

บทที่ 5

ทฤษฎีการควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายในแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงการสร้างตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวจากแบบจำลองเชิงเส้นที่นำเสนอในบทที่ 2 เพื่อใช้ในการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กและตำแหน่งของโรเตอร์ รวมทั้งความเร็วโรเตอร์ ซึ่งทำให้เราสามารถสร้างระบบควบคุมเวกเตอร์ได้โดยไม่ต้องใช้ตัวตรวจจับความเร็วหรือตำแหน่งใดๆ ทั้งสิ้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว

จากตัวสังเกตเต็มอันดับที่นำเสนอในบทที่ 4 (สมการ (4.1)) เมื่อเราใช้ค่าความเร็วประมาณ ($\hat{\omega}$) แทนค่าจริง (ω) จะได้ว่าตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวดังแสดงในสมการ (5.1)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i} \\ \hat{\Psi}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_q} I & -J \frac{\hat{\omega}}{L_q} \\ 0 & J \hat{\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i} \\ \hat{\Psi}' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{1}{L_q} \bar{u} + \begin{bmatrix} \frac{-(L_d - L_q)}{L_q} \frac{d\hat{i}}{dt} \begin{bmatrix} \cos \hat{\rho} \\ \sin \hat{\rho} \end{bmatrix} \\ (L_d - L_q) \frac{d\hat{i}}{dt} \begin{bmatrix} \cos \hat{\rho} \\ \sin \hat{\rho} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

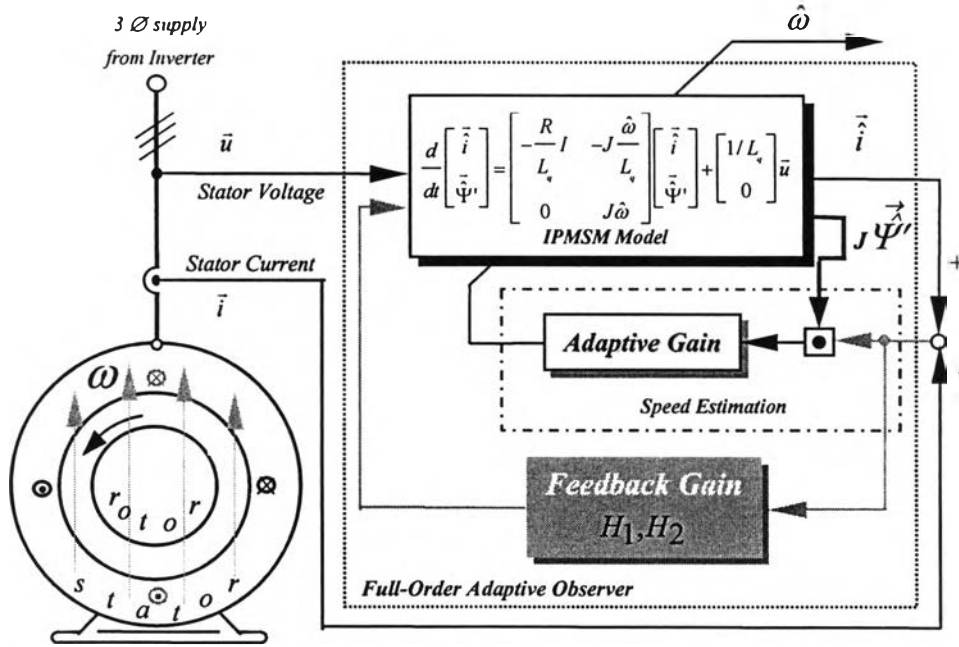
$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ H_1 * I + H_2 * J \end{bmatrix} [\hat{i} - \bar{i}]$$

สมการประมาณค่าความเร็ว:

$$\hat{\omega} = (K_p + K_i \int dt) \{ \bar{e}_i^T J \hat{\Psi}' \}; \quad K_p, K_i > 0 \quad (5.2)$$

จากสมการ (5.1) จะเห็นได้ว่าตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวประกอบด้วยแบบจำลองของมอเตอร์และสัญญาณป้อนกลับของค่าผิดพลาดของกระแสเดเตอร์ผ่านอัตราขยาย H_1 และ H_2 ค่าความเร็วที่ใช้ในตัวสังเกตเต็มอันดับเป็นค่าที่ได้จากการประมาณ ($\hat{\omega}$) ซึ่งถ้าความเร็วมอเตอร์ไม่ถูกต้องกล่าวคือ $\hat{\omega} \neq \omega$ ผลที่ได้ก็คือจะเกิดค่าผิดพลาดของทั้งกระแสเดเตอร์ (\bar{e}_i) และฟลักซ์แม่เหล็ก (\bar{e}_ψ) แต่เนื่องจากสัญญาณที่เราสามารถวัดหรือคำนวณได้คือค่าผิดพลาดของกระแสเดเตอร์ ด้วยเหตุนี้เราจึงใช้ค่าผิดพลาดของกระแสเดเตอร์เป็นหลักในการประมาณค่า

ความเร็วมอเตอร์ เราสามารถแสดงภาพรวมของบล็อกไดอะแกรมของตัวสังเกตแบบปรับตัวได้ดังรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าตัวสังเกตแบบปรับตัวที่พัฒนาขึ้นนี้จะมียังประกอบ 3 ส่วน ได้แก่ แบบจำลองมอเตอร์ซึ่งโครนีสแม่เหล็กถาวร ส่วนประมาณค่าความเร็ว และส่วนป้อนกลับค่าความผิดพลาดผ่านอัตราขยายป้อนกลับ H_1 และ H_2



รูปที่ 5.1 แผนภาพรวมของตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว

5.2 การบูรณาการตัวสังเกตแบบปรับตัวกับการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม

ในหัวข้อนี้เราจะแสดงผลการบูรณาการตัวสังเกตแบบปรับตัวกับการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม ซึ่งเหมือนกับบทที่ 4 หัวข้อ 4.3 เพียงแต่เราแทนเทอม ω ด้วย $\hat{\omega}$ ใน สมการ (4.10)-(4.17) เราก็จะได้สมการ (5.3)-(5.10) ดังนี้

สมการทางด้านสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณ:

$$\begin{bmatrix} L_d \frac{d\hat{d}}{dt} \\ L_q \frac{d\hat{q}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} \hat{d} \\ \hat{q} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_q \hat{q} \frac{d\hat{p}}{dt} \\ L_d \hat{d} \frac{d\hat{p}}{dt} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{\omega} \hat{\Psi}' \end{bmatrix} \tag{5.3}$$

สมการทางด้านโรเตอร์บนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณ:

$$\frac{d\hat{\Psi}}{dt} = H1(\hat{i}_d^* - i_d) - H2(\hat{i}_q^* - i_q) \quad (5.4)$$

$$\frac{d\hat{\rho}}{dt} = \hat{\omega} + \frac{1}{\hat{\Psi}} [H2(\hat{i}_d^* - i_d) + H1(\hat{i}_q^* - i_q)] \quad (5.5)$$

แรงดันสเตเตอร์ของตัวควบคุมเวกเตอร์ที่มีการชดเชยแรงดันเชื่อมโยระหว่างแกน:

$$\begin{bmatrix} u_d^* \\ u_q^* \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} \hat{i}_d^* \\ \hat{i}_q^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_q \hat{i}_q \frac{d\hat{\rho}}{dt} \\ L_d \hat{i}_d \frac{d\hat{\rho}}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{\omega} \hat{\Psi}' \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

สมการทางด้านสเตเตอร์หลังการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม:

$$\begin{bmatrix} L_d \frac{d\hat{i}_d}{dt} \\ L_q \frac{d\hat{i}_q}{dt} \end{bmatrix} = -R \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

หรือ

$$\hat{i}_d = 0 \quad (5.8)$$

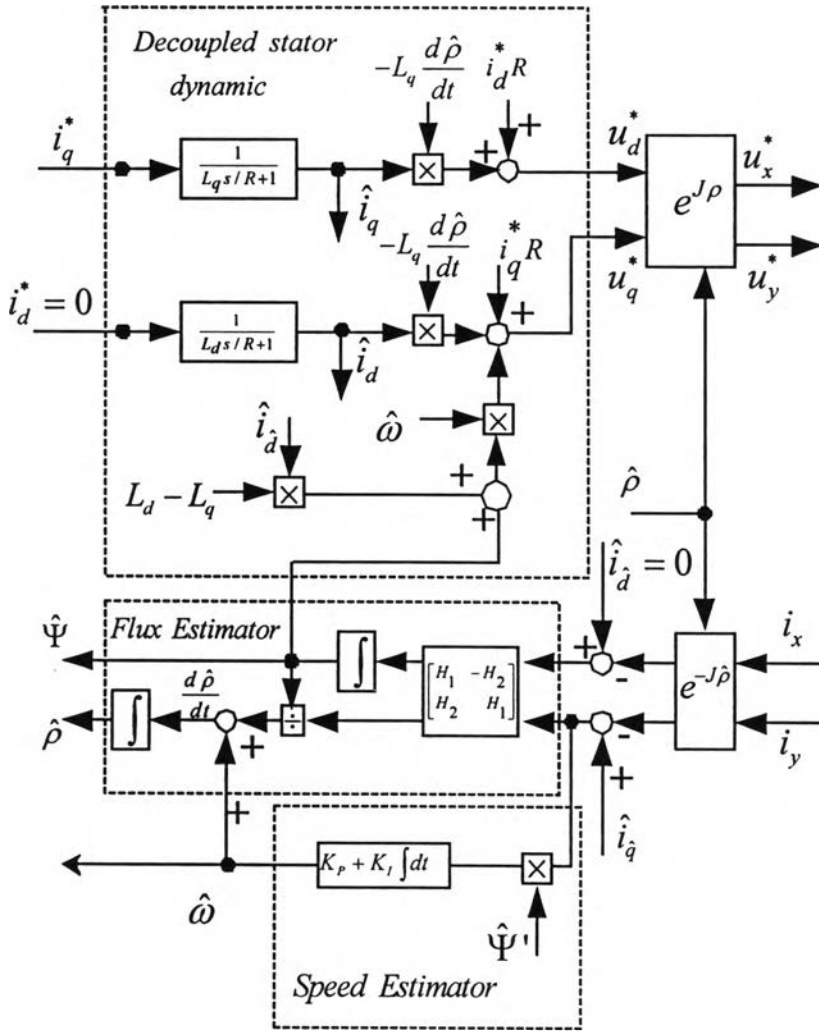
$$\hat{i}_q = \frac{1}{L_q s / R + 1} i_q^* \quad (5.9)$$

สมการประมาณค่าความเร็ว:

$$\hat{\omega} = (K_p + K_I \int dt) \{e_q \cdot \hat{\Psi}'\} ; K_p, K_I > 0 \quad (5.10)$$

จากรายละเอียดข้างต้น เราสามารถบูรณาการการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วมกับตัวสังเกตเพิ่มอันดับแบบปรับตัวได้โดยอาศัยสมการแรงดันสเตเตอร์ในตัวควบคุมเวกเตอร์ที่มีการชดเชยแรงดันที่เชื่อมโยระหว่างแกนเป็นสมการ (5.6), สมการทางด้านโรเตอร์ของตัวสังเกตเพิ่มอันดับแบบปรับตัวเป็นสมการ (5.4)-(5.5), สมการทางด้านสเตเตอร์ของตัวสังเกตเพิ่มอันดับแบบ

ปรับตัวหลังการควบคุมแยกการเชื่อมร่วมเป็นสมการ (5.8)-(5.9) และสมการประมาณค่าความเร็วเป็นสมการ (5.10) แผนภาพโดยรวมของระบบเมื่อทำการบูรณาการ การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมกับตัวสังเกตเพิ่มอันดับแบบปรับตัว แสดงได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 บล็อกไดอะแกรมโดยรวมหลังบูรณาการตัวสังเกตแบบปรับตัวเข้ากับระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม

5.3 เสถียรภาพและการออกแบบระบบประมาณค่าความเร็ว

เนื่องจากการประมาณค่าความเร็วด้วยตัวสังเกตแบบปรับตัวเป็นระบบวงรอบปิด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่เราจะต้องศึกษาและวิเคราะห์ถึงเสถียรภาพของระบบประมาณ โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณนี้ เราจะใช้วิธีเชิงพารามิเตอร์ [5] ซึ่งจะแปลงระบบประมาณไปแสดงบนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณและใช้ Routh-Hurwitz Criterion ในการหาเงื่อนไขทางด้านเสถียรภาพในรูปของสมการชัดเจน นอกจากนี้เรายังศึกษาถึงเกณฑ์ในการออกแบบอัตราขยายการปรับตัวโดยพิจารณาจากสมรรถนะในการติดตามความเร็วจริง (Tracking performance) ที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเร่งและลดความเร็ว ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.3.1 สมการค่าผิดพลาดในการประมาณ

ในเบื้องต้นนี้เราจะแสดงความสัมพันธ์ของค่าผิดพลาดของสัญญาณต่างๆ และบล็อกไดอะแกรมของค่าผิดพลาดในการประมาณค่าความเร็ว ซึ่งจะใช้เป็นบล็อกไดอะแกรมพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพในหัวข้อถัดไป

จากสมมุติฐาน $\frac{di}{dt} \approx 0$, $\frac{d\hat{i}}{dt} \approx 0$ และ ω เป็นค่าคงที่ เราสามารถเขียนสมการค่าผิดพลาดในการประมาณค่าได้ดังนี้

$$\frac{d\bar{e}}{dt} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{i} - \hat{i} \\ \bar{\Psi}' - \hat{\Psi}' \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_q} I & -J \frac{\omega}{L_q} \\ H_1 * I + H_2 * J & J\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i} - \hat{i} \\ \bar{\Psi}' - \hat{\Psi}' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 \\ L_q \\ I \end{bmatrix} J\bar{\Psi}'(\hat{\omega} - \omega) \quad (5.11)$$

และเมื่อพิจารณาเฉพาะส่วนค่าผิดพลาดของกระแสเดเตอร์ ซึ่งเป็นค่าที่เราสามารถคำนวณได้ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดของกระแสกับค่าผิดพลาดของความเร็วประมาณเป็นดังสมการ (5.12)

ค่าผิดพลาดของกระแสเดเตอร์:

$$\begin{aligned} \bar{e}_i &= \bar{i} - \hat{i} \\ &= \frac{s}{L_q} \left[s^2 I + s \left(\frac{R}{L_q} I - J\omega \right) - \frac{\omega}{L_q} H_2 * I + J \frac{\omega}{L_q} (H_1 - R) \right]^{-1} J\bar{\Psi}'(\omega - \hat{\omega}) \\ &= G(s) * J\bar{\Psi}'(\omega - \hat{\omega}) \end{aligned} \quad (5.12)$$

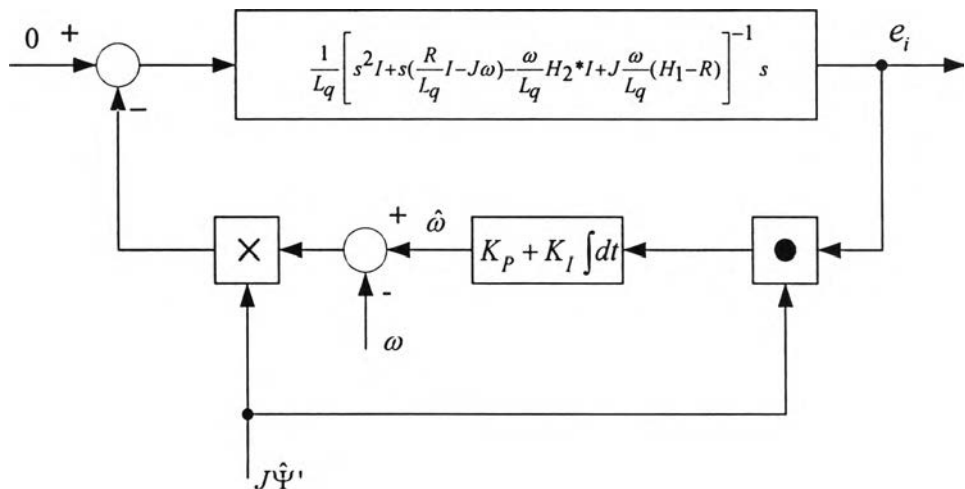
โดยที่

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} = \frac{s}{L_q} \left[s^2 I + (xI + yJ)s + mI + nJ \right]^{-1} \quad (5.13)$$

และ

$$\begin{aligned} x &= R / L_q \\ y &= -\omega \\ m &= -\omega H_2 / L_q \\ n &= \omega(H_1 - R) / L_q \end{aligned} \quad (5.14)$$

จากสมการ (5.12) จะเห็นได้ว่าค่าผิดพลาดของความเร็วจะสะท้อนไปยังค่าผิดพลาดของกระแสเตเตอร์ผ่านฟังก์ชันโอนย้าย $G(s)$ และค่าผิดพลาดของกระแสเตเตอร์ถูกนำไปใช้ในการประมาณค่าความเร็วตามสมการ (5.2) ดังนั้นเราสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบวงรอบปิดที่ประกอบด้วยฟังก์ชันโอนย้ายของค่าผิดพลาดกระแสพร้อมกันกับตัวควบคุม PI ในส่วนประมาณค่าความเร็วของตัวสังเกตแบบปรับตัวได้ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งจะเป็นบล็อกไดอะแกรมพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพต่อไป



รูปที่ 5.3 บล็อกไดอะแกรมของค่าผิดพลาดในระบบประมาณค่าความเร็วบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์

5.3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพบนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณด้วยวิธีเชิงพารามิเตอร์

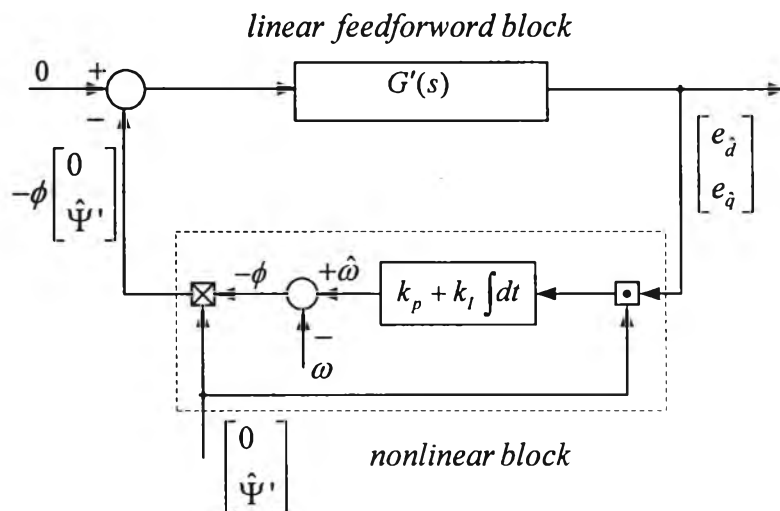
ในเบื้องต้นเราจะทำการแปลงระบบวงรอบปิดของค่าผิดพลาดในระบบประมาณค่าความเร็ว

ในรูปที่ 5.3 ซึ่งแสดงอยู่บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ไปแสดงบนแกนอ้างอิงหมุนของฟลักซ์ประมาณดัง

แสดงในรูปที่ 5.4 โดย $\begin{bmatrix} e_{i\hat{d}} \\ e_{i\hat{q}} \end{bmatrix}$ และ $G'(s)$ ในรูปที่ 5.4 และในสมการ (5.15) หมายถึงค่าผิดพลาด

ของกระแสสเตเตอร์และฟังก์ชันโอนย้าย $G(s)$ ที่แสดงบนแกนอ้างอิงของ ฟลักซ์ประมาณตามลำดับ สำหรับการคำนวณหา $G'(s)$ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข

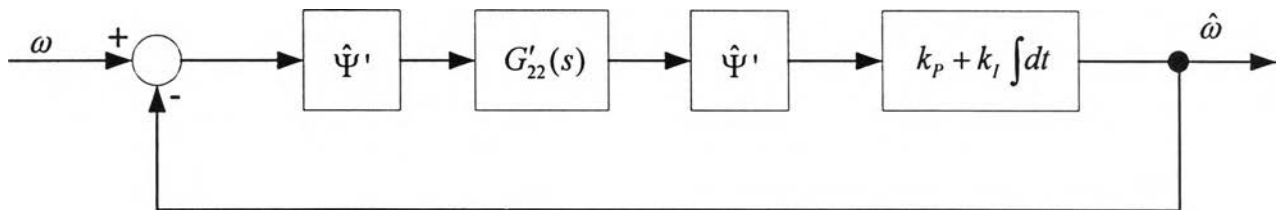
$$\begin{bmatrix} e_{i\hat{d}} \\ e_{i\hat{q}} \end{bmatrix} = G'(s) \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{\Psi}' \end{bmatrix} (\omega - \hat{\omega}); \quad G'(s) = \begin{bmatrix} G'_{11}(s) & G'_{12}(s) \\ G'_{21}(s) & G'_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (5.15)$$



รูปที่ 5.4 บล็อกไดอะแกรมของค่าผิดพลาดในระบบประมาณค่าความเร็วบนแกนหมุนของฟลักซ์ประมาณ

เนื่องจากเวกเตอร์ฟลักซ์ประมาณ $\hat{\Psi}'$ จะชี้ในแนวแกน \hat{d} รีเกรสเซอร์เวกเตอร์ $J\hat{\Psi}'$ ที่แสดงบนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณจึงมีเฉพาะองค์ประกอบในแกน \hat{q} เท่านั้น เวกเตอร์สัญญาณขาเข้าของฟังก์ชันโอนย้ายเชิงเส้นป้อนไปหน้า $G'(s)$ ซึ่งมีค่าเป็น $J\hat{\Psi}'(\omega - \hat{\omega})$ ก็จะมีองค์ประกอบเฉพาะในแกน \hat{q} เช่นเดียวกันและฟังก์ชันโอนย้ายที่ตอบสนองกับสัญญาณขาเข้านี้คือ $G'_{12}(s)$ และ

$G'_{22}(s)$ ซึ่งทำให้เกิดค่าผิดพลาดของกระแสเดเตอร์ในแกน \hat{d} และ แกน \hat{q} ตามลำดับ นอกจากนี้ เนื่องจากผลคูณสเกลาร์ที่ใช้ในการประมาณค่าความเร็วมอเตอร์ตามสมการ (5.10) มีค่าเท่ากับ $e_{\hat{q}} \cdot \hat{\Psi}'$ ซึ่งคำนวณมาจากค่าผิดพลาดของกระแสในแกน \hat{q} เท่านั้น ดังนั้นสัญญาณขาเข้าของส่วนไม่เชิงเส้นป้อนกลับจึงมีเพียงแค่อสัญญาณในแกน \hat{q} จากที่กล่าวมาทั้งหมดทำให้เราสามารถสรุปได้ว่าวงรอบป้อนกลับของค่าผิดพลาดในการประมาณค่าความเร็วเกิดจากสัญญาณเฉพาะในแกน \hat{q} นั้นหมายความว่าฟังก์ชันโอนย้าย $G'_{22}(s)$ เท่านั้นที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบวงรอบปิด ดังนั้นเราสามารถลดรูปและจัดระบบวงรอบปิดของค่าผิดพลาดได้ใหม่ดังแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 วงรอบปิดของระบบประมาณค่าความเร็วแบบสัญญาณเข้าออกเดี่ยว (SISO) บนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณ

ฟังก์ชันโอนย้าย $G'_{22}(s)$ สามารถคำนวณจากสมการ (5.13) ได้เป็น (ดูภาคผนวก ข)

$$G'_{22}(s) \cong \frac{1}{L_q} \left[\frac{s^3 + xs^2 + \left(\left(\frac{d\hat{\rho}}{dt} \right)^2 + m \right) s + \left(\frac{d\hat{\rho}}{dt} \right)^2 x + \frac{d\hat{\rho}}{dt} n}{\left(s^2 + xs - \left(\frac{d\hat{\rho}}{dt} \right)^2 - \frac{d\hat{\rho}}{dt} y + m \right)^2 + \left(\left(2 \frac{d\hat{\rho}}{dt} + y \right) s + \frac{d\hat{\rho}}{dt} x + n \right)^2} \right] \quad (5.16)$$

เสถียรภาพและเงื่อนไขศูนย์ที่มีเสถียรภาพ

ระบบประมาณในรูปที่ 5.5 มีลักษณะที่ง่ายต่อการวิเคราะห์ทั้งนี้เนื่องจากเป็นระบบแบบสัญญาณเข้า-ออกเดี่ยว (single-input-single-output; SISO) โดยมีสัญญาณขาเข้าเป็นความเร็วจริงและสัญญาณขาออกคือค่าความเร็วประมาณ ในการวิเคราะห์เสถียรภาพเราจะพิจารณาค่าแห่งของขั้วและศูนย์ของฟังก์ชันโอนย้าย $G'_{22}(s)$ โดยเราสามารถหาเงื่อนไขสำหรับความมีเสถียรภาพของ

ขั้วของตัวสังเกต โดยการประยุกต์ใช้ Routh-like scheme [4] กับฟังก์ชัน โอนย้าย $G(s)$ และได้เงื่อนไขดังแสดงในสมการ (5.17) (ดูภาคผนวก ค)

เงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอสำหรับขั้วของตัวสังเกตที่มีเสถียรภาพ:

$$mx + ny - \frac{n^2}{x} > 0 \quad (5.17)$$

เมื่อเราแทนค่า m, n, x และ y ในสมการ (5.14) ลงในสมการ (5.17) แล้วจัดรูป จะได้

$$\omega \left[\omega \left((H_1 - R)^2 / R + (H_1 - R) \right) + H_2 * R / L_q \right] < 0 \quad (5.18)$$

ซึ่งสมการ (5.18) ก็คือสมการ (4.3) นั่นเอง ดังนั้นขั้วของฟังก์ชัน โอนย้าย $G'_{22}(s)$ จึงมีตำแหน่งอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบเชิงซ้อนเสมอ ถ้าเราเลือกอัตราขยายป้อนกลับ (H_1, H_2) ตามสมการ (4.4)

สำหรับตำแหน่งของศูนย์ของ $G'_{22}(s)$ นั้น เนื่องจากว่าโดยปกติเรานิยมใช้อัตราขยายการปรับตัวที่มีค่าสูง เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดีของการประมาณค่าความเร็วโรเตอร์ ดังนั้นตำแหน่งของศูนย์ทั้งหมดของฟังก์ชัน โอนย้าย $G'_{22}(s)$ จะต้องอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบเชิงซ้อนเพื่อไม่ให้ระบบขาดเสถียรภาพจากการที่ขั้ววิ่งเข้าหาศูนย์ โดยการประยุกต์ใช้ Routh-Hurwitz Criterion เราได้เงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอที่รากทั้งหมดของพหุนามตัวตั้ง (Numerator) ของ $G'_{22}(s)$ จะอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบเชิงซ้อน (ศูนย์ที่มีเสถียรภาพ (stable zeros)) ดังนี้

เงื่อนไขศูนย์ที่มีเสถียรภาพ:

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\rho}}{dt} * \left(\frac{d\hat{\rho}}{dt} + \omega(H_1 - R) / R \right) &> 0 \\ \frac{d\hat{\rho}}{dt} * \omega(H_1 - R) + \omega H_2 R / L_q &< 0 \end{aligned} \quad (5.19)$$

เราจึงสามารถสรุปได้ว่า ถ้าต้องการให้ระบบประมาณค่าความเร็วด้วยตัวสังเกตแบบปรับตัวมีเสถียรภาพ เราจะต้องออกแบบอัตราขยายป้อนกลับที่ทำให้เงื่อนไขขั้วที่เสถียร (สมการ (5.18)) และเงื่อนไขศูนย์ที่เสถียร (สมการ (5.19)) เป็นจริง

5.3.3 การออกแบบอัตราขยายป้อนกลับ(H_2)

จากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 5.3.2 เราได้ข้อสรุปว่าเงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอสำหรับการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับได้แก่ เงื่อนไขของการมีขั้วที่เสถียร (5.18) และเงื่อนไขของการมีศูนย์ที่เสถียร (5.19) นอกจากนี้ทั้งสองแล้ว เรายังต้องพิจารณาดำแหน่งของขั้วที่เกิดขึ้นด้วยเพื่อให้ตัวสังเกตมีความเร็วในการตอบสนองเร็วกว่าการเปลี่ยนแปลงของความเร็วโรเตอร์ที่เราถือว่าเป็นค่าคงที่ในสมการแบบจำลอง ตำแหน่งของขั้วหาได้จากค่ารากของสมการคุณลักษณะซึ่งพิจารณาจากสมการค่าผิดพลาดดังนี้

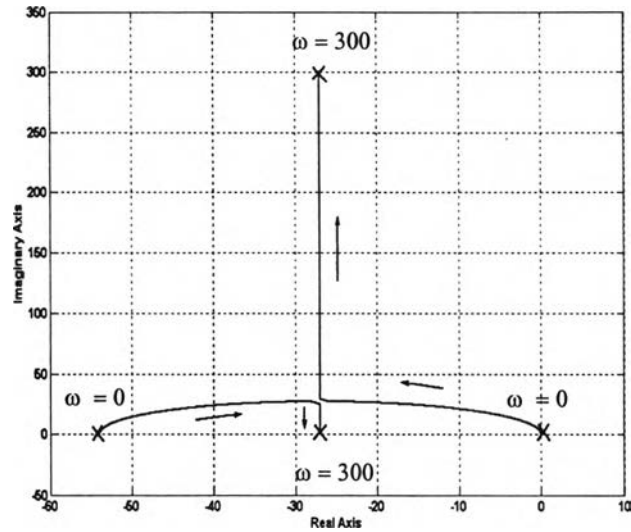
$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{-R}{2L_q} + j\frac{\omega}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{R}{L_q}\right)^2 - \omega^2 + j\omega\left(\frac{2R-4H_1}{L_q}\right) + \frac{4\omega H_2}{L_q}} \\ p_2 &= \frac{-R}{2L_q} + j\frac{\omega}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{R}{L_q}\right)^2 - \omega^2 + j\omega\left(\frac{2R-4H_1}{L_q}\right) + \frac{4\omega H_2}{L_q}} \end{aligned} \quad (5.20)$$

โดยที่ $p_1, p_1^*; p_2, p_2^*$ คือค่ารากที่เป็นคู่สังยุคเชิงซ้อน

ตัวอย่างของการเลือกค่า H_1, H_2 ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการ (5.18) และ (5.19) โดยมีสมมติฐานว่า $\frac{d\hat{p}}{dt}$ มีเครื่องหมายเหมือน ω คือ

$$\begin{aligned} H_1 &= 0.5 * R \\ H_2 &= 0 \end{aligned} \quad (5.21)$$

เมื่อเรานำค่า H_1, H_2 ไปคำนวณหาเส้นทางเดินราก ณ ความเร็ว ω ต่างๆ ทางเดินของรากจะเป็นไปตามรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 เส้นทางเดินรากของระบบประมาณค่าความเร็ว เมื่อความเร็ว ω เปลี่ยนแปลงในช่วง 0 ถึง 300 rad/sec

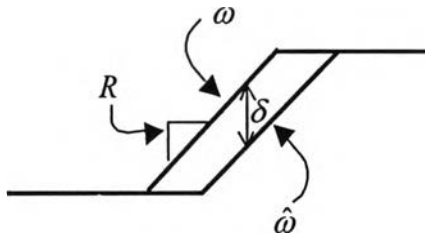
จากเส้นทางเดินรากในรูปที่ 5.6 เราจะเห็นว่าไม่มีตำแหน่งขั้วเกิดขึ้นทางฝั่งขวาของแกนจินตภาพ เราจึงสรุปได้ว่าอัตราขยายป้อนกลับที่ได้ออกแบบไว้มีผลทำให้ระบบประมาณค่าความเร็วมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงานและมีความเร็วในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วประมาณ $1/27 \cong 37$ msec

5.3.4 การออกแบบอัตราขยายการปรับตัว

นอกเหนือไปจากอัตราขยายป้อนกลับที่ตัวสังเกตแบบปรับตัวแล้ว อัตราขยายการปรับตัว (Adaptation gains) ก็เป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งซึ่งจำเป็นที่จะต้องหาแนวทางในการออกแบบ เพราะมีส่วนสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติการประมาณค่าความเร็วเช่นกัน ในที่นี้เราจะกล่าวถึงวิธีการออกแบบค่าอัตราขยายการปรับตัว โดยแนวทางที่นำเสนอจะพิจารณาคูสมบัติของตัวประมาณค่าความเร็วในด้านความเร็วในการติดตามค่าความเร็วโรเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเร่งและลดความเร็ว

ในการหาเกณฑ์การออกแบบอัตราขยายการปรับตัวนี้เราจะใช้บล็อกไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 5.5 ซึ่งระบบมีสัญญาณขาเข้าคือความเร็วจริงของมอเตอร์ ω และสัญญาณขาออกคือความเร็วที่ประมาณ $\hat{\omega}$ ระบบควบคุมความเร็วโดยทั่วไปจะมีการจำกัดขนาดสัญญาณขาออกของ

ตัวควบคุมความเร็ว (Speed regulator) ดังนั้นในกรณีที่เรทำการเร่งหรือลดความเร็วมอเตอร์ที่มีช่วงกว้างพอประมาณ แรงบิดคำสั่งจะมีค่าคงที่ในช่วงเร่งลดความเร็วและความเร็วของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นเชิงเส้น โดยมีความชันเท่ากับ $R \triangleq \frac{d\omega}{dt} = \frac{p T_m}{2 J_s}$ โดยที่ J_s คือค่าความเฉื่อยของระบบขับเคลื่อน ด้วยเหตุนี้เราจึงเลือกที่จะศึกษาถึงผลตอบสนองของระบบประมาณค่าความเร็วต่อสัญญาณแรมปี (Ramp Response) โดยในการวิเคราะห์ค่าความเร็วในการตอบสนองของระบบนั้นเราจะพิจารณาจากค่าผิดพลาดในการประมาณค่าของความเร็ว (δ) ในช่วงเร่ง/ลดความเร็วดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ผลตอบสนองแบบแรมปีของการประมาณค่าความเร็ว

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 5.5 เราสามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายระหว่างความเร็วจริงและสัญญาณผิดพลาดของความเร็วประมาณได้ดังนี้ คือ

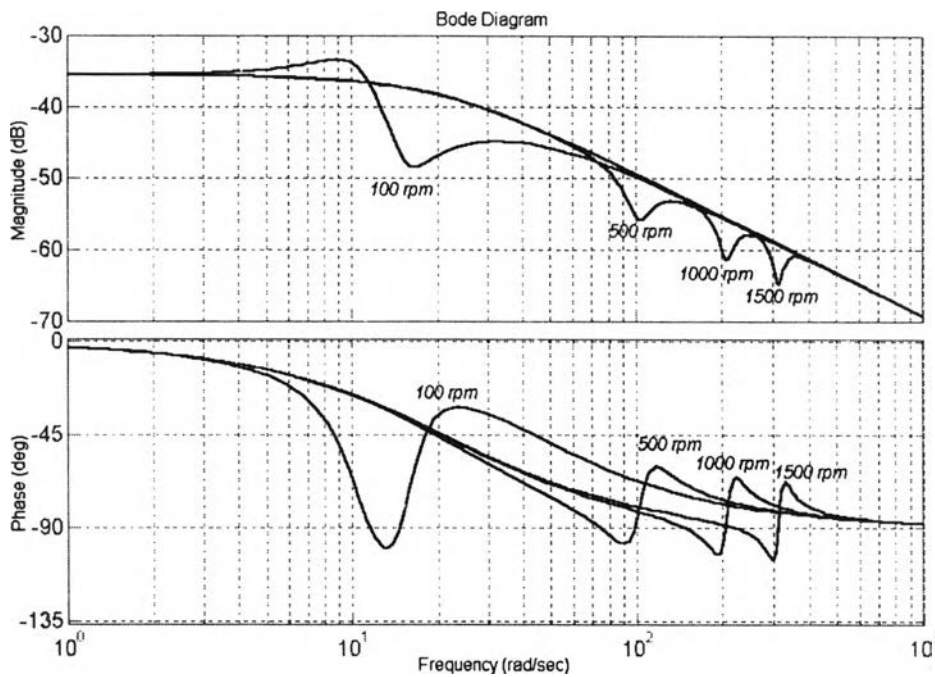
$$\frac{\omega - \hat{\omega}}{\omega} = \frac{1}{1 + \hat{\Psi}'^2 G'_{22}(s)(K_p + K_I/s)} \quad (5.22)$$

โดยใช้ทฤษฎีบทค่าสุดท้าย (Final Value Theorem) เราสามารถหาค่าผิดพลาดของความเร็วประมาณในช่วงแรมปี (δ) ได้เป็น

$$\begin{aligned} \delta &= \lim_{s \rightarrow 0} s \times \frac{R}{s^2} \times \frac{1}{1 + \hat{\Psi}'^2 G'_{22}(s)(K_p + K_I/s)} \\ &= \frac{R}{K_I \hat{\Psi}'^2 G'_{22}(s)|_{s=0}} \end{aligned} \quad (5.23)$$

$$\therefore K_I = \frac{R}{\delta \hat{\Psi}'^2 G'_{22}(s)|_{s=0}} \quad (5.24)$$

จากการศึกษาแผนภาพโบเด (รูปที่ 5.8) จะพบว่า $\hat{\Psi}^{i2} G'_{22}(s)$ ที่ $s=0$ มีค่าค่อนข้างคงที่ (เท่ากับ 0.0165 โดยประมาณ) ดังนั้นจากสมการ (5.24) ถ้าเราใช้ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบอินทิเกรต K_I ที่มีค่าสูงก็จะทำให้ระบบประมาณค่าความเร็วมีผลตอบสนองแบบแรมป์ที่ดีได้ ในการออกแบบเราจะกำหนดค่าความผิดพลาด δ และใช้สมการ (5.24) ในการออกแบบค่า K_I

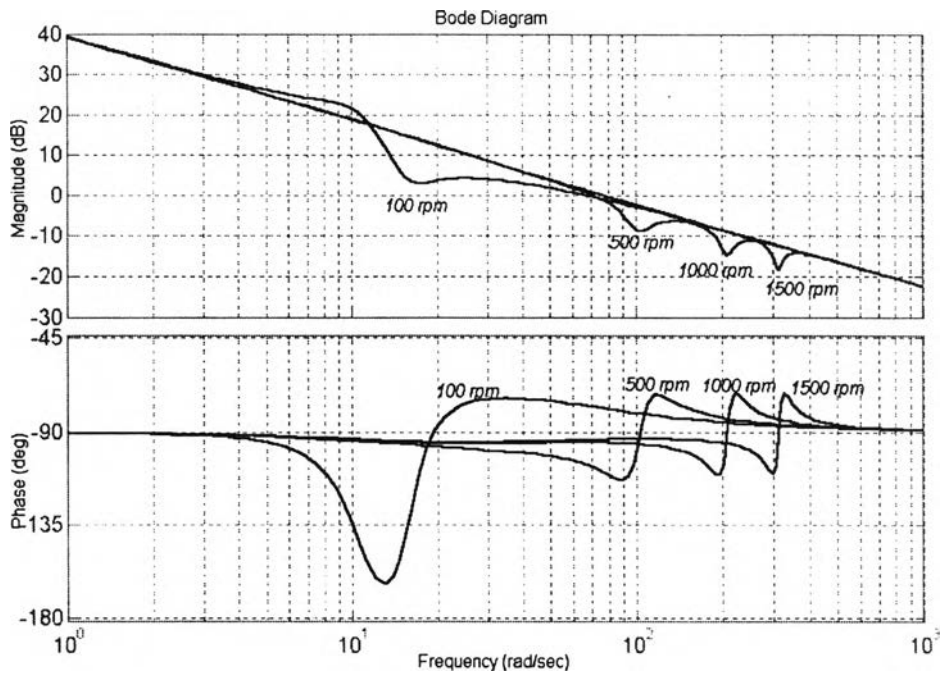


รูปที่ 5.8 แผนภาพโบเดของ $\hat{\Psi}^{i2} G'_{22}(s)$

ถ้าเราต้องการให้มีค่าความผิดพลาดขณะเร่งลดความเร็วที่แรงบิดพิกัด 10 rpm ($\delta = 2.093$ rad/s) ซึ่งเป็นค่าน้อยเพียงพอ เมื่อแทนค่าต่างๆ ในสมการ (5.24) จะได้ $K_I = 5,406$

สำหรับการออกแบบค่า K_p นั้นจะพิจารณาจากช่วงเฟสที่ปลอดภัย (Phase margin) ของระบบประมาณค่าความเร็วซึ่งจากแผนภาพโบเดของ $\hat{\Psi}^{i2} G'_{22}(s)$ จะเห็นว่าไม่ควรที่จะเลือกให้ ความถี่หักมุมของตัวควบคุม PI $\left(\omega_{cn} = \frac{K_I}{K_p}\right)$ มีค่าสูงจนเกินไปเพราะจะทำให้เฟสด้านหลังของตัวควบคุมมีผลต่อเสถียรภาพของระบบได้ อย่างไรก็ตามการเลือกความถี่หักมุมน้อยก็มิได้หมายความว่าระบบจะทำงานได้ดี ทั้งนี้เพราะเราจะต้องใช้ค่า K_p ที่มีค่าสูงซึ่งทำให้ผลกระทบของสัญญาณรบกวนมีมาก ซึ่งถ้าเราเลือก $\omega_{cn} = 25 \text{ rad/s}$ จะได้ $K_p = 216.24$ เมื่อเรานำเอาค่า

อัตราขยายการปรับตัวที่ได้ออกแบบไปหาค่าฟังก์ชัน โอนย้ายวงรอบเปิดของระบบประมาณค่าความเร็ว (รูปที่ 5.5) แล้วไปวาดแผนภาพโบเด จะได้ดังรูปที่ 5.9

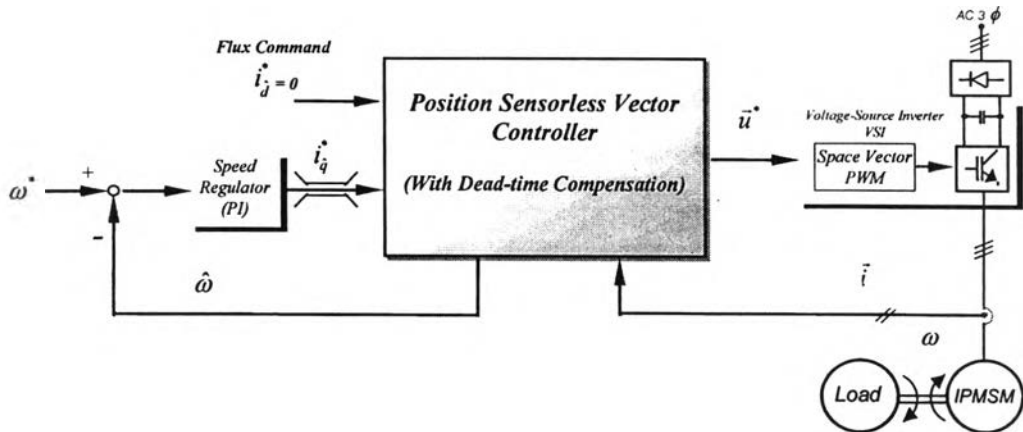


รูปที่ 5.9 แผนภาพโบเดของฟังก์ชัน โอนย้ายวงรอบเปิดของระบบประมาณค่าความเร็ว

ซึ่งจากรูปที่ 5.9 จะเห็นว่าระบบประมาณค่าความเร็วจะมีช่วงเฟสที่ปลอดภัยตลอดย่านการทำงานซึ่งเพียงพอสำหรับระบบควบคุม

5.4 ผลจำลองการทำงานและผลการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์ วัตถุประสงค์และความเร็ว

รูปที่ 5.10 แสดงถึงโครงสร้างของระบบควบคุมความเร็วที่ใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมที่มีการประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วด้วยตัวสังเกตแบบปรับตัวที่ใช้ในการทดลองและจำลองการทำงาน



รูปที่ 5.10 ระบบควบคุมความเร็วที่ใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมที่มีการประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วด้วยตัวสังเกตเพิ่มอันดับแบบปรับตัว

ผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัว

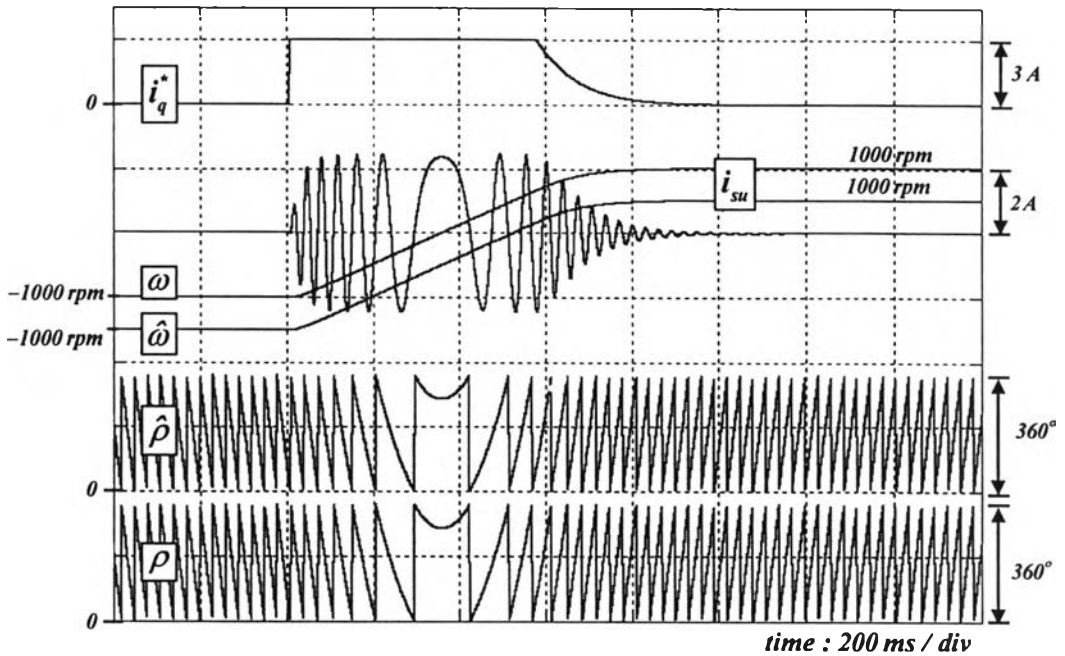
รูปที่ 5.14-5.19 เป็นผลการจำลองในสภาวะอยู่ตัว จะเห็นว่าระบบสามารถทำงานได้ดีและมีเสถียรภาพ โดยมีค่าความผิดพลาดของความเร็วสูงสุด (ที่ 100 rpm) ≈ 3 rpm , ค่าผิดพลาดของตำแหน่งสูงสุดที่ (100 rpm) $\approx 2.4^\circ$ โดยที่ $e_\omega = \hat{\omega} - \omega$

ผลตอบสนองต่อการกลับทิศความเร็ว

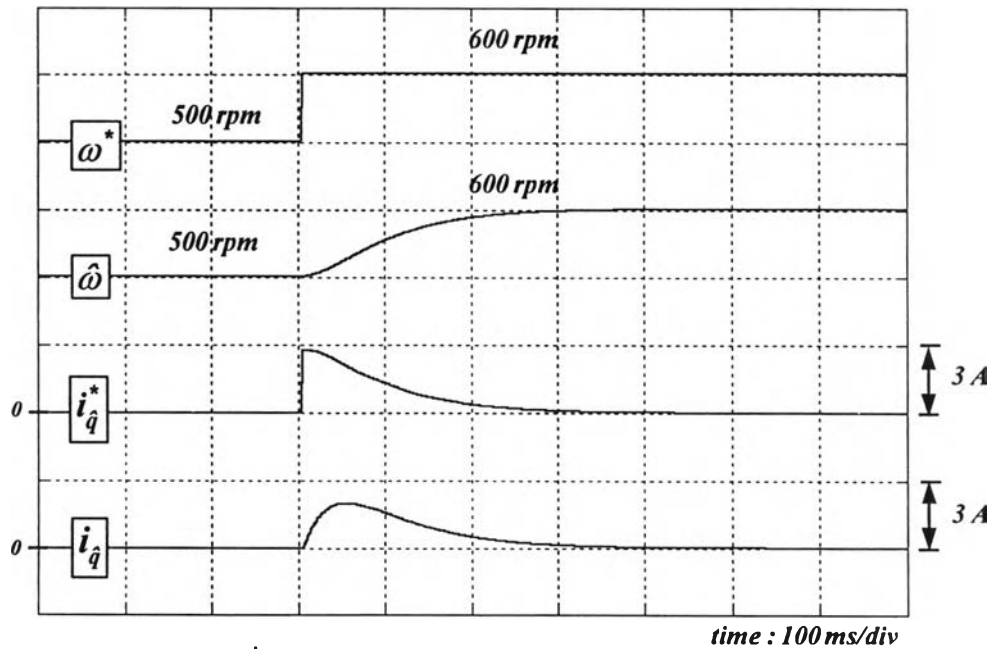
รูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.20-5.23 เป็นผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองในขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 \rightarrow 1000 rpm ตามลำดับ จากผลการทดลองในช่วงแรกของการกลับทิศ จะเห็นได้ว่า Envelope ของกระแสสเตเตอร์จะมีขนาดเล็กกว่าที่ควรจะเป็น ซึ่งเกิดมาจากค่าความเร็วประมาณมีค่าความผิดพลาดสูง ≈ 20 rpm ส่งผลให้การประมาณค่าตำแหน่งมีค่าคลาดเคลื่อนเช่นกัน โดยมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง $\approx 10^\circ$ แต่ในช่วงการประมาณค่าความเร็วจาก 0 \rightarrow 1000 rpm ระบบสามารถควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ได้เป็นอย่างดี ซึ่งดูได้จาก Envelope ของกระแสสเตเตอร์จะมีขนาดคงที่เป็นไปตามกระแสสร้างแรงบิดคำสั่ง ระบบประมาณค่าความเร็วสามารถทำงานได้ดี โดยพิจารณาได้จากค่าความผิดพลาดของความเร็วมีค่าลดลงและเข้าสู่ค่าศูนย์ สำหรับค่าความผิดพลาดของตำแหน่งก็มีค่าลดลงเช่นกัน โดยมีค่าประมาณ 6° เมื่อค่าความผิดพลาดของความเร็วมีค่าประมาณ 0 rpm

ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ

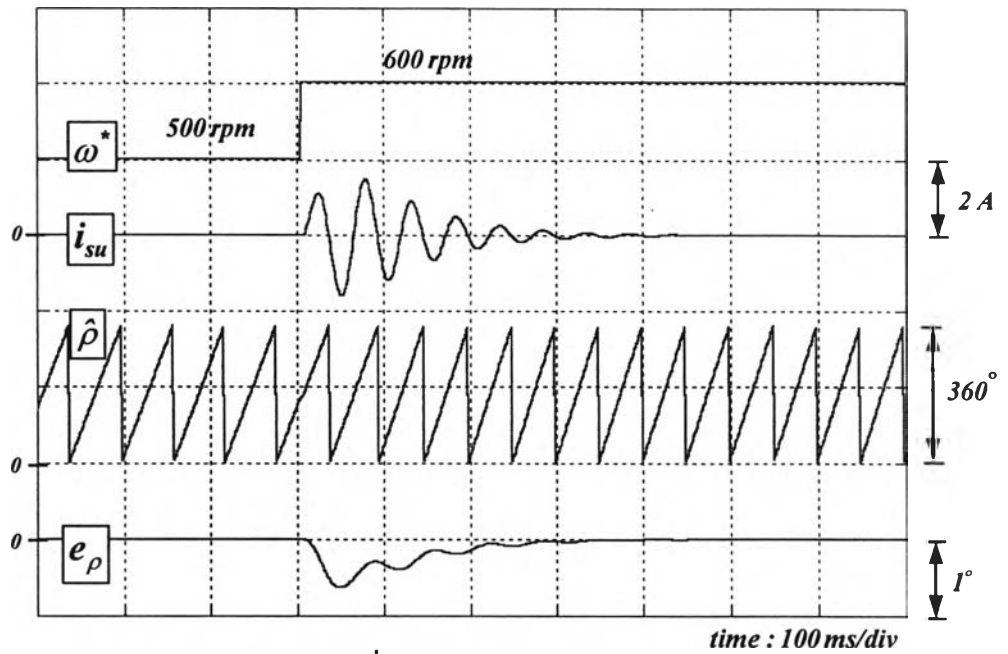
รูปที่ 5.12-5.13 และรูปที่ 5.23-5.24 เป็นผลการจำลองการทำงานและผลการทดลอง ในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งจาก 500 → 600 rpm ตามลำดับ จะเห็นว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมความเร็วได้ตามค่าคำสั่งอย่างรวดเร็ว ซึ่งก็จะสอดคล้องกันระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองการทำงาน สำหรับค่าความผิดพลาดสูงสุดของตำแหน่ง (จากการทดลอง) นั้นมีประมาณ 10°



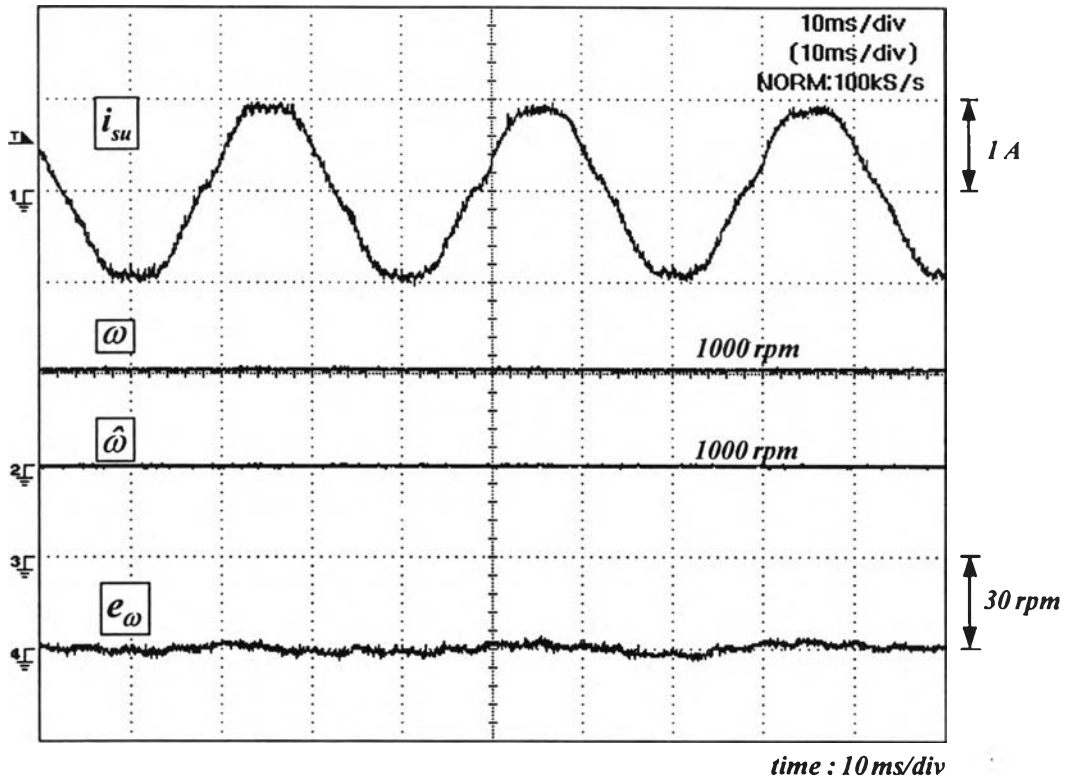
รูปที่ 5.11 ผลการจำลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้ระบบการควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง



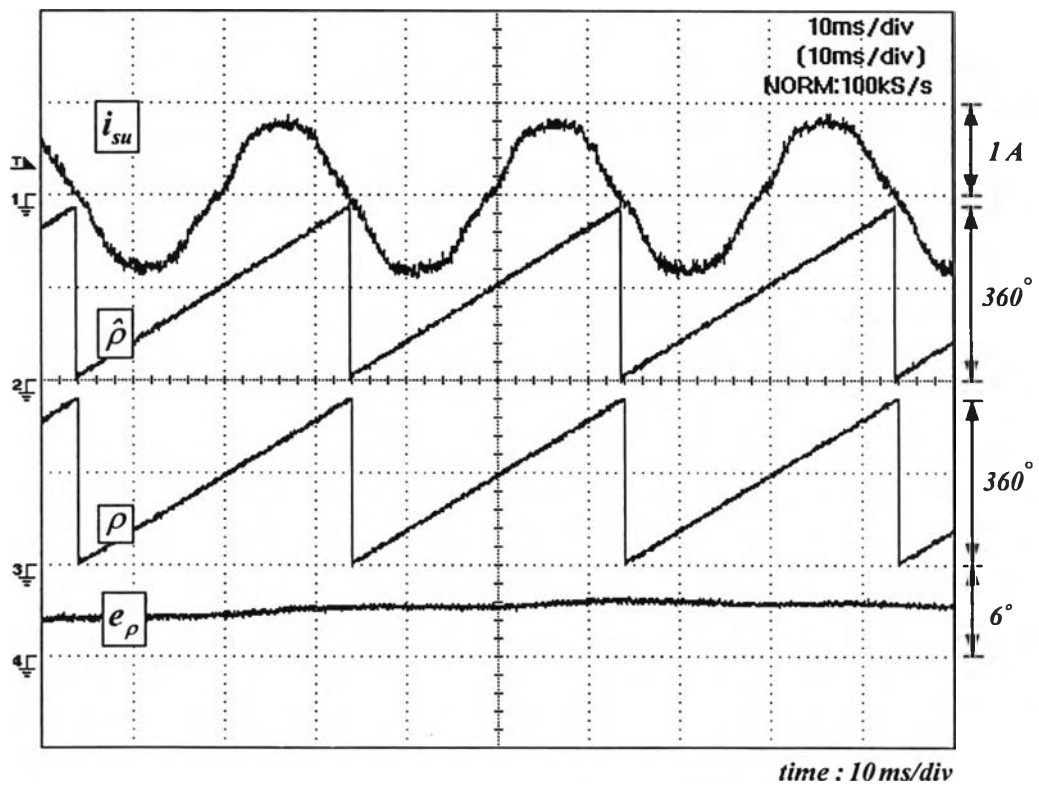
รูปที่ 5.12 ผลการจำลองเมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



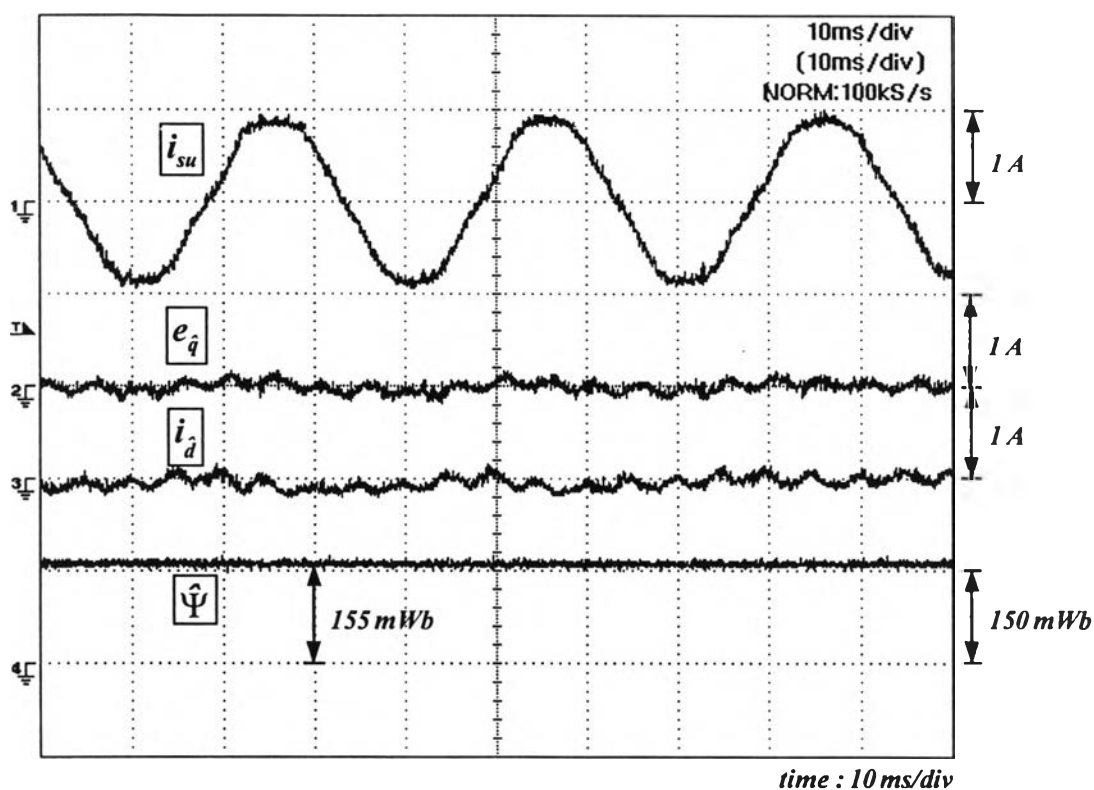
รูปที่ 5.13 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์โร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 500 ไป 600 rpm (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแส)



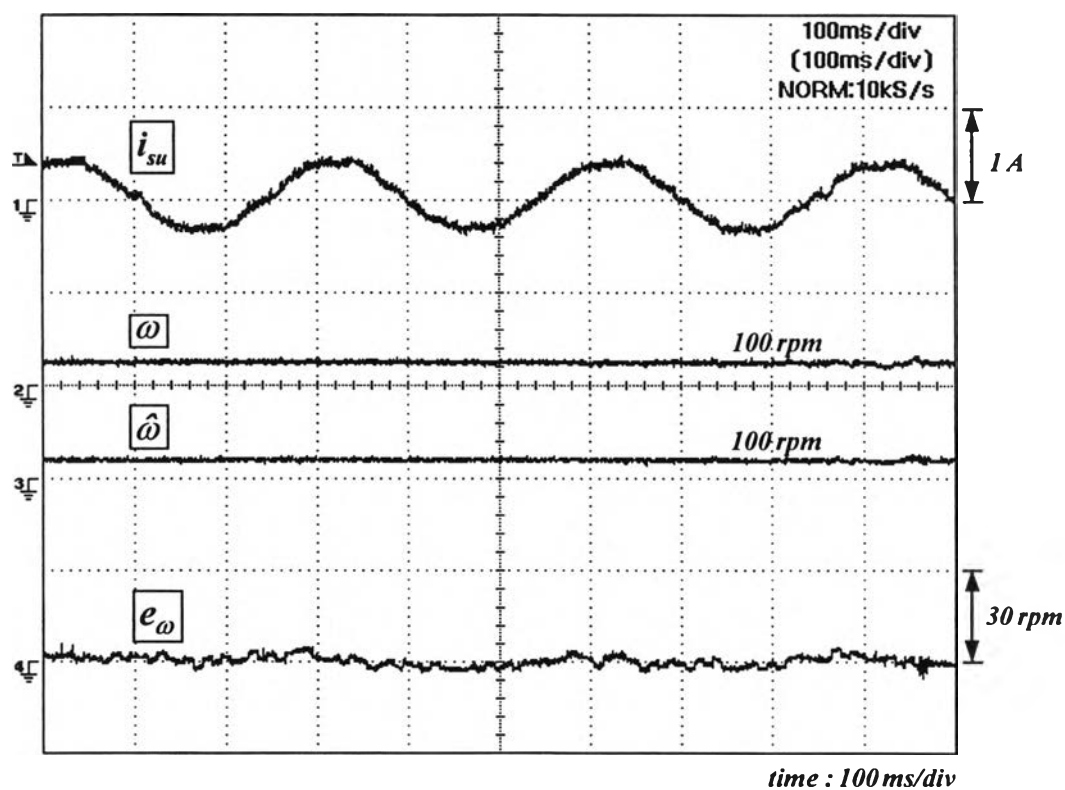
รูปที่ 5.14 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 1000 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและความเร็ว)



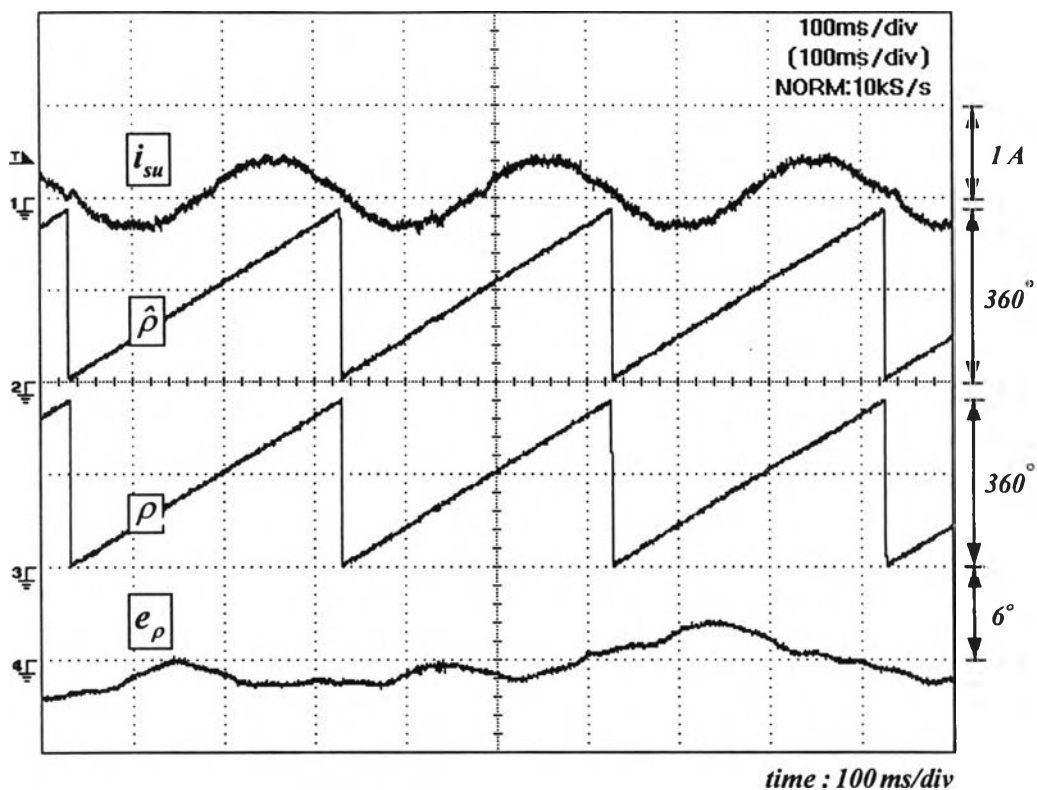
รูปที่ 5.15 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 1000 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง)



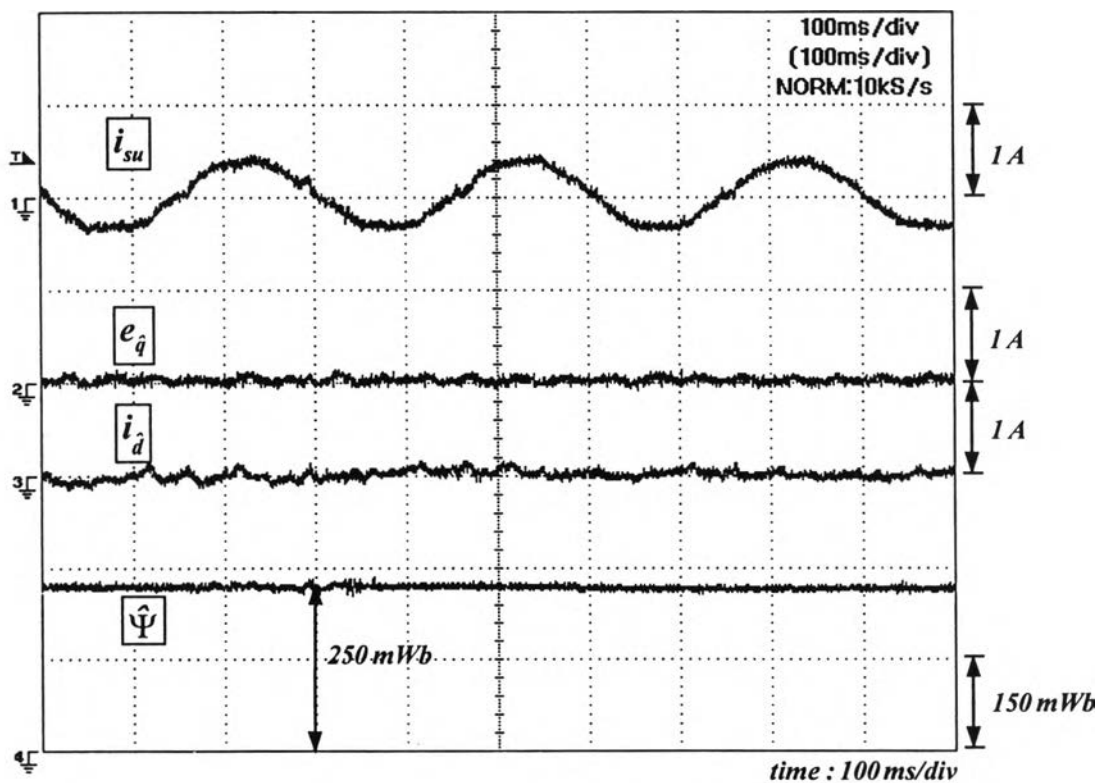
รูปที่ 5.16 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 1000 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไรเซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและฟลักซ์แม่เหล็ก)



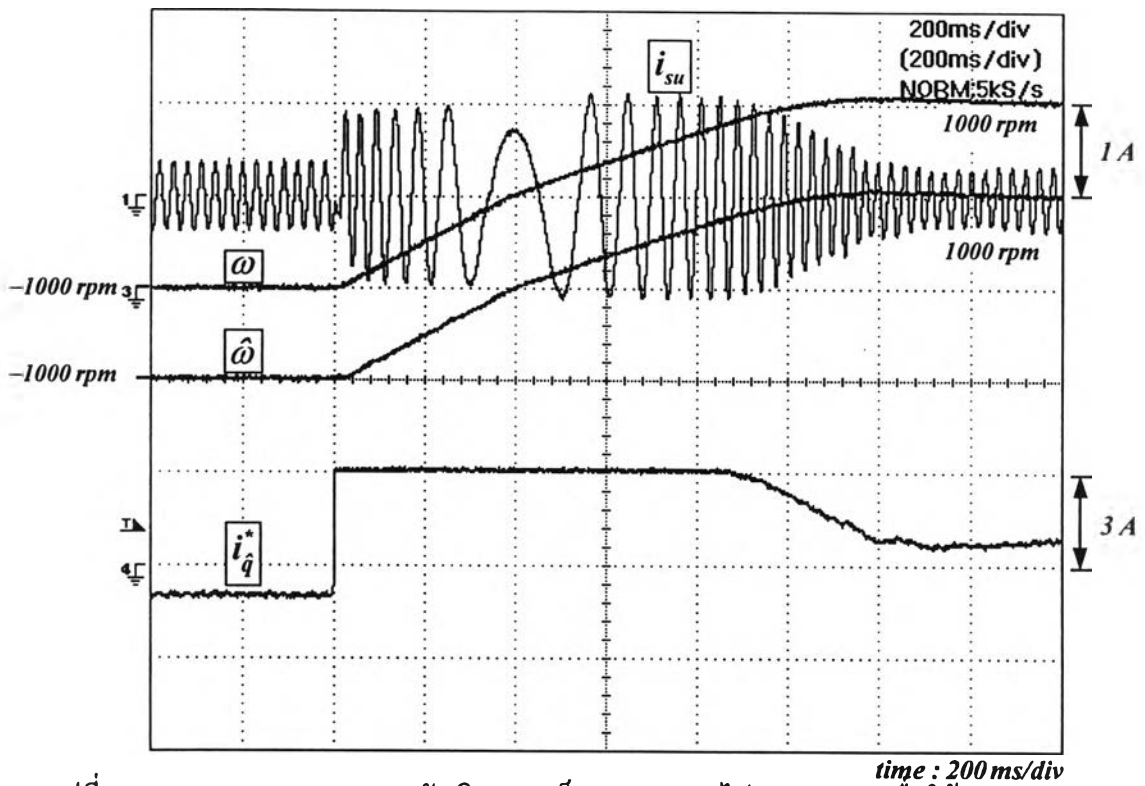
รูปที่ 5.17 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 100 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไรเซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและความเร็ว)



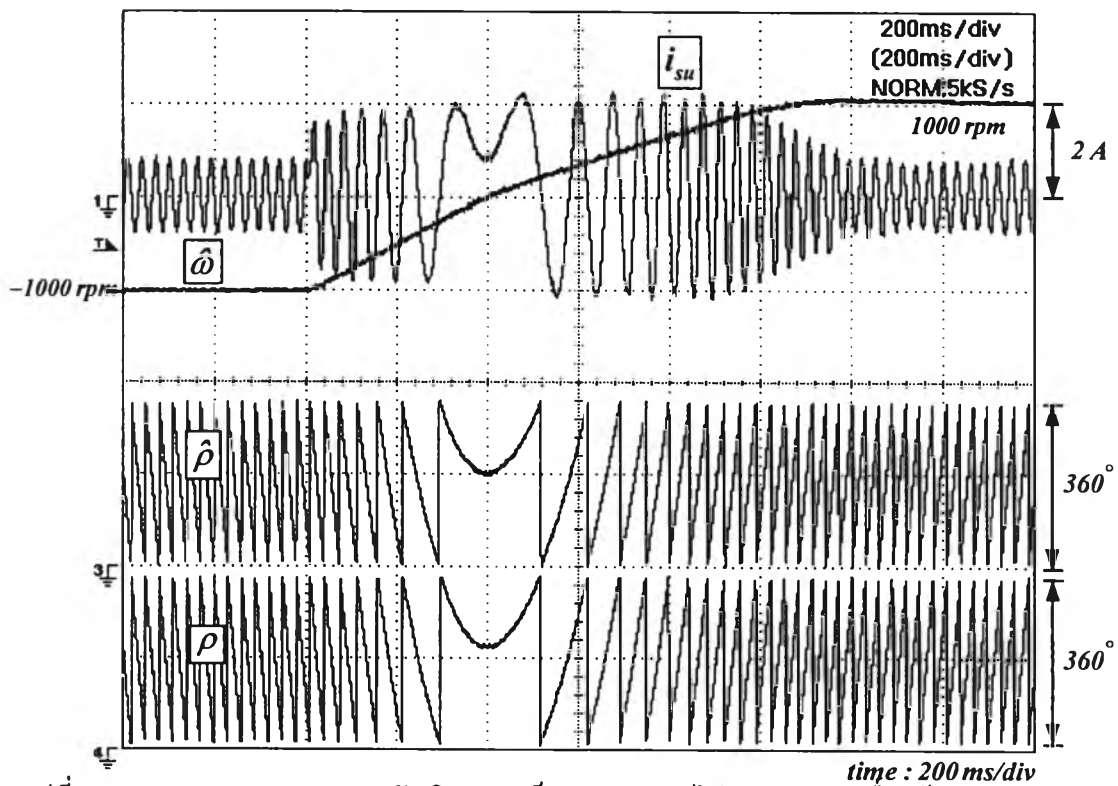
รูปที่ 5.18 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 100 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง)



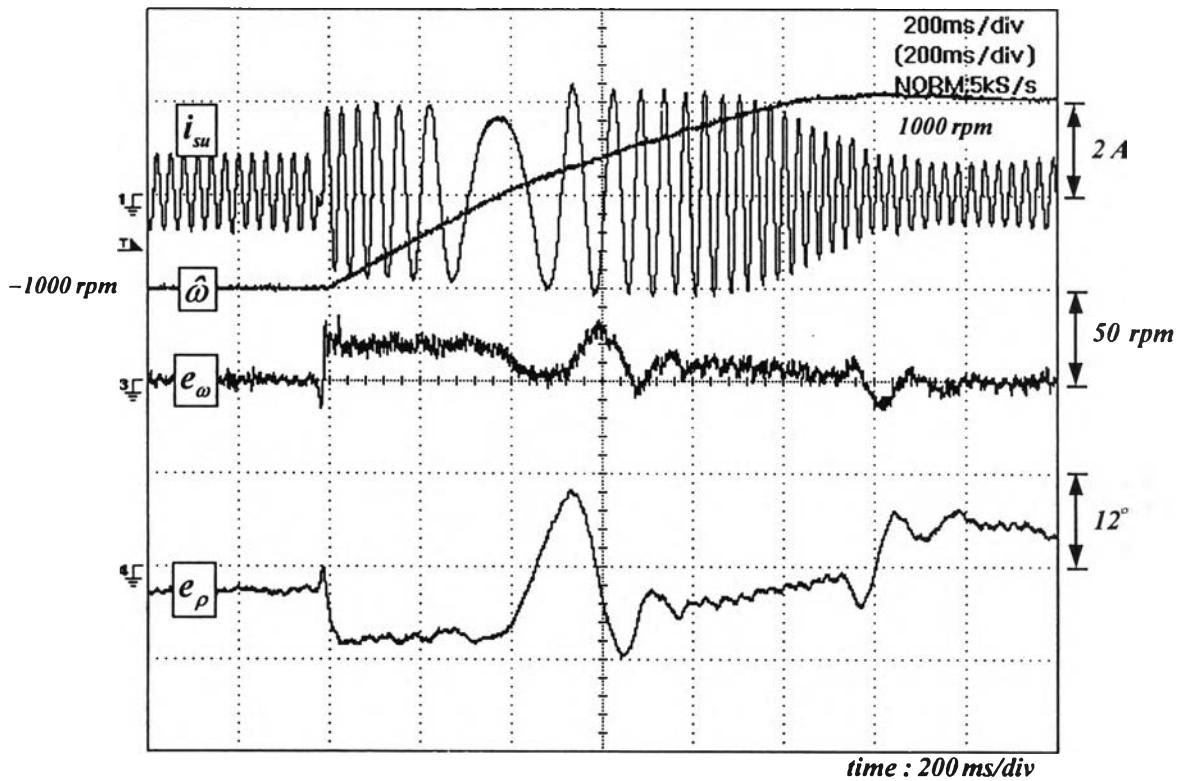
รูปที่ 5.19 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 100 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและฟลักซ์แม่เหล็ก)



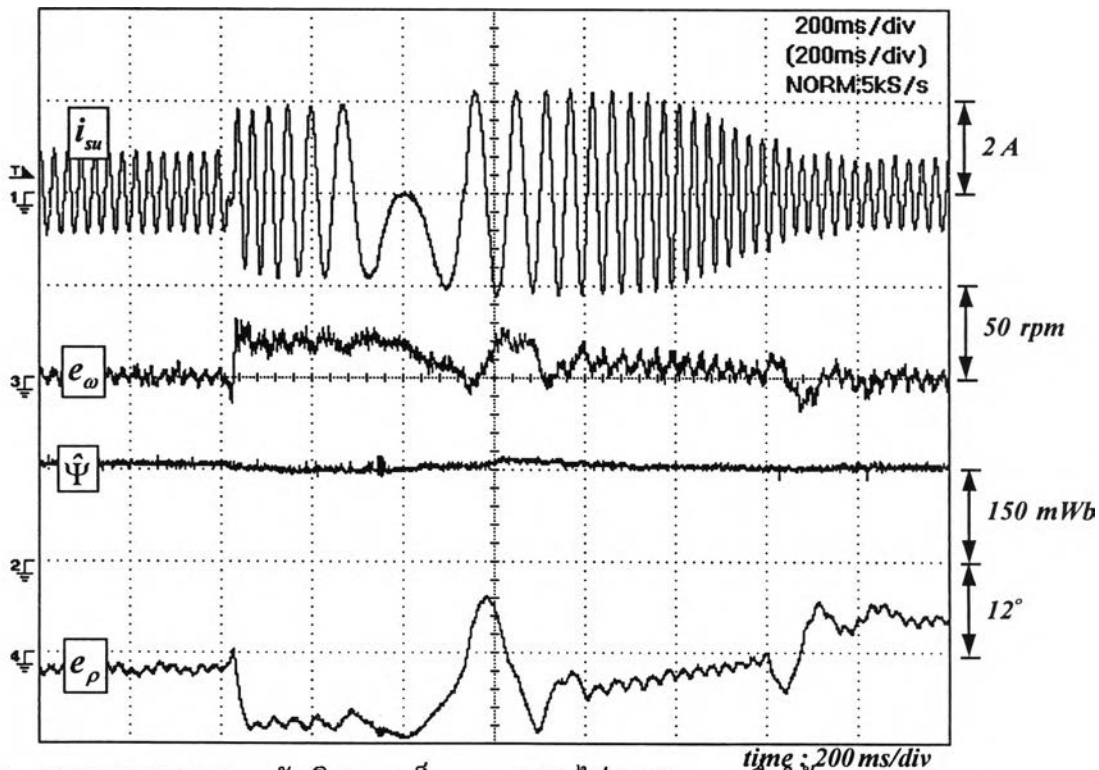
รูปที่ 5.20 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุม
เวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



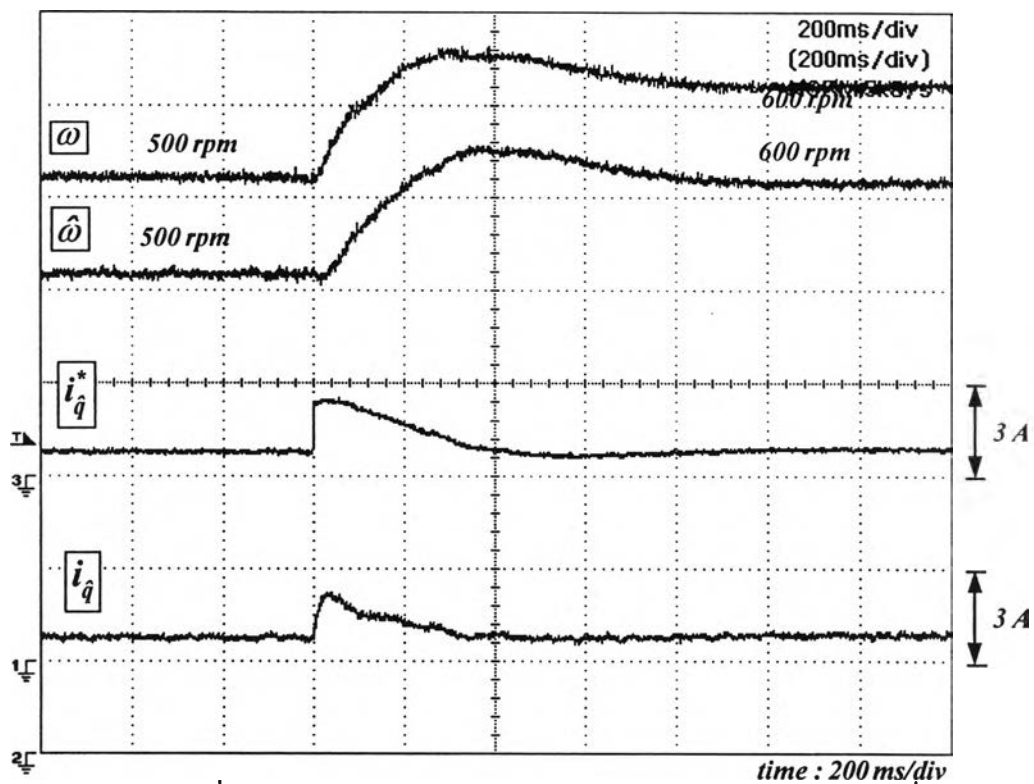
รูปที่ 5.21 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุม
เวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแส, ความเร็วและตำแหน่ง)



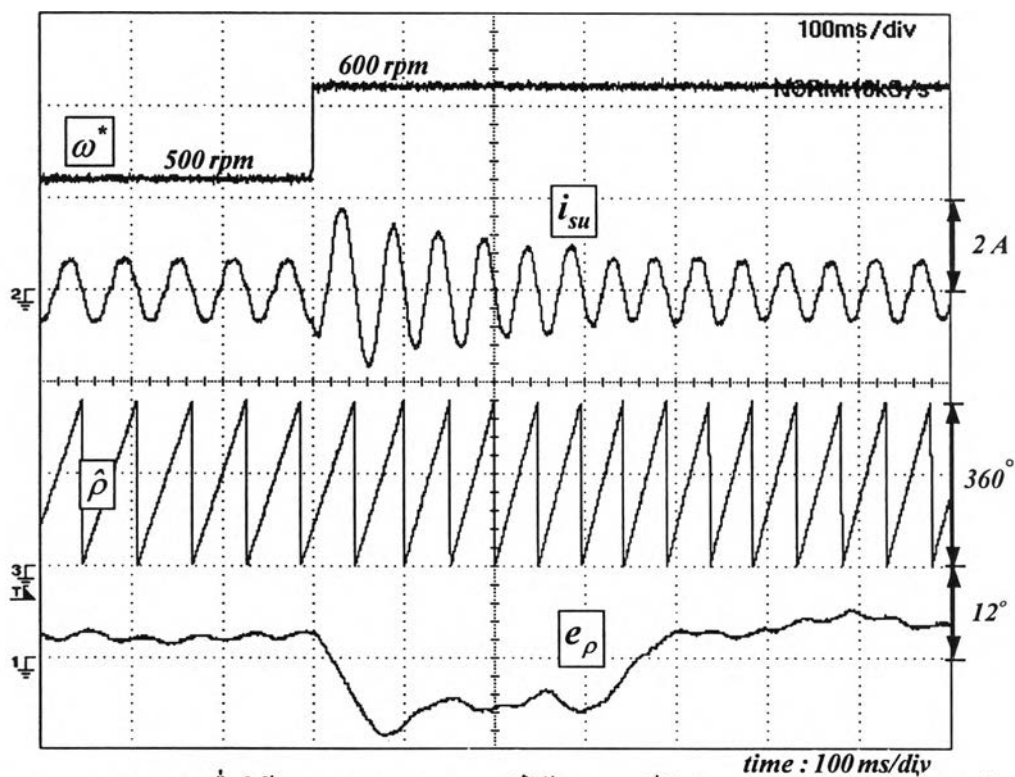
รูปที่ 5.22 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุม
 เวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นความเร็ว, ค่าผิดพลาดความเร็วและตำแหน่ง)



รูปที่ 5.23 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุม
 เวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปฟลักซ์แม่เหล็ก, ค่าผิดพลาดความเร็วและตำแหน่ง)



รูปที่ 5.24 ผลการทดลองเมื่อใช้ระบบควบคุมความเร็วโร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



รูปที่ 5.25 ผลการทดลองเมื่อใช้ระบบควบคุมความเร็วโร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ จาก 500 ไป 600 rpm ((รูปคลื่นตำแหน่งและกระแส)