ตัวขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับมอเตอร์สปินเดิลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อลดทอนการกระเพื่อมของแรงบิดและการสั่นสะเทือนทางกล

A Position-Sensorless Vector-Control Driver for Spindle Motors in Hard Disk Drives to Reduce Torque Ripple and Mechanical Vibration

พูนลาภ เมฆเข็มทอง, กิตติวัฒน์ เชี่ยงฉิน, สุรพงศ์ สุวรรณกวิน และสมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 10330
โทร: 02-2186534 E-mail: Surapong.su@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอตัวขับเคลื่อนแบบใหม่สำหรับมอเตอร์สปินเดิลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยอาศัยหลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง เนื่องจากมอเตอร์สปินเดิลในปัจจุบันจะมีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเป็นรูปคลื่นไซน์ซึ่งเป็นคุณสมบัติของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร เพื่อลดทอนการกระเพื่อมของแรงบิดและการสั่นสะเทือนทางกลที่มีสาเหตุมาจากตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม ตัวขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งจะป้อนแรงดันพีดับเบิลยูเอ็มที่มีองค์ประกอบหลักมูลเป็นรูปคลื่นไซน์เพื่อทำให้ได้กระแสสเตเตอร์เป็นรูปคลื่นไซน์ ผลการทดสอบตัวขับเคลื่อนที่พัฒนาขึ้นแสดงถึงสมรรถนะในการขับเคลื่อนของตัวควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง รวมทั้งผลทดสอบการสั่นสะเทือนทางกลในทางปฏิบัติแสดงให้เห็นถึงการลดทอนการสั่นสะเทือนทางกลอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม

Abstract

This paper presents a novel driver for a spindle motors in hard disk drives based on principles of position-sensorless vector control. Nowadays, spindle motors in hard disk drives have sinusoidal back-emf waveform, which is the property of the permanent-magnet synchronous motors (PMSM). To reduce the ripple of torque and the mechanical vibration caused by conventional drivers, the position-sensorless vector control based driver will feed the spindle motor with PWM voltage waveform, by which the sinusoidal current of the motor can be obtained. Experimental results of the proposed driver demonstrate the better driving performance. In addition, the result of mechanical vibration testing show significant improvement in the attenuation of mechanical vibration compared to that of the conventional driver.

1. คำนำ

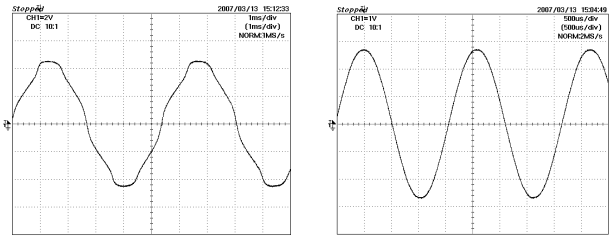
บทความนี้จะพิจารณาถึงการสั่นสะเทือนทางกลในส่วนที่เกี่ยวข้องกับตัวขับเคลื่อนของมอเตอร์สปินเดิล โดยเน้นถึงการพัฒนาตัวขับเคลื่อนแบบใหม่สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อการลดทอนระลอกแรงบิดของมอเตอร์ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการสั่นสะเทือนทางกล แนวคิดในการพัฒนาตัวขับเคลื่อนนี้จะพิจารณาจากรูปคลื่นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของมอเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่สะท้อนถึงการกระจายของฟลักซ์แม่เหล็กทางด้านโรเตอร์ จากการตรวจสอบพบว่ามอเตอร์สปินเดิลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันได้เปลี่ยนมาใช้มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่มีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเป็นรูปคลื่นไซน์ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดระลอกแรงบิด ตัวขับเคลื่อนจะต้องป้อนแรงดันและ/หรือกระแสที่ขดลวดสเตเตอร์ที่มีองค์ประกอบหลักมูลเป็นรูปคลื่นไซน์สอดคล้องกับการกระจายของแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านโรเตอร์ด้วย และจากที่ได้สำรวจตรวจสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้งานจริงกันอยู่ [2]-[3] พบว่าตัวขับเคลื่อนยังคงใช้แนวคิดของตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมซึ่งอาจจะด้วยเหตุที่เป็นเทคโนโลยีที่คุ้นเคยและมีการควบคุมที่ง่าย แต่จะเกิดปัญหาการสั่นสะเทือนทางกลอันเนื่องจากระลอกแรงบิดได้ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวบทความนี้จะนำเสนอตัวขับเคลื่อนแบบใหม่สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

RECEIVED 14 December, 2010
ACCEPTED 25 May, 2011

ในหัวข้อถัดไปจะนำเสนอถึง 1) ระลอกแรงบิดที่เกิดขึ้นจากตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม 2) ตัวขับเคลื่อนแบบใหม่ด้วยการควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง และ 3) ผลการทดสอบสมรรถนะของตัวขับเคลื่อนและการทดสอบการสั่นสะเทือนทางกลในทางปฏิบัติ

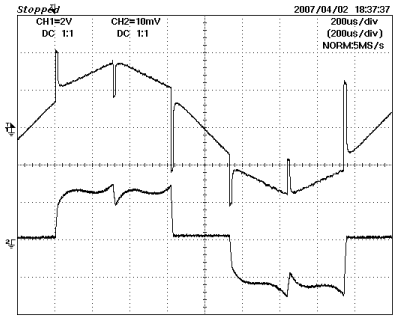
2. ระลอกแรงบิดที่เกิดจากตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมกับมอเตอร์สปินเดิลที่ใช้มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

การวิเคราะห์ระลอกแรงบิดที่เกิดจากตัวขับเคลื่อนนั้น เราจะเริ่มต้นด้วยการพิจารณารูปคลื่นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของมอเตอร์สปินเดิล รูปที่ 1 แสดงถึงรูปคลื่นของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำโดยเปรียบเทียบระหว่างมอเตอร์สปินเดิลแบบดั้งเดิมที่ใช้มอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน (BLDC Motor) และมอเตอร์สปินเดิลแบบใหม่ที่ใช้มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSM)



(ก) BLDC Motor (Trapezoidal) (ข) PMSM (Sinusoidal)

รูปที่ 1 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน (BLDC Motor) และมอเตอร์ซิงโครงนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSM)



รูปที่ 2 แรงดันและกระแสของมอเตอร์มอเตอร์สปินเดิลที่ขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม

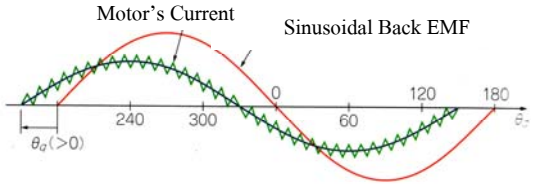
จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่ามอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านจะมีรูปคลื่นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal)ในขณะที่แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของมอเตอร์ซิงโครนัสจะเป็นรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal) ในกรณีที่ขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านด้วยตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมนั้น กระแสของมอเตอร์ที่มีรูปคลื่นเกือบสี่เหลี่ยมจะสอดคล้องกับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของมอเตอร์ที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ดังนั้นจึงไม่เกิดระลอกแรงบิดในส่วนที่มีสาเหตุมาจากองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแส แต่จะมีเฉพาะระลอกแรงบิดที่เกิดจากการสับเปลี่ยนของสวิตช์กำลังเท่านั้น(Commutation Torque Ripple) [1] ซึ่งจะแตกต่างจากในกรณีที่นำตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมนี้ไปขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัส ที่นอกจากจะมีระลอกแรงบิดของการสับเปลี่ยนแล้ว ยังเกิดระลอกแรงบิดจากการกระทำระหว่างกันระหว่างองค์ประกอบฮาร์มอนิกของแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์ (Stator's MMF) (กระแสมอเตอร์มีฮาร์มอนิกอันดับต่ำ ดูรูปที่ 2) และการกระจายของฟลักซ์แม่เหล็กทางด้านโรเตอร์ (Rotor Magnet Flux Distribution) (มีการกระจายเป็นไซน์ตามตำแหน่งเชิงมุม เนื่องจากแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเป็นรูปคลื่นไซน์)

3. ตัวขับเคลื่อนแบบใหม่สำหรับมอเตอร์สปินเดิลด้วยการควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

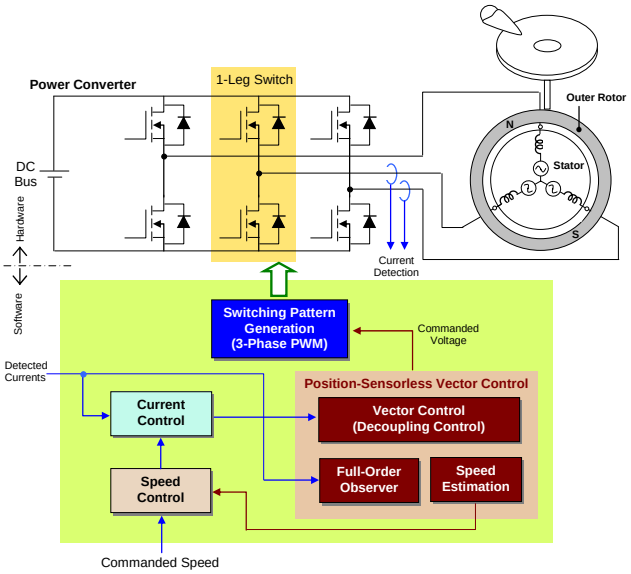
3.1 หลักการและโครงสร้างของตัวขับเคลื่อนแบบใหม่

ในกรณีที่แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเป็นรูปคลื่นไซน์นั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการกระเพื่อมของแรงบิดที่เกิดจากระลอกแรงบิดทั้ง 2 ส่วนดังกล่าวในหัวข้อที่แล้ว ตัวขับเคลื่อนจะต้องป้อนแรงดันเพื่อให้กระแสมอเตอร์เป็นรูปคลื่นไซน์ดังแสดงในรูปที่ 3 รูปคลื่นของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำและกระแสของมอเตอร์ที่เป็นไซน์ ทำให้การขับเคลื่อนจะปราศจากระลอกแรงบิดที่เกิดจากการกระทำระหว่างกันระหว่างองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์เชิงเวลาของแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์ (Stator's MMF) และการกระจายของฟลักซ์แม่เหล็กทางด้านโรเตอร์ (Rotor Magnet Flux Distribution) นอกจากนี้ด้วยวิธีการขับเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลง

ไปจากเดิม ทำให้ไม่มีช่วงการสับเปลี่ยนการนำกระแสของสวิตช์ ดังนั้นจึงไม่มีระลอกแรงบิดที่เกิดจากการสับเปลี่ยนกระแสเกิดขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 3 รูปคลื่นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำและกระแสของมอเตอร์สปินเดิลที่ขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนแบบใหม่



รูปที่ 4 โครงสร้างของตัวขับเคลื่อนแบบใหม่สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยอาศัยการควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

หลักการขับเคลื่อนดังกล่าวข้างต้นนี้สามารถทำได้โดยประยุกต์ใช้วิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสที่ใช้กับอินเวอร์เตอร์ในอุตสาหกรรม [4] โดยอาศัยหลักการควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 4

3.2 หลักการของตัวควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งโดยอาศัยการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม

การควบคุมแบบเวกเตอร์เป็นการควบคุมแรงบิดและ ฟลักซ์ของมอเตอร์ในขณะใดขณะหนึ่งโดยใช้แบบจำลองของมอเตอร์ โดยเราสามารถแสดงแบบจำลองทางพลวัตของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรได้ดังนี้

3.2.1 แบบจำลองของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรอ้างอิงบนแกนโรเตอร์

สมการสเตเตอร์:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L}\left\{-Ri_d + \omega L i_q + v_d\right\} \quad (1)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L}\left\{-Ri_q - \omega L i_d - \omega\lambda + v_q\right\} \quad (2)$$

สมการโรเตอร์:

$$\frac{d\rho}{dt} = \omega \quad (3)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = 0 \quad (4)$$

สมการแรงบิด:

$$T_m = \frac{p}{2}\lambda i_q \quad (5)$$

โดยที่ตัวห้อย d,q แสดงถึงองค์ประกอบในแกนอ้างอิงโรเตอร์ d,q ตามลำดับ สมการ (4) แสดงให้ทราบว่ามอเตอร์สปินเดิลมีโรเตอร์ ฟลักซ์คงที่เนื่องจากโรเตอร์ทำมาจากแม่เหล็กถาวร และสมการ (5) จะเห็นได้ว่าการควบคุมแรงบิดสามารถทำได้โดยควบคุมผ่านกระแสในแกน q (i_q)

3.2.2 ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว

การควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งจะอาศัยตัวสังเกตแบบปรับตัวในการประมาณกระแสสเตเตอร์ โรเตอร์ฟลักซ์ และความเร็วโรเตอร์ไปพร้อมๆกัน ซึ่งแสดงได้ดังสมการ (6)-(10)

ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับอ้างอิงบนแกนโรเตอร์

สมการสเตเตอร์:

$$\frac{d\hat{i}_{\hat{d}}}{dt}=\frac{1}{L}\left\{-R\hat{i}_{\hat{d}}+L\frac{d\hat{\rho}}{dt}\hat{i}_{\hat{q}}+v_{\hat{d}}+G_1\cdot e_{\hat{d}}-G_2\cdot e_{\hat{q}}\right\} \quad (6)$$

$$\frac{d\hat{i}_{\hat{q}}}{dt}=\frac{1}{L}\left\{-R\hat{i}_{\hat{q}}-L\frac{d\hat{\rho}}{dt}\hat{i}_{\hat{d}}-\hat{\omega}\hat{\lambda}+v_{\hat{q}}+G_2\cdot e_{\hat{d}}+G_1\cdot e_{\hat{q}}\right\} \quad (7)$$

สมการโรเตอร์:

$$\frac{d\hat{\rho}}{dt}=\hat{\omega}+\frac{H_2e_{\hat{d}}-H_1e_{\hat{q}}}{\hat{\lambda}} \quad (8)$$

$$\frac{d\hat{\lambda}}{dt}=H_1\cdot e_{\hat{d}}-H_2\cdot e_{\hat{q}} \quad (9)$$

สมการประมาณความเร็ว :

$$\hat{\omega}=\left(k_P+k_I\int dt\right)\left\{e_{\hat{q}}\hat{\lambda}\right\} \quad (10)$$

โดยที่ $e_d=\hat{i}_{\hat{d}}-i_{\hat{d}}$ และ $e_q=\hat{i}_{\hat{q}}-i_{\hat{q}}$

G_1,G_2,H_1,H_2 คือ อัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกต (Observer's Feedback Gains) ในขณะที่ตัวห้อย $\hat{d},\hat{q}$ แสดงถึงองค์ประกอบในแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณ $\hat{d},\hat{q}$ และ $\frac{d\hat{\rho}}{dt}$ คือความถี่ของฟลักซ์ประมาณ

3.2.3 การควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม

ระบบควบคุมแบบเวกเตอร์แบบแรงดันจะอาศัยการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วมในการควบคุมกระแส โดยทำการชดเชยแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เชื่อมโยงระหว่างแกน d และ q ดังนี้

$$v_{\hat{d}}=u_{\hat{d}}-L\frac{d\hat{\rho}}{dt}\hat{i}_{\hat{q}} \quad (11)$$

$$v_{\hat{q}}=u_{\hat{q}}+L\frac{d\hat{\rho}}{dt}\hat{i}_{\hat{d}}+\hat{\omega}\hat{\lambda} \quad (12)$$

เมื่อแทนสมการ (11)-(12) ลงในสมการ (6)-(7) จะได้สมการสเตเตอร์ของตัวสังเกตที่ป้อนด้วยแรงดันจากการควบคุมแยกการเชื่อมร่วมดังนี้:

$$\frac{di_{\hat{d}}}{dt}=\frac{1}{L}\left\{-R\hat{i}_{\hat{d}}+u_{\hat{d}}+G_1\cdot e_{\hat{d}}-G_2\cdot e_{\hat{q}}\right\} \quad (13)$$

$$\frac{di_{\hat{q}}}{dt}=\frac{1}{L}\left\{-R\hat{i}_{\hat{q}}+u_{\hat{q}}+G_2\cdot e_{\hat{d}}+G_1\cdot e_{\hat{q}}\right\} \quad (14)$$

สมการข้างต้นแสดงถึงลักษณะทางพลวัตของกระแสสเตเตอร์ที่มีการควบคุมได้อย่างอิสระในแต่ละแกนโดยผ่านแรงดัน $u_{\hat{d}}$ และ $u_{\hat{q}}$ โดยเราเรียกวิธีการควบคุมแรงดัน $v_{\hat{d}}$ และ $v_{\hat{q}}$ ตามสมการ (11)-(12) ว่าเป็นการควบคุมแบบแยกเชื่อมร่วม (Decoupling control) ถ้าเรากำหนดให้

$$u_{\hat{d}}=i_{\hat{d}}^{*}R \quad (15)$$

$$u_{\hat{q}}=i_{\hat{q}}^{*}R \quad (16)$$

จะได้

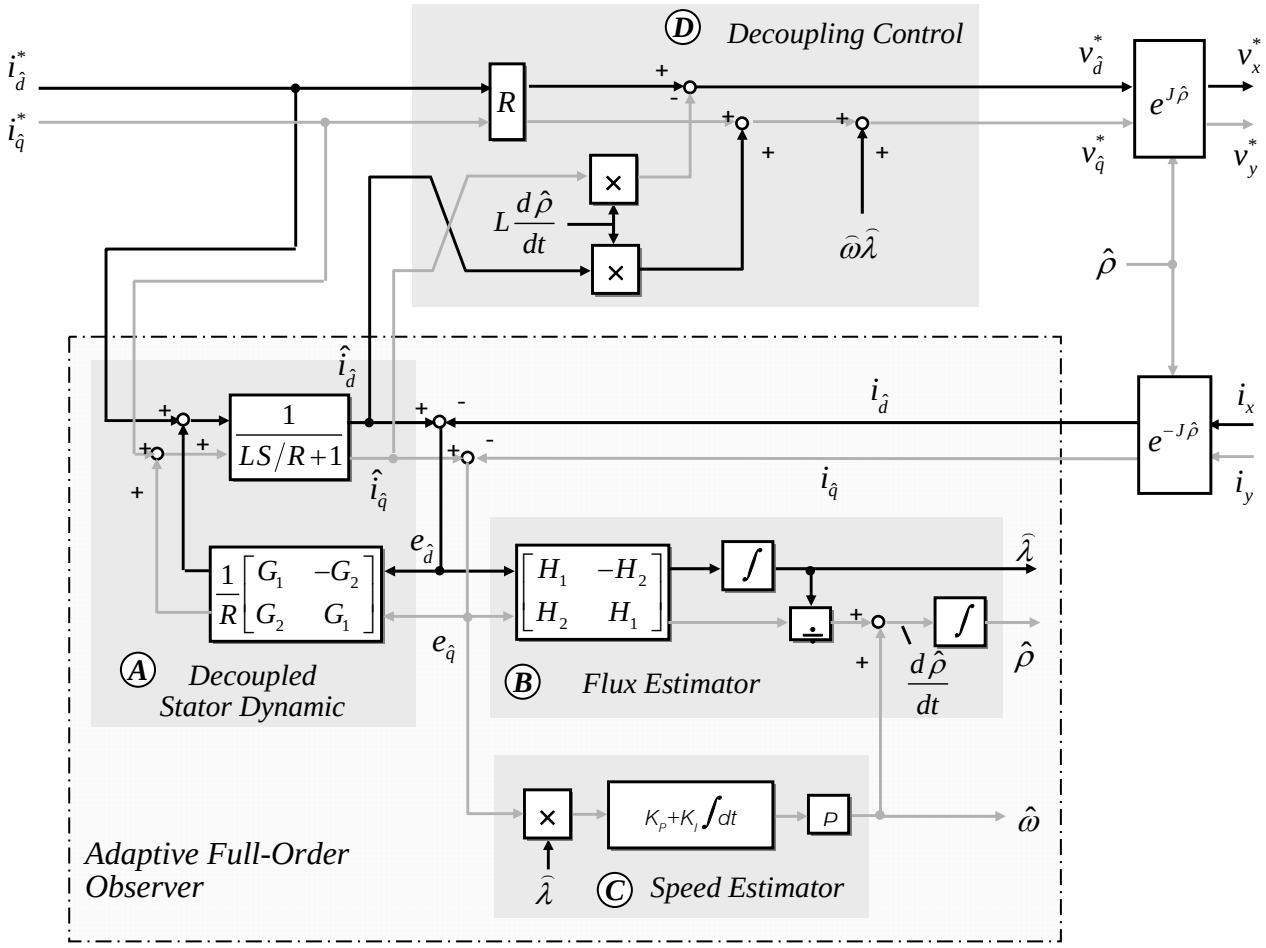
$$\frac{di_{\hat{d}}}{dt}=\frac{1}{L}\left\{R(i_{\hat{d}}^{*}-\hat{i}_{\hat{d}})+G_1\cdot e_{\hat{d}}-G_2\cdot e_{\hat{q}}\right\} \quad (17)$$

$$\frac{di_{\hat{q}}}{dt}=\frac{1}{L}\left\{R(i_{\hat{q}}^{*}-\hat{i}_{\hat{q}})+G_2\cdot e_{\hat{d}}+G_1\cdot e_{\hat{q}}\right\} \quad (18)$$

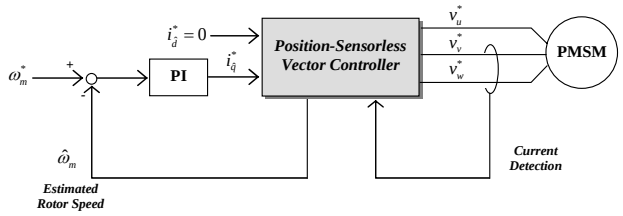
จะเห็นได้จากสมการ (17)-(18) ว่าในกรณีที่ $e_{\hat{d}}=e_{\hat{q}}=0$ ผล ตอบสนองของกระแสสเตเตอร์ $(i_{\hat{d}},i_{\hat{q}})$ ต่อกระแสคำสั่งในแต่ละแกน $(i_{\hat{d}}^{*},i_{\hat{q}}^{*})$ เป็นการหน่วงแบบอันดับหนึ่งด้วยค่าคงตัวเวลาเท่ากับ L/R

3.3 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งโดยอาศัยการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม

จากตัวสังเกตแบบปรับตัวและแนวคิดของการควบคุมแยกการเชื่อมร่วมข้างต้นเราสามารถแสดงโครงสร้างของตัวควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งดังในรูปที่ 5 โดยตัวควบคุมจะประกอบด้วย 4 ส่วนคือ บริเวณ A คือลักษณะทางพลวัตทางด้านสเตเตอร์ บริเวณ B คือลักษณะทางพลวัตของโรเตอร์ฟลักซ์ บริเวณ C คือส่วนประมาณค่าความเร็ว และบริเวณ D คือการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม รูปที่ 6 แสดงถึงระบบควบคุมความเร็วที่ใช้ตัวควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง



รูปที่ 5 โครงสร้างของตัวควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งโดยอาศัยการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม



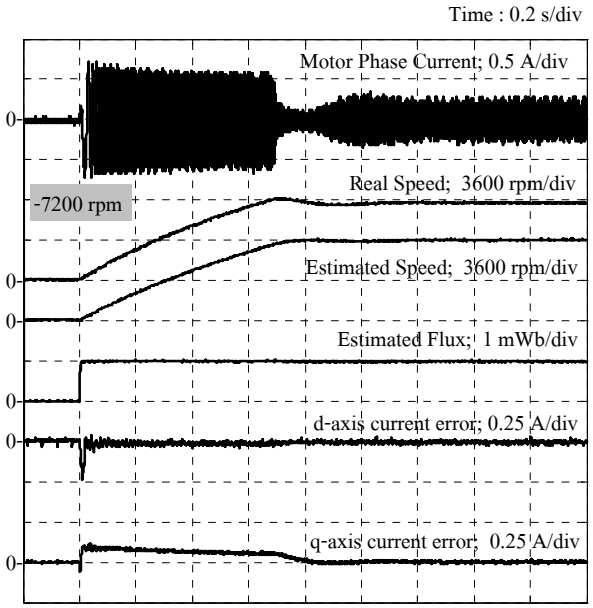
รูปที่ 6 ระบบควบคุมความเร็วด้วยตัวควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

4. การทดสอบสมรรถนะของตัวขับเคลื่อนที่ใช้ตัวควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

4.1 การทำงานในช่วงการเริ่มต้นเออกตัวและการเร่งความเร็ว

ผลการทดลองในรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าระบบขับเคลื่อนสามารถเริ่มต้นออกตัวจากหยุดนิ่งได้ดี รวมทั้งประมาณค่าความเร็วโรเตอร์และติดตามความเร็วจริงของโรเตอร์ได้อย่างแม่นยำ เวลาที่ใช้ในการเริ่มต้นออกตัวจนกระทั่งลู่เข้าสู่ความเร็วตั้งค่าที่ 7200 rpm มีค่าประมาณ 700 ms โดยตัวสังเกตสามารถประมาณค่าฟลักซ์และกระแสมอเตอร์ได้อย่างถูกต้อง เมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแสเฟส u, i_{su} จะพบว่าตลอดช่วงเร่งความเร็วระบบสามารถควบคุม

กระแสให้มีขนาดค่ายอดคงที่เท่ากับ 600 mA ตามค่าที่ได้จำกัดไว้ภายในตัวควบคุม ผลตอบสนองดังกล่าวนี้แสดงถึงสมรรถนะในการควบคุมแรงบิดที่ดี

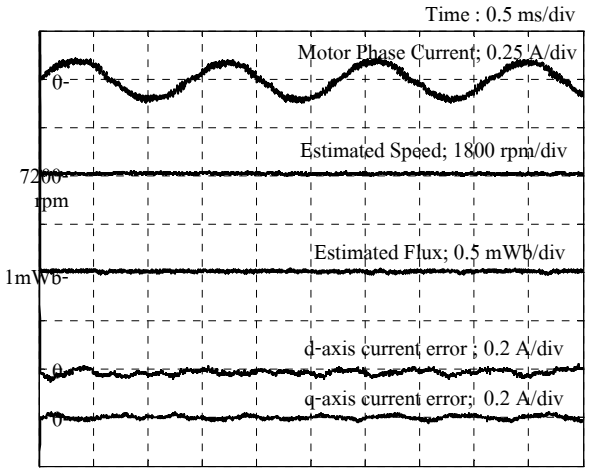


รูปที่ 7 ผลการทดลองการเริ่มต้นออกตัวและเร่งความเร็วไปที่ค่าคำสั่ง 7200 rpm

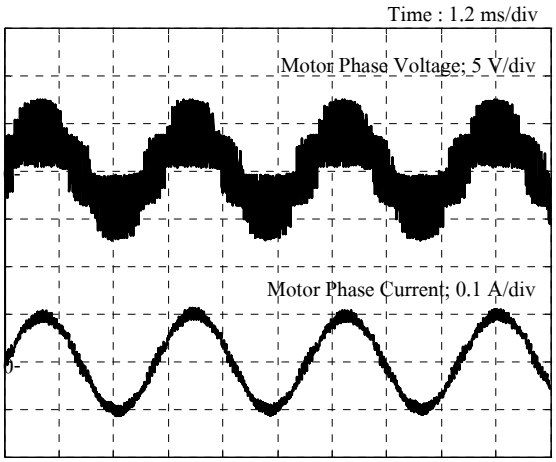
4.2 การทำงานที่สถานะอยู่ตัว 7200 rpm

ผลการทดลองในรูปที่ 8 แสดงถึงสมรรถนะของตัวขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่สถานะอยู่ตัว โดยกระแสมอเตอร์เป็นรูปคลื่นไซน์และระบบสามารถควบคุมความเร็วและประมาณตัวแปรสถานะต่างๆได้อย่างถูกต้อง ทั้งกระแสมอเตอร์ (สังเกตได้จากค่าผิดพลาดของกระแสทั้งสองแกนอยู่รอบค่าศูนย์) โรเตอร์ฟลักซ์ และความเร็วโรเตอร์

รูปที่ 9 แสดงภาพขยายรูปคลื่นกระแสจะเห็นได้อย่างชัดเจนถึงรูปคลื่นที่เป็นไซน์สมบูรณ์ และรูปที่ 10(ข) แสดงสเปรกตรัมของกระแส โดยกระแสที่องค์ประกอบหลักมูลมีขนาดเท่ากับ 90 mA และองค์ประกอบความถี่การสวิตช์ 40 kHz มีขนาดประมาณ 5 mA เมื่อเปรียบเทียบกับสเปรกตรัมของกระแสในรูปที่ 10(ข) สำหรับกรณีที่ใช้ตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม เห็นได้ว่าจะมีองค์ประกอบความถี่ต่ำของกระแสในช่วงความถี่ 1-20 KHz ซึ่งมีขนาดที่สูงอย่างมีนัยสำคัญและเป็นต้นเหตุของการสั่นสะเทือนทางกล



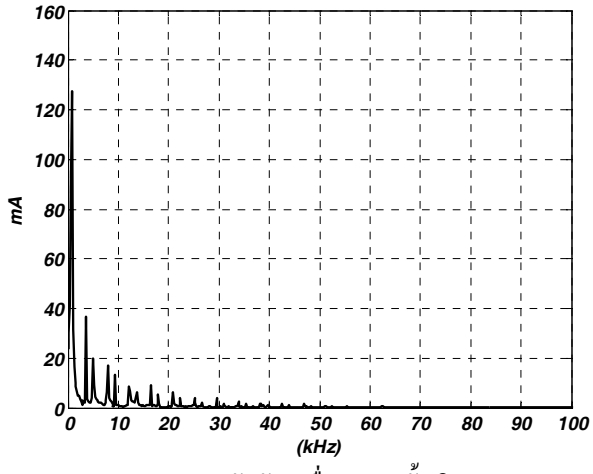
รูปที่ 8 ผลการทดลองที่สถานะอยู่ตัว 7200 rpm



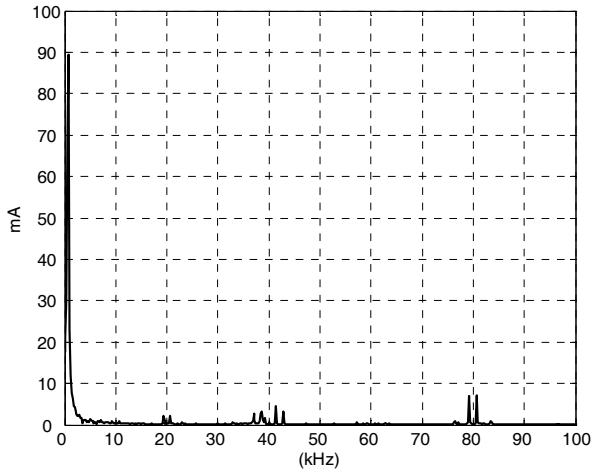
รูปที่ 9 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่สถานะอยู่ตัว 7200 rpm

4.3 ผลการทดสอบการตรวจวัดการสั่นสะเทือนทางกล

รูปที่ 11 แสดงการจัดเตรียมการวัดการสั่นสะเทือนทางกล โดยมอเตอร์สปินเดิลจะอยู่บนโฟมที่วางบนโต๊ะทดสอบและถูกขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อน วิธีตรวจวัดการสั่นสะเทือนจะอาศัยปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler Effect) ที่ใช้ในเครื่องมือวัดโดยทั่วไป การสั่นสะเทือนของมอเตอร์จะสัมพันธ์กับรูปคลื่นสัญญาณแสงเลเซอร์ที่สะท้อนกลับจากมอเตอร์มายังตัวตรวจวัดการสั่นสะเทือน (Vibrometer) การสั่นสะเทือนทางกลจะประกอบด้วยองค์ประกอบความถี่ต่างๆไม่ว่าจะเป็นความถี่มูลฐานที่ความเร็วของมอเตอร์เท่ากับ 120 Hz หรือองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์อื่นๆของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากตัวขับเคลื่อน

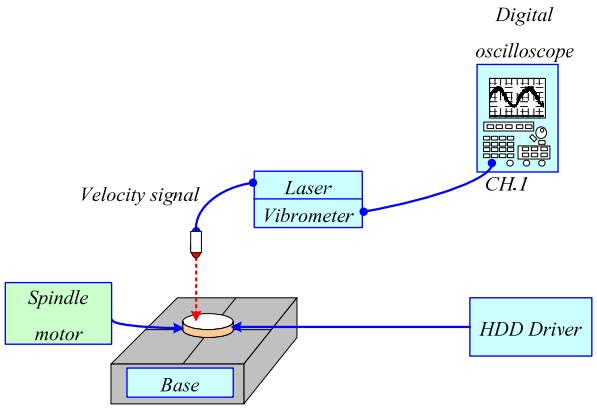


(ก) ตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม

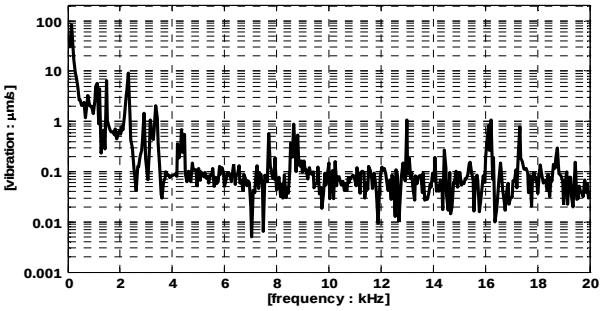


(ข) ตัวขับเคลื่อนที่นำเสนอ

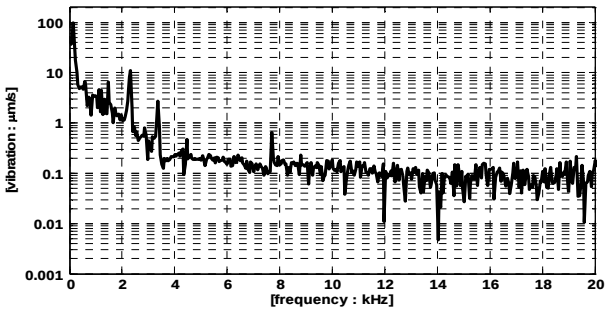
รูปที่ 10 สเปรกตรัมของกระแสที่ 7200 rpm



รูปที่ 11 ระบบการตรวจวัดการสั่นสะเทือนทางกล



(ก) ตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม



(ข) ตัวขับเคลื่อนที่นำเสนอ

รูปที่ 12 สเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกล

รูปที่ 12 เปรียบเทียบสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกลระหว่างตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมและตัวขับเคลื่อนที่นำเสนอ เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกลจะพบว่าตัวขับเคลื่อนที่นำเสนอสามารถลดทอนโหมดเด่นที่ความถี่ 8.65 kHz,13 kHz, 16.2 kHz และ 17.3 kHz ให้ลดลง ได้ถึง 10 เท่า

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาตัวขับเคลื่อนแบบใหม่สำหรับมอเตอร์สปินเดิลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยสามารถควบคุมกระแสมอเตอร์ให้เป็นรูปคลื่นไซน์และมีสมรรถนะในการขับเคลื่อนที่ดี ทั้งการเริ่มต้นออกตัวและเร่งความเร็วเข้าสู่ค่าความเร็วคำสั่ง 7200 rpm ได้อย่างรวดเร็วรวมถึงสามารถควบคุมความเร็วได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ผลการทดสอบการสั่นสะเทือนทางกลแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะในการลดทอนการสั่นสะเทือนทางกลอย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถลดทอนโหมดเด่นของการสั่นสะเทือนได้ถึง 10 เท่า

ซึ่งเป็นการลดสาเหตุหนึ่งของการเกิดเสียงรบกวนอันเนื่องมาจากการสั่นสะเทือนทางกลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยพัฒนาและวิศวกรรมภายใต้โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากวิทยาลัยร่วมด้านเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลและการประยุกต์ใช้งาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ภาคผนวก

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์และพิกัดของมอเตอร์

แรงบิดพิกัด : 3.303 mNm	ค่าความต้านทาน R : 1.743 Ω
กระแสพิกัด : 500 mA	ค่าความเหนี่ยวนำ L : 0.426 mH
ความเร็วพิกัด : 7200 rpm	ค่าฟลักซ์แม่เหล็ก λ : 1.101 mWb
ขั้วแม่เหล็ก : 12 poles	

เอกสารอ้างอิง

[1] Y. Murai, Y. Kawase, K. Ohashi, K. Nagatake and K. Okuyama, “Torque Ripple Improvement for Brushless DC Miniature Motors,” *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 25, no. 3, pp. 441-450, May/Jun. 1989.

[2] A. L. El-Sadi, “Switch Mode Sine Wave Driver for Polyphase Brushless Permanent Magnet Motor,” U.S. Patent 5 798 623, Aug., 1998.

[3] B. J. White, “Method and Apparatus for Driving a Polyphase, Burshless DC Motor,” U.S. Patent 6 236 174 B1, May, 2001.

[4] S. Sangwongwanich, S. Suwankawin, S. Po-ngam and S. Koonlaboon “A Unified Speed Estimation Design Framework for Sensorless AC Motor Drives Based on Positive-Real Property” *IEEE Trans. Ind. Elec.*, vol. 53, no. 1, pp.96-119, Feb 2006.