-20)-(3.2.1-22) ซึ่งเราสามารถเขียนในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$V_{qdos} = -r_s i_{qdos} + \omega_r \lambda_{qds} + p \lambda_{qdos} \quad (3.2.1-29)$$

$$\text{โดย } (\lambda_{dqs})^T = [\lambda_{ds} \ -\lambda_{qs} \ 0] \quad (3.2.1-30)$$

ตัวแปรในขดลวดโรเตอร์ของเครื่องจักรกลเชิงโรตริสจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสมการแรงดันไฟฟ้าของโรเตอร์จะถูกกำหนดในแกนอ้างอิงโรเตอร์ ดังนั้นสมการที่ (3.2.1-8) จะเปลี่ยนไปเป็น

$$V^r_{qdr} = r^r i^r_{qdr} + p \lambda^r_{qdr} \quad (3.2.1-31)$$

โดยตัวอักษร "r" บ่งว่าตัวแปรนั้นอยู่บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ จากสมการที่ (3.2.1-29) ค่าของอินดักแตนซ์ที่เปลี่ยนตามเวลาจะถูกตัดทิ้งออกจากสมการแรงดันไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่อแกนอ้างอิงอยู่กับโรเตอร์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดสมการแรงดันไฟฟ้าของสเตเตอร์ในแกนอ้างอิงโรเตอร์ซึ่งสามารถกระทำได้ดังนี้

$$f^r_{qdos} = K^r f_{qdos} \quad (3.2.1-32)$$

โดย

$$K^r = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r - \theta) & -\sin(\theta_r - \theta) & 0 \\ \sin(\theta_r - \theta) & \cos(\theta_r - \theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2.1-33)$$

โดย θ_r คือมุมของแกนอ้างอิงโรเตอร์และ θ คือมุมของการอ้างอิงใด ๆ

เมื่อทำการย้ายตัวแปรทุกตัวของสเตเตอร์ไปยังบนแกนอ้างอิงโรเตอร์ เพื่อตัดค่าของอินดักแตนซ์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time-varying Inductances) ในสมการแรงดันทั้งไปจะได้สมการใหม่ดังนี้

$$V^r_{qdos} = -r_s i^r_{qdos} + \omega_r \lambda^r_{qds} + p \lambda^r_{qdos} \quad (3.2.1-34)$$

$$V^r_{qdr} = r^r i^r_{qdr} + p \lambda^r_{qdr} \quad (3.2.1-35)$$

โดย $(\lambda^r_{qds})^T = [\lambda^r_{ds} \ -\lambda^r_{qs} \ 0]$ (3.2.1-36)

จากสมการ (3.2.1-34) และ (3.2.1-35) สามารถเขียนกระจายออกได้เป็นแต่ละสมการย่อย ได้ดังนี้

$$V^r_{qs} = -r_s i^r_{qs} + \omega_r \lambda^r_{ds} + p \lambda^r_{qs} \quad (3.2.1-37)$$

$$V^r_{ds} = -r_s i^r_{ds} - \omega_r \lambda^r_{qs} + p \lambda^r_{ds} \quad (3.2.1-38)$$

$$V_{os} = -r_s i_{os} + p \lambda_{os} \quad (3.2.1-39)$$

$$V^r_{kq1} = r^r_{kq1} i^r_{kq1} + p \lambda^r_{kq1} \quad (3.2.1-40)$$

$$V^r_{kq2} = r^r_{kq2} i^r_{kq2} + p \lambda^r_{kq2} \quad (3.2.1-41)$$

$$V^r_{fd} = r^r_{fd} i^r_{fd} + p \lambda^r_{fd} \quad (3.2.1-42)$$

$$V^r_{kd} = r^r_{kd} i^r_{kd} + p \lambda^r_{kd} \quad (3.2.1-43)$$

โดยที่

$$\lambda^r_{qs} = -L_{ls} i^r_{qs} + L_{mq} (-i^r_{qs} + i^r_{kq1} + i^r_{kq2}) \quad (3.2.1-44)$$

$$\lambda^r_{ds} = -L_{ls} i^r_{ds} + L_{md} (-i^r_{ds} + i^r_{kd} + i^r_{fd}) \quad (3.2.1-45)$$

$$\lambda_{os} = -L_{ls} i_{os} \quad (3.2.1-46)$$

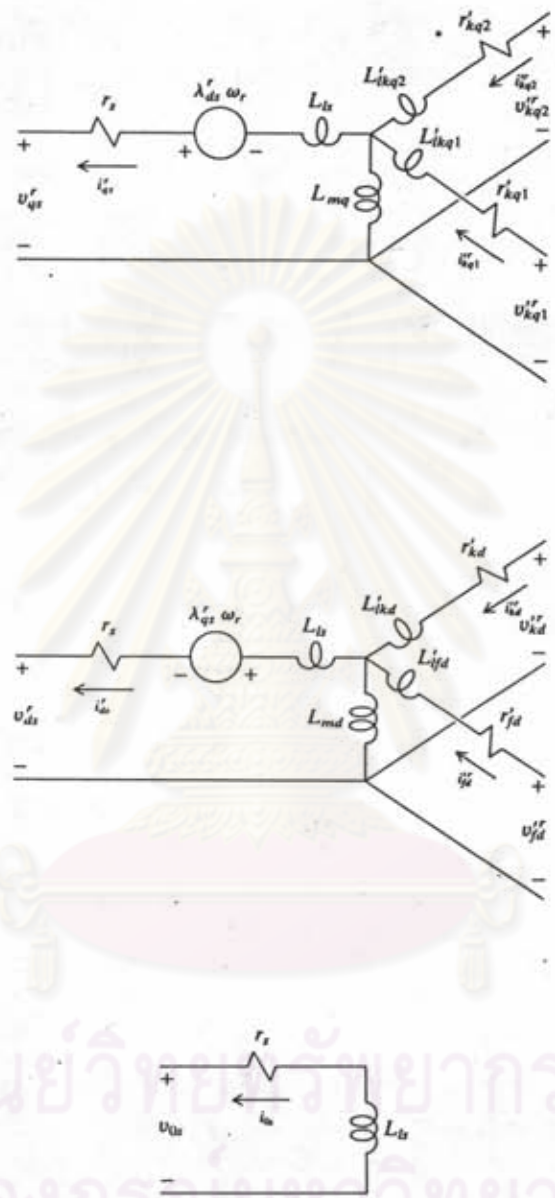
$$\lambda^r_{kq1} = L'_{lkq1} i^r_{kq1} + L_{mq} (-i^r_{qs} + i^r_{kq1} + i^r_{kq2}) \quad (3.2.1-47)$$

$$\lambda^r_{kq2} = L'_{lkq2} i^r_{kq2} + L_{mq} (-i^r_{qs} + i^r_{kq1} + i^r_{kq2}) \quad (3.2.1-48)$$

$$\lambda^r_{fd} = L'_{lfd} i^r_{fd} + L_{md} (-i^r_{ds} + i^r_{fd} + i^r_{kd}) \quad (3.2.1-49)$$

$$\lambda^r_{kd} = L'_{lkd} i^r_{kd} + L_{md} (-i^r_{ds} + i^r_{fd} + i^r_{kd}) \quad (3.2.1-50)$$

จากสมการแรงดันไฟฟ้าและสมการฟลักซ์แม่เหล็กคล้องขดลวด เราสามารถสร้างวงจรสมมูลแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรใน q -axis, แกน d -axis และ o -axis ได้ดังรูปที่ 3.2-4



รูปที่ 3.2-4 วงจรสมมูลของเครื่องจักรกลเชิงโรตริส 3 เฟส โดยแกนอ้างอิงอยู่บนแกนโรเตอร์ (Park's Equation)

เนื่องจากพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกล และพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้ามักจะอยู่ในค่าโอมหรือค่า per unit ของความต้านทานพื้นฐาน (Base Impedance) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องกำหนดสมการแรงดันไฟฟ้าและสมการฟลักซ์แม่เหล็กคล้องขดลวดในเทอมของค่ารีแอกแตนซ์ (Reactances) มากกว่าในเทอมของค่าอินดักแตนซ์ (Inductances) ผลก็คือสมการ (3.2.1-37)-(3.2.1-43) จะสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$V^{rqs} = -r_s i^{rqs} + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi^{rds} + \frac{p}{\omega_b} \psi^{rqs} \quad (3.2.1-51)$$

$$V^{rds} = -r_s i^{rds} - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi^{rqs} + \frac{p}{\omega_b} \psi^{rds} \quad (3.2.1-52)$$

$$V_{os} = -r_s i_{os} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{os} \quad (3.2.1-53)$$

$$V'^{rkq1} = r'_{kq1} i'^{rkq1} + \frac{p}{\omega_b} \psi'^{rkq1} \quad (3.2.1-54)$$

$$V'^{rkq2} = r'_{kq2} i'^{rkq2} + \frac{p}{\omega_b} \psi'^{rkq2} \quad (3.2.1-55)$$

$$V'^{rfd} = r'_{fd} i'^{rfd} + \frac{p}{\omega_b} \psi'^{rfd} \quad (3.2.1-56)$$

$$V'^{rkd} = r'_{kd} i'^{rkd} + \frac{p}{\omega_b} \psi'^{rkd} \quad (3.2.1-57)$$

โดยที่ ω_b คือ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าพื้นฐาน (Base Electrical Angular Velocity) ซึ่งใช้ในการคำนวณหาค่าอินดักซ์ทีฟ รีแอกแตนซ์ (Inductive Reactances) และค่าของฟลักซ์แม่เหล็กคล้องขดลวดต่อวินาที คือ

$$\psi^{rqs} = -X_{ls} i^{rqs} + X_{mq} (-i^{rqs} + i'^{rkq1} + i'^{rkq2}) \quad (3.2.1-58)$$

$$\psi^{rds} = -X_{ls} i^{rds} + X_{md} (-i^{rds} + i'^{rkd} + i'^{rfd}) \quad (3.2.1-59)$$

$$\psi_{os} = -X_{ls} i_{os} \quad (3.2.1-60)$$

$$\psi'^{rkq1} = X'_{lkq1} i'^{rkq1} + X_{mq} (-i^{rqs} + i'^{rkq1} + i'^{rkq2}) \quad (3.2.1-61)$$

$$\psi'^{rkq2} = X'_{lkq2} i'^{rkq2} + X_{mq} (-i^{rqs} + i'^{rkq1} + i'^{rkq2}) \quad (3.2.1-62)$$

$$\psi'^{rfd} = X'_{lfd} i'^{rfd} + X_{md} (-i^{rds} + i'^{rfd} + i'^{rkd}) \quad (3.2.1-63)$$

$$\psi'^{rkd} = X'_{lkd} i'^{rkd} + X_{md} (-i^{rds} + i'^{rfd} + i'^{rkd}) \quad (3.2.1-64)$$

จากสมการที่ (3.2.1-58) - (3.2.1-64) จะแสดงสมการของฟลักซ์แม่เหล็กค้ำของ
ขดลวดค้ำวินาทีเป็นฟังก์ชันของกระแส ซึ่งเราสามารถเขียนใหม่ในรูปของกระแสเป็นฟังก์ชัน
ของฟลักซ์แม่เหล็กค้ำของขดลวดค้ำวินาทีได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \bar{r}_{qs} \\ i'_{kq1} \\ i'_{kq2} \end{bmatrix} = \frac{1}{D_q} \begin{bmatrix} X'_{kq1} X'_{kq2} - X_{mq}^2 & -X_{mq} X'_{kq2} + X_{mq}^2 & -X_{mq} X'_{kq1} + X_{mq}^2 \\ X_{mq} X'_{kq2} - X_{mq}^2 & -X_q X'_{kq2} + X_{mq}^2 & X_q X_{mq} - X_{mq}^2 \\ X_{mq} X'_{kq1} - X_{mq}^2 & X_q X_{mq} - X_{mq}^2 & -X_q X'_{kq1} + X_{mq}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi'_{qs} \\ \psi'_{kq1} \\ \psi'_{kq2} \end{bmatrix} \quad (3.2.1-65)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{r}_{ds} \\ i'_{fd} \\ i'_{kd} \end{bmatrix} = \frac{1}{D_d} \begin{bmatrix} X'_{fd} X'_{kd} - X_{md}^2 & -X_{md} X'_{kd} + X_{md}^2 & -X_{md} X'_{fd} + X_{md}^2 \\ X_{md} X'_{kd} - X_{md}^2 & -X_d X'_{kd} + X_{md}^2 & X_d X_{md} - X_{md}^2 \\ X_{md} X'_{fd} - X_{md}^2 & X_d X_{md} - X_{md}^2 & -X_d X'_{fd} + X_{md}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi'_{ds} \\ \psi'_{fd} \\ \psi'_{kd} \end{bmatrix} \quad (3.2.1-66)$$

$$i_{0s} = \frac{1}{X_{ts}} \psi_{0s} \quad (3.2.1-67)$$

โดย

$$D_q = X_{mq}^2 (X_q - 2X_{mq} + X'_{kq1} + X'_{kq2}) - X_q X'_{kq1} X'_{kq2} \quad (3.2.1-68)$$

$$D_d = X_{md}^2 (X_d - 2X_{md} + X'_{fd} + X'_{kd}) - X_d X'_{fd} X'_{kd} \quad (3.2.1-69)$$

เมื่อเขียนค่าแรงค้ำสนามใหม่เป็น

$$e'_{fd} = V_{fd} \frac{X_{md}}{r_{fd}} \quad (3.2.1-70)$$

ดังนั้น สำหรับสมการแรงค้ำสนาม (3.2.1-35) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$e'_{fd} = \frac{X_{md}}{r_{fd}} (r'_{fd} i'_{fd} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{fd}) \quad (3.2.1-71)$$

สมการแรงค้ำไฟฟ้าของเครื่องจักรกลเชิงโรตัสที่แสดงในสมการ (3.2.1-51) -
(3.2.1-57) จะเห็นว่าอยู่ในรูปของตัวแปรอิสระกระแสและฟลักซ์แม่เหล็กค้ำของขดลวด ซึ่ง

จากสมการที่ (3.2.1-58)-(3.2.1-64) จะเห็นได้ว่าค่าของกระแสและค่าฟลักซ์แม่เหล็กค้ำของขดลวดมีความสัมพันธ์กัน เราจึงสามารถกำหนดตัวใดตัวหนึ่งให้เป็นตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียวได้ ซึ่งในที่นี้ตัวแปรอิสระที่เลือกคือฟลักซ์แม่เหล็กค้ำของขดลวด ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการแรงดันไฟฟ้าได้ใหม่ในรูปของฟลักซ์แม่เหล็กค้ำของขดลวดเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองได้เป็น

$$\begin{bmatrix} v_{e1} \\ v_{e2} \\ v_{o3} \\ v_{k1} \\ v_{k2} \\ v_{fd} \\ v_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_s a_{11} + \frac{p}{\omega_b} & \frac{\omega_r}{\omega_b} & 0 & -r_s a_{12} & -r_s a_{13} & 0 & 0 \\ -\frac{\omega_r}{\omega_b} & -r_s b_{11} + \frac{p}{\omega_b} & 0 & 0 & 0 & -r_s b_{12} & -r_s b_{13} \\ 0 & 0 & -\frac{r_r}{X_{lr}} + \frac{p}{\omega_b} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ r_{k1} a_{21} & 0 & 0 & r_{k1} a_{22} + \frac{p}{\omega_b} & r_{k1} a_{23} & 0 & 0 \\ r_{k2} a_{31} & 0 & 0 & r_{k2} a_{32} & r_{k2} a_{33} + \frac{p}{\omega_b} & 0 & 0 \\ 0 & X_{md} b_{21} & 0 & 0 & 0 & X_{md} b_{22} + \frac{X_{md} p}{r_{fd} \omega_b} & X_{md} b_{23} \\ 0 & r_{kd} b_{31} & 0 & 0 & 0 & r_{kd} b_{32} & r_{kd} b_{33} + \frac{p}{\omega_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{e1} \\ \psi_{e2} \\ \psi_{o3} \\ \psi_{k1} \\ \psi_{k2} \\ \psi_{fd} \\ \psi_{fd} \end{bmatrix} \quad (3.2.1-72)$$

โดยที่

$$X_q = X_{ls} + X_{mq} \quad (3.2.1-73)$$

$$X_d = X_{ls} + X_{md} \quad (3.2.1-74)$$

$$X'kq1 = X'lkq1 + X_{mq} \quad (3.2.1-75)$$

$$X'kq2 = X'lkq2 + X_{mq} \quad (3.2.1-76)$$

$$X'fd = X'lfid + X_{md} \quad (3.2.1-77)$$

$$X'kd = X'lkd + X_{md} \quad (3.2.1-78)$$

และค่าของ $a_{i,j}$, $b_{i,j}$ คือสมาชิกในเมตริกซ์ 3×3 ของสมการ (3.2.1-65) และ (3.2.1-66) ซึ่งนำมาแสดงใหม่ดังนี้

$$a_{ij} = \frac{1}{D_q} \begin{bmatrix} X'kq1X'kq2 - X_{mq}^2 & -X_{mq}X'kq2 + X_{mq}^2 & -X_{mq}X'kq1 + X_{mq}^2 \\ X_{mq}X'kq2 - X_{mq}^2 & -X_qX'kq2 + X_{mq}^2 & X_qX_{mq} - X_{mq}^2 \\ X_{mq}X'kq1 - X_{mq}^2 & X_qX_{mq} - X_{mq}^2 & -X_qX'kq1 + X_{mq}^2 \end{bmatrix} \quad (3.2.1-79)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{D_d} \begin{bmatrix} X'_{fd}X'_{kd} + X_{md}^2 & -X_{md}X'_{kd} + X_{md}^2 & -X_{md}X'_{fd} + X_{md}^2 \\ X_{md}X'_{kd} + X_{md}^2 & -X_dX'_{kd} + X_{md}^2 & X_dX_{md} + X_{md}^2 \\ X_{md}X'_{fd} + X_{md}^2 & X_dX_{md} + X_{md}^2 & -X_dX'_{fd} + X_{md}^2 \end{bmatrix} \quad (3.2.1-80)$$

$$D_q = X_{mq}^2(X_q - 2X_{mq} + X'_{kq1} + X'_{kq2}) - X_qX'_{kq1}X'_{kq2} \quad (3.2.1-81)$$

$$D_d = X_{md}^2(X_d - 2X_{md} + X'_{fd} + X'_{kd}) - X_dX'_{fd}X'_{kd} \quad (3.2.1-82)$$

3.2.1.4 สมการการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของมุมของเครื่องจักรกลที่เกิดขึ้นในระหว่างที่ระบบเกิดการรบกวน สามารถกระทำได้โดยสมการการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ ค่าของความถี่และมุมของโรเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงเกิดจากค่าผลต่างของแรงบิดที่กักกันก๊าซป้อนให้กับค่าแรงบิดทางไฟฟ้าในตัวเครื่องจักรกลซิงโครนัสเอง นั่นคือ

$$p\omega_r(t) = \frac{\omega_b}{2H}(T_{pm} - T_e(t)) \quad (3.2.1-83)$$

$$p\delta(t) = \omega_r(t) - \omega_b \quad (3.2.1-84)$$

โดยค่าแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Torque, $T_e(t)$) ในเทอมของฟลักซ์แม่เหล็กค้ำจุนขดลวดค่อวินาทีและกระแส บนแกนอ้างอิงโรเตอร์สามารถหาได้จาก

$$T_e(t) = \psi^r_{ds}i^r_{qs} - \psi^r_{qs}i^r_{ds} \quad (3.2.1-85)$$

หรือ

$$T_e(t) = [(a_{11} \ b_{11})\psi^r_{qs}\psi^r_{ds} + \psi^r_{ds}(a_{12}\psi^r_{kq1} + a_{13}\psi^r_{kq2}) - \psi^r_{qs}(b_{12}\psi^r_{fd} + b_{13}\psi^r_{kd})] \quad (3.2.1-86)$$

โดย ω_b = ค่าเบส (Base) ของความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า

T_{pm} = แรงบิดที่ป้อนให้เครื่องจักรกลซิงโครนัสจากกังหัน (Turbine)

H = ค่าคงที่ความเฉื่อย (Inertia)

$a_{1,1}, b_{1,1}$ = คือสมาชิกในเมตริกซ์ 3×3 ในสมการ (3.2.1-79) และ (3.2.1-80) ค่าของแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสมการที่ (3.2.1-83) นั้น ในกรณีที่เครื่องจักรกลเชิงโรตารีสทำตัวเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะใช้ค่าบวกสำหรับค่าของแรงบิดทางไฟฟ้านั้น โดยค่าของกระแสเดเตอร์ในทิศทางออกจากขั้วของเครื่องจักรกลเชิงโรตารีสก็จะเป็นบวกด้วยเช่นกัน

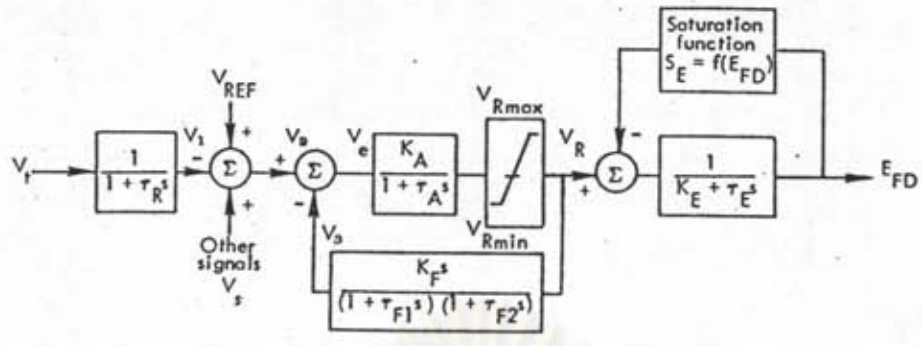
3.2.2 แบบจำลองของเอ็กไซเตอร์ (Excitation Model) [9,14]

ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันก๊าซมีการใช้ระบบเอ็กไซเตอร์หลายแบบ แต่ที่นิยมใช้มากจะเป็นแบบ Brushless Scheme ที่เชื่อมต่อกับซิลิกอนไดโอด โดยจะทำให้ส่วนของคอมมิวเตเตอร์, สลิปริงค์ และส่วนของ Brushgear ลดลงส่งผลให้ระบบเอ็กไซเตอร์ดีขึ้น เนื่องจากการมีส่วนที่เชื่อมต่อน้อย จะทำให้การสปาร์คทางไฟฟ้าที่มักเกิดขึ้นบนหน้าของส่วนสัมผัส (Contact) นั้นมีน้อยลง ซึ่งลักษณะดังกล่าวสำคัญมากกับระบบของกังหันก๊าซ เพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันก๊าซจะทำงานโดยใช้ก๊าซซึ่งมีคุณสมบัติไวต่อไฟ

ระบบเอ็กไซเตอร์ที่จะกล่าวเป็นโมเดลชนิด Brushless ซึ่งประกอบด้วย Pilot Exciter, Main Exciter, Rotating Diodes และ Automatic Voltage Regulator (AVR)

AVR จะทำงานเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่ตั้งไว้ ผลของค่าความแตกต่างนี้จะถูกขยายและควบคุม Firing Pulse ของบริดจ์ไทรซิสเตอร์ (Half-controlled Thyristor Bridge) ซึ่งจะควบคุมการเอ็กไซต์ของ Main Exciter

การแทน AVR ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์นั้น AVR แต่ละชนิดจะมีโมเดลย่อยที่เป็นส่วนประกอบมีลักษณะใกล้เคียงกัน ในการศึกษานี้ได้ใช้โมเดลที่เป็นที่รู้จักกันโดยมีลักษณะใกล้เคียงที่จะแสดงระบบเอ็กไซเตอร์ได้ก็คือ "IEEE Type 2"



รูปที่ 3.2-5 แสดงระบบอิเล็กทรอนิกส์ IEEE Type 2-Rotating Rectifier System

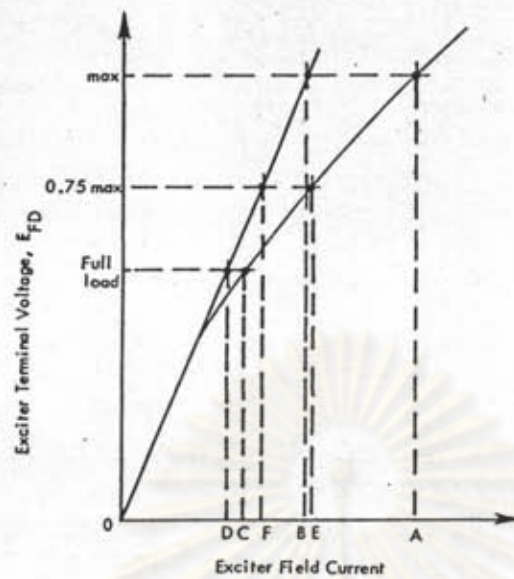
จากรูปค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (V_a) จะถูกกรอง(Filtering) โดยผ่าน Transfer Function ซึ่งมีค่าคงที่ทางเวลา T_n ซึ่งค่าของ T_n จะมีค่าน้อยมากจนบางครั้งถือว่าเป็นศูนย์

ตัวขยาย (Amplifier) มีค่าคงที่ทางเวลา τ_A และการขยาย K_A ซึ่งค่าที่ได้มาจะถูกจำกัดโดย V_{Rmax} และ V_{Rmin} จากรูปจะเห็นว่า Damping Feedback Loop จะมีค่าคงที่ทางเวลา 2 ค่า คือ τ_{F1} , τ_{F2} ซึ่งค่าแรกจะเป็น "Major Damping" และอีกค่าหนึ่งจะเป็น "Minor Damping" ซึ่งจะทำการหน่วงค่าความถี่ที่สูง ๆ

ส่วนต่อไปที่เราจะพูดถึงคือ ฟังก์ชันการอิ่มตัว (Saturation Function) ซึ่งในการแสดงผลการอิ่มตัวของอิเล็กทรอนิกส์นั้นสามารถกระทำได้หลายวิธี แต่ในที่นี้จะกระทำโดยกำหนด Saturation Function (S_E) ด้วย Exponential Model ดังนี้

$$S_E = A_{EX} e^{(B_{EX} e_{fd})} \quad (3.2.2-1)$$

ค่าของ A_{EX} และ B_{EX} จะถูกคำนวณจากข้อมูลของการอิ่มตัว โดย S_E และ e_{fd} จะถูกกำหนดที่ 2 จุด ซึ่งปกติเราใช้ที่ค่าสูงสุด และที่ 75% ของค่าสูงสุด เราจะสามารถหาค่า A_{EX} และ B_{EX} ได้



รูปที่ 3.2-6 กราฟแสดงความอิ่มตัวของเอ็กไซเตอร์ (Exciter Saturation Curve)

$$SE_{max} = \frac{(A - B)}{B} \quad (3.2.2-2)$$

$$SE_{.75max} = \frac{(E - F)}{F} \quad (3.2.2-3)$$

$$SE_{FL} = \frac{(C - D)}{D} \quad (3.2.2-4)$$

ค่าของ A_{EX} และ B_{EX} สามารถหาได้จาก

$$SE_{max} = \frac{(A - B)}{D e^{f_{dmax}}} = A_{EX} e^{(B_{EX} e^{f_{dmax}})} \quad (3.2.2-5)$$

$$SE_{.75max} = \frac{(\frac{4}{3})(E - F)}{D e^{f_{dmax}}} = A_{EX} e^{(0.75 B_{EX} e^{f_{dmax}})} \quad (3.2.2-6)$$

จะได้ $A_{EX} = \frac{(SE_{.75max})^4}{(SE_{max})^3} \quad (3.2.2-7)$

$$B_{EX} = \left(\frac{4}{e^{f_{dmax}}}\right) \ln\left(\frac{SE_{max}}{SE_{.75max}}\right) \quad (3.2.2-8)$$

และค่าของ $e^{f_{dmax}}$ หาได้โดยสัมพันธ์กับ V_{Rmax} โดยผ่านค่า S_E และ K_E

ที่สภาวะสมดุล

$$V_R = K_E e^{f_d} + S_E e^{f_d} \quad (3.2.2-9)$$

โดยที่ $V_{min} < V_R < V_{max}$

ดังนั้น $V_{Rmax} = (KE + SE_{max}) \theta_{fdmax}$ (3.2.2-10)

ดังนั้นเราจะสามารถแทนระบบของอิเล็กทรอนิกส์ในรูปที่ 3.2-5 ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$pV_1 = \frac{1}{\tau_r} V_1 - \frac{1}{\tau_r} V_1 \quad (3.2.2-11)$$

$$pV_R = \frac{K_A}{\tau_A} V_e - \frac{1}{\tau_A} V_R \quad (3.2.2-12)$$

$$p\theta_{fd} = \frac{1}{\tau_e} V_R - \left[\frac{(KE + SE)}{\tau_e} \right] \theta_{fd} \quad (3.2.2-13)$$

$$p^2(V_3) = \frac{K_F K_A}{\tau_{F1} \tau_{F2} \tau_A} V_e - \frac{K_F}{\tau_{F1} \tau_{F2} \tau_A} V_R - \frac{(\tau_{F1} + \tau_{F2})}{\tau_{F1} \tau_{F2}} pV_3 - \frac{1}{\tau_{F1} \tau_{F2}} V_3 \quad (3.2.2-14)$$

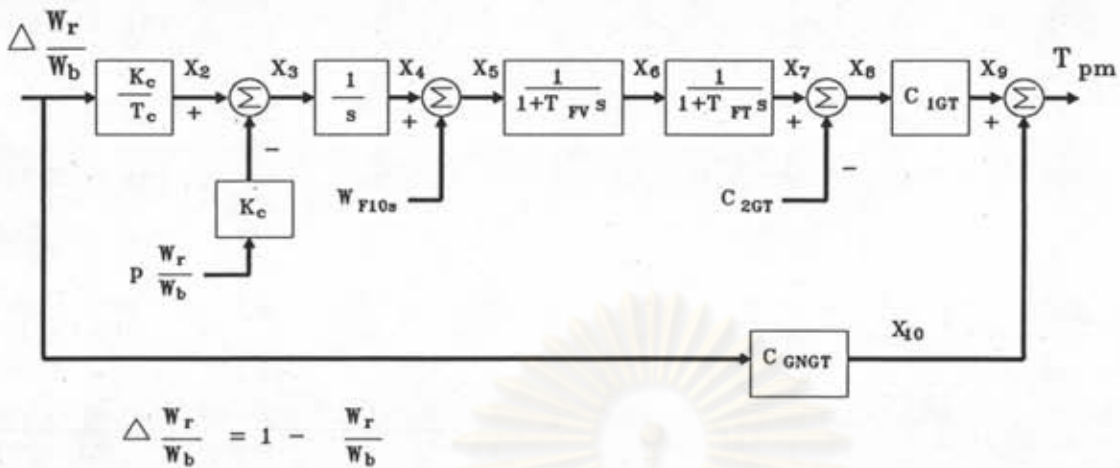
$$V_e = V_{REF} + V_s - V_1 - V_3 \quad (3.2.2-15)$$

3.2.3 แบบจำลองโทเวลเนอร์ของกังหันก๊าซ

(Gas-turbine Governor System) [13]

เครื่องยนต์กังหันก๊าซที่ใช้ร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะมีลักษณะแตกต่างค่อนข้างมากจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดอื่น โดยเฉพาะการที่มีค่าของ Rotating Inertia ต่ำ มีผลอย่างมากต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่มันเชื่อมต่ออยู่ เมื่อเกิดภาวะที่รบกวนระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กังหันก๊าซจะมีการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย โดยเฉพาะในระบบโตะเนเนอเรชั่นซึ่งเราจะเห็นว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่อยู่ในระบบโตะเนเนอเรชั่นจะอยู่กับโตะลคมาก ดังนั้นผลของการเปลี่ยนแปลงโตะลคจะส่งผลต่อเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาก

ในการศึกษาจะคผลกระทบจากการสคาร์ทมอเดอ์เห่นยว่นยว่นใหญ่ขึ้นในระบบโตะเนเนอเรชั่น ซึ่งอยู่ในลักษณะของ Dynamic Simulation ช่วงเวลาของการศึกษาจะยวกว่าการศึกษาพอล์ค ดังนั้นการศึกษาแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันก๊าซให้ถูกต้องจึงจำเป็นต้องพิจารณาผลของโทเวลเนอร์ด้วย โดยโทเวลเนอร์ที่ใช้จะเป็นดังรูป



รูปที่ 3.2-7 ระบบโถกความเร็วของกังหันก๊าซ (Gas-turbine Governor System)

ซึ่งเราสามารถแทนระบบนี้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} pX_4 &= X_3 \\ &= \left(\frac{K_c}{T_c}\right) \frac{\Delta\omega_r}{\omega_b} - K_c p \left(\frac{\omega_r}{\omega_b}\right) \end{aligned} \quad (3.3.3-1)$$

$$\begin{aligned} pX_6 &= \frac{(X_5 - X_6)}{T_{FV}} \\ &= \frac{(X_4 + W_{F10s} - X_6)}{T_{FV}} \end{aligned} \quad (3.3.3-2)$$

$$pX_7 = \frac{(X_6 - X_7)}{T_{FT}} \quad (3.3.3-3)$$

$$\begin{aligned} T_{pm} &= (X_9 + X_{10}) \\ &= C_{1GT}(X_7 - C_{2GT}) + C_{GNGT} \frac{\Delta\omega_r}{\omega_b} \end{aligned} \quad (3.3.3-4)$$

3.3 แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor Model) [11,15,16]

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล มีใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากราคาที่ไม่สูงและมีความเชื่อถือได้ดี ขนาดที่ใช้ก็มีหลายขนาดมากตั้งแต่ไม่กี่วัตต์จนถึงขนาดหลายเมกะวัตต์ ทุกขนาดของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบที่มันเชื่อมต่อกอยู่ ดังนั้นในการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลังในโรงงานอุตสาหกรรมจึงจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ลดลง เนื่องจากการไหลของกระแสอย่างมากระหว่างทำการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่ เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าการลดลงของแรงดันไฟฟ้านี้ยังเพียงพอที่จะทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสร้างแรงบิดไปรองรับโหลดที่มีอยู่ได้ และการลดลงของแรงดันไฟฟ้าไม่ส่งผลกระทบต่อเครื่องจักรกลตัวอื่นในระบบ

ในการศึกษาได้ทำการสร้างแบบจำลองของมอเตอร์ เพื่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่จะส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าและกระแสที่บัสที่มอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นเชื่อมต่อกอยู่ ซึ่งสามารถที่จะกล่าวต่อไปจะเป็นสมการแรงดันของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีตัวพารามิเตอร์อยู่ในแกนอ้างอิงใด ๆ (Arbitrary Reference Frame, W) ถ้าต้องการเปลี่ยนจากแกนอ้างอิงใด ๆ มาเป็นแกนอ้างอิงแบบซิงโครนัส ก็เพียงแต่เปลี่ยนค่า W ในสมการแรงดันไปเป็น W_s (เป็นการเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ บนโรเตอร์ไปยังสเตเตอร์)

การจัดเรียงตัวของขดลวดในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 ขั้ว, 3 เฟส, Wye Connected จะเป็นดังรูปที่ 3.3-1 ซึ่งประกอบด้วยขดลวดสเตเตอร์จำนวน 3 ชุดในทั้ง 3 เฟสคือ a_s , b_s และ c_s โดยขดลวดในแต่ละเฟสจะห่างกันเป็นมุม 120° และมีจำนวนขดลวด N_s ชุด ขณะที่มีความต้านทาน r_s ส่วนในโรเตอร์จะเหมือนกับในสเตเตอร์คือ ประกอบด้วยขดลวดจำนวน 3 ชุดในทั้ง 3 เฟสคือ a_r , b_r และ c_r โดยขดลวดในแต่ละเฟสจะห่างกันเป็นมุม 120° และมีจำนวนขดลวด N_r ชุด ขณะที่มีความต้านทาน r_r

จากรูปที่ 3.3-1 มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องคือ

$i_{a_s}, i_{b_s}, i_{c_s}$ คือ กระแสที่ไหลเข้าขดลวดสเตเตอร์ในแต่ละเฟส

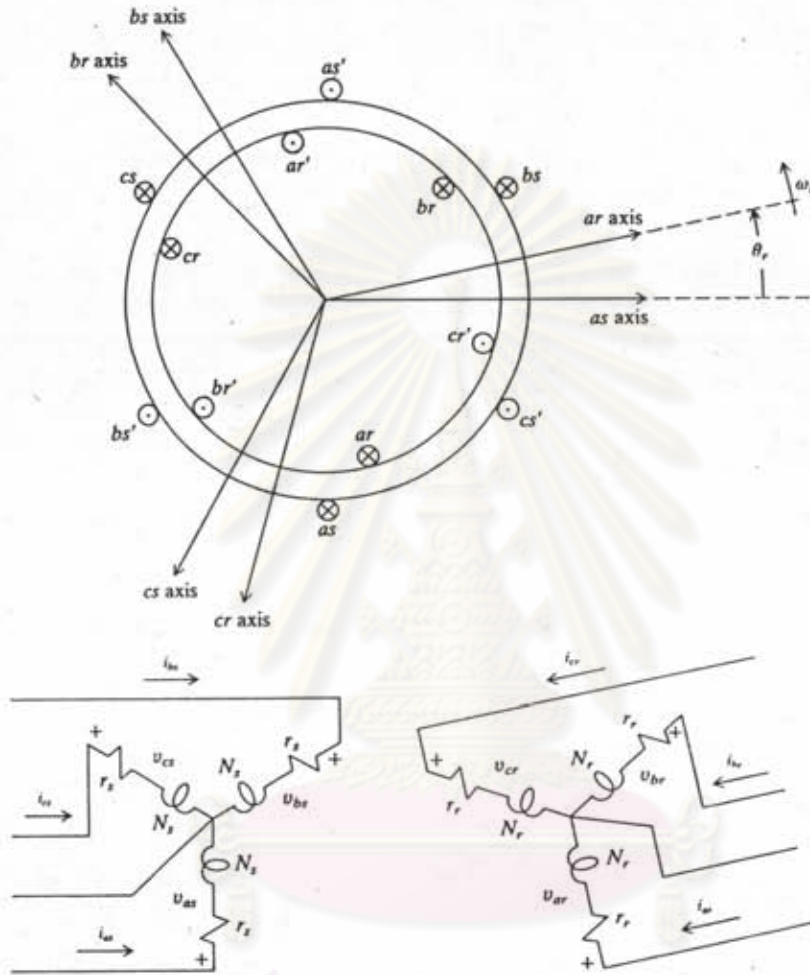
$V_{a_s}, V_{b_s}, V_{c_s}$ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าคล่องความต้านทานและอินดักแตนซ์ในแต่ละเฟสของสเตเตอร์

i_{ar}, i_{br}, i_{cr}

คือ กระแสที่ไหลเข้าขดลวดโรเตอร์ในแต่ละเฟส

V_{ar}, V_{br}, V_{cr}

คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าคล่องความต้านทานและอินดักแตนซ์ในแต่ละเฟสของโรเตอร์



รูปที่ 3.3-1 เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ 2 ขั้ว, 3 เฟส,

Wye Connected

3.3.1 สมการแรงดันในแกนอ้างอิงใด ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

เมื่อกำหนดทิศทางของแกนแม่เหล็กในแต่ละขดลวดเป็นดังรูปที่ 3.3-1 ซึ่งเป็นการกำหนดที่สอดคล้องกับการที่เรากำหนดให้เป็นเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำที่มีคุณสมบัติเป็นมอเตอร์ โดยขดลวดโรเตอร์จะถูกลัดวงจร (Short Circuit) เข้าหากัน ค่ากระแสสแตเตอร์ทั้ง 3 เฟส

(i_{aa}, i_{bb}, i_{cc}) จะไหลเข้ามาอย่างสมมาตรและจะทำให้เกิดแรงเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (MMF) ขึ้นในช่องว่าง และหมุนไปด้วยความถี่สัมพันธ์กับความถี่ของกระแสเดือเตอร์ที่ไหลเข้ามา ความแตกต่างระหว่างความเร็วของโรเตอร์กับความเร็วของ MMF จะทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดโรเตอร์ ซึ่งกระแสเหนี่ยวนำในขดลวดโรเตอร์นี้จะไปสร้าง MMF อีก 1 ชุด ซึ่งจะหมุนไปด้วยความเร็วที่สัมพันธ์กับความถี่ของกระแสโรเตอร์ แรงบิดทางไฟฟ้าจะเกิดจากผลของการ Interaction กันของ MMF ทั้ง 2 ชุดนี้

จากรูปที่ 3.3.1 สมการแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$V_{abcs} = r_s i_{abcs} + p \lambda_{abcs} \quad (3.3-1)$$

$$V_{abcr} = r_r i_{abcr} + p \lambda_{abcr} \quad (3.3-2)$$

โดย

$$(f_{abcs})^T = [f_{as} \ f_{bs} \ f_{cs}] \quad (3.3-3)$$

$$(f_{abcr})^T = [f_{ar} \ f_{br} \ f_{cr}] \quad (3.3-4)$$

โดยสมการที่ (3.3-1) และ (3.3-2) จะอยู่ในรูปของเมตริกซ์ ค่าของ r_s และ r_r จะเป็นเมตริกซ์ในแนวทแยง (Diagonal Matrices) ส่วน f ในสมการ (3.3-3) และ (3.3-4) จะแทนตัวแปรกระแส, แรงดันไฟฟ้า หรือฟลักซ์แม่เหล็กที่อยู่ในสมการ (3.3-1) และ (3.3-2)

$$r_s = \text{diag} [r_s \ r_s \ r_s] \quad (3.3-5)$$

$$r_r = \text{diag} [r_r \ r_r \ r_r] \quad (3.3-6)$$

ในทำนองเดียวกันกับเครื่องจักรกลเชิงโคโรนัส เราสามารถทำการย้ายแกนเพื่อเปลี่ยนตัวแปรไปอยู่บนแกนอ้างอิงใด ๆ ก็ได้

$$V_{qdos} = r_s i_{qdos} + \omega \lambda_{qdos} + p \lambda_{qdos} \quad (3.3-7)$$

$$V'_{qdor} = r'_r i'_{qdor} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{qdor} + p \lambda'_{qdor} \quad (3.3-8)$$

โดย

$$(\lambda_{qds})^T = [\lambda_{ds} \ -\lambda_{qs} \ 0] \quad (3.3-9)$$

$$(\lambda'_{qdr})^T = [\lambda'_{dr} \ -\lambda'_{qr} \ 0] \quad (3.3-10)$$

ซึ่งสมการ (3.3-7) และ (3.3-8) นั้น ตัวแปรต่าง ๆ จะอยู่บนแกนอ้างอิงใด ๆ ซึ่งสามารถเขียนใหม่ในรูปที่กระจายออกได้ดังนี้

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \quad (3.3-11)$$

$$V_{ds} = r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \quad (3.3-12)$$

$$V_{os} = r_s i_{os} + p \lambda_{os} \quad (3.3-13)$$

$$V'_{qr} = r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} + p \lambda'_{qr} \quad (3.3-14)$$

$$V'_{dr} = r'_r i'_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} + p \lambda'_{dr} \quad (3.3-15)$$

$$V'_{or} = r'_r i'_{or} + p \lambda'_{or} \quad (3.3-16)$$

โดยสมการ (3.3-9), (3.3-10) ซึ่งเป็นสมการหาค่าของฟลักซ์แม่เหล็กของขดลวด สามารถเขียนกระจายได้เป็น

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (3.3-17)$$

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (3.3-18)$$

$$\lambda_{os} = L_s i_{os} \quad (3.3-19)$$

$$\lambda'_{qr} = L'_r i'_{qr} + M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (3.3-20)$$

$$\lambda'_{dr} = L'_r i'_{dr} + M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (3.3-21)$$

$$\lambda'_{or} = L'_r i'_{or} \quad (3.3-22)$$

เช่นเดียวกับแบบจำลองเครื่องจักรซิงโครนัส เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ

ระบบไฟฟ้ากำลังและเครื่องจักรกลจะกำหนดในค่าของโหม้ม หรือ Per Unit ของค่าเบสของ อิมพีแดนซ์ ดังนั้นจะเป็นการง่ายกว่าในการที่เราจะกำหนดสมการแรงดันไฟฟ้าและสมการฟลักซ์ แม่เหล็กคล่องขดลวดในเทอมของรีแอ็กแตนซ์มากกว่าอินดักแตนซ์ ดังนั้นสมการที่ (3.3-11) - (3.3-16) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{qs} \quad (3.3-23)$$

$$V_{ds} = r_s i_{ds} - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{ds} \quad (3.3-24)$$

$$V_{os} = r_s i_{os} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{os} \quad (3.3-25)$$

$$V'_{qr} = r'_r i'_{qr} + \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} (\omega - \omega_r) \psi'_{dr} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{qr} \quad (3.3-26)$$

$$V'_{dr} = r'_r i'_{dr} - \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} (\omega - \omega_r) \psi'_{qr} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{dr} \quad (3.3-27)$$

$$V'_{or} = r'_r i'_{or} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{or} \quad (3.3-28)$$

ค่า ω_b คือค่าเบส (Base) ของความเร็วมุมทางไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณค่าอินดักซ์ที่ฟ รีแอกแตนซ์ (Inductive Reactance) และสมการ (3.3-17) - (3.3-22) จะเปลี่ยน เป็นค่าฟลักซ์แม่เหล็กคล่องขดลวดต่อวินาทีในหน่วยของโวลต์ได้ดังนี้

$$\psi_{qs} = X_{ls} i_{qs} + X_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (3.3-29)$$

$$\psi_{ds} = X_{ls} i_{ds} + X_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (3.3-30)$$

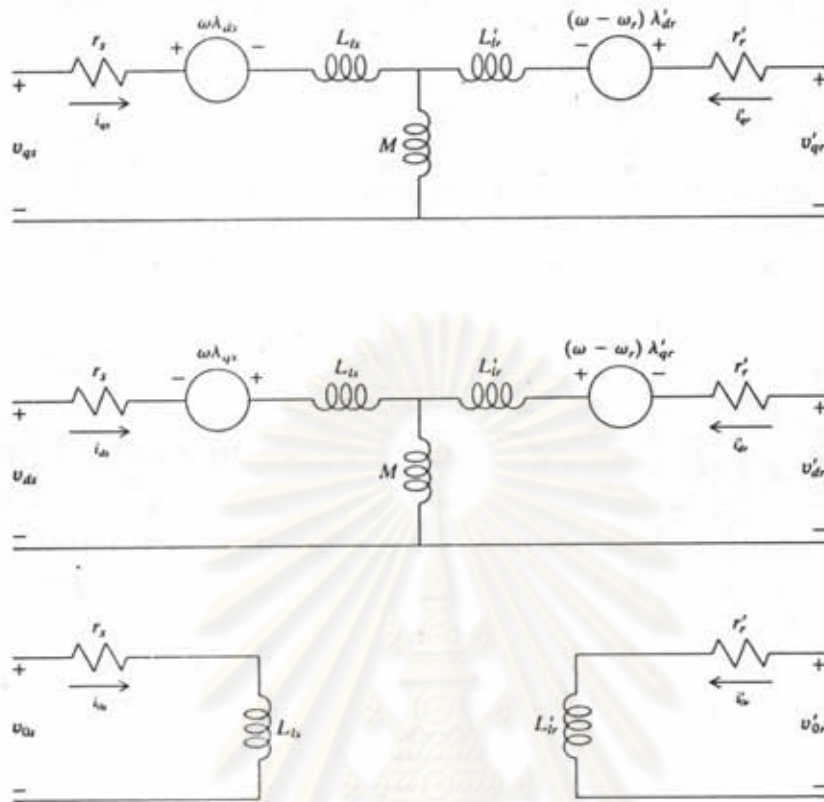
$$\psi_{os} = X_{ls} i_{os} \quad (3.3-31)$$

$$\psi'_{qr} = X'_{lr} i'_{qr} + X_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (3.3-32)$$

$$\psi'_{dr} = X'_{lr} i'_{dr} + X_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (3.3-33)$$

$$\psi'_{or} = X'_{lr} i'_{or} \quad (3.3-34)$$

จากสมการ (3.3-11) - (3.3-16) สามารถสร้างวงจรสมมูลแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับฟลักซ์แม่เหล็กคล่องขดลวดและกระแสได้ดังรูปที่ 3.3-2



รูปที่ 3.3-2 วงจรสมมูลของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ 3 เฟส บนแกนอ้างอิงใด ๆ

เนื่องจากค่ากระแสและฟลักซ์แม่เหล็กต้องขดลวดจะสัมพันธ์กัน ดังสมการ (3.3-29)-

(3.3-34) ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการแรงดันไฟฟ้า (3.3-23) - (3.3-28) ใหม่ โดยให้อยู่ในรูปของฟลักซ์แม่เหล็กต้องขดลวดต่อวินาทีที่เพียงตัวแปรเดียวได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{0s} \\ v'_{qr} \\ v'_{dr} \\ v'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s X'_{rr} + \frac{p}{\omega_b} & \frac{\omega}{\omega_b} & 0 & -\frac{r_s X_M}{D} & 0 & 0 \\ -\frac{\omega}{\omega_b} & r_s X'_{rr} + \frac{p}{\omega_b} & 0 & 0 & -\frac{r_s X_M}{D} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{r_s}{X_{ls}} + \frac{p}{\omega_b} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{r'_r X_M}{D} & 0 & 0 & \frac{r'_r X_{rs}}{D} + \frac{p}{\omega_b} & \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} & 0 \\ 0 & -\frac{r'_r X_M}{D} & 0 & -\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} & \frac{r'_r X_{rs}}{D} + \frac{p}{\omega_b} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r'_r}{X'_{lr}} + \frac{p}{\omega_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \\ \psi_{0s} \\ \psi'_{qr} \\ \psi'_{dr} \\ \psi'_{0r} \end{bmatrix} \quad (3.3-35)$$

โดยที่

$$X_{ss} = X_{ls} + X_M \quad (3.3-36)$$

$$X'_{rr} = X'_{lr} + X_M \quad (3.3-37)$$

$$D = X_{ss}X'_{rr} - X_M^2 \quad (3.3-38)$$

3.3.2 สมการการเคลื่อนที่ของโรเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำ

สมการที่แสดงสภาวะการเคลื่อนที่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่นำมาใช้ในการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงความเร็วโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำคือ

$$p\omega_r = \frac{\omega_b}{2H} (T_e(t) - T_L) \quad (3.3-39)$$

โดยค่าแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Torque, $T_e(t)$) ในเทอมของฟลักซ์แม่เหล็กต้องขดลวดต่อวินาทีและกระแส บนแกนอ้างอิงใด ๆ สามารถหาได้จาก

$$T_e(t) = (\psi'_{qr} i'_{dr} - \psi'_{dr} i'_{qr}) / \omega_b \quad (3.3-40)$$

โดย ω_b = ค่าเบส (Base) ของความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า

T_L = แรงบิดที่มอเตอร์เหนี่ยวนำจ่ายให้โหลด (Load Torque)

H = ค่าคงที่ความเฉื่อย (Inertia)

ค่าแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสมการข้างต้น ในกรณีที่เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำทำตัวเป็นมอเตอร์ ค่าแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นค่าบวก โดยคิดทิศทางกระแสที่ไหลจากขั้วมอเตอร์เข้ามายังสเคเตอร์เป็นทิศทางบวกด้วย