

ตัวขับเคลื่อนแบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับมอเตอร์
สปีดเฟดในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อลดทอนการกระเพื่อมของแรงบิด
และการสั่นสะเทือนทางกล

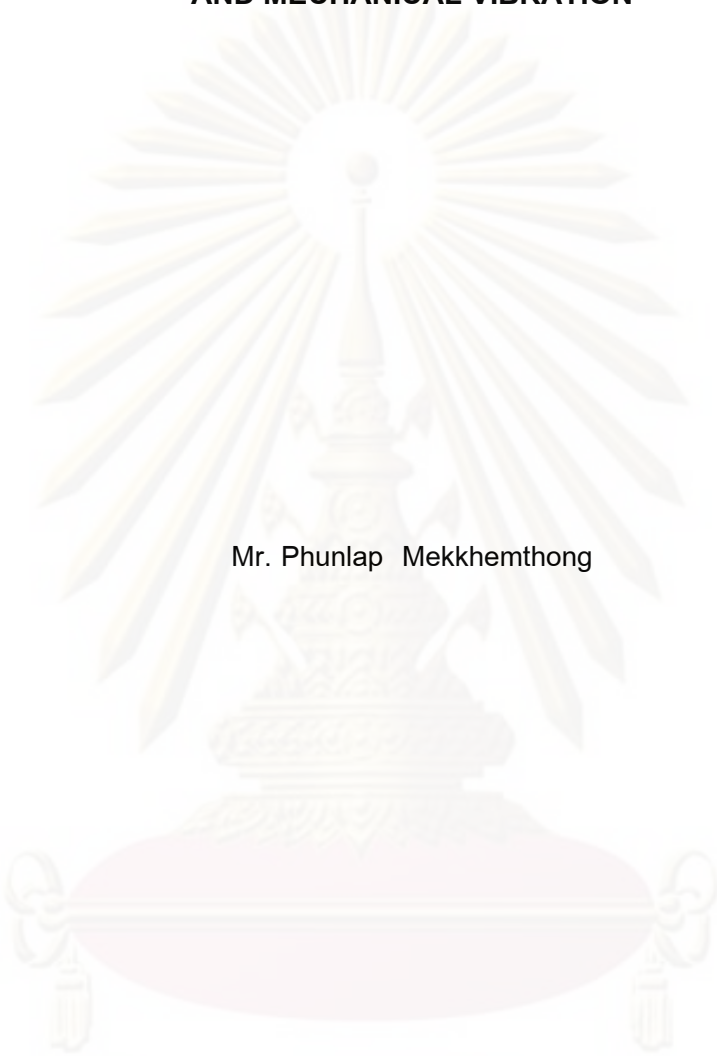
นาย พูนลาภ เมฆเข็มทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**A POSITION-SENSORLESS VECTOR-CONTROL DRIVER FOR SPINDLE
MOTORS IN HARD DISK DRIVES TO REDUCE TORQUE RIPPLE
AND MECHANICAL VIBRATION**



Mr. Phunlap Mekkhemthong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ตัวขับเคลื่อนแบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง
สำหรับมอเตอร์สปีนเดิลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อลดทอนการ
กระเพื่อมของแรงบิดและการสั่นสะเทือนทางกล

โดย

นาย พูนลาภ เมฆเข้มทอง

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

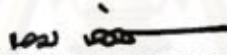
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพงษ์ สุวรรณกวิน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

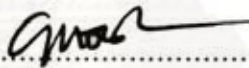
อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

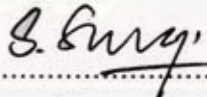


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



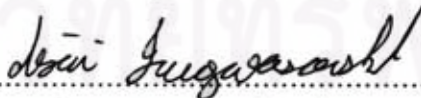
..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิทิต)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพงษ์ สุวรรณกวิน)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)



..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.นิตย์ เพ็ญเวโรจน์สกุล)

ศูนย์วิทยานิพนธ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พูนลาภ เมฆเข็มทอง : ตัวขับเคลื่อนแบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง สำหรับมอเตอร์สปินเดิลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อลดทอนการกระเพื่อมของแรงบิด และการสั่นสะเทือนทางกล. (A POSITION-SENSORLESS VECTOR-CONTROL DRIVER FOR SPINDLE MOTORS IN HARD DISK DRIVES TO REDUCE TORQUE RIPPLE AND MECHANICAL VIBRATION) อ. ที่ปรึกษา
 วิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน,อ. ที่ปรึกษา
 วิทยานิพนธ์ร่วม : อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ , 75 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอตัวขับเคลื่อนแบบใหม่สำหรับมอเตอร์สปินเดิลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยอาศัยหลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง แนวคิดในการพัฒนาตัวขับเคลื่อนจะพิจารณารูปคลื่นของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของมอเตอร์สปินเดิลที่ใช้จริงในปัจจุบัน ผลการตรวจวัดชี้ให้เห็นว่ามอเตอร์สปินเดิลในปัจจุบันจะมีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเป็นรูปคลื่นไซน์ซึ่งเป็นคุณสมบัติของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

เพื่อลดทอนการกระเพื่อมของแรงบิดและการสั่นสะเทือนทางกลที่มีสาเหตุมาจากตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม ตัวขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งจะป้อนแรงดันพีคดับเบิลยูเอ็มที่มีองค์ประกอบหลักมูลเป็นรูปคลื่นไซน์เพื่อให้ได้กระแสเดเตอร์เป็นรูปคลื่นไซน์ ผลจำลองการทำงานและผลการทดสอบตัวขับเคลื่อนที่พัฒนาขึ้นแสดงถึงสมรรถนะในการขับเคลื่อนของตัวควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง รวมทั้งผลทดสอบการสั่นสะเทือนทางกลในทางปฏิบัติแสดงให้เห็นถึงการลดทอนการสั่นสะเทือนทางกลอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์.....
 ปีการศึกษา 2552ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5070594321 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : POSITION-SENSORLESS / PERMANENT MAGNET

SYNCHRONOUS MOTOR / SPINDLE MOTOR / HARD DISK DRIVES / TORQUE

RIPPLE AND MECHANICLE VIBRATIONS

PHUNLAP MEKKHEMTHONG : A POSITION-SENSORLESS VECTOR-CONTROL DRIVER FOR SPINDLE MOTORS IN HARD DISK DRIVES TO REDUCE TORQUE RIPPLE AND MECHANICAL VIBRATION . THESIS

ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR SURAPONG SUWANKAWIN,Ph.D,

THESIS CO-ADVISOR : SOMBOON SANGWONGWANICH,D.Eng, 75 pp.

This thesis presents a novel driver for a spindle motors in hard disk drives based on principles of position-sensorless vector control. To develop the new driver, the back electromotive force (back-emf) of the motor is investigated. From the real measurement, it is pointed out that the present 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. Simulation and 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.

Department : Electrical Engineering

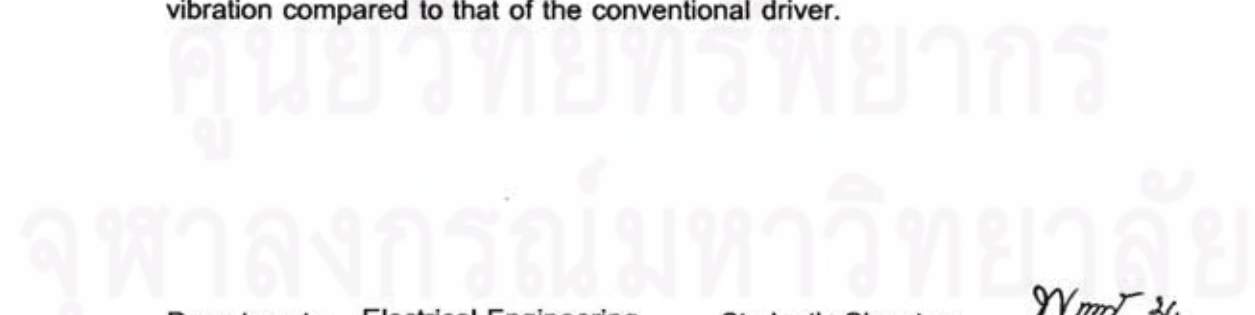
Student's Signature *W mrt 21.*

Field of Study : Electrical Engineering

Advisor's Signature *S. Surapong*

Academic Year : 2009

Co-Advisor's Signature *S. Somborn*



กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานต่าง ๆ ที่ได้ให้การช่วยเหลือและเอื้อเฟื้อให้คำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ได้สำเร็จลุล่วง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน และ อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์ วาณิชย์ ท่านอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำและคอยดูแลเอาใจใส่พวกเราอย่างดียิ่ง

รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติมา จินตนาวัน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่เอื้อเฟื้อคำแนะนำและเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนทางกล

คุณกิตติวัฒน์ เชียงฉินที่ร่วมจัดเตรียมฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์สำหรับงานวิจัย วิทยาลัยร่วมด้านเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลและการประยุกต์ใช้งาน (DSTAR) ที่สนับสนุนทุนสำหรับงานวิจัย

และขอขอบพระคุณบิดาและมารดาที่คอยเป็นกำลังใจและช่วยสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ลำดับขั้นตอนในการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม (Conventional Driver).....	4
2.1 ลักษณะสมบัติของมอเตอร์สปีนเดิลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	4
2.2 ระลอกแรงบิดของมอเตอร์สปีนเดิลที่ขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนแบบ ดั้งเดิม.....	5
2.3 ตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมกับมอเตอร์สปีนเดิลซิงโครนัสชนิดแม่เหล็ก ถาวร.....	8
บทที่ 3 ตัวขับเคลื่อนแบบใหม่สำหรับมอเตอร์สปีนเดิลด้วยการควบคุมแบบเวกเตอร์ ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง.....	13
3.1 หลักการและโครงสร้างของตัวขับเคลื่อนแบบใหม่.....	13
3.2 การควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง.....	15
3.2.1 แบบจำลองของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร.....	15
3.2.2 ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว.....	16
3.2.3 การควบคุมแบบเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม.....	17
3.2.4 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งโดย อาศัยการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม.....	18

บทที่	หน้า
3.3 การจำลองการทำงานของตัวขับเคลื่อนที่ใช้ตัวควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้ เซนเซอร์วัดตำแหน่ง.....	20
3.4 ผลการทดลองของตัวขับเคลื่อนที่ใช้ตัวควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์ วัดตำแหน่ง.....	20
บทที่ 4 การสันสะเทือนทางกล.....	53
4.1 การตรวจวัดการสันสะเทือนทางกล.....	53
4.2 ผลการทดลองวัดการสันสะเทือนทางกลเมื่อใช้ตัวขับเคลื่อนต่างชนิดกัน..	54
4.3 ผลการทดลองวัดการสันสะเทือนทางกลเมื่อใช้ตัวขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM ที่มีความถี่การสวิตซ์ ต่าง ๆ.....	55
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	65
สรุปผลการวิจัย.....	65
ข้อเสนอแนะ.....	65
รายการอ้างอิง.....	67
ภาคผนวก.....	69
ภาคผนวก ก.....	70
ภาคผนวก ข.....	74
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	75

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	เงื่อนไขการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์ไว้ตำแหน่ง.....	21



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	ภาพรวมระบบควบคุมของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	1
2.1	โครงสร้างของมอเตอร์สปีนเดลที่ใช้ในฮาร์ดดิสก์.....	4
2.2	แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน (BLDC Motor) และมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSM).....	5
2.3	รูปคลื่นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำและกระแสมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม.....	6
2.4	โครงสร้างของตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม.....	7
2.5	แรงดันและกระแสของมอเตอร์สปีนเดลที่เป็นมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่ขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม.....	8
2.6	ผลการทดลองการเริ่มต้นออกตัวของระบบขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมที่มีการเชื่อมต่อทางกลกับตัวเข้ารหัส	10
2.7	ผลการทดลองการเริ่มต้นออกตัวของระบบขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมที่ไม่มีการเชื่อมต่อทางกลกับตัวเข้ารหัส	10
2.8	ผลการทดลองของระบบขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมที่สถานะอยู่ตัว $\omega_m^* = 7200$ rpm (มีการเชื่อมต่อทางกลกับตัวเข้ารหัส)	11
2.9	ผลการทดลองของระบบขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมที่สถานะอยู่ตัว $\omega_m^* = 7200$ rpm (ไม่มีการเชื่อมต่อทางกลกับตัวเข้ารหัส)	11
2.10	รูปคลื่นกระแสของมอเตอร์เมื่อขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm (ไม่มีการเชื่อมต่อทางกลกับตัวเข้ารหัส)	12
2.11	สเปกตรัมของกระแสของมอเตอร์เมื่อขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm (ไม่มีการเชื่อมต่อทางกลกับตัวเข้ารหัส)	12
3.1	รูปคลื่นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำและกระแสของมอเตอร์สปีนเดลที่ขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนแบบใหม่.....	13
3.2	โครงสร้างของตัวขับเคลื่อนแบบใหม่สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยอาศัยการควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง.....	14
3.3	โครงสร้างของตัวควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งโดยอาศัยการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม.....	18
3.4	ระบบควบคุมความเร็วด้วยตัวควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง.....	19

รูปที่	หน้า
3.5 ผลจำลองการทำงานขณะเริ่มเดินมอเตอร์ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง.....	27
3.6 ผลจำลองการของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm.....	28
3.7 ผลจำลองการเร่งลดความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง.....	29
3.8 ผลการทดลองการเริ่มต้นออกตัวมอเตอร์ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้วงจรถยายเชิงเส้น โดยมีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล.....	30
3.9 ผลการทดลองที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้วงจรถยายเชิงเส้น โดยมีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล.....	31
3.10 ผลการทดลองการเร่งลดความเร็วของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้วงจรถยายเชิงเส้น โดยมีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล.....	32
3.11 ผลการทดลองการเริ่มต้นออกตัวมอเตอร์ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM โดยมีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล.....	33
3.12 ผลการทดลองที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM โดยมีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล.....	34
3.13 ผลการทดลองการเร่งลดความเร็วของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM โดยมีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล.....	35
3.14 ผลการทดลองการเริ่มต้นออกตัวมอเตอร์ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้วงจรถยายเชิงเส้น โดยไม่มีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล.....	36
3.15 ผลการทดลองที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้วงจรถยายเชิงเส้น โดยไม่มีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล.....	37

รูปที่	หน้า	
4.2	เปรียบเทียบสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกลของตัวขับเคลื่อนทั้ง 3 แบบ.....	56
4.3	สเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกลที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ณ ตำแหน่ง A.....	57
4.4	สเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกลที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ณ ตำแหน่ง B.....	58
4.5	สเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกลที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ณ ตำแหน่ง C.....	59
4.6	สเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกลที่ $f_{sw} = 20$ kHz และความเร็ว $\omega_m^* = 7200$ rpm.....	60
4.7	สเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกลที่ $f_{sw} = 30$ kHz และความเร็ว $\omega_m^* = 7200$ rpm.....	61
4.8	สเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกลที่ $f_{sw} = 40$ kHz และความเร็ว $\omega_m^* = 7200$ rpm.....	62
4.9	สเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกลที่ $f_{sw} = 60$ kHz และความเร็ว $\omega_m^* = 7200$ rpm.....	63
4.10	สเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกลที่ $f_{sw} = 80$ kHz และความเร็ว $\omega_m^* = 7200$ rpm.....	64
ก.1	โครงสร้างฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบเมื่อใช้ตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม.....	71
ก.2	โครงสร้างฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้วงจรขยายเชิงเส้น.....	72
ก.3	โครงสร้างฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM.....	73

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

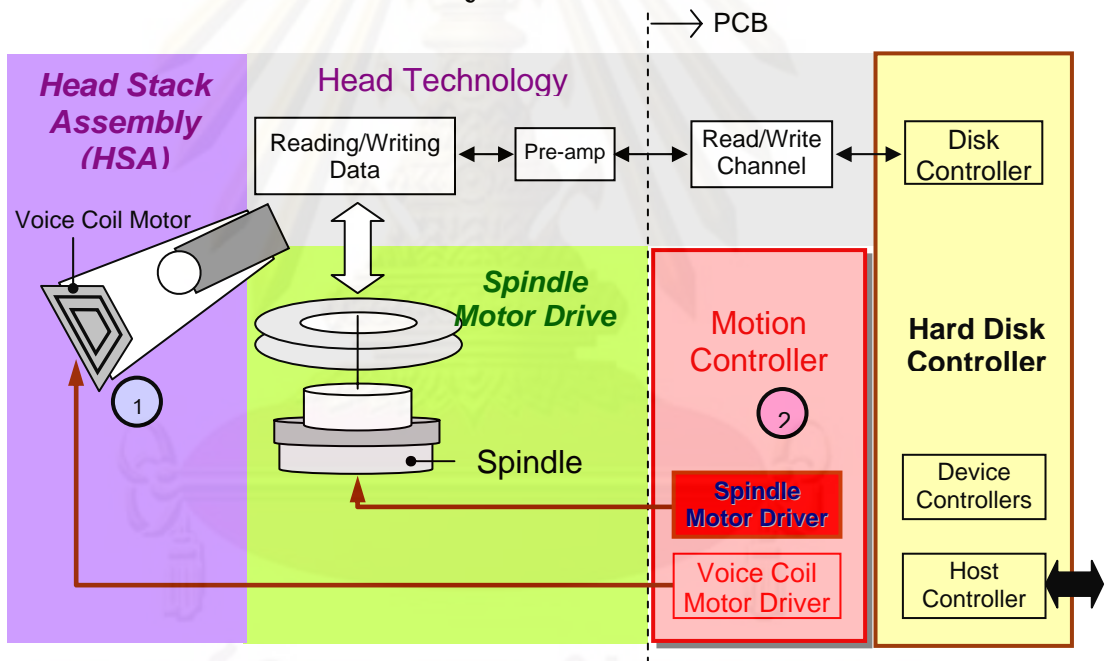
e_d, e_q	คือ	ค่าผิวดินของกระแสเตเตอร์อ้างอิงบนแกนโรเตอร์ฟลักซ์ประมาณ d และ q
f_{sw}	คือ	ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์
G_1, G_2, H_1, H_2	คือ	อัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกต
i_d, i_q	คือ	กระแสเตเตอร์อ้างอิงบนแกนโรเตอร์ d และ q
i_d^*, i_q^*	คือ	กระแสเตเตอร์อ้างอิงบนแกนโรเตอร์ฟลักซ์ประมาณ d และ q
\hat{i}_d, \hat{i}_q	คือ	ค่าประมาณกระแสเตเตอร์อ้างอิงบนแกนโรเตอร์ฟลักซ์ประมาณ d และ q
i_d^*, i_q^*	คือ	กระแสเตเตอร์คำสั่ง อ้างอิงบนแกนโรเตอร์ฟลักซ์ประมาณ d และ q
L	คือ	ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์
p	คือ	จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์
R	คือ	ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์
T_m	คือ	แรงบิดของมอเตอร์
u_d^*, u_q^*	คือ	แรงดันสเตเตอร์คำสั่งอ้างอิงบนแกนโรเตอร์ฟลักซ์ประมาณ d และ q
v_d, v_q	คือ	แรงดันสเตเตอร์อ้างอิงบนแกนโรเตอร์ d และ q
v_d^*, v_q^*	คือ	แรงดันสเตเตอร์อ้างอิงบนแกนโรเตอร์ฟลักซ์ประมาณ d และ q
ρ	คือ	ตำแหน่งของโรเตอร์ฟลักซ์
$\hat{\rho}$	คือ	ค่าประมาณตำแหน่งของโรเตอร์ฟลักซ์
λ	คือ	โรเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็ก
$\hat{\lambda}$	คือ	ค่าประมาณโรเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็ก
ω	คือ	ความเร็วโรเตอร์
$\hat{\omega}$	คือ	ค่าประมาณความเร็วโรเตอร์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องด้วยการพัฒนาสมรรถนะของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นไปในทิศทางที่จะพยายามเพิ่มผลตอบสนองที่รวดเร็วในการอ่านและเขียนข้อมูลประกอบกับความจุของแผ่นดิสก์ข้อมูลที่สูงยิ่งขึ้นในขณะที่มีความต้องการตัวประกอบรูปแบบ (Form Factor) หรือขนาดที่เล็กลง ดังนั้นการสั่นสะเทือนทางกลจึงมีนัยสำคัญอย่างยิ่งต่อความถูกต้องและความแม่นยำในการอ่านและเขียนข้อมูล นอกจากนี้การสั่นสะเทือนทางกลยังทำให้เกิดเสียงรบกวนซึ่งเป็นอุปสรรคต่อความสะดวกสบายของผู้ใช้งานอีกด้วย ด้วยเหตุนี้การลดทอนการสั่นสะเทือนทางกลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จึงเป็นประเด็นวิจัยและพัฒนาที่สำคัญประเด็นหนึ่ง



รูปที่ 1.1 ภาพรวมระบบควบคุมของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

รูปที่ 1.1 แสดงถึงโครงสร้างระบบควบคุมของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ การสั่นสะเทือนทางกลมีสาเหตุมาจาก 2 ส่วนหลักๆคือ

1.1.1) หัวอ่าน (Head Stack Assembly; HSA) ที่มี Voice Coil Motor เป็นตัวขับเคลื่อน (Actuator) การสั่นสะเทือนทางกลในช่วงเวลาที่หัวอ่านมีการเคลื่อนที่ทำให้เกิดเสียงรบกวนระหว่างการค้นหาข้อมูล (Search Noise)

1.1.2) ส่วนขับเคลื่อนของมอเตอร์สปินเดิล (Spindle Motor Drive) ที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อนแผ่นดิสก์ข้อมูล (Disk Platter) ให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วคงที่ ทั้งนี้การสั่นสะเทือน

ทางกลในขณะที่มอเตอร์สปินเดิลหมุนจะทำให้เกิดเสียงรบกวน (Idle Noise) ได้เช่นกัน การสันนิษฐานทางกลในส่วนนี้มีสาเหตุมาจาก 3 องค์ประกอบคือ

- 1) โครงสร้างทางกลของมอเตอร์และส่วนเชื่อมร่วม (Coupling) ระหว่างเฟลาและแผ่นดิสก์ข้อมูล [1]-[3]
- 2) โครงสร้างทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับารออกแบบทางแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวมอเตอร์ [4]-[7] และ
- 3) ตัวขับเคลื่อนของมอเตอร์สปินเดิล (Spindle Motor Driver) [8]-[15]

วิทยานิพนธ์นี้ให้ความสนใจศึกษาการสันนิษฐานทางกลในส่วนที่เกี่ยวข้องกับตัวขับเคลื่อนของมอเตอร์สปินเดิล โดยเน้นถึงการพัฒนาตัวขับเคลื่อนแบบใหม่สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อการลดทอนระลอกแรงบิดของมอเตอร์ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการสันนิษฐานทางกล แนวคิดในการพัฒนาตัวขับเคลื่อนนี้จะพิจารณาจากรูปคลื่นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของมอเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่สะท้อนถึงการกระจายของฟลักซ์แม่เหล็กทางด้านโรเตอร์ ทั้งนี้ตัวขับเคลื่อนจะต้องป้อนแรงดันและ/หรือกระแสที่ขดลวดสเตเตอร์ให้สอดคล้องกับการกระจายของแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านโรเตอร์เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดระลอกแรงบิด โดยเนื้อหาในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับ 1) ตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม (Conventional Driver) ลักษณะสมบัติของมอเตอร์สปินเดิลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และการสันนิษฐานทางกลที่เกิดขึ้นในตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม 2) ตัวขับเคลื่อนแบบใหม่ด้วยตัวควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง และ 3) กระบวนการทดสอบการสันนิษฐานทางกล

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

พัฒนาตัวขับเคลื่อนสำหรับมอเตอร์สปินเดิลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อลดทอนการสันนิษฐานทางกลด้วยอัลกอริทึมการควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. วิเคราะห์การกระเพื่อมของแรงบิดของมอเตอร์สปินเดิลเมื่อขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม (Conventional Driver)
2. พัฒนาตัวขับเคลื่อนแบบใหม่สำหรับมอเตอร์สปินเดิลแบบมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรเพื่อลดการกระเพื่อมของแรงบิดและการสันนิษฐานทางกล
3. ทดสอบการสันนิษฐานทางกลโดยเปรียบเทียบระหว่างตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมและตัวขับเคลื่อนแบบใหม่

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ตัวขับเคลื่อนแบบใหม่สำหรับมอเตอร์สปินเดิลแบบมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรสามารถลดทอนการกระเพื่อมของแรงบิดและการสั่นสะเทือนทางกลได้
2. สามารถนำผลการศึกษา วิจัย และพัฒนาไปประยุกต์ใช้กับระบบขับเคลื่อนของมอเตอร์สปินเดิลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้

1.5 ลำดับขั้นตอนในการการวิจัย

1. ศึกษาปัญหาการกระเพื่อมของแรงบิดของมอเตอร์สปินเดิลที่ขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม
2. นำเสนอตัวขับเคลื่อนแบบใหม่สำหรับมอเตอร์สปินเดิลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์
3. จำลองการทำงานวิธีการควบคุมมอเตอร์สปินเดิลด้วยวิธีใหม่
4. ออกแบบและทดสอบสร้างตัวขับเคลื่อนแบบใหม่ ทั้งในส่วนฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์
5. ปรับปรุงแก้ไขซอฟต์แวร์ในส่วนที่ผิดพลาด รวมทั้งประเมินผล สรุปผลและเก็บข้อมูล
6. เขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม (Conventional Driver)

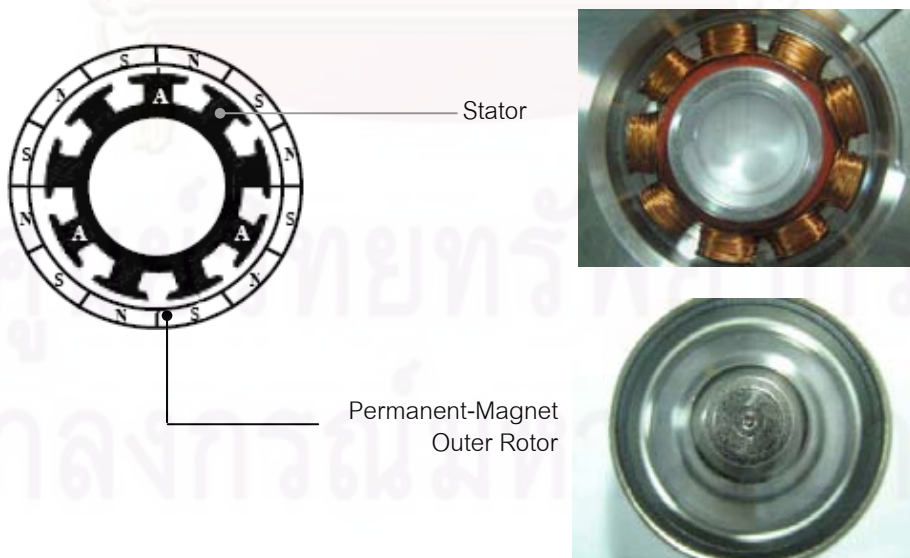
2.1 ลักษณะสมบัติของมอเตอร์สปีนเดิลในฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์

ก่อนที่จะพิจารณาถึงระลอกแรงบิดของมอเตอร์สปีนเดิลนั้นในเบื้องต้นจะนำเสนอถึงโครงสร้างของมอเตอร์สปีนเดิลแต่พอสังเขป รูปที่ 2.1 แสดงถึงสเตเตอร์และโรเตอร์ของมอเตอร์สปีนเดิล โดยโรเตอร์จะเป็นแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) และเป็นโรเตอร์ชนิดที่อยู่ด้านนอก (Outer Rotor) สำหรับส่วนสเตเตอร์จะมีชุดขดลวด (Stator/Armature Winding) พันอยู่บนแกนสเตเตอร์ (Stator Core)

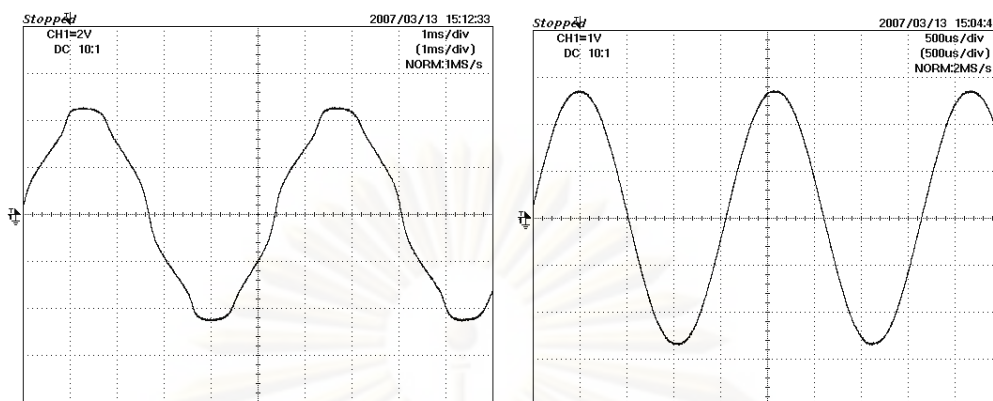
มอเตอร์สปีนเดิลที่ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์สามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภทตามการกระตุ้นทางแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทางด้านโรเตอร์ คือ

2.2.1) มอเตอร์สปีนเดิลแบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor, BLDC Motor) จะมีการกระตุ้นแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านโรเตอร์ให้กระจายตามตำแหน่งสม่ำเสมอ ในกรณีนี้จะสะท้อนมาที่แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมคางหมูดังในแสดงในรูปที่ 2.2(ก)

2.2.2) มอเตอร์สปีนเดิลแบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิดซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent-Magnet Synchronous Motor; PMSM) จะกระตุ้นแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านโรเตอร์ให้กระจายเป็นไซน์ตามตำแหน่งโดยในกรณีนี้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจะเป็นรูปคลื่นไซน์เช่นกันดังในแสดงรูปที่ 2.2 (ข)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของมอเตอร์สปีนเดิลที่ใช้ในฮาร์ดดิสก์



(ก) BLDC Motor

(ข) PMSM

รูปที่ 2.2 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน (BLDC Motor) และมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSM)

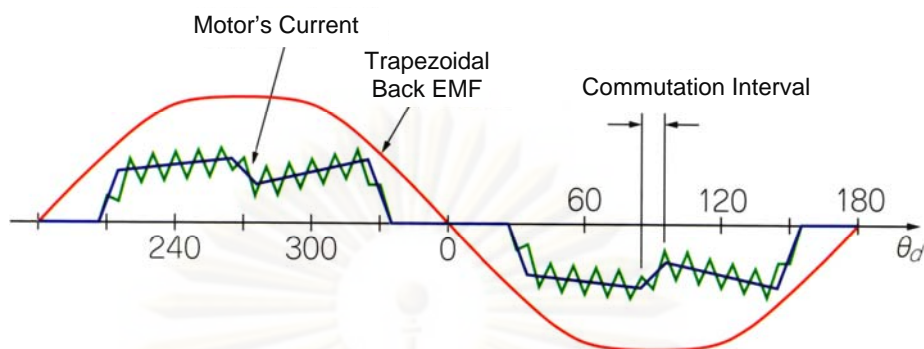
2.2 ระลอกแรงบิดของมอเตอร์สปีนเดิลที่ขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม

ในส่วนเทคโนโลยีของตัวขับเคลื่อนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้น หลักการของตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมจะพัฒนาอยู่บนพื้นฐานสำหรับมอเตอร์สปีนเดิลแบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน ซึ่งเป็นมอเตอร์ชนิดที่ใช้ควบคู่กับเทคโนโลยีของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในระยะเริ่มแรก ในปัจจุบันเทคโนโลยีของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้เปลี่ยนมาใช้มอเตอร์สปีนเดิลแบบมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแทน อย่างไรก็ตามแม้ตัวขับเคลื่อนสำหรับมอเตอร์สปีนเดิลแบบซิงโครนัสจะมีการดัดแปลงไปบ้างแต่แนวคิดหลักก็ยังคงใช้หลักการของตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม [14]-[15] ยังผลให้เกิดระลอกแรงบิดจากการที่ใช้วิธีการขับเคลื่อนที่ไม่สอดคล้องกับประเภทของมอเตอร์สปีนเดิลได้ ซึ่งจะกล่าวเพิ่มเติมในประเด็นนี้ในลำดับถัดไป

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าตัวขับเคลื่อนมีบทบาทอย่างมากต่อการเกิดระลอกแรงบิดและการสั่นสะเทือนทางกล ดังนั้นในเบื้องต้นจะนำเสนอหลักการทำงานของตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมแต่พอสังเขป เพื่อให้เข้าใจถึงสาเหตุของการเกิดระลอกแรงบิด

2.2.1 ตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมกับมอเตอร์สปีนเดิลแบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

หลักการควบคุมของตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมจะสอดคล้องกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Back EMF) โดยตัวขับเคลื่อนจะทำหน้าที่ป้อนกระแสมอเตอร์ที่มีรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยม (Quasi Square) และมุมเฟสตรงกันกับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำดังแสดงในรูปที่ 2.3 ในทางทฤษฎีถ้ากระแสมอเตอร์เป็นรูปคลื่นเกือบสี่เหลี่ยมแล้วจะไม่ทำให้เกิดระลอกแรงบิดของมอเตอร์



รูปที่ 2.3 รูปคลื่นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำและกระแสมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม

รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม (Conventional Driver) ซึ่งประกอบด้วย

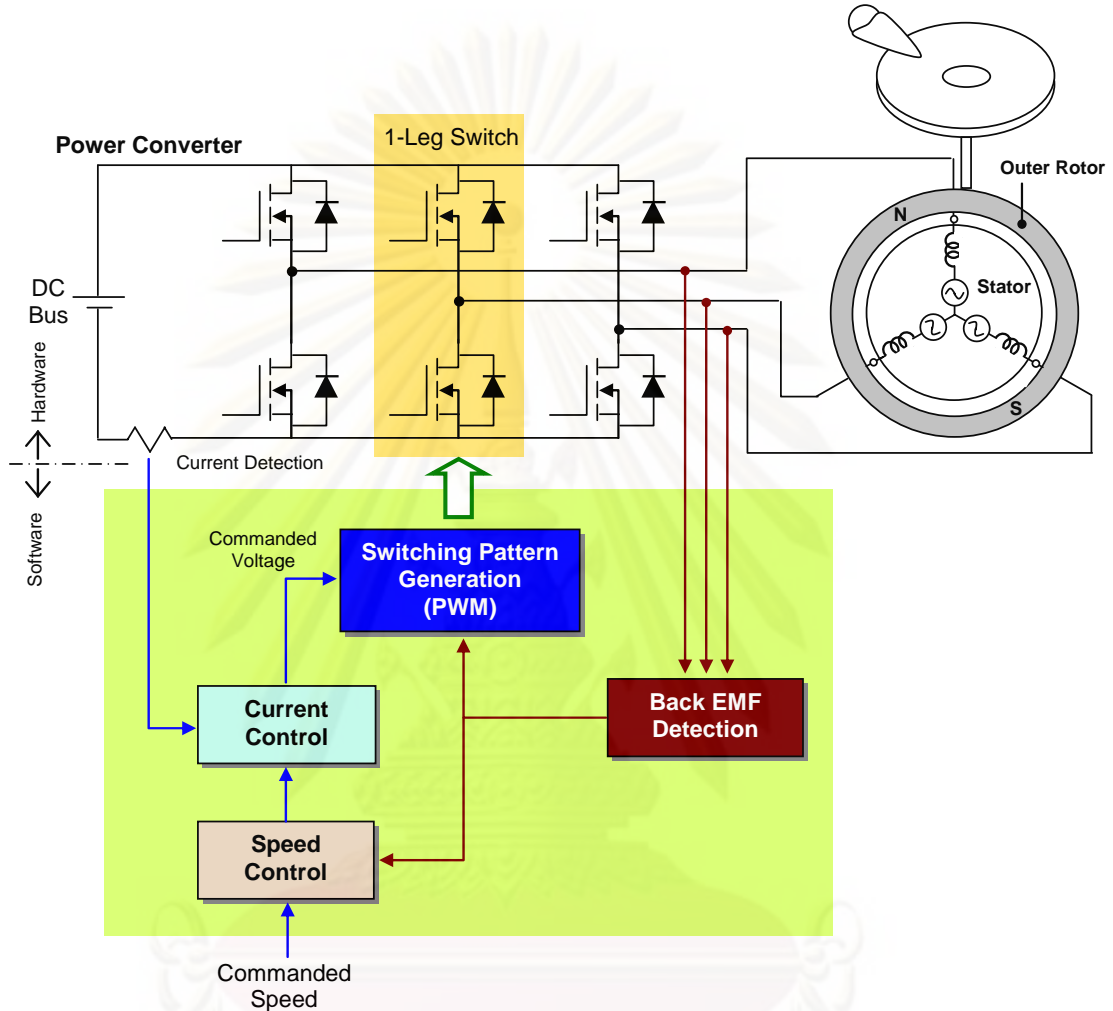
1) วงจรแปลงผันพลังงาน (Power Converter) ทำหน้าที่จ่ายแรงดันให้แก่มอเตอร์ วงจรแปลงผันจะประกอบด้วยสวิตช์กำลัง 6 ตัวเชื่อมต่อกันในรูปแบบ (Topology) ที่เป็นแบบ 3 ขา (1 ขามีสวิตช์ 2 ตัว) การทำงานจะมีเพียง 2 ขาทำหน้าที่จ่ายแรงดันให้แก่มอเตอร์ในขณะใดขณะหนึ่ง โดยจะมีการสับเปลี่ยน (Commutation) ผลัดกันทำหน้าที่จ่ายแรงดันให้แก่มอเตอร์ภายในระหว่างสวิตช์ทั้ง 3 ขา

2) ส่วนตรวจจับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำย้อนกลับ (Back EMF Detection) ทำหน้าที่ตรวจจับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการสับเปลี่ยน (Commutation) การทำงานของสวิตช์ทั้ง 3 ขา โดยอาศัยการชั่งตัวอย่าง (Sample) ข้อมูลของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจากขาหนึ่งของสวิตช์กำลังในขณะที่มีได้ทำหน้าที่จ่ายแรงดันให้แก่มอเตอร์ นอกจากนี้ในส่วนตรวจจับนี้ยังให้ข้อมูลความเร็วเชิงโรตัสที่ป้อนกลับไปยังวงรอบควบคุมความเร็วมอเตอร์สปีนเดิลอีกด้วย

3) ส่วนกำเนิดรูปแบบสัญญาณขับนำสวิตช์กำลัง (Switching Pattern Generation) รูปแบบการขับนำสวิตช์กำลังจะถูกกำหนดโดยอาศัยข้อมูลจากส่วนตรวจจับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำและข้อมูลแรงดันคำสั่งที่ได้จากส่วนควบคุมกระแส (ซึ่งจะกล่าวถัดไป) ทั้งนี้จะใช้วิธีการมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation; PWM) เพื่อให้ได้แรงดันเฉลี่ยสอดคล้องตามแรงดันคำสั่ง

4) ส่วนควบคุมความเร็วและกระแสของมอเตอร์ (Speed/Current Control) เป็นวงรอบควบคุมแบบคาสเคด (Cascade Control) ในส่วนควบคุมความเร็วจะใช้ข้อมูลความเร็วเชิงโรตัสที่ป้อนกลับจากส่วนตรวจจับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ ตัวควบคุมความเร็วจะกำหนดกระแสคำสั่ง

ให้แก่วงรอบควบคุมกระแสที่อยู่ในวงรอบใน (Inner Loop) ทำการควบคุมกระแสผ่านการกำหนดแรงดันคำสั่งให้แก่ส่วนกำเนิดรูปแบบสัญญาณขับนำสวิตช์กำลัง



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของตัวขับเคลื่อนแบบตั้งเดิม

2.2.2 ระยะเวลาบิตของที่เกิดจากการสับเปลี่ยนการนำกระแสของสวิตช์

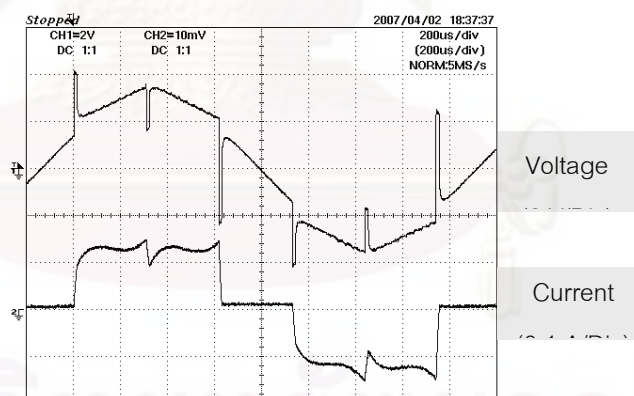
ปัญหาระยะเวลาบิตที่เกิดขึ้นในกรณีของตัวขับเคลื่อนแบบตั้งเดิมกับมอเตอร์สปีนเดลแบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านนั้นมีสาเหตุมาจากการสับเปลี่ยน (Commutation Torque Ripple) ซึ่งเกิดขึ้นในจังหวะที่มีการสับเปลี่ยนการทำงานของสวิตช์จากขาหนึ่งไปยังอีกขาหนึ่ง [4]-[5] โดยจะสังเกตได้จากรูปที่ 2.3 มีการกระเพื่อมของสัญญาณกระแสในช่วงเวลาที่เกิดการสับเปลี่ยนการนำกระแสของสวิตช์ (Commutation Interval) แนวทางแก้ไขปัญหานี้สามารถทำได้โดยอาศัยเทคนิคการเหลื่อม (Overlap) สำหรับการขับนำสวิตช์ [8]-[10] เพื่อปรับปรุงให้กระแสมอเตอร์มีรูปคลื่นเกือบสี่เหลี่ยมและสามารถลดทอนระยะเวลาบิตได้ อาจกล่าวได้ว่าเทคโนโลยีของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แบบตั้งเดิมที่ใช้ตัวขับเคลื่อนแบบตั้งเดิม (และอาศัย

การเหลื่อมการขั้วนำสวิตช์)พร้อมกันกับมอเตอร์สปีนเดิลแบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านนั้น ประเด็นปัญหาของระลอกแรงบิดจากตัวขับเคลื่อนจะไม่มีนัยสำคัญแต่อย่างใด

2.3 ตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมกับมอเตอร์สปีนเดิลแบบมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็ก

ถาวร

แม้ว่าปัจจุบันมอเตอร์สปีนเดิลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้เปลี่ยนมาใช้มอเตอร์ซิงโครนัส แต่เท่าที่ได้ตรวจสอบกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้จริงกันอยู่ [14]-[15] พบว่าตัวขับเคลื่อนยังคงใช้แนวคิดของตัวขับเคลื่อนเดิมซึ่งอาจจะด้วยเหตุที่เป็นเทคโนโลยีที่คุ้นเคยและมีการควบคุมที่ง่าย การขับเคลื่อนดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดระลอกแรงบิดเนื่องจากฮาร์มอนิกของกระแสเดเตอร์ (กระแสมอเตอร์จะมีรูปคลื่นเกือบสี่เหลี่ยมทำให้มีองค์ประกอบฮาร์มอนิกในเชิงเวลา) โดยระลอกแรงบิดนี้เกิดจากการกระทำระหว่างกันระหว่างองค์ประกอบฮาร์มอนิกของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (MMF) ทางด้านสเตเตอร์ และการกระจายของฟลักซ์แม่เหล็กทางด้านโรเตอร์ (Rotor Magnet Flux Distribution) ที่ถูกกระตุ้นให้เป็นฟังก์ชันของไซน์ตามตำแหน่งเชิงมุมทางไฟฟ้า รูปที่ 2.5 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์สปีนเดิลแบบมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่ขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม



รูปที่ 2.5 แรงดันและกระแสของมอเตอร์สปีนเดิลที่เป็นมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่ขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม

จากลักษณะของรูปคลื่นแรงดันและกระแสในรูปที่ 2.5 สามารถสรุปได้ว่าการกระเพื่อมของแรงบิดและส่งผลไปยังการสั่นสะเทือนทางกลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้ตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมควบคู่กับมอเตอร์สปีนเดิลแบบมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรมีสาเหตุหลักมาจาก

2.3.1) ระลอกแรงบิดของการสับเปลี่ยน (Commutation Torque Ripple)

2.3.2) ระลอกแรงบิดที่เกิดจากการกระทำระหว่างกันระหว่างองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านสเตอร์ และการกระจายของฟลักซ์แม่เหล็กทางด้านโรเตอร์

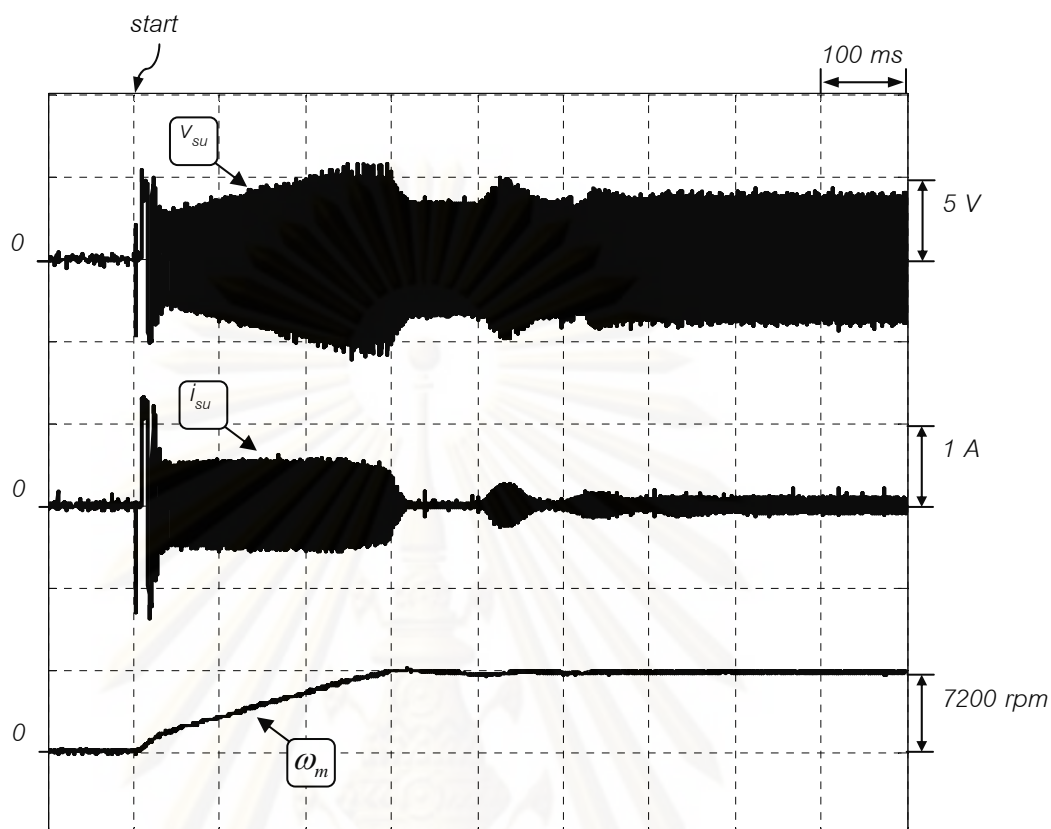
2.4 ผลการทดลองของตัวขับเคลื่อนที่ใช้ตัวควบคุมแบบดั้งเดิม

2.4.1 ผลการทดลองในช่วงการเริ่มต้นออกตัว

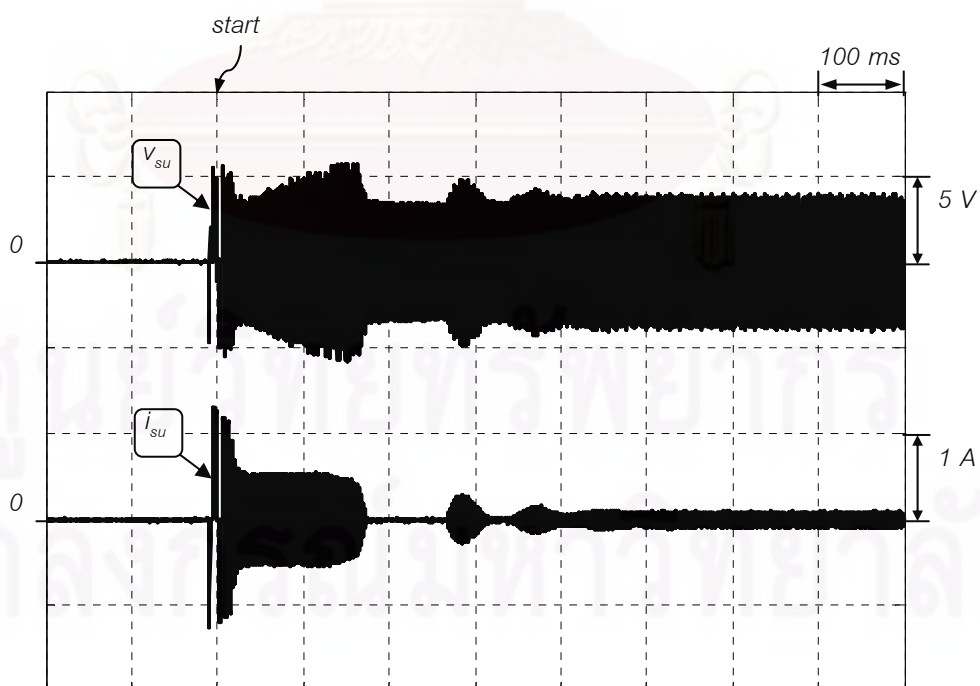
รูปที่ 2.6 และ 2.7 แสดงถึงการเริ่มต้นออกตัวจากหยุดนิ่งไปสู่ค่าความเร็ว $\omega_m^* = 7200$ rpm ซึ่งใช้เวลาประมาณ 300 ms ในการเร่งความเร็ว จะสังเกตเห็นว่าในจังหวะของการออกตัว ค่ายอดของกระแสมอเตอร์ค่อนข้างสูง โดยมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 1.2 A (พิกัดของมอเตอร์เท่ากับ 0.5 A) และสังเกตเห็นการแกว่งของกระแส แรงดันและความเร็วก่อนจะเข้าสู่สถานะอยู่ตัว

2.4.2 ผลการทดลองการทำงานที่สถานะอยู่ตัว

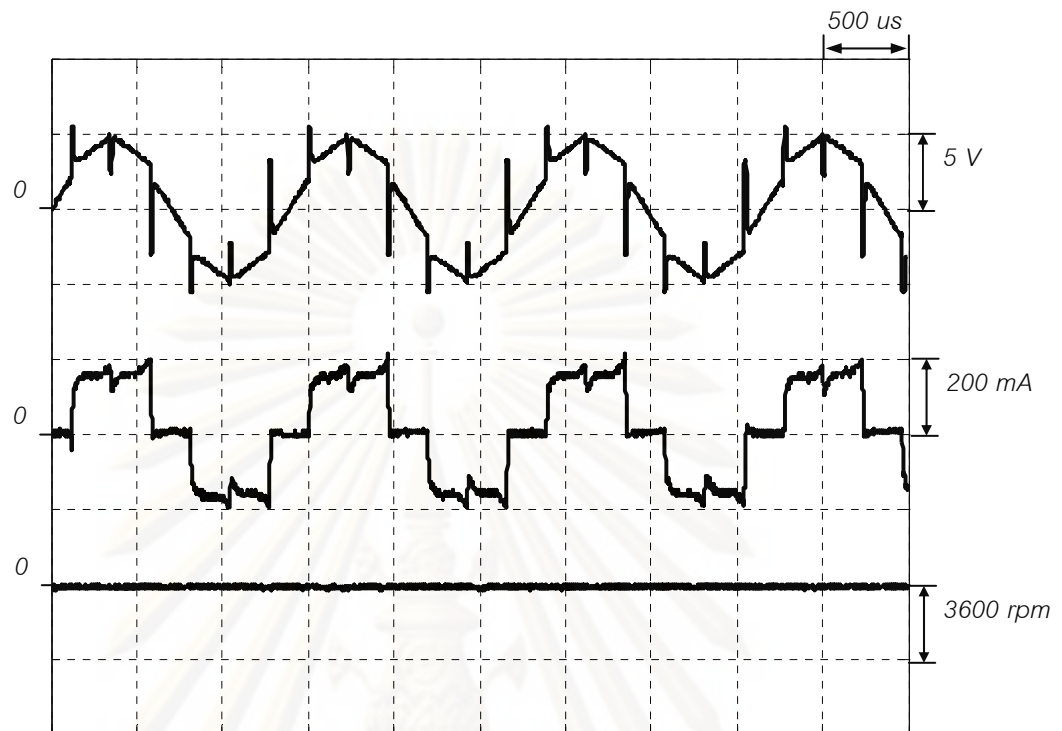
รูปที่ 2.8 และ 2.9 แสดงกระแสและแรงดันของมอเตอร์ที่สถานะอยู่ตัวที่ความเร็ว 7200 rpm ภาพขยายของกระแสมอเตอร์ในรูปที่ 2.10 แสดงถึงรูปคลื่นเกือบสี่เหลี่ยมดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.3 ซึ่งเมื่อพิจารณาสเปกตรัมของกระแสในรูปที่ 2.11 จะพบว่ามีฮาร์มอนิกส์ในย่านความถี่ต่ำซึ่งจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนทางกลของมอเตอร์สปีนเดลได้



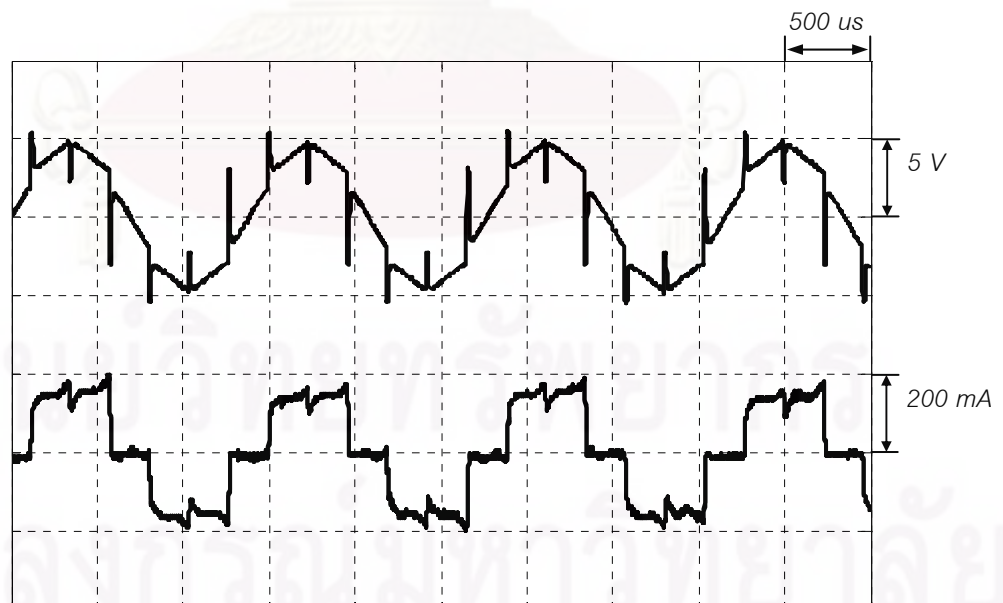
รูปที่ 2.6 ผลการทดลองการเริ่มต้นออกตัวของระบบขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมที่มีการเชื่อมต่อทางกลกับตัวเข้ารหัส



รูปที่ 2.7 ผลการทดลองการเริ่มต้นออกตัวของระบบขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมที่ไม่มีการเชื่อมต่อทางกลกับตัวเข้ารหัส



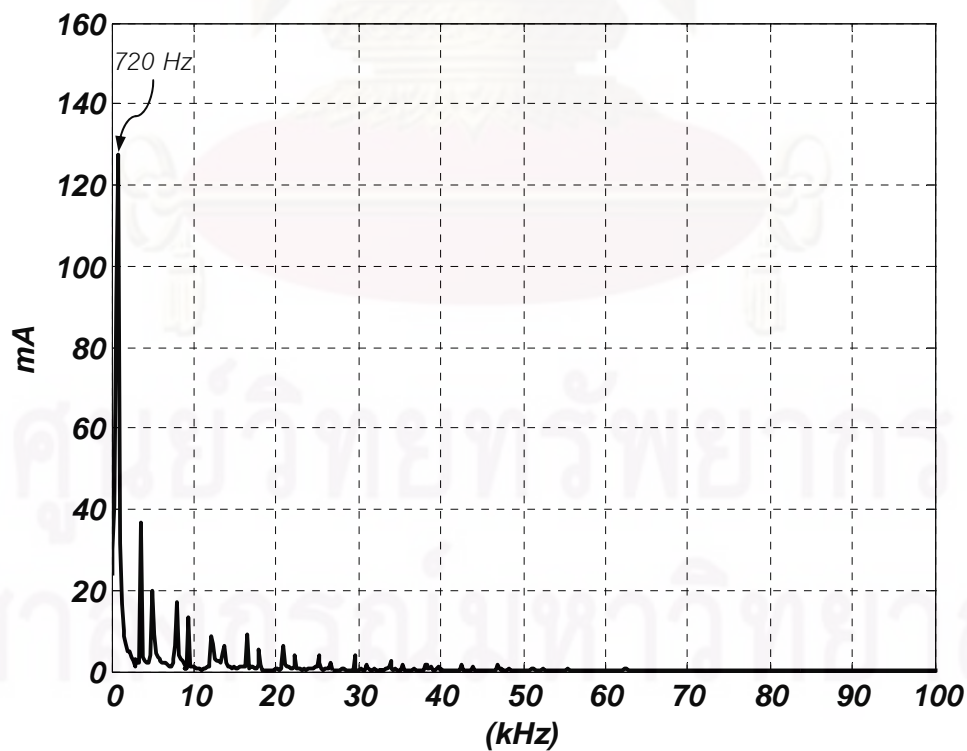
รูปที่ 2.8 ผลการทดลองของระบบขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมที่สถานะอยู่ตัว $\omega_m^* = 7200$ rpm (มีการเชื่อมต่อทางกลกับตัวเข้ารหัส)



รูปที่ 2.9 ผลการทดลองของระบบขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมที่สถานะอยู่ตัว $\omega_m^* = 7200$ rpm (ไม่มีการเชื่อมต่อทางกลกับตัวเข้ารหัส)



รูปที่ 2.10 รูปคลื่นกระแสของมอเตอร์เมื่อขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm (ไม่มีการเชื่อมต่อทางกลกับตัวเข้ารหัส)



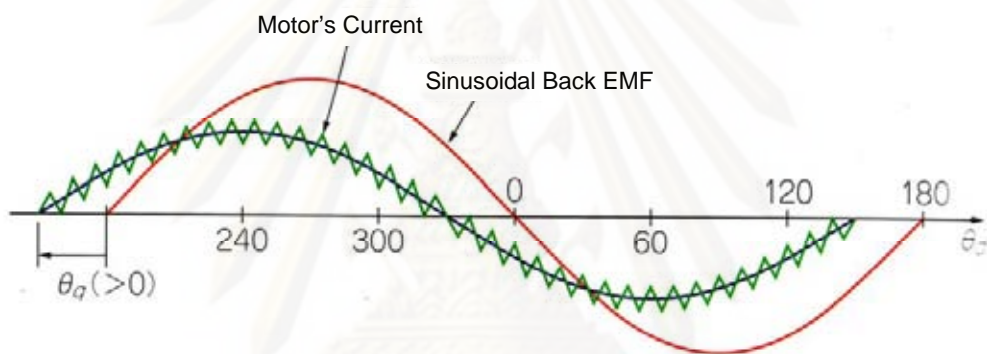
รูปที่ 2.11 สเปกตรัมของกระแสของมอเตอร์เมื่อขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm (ไม่มีการเชื่อมต่อทางกลกับตัวเข้ารหัส)

บทที่ 3

ตัวขับเคลื่อนแบบใหม่สำหรับมอเตอร์สปีนเดิลด้วยการควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

3.1 หลักการและโครงสร้างของตัวขับเคลื่อนแบบใหม่

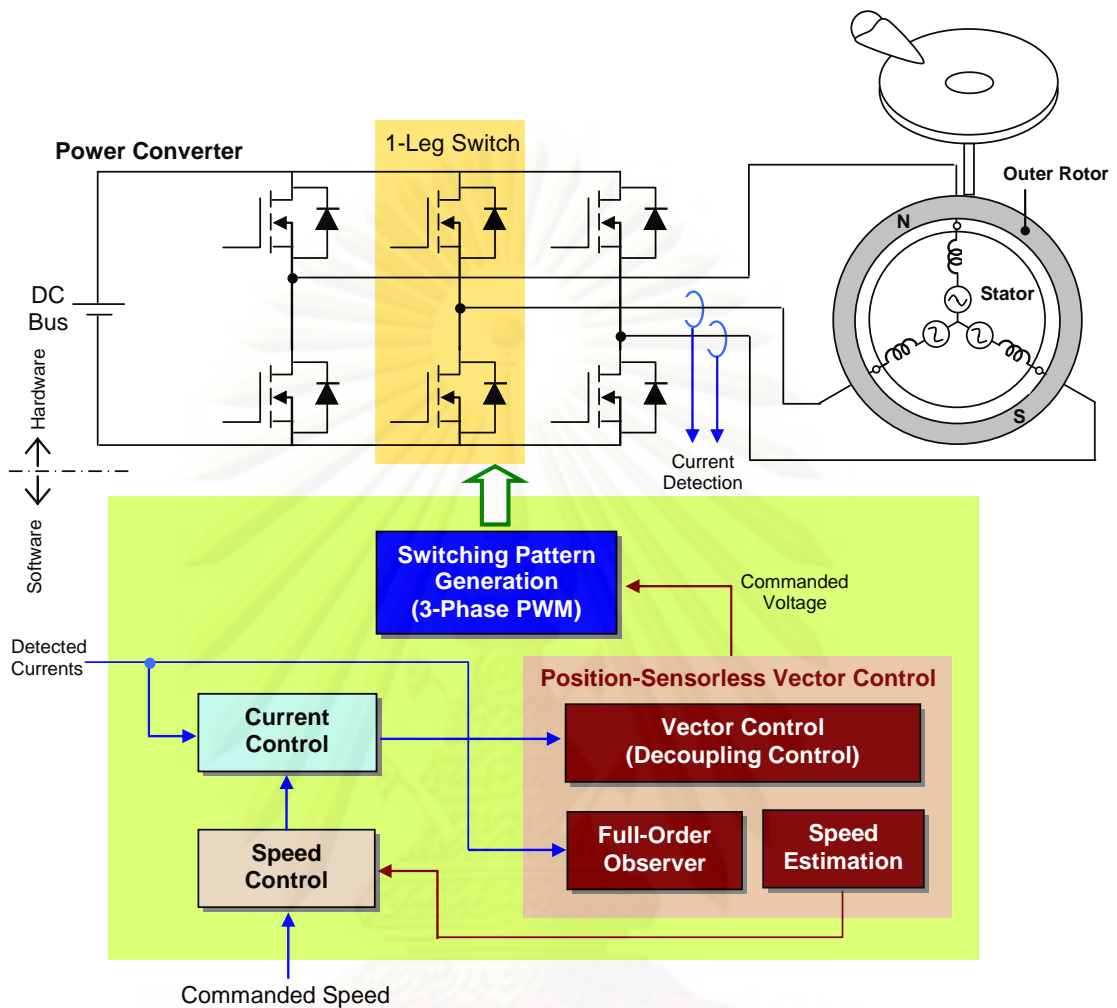
ในกรณีที่แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเป็นรูปคลื่นไซน์นั้น เพื่อหลีกเลี่ยงการกระเพื่อมของแรงบิดที่เกิดจากระลอกแรงบิดทั้ง 2 ส่วนดังกล่าวในหัวข้อที่แล้ว ตัวขับเคลื่อนจะต้องป้อนแรงดันเพื่อให้กระแสมอเตอร์เป็นรูปคลื่นไซน์ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 รูปคลื่นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำและกระแสของมอเตอร์สปีนเดิลที่ขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนแบบใหม่

ด้วยรูปคลื่นของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำและกระแสของมอเตอร์ที่เป็นรูปคลื่นไซน์ ทำให้การขับเคลื่อนปราศจากระลอกแรงบิดที่เกิดจากการกระทำระหว่างกันระหว่างองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์เชิงเวลาของแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์ และการกระจายของฟลักซ์แม่เหล็กทางด้านโรเตอร์ นอกจากนี้ด้วยวิธีการขับเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ทำให้ไม่มีช่วงการสับเปลี่ยนการนำกระแสของสวิตช์ ดังนั้นจึงไม่มีระลอกแรงบิดที่เกิดจากการสับเปลี่ยนกระแสเกิดขึ้นอีกด้วย

หลักการขับเคลื่อนดังกล่าวข้างต้นนี้สามารถทำได้โดยประยุกต์ใช้วิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์เชิงโรตารีที่ใช้กับอินเวอร์เตอร์ในอุตสาหกรรม [16] โดยอาศัยหลักการควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของตัวขับเคลื่อนแบบใหม่สำหรับฮาร์ดดิस्कไดรฟ์โดยอาศัยการควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง

รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างของตัวขับเคลื่อนแบบใหม่สำหรับฮาร์ดดิस्कไดรฟ์ โครงสร้างโดยรวมยังคงคล้ายคลึงกับตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม มีส่วนที่แตกต่างออกไปจากตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมอยู่ 2 ส่วนหลักๆ ก็คือ

1) การควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง (Position-Sensorless Vector Control) ตัวขับเคลื่อนแบบใหม่จะใช้วิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งดังรูปที่ 3.2 ทำหน้าที่ประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กทางดำนโรเตอร์และความเร็วมอเตอร์ไปพร้อมๆกัน โดยมีส่วนควบคุมแบบเวกเตอร์คำนวณแรงดันคำสั่งที่เป็นรูปคลื่นไซน์ 3 เฟสที่มีขนาดและมุมเฟสที่เหมาะสม เพื่อเป็นค่าแรงดันอ้างอิงสำหรับส่วนกำเนิดรูปแบบสัญญาณขับนำสวิทช์ที่ทำหน้าที่สร้างแรงดันให้แก่มอเตอร์สปีนเดิล

2) ส่วนกำเนิดรูปแบบสัญญาณขับนำสวิตช์กำลัง (Switching Pattern Generation) รูปแบบการสวิตช์ในส่วนนี้จะแตกต่างไปจากของตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม ในกรณีนี้สวิตช์ทั้ง 3 ขาจะทำงานไปพร้อมๆกัน สัญญาณขับนำสวิตช์ทั้ง 3 ขาจะเป็นแบบ PWM ที่ให้แรงดันระหว่างสายของทั้ง 3 เฟสมีค่าเฉลี่ยเฉพาะที่เป็นสัญญาณไซน์ที่มีมุมเฟสเหลื่อมซึ่งกันและกันอยู่ 120° และแรงดันในลักษณะดังกล่าวนี้ทำให้กระแสมอเตอร์เป็นรูปคลื่นไซน์ดังแสดงในรูปที่ 3.1 จึงสามารถลดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการกระเพื่อมของแรงบิดได้ จะเห็นได้จากโครงสร้างในรูปที่ 3.2 ว่าตัวขับเคลื่อนแบบใหม่ที่จะพัฒนาขึ้นนี้มีโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ไม่แตกต่างไปจากของตัวขับเคลื่อนเดิม ส่วนที่แตกต่างจะเป็นเพียงอัลกอริทึมที่ใช้ในส่วนซอฟต์แวร์เท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำตัวขับเคลื่อนแบบใหม่ไปประยุกต์ใช้จริงในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้

3.2 การควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง [2]

3.2.1 แบบจำลองของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

การควบคุมแบบเวกเตอร์เป็นการควบคุมแรงบิดและฟลักซ์ของมอเตอร์ในขณะหนึ่งโดยใช้แบบจำลองของมอเตอร์ จากลักษณะสมบัติของมอเตอร์สปีนเดิลในหัวข้อ 2.1 เราสามารถแสดงแบบจำลองทางพลวัตของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรได้ดังนี้

แบบจำลองของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรอ้างอิงบนแกนโรเตอร์

สมการสเตเตอร์ :

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

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

สมการโรเตอร์ :

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

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

สมการแรงบิด :

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

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

3.2.2 ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว

การควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งจะอาศัยตัวสังเกตแบบปรับตัวในการประมาณกระแสเดเตอร์ โรเตอร์ฟลักซ์ และความเร็วโรเตอร์ไปพร้อมๆกัน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (6)-(10) ดังนี้

ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับอ้างอิงบนแกนโรเตอร์

สมการสเตเตอร์ :

$$\frac{d\hat{i}_d}{dt} = \frac{1}{L} \left\{ -R\hat{i}_d + L \frac{d\hat{p}}{dt} \hat{i}_q + v_d + G_1 \cdot e_d - G_2 \cdot e_q \right\} \quad (6)$$

$$\frac{d\hat{i}_q}{dt} = \frac{1}{L} \left\{ -R\hat{i}_q - L \frac{d\hat{p}}{dt} \hat{i}_d - \hat{\omega} \hat{\lambda} + v_q + G_2 \cdot e_d + G_1 \cdot e_q \right\} \quad (7)$$

สมการโรเตอร์:

$$\frac{d\hat{p}}{dt} = \hat{\omega} + \frac{H_2 e_d - H_1 e_q}{\hat{\lambda}} \quad (8)$$

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

สมการประมาณความเร็ว :

$$\hat{\omega} = (k_p + k_i \int dt) \{ e_q \hat{\lambda} \} \quad (10)$$

โดยที่

$$e_d = \hat{i}_d - i_d \quad \text{และ} \quad e_q = \hat{i}_q - i_q \quad (11)$$

“ \wedge ” หมายถึง ค่าประมาณ, 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 $\frac{d\hat{p}}{dt}$ คือความถี่ของ ฟลักซ์ประมาณ

3.2.3 การควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม

ระบบควบคุมแบบเวกเตอร์แบบแรงดันจะอาศัยการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วมในการควบคุมกระแส โดยทำการชดเชยแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เชื่อมโยงระหว่างแกน d และ q ดังสมการที่ (11)-(12)

$$v_d = u_d - L \frac{d\hat{i}_q}{dt} \quad (11)$$

$$v_q = u_q + L \frac{d\hat{i}_d}{dt} + \hat{\omega} \hat{i} \quad (12)$$

เมื่อแทนสมการที่ (11)-(12) ลงในสมการที่ (6)-(7) จะได้

สมการสเตเตอร์ของตัวสังเกตุที่ป้อนด้วยแรงดันจากการควบคุมแยกการเชื่อมร่วมเป็น

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L} \left\{ -R\hat{i}_d + u_d + G_1 \cdot e_d - G_2 \cdot e_q \right\} \quad (13)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L} \left\{ -R\hat{i}_q + u_q + G_2 \cdot e_d + G_1 \cdot e_q \right\} \quad (14)$$

สมการข้างต้นแสดงถึงลักษณะทางพลวัตของกระแสสเตเตอร์ที่มีการควบคุมได้อย่างอิสระในแต่ละแกนโดยผ่านแรงดัน u_d และ u_q โดยเราเรียกวิธีการควบคุมแรงดัน v_d และ v_q ตามสมการที่ (11)-(12) ว่าเป็นการควบคุมแบบแยกเชื่อมร่วม (Decoupling control) ถ้าเรากำหนดให้

$$u_d = i_d^* R \quad (15)$$

$$u_q = i_q^* R \quad (16)$$

“ * ” หมายถึง ค่าคำสั่ง
จะได้

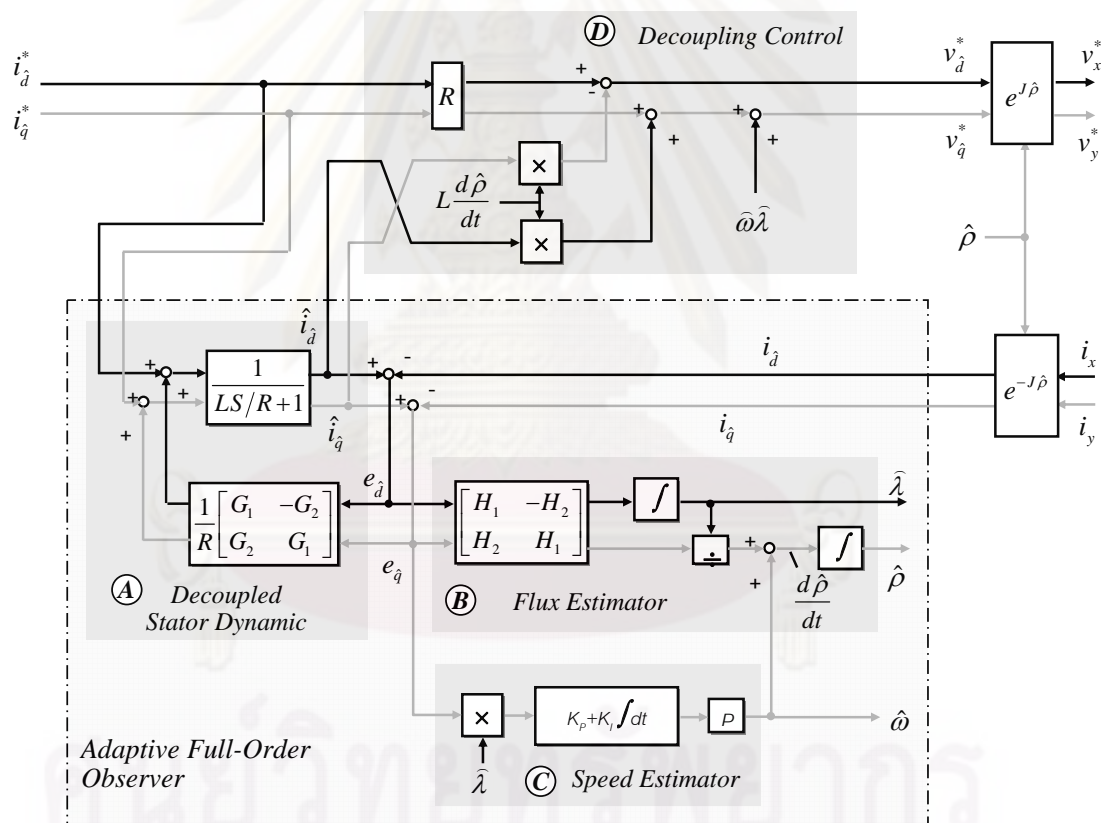
$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L} \left\{ R(i_d^* - \hat{i}_d) + G_1 \cdot e_d - G_2 \cdot e_q \right\} \quad (17)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L} \left\{ R(i_q^* - \hat{i}_q) + G_2 \cdot e_d + G_1 \cdot e_q \right\} \quad (18)$$

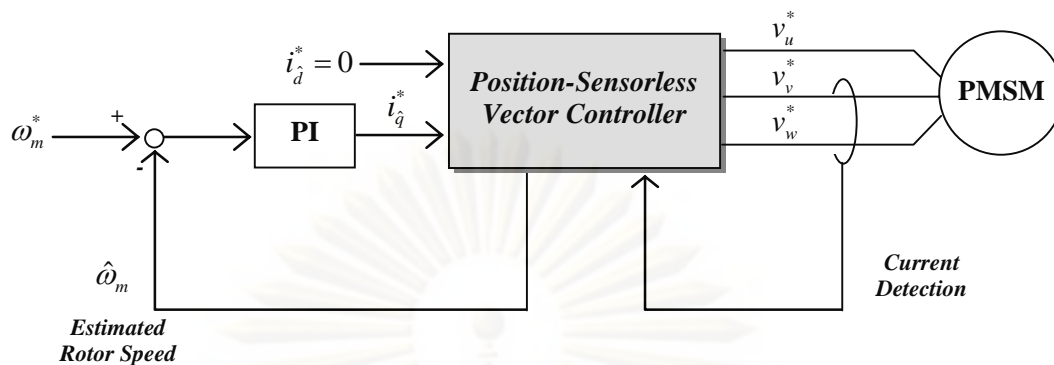
จะเห็นได้จากสมการที่ (17)-(18) ว่าในกรณีที่ $e_d = e_q = 0$ ผลตอบสนองของกระแสสเตเตอร์ (i_d, i_q) ต่อกระแสคำสั่งในแต่ละแกน (i_d^*, i_q^*) เป็นการหน่วงแบบอันดับหนึ่งด้วยค่าคงตัวเวลาเท่ากับ L/R

3.2.4 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งโดยอาศัยการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม

จากตัวสังเกตแบบปรับตัวในสมการที่ (8)-(10) และแนวคิดของการควบคุมแยกการเชื่อมร่วมข้างต้น(สมการที่ (11)-(18)) เราสามารถแสดงโครงสร้างของตัวควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งดังรูปที่ 9 โดยตัวควบคุมจะประกอบด้วย 4 ส่วนคือ บริเวณ A คือ ลักษณะทางพลวัตทางด้านสเตเตอร์(สมการที่ (17)-(18)) บริเวณ B คือลักษณะทางพลวัตของโรเตอร์ฟลักซ์ (สมการที่ (8)-(9)) บริเวณ C คือส่วนประมาณค่าความเร็ว (สมการที่ (10)) และบริเวณ D คือการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม (สมการที่ (11)-(12)) รูปที่ 3.4 แสดงถึงระบบควบคุมความเร็วที่ใช้ตัวควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของตัวควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งโดยอาศัยการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม



รูปที่ 3.4 ระบบควบคุมความเร็วด้วยตัวควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

เพื่อให้ระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งทำงานโดยมีเสถียรภาพจะเลือกอัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกตตามที่มีการนำเสนอไว้ใน [16] ดังนี้

- อัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกต

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= -x + \frac{R}{L}, \\ G_2 &= -y - \omega, \\ H_1 &= -LG_1 + R, \\ H_2 &= -LG_2 - k_2\omega, \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

โดยมีเงื่อนไขคือ

$$\left. \begin{aligned} x &= \alpha \left| \frac{d\hat{p}}{dt} \right|, \quad y = -\frac{d\hat{p}}{dt} \\ k_2 &= \beta L \left| \frac{d\hat{p}}{dt} \right|^2 / \|J\omega\|^2 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

$$\text{และกำหนดให้ } \beta = \gamma / (1 - \gamma) + \gamma(1 - \gamma)\alpha^2 \quad (21)$$

- อัตราขยายปรับตัวของระบบประมาณความเร็ว $k_p = 50,000$, $k_i = 6,400,000$
- อัตราขยายของระบบควบคุมความเร็ว $k_p = 0.032$, $k_i = 0.32$

3.3 การจำลองการทำงานของตัวขับเคลื่อนที่ใช้ตัวควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

รูปที่ 3.5-3.7 แสดงถึงการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ของตัวขับเคลื่อนแบบใหม่สำหรับมอเตอร์สปีนเดิลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร โดยใช้พารามิเตอร์ของมอเตอร์ในภาคผนวก ก

3.3.1 ผลการจำลองการทำงานในช่วงการเริ่มต้นออกตัวและการเร่ง-ลดความเร็ว

จากรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าระบบสามารถเริ่มต้นออกตัวจากหยุดนิ่งและเร่งความเร็วพร้อมๆกันกับขับเคลื่อนโหลดขนาด 2 mNm ไปสู่ค่าความเร็ว $\omega_m^* = 7200$ rpm ได้อย่างถูกต้อง โดยระบบสามารถควบคุมฟลักซ์ กระแสและความเร็ว รวมถึงประมาณค่าความเร็วโรเตอร์ได้เป็นอย่างดีแม้ในทั้งในช่วงผลตอบสถานะชั่วคราวแบบแรมป์และผลตอบสนองที่สถานะอยู่ตัวที่ 7200 rpm

3.3.2 ผลการจำลองการทำงานที่สถานะอยู่ตัว

รูปที่ 3.6 แสดงถึงผลตอบสนองของกระแสมอเตอร์ที่สถานะอยู่ตัวที่ความเร็ว 7200 rpm โดยกระแสของมอเตอร์จะมีรูปคลื่นไซน์สอดคล้องกับแบบจำลองของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร อีกทั้งสามารถควบคุมฟลักซ์และควบคุมกระแสในแต่ละแกนได้โดยพิจารณาจากความผิดพลาดของกระแสที่มีค่าเท่ากับศูนย์

3.4 ผลการทดลองของตัวขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

การทดสอบตัวขับเคลื่อนจะพิจารณาจากลักษณะการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งแยกเป็นประเด็นสำหรับการทดสอบดังนี้คือ

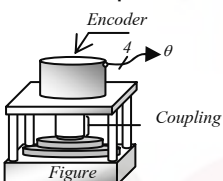
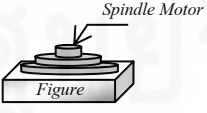
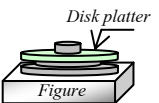
- 1) ความถูกต้องในการประมาณค่าความเร็วโรเตอร์ทั้งต่อผลตอบสนองสถานะอยู่ตัว (7200 rpm) และผลตอบสนองชั่วคราวของการเริ่มต้นออกตัว
- 2) สมรรถนะการขับเคลื่อนเมื่อมีแผ่นดิสก์ข้อมูล (โหลด)
- 3) การสั่นสะเทือนทางกลที่เกิดจากตัวขับเคลื่อนและมอเตอร์ โดยพิจารณาจากกระแสมอเตอร์ที่สถานะอยู่ตัว (7200 rpm)

เพื่อให้เราสามารถทดสอบสมรรถนะในประเด็นต่างๆข้างต้นได้ครบถ้วน การทดลองทางปฏิบัติจึงแยกเงื่อนไขการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 1 การพิจารณาความถูกต้องในการประมาณความเร็วโรเตอร์จำเป็นต้องติดตั้งตัวเข้ารหัสที่เพลลาของมอเตอร์ และเนื่องจากโครงสร้างทางกายภาพของมอเตอร์สปีนเดิลที่มีปลายเพลลาเพียงด้านเดียว (Single-end shaft) จึงต้องดำเนินการทดลองแยกกันระหว่างการทดสอบความถูกต้องในการประมาณค่าความเร็วโร

เตอร์และการทดสอบสมรรถนะการขับเคลื่อนเมื่อมีแผ่นดิสก์ข้อมูล สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนทางกล จะพิจารณาการสั่นสะเทือนที่เกิดจากตัวขับเคลื่อนและมอเตอร์เป็นหลัก จึงไม่มีการเชื่อมต่อส่วนทางกลใดๆซึ่งจะส่งผลต่อการสั่นสะเทือนทางกล (ดูบทที่ 4) อาทิเช่น แผ่นดิสก์ข้อมูล หรือการเชื่อมต่อตัวเข้ารหัสเข้าที่เพลลาของมอเตอร์ ดังนั้นจึงเพิ่มการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ตัวเปล่าเพื่อให้ได้เงื่อนไขการทดลองที่สอดคล้องกันระหว่างการทดสอบสมรรถนะของตัวขับเคลื่อนและการทดสอบการสั่นสะเทือนทางกลในบทที่ 4

นอกจากนี้เพื่อตรวจสอบว่าผลกระทบจากองค์ประกอบความถี่สูงของการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์แบบพีดับบีวเอ็ม (PWM inverter) ว่ามีนัยสำคัญเพียงใด จึงได้ใช้ผลการทดสอบจากวงจรขยายเชิงเส้น (Linear amplifier) ที่ให้กระแสมอเตอร์เป็นรูปคลื่นไซน์ที่ไม่มีระลอกของการสวิตช์เป็นตัวอ้างอิง

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

	Mechanical Coupling	Electrical Actuator	Testing Conditions	Experimental Results
1)	With encoder & no disk platter 	Linear amplifier	- Start up	รูปที่ 3.8
			- Steady state at 7200 rpm	รูปที่ 3.9
			- Acceleration / deceleration	รูปที่ 3.10
		PWM inverter	- Start up	รูปที่ 3.11
			- Steady state at 7200 rpm	รูปที่ 3.12
			- Acceleration / deceleration	รูปที่ 3.13
2)	No encoder & no disk platter 	Linear amplifier	- Start up	รูปที่ 3.14
			- Steady state at 7200 rpm	รูปที่ 3.15
			- Acceleration / deceleration	รูปที่ 3.16
		PWM inverter	- Start up	รูปที่ 3.17
			- Steady state at 7200 rpm	รูปที่ 3.18 รูปที่ 3.26-3.35
			- Acceleration / deceleration	รูปที่ 3.19
3)	No encoder & with disk platter 	Linear amplifier	- Start up	รูปที่ 3.20
			- Steady state at 7200 rpm	รูปที่ 3.21
			- Acceleration / deceleration	รูปที่ 3.22
		PWM inverter	- Start up	รูปที่ 3.23
			- Steady state at 7200 rpm	รูปที่ 3.24
			- Acceleration / deceleration	รูปที่ 3.25

3.4.1 ผลการทดลองการเริ่มต้นออกตัว

เงื่อนไขการทดสอบ: 1) เชื่อมต่อกับตัวเข้ารหัส (With encoder) และไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล (No disk platter) (รูปที่ 3.8 และ 3.11)

ผลการทดลองในรูปที่ 3.8 เป็นกรณีที่ใช้วงจรขยายเชิงเส้น จะเห็นว่าระบบสามารถเริ่มต้นออกตัวจากหยุดนิ่งได้ดี รวมทั้งประมาณค่าความเร็วโรเตอร์และติดตามความเร็วจริงของโรเตอร์ได้อย่างแม่นยำ เวลาที่ใช้ในการเริ่มต้นออกตัวจนกระทั่งเข้าสู่ความเร็วตั้งค่าที่ 7200 rpm มีค่าประมาณ 550 ms โดยตัวสังเกตสามารถประมาณค่าฟลักซ์และกระแสมอเตอร์ได้อย่างถูกต้อง แม้ว่าจะมีค่าผิดพลาดและการแกว่งของกระแสทั้งแกน (d, q) อยู่บ้างในจังหวะออกตัว แต่ค่าผิดพลาดของกระแสก็สามารถเข้าสู่ใกล้ศูนย์ด้วยเวลาประมาณ 100 ms สำหรับในกรณีที่ใช้อินเวอร์เตอร์ PWM ก็ให้ผลตอบสนองที่สอดคล้องกันดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยใช้เวลาประมาณ 600 ms ในการออกตัวและเร่งความเร็วเข้าสู่ค่าคำสั่งที่ 7200 rpm ผลตอบสนองที่ช้าลงเล็กน้อยนี้สามารถพิจารณาได้จากจังหวะการออกตัวจะใช้เวลามากกว่าในกรณีของวงจรขยายเชิงเส้นในรูปที่ 3.8 ทั้งนี้อาจจะมีสาเหตุมาจากผลของแรงดันที่ผิดเพี้ยนของอินเวอร์เตอร์ PWM (จากการประวิงเวลา, Dead time) ในช่วงความเร็วต่ำซึ่งขนาดแรงดันมีค่าน้อย

เงื่อนไขการทดสอบ: 2) ไม่มีตัวเข้ารหัส (Without encoder) และไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล (No disk platter) (รูปที่ 3.14 และ 3.17)

รูปที่ 3.14 และ 3.17 แสดงการทดสอบระบบที่โดยภาพรวมมีผลตอบสนองคล้ายคลึงกับรูปที่ 3.8 และ 3.11 ในกรณีนี้ใช้เวลา 450 ms สำหรับการเริ่มต้นออกตัว เนื่องจากไม่มีผลจากความเฉื่อยทางกลของตัวเข้ารหัส ทำให้โมเมนต์ความเฉื่อยรวมของระบบลดลงและมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้นจากเดิมประมาณ 100 ms

เงื่อนไขการทดสอบ: 3) ไม่มีตัวเข้ารหัส (Without encoder) และมีแผ่นดิสก์ข้อมูล (With disk platter) (รูปที่ 3.20 และ 3.23)

วัตถุประสงค์ในการทดสอบคือสมรรถนะในการควบคุมแรงบิดของตัวขับเคลื่อน จากผลการทดลองในรูปที่ 3.20 จะเห็นว่าระบบสามารถเริ่มต้นออกตัวพร้อมกับขับเคลื่อนแผ่นดิสก์ข้อมูลได้เป็นอย่างดี โดยสมรรถนะในการควบคุมแรงบิดสะท้อนมาที่การประมาณฟลักซ์ได้อย่างถูกต้องและสามารถควบคุมกระแสทั้งสองแกนโดยค่าผิดพลาดของกระแสน้อยมาก เมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแสเฟส u , i_{su} จะพบว่าตลอดช่วงเร่งความเร็วขนาดค่ายอดของกระแสคงที่เท่ากับ 800 mA (สอดคล้องกับค่าที่จำกัดไว้ภายในตัวควบคุม) ซึ่งสะท้อนถึงสมรรถนะในการควบคุมแรงบิดที่ดี ระบบใช้เวลาประมาณ 3.5 s สำหรับผลตอบสนองการเริ่มต้นออกตัวและเร่งความเร็วจนถึงค่าคำสั่งที่ 7200 rpm สำหรับในกรณีที่ใช้อินเวอร์เตอร์ PWM เป็นตัวขับในรูปที่ 3.23 การผิดเพี้ยนของแรงดันส่งผลกระทบบในระดับที่ทำให้จังหวะการออกตัวพร้อมขับเคลื่อนแผ่นดิสก์

ข้อมูลมีสมรรถนะที่ด้อยลงเล็กน้อย แต่การทำงานโดยรวมของระบบยังคงมีสมรรถนะที่ดีพอใช้ ระบบสามารถควบคุมแรงบิดให้สามารถออกตัวและเร่งความเร็วเข้าสู่ค่าความเร็ว $\omega_m^* = 7200$ rpm ได้

3.4.2 ผลการทดลองการเร่ง-ลดความเร็ว (3600 \leftrightarrow 7200 rpm)

เงื่อนไขการทดสอบ: 1) เชื่อมต่อกับตัวเข้ารหัส (With encoder) และไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล (No disk platter) (รูปที่ 3.10 และ 3.13)

รูปที่ 3.10 แสดงถึงสมรรถนะในการเร่ง-ลดความเร็วที่ดีของการควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง ตัวสังเกตแบบปรับตัวสามารถประมาณฟลักซ์ กระแสและความเร็วโรเตอร์ได้อย่างถูกต้องตลอดช่วงการทำงานทั้งหมด ระบบสามารถขับเคลื่อนและติดตามความเร็วจริงของมอเตอร์ได้อย่างแม่นยำ ในช่วงการเร่ง-ลดความเร็วกระแสเฟส u , i_{su} มีค่ายอดคงที่เท่ากับ 800 mA สอดคล้องกับค่าที่จำกัดไว้ภายในตัวควบคุม เป็นการยืนยันถึงสมรรถนะที่ดีในการควบคุมแรงบิด ผลตอบสนองในช่วงเร่งและลดความเร็วเท่ากับ 300 ms และ 200 ms ตามลำดับ ในช่วงเร่งและลดความเร็วจะสังเกตค่าผิดพลาดของกระแสอยู่บ้างโดยเฉพาะค่าผิดพลาดของกระแสในแกน q (มีค่าประมาณ 100 mA) ซึ่งเป็นผลของค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวของผลตอบสนองแบบแรมป์ เราสามารถลดค่าผิดพลาดนี้ได้โดยเพิ่มอัตราขยายปรับตัวของการประมาณค่าความเร็ว แต่ก็ต้องประนีประนอมกับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนเมื่อใช้อัตราขยายที่มากขึ้นนี้ รูปที่ 3.13 เป็นผลการทดลองสำหรับกรณีที่ใช้อินเวอร์เตอร์ PWM โดยรวมแล้วระบบยังคงมีผลตอบสนองที่ดีเช่นเดียวกับผลของการใช้วงจรขยายเชิงเส้นในรูปที่ 3.10

หมายเหตุ แม้ว่าการทำงานของฮาร์ดดิस्कที่ไดรฟ์จะไม่มีแรงและลดความเร็วเหมือนกับระบบขับเคลื่อนโดยทั่วไปในอุตสาหกรรม การทดสอบดังกล่าวเพียงแต่จะแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะที่สูงของตัวขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ได้พัฒนาขึ้น

เงื่อนไขการทดสอบ: 2) ไม่มีตัวเข้ารหัส (Without encoder) และไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล (No disk platter) (รูปที่ 3.16 และ 3.19)

รูปที่ 3.16 และ 3.19 ให้ผลตอบสนองที่ใกล้เคียงกับรูปที่ 3.10 และ 3.13 ผลตอบสนองในช่วงเร่งและลดความเร็วเท่ากับ 200 ms และ 120 ms ตามลำดับ ผลตอบสนองแบบแรมป์ที่เร็วขึ้นในช่วงเร่งและลดความเร็วเนื่องจากไม่มีการเชื่อมต่อกับตัวเข้ารหัส ทำให้โมเมนต์ความเฉื่อยโดยรวมของระบบลดลง ซึ่งที่สังเกตเห็นได้ค่อนข้างชัดเจนคือค่าผิดพลาดของกระแสที่สถานะอยู่ตัวของผลตอบสนองแบบแรมป์มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากค่าผิดพลาดของความเร็ว

ประมาณจะแปรผันตรงต่อผลตอบสนองแบบแรมป์ของความเร็วโรเตอร์และสะท้อนมาที่ค่าผิดพลาดของกระแสดังกล่าว [2]

เงื่อนไขการทดสอบ: 3) ไม่มีตัวเข้ารหัส (Without encoder) และมีแผ่นดิสก์ข้อมูล (With disk platter) (รูปที่ 3.22 และ 3.25)

การเร่ง-ลดความเร็วพร้อม ๆ กับขับเคลื่อนแผ่นดิสก์ข้อมูลในรูปที่ 3.22 และ 3.25 ทำให้เวลาในการเร่งและลดความเร็วยาวนานขึ้นเป็น 2 s และ 1.5 s ตามลำดับ ในกรณีของวงจรรขยายเชิงเส้นในรูปที่ 3.22 จะเห็นว่าระบบมีสมรรถนะในการขับเคลื่อนที่ดีมากคือสามารถประมาณฟลักซ์ กระแส และความเร็วถูกต้อง และสามารถควบคุมแรงบิดได้ ซึ่งยืนยันถึงความถูกต้องทางทฤษฎีของตัวขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง สำหรับในกรณีของอินเวอร์เตอร์ PWM ในรูปที่ 3.25 สมรรถนะของระบบโดยรวมอยู่ในเกณฑ์ดี โดยสามารถสังเกตเห็นค่าผิดพลาดของกระแสในแกน d ที่มากขึ้น (ประมาณ 100 mA) ซึ่งมีสาเหตุเนื่องจากแรงดันบัสไฟตรงมีค่าสูงขึ้นประมาณ 2 V ในช่วงลดความเร็ว (แรงดันบัสไฟตรงค่าปกติเท่ากับ 12 V) ประกอบกับไม่ได้มีการชดเชยแรงดันบัสไฟตรง จึงทำให้แรงดันเฉลี่ยจากอินเวอร์เตอร์ PWM มีขนาดผิดพลาดไปและส่งผลกระทบต่อสมรรถนะในช่วงลดความเร็วได้

3.4.3 ผลการทดลองการทำงานที่สถานะอยู่ตัว

เงื่อนไขการทดสอบ: 1) เชื่อมต่อกับตัวเข้ารหัส (With encoder) และไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล (No disk platter) (รูปที่ 3.9 และ 3.12)

ในกรณีที่ใช้งานวงจรรขยายเชิงเส้นจ่ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ดังในรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่ากระแสของมอเตอร์เป็นรูปคลื่นไซน์เช่นกัน โดยการควบคุมเวกเตอร์สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้ถูกต้อง ในขณะที่ตัวสังเกตแบบปรับตัวสามารถประมาณค่าความเร็วโรเตอร์ กระแส มอเตอร์และฟลักซ์ได้อย่างแม่นยำ และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวขับเคลื่อนที่ใช้อินเวอร์เตอร์ PWM เป็นตัวขับเร้าดังในรูปที่ 3.12 ผลการทดลองที่ได้คล้ายคลึงกันกับรูปที่ 3.9 โดยภาพรวมกระแสค่อนข้างเป็นรูปคลื่นไซน์สมบูรณ์

เงื่อนไขการทดสอบ: 2) ไม่มีตัวเข้ารหัส (Without encoder) และไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล (No disk platter) (รูปที่ 3.15 และ 3.18)

เมื่อปลดตัวเข้ารหัสออกโดยขับเคลื่อนให้มอเตอร์หมุนด้วยเพลลาเปล่าๆ ผลการทดลองที่ได้ในรูปที่ 3.15 และ 3.18 ยังคงมีผลตอบสนองสถานะอยู่ตัวที่ดีเหมือนเช่นในรูปที่ 3.9 และ 3.12 โดยกระแสมอเตอร์มีขนาดลดลงเล็กน้อยเนื่องจากไม่มีแรงเสียดทานทางกลจากการเชื่อมต่อตัวเข้ารหัส เงื่อนไขการทดสอบนี้จะเป็นเงื่อนไขเดียวกับการทดสอบการสั้นสะเทือนทางกลซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 4

เงื่อนไขการทดสอบ: 3) ไม่มีตัวเข้ารหัส (Without encoder) และมีแผ่นดิสก์ข้อมูล (With disk platter) (รูปที่ 3.21 และ 3.24)

เงื่อนไขการทดสอบนี้เพื่อแสดงถึงการนำตัวขับเคลื่อนที่พัฒนาขึ้นไปใช้งานในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ผลการทดลองที่ 3.21 และ 3.24 แสดงถึงสมรรถนะของตัวขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไรเซนเซอร์วัดตำแหน่ง โดยกระแสมอเตอร์เป็นรูปคลื่นไซน์และระบบสามารถควบคุมความเร็วได้ และประมาณตัวแปรสถานะต่างๆ ได้อย่างถูกต้อง ทั้งกระแสมอเตอร์ (ค่าผิดพลาดของกระแสทั้งสองแกนอยู่รอบค่าศูนย์) โรเตอร์ฟลักซ์ และความเร็วโรเตอร์

3.4.4 ผลการทดลองที่สถานะอยู่ตัว 7200 rpm เมื่อมีการแปรค่าความถี่การสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ PWM

ในการใช้อินเวอร์เตอร์ PWM กับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อให้กระแสมอเตอร์มีรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์สมบูรณ์ มีสิ่งที่ต้องพิจารณาคือ

- 1) ค่าคงตัวเวลาทางไฟฟ้าของมอเตอร์ (L/R) เนื่องจากค่าคงตัวเวลาทางไฟฟ้าของมอเตอร์มีค่าต่ำมาก (0.244 ms ; $L = 0.425 \text{ mH}$, $R = 1.743 \Omega$) เพื่อให้กระแสเป็นรูปคลื่นไซน์จึงต้องใช้ความถี่การสวิตซ์ที่สูง ($> 10 \text{ kHz}$)
- 2) ผลกระทบจากการประวิงเวลา (Dead-time effect) การใช้ความถี่การสวิตซ์ค่าสูงจะทำให้ได้รับผลกระทบจากการประวิงเวลาของอินเวอร์เตอร์ PWM ทำให้ตัวขับเคลื่อนไม่สามารถจ่ายแรงดันได้แม่นยำและถูกต้อง ส่งผลทำให้กระแสมอเตอร์มีรูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ได้ ซึ่งผลกระทบจากการประวิงเวลาทำให้เป็นข้อจำกัดในการเพิ่มความถี่การสวิตซ์

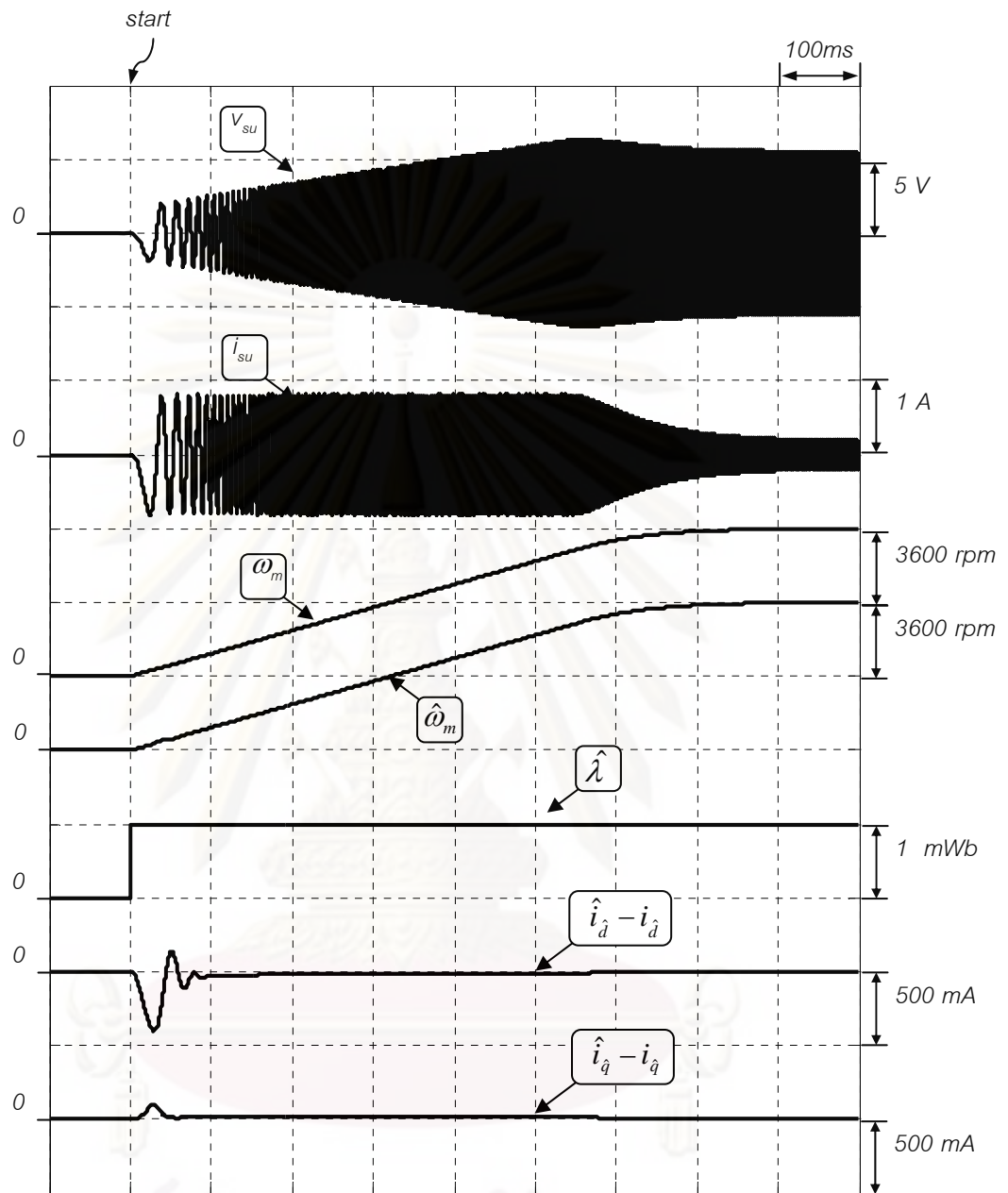
เงื่อนไขการทดสอบ: ใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM ที่ไม่มีตัวเข้ารหัส (Without encoder) และไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล (No disk platter) (รูปที่ 3.26-3.35)

การทดสอบการทำงานของระบบจะแปรค่าความถี่การสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ PWM และพิจารณารูปคลื่นกระแสในโดเมนเวลาและสเปกตรัมของกระแสในเชิงความถี่ประกอบกัน เพื่อหาค่าความถี่การสวิตซ์ที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนทางกลต่อไป รูปที่ 3.26 และ 3.27 เป็นการทำงานที่ความถี่สวิตซ์เท่ากับ 20 kHz กระแสจะมีกระแสเพื่่อมสูงและเมื่อเพิ่มความถี่การสวิตซ์ให้สูงขึ้นเป็น 30 kHz , 40 kHz , 60 kHz และ 80 kHz การกระแสเพื่่อมของกระแสจะลดลงดังแสดงในรูปที่ 3.28-3.35 โดยที่ความถี่สวิตซ์ 80 kHz การกระแสเพื่่อมของกระแสจะน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามรูปคลื่นกระแสในรูป 3.34 จะผิดเพี้ยนจากไซน์ค่อนข้างมาก ซึ่งสะท้อนไปที่สเปกตรัมของกระแสในรูปที่ 3.35 จะมีองค์ประกอบความถี่ 3.6 kHz ซึ่งเป็นฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 5 ของความถี่ 720 Hz ที่อินเวอร์เตอร์สร้างขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของกระแสที่ความถี่สวิตซ์ 30 kHz , 40 kHz และ 60 kHz ในรูปที่ 3.29, 3.31 และ

3.33 จะเห็นว่าแม้ว่าจะได้พยายามชดเชยผลของการประวิงเวลาแล้ว แต่การชดเชยไม่สามารถทำได้อย่างสมบูรณ์โดยเฉพาะเมื่อความถี่การสวิตช์มีค่าสูงมากอย่างเช่นที่ 80 kHz เป็นต้น ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการควบคุมโดยรวมของตัวขับเคลื่อนได้

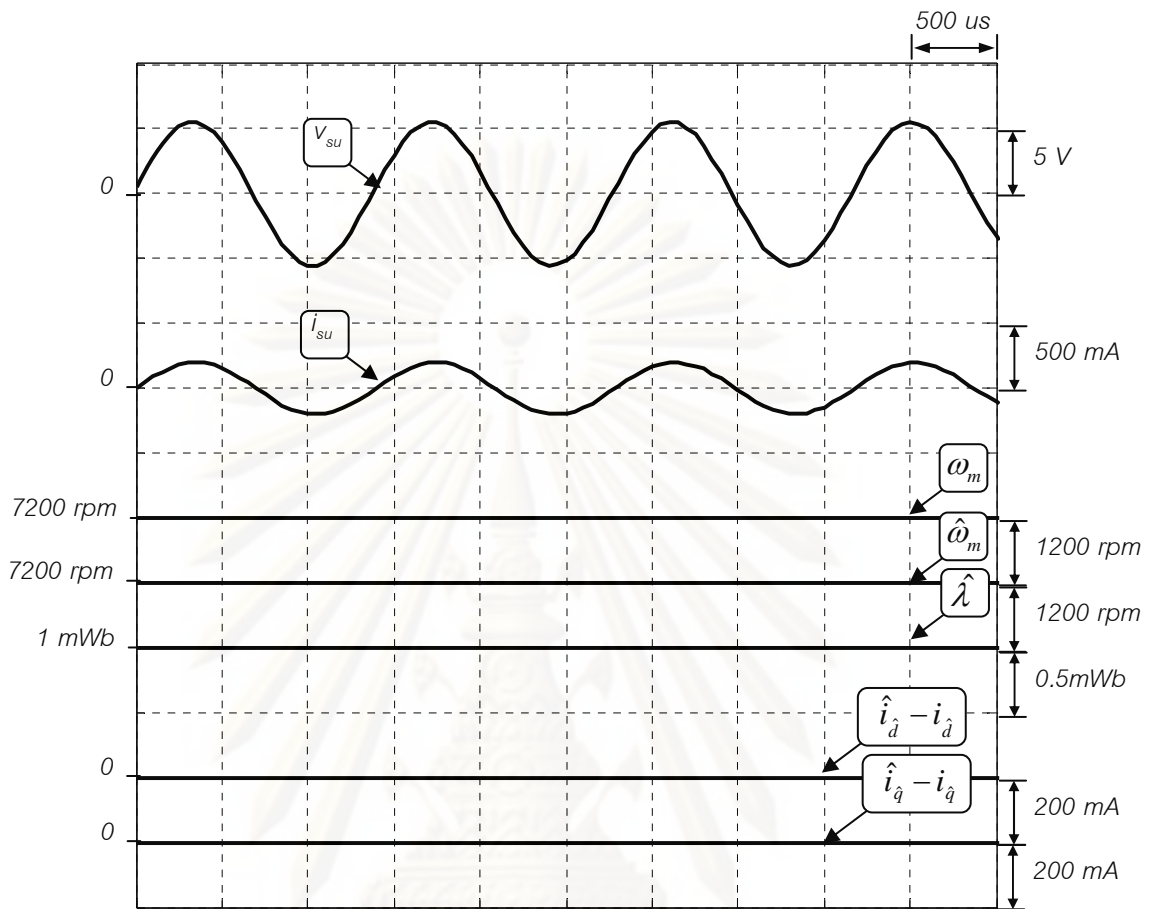


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

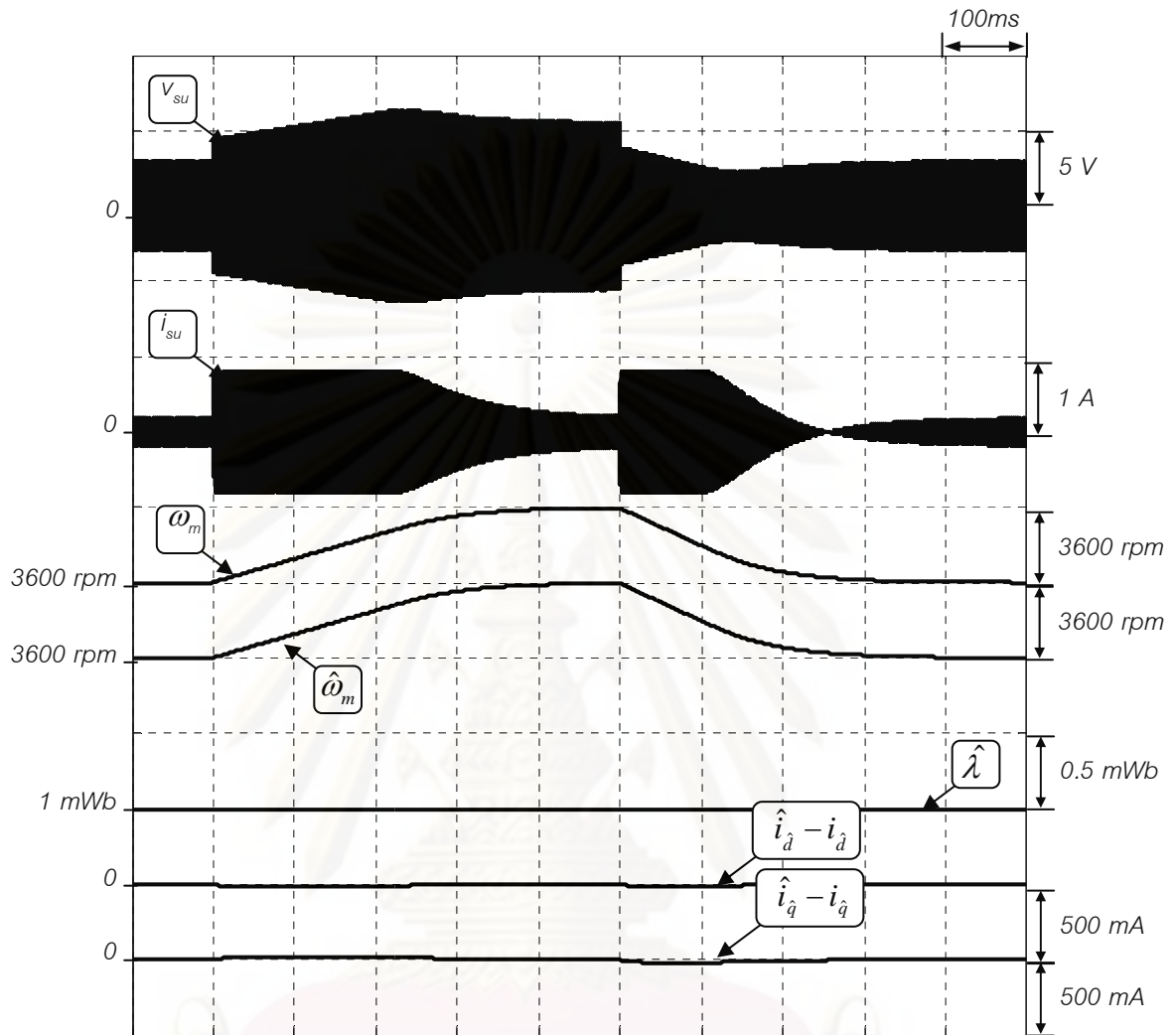


รูปที่ 3.5 ผลจำลองการทำงานขณะเริ่มเดินมอเตอร์ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์
วัดตำแหน่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

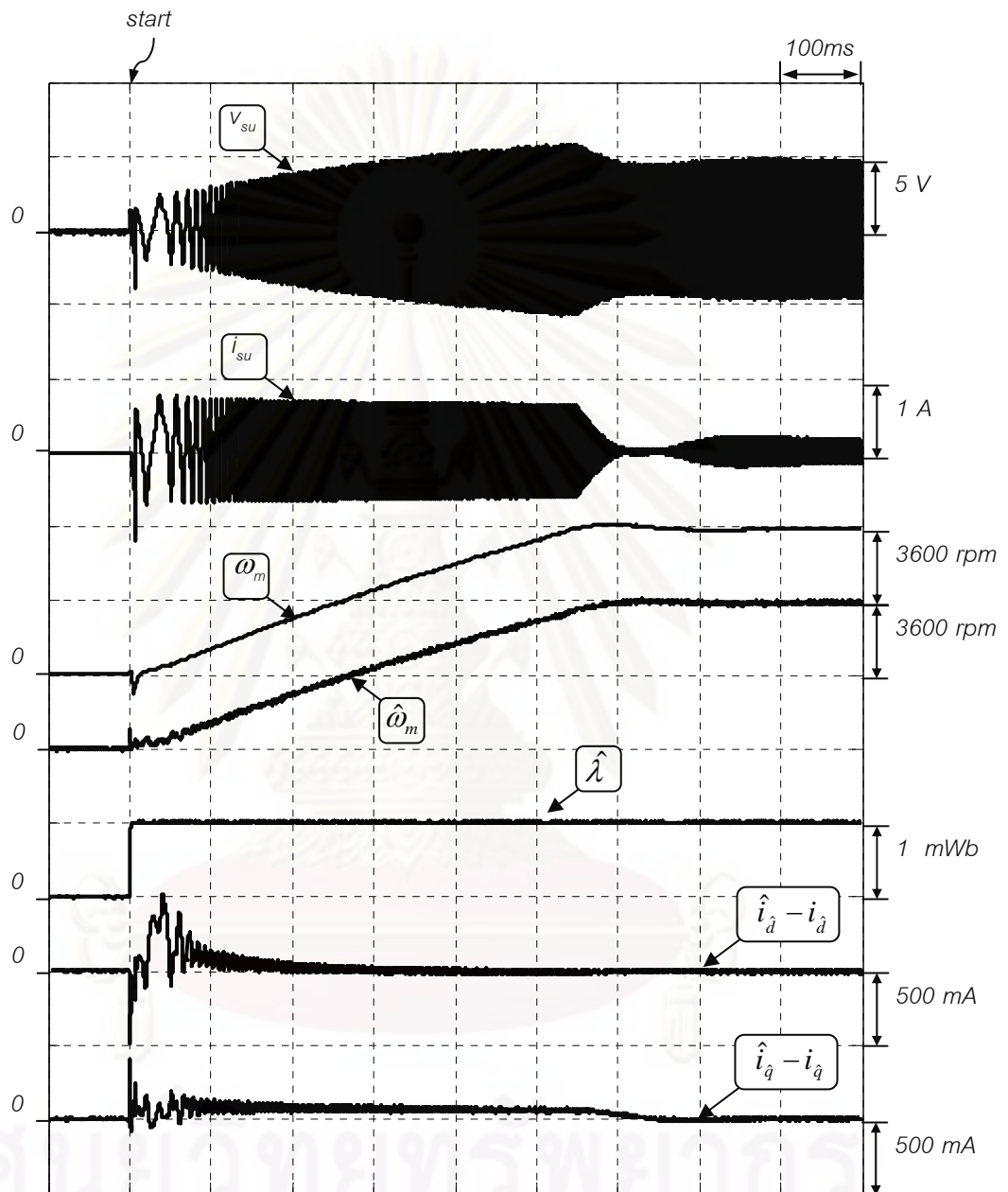


รูปที่ 3.6 ผลจำลองการของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm

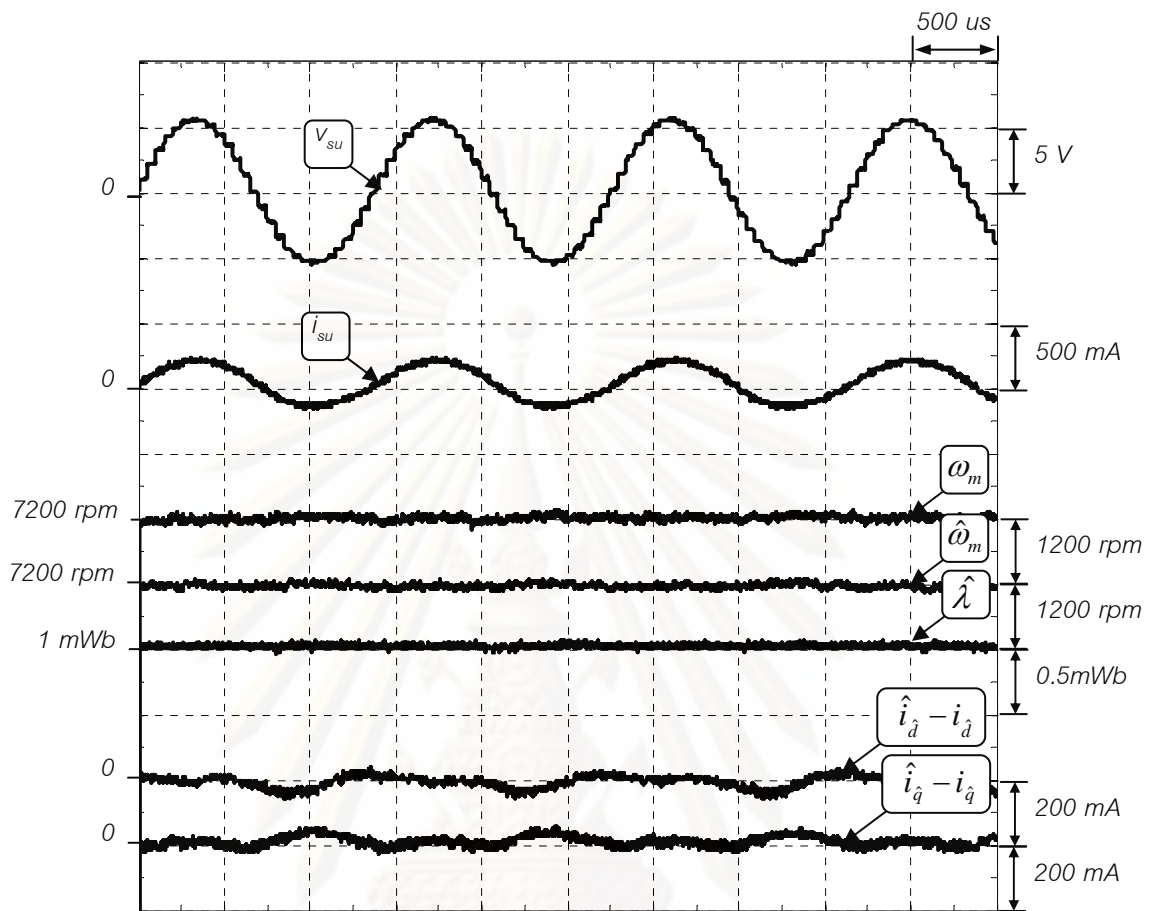


รูปที่ 3.7 ผลจำลองการเร่งลดความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

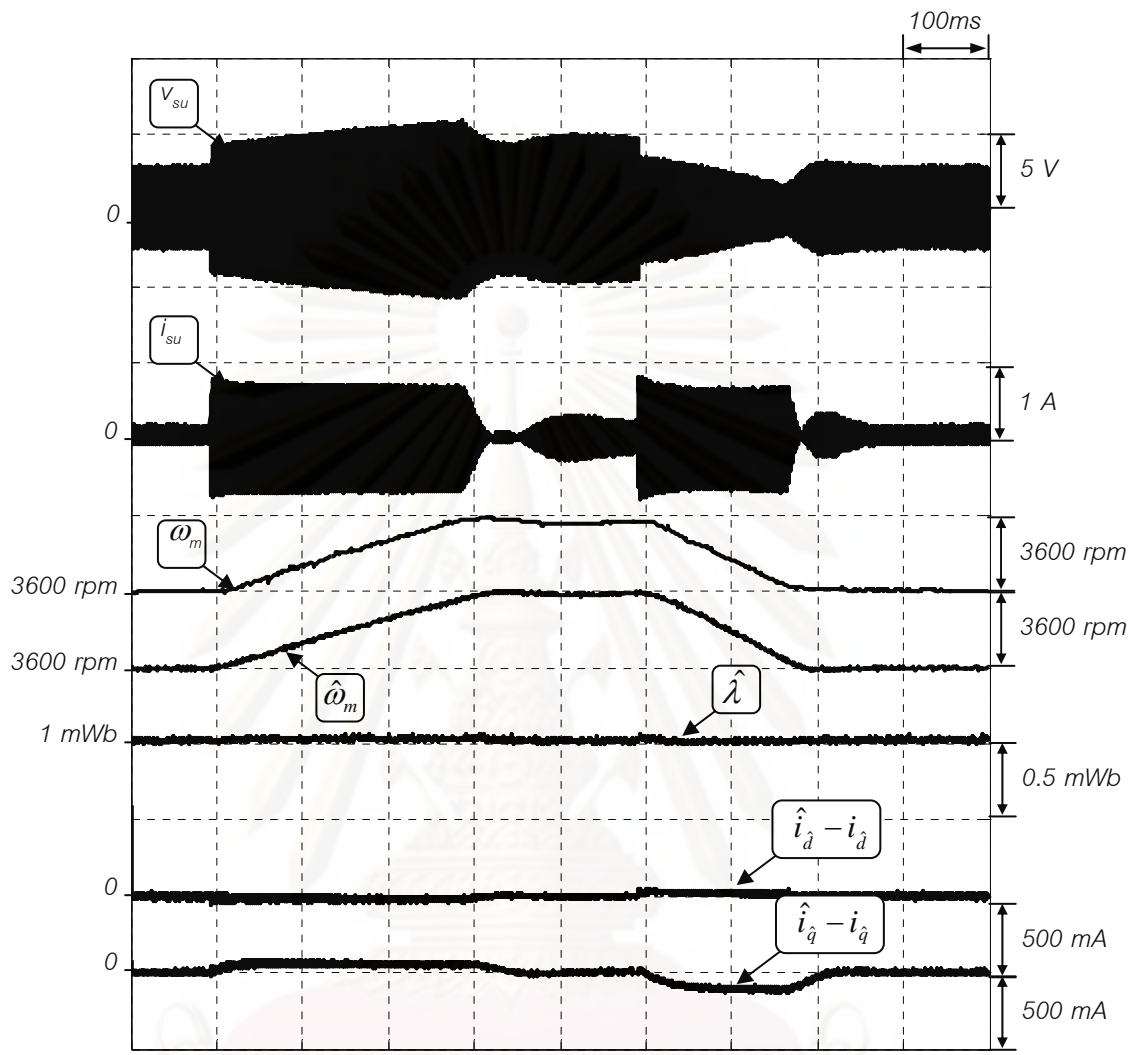
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



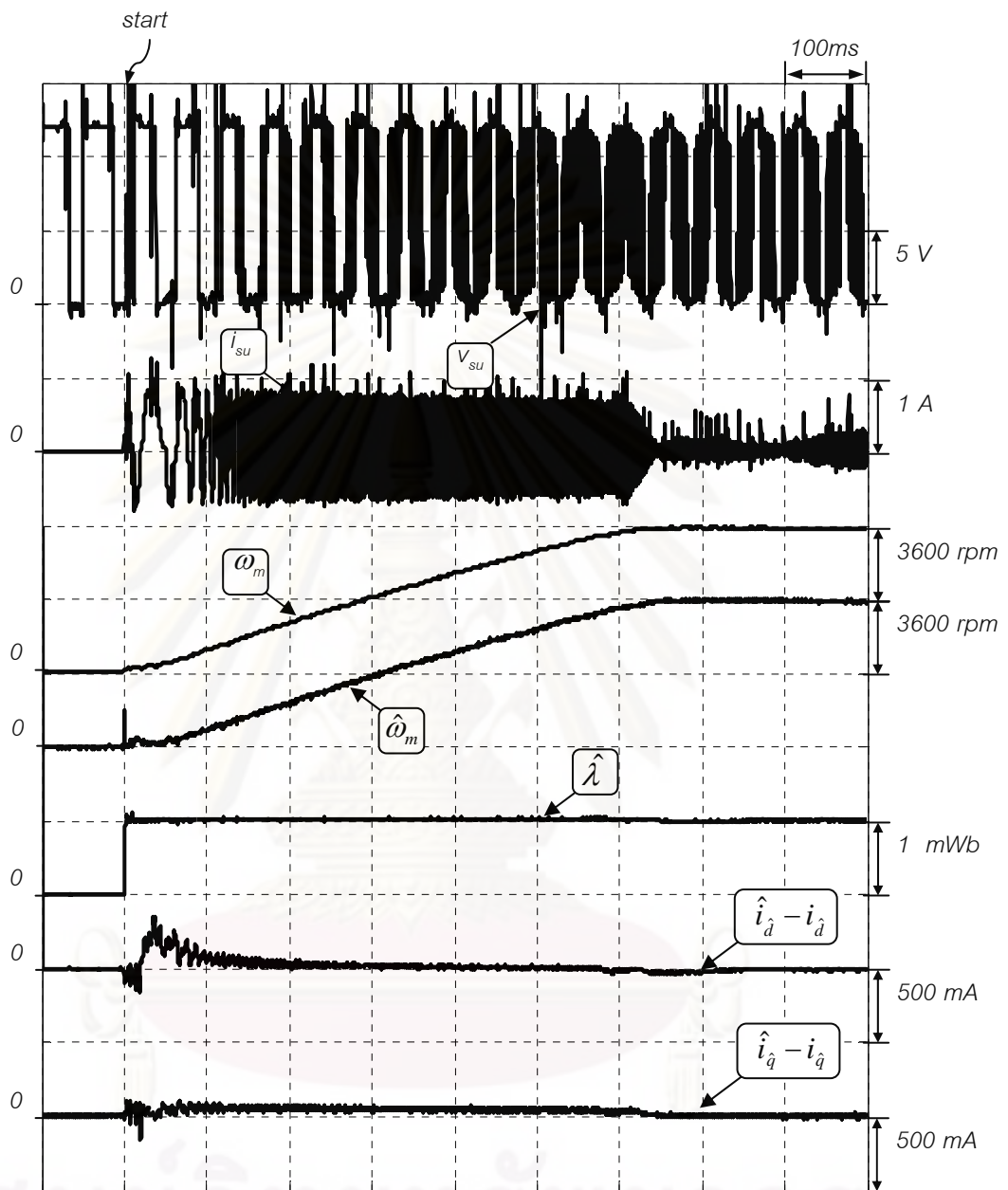
รูปที่ 3.8 ผลการทดลองการเริ่มต้นออกตัวมอเตอร์ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์ วัดตำแหน่งเมื่อใช้วงจรถยายเชิงเส้น โดยมีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล



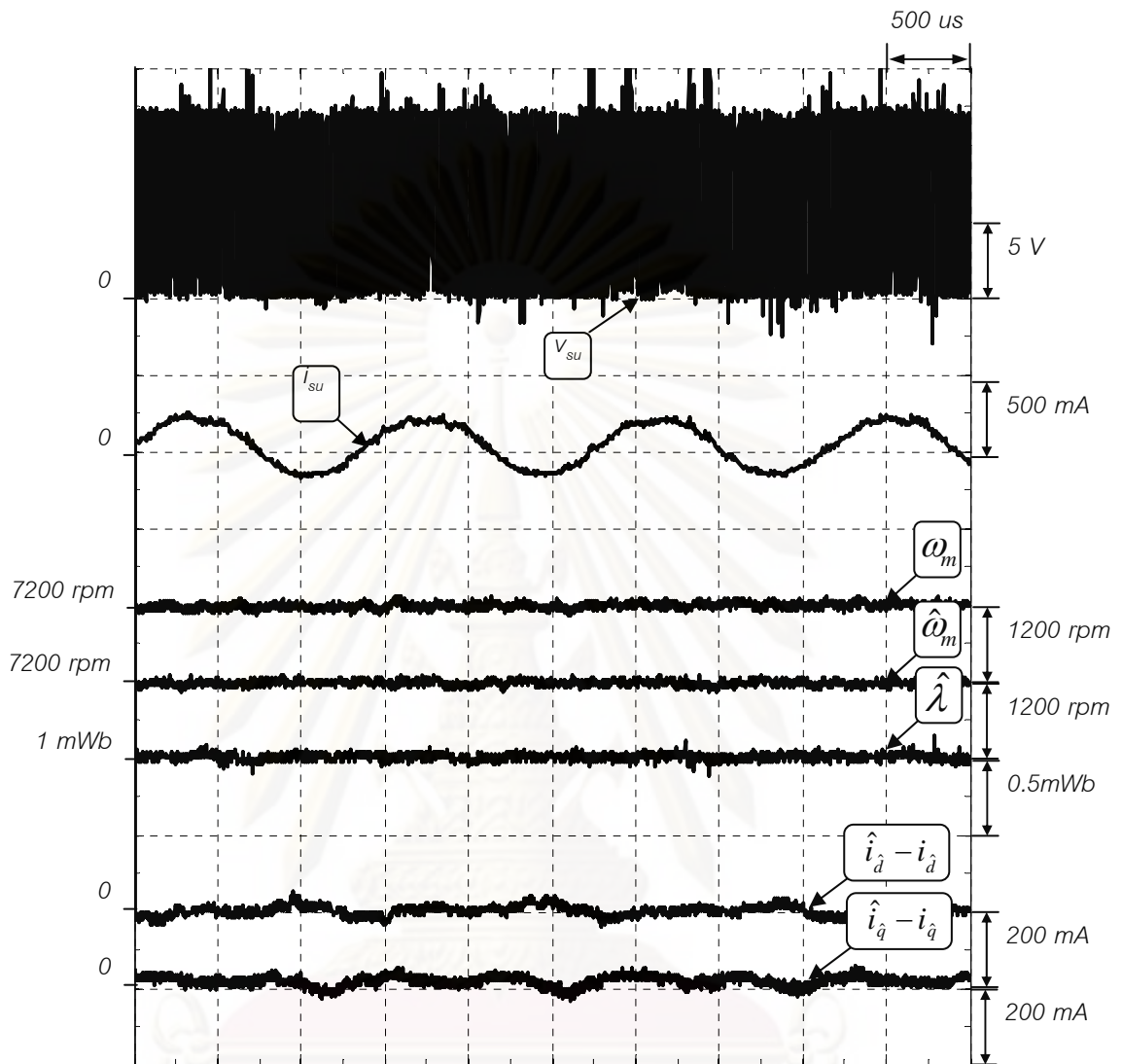
รูปที่ 3.9 ผลการทดลองที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้วงจรขยายเชิงเส้น โดยมีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล



รูปที่ 3.10 ผลการทดลองการเร่งลดความเร็วของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้วงจรถยายเชิงเส้น โดยมีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล

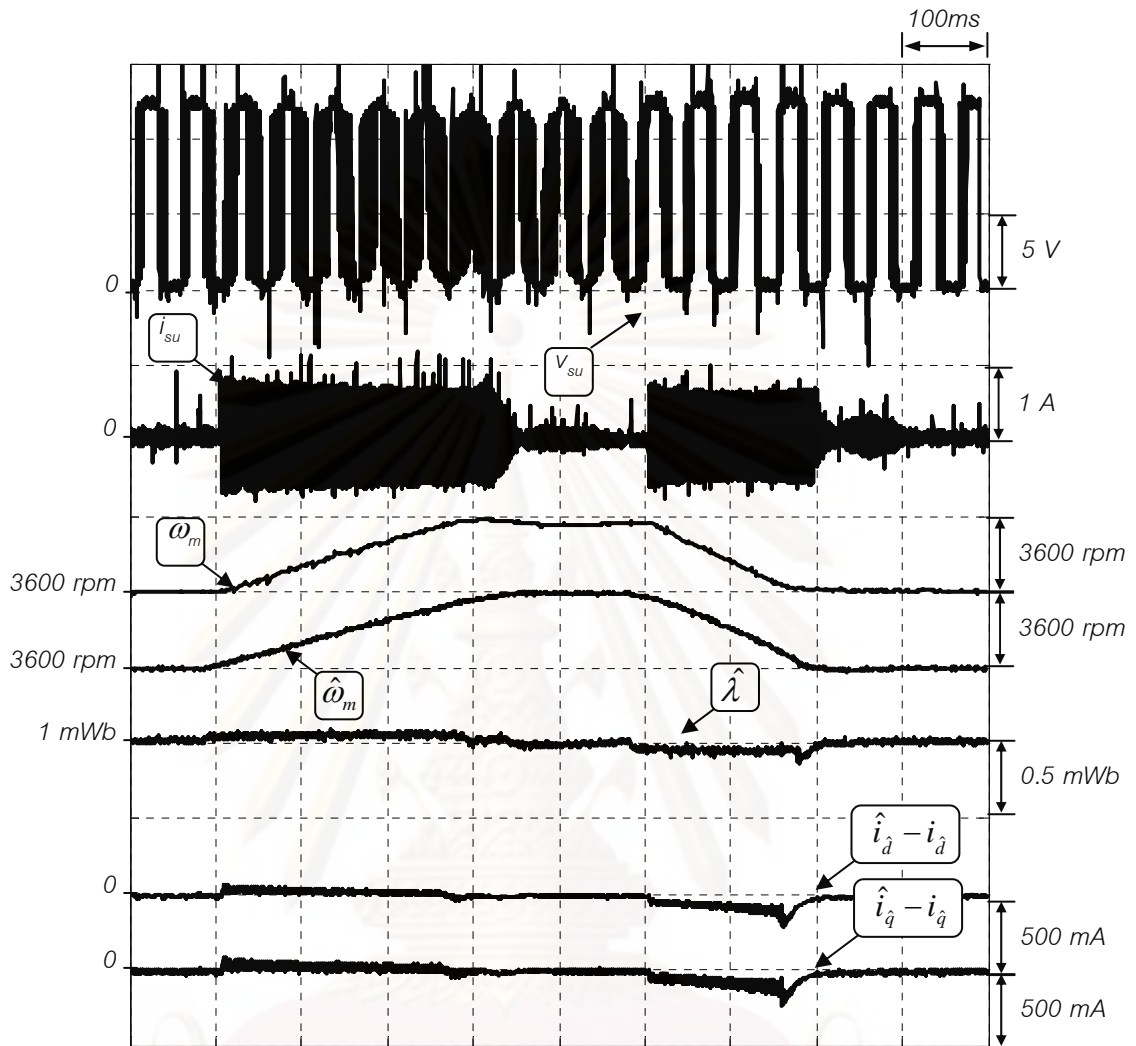


รูปที่ 3.11 ผลการทดลองการเริ่มต้นนอกตัวมอเตอร์ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์ วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM โดยมีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล

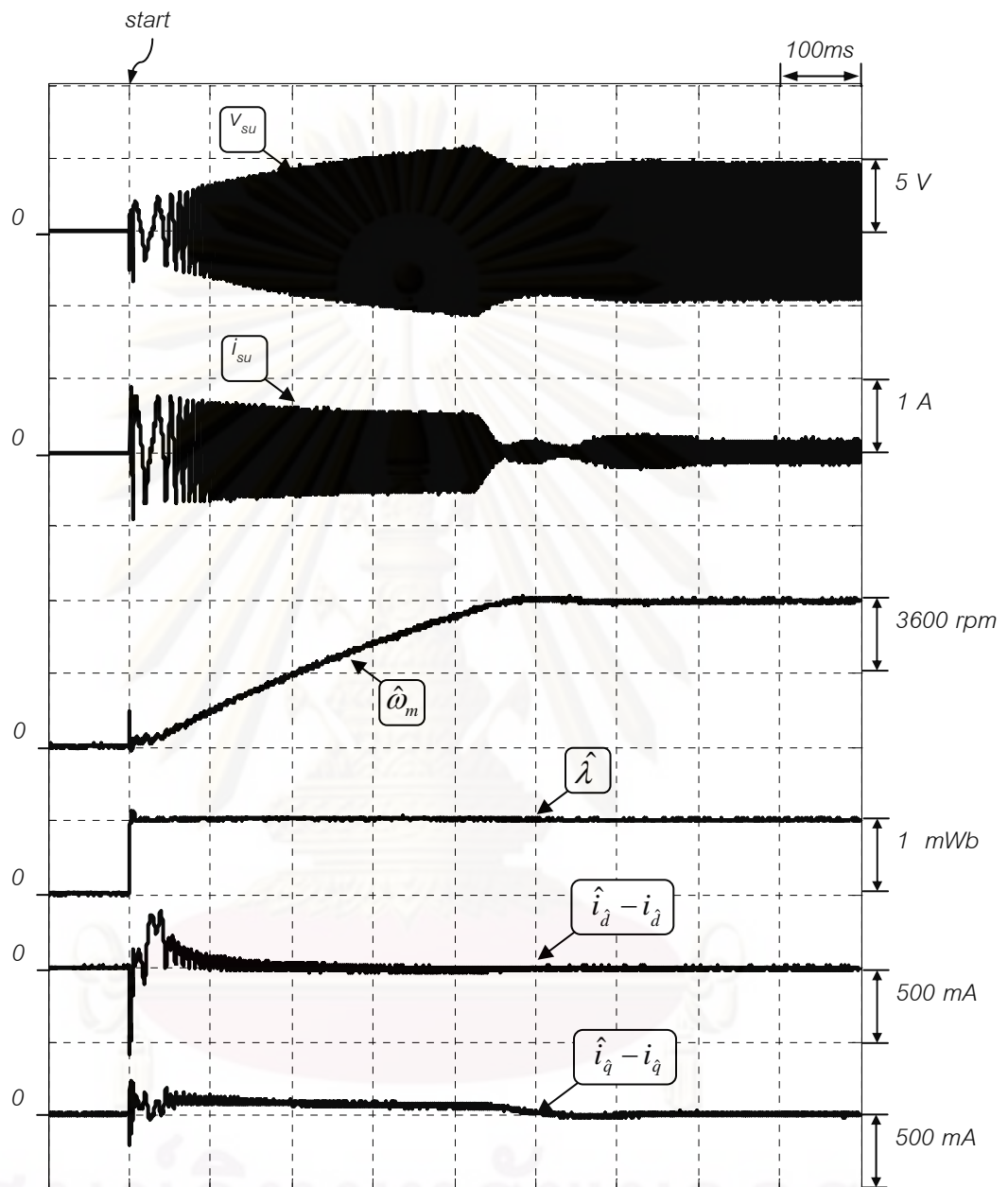


รูปที่ 3.12 ผลการทดลองที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ของระบบควบคุมมอเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM โดยมีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

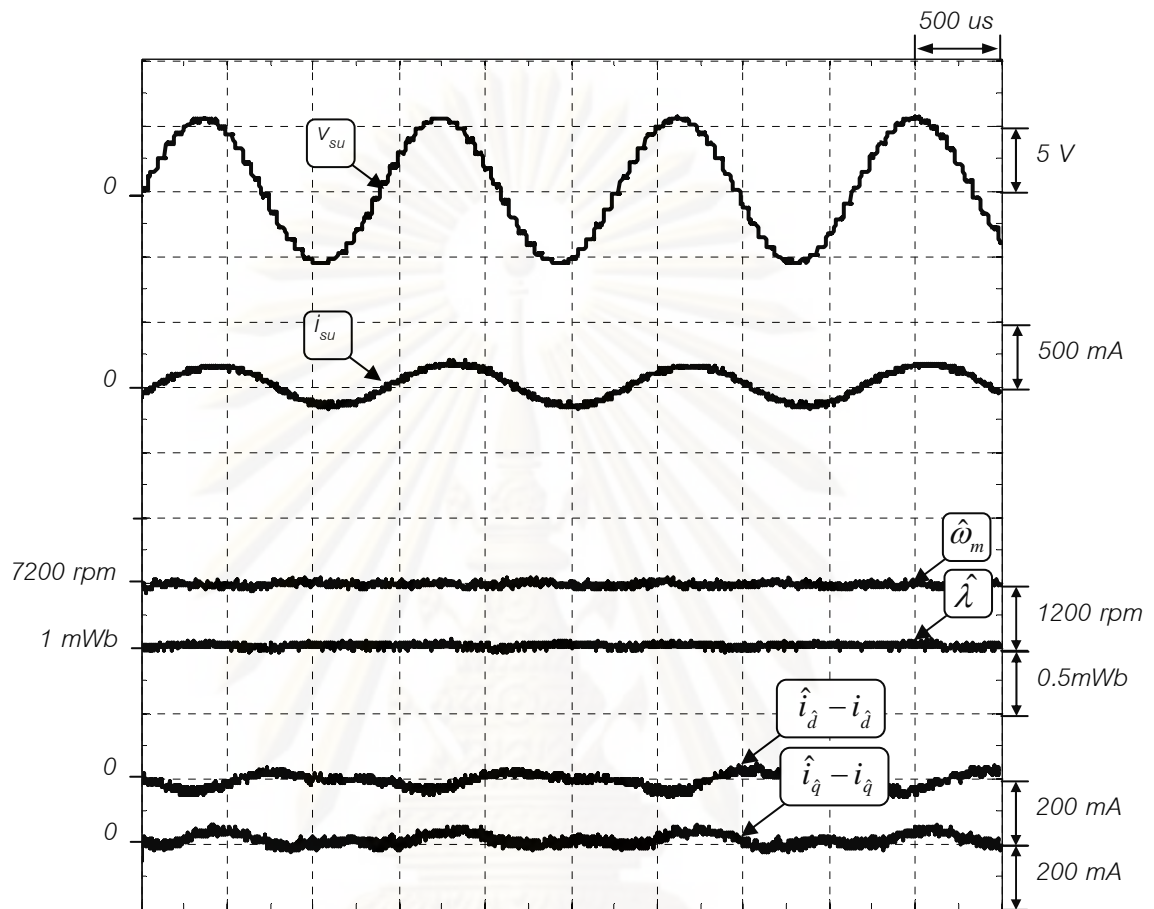


รูปที่ 3.13 ผลการทดลองการเร่งลดความเร็วของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM โดยมีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล

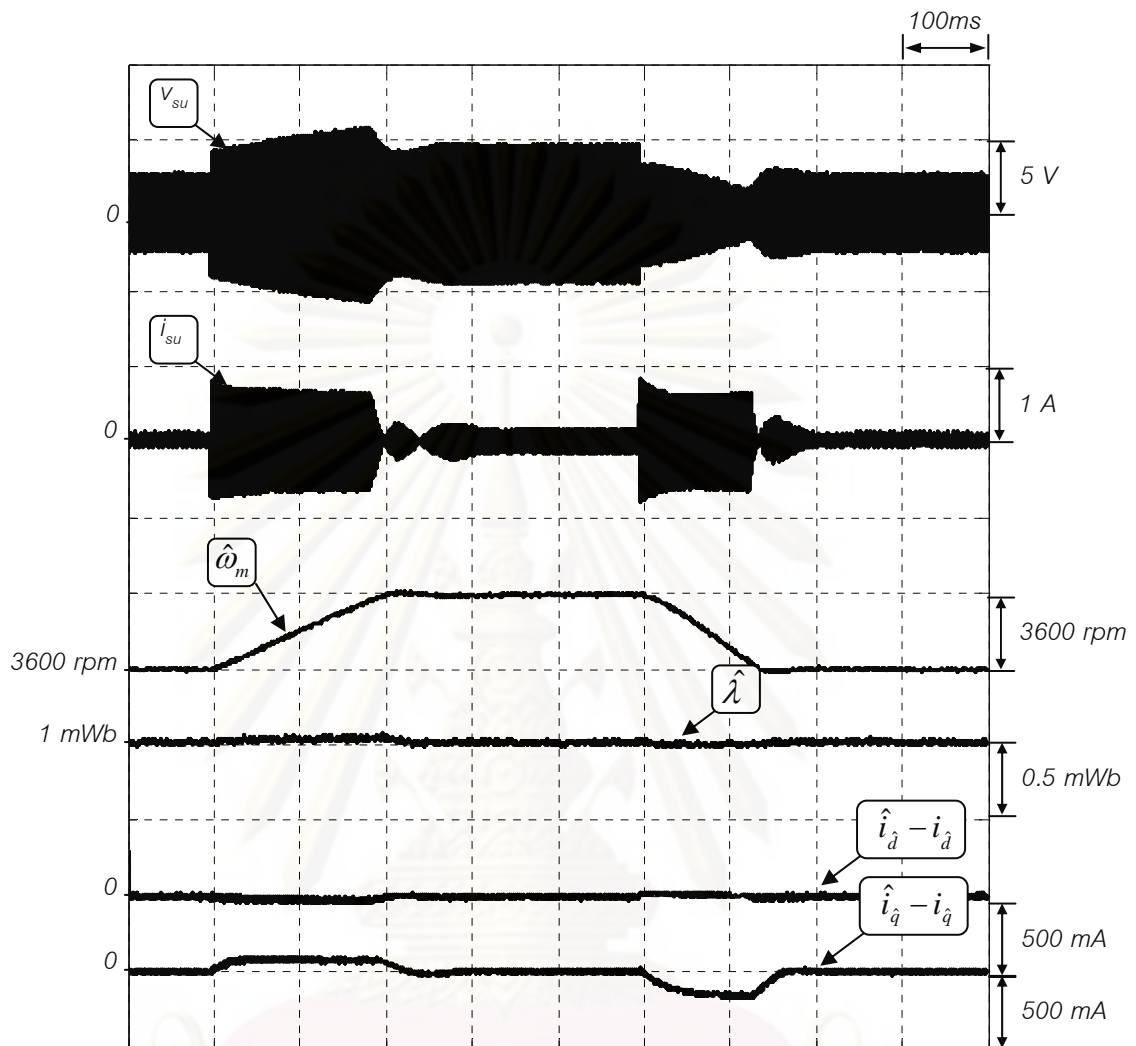


รูปที่ 3.14 ผลการทดลองการเริ่มต้นนอกตัวมอเตอร์ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์ วัดตำแหน่งเมื่อใช้วงจรมายาเชิงเส้น โดยไม่มีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

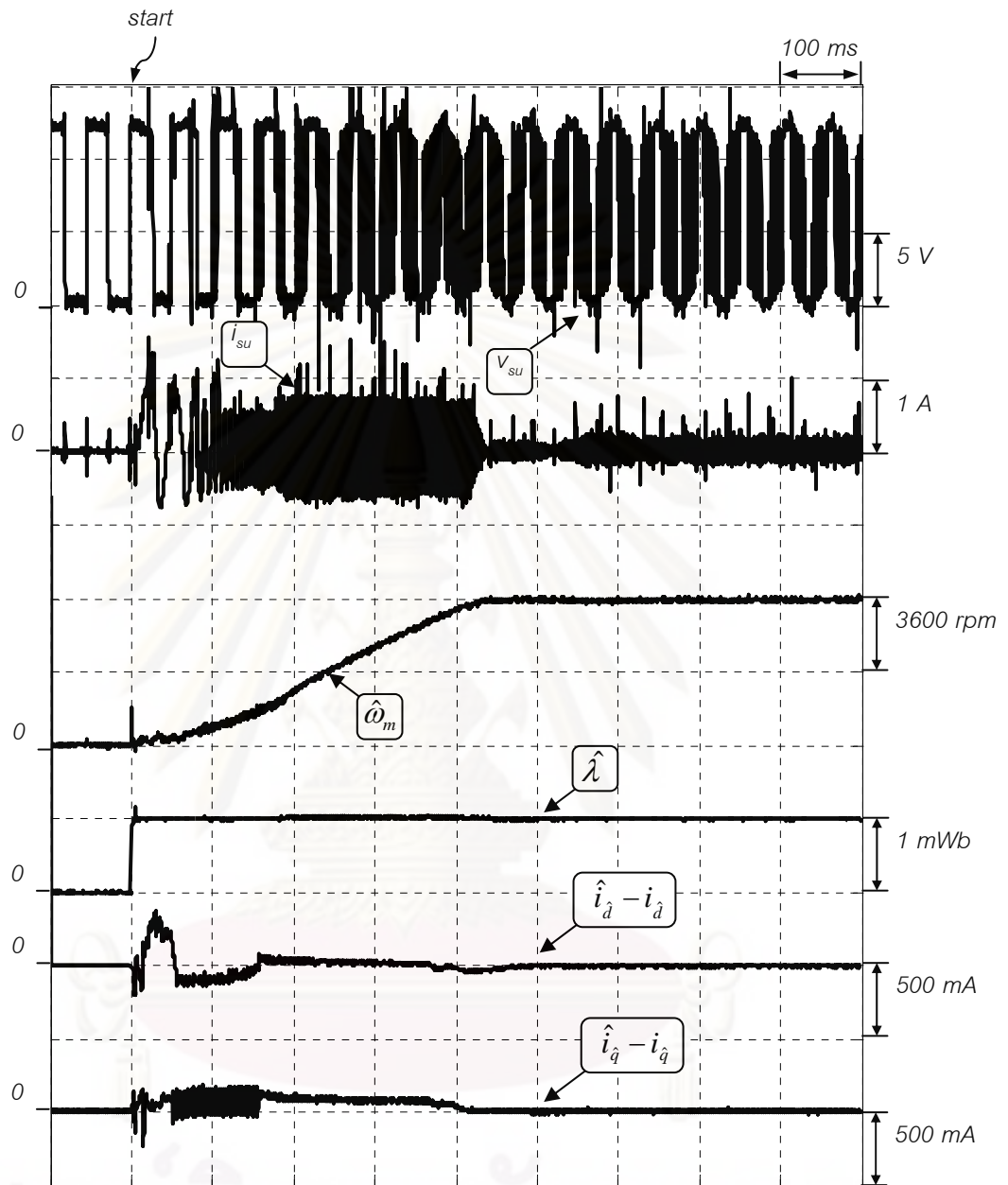


รูปที่ 3.15 ผลการทดลองที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ของระบบควบคุมความเร็วแบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้วงจรถายเชิงเส้น โดยไม่มีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล



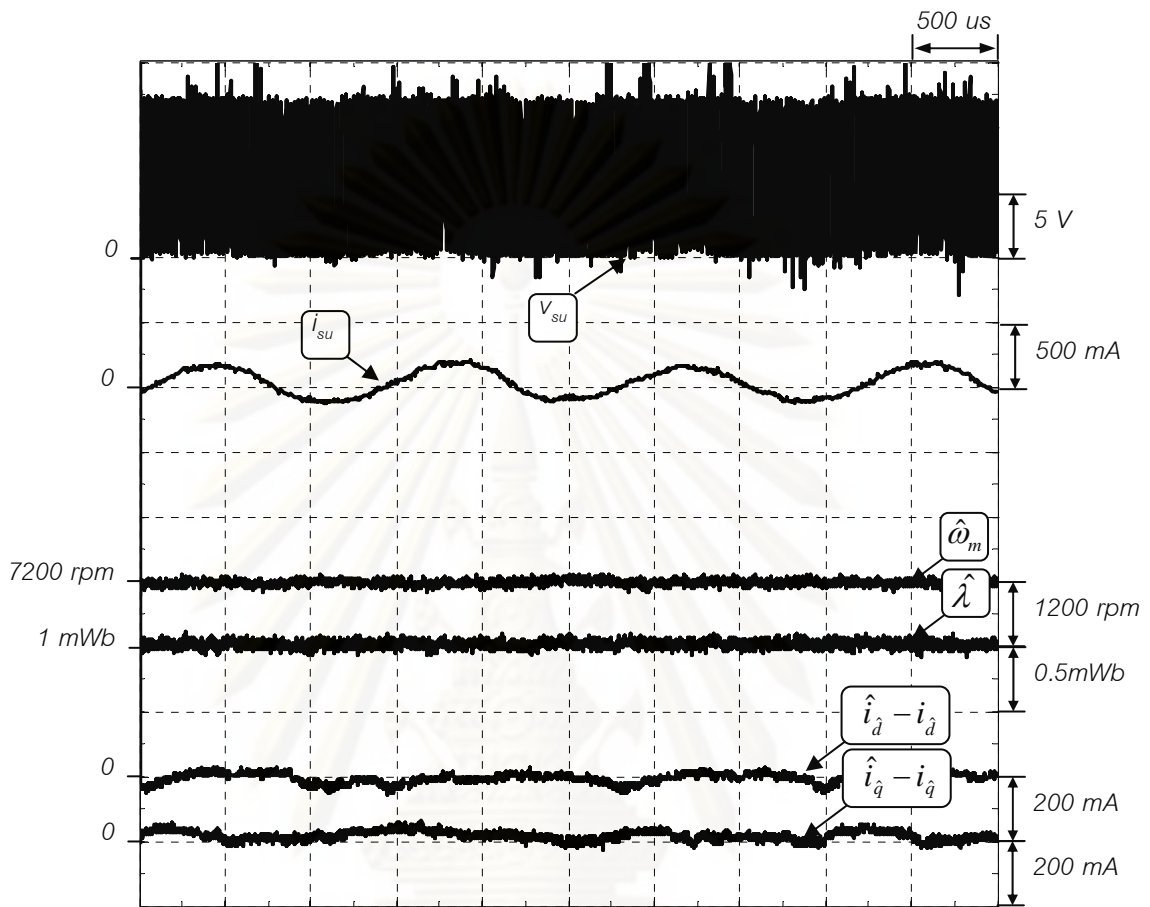
รูปที่ 3.16 ผลการทดลองการเร่งลดความเร็วของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้วงจรถยายเชิงเส้น โดยไม่มีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.17 ผลการทดลองการเริ่มต้นนอกตัวมอเตอร์ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์ วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM โดยไม่มีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



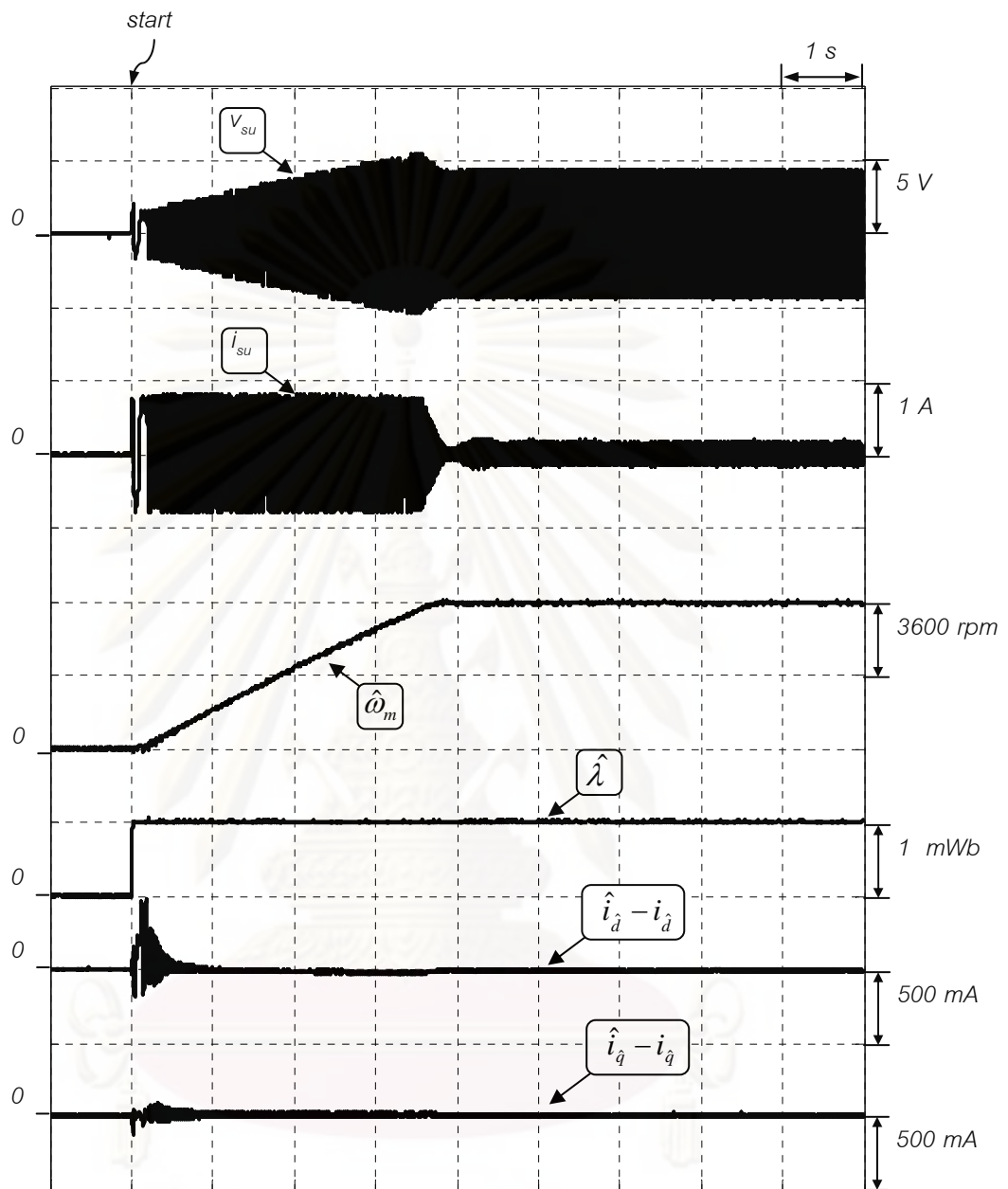
รูปที่ 3.18 ผลการทดลองที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM โดยไม่มีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



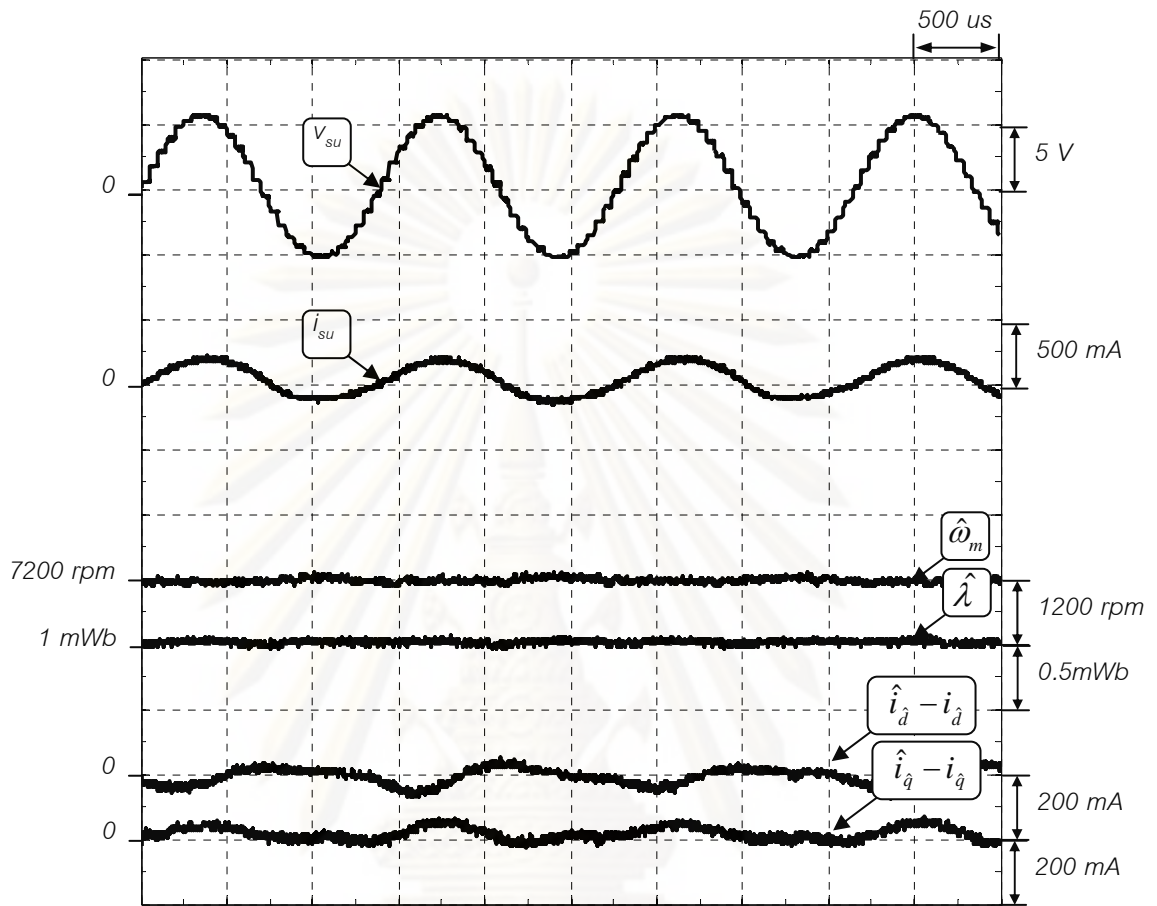
รูปที่ 3.19 ผลการทดลองการเร่งลดความเร็วของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM โดยไม่มีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

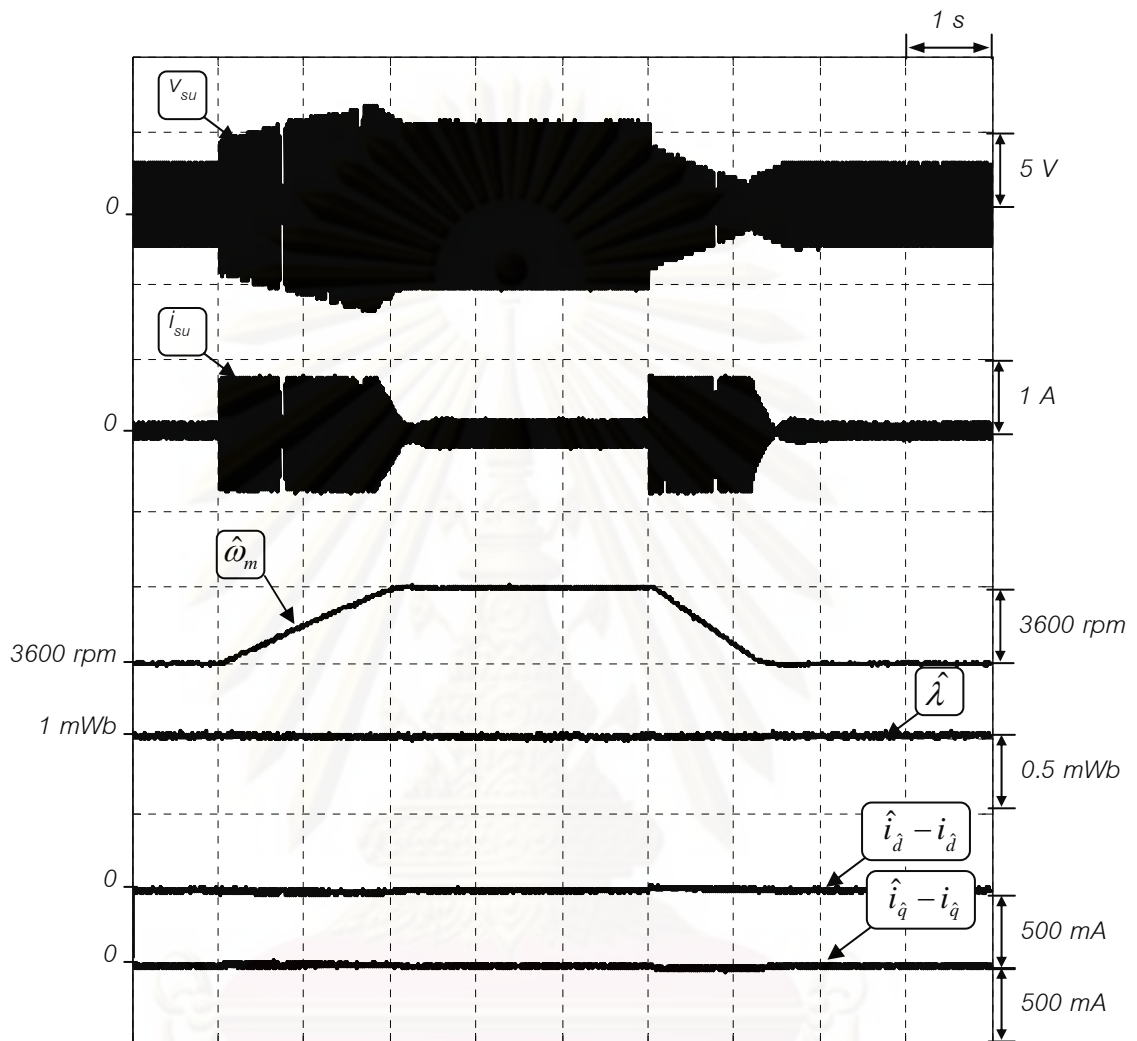


รูปที่ 3.20 ผลการทดลองการเริ่มต้นนอกตัวมอเตอร์ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์ วัดตำแหน่งเมื่อใช้วงจรมายายเชิงเส้น โดยไม่มีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและมีแผ่นดิสก์ข้อมูล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

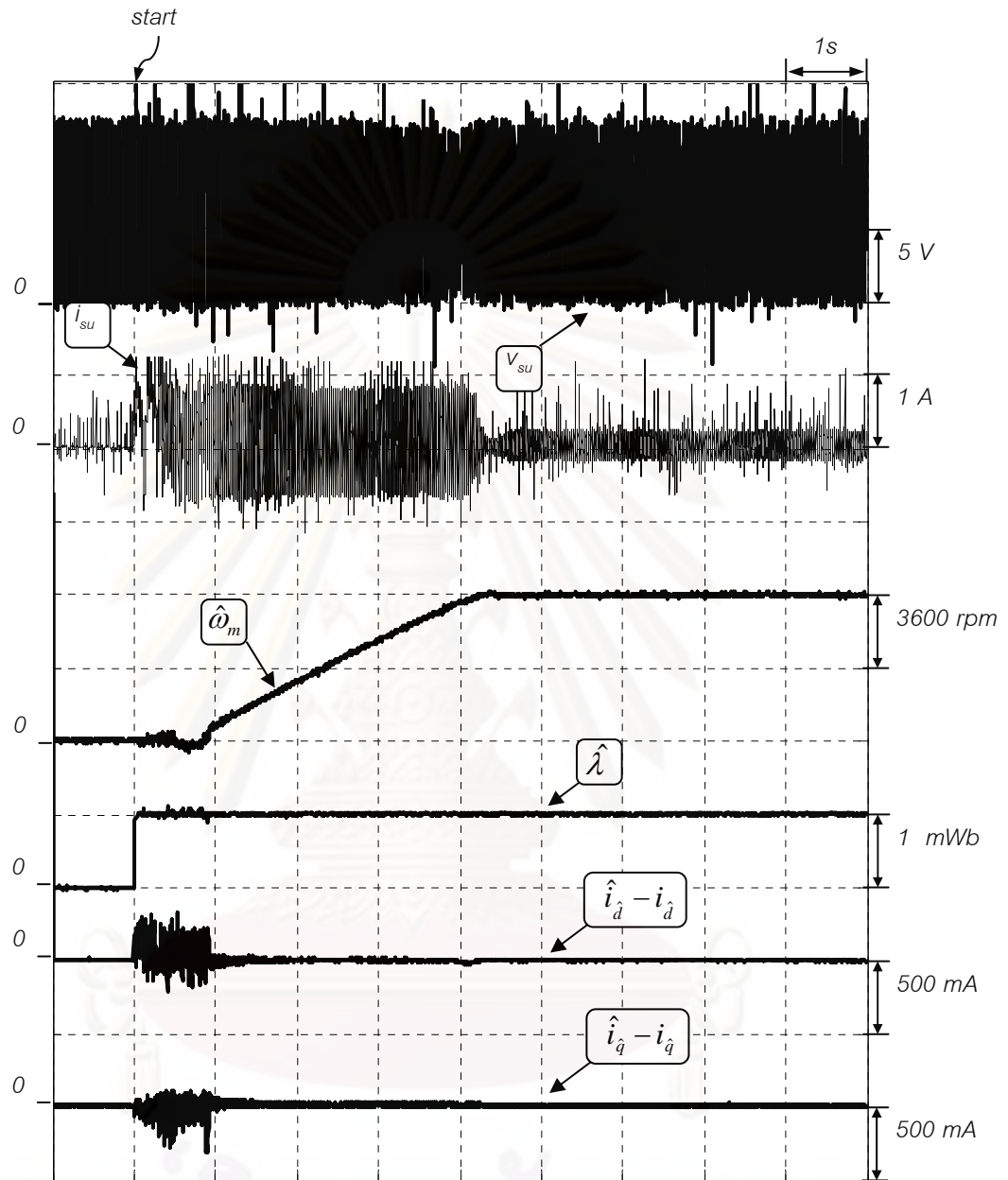


รูปที่ 3.21 ผลการทดลองที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ของระบบควบคุมมอเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้วงจรขยายเชิงเส้น โดยไม่มีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและมีแผ่นดิสก์ข้อมูล



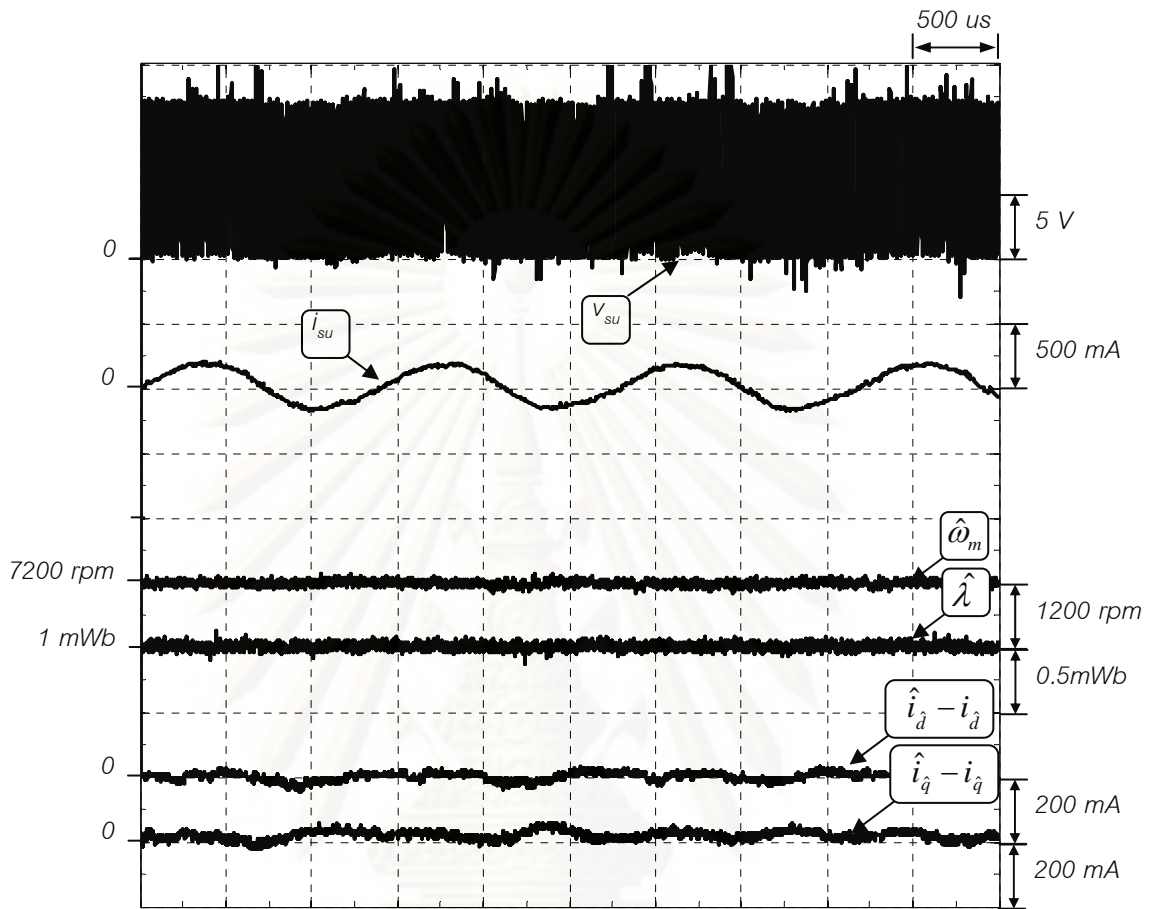
รูปที่ 3.22 ผลการทดลองการเร่งลดความเร็วของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้วงจรถยายเชิงเส้น โดยไม่มีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและมีแผ่นดิสก์ข้อมูล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



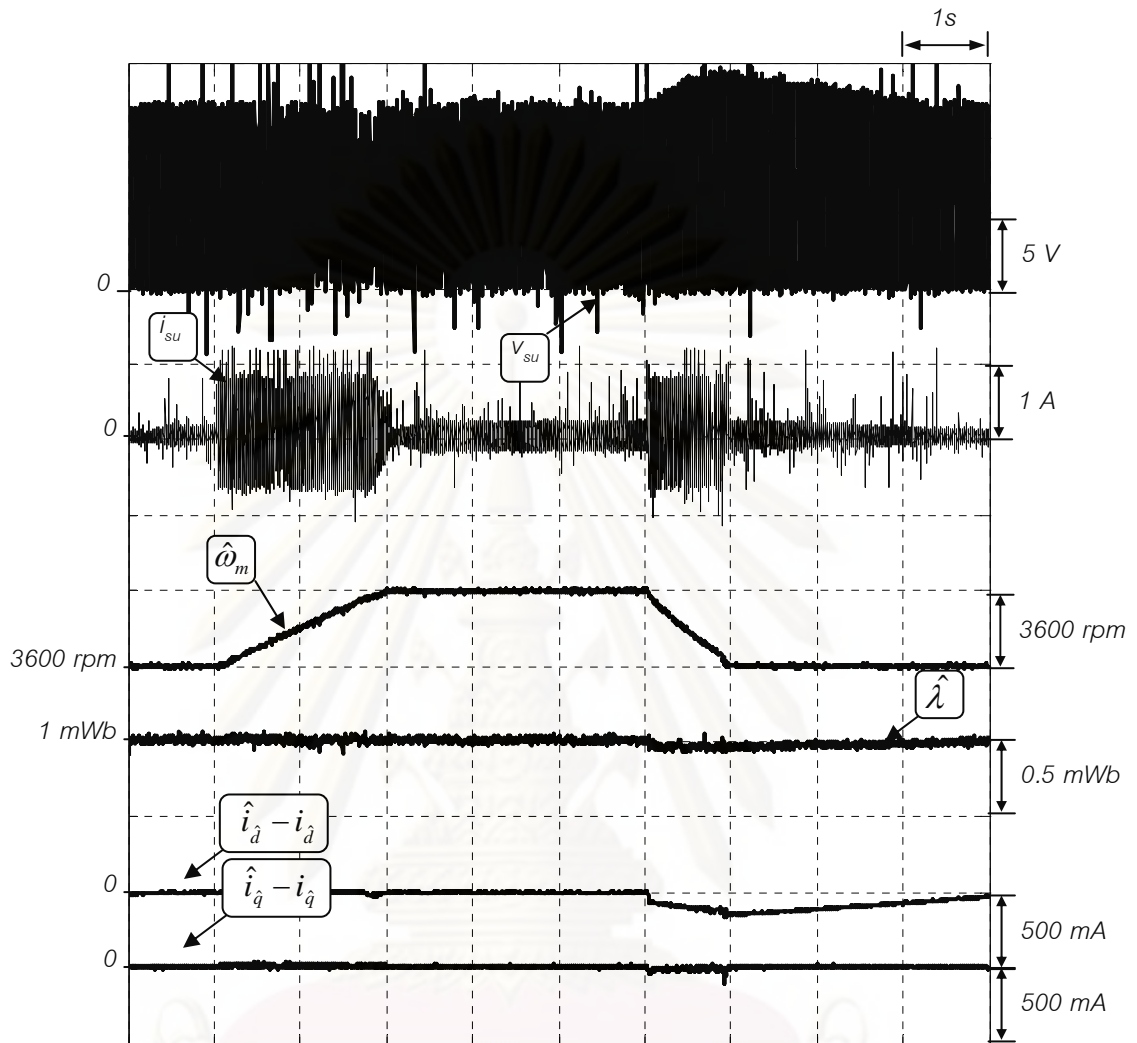
รูปที่ 3.23 ผลการทดลองการเริ่มต้นนอกตัวมอเตอร์ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์ วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM โดยไม่มีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและมีแผ่นดิสก์ข้อมูล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



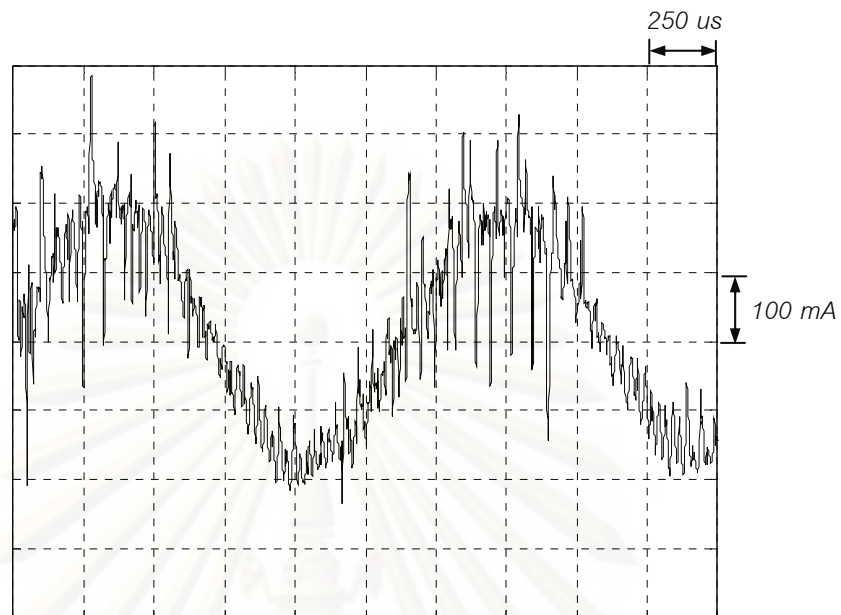
รูปที่ 3.24 ผลการทดลองที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM โดยไม่มีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและมีแผ่นดิสก์ข้อมูล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

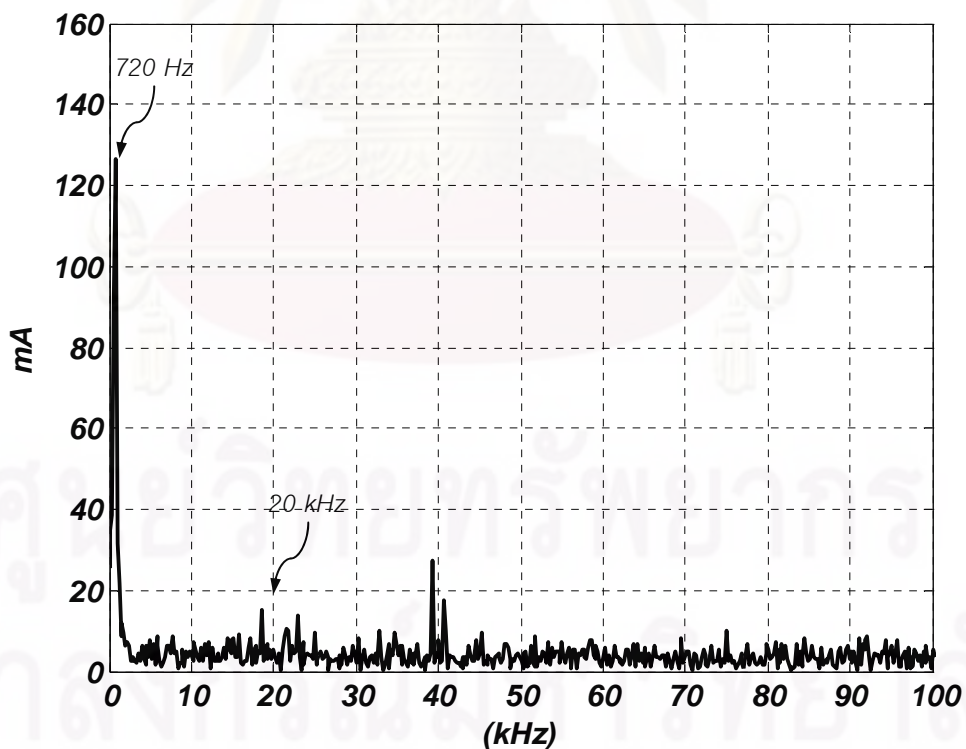


รูปที่ 3.25 ผลการทดลองการเร่งลดความเร็วของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM โดยไม่มีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและมีแผ่นดิสก์ข้อมูล

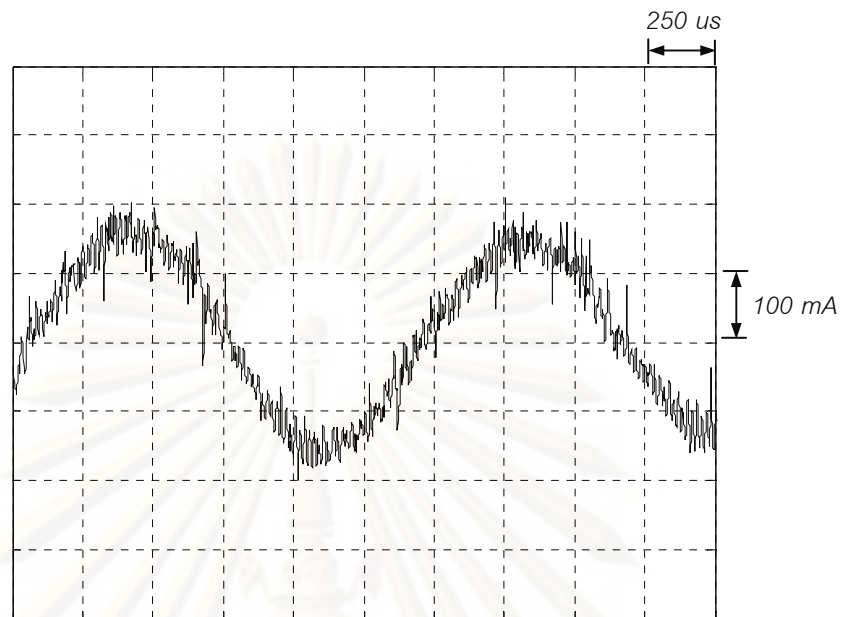
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



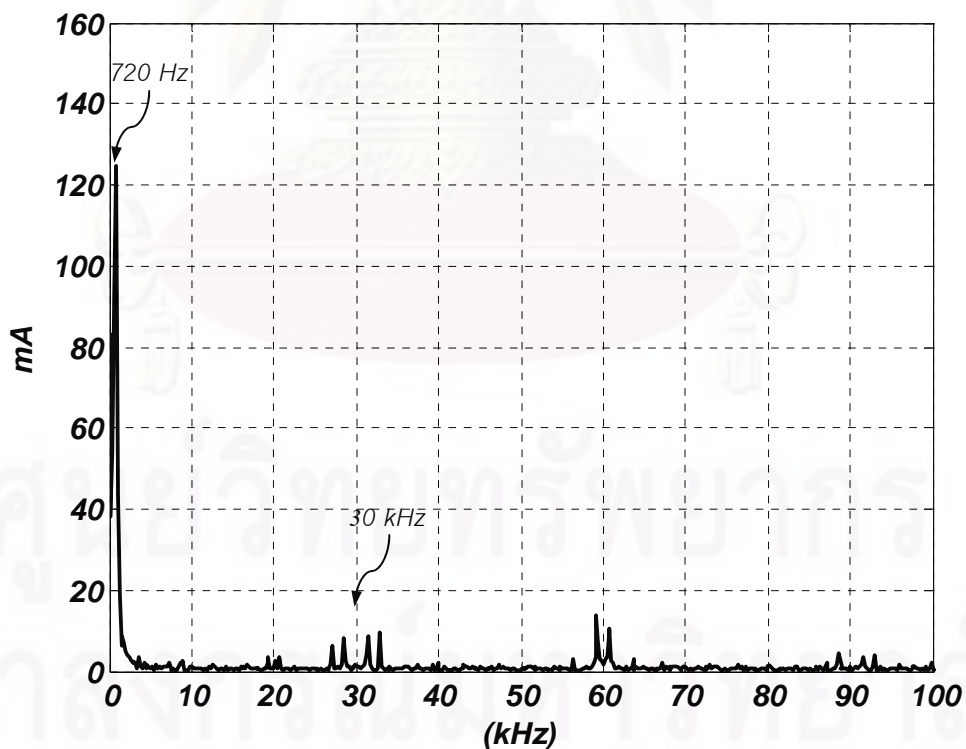
รูปที่ 3.26 กระแสเฟส i_{su} ที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM ที่ความถี่การสวิตช์ 20 kHz โดยไม่มีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล



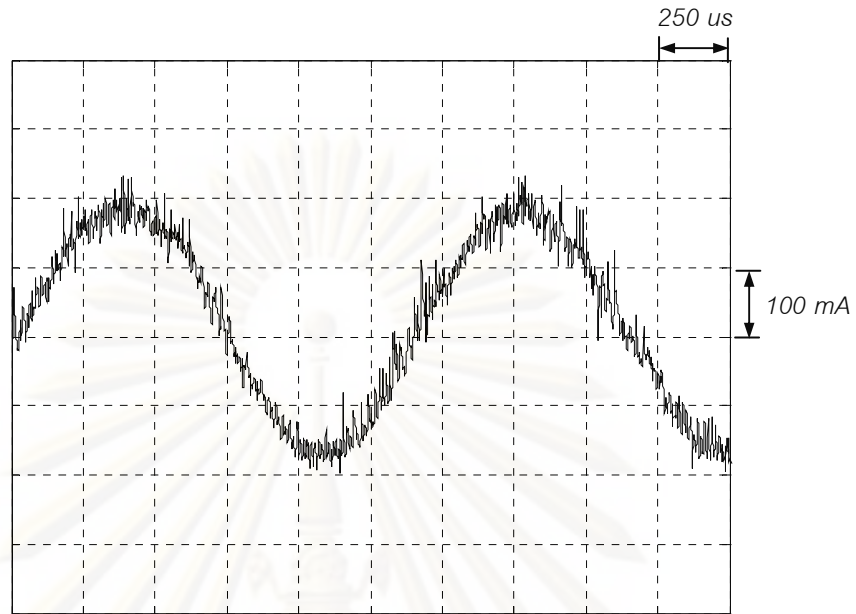
รูปที่ 3.27 สเปกตรัมของกระแสเฟส i_{su} ที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM ที่ความถี่การสวิตช์ 20 kHz โดยไม่มีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล



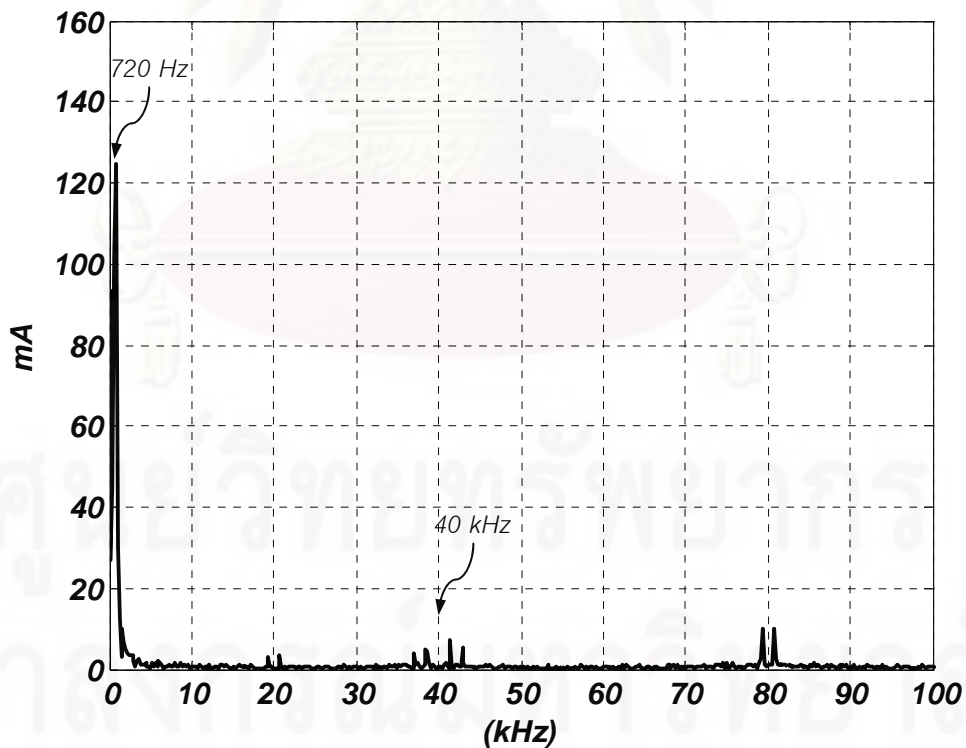
รูปที่ 3.28 กระแสเฟส i_{su} ที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM ที่ความถี่การสวิตช์ 30 kHz โดยไม่มีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล



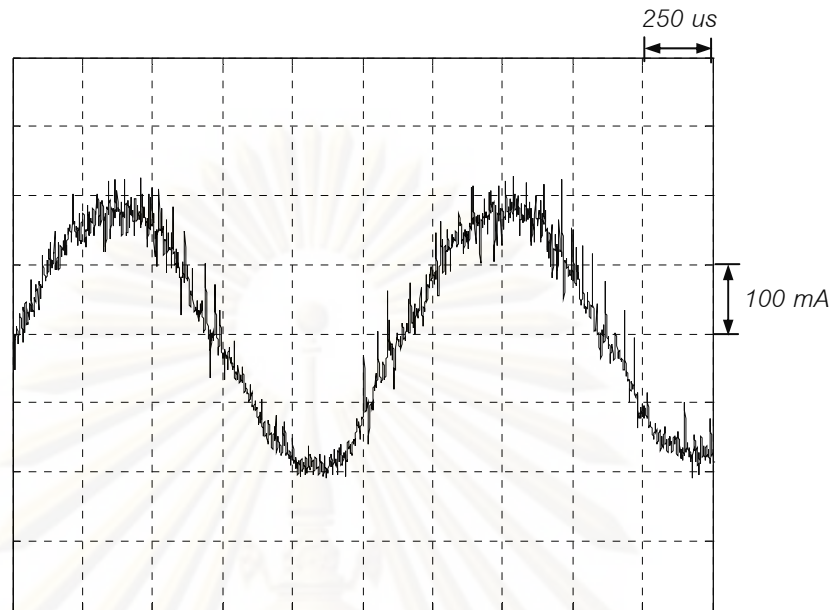
รูปที่ 3.29 สเปกตรัมของกระแสเฟส i_{su} ที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM ที่ความถี่การสวิตช์ 30 kHz โดยไม่มีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล



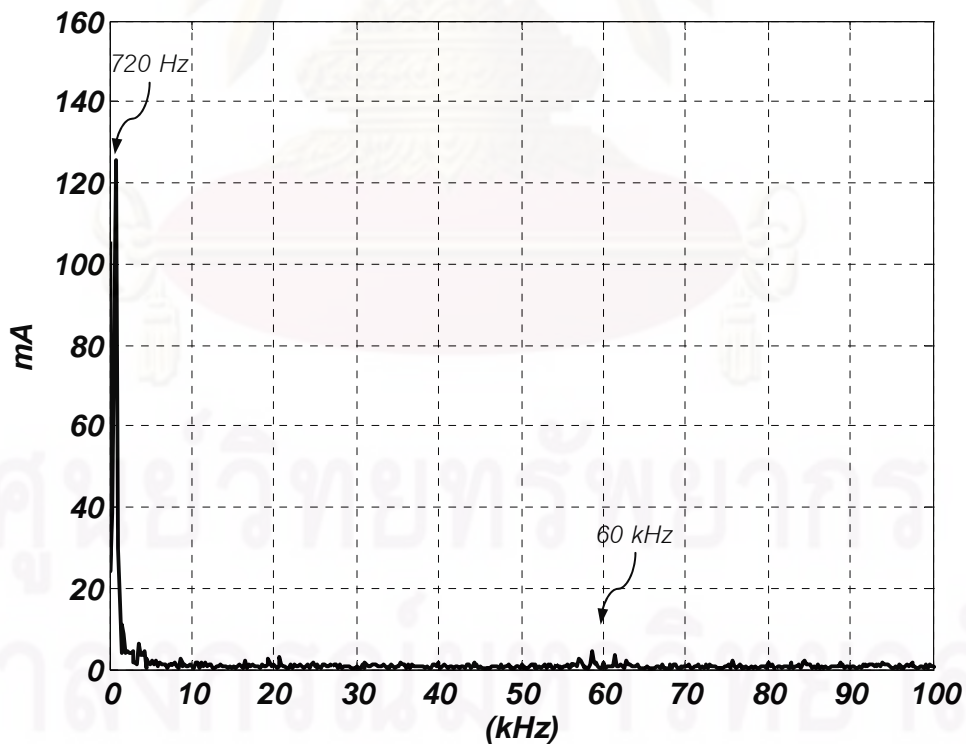
รูปที่ 3.30 กระแสเฟส i_{su} ที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM ที่ความถี่การสวิตช์ 40 kHz โดยไม่มีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล



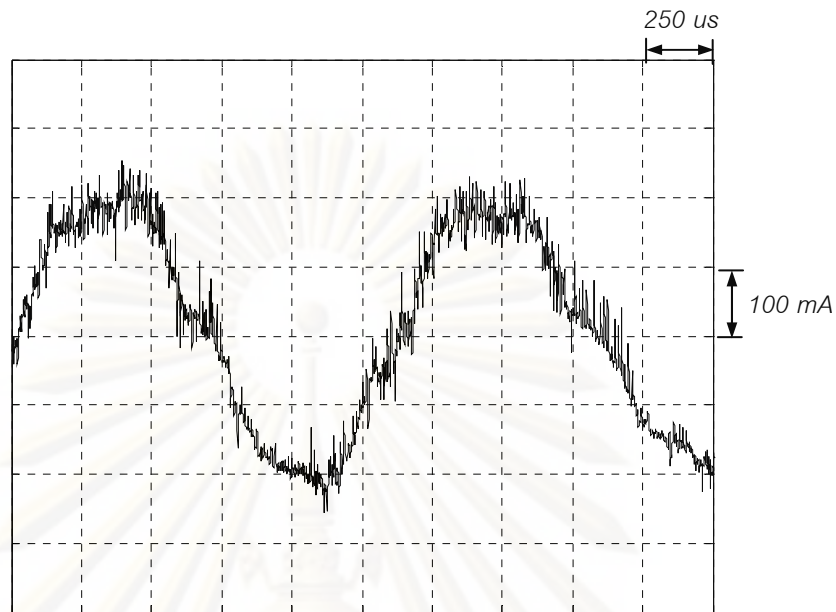
รูปที่ 3.31 สเปกตรัมของกระแสเฟส i_{su} ที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM ที่ความถี่การสวิตช์ 40 kHz โดยไม่มีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล



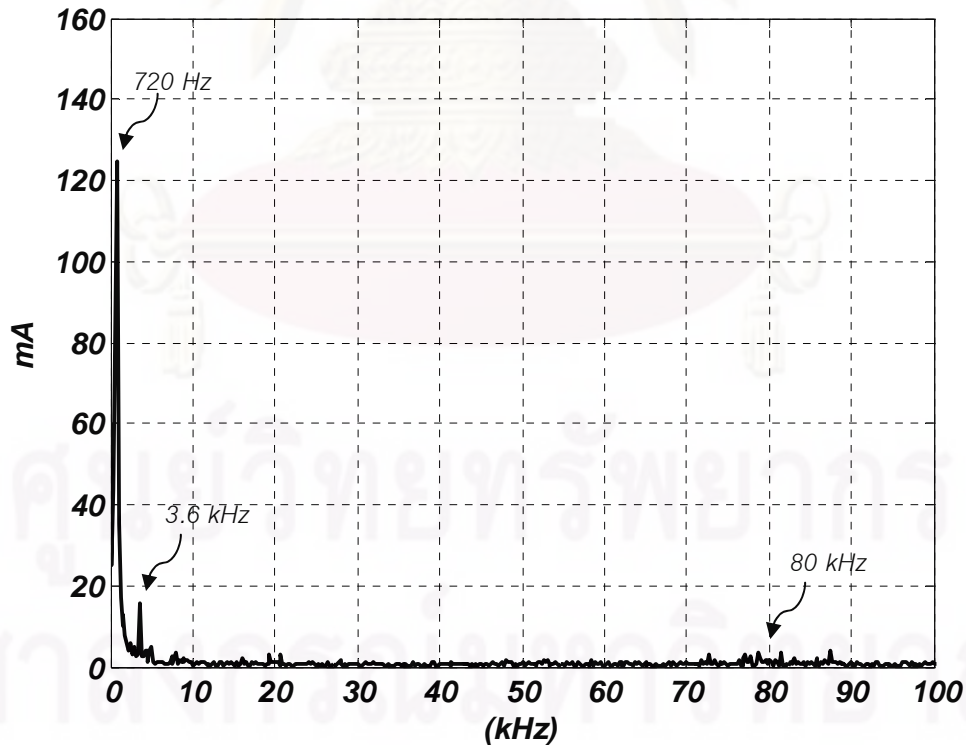
รูปที่ 3.32 กระแสเฟส i_{su} ที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM ที่ความถี่การสวิตช์ 60 kHz โดยไม่มีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล



รูปที่ 3.33 สเปกตรัมของกระแสเฟส i_{su} ที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM ที่ความถี่การสวิตช์ 60 kHz โดยไม่มีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล



รูปที่ 3.34 กระแสเฟส i_{su} ที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM ที่ความถี่การสวิตช์ 80 kHz โดยไม่มีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล

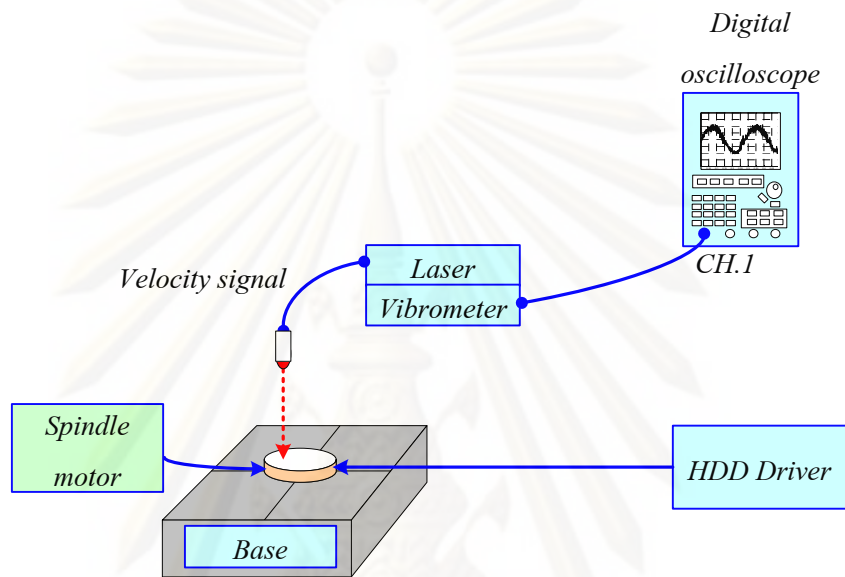


รูปที่ 3.35 สเปกตรัมของกระแสเฟส i_{su} ที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM ที่ความถี่การสวิตช์ 80 kHz โดยไม่มีการติดตั้งตัวเข้ารหัสและไม่มีแผ่นดิสก์ข้อมูล

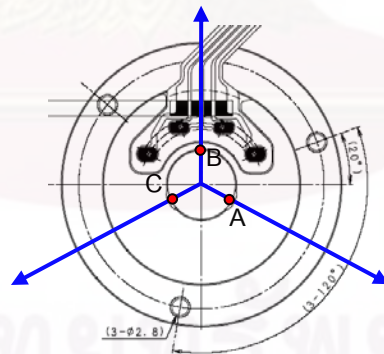
บทที่ 4

การสั่นสะเทือนทางกล

4.1 การตรวจวัดการสั่นสะเทือนทางกล



(ก) วงจรการวัดการสั่นสะเทือนทางกล



(ข) ตำแหน่งการตรวจวัดการสั่นสะเทือนทางกล

รูปที่ 4.1 การเตรียมการตรวจวัดการสั่นสะเทือนทางกลในภาคปฏิบัติ

รูปที่ 4.1(ก) แสดงการเตรียมการวัดการสั่นสะเทือนทางกล โดยมอเตอร์สปินเดิลจะวางอยู่บนโฝมที่วางบนโต๊ะทดสอบและถูกขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อน วิธีการตรวจวัดจะใช้แสงเลเซอร์เล็งไปที่ตัวมอเตอร์ที่ตำแหน่ง A, B และ C ที่ละตำแหน่งตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข) การสะท้อนกลับของแสงในลักษณะสัญญาณเชิงเวลาจะส่งผ่านไปที่ Vibrometer เพื่อขยายสัญญาณและประมวลผลเปรียบเทียบระหว่างความถี่และเฟสอ้างอิงของแสงเลเซอร์ที่ส่งออกไป

กับความถี่และเฟสของสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากตัวมอเตอร์ที่หมุนอยู่ โดยผลการเปรียบเทียบจะทำให้ได้สัญญาณการสั่นสะเทือนทางกลออกมา (หลักการตรวจวัดดังกล่าวอาศัยปรากฏการณ์ Doppler Effect ที่ใช้ในเครื่องมือวัดโดยทั่วไป) ในกรณีที่มีมอเตอร์มีการสั่นสะเทือนรูปคลื่นสัญญาณแสงเลเซอร์ที่สะท้อนกลับของมอเตอร์ยัง Vibrometer จะประกอบด้วยองค์ประกอบความถี่ต่างๆไม่ว่าจะเป็นความถี่มูลฐานที่ความเร็วของมอเตอร์เท่ากับ 120 Hz หรือองค์ประกอบฮาร์โมนิกอื่น ๆ ของการสั่นสะเทือนทางกลที่เกิดจากตัวขับเคลื่อน สัญญาณด้านออกจาก Vibrometer จะส่งผ่านไปยังออสซิลโลสโคปและเก็บข้อมูลเพื่อประมวลผลต่อไป

การทดสอบการสั่นสะเทือนทางกลจะเปรียบเทียบระหว่างตัวขับเคลื่อน 3 ชนิด คือ

- 1) ตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม
- 2) ตัวขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ใช้วงจรถยายเชิงเส้น และ
- 3) ตัวขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ใช้อินเวอร์เตอร์ PWM

4.2 ผลการทดลองวัดการสั่นสะเทือนทางกลเมื่อใช้ตัวขับเคลื่อนต่างชนิดกัน

รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกลที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวขับเคลื่อนทั้งสามแบบซึ่งจะวัดการสั่นสะเทือนตามตำแหน่ง A ในรูปที่ 4.2 (ก), ตำแหน่ง B ในรูปที่ 4.2 (ข) และ ตำแหน่ง C ในรูปที่ 4.2 (ค) เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกลในแต่ละตำแหน่งจะพบว่าในย่านความถี่ต่ำช่วง 50Hz - 4kHz ที่ตำแหน่ง A,B และ C ขนาดของการสั่นสะเทือนทางกลไม่มีความแตกต่างที่ชัดเจน ส่วนในย่านความถี่ 4kHz-20kHz เมื่อใช้ตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม การสั่นสะเทือนจะมีโหมดเด่นที่ความถี่ 8.65 kHz, 13 kHz, 16.2 kHz และ 17.3 kHz ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งทั้งแบบที่ใช้วงจรถยายเชิงเส้นและแบบที่ใช้อินเวอร์เตอร์ PWM จะเห็นว่าการสั่นสะเทือนที่โหมดเด่นดังกล่าวถูกลดทอนลง 1-2 $\mu\text{m/s}$ และเมื่อพิจารณาตลอดย่านความถี่สูง 2 kHz – 20 kHz รูปที่ 4.2 จะเห็นว่าตัวขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งทั้ง 2 แบบสามารถลดทอนการสั่นสะเทือนทางกลอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม

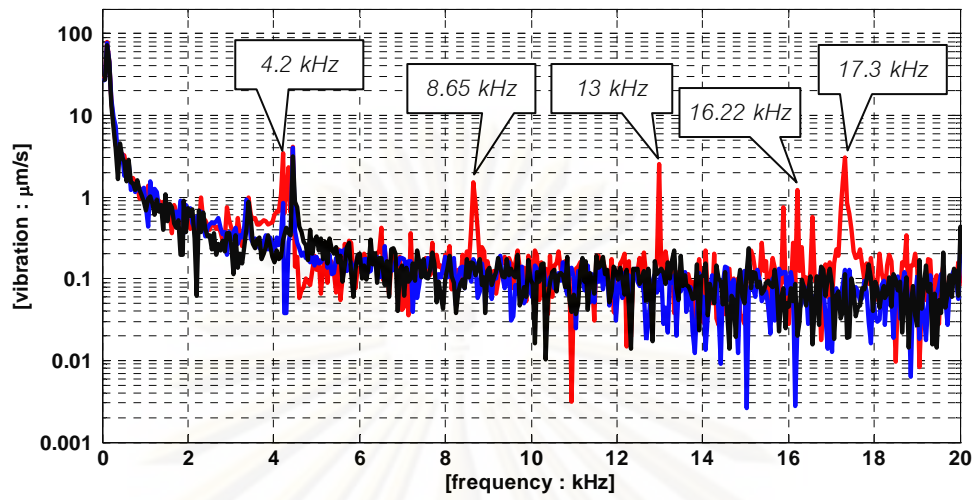
รูปที่ 4.3-4.5 เป็นผลการทดลองเดียวกันกับรูปที่ 4.2 เพียงแต่แยกแสดงสเปกตรัมการสั่นสะเทือนทางกลของตัวขับเคลื่อนทั้งสามแบบเปรียบเทียบกัน โดยแสดงเปรียบเทียบผลของการทดสอบที่ตำแหน่ง A B และ C ตามลำดับ จะเห็นว่าผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้จากตัวขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ใช้วงจรถยายเชิงเส้นและอินเวอร์เตอร์ PWM มีรูปแบบการสั่นสะเทือนทางกลใกล้เคียงกันมาก ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะเราใช้ความถี่การสวิตซ์ที่สูงกว่า 20 kHz ขึ้นไป

การพิจารณาผลตอบสนองเชิงความถี่เฉพาะที่ต่ำกว่า 20 kHz นอกจากจะครอบคลุมผลการสั่นสะเทือนทางกลต่อการเขียนและอ่านข้อมูลแล้ว ยังสามารถนำไปวิเคราะห์สาเหตุการเกิด

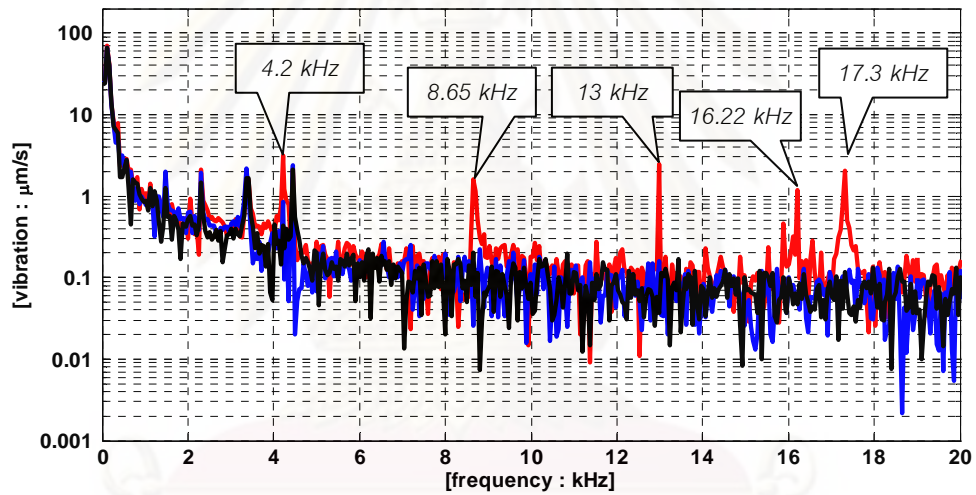
เสียงจากการสั่นสะเทือนทางกล จากประสบการณ์ในการทดลองพบว่าการลดลงของการสั่นสะเทือนในรูปที่ 4.2 – 4.5 ทำให้เสียงระหว่างการขับเคลื่อนลดลงอย่างชัดเจนอีกด้วย

4.3 ผลการทดลองวัดการสั่นสะเทือนทางกลเมื่อใช้ตัวขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM ที่มีความถี่การสวิตช์ต่าง ๆ

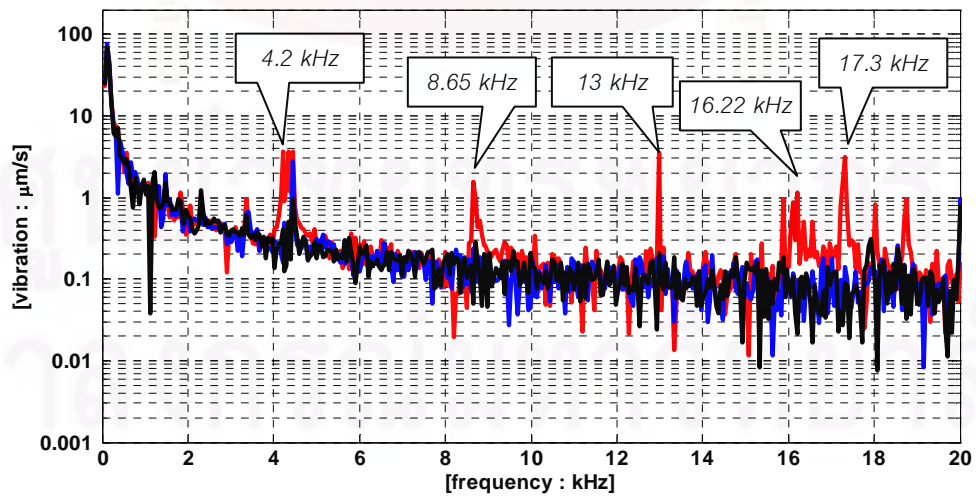
รูปที่ 4.6 - 4.10 แสดงสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกลที่ความถี่สวิตช์ 20 kHz – 80 kHz สเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกลที่เกิดขึ้นในแต่ละความถี่สวิตช์มีความใกล้เคียงกัน แม้ว่าที่ความถี่สวิตช์ 80 kHz นั้นกระแสเฟสของมอเตอร์ดังรูปที่ 3.34 -3.35 มีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์บ้างก็ตาม สรุปได้ว่าตัวขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่พัฒนาขึ้นสามารถลดการสั่นสะเทือนทางกลได้ดี



(ก) ตำแหน่ง A

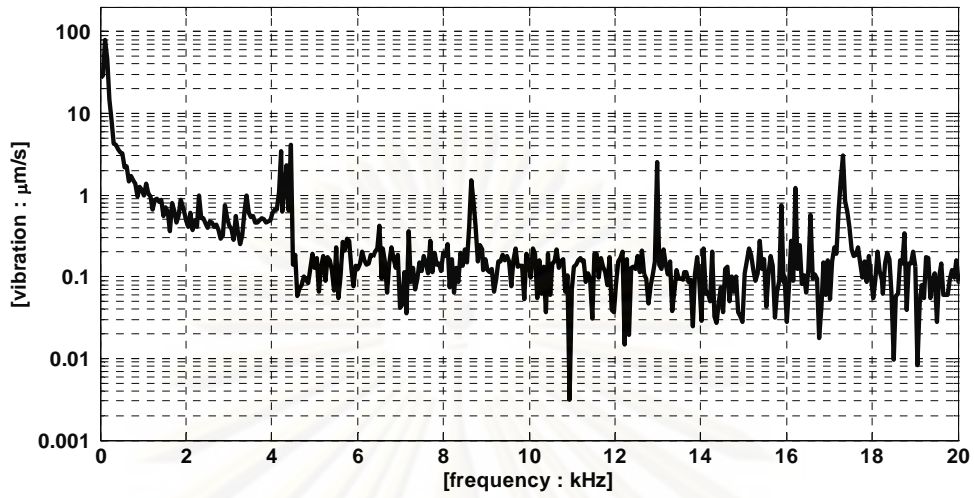


(ข) ตำแหน่ง B

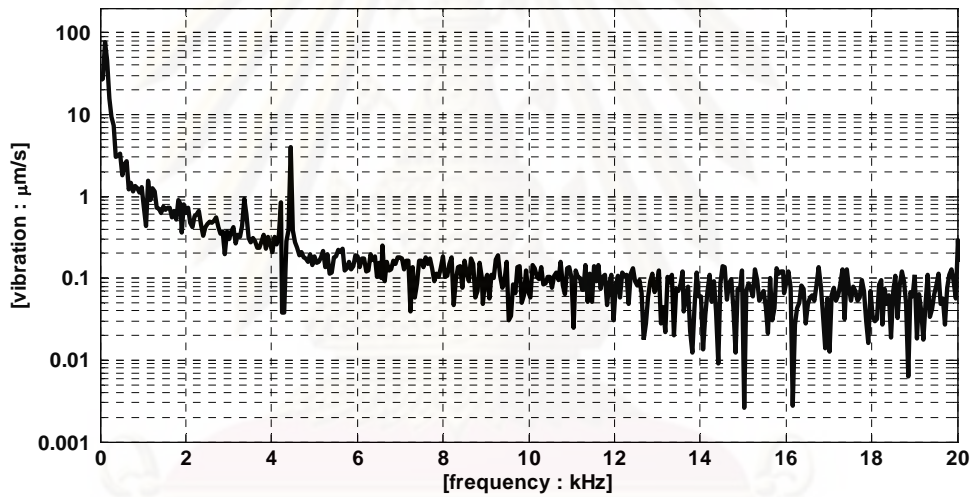


(ค) ตำแหน่ง C

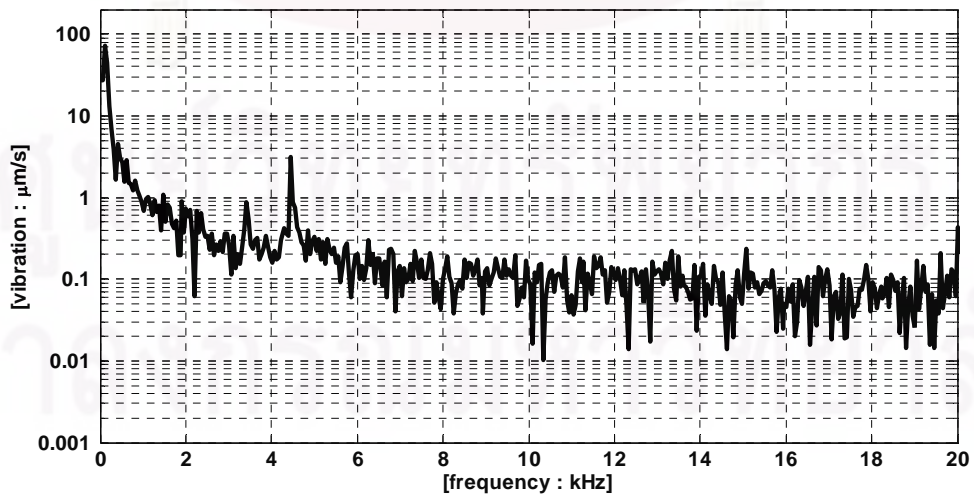
รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบสเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกลของตัวขับเคลื่อนทั้ง 3 แบบ

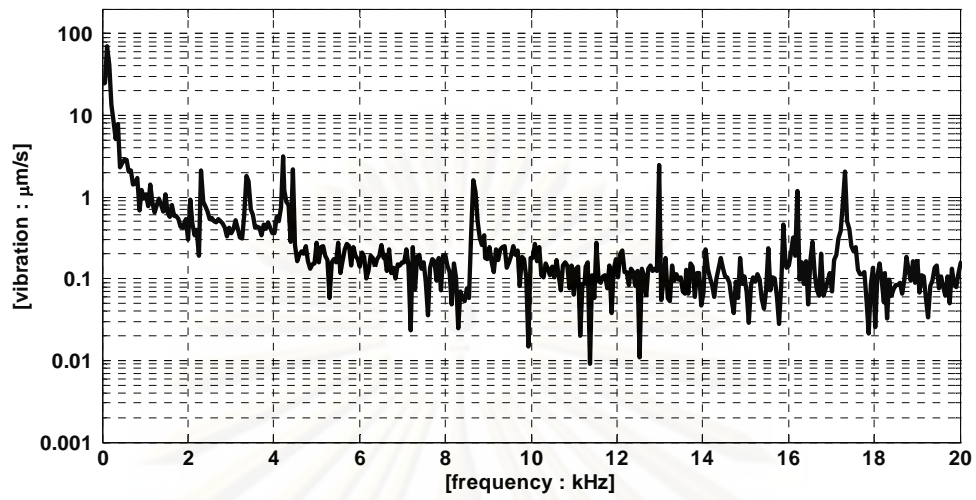


(ก) ตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม

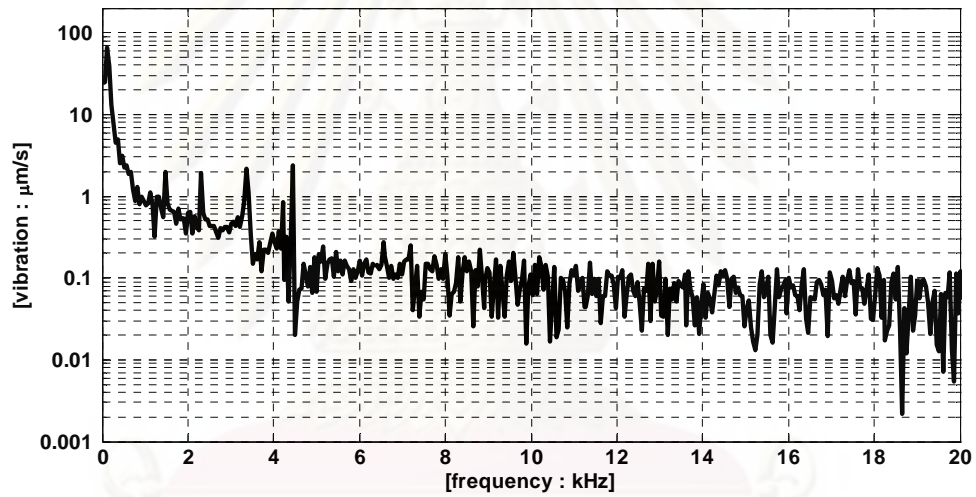


(ข) ตัวขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ใช้วงจรขยายเชิงเส้น

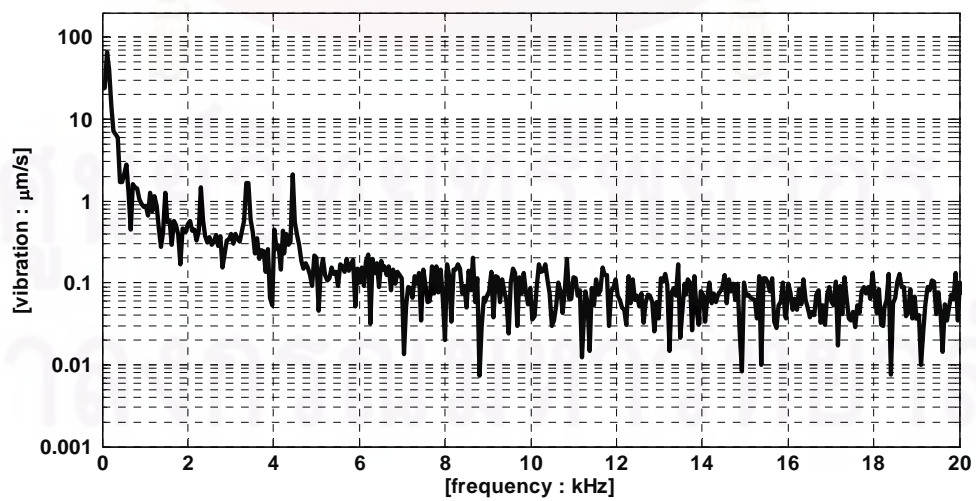
(ค) ตัวขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ใช้อินเวอร์เตอร์ PWM รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกลที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ณ ตำแหน่ง A

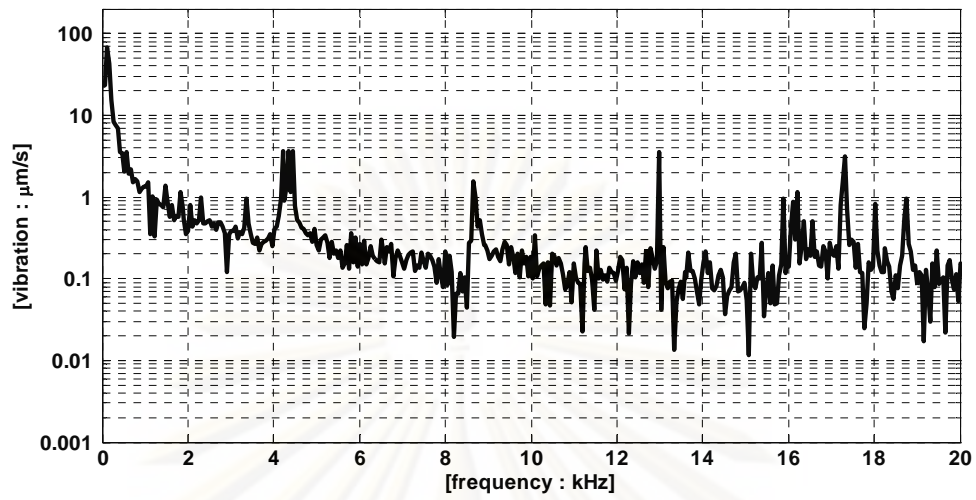


(ก) ตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม

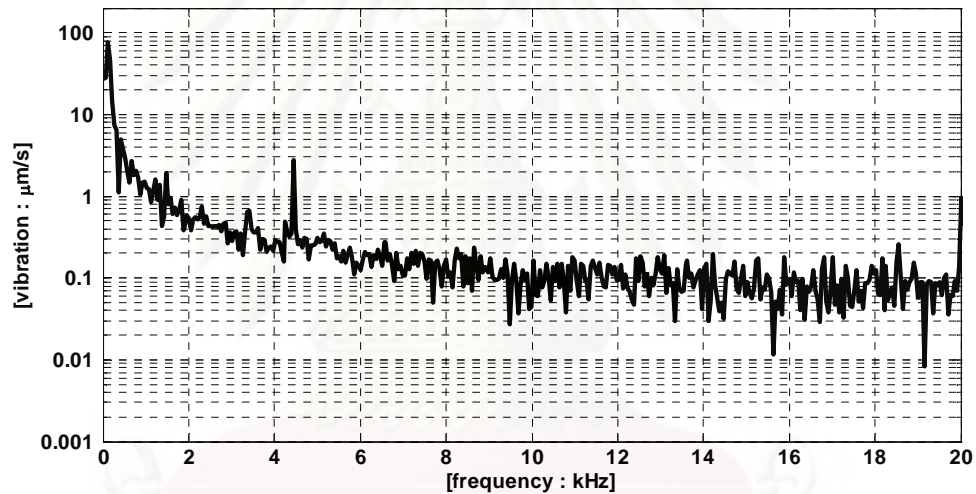


(ข) ตัวขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ใช้วงจรถยายเชิงเส้น

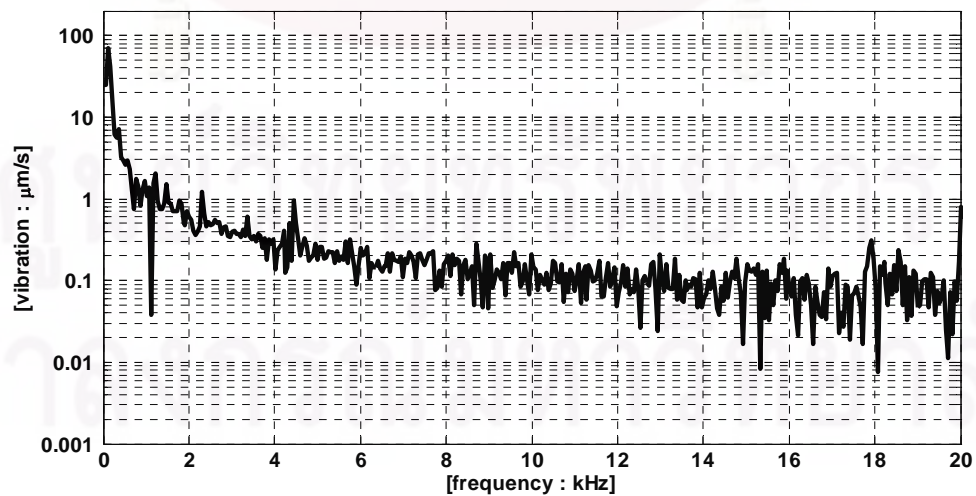
(ค) ตัวขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ใช้อินเวอร์เตอร์ PWM รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกลที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ณ ตำแหน่ง B

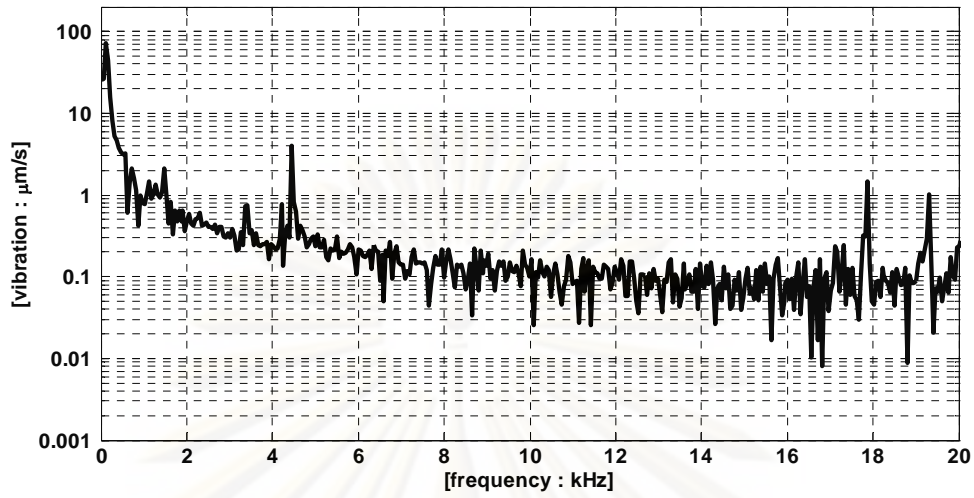


(ก) ตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม

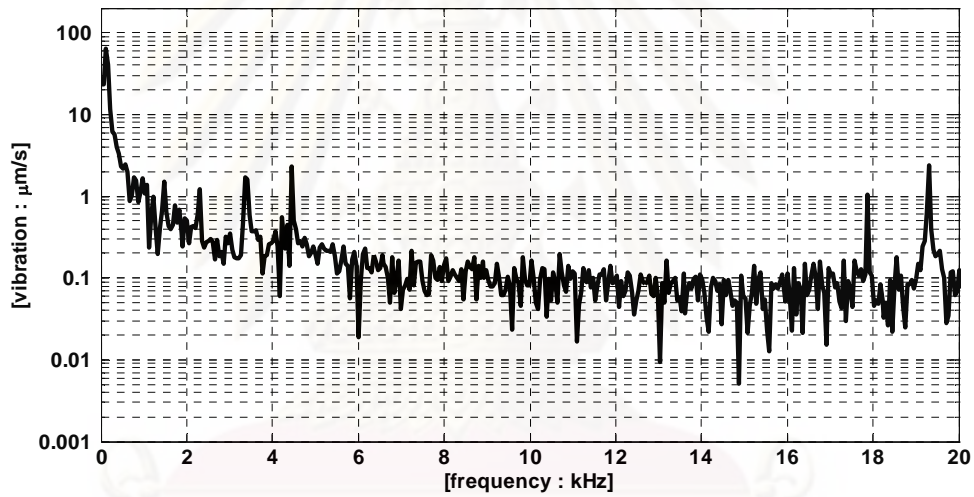


(ข) ตัวขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ใช้งานจรขยายเชิงเส้น

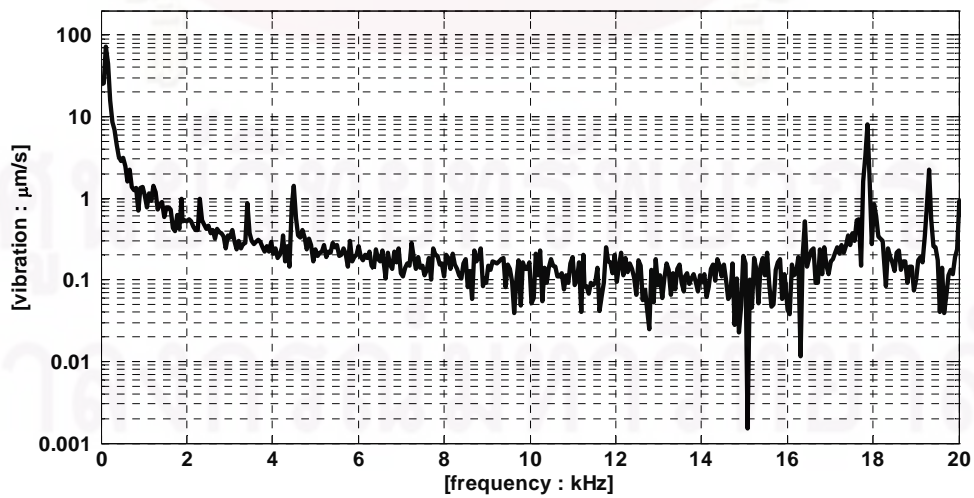
(ค) ตัวขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ใช้อินเวอร์เตอร์ PWM รูปที่ 4.5 สเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกลที่ $\omega_m^* = 7200$ rpm ณ ตำแหน่ง C



(ก) ตำแหน่ง A

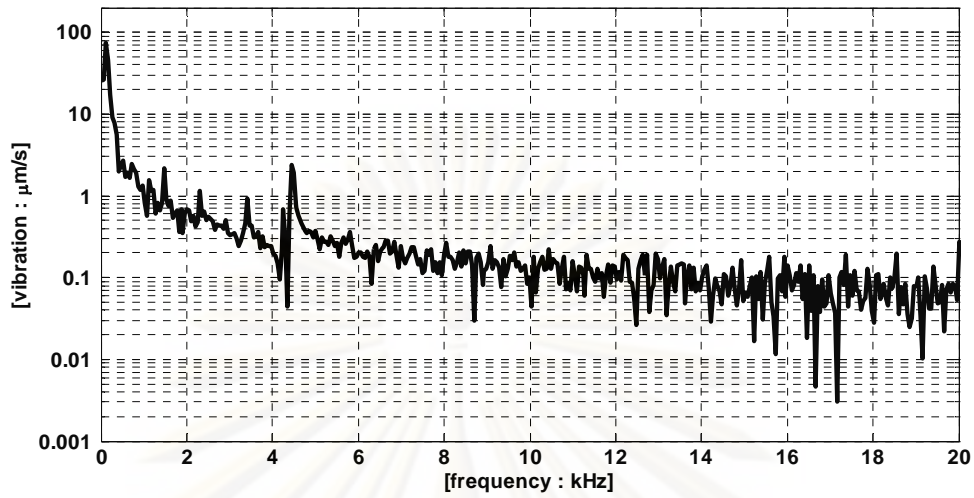


(ข) ตำแหน่ง B

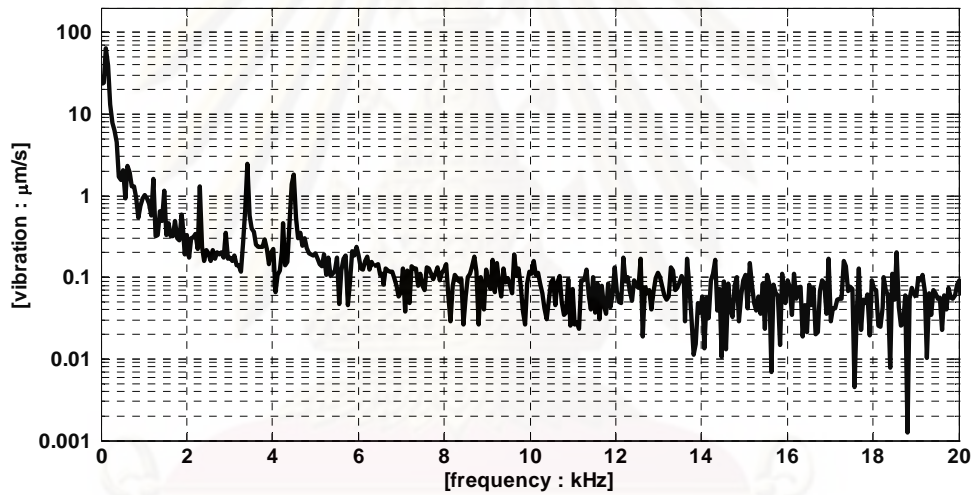


(ค) ตำแหน่ง C

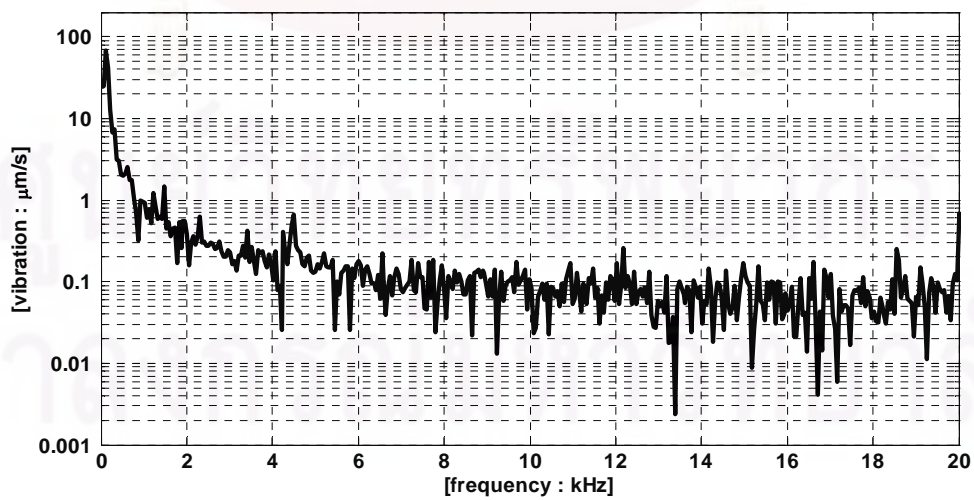
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกลที่ $f_{sw} = 20$ kHz และความเร็ว $\omega_m^* = 7200$ rpm



(ก) ตำแหน่ง A

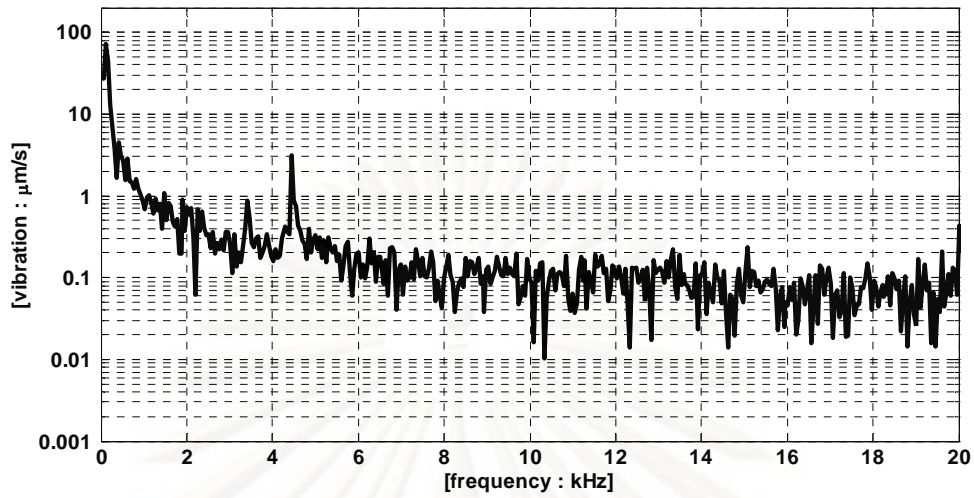


(ข) ตำแหน่ง B

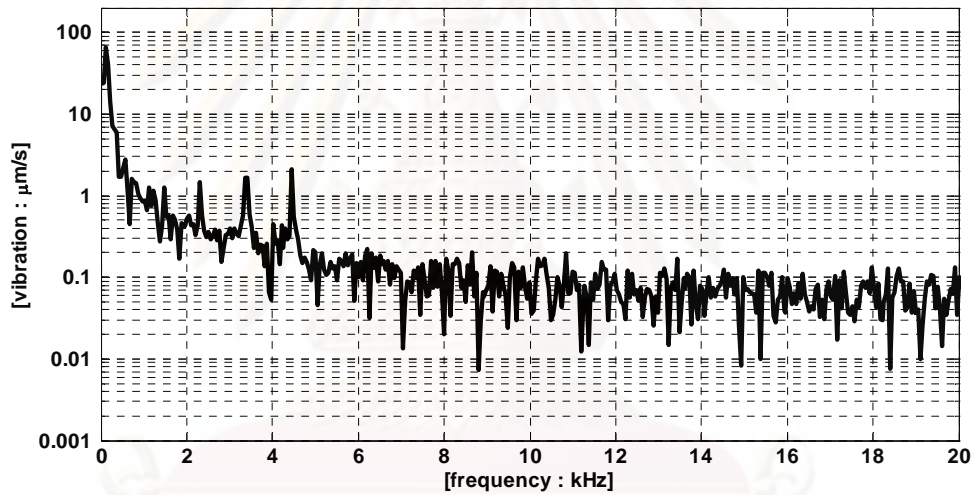


(ค) ตำแหน่ง C

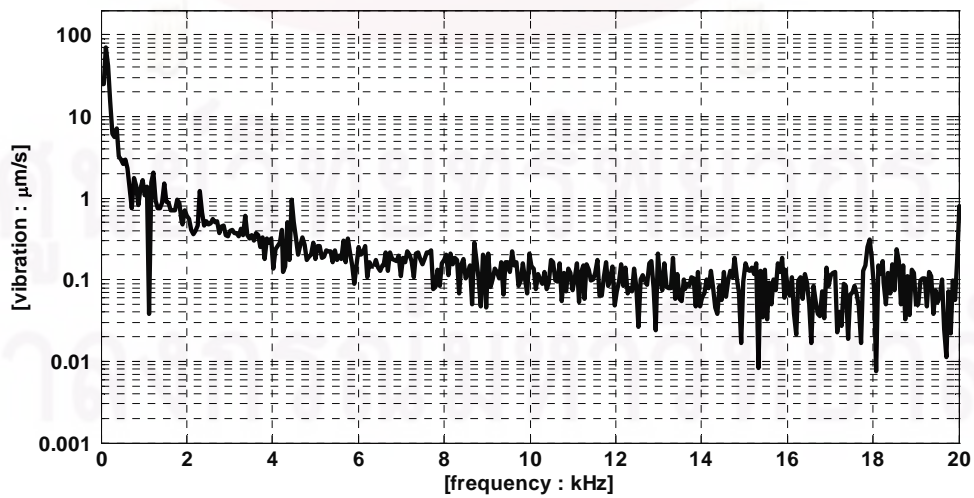
รูปที่ 4.7 สเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกลที่ $f_{sw} = 30$ kHz และความเร็ว $\omega_m^* = 7200$ rpm



(ก) ตำแหน่ง A

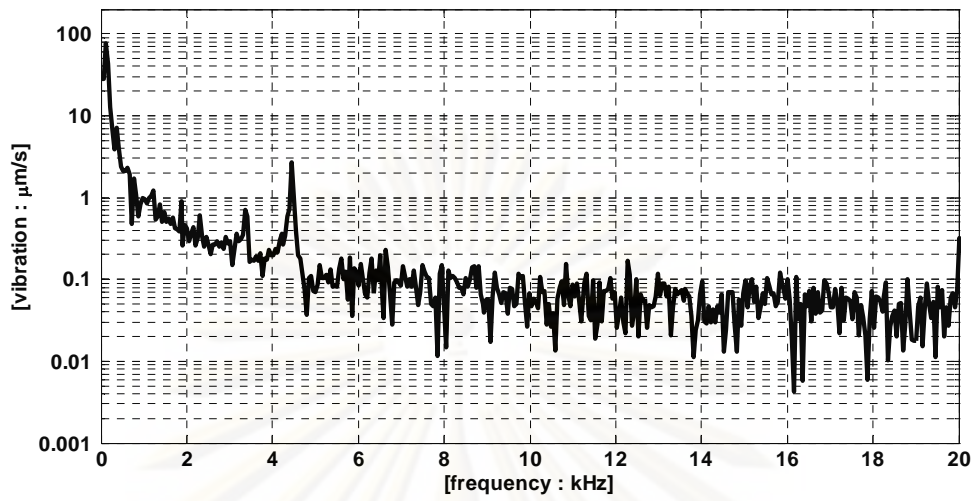


(ข) ตำแหน่ง B

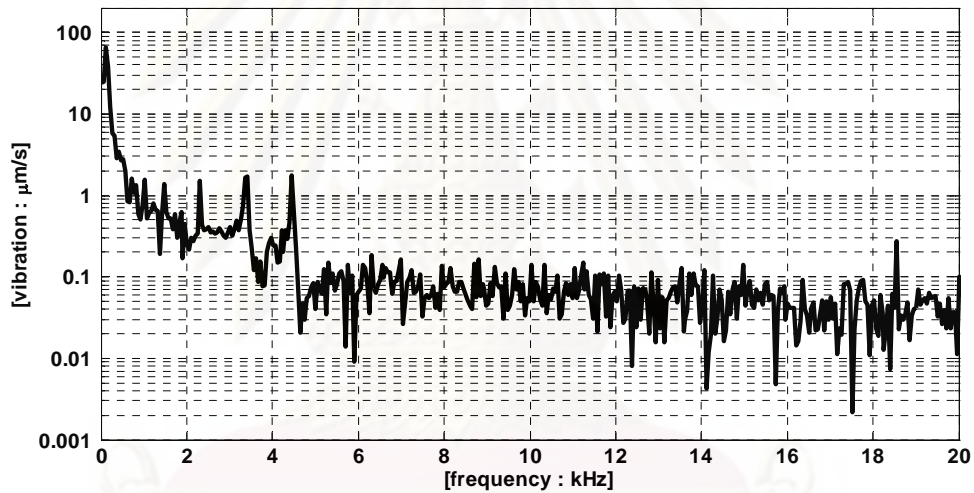


(ค) ตำแหน่ง C

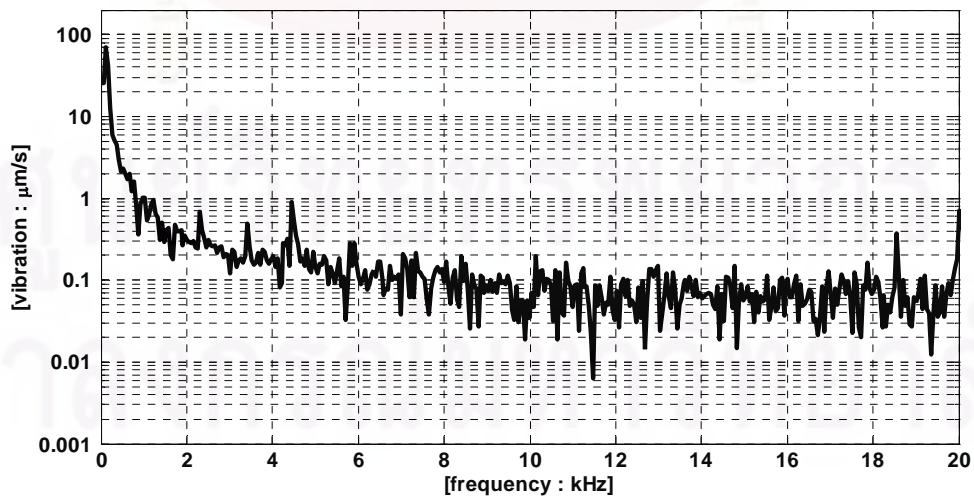
รูปที่ 4.8 สเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกลที่ $f_{sw} = 40$ kHz และความเร็ว $\omega_m^* = 7200$ rpm



(ก) ตำแหน่ง A

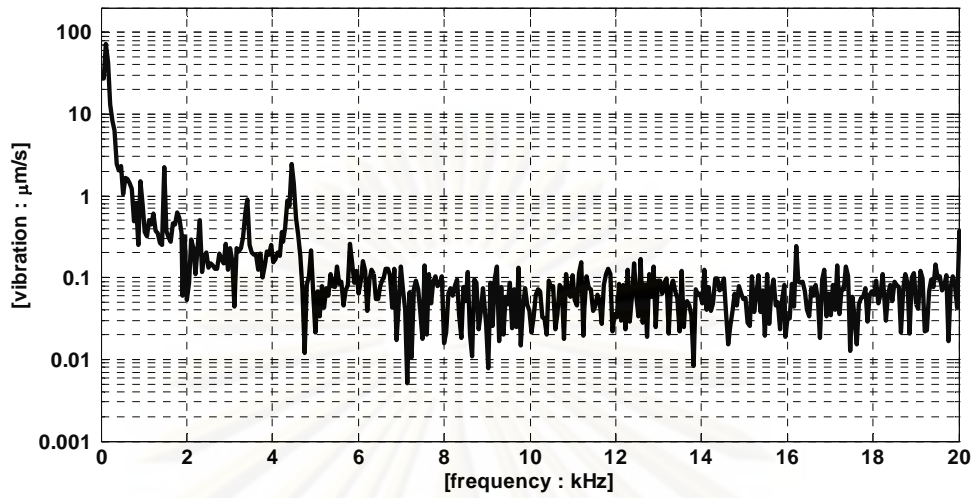


(ข) ตำแหน่ง B

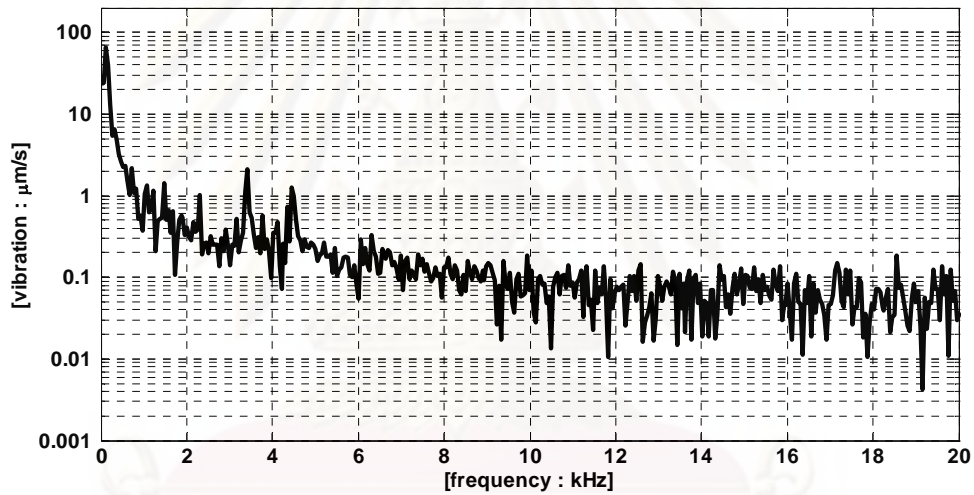


(ค) ตำแหน่ง C

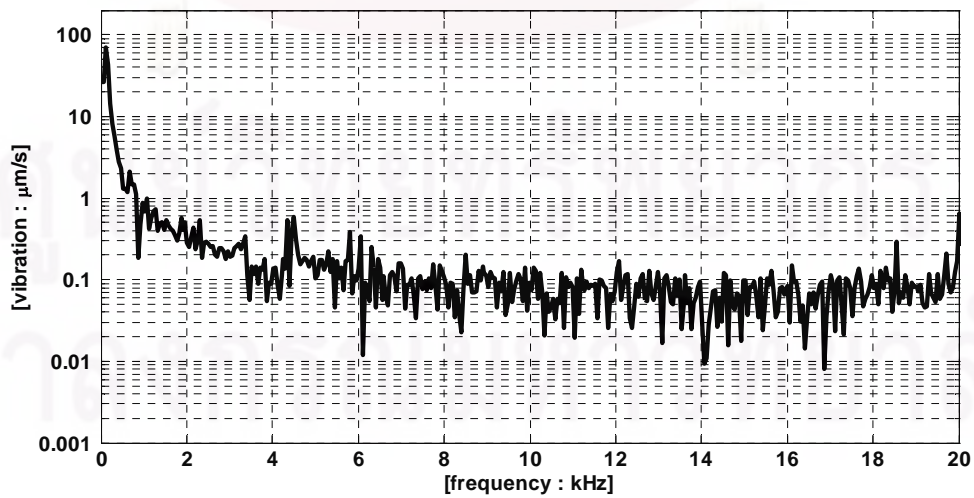
รูปที่ 4.9 สเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกลที่ $f_{sw} = 60$ kHz และความเร็ว $\omega_m^* = 7200$ rpm



(ก) ตำแหน่ง A



(ข) ตำแหน่ง B



(ค) ตำแหน่ง C

รูปที่ 4.10 สเปกตรัมของการสั่นสะเทือนทางกลที่ $f_{sw}=80$ kHz และความเร็ว $\omega_m^* = 7200$ rpm

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการขับเคลื่อนมอเตอร์สปีนเดิลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยมีข้อสรุปดังนี้

1) ผลการศึกษาและวิจัยได้ชี้ให้เห็นว่าในปัจจุบันมอเตอร์สปีนเดิลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้เปลี่ยนจากมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่มีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมคางหมูมาเป็นมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่มีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเป็นรูปคลื่นไซน์ การเปลี่ยนแปลงนี้จะต้องพัฒนาตัวขับเคลื่อนที่เหมาะสมและสอดคล้องกับมอเตอร์ซิงโครนัส เพื่อหลีกเลี่ยงการสั่นสะเทือนทางกลจากตัวขับเคลื่อน

2) พัฒนาตัวขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งที่ใช้อินเวอร์เตอร์ PWM การลดทอนการสั่นสะเทือนทางกลทำได้โดยตัวขับเคลื่อนจะควบคุมกระแสของมอเตอร์ให้เป็นรูปคลื่นไซน์ ซึ่งจะสอดคล้องกับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่แรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านโรเตอร์มีการกระจายเป็นฟังก์ชันไซน์ตามตำแหน่งเชิงมุม

3) ผลการทดสอบการสั่นสะเทือนทางกลแสดงให้เห็นถึงการลดทอนการสั่นสะเทือนทางกลอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อขับเคลื่อนมอเตอร์สปีนเดิลด้วยตัวควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งที่พัฒนาขึ้น และเป็นการลดต้นเหตุหนึ่งของการกำเนิดเสียงรบกวนอันเนื่องมาจากการสั่นสะเทือนทางกลได้

4) ระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งมีสมรรถนะในการขับเคลื่อนที่ดี โดยสามารถเริ่มต้นออกตัวและเร่งความเร็วเข้าสู่ค่าความเร็วคำสั่ง 7200 rpm ได้อย่างรวดเร็ว และควบคุมความเร็วได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

ข้อเสนอแนะ

1) จากการทดลองการควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งด้วยอินเวอร์เตอร์ PWM จะพบว่าขณะลดความเร็วมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันบัสไฟตรงทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์เพราะมีกระแสจากมอเตอร์ไหลกลับไปชาร์จตัวเก็บประจุทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์จึงทำให้แรงดันบัสไฟตรงเพิ่มขึ้นซึ่งมีผลต่อการทำงานของระบบควบคุมของตัวสั่งเกตต์เอ็มแอนด์บีเพราะแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงในแบบจำลองเป็นค่าคงที่ 12 V ถ้าแรงดันบัสไฟตรงจริงที่ด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์เปลี่ยนแปลงจะทำให้มอเตอร์ได้รับแรงดันผิดพลาด ซึ่ง

แรงดันที่เพิ่มขึ้น 2 V หรือประมาณ 17% นั้นจึงมีนัยสำคัญมากในการทำงาน ดังนั้นถ้าต้องการลดปัญหาดังกล่าวควรมีการตรวจจับแรงดันบัสไฟตรงทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับแบบจำลอง

2) ข้อจำกัดที่เกิดจากอุปกรณ์สวิตช์กำลัง(มอสเฟต)ในภาคกำลังของอินเวอร์เตอร์และแรงดันบัสไฟตรงที่ใช้งาน เนื่องจากแรงดันตกคร่อมมอสเฟตที่ใช้เป็นสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์มีค่าประมาณ 1 V จึงทำให้เกิดปัญหาขึ้นเพราะแรงดันบัสไฟตรงที่ใช้งานในอินเวอร์เตอร์มีค่าเพียง 12 V (ระดับแรงดันจริงที่ใช้งานในตัวขับเคลื่อนมอเตอร์สปีนเดิลของอุตสาหกรรม) ระดับแรงดันตกคร่อมมอสเฟตดังกล่าวจะมีนัยสำคัญในระบบควบคุมที่ใช้แรงดันบัสไฟตรงต่ำๆ ดังนั้นควรเลือกมอสเฟตที่มีค่าความต้านทานภายในต่ำเพื่อลดแรงดันตกคร่อมมอสเฟต



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] จูติมา จินตนาวัน. การสั่นสะเทือนทางกลของระบบคอมพิวเตอร์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Mechanical Vibration of Computer Hard Disk Drives (HDD)). วารสารสมาคมวิชาการหุ่นยนต์ไทย 1 (2544)
- [2] สาคร โพธิ์งาม. การขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งแบบใหม่โดยอิงแบบจำลองเชิงเส้น, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [3] Bi, C., Guo, G. and Al Mamun, A., Hard Disk Drive Mechatronics and Control. CRC Press, 2007.
- [4] Jahns, T., and Soong, L. W. Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives – A Review. IEEE Trans. Ind. Electron 43(1996): 321-330.
- [5] Jahns, T. Motion Control with Permanent-Magnet AC Machines. IEEE Proc 82 (1994): 1241-1252.
- [6] Islam, M. S., Mir, S., Sebastian, T. and Underwood, S. Design Considerations of Sinusoidally Excited Permanent-Magnet Machines for Low-Torque-Ripple Applications. IEEE Trans. Ind. Applications 41 (Jul.-Aug. 2005): 955-962.
- [7] Perriard, Y., Koechli, C. and Cardoletti, L. Noise Reduction for Brushless DC Motor – Sensorless Control Analysis and Back EMF Shape Modification. Proc. of 28th IEEE Annual Conference of the Industrial Electronics Society, (IECON'02), pp. 1038-1043. 2002.
- [8] Murai, Y., Kawase, Y., Ohashi, K., Nagatake, K. and Okuyama, K. Torque Ripple Improvement for Brushless DC Miniature Motors. IEEE Trans. Ind. Applications 25 (May-Jun. 1989): 441-450.
- [9] Brackley, M. and Pollock, C. Analysis and Reduction of Acoustic Noise from a Brushless DC Drive. IEEE Trans. Ind. Applications 36 (May-Jun. 2000): 772-777.
- [10] Hung, J. Y. and Ding, Z. Design of Currents to Reduce Torque Ripple in Brushless Permanent Magnet Motors. IEE Proceedings-B 140 (July, 1993): 260-266.

- [11] Park, S. J., Park, H. W., Lee, M. H. and Harashima, F. A New Approach for Minimum-Torque-Ripple Maximum-Efficiency Control of BLDC Motor. IEEE Trans. Ind. Electron 47 (Feb. 2000): 109-114.
- [12] Bi, C., Jiang, Q., Lin, S., Low, T. S. and Mamun, A. A. Reduction of Acoustic Noise in FDB Spindle Motors by Using Drive Technology. IEEE Trans. Magn. 39 (Mar. 2003): 800-805.
- [13] Lin, S., Jiang, Q., Mamun, A. A. and Bi, C. Effect of Drive Modes on the Acoustic Noise of Fluid Dynamic Bearing Spindle Motors. IEEE Trans. Magn. 39 (Sep. 2003): 3277-3279.
- [14] El-Sadi, A. L. Switch Mode Sine Wave Driver for Polyphase Brushless Permanent Magnet Motor. U.S. Patent 5 798 623 (Aug. 1998).
- [15] White, B. J. Method and Apparatus for Driving a Polyphase, Brushless DC Motor. U.S. Patent 6 236 174 B1 (May, 2001).
- [16] Sangwongwanich, S., Suwankawin, S., Po-ngam, S. and Koonlaboon, S. A Unified Speed Estimation Design Framework for Sensorless AC Motor Drives Based on Positive-Real Property. Proc. PCC (Apr. 2007): 1111 – 1118.
- [17] Vijayraghavan, P., and Krishnan, R. Noise in electric machines: a review. Industry Applications IEEE Transactions 35 (Sept.-Oct. 1999): 1007 – 1013.
- [18] Hendershot, R. J. and Miller, T. J. E. Design of Brushless Permanent-Magnet Motors, Magna Physics and Oxford Science Publications, 1994.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบ พารามิเตอร์และพิกัดของมอเตอร์

ฮาร์ดแวร์ของระบบ

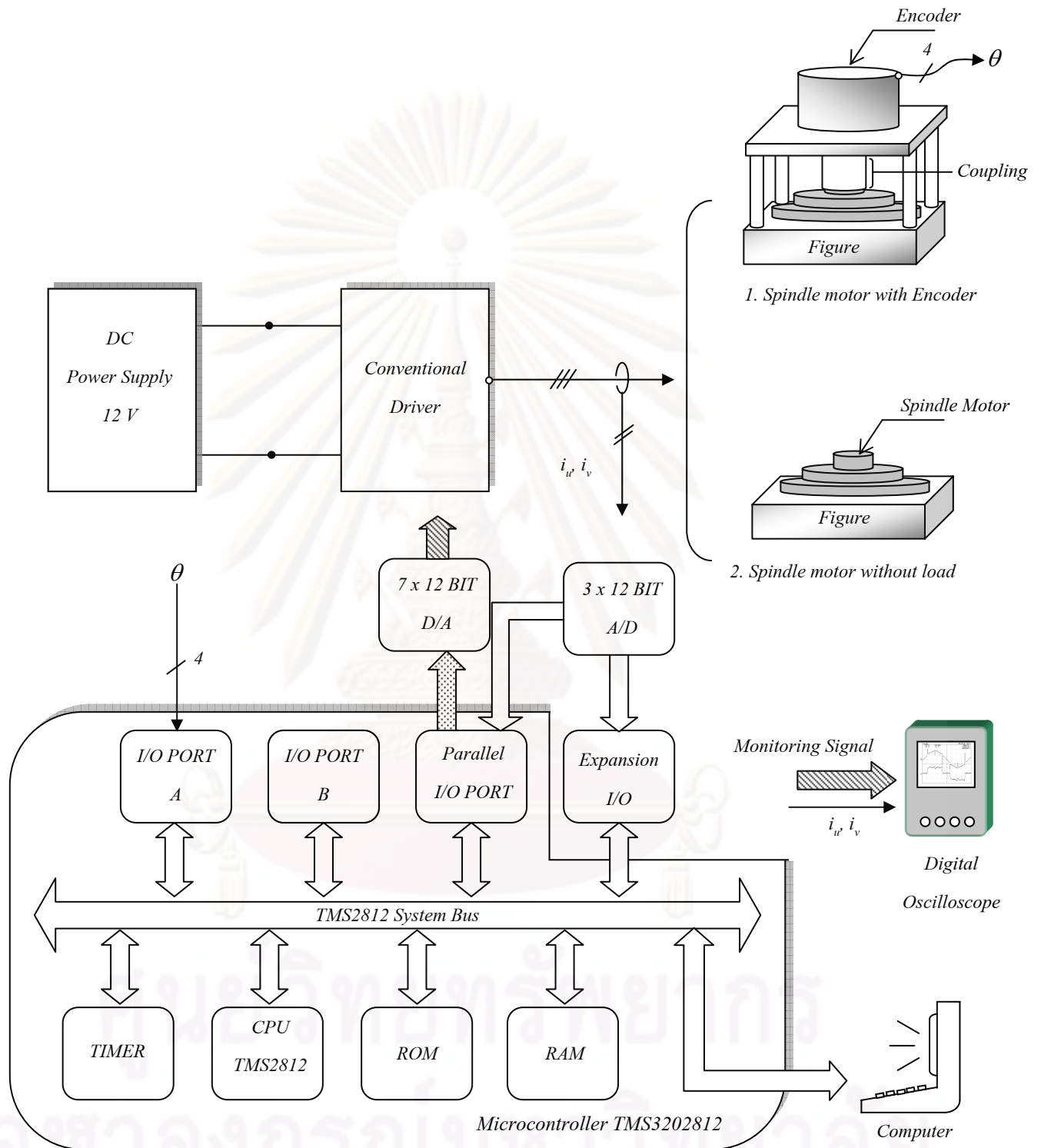
การทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมได้แบ่งออกเป็น 3 แบบดังตารางที่ 1 ดังนั้นฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบจึงออกแบบไว้ 3 ชุดโดยมีส่วนประกอบร่วมกันคือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งทำหน้าที่คำนวณและประมวลผลคำสั่งต่างๆ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้เป็นตระกูล TMS3202812 ที่เชื่อมต่ออยู่กับคอมพิวเตอร์และมอเตอร์สปีนเดลซึ่งได้ออกแบบการทดสอบไว้ 3 แบบคือ 1) มีตัวเข้ารหัส 2) ไม่มีตัวเข้ารหัส และไม่มีแผ่นข้อมูล 3) มีแผ่นข้อมูล โดยการทดสอบตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมจะเฉพาะแบบที่ 1 และ 2 ส่วนตัวขับเคลื่อนแบบใหม่จะทดสอบทั้งหมดสามแบบ ส่วนสุดท้ายส่วนแสดงผลสัญญาณโดยให้ออสซิลโลสโคปซึ่งเชื่อมวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกจะเก็บข้อมูลต่างๆ เพื่อนำไปแสดงผลต่อไป

ฮาร์ดแวร์เพิ่มเติมการทดสอบตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมจะใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 12 V เพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมดังรูปที่ ก.1 และเมื่อทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์สปีนเดลแบบมีตัวเข้ารหัสจะส่งข้อมูลไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อแปลงเป็นความเร็วรอบโดยใช้ซอฟต์แวร์เดียวกับตัวขับเคลื่อนแบบใหม่

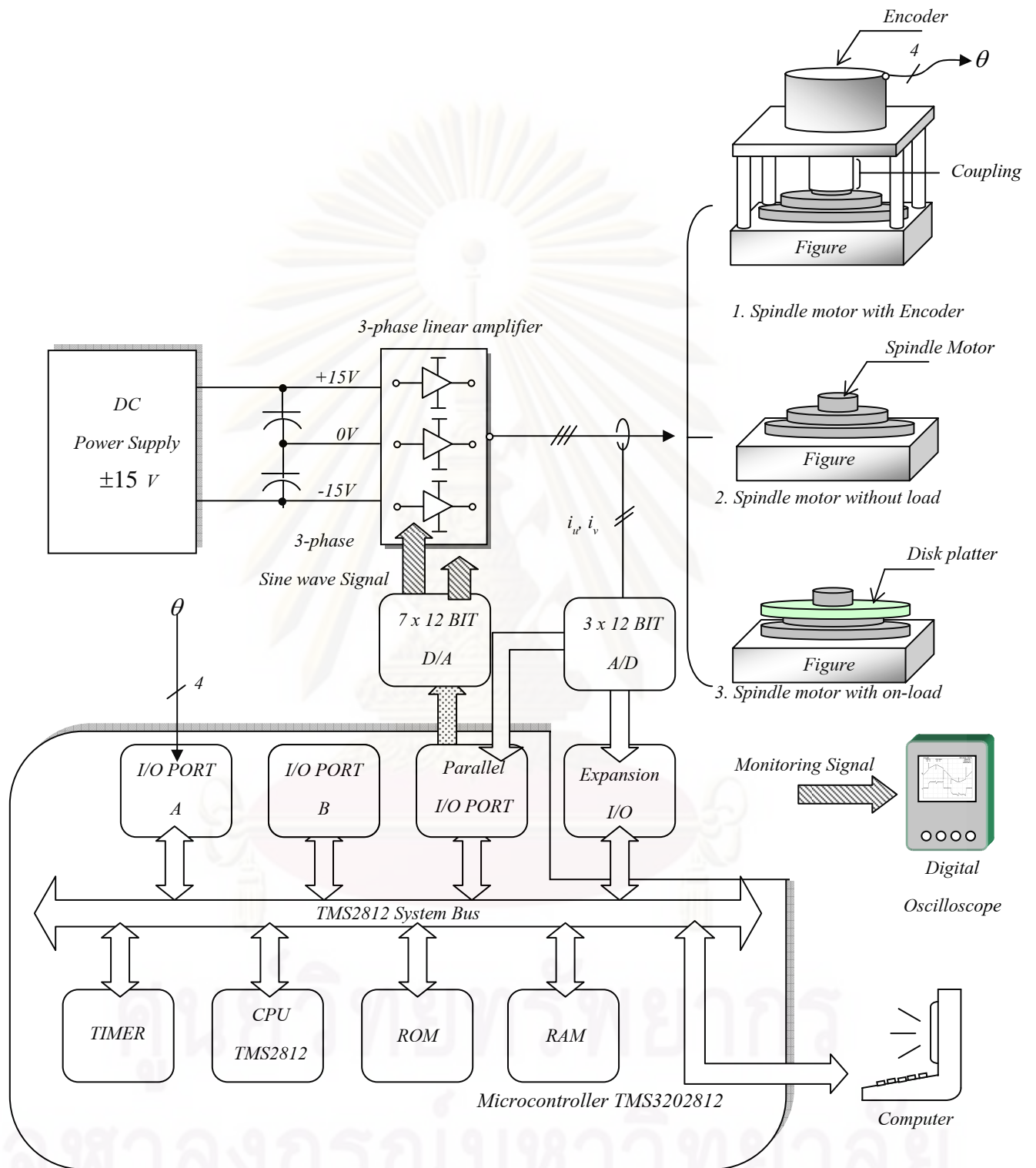
ดังรูปที่ ก.2 ส่วนตัวขับเคลื่อนแบบใหม่ที่ใช้วงจรขยายเชิงเส้นจะใช้แหล่งจ่ายแรงดัน ± 15 V ในภาคกำลังจะใช้วงจรขยายเชิงเส้นโดยจะรับสัญญาณที่คำนวณได้จากวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกที่เชื่อมต่ออยู่กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนของการตรวจจับกระแสและมุมของโรเตอร์จะนำเข้ายังอินพุตพอร์ต A และ B ตามลำดับ ส่วนตัวขับเคลื่อนแบบใหม่ที่ใช้อินเวอร์เตอร์ PWM ใช้แหล่งจ่ายแรงดัน 12 V ดังรูปที่ ก.3 ในส่วนของภาคกำลังนั้นจะใช้อินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสซึ่งใช้มอสเฟสเป็นอุปกรณ์สวิตช์โดยสัญญาณขับนำจะได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีการแยกโดด (isolated) โดยใช้บัฟเฟอร์ขับนำด้วยแสง และส่วนของการตรวจจับกระแสและมุมของโรเตอร์จะเหมือนกับตัวขับเคลื่อนแบบใหม่ที่ใช้วงจรขยายเชิงเส้น

พารามิเตอร์และพิกัดของมอเตอร์

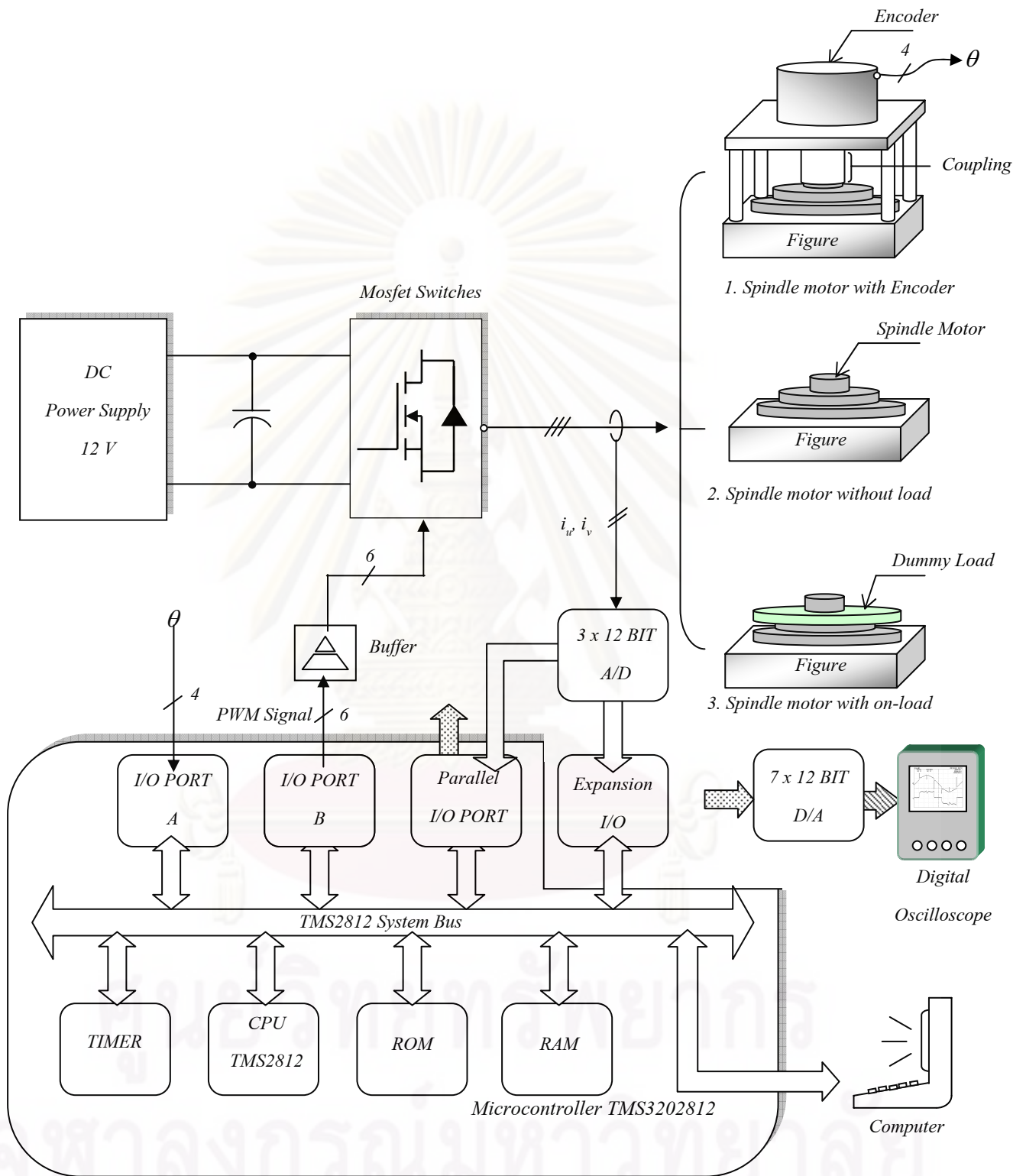
แรงบิดพิกัด	:	3.303 mNm	กระแสพิกัด	:	500 mA
ความเร็วพิกัด	:	7200 rpm	ขั้วแม่เหล็ก	:	12 poles
ค่าความต้านทาน	:	1.743 Ω	ค่าความเหนี่ยวนำ	:	0.426 mH
ค่าฟลักซ์แม่เหล็ก	:	1.101 mWb			



รูปที่ ก.1 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบเมื่อใช้ตัวขับเคลื่อนแบบดั้งเดิม



รูปที่ ก.2 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้วงจรถยายเชิงเส้น



รูปที่ ก.3 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ PWM

ภาคผนวก ข

บทความตีพิมพ์

พูนลาภ เมฆเข็มทอง, สุรพงศ์ สุวรรณกวิน และ สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์. ตัวขับเคลื่อนแบบ
เวกเตอร์ไรเซนเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับมอเตอร์สปีนเดิลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อลดทอนการ
กระเพื่อมของแรงบิดและการสั่นสะเทือนทางกล. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่
32 1(2552): 491-494.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพูนลาภ เมฆเข็มทอง เกิดเมื่อวันที่ 10 พฤศจิกายน พุทธศักราช 2526 ที่ อ.เมือง จ.อุตรดิตถ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า(เกียรตินิยมอันดับสอง) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเมื่อปีการศึกษา 2549 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550 ปัจจุบันได้ทำงานในตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้า 4 ที่แผนก ออกแบบระบบวงจรตาข่าย ฝ่ายออกแบบและควบคุมงาน การไฟฟ้านครหลวง



ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย