

บทที่ 2

การประมาณค่าความเร็วที่ใช้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำและผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในบทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงการประมาณค่าความเร็วที่ใช้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดความเร็ว (อุเทน นิตยาธารีกุล, 2542 [2]) ที่ใช้ในการศึกษาทดลองงานวิจัยนี้ รวมทั้งจะศึกษาถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีต่อระบบประมาณค่าความเร็ว เพื่อใช้เป็นเหตุผลสนับสนุนที่มาของงานวิจัยนี้

2.1 การประมาณค่าความเร็วที่ใช้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ

สมการ (2.1) แสดงแบบจำลองลักษณะทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำอ้างอิงบนแกนสเตเตอร์ (แกน $\alpha - \beta$) โดยมีแรงดันสเตเตอร์ (\vec{v}_s) เป็นสัญญาณขาเข้า (Input) และมีกระแสสเตเตอร์ (\vec{i}_s) กับ โรเตอร์ฟลักซ์ ($\vec{\lambda}_r$) เป็นตัวแปรสถานะ (State) และสัญญาณขาออก (Output) ที่เราสามารถวัดได้ คือกระแสสเตเตอร์ (\vec{i}_s)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \vec{i}_s \\ \vec{\lambda}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbb{A}_{11} & \mathbb{A}_{12} \\ \mathbb{A}_{21} & \mathbb{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i}_s \\ \vec{\lambda}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbb{B}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \vec{v}_s \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$\mathbb{A}_{11} = -\frac{1}{\sigma L_s} (R_s + R'_r) \cdot \mathbb{I}$$

$$\mathbb{A}_{12} = -\frac{1}{\sigma L_s} \cdot \mathbb{A}_{22}$$

$$\mathbb{A}_{21} = R'_r \cdot \mathbb{I}$$

$$\mathbb{A}_{22} = -\frac{R'_r}{M'} \cdot \mathbb{I} + \omega_m \cdot \mathbb{J}$$

$$\mathbb{B}_1 = -\frac{1}{\sigma L_s} \cdot \mathbb{I}$$

$$\mathbb{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbb{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M' = \frac{M^2}{L_r}$$

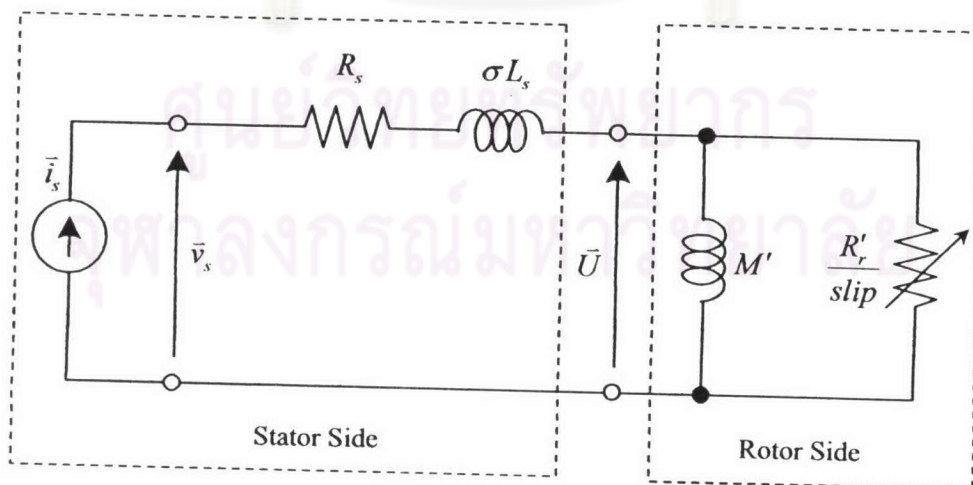
$$R'_r = \left(\frac{M}{L_r} \right)^2 R_r$$

$$\sigma L_s = L_s - \frac{M^2}{L_r}$$

โดยที่

- \vec{v}_s : เวกเตอร์ปริภูมิของแรงดันสเตเตอร์บนแกน $\alpha - \beta$
- \vec{i}_s : เวกเตอร์ปริภูมิของกระแสสเตเตอร์บนแกน $\alpha - \beta$
- $\vec{\lambda}_r$: เวกเตอร์ปริภูมิของโรเตอร์ฟลักซ์บนแกน $\alpha - \beta$ อ้างอิงทางด้านสเตเตอร์
- R_s, R_r : ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ ตามลำดับ
- L_s, L_r : ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ ตามลำดับ
- M : ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์
- M' : ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์อ้างอิงทางด้านสเตเตอร์
- R_r' : ค่าความต้านทานของขดลวด โรเตอร์อ้างอิงทางด้านสเตเตอร์
- σ : สัมประสิทธิ์การรั่วไหลรวม (Total leakage coefficient)
- ω_m : ความเร็วโรเตอร์ (Rotor speed) ในปริมาณทางไฟฟ้า

เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นแบบควบคุมกระแส ดังนั้นกระแสสเตเตอร์ (\vec{i}_s) จะกลายเป็นสัญญาณควบคุมของระบบแทนแรงดันสเตเตอร์ (\vec{v}_s) ส่วนโรเตอร์ฟลักซ์ ($\vec{\lambda}_r$) จะเป็นตัวแปรสถานะของระบบเพียงตัวเดียวเท่านั้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้เราจึงนิยามให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (\vec{U}) เป็นสัญญาณขาออกแทนกระแสสเตเตอร์ (\vec{i}_s) และจากแนวความคิดที่ได้จากวงจรสมมูลในสถานะอยู่ตัวของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่อ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์ (Rotor-flux-based equivalent circuit) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ทำให้เราสามารถคำนวณหาค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำได้ทั้งจากปริมาณทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ ดังแสดงในสมการ (2.2) และ (2.3) ตามลำดับ



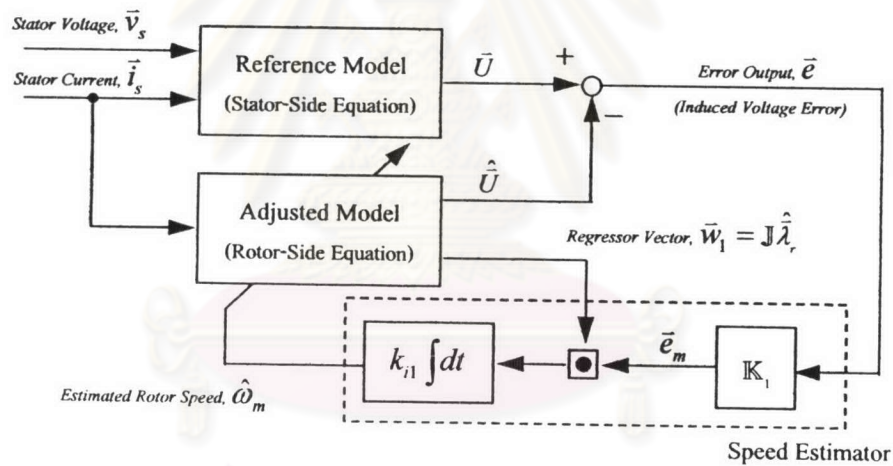
รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลในสถานะอยู่ตัวของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่อ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์

$$\text{(คำนวณจากสมการด้านสเตเตอร์)} \quad \bar{U} = \bar{v}_s - \left[R_s + \sigma L_s \frac{d}{dt} \right] \cdot \bar{i}_s \quad (2.2)$$

$$\text{(คำนวณจากสมการด้านโรเตอร์)} \quad \bar{U} = \frac{d\bar{\lambda}_r}{dt} = R'_r \cdot \bar{i}_s + \left[-\frac{R'_r}{M'} \mathbb{I} + \omega_m \mathbb{J} \right] \cdot \bar{\lambda}_r \quad (2.3)$$

โดยที่ \bar{U} : เวกเตอร์ปริภูมิของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำบนแกน $\alpha - \beta$ (อ้างอิงทางขดลวดสเตเตอร์)

จากสมการ (2.2) และ (2.3) ถ้าค่าพารามิเตอร์ต่างๆ รวมทั้งความเร็วโรเตอร์ (ω_m) ตรงกับค่าจริงในมอเตอร์ แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ได้จากสมการทั้งสองจะมีค่าเท่ากัน แต่ถ้าความเร็วโรเตอร์ที่ใช้คำนวณในสมการ (2.3) แตกต่างไปจากค่าจริง จะทำให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (\bar{U}) ที่คำนวณได้จากสมการ (2.2) และ (2.3) มีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งเราสามารถนำค่าความผิดพลาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำนี้ไปใช้ในการประมาณค่าความเร็วที่ถูกต้องได้โดยอาศัยหลักการของ Model Reference Adjustment System (MRAS) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



โดยที่ \otimes แทนตัวปฏิบัติการคูณภายใน (Inner product)

รูปที่ 2.2 การประมาณค่าความเร็วที่ใช้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ใช้หลักการของ MRAS

โครงสร้างของระบบประมาณค่าความเร็วที่ใช้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำดังแสดงในรูปที่ 2.1 ประกอบด้วยส่วนหลัก 3 ส่วน คือ

1. แบบจำลองอ้างอิง (Reference Model) ทำหน้าที่เป็นแบบจำลองของมอเตอร์จริง ให้สัญญาณขาออกเป็นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจริง (\bar{U}) ที่ตรงกับค่าจริงภายในมอเตอร์ (ถ้าค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าถูกต้อง) โดยไม่ขึ้นกับค่าความเร็วโรเตอร์ ค่า \bar{U} สามารถคำนวณได้จากปริมาณทางด้านสเตเตอร์ ดังแสดงในสมการ (2.2)

2. แบบจำลองปรับตัว (Adjusted Model) ทำหน้าที่เป็นแบบจำลองของมอเตอร์จริงที่ให้สัญญาณขาออกเป็นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำประมาณ (\hat{U}) โดยคำนวณจากปริมาณทางด้านโรเตอร์ซึ่งขึ้นกับค่าความเร็วโรเตอร์ที่ประมาณจากตัวประมาณค่าความเร็ว ($\hat{\omega}_m$) จากสมการ (2.3) สามารถเขียนสมการของแบบจำลองปรับตัวได้ใหม่ดังแสดงในสมการ (2.4)

$$\hat{U} = \frac{d\hat{\lambda}_r}{dt} = R'_r \cdot \hat{i}_s + \left[-\frac{R'_r}{M'} \mathbb{I} + \hat{\omega}_m \mathbb{J} \right] \cdot \hat{\lambda}_r \quad (2.4)$$

โดยที่ " $\hat{\cdot}$ " หมายถึงค่าประมาณของตัวแปรในระบบ

3. ตัวประมาณค่าความเร็ว (Speed Estimator) ทำหน้าที่ประมาณค่าความเร็วให้กับระบบ โดยใช้เกรเดียนต์อัลกอริทึม (Gradient Algorithm) และอัตราขยายแบบอินทิเกรต ดังแสดงในสมการ (2.5) ค่าความเร็วโรเตอร์ที่ประมาณได้จากสัญญาณค่าความผิดพลาดขาออก (Output Error) จากแบบจำลองทั้งสองจะถูกนำกลับไปใช้ในการปรับแบบจำลองปรับตัวในทิศทางที่จะทำให้สัญญาณค่าความผิดพลาดลดลงเป็นศูนย์ (ดูรายละเอียดได้ใน [2])

$$\hat{\omega}_m = k_{i1} \int (\mathbb{J} \hat{\lambda}_r)^T \bar{e}_m dt \quad ; k_{i1} > 0 \quad (2.5)$$

เมื่อ

$$\bar{e}_m = \mathbb{K}_1 \cdot \bar{e} \quad \text{และ} \quad \bar{e} = \bar{U} - \hat{U} \quad (2.6)$$

$$\mathbb{K}_1 = \mathbb{I} - k\mathbb{J} \quad \text{และ} \quad k = \begin{cases} \omega_m / \alpha & ; |\omega_m| \leq \mu \\ \text{sgn}(\omega_m) \cdot \mu / \alpha & ; |\omega_m| > \mu \end{cases} \quad (2.7)$$

$$\mu > |\omega_{s,\max}| \quad \text{และ} \quad \alpha = R'_r / M' \quad (2.8)$$

โดยที่

\bar{e} : เวกเตอร์ปริภูมิค่าความผิดพลาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ

\bar{e}_m : เวกเตอร์ปริภูมิค่าความผิดพลาดหลังการขยายด้วยเมตริกซ์ \mathbb{K}_1

$\mathbb{J} \hat{\lambda}_r$: เวกเตอร์ตัวถดถอย (Regressor vector) ของการประมาณค่าความเร็ว

\mathbb{K}_1 : เมตริกซ์ขยายค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าความเร็ว

k : พารามิเตอร์ของเมตริกซ์ขยาย \mathbb{K}_1

μ : ค่าจำกัดของความเร็วที่ใช้กำหนดค่า k

$\omega_{s,\max}$: ค่าสูงสุดของความเร็วที่เสถียร

$\text{sgn}()$ คือฟังก์ชันเครื่องหมาย (Signum function)

2.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อระบบควบคุม

เนื่องด้วยระบบประมาณค่าความเร็วที่กล่าวถึงในหัวข้อก่อนหน้านี้อาศัยแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำในการคำนวณ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้จึงมีความสำคัญต่อความถูกต้องของการประมาณค่าความเร็ว วงจรสมมูลในสภาวะอยู่ตัวอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังแสดงในรูปที่ 2.1 ประกอบด้วยพารามิเตอร์ 4 ตัวคือ $R_r, \sigma L_r, M'$ และ R_r' ในการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์แต่ละตัวในวงจรสมมูลที่มีต่อความผิดพลาดในการประมาณค่าความเร็ว นั้น เราจะถือว่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆที่ไม่ได้พิจารณาในขณะนั้นเป็นพารามิเตอร์ที่มีค่าคงตัวและตรงกับค่าจริง

2.2.1 ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำร่วมสมมูล

ค่าความเหนี่ยวนำร่วมสมมูล M' จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามระดับฟลักซ์ภายในมอเตอร์ ในบางกรณีเราจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงระดับฟลักซ์ภายในมอเตอร์เพื่อให้ระบบควบคุมสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์บางประการ เช่น ลดระดับฟลักซ์เพื่อลดการสูญเสียในแกนเหล็ก หรือ เพื่อรักษาค่าแรงดันให้คงที่ในย่านความเร็วสูงกว่าค่าฐาน ดังนั้นการใช้ค่าความเหนี่ยวนำร่วมสมมูลที่มีค่าคงที่ข่มส่งผลกระทบต่อระบบประมาณค่าความเร็วและระบบควบคุม

การเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำร่วมสมมูลซึ่งเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งทางด้านโรเตอร์จะส่งผลกระทบต่อแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำประมาณ (\hat{U}) และ โรเตอร์ฟลักซ์ประมาณ ($\hat{\lambda}_r$) ที่คำนวณได้ในแบบจำลองปรับตัว เราสามารถเขียนสมการ (2.4) ในกรณีที่มีความผิดพลาดของค่าความเหนี่ยวนำร่วมสมมูลได้ใหม่ ดังนี้

$$\begin{aligned}\hat{U} &= \frac{d\hat{\lambda}_r}{dt} = R_r' \cdot \hat{i}_s + \left[-\frac{R_r'}{\hat{M}'} \mathbb{I} + \hat{\omega}_m \mathbb{J} \right] \cdot \hat{\lambda}_r \\ &= R_r' \cdot \hat{i}_s + \left[-R_r' \left\{ \frac{1}{\hat{M}'} + \Delta \left(\frac{1}{M'} \right) \right\} \mathbb{I} + \hat{\omega}_m \mathbb{J} \right] \cdot \hat{\lambda}_r\end{aligned}\quad (2.9)$$

โดยที่ $\Delta(1/M') = 1/\hat{M}' - 1/M'$: ค่าความคลาดเคลื่อนของความเหนี่ยวนำร่วมสมมูล

จากสมการ (2.3) และ (2.9) เราสามารถหาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำร่วมสมมูลต่อค่าความผิดพลาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขาออก (\bar{e}) ได้ดังนี้

$$\bar{e} = \bar{U} - \hat{U} = \mathbb{G}(s) \cdot \left\{ \mathbb{J} \hat{\lambda}_r (\omega_m - \hat{\omega}_m) \right\} + \mathbb{G}(s) \cdot \left\{ \hat{\lambda}_r R'_r \cdot \Delta(1/M') \right\} \quad (2.10)$$

เมื่อ

$$\mathbb{G}(s) = [(s + \alpha)\mathbb{I} - \omega_m \mathbb{J}]^{-1} \cdot s\mathbb{I} \quad , \alpha = R'_r / M' \quad (2.11)$$

เนื่องจากค่าความผิดพลาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ใช้ในการประมาณค่าความเร็วจริงๆ คือ \bar{e}_m ดังนั้นจากสมการ (2.6) และ (2.10) เราสามารถหาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำร่วมสมมูลที่มีต่อ \bar{e}_m ได้ดังนี้

$$\bar{e}_m = \mathbb{K}_1 \mathbb{G}(s) \cdot \left\{ \mathbb{J} \hat{\lambda}_r \cdot \Delta \omega_m \right\} + \mathbb{K}_1 \mathbb{G}(s) \cdot \left\{ \hat{\lambda}_r R'_r \cdot \Delta(1/M') \right\} \quad (2.12)$$

เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ ค่าต่างๆของระบบประมาณค่าความเร็วในสถานะอยู่ตัว เราจะทำการย้ายแกนอ้างอิงจากแกนอ้างอิงสเตเตอร์ (แกน $\alpha - \beta$) ไปเป็นแกนอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์ (แกน $d - q$) ที่แกน d อยู่ในแนวเดียวกับเวกเตอร์ของโรเตอร์ฟลักซ์ประมาณ ($\hat{\lambda}_r$) แทน ซึ่งจะทำให้สมการ (2.12) เปลี่ยนไปเป็นสมการ (2.13) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} e_{md} \\ e_{mq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G'_{m11}(s) & G'_{m12}(s) \\ G'_{m21}(s) & G'_{m22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{\lambda}_r \end{bmatrix} \cdot \Delta \omega_m + \begin{bmatrix} G'_{m11}(s) & G'_{m12}(s) \\ G'_{m21}(s) & G'_{m22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\lambda}_r \\ 0 \end{bmatrix} R'_r \cdot \Delta(1/M') \quad (2.13)$$

เมื่อ

$$G'_m(s) = \mathbb{K}_1 \cdot \mathbb{G}(s') \Big|_{s' = s + j\omega} = \begin{bmatrix} G'_{m11}(s) & G'_{m12}(s) \\ G'_{m21}(s) & G'_{m22}(s) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

โดยที่

ω : ความถี่โรเตอร์ฟลักซ์ (rad/s)

$\Delta \omega_m = \omega_m - \hat{\omega}_m$: ค่าความผิดพลาดของความเร็วโรเตอร์

$[\]_d, [\]_q$: แทนในองค์ประกอบในแกน d และ q ตามลำดับ

สมการประมาณค่าความเร็ว (2.5) เมื่อแสดงบนแกนอ้างอิง $d - q$ จะกลายเป็นสมการ (2.15) ซึ่งจะพบว่า เวกเตอร์รีเกรสเซอร์ $\mathbb{J} \hat{\lambda}_r$ จะมีค่าเฉพาะในองค์ประกอบแกน q เท่านั้น ดังนั้นองค์ประกอบของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ \bar{e}_m ที่ใช้ในการประมาณค่าความเร็ว จึงเป็นเพียง e_{mq} เท่านั้น

$$\hat{\omega}_m = k_r \int \left\{ \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{\lambda}_r \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} e_{md} \\ e_{mq} \end{bmatrix} \right\} dt = k_r \int (\hat{\lambda}_r \cdot e_{mq}) dt \quad (2.15)$$

ถ้าระบบประมาณค่าความเร็วมีเสถียรภาพ สมการประมาณค่าความเร็วจะปรับค่าประมาณ $\hat{\omega}_m$ จนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว โดยที่ e_{mq} จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจากสมการ (2.13) เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดของความเร็วโรเตอร์กับค่าความคลาดเคลื่อนของความเหนี่ยวนำร่วมสมมูลในสภาวะอยู่ตัว โดยการแทนค่า $e_{mq} = 0$ และ $s = 0$ ได้ดังนี้

$$e_{mq} = G'_{m22}(0) \cdot \hat{\lambda}_r \Delta \omega_m + G'_{m21}(0) \cdot \hat{\lambda}_r R_r \Delta(1/M') = 0 \quad (2.16)$$

$$\therefore \frac{\Delta \omega_m}{\Delta(1/M')} = -\frac{G'_{m21}(0) R_r}{G'_{m22}(0)} = \frac{R_r (k\omega_s - \alpha)}{(k\alpha + \omega_s)} \quad (2.17)$$

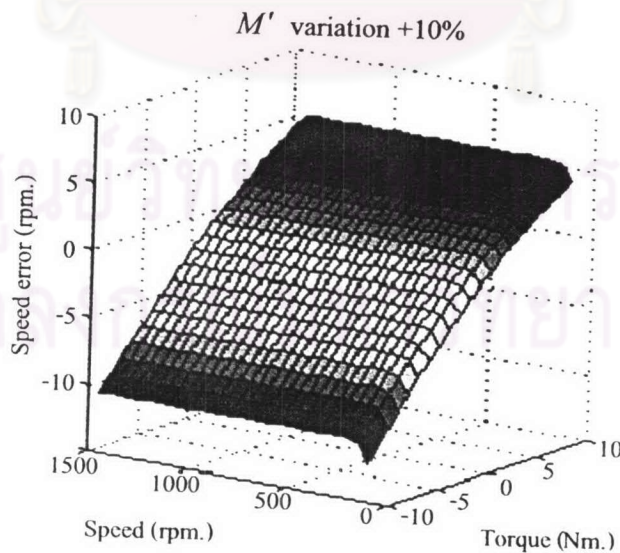
โดยที่

$$G'_{m21}(s) = \frac{-ks^2 + (\omega_m - k\alpha)s + \omega(\alpha - k\omega_s)}{(s + \alpha)^2 + \omega_s^2} \quad (2.18)$$

$$G'_{m22}(s) = \frac{s^2 + (\alpha + k\omega_m)s + \omega(k\alpha + \omega_s)}{(s + \alpha)^2 + \omega_s^2} \quad (2.19)$$

และ $\omega_s = \omega - \omega_m$: ความถี่สลลิป (rad/s)

จากสมการ (2.17) เราสามารถแสดงค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าความเร็วที่จุดทำงานต่างๆ ในระนาบแรงบิด-ความเร็ว เมื่อความเหนี่ยวนำร่วมสมมูลมีค่าเปลี่ยนแปลงไป +10% (มงคล แซ่เจี๋ย, 2545 [3]) ได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความผิดพลาดในการประมาณค่าความเร็วโรเตอร์เมื่อความเหนี่ยวนำร่วมสมมูลเปลี่ยนแปลง +10%

จากรูปที่ 2.3 จะพบว่าความผิดพลาดในการประมาณค่าความเร็วจะขึ้นกับแรงบิดมากกว่าความเร็ว และค่าความผิดพลาดจะมีค่าสูงเมื่อแรงบิดมีค่ามากทั้งในทิศทางบวกและลบ สำหรับจุดทำงานที่มีความเร็วต่างกัน พบว่าในบริเวณย่านความเร็วต่ำมากๆ ความถี่โรเตอร์ฟลักซ์จะมีค่าน้อยเป็นผลให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย เมื่อคิดเชิงสัดส่วนแล้วค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจึงส่งผลกระทบต่อแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำได้มากกว่าในบริเวณย่านความเร็วสูง

2.2.2 ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานโรเตอร์สมมูล

เนื่องจากขดลวดโรเตอร์ทำจากโลหะทองแดงหรืออลูมิเนียม เมื่ออุณหภูมิของขดลวดมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพการใช้งาน ค่าความต้านทานของขดลวดจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิในลักษณะเชิงเส้น ดังนั้นการใช้ค่าความต้านทานโรเตอร์สมมูลที่มีค่าคงที่ข่มส่งผลกระทบต่อระบบประมาณค่าความเร็ว

การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานโรเตอร์สมมูล R'_r ซึ่งเป็นพารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งทางด้านโรเตอร์ จะส่งผลกระทบต่อแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำประมาณ (\hat{U}) ทำให้เราเขียนสมการ (2.4) ใ้ใหม่ ดังนี้

$$\begin{aligned}\hat{U} &= \frac{d\hat{\lambda}_r}{dt} = \hat{R}'_r \cdot \hat{i}_s + \left[-\frac{\hat{R}'_r}{M'} \mathbb{I} + \hat{\omega}_m \mathbb{J} \right] \cdot \hat{\lambda}_r \\ &= (R'_r - \Delta R'_r) \cdot \hat{i}_s + \left[-\frac{(R'_r - \Delta R'_r)}{M'} \mathbb{I} + \hat{\omega}_m \mathbb{J} \right] \cdot \hat{\lambda}_r\end{aligned}\quad (2.20)$$

โดยที่ $\Delta R'_r = R'_r - \hat{R}'_r$: ค่าความคลาดเคลื่อนของความต้านทานโรเตอร์สมมูล

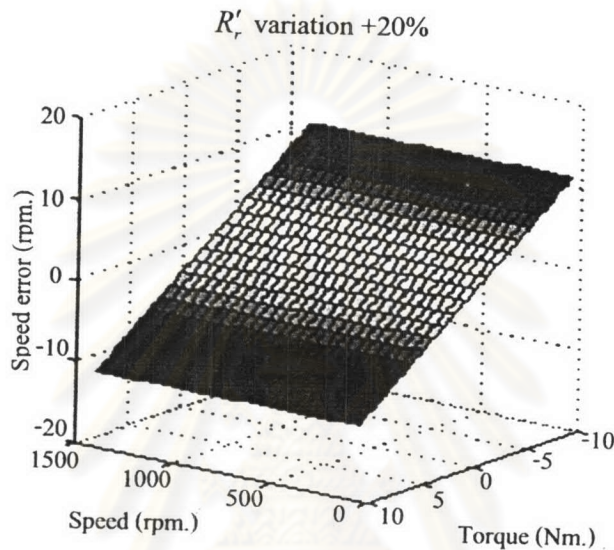
ในทำนองเดียวกันกับความเหนี่ยวนำร่วมสมมูล เราสามารถหาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานโรเตอร์สมมูล ต่อ \bar{e}_m บนแกน $d-q$ ได้ดังนี้ (ดูรายละเอียดได้ในภาคผนวก ข)

$$\bar{e}_m = G'_m(s) \cdot \left\{ \mathbb{J} \hat{\lambda}_r \cdot \Delta \omega_m \right\} + G'_m(s) \cdot \left\{ \left[M' \hat{i}_s - \hat{\lambda}_r \right] \cdot \frac{\Delta R'_r}{M'} \right\} \quad (2.21)$$

โดยการแทนค่า $e_{mq} = 0$ และ $s = 0$ ลงในสมการ (2.21) เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดของความเร็วโรเตอร์กับค่าความคลาดเคลื่อนของความต้านทานโรเตอร์สมมูลในสภาวะอยู่ตัว ได้ดังแสดงในสมการ (2.22)

$$\frac{\Delta\omega_m}{\Delta R'_r} = -\frac{G'_{m22}(0) \cdot i_{sq}}{G'_{m22}(0) \cdot \hat{\lambda}_r} = -\frac{i_{sq}}{\hat{\lambda}_r} \quad (2.22)$$

จากสมการ (2.22) เราสามารถแสดงค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าความเร็ว ณ จุดทำงานต่างๆ ในระนาบแรงบิด-ความเร็ว เมื่อความโรเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไป +20% (มงคล แซ่เจีย, 2545 [3]) ได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ค่าความผิดพลาดในการประมาณค่าความเร็วโรเตอร์เมื่อความต้านทานโรเตอร์สมมูลเปลี่ยนแปลง 20%

จากรูปที่ 2.4 จะพบว่าค่าความผิดพลาดในการประมาณค่าความเร็วจะขึ้นอยู่กับค่าแรงบิดในลักษณะเชิงเส้นซึ่งคล้ายคลึงกับกรณีของการเปลี่ยนแปลงของความเหนี่ยวนำร่วมสมมูล ในขณะที่ค่าความเร็วของจุดทำงานจะไม่ส่งผลกระทบต่อความผิดพลาดในการประมาณค่าความเร็วโรเตอร์เลย ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากระบบในสภาวะอยู่ตัว ดังแสดงในสมการ (2.21) ความผิดพลาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าความเร็วกับความคลาดเคลื่อนของความต้านทานโรเตอร์สมมูลจะมีทิศทางเดียวกันและหักล้างกัน และความสัมพันธ์ของ $\Delta\omega_m$ กับ $\Delta R'_r$ จะไม่ขึ้นกับฟังก์ชันโอนย้าย $G'_m(s)$ ในสภาวะอยู่ตัวดังแสดงในสมการ (2.22) จึงไม่ปรากฏค่าความผิดพลาดออกมาในค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำประมาณ (\hat{U}) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานโรเตอร์สมมูลจะไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ ไม่ว่าจะเป็นที่ความเร็วเท่าไรก็ตาม แต่จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการประมาณค่าความเร็วเท่านั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงไม่ได้ทำการแก้ไขผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานโรเตอร์สมมูลอย่างไรก็ตามเนื่องจากความต้านทานโรเตอร์สมมูลและความต้านทานสเตเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตาม

อุณหภูมิของมอเตอร์ไปพร้อมๆกัน ดังนั้นในกรณีที่มีการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ เราอาจจะใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานสเตเตอร์ที่ประมาณได้ ไปปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานโรเตอร์สมมูล เพื่อให้ความผิดพลาดในการประมาณค่าความเร็วโรเตอร์เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานโรเตอร์สมมูลมีค่าลดลง

2.2.3 ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลรวม

การเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลรวม (σL_s) มีลักษณะเช่นเดียวกับความเหนี่ยวนำรวมสมมูล แต่เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลรวมเป็นพารามิเตอร์ทางด้านสเตเตอร์ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลรวมจะไม่ได้มีผลโดยตรงต่อแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำประมาณ \hat{U} ที่คำนวณได้จากแบบจำลองปรับตัว แต่จะมีผลเป็นเสมือนสัญญาณรบกวนที่รวมเข้ามากับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขาออก (\bar{U}) ที่คำนวณได้จากแบบจำลองอ้างอิง ซึ่งในกรณีนี้สมการทางด้านสเตเตอร์ (2.2) และ สมการทางด้านโรเตอร์ (2.3) สามารถเขียนได้ใหม่ดังแสดงในสมการ (2.23) และ (2.24) ตามลำดับดังนี้

$$\bar{U} = \bar{v}_s - \left[R_s + \widehat{\sigma L_s} \frac{d}{dt} \right] \cdot \bar{i} = \bar{v}_s - \left[R_s + \sigma L_s \frac{d}{dt} \right] \cdot \bar{i}_s + \Delta(\sigma L_s) \frac{d\bar{i}_s}{dt} \quad (2.23)$$

$$\bar{U} = \frac{d\bar{\lambda}_r}{dt} + \Delta(\sigma L_s) \frac{d\bar{i}_s}{dt} = R'_r \cdot \bar{i}_s + \left[-\frac{R'_r}{M'} \mathbb{I} + \omega_m \mathbb{J} \right] \cdot \bar{\lambda}_m + \Delta(\sigma L_s) \frac{d\bar{i}_s}{dt} \quad (2.24)$$

เมื่อ

$\Delta(\sigma L_s) \frac{d\bar{i}_s}{dt}$: สัญญาณรบกวน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลรวม

$\Delta(\sigma L_s) = \sigma L_s - \widehat{\sigma L_s}$: ค่าความคลาดเคลื่อนของความเหนี่ยวนำรั่วไหลรวม

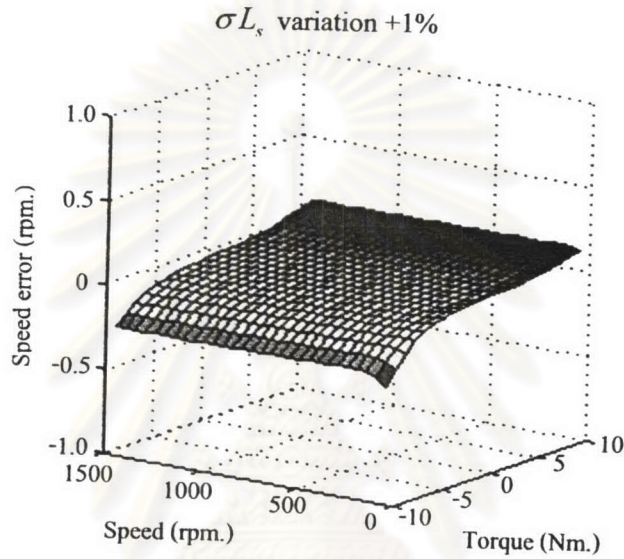
ดังนั้นจากสมการ (2.24), (2.4) และ (2.6) เราสามารถหาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลรวมต่อ \bar{e}_m บนแกน $d-q$ ได้ดังนี้ (ดูรายละเอียดได้ในภาคผนวก ข)

$$\bar{e}_m = \mathbb{G}'_m(s) \left\{ \mathbb{J} \hat{\lambda}_r \cdot \Delta \omega_m \right\} + \mathbb{K}_1 \cdot [s \mathbb{I} + \omega \mathbb{J}] \left\{ \bar{i}_s \cdot \Delta(\sigma L_s) \right\} \quad (2.25)$$

โดยการแทน $e_{mq} = 0$ และ $s = 0$ ลงในสมการ (2.25) เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดของความเร็วโรเตอร์กับค่าความคลาดเคลื่อนของความต้านทานเหนี่ยวนำรั่วไหลรวมในสภาวะอยู่ตัว ได้ดังแสดงในสมการ (2.26)

$$\frac{\Delta\omega_m}{\Delta(\sigma L_s)} = -\frac{\omega(i_{sd} + ki_{sq})}{G'_{m22}(0) \cdot \hat{\lambda}_r} = -\frac{(\alpha^2 + \omega_s^2)(i_{sd} + ki_{sq})}{(k\alpha + \omega_s) \hat{\lambda}_r} \quad (2.26)$$

จากสมการ (2.26) เราสามารถแสดงค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าความเร็ว ณ จุดทำงานต่างๆ ในระนาบแรงบิด-ความเร็ว เมื่อความเหนี่ยวนำรั้วไหลรวมมีค่าเปลี่ยนแปลงไป +1% (มงคล แซ่เจีย, 2545 [3]) ได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ค่าความผิดพลาดในการประมาณค่าความเร็วโรเตอร์เมื่อความเหนี่ยวนำรั้วไหลรวมเปลี่ยนแปลง +1%

จากรูปที่ 2.5 จะพบว่าค่าความผิดพลาดในการประมาณค่าความเร็วมีค่าค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากในย่านความเร็วต่ำ (ความถี่ต่ำ) ค่ารีแอกแตนซ์ของความเหนี่ยวนำรั้วไหลรวมมีค่าน้อย ทำให้แรงดันตกคร่อมรีแอกแตนซ์มีค่าน้อย ส่วนในย่านความเร็วสูงแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจะมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นแรงดันตกคร่อมรีแอกแตนซ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของความเหนี่ยวนำรั้วไหลรวม หรือ สัญญาณรบกวนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำรั้วไหลรวมจึงไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความเร็วประมาณมากนัก และโดยทั่วไปแล้วการควบคุมมอเตอร์ภายในช่วงความเร็วไม่เกินพิกัด เราจะรักษาขนาดโรเตอร์ฟลักซ์ให้คงที่ทำให้ความเหนี่ยวนำรั้วไหลรวมซึ่งเปลี่ยนแปลงตามฟลักซ์ภายในมอเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

2.2.4 ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานสเตเตอร์

ความต้านทานสเตเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเช่นเดียวกับความต้านทานโรเตอร์สมมูล และผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานสเตเตอร์ซึ่งเป็นพารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งทางด้านสเตเตอร์ เราสามารถพิจารณาเป็นเหมือนสัญญาณรบกวนได้เช่นกัน ดังแสดงในสมการด้านสเตเตอร์ (2.27) และสมการด้านโรเตอร์ (2.28)

$$\vec{U} = \vec{v}_s - \left[\hat{R}_s + \sigma L_s \frac{d}{dt} \right] \cdot \vec{i}_s = \vec{v}_s - \left[R_s + \sigma L_s \frac{d}{dt} \right] \cdot \vec{i}_s + \Delta R_s \vec{i}_s \quad (2.27)$$

$$\vec{U} = \frac{d\hat{\lambda}_r}{dt} + \Delta R_s \vec{i}_s = R_r' \cdot \vec{i}_s + \left[-\frac{R_r'}{M'} \mathbb{I} + \omega_m \mathbb{J} \right] \cdot \hat{\lambda}_r + \Delta R_s \vec{i}_s \quad (2.28)$$

เมื่อ $\Delta R_s \vec{i}_s$: สัญญาณรบกวน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานสเตเตอร์
 $\Delta R_s = R_s - \hat{R}_s$: ค่าความคลาดเคลื่อนของความต้านทานสเตเตอร์

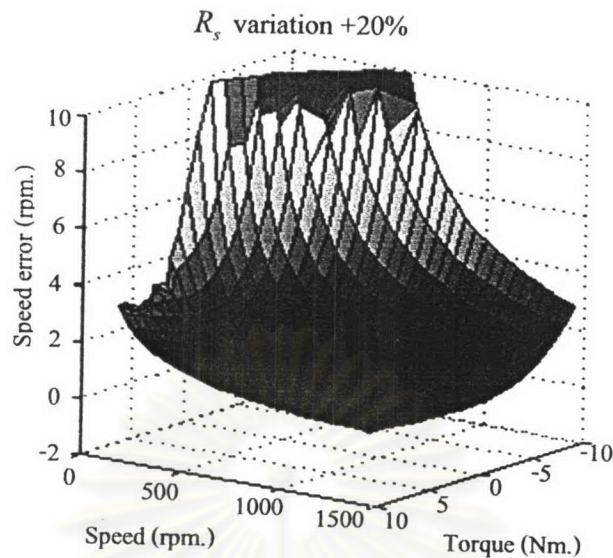
จากสมการ (2.28), (2.4) และ (2.6) เราสามารถหาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานสเตเตอร์ต่อ \vec{e}_m บนแกน $d-q$ ได้ดังนี้ (ดูรายละเอียดได้ในภาคผนวก ข)

$$\vec{e}_m = \mathbb{G}'_m(s) \left\{ \mathbb{J} \hat{\lambda}_r \cdot \Delta \omega_m \right\} + \mathbb{K}_1 \cdot \left\{ \vec{i}_s \cdot \Delta R_s \right\} \quad (2.29)$$

โดยการแทน $e_{mq} = 0$ และ $s = 0$ ลงในสมการ (2.29) เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดของความเร็วโรเตอร์กับค่าความคลาดเคลื่อนของความต้านทานสเตเตอร์ในสภาวะอยู่ตัว ได้ดังแสดงในสมการ (2.30)

$$\frac{\Delta \omega_m}{\Delta R_s} = -\frac{(-ki_{sd} + i_{sq})}{G'_{m22}(0) \cdot \hat{\lambda}_r} = \frac{(\alpha^2 + \omega_s^2)(ki_{sd} - i_{sq})}{\omega(k\alpha + \omega_s) \hat{\lambda}_r} \quad (2.30)$$

จากสมการ (2.30) สามารถแสดงค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าความเร็วที่จุดทำงานต่างๆ ในระนาบแรงบิด-ความเร็ว เมื่อความต้านทานสเตเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไป +20% (มงคล แซ่เจีย, 2545 [3]) ได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ค่าความผิดพลาดในการประมาณค่าความเร็วเมื่อความต้านทานสเตเตอร์เปลี่ยนแปลง +20%

จากรูปที่ 2.6 พบว่าทั้งค่าแรงบิดและความเร็วส่งผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดของความเร็วโรเตอร์ โดยเฉพาะในย่านความเร็วต่ำจะมีค่าความผิดพลาดของความเร็วโรเตอร์มาก เนื่องจากในย่านความเร็วต่ำ ความถี่โรเตอร์ฟลักซ์มีค่าน้อย แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจึงมีค่าน้อย ดังนั้นสัญญาณรบกวนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานสเตเตอร์จึงส่งผลกระทบต่อแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในย่านการทำงานแบบเบรกคืนพลังงานที่ความเร็วต่ำซึ่งค่าความถี่จะลดลงมากและแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยเกือบเป็นศูนย์ ผลกระทบที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้ระบบขาดเสถียรภาพได้ นอกจากนี้ที่จุดทำงานที่มีขนาดแรงบิดมาก ทำให้สัญญาณรบกวนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานสเตเตอร์มีค่ามาก (กระแสสเตเตอร์มีค่ามาก) เป็นผลให้เกิดความผิดพลาดของการประมาณค่าความเร็วโรเตอร์มากยิ่งขึ้น

จากผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ทั้งหมดที่ได้นำเสนอข้างต้น เห็นได้ว่าผลกระทบจากความต้านทานสเตเตอร์มีความสำคัญมากเมื่อเทียบกับค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ ดังนั้นแล้วจึงเป็นเหตุผลที่วิจัยนี้เลือกที่จะแก้ไขผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานสเตเตอร์ต่อระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดความเร็ว ดังจะเสนอในบทต่อไป