

ภาคผนวก ค

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

# การออกแบบอัตราขยายป้อนกลับอย่างง่ายสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบไร้เซนเซอร์วัดความเร็ว โดยใช้ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว

## The Simple Feedback Gain Design for Speed-Sensorless Induction Motor Drives by Using The Full-Order Adaptive Observer

อภิราช รัตนอุดมพิสุทธิ์ สากร โพธิ์งาม

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาธิปไตย เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ ๑ 10140 โทร (02) 470-9051

E-mail: apirach99@hotmail.com , sakormpo@hotmail.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้แนะนำเสนอการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับอย่างง่ายสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบไร้เซนเซอร์วัดความเร็วโดยใช้ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว แนวทางในการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับอย่างง่ายที่นำเสนอนี้ ยังสอดคล้องกับเงื่อนไขจริงของเครื่องมื่อในการยืนยัน ถึงการมีเสถียรภาพของระบบประมาณอีกด้วย ผลการจำลองการทำงานยืนยันถึงความเป็นไปได้ของแนวคิดที่นำเสนอ โดยที่ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ ในย่านความเร็วใกล้ศูนย์

**คำสำคัญ :** การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบไร้เซนเซอร์วัดความเร็ว, เสถียรภาพ, ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว

### Abstract

This paper presents the simple feedback gain design for speed-sensorless induction motor drives with using the full-order adaptive observer. The designed method is satisfied by the positive real conditions (PR conditions) that guarantee the stability of the estimation system. The feasibility of the proposed method, which can be operated at nearly zero speed, is confirmed by simulation results.

**Keywords:** Speed-sensorless induction motor drives, Stability, Full-order adaptive observer.

### 1. บทนำ

ในปัจจุบันงานวิจัยเกี่ยวกับวิธีการประมาณค่าความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (IM) มีอยู่เป็นจำนวนมาก วิธีการประมาณค่าโดยใช้ตัวสังเกต (Observer) [1]-[8] นั้นได้รับความนิยมมากเพราะว่า 1) ไม่ต้องอาศัยเงื่อนไขการทำงานในสภาวะอยู่ตัวในการออกแบบตัวสังเกตให้มีเสถียรภาพ 2) สามารถพิสูจน์ความมีเสถียรภาพได้อย่างชัดเจน และ 3) สามารถทำงานได้ในช่วงความเร็วที่กว้าง แต่อุปสรรคที่สำคัญคือการ

ออกแบบอัตราขยายป้อนกลับเพื่อให้ตัวสังเกตมีเสถียรภาพนั้น อัตราขยายป้อนกลับต้องขึ้นอยู่กับค่าความเร็วจริงของมอเตอร์ แต่เนื่องจากว่า ในระบบไร้เซนเซอร์วัดความเร็ว นั้นเราไม่สามารถรู้ค่าความเร็วจริงได้ โดยปกติแล้วจะใช้ค่าความเร็วที่ได้จากการประมาณในการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับแทน ดังนั้นในการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับ ที่ขึ้นอยู่กับค่าความเร็วให้น้อยที่สุด จึงเป็นประเด็นสำคัญ ของงานวิจัยนี้ โดยที่ระบบประมาณยังคงมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงาน

จากผลการจำลองการทำงาน ได้แสดงถึงความถูกต้อง ความง่าย ในการออกแบบ และในการนำไปใช้ในทางปฏิบัติจริง โดยที่ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ ในย่านความเร็วใกล้ศูนย์ของอัตราขยายป้อนกลับที่นำเสนอ

### 2. แบบจำลองและตัวสังเกตอันดับแบบปรับตัว ของ IM

แบบจำลองของ มอเตอร์เหนี่ยวนำ อ้างอิงบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ เป็นดังสมการที่ (1) [5], [8]

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \vec{i} \\ \vec{\lambda}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i} \\ \vec{\lambda}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} \vec{u} \quad (1)$$

$$A_{11} = -(R_s + R_r M^2 / L_r^2) / \sigma L_s \cdot I$$

$$A_{12} = -A_{22} M / \sigma L_s L_r$$

$$A_{21} = (R_r M / L_r) \cdot I$$

$$A_{22} = -(R_r / L_r) \cdot I + \omega_m \cdot J$$

$$B_1 = 1 / \sigma L_s \quad I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

โดยที่

$\vec{u}$  : สเตตเวกเตอร์ของแรงดันสเตเตอร์

$\vec{i}$  : สเตตเวกเตอร์ของกระแสสเตเตอร์

$R_s, R_r$  : ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์

$L_s, L_r$  : ความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์

$M$  : ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดด้านสเตเตอร์และโรเตอร์

$\vec{\lambda}_r$  : สเตตเวกเตอร์ของ ฟลักซ์แม่เหล็กทางด้านโรเตอร์

$\omega_m$  : ความเร็วทางไฟฟ้าของโรเตอร์

โดยอาศัยแบบจำลองในสมการที่ (1) สามารถสร้างตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับค่าได้ดังต่อไปนี้ [5]-[7]

ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับค่า:

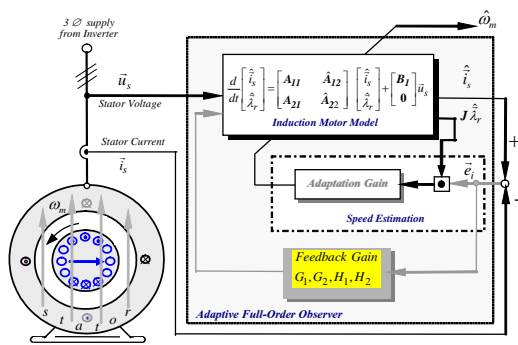
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i} \\ \hat{\lambda}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & \hat{A}_{12} \\ A_{21} & \hat{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i} \\ \hat{\lambda}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} \bar{u} + \begin{bmatrix} G_1 \cdot I + G_2 \cdot J \\ H_1 \cdot I + H_2 \cdot J \end{bmatrix} [\hat{i} - \bar{i}] \quad (2)$$

สมการการประมาณค่าความเร็ว:

$$\hat{\omega}_m = (k_p + k_i \int dt) (J \hat{\lambda})^T \bar{e}_i \quad (3)$$

โดยที่  $\hat{\lambda}$  หมายถึงค่าประมาณ และ  $G_1, G_2, H_1, H_2$  คืออัตราขยายป้อนกลับ

แผนภาพไคอะแกรม รูปที่ 1 แสดงถึงโครงสร้างของตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับค่าสำหรับระบบขับเคลื่อนแบบไวเซนเซอร์วัดความเร็วซึ่งมีองค์ประกอบหลักๆอยู่ด้วยกัน 3 ส่วน คือ 1. แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2. อัตราขยายป้อนกลับ 3. ระบบประมาณค่าความเร็ว



รูปที่ 1 โครงสร้างของตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับค่า

### 3. เสถียรภาพของระบบประมาณ

จากสมการที่ (1) และ (2) จะได้สมการค่าความผิดพลาดเป็นดังนี้

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{e}_i \\ \bar{e}_\lambda \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i} - \bar{i} \\ \hat{\lambda}_r - \bar{\lambda}_r \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} A_{11} + G_1 I + G_2 J & A_{12} \\ A_{21} + H_1 I + H_2 J & -\varepsilon A_{22} \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} \bar{e}_i \\ \bar{e}_\lambda \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} I / \varepsilon \\ -I \end{bmatrix}}_B (-J \hat{\lambda}) (\hat{\omega}_m - \omega_m) \quad (4)$$

$$\text{output error: } \bar{e}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{e}_i \\ \bar{e}_\lambda \end{bmatrix} \quad (5)$$

เมื่อ  $\varepsilon = \frac{\sigma L_s L_r}{M}$ ,  $\bar{e}_i = \hat{i}_s - \bar{i}_s$  และ  $\bar{e}_\lambda = \hat{\lambda}_r - \bar{\lambda}_r$

สมการค่าความผิดพลาดในปริภูมิฟังก์ชันโอนย้าย:

$$G(s) = C[sI - A]^{-1} B = s[s^2 I + (xI + yJ)s + mI + nJ]^{-1} / L \quad (6)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} x &= -G_1 + \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r} \\ y &= -G_2 - \omega_m \\ m &= \frac{R_r}{L_r} \left( -\left[ G_1 + \frac{H_1}{\varepsilon} \right] + \frac{R_s}{\sigma L_s} \right) - \omega_m \left[ G_2 + \frac{H_2}{\varepsilon} \right] \\ n &= -\frac{R_r}{L_r} \left[ G_2 + \frac{H_2}{\varepsilon} \right] + \omega_m \left( G_1 + \frac{H_1}{\sigma L_s} - \frac{R_s}{\sigma L_s} \right) \end{aligned}$$

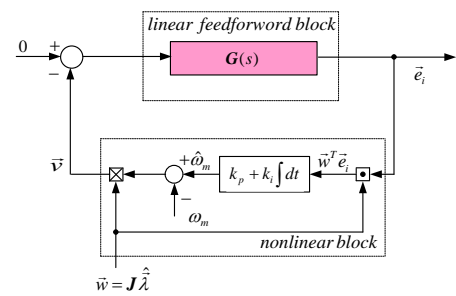
จากสมการที่ (3) และ (4) สามารถแสดงเป็นบล็อกไคอะแกรมได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งเมื่ออ้างอิงบนแกนพลาซมีประมาณจะเป็นดังรูปที่ 3 โดยที่

$$G'(s) = C[sI + \frac{d\hat{\rho}}{dt} J - A]^{-1} B = \begin{bmatrix} G'_{22}(s) & G'_{12}(s) \\ -G'_{12}(s) & G'_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (7)$$

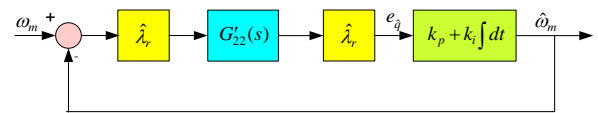
ค่าความผิดพลาดของกระแสสร้างแรงบิด

$$\left. \begin{aligned} e_q &= [\bar{e}'_i]_q = G'_{22}(s) \hat{\lambda} (\hat{\omega}_m - \omega_m) \\ G'_{22}(s) &= \frac{1}{\varepsilon} \frac{z(s)}{p(s)} \\ z(s) &= s^3 + xs^2 + (\hat{\omega}_0^2 + m)s + \hat{\omega}_0^2 x + \hat{\omega}_0 n \\ p(s) &= (s^2 + xs - \hat{\omega}_0^2 - \hat{\omega}_0 y + m)^2 + ((2\hat{\omega}_0 + y)s + \hat{\omega}_0 x + n)^2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\text{Speed estimation: } \hat{\omega}_m = (k_p + k_i \int dt) [e_q \hat{\lambda}] ; k_p, k_i > 0 \quad (9)$$



รูปที่ 2 แผนภาพไคอะแกรมของค่าผิดพลาดในระบบประมาณค่าความเร็วบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์



รูปที่ 3 แผนภาพไคอะแกรมของค่าผิดพลาดในระบบประมาณค่าความเร็วบนแกนอ้างอิงพลาซมีประมาณ

จากรูปที่ 2 ระบบประมาณจะมีเสถียรภาพ ถ้า  $G(s)$  มีคุณสมบัติเป็นค่าจริงบวก (Positive real) ซึ่งเงื่อนไขนี้แสดงได้ดังสมการที่ (10) และคำตอบทั่วไปของอัตราขยายป้อนกลับที่สอดคล้องกับเงื่อนไข (10) แสดงในสมการที่ (11) [5]-[7]

เงื่อนไขจริงบวก (PR Conditions):

$$A^T P + PA = Q \leq 0; PB = C^T; \exists P = P^T > 0 \quad (10)$$

อัตราขยายป้อนกลับที่ทำให้ระบบประมาณเสถียร:

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= -x + \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r} \\ G_2 &= -y - \omega_m \\ H_1 &= -\varepsilon G_1 - \frac{k_2 R_r}{L_r} + \frac{R_r L_r}{M} \\ H_2 &= -\varepsilon G_2 - k_2 \omega_m \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

โดยที่  $x > 0, k_2 > 0$  และ ไม่มีเงื่อนไขในการกำหนดค่า  $y$

### อัตราขยายป้อนกลับที่นำเสนอ:

จากเงื่อนไขที่ทำให้ระบบประมาณมีเสถียรภาพตามสมการที่ (11) นั้น ประเด็นที่สำคัญในงานวิจัยนี้คือ การนำเสนอการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับที่สอดคล้องกับสมการที่ (11) นอกจากนั้น ยังนำเสนอการออกแบบ อัตราขยายป้อนกลับที่อาศัยค่าความเร็วจริง ( $\omega_m$ ) ให้น้อยที่สุดเพื่อความง่ายในทางปฏิบัติ และลดค่าความผิดพลาดทางทฤษฎี จากการใช้ค่าความเร็วประมาณ ( $\hat{\omega}_m$ ) แทนค่าความเร็วจริง ( $\omega_m$ ) ในการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับอีกด้วย ซึ่งมีรายละเอียดในการออกแบบดังนี้ จากสมการที่ (11)

$$A) \text{ เลือก } x = \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r} \Rightarrow G_1 = 0$$

$$B) \text{ เลือก } y = -\omega_m \Rightarrow G_2 = 0$$

$$C) \text{ เลือก } H_1 = 0 \Rightarrow k_2 = \frac{R_s L_r}{M} * \frac{R_r L_r}{R_r} = \frac{R_s L_r^2}{M}$$

$$D) \text{ จะได้ } H_2 = -\frac{R_s L_r^2}{M} \omega_m$$

### สรุปอัตราขยายป้อนกลับที่นำเสนอ

$$G_1 = 0, G_2 = 0, H_1 = 0, H_2 = -\frac{R_s L_r^2}{M} \omega_m \quad (12)$$

อย่างไรก็ตาม ในระบบควบคุมแบบไร้เซ็นเซอร์วัดความเร็วแล้ว เราจะใช้ค่า  $\hat{\omega}_m$  แทนค่า  $\omega_m$  ในอัตราขยายป้อนกลับที่นำเสนอ

จากสมการที่ (12) จะเห็นว่า อัตราขยายป้อนกลับที่นำเสนอ นั้นมีความง่ายในการนำไปใช้ในทางปฏิบัติ ( มีเพียงแค่  $H_2$  ) และสอดคล้องกับเงื่อนไขการมีเสถียรภาพตามสมการที่ (11) อีกด้วย ซึ่งผลการจำลองการทำงาน แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับ ดังจะนำเสนอในข้อหัวข้อต่อไป

## 4. ผลการจำลองการทำงาน

ในการจำลองการทำงานจะใช้ โปรแกรม MATLAB/Simulink โดยที่พารามิเตอร์ของมอเตอร์แสดงในภาคผนวก ซึ่งผลการจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 4-11 ซึ่งจากผลการจำลองการทำงานจะเห็นว่า ระบบจะขาดเสถียรภาพย่านคืนพลังงาน ( Regenerative regions ) ในกรณีที่อัตราขยายป้อนกลับเป็นศูนย์ และจะมีเสถียรภาพเมื่อใช้อัตราขยายป้อนกลับที่นำเสนอ ดังแสดงในรูปที่ 4-5 ในรูปที่ 6-10 แสดงให้เห็นถึง สมรรถนะของอัตราขยายป้อนกลับที่นำเสนอ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ รูปที่ 6-7 ขณะทำการกลับทิศทางหมุน ระบบประมาณยังคงมีเสถียรภาพตลอดเวลา นอกจากนั้นแล้ว รูปที่ 8-9 ยังแสดงให้เห็นถึง ความสามารถในการทำงานของระบบไร้เซ็นเซอร์วัดความเร็วที่นำเสนอซึ่งสามารถทำงานได้ทั้ง 4 Quadrants ( Q1-Q4 ) ได้อย่างมีเสถียรภาพ รูปที่ 10 แสดงให้เห็นถึง ระบบไร้เซ็นเซอร์ ที่นำเสนอ นั้นสามารถทำงานได้ ในย่านคืนพลังงาน ที่ความเร็วใกล้เคียงศูนย์ ( 1 rpm ) ท้ายสุดในรูปที่ 11 เป็นผลตอบสนองของขณะการ

เปลี่ยนแปลงค่าความเร็วในช่วงแคบยังได้ผลเป็นที่พึงพอใจอีกด้วย ( โดยที่  $e_d$  และ  $e_q$  คือค่าความผิดพลาดของกระแสแกน  $d$  และ แกน  $q$  ตามลำดับ)

### สรุป

จากผลการจำลองการทำงานได้แสดงถึงความถูกต้อง ความง่าย ในการออกแบบ และความง่ายในการนำไปใช้ในทางปฏิบัติจริง ของอัตราขยายป้อนกลับที่นำเสนอ โดยที่ตัวสังเกตที่นำเสนอ นั้นสามารถทำงานได้ทั้ง 4 กรณีย่านคืนพลังงาน การกลับทิศทางหมุน และ การทำงานทั้ง 4 Quadrants ( Q1-Q4 ) นอกจากนั้นแล้ว สมรรถนะในการเร่งลดความเร็วในช่วงแคบยังได้ผลเป็นที่น่าพึงพอใจอีกด้วย โดยจะเห็นได้จากค่าความผิดพลาดของความเร็ (  $\Delta\omega$  ) และค่าความผิดพลาดของกระแส ( $e_d, e_q$ ) เป็นศูนย์ในสภาวะอยู่ตัว

### ภาคผนวก

#### พิกัดและพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการวิจัย

2 HP, 220/380V, 50 Hz, 6.3/3.7 A, 1430 rpm, 4 poles  
 $i_{sd} = 5.788 \text{ A (rated)}, i_{sq} = 9.25 \text{ A (rated)}, J = 0.021 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$   
 $i_{sq} = 9.25 \text{ A (rated)}, M = L_r = 93.4 \text{ mH}$

$$L_r = 93.4 \text{ mH} \cdot L_s = 104.9 \text{ mH} \cdot R_r = 0.963 \Omega \cdot R_s = 2.15 \Omega$$

$$\text{Speed controller: } K_p = 1, K_i = 0.11$$

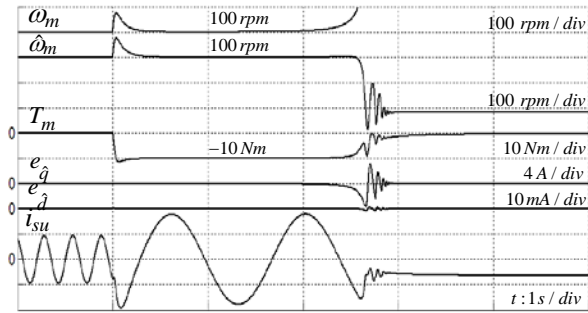
$$\text{Adaptation Gain: } K_p = 20, K_i = 40,000$$

### เอกสารอ้างอิง

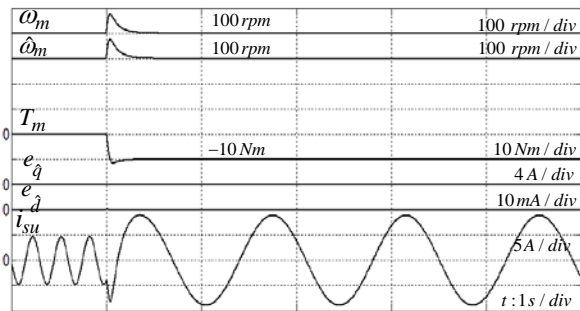
- [1] H. Kubota, K. Matsuse, "Speed Sensorless Field-Oriented Control of Induction Motor with Rotor Resistance Adaptation", IEEE Trans. On Ind. Appl., Vol. IA-30, No.5, 1994, pp. 1219-1224.
- [2] G. Yang, T.H. Chin, "Adaptive-Speed Identification Scheme for a Vector Control Speed Sensorless Inverter-Induction Motor Drive", IEEE Trans. On Ind. Appl., Vol. IA-29, No.4, 1993, pp. 820-825
- [3] G. C. Verghese and S. R. Sanders, "Observer for Flux estimation in induction machines", IEEE Trans. On Ind. Electron, Vol. 35, no. 1, 1988, pp. 85-94
- [4] L. Hamefors, "A comparison between directly parametrised observers and extended Kalman filters for sensorless induction motor drive", Proc. Of power Electronics and Variable Speed Drives, No.456, 1998, pp. 275-280
- [5] S. Sangwongwanich et al, "A Unified Speed Estimation Design Framework for Sensorless AC Motor Drives Based on Positive-Real Property," Proc. Of PCC-Nagoya'07, pp. 1111-1118, 2007.
- [6] S. Po-ngam and S. Sangwongwanich "Stability and Dynamic Performance Improvement of Adaptive Full-Order Observers for Sensorless PMSM Drive", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, No.2, 2012, pp. 588-600
- [7] สาคร โพธิ์งาม, "การออกแบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เชิงโรตอร์สชนิดแม่เหล็กถาวรไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งโดยอิงตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวเพื่อการปรับปรุงเสถียรภาพ การกำหนดผลตอบสนองทางพลวัตและความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์", วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิตศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้าจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [8] สุวรงค์ สุวรรณกวิน, "เทคนิคใหม่ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและออกแบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไร้เซ็นเซอร์วัดความเร็ว ที่ใช้การควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม", วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิตศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้าจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

### ประวัติผู้วิจัย

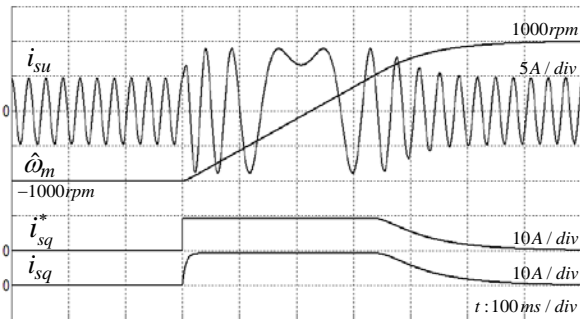
1. นาย อภิราช รัตนอุดมพิสุทธิ์ กำลังศึกษา ระดับ ป.โท ที่ มจร.
2. ดร. สาคร โพธิ์งาม อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ มจร.



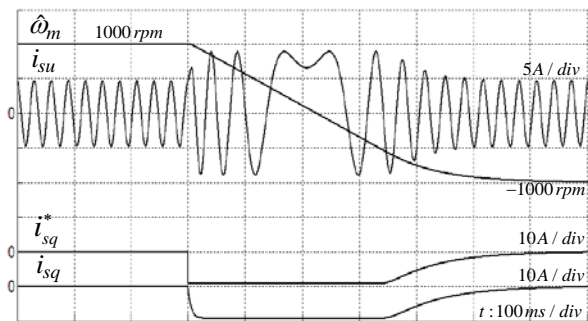
รูปที่ 4 ผลตอบสนองของขณะทำงานในย่านคินพลังงานที่ค่าความเร็ว  
คำสั่ง 100 rpm และแรงบิดของโหลด -10 Nm ในกรณีที่ไม่มี  
อัตราขยายป้อนกลับ  $G_1, G_2, H_1, H_2 = 0$



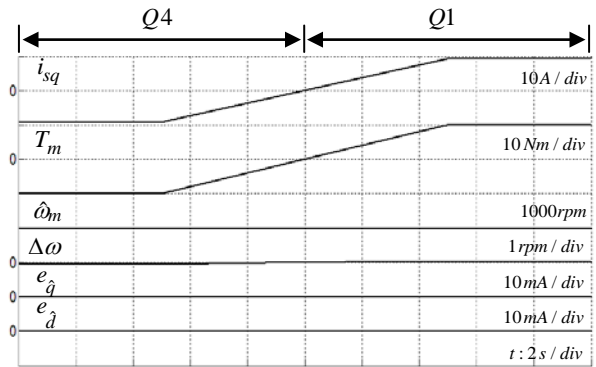
รูปที่ 5 ผลตอบสนองของขณะทำงานในย่านคินพลังงานที่ค่าความเร็ว  
คำสั่ง 100 rpm และแรงบิดของโหลด -10 Nm ในกรณีที่ใช้  
อัตราขยายป้อนกลับที่นำเสนอ



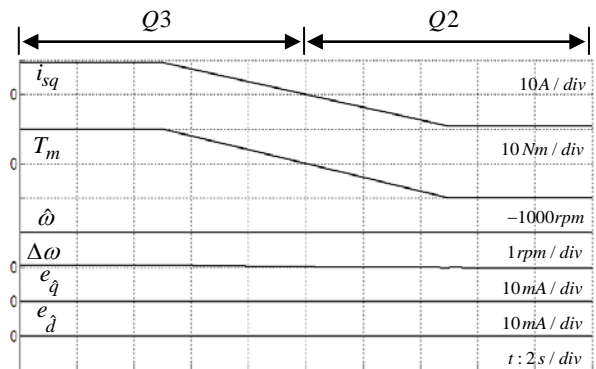
รูปที่ 6 ผลตอบสนองของขณะกลับทิศทางหมุน จาก -1000 rpm  
ไป 1000 rpm ในกรณีที่ใช้อัตราขยายป้อนกลับที่นำเสนอ



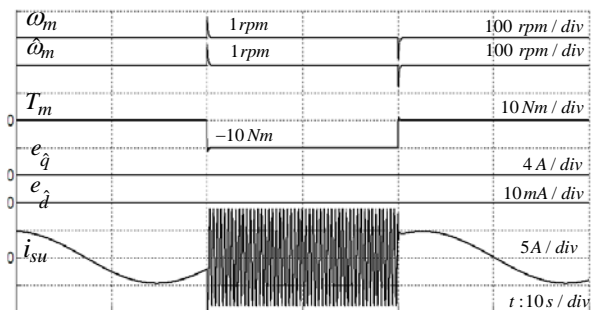
รูปที่ 7 ผลตอบสนองของขณะกลับทิศทางหมุน จาก 1000 rpm  
ไป -1000 rpm ในกรณีที่ใช้อัตราขยายป้อนกลับที่นำเสนอ



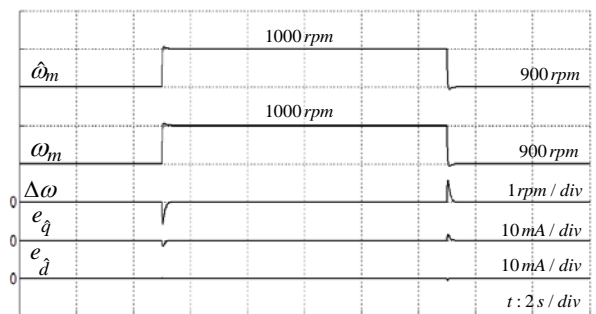
รูปที่ 8 ผลตอบสนองของขณะทำงานใน Quadrants ที่ 4 และ ที่ 1 ที่ความเร็ว  
คำสั่ง 1000 rpm ในกรณีที่ใช้อัตราขยายป้อนกลับที่นำเสนอ



รูปที่ 9 ผลตอบสนองของขณะทำงานใน Quadrants ที่ 3 และ ที่ 2 ที่ความเร็ว  
คำสั่ง -1000 rpm ในกรณีที่ใช้อัตราขยายป้อนกลับที่นำเสนอ



รูปที่ 10 ผลตอบสนองของขณะทำงานในย่านคินพลังงานที่ค่าความเร็ว  
คำสั่ง 1 rpm และแรงบิดของโหลด -10 Nm ในกรณีที่ใช้  
อัตราขยายป้อนกลับที่นำเสนอ



รูปที่ 11 ผลตอบสนองของขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงแคบระหว่าง  
900 ถึง 1000 rpm ในกรณีที่ใช้อัตราขยายป้อนกลับที่นำเสนอ