บทที่ 2

ทฤษฎีการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

2.1 บทนำ

เครื่องจักรกลซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรเป็นเครื่องจักรกลที่สามารถแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยทั่วไปจะนิยมใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบแปลงผันพลังงานลม ที่มีขนาดพิกัดกำลังตั้งแต่ระดับกิโลวัตต์จนถึงระดับเมกกะวัตต์ เนื่องจากขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังกล่าวมีขนาดเล็ก ทนทาน และโครงสร้างไม่ซับซ้อนจึงทำให้การบำรุงรักษาสามารถกระทำได้ง่าย อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการผลิตกำลังไฟฟ้าที่สูงอีกด้วย ปัจจุบันในต่างประเทศรวมทั้งภายในประเทศไทยได้นำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรมาใช้สำหรับระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานลม (กังหันลม) ซึ่งจะเชื่อมต่อเข้ากับกริดระบบเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับกริดระบบ โดยในบทนี้จะได้กล่าวถึงหลักการทฤษฎีพื้นฐานการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรโดยจะประกอบไปด้วย โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร เทคนิคการควบคุมกระแสสเตเตอร์ในแกน d ให้เป็นศูนย์ทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อให้เข้าใจถึงหลักการทำงานและการควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่ถูกเชื่อมต่อกริดระบบ และสามารถที่จะนำไปวิเคราะห์ และสร้างแบบจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่ถูกเชื่อมต่อกริดต่อไป

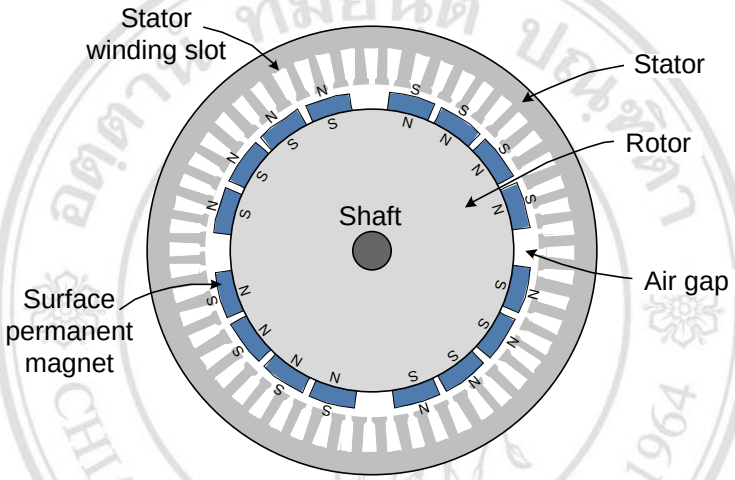
2.2 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรสามารถแบ่งลักษณะการวางของตัวแม่เหล็กได้ออกเป็น 2 ลักษณะ คือ แบบฝังแม่เหล็กถาวรบริเวณผิวของตัวโรเตอร์ และ แบบฝังแม่เหล็กถาวรบริเวณร่องสล๊อตของตัวโรเตอร์

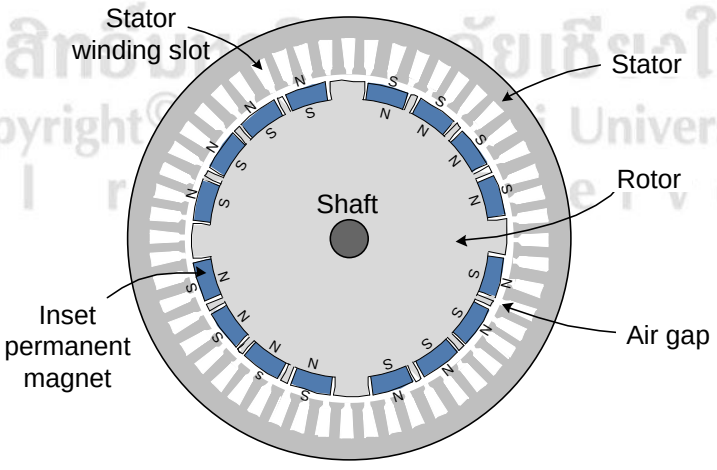
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2.1 แบบฝังแม่เหล็กถาวรบริเวณผิวของตัวโรเตอร์

ภาพที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรโดยมีลักษณะการวางแม่เหล็กบริเวณผิวของตัวโรเตอร์ ข้อดีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้คือโครงสร้างไม่ซับซ้อน และยังมีราคาต่ำกว่าแบบฝังแม่เหล็กถาวรบริเวณร่องสล๊อตของตัวโรเตอร์ อย่างไรก็ตามการวางแม่เหล็กถาวรบริเวณผิวของโรเตอร์อาจมีความเสี่ยงที่แม่เหล็กจะหลุดออกจากโรเตอร์เนื่องจากแรงหนีศูนย์กลาง ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดนี้เหมาะสมสำหรับงานที่ต้นกำลังมีความเร็วรอบต่ำ



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบกระตุ้นด้วยแม่เหล็กแบบฝังแม่เหล็กถาวรบริเวณผิวของตัวโรเตอร์



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบกระตุ้นด้วยแม่เหล็กแบบฝังแม่เหล็กถาวรบริเวณร่องสล๊อตของตัวโรเตอร์

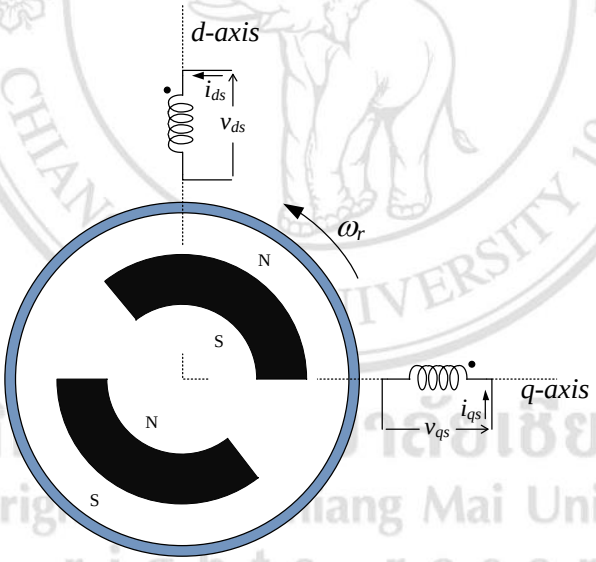
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2.2 แบบฝังแม่เหล็กถาวรบริเวณร่องสล๊อตของตัวโรเตอร์

แม่เหล็กถาวรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสด้วยถูกแทรกอยู่บริเวณผิวของตัวโรเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ซึ่งลักษณะการวางของแม่เหล็กดังกล่าวจะช่วยลดความเครียดเนื่องจากหมุน ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบฝังแม่เหล็กถาวรบริเวณร่องสล๊อตของตัวโรเตอร์ นั้นจะเหมาะสำหรับงานที่ต้นกำลังมีความเร็วรอบสูง

2.3 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร โดยใช้หลักการวิเคราะห์วงจรสมมูลบนแกนอ้างอิงหมุนสองเฟส (dq) ข้อดีของการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้คือมีความง่าย สะดวกต่อการวิเคราะห์ทั้งการทำงานในเงื่อนไขของสภาวะคงตัวและสภาวะชั่วขณะ รูปแบบทั่วไปของสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร สามารถวิเคราะห์ได้ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรบนแกนอ้างอิงหมุนสองเฟส

จากภาพที่ 2.3 แสดงถึงเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรบนแกนอ้างอิงหมุนสองเฟส ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรขดลวดตัวนำทางด้านสเตเตอร์จำนวนสองขด ซึ่งมีขดลวดตัวนำ 1 ขด ในแนวแกนอ้างอิง d และขดลวดตัวนำอีกหนึ่งขด ในแนวแกนอ้างอิง q จากแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังกล่าว สามารถนำทฤษฎีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบทั่วไปมาใช้ในการวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรบนแกนอ้างอิงหมุนสองเฟส (dq) ซึ่งจะได้สมการแรงดันไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ดังนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s - pL_d & \omega_r L_q \\ -\omega_r L_d & -R_s - pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

เมื่อ v_{ds}, v_{qs} คือ องค์ประกอบของแรงดันสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงหมุนสองเฟส (dq)

i_{ds}, i_{qs} คือ องค์ประกอบของกระแสสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงหมุนสองเฟส (dq)

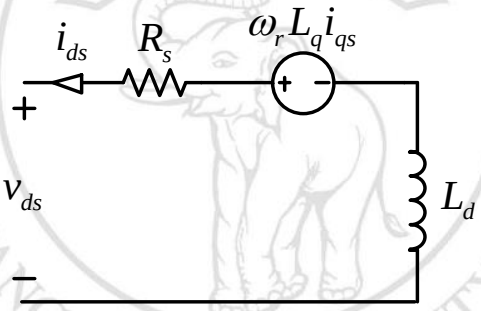
R_s คือ ความต้านทานสเตเตอร์

L_d, L_q คือ ความเหนี่ยวนำในตัวเองบนแกนอ้างอิงหมุนของเฟส (dq)

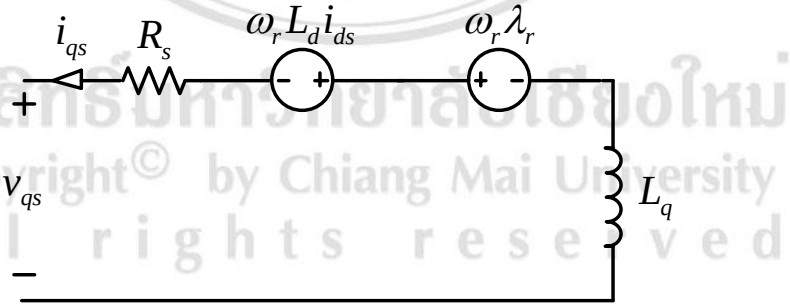
ω_r คือ ความเร็วรอบโรเตอร์

p คือ ตัวกระทำอนุพันธ์ $\frac{d}{dt}$

จากสมการ (2.1) สามารถนำมาแปลงเป็นวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรบนแกนอ้างอิงหมุนสองเฟส (dq) ได้ดังแสดงในภาพที่ 2.4



(ก) แกนอ้างอิง d



(ข) แกนอ้างอิง q

ภาพที่ 2.4 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรบนแกนอ้างอิงหมุนสองเฟส (dq)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

พิจารณาวงจรสมมูลจากภาพที่ 2.4 จะสามารถแสดงสมการแรงดันด้านสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงหมุนสองเฟสได้คือ

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + p\lambda_{ds} \tag{2.2}$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + p\lambda_{qs} \tag{2.3}$$

$$\vec{V}_s = v_{qs} + jv_{ds} \tag{2.4}$$

เมื่อ $\vec{V}_s$ คือเวกเตอร์แรงดันด้านสเตเตอร์ (V)

$\lambda_{ds}, \lambda_{qs}$ คือองค์ประกอบฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าด้านสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงหมุนสองเฟส (Wb-turn)

จากสมการที่ (2.2) (2.3) และ (2.4) สามารถแสดงสมการองค์ประกอบฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าด้านสเตเตอร์ได้คือ

$$\lambda_{ds} = -L_d i_{ds} + \lambda_r \tag{2.5}$$

$$\lambda_{qs} = -L_q i_{qs} \tag{2.6}$$

$$\vec{\lambda}_s = \lambda_{qs} + j\lambda_{ds} \tag{2.7}$$

เมื่อ $\vec{\lambda}_s$ คือเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าด้านสเตเตอร์ (Wb-turn)

λ_r คือฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าด้านโรเตอร์ (Wb-turn)

จากสมการที่ (2.5) (2.6) และ (2.7) จะเห็นได้ว่าฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าทางด้านขดลวดโรเตอร์ λ_r ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าฯ จะมีค่าคงที่เนื่องจากถูกสร้างจากแม่เหล็กถาวร ซึ่งสามารถดูค่าได้จากป้ายพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าฯ ในตัวนั้นๆ นอกจากนี้ค่าความเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าฯ บนแกนอ้างอิงหมุนสองเฟสสามารถคำนวณหาได้จาก

$$L_d = L_{ls} + L_{dm} \tag{2.8}$$

$$L_q = L_{ls} + L_{qm} \tag{2.9}$$

เมื่อ L_{ls} คือความเหนี่ยวนำในตัวเองด้านสเตเตอร์ (H)

L_{dm}, L_{qm} คือองค์ประกอบความเหนี่ยวนำร่วม (H)

จากสมการที่ (2.8) และ (2.9) โดยทั่วไปค่าความเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าฯ บนแกนอ้างอิงหมุนสองเฟส $\left(L_d, L_q\right)$ ในแบบขั้วไม่ยื่นจะมีค่าเท่ากัน $\left(L_d = L_q\right)$ และแบบขั้วยื่นจะมีค่าแตกต่างกันโดยทั่วไปค่าความเหนี่ยวนำในแนวแกน d จะน้อยกว่าในแนวแกน q $\left(L_d < L_q\right)$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อแทนสมการที่ (2.5) (2.6) (2.7) ลงในสมการที่ (2.1) และพิจารณาให้ $d\lambda_r / dt = 0$ กำหนดให้ λ_r เป็นค่าคงที่ ดังนั้นสามารถเขียนสมการแรงดันด้านสเตเตอร์ใหม่ได้คือ

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} + \omega_r L_q i_{qs} - L_d p i_{ds} \tag{2.10}$$

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} - \omega_r L_d i_{ds} + \omega_r \lambda_r - L_q p i_{qs} \tag{2.11}$$

จากสมการที่ (2.10) และ (2.11) สามารถแสดงเป็นสมการกระแสด้านสเตเตอร์ได้คือ

$$i_{ds} = \frac{1}{S}\left(-v_{ds} - R_s i_{ds} + \omega_r L_q i_{qs}\right) / L_d \tag{2.12}$$

$$i_{qs} = \frac{1}{S}\left(-v_{qs} - R_s i_{qs} - \omega_r L_d i_{ds} + \omega_r \lambda_r\right) / L_q \tag{2.13}$$

โดยที่แรงบิดทางไฟฟ้า$\left(T_e\right)$ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าฯ สร้างขึ้น เมื่อพิจารณาในเทอมขององค์ประกอบกระแสและฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าด้านขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$T_e = \frac{3P}{2}\left(i_{qs}\lambda_{ds} - i_{ds}\lambda_{qs}\right) \tag{2.14}$$

เมื่อ P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

ในทำนองเดียวเมื่อแทนค่าสมการที่ (2.12) และ (2.13) ลงในสมการที่ (2.14) จะสมารถแสดงสมการแรงบิดทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าฯ ได้คือ

$$T_e = \frac{3P}{2}\left(\lambda_r i_{qs} - \left(L_d - L_q\right) i_{ds}\lambda_{qs}\right) \tag{2.15}$$

พิจารณาหาความเร็วรอบของโรเตอร์ ω_r สามารถคำนวณหาได้จาก

$$\omega_r = \frac{P}{JS}\left(T_e - T_m\right) \tag{2.16}$$

เมื่อ J คือโมเมนต์ความเฉื่อย (kg-m^2)

T_m คือแรงบิดทางกล (Nm)

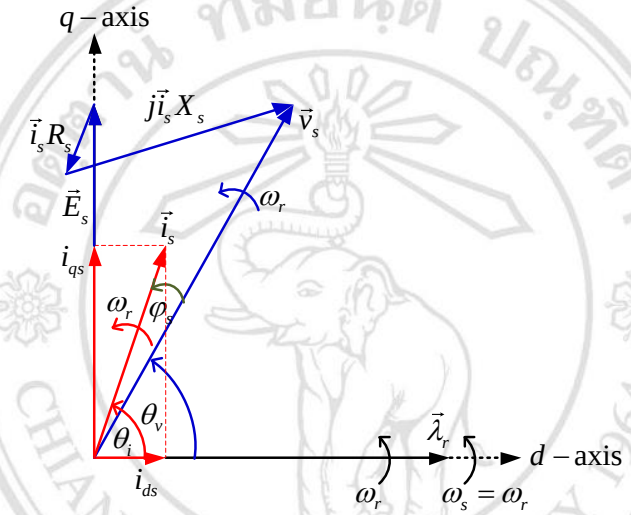
S คือตัวกระทำปริพันธ์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ในส่วนของกำลังไฟฟ้าทางด้านออก (P_e) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าฯ สามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกได้จาก

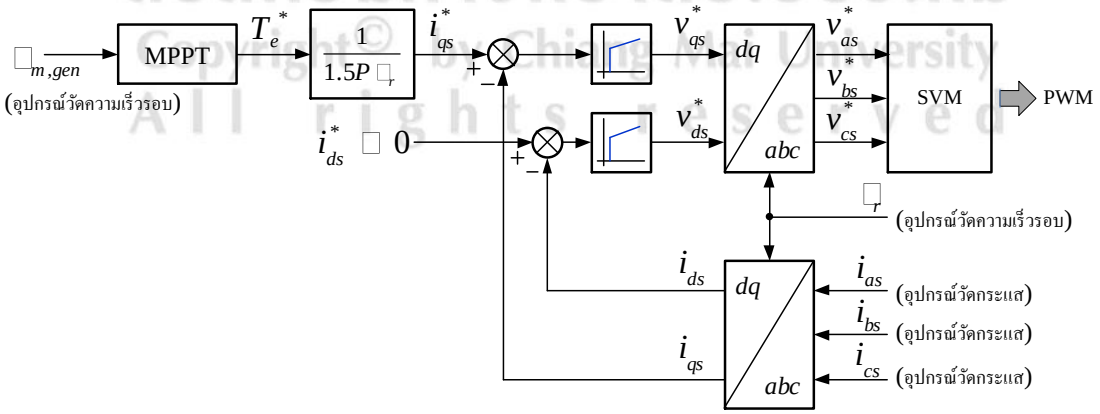
$$P_e = \frac{3}{2}\left(i_{ds}v_{ds} + i_{qs}v_{qs}\right) \tag{2.17}$$

จากวงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรในแกนอ้างอิงหมุนสองเฟส (dq) ในภาพที่ 2.4 จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ไดอะแกรมได้ดังแสดงในภาพที่ 2.5 ภายใต้ การวางทับกันของฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์กับแขนของแกน d ในแกนอ้างอิงหมุน



ภาพที่ 2.5 เวกเตอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

2.4 การควบคุมทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยอาศัยเทคนิคการควบคุมองค์ประกอบของกระแสสเตเตอร์ในแกน d ให้เป็นศูนย์



ภาพที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมเทคนิคการควบคุมองค์ประกอบของกระแสสเตเตอร์ในแกน d ให้เป็นศูนย์ทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ในภาพที่ 2.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมเทคนิคการควบคุมองค์ประกอบของกระแสสเตเตอร์ในแกน d ให้เป็นศูนย์ทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยอาศัยค่าความผิดพลาดขององค์ประกอบกระแสสเตเตอร์ในแกน d และ q ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอ้างอิงและกระแสที่วัดจริง แล้วนำมาผ่านตัวควบคุมเชิงเส้นพีไอ (PI Controller) เพื่อสร้างสัญญาณแรงดันอ้างอิงสำหรับนำไปควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชั่น (Space Vector Modulation: SVM) ข้อดีของเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอนี้ คือเป็นระบบที่ควบคุมง่าย หลักการทำงานไม่ซับซ้อน และสามารถควบคุมองค์ประกอบของกระแสสเตเตอร์ในแกน d และ q ได้อย่างอิสระบนพื้นฐานของการควบคุมแบบเวกเตอร์

การควบคุมทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยอาศัยเทคนิคการควบคุมองค์ประกอบของกระแสสเตเตอร์ในแกน d ให้เป็นศูนย์มีวัตถุประสงค์เพื่อลดขนาดกระแสสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และลดกำลังสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ เป็นผลให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น ซึ่งเทคนิคการควบคุมองค์ประกอบของกระแสสเตเตอร์ในแกน d ให้เป็นศูนย์สามารถทำได้โดยการแปลงสมการกระแสสเตเตอร์สามเฟสในแกนอ้างอิงนิ่ง ให้อยู่ในรูปของกระแสสเตเตอร์สองเฟสในแกนอ้างอิงหมุน ดังนั้นเมื่อกำหนดองค์ประกอบของกระแสสเตเตอร์ในแกน d ให้เป็นศูนย์ จะทำให้กระแสสเตเตอร์เท่ากับองค์ประกอบของกระแสสเตเตอร์ในแกน q

$$\begin{aligned} \vec{i}_s &= i_{ds} + ji_{qs} \\ i_s &= \sqrt{i_{ds}^2 + i_{qs}^2} = i_{qs}, i_{ds} = 0 \end{aligned} \tag{2.18}$$

เมื่อแทนสมการ (2.18) ลงในสมการ (2.14) สามารถเขียนใหม่ในรูปแบบสมการแรงบิดทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรในเงื่อนไขการควบคุมให้องค์ประกอบของกระแสสเตเตอร์ในแกน d ให้เป็นศูนย์ ได้ดังนี้

$$T_e = \frac{3}{2} P \lambda_r i_{qs} = \frac{3}{2} P \lambda_r i_s \tag{2.19}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

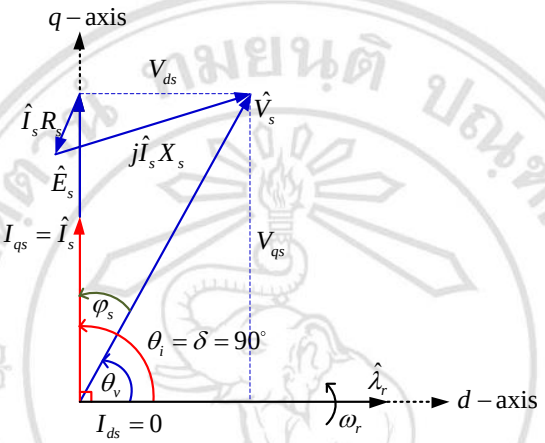
จากสมการ (2.19) แรงบิดทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรจะแปรผันตามกระแสสเตเตอร์ เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์มีค่าคงที่ ซึ่งคล้ายกับสมการแรงบิดทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งแรงบิดทางกลจะแปรผันตามกระแสอาร์เมเจอร์

เพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรโดยอาศัยเทคนิคการควบคุมองค์ประกอบของกระแสสเตเตอร์ในแกน d ให้เป็นศูนย์ จากสมการ (2.10) และ (2.11) สามารถเขียนภายใต้สภาวะคงตัว (Steady-state) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ได้ดังนี้

$$V_{ds} = -R_s i_{ds} + \omega_r L_q i_{qs} \tag{2.20}$$

$$V_{qs} = -R_s i_{qs} - \omega_r L_d i_{ds} + \omega_r \lambda_r \tag{2.21}$$

จากสมการ (2.20) และ (2.21) จะสามารถนำมาเขียนเป็นเฟสเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรในเงื่อนไขการควบคุมให้องค์ประกอบของกระแสสเตเตอร์ในแกน d เป็นศูนย์ ได้ดังแสดงในภาพที่ 2.7 โดยเฟสเซอร์ไดอะแกรมดังกล่าวถูกเขียนขึ้นมาภายใต้ การวางทับกันของฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์กับแขนของแกน d ในแกนอ้างอิงหมุน



ภาพที่ 2.7 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรใน เงื่อนไขการควบคุมองค์ประกอบของกระแสสเตเตอร์ในแกน d ให้เป็นศูนย์

จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมในภาพที่ 2.7 กระแสสเตอร์จะถูกวางทับกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับในแกน q และตั้งฉากกับฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรในแกน d อยู่ตลอดเวลา ฉะนั้นมุมของกระแสสเตเตอร์หรือเรียกว่า มุมของแรงบิดจะต้องถูกรักษาไว้ที่ 90 องศา ดังนี้

$$\theta_i = \varphi = 90^\circ \tag{2.22}$$

มุมของแรงดันสเตเตอร์จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมในภาพที่ 2.7 สามารถหาได้โดย

$$\theta_v = \sin^{-1}\left(\frac{V_{qs}}{V_s}\right) \tag{2.23}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

แทนสมการ (2.20) และ (2.21) ลงในสมการ (2.23)

$$\theta_v = \sin^{-1}\left(\frac{V_{qs}}{\sqrt{(V_{ds})^2+(V_{qs})^2}}\right) = \sin^{-1}\frac{1}{\sqrt{1+\frac{(L_q\hat{I}_s/\hat{\lambda}_r)^2}{(1+R_s\hat{I}_s/\omega_r\hat{\lambda}_r)^2}}} \tag{2.24}$$

จากสมการ (2.22) และ (2.24) จะสามารถหามุมของตัวประกอบกำลังได้ โดยอ้างอิงจาก เฟสเซอร์ไดอะแกรมในภาพที่ 2.7

$$\varphi_s = 90^\circ - \sin^{-1}\frac{1}{\sqrt{1+\frac{(L_q\hat{I}_s/\hat{\lambda}_r)^2}{(1+R_s\hat{I}_s/\omega_r\hat{\lambda}_r)^2}}} \tag{2.25}$$

จากสมการ (2.25) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของตัวประกอบกำลังกับกระแสสเตเตอร์และความเร็วของโรเตอร์ เมื่อความเหนี่ยวนำในตัวเองบนแกนอ้างอิงหมุน q (L_q), ตัวต้านทาน (R_s) และฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์ (λ_r) มีค่าคงที่ จะสามารถวิเคราะห์ได้ว่า ภายใต้การควบคุมด้วยเทคนิคการควบคุมองค์ประกอบของกระแสสเตอร์ในแกน d ให้เป็นศูนย์ เมื่อใดก็ตามที่กระแสสเตเตอร์หรือความเร็วของโรเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ตัวประกอบกำลังมีค่าต่ำหรือแย่ลง เป็นผลให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลดลง

และสามารถพิจารณาหาสมการกำลังไฟฟ้าแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าฯ เมื่อใช้หลักการควบคุมองค์ประกอบของกระแสทางด้านขดลวดสเตเตอร์ในแกน d ให้เป็นศูนย์ ได้คือ

$$\begin{aligned} P_s &= 3\cdot\frac{\sqrt{V_{ds}^2+V_{qs}^2}}{\sqrt{2}}\cdot\frac{\sqrt{I_{ds}^2+I_{qs}^2}}{\sqrt{2}}\cdot \mathrm{PF}_s \\ &= 3\cdot V_s\cdot I_s\cdot\cos(\varphi_s) \end{aligned} \tag{2.27}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.5 สรุป

การควบคุมกระแสสเตเตอร์สำหรับระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบกระตุ้นด้วยแม่เหล็กถาวรที่ถูกเชื่อมต่อกริด โดยอาศัยเทคนิคการควบคุมองค์ประกอบของกระแสสเตเตอร์ในแกน d ให้เป็นศูนย์ มีข้อดีคือควบคุมง่าย และหลักการทำงานไม่ซับซ้อน อีกทั้งยังสามารถช่วยลดพลังงานสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เทคนิคดังกล่าวจะสร้างสัญญาณแรงดันอ้างอิงเพื่อนำไปควบคุมคอนเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบสองระดับในลักษณะหันหลังชนกันทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งในบทถัดไปจะได้อธิบายถึงทฤษฎีและเทคนิคการมอดูเลตสัญญาณของคอนเวอร์เตอร์ดังกล่าว และการควบคุมทางด้านกริดระบบ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved