

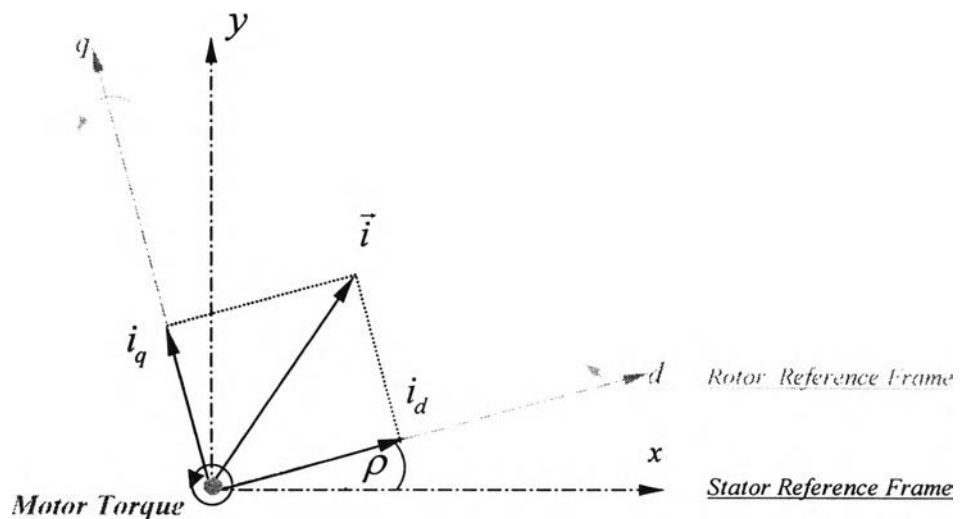
### บทที่ 3

#### การควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายใน โดยใช้หลักการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม (Decoupling Control) โดยอันดับแรกจะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของการควบคุม จากนั้นจะเสนอผลการจำลองการทำงานและผลการทดสอบกับระบบจริง

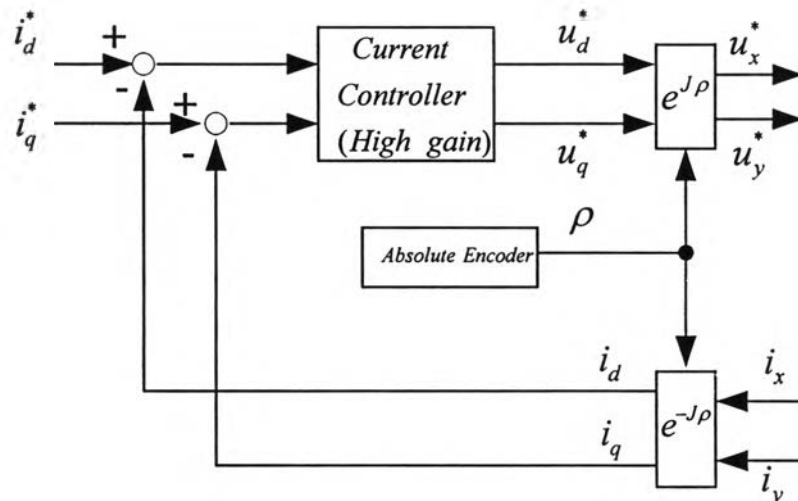
#### 3.1 ทฤษฎีการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม

การควบคุมแบบเวกเตอร์เป็นการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์โดยตรง ซึ่งจะทำการควบคุมแรงบิดผ่านทางกระแสเดเตอร์ ( $i_q$ ) ดังแสดงในสมการ (2.14) เนื่องจากในกรณีของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายใน เราจำเป็นต้องรู้ตำแหน่งของฟลักซ์แม่เหล็กจึงจะสามารถจ่ายกระแสเดเตอร์  $i$  ได้อย่างถูกต้องทั้งขนาดและมุม พิจารณาได้จากรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 หลักการควบคุมแรงบิดของการควบคุมแบบเวกเตอร์

ระบบควบคุมเวกเตอร์โดยทั่วไปมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.2 วิธีการควบคุมกระแสสแตเตอร์ที่นิยมใช้ในระบบควบคุมแบบเวกเตอร์โดยทั่วไป ก็คือการใช้วงรอบควบคุมกระแสที่มีแบนด์วิดธ์สูง เพื่อให้อินเวอร์เตอร์ทำงานเหมือนกับแหล่งจ่ายกระแสและควบคุมกระแสในแต่ละแกน ( $i_d, i_q$ ) ได้อย่างอิสระ ด้วยวิธีการควบคุมนี้ทำให้เราต้องใช้ตัวประมวลผลที่มีความเร็วสูง นอกจากนี้การใช้อัตราขยายค่าสูงสำหรับตัวควบคุมกระแสยังจะทำให้เกิดปัญหาการขาดเสถียรภาพได้



รูปที่ 3.2 ระบบควบคุมเวกเตอร์โดยทั่วไปที่ใช้วงรอบควบคุมกระแสที่มีแบนด์วิดธ์สูง

ในทางตรงกันข้ามระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแรงดันจะอาศัยการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม ในการควบคุมกระแส โดยชดเชยแรงดันเหนี่ยวนำที่เชื่อมโยงระหว่างแกน  $d$  และ  $q$  และเนื่องจากตัวควบคุมทำงานในลักษณะป้อนไปหน้า จึงไม่มีปัญหาในเรื่องเสถียรภาพของการควบคุมกระแส

ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแรงดันที่อาศัยหลักการควบคุมแยกการเชื่อมร่วมสามารถอธิบายได้โดยเริ่มต้นจากแบบจำลองของมอเตอร์ซึ่งโครนัสแม่เหล็กถาวรบนแกนอ้างอิงโรเตอร์ในสมการ (2.12) ซึ่งสามารถเขียนได้ใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} L_d \frac{di_d}{dt} \\ L_q \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\omega L_q i_q \\ \omega L_q i_d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi' \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

จากสมการ (3.1) จะสังเกตได้ว่ามีเทอมของแรงดันเหนี่ยวนำเชื่อมโยงระหว่างปริมาณในแกน  $d$  และแกน  $q$  ทำให้การควบคุมกระแสในแกนทั้งสองผ่านทางแรงดันสเตเตอร์ยุ่งยากและไม่มีอิสระในการควบคุมกระแสในแต่ละแกน ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหานี้เราจึงทำการชดเชยแรงดันที่เชื่อมโยงระหว่างแกนทั้งสองโดยกำหนดให้แรงดันสเตเตอร์ที่จ่ายให้กับมอเตอร์เป็นไปตามสมการ (3.2)

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u'_d \\ u'_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega L_q i_q \\ \omega L_d i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi' \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

เมื่อแทนสมการ (3.2) ลงในสมการ (3.1) จะได้

สมการสเตเตอร์ของมอเตอร์หลังการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม:

$$\begin{bmatrix} L_d \frac{di_d}{dt} \\ L_q \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = -R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u'_d \\ u'_q \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

สมการข้างต้นแสดงถึงลักษณะพลวัตของกระแสสเตเตอร์ที่มีการควบคุมได้อย่างอิสระในแต่ละแกนผ่านแรงดัน  $u'_d$  และ  $u'_q$  และเราเรียกการควบคุมแรงดัน  $u_d$  และ  $u_q$  ตามสมการ (3.2) ว่าการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม (*Decoupling Control*) และถ้าเรากำหนดให้

$$\begin{bmatrix} u'_d \\ u'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ri_d^* \\ Ri_q^* \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

เราจะได้ผลตอบสนองของกระแสสเตเตอร์ ( $i_d, i_q$ ) ต่อกระแสคำสั่งในแต่ละแกน ( $i_d^*, i_q^*$ ) เป็นแบบหนึ่งอันดับหนึ่งด้วยค่าคงตัวทางเวลาเท่ากับ  $L_d/R$  และ  $L_q/R$  ตามลำดับ

จากแนวคิดของการควบคุมแยกการเชื่อมร่วมข้างต้น เราสามารถเขียนสมการต่างๆของตัวควบคุมเวกเตอร์แบบแรงดันด้วยการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ได้ดังสมการ (3.5)-(3.7)

แรงดันสเตเตอร์ของตัวควบคุมแยกการเชื่อมร่วมที่มีการชดเชยแรงดันที่เชื่อมโยงระหว่างแกน:

$$\begin{bmatrix} u_d^* \\ u_q^* \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega L_q \hat{i}_q \\ \omega L_d \hat{i}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi' \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

“^” หมายถึง ค่าประมาณ

สมการสเตเตอร์ในแบบจำลองหลังการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม:

$$\begin{bmatrix} L_d \frac{d\hat{i}_d}{dt} \\ L_q \frac{d\hat{i}_q}{dt} \end{bmatrix} = -R \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

หรือ

$$\hat{i}_d = \frac{1}{L_d s / R + 1} i_d^* \quad (3.7)$$

$$\hat{i}_q = \frac{1}{L_q s / R + 1} i_q^* \quad (3.8)$$

ในกรณีที่เราเลือก  $i_d^* = 0$  และ  $\hat{i}_d(0) = 0$  จะได้  $\hat{i}_d(t) \equiv 0$  ดังนั้นสมการ (3.7)-(3.8) สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการ (3.9) และ (3.10) ตามลำดับ

$$\hat{i}_d = 0 \quad (3.9)$$

$$\hat{i}_q = \frac{1}{L_q s / R + 1} i_q^* \quad (3.10)$$

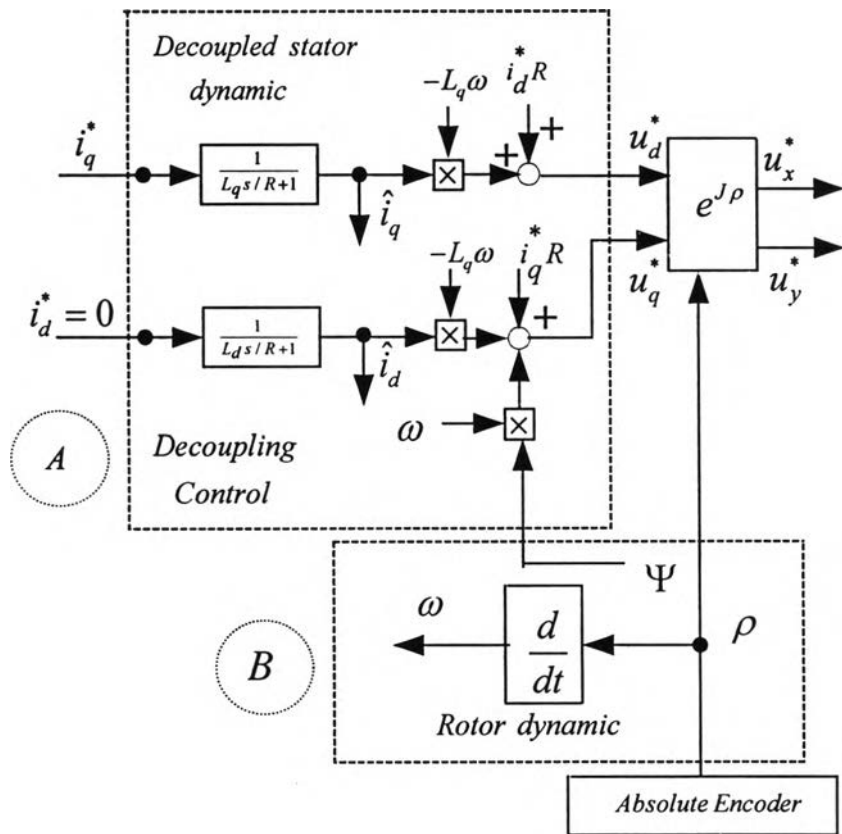
ในการคำนวณแรงดันชดเชยตามสมการ (3.5) เราจำเป็นต้องทราบข้อมูลของฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งสามารถหาได้จากการวัดตำแหน่งโรเตอร์และการคำนวณได้จากสมการ (3.11)

สมการ โรเตอร์ในแบบจำลองของตัวควบคุมแยกการเชื่อมร่วม:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \rho \\ \Psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

จากสมการ (3.5) จะเห็นได้ว่าในกรณีนี้เราสามารถใส่กระแสเดเตอร์ ( $\hat{i}_d, \hat{i}_q$ ) ที่คำนวณได้จากสมการ (3.9) และ (3.10) แทนการใช้ค่ากระแสจริงจากการตรวจจับ ( $i_d, i_q$ ) ซึ่งถือได้ว่าเป็นข้อดีของการควบคุมเวกเตอร์แบบแรงดัน ที่เราสามารถควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ได้โดยไม่ต้องใช้ตัวตรวจจับกระแส เนื่องจากการคำนวณแรงดันชดเชยในการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วมต้องการข้อมูลของกระแสเดเตอร์ ( $\hat{i}_d, \hat{i}_q$ ) และแรงดันที่เราสามารถสร้างได้ด้วยอินเวอร์เตอร์เป็นแรงดันบนแกนอ้างอิงของสเตเตอร์ เราจึงต้องแปลงแรงดันที่คำนวณได้ตามสมการ (3.5) บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ไปเป็นคำสั่งแรงดันบนแกนอ้างอิงของสเตเตอร์โดยใช้ข้อมูลของตำแหน่งเชิงมุมของเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งหาได้จากตัวเซนเซอร์วัดตำแหน่งโรเตอร์ ส่วนความเร็วโรเตอร์นั้นสามารถหาได้จากสมการ (3.11)

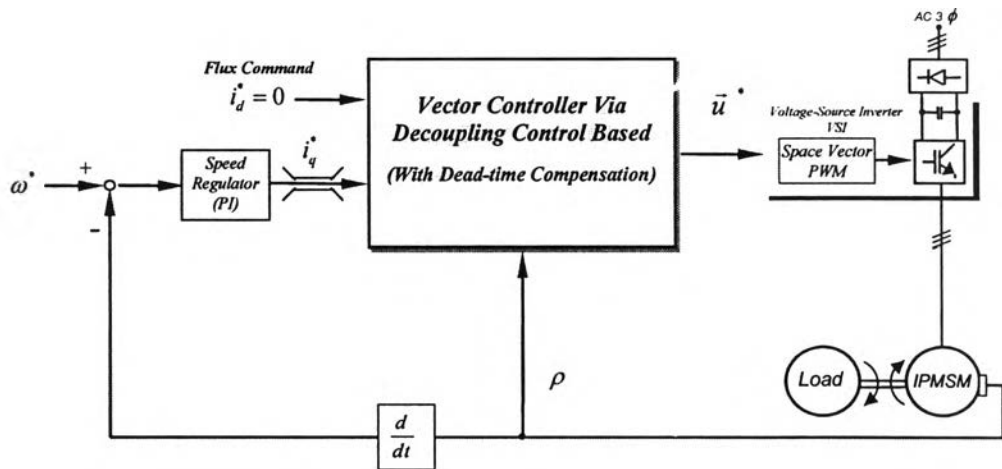
โครงสร้างของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแรงดันที่มีการควบคุมแยกการเชื่อมร่วมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 ในบริเวณ A คือการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม (สมการ (3.5)) และลักษณะพลวัตทางด้านสเตเตอร์ (สมการ (3.10)) สำหรับบริเวณ B คือลักษณะพลวัตทางด้านโรเตอร์ (สมการ (3.11))



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแรงดันโดยอาศัยการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม

### 3.2 ผลการจำลองการทำงานและผลการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม

รูปที่ 3.4 แสดงถึงโครงสร้างของระบบควบคุมความเร็วด้วยตัวควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วมที่ใช้ในการทดลองและจำลองการทำงาน โดยรายละเอียดของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการทดลองได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก



รูปที่ 3.4 ระบบควบคุมความเร็วด้วยตัวควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม

ผลตอบสนองในสถานะอยู่ตัว

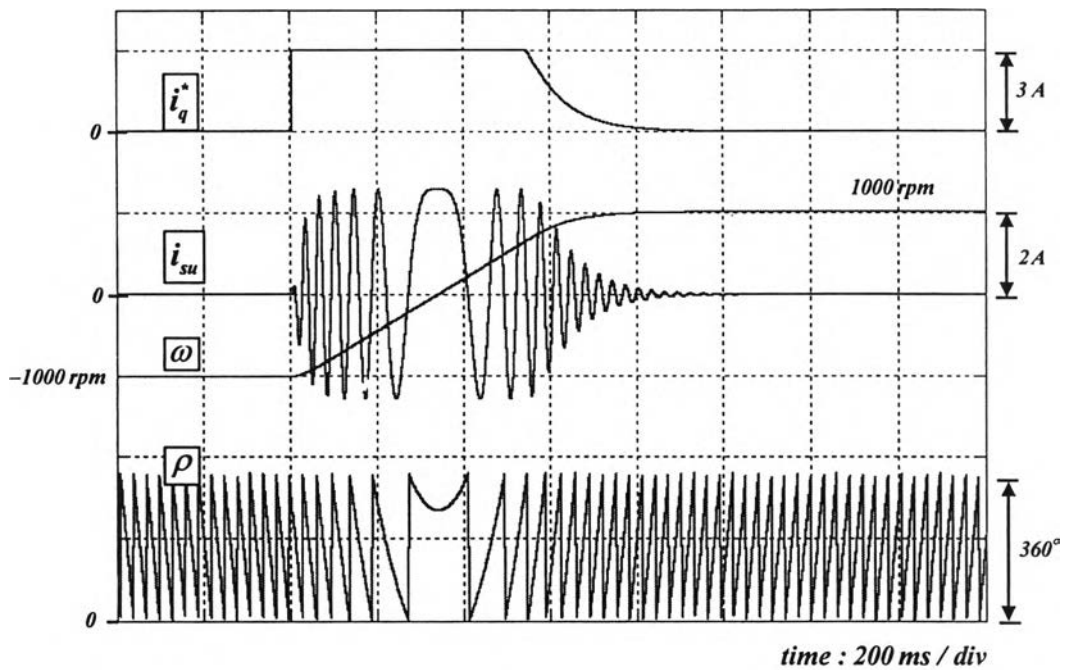
รูปที่ 3.8-3.9 เป็นผลการทดลองการทำงานในสถานะอยู่ตัวของระบบที่ความเร็ว 1000 และ 100 rpm ตามลำดับ โดยระบบสามารถควบคุมกระแสสร้างแรงบิดและฟลักซ์แม่เหล็กได้ดี ซึ่งดูได้จากค่าผิดพลาดของการประมาณกระแสเป็นศูนย์

ผลตอบสนองต่อการกลับทิศความเร็ว

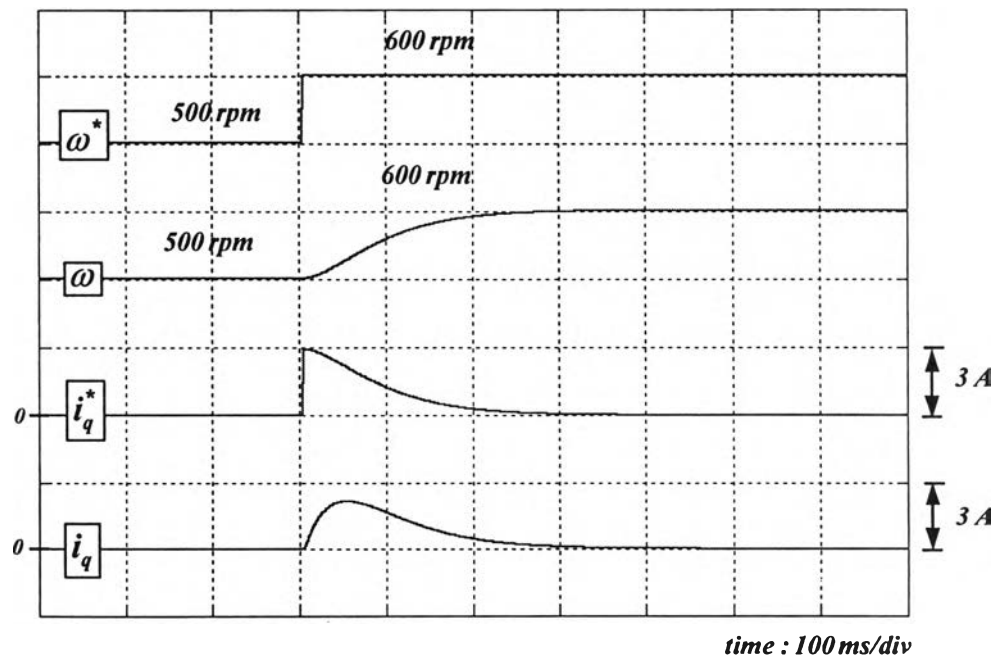
รูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.10 เป็นผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองในขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 → 1000 rpm ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าระบบสามารถควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ได้เป็นอย่างดี โดยดูจาก Envelope ของกระแสเดเตอร์ที่เป็นไปตามกระแสสร้างแรงบิดคำสั่ง ทั้งในส่วนผลการทดลองและผลการจำลองการทำงาน

ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ

รูปที่ 3.6-3.7 และรูปที่ 3.11-3.12 เป็นผลการจำลองการทำงานและผลการทดลอง ในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งจาก 500 → 600 rpm ตามลำดับ จะเห็นว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมความเร็วได้ตามค่าคำสั่งอย่างรวดเร็ว ซึ่งก็จะสอดคล้องกันระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองการทำงาน

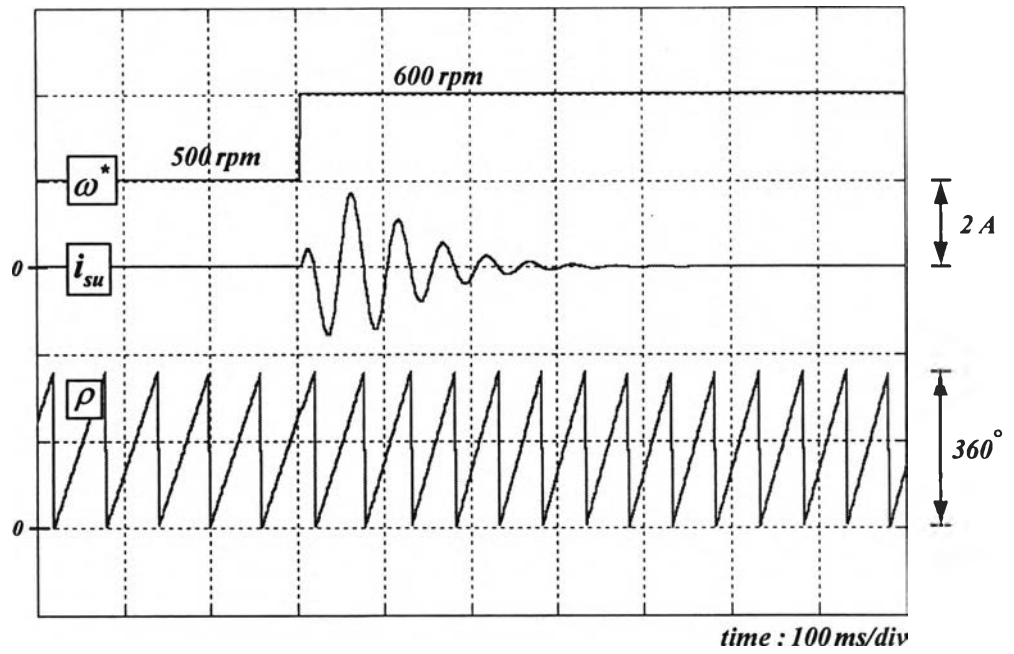


รูปที่ 3.5 ผลการจำลองการทำงานขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม

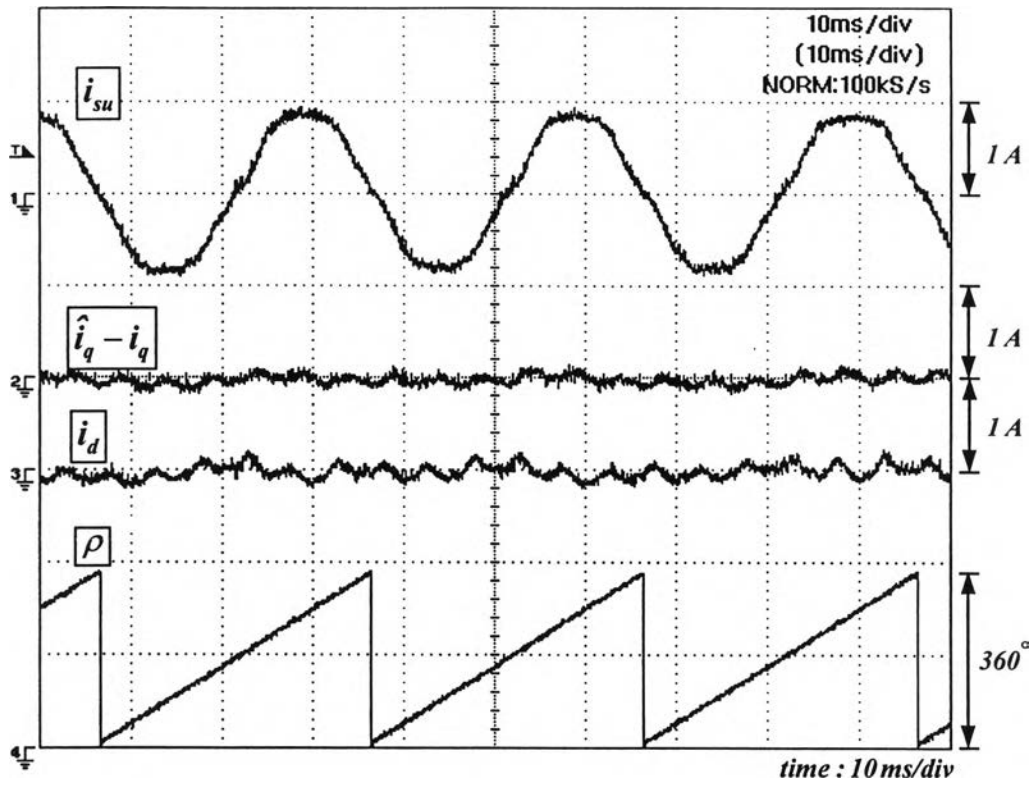


รูปที่ 3.6 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)

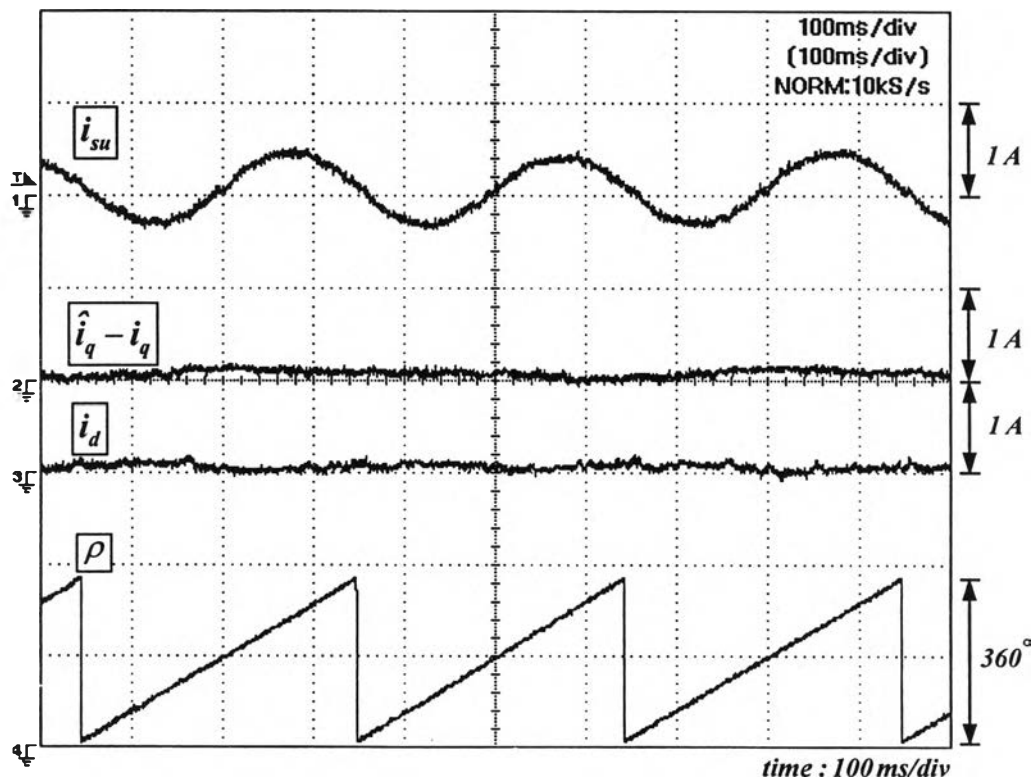




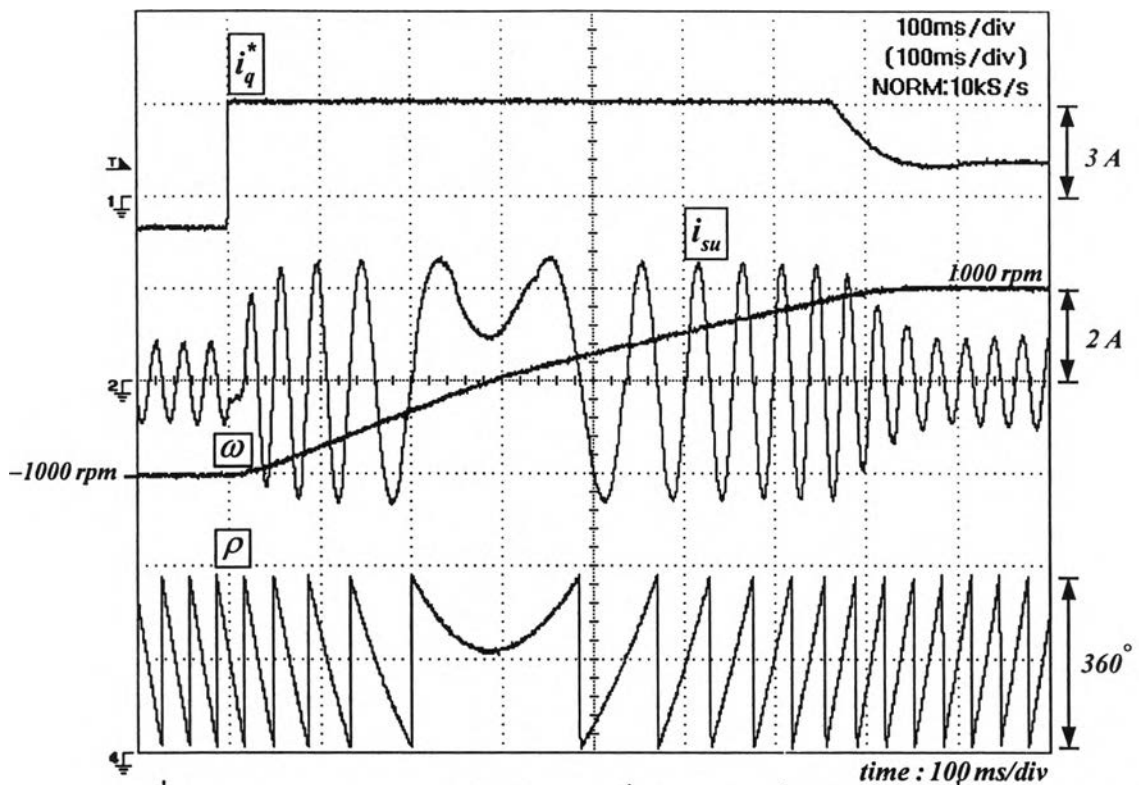
รูปที่ 3.7 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 500 ไป 600 rpm (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแส)



รูปที่ 3.8 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง)

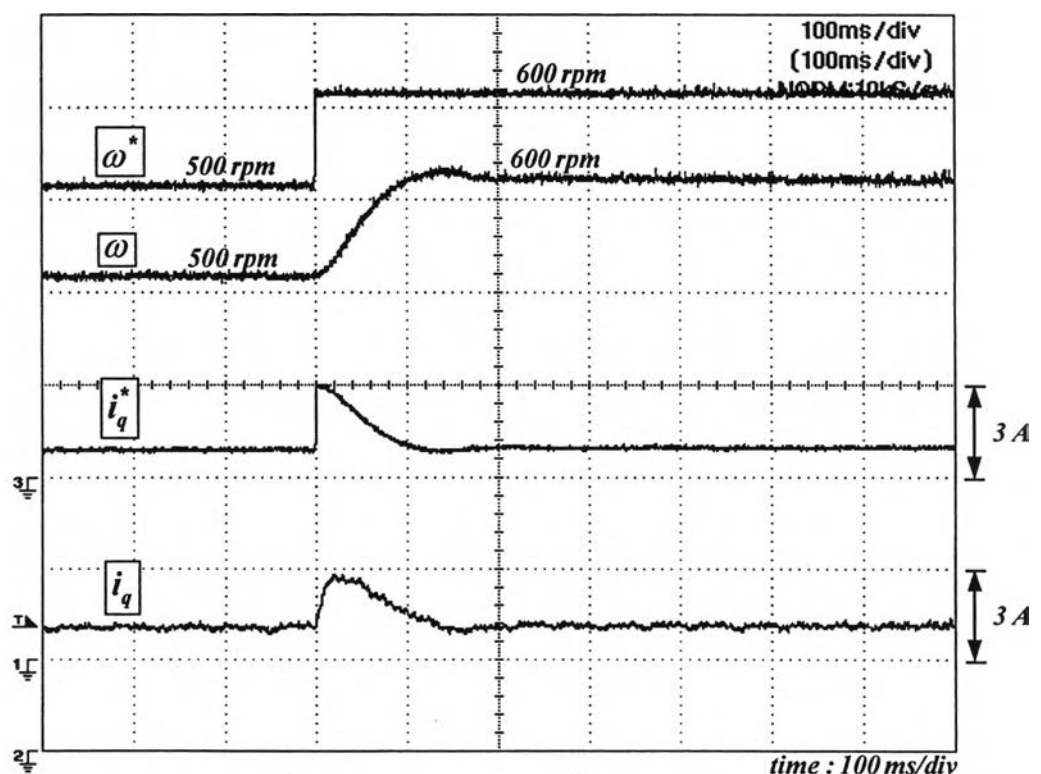


รูปที่ 3.9 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 100 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง)



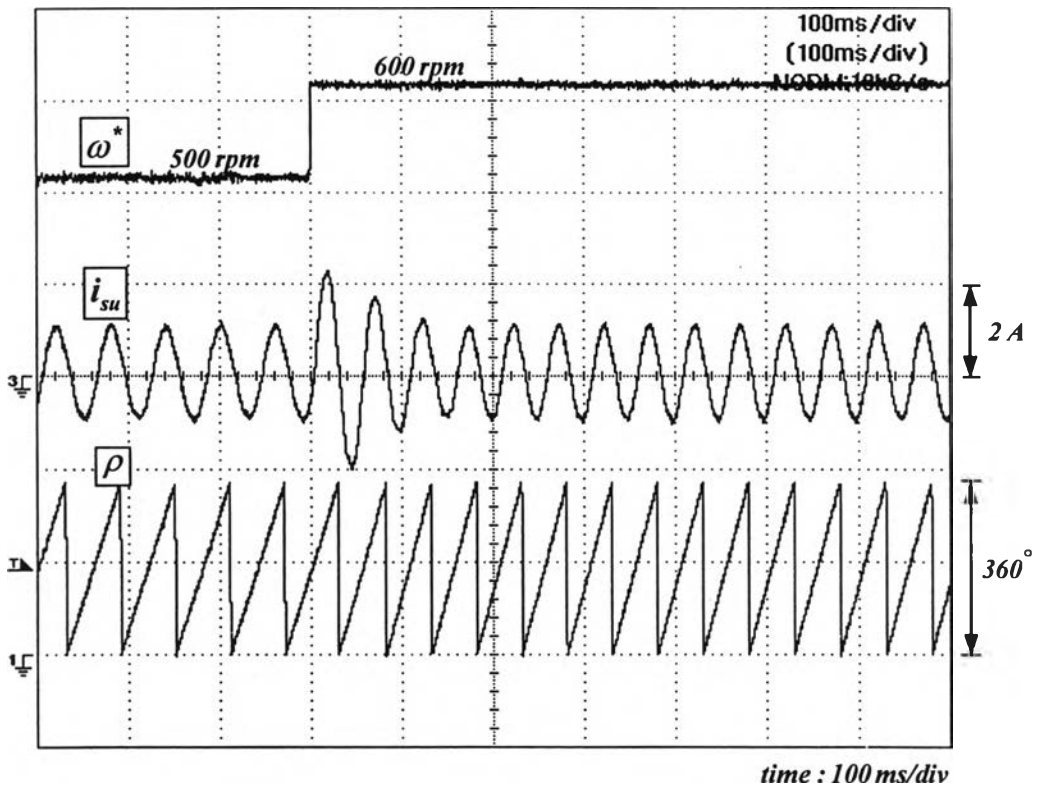
รูปที่ 3.10 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุม

แยกการเชื่อมร่วม (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



รูปที่ 3.11 ผลการทดลองเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็ว

คำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



รูปที่ 3.12 ผลการทดลองเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็ว  
คำสั่งในช่วงแคบจาก 500 ไป 600 rpm (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแส)