

บทที่ 4

ตัวสังเกตเต็มอันดับสำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายใน

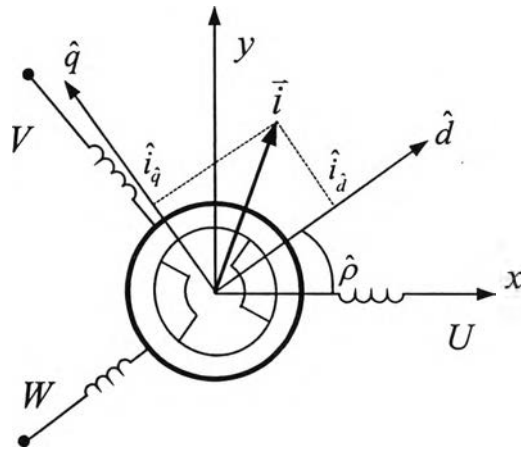
ในบทนี้เราจะกล่าวถึงการสร้างตัวสังเกตเต็มอันดับจากแบบจำลองเชิงเส้นที่นำเสนอในบทที่ 2 เพื่อใช้ในการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กและตำแหน่งของโรเตอร์ โดยจะใช้เพียงแค่ตัวตรวจจับความเร็วเท่านั้นในการประมาณค่าตำแหน่งของโรเตอร์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 ตัวสังเกตเต็มอันดับ

จากแบบจำลองเชิงเส้นที่นำเสนอในสมการ (2.11) เราสามารถใช้ข้อมูลความเร็วโรเตอร์, แรงดันและกระแสเดเตอร์ ประมาณค่ากระแสเดเตอร์และตำแหน่งของโรเตอร์รวมทั้งขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กได้ โดยใช้ตัวสังเกตเต็มอันดับดังแสดงในสมการ (4.1)

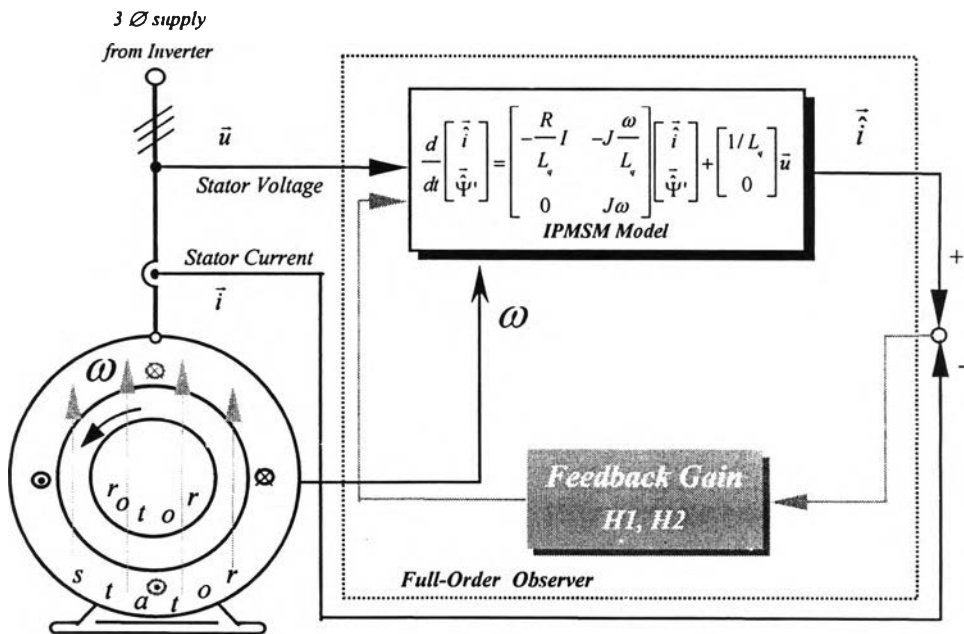
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i} \\ \hat{\Psi}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_q} I & -J \frac{\omega}{L_q} \\ 0 & J\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i} \\ \hat{\Psi}' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \bar{u} + \begin{bmatrix} -\frac{(L_d - L_q)}{L_q} \frac{d\hat{d}}{dt} \begin{bmatrix} \cos \hat{\rho} \\ \sin \hat{\rho} \end{bmatrix} \\ (L_d - L_q) \frac{d\hat{d}}{dt} \begin{bmatrix} \cos \hat{\rho} \\ \sin \hat{\rho} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$
$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ H_1 * I + H_2 * J \end{bmatrix} [\hat{i} - i]$$

โดยที่ “^” หมายถึง ค่าประมาณ, H_1 และ H_2 คือ อัตราขยายป้อนกลับ (Feedback gain) และ แกน \hat{d} ขึ้นในแนว $\hat{\rho}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แบบจำลองของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายใน เมื่อแกน \hat{d} ชี้ในแนว $\hat{\rho}$

จากสมการ (4.1) จะเห็นได้ว่าตัวสังเกตเต็มอันดับประกอบด้วยแบบจำลองของมอเตอร์และสัญญาณป้อนกลับของค่าผิดพลาดของกระแสเดเตอร์ผ่านอัตราขยายป้อนกลับ H_1 และ H_2 ซึ่งถ้าเราใช้ค่าเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กที่ไม่ถูกต้องในตัวสังเกตเต็มอันดับกล่าวคือ $\hat{\Psi}' \neq \Psi'$ ผลที่ได้ก็จะเกิดค่าผิดพลาดของกระแสเดเตอร์ ($\bar{e}_i = \vec{i} - \hat{i}$) ด้วยเหตุนี้เราจึงใช้ค่าผิดพลาดของกระแสเดเตอร์มาปรับค่าในตัวสังเกตเต็มอันดับผ่านอัตราขยายป้อนกลับ H_1 และ H_2 แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ภาพรวมการทำงานของตัวสังเกตแบบเต็มอันดับ

4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวสังเกตเพิ่มเติมอันดับ

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

สมการลักษณะพลวัตของค่าความผิดพลาด:

$$\frac{d\bar{e}}{dt} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{i} - \hat{i} \\ \bar{\Psi}' - \hat{\Psi}' \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} I & -J \frac{\omega}{L} \\ H_1 * I + H_2 * J & J\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i} - \hat{i} \\ \bar{\Psi}' - \hat{\Psi}' \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

จากสมการ (4.2) จะเห็นได้ว่าในกรณีที่อัตรายบายป้อนกลับเป็นศูนย์ ($H_1 = H_2 = 0$) ระบบประมาณจะมีขั้วอยู่บนแกนจินตภาพ ซึ่งจะทำให้ค่าความผิดพลาดแกว่งเป็นฟังก์ชันไซน์ไม่ลู่เข้าสู่ศูนย์ เงื่อนไขที่ทำให้ตัวสังเกตหรือตัวประมาณมีเสถียรภาพ ก็คือเงื่อนไขของขั้วที่เสถียร (Stable pole conditions) ซึ่งแสดงได้ดังสมการ (4.3) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)

$$\omega^* \left[\omega^* \left(\frac{(H_1 - R)^2}{R} + (H_1 - R) \right) + H_2 * \frac{R}{L} \right] < 0 \quad (4.3)$$

ตัวอย่างของการออกแบบอัตรายบายให้เงื่อนไขขั้วที่เสถียรเป็นจริงที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้คือ

$$\begin{aligned} H_1 &= 0.5 * R \\ H_2 &= 0 \end{aligned} \quad (4.4)$$

4.3 การบูรณาการตัวสังเกตกับการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม

ในหัวข้อนี้เราจะกล่าวถึงการบูรณาการตัวสังเกตเข้ากับการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม ทั้งนี้เนื่องจากการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กและค่ากระแสเดเตอร์ตามสมการ (4.1) นั้นคำนวณบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ แต่ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม ที่ได้แสดงในบทที่ 3 นั้นบนแกนอ้างอิงโรเตอร์ ดังนั้นเพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลองที่ใช้ในทั้งตัวสังเกตและ

การควบคุมเวกเตอร์เราจึงทำการบูรณาการทั้งสองระบบเข้าด้วยกัน ในกรณีนี้ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมจะต้องใช้ค่าของฟลักซ์ประมาณในการควบคุม เราจึงจำเป็นต้องแสดงแบบจำลองบนแกนอ้างอิงของฟลักซ์ประมาณ ซึ่งสามารถแสดงสมการสเตเตอร์ของตัวสังเกตุเต็มอันดับบนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณได้ดังนี้

สมการทางด้านสเตเตอร์ของตัวสังเกตุเต็มอันดับบนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณ:

$$\begin{bmatrix} L_d \frac{d\hat{i}_d}{dt} \\ L_q \frac{d\hat{i}_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{\hat{d}} \\ u_{\hat{q}} \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_q \hat{i}_q \frac{d\hat{\rho}}{dt} \\ L_q \hat{i}_d \frac{d\hat{\rho}}{dt} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \hat{\Psi}' \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

เนื่องจากการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วมเป็นการควบคุมบนแกนอ้างอิง d, q ดังนั้นเราจึงเขียนสมการเหลือคือสมการของฟลักซ์ขยายบนแกนอ้างอิงเดียวกันเพื่อความสอดคล้องของสมการทั้งหมด จากสมการ (4.1) สมการพลวัตของฟลักซ์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์แสดงได้ดังสมการ (4.6)

$$\frac{d\bar{\Psi}'}{dt} = J\omega\bar{\Psi}' + (L_d - L_q) \frac{d\hat{i}_d}{dt} \begin{bmatrix} \cos \hat{\rho} \\ \sin \hat{\rho} \end{bmatrix} + [H_1 * I + H_2 * J][\bar{i}' - \bar{i}] \quad (4.6)$$

ในการคำนวณหาฟลักซ์ขยาย Ψ' (สมการ (4.6)) เราสังเกตได้ว่าเทอม $(L_d - L_q) \frac{d\hat{i}_d}{dt} \begin{bmatrix} \cos \hat{\rho} \\ \sin \hat{\rho} \end{bmatrix}$ ทำให้การประมาณค่าฟลักซ์มีความซับซ้อน ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ เราจึงเขียนสมการ (4.6) ใหม่ในรูปสมการ (4.7) - (4.8) ดังนี้

$$\bar{\Psi}' = \bar{\Psi} + (L_d - L_q) \hat{i}_d' * e^{j\hat{\rho}} \quad (4.7)$$

$$\frac{d\bar{\Psi}'}{dt} = J\omega\bar{\Psi}' + [H_1 * I + H_2 * J][\bar{i}' - \bar{i}] \quad (4.8)$$

เราสามารถแสดงสมการพลวัตของฟลักซ์ขยายในสมการ (4.7)-(4.8) บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ได้ดังสมการ (4.9) - (4.10)

$$\hat{\Psi}' = \hat{\Psi} + (L_d - L_q) \dot{\hat{d}} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\Psi}}{dt} &= H1(\dot{\hat{d}} - i_{\hat{d}}) - H2(\dot{\hat{q}} - i_{\hat{q}}) \\ \frac{d\hat{\rho}}{dt} &= \hat{\omega} + \frac{1}{\hat{\Psi}} [H2(\dot{\hat{d}} - i_{\hat{d}}) + H1(\dot{\hat{q}} - i_{\hat{q}})] \end{aligned} \quad (4.10)$$

ลำดับต่อไปเราจะหาสมการในส่วนการควบคุมเวกเตอร์บนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณ ซึ่งมีวิธีการหาเหมือนกับตัวสังเกตเต็มอันดับ แบบจำลองของมอเตอร์ในส่วนการควบคุมเวกเตอร์สมการ (2.11) สามารถแสดงอ้างอิงบนแกนฟลักซ์ประมาณได้ดังสมการ (4.11)

สมการทางด้านสเตเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์บนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณ:

$$\begin{bmatrix} L_d \frac{d\hat{d}}{dt} \\ L_q \frac{d\hat{q}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{\hat{d}} \\ u_{\hat{q}} \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} i_{\hat{d}} \\ i_{\hat{q}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_q i_{\hat{q}} \frac{d\hat{\rho}}{dt} \\ L_q i_{\hat{d}} \frac{d\hat{\rho}}{dt} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \hat{\Psi}' \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

จากค่าประมาณของตำแหน่งโรเตอร์, ฟลักซ์แม่เหล็ก และกระแสสเตเตอร์ ที่ได้จากตัวสังเกตเต็มอันดับ ความเร็วโรเตอร์ที่ได้จากการตรวจจับ และแบบจำลองมอเตอร์บนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณ เราสามารถควบคุมแรงบิดและฟลักซ์ในช่องอากาศได้โดยการควบคุมกระแส $i_{\hat{q}}$ และ $i_{\hat{d}}$ ตามลำดับ ซึ่งค่ากระแส $i_{\hat{q}}$ และ $i_{\hat{d}}$ นั้นเราสามารถควบคุมผ่านแรงดันสเตเตอร์ได้โดยอาศัยการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม ซึ่งก็ใช้หลักการเช่นเดียวกับบทที่ 3 ที่ผ่านมา

แรงดันสเตเตอร์ของตัวควบคุมเวกเตอร์ที่มีการชดเชยแรงดันเชื่อมโยงระหว่างแกน:

$$\begin{bmatrix} u_{\hat{d}} \\ u_{\hat{q}} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_{\hat{d}} \\ i_{\hat{q}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_q \dot{\hat{q}} \frac{d\hat{\rho}}{dt} \\ L_q \dot{\hat{d}} \frac{d\hat{\rho}}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \hat{\Psi}' \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

เมื่อเราแทนแรงดันคำสั่งสมการ (4.12) ลงในสมการทางด้านสเตเตอร์ของทั้งส่วนควบคุมเวกเตอร์ (4.11) และตัวสังเกตเต็มอันดับ (4.5) เราจะได้

สมการทางด้านสเตเตอร์หลังการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม:

$$\begin{bmatrix} L_d \frac{d\hat{i}_d}{dt} \\ L_q \frac{d\hat{i}_q}{dt} \end{bmatrix} = -R \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

หรือ

$$\hat{i}_d = \frac{1}{L_d s / R + 1} i_d^* \quad (4.14)$$

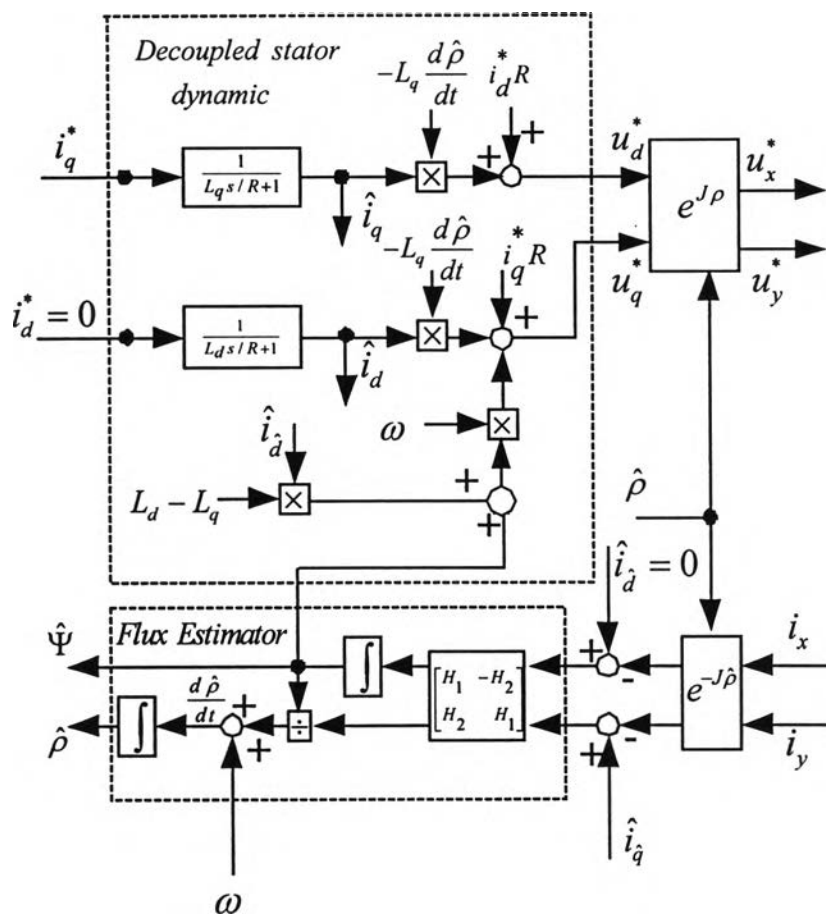
$$\hat{i}_q = \frac{1}{L_q s / R + 1} i_q^* \quad (4.15)$$

ในกรณีที่เรานำเลือก $i_d^* = 0$ และ $\hat{i}_d(0) = 0$ จะได้ $\hat{i}_d(t) \equiv 0$ ดังนั้นสมการ (4.14)-(4.15) สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการ (4.16) และ (4.17)

$$\hat{i}_d = 0 \quad (4.16)$$

$$\hat{i}_q = \frac{1}{L_q s / R + 1} i_q^* \quad (4.17)$$

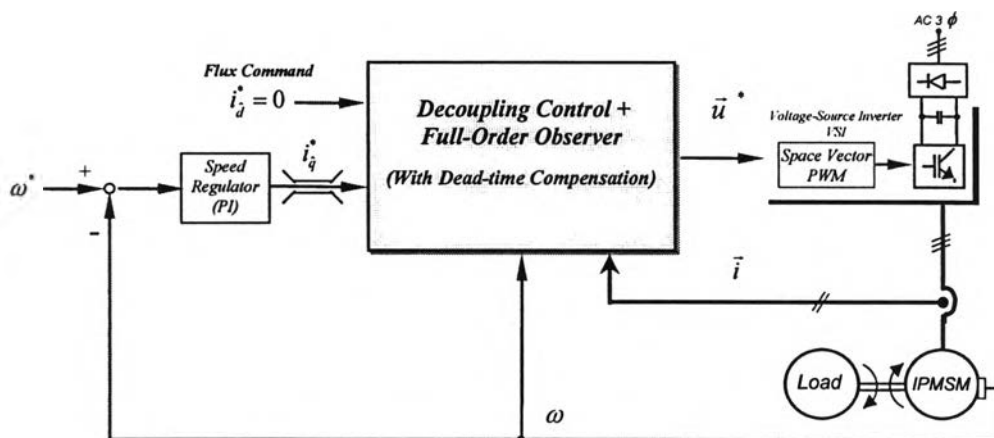
กล่าวโดยสรุปแล้วตอนนี้เรามีสมการแรงดันสเตเตอร์ในตัวควบคุมที่มีการชดเชยแรงดันที่เชื่อมโยงระหว่างแกนสมการ (4.12), สมการทางด้านโรเตอร์ของตัวสังเกตเพิ่มอันดับสมการ (4.9)-(4.10) และสมการทางด้านสเตเตอร์ของส่วนควบคุมเวกเตอร์และตัวสังเกตเพิ่มอันดับหลังการควบคุมแยกการเชื่อมร่วมเป็นสมการ (4.16)-(4.17) เราสามารถบูรณาการควบคุมแยกการเชื่อมร่วมกับตัวสังเกตเพิ่มอันดับซึ่งใช้แบบจำลองร่วมกันได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 บล็อกไดอะแกรมโดยรวมหลังบูรณาการตัวสังเกตเข้ากับระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม

4.4 ผลจำลองการทำงานและผลการทดสอบสมรรถนะของระบบประมาณค่าฟลักซ์และตำแหน่งด้วยตัวสังเกตเต็มอันดับ

รูปที่ 4.4 แสดงถึงโครงสร้างของระบบควบคุมความเร็วที่ใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมที่มีการประมาณค่าฟลักซ์และตำแหน่งด้วยตัวสังเกตเต็มอันดับที่ใช้ในการทดลองและจำลองการทำงาน โดยรายละเอียดของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการทดลองแสดงไว้ในภาคผนวก ก



รูปที่ 4.4 ระบบควบคุมความเร็วที่ใช้ระบบควบคุมแยกการเชื่อมร่วมที่มีการประมาณค่าฟลักซ์และตำแหน่งด้วยตัวสังเกตเต็มอันดับ

ผลตอบสนองในสถานะอยู่ตัว

รูปที่ 4.8 และ 4.10 เป็นรูปคลื่นกระแสและตำแหน่งจากผลการทดลองในสถานะอยู่ตัวของระบบที่ความเร็ว 1000 และ 100 rpm ตามลำดับ จะเห็นว่าระบบสามารถประมาณค่าตำแหน่งได้ดีที่ความเร็ว 1000 rpm โดยมีค่าเฉลี่ยของความผิดพลาด ($e_p = \hat{\rho} - \rho$) $\approx 0.5^\circ$ แต่ความผิดพลาดจะมีค่าสูงในช่วงความเร็วต่ำ ซึ่งคาดว่าน่าจะมีสาเหตุมาจากผลกระทบของเวลาประวิง (dead time) ของการสวิตช์หรือค่าความต้านทานที่คลาดเคลื่อน รวมถึงแรงดันตกคร่อมสวิตช์ด้วย

รูปที่ 4.9 และ 4.11 เป็นรูปคลื่นค่าผิดพลาดของกระแสและฟลักซ์แม่เหล็กประมาณ ซึ่งจะเห็นว่าค่าผิดพลาดของกระแสมีค่าน้อยมาก (ค่าสูงสุดของความผิดพลาด ≈ 0.2 A) สำหรับค่าความผิดพลาดของฟลักซ์ประมาณที่ความเร็ว 1000 rpm ก็ถือว่ามีค่าน้อย โดยที่ฟลักซ์แม่เหล็กจริงของมอเตอร์ (ภาคผนวก ก) มีค่าเท่ากับ 150 mWb แต่ค่าฟลักซ์ประมาณที่ความเร็วต่ำจะคลาดเคลื่อนไปจากค่าจริงค่อนข้างมาก ทั้งนี้ก็น่าจะมาจากผลกระทบของเวลาประวิง (dead time) ของการสวิตช์ที่

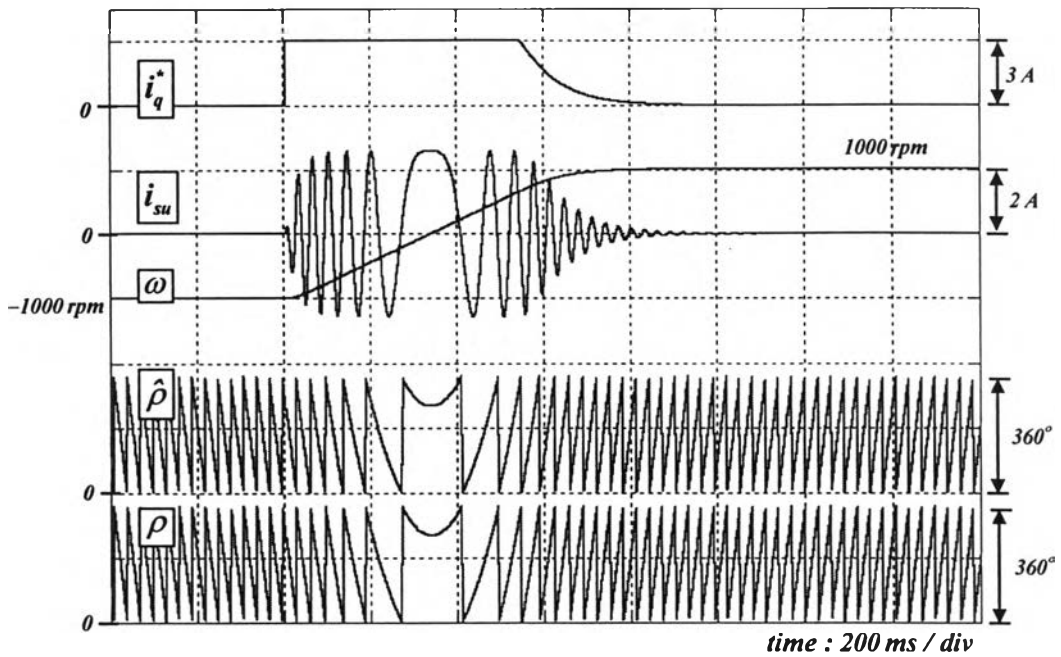
ทำให้แรงดันที่มอเตอร์ได้รับมีค่าลดลง ดังนั้นตัวถังเกิดจึงประมาณค่าฟลักซ์ให้มีขนาดใหญ่เพื่อที่จะชดเชยค่าแรงดันที่หายไป

ผลตอบสนองต่อการกลับทิศความเร็ว

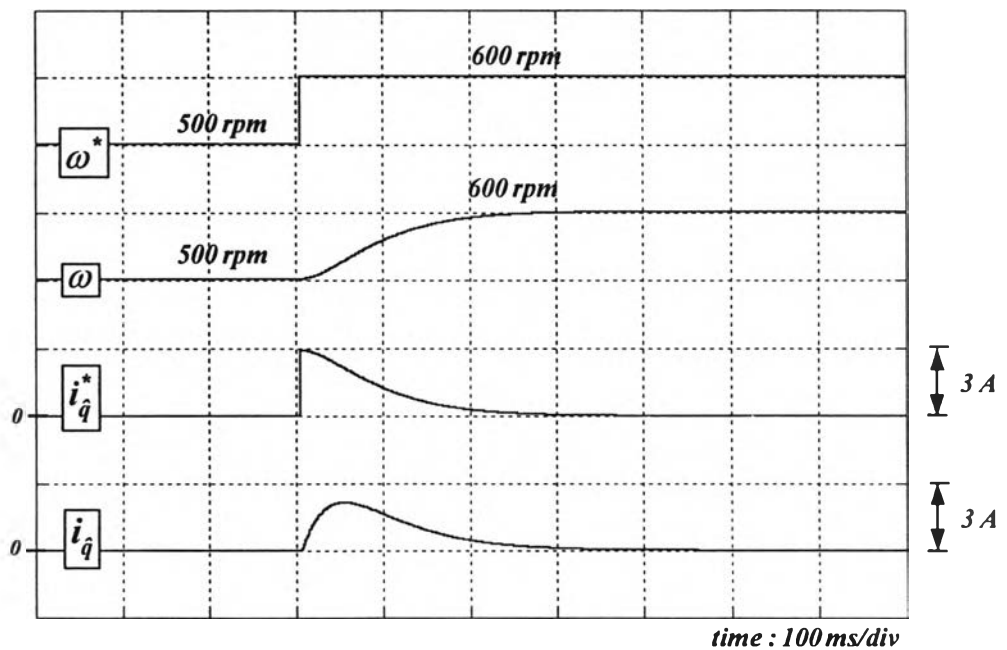
รูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.12-4.13 เป็นผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองในขณะกลับทิศความเร็วจาก $-1000 \rightarrow 1000$ rpm ตามลำดับ จากผลการจำลองการทำงานจะเห็นว่าระบบสามารถควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ได้เป็นอย่างดี

ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ

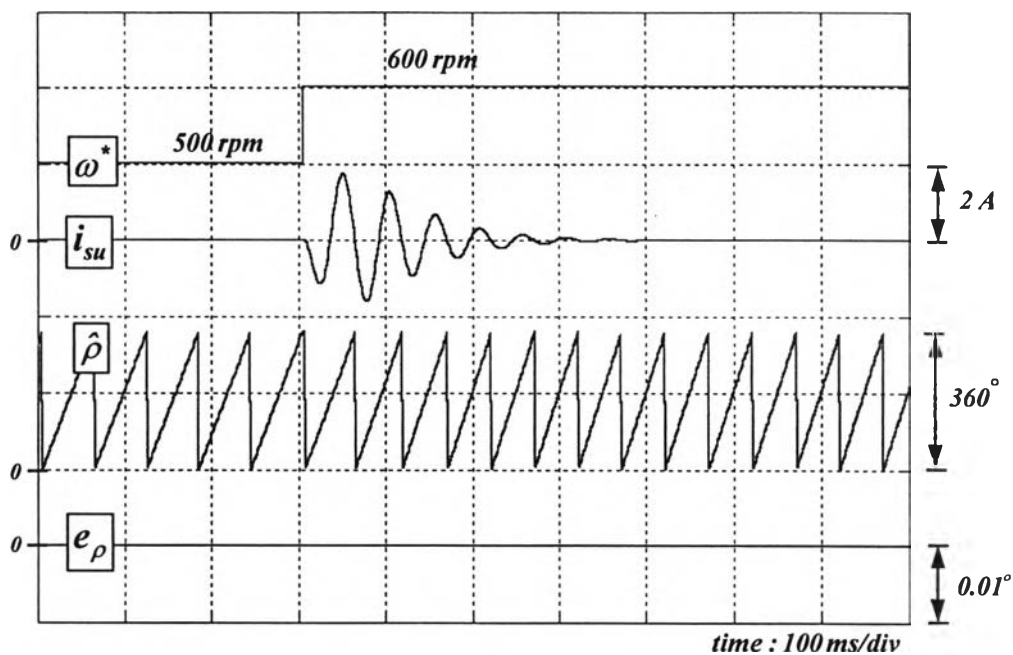
รูปที่ 4.6-4.7 และรูปที่ 4.13-4.14 เป็นผลการจำลองการทำงานและผลการทดลอง ในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งจาก $500 \rightarrow 600$ rpm ตามลำดับ จะเห็นว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมความเร็วได้ตามค่าคำสั่งอย่างรวดเร็ว ซึ่งก็จะสอดคล้องกันระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองการทำงาน สำหรับค่าความผิดพลาดของตำแหน่งเคลื่อนนั้นมีประมาณ 3°



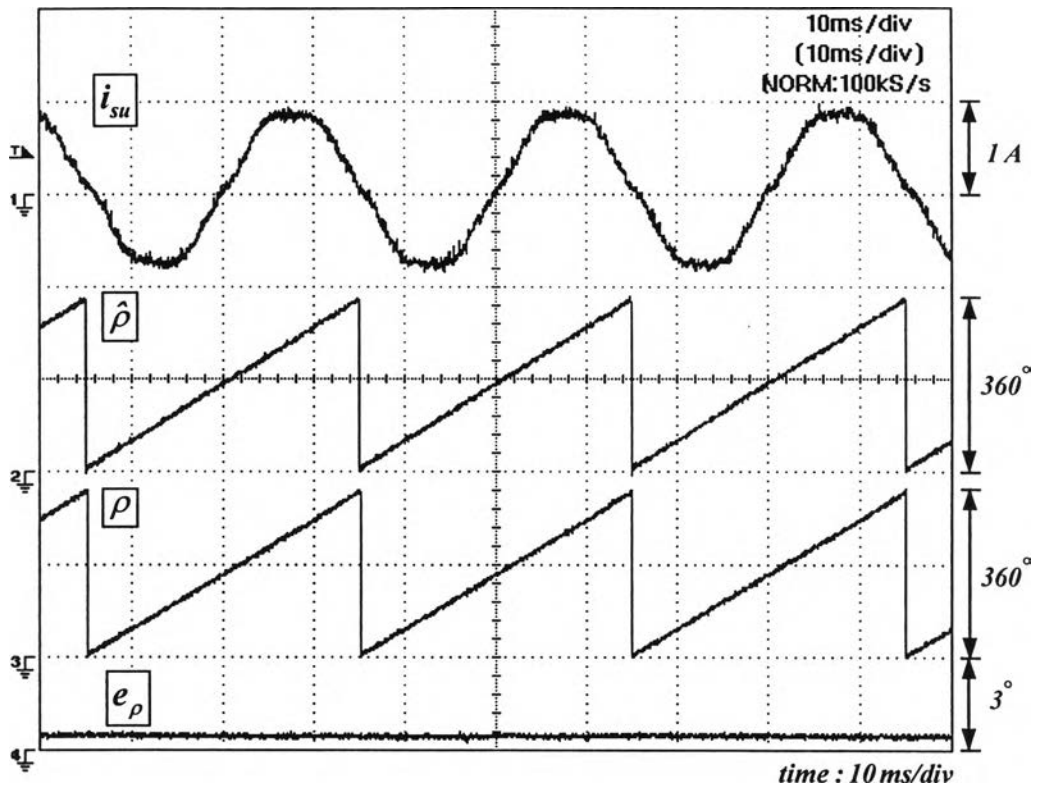
รูปที่ 4.5 ผลการจำลองการทำงานขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต



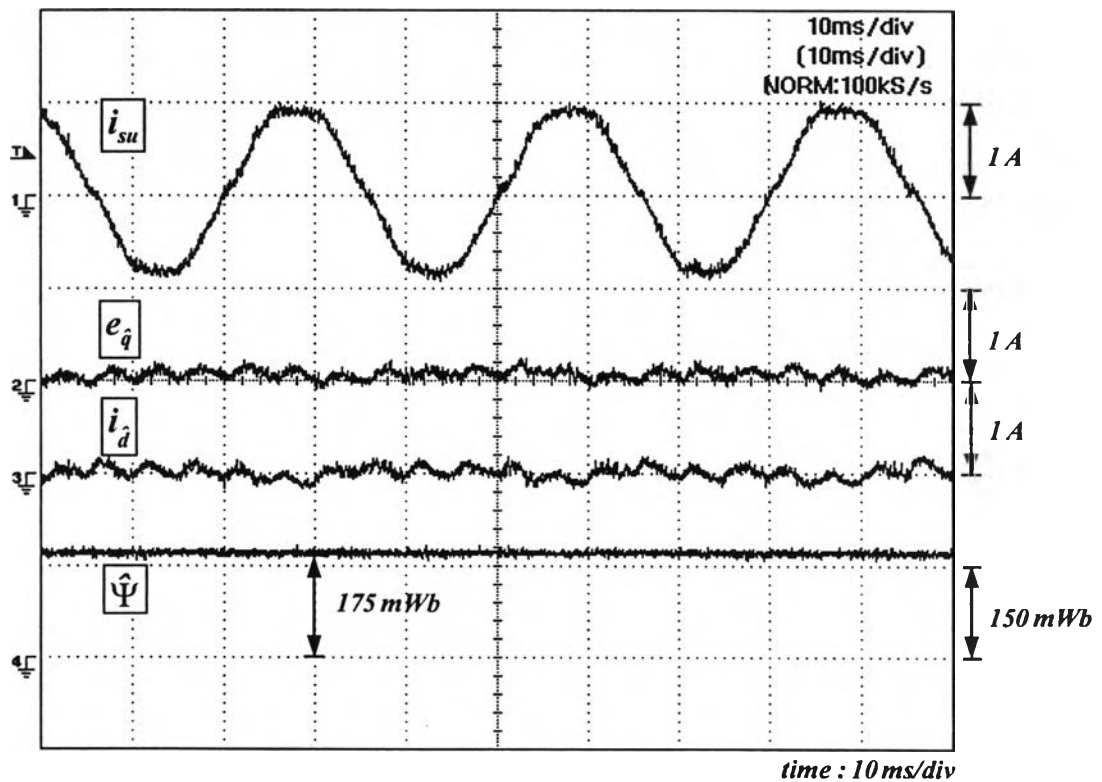
รูปที่ 4.6 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกตในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



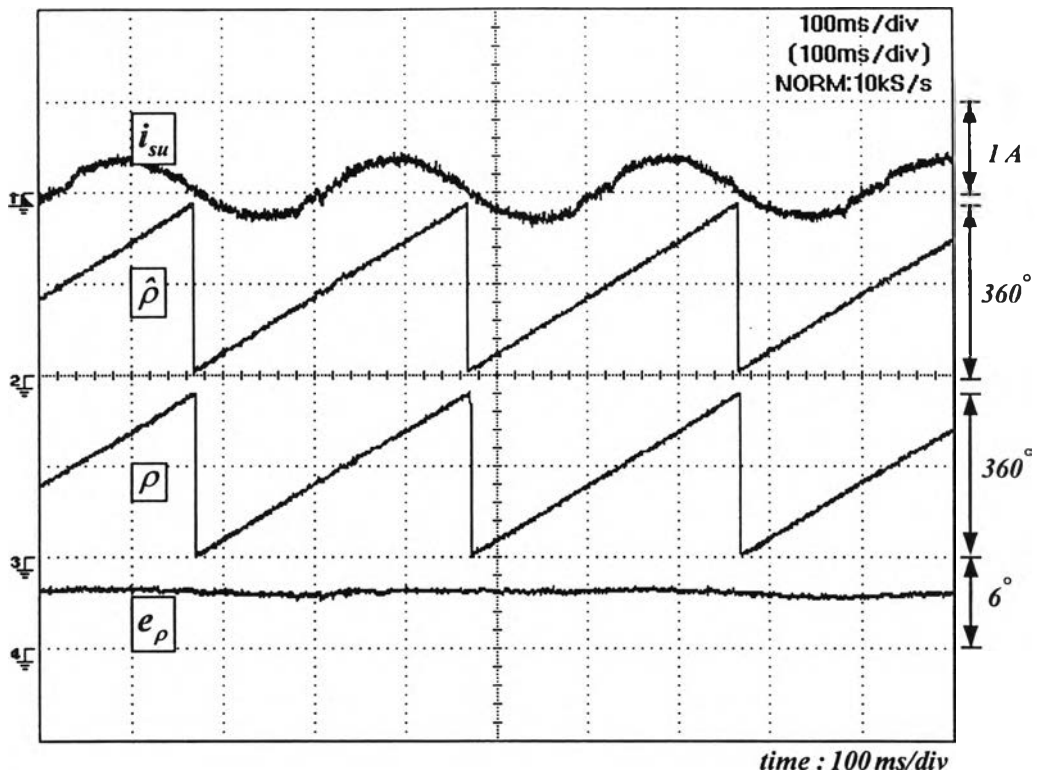
รูปที่ 4.7 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกตในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 500 ไป 600 rpm (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแส)



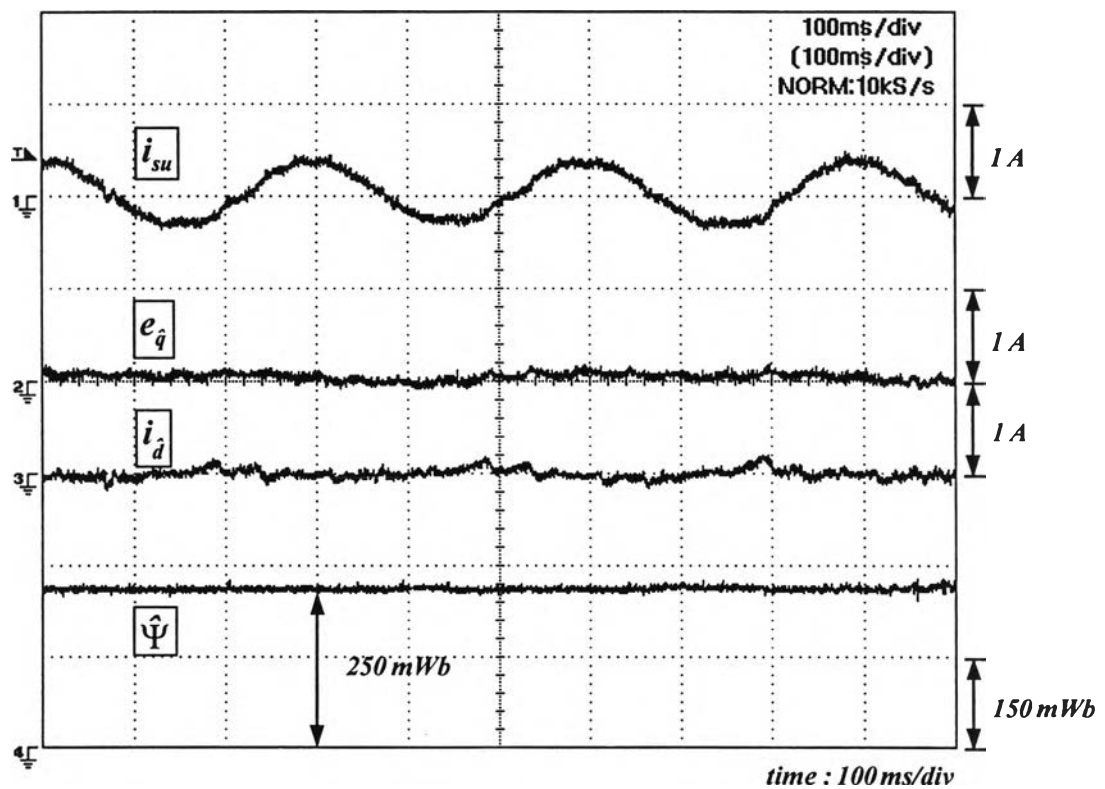
รูปที่ 4.8 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต(รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง)



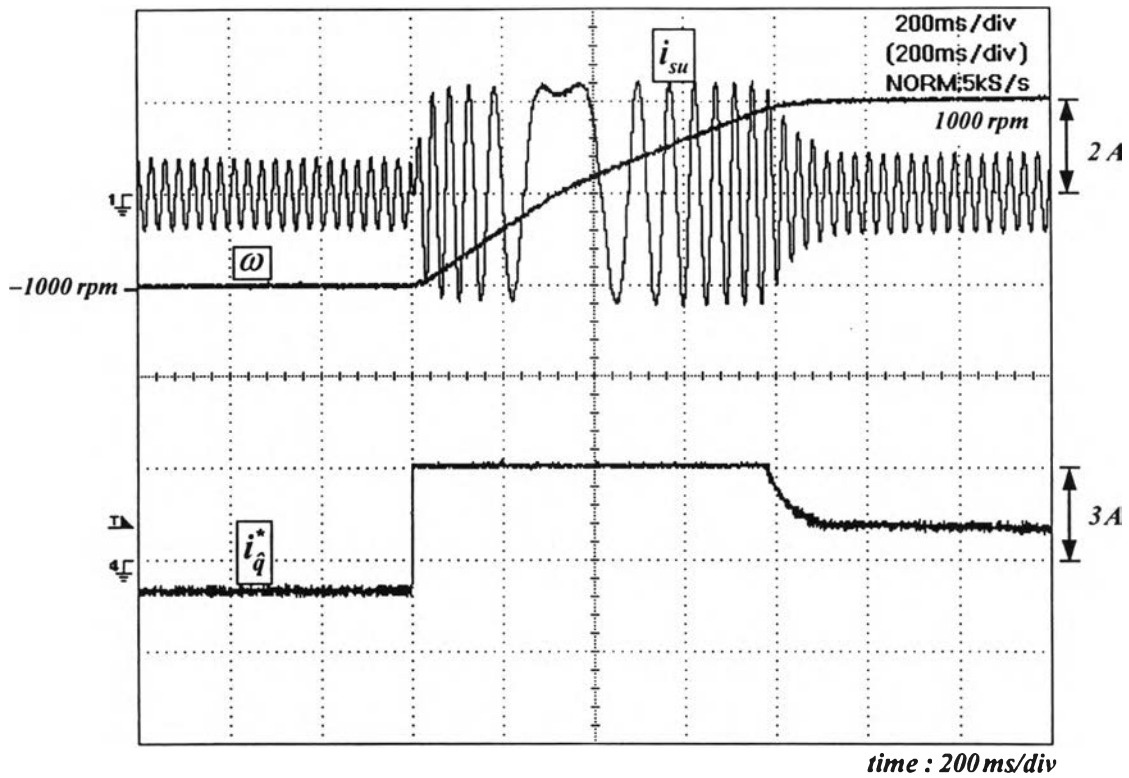
รูปที่ 4.9 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต(รูปคลื่นกระแสและฟลักซ์แม่เหล็ก)



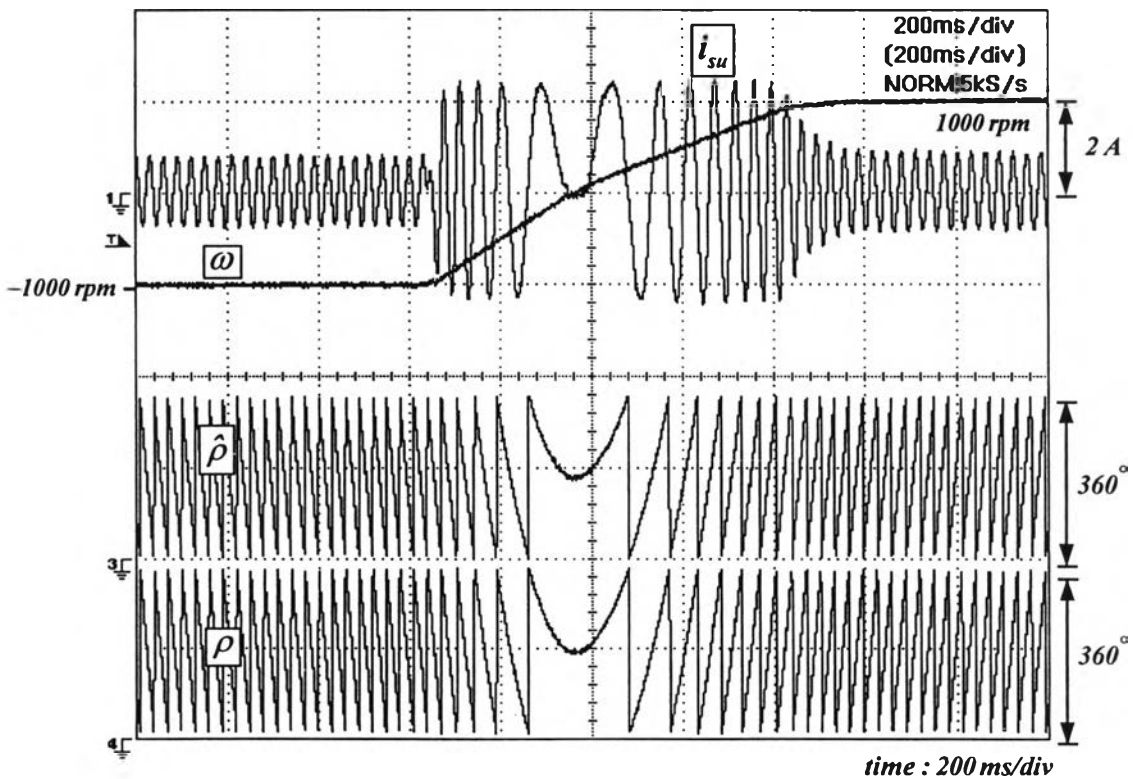
รูปที่ 4.10 ผลการทดลองในสถานะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 100 rpm เมื่อใช้การควบคุมแบบการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต(รูปคลื่นกระแสและฟลักซ์แม่เหล็ก)



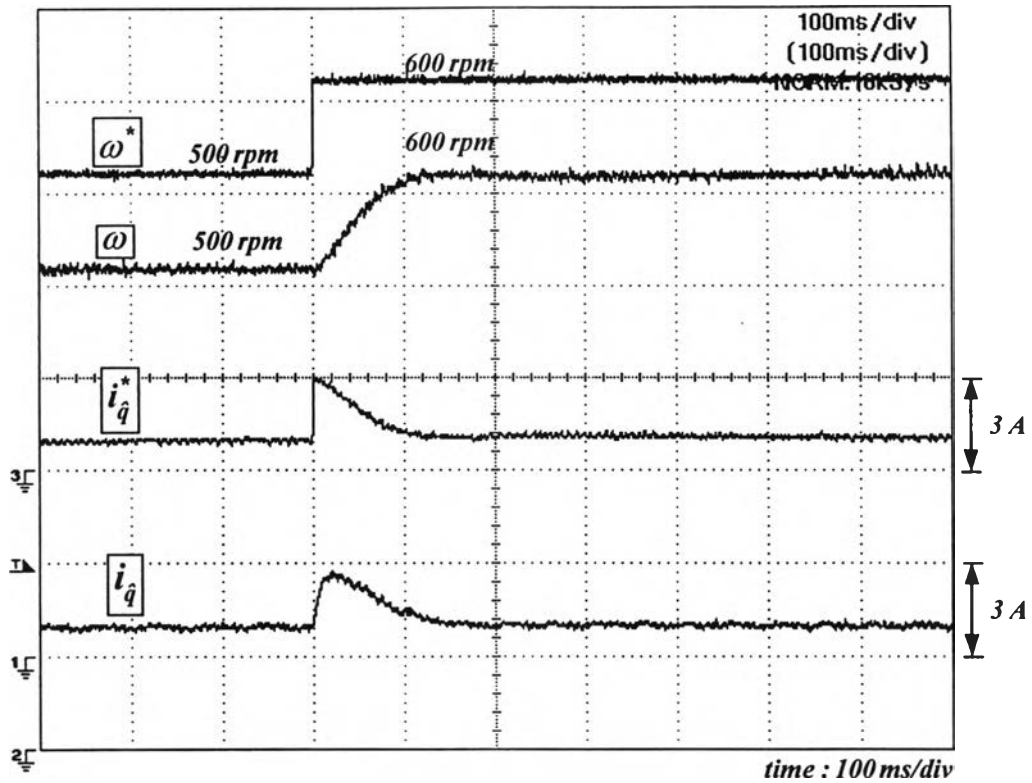
รูปที่ 4.11 ผลการทดลองในสถานะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 100 rpm เมื่อใช้การควบคุมแบบการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต(รูปคลื่นกระแสและฟลักซ์แม่เหล็ก)



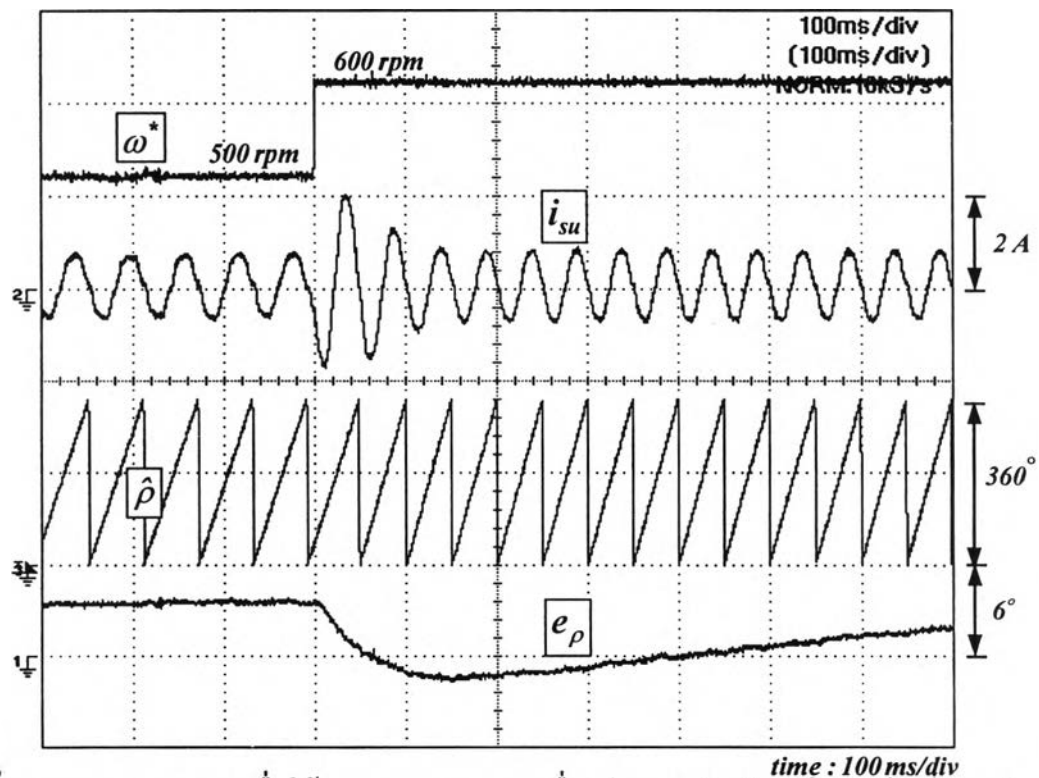
รูปที่ 4.12 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแบบการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



รูปที่ 4.13 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแบบการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นกระแส, ความเร็วและตำแหน่ง)



รูปที่ 4.14 ผลการทดลองเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกตในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



รูปที่ 4.15 ผลการทดลองเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกตในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 500 ไป 600 rpm (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแส)