

การดำเนินงานด้วยดีสเปซสำหรับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
ด้วยเทคนิคการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม
dSPACE Implementation for Speed Regulation of Three-Phase Induction motor
Based on Indirect Vector Control Technique

จักรพงษ์ จารุมิตรี และ เสถียร ชาญศรีรัตน์

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

833 ถ.พระราม 1 เขต ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทรศัพท์: 0-2215-3861 ต่อ 210 E-mail: ch_charumit@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พิกัด 4 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก ด้วยหลักการควบคุมโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์แบบทางอ้อม โดยเน้นถึงการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์แรงบิดแม่เหล็ก และผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากสภาวะคงตัวและสภาวะทางไดนามิกส์ ในการควบคุมกระแสสำหรับสร้างโรเตอร์ฟลักซ์และแรงบิดแม่เหล็กในกรอบอ้างอิงแกนหมุน ถูกควบคุมด้วยชุดอินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมด้วยคำสั่งกระแส โดยมีพิกัดอุปกรณ์สวิตช์กำลังไอจีบีที 25 แอมป์ แรงดันพิกัด 1200 โวลต์ ระบบการขับเคลื่อนทั้งหมดถูกควบคุมด้วยตัวประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัล DSP เบอร์ TMS320F240 ที่ใช้งานผ่านการดอินเตอร์เฟสแบบทันเวลา dSPACE DS1104 จากผลการทดสอบพบว่าระบบควบคุมที่นำเสนอให้ผลตอบสนองที่ดี ภายใต้สภาวะคงตัวและสภาวะทางไดนามิกส์

คำสำคัญ: การควบคุมเวกเตอร์ทางอ้อม มอเตอร์เหนี่ยวนำ

Abstract

This paper proposes the control technique for 4hp, 4 poles three-phase induction motor based on an indirect flux vector control technique (IFOC). This technique is emphasized on speed control, electromagnetic torque and parameter changing for steady and dynamic conditions. Rotor flux and electromagnetic torque are controlled by currents in terms of rotating reference frame. These currents are controlled by current controlled voltage source inverter with ratings of 25A, 1200V. The overall drive system is implemented on a real-time DSP TMS320F240 board via dSPACE DS1104 interface card. The proposed system provides good response for both dynamic and steady state conditions.

Keywords: Indirect vector control, Induction motor.

1. บทนำ

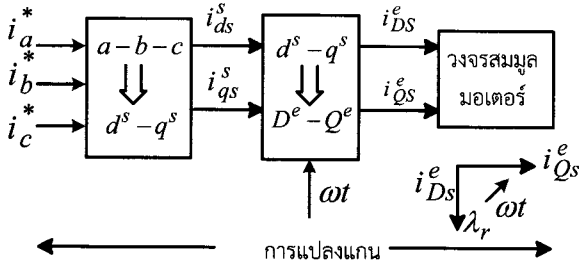
การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ด้วยหลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector control) หรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการควบคุมการกำหนดทิศทางของฟลักซ์ (Field orientation control, FOC) ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น การควบคุมฟลักซ์แบบทางตรง (Direct field orientation control, DFOC) และการควบคุมฟลักซ์แบบทางอ้อม (Indirect field orientation control, IFOC) การควบคุมฟลักซ์แบบทางตรงนั้นกำหนดขนาดและทิศทางตำแหน่งองศาของเวกเตอร์ฟลักซ์อ้างอิง โดยการประมาณค่าโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์โดยตรงจากแรงดันและกระแสที่ได้จากอุปกรณ์การตรวจจับ Hall sensor ที่ถูกฝังในช่องว่างอากาศบริเวณขดลวดสเตเตอร์ในตำแหน่งแกน d และ q ทำให้ได้ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนในกรอบอ้างอิงแกนนิ่ง (Stator reference frame) ที่ถูกต้อง ในขณะที่เดียวกับการควบคุมฟลักซ์แบบทางอ้อมนั้นไม่มีอุปกรณ์การตรวจจับ Hall sensor แต่จะอาศัยการประมาณค่าโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ที่ถูกต้องมาจากการคำนวณกระแส แรงดัน และความเร็วสลิป (Slip speed) และการแปลงแกนในกรอบอ้างอิงแกนหมุน (Rotating reference frame) ที่ถูกต้อง

ในหลักการ IFOC สามารถควบคุมให้ผลตอบสนองทางไดนามิกส์ของแรงบิดและฟลักซ์ได้อย่างอิสระ คล้ายกับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก (Separately excited DC motor) โดยจะต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์อย่างถูกต้อง เพื่อนำมาคำนวณค่าความถี่สลิป (Slip frequency) ให้เหมาะสมและถูกต้อง เพื่อที่จะสามารถควบคุมแรงบิด และฟลักซ์ของมอเตอร์ได้อย่างอิสระ แต่ทางปฏิบัตินั้นเป็นการยากที่จะคำนวณค่าความถี่สลิปให้ถูกต้อง เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่ทำให้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เปลี่ยนแปลง เป็นผลทำให้ค่าความผิดพลาด อาทิเช่น ช่วงเวลาคงตัวของโรเตอร์ (Rotor time constant) ค่าความต้านทานโรเตอร์ การอิ่มตัวของแกน และความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน [1]-[3]

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอหลักการพื้นฐานของการควบคุมโรเตอร์ฟลักซ์แบบทางอ้อม ซึ่งเน้นถึงขั้นตอนการวิเคราะห์ การจำลอง และผลที่ได้จากการทดสอบ อาทิเช่น แรงบิดแม่เหล็ก ความเร็วรอบ และผลตอบสนองทางไดนามิกส์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

2. ไดนามิกส์โมเดลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

วงจรสมมูลแบบไดนามิกส์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธีการควบคุมโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ทางอ้อมนั้น ต้องดัดแปลงวงจรสมมูลของมอเตอร์จากระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสไปเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 2 เฟส ในกรอบอ้างอิงแกนนิ่ง และเพื่อง่ายต่อการควบคุมปริมาณกระแสและโรเตอร์ฟลักซ์ในปริมาณดีซี เช่นเดียวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกขดกระตุ้น จำเป็นที่จะต้องแปลงวงจรสมมูลของมอเตอร์ให้อยู่ในรูปกรอบอ้างอิงแกนหมุน หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Excitation reference frame (e) ดังแสดงตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 การแปลงวงจรสมมูลของมอเตอร์ในกรอบอ้างอิงแกนหมุน

สมการแรงดันและกระแสของมอเตอร์ ตามสมการแรงดันของ Kirchhoff's voltage law (KVL) จากวงจรพื้นฐานที่มีตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับการพันขดลวดในมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยเมื่อใช้กฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) ในการกำหนดแรงดันเหนี่ยวนำ (e) ในตัวเหนี่ยวนำ (L) ซึ่งมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ (λ) ต่อเวลา โดยเขียนสมการแรงดันทางด้านขดสเตเตอร์และสมการแรงดันทางด้านขดโรเตอร์ ตามสมการที่ (1) และ (2) ดังนั้นสมการแรงดันที่ขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์มีค่าเท่ากับ

$$v_s^s = R_s^s i_s^s + \frac{d\lambda_s^s}{dt} \quad (1)$$

$$v_r^r = R_r^r i_r^r + \frac{d\lambda_r^r}{dt} \quad (2)$$

เมื่อกำหนดให้ R_s^s และ R_r^r เป็นค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ จากความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานทางด้านโรเตอร์ (R_r^r) เมื่อถูกย้ายพารามิเตอร์จากด้านโรเตอร์มายังด้านสเตเตอร์ และเขียนรูปสมการแรงดันสเตเตอร์และโรเตอร์ทางด้านสเตเตอร์คือ

$$v_s^s = R_s^s i_s^s + p\lambda_s^s \quad (3)$$

$$v_r^r = R_r^s i_r^s + (p - j\omega_{sl})\lambda_r^s \quad (4)$$

เมื่อ $p = d/dt$

และฟลักซ์เวกเตอร์ λ_s^s และ λ_r^s เขียนให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์กระแส i_s^s และกระแส i_r^s และตัวเหนี่ยวนำได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \lambda_s^s \\ \lambda_r^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^s \\ i_r^s \end{bmatrix} \quad (5)$$

เมื่อ

L_m คือค่าความเหนี่ยวนำร่วม

L_s คือค่าความเหนี่ยวนำสเตเตอร์ที่เกิดจากผลรวมของค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของสเตเตอร์ กับค่าความเหนี่ยวนำร่วม ($L_{ls} + L_m$)

L_r คือค่าความเหนี่ยวนำโรเตอร์ที่เกิดจากผลรวมของค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของ โรเตอร์กับค่าความเหนี่ยวนำร่วม ($L_{lr} + L_m$)

เขียนให้อยู่ในรูปของสมการเมตริกคือ

$$\begin{bmatrix} v_s^s \\ v_r^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s^s + pL_s & pL_m \\ (p - j\omega_{sl})L_m & R_r^s + (p - j\omega_{sl})L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^s \\ i_r^s \end{bmatrix} \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) ต้องทำการแปลงแรงดันที่ให้อยู่ในสมการกรอบอ้างอิงแกนนิ่ง หรือรูปแบบขององค์ประกอบ $d-q$ ดังนั้นสมการแรงดันของสเตเตอร์ในเทอม $d-q$ มีค่าเท่ากับ

$$v_{ds}^s = (R_s^s + pL_s)i_{ds}^s + pL_m i_{dr}^s \quad (7)$$

$$v_{qs}^s = (R_s^s + pL_s)i_{qs}^s + pL_m i_{qr}^s \quad (8)$$

และสมการแรงดันของโรเตอร์ในเทอม $d-q$ มีค่าเท่ากับ

$$v_{dr}^s = R_r^s i_{dr}^s + p\lambda_{dr}^s + \omega_{sl}\lambda_{qr}^s \quad (9)$$

$$v_{qr}^s = R_r^s i_{qr}^s + p\lambda_{qr}^s - \omega_{sl}\lambda_{dr}^s \quad (10)$$

ในการพิจารณาวงจรสมมูลในกรอบอ้างอิงแกนหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส พิจารณาได้จากเฟสเซอร์แรงดันตามสมการที่ (11)

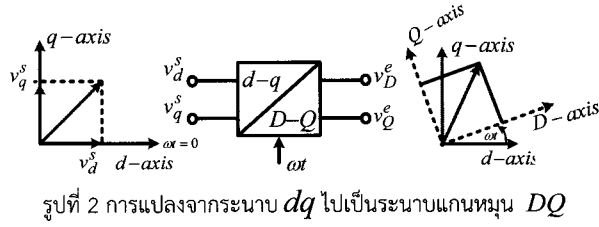
$$V_s^e = V_s^s e^{-j\omega t} \quad (11)$$

จัดรูปอยู่ในกรอบอ้างอิงแกนหมุน หรือระนาบ D-Q กรอบอ้างอิงแกนหมุน

$$\begin{aligned} V_{DS}^e + jV_{QS}^e &= \overbrace{V_s^s}^{V_s^s} \overbrace{e^{-j\omega t}}^{e^{-j\omega t}} [\cos(-\omega t) + j\sin(-\omega t)] \\ &= V_{ds}^s \cos(\omega t) + V_{qs}^s \sin(\omega t) \\ &\quad + j[-V_{ds}^s \sin(\omega t) + V_{qs}^s \cos(\omega t)] \end{aligned} \quad (12)$$

สมการของการแปลงแกนในกรอบอ้างอิง $dq \rightarrow DQ$ ทำได้โดย

$$\begin{bmatrix} V_{DS}^e \\ V_{QS}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds}^s \\ V_{qs}^s \end{bmatrix} \quad (13)$$



จากสมการแรงดันและกระแสในกรอบอ้างอิงแกนนิ่ง สามารถแปลงให้อยู่ในรูปสมการกรอบอ้างอิงแกนหมุน แสดงในรูปที่ 2 โดยการนำสมการที่ (1) แทนลงในสมการที่ (11) มีค่าเท่ากับ

$$V_s^e e^{j\omega t} = R_s i_s^e e^{j\omega t} + p \lambda_s^e e^{j\omega t} \quad (14)$$

$$\text{โดยที่ } p \lambda_s^e e^{j\omega t} = (p + j\omega) \lambda_s^e e^{j\omega t}$$

แรงดันที่ขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ในทอมของกรอบอ้างอิงแกนหมุนคือ

$$V_s^e = R_s i_s^e + (p + j\omega) \lambda_s^e \quad (15)$$

$$V_R^e = R_r i_R^e + (p + j\omega_{sl}) \lambda_R^e \quad (16)$$

โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสในกรอบอ้างอิงแกนหมุนคือ

$$\begin{bmatrix} v_{Ds}^e \\ v_{Qs}^e \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega L_s & pL_m & -\omega_{sl}L_m \\ \omega L_s & R_s + pL_s & \omega_{sl}L_m & pL_m \\ pL_m & -\omega_{sl}L_m & R_r + pL_r & -\omega_{sl}L_r \\ \omega_{sl}L_m & pL_m & \omega_{sl}L_r & pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ds}^e \\ i_{Qs}^e \\ i_{DR}^e \\ i_{QR}^e \end{bmatrix} \quad (17)$$

และสมการแรงบิดในกรอบอ้างอิงแกนหมุนเขียนสมการแรงบิดให้อยู่ในรูปของกระแสสเตเตอร์และโรเตอร์ฟลักซ์คือ

$$T = \frac{P}{3} \frac{L_m}{L_r} (i_{Qs}^e \lambda_{DR}^e - i_{Ds}^e \lambda_{QR}^e) \quad (18)$$

3. หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์แบบทางอ้อม

หลักการควบคุมโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์แบบทางอ้อมมีหลักการพื้นฐานจำลองมาจากการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกขดกระตุ้น โดยมีกระแสแอมเจอร์ (i_a) ทำมุมตั้งฉากกับโรเตอร์ฟลักซ์ (λ_r) ซึ่งเป็นผลทำให้การควบคุมดีซีมอเตอร์มีแรงบิดสูงสุด โดยผลของแรงบิดมอเตอร์นั้นขึ้นอยู่กับกระแสแอมเจอร์เป็นหลักในขณะที่ให้โรเตอร์ฟลักซ์มีค่าคงที่ ในหลักการควบคุมโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์แบบทางอ้อมนั้นอาศัยอุปกรณ์ตรวจจับความเร็วรอบของโรเตอร์ Encoder และนำผลของความเร็วรอบของโรเตอร์ (ω_m) มารวมกับค่าความเร็วสลิป (ω_{sl}) โดยการคำนวณค่าความเร็วสลิปนั้นจะต้องมีความแม่นยำสูง เพื่อที่จะสามารถควบคุมโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์วางอยู่ในแกนของสนามแม่เหล็กหมุนอยู่

ตลอดเวลา จากการคำนวณแรงบิดตามสมการที่ (18) เมื่อกระแส i_{Ds}^e และ i_{Qs}^e เป็นองค์ประกอบของเวกเตอร์กระแสที่สเตเตอร์ในกรอบอ้างอิงแกนหมุน และโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ในกรอบอ้างอิงแกนหมุนที่ประกอบไปด้วย λ_{DR}^e และ λ_{QR}^e นั้นมีค่าขึ้นอยู่กับกระแส i_{Ds}^e และ i_{Qs}^e เมื่อพิจารณาสมการแรงดันที่สเตเตอร์ในสมการที่ (16) กำหนดให้แรงดันตกคร่อม $v_R^e = 0$ เนื่องมาจาก ขดลวดของโรเตอร์ลัดวงจร หรือที่เรียกว่าเป็นแบบกรงกระรอก ปรับรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$R_r i_R^e + (p + j\omega_{sl}) \lambda_R^e = 0 \quad (19)$$

กระแสโรเตอร์ในกรอบอ้างอิงแกนหมุนมีค่าเท่ากับ

$$i_R^e = \frac{1}{L_r} (\lambda_r^e - L_m i_s^e) \quad (20)$$

แทนค่าสมการกระแส (20) ลงในสมการ (19) คือ

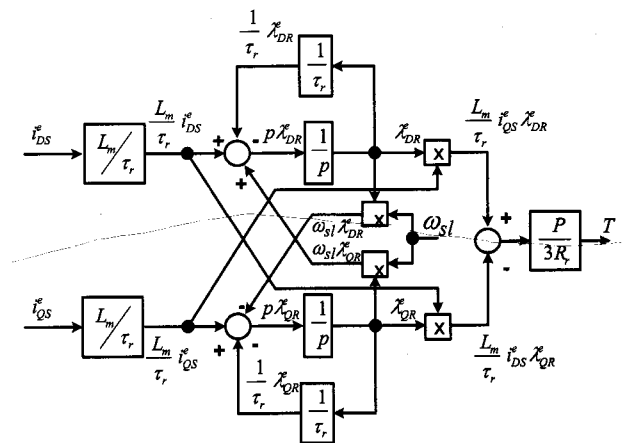
$$p \lambda_R^e = \frac{1}{\tau_r} [L_m i_s^e - (1 + j\omega_{sl} \tau_r) \lambda_R^e] \quad (21)$$

เมื่อค่าเวลาคงตัวของโรเตอร์ τ_r เป็นอัตราส่วนของ L_r/R_r

จากนั้นแยกองค์ประกอบของโรเตอร์ฟลักซ์ DQ ออกเป็นสองส่วนดังนี้คือ

$$\lambda_{DR}^e = \frac{1}{p} \left(\frac{L_m}{\tau_r} i_{Ds}^e - \frac{1}{\tau_r} \lambda_{DR}^e + \omega_{sl} \lambda_{QR}^e \right) \quad (22)$$

$$\lambda_{QR}^e = \frac{1}{p} \left(\frac{L_m}{\tau_r} i_{Qs}^e - \frac{1}{\tau_r} \lambda_{QR}^e - \omega_{sl} \lambda_{DR}^e \right) \quad (23)$$



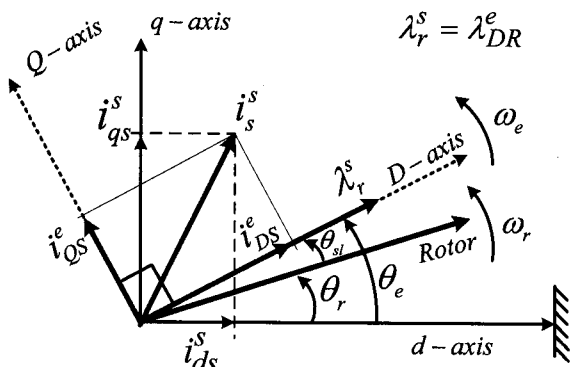
รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมการคำนวณแรงบิดในกรอบอ้างอิงแกนหมุน

จากสมการที่ (22) และ (23) อธิบายถึงไดนามิกส์บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังแสดงตามรูปที่ 3 ซึ่งมีความยากลำบากในการควบคุมเนื่องจากมีบล็อกการคูณถึงสี่บล็อกด้วยกันและมีการเชื่อมโยงฟารามิเตอร์

ระหว่างบล็อกไดอะแกรมของแกน D และ แกน Q ในหลักการนี้เรียกว่า การควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นเพื่อต่อการควบคุมที่เป็นแบบเชิงเส้นจึงต้องกำหนดให้สมการของ λ_{QR}^e ให้มีค่าเป็นศูนย์ เพื่อที่ควบคุม พารามิเตอร์ต่างๆได้อย่างอิสระ ซึ่งเป็นพื้นฐานของการควบคุมแบบ IFOC จากรูปที่ 3 เมื่อกำหนดให้สมการของ λ_{QR}^e ให้มีค่าเป็นศูนย์ ทำให้ได้ สมการแรงบิดที่แยกการควบคุมระหว่างกระแส และโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ ได้อย่างอิสระในกรอบอ้างอิงแกนหมุนมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{P}{3} \frac{L_m}{\tau_r R_r} (i_{QS}^e \lambda_{DR}^e) \quad (24)$$

เมื่อกำหนดให้ λ_{DR}^e มีค่าเท่ากับโรเตอร์ฟลักซ์ในกรอบอ้างอิงแกนนิ่ง λ_r^s



รูปที่ 4 หลักการพื้นฐานของการควบคุมแบบโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์แบบทางอ้อม

รูปที่ 4 แสดงหลักการพื้นฐานของการควบคุมแบบโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ ในกรอบอ้างอิงแกนนิ่งและกรอบอ้างอิงแกนหมุน เมื่อกำหนดให้ ω_e คือ ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน การควบคุมแบบโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ จะต้องควบคุมโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ซึ่งเป็นปริมาณดิสcrete ในกรอบอ้างอิง แกนหมุนให้หมุนไปด้วยกับความเร็ว ω_e ด้วยการคำนวณค่า ω_{sl}^* ที่ถูกต้อง ภายได้เงื่อนไขสภาวะคงตัวและสภาวะไดนามิกส์ ในการตั้งฉากของขนาด กระแส และโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ในกรอบอ้างอิงแกนหมุน จะต้องถูก รักษาไว้ให้ตั้งฉากกันอยู่ตลอดเวลาไม่ว่าการควบคุมมอเตอร์จะอยู่ใน สภาวะใดก็ตาม จากสมการที่ (21) เปลี่ยนให้อยู่ในรูปสมการโรเตอร์ ฟลักซ์ในกรอบอ้างอิงแกนหมุน เป็นไปตามสมการที่ (25) มีค่าเท่ากับ

$$\lambda_{DR}^e + (p + j\omega_{sl})\tau_r \lambda_{DR}^e = L_m i_{QS}^e \quad (25)$$

โดยสมการที่ (25) นี้เป็นสมการตั้งต้นของระบบ IFOC โดยมีความสัมพันธ์ กันระหว่าง λ_{DR}^e และ i_{QS}^e สมการนี้จะต้องทำการแยกองค์ประกอบใน กรอบอ้างอิงแกนหมุน DQ เพื่อที่จะหาค่าของกระแส i_{DS}^e และ i_{QS}^e โดย ที่องค์ประกอบของ Real part คือ

$$\lambda_{DR}^e (1 + \tau_r p) = L_m i_{DS}^e \quad (26)$$

ซึ่ง $\tau_r p$ มีค่าเป็นศูนย์เมื่อมอเตอร์ทำงานที่สภาวะคงตัว และองค์ประกอบของ Imaginary part คือ

$$\omega_{sl} \tau_r \lambda_{DR}^e = L_m i_{QS}^e \quad (27)$$

จากนั้นแทน ω_{sl} ด้วย ω_{sl}^* , แทน λ_{DR}^e ด้วย λ_r^* , แทน i_{QS}^e ด้วย i_{QS}^{e*} ลงในสมการและหาค่า ω_{sl}^* ได้จาก

$$\omega_{sl}^* = \frac{L_m i_{QS}^{e*}}{\tau_r \lambda_r^*} \quad (28)$$

จากสมการของ Real part ($\lambda_{DR}^e (1 + \tau_r p) = L_m i_{DS}^e$) เมื่อให้ปริมาณ ของ τ_r มีค่าคงที่ดังนั้นโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์มีค่าเท่ากับ

$$\lambda_r^e = L_m i_{DS}^{e*} \quad (29)$$

(ควบคุมขนาดของโรเตอร์ฟลักซ์ λ_r^* โดยการควบคุมกระแส i_{DS}^{e*})

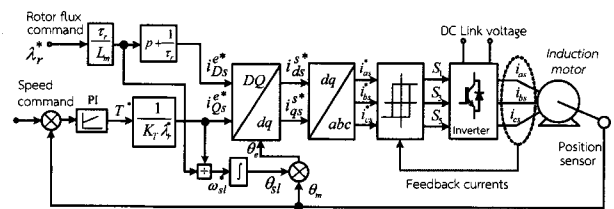
นำสมการที่ได้แทนลงในสมการ ω_{sl}^* ให้อยู่ในรูปของกระแส

$$\omega_{sl}^* = \frac{1}{\tau_r} \frac{i_{QS}^{e*}}{i_{DS}^{e*}} \quad (\text{ควบคุมมุม } \omega_{sl}^* \text{ โดยการควบคุมกระแส}) \quad (30)$$

กระแสอ้างอิงในกรอบแกนหมุนของกระแสที่ขดลวดสเตเตอร์ i_{DS}^{e*} และ i_{QS}^{e*} แทนความต้องการของการสร้างโรเตอร์ฟลักซ์และแรงบิดมอเตอร์ ตามลำดับ โดยที่สัญญาณคำสั่งของกระแสทั้งสองหาได้จาก

$$i_{DS}^{e*} = \frac{1 + \tau_r p}{L_m} \lambda_r^* \quad (\text{โรเตอร์ฟลักซ์ถูกกำหนดโดยกระแส } i_{DS}^{e*}) \quad (31)$$

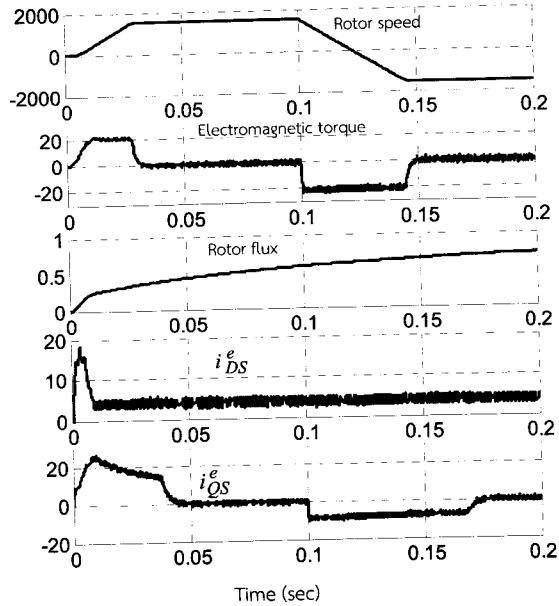
$$i_{QS}^{e*} = \frac{T^*}{K_T \lambda_r^*} \quad (\text{แรงบิดถูกกำหนดโดยกระแส } i_{QS}^{e*}) \quad (32)$$



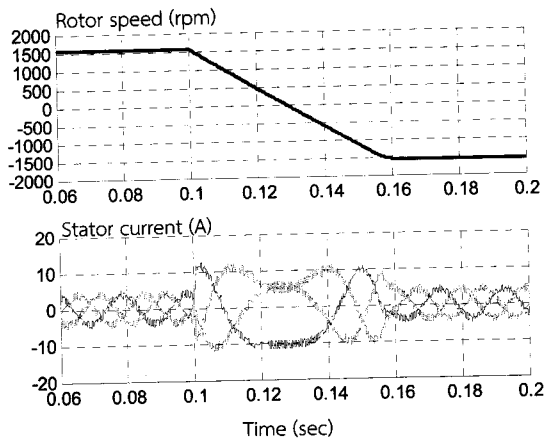
รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมโรเตอร์ฟลักซ์ทางอ้อม

4. ผลการจำลอง

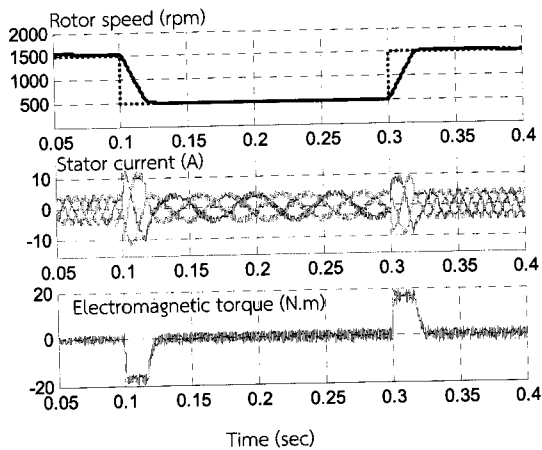
จากข้อมูลพารามิเตอร์ในตารางที่ 1 นำมาจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK, R2008a โดยมีผลการจำลองตามรูปที่ 6, 7 และ 8 ซึ่งเป็นผลของการเริ่มเดินมอเตอร์ ที่ความเร็วรอบ 1500rpm และกลับ ทางหมุน ที่ -1500rpm อย่างทันทีทันใด ในการจำลองนี้ แสดงผลของ แรงบิดแม่เหล็ก ความเร็วรอบ กระแสในกรอบอ้างอิงแกนหมุน i_{DS}^e, i_{QS}^e และ โรเตอร์ฟลักซ์ ในสภาวะไดนามิกส์และสภาวะคงตัว



รูปที่ 6 จำลองหลักการทำงานของการทำงานของมอเตอร์ฟลักซ์แบบทางอ้อม



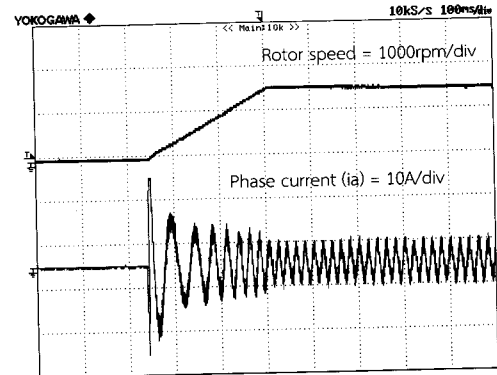
รูปที่ 7 ขณะกลับทางหมุนมอเตอร์จาก 1500rpm ไปเป็น -1500rpm



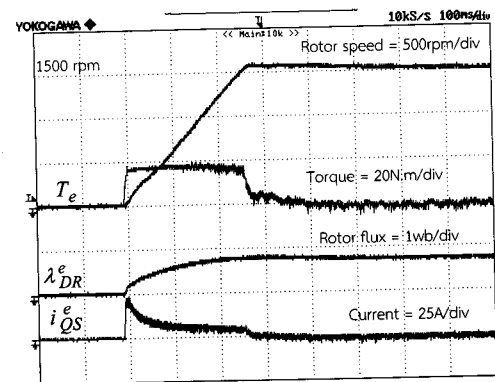
รูปที่ 8 กระแสสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟส และแรงบิดแม่เหล็ก ขณะลดความเร็วจาก 1500rpm ไปเป็น 500rpm

5. ผลการทดลอง

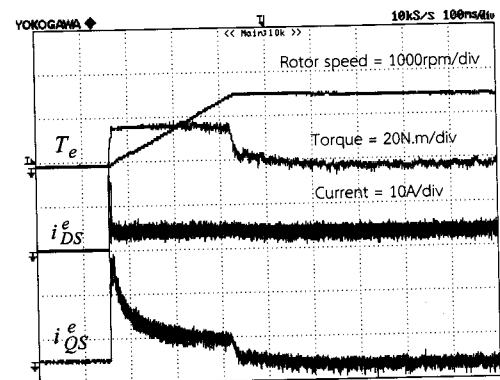
สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขนาดพิกัดกำลัง 3,000W, 380V, 50Hz, 4Pole และ ความเร็วรอบ 1415rpm ชุดประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัล DSP เบอร์ TMS320F240 ผ่านการอินเตอร์เฟส dSPACE DS1104 โดยกำหนดให้มีค่า sampling time เท่ากับ $50\mu s$ ในชุดทดสอบประกอบไปด้วยชุดอินเวอร์เตอร์ 25A, 1200V ถูกควบคุมด้วยคำสั่งกระแสด (Bang-bang)



รูปที่ 9 ความเร็วของมอเตอร์และกระแสเฟสขณะเริ่มเดินมอเตอร์

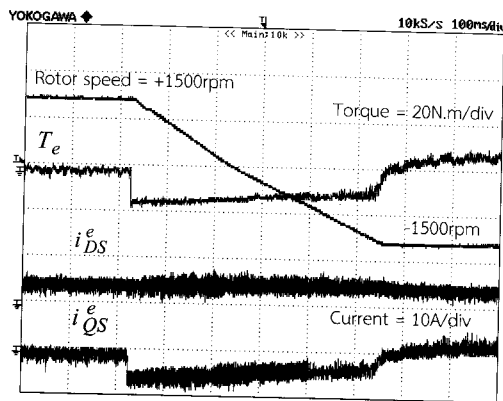


รูปที่ 10 ความเร็วที่โรเตอร์ แรงบิดแม่เหล็ก โรเตอร์ฟลักซ์ λ_{DR}^e และกระแส i_{QS}^e ขณะเริ่มเดินมอเตอร์

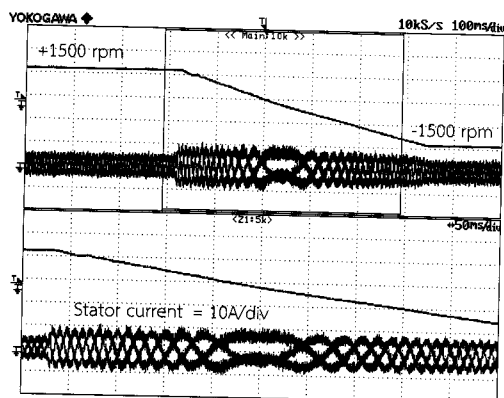


รูปที่ 11 ผลของแรงบิดแม่เหล็ก กระแส i_{DS}^e และ i_{QS}^e ในกรอบอ้างอิงแกนหมุน ขณะเริ่มเดินมอเตอร์

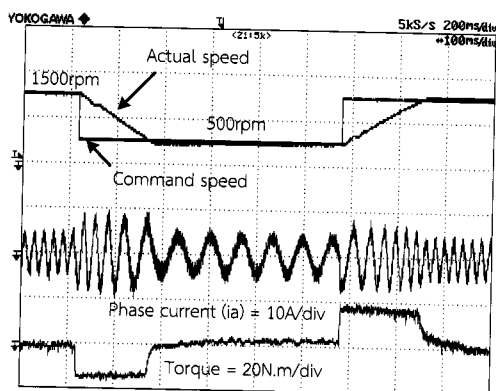
โดยมีวงจรระบบควบคุมตามรูปที่ 5 จากผลการทดลองในรูปที่ 9 เป็นการแสดงรูปกระแสเริ่มเดินมอเตอร์จากหยุดนิ่งไปจนถึงความเร็ว 1500rpm รูปที่ 10 แสดงผลของแรงบิดแม่เหล็ก โรเตอร์ฟลักซ์ และการตอบสนองของกระแส i_{DS}^e ขณะเริ่มเดินมอเตอร์ ในรูปที่ 11 แสดงผลการตอบสนองของกระแส i_{DS}^e และ i_{QS}^e ในสถานะไดนามิกส์ รูปที่ 12 และ 13 แสดงผลการตอบสนองของกระแส i_{DS}^e และ i_{QS}^e ในขณะที่ยกกลับทางหมุนมอเตอร์



รูปที่ 12 การเปลี่ยนแปลงของกระแส i_{DS}^e , i_{QS}^e และแรงบิดแม่เหล็ก ขณะยกกลับทางหมุนมอเตอร์อย่างทันทีทันใดจาก 1500 ถึง -1500rpm



รูปที่ 13 กระแสที่สเตเตอร์ทั้ง 3 เฟสขณะยกกลับทางหมุนมอเตอร์อย่างทันทีทันใดจาก 1500 ถึง -1500rpm



รูปที่ 14 ลักษณะแรงบิดแม่เหล็ก กระแสสเตเตอร์ เมื่อควบคุมให้ความเร็ว ลดลงจาก 1500rpm ไปเป็น 500rpm อย่างทันทีทันใด

ในรูปที่ 14 แสดงการทำงานของแรงบิดแม่เหล็กขณะลดความเร็วของมอเตอร์ จาก 1500rpm ไปเป็น 500rpm ซึ่งพบว่ามอเตอร์ทำงานอยู่ในสถานะ Regenerative และ forward direction สังเกตได้จากความถี่ของกระแสสเตเตอร์ ที่เปลี่ยนไป และแรงบิดแม่เหล็กมีค่าเป็นลบและบวกตามลำดับ

6. สรุป

จากการจำลองและการทดสอบการควบคุมมอเตอร์แบบ IFOC นั้นพบว่าผลการตอบสนองของการควบคุมมีประสิทธิภาพที่ดี ซึ่งหมายถึงการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์ที่ถูกนำมาใช้เป็นไปอย่างถูกต้อง ซึ่งสังเกตได้จากการตอบสนองของกระแสในกรอบอ้างอิงแกนหมุน

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

Rated power, Frequency, Pole	3000W, 50Hz, 4-pole
Rated speed	1415rpm
Stator resistance	2 Ω
rotor resistance	2.22 Ω
Magnetizing inductance	0.1999H
Stator and rotor leakage inductance	0.0159H

เอกสารอ้างอิง

- [1] Andrzej M. Trzynadlowski, (2000). *Control of Induction Motors*. Academic Press.
- [2] Masoudi, S.; Feyzi, M.R.; Sharifian, M.B.B.; (2009), *Speed Control in Vector Controlled induction Motors*, IEEE Conferences.
- [3] Khater, F.M.H.; Ahmed, F.I.; El-Sousy, (1999), *Analysis and Design of Indirect Field Orientation Control for Induction Machine Drive System*, IEEE Conferences.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ดร.จักรพงษ์ จารุมิสรุ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2552 ปัจจุบันเป็นพนักงานสายวิชาการ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน สนใจงานวิจัยทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงานทดแทน และการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า



รศ.ดร.เสถียร ชาญศิริรัตน์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2550 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรอง

ศาสตราจารย์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน สนใจงานวิจัยทางด้าน พลังงานทดแทน และการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า