



## บทที่ 2

### ทฤษฎีการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์

ในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีเกี่ยวกับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ โดยจะอธิบายถึงลักษณะทางจลน์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ พร้อมทั้งการควบคุมแบบเวกเตอร์ ซึ่งอาศัยการควบคุมแรงดันของอินเวอร์เตอร์ ตามหลักการแยกการควบคุมให้มีอิสระต่อกัน (decoupling control) ของกระแสกระตุ้นที่สร้างฟลักซ์ในโรเตอร์ และกระแสที่ทำให้เกิดแรงบิด

#### ลักษณะทางจลน์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 2.1 จะได้สมการแรงดันที่สเตเตอร์ ดังสมการที่ (2.1)

$$\begin{aligned}u_{sa}(t) &= R_s i_{sa} + \frac{d\psi_{sa}}{dt} \\u_{sb}(t) &= R_s i_{sb} + \frac{d\psi_{sb}}{dt} \\u_{sc}(t) &= R_s i_{sc} + \frac{d\psi_{sc}}{dt}\end{aligned}\tag{2.1}$$

และสมการแรงดันที่โรเตอร์ ดังสมการที่ (2.2)

$$\begin{aligned}0 &= R_r i_{ra} + \frac{d\psi_{ra}}{dt} \\0 &= R_r i_{rb} + \frac{d\psi_{rb}}{dt} \\0 &= R_r i_{rc} + \frac{d\psi_{rc}}{dt}\end{aligned}\tag{2.2}$$

โดยที่  $u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}$  = แรงดันที่ป้อนที่สเตเตอร์เฟส a, b และ c ตามลำดับ

$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  = กระแสสเตเตอร์เฟส a, b และ c ตามลำดับ

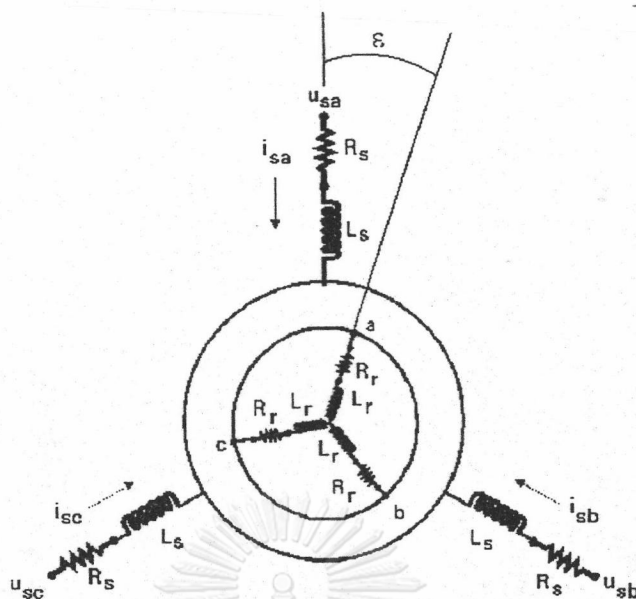
$i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}$  = กระแสโรเตอร์เฟส a, b และ c ตามลำดับ

$\psi_{sa}, \psi_{sb}, \psi_{sc}$  = ฟลักซ์ค้ำของขดลวดสเตเตอร์เฟส a, b และ c ตามลำดับ

$\psi_{ra}, \psi_{rb}, \psi_{rc}$  = ฟลักซ์ค้ำของขดลวดโรเตอร์เฟส a, b และ c ตามลำดับ

$R_s$  = ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์

$R_r$  = ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกรงกระรอก

และ

$$\psi_{sa} = L_s \left( i_{sa} - \frac{1}{2} i_{sb} - \frac{1}{2} i_{sc} \right) + M (i_{ra} \cos(-\varepsilon) + i_{rb} \cos(2\gamma - \varepsilon) + i_{rc} \cos(\gamma - \varepsilon))$$

$$\psi_{sb} = L_s \left( -\frac{1}{2} i_{sa} + i_{sb} - \frac{1}{2} i_{sc} \right) + M (i_{ra} \cos(\gamma - \varepsilon) + i_{rb} \cos(-\varepsilon) + i_{rc} \cos(2\gamma - \varepsilon))$$

$$\psi_{sc} = L_s \left( -\frac{1}{2} i_{sa} - \frac{1}{2} i_{sb} + i_{sc} \right) + M (i_{ra} \cos(2\gamma - \varepsilon) + i_{rb} \cos(\gamma - \varepsilon) + i_{rc} \cos(-\varepsilon))$$

$$\psi_{ra} = L_r \left( i_{ra} - \frac{1}{2} i_{rb} - \frac{1}{2} i_{rc} \right) + M (i_{sa} \cos(\varepsilon) + i_{sb} \cos(2\gamma + \varepsilon) + i_{sc} \cos(\gamma + \varepsilon))$$

$$\psi_{rb} = L_r \left( -\frac{1}{2} i_{ra} + i_{rb} - \frac{1}{2} i_{rc} \right) + M (i_{sa} \cos(\gamma + \varepsilon) + i_{sb} \cos(\varepsilon) + i_{sc} \cos(2\gamma + \varepsilon))$$

$$\psi_{rc} = L_r \left( -\frac{1}{2} i_{ra} - \frac{1}{2} i_{rb} + i_{rc} \right) + M (i_{sa} \cos(2\gamma + \varepsilon) + i_{sb} \cos(\gamma + \varepsilon) + i_{sc} \cos(\varepsilon))$$

$$\gamma = 2\pi/3$$

$L_s$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์

$L_r$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดโรเตอร์

$M$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดด้านสเตเตอร์และโรเตอร์

$\varepsilon(t)$  คือ ตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ซึ่งเป็นมุมระหว่างแกนอ้างอิงสเตเตอร์และแกนอ้างอิง

โรเตอร์

สมการที่ (2.1) และ (2.2) สามารถเขียนได้ใหม่ในรูปของสเปซเวกเตอร์ได้ดังนี้คือ

$$\underline{u}_S = R_S \underline{i}_S + \frac{d\underline{\psi}_S}{dt} \quad (2.3)$$

$$0 = R_r \underline{i}_r + \frac{d\underline{\psi}_r}{dt} \quad (2.4)$$

ซึ่งนิยามของสเปซเวกเตอร์ของแต่ละตัวแปรเป็นดังนี้คือ (W. Leonhard, 1985)

$$\underline{u}_S(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} [u_{sa}(t) + u_{sb}(t)e^{j\gamma} + u_{sc}(t)e^{j2\gamma}] \quad (2.5)$$

$$\underline{i}_S(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} [i_{sa}(t) + i_{sb}(t)e^{j\gamma} + i_{sc}(t)e^{j2\gamma}] \quad (2.6)$$

$$\underline{i}_r(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} [i_{ra}(t) + i_{rb}(t)e^{j\gamma} + i_{rc}(t)e^{j2\gamma}] \quad (2.7)$$

$$\underline{\psi}_S(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} [\psi_{sa}(t) + \psi_{sb}(t)e^{j\gamma} + \psi_{sc}(t)e^{j2\gamma}] = L_S \underline{i}_S + M \underline{i}_r e^{j\epsilon} \quad (2.8)$$

$$\underline{\psi}_r(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} [\psi_{ra}(t) + \psi_{rb}(t)e^{j\gamma} + \psi_{rc}(t)e^{j2\gamma}] = L_r \underline{i}_r + M \underline{i}_S e^{-j\epsilon} \quad (2.9)$$

นอกจากนั้นแรงบิดที่เกิดขึ้นจากปฏิกริยาระหว่างกระแสสเตเตอร์และกระแสโรเตอร์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$m_d = M \text{Im}(\underline{i}_S \underline{i}_r^* e^{-j\epsilon}) \quad (2.10)$$

โดยที่  $m_d$  = แรงบิดขับเคลื่อน

$Z^*$  = ค่าสังยุคเชิงซ้อนของ  $Z$

### 1. แบบจำลองของโรเตอร์ฟลักซ์

เพื่อความง่ายในที่นี้เราจะพิจารณากรณีที่เราสามารถควบคุมกระแสสเตเตอร์  $\underline{i}_S$  ได้ตามต้องการก่อน แล้วจึงค่อยพิจารณาการควบคุมกระแสผ่านแรงดันอีกทีหนึ่ง

ดังนั้นเราจึงพิจารณาเฉพาะแต่สมการทางด้านโรเตอร์ (2.4) ก็เพียงพอ โดยอาศัยสมการที่ (2.9) เราสามารถเขียนสมการที่ (2.4) ได้ใหม่เป็น

$$R_r \underline{i}_r + L_r \frac{d}{dt} \underline{i}_r + M \frac{d}{dt} (\underline{i}_S e^{-j\epsilon}) = 0 \quad (2.11)$$

เนื่องจากการควบคุมแบบเวกเตอร์จะทำการควบคุมโรเตอร์ฟลักซ์ผ่านทางกระแสสเตเตอร์ จึงจัดรูปสมการที่ (2.11) ใหม่ให้อยู่ในรูปของกระแสที่สร้างฟลักซ์ ได้ดังนี้

$$R_r \underline{i}_r + M \frac{d}{dt} \left[ e^{-j\epsilon} \left( \underline{i}_S + \frac{L_r}{M} \underline{i}_r e^{j\epsilon} \right) \right] = 0 \quad (2.12)$$

$$R_r \frac{M}{L_r} (\underline{i}_{mr} - \underline{i}_S) e^{-j\epsilon} + M \frac{d}{dt} (e^{-j\epsilon} \underline{i}_{mr}) = 0 \quad (2.13)$$

โดยที่  $\underline{i}_{mr} = \underline{i}_S + \frac{L_r}{M} \underline{i}_r e^{j\epsilon} = \underline{i}_{mr} e^{j\epsilon}$  (2.14)

$\underline{i}_{mr}$  คือ สเปซเวกเตอร์ของกระแสทำแม่เหล็ก (Magnetizing current space vector)

$\rho$  คือ มุมระหว่างแกนสเตเตอร์กับแกนของโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ สมการที่ (2.13) เป็นสมการแรงดันของโรเตอร์โดยแกนอ้างอิงเป็นแกนโรเตอร์ ซึ่งสามารถทำการย้ายสมการมายังแกนอ้างอิงสเตเตอร์ โดยการคูณสมการ (2.13) ด้วย  $e^{j\varepsilon}$  ได้ดังนี้

$$\frac{di_{mr}}{dt} = \left(-\frac{R_r}{L_r} + j\omega_m\right) \underline{i}_{mr} + \frac{R_r}{L_r} \underline{i}_s \quad (2.15)$$

โดยที่  $\omega_m = \frac{d\varepsilon}{dt}$  : ความถี่เชิงมุมของโรเตอร์

ดังนั้นถ้าเราทราบค่าของกระแสสเตเตอร์จากการวัด เราก็สามารถที่จะคำนวณขนาดและมุมของกระแสกระตุ้นได้ และจากสมการที่ (2.10) และ (2.14) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} m_d &= M \operatorname{Im} \left[ \underline{i}_s \cdot (\underline{i}_{mr} - \underline{i}_s) \frac{M}{L_r} \right] \\ &= \frac{M^2}{L_r} \operatorname{Im} \left[ \underline{i}_s \cdot \underline{i}_{mr} \right] \\ &= \frac{M^2}{L_r} \underline{i}_{mr} \operatorname{Im} \left[ \underline{i}_s e^{-j\rho} \right] \end{aligned} \quad (2.16)$$

เนื่องจากในการควบคุมแบบเวกเตอร์ปริมาณที่เราสนใจเฉพาะแรงบิด และขนาดของโรเตอร์ฟลักซ์ การแสดงความสัมพันธ์ต่างๆ บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์จะทำให้สะดวกในการพิจารณา เราจึงทำการย้ายแกนอ้างอิงมาอยู่บนโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์แทน ดังนั้นสมการที่ (2.15) จะเขียนได้ใหม่เป็น

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (\underline{i}_{mr} e^{j\rho}) &= \left(-\frac{R_r}{L_r} + j\omega_m\right) \underline{i}_{mr} e^{j\rho} + \frac{R_r}{L_r} (\underline{i}_s e^{-j\rho}) e^{j\rho} \\ j\omega_o e^{j\rho} \underline{i}_{mr} + e^{j\rho} \frac{di_{mr}}{dt} &= \left(-\frac{R_r}{L_r} + j\omega_m\right) \underline{i}_{mr} e^{j\rho} + \frac{R_r}{L_r} (\underline{i}_s e^{-j\rho}) e^{j\rho} \end{aligned} \quad (2.17)$$

โดยที่  $\omega_o = \frac{d\rho}{dt}$  : ความถี่เชิงมุมของโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์

และคูณสมการที่ (2.17) ตลอดด้วย  $e^{-j\rho}$  พร้อมทั้งแยกสมการออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนจริง(Re) กับส่วนจินตภาพ(Im) ได้ดังนี้คือ

$$\operatorname{Re}: \frac{di_{mr}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} i_{mr} + \frac{R_r}{L_r} i_s \alpha \quad (2.18)$$

$$\operatorname{Im}: \omega_o i_{mr} = \omega_m i_{mr} + \frac{R_r}{L_r} i_s \beta \quad (2.19)$$

$$\omega_o = \omega_m + \frac{R_r}{L_r} \frac{i_s \beta}{i_{mr}}$$



สมการที่ (2.18) และ (2.19) หรือรูปที่ 2.3 เป็นสมการพื้นฐานสำหรับระบบควบคุมแบบเวกเตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส ซึ่งสามารถควบคุมแรงบิดและขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กได้อย่างอิสระเช่นเดียวกับมอเตอร์กระแสตรง โดยที่

-  $i_{s\alpha}$  ทำหน้าที่ควบคุมขนาดของฟลักซ์ (เปรียบเสมือนแรงดันสนามของมอเตอร์กระแสตรง)

-  $i_{s\beta}$  ทำหน้าที่ควบคุมแรงบิด (เปรียบเสมือนกระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรง)

## 2. แบบจำลองทางด้านสเตเตอร์และการควบคุมแบบแยกอิสระต่อกัน

ในกรณีที่แหล่งจ่ายของระบบเป็นแบบแหล่งจ่ายแรงดัน และไม่สามารถทำการป้อนกลับและควบคุมกระแสได้เร็วเพียงพอ ซึ่งจะเกิดขึ้นกับระบบขนาดใหญ่ที่ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สวิตซ์ได้ช้าเช่น GTO เราจำเป็นต้องพิจารณาสมการแรงดันทางด้านสเตเตอร์ด้วย เพื่อหาวิธีการควบคุมแรงดันให้ได้กระแสตามที่ต้องการ จากสมการที่ (2.1) และ (2.8) จะได้ว่า

$$\underline{u}_s = R_s \underline{i}_s + \frac{d}{dt} (L_s \underline{i}_s + M i_r e^{j\epsilon}) \quad (2.21)$$

เพื่อจัดให้สมการอยู่ในรูปของ  $\underline{i}_s$  และ  $\underline{i}_{mr}$  โดยอาศัยความสัมพันธ์จากสมการที่ (2.14) เราจะจัดรูปสมการที่ (2.21) ใหม่ได้ดังต่อไปนี้

$$\underline{u}_s = R_s \underline{i}_s + \frac{d}{dt} \left( L_s \underline{i}_s + \frac{M^2}{L_r} (\underline{i}_{mr} - \underline{i}_s) \right) \quad (2.22)$$

$$\underline{u}_s = R_s \underline{i}_s + \frac{L_s L_r - M^2}{L_r} \frac{d\underline{i}_s}{dt} + \frac{M^2}{L_r} \frac{d\underline{i}_{mr}}{dt}$$

จากสมการที่ (2.15) และ (2.22) จะได้สมการแรงดันบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ดังต่อไปนี้

$$\underline{u}_s = R_s \underline{i}_s + \sigma L_s \frac{d\underline{i}_s}{dt} + \frac{M^2}{L_r} \left[ \left( -\frac{R_r}{L_r} + j\omega_m \right) \underline{i}_{mr} + \frac{R_r}{L_r} \underline{i}_s \right] \quad (2.23)$$

ในที่นี้  $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$  : สัมประสิทธิ์การรั่วไหลรวม (total leakage coefficient)

ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันกับในกรณีการหาแบบจำลองของโรเตอร์ฟลักซ์ เราจะแสดงความสัมพันธ์ต่างๆ บนแกนอ้างอิงที่อยู่บนโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ซึ่งจะสะดวกในการควบคุม ดังนั้นเราจึงทำการย้ายแกนอ้างอิงไปยังแกนอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์โดยคูณสมการที่ (2.23) ด้วย  $e^{-j\theta}$  และแยกสมการเป็นส่วนจริงกับส่วนจินตภาพโดยกำหนดให้

$$\underline{i}_s e^{-j\theta} = i_{s\alpha} + j i_{s\beta}, \quad \underline{u}_s e^{-j\theta} = u_{s\alpha} + j u_{s\beta} \quad \text{และ} \quad \underline{i}_{mr} e^{-j\theta} = i_{mr}$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{Re: } u_{s\alpha} &= R_s i_{s\alpha} + \sigma L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} - \omega_o \sigma L_s i_{s\beta} - R_r \frac{M^2}{L_r^2} i_{mr} + R_r \frac{M^2}{L_r^2} i_{s\alpha} \\ \text{Im: } u_{s\beta} &= R_s i_{s\beta} + \sigma L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} + \omega_o \sigma L_s i_{s\alpha} + \omega_m \frac{M^2}{L_r} i_{mr} + R_r \frac{M^2}{L_r^2} i_{s\beta} \end{aligned} \quad (2.24)$$

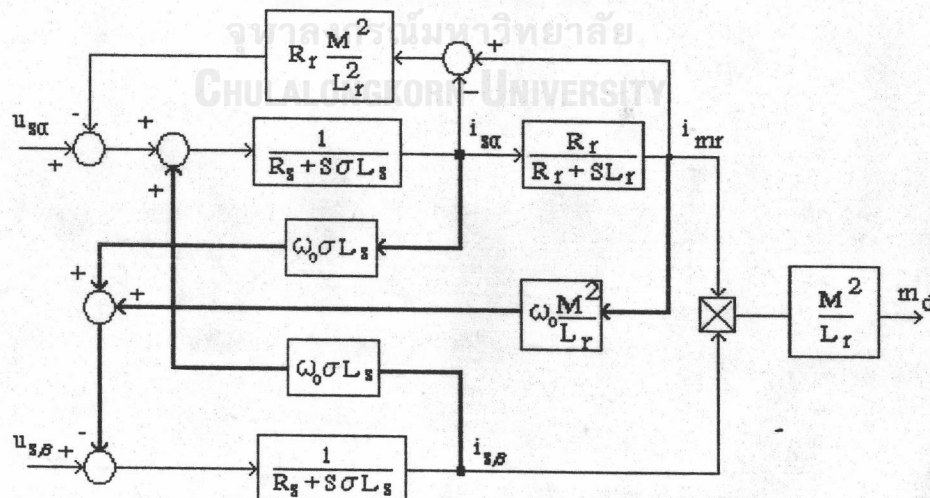
ในที่นี้เราอาศัยความสัมพันธ์ที่ว่า

$$e^{-j\rho} \frac{di_s}{dt} = \frac{d}{dt} (i_s e^{-j\rho}) + j\omega_o i_s e^{-j\rho} \quad \text{และ} \quad \omega_o = \frac{d\rho}{dt}$$

และในส่วนจินตภาพของสมการที่(2.24)จะเขียนได้ใหม่โดยอาศัยความสัมพันธ์  $\omega_{sl} = \frac{R_r}{L_r} \frac{i_{s\beta}}{i_{mr}}$  เป็น

$$\begin{aligned} \text{Im: } u_{s\beta} &= R_s i_{s\beta} + \sigma L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} + \omega_o \sigma L_s i_{s\alpha} + \omega_m \frac{M^2}{L_r} i_{mr} + R_r \frac{M^2}{L_r^2} \omega_{sl} \frac{L_r}{R_r} i_{mr} \\ &= R_s i_{s\beta} + \sigma L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} + \omega_o \left[ \sigma L_s i_{s\alpha} + \frac{M^2}{L_r} i_{mr} \right] \end{aligned} \quad (2.25)$$

จากสมการข้างต้นสามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่ายังมีแรงดันเหนี่ยวนำเชื่อมโยกันระหว่างแกน  $\alpha$  และแกน  $\beta$  ซึ่งทำให้การควบคุมกระแสมีความซับซ้อน ในวิทยานิพนธ์นี้เราจะใช้หลักการแยกการควบคุมให้มีอิสระต่อกัน ( Decoupling control ) (F. Harashia, 1990) ของกระแสกระตุ้นที่สร้างฟลักซ์  $i_{s\alpha}$  และกระแสเสถียรทำให้เกิดแรงบิด  $i_{s\beta}$  โดยการชดเชยแรงดันเหนี่ยวนำในส่วนเชื่อมโยเหล่านี้



รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ป้อนด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน จากสมการที่ (2.24-2.25) และรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่า แรงดันเหนี่ยวนำที่ปรากฏบนแกน  $\alpha$  ซึ่งมีผลมาจากแกน  $\beta$  คือ

$$\hat{u}_\alpha = -\omega_0 \sigma L_s i_s \beta$$

และแรงดันเหนี่ยวนำที่ปรากฏแกน  $\beta$  ซึ่งมีผลมาจากแกน  $\alpha$  คือ

$$\hat{u}_\beta = \omega_0 \left( \sigma L_s i_s \alpha + \frac{M^2}{L_r} i_{mr} \right)$$

ดังนั้นถ้าควบคุมให้  $u_{s\alpha}$  และ  $u_{s\beta}$  เป็นไปตามสมการ

$$u_{s\alpha} = e_{s\alpha} - \omega_0 \sigma L_s i_s \beta \quad (2.26)$$

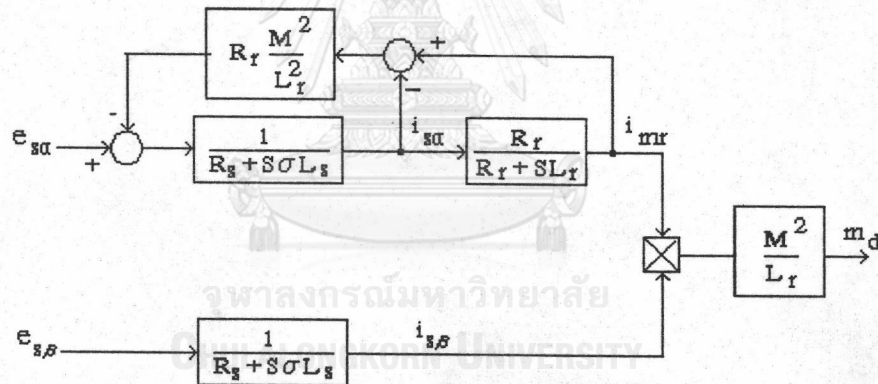
$$u_{s\beta} = e_{s\beta} + \omega_0 \left( \sigma L_s i_s \alpha + \frac{M^2}{L_r} i_{mr} \right) \quad (2.27)$$

และแทนสมการที่ (2.26) และ (2.27) ลงในสมการที่ (2.24) และ (2.25) ตามลำดับจะได้

$$e_{s\alpha} = R_s i_s \alpha + \sigma L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} - R_r \frac{M^2}{L_r^2} i_{mr} + R_r \frac{M^2}{L_r^2} i_{s\alpha} \quad (2.28)$$

$$e_{s\beta} = R_s i_s \beta + \sigma L_s \frac{di_{s\beta}}{dt}$$

จะเห็นได้ว่าผลของส่วนที่เป็นแรงดันเหนี่ยวนำซึ่งกันและกันจะถูกชดเชยไป บล็อกไดอะแกรม หลังการชดเชยแสดงได้ดังในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมหลังจากชดเชยแรงดันเหนี่ยวนำในส่วนที่เชื่อมโยง

โดยในกรณีทั่วไปเราสามารถละเลยการล้าหลังของกระแสกระตุ้นได้และเราจะได้ว่า  $i_{mr} = i_{s\alpha}$  ดังนั้นรูปที่ 2.5 สามารถเขียนได้ง่ายขึ้นดังรูปที่ 2.6 ซึ่งจะได้ว่าการควบคุมกระแส  $i_{s\alpha}$  และ  $i_{s\beta}$  สามารถแยกอิสระต่อกันได้โดยผ่าน  $e_{s\alpha}$  และ  $e_{s\beta}$

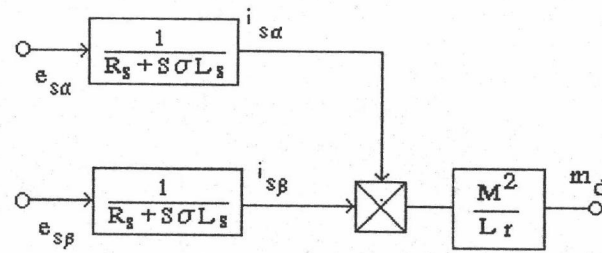
และในกรณีนี้จากสมการที่ (2.26) และ (2.27) แรงดันที่เราควรจ่ายให้มอเตอร์จะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$u_{s\alpha} = e_{s\alpha} - \omega_0 \sigma L_s i_s \beta \quad (2.29)$$

$$u_{s\beta} = e_{s\beta} + \omega_0 L_s i_s \alpha \quad (2.30)$$

และถ้าเรากำหนดให้





รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ป้อนด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน โดยการแยกการควบคุมให้มีอิสระต่อกัน ในกรณีทีละเลขการล้าหลังของกระแสกระตุ้น

$$e_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha}^{ref} \quad (2.31)$$

$$e_{s\beta} = R_s i_{s\beta}^{ref} \quad (2.32)$$

จากสมการที่ (2.28) จะได้ว่า

$$i_{s\alpha} = \frac{1}{\tau_s s + 1} i_{s\alpha}^{ref} \quad (2.33)$$

$$i_{s\beta} = \frac{1}{\tau_s s + 1} i_{s\beta}^{ref} \quad (2.34)$$

โดยที่  $\tau_s = \frac{\sigma L_s}{R_s}$  : ค่าคงที่ทางเวลาทางด้านสเตเตอร์

ในทางปฏิบัติเนื่องจากค่าคงที่ทางเวลา  $\tau_s$  มีค่าน้อยมาก และอาจละเลยได้ เราจึงกำหนดให้แรงดันสเตเตอร์มีค่าดังนี้แทนคือ

$$u_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha}^{ref} - \omega_o \sigma L_s i_{s\beta}^{ref} \quad (2.35)$$

$$u_{s\beta} = R_s i_{s\beta}^{ref} + \omega_o L_s i_{s\alpha}^{ref} \quad (2.36)$$

ในทำนองเดียวกันถ้ากระแสกระตุ้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเวลา สมการทางด้านโรเตอร์ (2.18) และ(2.19) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$i_{mr} = i_{s\alpha}^{ref} \quad (2.37)$$

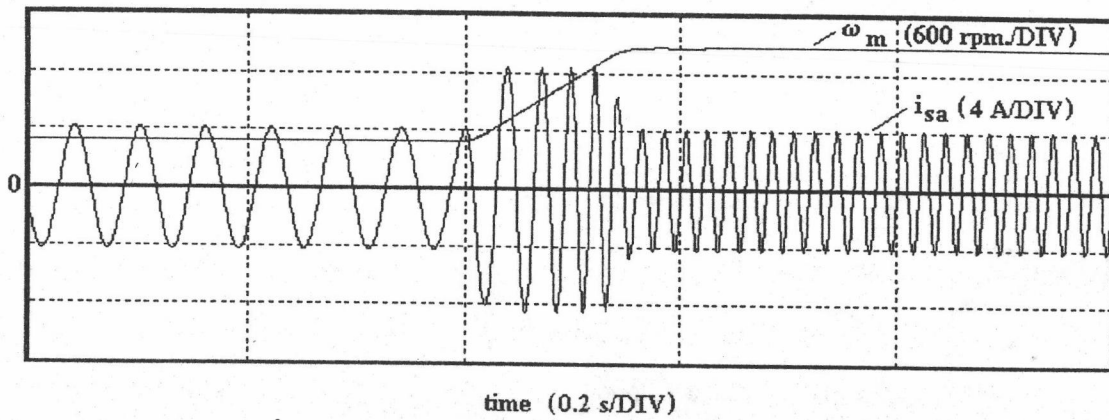
$$\omega_o = \omega_m + \frac{R_r}{L_r i_{mr}} i_{s\beta} \quad (2.38)$$

กล่าวโดยสรุปก็คือ เราจะใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.37) และ (2.38) ในการคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ เพื่อใช้ในการแปลงแกน และจะใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.35) และ(2.36) ในการควบคุมกระแสผ่านแรงดันให้ได้กระแสตามต้องการ

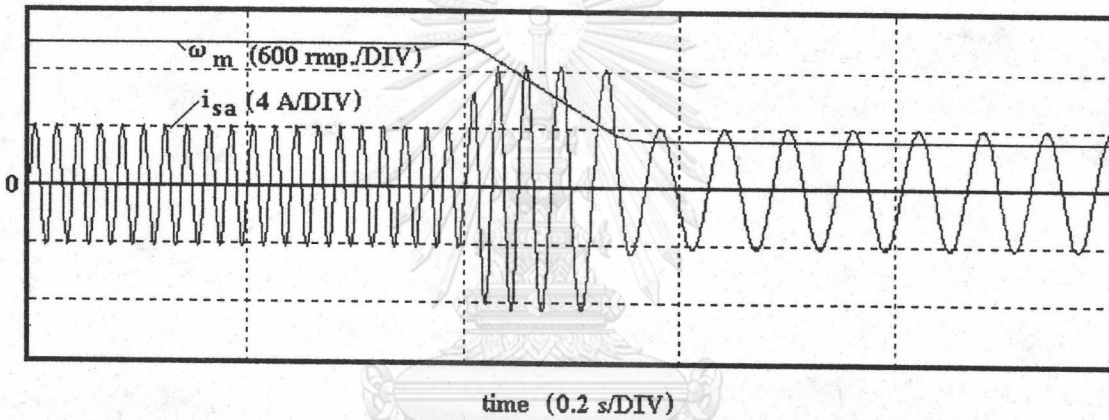
ดังนั้นโครงสร้างของระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งใช้หลักการแยกการควบคุมให้มีอิสระต่อกันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 และผลการจำลองการทำงานด้วย

โปรแกรม MATLAB with SIMULINK โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ตามภาคผนวก แสดงได้ดังรูปที่ 2.8-2.14 ซึ่งผลการจำลองในรูปที่ 2.8-2.10 แสดงให้เห็นถึงผลการตอบสนองของความเร็วต่อคำสั่งแบบขั้นในการเร่ง-ลดความเร็ว และการกลับทิศทางการหมุน อีกทั้งยังแสดงให้เห็นว่าเราสามารถควบคุมแรงบิดให้คงที่ได้ โดยดูจากความเร็วซึ่งขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น ผลการจำลองยังแสดงให้เห็นอีกว่า เราสามารถควบคุมกระแสให้ได้ค่าตามที่เรต้องการผ่านแรงดันได้โดยที่เราจำกัดค่ากระแสไว้ที่ค่าพิกัด โดยไม่ต้องมีการป้อนกลับของกระแสเพื่อมาใช้ในการควบคุม ส่วนผลการจำลองในรูปที่ 2.11-2.12 แสดงให้เห็นถึงเวลาในการคืนสู่ค่าความเร็วปกติของระบบเมื่อมีการเพิ่มหรือลดโหลดแบบขั้นบันได และผลการจำลองในรูปที่ 2.13-2.14 เป็นการแสดงคุณลักษณะของวงรอบการควบคุมความเร็วที่มีตัวควบคุมแบบ PI โดยดูผลการตอบสนองของความเร็วต่อคำสั่งความเร็วแบบขั้นในช่วงแคบ โดยที่ระบบควบคุมที่ออกแบบไว้มีความถี่ตัดข้ามที่ทำให้ได้เวลาที่เข้าสู่ความเร็วคำสั่งประมาณ 20 ms ซึ่งผลการจำลองที่ได้ก็เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ จากผลการจำลองที่ได้นี้จะแสดงให้เห็นว่าระบบมีความเร็วในการตอบสนองต่อคำสั่งและโหลดสูงมาก

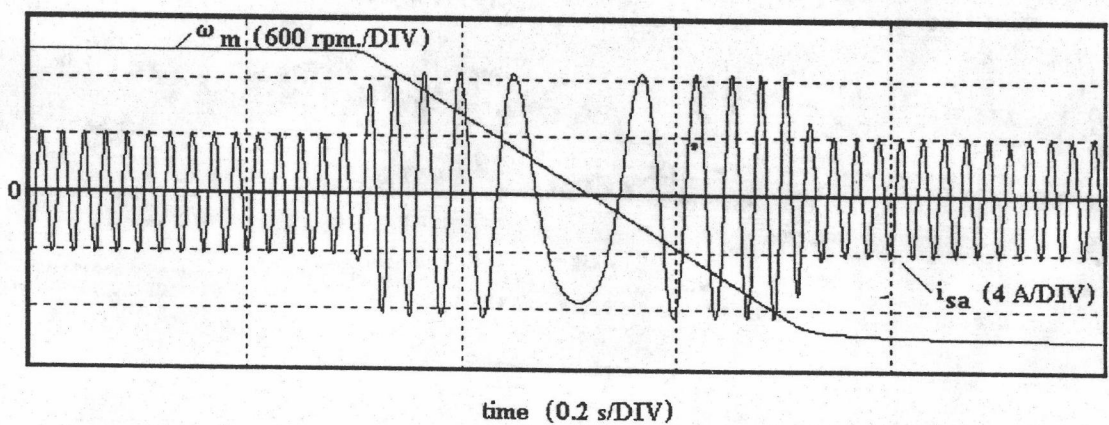




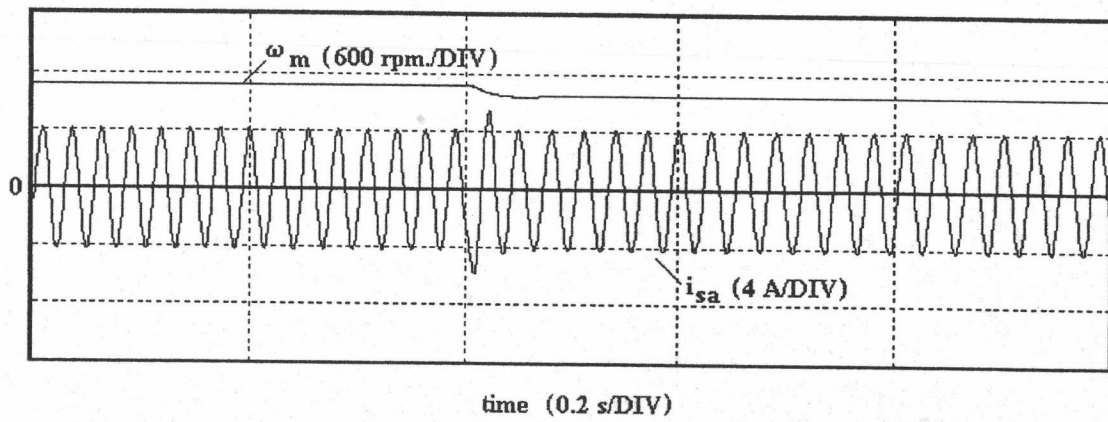
รูปที่ 2.8 ผลการจำลองการเร่งความเร็วจาก 500->1500 rpm



รูปที่ 2.9 ผลการจำลองการลดความเร็วจาก 1500->500 rpm



รูปที่ 2.10 ผลการจำลองการกลับทิศทางการหมุน -1500->1500 rpm



รูปที่ 2.14 ผลการจำลองการลดความเร็วจาก 1100- $\rightarrow$ 1000 rpm

