

## บทที่ 4

### การประมาณค่าความเร็วที่มีใช้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำและมีการประมาณค่า ความต้านทานสเตเตอร์พร้อมกัน

การออกแบบเมตริกซ์ขยายที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 เพื่อให้ระบบมีคุณสมบัติความ  
คงทนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานสเตเตอร์ชี้ให้เห็นว่าเราสามารถปรับปรุงระบบได้ดีขึ้น  
ในระดับหนึ่งแต่ไม่สามารถกำจัดค่าความผิดพลาดในการประมาณค่าความเร็วให้เป็นศูนย์ได้และ  
แม้ว่าอัตราขยายป้อนกลับจะช่วยให้ระบบมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงความต้านทานสเตเตอร์  
ที่ดีขึ้น แต่ระบบยังคงขาดเสถียรภาพได้เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ความถี่ต่ำๆ เนื่องจากค่าความ  
ต้านทานสเตเตอร์ที่ใช้ในตัวสังกะสีมีค่าไม่ตรงกับค่าความต้านทานของมอเตอร์ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลง  
ตามอุณหภูมิอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นแนวทางที่จะแก้ไขความคลาดเคลื่อนของความต้านทานสเตเตอร์  
อีกวิธีหนึ่งคือการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ไปพร้อมๆกับการประมาณค่าความเร็ว

ในบทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงวิธีการประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทาน  
สเตเตอร์ รวมทั้งการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทาน  
สเตเตอร์ และจะนำผลที่ได้มาใช้เป็นเงื่อนไขในการออกแบบระบบประมาณค่าความต้านทาน  
สเตเตอร์ที่มีเสถียรภาพทุกย่านการทำงาน (ได้แก่ ย่านมอเตอร์ ย่านเบรกแบบคืนพลังงาน และ ย่าน  
ปลั๊กกิ้ง) รวมทั้งทดสอบความถูกต้องด้วยผลการทดลองจริง

#### 4.1 วิธีการประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทานสเตเตอร์

การประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ที่จะนำเสนอในงานวิจัยนี้ สามารถทำได้  
ด้วยวิธีเดียวกับการประมาณค่าความเร็ว โดยการใส่สัญญาณค่าความผิดพลาดของแรงเคลื่อน  
เหนี่ยวนำขาออกของระบบ ( $\bar{e}$ ) มาคำนวณหาค่าความต้านทานสเตเตอร์ประมาณ ( $\hat{R}_s$ ) แล้วป้อนกลับ  
ให้แบบจำลองอ้างอิงดังรูปที่ 4.1 การประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทานสเตเตอร์ใช้วิธี  
เดียวกันที่เรียกว่า เกรเดียนต์อัลกอริทึม ดังแสดงในสมการ (4.1) และ (4.2) ตามลำดับ

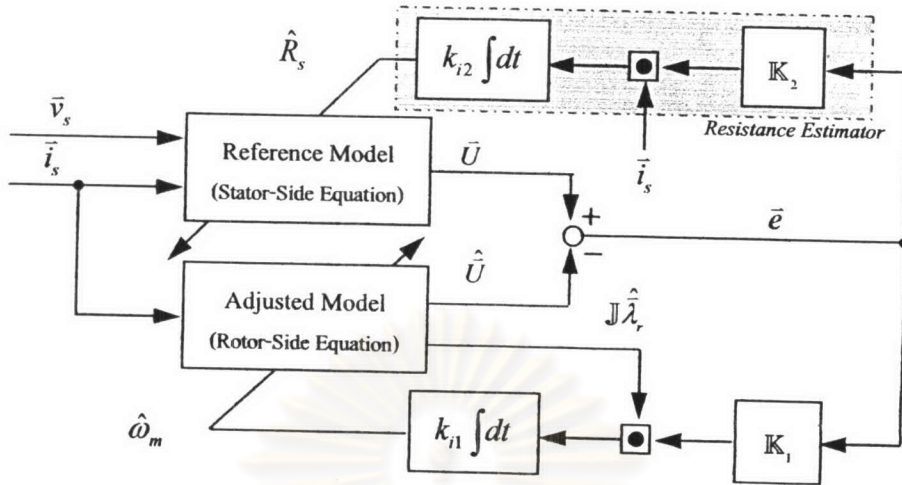
$$\hat{\omega}_m = k_{r1} \int (\mathbb{J} \hat{\lambda}_r)^T (\mathbb{K}_1 \bar{e}) dt \quad ; k_{r1} > 0 \quad (4.1)$$

$$\hat{R}_s = k_{r2} \int (\bar{i}_s)^T (\mathbb{K}_2 \bar{e}) dt \quad ; k_{r2} > 0 \quad (4.2)$$

โดยที่

$\mathbb{K}_1$ : เมตริกซ์ขยายค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าความเร็ว

$\mathbb{K}_2$ : เมตริกซ์ขยายค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์



โดยที่  $\odot$  แทนตัวปฏิบัติการคูณภายใน (Inner product)

รูปที่ 4.1 ระบบประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทานสเตเตอร์

สำหรับในงานวิจัยนี้ เมตริกซ์ขยาย  $K_2$  เป็นเมตริกซ์ขยายค่าความผิดพลาด สำหรับการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ เช่นเดียวกับเมตริกซ์ขยาย  $K_1$  ที่ใช้ในการประมาณค่าความเร็ว โดยที่เราจะออกแบบเมตริกซ์ขยาย  $K_2$  ให้ระบบประมาณมีเสถียรภาพทุกย่านการทำงาน โดยเริ่มต้นจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทานสเตเตอร์ที่ใช้เมตริกซ์ขยาย  $K_2$  นี้ เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขสำหรับการเลือกและออกแบบเมตริกซ์ขยาย  $K_2$  ในลำดับต่อไป

#### 4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็วและความต้านทานสเตเตอร์

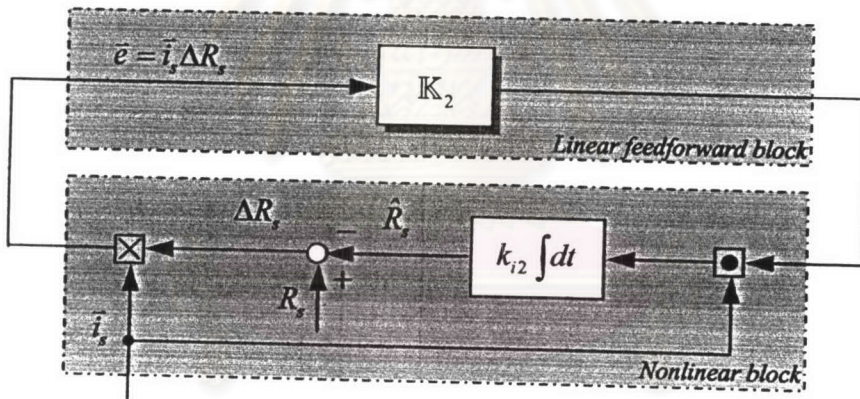
ในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบประมาณค่าโดยรวม สิ่งที่ต้องคำนึงเป็นลำดับแรก ได้แก่ เสถียรภาพของแต่ละวงรอบของการประมาณค่า หมายความว่าในกรณีที่เราระประมาณค่าความเร็วหรือความต้านทานสเตเตอร์แต่เพียงอย่างเดียว ระบบประมาณค่าในแต่ละวงรอบนั้นจะต้องมีเสถียรภาพในตัวของมันเอง เนื่องจากในวงรอบการประมาณค่าความเร็วได้ถูกออกแบบให้มีเสถียรภาพอยู่แล้ว ดังนั้นเราจะพิจารณาเพียงการออกแบบเฉพาะในส่วนของวงรอบการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ และหลังจากที่ออกแบบให้แต่ละวงรอบมีเสถียรภาพแล้วสิ่งที่ต้องคำนึงอีกประการหนึ่ง คือ เสถียรภาพของการประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทานสเตเตอร์พร้อมกัน เนื่องจากการใช้สัญญาณค่าความผิดพลาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขาออกของระบบ ( $\hat{e}$ ) ในการประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทานสเตเตอร์จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันของการประมาณค่าทั้งสอง และอาจทำให้การประมาณเป็นไปในทิศทางที่ไม่ถูกต้อง จนขาดเสถียรภาพในบางย่านการทำงานได้

4.2.1 เสถียรภาพของการประมาณค่าความต้านทานสเตรเตอร์

การวิเคราะห์เฉพาะการประมาณค่าความต้านทานสเตรเตอร์สามารถกระทำได้เช่นเดียวกับการวิเคราะห์การประมาณค่าความเร็ว ในเบื้องต้นเราจะสมมติว่าระบบมีเฉพาะค่าความคลาดเคลื่อนของความต้านทานสเตรเตอร์ ( $\Delta R_s$ ) ส่วนค่าความผิดพลาดความเร็ว ( $\Delta \omega_m$ ) นั้นมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้การคำนวณในส่วนแบบจำลองอ้างอิงได้รับผลกระทบจากการคลาดเคลื่อนของค่าความต้านทานสเตรเตอร์ดังแสดงในสมการ (2.27) ในขณะที่แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่คำนวณจากแบบจำลองแบบปรับตัวในสมการ (2.4) จะมีค่าตรงกับค่าจริง เนื่องจากค่าความเร็วประมาณ ( $\hat{\omega}_m$ ) เท่ากับค่าความเร็วจริง ( $\omega_m$ ) ดังนั้นค่าความผิดพลาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของระบบจะมีค่าดังนี้

$$\bar{e} = \bar{U} - \hat{U} = \bar{i}_s \Delta R_s \tag{4.3}$$

และจากการประมาณค่าความต้านทานสเตรเตอร์ ในสมการ(4.2) ทำให้เราสามารถเขียนวงรอบการประมาณค่าความต้านทานสเตรเตอร์ ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.2



โดยที่ ⊗ แทนตัวปฏิบัติการคูณเวกเตอร์ (Vector Product)

รูปที่ 4.2 วงรอบของการประมาณค่าความต้านทานสเตรเตอร์

รูปที่ 4.2 ประกอบด้วย บล็อกป้อนไปหน้าเชิงเส้น (Linear Feedforward Block) และบล็อกไม่เชิงเส้น (Nonlinear Block) จากทฤษฎีเสถียรภาพแบบไฮเปอร์ (Hyperstability) ที่กล่าวว่า “เงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอ เพื่อที่ระบบป้อนกลับดังแสดงในรูปที่ 4.2 มีเสถียรภาพสำหรับบล็อกไม่เชิงเส้นใด ๆ ที่มีคุณสมบัติพาสซีฟ (passive) คือ เมตริกซ์  $K_2$  จะต้องมีคุณสมบัติ ค่าจริงบวกอย่างเข้ม (Strictly Positive Real หรือ SPR)” หรืออาจกล่าวได้ว่า ถ้าเรากำหนดบล็อกไม่เชิงเส้นให้มีค่าคงที่ เสถียรภาพของวงรอบการประมาณค่าความต้านทานสเตรเตอร์ จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติ strictly positive real ของเมตริกซ์  $K_2$  [1] นั่นคือมุมเฟสของสัญญาณค่าความผิดพลาด

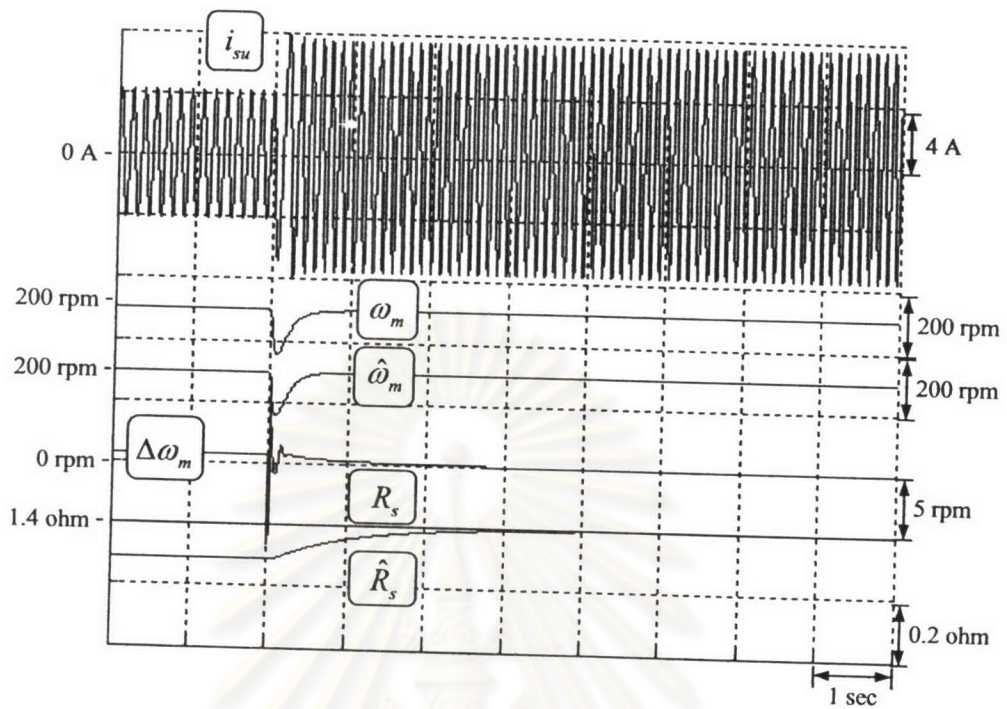
ของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ ( $\vec{e}$ ) หลังจากผ่านเมตริกซ์  $\mathbb{K}_2$  จะต้องเลื่อนเฟสไปน้อยกว่า  $\pm 90^\circ$  หรือเมตริกซ์  $\mathbb{K}_2$  ต้องมีสมบัติเชิงเฟสที่มีค่าน้อยกว่า  $\pm 90^\circ$  ดังสมการ (4.4)

$$\text{มุมเลื่อนเฟส: } \angle \mathbb{K}_2 = \tan^{-1} \frac{b}{a} < \pm 90^\circ \text{ หรือ } a > 0 \text{ โดยที่ } \mathbb{K}_2 = a\mathbb{I} + b\mathbb{J} \quad (4.4)$$

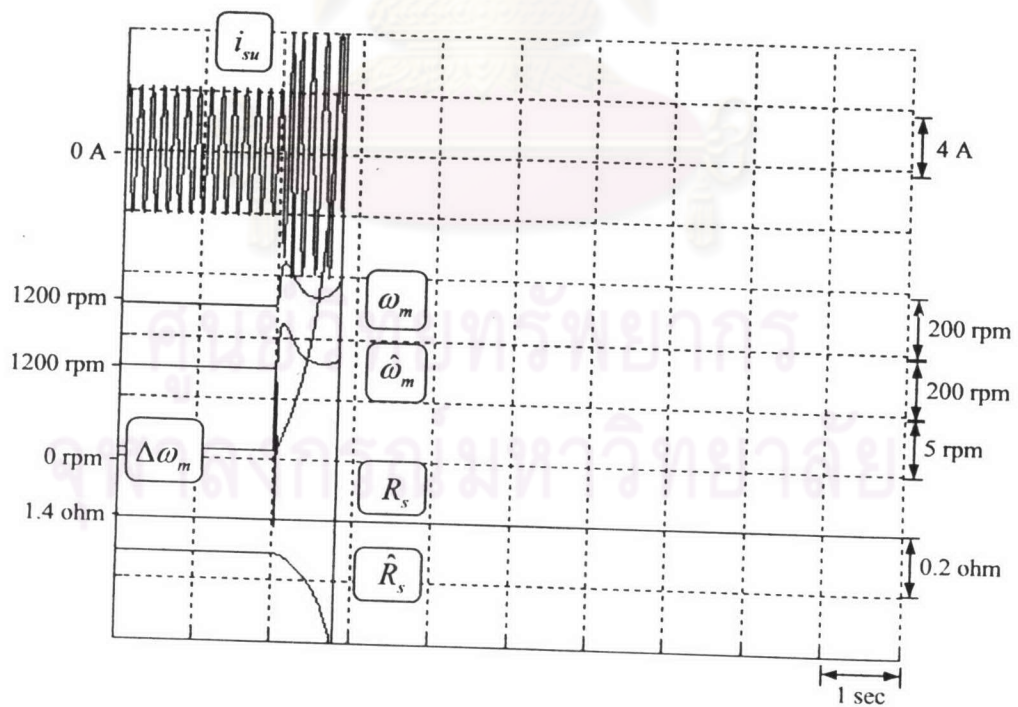
ตัวอย่างเมตริกซ์ที่มีสมบัติ SPR และทำให้วงรอบการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์มีเสถียรภาพ ได้แก่ “เมตริกซ์  $\mathbb{K}_1$ ” เนื่องจากในสมการ (2.7) เมตริกซ์  $\mathbb{K}_1$  มีค่า  $a=1$  ซึ่งมากกว่าศูนย์ตามเงื่อนไขของสมการ (4.4) ดังนั้นถ้าเราใช้เมตริกซ์  $\mathbb{K}_1$  เป็นเมตริกซ์ขยาย  $\mathbb{K}_2$  แล้วระบบประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทานสเตเตอร์ควรมีเสถียรภาพภายในตัวมันเอง แต่จากผลจำลองการทำงานเราพบว่าการทำงานของระบบประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ร่วมกับการประมาณค่าความเร็วมีเสถียรภาพดีในย่านการทำงานแบบมอเตอร์เท่านั้น แต่ระบบจะขาดเสถียรภาพในย่านการทำงานแบบเบรกคืนพลังงาน ดังแสดงรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

รูปที่ 4.3 และ 4.4 เป็นผลจำลองการทำงานของระบบประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทานสเตเตอร์ ที่ความเร็ว 200 rpm โดยเราจะตั้งต้นค่าความต้านทานสเตเตอร์ในระบบมีค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าจริงไป -8% หลังจากนั้นเราได้ทดลองใส่โหลดให้กับระบบ ซึ่งเป็นโหลดแบบ มอเตอร์ (+10Nm) และเบรกคืนพลังงาน (-10 Nm) ตามลำดับ เพื่อดูการทำงานของระบบประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ และเสถียรภาพของระบบโดยรวม

ดังนั้นการออกแบบให้วงรอบการประมาณแต่ละวงรอบมีเสถียรภาพจึงไม่เพียงพอที่จะทำให้ระบบที่มีการประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทานสเตเตอร์พร้อมกัน มีเสถียรภาพทุกย่านการทำงาน โดยเฉพาะย่านการทำงานแบบเบรกแบบคืนพลังงาน และสาเหตุสำคัญที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ คือการเชื่อมโยงระหว่างวงรอบการประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทานสเตเตอร์ ซึ่งเราจะทำการวิเคราะห์และหาเงื่อนไขที่จะทำให้ระบบโดยรวมมีเสถียรภาพต่อไป



รูปที่ 4.3 ผลจำลองการทำงานของระบบประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ ที่ใช้เมตริกซ์ขยาย  $K_2$  เท่ากับ  $K_1$  ที่ความเร็ว 200 rpm โหลด +10 Nm.



รูปที่ 4.4 ผลจำลองการทำงานของระบบประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ ที่ใช้เมตริกซ์ขยาย  $K_2$  เท่ากับ  $K_1$  ที่ความเร็ว 200 rpm โหลด -10 Nm.

### 4.2.2 เสถียรภาพของการประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทานสเตเตอร์

ค่าความผิดพลาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขาออกของระบบ ( $\bar{e}$ ) ที่ถูกใช้ในการประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทานสเตเตอร์นั้น ประกอบด้วยค่าความผิดพลาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดจากค่าความผิดพลาดความเร็ว ( $\Delta\omega_m$ ) และค่าความผิดพลาดค่าความคลาดเคลื่อนของความต้านทานสเตเตอร์ ( $\Delta R_s$ ) ดังแสดงในสมการ(4.5)

$$\bar{e} = \bar{e}_{\Delta\omega_m} + \bar{e}_{\Delta R_s} = G(s)\{J\hat{\lambda}_r\Delta\omega_m\} + \bar{i}_s\Delta R_s \tag{4.5}$$

กำหนดให้

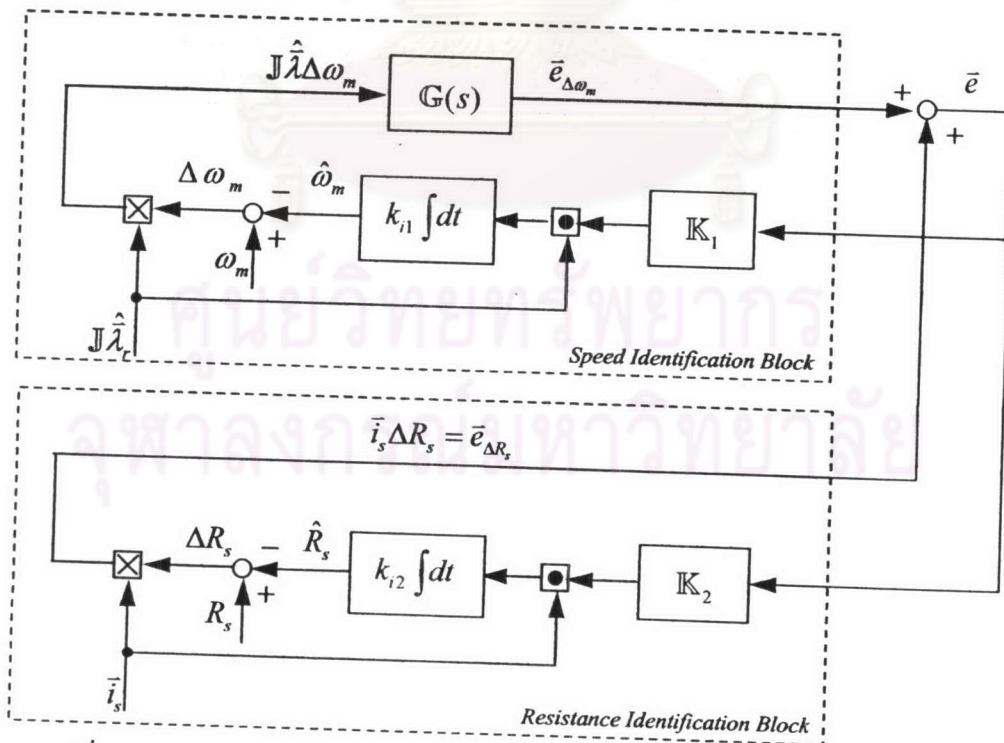
$$\bar{e}_{\Delta\omega_m} = G(s)J\hat{\lambda}_r\Delta\omega_m \text{ และ } \bar{e}_{\Delta R_s} = \bar{i}_s\Delta R_s \tag{4.6}$$

โดยที่

$\bar{e}_{\Delta\omega_m}$ : สเปซเวกเตอร์ค่าความผิดพลาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดจาก  $\Delta\omega_m$

$\bar{e}_{\Delta R_s}$ : สเปซเวกเตอร์ค่าความผิดพลาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดจาก  $\Delta R_s$

การประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทานสเตเตอร์โดยใช้ค่าความผิดพลาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขาออกจากสมการ (4.5) จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างวงรอบการประมาณค่าทั้งสองส่วน ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 วงรอบการประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทานสเตเตอร์พร้อมกัน

การวิเคราะห์เสถียรภาพของการประมาณค่าทั้งสองที่มีการเชื่อมโยงกัน เริ่มจาก นำเอาสมการการประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทานสเตรเตอร์ (สมการ (4.1) และ (4.2)) มาเขียนใหม่ในรูปเมตริกซ์สมการอนุพันธ์ ดังต่อไปนี้

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_m \\ \hat{R}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{i1} \bar{w}_1^T \mathbb{K}_1 \bar{e} \\ k_{i2} \bar{w}_2^T \mathbb{K}_2 \bar{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{i1} \bar{w}_1^T \mathbb{K}_1 (\bar{e}_{\Delta\omega_m} + \bar{e}_{\Delta R_s}) \\ k_{i2} \bar{w}_2^T \mathbb{K}_2 (\bar{e}_{\Delta\omega_m} + \bar{e}_{\Delta R_s}) \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

โดยที่

$\bar{w}_1$ : เวกเตอร์รีเกรสเซอร์ของการประมาณค่าความเร็ว และ  $\bar{w}_1 = \mathbb{J} \hat{\lambda}_r$

$\bar{w}_2$ : เวกเตอร์รีเกรสเซอร์ของการประมาณค่าความต้านทานสเตรเตอร์ และ  $\bar{w}_2 = \bar{i}_s$

ภายใต้สมมติฐานที่ว่า  $\omega_m$  และ  $R_s$  มีการเปลี่ยนแปลงเชิงเวลาที่ช้า ( $d\omega_m/dt \cong 0$  และ  $dR_s/dt \cong 0$ ) เราสามารถเขียนสมการ (4.7) ได้ใหม่ดังนี้

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_m \\ \hat{R}_s \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_m \\ R_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{i1} \bar{w}_1^T \mathbb{K}_1 (\bar{e}_{\Delta\omega_m} + \bar{e}_{\Delta R_s}) \\ k_{i2} \bar{w}_2^T \mathbb{K}_2 (\bar{e}_{\Delta\omega_m} + \bar{e}_{\Delta R_s}) \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

เมื่อเราแทนค่า  $\omega_m - \hat{\omega}_m = \Delta\omega_m$ ,  $R_s - \hat{R}_s = \Delta R_s$ ,  $\bar{e}_{\Delta\omega_m} = \mathbb{G}(s) \mathbb{J} \hat{\lambda}_r \Delta\omega_m$  และ  $\bar{e}_{\Delta R_s} = \bar{i}_s \Delta R_s$  ลงในสมการ (4.8) จะได้ว่า

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta\omega_m \\ \Delta R_s \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{i1} \bar{w}_1^T \mathbb{K}_1 \left( \mathbb{G}(s) \mathbb{J} \hat{\lambda}_r \Delta\omega_m + \bar{i}_s \Delta R_s \right) \\ k_{i2} \bar{w}_2^T \mathbb{K}_2 \left( \mathbb{G}(s) \mathbb{J} \hat{\lambda}_r \Delta\omega_m + \bar{i}_s \Delta R_s \right) \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

จะเห็นได้ว่าระบบในสมการ(4.9) เป็นระบบที่ยากต่อการวิเคราะห์ ดังนั้นในที่นี้ เราจะพิจารณากรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของ  $\Delta\omega_m$  และ  $\Delta R_s$  ช้ากว่าการเปลี่ยนแปลงของ  $\bar{w}_1, \bar{w}_2, \bar{e}_1$  และ  $\bar{e}_2$  ทำให้เกิดการแยกสเกลของเวลา (Separation of time scale) ในระบบ ซึ่งทำให้เราสามารถ ใช้การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (Averaging analysis) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ค) มาช่วยวิเคราะห์ได้ และเราก็จะสามารถศึกษาลักษณะสมบัติของระบบได้ง่ายขึ้น ดังนั้นสมการของ  $\Delta\omega_m$  และ  $\Delta R_s$  สามารถแสดงในรูปค่าเฉลี่ยได้ใหม่ ดังแสดงในสมการ(4.10)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \overline{\Delta\omega_m} \\ \overline{\Delta R_s} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{k_{i1} \bar{w}_1^T \mathbb{K}_1 \bar{e}_1}{k_{i2} \bar{w}_2^T \mathbb{K}_2 \bar{e}_1} & \frac{k_{i1} \bar{w}_1^T \mathbb{K}_1 \bar{e}_2}{k_{i2} \bar{w}_2^T \mathbb{K}_2 \bar{e}_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{\Delta\omega_m} \\ \overline{\Delta R_s} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

หรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์  $\mathbb{D}$  ดังแสดงในสมการ (4.11)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \overline{\Delta\omega_m} \\ \overline{\Delta R_s} \end{bmatrix} = - \underbrace{\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}}_{\mathbb{D}} \begin{bmatrix} \overline{\Delta\omega_m} \\ \overline{\Delta R_s} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} D_{11} &= \overline{k_{r1} \bar{w}_1^T \mathbb{K}_1 \bar{e}_1} & D_{12} &= \overline{k_{r1} \bar{w}_1^T \mathbb{K}_1 \bar{e}_2} \\ D_{21} &= \overline{k_{r2} \bar{w}_2^T \mathbb{K}_2 \bar{e}_1} & D_{22} &= \overline{k_{r2} \bar{w}_2^T \mathbb{K}_2 \bar{e}_2} \\ \bar{e}_1 &= \mathbb{G}(s) \bar{w}_1 & \bar{e}_2 &= \bar{w}_2 \\ \bar{w}_1 &= \mathbb{J} \hat{\lambda}_r & \bar{w}_2 &= \bar{i}_s \end{aligned}$$

" $\bar{\quad}$ " หมายถึงค่าเฉลี่ยเชิงเวลา

จะเห็นได้ว่าระบบดังแสดงในสมการ(4.11) อยู่ในรูปทั่วไปที่เรียกว่า Autonomous System ดังนั้นระบบจะมีเสถียรภาพ ( $\Delta\omega_m$  และ  $\Delta R_s$  ใกล้เคียงศูนย์) ก็ต่อเมื่อ เมตริกซ์  $-\mathbb{D}$  เป็นเมตริกซ์ที่เสถียร (Hurwitz Matrix)

เมตริกซ์  $-\mathbb{D}$  จะเป็นเมตริกซ์ที่เสถียรก็ต่อเมื่อส่วนจริงของค่าเฉพาะ (Eigenvalues) ทุกตัวของเมตริกซ์  $-\mathbb{D}$  มีค่าน้อยกว่าศูนย์ ซึ่งเงื่อนไขที่ทำให้เมตริกซ์  $-\mathbb{D}$  เป็นเมตริกซ์ที่เสถียร คือ

$$\text{เงื่อนไข (i) : } \text{trace } \mathbb{D} > 0$$

$$\text{เงื่อนไข (ii) : } \det \mathbb{D} > 0$$

เมื่อพิจารณาสมาชิกแต่ละตัวในเมตริกซ์  $\mathbb{D}$  จะเห็นได้ว่าสมาชิกเหล่านี้อยู่ในรูปผลคูณภายใน (Dot Product) ระหว่างเวกเตอร์รีเกรสเซอร์ ( $\bar{w}_1$  และ  $\bar{w}_2$ ) กับเวกเตอร์ค่าความผิดพลาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ ( $\bar{e}_1$  และ  $\bar{e}_2$ ) ที่ผ่านเมตริกซ์ขยาย  $\mathbb{K}_1$  และ  $\mathbb{K}_2$  ดังสมการ (4.12)-(4.15)

$$D_{11} = \overline{k_{r1} \bar{w}_1^T \mathbb{K}_1 \bar{e}_1} = \overline{k_{r1} \|\bar{w}_1\| \|\mathbb{K}_1\| \|\bar{e}_1\| \cos \theta_{11}} \quad (4.12)$$

$$D_{12} = \overline{k_{r1} \bar{w}_1^T \mathbb{K}_1 \bar{e}_2} = \overline{k_{r1} \|\bar{w}_1\| \|\mathbb{K}_1\| \|\bar{e}_2\| \cos \theta_{12}} \quad (4.13)$$

$$D_{21} = \overline{k_{r2} \bar{w}_2^T \mathbb{K}_2 \bar{e}_1} = \overline{k_{r2} \|\bar{w}_2\| \|\mathbb{K}_2\| \|\bar{e}_1\| \cos \theta_{21}} \quad (4.14)$$

$$D_{22} = \overline{k_{r2} \bar{w}_2^T \mathbb{K}_2 \bar{e}_2} = \overline{k_{r2} \|\bar{w}_2\| \|\mathbb{K}_2\| \|\bar{e}_2\| \cos \theta_{22}} \quad (4.15)$$

โดยที่

$$\theta_{11} \text{ คือ มุมระหว่าง } \bar{w}_1 \text{ กับ } \mathbb{K}_1 \bar{e}_1 \quad \text{มีค่าเท่ากับ } |\angle \bar{w}_1 - (\angle \mathbb{K}_1 + \angle \mathbb{G}(J\omega) + \angle \bar{w}_1)| \quad (4.16)$$

$$\theta_{12} \text{ คือ มุมระหว่าง } \bar{w}_1 \text{ กับ } \mathbb{K}_1 \bar{e}_2 \quad \text{มีค่าเท่ากับ } |\angle \bar{w}_1 - (\angle \mathbb{K}_1 + \angle \bar{w}_2)| \quad (4.17)$$

$$\theta_{21} \text{ คือ มุมระหว่าง } \bar{w}_2 \text{ กับ } \mathbb{K}_2 \bar{e}_1 \quad \text{มีค่าเท่ากับ } |\angle \bar{w}_2 - (\angle \mathbb{K}_2 + \angle \mathbb{G}(J\omega) + \angle \bar{w}_1)| \quad (4.18)$$

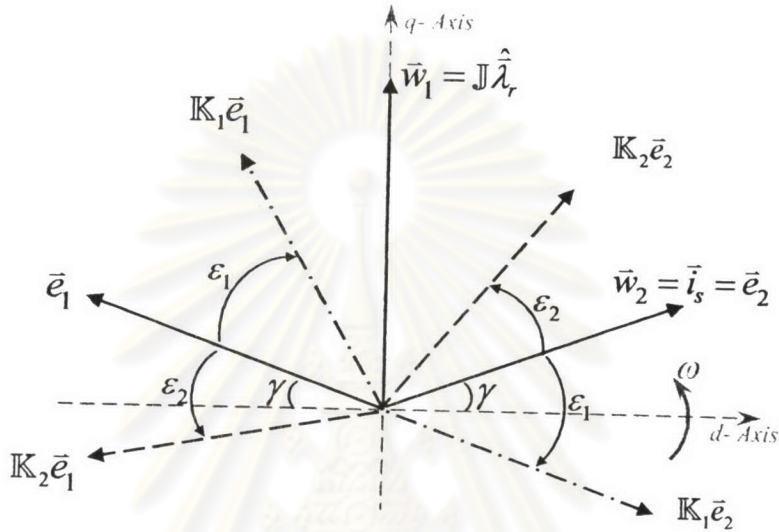
$$\theta_{22} \text{ คือ มุมระหว่าง } \bar{w}_2 \text{ กับ } \mathbb{K}_2 \bar{e}_2 \quad \text{มีค่าเท่ากับ } |\angle \bar{w}_2 - (\angle \mathbb{K}_2 + \angle \bar{w}_2)| \quad (4.19)$$



$$\angle K_1 : \text{มุมเฟสของเมตริกซ์ขยาย } K_1 \text{ มีค่าเท่ากับ } \varepsilon_1 = \tan^{-1}(-k) \quad (4.20)$$

$$\angle K_2 : \text{มุมเฟสของเมตริกซ์ขยาย } K_2 \text{ มีค่าเท่ากับ } \varepsilon_2 \quad (4.21)$$

สำหรับการอ้างอิงตำแหน่งเชิงมุมของสเปซเวกเตอร์ต่างๆข้างต้น เราจะอ้างอิงบนแกนหมุนโรเตอร์ฟลักซ์(แกน d-q) ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ตำแหน่งเชิงมุมของสเปซเวกเตอร์ต่างๆ บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์

โดยที่

$$\angle \vec{i}_s = \gamma = \tan^{-1} \frac{i_{sq}}{i_{sd}} = \tan^{-1} \frac{\omega_s}{\alpha} \quad (4.22)$$

$$\angle G(j\omega) = \text{sgn}(\omega) \cdot 90^\circ - \gamma \quad (4.23)$$

เมื่อ  $\gamma$ : มุมสลิป

สำหรับเงื่อนไข (i) ของเมตริกซ์  $D$  เราสามารถหาค่า  $\text{trace } D$  ที่เขียนอยู่ในรูปผลคูณภายในของสเปซเวกเตอร์ข้างต้น ดังแสดงในสมการ (4.24)

$$\text{trace } D = D_{11} + D_{22} = \overline{k_{i1} \|\vec{w}_1\| \|K_1\| \|\vec{e}_1\| \cos \theta_{11}} + \overline{k_{i2} \|\vec{w}_2\| \|K_2\| \|\vec{e}_2\| \cos \theta_{22}} \quad (4.24)$$

จากสมการ(4.16) และ (4.19) มุม  $\theta_{11}$  และมุม  $\theta_{22}$  คือมุมเฟสของ  $K_1 G(s)$  และ  $K_2$  ตามลำดับ เมื่อเราพิจารณาโครงสร้างของการประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทานสเตเตอร์ เมตริกซ์  $K_1 G(s)$  และ  $K_2$  คือส่วนป้อนไปหน้าเชิงเส้นของการประมาณค่าทั้งสอง และมีสมบัติ SPR ตามที่ออกแบบและกำหนดไว้คอนตัน เป็นผลให้ค่าของมุม  $\theta_{11}$  และ  $\theta_{22}$  มีค่าน้อยกว่า  $\pm 90^\circ$  หรือ ค่า  $\cos \theta_{11}$  และ  $\cos \theta_{22}$  มีค่ามากกว่าศูนย์เสมอ ดังนั้นสมบัติความเป็น SPR ของเมตริกซ์

$\mathbb{K}_1 G(s)$  และ  $\mathbb{K}_2$  เป็นเงื่อนไขที่ทำให้สมการ (4.24) เป็นจริงเสมอ หรือกล่าวได้ว่าเป็นเงื่อนไขที่เพียงพอแต่ไม่จำเป็นสำหรับ  $\text{trace } \mathbb{D} > 0$

สำหรับเงื่อนไข (ii) ของเมตริกซ์  $\mathbb{D}$  เราสามารถหาค่าของ  $\det \mathbb{D}$  ที่เขียนอยู่ในรูปผลคูณภายในของสเปซเวกเตอร์ข้างต้น ดังแสดงในสมการ (4.25)

$$\begin{aligned} \det \mathbb{D} &= D_{11} \cdot D_{22} - D_{12} \cdot D_{21} \\ &= \overline{(k_{11} \tilde{w}_1^T \mathbb{K}_1 \tilde{e}_1)} (k_{12} \tilde{w}_2^T \mathbb{K}_2 \tilde{e}_2) - \overline{(k_{11} \tilde{w}_1^T \mathbb{K}_1 \tilde{e}_2)} (k_{12} \tilde{w}_2^T \mathbb{K}_2 \tilde{e}_1) \\ &= k_{11} k_{12} \|\tilde{w}_1\| \|\tilde{w}_2\| \|\tilde{e}_1\| \|\tilde{e}_2\| \|\mathbb{K}_1\| \|\mathbb{K}_2\| \{\cos \theta_{11} \cos \theta_{22} - \cos \theta_{12} \cos \theta_{21}\} \end{aligned} \quad (4.25)$$

จากสมการ (4.25) จะเห็นได้ว่า  $\det \mathbb{D}$  จะมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าศูนย์ จะขึ้นอยู่กับเทอม  $\{\cos \theta_{11} \cos \theta_{22} - \cos \theta_{12} \cos \theta_{21}\}$  เมื่อเราแทนค่า  $\theta_{11}$ ,  $\theta_{12}$ ,  $\theta_{21}$ , และ  $\theta_{22}$  จากสมการ (4.16)-(4.19) สามารถเขียนเทอมนี้ได้ใหม่เป็นดังนี้ (ดูรายละเอียดได้ในภาคผนวก ง)

$$\cos \theta_{11} \cos \theta_{22} - \cos \theta_{12} \cos \theta_{21} = \text{sgn}(\omega) \cos(-\varepsilon_1 - \gamma + \varepsilon_2) \sin(2\gamma) \quad (4.26)$$

จากสมการ (4.26) เราจะได้เงื่อนไขที่เพียงพอแต่ไม่จำเป็นที่จะทำให้  $\det \mathbb{D} > 0$  ดังแสดงในสมการ (4.27)

$$\text{sgn}(\omega) \cos(-\varepsilon_1 - \gamma + \varepsilon_2) \sin(2\gamma) > 0 \quad (4.27)$$

ดังนั้นจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทานสเคเตอร์ เราสามารถสรุปเงื่อนไขที่เพียงพอแต่ไม่จำเป็นสำหรับเสถียรภาพของระบบสำหรับการออกแบบเมตริกซ์ขยาย  $\mathbb{K}_2$  โดยการพิจารณาจากสมบัติเชิงเฟส (มุม  $\varepsilon_2$ ) ได้ดังนี้

$$\text{sgn}(\omega) \cos(-\varepsilon_1 - \gamma + \varepsilon_2) \sin(2\gamma) > 0 \text{ และ } \varepsilon_2 < \pm 90^\circ \quad (4.28)$$

โดยที่

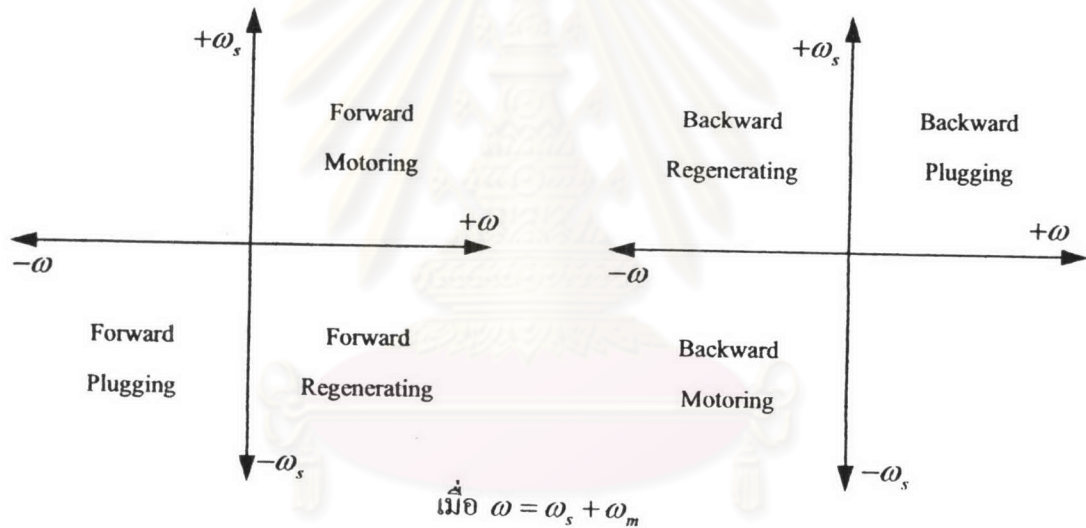
$$\gamma \leq \pm \tan^{-1} \frac{\omega_{s,\max}}{\alpha} \quad \text{ซึ่งในที่นี้จะมีค่าประมาณ } \gamma \leq \pm 66^\circ$$

$$\varepsilon_1 \leq \pm \tan^{-1} \frac{\mu}{\alpha} \quad \text{ซึ่งในที่นี้จะมีค่าประมาณ } \varepsilon_1 \leq \pm 70^\circ$$

### 4.3 การออกแบบระบบประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์

การออกแบบระบบประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ จะออกแบบผ่านเมตริกซ์ขยาย  $\mathbb{K}_2$  โดยอาศัยการพิจารณามุมเฟส (มุม  $\varepsilon_2$ ) ของเมตริกซ์ดังกล่าว ให้สอดคล้องกับเงื่อนไขอสมการ (4.28) ในทุกย่านการทำงานของมอเตอร์

สำหรับย่านการทำงานทั้งหมดของมอเตอร์ ประกอบด้วย ย่านการทำงานแบบมอเตอร์ (Motoring Mode), ย่านการทำงานแบบเบรกคืนพลังงาน (Regenerating Mode) และย่านการทำงานแบบปลั๊กกิ้ง (Plugging Mode) โดยที่ย่านการทำงานต่างๆของมอเตอร์มีความสัมพันธ์กับเครื่องหมายของตัวแปรความเร็วเชิงมุมต่างๆ ซึ่งได้แก่ ความถี่โรเตอร์ปลั๊กซ์ ( $\omega$ ), ความถี่สลิป ( $\omega_s$ ) และ ความเร็วโรเตอร์ ( $\omega_m$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.7



- (ก) มอเตอร์หมุนไปหน้า ( $\omega_m > 0$ )
- (ข) มอเตอร์หมุนกลับทิศ ( $\omega_m < 0$ )

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของย่านการทำงานของมอเตอร์กับเครื่องหมายของตัวแปรความเร็วเชิงมุม

ในที่นี้จะลองพิจารณาในกรณีตัวอย่างที่ออกแบบเมตริกซ์ขยาย  $\mathbb{K}_2$  ก่อนหน้านี้ ที่มีค่าเท่ากับ  $\mathbb{K}_1$  หรือ มุม  $\varepsilon_2 = \varepsilon_1$  ซึ่งเมื่อแทนค่ามุมดังกล่าวลงในอสมการ (4.28) จะได้เป็น

$$\text{sgn}(\omega) \cos(-\varepsilon_1 - \gamma + \varepsilon_2) \sin(2\gamma) = \text{sgn}(\omega) \cos(\gamma) \sin(2\gamma) > 0 \tag{4.29}$$

เมื่อพิจารณาในย่านการทำงานแบบมอเตอร์ทั้งหมุนไปหน้าและกลับทิศ พบว่าเทอมฝั่งซ้ายมือของอสมการ (4.29) มีค่ามากกว่าศูนย์เสมอ จึงสรุปได้ว่าระบบมีเสถียรภาพจริงและ

สอดคล้องกับผลการจำลองในรูปที่ 4.3 แต่ในย่านการทำงานแบบเบรกคืนพลังงานทั้งหมดไปหน้า และกลับทิศพบว่าทอมฝั่งซ้ายมือของอสมการ (4.29) จะมีค่าน้อยกว่าศูนย์ ซึ่งไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพ และเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพในย่านการทำงานดังกล่าว เนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงของการประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทานสเตเตอร์ และข้อสรุปนี้ก็สอดคล้องกับผลการจำลองในรูปที่ 4.4 เช่นกัน

สำหรับการออกแบบให้เมตริกซ์ขยาย  $\mathbb{K}_2$  ให้สอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพทุกย่านการทำงาน สามารถแบ่งพิจารณาเงื่อนไขอสมการ (4.28) ตามย่านการทำงานต่างๆ ได้ดังนี้

ก) ย่านการทำงานแบบมอเตอร์ พบว่าผลคูณของทอม  $\text{sgn}(\omega)\sin(2\gamma)$  มีค่ามากกว่าศูนย์เสมอ ดังนั้นเงื่อนไขเสถียรภาพในย่านการทำงานนี้คือ ทอม  $\cos(-\varepsilon_1 - \gamma + \varepsilon_2)$  ต้องมากกว่าศูนย์ หรือ  $-90^\circ < (-\varepsilon_1 - \gamma + \varepsilon_2) < 90^\circ$

ข) ย่านการทำงานแบบเบรกคืนพลังงาน พบว่าผลคูณของทอม  $\text{sgn}(\omega)\sin(2\gamma)$  มีค่าน้อยกว่าศูนย์เสมอ ดังนั้นเงื่อนไขเสถียรภาพในย่านการทำงานนี้คือ ทอม  $\cos(-\varepsilon_1 - \gamma + \varepsilon_2)$  ต้องน้อยกว่าศูนย์ หรือ  $90^\circ < (-\varepsilon_1 - \gamma + \varepsilon_2) < 270^\circ$

ค) ย่านการทำงานแบบปลั๊กกิ้ง พบว่าผลคูณของทอม  $\text{sgn}(\omega)\sin(2\gamma)$  มีค่ามากกว่าศูนย์เสมอ ดังนั้นเงื่อนไขเสถียรภาพในย่านการทำงานนี้คือ ทอม  $\cos(-\varepsilon_1 - \gamma + \varepsilon_2)$  ต้องมากกว่าศูนย์ หรือ  $-90^\circ < (-\varepsilon_1 - \gamma + \varepsilon_2) < 90^\circ$

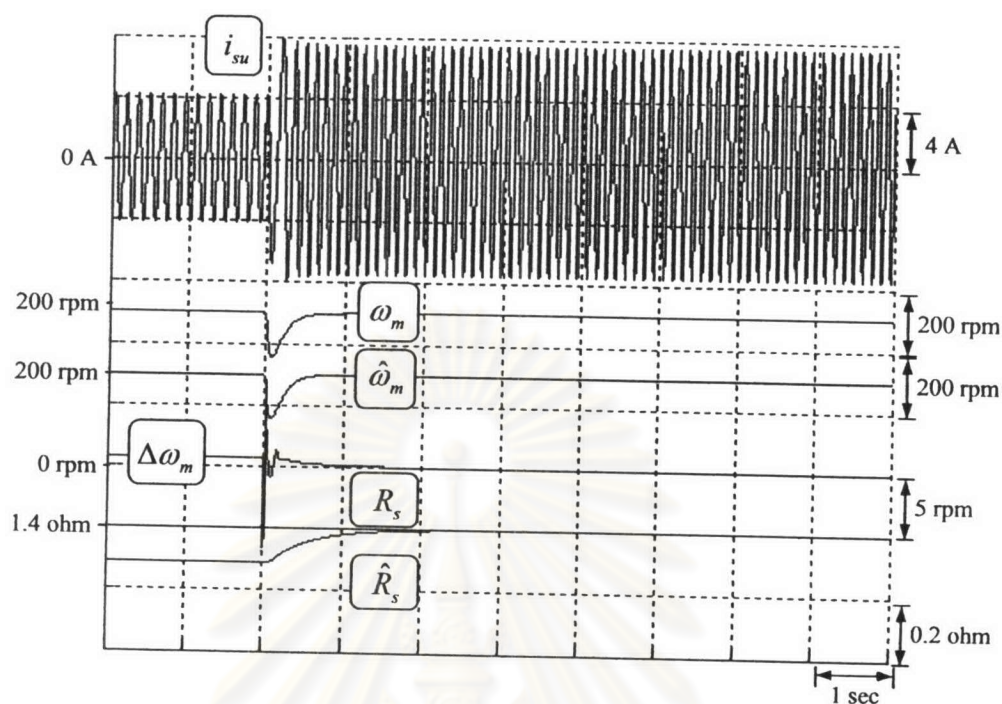
เราจะพบว่าค่า  $\varepsilon_2$  ที่ทำให้เงื่อนไขข้างต้นทั้ง 3 ข้อเป็นจริงมีค่าดังแสดงในสมการ (4.30) และเมตริกซ์  $\mathbb{K}_2$  ที่มีมูเมตริกซ์สอดคล้องกับค่า  $\varepsilon_2$  แสดงในสมการ (4.31)

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + \text{sgn}(\omega) \cdot 45^\circ - \text{sgn}(\omega_s) \cdot 45^\circ \quad (4.30)$$

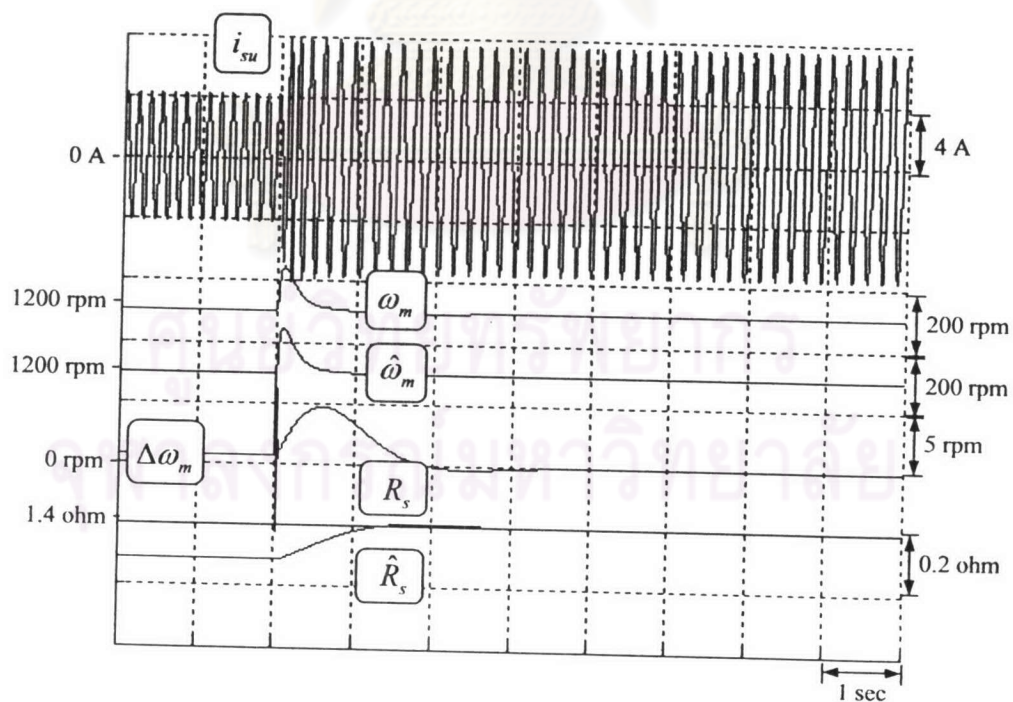
$$\mathbb{K}_2 = \mathbb{K}_1 \cdot [\mathbb{I} + \text{sgn}(\omega)\mathbb{J}] \cdot [\mathbb{I} - \text{sgn}(\omega_s)\mathbb{J}] \quad (4.31)$$

เมื่อเรานำเมตริกซ์  $\mathbb{K}_2$  ที่ออกแบบได้ในสมการ (4.31) มาทดสอบการทำงาน จากผลจำลองการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ซึ่งเป็นการทำงานของระบบประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทานสเตเตอร์ ที่ความเร็ว 200 rpm มีโหลดขนาด +10 Nm. และ -10 Nm. ตามลำดับ โดยเริ่มต้นด้วยค่าความต้านทานสเตเตอร์ที่คลาดเคลื่อนไป -8%

จากการทดสอบพบว่า เมื่อเราออกแบบเมตริกซ์  $\mathbb{K}_2$  ตามเงื่อนไขเสถียรภาพที่เสนอในสมการ (4.31) ระบบประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทานสเตเตอร์จะมีเสถียรภาพทั้งย่านการทำงานแบบมอเตอร์และแบบเบรกคืนพลังงาน อีกทั้งสามารถประมาณค่าความต้านทานได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 4.8 ผลจำลองการทำงานของระบบประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ ที่ใช้เมตริกซ์ขยาย  $K_2$  ดังสมการ(4.31) ที่ความเร็ว 200 rpm โหลด +10 Nm



รูปที่ 4.9 ผลจำลองการทำงานของระบบประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ ที่ใช้เมตริกซ์ขยาย  $K_2$  ดังสมการ(4.31) ที่ความเร็ว 200 rpm โหลด -10 Nm

สำหรับการออกแบบเมตริกซ์ขยาย  $\mathbb{K}_2$  หรือหาค่า  $\varepsilon_2$  ให้สอดคล้องกับเงื่อนไขอสมการ (4.28) ทุกขั้นตอนการทำงานตามที่เสนอข้างต้นนั้น ถึงแม้จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพทุกขั้นตอนการทำงาน แต่วิธีการค่อนข้างยุ่งยาก อีกทั้งไม่มีแนวคิดที่ชัดเจนที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับระบบประมาณค่าความเร็วอื่นๆ ได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเสนอแนวทางการออกแบบเมตริกซ์ขยาย  $\mathbb{K}_2$  สำหรับระบบประมาณค่าความเร็วที่มีการประมาณค่าความต้านทานสเตรเตอร์ที่มีรูปแบบที่ชัดเจนและสอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพ โดยมีหลักการออกแบบ “กำหนดให้มุมเฟสของบล็อกป้อนไปหน้าเชิงเส้นของการประมาณค่าความต้านทานสเตรเตอร์ (เมตริกซ์  $\mathbb{K}_2$ ) มีค่าเท่ากับมุมเชิงเฟสของบล็อกป้อนไปหน้าเชิงเส้นของการประมาณค่าความเร็ว (เมตริกซ์  $\mathbb{K}_1 G(s)$ )” ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (4.32)

$$\angle \mathbb{K}_2 = \angle (\mathbb{K}_1 G(j\omega)) = \angle \mathbb{K}_1 + \angle G(j\omega) \quad (4.32)$$

หรือ

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + \text{sgn}(\omega) \cdot 90^\circ - \gamma \quad (4.33)$$

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบที่ใช้เมตริกซ์ขยายตามสมการ (4.32) พบว่า เสถียรภาพเฉพาะภายในวงรอบการประมาณค่าความต้านทานสเตรเตอร์ตามอสมการ (4.4) เป็นจริงเสมอ เพราะมุมเฟสของบล็อกป้อนไปหน้าเชิงเส้นของการประมาณค่าความเร็วที่ได้ ออกแบบให้สอดคล้องกับสมบัติ SPR สำหรับส่วนความเชื่อมโยงระหว่างวงรอบการประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทานสเตรเตอร์ ซึ่งพิจารณาจากอสมการ (4.28) พบว่าเมื่อแทนค่า  $\varepsilon_2$  จากสมการ (4.33) ได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{sgn}(\omega) \cos(-\varepsilon_1 - \gamma + \varepsilon_2) \sin(2\gamma) &= \text{sgn}(\omega) \cos[\text{sgn}(\omega) \cdot 90^\circ - 2\gamma] \sin(2\gamma) \\ &= \text{sgn}(\omega) [\text{sgn}(\omega) \sin(2\gamma)] \sin(2\gamma) \\ &= \text{sgn}^2(\omega) \sin^2(2\gamma) > 0 \end{aligned} \quad (4.34)$$

พบว่าอสมการ (4.34) สอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพในอสมการ (4.28) เสมอ โดยที่ไม่ต้องแยกพิจารณาในแต่ละขั้นตอนการทำงาน ดังนั้นเราจะได้เมตริกซ์ขยาย  $\mathbb{K}_2$  สำหรับการประมาณค่าความต้านทานสเตรเตอร์ ที่มีมุมเฟสสอดคล้องกับสมการ (4.33) ดังนี้

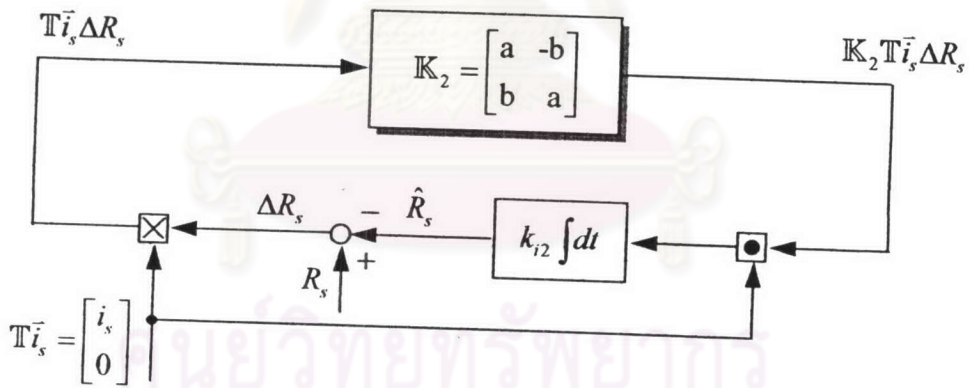
$$\mathbb{K}_2 = \text{sgn}(\omega) \mathbb{J} \cdot \left[ \mathbb{I} - \frac{\omega_s}{\alpha} \mathbb{J} \right] \cdot \mathbb{K}_1 \quad (4.35)$$

4.4 การออกแบบอัตรายายปรับตัวของระบบประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์

ในหัวข้อนี้เราจะกล่าวถึงการออกแบบอัตรายายปรับตัว  $k_{i2}$  เมื่อระบบประมาณใช้เมตริกซ์ขยาย  $\mathbb{K}_2$  ตามสมการ (4.35) สมการเมตริกซ์ขยาย (4.35)  $\mathbb{K}_2$  เขียนใหม่ ได้ดังสมการ (4.36)

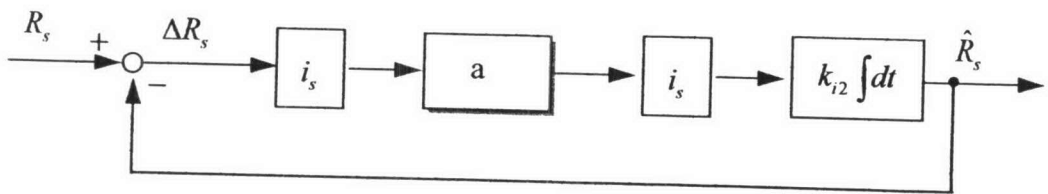
จาก 
$$\begin{aligned} \mathbb{K}_2 = a\mathbb{I} + b\mathbb{J} &= \text{sgn}(\omega)\mathbb{J} \cdot \left[ \mathbb{I} - \frac{\omega_s}{\alpha}\mathbb{J} \right] \cdot \mathbb{K}_1 \\ &= \begin{bmatrix} 0 & \text{sgn}(\omega) \\ \text{sgn}(\omega) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \omega_s/\alpha \\ \omega_s/\alpha & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & k \\ -k & 1 \end{bmatrix} \\ \therefore \begin{bmatrix} a & -b \\ b & a \end{bmatrix} &= \text{sgn}(\omega) \begin{bmatrix} (\omega_s/\alpha) + k & (\omega_s/\alpha)k - 1 \\ 1 - (\omega_s/\alpha)k & (\omega_s/\alpha) + k \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{4.36}$$

การวิเคราะห์จะอาศัยวงรอบการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ที่อ้างอิงบนแกนอ้างอิงของกระแสสเตเตอร์ (แกน  $d$  ของแกนอ้างอิงซึ่งในแนวเดียวกับ  $\vec{i}_s$ ) โดยใช้เมตริกซ์การแปลง  $T$  รูปที่ 4.2 เราสามารถเขียนใหม่โดยอ้างอิงบนแกนอ้างอิงกระแสสเตเตอร์ ได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 วงรอบการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงกระแสสเตเตอร์

จากรูปที่ 4.10 เมื่อพิจารณาผลตอบสนองต่อสัญญาณขาเข้า ( $T\vec{i}_s\Delta R$ ) ซึ่งมีเฉพาะองค์ประกอบในแกน  $d$  ผ่านเมตริกซ์ขยาย  $\mathbb{K}_2$  จะถูกนำมาคูณภายในกับเวกเตอร์  $T\vec{i}_s$  ซึ่งมีเฉพาะองค์ประกอบในแกน  $d$  เช่นกัน ดังนั้นองค์ประกอบ  $a$  ของเมตริกซ์ขยาย  $\mathbb{K}_2$  เท่านั้นที่ถูกใช้ในการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ ทำให้เราสามารถเขียนวงรอบการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ได้ใหม่ในลักษณะสัญญาณเข้าเดี่ยว-ออกเดี่ยว (SISO) ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 วงรอบประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์แบบ SISO

จากรูปที่ 4.11 เราสามารถหาฟังก์ชัน โอนย้ายระหว่างค่าความผิดพลาดในการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์เทียบกับค่าความต้านทานสเตเตอร์จริงได้ดังสมการ (4.37)

$$\frac{R_s - \hat{R}_s}{R_s} = \frac{1}{i_s^2 \left( \frac{\omega_s}{\alpha} + k \right) \frac{k_{i2}}{s}} \quad (4.37)$$

เนื่องจากความต้านทานสเตเตอร์ของมอเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิตามสมการที่ (4.38)

$$R_{sT} = R_{so} \cdot (1 + \alpha_{cu} \Delta T) \quad (4.38)$$

โดยที่

$R_{sT}$  : ค่าความต้านทานสเตเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

$R_{so}$  : ค่าความต้านทานสเตเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ

$\Delta T$  : ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิจริงของขดลวดสเตเตอร์เทียบกับอุณหภูมิขณะทดสอบ

$\alpha_{cu}$  : ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานสเตเตอร์

(ลวดตัวนำทองแดงมีค่า  $\alpha_{cu} = 0.00393 \text{ [}^\circ\text{C]}^{-1}$ )

เมื่อพิจารณาว่าอุณหภูมิของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นตามเวลาในลักษณะฟังก์ชันลาดเอียง (Ramp function) เราพบว่าความต้านทานสเตเตอร์จะเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นเป็นฟังก์ชันลาดเอียงเช่นกันดังสมการ (4.39)

$$\frac{dR_s}{dt} = R_{so} \alpha \frac{dT}{dt} \quad (4.39)$$

จากสมการ (4.37) เมื่อใช้ทฤษฎีบทค่าสุดท้าย (Final value theorem) เราสามารถหาค่าความผิดพลาดในการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ ( $\delta_{R_s}$ ) เมื่อความต้านทานเปลี่ยนแปลงตามสมการ (4.39) ในลักษณะเป็นฟังก์ชันลาดเอียงได้ดังสมการ (4.40)



$$\begin{aligned} \delta_{R_r} &= \lim_{s \rightarrow 0} \left[ \frac{s}{i_s^2 \left( \frac{\omega_s}{\alpha} + k \right) \frac{k_{i2}}{s}} \right] \cdot \left[ \frac{R_{so} \alpha (dT/dt)}{s^2} \right] \\ &= \frac{R_{so} \alpha (dT/dt)}{i_s^2 \left( \frac{\omega_s}{\alpha} + k \right) k_{i2}} \end{aligned} \quad (4.40)$$

จากสมการ (4.40) พบว่าถ้าเราใช้อัตราขยาย  $k_{i2}$  ที่มีค่าสูงจะทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าต่ำ เมื่อเราจะพิจารณาการทำงานของมอเตอร์ขณะใส่โหลดพิกัดแบบคั่นพลังงาน และจากการทดสอบที่จุดทำงานดังกล่าวพบว่าอุณหภูมิของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงประมาณ 1 องศาเซลเซียสต่ออนาที ดังนั้นเมื่อกำหนดให้ค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ที่ 0.1% คำนวณสมการ (4.40) จะได้ว่า จะต้องใช้ค่า  $k_{i2}$  เท่ากับ 0.002

#### 4.5 ข้อจำกัดในการประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทานสเตเตอร์

จากเงื่อนไขเสถียรภาพในสมการ (4.28) พบว่าในบางสภาวะการทำงานทำให้เงื่อนไขดังกล่าวเท่ากับศูนย์ หรือ  $\det \mathbb{D} = 0$  โดยสภาวะดังกล่าวนี้ ได้แก่

1. สภาวะความถี่โรเตอร์พลิกซ์เป็นศูนย์ ( $\text{sgn } \omega = 0$ )
2. สภาวะไร้โหลด ( $\sin 2\gamma = 0$ )

เมื่อ  $\det \mathbb{D} = 0$  หรือกล่าวได้ว่าระบบประมาณค่าความเร็วและค่าความต้านทานสเตเตอร์อยู่ในสถานะพหุเสถียร จึงทำให้ไม่สามารถยืนยันได้ว่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้จะถูเข้าหาค่าพารามิเตอร์จริง ในทางปฏิบัติเพื่อป้องกันปัญหาที่เกิดขึ้นเราจะหยุดประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์เมื่อมอเตอร์ทำงานใกล้สภาวะดังกล่าว ในกรณีที่ความถี่ทำงานของระบบเข้าใกล้สภาวะ  $\hat{\omega} = 0$  rad/s เราจะให้ระบบหยุดการทำงานเมื่อ  $|\hat{\omega}| < 3$  rad/s หรือ ประมาณที่ 1% ของพิกัด ในกรณีที่ระบบทำงานเข้าใกล้สภาวะไร้โหลด ( $i_{sq} = 0$  A) เราจะให้ระบบหยุดการทำงานเมื่อ  $|i_{sq}| < 2.7$  A หรือ ประมาณที่ 30% ของพิกัดโหลด นอกจากนี้เราจะให้ระบบเริ่มทำงานหลังจากระบบได้รับโหลดที่มากพอ ( $|i_{sq}| \geq 2.7$  A) หลังผ่านไป 0.5 วินาที เพื่อรอสภาวะชั่วคราวของโหลดที่อาจเกิดขึ้นในระบบผ่านไป

#### 4.6 ผลการทดลอง

รูปที่ 4.12 – 4.19 เป็นการแสดงผลการทำงานของระบบประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ที่ความเร็ว 200 rpm และ 1200 rpm โดยเริ่มต้นให้ค่าความต้านทานสเตเตอร์มีค่าความผิดพลาดอยู่ -8% และ +14% และหลังจากมอเตอร์รับโหลดพิกัด  $\pm 10$  Nm (แบบมอเตอร์ และแบบเบรกคืนพลังงาน) เป็นเวลา 0.5 วินาที ระบบสามารถประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ให้ถูกต้องใกล้เคียงกับค่าจริงที่วัดได้ (ประมาณ 1.4 ohm) ทุกย่านการทำงาน

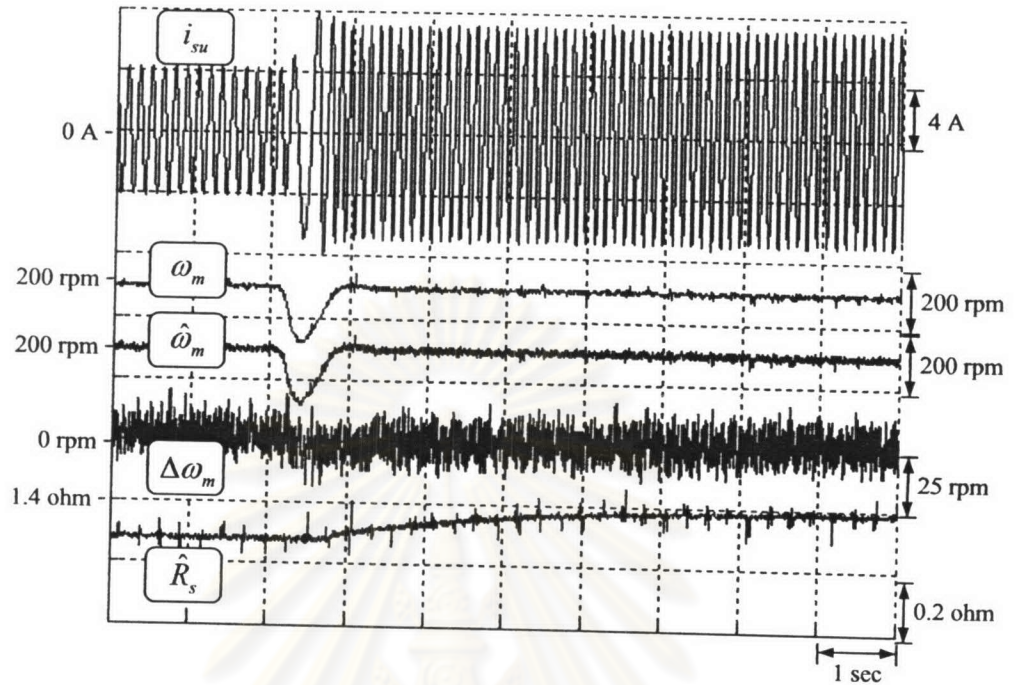
รูปที่ 4.20 เป็นการแสดงผลในลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดและค่าความเร็วของมอเตอร์ พบว่าระบบมีเสถียรภาพในการทำงานกว้างขึ้นถึง เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่มีการออกแบบเมตริกซ์ป้อนกลับ IH (ในรูปที่ 3.8-3.9) และระบบเดิมที่ไม่มีการแก้ไขผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานสเตเตอร์ (ในรูปที่ 3.6-3.7)

จากรูปที่ 4.21-4.22 เป็นการแสดงผลตอบสนองสถานะชั่วครู่โดยทำการเร่งลดความเร็วมอเตอร์จาก 200 rpm ไป 1200 rpm และ จาก 1200 rpm ไป 200 rpm ตามลำดับ พบว่าค่าความเร็วประมาณจะมีส่วนพุ่งเกินเล็กน้อยแต่โดยรวมแล้วระบบสามารถควบคุมให้มอเตอร์ติดตามความเร็วคำสั่งได้อย่างถูกต้อง ส่วนค่าความต้านทานประมาณนั้นการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงดังกล่าวและยังคงรักษาไว้ที่ค่าจริงได้

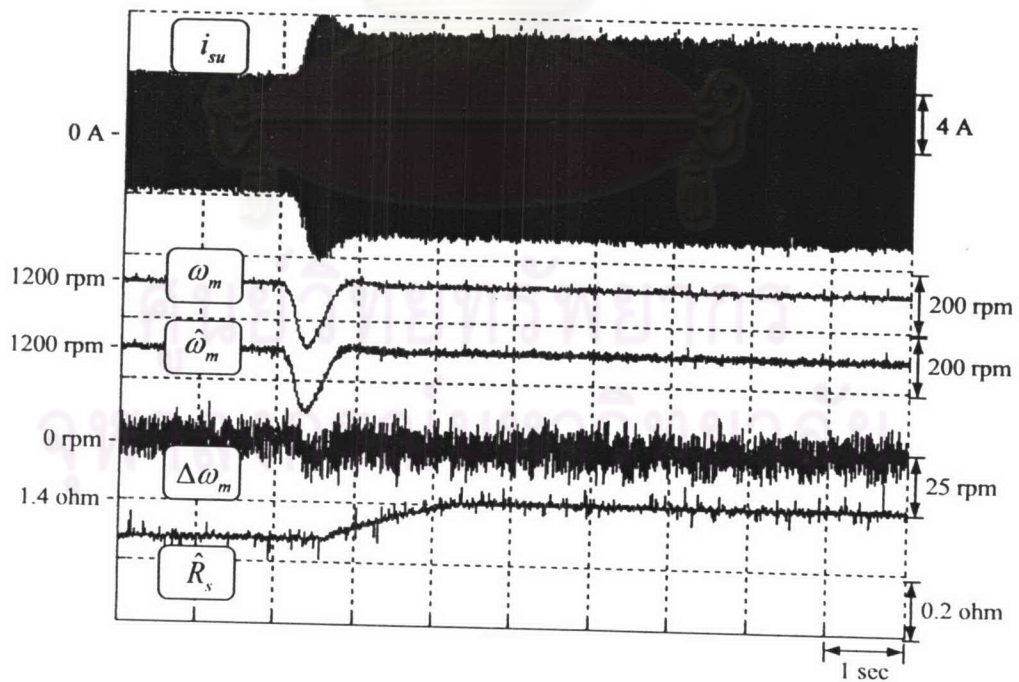
จากรูปที่ 4.23 – 4.24 เป็นการแสดงผลตอบสนองสถานะชั่วครู่โดยทำการกลับทิศทางหมุนระหว่างความเร็ว +1450 rpm กับ -1450 rpm โดยไม่มีโหลด จะเห็นได้ว่าระบบสามารถควบคุมให้มอเตอร์ติดตามค่าความเร็วคำสั่งได้อย่างถูกต้อง ส่วนการประมาณค่าความต้านทานที่มีการทำงานในช่วงเร่งลดความเร็ว ก็ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าประมาณของความต้านทานสเตเตอร์

จากรูปที่ 4.25-4.26 เป็นการแสดงผลตอบสนองชั่วครู่โดยทำการกลับทิศทางหมุนของมอเตอร์เช่นเดียวกัน แต่ขณะทดสอบจะให้มอเตอร์รับโหลดพิกัด 10 Nm. และเพื่อป้องกันกระแสชากขณะกลับทิศทางหมุน เราจึงเลือกช่วงความเร็วอยู่ที่ +200 rpm กับ -200 rpm เพื่อดูผลการทำงานของระบบประมาณค่าต้านทานอย่างต่อเนื่องเมื่อมีการกลับทิศทางหมุน พบว่าในขณะที่พบว่าระบบประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและต่อเนื่อง

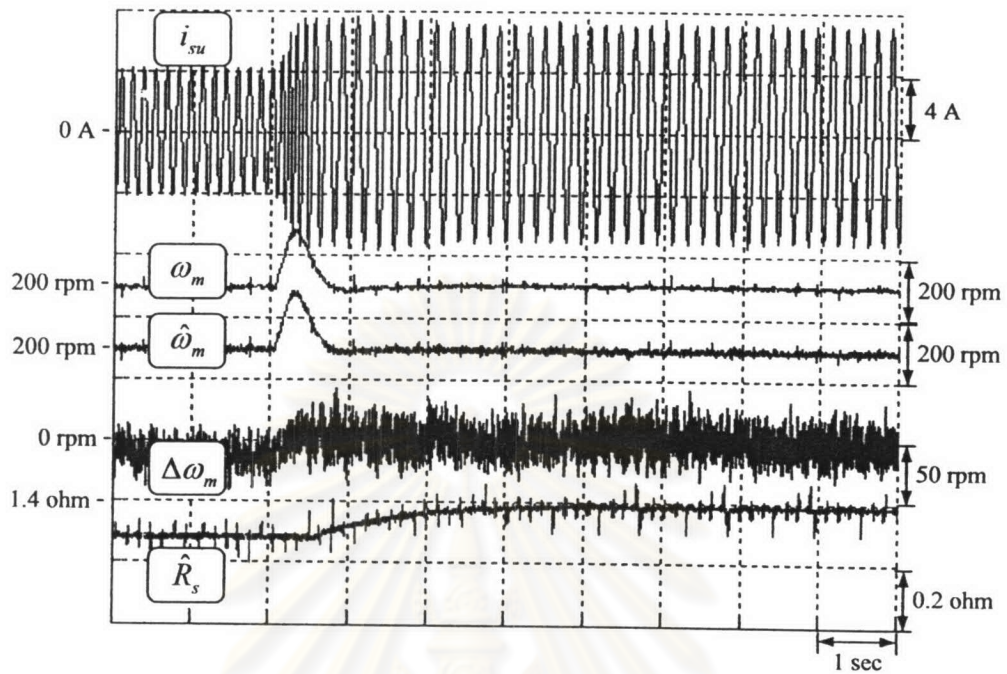
จากรูปที่ 4.27-4.28 เป็นการแสดงผลตอบสนองชั่วครู่ เมื่อใส่โหลดพิกัดที่ความเร็ว 200 rpm และ 1200 rpm พบว่าการใส่และปลดโหลดของมอเตอร์ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ และระบบสามารถรักษาความเร็วตามค่าคำสั่งอย่างถูกต้อง



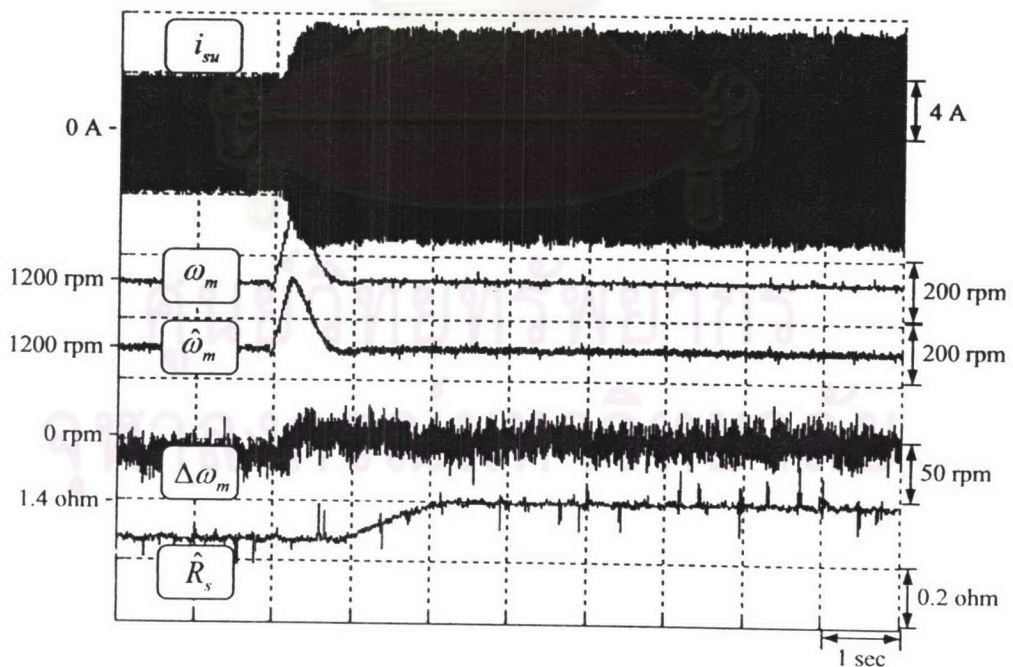
รูปที่ 4.12 รูปคลื่นขณะทำการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ที่ความเร็ว 200 rpm โดยใส่โหลดพิกัด +10 Nm. และ  $\Delta R_s = -8\%$



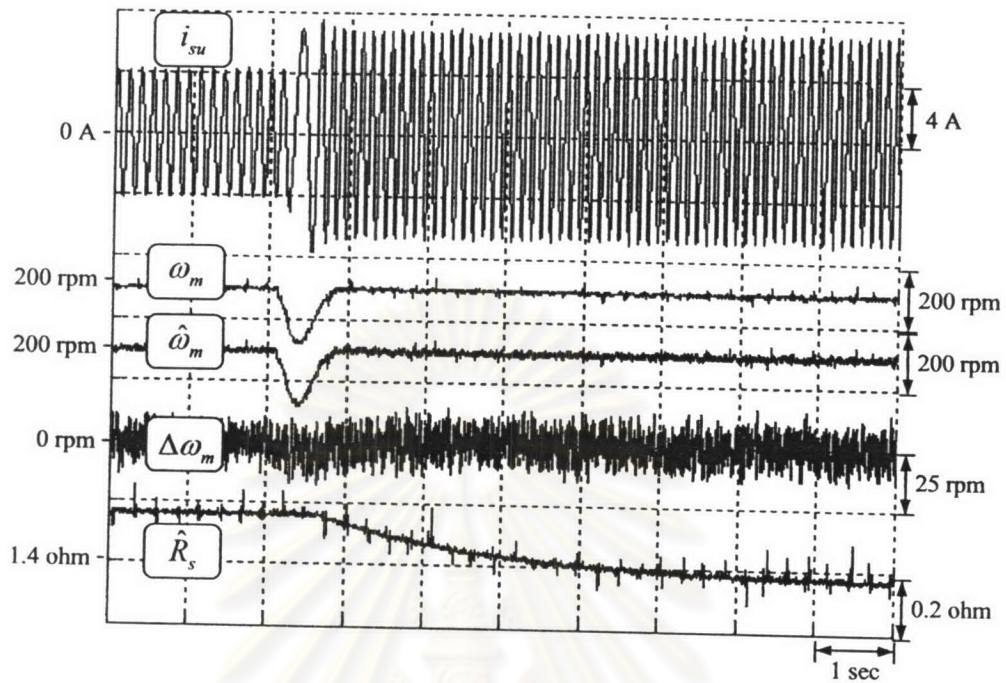
รูปที่ 4.13 รูปคลื่นขณะทำการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ที่ความเร็ว 1200 rpm โดยใส่โหลดพิกัด +10 Nm. และ  $\Delta R_s = -8\%$



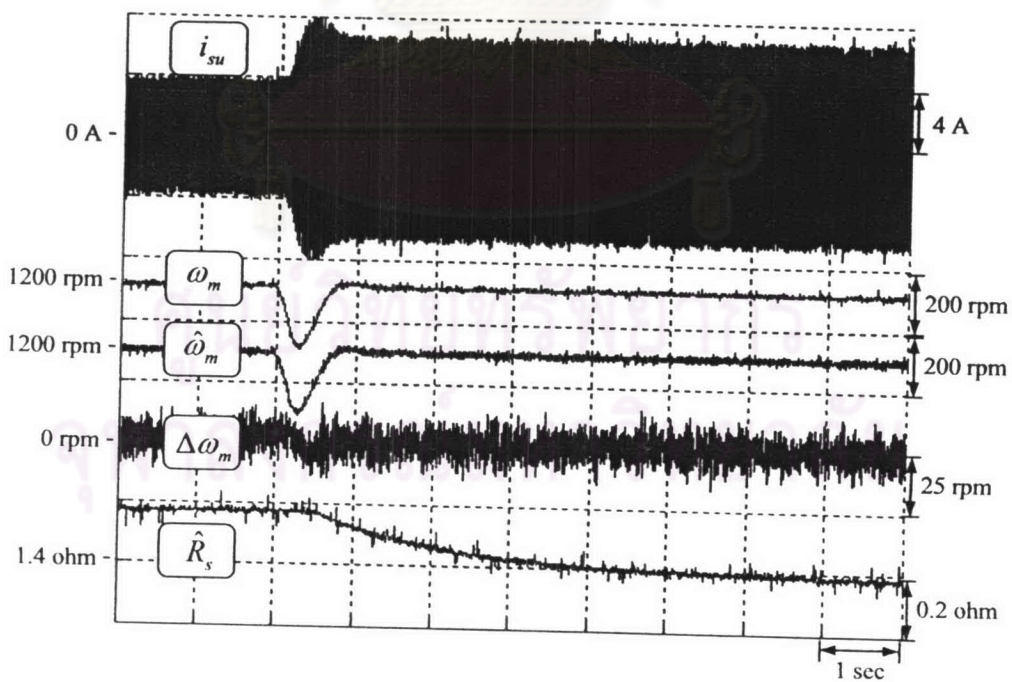
รูปที่ 4.14 รูปคลื่นขณะทำการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ที่ความเร็ว 200 rpm โดยใส่โหลดพิกัด -10 Nm. และ  $\Delta R_s = -8\%$



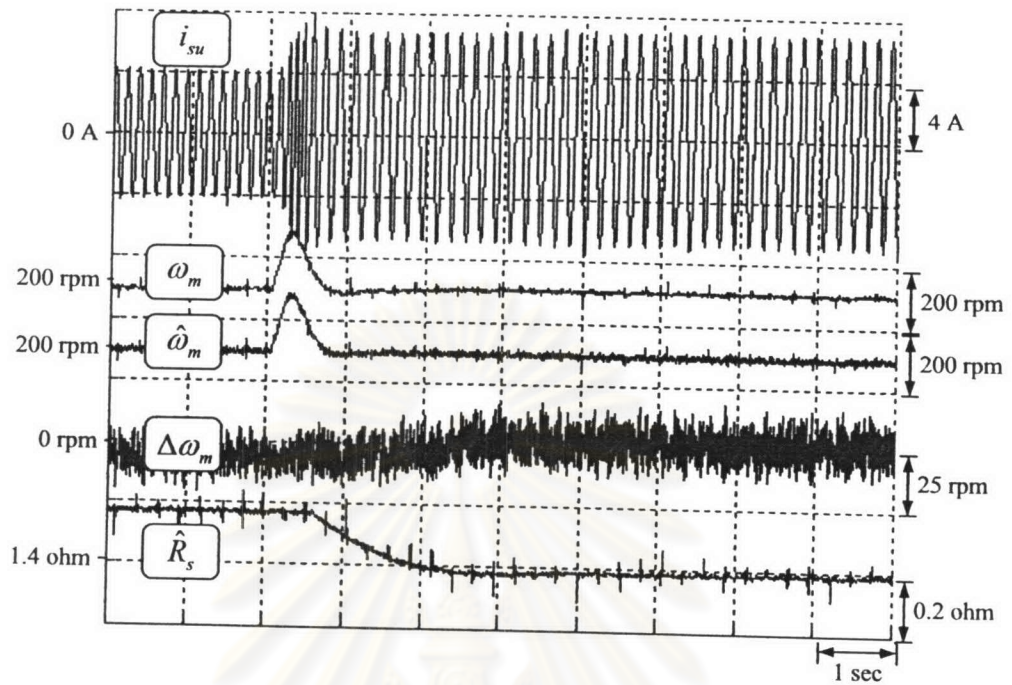
รูปที่ 4.15 รูปคลื่นขณะทำการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ที่ความเร็ว 1200 rpm โดยใส่โหลดพิกัด -10 Nm. และ  $\Delta R_s = -8\%$



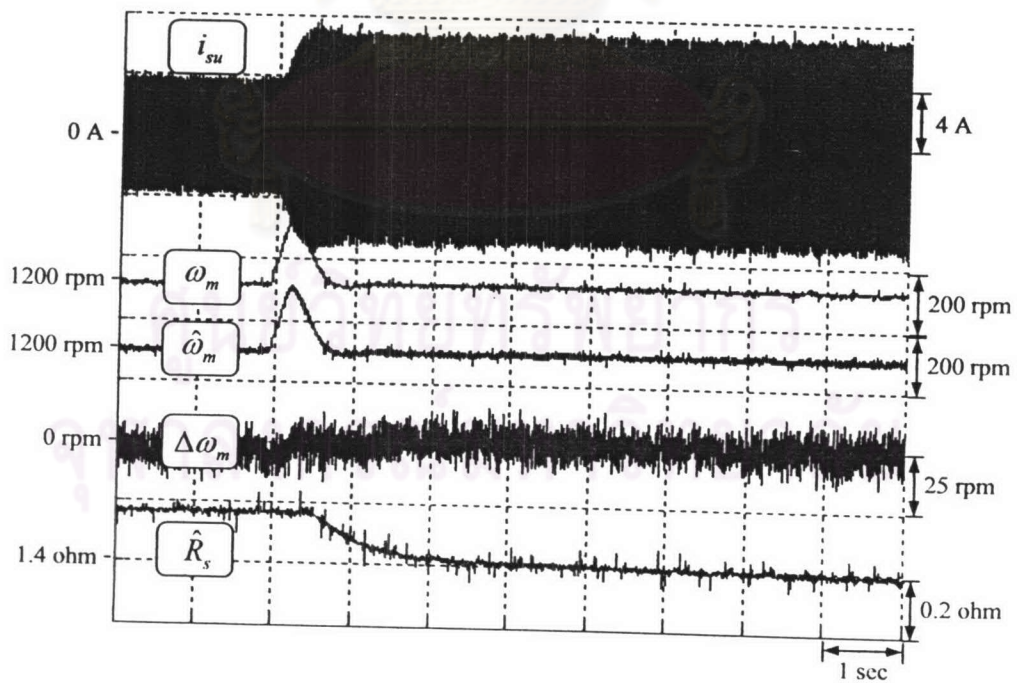
รูปที่ 4.16 รูปคลื่นขณะทำการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ที่ความเร็ว 200 rpm โดยใส่โหลดพิกัด +10 Nm. และ  $\Delta R_s = +14\%$



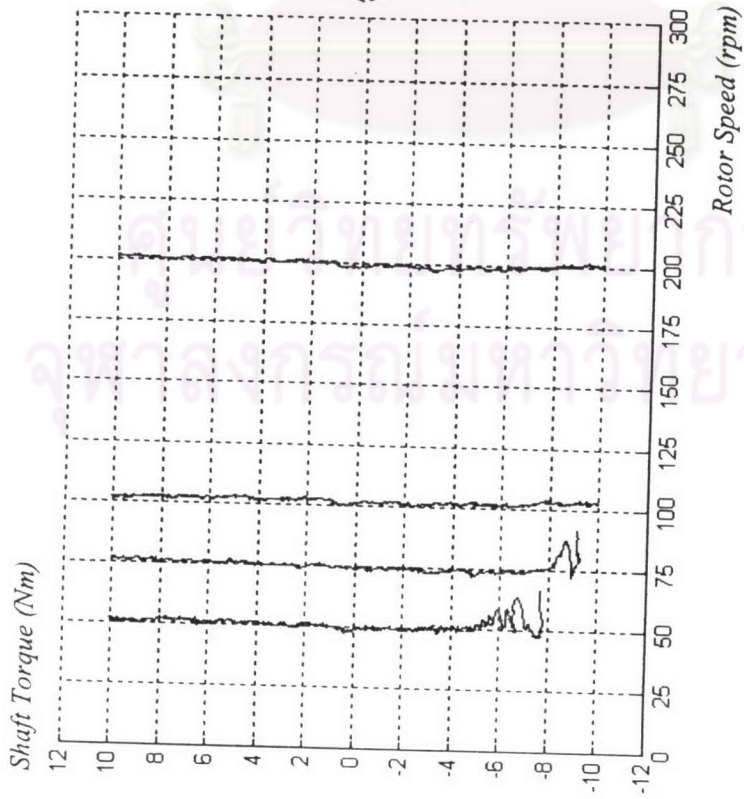
รูปที่ 4.17 รูปคลื่นขณะทำการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ที่ความเร็ว 1200 rpm โดยใส่โหลดพิกัด +10 Nm. และ  $\Delta R_s = +14\%$



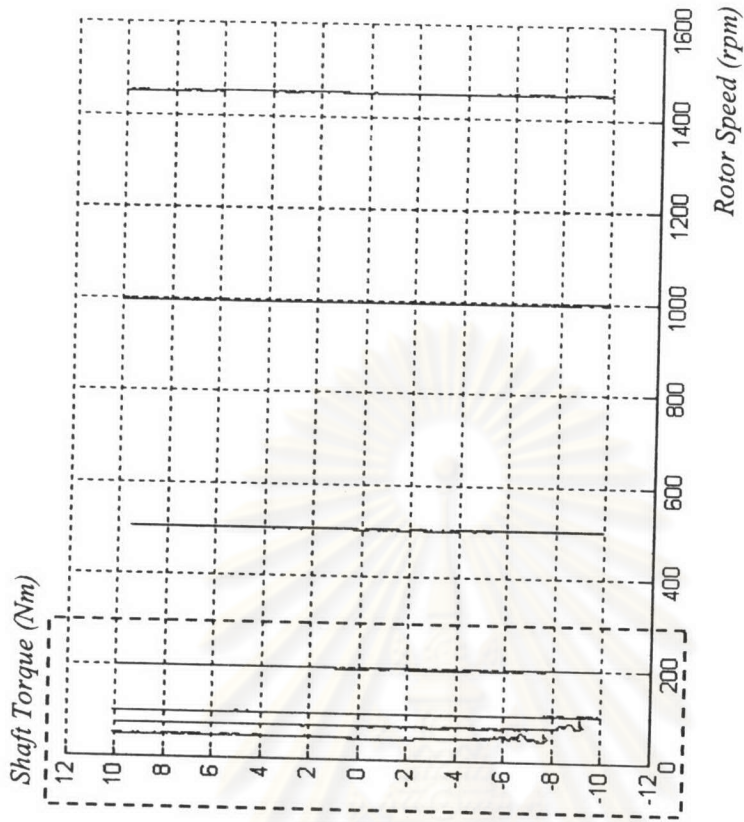
รูปที่ 4.18 รูปคลื่นขณะทำการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ที่ความเร็ว 200 rpm โดยใส่โหลดพิกัด -10 Nm. และ  $\Delta R_s = +14\%$



รูปที่ 4.19 รูปคลื่นขณะทำการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ที่ความเร็ว 1200 rpm โดยใส่โหลดพิกัด -10 Nm. และ  $\Delta R_s = +14\%$

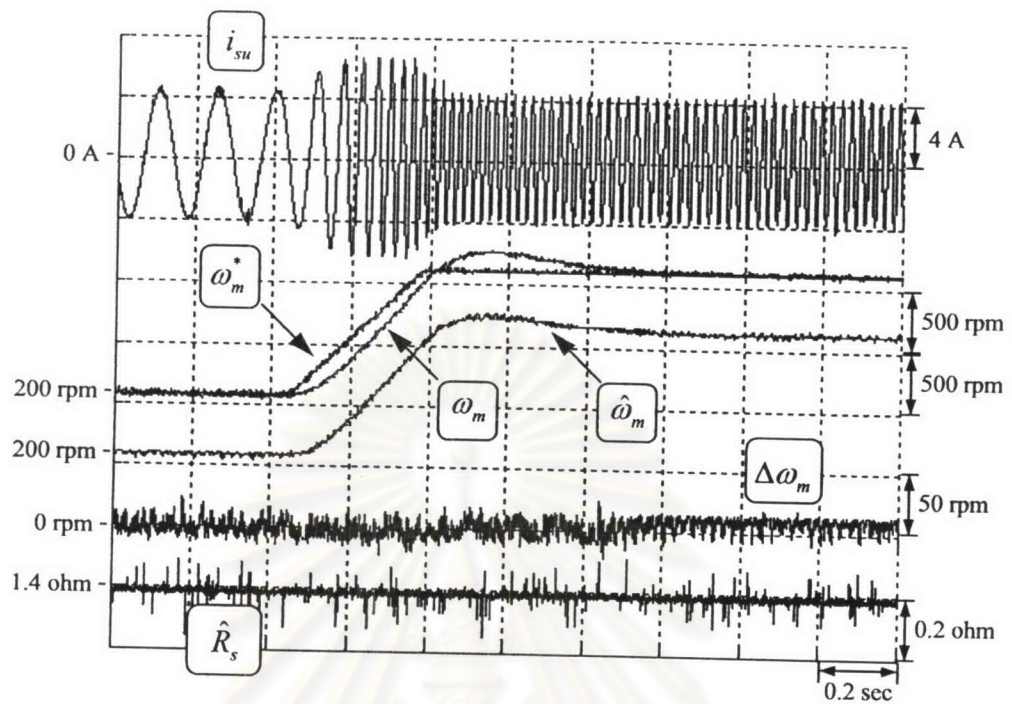


(ก) ภาพขยายในย่านความเร็วต่ำ

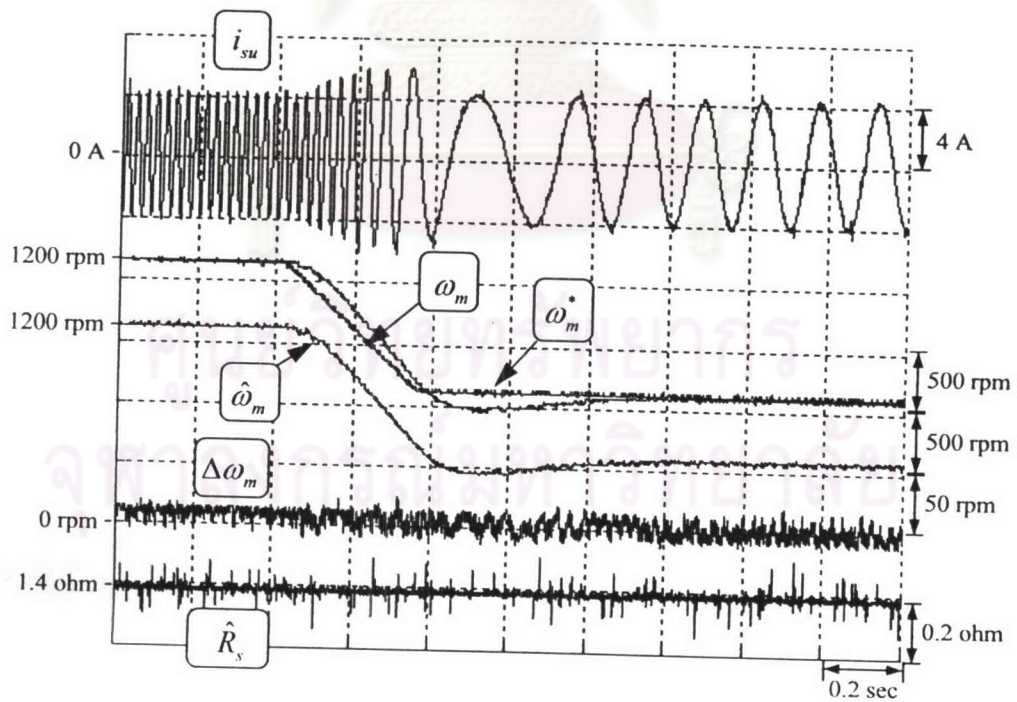


(ข) ภาพโดยรวมตลอดย่านความเร็ว

รูปที่ 4.20 ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์เมื่อมีการประมาณค่าความถี่ตามทางานสเตเตอร์

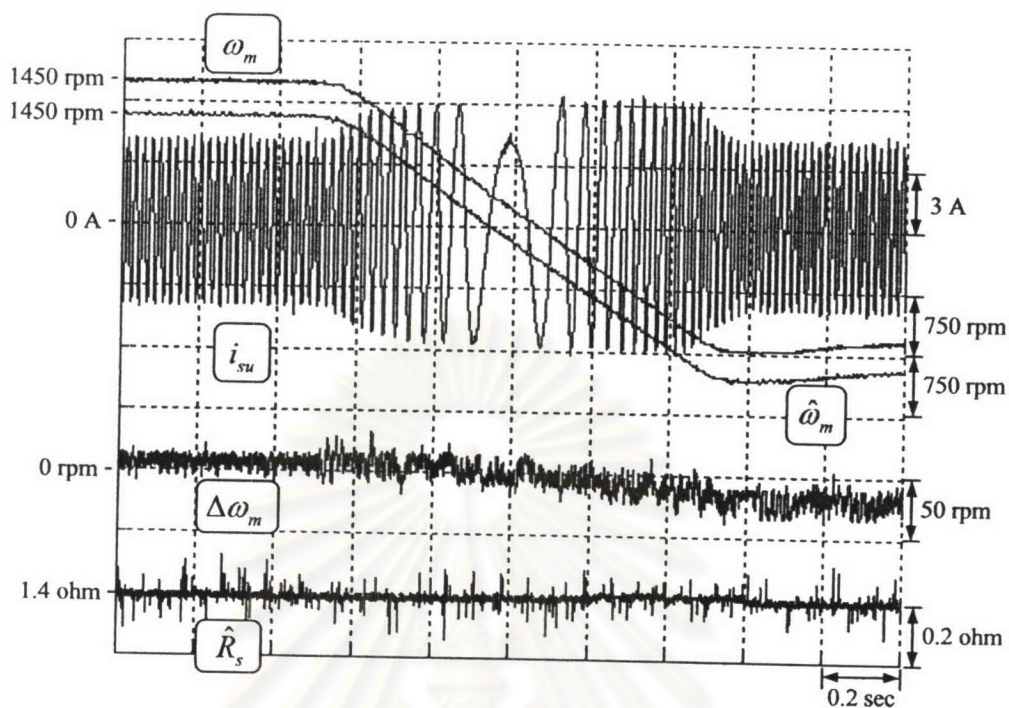


รูปที่ 4.21 ผลตอบสนองชั่วคราวขณะเร่งความเร็วของมอเตอร์จาก 200 rpm ไป 1200 rpm เมื่อมีการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์

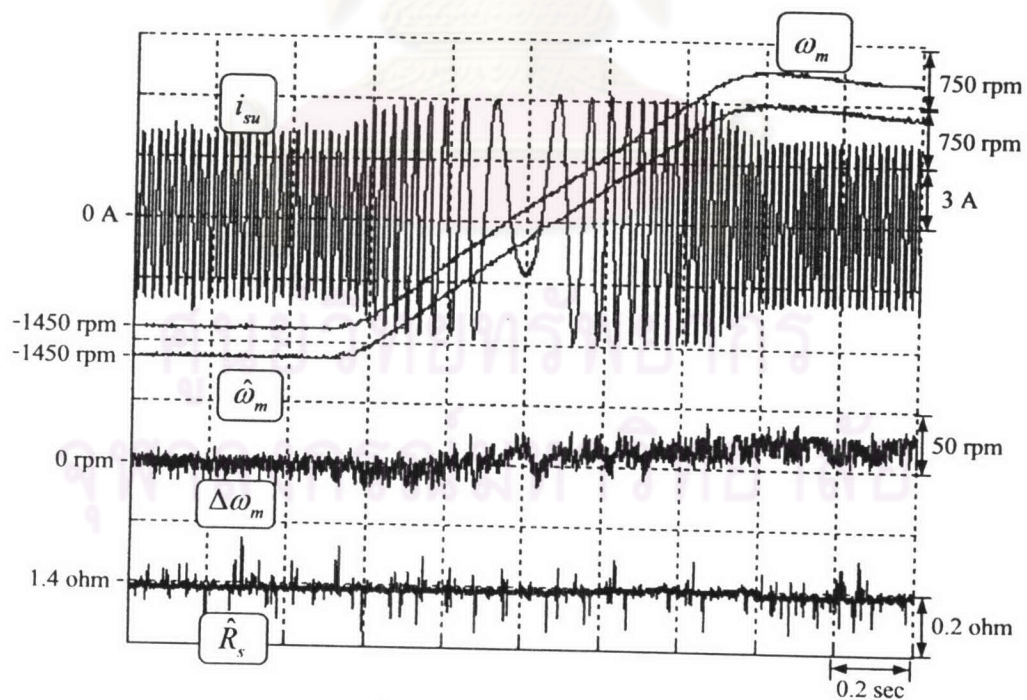


รูปที่ 4.22 ผลตอบสนองชั่วคราวขณะเร่งความเร็วของมอเตอร์จาก 1200 rpm ไป 200 rpm เมื่อมีการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์

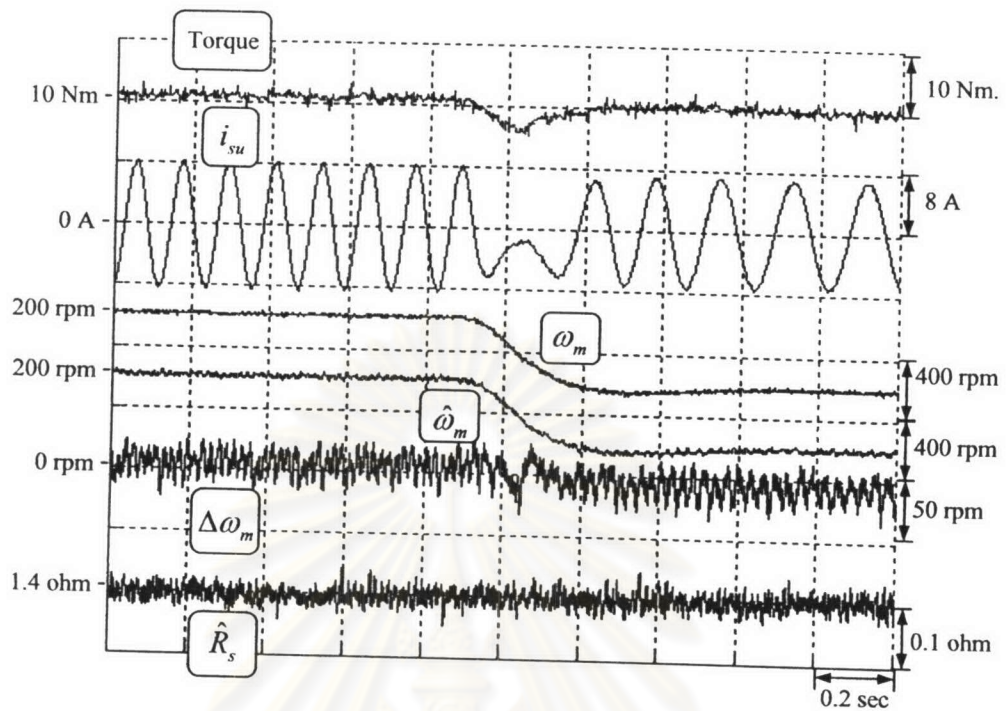




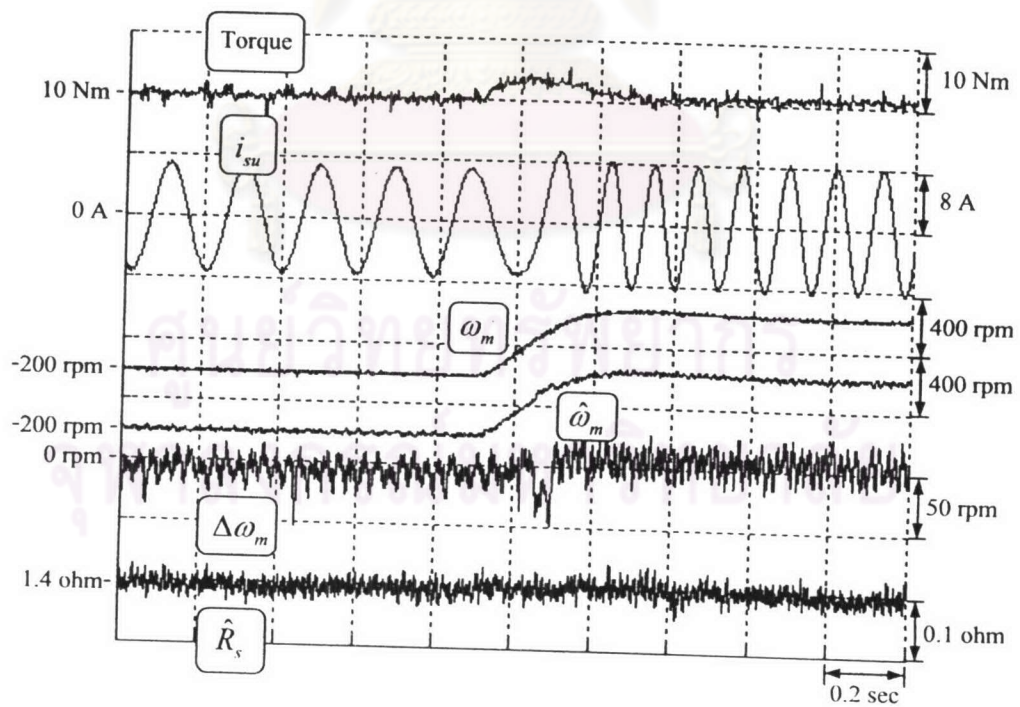
รูปที่ 4.23 ผลตอบสนองสถานะชั่วครู่ขณะกลับทิศความเร็วของมอเตอร์ +1450 rpm ไป -1450 rpm ขณะไร้โหลด เมื่อมีการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์



รูปที่ 4.24 ผลตอบสนองสถานะชั่วครู่ขณะกลับทิศความเร็วของมอเตอร์ -1450 rpm ไป +1450 rpm ขณะไร้โหลด เมื่อมีการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์



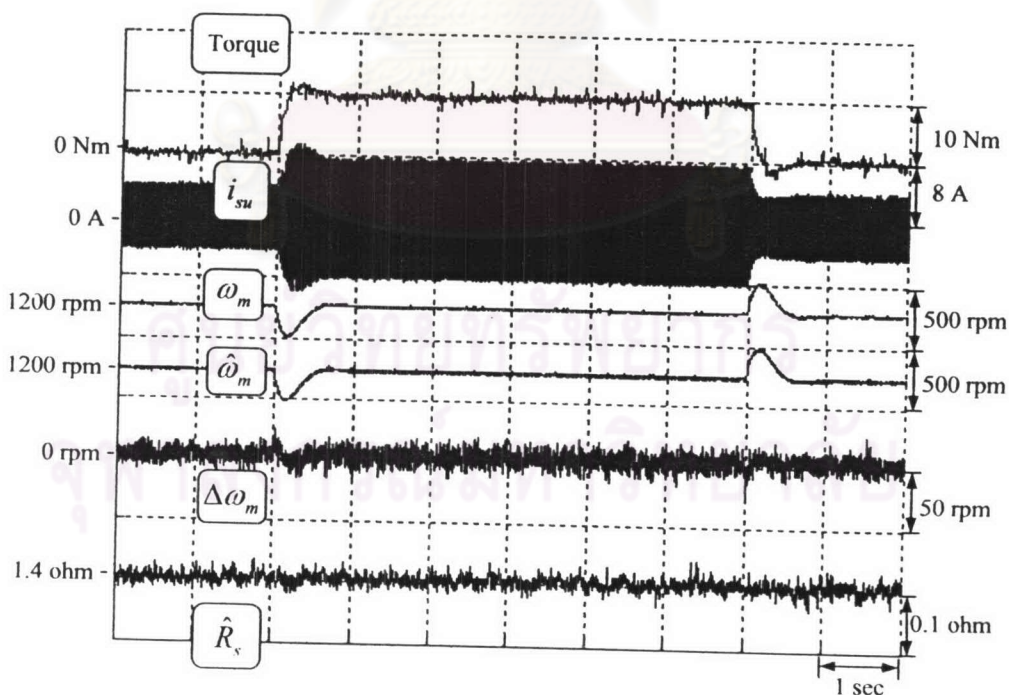
รูปที่ 4.25 ผลตอบสนองสถานะชั่วครู่ขณะกลับทิศความเร็วของมอเตอร์ +200 rpm ไป -200 rpm ที่โหลดพิกัด เมื่อมีการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์



รูปที่ 4.26 ผลตอบสนองสถานะชั่วครู่ขณะกลับทิศความเร็วของมอเตอร์ -200 rpm ไป +200 rpm ที่โหลดพิกัด เมื่อมีการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์



รูปที่ 4.27 ผลตอบสนองสถานะชั่วครู่ขณะใส่โหลดพิกัดแบบขั้นให้กับมอเตอร์ที่ความเร็ว 200 rpm เมื่อมีการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์



รูปที่ 4.28 ผลตอบสนองสถานะชั่วครู่ขณะใส่โหลดพิกัดแบบขั้นให้กับมอเตอร์ที่ความเร็ว 1200 rpm เมื่อมีการประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์