

บทที่ 5

ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์

เนื่องจากสมการของตัวสังเกตต้องใช้ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของมอเตอร์ในการประมาณค่าตำแหน่งและความเร็ว ซึ่งตามปกติในการใช้งานจริง ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ และค่าความเหนี่ยวนำก็จะเปลี่ยนตามการอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์เหล่านี้ อาจทำให้เกิดความผิดพลาดจากการประมาณในตัวสังเกตได้ ดังนั้นเนื้อหาวิทยานิพนธ์ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวทางการวิเคราะห์และคำนวณหาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ต่อการประมาณค่าตำแหน่ง ความเร็ว และ ฟลักซ์ ของตัวสังเกต

จากสมการของตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว (สมการที่ (2.9)) เมื่อพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงจากค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำ สามารถเขียนสมการของตัวสังเกตใหม่ ได้เป็น

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i} \\ \hat{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{R} \mathbf{I} & -\mathbf{J} \hat{\omega} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J} \hat{\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i} \\ \hat{\lambda} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\hat{L}} \mathbf{I} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \bar{u} + \begin{bmatrix} \mathbf{G} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix} [\hat{i} - \bar{i}] \quad (5.1)$$

โดยที่ \hat{R} และ \hat{L} คือค่าที่ใช้คำนวณในตัวสังเกต $\mathbf{G} = G_1 \mathbf{I} + G_2 \mathbf{J}$ และ $\mathbf{H} = H_1 \mathbf{I} + H_2 \mathbf{J}$

5.1 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทาน

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาผลกระทบจากความผิดพลาดของค่าความต้านทานเพียงอย่างเดียวโดยให้ $\hat{L} = L$ จากสมการที่ (2.5) และ (5.1) ค่าความผิดพลาดของกระแสประมาณและฟลักซ์ประมาณ ในกรณีนี้จะเป็นดังสมการที่ (5.2) และ (5.3) ตามลำดับ

$$\bar{e}_i = \mathbf{R}(s) \Delta R \hat{i} + \mathbf{G}(s) \Delta \omega (-\mathbf{J} \hat{\lambda}) \quad (5.2)$$

$$\bar{e}_\lambda = \left\{ \mathbf{G}_p(s) \left[(s - R/L) \mathbf{I} - \mathbf{G} \right] - \frac{\mathbf{H}}{L} \right\} \mathbf{J} \Delta \omega \hat{\lambda} - \frac{\mathbf{H}}{L} \mathbf{G}_p(s) \Delta R \hat{i} \quad (5.3)$$

โดยที่

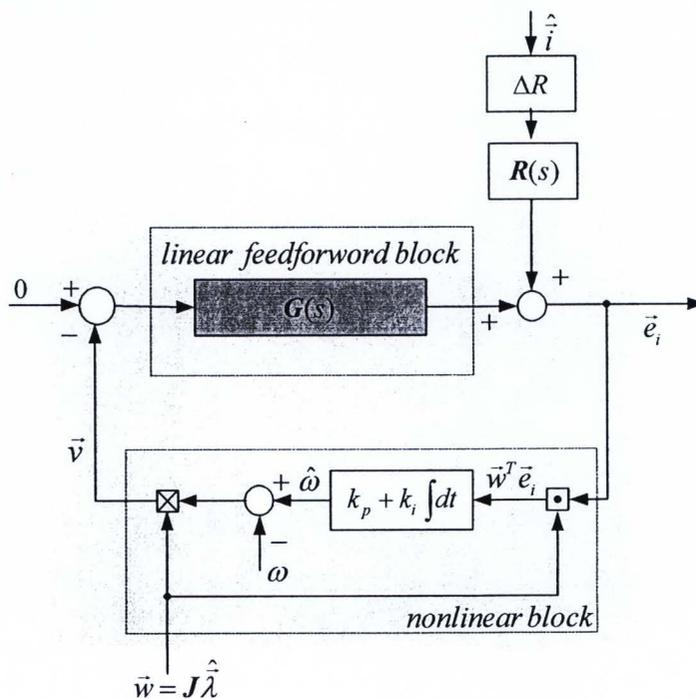
$$\mathbf{G}_p(s) = \left\{ \left[s\mathbf{I} - \frac{\mathbf{R}}{L} - \mathbf{G} \right] \left[s\mathbf{I} - \mathbf{J}\omega \right] + \mathbf{J} \frac{\omega}{L} \mathbf{H} \right\}^{-1} = \frac{L}{s} \mathbf{G}(s) \quad (5.4)$$

$$\mathbf{R}(s) = -\frac{1}{L} \mathbf{G}_p(s) [s\mathbf{I} - \mathbf{J}\omega] \quad (5.5)$$

$$\Delta R = \hat{R} - R, \Delta\omega = \hat{\omega} - \omega \quad (5.6)$$

5.1.1 ผลกระทบต่อการประมาณค่าความเร็วจากค่าความผิดพลาดของค่าความต้านทาน

จากสมการที่ (2.10) และ (5.1) แผนภาพบล็อกของค่าความผิดพลาดซึ่งรวมผลกระทบจากค่าความผิดพลาดของค่าความต้านทานแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 ส่วนที่แรงงาในรูปที่ 5.1 คือแผนภาพบล็อกของค่าความผิดพลาดที่เคยแสดงไว้ก่อนหน้านี้ในรูปที่ 3.1 เสถียรภาพของระบบประมาณในกรณีที่มีค่าความผิดพลาดของค่าความต้านทานจึงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติ PR ของฟังก์ชันโอนย้าย $\mathbf{G}(s)$ ซึ่งนำเสนอแล้วในบทที่ 3 ในขณะที่ผลกระทบต่อการประมาณค่าความเร็วจากค่าความผิดพลาดของค่าความต้านทานนั้นขึ้นอยู่กับฟังก์ชันโอนย้าย $\mathbf{R}(s)$



รูปที่ 5.1 แผนภาพบล็อกการประมาณค่าความเร็วบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ที่รวมผลกระทบจากค่าความผิดพลาดของค่าความต้านทาน (ΔR)

อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาถึงคุณสมบัติ PR ของฟังก์ชันโอนย้าย $G(s)$ เมื่อเกิดความผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์ อัตราขยายป้อนกลับที่ใช้จริงจะไม่สอดคล้องตามเงื่อนไข PR (สมการที่ (3.26)) แต่มิได้หมายความว่าระบบประมาณจะขาดเสถียรภาพทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราขยายการปรับตัวที่ใช้ในขณะนั้น ในที่นี้เราจึงสมมุติว่าตัวสังเกตที่ออกแบบไว้ยังคงมีเสถียรภาพอยู่ (ชั่วคราวรอบปิดยังคงอยู่ฝั่งซ้ายของระนาบเชิงซ้อนถึงแม้ว่าจะมีศูนย์ที่ไม่เสถียรอยู่ทางฝั่งขวาของระนาบเชิงซ้อนก็ตาม) และสามารถพิจารณาผลกระทบในสภาวะอยู่ตัว ฟังก์ชันโอนย้าย $R(s)$ ในสมการที่ (5.5) นั้นเมื่อพิจารณาในสภาวะอยู่ตัวแล้ว สามารถคำนวณค่าได้โดยแทน sI ด้วย $J\omega$ ดังแสดงในสมการที่ (5.7)

$$R(s)|_{sI \rightarrow J\omega} = -\frac{1}{L} G_p(s)|_{sI \rightarrow J\omega} [J\omega - J\omega] = 0 \quad (5.7)$$

จะพบว่าเมื่อเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวแล้ว ฟังก์ชันโอนย้าย $R(s)$ จะมีค่าเป็นศูนย์ นั้นหมายความว่าความผิดพลาดของค่าความต้านทานในแบบจำลองไม่ส่งผลกระทบต่อการประมาณค่าความเร็วในสภาวะอยู่ตัว

5.1.2 ผลกระทบต่อการประมาณค่าตำแหน่งจากค่าความผิดพลาดของค่าความต้านทาน

เนื่องจาก ΔR ไม่ส่งผลกระทบต่อการประมาณค่าความเร็วและระบบประมาณยังคงมีเสถียรภาพอยู่ จึงทำให้ค่าความผิดพลาดของความเร็วเข้าสู่ศูนย์ในสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นโดยการแทนค่า $\Delta\omega = 0$ และ $G_p(s)|_{sI \rightarrow J\omega}$ ลงในสมการที่ (5.3) จะได้ค่าความผิดพลาดของฟลักซ์ประมาณในสภาวะอยู่ตัว ดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \bar{e}_\lambda &= \hat{\lambda} - \bar{\lambda} = [J\omega]^{-1} (-\Delta R \hat{i}) \\ \therefore J\omega(\hat{\lambda} - \bar{\lambda}) &= -\Delta R \hat{i} \end{aligned} \quad (5.8)$$

สำหรับการควบคุมแบบแรงบิดต่อกระแสสูงสุด เวกเตอร์กระแส \hat{i} จะตั้งฉากกับเวกเตอร์ฟลักซ์ $\hat{\lambda}$ ดังนั้นเวกเตอร์ค่าความผิดพลาดของฟลักซ์ก็จะขนานกับ $\hat{\lambda}$ และ $\bar{\lambda}$ ด้วย ซึ่งผลที่ได้หมายความว่า ΔR จะส่งผลกระทบต่อขนาดของฟลักซ์เท่านั้น สำหรับเฟสหรือตำแหน่งนั้นยังคงถูกต้อง สมการที่ (5.9) - (5.10) แสดงถึงค่าความผิดพลาดของฟลักซ์ในเทอมของขนาดและตำแหน่งตามลำดับ

$$e_\lambda = \hat{\lambda} - \lambda = \frac{-\Delta R \hat{i}_q}{\omega} \quad (5.9)$$

$$e_\rho = \hat{\rho} - \rho = 0 \quad (5.10)$$

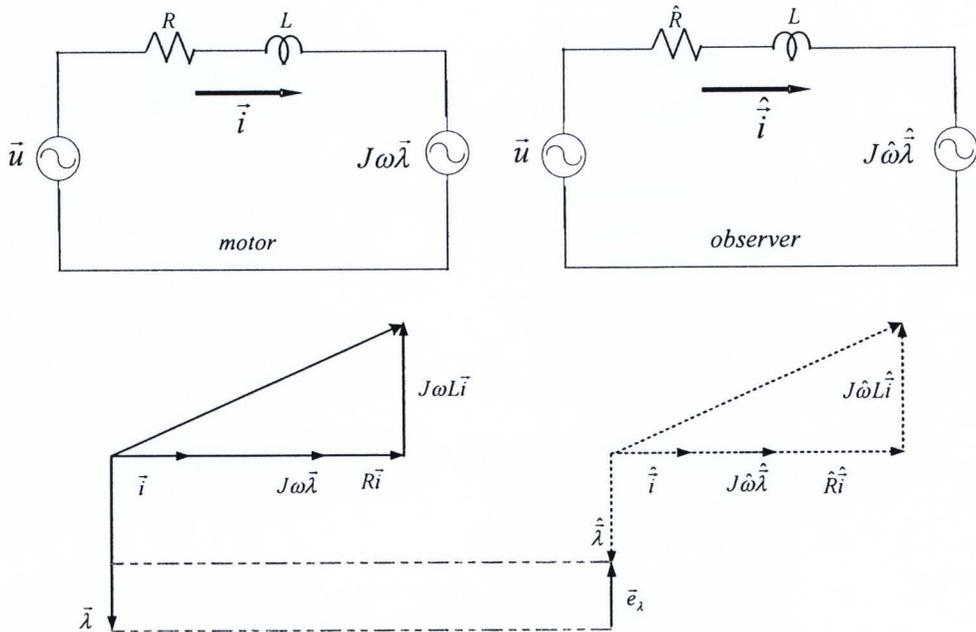
นอกจากนั้นแล้วเมื่อ $\Delta\omega = \hat{\omega} - \omega = 0$ แล้วจะได้ว่าค่าความผิดพลาดของกระแสประมาณในสภาวะอยู่ตัวเป็นศูนย์ด้วย โดยพิจารณาจากสมการต่อไปนี้

$$\bar{e}_i = \mathbf{R}(s)|_{s \rightarrow J\omega} \Delta R \hat{i} + \mathbf{G}(s)|_{s \rightarrow J\omega} \Delta\omega (-J\hat{\lambda})$$

แต่ในสภาวะอยู่ตัว $\mathbf{R}(s)|_{s \rightarrow J\omega} = 0$

$$\therefore \bar{e}_i = \hat{i} - i = 0 \quad (5.11)$$

จากสมการที่ (5.8) และ (5.11) สามารถเขียนแผนภาพเวกเตอร์ของมอเตอร์และตัวสังเกตได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แผนภาพเวกเตอร์ในสภาวะอยู่ตัวของมอเตอร์และตัวสังเกตในกรณีมีค่าความผิดพลาดของค่าความต้านทาน

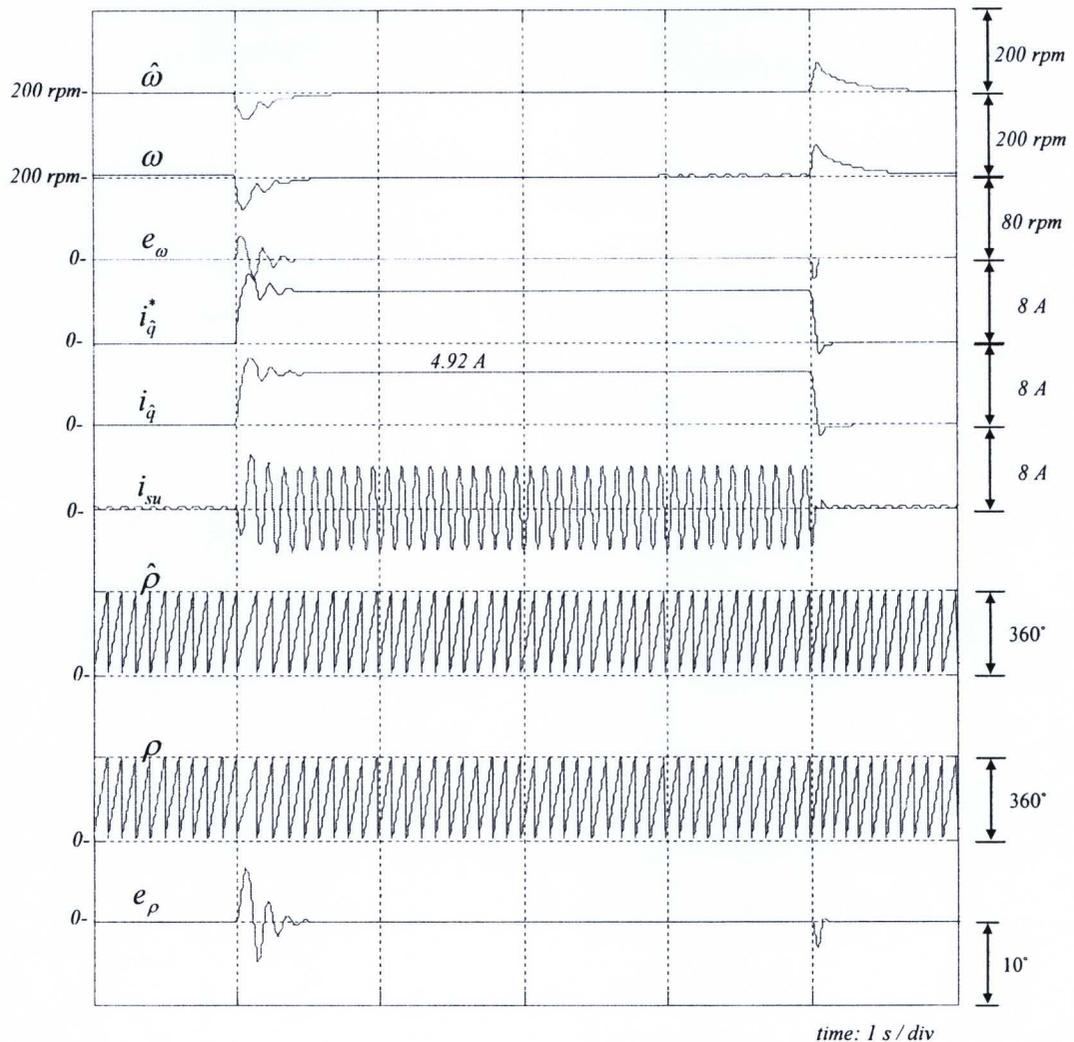
จากสมการที่ (5.10) และแผนภาพเวกเตอร์ในรูปที่ 5.2 สามารถสรุปได้ว่า ΔR ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อการทำงานประมาณค่าตำแหน่ง ความเร็ว และกระแส แต่จะส่งผลทำให้ขนาดของฟลักซ์ประมาณผิดพลาดได้ ซึ่งค่าความผิดพลาดขึ้นกับขนาดของแรงบิดและความเร็วในขณะนั้น ๆ ผล

นั้น ๆ ผลจากความผิดพลาดเชิงขนาดของฟลักซ์ประมาณจะทำให้การควบคุมแรงบิดเกิดความผิดพลาดได้ กล่าวคือแรงบิดที่เกิดขึ้นจริง (T_m) จะคลาดเคลื่อนแรงบิดประมาณหรือคำสั่ง (T_{est}) ได้ ซึ่งค่าความผิดพลาดของแรงบิดจะคำนวณได้จากสมการที่ (5.12)

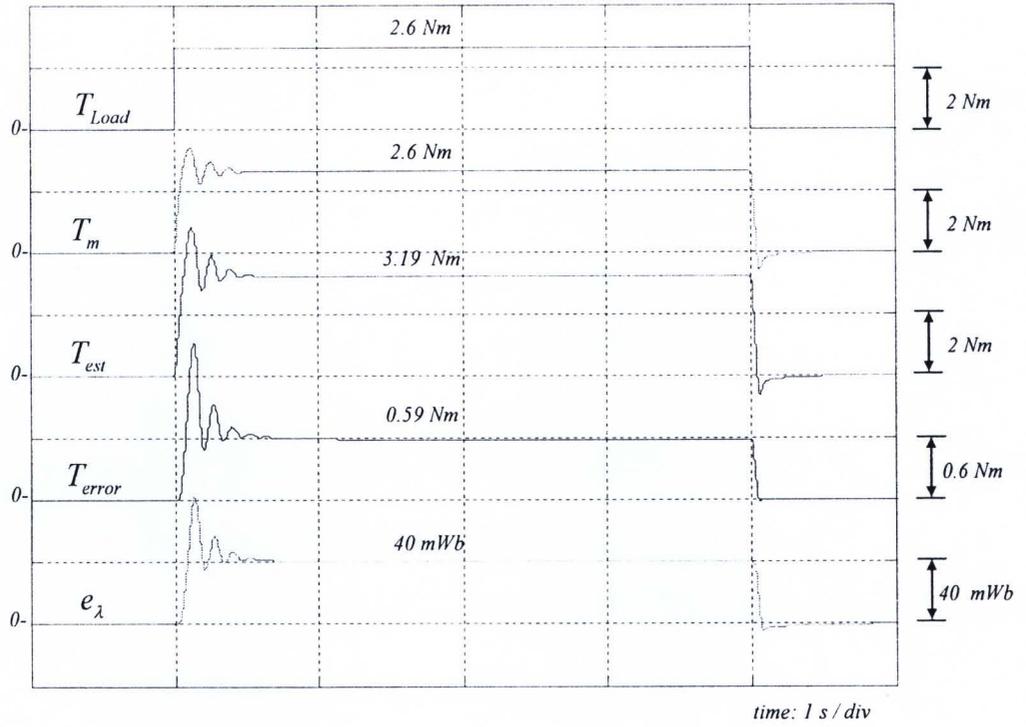
$$T_{error} = T_{est} - T_m = \frac{P}{2} e_\lambda \hat{i}_q \quad (5.12)$$

โดยที่ $T_{est} = \frac{P}{2} \lambda \hat{i}_q$ คือค่าแรงบิดประมาณ และ $T_{error} = T_{est} - T_m$ คือค่าความผิดพลาดของแรงบิดประมาณกับแรงบิดจริงที่เกิดขึ้น

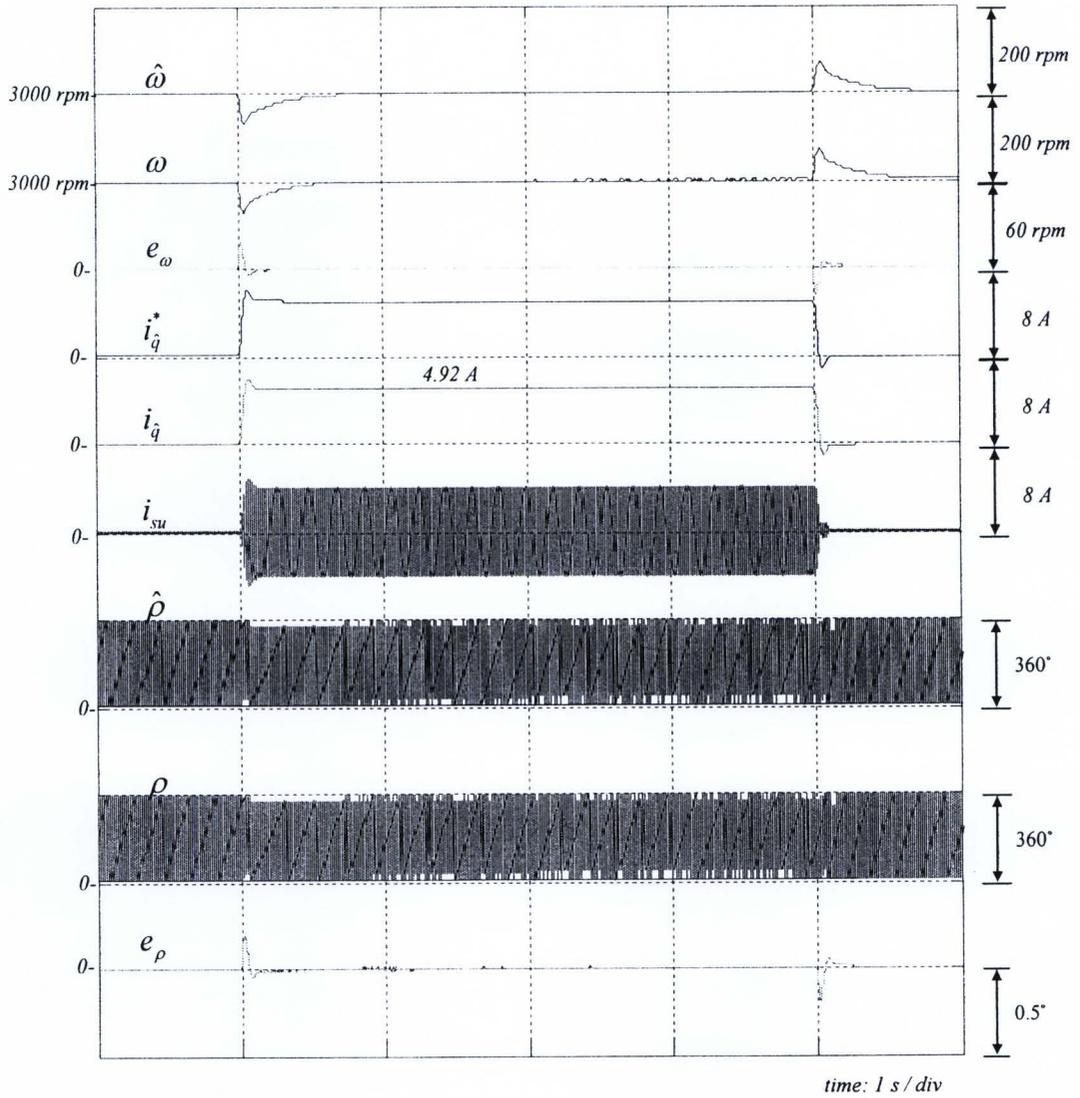
ความถูกต้องของแนวทางในการวิเคราะห์ผลกระทบจาก ΔR ต่อการประมาณตำแหน่งและความเร็วยืนยันได้ด้วยผลการจำลองการทำงานในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.3 และ 5.4 ในช่วงความเร็วต่ำและความเร็วสูงตามลำดับ



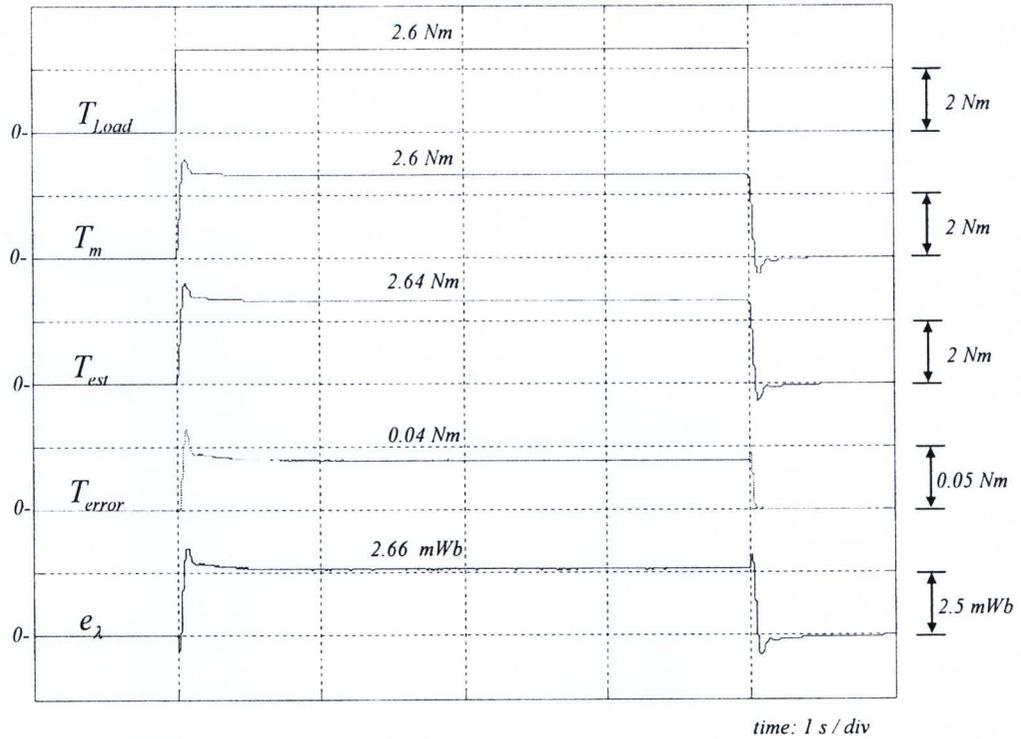
รูปที่ 5.3 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์แบบไรเซนเซอร์ที่ความเร็วคำสั่ง 200 rpm ในกรณี $\Delta R = -20\%$



รูปที่ 5.3(ต่อ) ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์ที่ความเร็ว
คำสั่ง 200 rpm ในกรณี $\Delta R = -20\%$



รูปที่ 5.4 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์ที่ความเร็วคำสั่ง 3000 rpm ในกรณี $\Delta R = -20\%$



รูปที่ 5.4(ต่อ) ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์ที่ความเร็วคำสั่ง 3000 rpm ในกรณี $\Delta R = -20\%$

ผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 5.3 และ 5.4 สามารถสรุปได้ดังนี้คือ จากรูปที่ 5.3 และ 5.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวแล้วค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วจะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งก็สอดคล้องกับการวิเคราะห์ในสมการที่ (5.7) และ (5.10) สำหรับค่าความผิดพลาดเชิงขนาดของฟลักซ์ในกรณีที่ $\Delta R = -20\%$ นั้นก็สอดคล้องกับการวิเคราะห์ในสมการที่ (5.9) กล่าวคือ โดยอาศัยค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่แสดงในภาคผนวก ก

ที่ความเร็วคำสั่ง 200 rpm:

$$e_\lambda = \hat{\lambda} - \lambda = \frac{-\Delta R \hat{i}_q}{\omega} = \frac{0.2 * R * 4.92}{200 * (p/2 * 2\pi/60)} = \frac{0.2 * 2.55 * 4.92}{200 * (6/2 * 2\pi/60)} = 40 \text{ mWb} \quad (5.13)$$

$$T_{error} = T_{est} - T_m = \frac{p}{2} e_\lambda \hat{i}_q = \frac{6}{2} * 40 \text{ m} * 4.92 = 0.59 \text{ Nm} \quad (5.14)$$

ที่ความเร็วคำสั่ง 3000 rpm:

$$e_\lambda = \hat{\lambda} - \lambda = \frac{-\Delta R \hat{i}_q}{\omega} = \frac{0.2 * R * 4.92}{3000 * (p/2 * 2\pi/60)} = \frac{0.2 * 2.55 * 4.92}{3000 * (6/2 * 2\pi/60)} = 2.66 \text{ mWb} \quad (5.15)$$

$$T_{error} = T_{est} - T_m = \frac{p}{2} e_\lambda \hat{i}_q = \frac{6}{2} * 2.66 \text{ m} * 4.92 = 0.04 \text{ Nm} \quad (5.16)$$

ดังนั้นผลการจำลองการทำงานทั้งหมด จึงยืนยันถึงความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ ผลกระทบจาก ΔR ต่อการประมาณตำแหน่ง ความเร็ว ฟลักซ์ และกระแสที่ได้นำเสนอ

หมายเหตุ: ค่า $|\Delta R| = 20\%$ ที่ใช้ในการจำลองการทำงานนั้นมาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับค่าของอุณหภูมิ $R_T = R_{T_0} [1 + \alpha_{cu} \Delta T]$ โดยที่ R_T คือค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ R_{T_0} คือค่าความต้านทานที่ได้จากการทดสอบ α_{cu} คือค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทาน (ลวดตัวนำทองแดงมีค่า $\alpha_{cu} = 0.00393 [C^\circ]^{-1}$) และ ΔT คือค่าผลต่างของอุณหภูมิของขดลวดเทียบกับอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ เมื่อพิจารณา $\Delta T = 50^\circ C$ จาก $30^\circ C$ ถึง $80^\circ C$ จะได้ $|\Delta R| = 19.65\%$ ดังนั้นค่า $|\Delta R|$ ที่ใช้ในการจำลองการทำงานนี้ครอบคลุมถึงค่า $|\Delta R|$ ที่สามารถเกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติ

5.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำ

ในทำนองเดียวกันในหัวข้อนี้จะพิจารณาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียวโดยการแทนค่า $\hat{R} = R$ ในสมการที่ (5.1) และสามารถคำนวณหาค่าความผิดพลาดของกระแสได้จากสมการที่ (2.5) และ (5.1) ดังนี้คือ

$$\vec{e}_i = \mathbf{G}_p(s) [s\mathbf{I} - \mathbf{J}\omega] \left[\left(\frac{R}{\hat{L}} - \frac{R}{L} \right) \hat{i} + \left(\frac{\omega}{L} - \frac{\hat{\omega}}{\hat{L}} \right) \mathbf{J}\hat{\lambda} + \left(\frac{I}{\hat{L}} - \frac{I}{L} \right) \vec{u} \right] + \mathbf{G}_p(s) \mathbf{J} \frac{\omega}{L} \Delta\omega \hat{\lambda} \quad (5.17)$$

5.2.1 ผลกระทบต่อการประมาณค่าความเร็วจากค่าความผิดพลาดของค่าความเหนี่ยวนำ

เนื่องจากฟังก์ชันโอนย้ายหน้าเทอมค่าความผิดพลาดของค่าความเหนี่ยวนำในสมการที่ (5.16) , $\mathbf{G}_p(s) [s\mathbf{I} - \mathbf{J}\omega]$, จะมีค่าเท่ากับศูนย์ในสภาวะอยู่ตัวดังนั้นค่า ΔL จะไม่ส่งผล

ให้เกิดค่าความผิดพลาดของกระแส ดังนั้นการประมาณค่าความเร็วจากค่าความผิดพลาดของกระแส จึงยังคงถูกต้องแม้ว่าจะมีความผิดพลาดของค่าความเหนี่ยวนำก็ตาม

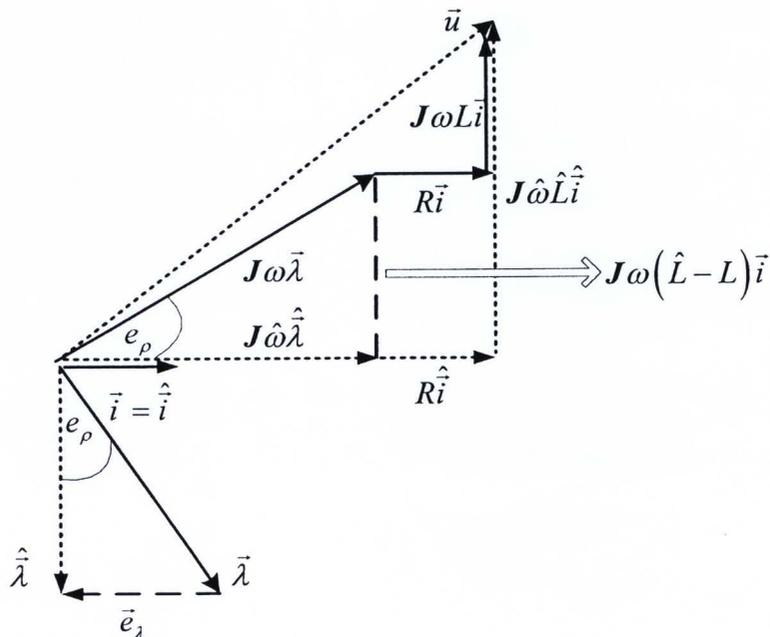
5.2.2 ผลกระทบต่อการประมาณค่าตำแหน่งจากค่าความผิดพลาดของค่าความเหนี่ยวนำ

จากสมการที่ (2.5) และ (5.1) ภายใต้เงื่อนไข $\Delta\omega = 0$ และ $\vec{e}_1 = 0$ สามารถคำนวณหาค่าความผิดพลาดของของฟลักซ์ในสภาวะอยู่ตัวได้ดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \hat{L} \frac{d\vec{i}}{dt} - L \frac{d\vec{i}}{dt} \Big|_{\frac{d}{dt} \rightarrow J\omega} &= J\omega(\hat{L} - L)\vec{i} = -J\omega(\hat{\lambda} - \bar{\lambda}) \\ \therefore \vec{e}_2 &= (L - \hat{L})\vec{i} \end{aligned} \quad (5.18)$$

รูปที่ 5.5 แสดงแผนภาพเวกเตอร์ในกรณีนี้ ซึ่งจากสมการที่ (5.18) หรือจากรูปที่ 5.7 สามารถคำนวณหาค่าความผิดพลาดของตำแหน่งได้ดังนี้คือ

$$|e_\rho| = \left| \sin^{-1} \frac{e_\lambda}{\lambda} \right| = \sin^{-1} \frac{|\hat{L} - L| \|\vec{i}\|}{\lambda} = \sin^{-1} \frac{|\Delta L| \|\vec{i}\|}{\lambda} \quad (5.19)$$



รูปที่ 5.5 แผนภาพเวกเตอร์ในสภาวะอยู่ตัวกรณีมีค่าความผิดพลาดจากค่าความเหนี่ยวนำ

จากค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในภาคผนวก ก $L = 21.5mH$, $\|\vec{i}\| = i_{q(\text{rated})} = 4.92A$ และ $\lambda = 0.176Wb$ ดังนั้นหากสมมติให้ $|\Delta L| = 20\%$ ของค่าจริงซึ่งตามปกติค่าความผิดพลาดจะมีค่าไม่เกินนี้ (ประมาณ 13% จากการทดสอบมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้) จะสามารถคำนวณหาค่า e_λ และ $|e_\rho|$ ได้เท่ากับ

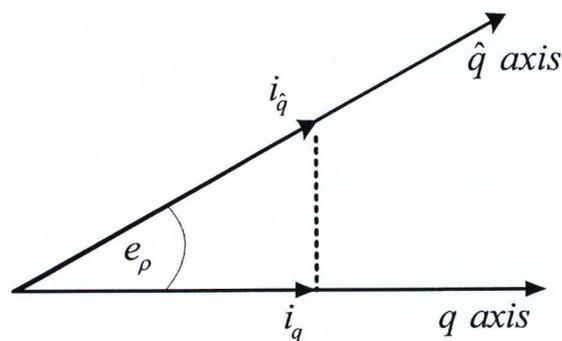
$$e_\lambda = 0.2 * 21.5 \times 10^{-3} * 4.92 = 0.021 Wb \quad (5.20)$$

$$|e_\rho| = \sin^{-1} \frac{0.2 * 21.5 * 10^{-3} * 4.92}{0.176} = 6.9^\circ \quad (5.21)$$

ค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง $|e_\rho|$ นี้ทำให้แรงบิดที่ได้จริงผิดพลาดไปเล็กน้อยเท่านั้นโดยพิจารณาได้จากรูปที่ 5.6 ซึ่งจะได้ว่า

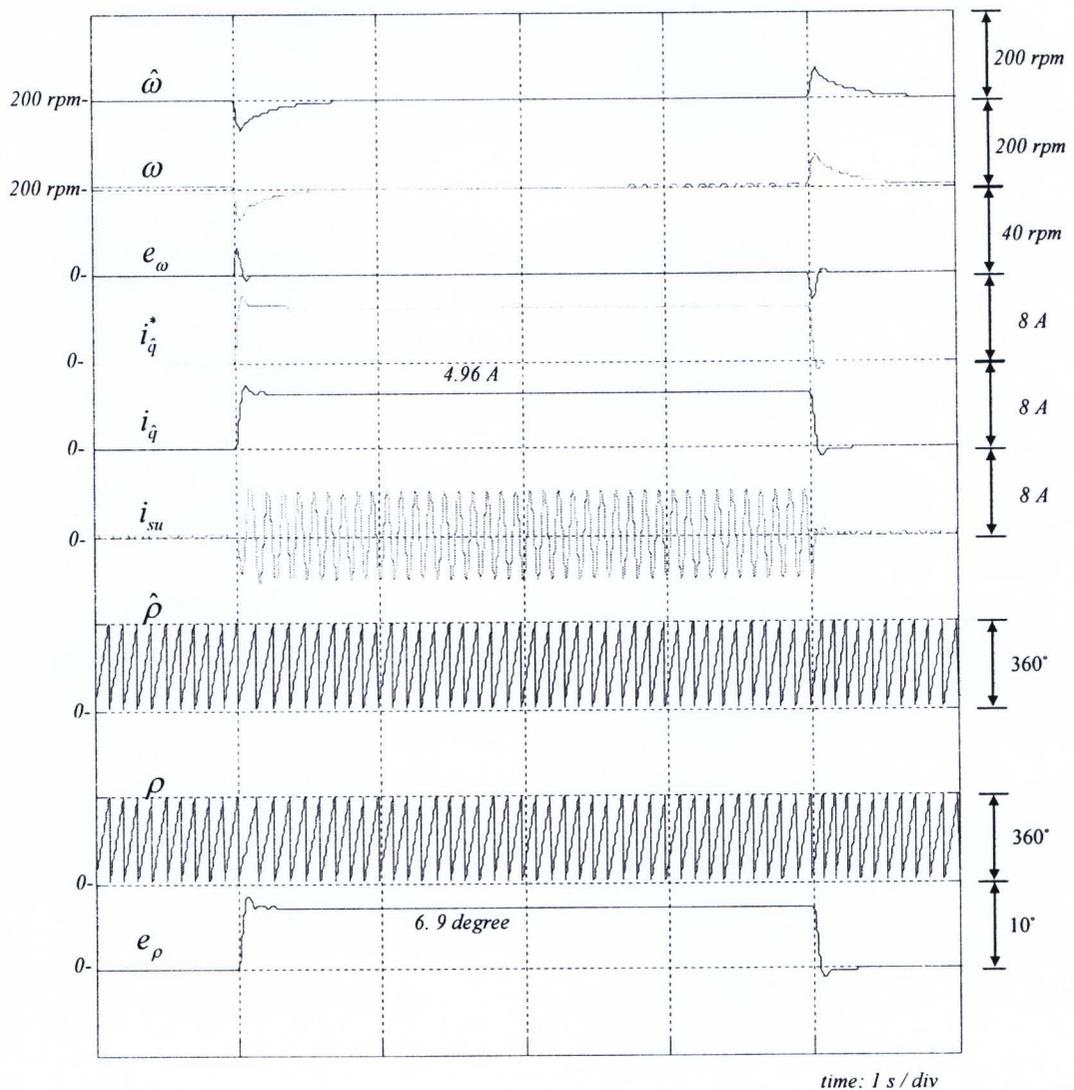
$$i_q = \hat{i}_q \cos \Delta\rho = 0.9927 * \hat{i}_q \quad (5.22)$$

จะเห็นว่ากระแสสร้างแรงบิดจริงจะลดลงไปเพียงแค่ 0.73% เท่านั้นและค่าความผิดพลาดของค่าฟลักซ์ประมาณก็มีค่าประมาณ 0.7% เช่นกัน ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วค่าความผิดพลาดเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อควบคุมแรงบิดน้อยมากและละเลยได้ ข้อสรุปนี้สามารถยืนยันได้จากผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 5.9-5.10 ซึ่งได้ $|e_\rho| \approx 6.9^\circ$ และ $\hat{i}_q = 4.96A$ ซึ่งความจริงแล้วกระแสที่ต้องใช้ในการสร้างแรงบิดที่พิกัด (2.6Nm) เท่ากับ $4.92A$ ซึ่งก็ตรงกับผลการวิเคราะห์ที่ $4.96 * \cos 6.9^\circ = 4.92A$

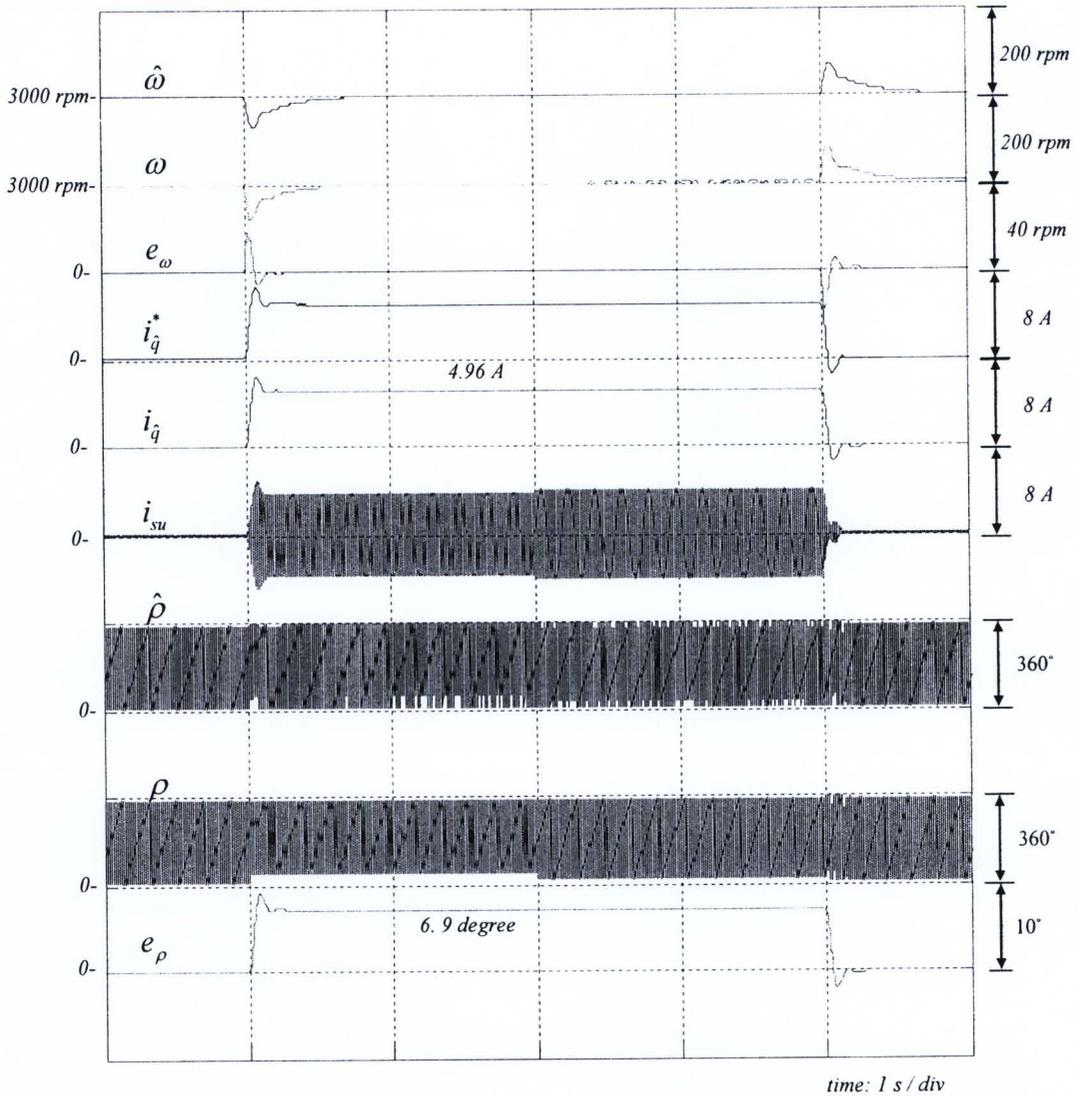


รูปที่ 5.6 แกนอ้างอิงของมอเตอร์และตัวสังเกตบนเมื่อเกิดค่าผิดพลาดของการประมาณตำแหน่ง e_ρ จากความผิดพลาด ΔL

ผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 5.7-5.8 นั้นแสดงให้เห็นว่าจากการวิเคราะห์ถึงผลกระทบจาก ΔL ที่ได้นำเสนอนั้นมีความถูกต้อง กล่าวคือเมื่อเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวแล้วค่าความผิดพลาดของความเร็วจะมีค่าเป็นศูนย์ และจะมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งเท่ากับ 6.9° เมื่อ $\Delta L = -20\%$ เมื่อเปรียบเทียบกับผลกระทบจากความผิดพลาดของค่าความต้านทาน (สมการที่ (5.9)) จะพบว่าผลกระทบจากความผิดพลาดของค่าความเหนี่ยวนำจะไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ทำงาน กล่าวคือผลกระทบจะมีค่าเท่ากันไม่ว่าที่ความเร็วสูงหรือความเร็วต่ำ (ดังพิจารณาได้จากผลการจำลองในรูปที่ 5.7 และ 5.8) ในขณะที่ผลกระทบจากความผิดพลาดของค่าความต้านทานจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเร็วลดลง ดังนั้นในย่านความเร็วต่ำจะต้องหาวิธีการลดผลกระทบจากความผิดพลาดของค่าความต้านทาน



รูปที่ 5.7 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์ที่ความเร็วคำสั่ง 200 rpm ในกรณี $\Delta L = -20\%$



รูปที่ 5.8 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์ที่ความเร็วคำสั่ง 3000 rpm ในกรณี $\Delta L = -20\%$

5.3 แนวทางในการแก้ปัญหาความผิดพลาดทางขนาดของฟลักซ์ในย่านความเร็วต่ำ

เนื่องจากผลกระทบจากค่าความต้านทานจะทำให้เกิดค่าความผิดพลาดของฟลักซ์ในเชิงขนาดอยู่ ดังแสดงในสมการที่ (5.9) ซึ่งนำมาแสดงอีกครั้งในสมการที่ (5.23)

$$e_\lambda = \hat{\lambda} - \lambda = \frac{-\Delta R i_q^*}{\omega} \quad (5.23)$$

ปัญหานี้ไม่ส่งผลกระทบมากนักถ้าเป็นระบบควบคุมความเร็ว แต่จะเป็นปัญหาได้เมื่อระบบควบคุมเป็นการควบคุมแรงบิด ทั้งนี้เนื่องจากค่าแรงบิดประมาณ

$$T_{est} = \frac{P}{2} \hat{\lambda} \hat{i}_q \quad (5.24)$$

ที่คำนวณได้จะเกิดความผิดพลาดขึ้นเนื่องจากค่า $\hat{\lambda}$ ที่คลาดเคลื่อน ทำให้เกิดความผิดพลาดของการควบคุมแรงบิดดังแสดงในรูปที่ 5.4 และ 5.5 ก่อนหน้านี้ ในที่นี้เราจะเสนอแนวทางแก้ไขปัญหาการควบคุมแรงบิดนี้โดยพิจารณาจากสมการที่ (5.22) จะเห็นว่าผลกระทบจาก ΔR จะส่งผลกระทบมากในย่านความเร็วต่ำ และส่งผลกระทบน้อยในย่านความเร็วสูง ซึ่งก็จะสอดคล้องกับการทำงานของมอเตอร์จริงกล่าวคือที่ความเร็วสูงค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนามีค่ามากกว่าแรงดันตกคร่อมความต้านทาน ดังนั้นค่าความผิดพลาดของความต้านทานจึงส่งผลกระทบน้อย เพื่อลดผลกระทบดังกล่าวในย่านความเร็วต่ำเราจึงกำหนดให้ระบบไม่นำค่าฟลักซ์ประมาณนี้ไปใช้ในการควบคุมเวกเตอร์แต่ให้ใช้ค่าฟลักซ์ประมาณที่คำนวณได้ในขณะทำงานที่ย่านความเร็วสูงกว่าไปใช้แทน ตามสมการที่ (5.25)

$$\hat{\lambda}_{control} = \begin{cases} \hat{\lambda} & ; |\hat{\omega}| \geq \omega_1 \\ \hat{\lambda}|_{|\hat{\omega}|=\omega_1} & ; |\hat{\omega}| < \omega_1 \end{cases} \quad (5.25)$$

เมื่อ $\hat{\lambda}_{control}$ คือค่าฟลักซ์ที่ใช้ในการควบคุม และ ω_1 คือย่านความถี่ต่ำที่กำหนด

สำหรับค่า ω_1 นั้นสามารถกำหนดตามแนวทางการออกแบบดังนี้คือ จากค่าความผิดพลาดของแรงบิด

$$T_{error} = T_{est} - T_m = \frac{P}{2} e_\lambda \hat{i}_q \quad (5.26)$$

แทนสมการที่ (5.24) ลงใน (5.26) จะได้

$$T_{error} = \frac{P}{2} \left(\frac{-\Delta R \hat{i}_q}{\omega} \right) \hat{i}_q \quad (5.27)$$

สมการที่ (5.27) สามารถใช้กำหนดค่า ω_1 ที่ต้องการได้จากสมการที่ (5.28) เช่น สมมติให้ $|T_{error}|$ ที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 10% ของ T_{rated} ที่ $|\hat{\omega}| = \omega_1$ โดยที่ $|\Delta R| = 20\%$



$$\omega_1 = \frac{p}{2} \frac{\Delta R i_q^{(rated)^2}}{T_{error}} \quad (5.28)$$

จากค่าพารามิเตอร์และพิกัดของมอเตอร์ที่แสดงในภาคผนวก ก เมื่อแทนค่าแล้วจะได้

$$\omega_1 = \frac{6}{2} * \frac{0.2 * 2.55 * 4.92^2}{0.1 * 2.6} = 142.45 \text{ rad / sec (ทางไฟฟ้า)} = 453 \text{ rpm (ทางกล)} \quad (5.29)$$

จากแนวทางการออกแบบที่ได้บรรยายนี้ สามารถกล่าวได้ว่าเมื่อความเร็วต่ำกว่า 453 rpm ที่โหลดพิกัดและมี $|\Delta R| = 20\%$ จะมีค่าความผิดพลาดของแรงบิดไม่เกิน 10% ของแรงบิดพิกัด ดังแสดงด้วยผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองในรูปที่ 5.9 ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้

การทำงานในช่วง A :

การทำงานในช่วงนี้เป็นการทำงานในสภาวะไร้โหลดที่ความเร็วคำสั่ง 453 rpm จะเห็นว่าจะไม่มีความผิดพลาดของแรงบิดเกิดขึ้นเนื่องจากกระแสมีค่าเป็นศูนย์ และในช่วงนี้ $\hat{\lambda}_{control} = \hat{\lambda}$

การทำงานในช่วง B :

การทำงานในช่วงนี้เป็นการทำงานที่โหลดพิกัดที่ความเร็วคำสั่ง 453 rpm ซึ่งจะมีค่าความผิดพลาดของแรงบิดเท่ากับที่ออกแบบคือ 10% ของแรงบิดพิกัด (0.26 Nm) และสามารถคำนวณหาค่า $\hat{\lambda}$ ได้ดังนี้

$$\hat{\lambda} = e_\lambda + \lambda = \frac{-\Delta R \hat{i}_q}{\omega} + \lambda = \frac{0.2 * 2.55 * 4.92}{453 * (p/2 * 2\pi/60)} + 0.176 = 0.1936 \text{ Wb}$$

ซึ่งก็จะตรงกับผลการจำลองการทำงานและผลการทดลอง และมีการใช้ $\hat{\lambda}_{control} = \hat{\lambda}$ ตามที่ออกแบบ

การทำงานในช่วง C :

การทำงานในช่วงนี้เป็นการทำงานที่โหลดพิกัดที่ความเร็วคำสั่ง 200 rpm ซึ่งเป็นการทำงานในช่วงความเร็วที่ต่ำกว่า ω_1 ดังนั้นจากการออกแบบจะให้

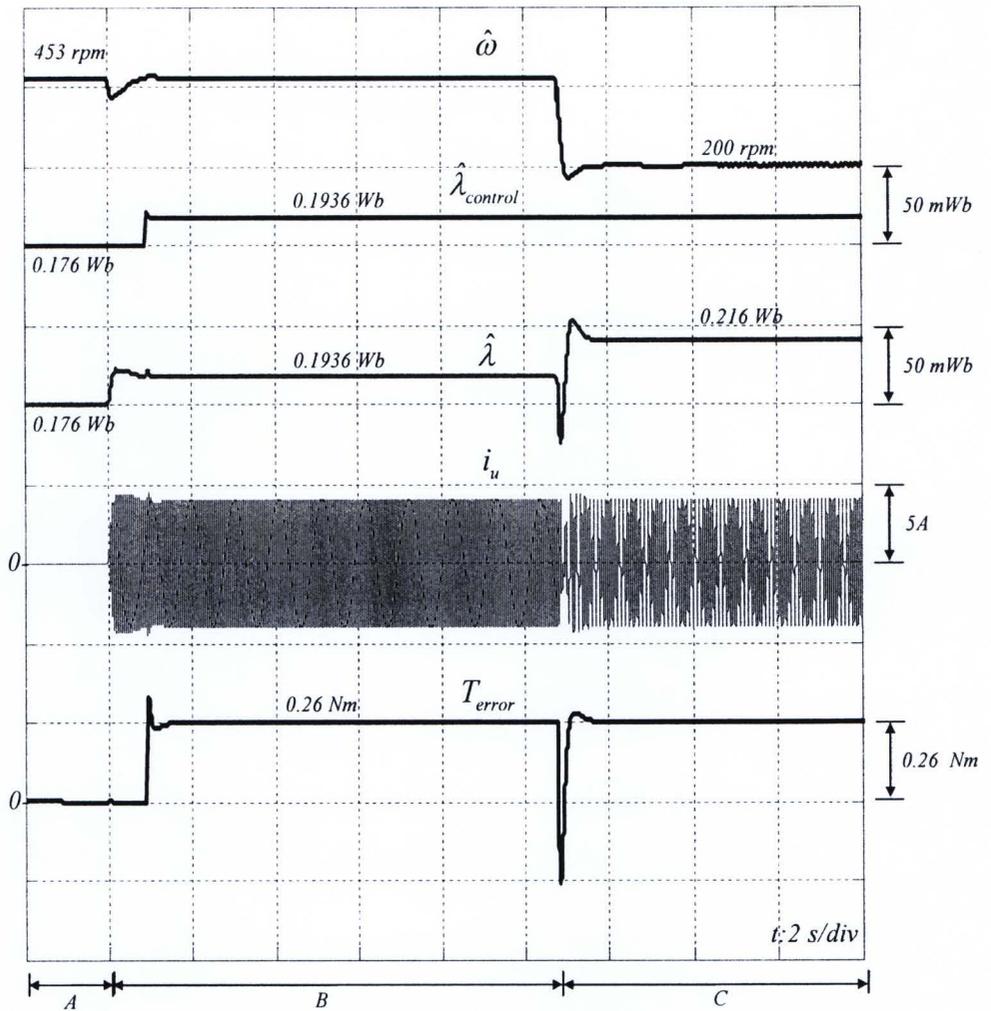
$$\hat{\lambda}_{control} = \hat{\lambda} \Big|_{|\omega|=\omega_1=453 \text{ rpm}} = 0.1936 \text{ Wb}$$

ในส่วนของ $\hat{\lambda}$ ในช่วงการทำงานนี้สามารถคำนวณได้ดังนี้คือ

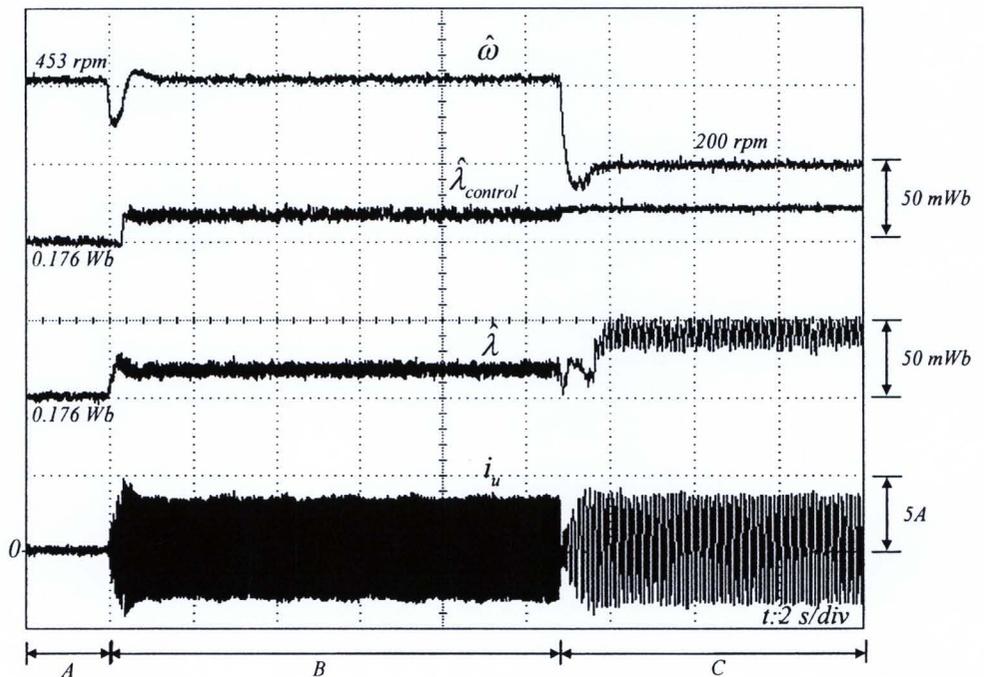
$$\hat{\lambda} = e_\lambda + \lambda = \frac{-\Delta R \dot{i}_q}{\omega} + \lambda = \frac{0.2 * 2.55 * 4.92}{200 * (p/2 * 2\pi/60)} + 0.176 = 0.216 \text{ Wb}$$

ซึ่งก็จะตรงกับผลการจำลองการทำงาน และผลการทดลองก็สอดคล้องกับผลการจำลองการทำงานด้วย ดังนั้นจากแนวทางการออกแบบ $\hat{\lambda}_{control}$ ที่นำเสนอนี้สามารถลดค่าความผิดพลาดของแรงบิดลงเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทำงานในเงื่อนไขเดียวกันในรูปที่ 5.3 ที่มีค่าความผิดพลาดของแรงบิดเท่ากับ 0.59 Nm

ดังนั้นกล่าวโดยสรุปแล้วจะเห็นว่าแนวทางในการออกแบบค่า $\hat{\lambda}_{control}$ ที่ได้นำเสนอนี้สามารถลดค่าความผิดพลาดของแรงบิดลงได้ โดยผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองยืนยันความถูกต้องของแนวคิดที่ได้นำเสนอ



(ก) ผลการจำลองการทำงาน



(ข) ผลการทดลอง

รูปที่ 5.9 ผลตอบสนองของการควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์เมื่อใช้แนวทางในการแก้ปัญหาจากค่าความผิดพลาดทางขนาดของฟลักซ์ในย่านความเร็วต่ำที่นำเสนอ โดยมี $|\Delta R| = 20\%$