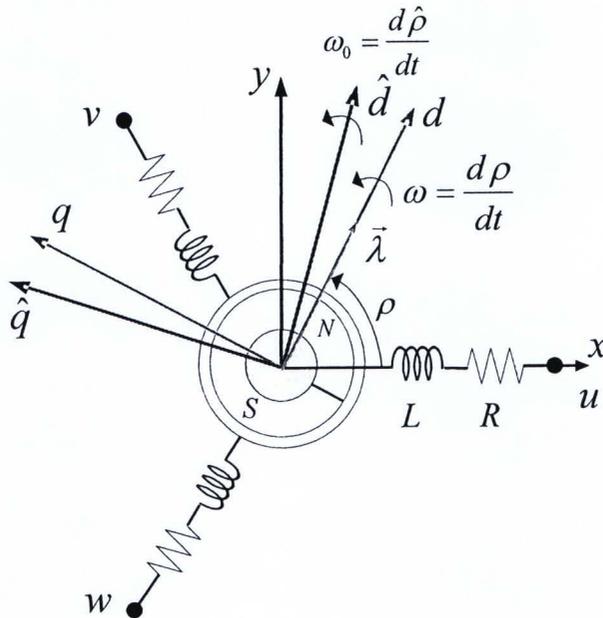


## บทที่ 2

### ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว

ในบทนี้จะกล่าวถึงตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวที่ใช้ในการประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร โดยในลำดับแรกจะกล่าวถึงแบบจำลองทางพลวัตของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร ดังแสดงในลำดับต่อไปนี้เป็นคือ

#### 2.1 แบบจำลองทางพลวัตของ PMSM



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแกนอ้างอิงทั้งสามแกนที่ใช้ในการควบคุมแบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งของ PMSM

รูปที่ 2.1 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแกนอ้างอิงทั้งสามแกนที่ใช้ในการควบคุมแบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งของ PMSM ซึ่งประกอบไปด้วย แกนอ้างอิงสเตเตอร์ (พิกัด  $x, y$ ) แกนอ้างอิงโรเตอร์ (พิกัด  $d, q$ ) และแกนอ้างอิงของฟลักซ์ประมาณ (พิกัด  $\hat{d}, \hat{q}$ ) สำหรับ  $u, v, w$  คือแกนของขดลวดสามเฟส  $u, v, w$  ตามลำดับ ซึ่งโดยทั่วไปแบบจำลองของ PMSM บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์แสดงได้ดังสมการที่ (2.1)

$$\left. \begin{aligned} \bar{u} &= R\bar{i} + L \frac{d\bar{i}}{dt} + \mathbf{J}\omega\lambda e^{J\rho} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \frac{d\rho}{dt} &= \omega \\ T_m &= \frac{p}{2} [\mathbf{J}\bar{\lambda}]^T \bar{i} \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

โดยที่

$\bar{u}$ : สเปซเวกเตอร์ของแรงดันสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์

$\bar{i}$ : สเปซเวกเตอร์ของกระแสสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์

$R$ : ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์

$L$ : ความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์

$\lambda$ : ฟลักซ์แม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร

$T_m$ : แรงบิดของมอเตอร์

$p$ : จำนวนขั้วแม่เหล็ก

$\omega, \rho$ : ความเร็วและตำแหน่งของโรเตอร์คิดเป็นปริมาณทางไฟฟ้า

$\omega_0 = \frac{d\hat{\rho}}{dt}$ : ความเร็วหรือความถี่ของฟลักซ์ประมาณ

" $\hat{\rho}$ ": ค่าประมาณ

กำหนดให้  $[\bar{i} \ \rho]^T$  เป็นตัวแปรสถานะ เราสามารถเขียนสมการที่ (1.1) ในรูปแบบสมการสถานะอันดับ 3 ได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -R/L & 0 \\ 0 & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega\lambda/L & 0 \\ 0 & -\omega\lambda/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\rho \\ \cos\rho \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 1/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} \\ \frac{d\rho}{dt} &= \omega \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

โดยที่ตัวห้อย  $x, y$  แสดงถึงองค์ประกอบในแกนอ้างอิงสเตเตอร์  $x, y$  ตามลำดับ สมการสถานะ (2.2) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ PMSM ที่ใช้ในงานวิจัยทั่วไป แต่เนื่องจากสมการสถานะ (2.2) มีเทอม  $\cos\rho, \sin\rho$  ปะปนอยู่จึงทำให้สมการสถานะมีลักษณะไม่เชิงเส้น ซึ่งเป็นจุดด้อยของแบบจำลองนี้ ถ้านำแบบจำลองนี้มาสร้างตัวสังเกตเพื่อประมาณค่าตัวแปรสถานะจะได้ดังสมการที่ (2.3)

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_x \\ \hat{i}_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -R/L & 0 \\ 0 & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_x \\ \hat{i}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{\omega}\lambda/L & 0 \\ 0 & -\hat{\omega}\lambda/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\hat{\rho} \\ \cos\hat{\rho} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1 & -h_2 \\ h_2 & h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_x - i_x \\ \hat{i}_y - i_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 1/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} \\ \frac{d\hat{\rho}}{dt} &= \hat{\omega} + [h_3 \quad h_4] \begin{bmatrix} \hat{i}_x - i_x \\ \hat{i}_y - i_y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.3)$$

โดยที่  $h_1, h_2, h_3, h_4$  คืออัตราขยายป้อนกลับ (feedback gain) ของตัวสังเกต ตัวสังเกตในสมการที่ (2.3) จะมีเทอม  $\cos\hat{\rho}, \sin\hat{\rho}$  ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นเช่นเดียวกับสมการสถานะ (2.2) ทำให้ไม่สามารถใช้ทฤษฎีของระบบควบคุมแบบเชิงเส้น ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวสังเกต และการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับได้โดยตรง โดยทั่วไปจะต้องประมาณสมการให้เป็นเชิงเส้นรอบจุดทำงานก่อนแล้วจึงค่อยวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการของระบบเชิงเส้น ดังนั้นแม้ผลการวิเคราะห์ระบบประมาณจะบ่งชี้ว่าระบบประมาณค่าความเร็วมีเสถียรภาพรอบ ๆ จุดทำงานแต่ก็ไม่สามารถยืนยันได้ว่าระบบจะมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานในช่วงกว้าง เพื่อแก้ปัญหาความไม่เชิงเส้นดังกล่าวงานวิจัยนี้จะพิจารณาให้พลักซ์จากแม่เหล็กถาวรเป็นตัวแปรเพิ่มเติมแบบจำลอง (2.4) นี้มีการนำเสนอในงานวิจัย [18]

$$\begin{aligned} \bar{u} &= R\bar{i} + L \frac{d\bar{i}}{dt} + J\omega\lambda e^{J\rho} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda e^{J\rho} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} &= J\omega\lambda e^{J\rho} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.4)$$

โดยที่ตัวแปรสถานะคือ  $\begin{bmatrix} \bar{i} & \lambda e^{J\rho} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix}^T$  สมการที่ (2.4) สามารถเขียนในรูปแบบสมการสถานะได้เป็น

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{i} \\ \bar{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} \mathbf{I} & -\mathbf{J} \frac{\omega}{L} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J} \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i} \\ \bar{\lambda} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{I}/L \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \bar{u} \quad (2.5)$$

โดยที่

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

และเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็ก  $\vec{\lambda} = \lambda e^{j\theta} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$  จากการพิจารณาโดยทั่วไปว่าค่าคงตัวทางเวลาทางไฟฟ้า (Electrical time constant) มีค่าน้อยกว่าค่าคงตัวทางเวลาทางกล (Mechanical time constant) มาก ดังนั้นจึงถือได้ว่า  $\omega$  มีค่าคงที่ในการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของตัวสังเกตแบบจำลอง (2.5) ที่ได้จึงจะเป็นเชิงเส้น แบบจำลองนี้สามารถแสดงบนแกนอ้างอิงโรเตอร์ได้ตั้งสมการที่ (2.6)-(2.8) โดยที่ สมการที่ (2.6) คือสมการทางด้านสเตเตอร์ สมการที่ (2.7) คือสมการทางด้านโรเตอร์และสมการที่ (2.8) คือสมการแรงบิดของมอเตอร์ ตามลำดับ

แบบจำลองของ PMSM บนแกนอ้างอิงโรเตอร์:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - \frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\omega i_q \\ \omega i_d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \lambda / L \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = 0 \quad ; \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (2.7)$$

$$T_m = \frac{P}{2} \lambda i_q \quad (2.8)$$

โดยที่ตัวห้อย  $d, q$  แสดงถึงองค์ประกอบในแกนอ้างอิงโรเตอร์  $d, q$  ตามลำดับ

## 2.2 ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว ของ PMSM

จากแบบจำลองเชิงเส้นในสมการที่ (2.5) สามารถสร้างตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ได้ดังแสดงในสมการที่ (2.9)-(2.10)

ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว:

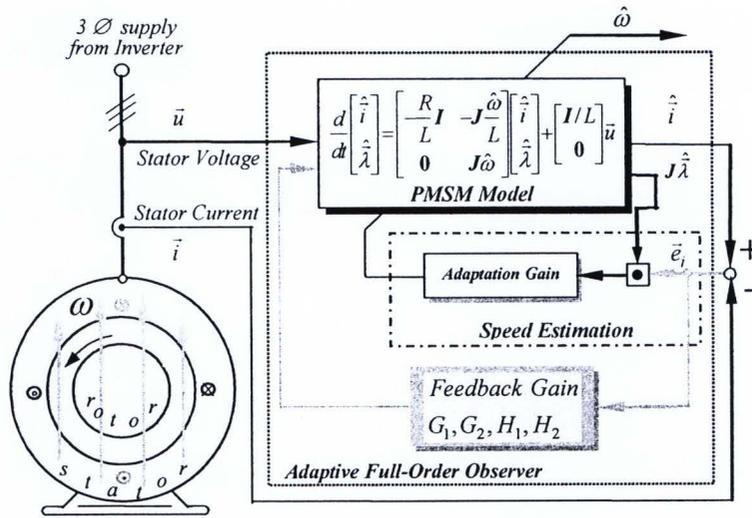
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i} \\ \hat{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} \mathbf{I} & -\mathbf{J} \frac{\hat{\omega}}{L} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J} \hat{\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i} \\ \hat{\lambda} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{I}/L \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \bar{u} + \begin{bmatrix} G_1 \mathbf{I} + G_2 \mathbf{J} \\ H_1 \mathbf{I} + H_2 \mathbf{J} \end{bmatrix} [\hat{i} - \bar{i}] \quad (2.9)$$

สมการการประมาณค่าความเร็ว:

$$\hat{\omega} = (k_p + k_i \int dt) \{ \hat{e}_i^T J \hat{\lambda} \} \quad ; k_p, k_i > 0 \quad (2.10)$$

โดยที่  $G_1, G_2, H_1, H_2$  คือ อัตราขยายป้อนกลับ  $\hat{e}_i = \hat{i} - i$  คือค่าความผิดพลาดของกระแส และ  $k_p, k_i$  คืออัตราขยายการปรับตัวแบบสัดส่วนและแบบอินทิเกรต ตามลำดับ

จากสมการที่ (2.9) - (2.10) สามารถเขียนแผนภาพรวมของตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภาพรวมของตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว

### 2.3 ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวบนแกนหมุนของฟลักซ์ประมาณและการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม (Decoupling control)

เนื่องจากระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ซึ่งใช้ข้อมูลความเร็ว ตำแหน่ง และฟลักซ์แม่เหล็กนั้นสร้างโดยอ้างอิงบนแกนหมุนของฟลักซ์ประมาณ ดังนั้นตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบควบคุมแบบเวกเตอร์จึงต้องแสดงอ้างอิงบนแกนหมุนของฟลักซ์ประมาณด้วย



สมการทางด้านสเตเตอร์:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - \frac{R}{L} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\hat{i}_q \omega_0 \\ \hat{i}_d \omega_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{\omega} \hat{\lambda} / L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 e_d - G_2 e_q \\ G_2 e_d + G_1 e_q \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

สมการทางด้านโรเตอร์:

$$\frac{d\hat{\lambda}}{dt} = H_1 e_d - H_2 e_q \quad (2.12)$$

$$\omega_0 = \frac{d\hat{p}}{dt} = \hat{\omega} + [H_2 e_d + H_1 e_q] / \hat{\lambda} \quad (2.13)$$

สมการการประมาณค่าความเร็วบนแกนหมุนของฟลักซ์ประมาณ:

$$\hat{\omega} = (k_p + k_i \int dt) [e_q \hat{\lambda}] \quad (2.14)$$

ในการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมนั้นแรงดันสเตเตอร์ถูกกำหนดโดย

แรงดันสเตเตอร์ของตัวควบคุมเวกเตอร์ที่มีการชดเชยแรงดันเชื่อมโยงระหว่างแกน:

$$\begin{bmatrix} u_d^* \\ u_q^* \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} + \omega_0 L \begin{bmatrix} -\hat{i}_q \\ \hat{i}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{\omega} \hat{\lambda} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

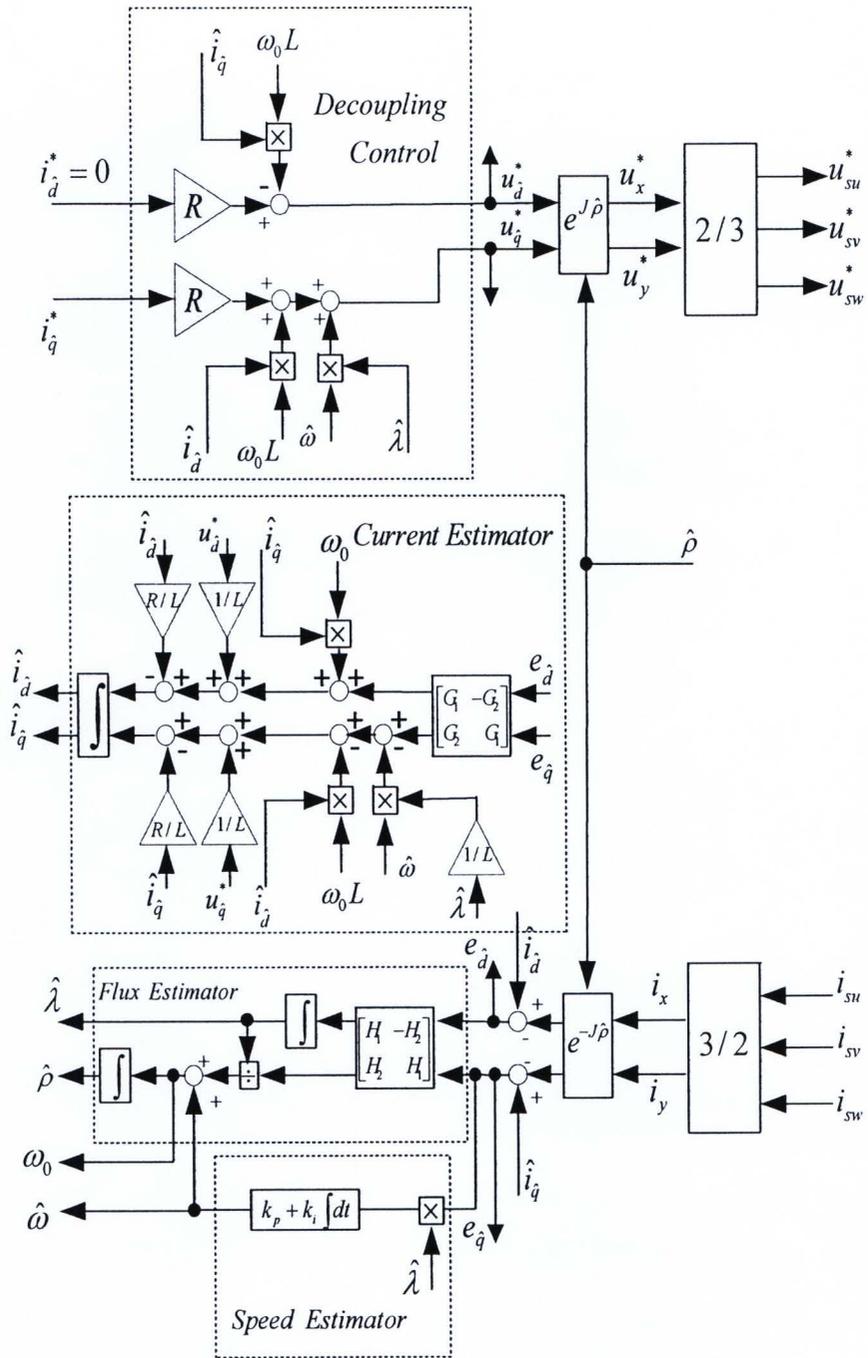
โดยที่ "\*" คือค่าคำสั่ง ตัวห้อย  $\hat{d}, \hat{q}$  แสดงถึงองค์ประกอบในแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณ  $\hat{d}, \hat{q}$  จากสมการที่ (2.11)-(2.15) สามารถเขียนแผนภาพบล็อกการควบคุมแยกการเชื่อมร่วมนั้นกับตัวสังเกตเต็มอันดับได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นการควบคุมแบบแรงบิดต่อกระแสสูงสุด (Maximum torque per ampere ratio) กล่าวคือ  $i_d^* = 0$  และระบบควบคุมความเร็วที่ใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมนั้นมีการประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วด้วยตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวแสดงในรูปที่ 2.4

จากสมการที่ (2.11)-(2.15) นี้เราจะจำลองการทำงานของระบบประมาณกับการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมนั้นเพื่อแสดงให้เห็นถึงปัญหาบางอย่างที่สำคัญที่อาจเกิดขึ้นได้จากการใช้ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว โดยใช้อัตราขยายป้อนกลับดังนี้คือ

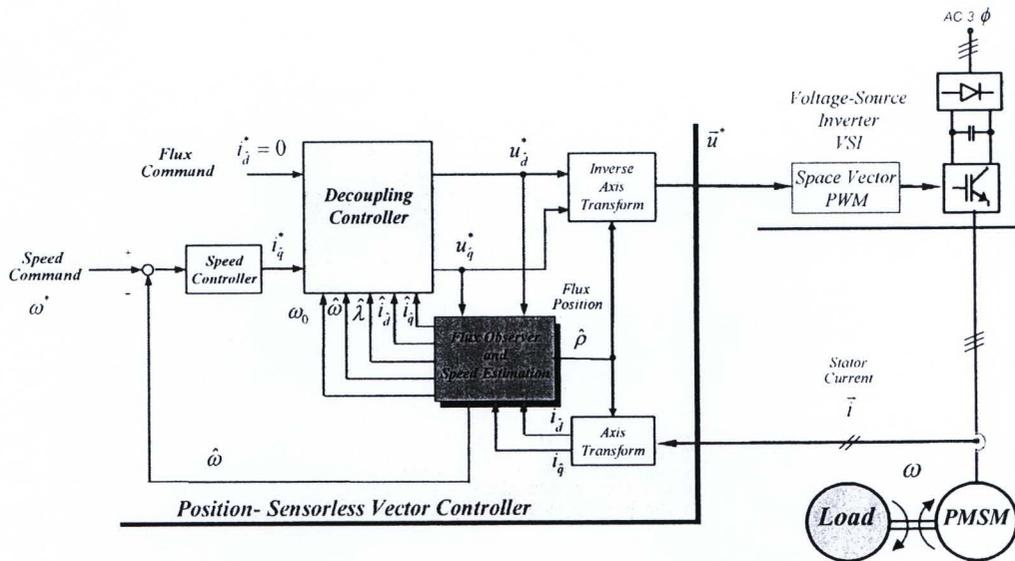
ห้องสมุดบางพลี  
วันที่..... 21 ส.ค. 2555  
เลขทะเบียน..... 248242  
เลขเรียกหนังสือ.....

$$G_1 = 0, G_2 = -60, H_1 = 3, H_2 = 1 \quad (2.16)$$

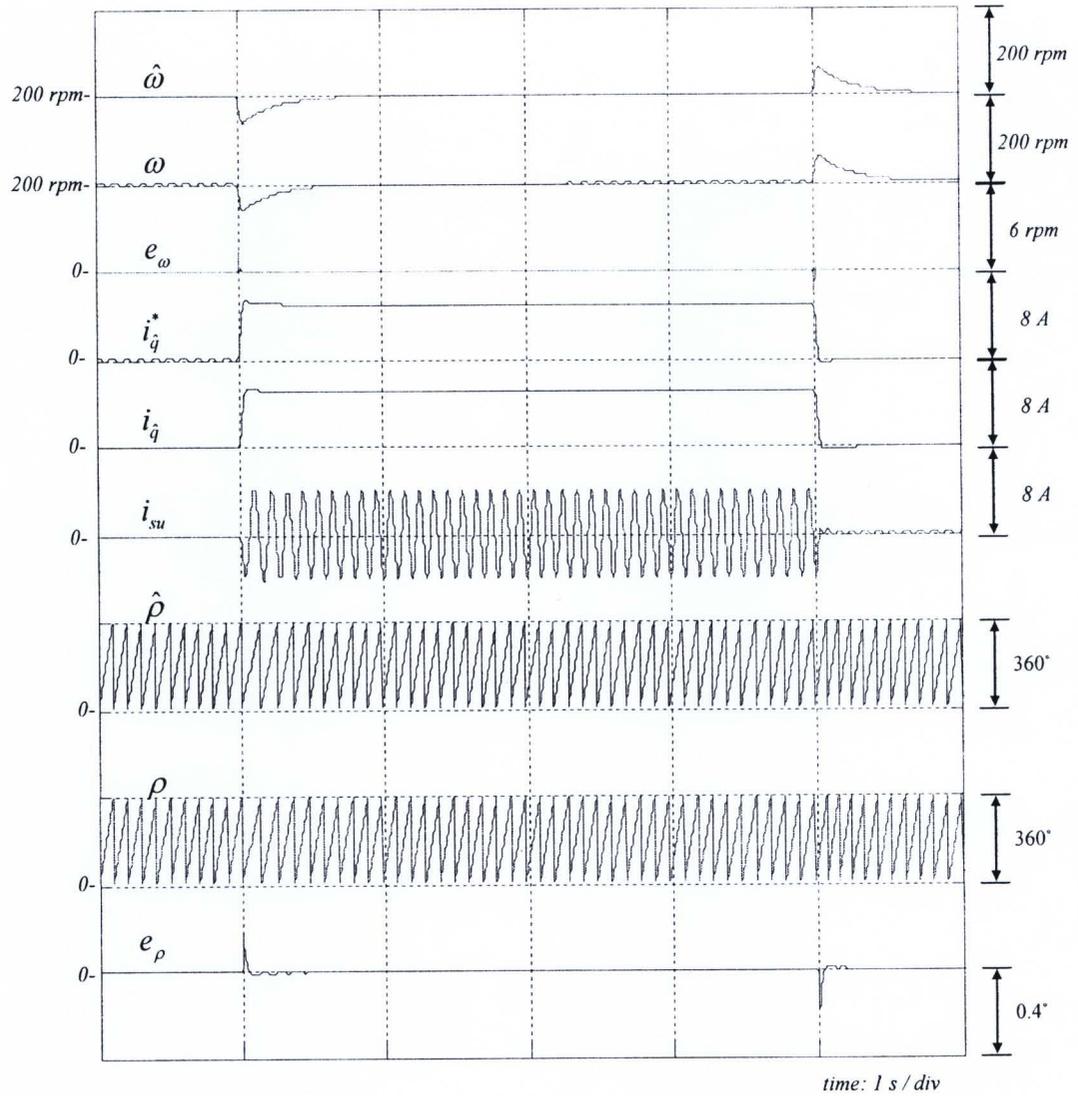
โดยผลการจำลองการทำงานแสดงในรูปที่ 2.5 และ 2.6 ในรูปที่ 2.5 เป็นผลการจำลองการทำงานในสภาวะที่มอเตอร์จ่ายโหลดที่พิกัดที่ความเร็วคำสั่ง 200 rpm ซึ่งจะเห็นว่าระบบประมาณสามารถทำงานได้เป็นอย่างดีโดยมีค่าความผิดพลาดของความเร็ว ( $e_\omega = \hat{\omega} - \omega$ ) เป็นศูนย์ในสภาวะอยู่ตัว ในสภาวะชั่วคราวนั้นมีค่าความผิดพลาดสูงสุดประมาณ 2 rpm ในทำนองเดียวกัน ค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง ( $e_p = \hat{p} - p$ ) ก็มีค่าเป็นศูนย์ในสภาวะอยู่ตัว ส่วนในสภาวะชั่วคราวนั้นมีค่าความผิดพลาดสูงสุดประมาณ 0.15 องศา ซึ่งดูเหมือนว่าการใช้ค่าอัตราขยายป้อนกลับในสมการที่ (2.16) นั้น จะทำให้ตัวสังเกตหรือระบบประมาณสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ แต่ผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่าระบบประมาณจะขาดเสถียรภาพเมื่อมอเตอร์กลับทิศทางหมุน โดยค่าความผิดพลาดของความเร็วและค่าความผิดพลาดของตำแหน่งจะลู่ออกเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ความเร็ว -200 rpm ดังนั้นจากผลการจำลองการทำงานสามารถสรุปได้ว่า การออกแบบอัตราขยายป้อนกลับที่ทำให้ตัวสังเกตหรือระบบประมาณมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานนั้นเป็นสิ่งสำคัญ เพราะถ้าหากไม่พิจารณาตรงนี้แล้วจะไม่สามารถล่วงรู้ได้ว่าระบบจะขาดเสถียรภาพในย่านการทำงานไหน ดังนั้นบทที่ 3 จึงจะกล่าวถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวสังเกตและจะนำเสนอการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับที่ทำให้ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน



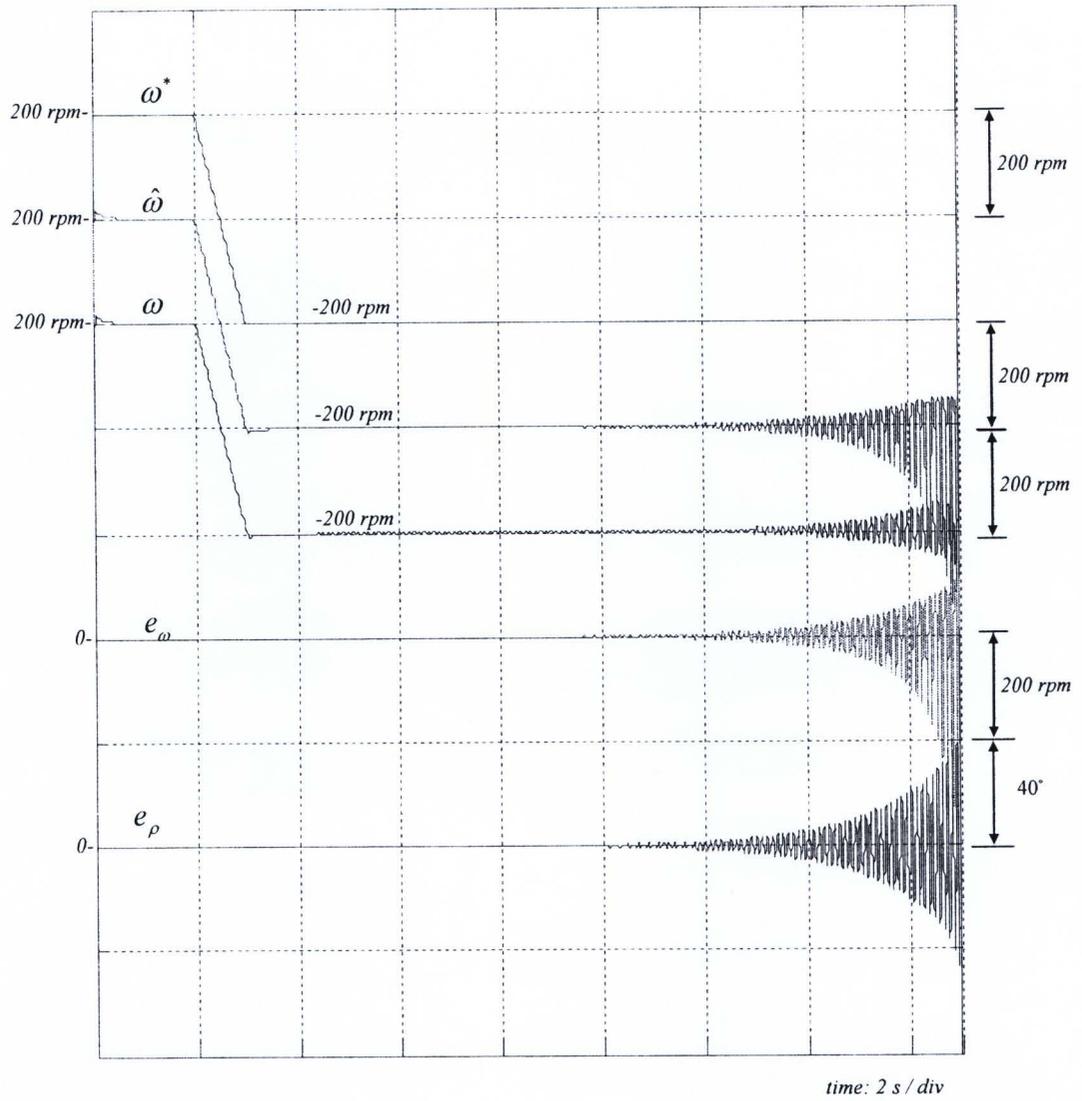
รูปที่ 2.3 แผนภาพบล็อกโดยรวมของตัวสังเกตแบบปรับตัวกับระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม



รูปที่ 2.4 ระบบควบคุมความเร็วที่ใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมที่มีการประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วด้วยตัวสังเกตเติมอันดับแบบปรับตัว



รูปที่ 2.5 ผลการจำลองการทำงานที่ความเร็วคำสั่ง 200 rpm ขณะขับโหลดพิกัดเมื่อใช้ อัตราขยายป้อนกลับ  $G_1 = 0$ ,  $G_2 = -60$ ,  $H_1 = 3$ ,  $H_2 = 1$



รูปที่ 2.6 ผลการจำลองการทำงานขณะกลับทิศทางหมุนจาก  $200 \rightarrow -200 \text{ rpm}$   
 เมื่อใช้อัตราขยายป้อนกลับ  $G_1 = 0, G_2 = -60, H_1 = 3, H_2 = 1$

