

ในกรณีที่สนามแม่เหล็กภายในตัวมอเตอร์มีการกระจายเป็นแบบรูปคลื่นไซน์ตามตำแหน่งเชิงมุมของมอเตอร์ โดยอาศัยความสัมพันธ์ที่ว่า

$$\begin{aligned}v_{us} + v_{vs} + v_{ws} &= 0, \\ i_{us} + i_{vs} + i_{ws} &= 0, \quad i_{ur} + i_{vr} + i_{wr} = 0\end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{us} \\ v_{vs} \\ v_{ws} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{us} \\ i_{vs} \\ i_{ws} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ur} \\ i_{vr} \\ i_{wr} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos p\theta_m & -\sin p\theta_m \\ \sin p\theta_m & \cos p\theta_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

(2.1)

เราสามารถเขียนแบบจำลองแสดงลักษณะสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำบนแกนสเตเตอร์ได้ดังนี้ คือ

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s \frac{d}{dt} & 0 & M \frac{d}{dt} & 0 \\ 0 & R_s + L_s \frac{d}{dt} & 0 & M \frac{d}{dt} \\ M \frac{d}{dt} & p\omega_m M & R_r + L_r \frac{d}{dt} & p\omega_m L_r \\ -p\omega_m M & M \frac{d}{dt} & -p\omega_m L_r & R_r + L_r \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$T = pM [i_{\beta s} i_{\alpha r} - i_{\alpha s} i_{\beta r}] \quad (2.3)$$

โดยที่

- v_{us}, v_{vs}, v_{ws} : แรงดันเฟสทางด้านสเตเตอร์
- $v_{\alpha s}, v_{\beta s}$: แรงดันสเตเตอร์ในแกน $\alpha - \beta$
- i_{us}, i_{vs}, i_{ws} : กระแสในขดลวดทางด้านสเตเตอร์
- i_{ur}, i_{vr}, i_{wr} : กระแสในขดลวดทางด้านโรเตอร์
- $i_{\alpha s}, i_{\beta s}$: กระแสสเตเตอร์ในแกน $\alpha - \beta$

$i_{\alpha r}, i_{\beta r}$: กระแสโรเตอร์ในแกน $\alpha-\beta$
i_{dr}, i_{qr}	: กระแสโรเตอร์ในแกน $d-q$
R_S	: ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์
R_r	: ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์
L_S	: ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์
L_r	: ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดโรเตอร์
M	: ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดด้านสเตเตอร์และโรเตอร์
θ_m	: ตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์
$\omega_m = d\theta_m/dt$: ความเร็วโรเตอร์
p	: จำนวนคู่ของขั้วแม่เหล็ก (pole pair) ของมอเตอร์

เนื่องจากการควบคุมแบบเวกเตอร์เป็นการควบคุมโรเตอร์ฟลักซ์โดยตรง เราจึงนิยมแสดงลักษณะสมบัติทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยมีกระแสสเตเตอร์ \vec{i}_s และโรเตอร์ฟลักซ์ $\vec{\lambda}_r$ เป็นตัวแปรดังนี้คือ

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \vec{i}_s \\ \vec{\lambda}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i}_s \\ \vec{\lambda}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} \vec{v}_s \quad (2.4)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} A_{11} &= -(R_S + R_r M^2 / L_r^2) / \sigma L_S \bullet I \\ A_{12} &= (R_r / L_r \epsilon) \bullet I - p \omega_m / \epsilon \bullet J \\ A_{21} &= (M R_r / L_r) \bullet I \\ A_{22} &= -(R_r / L_r) \bullet I + p \omega_m \bullet J = -\epsilon A_{12} \\ B_1 &= 1 / \sigma L_S \end{aligned}$$

$$\sigma = 1 - M^2 / L_S L_r, \quad \epsilon = \sigma L_S L_r / M$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{i}_s = [i_{\alpha s} \quad i_{\beta s}]^T, \quad \vec{v}_s = [v_{\alpha s} \quad v_{\beta s}]^T$$

$$\vec{\lambda}_r = [\lambda_{\alpha r} \quad \lambda_{\beta r}]^T = M [i_{\alpha s} \quad i_{\beta s}]^T + L_r [i_{\alpha r} \quad i_{\beta r}]^T$$

โครงสร้างและลักษณะสมบัติของตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว (Adaptive Full-order Observer) บนแกนนิ่ง

โดยอาศัยสมการแสดงลักษณะทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อก่อน เราสามารถสร้างตัวสังเกตแบบเต็มอันดับของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ดังนี้คือ

$$\frac{d\hat{i}_s}{dt} = A_{11}\hat{i}_s + \hat{A}_{12}\hat{\lambda}_r + B_1\bar{v}_s - H_1'(\hat{i}_s - \bar{i}_s) \quad (2.5)$$

$$\frac{d\hat{\lambda}_r}{dt} = A_{21}\hat{i}_s + \hat{A}_{22}\hat{\lambda}_r - H_2'(\hat{i}_s - \bar{i}_s) \quad (2.6)$$

ทั้งนี้ “s” หมายถึง ตัวปฏิบัติการอนุพันธ์ (differential operator) และ “^” หมายถึง ค่าที่ได้จากการประมาณค่า (estimated values) จากสมการที่ (2.5) และ (2.6) จะเห็นได้ว่าตัวสังเกตประกอบด้วยแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำและสัญญาณป้อนกลับของค่าความผิดพลาดของกระแสเตอร์ผ่านอัตราขยาย H_1', H_2' ในกรณีนี้เราสมมติด้วยว่า ค่าความเร็ว ω_m ที่ใช้ในตัวสังเกตในส่วน $\hat{A}_{12}, \hat{A}_{22}$ เป็นค่าที่ได้จากการประมาณ ($\hat{\omega}_m$) ทั้งนี้เพื่อจะได้ใช้ความสัมพันธ์เหล่านี้ในการประมาณค่าความเร็วในหัวข้อถัดไป จากสมการข้างบนเราสามารถคำนวณหาสมการค่าผิดพลาดในการประมาณค่า (error equation) ได้ดังนี้คือ

ค่าผิดพลาดของกระแส (current error):

$$\hat{i}_s - \bar{i}_s = [sI + H_1' - A_{11}]^{-1} \{ A_{12}(\hat{\lambda}_r - \bar{\lambda}_r) + (\hat{A}_{12} - A_{12})\hat{\lambda}_r \} \quad (2.7)$$

ค่าผิดพลาดของโรเตอร์ฟลักซ์ (rotor flux error) :

$$\hat{\lambda}_r - \bar{\lambda}_r = [sI - A_{22}]^{-1} \{ (\hat{A}_{22} - A_{22})\hat{\lambda}_r - [H_2' - A_{21}](\hat{i}_s - \bar{i}_s) \} \quad (2.8)$$

ระบบประมาณค่าความเร็วมอเตอร์

จากสมการข้างต้น จะเห็นได้ว่าถ้าเราใช้ค่าความเร็วมอเตอร์ที่ไม่ถูกต้องในตัวสังเกตแบบเต็มอันดับ กล่าวคือ $\omega_m \neq \hat{\omega}_m$ ผลที่ได้ก็คือจะเกิดค่าผิดพลาดของทั้งกระแสเตอร์และโรเตอร์ฟลักซ์ แต่เนื่องจากสัญญาณที่เราสามารถวัดหรือคำนวณได้คือค่าผิดพลาดของกระแสเตอร์ ด้วยเหตุนี้เราจึงใช้ค่าผิดพลาดของกระแสเตอร์เป็นหลักในการประมาณค่าความเร็วมอเตอร์

จากสมการที่ (2.7) และ (2.8) เราสามารถคำนวณได้ว่า ค่าผิดพลาดของกระแสเตอร์มีความสัมพันธ์กับค่าผิดพลาดของความเร็วโรเตอร์ตามสมการ:

$$\hat{i}_s - \bar{i}_s = \frac{s}{-\varepsilon} \left[s^2 I + s(H'_1 - A_{11} - A_{22}) - A_{22} \left(H'_1 - A_{11} + \frac{(H'_2 - A_{21})}{\varepsilon} \right) \right]^{-1} \Delta A_{22} \hat{\lambda}_r \quad (2.9)$$

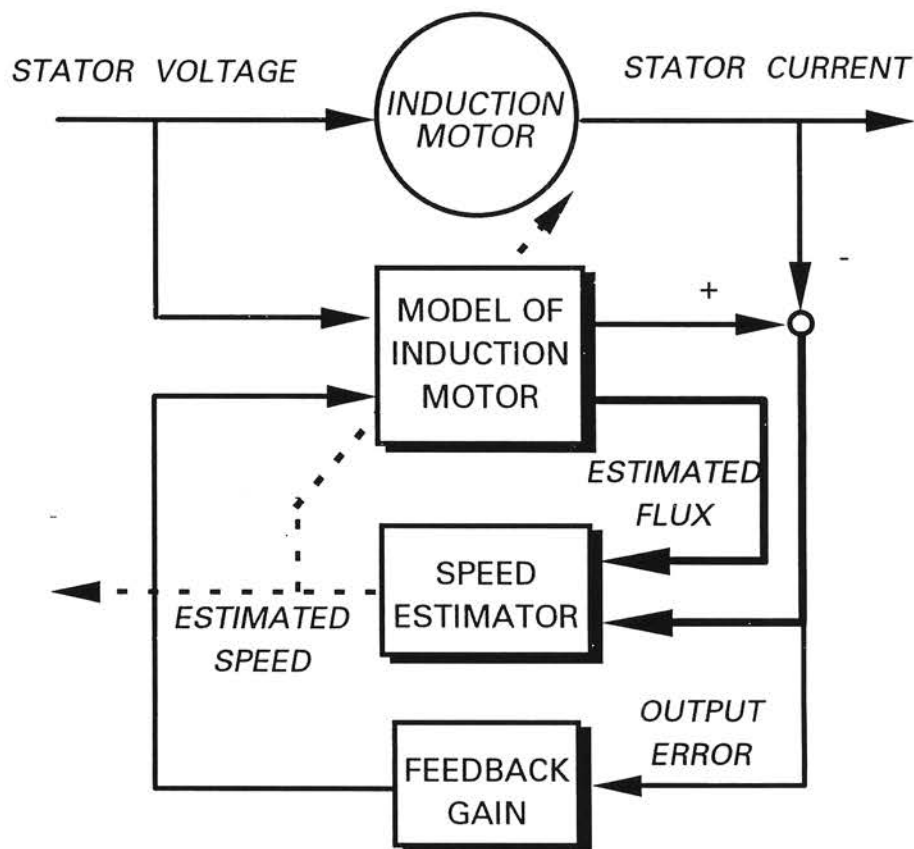
โดยที่ $\Delta A_{22} = \hat{A}_{22} - A_{22} = p(\hat{\omega}_m - \omega_m) \cdot J$ ดังนั้น $\Delta A_{22} \hat{\lambda}_r = (\hat{\omega}_m - \omega_m) p J \hat{\lambda}_r$ และเราเรียกค่า $p J \hat{\lambda}_r$ ว่า เวกเตอร์รีเกรสเซอร์ (regressor vector)

ในการประมาณค่าความเร็วมอเตอร์ เราใช้วิธีที่เรียกว่า เกรเดียนต์ อัลกอริทึม (Gradient Algorithm) ดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_m &= (k_p + k_I \int dt) \times (\text{regressor vector})^T \times \text{output error} \\ &= (k_p + k_I \int dt) w^T e_1 \quad ; k_p, k_I > 0 \end{aligned} \quad (2.10)$$

โดยที่ k_p, k_I คืออัตราขยายปรับตัว, $w = p J \hat{\lambda}_r$, และ $e_1 = \hat{i}_s - \bar{i}_s$

ดังนั้น โครงสร้างของระบบสังเกตแบบปรับตัวที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของระบบสังเกตแบบปรับตัวสำหรับประมาณค่าความเร็ว

กล่าวโดยสรุปคือ ระบบสังเกตแบบปรับตัวจะมียังประกอบสามส่วนได้แก่ แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ระบบประมาณค่าความเร็ว และส่วนป้อนกลับของค่าผิดพลาดของกระแส ซึ่งส่วนของสัญญาณป้อนกลับนี้จะช่วยในการปรับปรุงเสถียรภาพในการประมาณความเร็ว ที่จะกล่าวในบทถัดไป

โครงสร้างของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแรงดัน

ในงานวิจัยนี้เราใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแรงดัน (โศภณ สมัยรัฐ, 2538) ซึ่งเป็นระบบที่มีโครงสร้างคล้ายคลึงกับระบบการควบคุมแบบ V/F ที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์ทั่วไป จึงสามารถนำไปใช้ทดแทนได้ง่ายอีกทั้งยังมีโครงสร้างที่ง่ายต่อการพัฒนาโดยอาศัยทฤษฎีการควบคุม

ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแรงดันอาศัยหลักการควบคุมแยกอิสระ (Decoupling Control) ระหว่างกระแสสร้างฟลักซ์และกระแสสร้างแรงบิด ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการมองแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (สมการ 2.4) บนแกนหมุนซึ่งแกนนอน (d-axis) ชี้ในแนวเดียวกันกับโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ (ดูรูปที่ 2.3 ประกอบ) โดยเราจะได้แบบจำลองบนแกนหมุนนี้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{i}_s}{dt} = & \{-[R_s + M^2 R_r / L_r^2] / \sigma L_s \cdot I - \omega J\} \vec{i}_s \\ & + \frac{M^2}{\sigma L_s L_r} [R_r / L_r \cdot I - p \omega_m J] \vec{i}_o + B_1 \vec{v}_s \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\frac{d\vec{i}_o}{dt} = \frac{R_r}{L_r} \vec{i}_s - [R_r / L_r \cdot I - (p \omega_m - \omega) J] \vec{i}_o \quad (2.12)$$

กำหนดให้

$$\vec{i}_s = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix}, \quad \vec{v}_s = \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix}, \quad \vec{i}_o = \vec{\lambda}_r / M = \begin{bmatrix} i_o \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

และใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสลิป ω_s กับ กระแสสร้างแรงบิด i_{sq} และกระแสสนามโรเตอร์ฟลักซ์ i_o จากสมการ (2.2) เราสามารถเขียนสมการแบบจำลองมอเตอร์บนแกนหมุนได้ใหม่เป็น

$$R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} = \omega \sigma L_s i_{sq} - \frac{M^2}{L_r} R_r (i_{sd} - i_o) + v_{sd} \quad (2.14)$$

$$R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} = -\omega L_s i_{sd} + \frac{M^2}{L_r} \omega (i_{sd} - i_o) + v_{sq} \quad (2.15)$$

$$R_r i_o + L_r \frac{di_o}{dt} = R_r i_{sd} \quad (2.16)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega = p\omega_m + \omega_s = p\omega_m + R_r i_{sq} / L_r i_o \quad (2.17)$$

จากสมการที่ (2.14)-(2.17) จะเห็นได้ว่า มีเทอมของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเชื่อมโยงระหว่างปริมาณในแกน d และในแกน q ทำให้การควบคุมกระแสในแกนทั้งสองผ่านทางแรงดันสเตเตอร์ยุ่งยาก และไม่มีอิสระในการควบคุมในแต่ละแกน ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาที่เราจึงชดเชยแรงดันที่เชื่อมโยงระหว่างแกน เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมกระแส โดยกำหนดให้

$$v_{sd} = u_{sd} - \omega \sigma L_s i_{sq} + \frac{M^2}{L_r^2} R_r (i_{sd} - i_o) \quad (2.18)$$

$$v_{sq} = u_{sq} + \omega L_s i_{sd} - \frac{M^2}{L_r} \omega (i_{sd} - i_o) \quad (2.19)$$

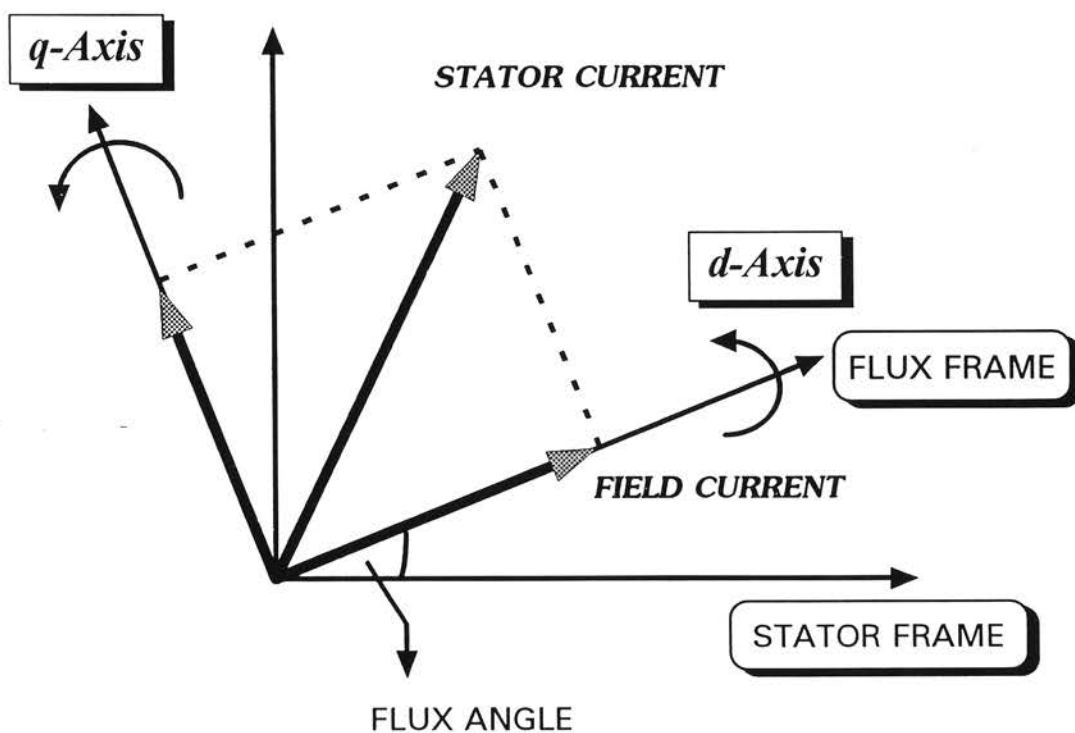
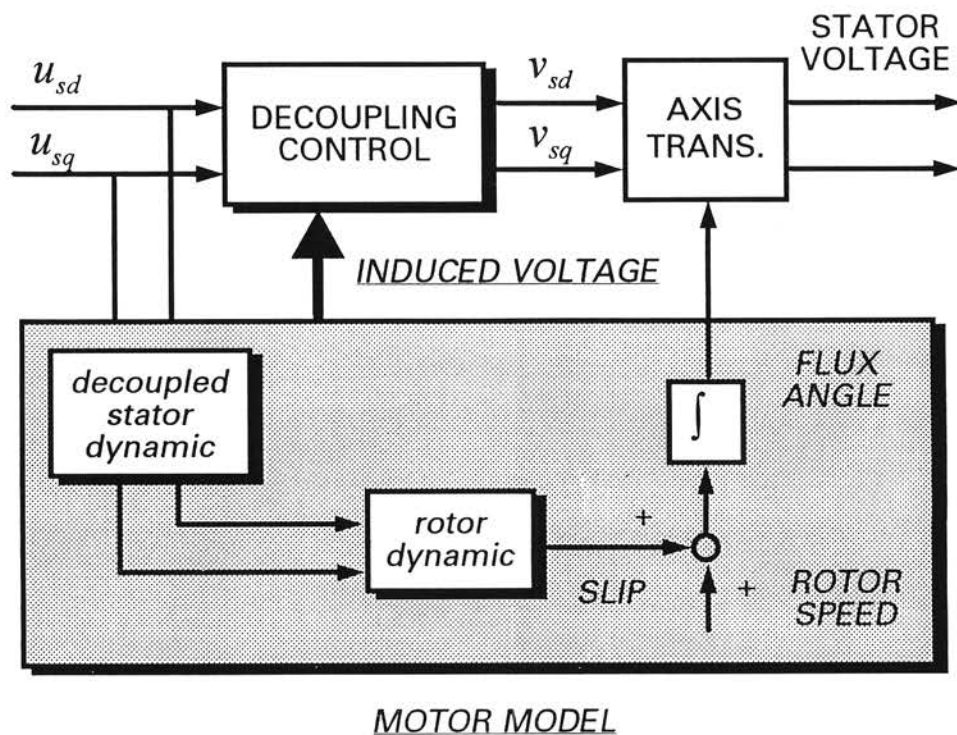
ทำให้เราสามารถเขียนสมการทางสเตเตอร์ (2.14) และ (2.15) ได้เป็น

$$R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} = u_{sd} \quad (2.20)$$

$$R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} = u_{sq} \quad (2.21)$$

สมการข้างต้นเป็นสมการแสดงลักษณะทางพลวัตของกระแสสเตเตอร์เมื่อควบคุมผ่านแรงดัน u_{sd} และ u_{sq} ที่มีการควบคุมได้อย่างอิสระในแต่ละแกน และเราเรียกการควบคุมแรงดัน v_{sd} และ v_{sq} ตามสมการ (2.18)-(2.19) ว่าเป็นการควบคุมแยกอิสระ (Decoupling Control) โดยปรกติเรา จะกำหนดให้ $u_{sd} = i_{sd}^* R_s$, $u_{sq} = i_{sq}^* R_s$ โดยที่ $()^*$ แสดงถึงค่าคำสั่ง

เนื่องจากการคำนวณแรงดันชดเชยในการควบคุมแบบแยกอิสระต้องการข้อมูลของกระแสสนาม i_o และแรงดันที่เราสามารถสร้างได้ด้วยอินเวอร์เตอร์เป็นแรงดันบนแกนนิ่ง ดังนั้นแรงดันที่คำนวณได้ตามสมการ (2.18) และ (2.19) จะถูกแปลงกลับไปเป็นคำสั่งแรงดันบนแกนนิ่งโดยใช้ข้อมูลของตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ เราจึงต้องทราบว่าโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์มีขนาดเท่าไรและมีตำแหน่งเชิงมุมอยู่ ณ ที่ใด ซึ่งค่าเหล่านี้สามารถคำนวณได้จากแบบจำลองของมอเตอร์ที่ถูกควบคุมแบบแยกอิสระแล้ว โดยใช้สมการที่ (2.16), (2.17), (2.20), (2.21) ดังนั้นโครงสร้างของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแรงดันที่มีการควบคุมแยกอิสระสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแรงดันโดยอาศัยการควบคุมแยกอิสระ

เมื่อเรารวมส่วนของระบบควบคุมแวกเตอร์แบบแรงดันเข้ากับระบบประมาณค่าความเร็วโรเตอร์ (ระบบสังเกตแบบปรับตัว) เราจะได้โครงสร้างรวมของระบบควบคุมแวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดความเร็วดังแสดงในรูปที่ 2.4 ผลการจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรม MATLAB with SIMULINK โดยใช้ค่าพารามิเตอร์มอเตอร์ตามภาคผนวก (ค) แสดงได้ดังรูปที่ 2.5-2.7 ผลการจำลองในรูปที่ 2.5 แสดงถึงการทำงานของระบบที่สถานะอยู่ตัวไร้โหลด ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบประมาณค่าความเร็วสามารถประมาณค่าความเร็วได้ถูกต้องตั้งแต่ความเร็วสูงจนถึงความเร็วต่ำ ส่วนผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองของระบบต่อคำสั่งแบบขั้นในการเร่ง-ลดความเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองในรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นกรณีที่เราใช้การควบคุมแบบแวกเตอร์โดยใช้เซนเซอร์วัดความเร็ว จะเห็นว่าระบบควบคุมแวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดความเร็วสามารถทำงานได้ใกล้เคียงกับระบบที่มีเซนเซอร์วัดความเร็ว โดยยังคงควบคุมแรงบิดและกระแสได้ตามคำสั่งและค่าผิดพลาดของความเร็วประมาณระหว่างการเร่งและลดความเร็วก็มีค่าน้อย ซึ่งผลตอบสนองที่ดีของความเร็วประมาณต่อความเร็วจริงที่เปลี่ยนแปลงนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบอัตราขยายแบบปรับตัว K_p และ K_i ให้มีค่าที่เหมาะสม ซึ่งเกณฑ์ในการออกแบบค่าอัตราขยายนี้จะนำเสนอในบทถัดไป

ต้นฉบับ หน้าขาดหาย

ต้นฉบับ หน้าขาดหาย

ต้นฉบับ หน้าขาดหาย