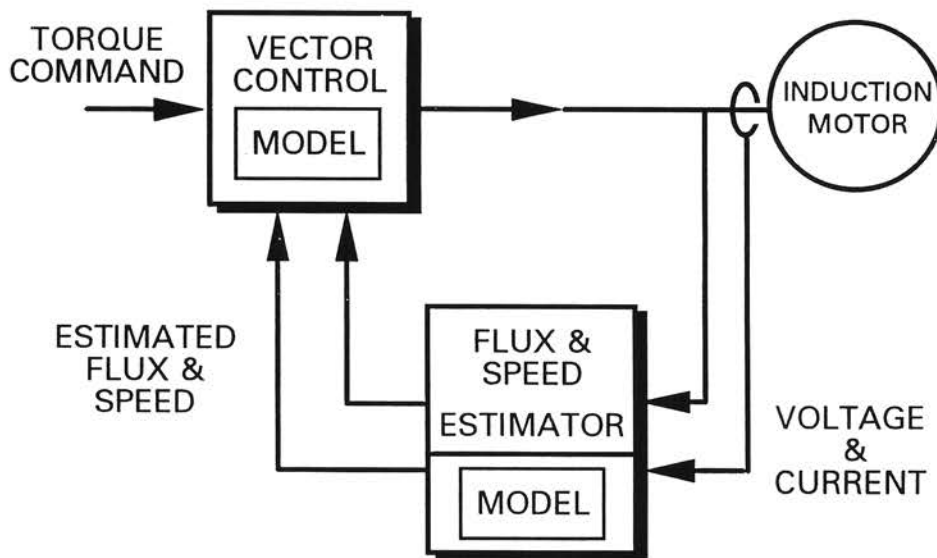


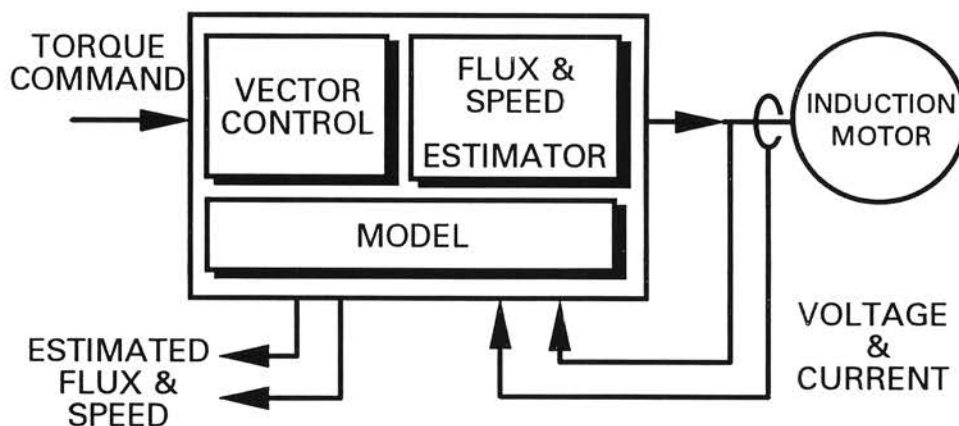
บทที่ 4

โครงสร้างของระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดความเร็ว

ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดความเร็วสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำในปัจจุบัน (รวมทั้งที่นำเสนอในบทที่ 2) โดยส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างที่ยุ่งยากซับซ้อน โครงสร้างของระบบสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 4.1 ซึ่งมีส่วนประกอบใหญ่อยู่สองส่วนคือ ระบบควบคุมเวกเตอร์และระบบประมาณค่าความเร็วโรเตอร์ เนื่องจากการมองส่วนควบคุมแบบเวกเตอร์และส่วนประมาณความเร็วแยกออกจากกันเป็นคนละส่วน โดยที่ระบบควบคุมเวกเตอร์จะสร้างบนแกนหมุน ในขณะที่ระบบประมาณค่าความเร็วโรเตอร์จะสร้างบนแกนนิ่งทำให้จำเป็นต้องใช้แบบจำลองของมอเตอร์สองครั้งในระบบควบคุมเวกเตอร์และระบบประมาณค่าความเร็ว อันเป็นอุปสรรคต่อการนำไปใช้และการพัฒนาให้ได้คุณสมบัติที่ดียิ่งขึ้น ในบทนี้เราจะนำเสนอรูปแบบระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์-เซอร์วัดความเร็วที่มีโครงสร้างปราศจากความซับซ้อนของแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยอาศัยการบูรณาการระหว่างระบบควบคุมเวกเตอร์และระบบประมาณค่าความเร็วบนแกนหมุน ซึ่งเป็นการมองระบบเป็นภาพรวมแทนการมองเป็นส่วนย่อยที่เป็นมาในอดีต ทั้งนี้การพัฒนาทั้งหมดมีการรองรับโดยทฤษฎีในทุกขั้นตอน จึงสะดวกในการนำไปใช้จริงและง่ายต่อการพัฒนาในระดับสูงต่อไป



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดความเร็วทั่วไป



รูปที่ 4.2 โครงสร้างของระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดความเร็วที่พัฒนาขึ้นใหม่

ระบบสังเกตบนแกนโรเตอร์ฟลักซ์

เนื่องจากการบูรณาการระบบสังเกตที่แสดงอยู่บนแกนนิ่งเข้ากับระบบควบคุมเวกเตอร์ที่แสดงอยู่บนแกนหมุนนี้ กระทำได้ยากเพราะแบบจำลองที่ใช้แตกต่างกัน เราจึงมีความจำเป็นที่จะต้องแสดงระบบสังเกตนี้บนแกนหมุนแทน โดยอาศัยการแปลงแกนอ้างอิงจากแกนนิ่งไปยังแกนหมุน เราสามารถเขียนสมการของระบบสังเกตจากสมการที่ (2.5-2.6) ได้ใหม่เป็น (รายละเอียดดูในภาคผนวก (ข))

$$R_s \hat{i}_{sd} + \sigma L_s \frac{d\hat{i}_{sd}}{dt} = \omega_o \sigma L_s \hat{i}_{sq} - \frac{M^2}{L_r} R_r (\hat{i}_{sd} - \hat{i}_o) + v_{sd} - \sigma L_s [H_1' e_1]_d \quad (4.1)$$

$$-R_s \hat{i}_{sq} + \sigma L_s \frac{d\hat{i}_{sq}}{dt} = -\omega_o L_s \hat{i}_{sd} + \frac{M^2}{L_r} \omega_o (\hat{i}_{sd} - \hat{i}_o) + v_{sq} - \frac{M}{L_r} [H_2' e_1]_q - \sigma L_s [H_1' e_1]_q \quad (4.2)$$

$$R_r \hat{i}_o + L_r \frac{d\hat{i}_o}{dt} = R_r (\hat{i}_{sd} - \frac{L_r}{R_r M} [H_2' e_1]_d) \quad (4.3)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_o = p\hat{\omega}_m + \omega_s = p\hat{\omega}_m + \left(\frac{R_r}{L_r} \hat{i}_{sq} - \frac{[H_2' e_1]_q}{M} \right) / \hat{i}_o \quad (4.4)$$

ในที่นี้ $e_1 = \hat{i}_s - \vec{i}_s$ และ $[]_d, []_q$ หมายถึงองค์ประกอบในแกน d และแกน q ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีลักษณะของสมการคล้ายคลึงกับสมการแบบจำลองมอเตอร์ที่ใช้ในระบบควบคุมเวกเตอร์ (สมการ (2.14)-(2.17)) ยกเว้นเทอมที่เป็นการป้อนกลับของค่าความผิดพลาดในการประมาณค่ากระแส แสดงให้เห็นถึงความเกี่ยวข้องกันระหว่างระบบทั้งสอง ซึ่งเป็นช่องทางที่ทำให้เราสามารถรวมระบบทั้งสองเข้าด้วยกันได้ ในส่วนการประมาณค่าความเร็วนั้นเราก็สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ใหม่เป็น

$$\hat{\omega}_m = (k_P + k_I \int dt) [\hat{i}_{sq} - i_{sq}] * pM\hat{i}_o \quad (4.5)$$

ซึ่งเป็นการประมาณค่าความเร็วจากค่าความผิดพลาดของกระแสแรงบิดนั่นเอง

การบูรณาการระบบควบคุมแบบเวกเตอร์และระบบสังเกต

จากโครงสร้างของระบบควบคุมเวกเตอร์และระบบสังเกต จะเห็นได้ว่ามีการใช้แบบจำลองของมอเตอร์ในทั้งสองระบบ ดังนั้นเมื่อประกอบระบบทั้งสองเข้าด้วยกันเพื่อสร้างระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดความเร็ว จะเกิดความซับซ้อนในการใช้แบบจำลอง ซึ่งเรามักจะพบเห็นได้บ่อยในระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดความเร็วทั่วไป ทั้งนี้ก็เนื่องจากผู้วิจัยขาดความเข้าใจในโครงสร้างและหลักการพื้นฐานของทั้งส่วนระบบควบคุมเวกเตอร์และระบบสังเกต การบูรณาการระบบทั้งสองเข้าด้วยกันและลดความซับซ้อนของแบบจำลอง สามารถกระทำได้ดังนี้คือ ในอันดับแรกเนื่องจากแรงดันที่ป้อนให้กับระบบสังเกตนั้นเป็นแรงดันที่ได้มาจากการควบคุมแยกอิสระที่มีการชดเชยแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำแล้วตามสมการ (2.18) ,(2.19) ดังนั้นสมการของระบบสังเกต (3.1), (3.2) จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$R_s \hat{i}_{sd} + \sigma L_s \frac{d\hat{i}_{sd}}{dt} = u_{sd} - \sigma L_s [H_1' e_1]_d \quad (4.6)$$

$$R_s \hat{i}_{sq} + \sigma L_s \frac{d\hat{i}_{sq}}{dt} = u_{sq} - \frac{M}{L_r} [H_2' e]_q - \sigma L_s [H_1' e_1]_q \quad (4.7)$$

ซึ่งจะพบว่าในกรณีที่ไม่มีการป้อนกลับของค่าความผิดพลาดในการประมาณกระแส ($H_1' = H_2' = 0$) สมการของระบบสังเกตจะตรงกันกับสมการของแบบจำลองในระบบควบคุมเวกเตอร์ (สมการ(2.20) และ (2.21)) เราจึงสามารถสร้างแบบจำลองเพียงระบบเดียวและใช้ร่วมกันได้ในทั้งระบบควบคุมเวกเตอร์และระบบสังเกต แต่ถ้าระบบสังเกตมีการป้อนกลับค่าความผิดพลาดสมการในส่วนแบบจำลองในสองระบบจะแตกต่างกัน ซึ่งเรามีวิธีการแก้ไขปัญหานี้ได้โดยการปรับเปลี่ยนส่วนการควบคุมแยกอิสระ ให้มีการป้อนกลับค่าความผิดพลาดของการประมาณค่ากระแส

แสรวมอยู่ด้วยตามสมการ

$$v_{sd} = u_{sd} - \omega_o \sigma L_s \hat{i}_{sq} + \frac{M^2}{L_r} R_r (\hat{i}_{sd} - \hat{i}_o) + [K e_1]_d \quad (4.8)$$

$$v_{sq} = u_{sq} + \omega_o L_s \hat{i}_{sd} - \frac{M^2}{L_r} \omega_o (\hat{i}_{sd} - \hat{i}_o) + [K e_1]_q \quad (4.9)$$

วิธีนี้เป็นการผนวกการควบคุมแบบไปหน้า (Feed Forward Control) ของการควบคุมแยกอิสระ เข้ากับการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ผ่านอัตราขยาย K ซึ่งจะทำให้เราสามารถปรับปรุงคุณภาพการควบคุมของระบบควบคุมเวกเตอร์ได้ดียิ่งขึ้นด้วย โดยการเลือกใช้ค่า K ที่เหมาะสม ดังนั้นสมการของระบบสังเกตจะเปลี่ยนไปเป็น

$$R_s \hat{i}_{sd} + \sigma L_s \frac{d\hat{i}_{sd}}{dt} = u_{sd} + [K e_1]_d - \sigma L_s [H_1' e_1]_d \quad (4.10)$$

$$R_s \hat{i}_{sq} + \sigma L_s \frac{d\hat{i}_{sq}}{dt} = u_{sq} + [K e_1]_q - \frac{M}{L_r} [H_2' e_1]_q - \sigma L_s [H_1' e_1]_q \quad (4.11)$$

ถ้าเรากำหนดให้

$$[K e_1]_d = \sigma L_s [H_1' e_1]_d \quad (4.12)$$

$$[K e_1]_q = \frac{M}{L_r} [H_2' e_1]_q + \sigma L_s [H_1' e_1]_q \quad (4.13)$$

จะได้สมการของระบบสังเกตเป็นสมการของแบบจำลองในระบบควบคุมเวกเตอร์เดิม กล่าวคือสมการ (2.20), (2.21) ดังนั้นเราก็สามารถจะทำการลดทอนแบบจำลองในระบบได้โดยใช้แบบจำลองในระบบควบคุมเวกเตอร์เพียงตัวเดียว ในขณะที่การควบคุมแยกอิสระมีการปรับปรุงเพิ่มการป้อนกลับเข้ามาเป็น

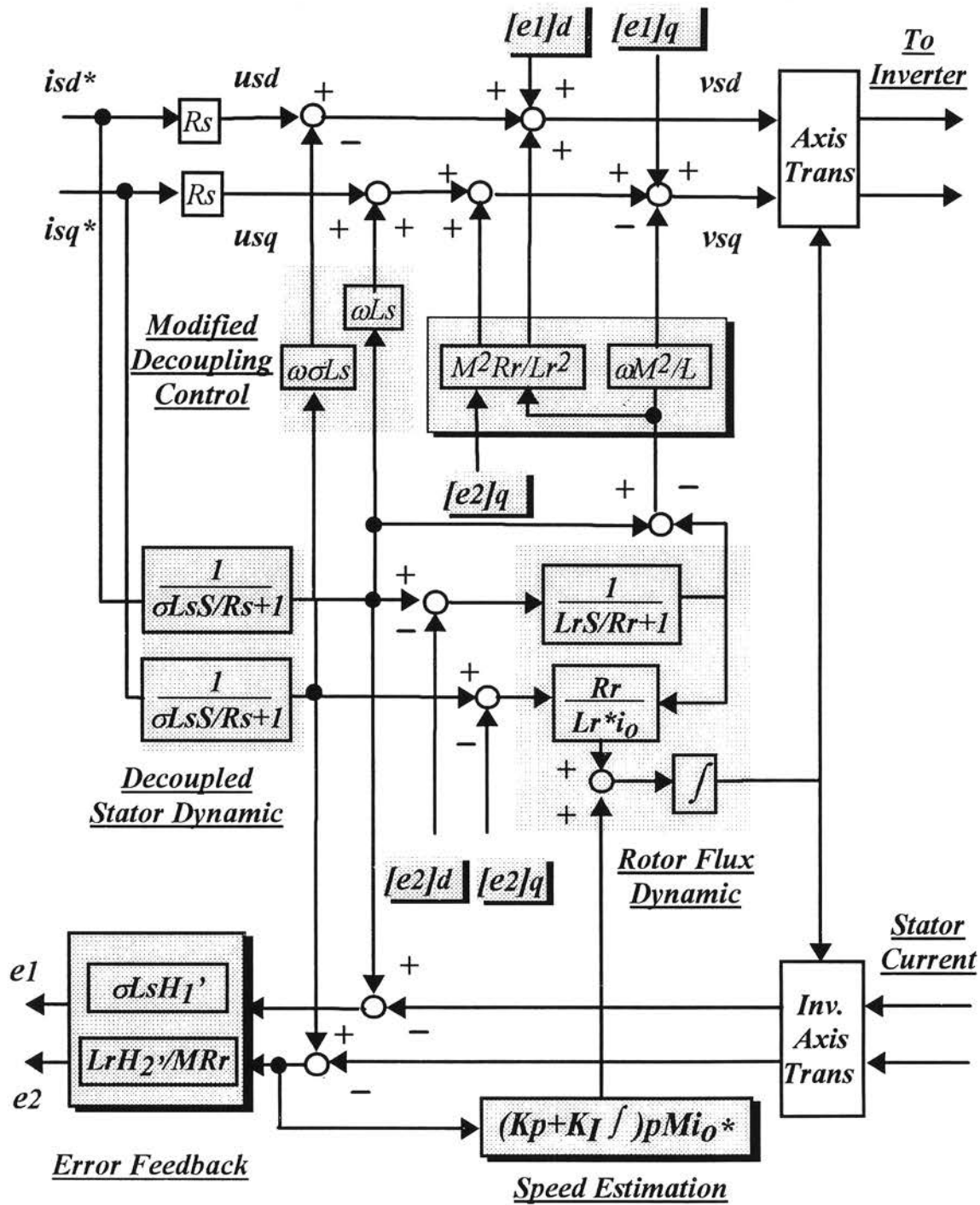
$$v_{sd} = u_{sd} - \omega_o \sigma L_s \hat{i}_{sq} + \frac{M^2}{L_r} R_r (\hat{i}_{sd} - \hat{i}_o) + \sigma L_s [H_1' e_1]_d \quad (4.14)$$

$$v_{sq} = u_{sq} + \omega_o L_s \hat{i}_{sd} - \frac{M^2}{L_r} \omega_o (\hat{i}_{sd} - \hat{i}_o) + \frac{M}{L_r} [H_2' e_1]_q + \sigma L_s [H_1' e_1]_q \quad (4.15)$$

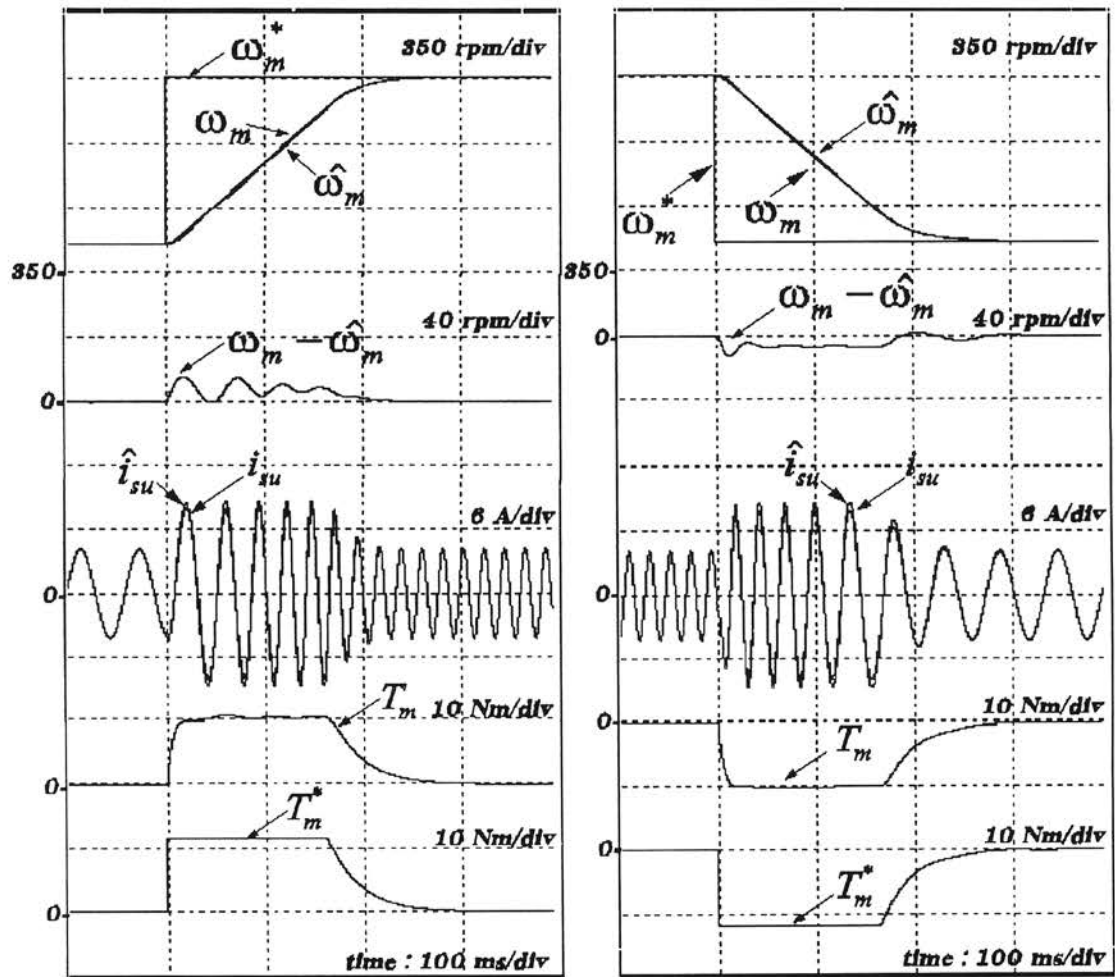
ระบบที่มีการบูรณาการแล้วจะมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 4.3

เมื่อได้ทำการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดความเร็วที่พัฒนาขึ้นมา โดยในกรณีที่ไม่มีการป้อนกลับของสัญญาณขาออกผิดพลาดที่ตัวสังเกต (รูปที่ 4.4, 4.5 (ก)) ปรากฏว่าได้ผลการตอบสนองเหมือนกันกับระบบควบคุมแบบดั้งเดิม (เปรียบเทียบกับรูปที่ 3.17

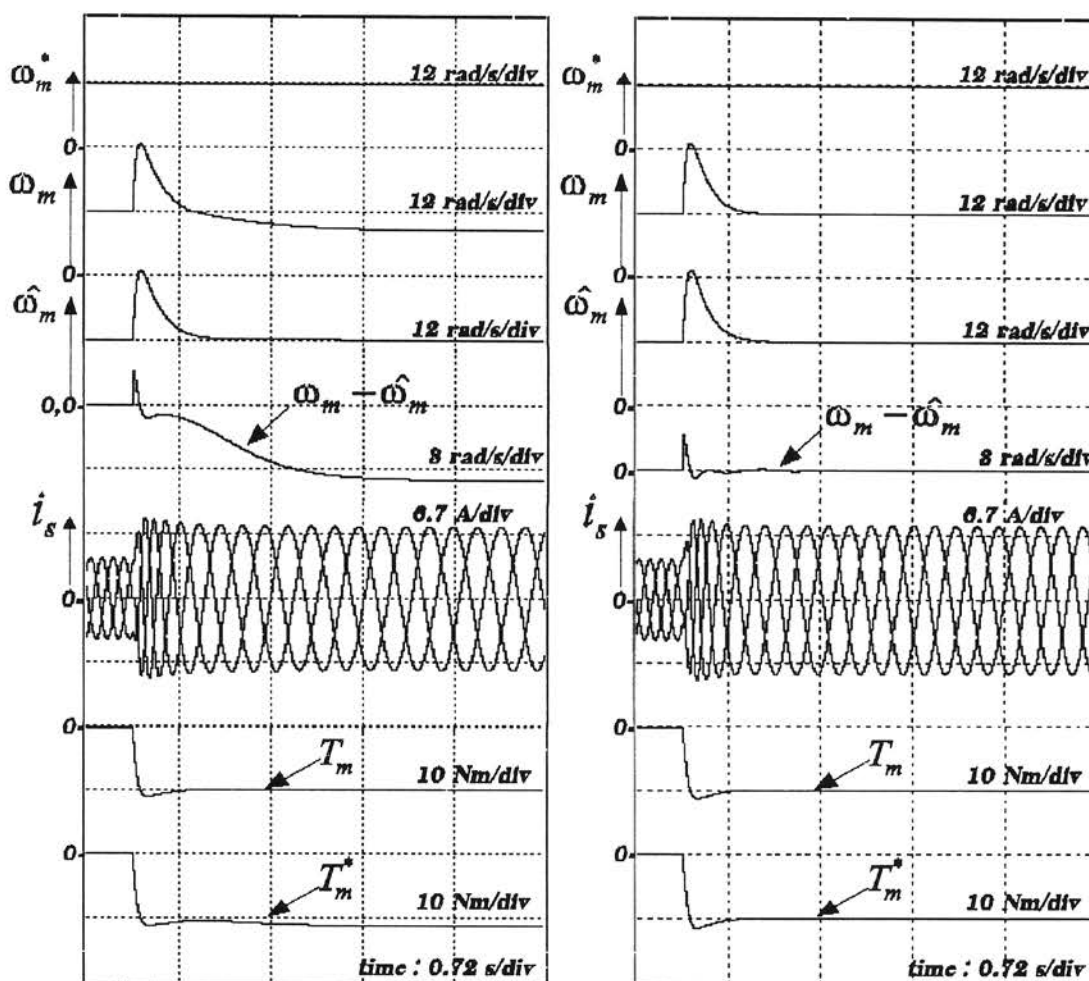
และ 3.6 ตามลำดับ) เมื่อเราทำการป้อนกลับที่ตัวส่งเกตเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพ (รูปที่ 4.5 (ข)) เราพบว่าผลตอบโดยรวมยังคงคล้ายคลึงกันกับการควบคุมแบบเดิม (เปรียบเทียบกับรูปที่ 3.8) อย่างไรก็ตามเมื่อเรามาดูที่ผลตอบแบบแรมปีของระบบใน รูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าขนาดกระแสประมาณกับกระแสจริงมีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าในรูปที่ 3.20 ยังผลให้ผลตอบสนองของระบบโดยรวมดีขึ้น (เวลาในการตอบสนองประมาณ 250 ms เมื่อเทียบกับการควบคุมแบบเดิม (รูปที่ 3.20) ซึ่งมีค่าประมาณ 300 ms) ที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากการที่เราทำการดัดแปลงระบบในส่วนการควบคุมแยกอิสระ โดยรวมการป้อนกลับและป้อนไปหน้าของกระแสที่ผิดพลาดนั่นเอง กล่าวโดยสรุปก็คือระบบที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้นอกจากจะทำงานได้เหมือนระบบเดิมโดยไม่ยุ่งยากซับซ้อนแล้ว เรายังสามารถปรับปรุงการควบคุมเวกเตอร์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้อีกด้วย



รูปที่ 4.3 ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดความเร็วหลังการบูรณาการแบบมีการป้อนกลับในการควบคุมแยกอิสระ



รูปที่ 4.4 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่มีการบูรณาการ โดยทำการเร่งความเร็ว 500->1420 rpm และลดความเร็ว 1420->500 rpm ที่อัตราขยายแบบปรับตัว $K_p = 2$, $K_i = 400$



ก) ในกรณีที่ไม่มีการป้อนกลับ

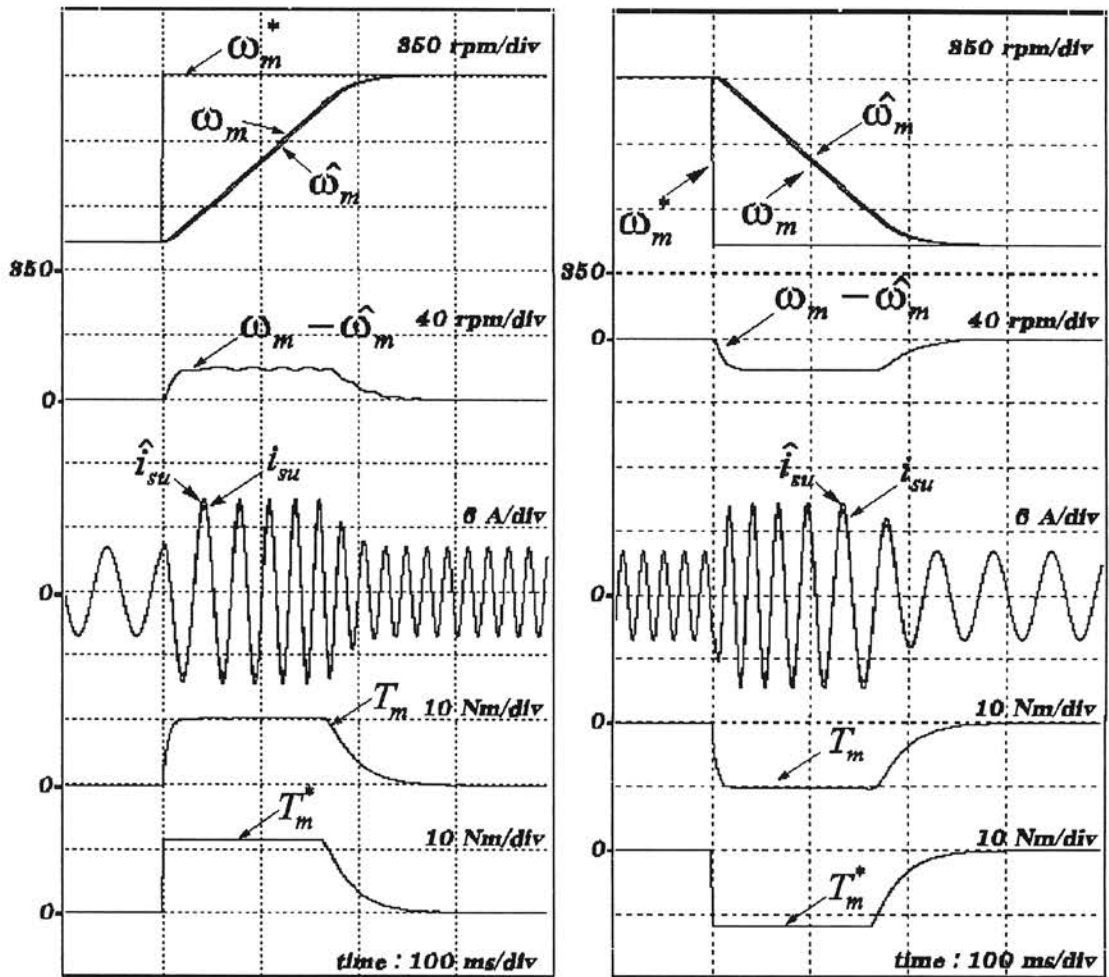
$$(H_1' = 0, H_2' = 0)$$

ข) กรณีมีการป้อนกลับ

$$(H_1' = 0, H_2' = -0.9 R_s \cdot I)$$

รูปที่ 4.5 ผลการจำลองการทำงานระบบที่มีการบูรณาการในขณะที่มีโหลดแบบคีนพลังงานขนาด

$$-10 \text{ Nm} \quad (K_p=2, K_f=400)$$



รูปที่ 4.6 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่มีการบูรณาการ โดยทำการเร่งความเร็ว 500→1420 rpm และลดความเร็ว 1420→500 rpm ที่อัตราขยายแบบปรับตัว $K_p = 2, K_I = 400$ โดยมีการป้อนกลับ ($H_1 = 0, H_2 = -0.9 R_s \cdot I$)