

การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมความเร็วและแรงบิดของสเตปป์มอเตอร์ที่มีการหมุน
อย่างต่อเนื่อง

DESIGN AND DEVELOPMENT OF SPEED-TORQUE CONTROL SYSTEM FOR
CONTINUOUS ROTATING STEPPING MOTOR



นายไสว พงศ์สวัสดิ์

MR. SAWAI PONGSWATD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหน้.....

เลขทะเบียน..... 30952

วัน, เดือน, ปี..... 4 ก.ย. 2541

พ.ศ. 2541

ISBN 974-622-213-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DESIGN AND DEVELOPMENT OF SPEED-TORQUE CONTROL SYSTEM FOR
CONTINUOUS ROTATING STEPPING MOTOR**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENT FOR THE DEGREE
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

1998

ISBN 974-622-213-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมความเร็วและแรงบิด
ของสเตปป์มอเตอร์ที่มีการหมุนอย่างต่อเนื่อง

นักศึกษา

นายไสว พงศ์สวัสดิ์

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ. กิตติ ตีระเศรษฐ์

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม

ผศ. ประภาส อุคคกิมพันธ์

ระดับการศึกษา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.

2541

บทคัดย่อ

เทคนิคการกระตุ้นสเตปป์มอเตอร์ในรูปแบบของกระแสชาน์แบบลูปิดที่ได้พัฒนาขึ้น ทำให้สเตปป์มอเตอร์หมุนได้อย่างราบเรียบและต่อเนื่องเทียบเคียงได้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แต่เมื่อนำมอเตอร์นี้ไปใช้ในสภาวะที่มีการะงาน จะไม่สามารถควบคุมงานความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ให้มีค่าตามที่ต้องการ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ เพื่อควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ให้มีค่าตามที่ต้องการ ในการควบคุมแรงบิดนั้น จะใช้การควบคุมกระแสกระตุ้นแบบลูปิดย่อยควบคุมขนาดของสัญญาณรูปคลื่นชาน์และ โคลชาน์ของกระแสกระตุ้นของมอเตอร์ เพื่อให้มอเตอร์มีค่าแรงบิดที่เหมาะสมกับขนาดของภาระงานที่มอเตอร์ได้รับ และใช้ฟังก์ชันการควบคุมแบบ Proportional + Integral ในลูปิดควบคุมหลักเพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้มีค่าคงที่ตามที่ต้องการ โดยในการทดลองจะใช้ภาระงานจำลองแบบกระแสไหลวน (Eddy Current Break) เป็นภาระงานในการทดลองระบบควบคุมความเร็ว ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมที่ออกแบบไว้สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้มีค่าคงที่ได้ในสภาวะที่มอเตอร์มีการะงานขนาดต่าง ๆ และระบบขับเคลื่อนกับระบบควบคุมที่ได้ออกแบบไว้สามารถจะประยุกต์นำไปใช้งานแทนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ นอกจากนี้ยังมีข้อดีคือ มอเตอร์จะมีขนาดเล็กและไม่มีแปรงถ่าน จึงลดการซ่อมบำรุงในส่วนองแปรงถ่าน อีกทั้งยังทนต่อกระแสขับเคลื่อนต่อเนื่องได้สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Design and Development of Speed-Torque Control System for Continuous Rotating Stepping Motor
Student	Mr. Sawai Pongswatd
Thesis Advisor	Associate Prof. Kitti Tirasesth
Thesis Co Advisor	Assistant Prof. Prapart Ukakimaparn
Level of Study	Master of Engineering in Electrical Engineering
Year	1998

Abstract

Applying the closed-loop sinusoidal current ministep technique which is developed, the revolution of the stepping motor is smooth and continuously with similar to general dc motor. However, with load applied, the speed and torque of this motor could not be controlled as desired. This thesis presents a design and development technique of the driving system in order to control the speed and torque of this motor separately. For the appropriate torque with corresponding to the load applied to be controlled, the inner loop control of the exciting current is used to control the amplitude of the sine and cosine signal in the driver system of the motor. The PI action (proportional + integral) in the outer loop is used to control the speed of the motor to the desired value. From the test results of this motor with several values of eddy current break loads, the speed of this motor can be accurately controlled as desired. It also shown from the test results that the control system with this driving system and it controller could also being used instead of the general DC motor control system. Moreover, since this motor is brushless, so the maintenance free and smaller size of the motor is realizable. The another advantage of this motor is that the high continuous driving current could be applied with low noise.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับการช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จาก หลายท่านด้วยกัน ซึ่งผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ กิตติ ศิริเศรษฐ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้ความกรุณาแนะนำเกี่ยวกับการเรียนและการทำวิจัย รวมถึงการกระตุ้นเตือนและสอบถามความคืบหน้าของงานวิจัยอย่างสม่ำเสมอ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประภาส อุดคคิมพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่คอยกระตุ้นเตือนและให้คำแนะนำทางด้านการออกแบบ และพัฒนาทางด้านฮาร์ดแวร์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ พิพัฒน์ เลาหสงคราม ที่ให้การดูแลเอาใจใส่และให้คำปรึกษาทั้งในส่วนวิชาการและงานเอกสารต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัยและการสนับสนุนเกี่ยวกับเครื่องมือเครื่องใช้มาโดยตลอด อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาที่คอยให้กำลังใจและคำปรึกษาเป็นอย่างดี

ที่สำคัญที่สุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ที่เคารพรักยิ่งตลอดถึงญาติพี่น้องทุกๆ ท่าน ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกท่าน ที่เป็นกำลังใจและมีส่วนร่วมในการทำวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้

ไสว พงศ์สวัสดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีเกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้า.....	3
2.1 หลักการทำงานของสเตปป์มอเตอร์.....	5
2.1.1 คุณลักษณะทางสถิตย์ (Static Characteristics).....	6
2.1.2 คุณลักษณะทางพลวัต (Dynamic Characteristic).....	7
2.2 ประเภทของสเตปป์มอเตอร์.....	9
2.2.1 สเตปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Stepping Motor).....	9
2.2.2 สเตปป์มอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้ (Variable Reluctance Stepping Motor).....	10
2.2.3 สเตปป์มอเตอร์แบบไฮบริดจ์ (Hybrid Stepping Motor).....	11
2.3 วงจรขับสำหรับสเตปป์มอเตอร์.....	13
2.3.1 การใช้ตัวต้านทานต่ออนุกรมกับวงจรขับ.....	14
2.3.2 การใช้วงจรขับแบบใช้แรงดันไฟฟ้าสองระดับ.....	16
2.3.3 การใช้วงจรขับแบบชอปเปอร์.....	17
2.3.4 การใช้วงจรขับแบบบริดจ์.....	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3. อุปกรณ์ต่อร่วมในระบบควบคุมมอเตอร์.....	20
3.1 เทคโคเจนเนอเรเตอร์ (Tachogenerator).....	20
3.2 ตัวเข้ารหัสแบบเพิ่มค่า (Incremental Encoder).....	21
บทที่ 4. การออกแบบและพัฒนา.....	24
4.1 หลักการทำงานของระบบขับเคลื่อน.....	24
4.1.1 ส่วนของการขับเคลื่อนมอเตอร์ (Motor Drive).....	25
4.1.2 ส่วนตัวเข้ารหัสและสเตปป์มอเตอร์ (Encoder&Stepping Motor).....	28
4.2 การออกแบบระบบควบคุมความเร็ว โดยการควบคุมค่ากระแสกระตุ้น.....	30
4.2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Motor).....	32
4.2.2 ตัวควบคุมแบบ PI (PI Controller).....	32
4.2.3 วงจรมัลติพลายเออร์ (Multiplier Circuit).....	34
4.2.4 ตัวเข้ารหัส (Encoder).....	35
4.2.5 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า (F/V Converter).....	35
4.2.6 การภาระงาน (Load).....	36
4.3 การออกแบบระบบควบคุมความเร็ว โดยการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้า.....	37
บทที่ 5. การทดลองและผลการทดลอง.....	40
5.1 การทดลองผลการตอบสนองทางความเร็ว	40
5.1.1 การทดลองโดยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรขับเคลื่อน และคงค่ากระแสกระตุ้น.....	41
5.1.2 การทดลองโดยการปรับค่ากระแสกระตุ้นในวงจรขับเคลื่อน และคงค่าแรงดันไฟฟ้า.....	42
5.2 การทดลองการทำงานของระบบควบคุมความเร็ว	44
5.2.1 การทดลองระบบควบคุมความเร็ว โดยการควบคุมค่ากระแสกระตุ้น.....	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.2 การทดลองระบบควบคุมความเร็ว โดยการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้า.....	46
5.2.3 การทดลองระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้า.....	47
5.2.4 การทดลองผลการตอบสนองทางความเร็วของระบบควบคุม ต่อการเปลี่ยนแปลงสเตปอินพุต.....	49
บทที่ 6. บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	51
บรรณานุกรม.....	53
ภาคผนวก.....	54
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์.....	55
บทความวิจัยในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบัน ครั้งที่ 18. เรื่อง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่มีแปรงถ่านโดยใช้สเตปปีงมอเตอร์.....	56
บทความวิจัยใน วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิตกิตติมศักดิ์ เรื่อง การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่มีแปรงถ่าน โดยใช้สเตปปีงมอเตอร์เป็นกรณีศึกษา.....	62
ภาคผนวก ข รายละเอียดข้อมูลของไอซีเบอร์ TL 494.....	71
ประวัติผู้เขียน.....	82

สารบัญภาพ

	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	3
2.2 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ.....	4
2.3 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ตัวหมุนเป็นแม่เหล็กถาวร.....	4
2.4 แสดงการหมุนเป็นสเตป.....	5
2.5 แสดงการหมุนแบบต่อเนื่อง.....	5
2.6 แสดงกราฟคุณลักษณะของแรงบิดต่อมุมสเตป.....	7
2.7 แสดงความสัมพันธ์คุณลักษณะของแรงบิดต่อกระแส.....	7
2.8 แสดงกราฟคุณลักษณะทางพลวัตของสเตปปีงมอเตอร์.....	8
2.9 แสดงโครงสร้างของสเตปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรสี่เฟส.....	9
2.10 แสดงโครงสร้างของสเตปปีงมอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานสนามแม่เหล็กได้.....	10
2.11 แสดงตำแหน่งของสถานะที่สมมูลย์เมื่อเกิดการกระตุ้นที่เฟสใดเฟสหนึ่ง.....	11
2.12 แสดงภาพหน้าตัดของมอเตอร์สี่เฟส ที่มีฟันโรเตอร์ห้าสิบซี่มุมสเตป 1.8 องศา.....	11
2.13 แสดงโครงสร้างของสเตปปีงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์.....	12
2.14 แสดงภาพการวางโรเตอร์ตามยาวเพื่อใช้สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กชั่วคราว.....	12
2.15 แสดงหลักการทํางานของสเตปปีงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์.....	13
2.16 แสดงวงจรสมมูลย์ของสเตปปีงมอเตอร์.....	13
2.17 แสดงการใช้ความต้านทานต่ออนุกรมกับขดลวดของสเตปปีงมอเตอร์.....	14
2.18 แสดงการเพิ่มตัวเก็บประจุในแต่ละส่วนของวงจรจำกัดแรงดัน.....	15
2.19 แสดงผลการเพิ่มตัวเก็บประจุนานกับความต้านทาน.....	15
2.20 แสดงวงจรขับสเตปปีงมอเตอร์แบบแรงดันไฟฟ้าสองระดับ.....	16
2.21 แสดงวงจรขับแบบชอปเปอร์.....	17
2.22 แสดงวงจรขับแบบบริดจ์ สำหรับการขับแบบสองภาวะชั่ว.....	18
2.23 แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสของการขับสเตปปีงมอเตอร์แบบสองภาวะชั่ว.....	18
2.24 แสดงวงจรขับแบบบริดจ์อีกแบบหนึ่งซึ่งใช้แหล่งจ่ายไฟเดียว.....	19

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
3.1 แสดงลักษณะของเทคโคเจนเนอเรเตอร์ที่ต่อกับเพลาของมอเตอร์.....	20
3.2 แสดงตัวอย่างกลไกของการเพิ่มค่าโดยใช้แสง.....	21
3.3 แสดงถึงตัวตรวจจับแบบมีช่องปิดเปิดให้แสงผ่านได้ช่องเดียวและแบบมีหลายช่อง.....	21
3.4 แสดงถึงผลของแสงที่เดินในแนวเดียวกันและแสงที่แตกกระจาย.....	22
3.5 (ก) แสดงตัวอย่างลูกคลื่นเอาต์พุตที่เหลี่ยมของตัวเข้ารหัสช่องเดียวสองทิศทาง.....	23
(ข) แสดงตัวอย่างสัญญาณของตัวเข้ารหัสสองช่อง ที่มีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา.....	23
4.1 แสดงบล็อกการทำงานของระบบขับเคลื่อน.....	25
4.2 แสดงวงจรถอดรหัสสัญญาณชาแนลและโคชาแนล.....	26
4.3 แสดงลักษณะของสัญญาณชาแนลและโคชาแนลที่ได้จากวงจรถอดรหัส.....	26
4.4 แสดงลักษณะของสัญญาณชาแนลและโคชาแนลที่ได้จากการวัดในวงจรจริง.....	27
4.5 แสดงวงจรขับเคลื่อนแบบสองแกนขวาง.....	27
4.6 แสดงวงจรขับที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น.....	28
4.7 แสดงการติดตั้งสเตปมอเตอร์เข้ากับตัวเข้ารหัส.....	28
4.8 แสดงบล็อกไคอะแกรมของระบบควบคุมความเร็วโดยทั่วไป.....	30
4.9 แสดงบล็อกไคอะแกรมของระบบควบคุมความเร็วที่ได้ออกแบบไว้.....	31
4.10 แสดงสัญญาณของค่ารอบเวลาทำงานที่ได้จากการมอดูเลตตามความกว้าง.....	32
4.11 แสดงบล็อกไคอะแกรมของตัวควบคุมแบบ PI.....	33
4.12 แสดงเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ PI เมื่ออินพุตเป็น Unit step.....	33
4.13 แสดงการปรับขนาดของสัญญาณชาแนลแบบโปรแกรมได้.....	34
4.14 แสดงหลักการกำหนดค่าฟังก์ชันที่ใช้ในการปรับขนาดของสัญญาณชาแนลและโคชาแนล.....	34
4.15 แสดงวงจรที่ใช้ในการปรับขนาดสัญญาณชาแนลและโคชาแนลแบบโปรแกรมได้.....	34
4.16 แสดงวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ได้พัฒนาขึ้นมาใช้.....	36
4.17 แสดงกราฟผลการตอบสนองของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน.....	36
4.18 แสดงการให้ภาระงานกับมอเตอร์.....	37
4.19 แสดงระบบควบคุมความเร็วที่ใช้การควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้า.....	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
4.20 แสดงวงจรแปลงสัญญาณเอซีเป็นดีซี.....	38
4.21 แสดงการสร้างสัญญาณทริกให้กับเอสซีอาร์.....	39
5.1 แสดงลักษณะของระบบควบคุมโดยรวมที่ได้ออกแบบไว้.....	40
5.2 แสดงลักษณะการปรับค่าแรงดันไฟฟ้า.....	41
5.3 แสดงระบบที่ใช้ในการทดลองผลการตอบสนองทางความเร็วเมื่อปรับค่าแรงดันไฟฟ้า.....	41
5.4 แสดงผลการตอบสนองทางความเร็วของระบบขับเคลื่อนเมื่อปรับค่าแรงดันไฟฟ้า.....	42
5.5 แสดงลักษณะการปรับค่ากระแสกระตุ้น.....	42
5.6 แสดงระบบที่ใช้ในการทดลองผลการตอบสนองทางความเร็วเมื่อปรับค่ากระแสกระตุ้น.....	43
5.7 แสดงผลการตอบสนองทางความเร็วของระบบขับเคลื่อนเมื่อปรับค่ากระแสกระตุ้น.....	43
5.8 แสดงผลการตอบสนองทางความเร็วของระบบขับเคลื่อนเมื่อมีการะงาน.....	43
5.9 แสดงระบบควบคุมความเร็วโดยการควบคุมค่ากระแสกระตุ้น.....	44
5.10 แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วเมื่อ $K_p=40\%, K_i=40\%$	45
5.11 แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วเมื่อ $K_p=70\%, K_i=40\%$	45
5.12 แสดงระบบควบคุมความเร็วโดยการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้า.....	46
5.13 แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วเมื่อ $K_p=10\%, K_i=30\%$	46
5.14 แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วเมื่อ $K_p=50\%, K_i=30\%$	47
5.15 แสดงระบบควบคุมความเร็วที่ใช้ในการทดลองกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	47
5.16 แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วเมื่อ $K_p=10\%, K_i=30\%$	48
5.17 แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วเมื่อ $K_p=50\%, K_i=30\%$	48
5.18 แสดงผลตอบสนองทางความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต่อการเปลี่ยนแปลง ของสเตปอินพุต.....	49
5.19 แสดงผลตอบสนองทางความเร็วของสเตปมอดูร์ที่ควบคุมค่ากระแสกระตุ้นต่อการ เปลี่ยนแปลงสเตปอินพุต.....	49
5.20 แสดงผลตอบสนองทางความเร็วของสเตปมอดูร์ที่ควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าต่อ การเปลี่ยนแปลงสเตปอินพุต.....	50

บทที่ 1

บทนำ

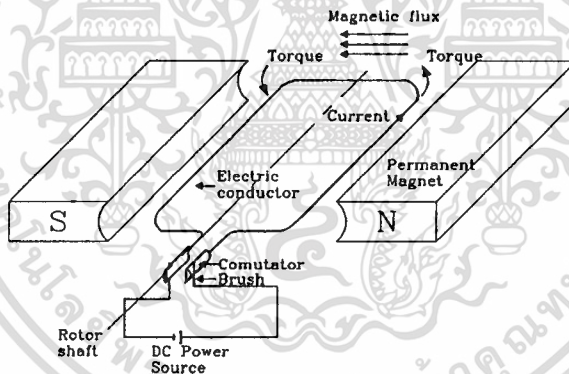
มอเตอร์ไฟฟ้าจัดได้ว่าเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่มีส่วนเกี่ยวข้องต่อการผลิตในอุตสาหกรรม และเป็นส่วนประกอบในเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ ทั้งในงานควบคุมและงานต้นกำลัง อีกทั้งยังสามารถทำการควบคุมได้ด้วยกระบวนการทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยทั่วไป มอเตอร์ไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งแต่ละประเภทจะมีข้อดีข้อเสียต่างกันออกไป กล่าวคือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นจะให้แรงบิดขณะเริ่มหมุนสูง การปรับความเร็วทำได้ง่าย การหมุนราบเรียบ และทำการควบคุมความเร็วได้ง่าย แต่ตัวมอเตอร์จะมีขนาดใหญ่กว่าและราคาก็แพงกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ นอกจากนี้ในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดใหญ่ ต้องมีกรรมวิธีในการสตาร์ทที่ยุ่ยากและต้องมีการซ่อมบำรุงรักษาเกี่ยวกับแปรงถ่าน มีขีดจำกัดทางด้านแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากมีคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ส่วนในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับนั้นตัวมอเตอร์จะมีขนาดเล็กและไม่มีแปรงถ่าน แต่แรงบิดขณะเริ่มหมุนและที่หมุนด้วยความเร็วรอบต่ำๆ จะไม่ดี ดังนั้นหากมีการพัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้การควบคุมการกระตุ้นเหมือนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแล้วจะสามารถทำให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับนั้นมีแรงบิดขณะเริ่มหมุนที่ดี และให้ผลการตอบสนองที่สูงขึ้น ลดสัญญาณรบกวนและการซ่อมบำรุงให้น้อยลง ซึ่งจะทำให้สามารถนำมอเตอร์ดังกล่าวนี้ไปใช้งานได้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นารออกแบบและพัฒนาระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้สเตปป์มอเตอร์^[3] เป็นกรณีศึกษา โดยการใช้การกระตุ้นในรูปแบบกระแสชาชนแบบรูปปิดเพื่อทำให้การหมุนของสเตปป์มอเตอร์เป็นไปอย่างราบเรียบและต่อเนื่อง มีแรงบิดขณะเริ่มหมุนที่ดีเทียบเคียงได้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกขดกระตุ้น และได้ออกแบบระบบควบคุมความเร็วแบบรูปปิดโดยการควบคุมค่ากระแสชาชนที่ใช้ในการกระตุ้นด้วยฟังก์ชันการควบคุมแบบ Proportional + Integral (PI) เพื่อควบคุมค่าแรงบิดของมอเตอร์ให้มีค่าสอดคล้องกับขนาดของภาระงานที่มอเตอร์ได้รับ ทั้งนี้เพื่อควบคุมให้มอเตอร์มีค่าความเร็วรอบที่คงที่ในสภาวะที่มีภาระงานขนาดต่างๆ และจากการทดลองโดยใช้ภาระงานจำลองแบบกระแสไหลวน (Eddy Current Break) ปรากฏว่าระบบควบคุมที่ได้ออกแบบไว้สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ได้คงที่ทั้งในสภาวะที่มีภาระงานและไม่มีภาระงาน

และในการทดลองนำระบบขับเคลื่อนดังกล่าวไปใช้กับระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดย
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

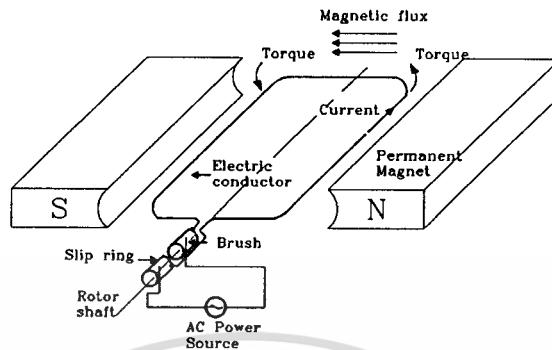
ทฤษฎีเกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ดังแสดงในภาพที่ 2.1 เป็นภาพโครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งในการหมุนและการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะใช้หลักการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนให้กับตัวหมุน (DC Power Source) โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับตัวหมุนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

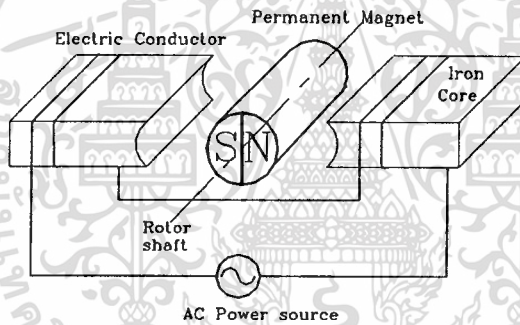


ภาพที่ 2.1 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ภาพที่ 2.2 และ 2.3 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับนั้นจะใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนให้กับมอเตอร์ (AC Power Source) ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ที่ป้อน โดยในภาพที่ 2.2 จะแสดงให้เห็นถึงตัวหมุนที่เป็นลวดตัวนำ ส่วนภาพ 2.3 จะแสดงลักษณะของตัวหมุนที่เป็นแม่เหล็กถาวร



ภาพที่ 2.2 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ



ภาพที่ 2.3 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ตัวหมุนเป็นแม่เหล็กถาวร

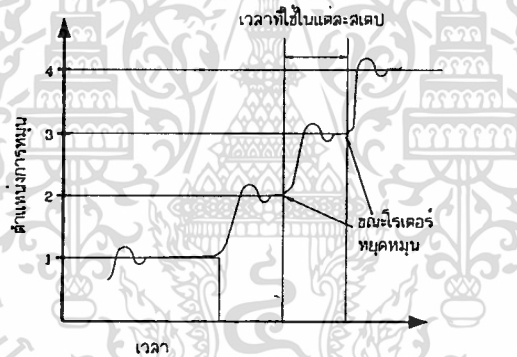
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านนั้นจะอาศัยโครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับตามภาพที่ 2.3 โดยใช้วงจรจับควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดตัวนำในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้สอดคล้องกับการหมุนของตัวหมุนที่เป็นแม่เหล็กถาวร

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการออกแบบและพัฒนาวงจรขับเคลื่อนและระบบควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่มีแปรงถ่าน โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่เป็นสเตปมิงมอเตอร์เป็นกรณีศึกษา ดังนั้นเพื่อเป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่เป็นสเตปมิงมอเตอร์และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เนื้อหาในบทนี้จึงกล่าวถึงหลักการการทำงานตลอดจนหลักในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ดังกล่าว

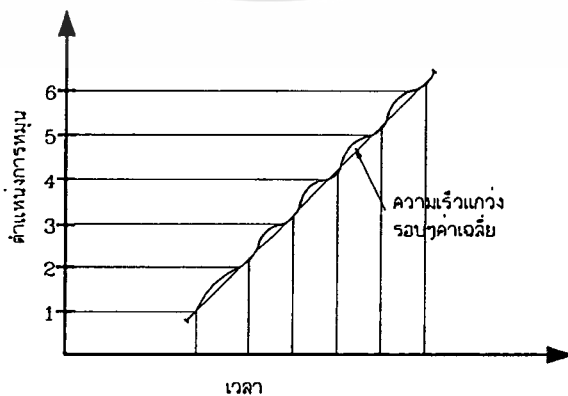
2.1 หลักการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์

สเตปปีงมอเตอร์เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิดหนึ่งที่เปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลเป็นการเคลื่อนที่ทางกล จึงเหมาะสำหรับการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ทางดิจิทัลหรือคอมพิวเตอร์ การทำงานของสเตปปีงมอเตอร์โดยส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับสัญญาณพัลส์ (Pulse) กระตุ้นที่ป้อนให้กับขดลวดเฟสของมอเตอร์ในลำดับที่ถูกต้องด้วยวงจรจัดลำดับลอจิกและกระแสที่พอเพียงด้วยวงจรขับ ซึ่งจะได้กล่าวโดยละเอียดในหัวข้อ 2.3 ต่อไป

การทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ตามอัตราเร็วของแต่ละสเตปจะแบ่งออกเป็น 2 โหมด^[5] การทำงานคือ โหมดของการหมุนเป็นสเตป (Discrete Mode) และโหมดของการหมุนแบบต่อเนื่อง (Slewing Mode)



ภาพที่ 2.4 แสดงการหมุนเป็นสเตป



ภาพที่ 2.5 แสดงการหมุนแบบต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 2.4 แสดงลักษณะการหมุนแบบสเตปซึ่งมีเวลาหยุดนิ่งก่อนที่จะเปลี่ยนสเตปถัดไป ดังนั้นหากมีการเพิ่มอัตราเร็วในแต่ละสเตปให้เร็วขึ้นและเป็นไปอย่างต่อเนื่อง การหมุนของ สเตปมอเตอร์ก็จะต่อเนื่องดังแสดงในภาพที่ 2.5 ในการนำสเตปมอเตอร์ไปใช้งานไม่ว่าจะเป็นโหมคการทำงานแบบโคหรือเป็นสเตปมอเตอร์แบบไหน ควรจะมีการศึกษาคุณลักษณะต่าง ๆ เช่น แรงบิด การตอบสนองต่อความถี่สูงสุด และความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดกับค่าของกระแส ทั้งนี้เพื่อให้สามารถควบคุมการทำงานของสเตปมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งคุณลักษณะเหล่านี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองลักษณะคือ

2.1.1. คุณลักษณะทางสถิตย์ (Static Characteristics)

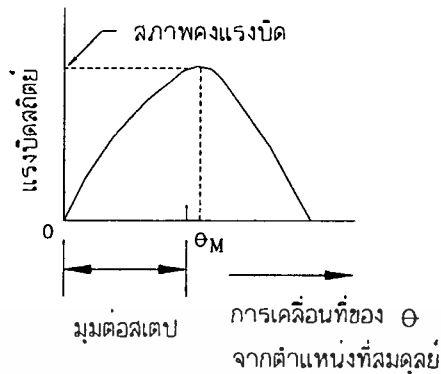
คุณลักษณะทางสถิตย์ หมายถึงคุณลักษณะในสภาวะที่มอเตอร์หยุดนิ่งไม่มีการเคลื่อนไหว ซึ่งตำแหน่งที่มีความสมดุลของการหมุนมากที่สุดก็คือตำแหน่งที่ซี่ฟันของโรเตอร์และซี่ฟันของสเตเตอร์มีความสัมพันธ์กันอยู่ในแนวเดียวกัน และยังคงอยู่ในตำแหน่งนี้จนกว่าจะมีการกระตุ้นอีกครั้ง โดยที่ตำแหน่งสมดุลของโรเตอร์จะมีค่าของแรงบิดเท่ากับศูนย์ ซึ่งถ้าโรเตอร์มีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมอเตอร์ก็จะทำการสร้างสมดุลให้กับโหลดโดยการสร้างแรงบิดขึ้นมาในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางเคลื่อนที่ ผลของแรงบิดกับการเคลื่อนที่ของโรเตอร์จะมีลักษณะคล้ายกับรูปคลื่นไซน์

แรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้น จะขึ้นอยู่กับกระแสที่จ่ายให้เฟสนั้น ๆ โดยที่แรงบิดนี้เรียกว่าสภาพคงแรงบิด (Holding Torque) หรือแรงบิดสถิตย์ (Static Torque) และลักษณะความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างค่าของแรงบิดกับกระแสที่เปลี่ยนแปลงไปจะเป็นลักษณะเชิงเส้น แต่ก็จะมีขีดจำกัดอยู่ที่จุดอิ่มตัวแม่เหล็กของทั้งโรเตอร์และสเตเตอร์ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแม่เหล็ก โดยที่จุดอิ่มตัวนี้จะไม่มีการเพิ่มขึ้นของแรงบิดแม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของกระแสเฟสก็ตาม

คุณลักษณะทางสถิตย์จะแสดงความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

(ก) คุณลักษณะของแรงบิดกับมุมสเตป (T/θ Characteristics)

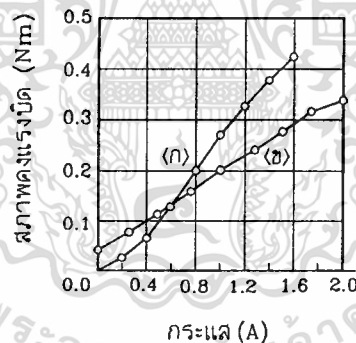
ภาพที่ 2.7 จะเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์แรงบิดสถิตย์สูงสุดที่เกิดขึ้น เรียกว่า สภาพคงแรงบิดที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง $\theta = \theta_m$ ตำแหน่งที่เกิดสภาพคงแรงบิดนี้จะมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งสมดุลของโรเตอร์ ซึ่งสภาพคงแรงบิดก็คือลักษณะของแรงบิดขั้นมูลฐานทั้งหมดของมอเตอร์ แสดงถึงแรงบิดที่มีการสะสมอยู่ที่ตัวมอเตอร์โดยจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของโรเตอร์ แรงบิดสถิตย์จะมีจุดเริ่มต้นที่สภาพคงแรงบิด



ภาพที่ 2.6 แสดงกราฟคุณลักษณะของแรงบิดต่อมุมตอลเตป

(ข) คุณลักษณะของแรงบิดกับกระแส (T/I Characteristics)

ภาพที่ 2.7 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สภาพคงแรงบิดกับกระแสที่จ่ายให้กับเฟสต่าง ๆ ของสเตปป์มอเตอรื



ภาพที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์คุณลักษณะของแรงบิดต่อกระแส

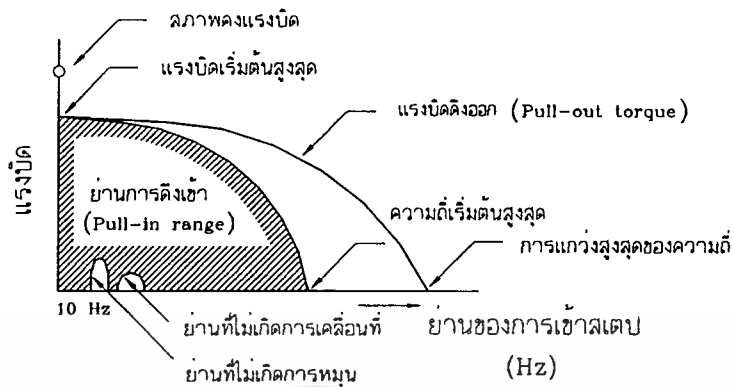
(ก) คือสเตปป์มอเตอรืแบบแปรค่าความต้านทานทางแม่เหล็กสี่เฟส โดยมีมุมสเตปเท่ากับ 1.8 องศา

(ข) คือ ไฮบริดจ์มอเตอรืสี่เฟส มุมสเตปเท่ากับ 1.8 องศา

2.1.2. คุณลักษณะทางพลวัต (Dynamic Characteristics)

ในการพิจารณาคุณลักษณะสถิตย์ของแรงบิดของสเตปป์มอเตอรื จะพิจารณาที่ต่อเมื่อไม่มีการเคลื่อนที่ของเพลามอเตอรื แต่การพิจารณาคุณลักษณะทางพลวัตของสเตปป์มอเตอรืนั้น จะมองถึงความสามารถในการสร้างแรงบิดที่สัมพันธ์กับความเร็ว โดยสามารถศึกษาได้จากคู่มือ

(Data Sheet) ของบริษัทผู้ผลิต ดังตัวอย่างในภาพที่ 2.8 ซึ่งจะบอกถึงรายละเอียดการใช้งานดังนี้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.8 แสดงกราฟคุณลักษณะทางพลวัตของสเตปป์ิงมอเตอร์

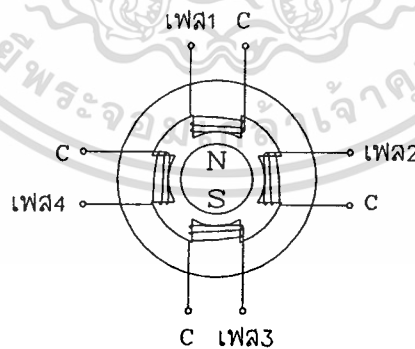
- (ก) คุณลักษณะของแรงบิดดึงเข้า (Pull-in Torque) เป็นคุณลักษณะเริ่มต้น และจะอ้างอิงกับย่านของแรงบิดที่เกิดจากแรงเสียดทานของโหลดที่ซึ่งมอเตอร์สามารถเคลื่อนที่และหยุดได้โดยปราศจากการสูญเสียในสเตปป์ สำหรับย่านความถี่ต่าง ๆ ที่ใช้นั้น จำนวนของพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบจะอยู่ในช่วง 100 เฮิรตซ์ (Hz) หรือใกล้เคียง
- (ข) คุณลักษณะของแรงบิดดึงออก (Pull-out Torque) สำหรับพิจารณาคุณลักษณะในขณะที่มอเตอร์เคลื่อนที่ หลังจากที่ได้ทำการทดสอบมอเตอร์ให้เกิดการเคลื่อนที่โดยใช้วงจรขับเคลื่อนลักษณะพิเศษ ในกรณีของการกระตุ้นในย่านของการเคลื่อนที่ด้วยตัวเอง (Self Starting Range) ความถี่ของพัลส์จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งมอเตอร์เกิดการเคลื่อนที่โดยปราศจากการเข้าจังหวะ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่เกิดจากแรงเสียดทานของโหลดกับความถี่พัลส์สูงสุดจะทำให้มอเตอร์สามารถเคลื่อนที่ได้โดยมีการเข้าจังหวะ ซึ่งจะเรียกว่า คุณลักษณะดึงออก ดังภาพที่ 2.9 โดยที่ขนาดของเส้นโค้งดึงออกจะขึ้นอยู่กับวงจรขับเคลื่อน การต่อเชื่อม (Coupling) เครื่องมือที่ใช้ในการวัด (Measuring Instruments) และเงื่อนไขอื่น ๆ
- (ค) ความถี่สูงสุดที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (Maximum Starting Frequency) เป็นการกำหนดการควบคุมความถี่สูงสุดให้มอเตอร์เคลื่อนที่ และหยุดได้ในขณะที่ไม่มีโหลดโดยปราศจากการสูญเสียทางสเตปป์
- (ง) ระดับสูงสุดของอัตราการดึงออก (Maximum Pull-out Rate) เป็นการกำหนดค่าความถี่สูงสุด ในขณะที่มอเตอร์สามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อไม่มีโหลด โดยปราศจากการสูญเสียทางสเตปป์

- (จ) แรงบิดสูงสุดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ (Maximum Starting Torque) เรียกว่าแรงบิดดึงเข้าสูงสุด (Maximum Pull-in Torque) และเป็นการกำหนดค่าของแรงบิดที่เกิดจากแรงเสียดทานสูงสุดของโหลด ซึ่งทำให้มอเตอร์สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างเข้าจังหวะกับพัลส์ที่มีความถี่ต่ำประมาณ 10 เฮิรตซ์

2.2 ประเภทของสเตปปีงมอเตอร์

2.2.1 สเตปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Stepping Motor)

สเตปปีงมอเตอร์ชนิดนี้จะใช้แม่เหล็กถาวรเป็นโรเตอร์ และมีซี่ฟันของสเตเตอร์ล้อมรอบภาพที่ 2.9 เป็นตัวอย่างสเตปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรสี่เฟสโดยที่โรเตอร์เป็นทรงกระบอก สเตเตอร์มีซี่ฟันสี่ซี่ โดยที่แต่ละซี่จะมีขดลวดพันโคจรอบ เพื่อทำให้เกิดการสร้างสนามแม่เหล็ก เมื่อต้องการให้สเตปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรมีขนาดมุมสเตป (Step) เล็กลง จะต้องเพิ่มจำนวนขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์และหรือจำนวนซี่ฟันของสเตเตอร์ แต่ก็มีขีดจำกัดในการเพิ่มจำนวนขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ ทั้งนี้เนื่องจากการสร้างแม่เหล็กถาวรให้มีโครงสร้างแบบมีขั้วแม่เหล็กหลายๆ ขั้วนั้นทำได้ยาก



ภาพที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของสเตปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรสี่เฟส

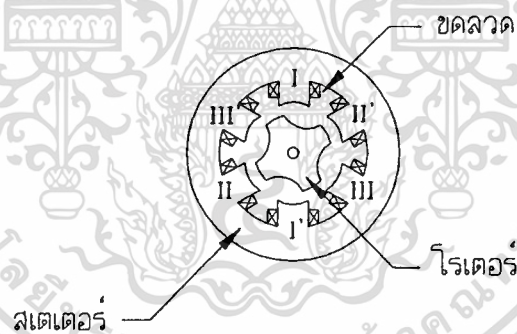
ลักษณะทั่วไปของมอเตอร์แบบนี้ก็คือ โรเตอร์จะถูกยึดอยู่กับที่แม้ว่าจะไม่มีการกระตุ้นเฟส ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าคิเทนท์แมคคาณิคซั่ม (Detent Mechanism) ข้อเสียของสเตปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรคือมีขนาดมุมสเตปใหญ่ ทำให้มีความละเอียดของสเตปต่อรอบน้อยมากเนื่องจากว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิฉะนั้นผู้ใดเห็นไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร การสร้างแม่เหล็กถาวรให้มีหลายขั้วทำได้ยากดังที่กล่าวมาแล้ว ทำให้ไม่สามารถสร้างสเตปป์ที่มีขนาดเล็กลงได้ สเตปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างขนาดเล็กทำให้ค่าของแรงบิดที่ได้ต่อหน่วยปริมาตรมีค่าต่ำ ถ้าต้องการปรับปรุงประสิทธิภาพในเรื่องของแรงบิด แม่เหล็กถาวรที่ใช้จะต้องทำมาจากสารแม่เหล็กที่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กสูง

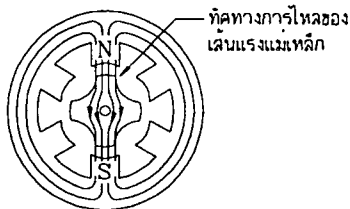
2.2.2 สเตปป์มอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้ (Variable Reluctance Stepping Motor)

สเตปป์มอเตอร์ชนิดนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า วีอาร์สเตปป์มอเตอร์ (VR Stepping Motor) โดยโครงสร้างมีโรเตอร์และสเตเตอร์ที่ทำจากโลหะซิลิคอน (Silicon) ซึ่งเป็นสารแม่เหล็กที่มีสภาพซึมซาบทางแม่เหล็ก (Permeability) สูงและสามารถให้เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านได้มากโดยโรเตอร์จะติดอยู่กับแกนของมอเตอร์ และสเตเตอร์จะติดอยู่กับโครงของตัวมอเตอร์



ภาพที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของสเตปป์มอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานสนามแม่เหล็กได้

ภาพที่ 2.10 เป็นภาพตัดขวางของสเตปป์มอเตอร์ซึ่งเป็นมอเตอร์สามเฟส โดยที่โรเตอร์มีซี่ฟันสี่ซี่ และสเตเตอร์จะมีซี่ฟันหกซี่ อยู่ในตำแหน่งตรงข้ามและทำมุม 180 องศา ต่อกันหรือขนานกันก็ได้ แต่ในภาพต่อในลักษณะอนุกรม จะเห็นว่าฟันของสเตเตอร์สองซี่ที่มีเฟสเดียวกันจะมีขั้วแม่เหล็กตรงข้ามซึ่งกันและกัน ส่วนภาพที่ 2.11 แสดงตำแหน่งของสถานะที่สมดุลย์เมื่อเกิดการกระตุ้นที่เฟสใดเฟสหนึ่งของมอเตอร์ และภาพที่ 2.12 แสดงการลดขนาดมุมสเตปป์ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มจำนวนซี่ฟันของโรเตอร์ให้มากขึ้น



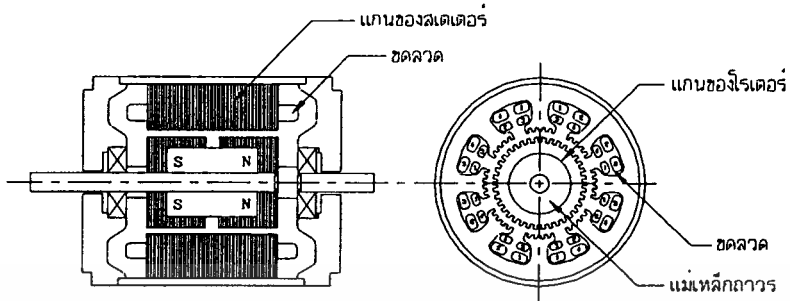
ภาพที่ 2.11 แสดงตำแหน่งของสถานะที่สมดุลเมื่อเกิดการกระตุ้นที่เฟสใดเฟสหนึ่ง



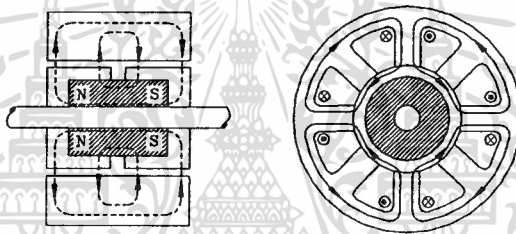
ภาพที่ 2.12 แสดงภาพหน้าตัดของมอเตอร์สี่เฟส ที่มีฟันโรเตอร์ห้าสิบซี่มุมสเตป 1.8 องศา

2.2.3 สเตปปีงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์ (Hybrid Stepping Motor)

เป็นสเตปปีงมอเตอร์ที่มีโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร การใช้ชื่อว่าไฮบริดจ์ได้มาจากการรวมหลักสำคัญของมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร และแบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้เข้าด้วยกัน สเตปปีงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์จะมีโครงสร้างของสเตเตอร์คล้ายกับโครงสร้างของสเตปปีงมอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานแม่เหล็กได้ ซึ่งจะมีขดลวดอยู่สองขด และขดลวดทั้งสองจะพันอยู่ที่ขั้วเดียวกันในลักษณะของสองภาวะขั้ว (Bipolar) ซึ่งจะทำให้ขั้วแม่เหล็กมีความต่างกันขณะที่มีการกระตุ้นแต่ละครั้ง แสดงได้ดังภาพที่ 2.13 ลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่งของสเตปปีงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์ก็คือ ตัวโรเตอร์จะเป็นแม่เหล็กถาวร รูปร่างทรงกระบอกตามยาวอยู่ในแกนเหล็กของโรเตอร์ เพื่อใช้สร้างสนามแม่เหล็กขั้วเดียว ดังแสดงในภาพที่ 2.14 โดยที่แต่ละขั้วของแม่เหล็กจะถูกล้อมรอบด้วยฟันเหล็กอ่อน ฟันของโรเตอร์กับสเตเตอร์จะอยู่ในตำแหน่งที่เหลื่อมกันอยู่ 90 องศา

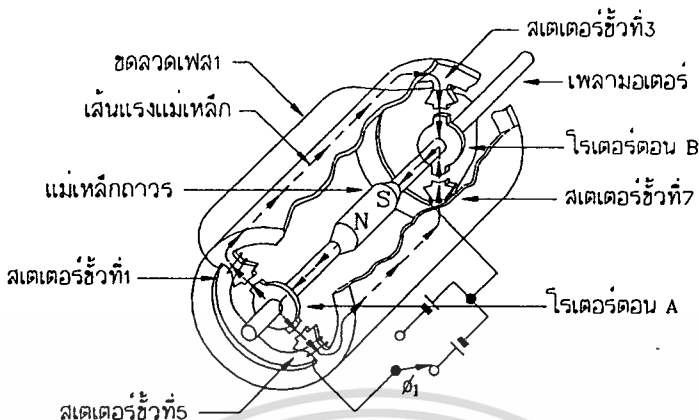


ภาพที่ 2.13 แสดงโครงสร้างของสเตปิงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์



ภาพที่ 2.14 แสดงภาพการวางโรเตอร์ตามยาวเพื่อใช้สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กขั้วเดียวกัน

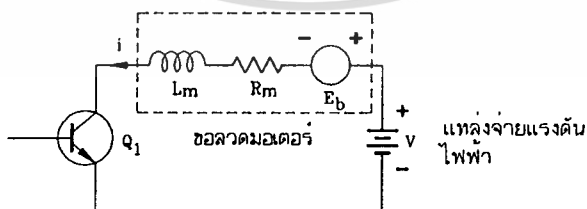
หลักการการทำงานของสเตปิงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์ ที่แตกต่างจากสเตปิงมอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้ก็คือ แรงบิดที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กจะไม่ขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของซี่ฟันด้วยซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 2.15 ข้อดีของสเตปิงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์คือมีขนาดของสเตปเล็กทำให้มีความละเอียดของสเตปต่อรอบสูง นอกจากนี้ยังมีค่าของแรงบิดสูงกว่าสเตปิงมอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้ แต่สเตปิงมอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้จะมีแรงเฉื่อยทางกลไกน้อยกว่า



ภาพที่ 2.15 แสดงหลักการทำงานของสเตปิงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์

2.3 วงจรขับสำหรับสเตปิงมอเตอร์

การพิจารณาถึงหลักการในการออกแบบวงจรขับกำลังให้กับขดลวดของสเตปิงมอเตอร์นั้น จะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบหลายอย่างด้วยกัน เนื่องจากการหมุนของสเตปิงมอเตอร์จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Back emf) ซึ่งจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า โดยสามารถเขียนวงจรสมมูลย์ (Equivalent circuit) ในหนึ่งเฟสของสเตปิงมอเตอร์ได้ดังในภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 แสดงวงจรสมมูลย์ของสเตปิงมอเตอร์

โดยทั่วไป สเตปิงมอเตอร์ได้ถูกออกแบบให้ทนความร้อนได้สูงถึง 100 องศาเซลเซียส แต่ในการใช้งานจริงจะถูกใช้งานที่ร้อนน้อยกว่าจุดอิมิตัวที่กำหนดมา ในการขับสเตปิงมอเตอร์นั้นต้องเลือกใช้อุปกรณ์ที่กินกระแสสูงๆ เนื่องจากขดลวดในแต่ละเฟสของสเตปิงมอเตอร์จะไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

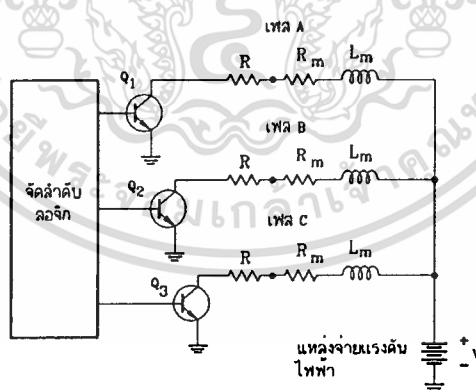
ต้องมีการนำและหยุดนำกระแสอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับทรานซิสเตอร์กำลังจากแรงดันยอดแหลม (Spike Voltage) ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสในขดลวด (Inductive Turn Off Spike Voltage) และการเสียดภาพฉับพลันของแรงดัน ซึ่งการออกแบบวงจรขับและวงจรป้องกันสามารถทำได้ดังนี้

2.3.1 การใช้ตัวต้านทานต่ออนุกรมกับวงจรขับ

การต่อความต้านทานอนุกรมกับวงจรขับ เป็นรูปแบบธรรมดาและราคาถูกสุด ในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสแตปป์มอเตอร์ คือการต่อความต้านทานอนุกรมเข้ากับชุดขดลวดแต่ละเฟสของสแตปป์มอเตอร์ การเพิ่มความต้านทานภายนอกทำให้ค่าเวลาคงตัวของวงจรลดลงไป ทำให้เวลาของการเพิ่มและลดระดับของกระแสลดลง

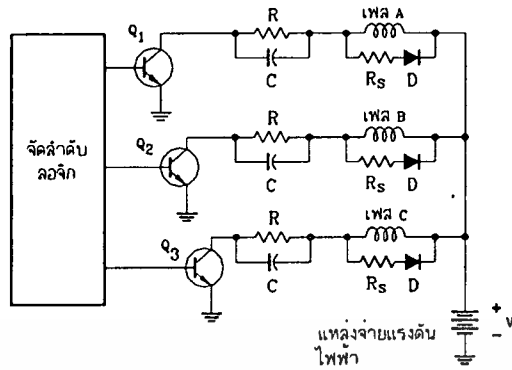
ข้อเสียของการต่อความต้านทานอนุกรมคือการสูญเสียกำลังงาน ค่าความต้านทานภายนอกมีมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้ระบบไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ ลักษณะการต่อความต้านทานอนุกรมมีผลดังต่อไปนี้คือ

- (ก) ค่าความต้านทานทั้งหมด จะถูกแทนที่ด้วยความต้านทานตัวเดียวระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทางคานอินพุตกับตัวสแตปป์มอเตอร์ ดังภาพที่ 2.17



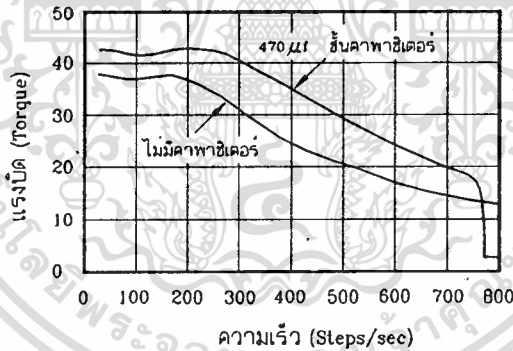
ภาพที่ 2.17 แสดงการใช้ความต้านทานต่ออนุกรมกับขดลวดของสแตปป์มอเตอร์

- (ข) ความต้านทานอนุกรมจะขนานกับตัวเก็บประจุ ในการเพิ่มตัวเก็บประจุในแต่ละส่วนของโครงข่ายของวงจรจำกัดแรงดัน สามารถช่วยรักษาระดับของแรงดันให้คงที่ โดยเฉพาะเมื่อวงจรทำงานมาใกล้ขีดจำกัดสูงสุดของแรงดันที่ทรานซิสเตอร์ทนได้



ภาพที่ 2.18 แสดงการเพิ่มตัวเก็บประจุในแต่ละส่วนของวงจรจำกัดแรงดัน

ในภาพที่ 2.18 แสดงวงจรขับกำลังซึ่งใช้ไดโอด-ความต้านทาน และมีการต่อตัวเก็บประจุขนานกับความต้านทาน ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของแรงบิดตั้งออก



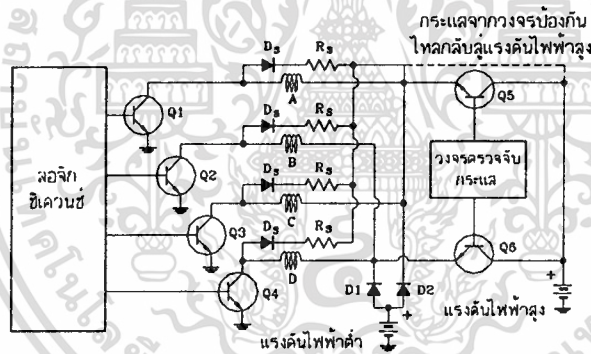
ภาพที่ 2.19 แสดงผลการเพิ่มตัวเก็บประจุขนานกับความต้านทาน

- (ค) ประสิทธิภาพของระบบจะเพิ่มขึ้น ถ้ามีการต่อความต้านทานร่วมกับโหลด (Common Load) ขนานกับทรานซิสเตอร์ระหว่างการใช้ความเร็วสูง วิธีการนี้จะช่วยให้การเปลี่ยนระดับของกระแสเร็วขึ้น แต่จะมีข้อเสียอยู่ที่มีการสูญเสียกำลังมาก

2.3.2 การใช้วงจรขับแบบใช้แรงดันไฟฟ้าสองระดับ

เป็นวิธีการขับที่มีประสิทธิภาพกว่ารูปแบบของการต่อความต้านทานอนุกรม ซึ่งใช้แรงดันไฟฟ้าระดับสูงสำหรับการยกกระดัดกระแสและตัดต่อไปยังแรงดันไฟฟ้าระดับต่ำ เมื่อถึงอัตรากระแสที่ต้องการหรือถึงเวลาที่กำหนด กระแสที่อยู่ในขดลวดจะไหลผ่านไดโอด D1 โดยแรงดันไฟฟ้าระดับต่ำจะทำงานแทน วิธีการนี้เรียกว่าการขับแบบแรงดันไฟฟ้าคู่หรือการขับแบบสองระดับ

เมื่อพิจารณาการลดลงของเวลาในการเปลี่ยนระดับกระแสของระบบการขับแบบสองระดับเปรียบเทียบกับแบบการต่อความต้านทานอนุกรม แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดจะยังคงอยู่ทั้งหมดจนกระทั่งกระแสเพิ่มขึ้นจนถึงระดับกระแสที่ต้องการ แม้ว่าค่าเวลาคงตัวจะไม่ลดลงเหมือนในแบบการต่อความต้านทานอนุกรม ค่าการยกกระดัดกระแสค่อนข้างจะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นหลังจากแรงดันไฟฟ้าระดับสูงจะตัดต่อไปสู่แรงดันไฟฟ้าระดับต่ำ กระแสจะตกลงและเกิดแรงดันย้อนกลับ



ภาพที่ 2.20 แสดงวงจรขับสเต็ปมอเตอร์แบบแรงดันไฟฟ้าสองระดับ

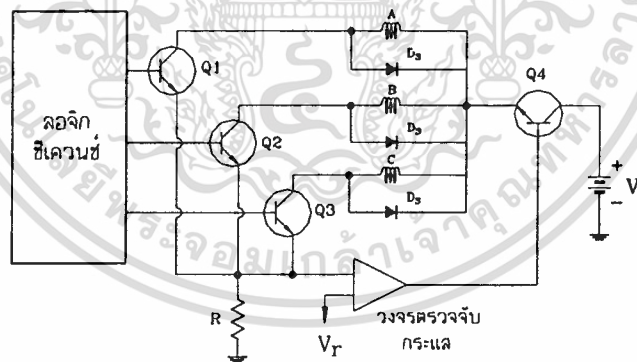
ขณะที่ทรานซิสเตอร์ Q5 และ Q6 ไม่ทำงาน ไดโอด D1 และ D2 ของแรงดันไฟฟ้าระดับต่ำนำกระแสอยู่ เมื่อแรงดันไฟฟ้าระดับสูงทำงาน ทรานซิสเตอร์ Q5 และ Q6 นำกระแสไดโอด D1 ต้องหยุดนำกระแสทันที และแหล่งจ่ายไฟของแรงดันไฟฟ้าระดับต่ำจะกลายเป็นระบบภายนอกการทำงานจะเป็นลักษณะนี้สลับกันไปตลอดช่วงการทำงาน โดยทั่วไป ไดโอดกระแสสูงจะมีค่าเวลาในการคืนตัวช้า ดังนั้นในกรณีนี้จึงมีความจำเป็นต้องใช้ไดโอดชนิดคืนตัวเร็ว (Fast Recovery Diode) เพื่อให้เกิดกระแสยอดแหลม (Current Spike) ในขณะที่มีแหล่งจ่ายไฟอยู่ในระดับที่ปลอดภัย โดยที่แหล่งจ่ายไฟที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำ ควรออกแบบให้มีระดับกระแสที่เพียงพอในการต้านกระแสย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 การใช้วงจรรีบแบบชอปเปอร์

เป็นวงจรรีบอีกแบบหนึ่งที่ใช้กับมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง คือใช้การมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation) หรือการมอดูเลตความถี่ (Frequency Modulation) ควบคุมกระแสเฉลี่ยที่ให้กับสเตปป์มอเตอร์ วงจรรีบแบบชอปเปอร์อย่างง่าย ๆ แสดงได้ดังภาพที่ 2.21 เมื่อเฟสใดเฟสหนึ่งของมอเตอร์ทำงาน ทราานซิสเตอร์ Q4 จะเปิดและปิดไปสู่แรงดันไฟฟ้าระดับสูงตลอดเวลา การใช้แหล่งจ่ายไฟที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าสูง เป็นสาเหตุให้กระแสในแต่ละเฟสเพิ่มระดับขึ้นอย่างทันทีทันใด เช่นเดียวกับในวงจรรีบแบบแรงดันไฟฟ้าสองระดับ คือมีวงจรรวบรวมระดับกระแสเพื่อจะปรับตั้งค่าการหยุดทำงานของทราานซิสเตอร์ Q4 เมื่อกระแสมาถึงระดับที่ต้องการ และเมื่อกระแสตกลงต่ำกว่ากระแสขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold Current) ทราานซิสเตอร์ Q4 จะทำงานอีกครั้งหนึ่ง การทำงานของวงจรมีจะยอมให้กระแสเฉลี่ยคงอยู่ในระดับที่ต้องการ ในกรณีนี้ความถี่ของการตัดช่วงจะอยู่ระหว่างหนึ่งถึงสามสิบกิโลเฮิร์ตซ์ ขึ้นอยู่กับค่าเวลาคงตัวของกาพั่นขดลวดของมอเตอร์และฮิสเตอรีซิส (Hysteresis) ของวงจรรวบรวมระดับกระแส ความถี่ของการตัดช่วงมักจะปรับตั้งอยู่สูงกว่าช่วงที่กำหนดเพื่อหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำซึ่งเกิดจากการสั่นของมอเตอร์

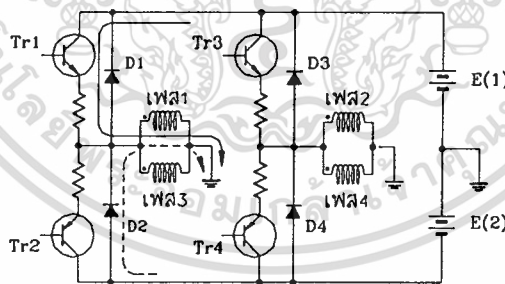


ภาพที่ 2.21 แสดงวงจรรีบแบบชอปเปอร์

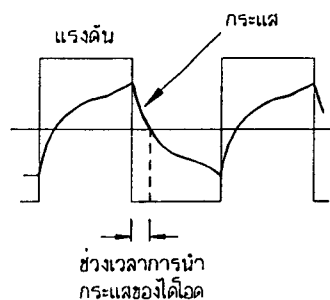
2.3.4 การใช้วงจรรีบแบบบริดจ์

ประสิทธิภาพในการใช้งานของสเตปป์มอเตอร์จะสูงขึ้น ถ้าควบคุมการไหลของกระแสให้ไหลได้สองทิศทาง ซึ่งช่วยให้แรงบิดเพิ่มขึ้นอีก 20-35% ของการใช้วงจรรีบแบบมีกระแสไหลทางเดียว วงจรรีบแบบบริดจ์มีสองชนิดคือ แบบมีแหล่งจ่ายไฟเดียว และแบบมีแหล่งจ่ายไฟสองแหล่ง ซึ่งจะมีคุณลักษณะในการทำงานดังต่อไปนี้

- (ก) การต่อขดลวดของมอเตอร์ ถ้ามอเตอร์มี 8 ขั้ว กระแสสลับจะสามารถไหลผ่านได้ เหมือนกับมอเตอร์สองเฟส
- (ข) การป้องกันอันตรายอันอาจเกิดจากทรานซิสเตอร์ “ทำงาน” ในขณะที่ทรานซิสเตอร์ อีกตัวหนึ่งยังนำกระแสอยู่ ทำได้โดยการใส่วงจรหน่วงเวลา คือค่าความต้านทาน เข้าไประหว่างทรานซิสเตอร์ทั้งสอง
- (ค) การใช้ไดโอดเพื่อป้องกันแรงดันย้อนกลับ โดยไดโอดจะถูกใส่ขนานเข้าไปกับ ทรานซิสเตอร์กำลัง เพื่อจำกัดแรงดันย้อนกลับ เมื่อทรานซิสเตอร์ “หยุดทำงาน” การทำงานของไดโอดจะแตกต่างจากแบบสภาพชั่วคราว ถ้า $Tr1$ นำกระแสซึ่งแสดง โดยเส้นทึบ เมื่อ $Tr1$ “หยุดทำงาน” และ $Tr2$ “ทำงาน” กระแสไม่ได้ไหลกลับ ทิศทางแต่จะไหลวนผ่านไดโอด $D2$ และแหล่งจ่ายไฟ $E(2)$ ซึ่งแสดงโดยเส้นประ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าแหล่งจ่ายไฟ $E(2)$ ขณะนี้จะถูกเก็บประจุ หรือถ้าพิจารณาใน เทอมของกำลังงานจากสนามแม่เหล็กจะถูกป้อนกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟในขณะที่ การขับสเตปป์มอเตอร์แบบสภาพชั่วคราว กำลังงานจากสนามแม่เหล็กจะถูกใช้ไป ในขดลวดความต้านทานภายนอกและซีเนอร์ไดโอด ทำให้การขับแบบสองภาวะ ขั้วมีข้อดีกว่า

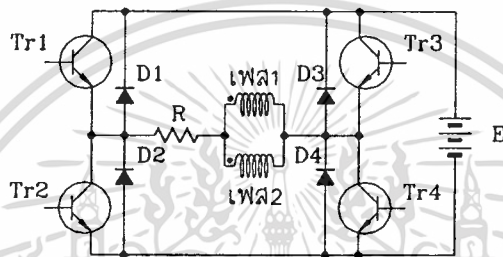


ภาพที่ 2.22 แสดงวงจรขับแบบบริดจ์ สำหรับการขับแบบสองภาวะขั้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ภาพที่ 2.23 แสดงรูปคลื่นแรงดัน ไฟฟ้าและกระแสของการขับสเตปป์มอเตอร์แบบสองภาวะขั้ว
 ไม่สามารถเผยแพร่สิ่งอื่น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสในทิศทางกลับสำหรับการขับแบบสภาพชั่วเดียว ต้องใช้วงจรจำกัดแรงดันเกินเพื่อ
 หน่วงกระแสหลังจาก “หยุดทำงาน” ของทรานซิสเตอร์ แต่สำหรับการขับแบบสองภาวะชั่วจะให้
 แรงดันไฟฟ้าเพื่อให้กระแสไหลกลับทิศทาง หลังจากกระแสที่เหลืออยู่หลังจากทรานซิสเตอร์หยุด
 ทำงานกลายเป็นศูนย์ และจะมีกระแสชุดใหม่เพิ่มขึ้นผ่านทรานซิสเตอร์ Tr2 ในทิศทางตรงกันข้าม
 ดังนั้น รูปคลื่นของกระแสจะไม่เป็นตัวชี้กำลัง แต่ขึ้นอยู่กับแรงดันย้อนกลับที่เกิดจากการเคลื่อนที่
 ของโรเตอร์



ภาพที่ 2.24 แสดงวงจรขับแบบบริดจ์อีกแบบหนึ่งซึ่งใช้แหล่งจ่ายไฟเดียว

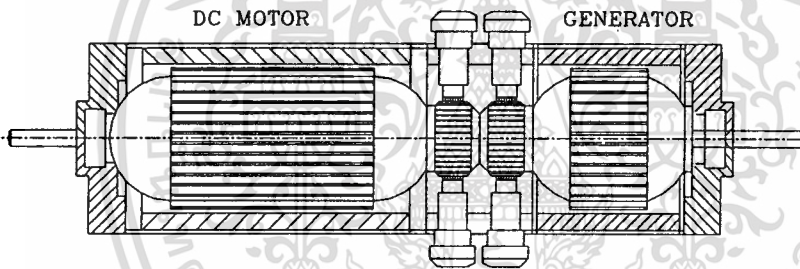
รูปแบบอีกอย่างหนึ่งของการขับแบบสองภาวะชั่ว แสดงได้ในภาพที่ 2.24 ในกรณีนี้
 จะใช้แหล่งจ่ายไฟเดียวแต่ใช้ทรานซิสเตอร์สี่ตัวสำหรับแต่ละเฟส ความต้านทานจะถูกต่อขนาน
 กับขดลวดเพื่อการเพิ่มระดับกระแสที่เร็วขึ้น วงจรหน่วงเวลาจะใช้เพื่อป้องกันทรานซิสเตอร์นำ
 กระแสเหลื่อมกัน (Overlap)

บทที่ 3

อุปกรณ์ต่อร่วมในระบบควบคุมมอเตอร์

3.1 เทคโคเจนเนอเรเตอร์ (Tachogenerator)

เทคโคเจนเนอเรเตอร์เป็นเครื่องมือที่สามารถแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะเป็นสัดส่วนกับค่าความเร็วรอบในการหมุน ภาพที่ 3.1 เป็นภาพเทคโคเจนเนอเรเตอร์ที่มีเพลาคู่อยู่กับเพลาลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



ภาพที่ 3.1 แสดงลักษณะของเทคโคเจนเนอเรเตอร์ที่ต่อกับเพลาลงของมอเตอร์

ความเร็วในการหมุนของเทคโคเจนเนอเรเตอร์เป็นสัดส่วนกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จึงสามารถเขียนแสดงในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้^[4]

$$e_g(t) = K_g \left(\frac{d\theta(t)}{dt} \right) = K_g \cdot \omega(t)$$

(3.1)

$$\frac{E_g(s)}{\theta(s)} = K_g \cdot s$$

โดยที่ $e_g(t)$ แทนค่าแรงดันเอาต์พุต (โวลต์)

$\theta(t)$ แทนระยะการเคลื่อนที่เชิงมุม (เรเดียน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $\omega(t)$ แทนค่าความเร็วเชิงมุมของตัวหมุน (เรเดียน/วินาที)
- K_g แทนค่าคงที่ของเทคโคเจนเนอร์เรเตอร์ (โวลท์/เรเดียน/วินาที)

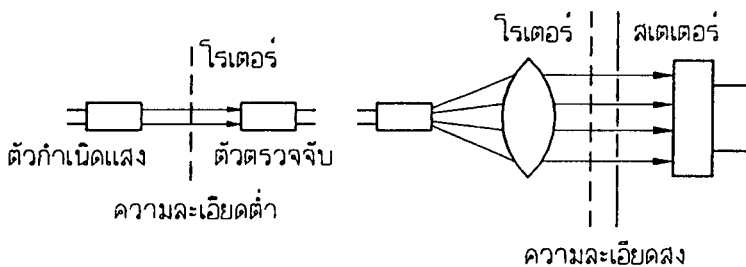
3.2 ตัวเข้ารหัสแบบเพิ่มค่า (Incremental Encoder)

ในระบบการบังคับตำแหน่งหรือความเร็วของมอเตอร์ จะใช้ตัวเข้ารหัสเพื่อสร้างสัญญาณป้อนกลับ โดยที่ตัวเข้ารหัสจะสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีค่าความถี่แปรผันตรงกับความเร็วในการหมุนของเพลา ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้ในการตรวจจับความเร็วของมอเตอร์ในรูปของอัตราจำนวนพัลส์ต่อหน่วยเวลาได้

ตัวเข้ารหัสแบบเพิ่มค่าประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ คือ ตัวกำเนิดแสง (Light Source) งานหมุน (Rotary Disk) งานอยู่กับที่ (Stationary Mask) และตัวตรวจจับ (Sensor) บนแผ่นงานหมุนซึ่งทำเป็นช่องโดยรอบดังแสดงในภาพที่ 3.2 บนแผ่นงานอยู่กับที่จะมีช่องสำหรับให้แสงผ่านตรงเข้าไปยังตัวตรวจจับ ถ้าเป็นตัวเข้ารหัสที่ใช้วัดความเร็วค่า อาจไม่ต้องมีแผ่นงานอยู่กับที่ก็ได้ ส่วนตัวกำเนิดแสงอาจจะเป็นหลอดไฟหรือ LED ดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.2 แสดงตัวอย่างกลไกของการเพิ่มค่าโดยใช้แสง



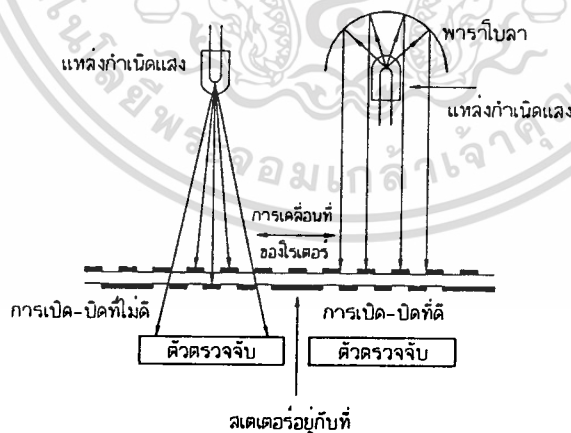
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้บางส่วน การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความละเอียดของตัวเข้ารหัสคือ จำนวนตามเวลาของสัญญาณเอาต์พุตต่อการหมุนของเพลลา 1 รอบ ซึ่งบอกเป็นจำนวนพัลส์ต่อรอบ หรือจำนวนไซเคิล (Cycle) ต่อ 360 องศาทางกล หรือไซเคิลต่อองศา ตัวเข้ารหัสที่ใช้กันทั่วๆ ไปมีค่าความละเอียดตั้งแต่ 15 ถึง 10,000 พัลส์ต่อรอบ ในทางปฏิบัตินั้น เนื่องจากแสงที่ออกจากแหล่งกำเนิดเป็นลำแสงเดี่ยว ถ้าต้องการให้แสงที่ผ่านช่องไปยังตัวตรวจจับเป็นเส้นตรงพร้อมๆ กัน ก็จะกระทำโดยใช้เลนซ์ (Lens) หรือตัวสะท้อนลักษณะพาราโบลา (Parabolic Refractor) ดังแสดงในภาพที่ 3.4

จำนวนพัลส์ต่อ 1 รอบของสัญญาณที่ตัวเข้ารหัสสร้างออกมาจะเท่ากับจำนวนช่องว่างบนแผ่นจานหมุน และความกว้างของช่องว่างกับความกว้างของแถบที่บระหว่างช่องว่างจะเท่ากัน ความกว้างของช่องว่าง (W) สามารถจะคำนวณได้จาก^[5]

$$W = \frac{\pi \cdot D}{2N} \quad (3.2)$$

โดยที่ D แทนเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเพ็ทเทิน
 N แทนจำนวนของความละเอียดเป็นพัลส์ต่อรอบ
 W แทนความกว้างของช่องว่าง

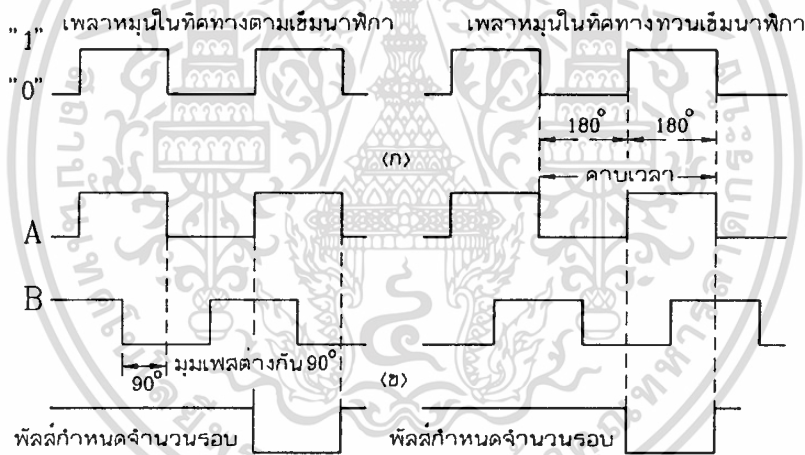


ภาพที่ 3.4 แสดงถึงผลของแสงที่เดินในแนวเดียวกันและแสงที่แตกกระจาย

โดยทั่วไป สัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากตัวเข้ารหัสโดยตรง จะมีระดับไม่เพียงพอในการควบคุมหรือสำหรับการประมวลผลสัญญาณ ดังนั้นจึงต้องมีวงจรขยายและแปลงรูปร่างของสัญญาณต่อไปในตัวเข้ารหัสด้วยเสมอ การใช้สัญญาณถูกคลื่นที่ได้จากตัวตรวจจับปกติแล้วจะเป็นรูปไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณสามเหลี่ยมหรือรูปสัญญาณซายน์ ขึ้นอยู่กับความละเอียดที่ต้องการ รูปสัญญาณเหล่านี้สามารถทำให้เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมได้โดยการต่อตัวเปรียบเทียบ (Comparator) เข้ากับภาคขยายเชิงเส้นของตัวเข้ารหัส ซึ่งจะทำได้เอาต์พุตเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมตามต้องการ

ภาพที่ 3.5 (ก) แสดงถึงรูปคลื่นเอาต์พุตสี่เหลี่ยมของตัวเข้ารหัสชนิดหนึ่งช่อง ไม่ว่าจะเพลลาจะหมุนในทิศทางใดสัญญาณที่ได้จะออกมาเหมือนกัน จึงเหมาะที่จะใช้กับงานที่ไม่กำหนดทิศทางเท่านั้น ส่วนในภาพที่ 3.5 (ข) แสดงสัญญาณสองชุดที่ได้จากเข้ารหัสชนิดสองช่องเฟส สัญญาณสองช่องนี้จะต่างกัน 90 องศา จึงเหมาะที่จะใช้ในงานที่ต้องการรับรู้ทิศทางการหมุนของเพลลาโดยการตรวจสอบลำดับลอจิกที่ได้ หรือใช้ควบคุมระบบที่ซับซ้อนอื่น ๆ จากสัญญาณในภาพ 3.5 (ข) จะเห็นได้ว่าสัญญาณทั้งสองช่องจะเริ่มจาก 0 ถึง 1 และ 1 ถึง 0 ขึ้นอยู่กับทิศทางการหมุนของแผ่นหมุนของตัวเข้ารหัส



ภาพที่ 3.5 (ก) แสดงตัวอย่างรูปคลื่นเอาต์พุตสี่เหลี่ยมของตัวเข้ารหัสช่องเดียวสองทิศทาง
(ข) แสดงตัวอย่างสัญญาณของตัวเข้ารหัสสองช่อง ที่มีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา

บทที่ 4

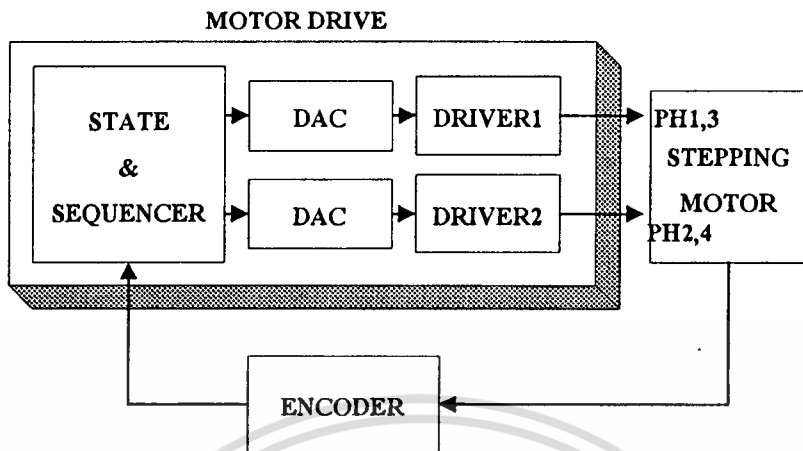
การออกแบบและพัฒนา

ระบบขับเคลื่อนสเตรปิงมอเตอร์ที่ใช้การควบคุมการกระตุ้นด้วยกระแสรูปคลื่นไซน์แบบ
ลูปปิด สามารถทำให้การหมุนของสเตรปิงมอเตอร์เป็นไปอย่างราบเรียบและต่อเนื่องเทียบเคียงได้
กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกขั้วกระตุ้น หรือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบตัวหมุนเป็น
แม่เหล็กถาวร และสามารถคลัสต์สัญญาณรบกวนและการซ่อมบำรุง กำลังงานสูญเสียในรูปของ
ความร้อนก็ลดลงเมื่อเทียบกับสเตรปิงมอเตอร์โดยทั่วไป แต่เมื่อนำระบบขับเคลื่อนดังกล่าวไปใช้
งานในสภาวะที่มีภาระงาน ปรากฏว่าความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากค่าแรงบิดของ
มอเตอร์ในขณะนั้นไม่สามารถเอาชนะแรงฉุดลากจากภาระงานได้ ดังนั้น ถ้าใช้การควบคุม
แบบป้อนกลับเพื่อควบคุมค่าแรงบิดของมอเตอร์ให้มีค่าเปลี่ยนแปลงตามขนาดภาระงานที่ได้รับ
เพื่อควบคุมค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ให้มีค่าคงที่ในสภาวะที่มีภาระงานขนาดต่าง ๆ ในวิทยา
นิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ โดยเนื้อหา
ในบทนี้จะกล่าวถึง 3 ส่วนหลักของระบบที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้น คือ หลักการทำงานของ
ระบบขับเคลื่อน การออกแบบระบบควบคุมแรงบิดและระบบควบคุมความเร็ว

4.1 หลักการทำงานของระบบขับเคลื่อน

ระบบขับเคลื่อนที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น จะใช้สัญญาณรูปไซน์ (sine) และโคไซน์
(cosine) ที่ได้จากการถอดรหัสข้อมูลจากตัวเข้ารหัส ที่ต่อแกนเพลตติดกับตัวโรเตอร์ของสเตรปิง
มอเตอร์เป็นตัวควบคุมจังหวะการกระตุ้น โดยที่สัญญาณไซน์และโคไซน์ที่ถูกถอดรหัสออกมา
จะใช้ควบคุมการกระตุ้นในแต่ละสเตรปิงการหมุนของมอเตอร์นั้นซึ่งจะถูกควบคุมให้สอดคล้องกับ
จังหวะการหมุนของโรเตอร์ในขณะนั้นๆ โดยการให้วงจรขับเคลื่อนเป็นตัวเปิด-ปิดจังหวะการ
กระตุ้นให้กับสเตรปิงมอเตอร์ ซึ่งวงจรขับเคลื่อนจะทำหน้าที่คล้ายกับลักษณะของซีคอมมิวเตเตอร์
และแปรปรวนในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั่นเอง ดังนั้นหากสัญญาณไซน์ที่ได้จากการถอดรหัส
มีความละเอียดสูงและย่อยสเตรปิงสัญญาณให้เป็นรูปคลื่นไซน์มีความสมบูรณ์มากขึ้นเท่าไร
การหมุนของสเตรปิงมอเตอร์ก็จะราบเรียบมากขึ้นเท่านั้น บล็อกแสดงการทำงานของระบบ

ขับเคลื่อนสามารถแสดงได้ ตามภาพที่ 4.1 เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.1 แสดงบล็อกการทำงานของระบบขับเคลื่อน

ระบบขับเคลื่อนประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

1. ส่วนของการขับเคลื่อนมอเตอร์ (Motor Drive)
2. ส่วนของตัวเข้ารหัสและสเตปिंगมอเตอร์ (Encoder & Stepping Motor)

4.1.1 ส่วนของการขับเคลื่อนมอเตอร์ (Motor Drive)

ในส่วนของการขับเคลื่อนจะประกอบไปด้วยส่วนย่อยๆ ดังนี้

1. หน่วยจัดการข้อมูล (State & Squencer) และ วงจรถอดรหัส (DAC)

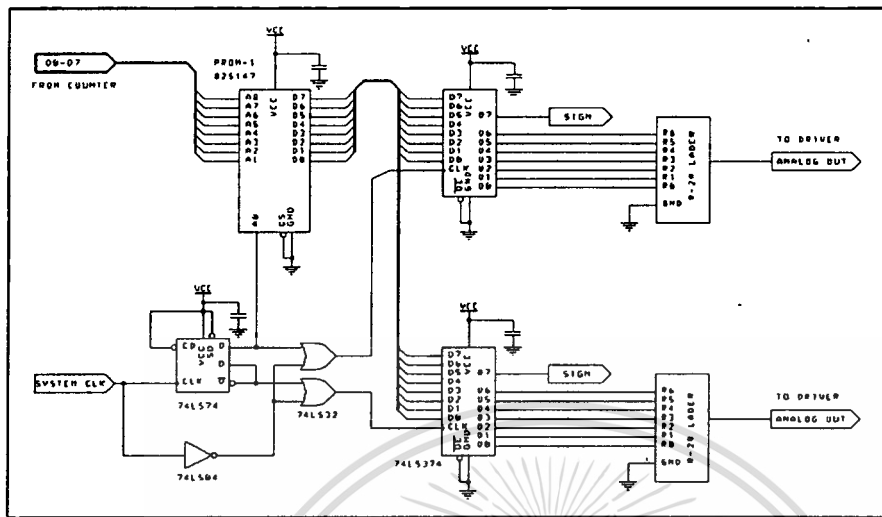
หน่วยจัดการข้อมูลและวงจรถอดรหัสเป็นส่วนที่รับสัญญาณจากตัวเข้ารหัส (Encoder) มาวิเคราะห์ทิศทางหมุนและถอดค่ารหัสในขณะนั้นๆ ออกมาเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์และโคไซน์ ซึ่งความละเอียดของรูปคลื่นไซน์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของข้อมูลที่ได้จากตัวเข้ารหัสกับวงจรถอดรหัสที่ใช้ วงจรถอดรหัสค่าสัญญาณไซน์และโคไซน์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังภาพที่ 4.2 ส่วนภาพที่ 4.3 แสดงลักษณะของสัญญาณไซน์และโคไซน์ พร้อมกับสัญญาณเครื่องหมาย ที่ได้จากวงจรถอดรหัสและตัวเข้ารหัสในหัวข้อ 4.1.2

2. วงจรขับเคลื่อนแบบสองแกนขวาง (Driver)

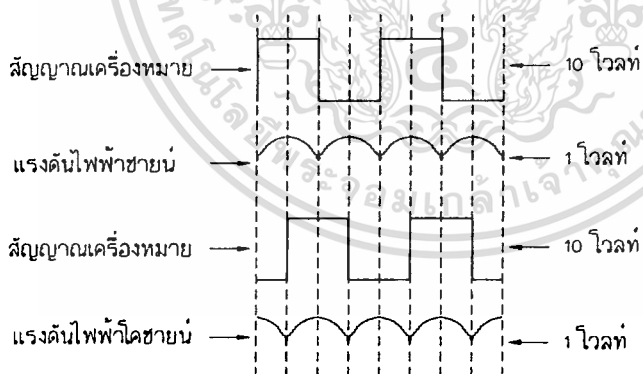
วงจรขับเคลื่อนแบบสองแกนขวางที่ใช้ในการขับ มีจำนวน 2 ชุด ชุดหนึ่งขับขดลวดเฟส 1 กับ เฟส 3 ให้สัมพันธ์กับสัญญาณไซน์ อีกชุดหนึ่งขับขดลวดเฟส 2 กับ เฟส 4 ให้สัมพันธ์กับสัญญาณโคไซน์ ซึ่งแต่ละชุดควบคุมการไหลของกระแสตามจังหวะการเปิด-ปิด (Switch) ของทรานซิสเตอร์ที่ถูกควบคุมการเปิด-ปิดตามค่าของรอบการทำงาน (Duty Cycle) ของสัญญาณพัลส์ที่ได้จากวงจรมอดูเลตตามความกว้าง (Pulse Width Modulations : PWM)

ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



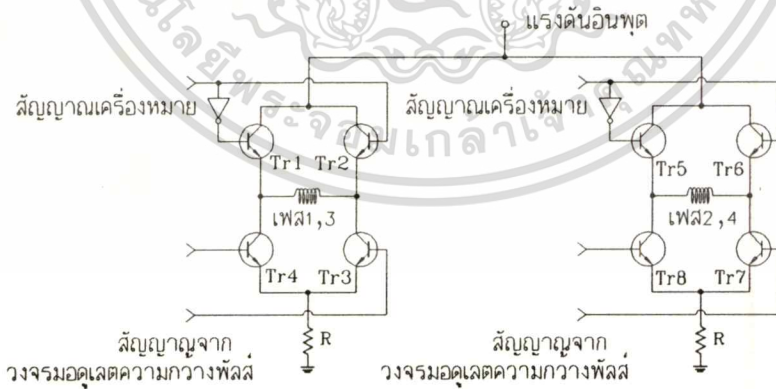
ภาพที่ 4.2 แสดงวงจรถอดรหัสสัญญาณชานน์และโคชานน์



ภาพที่ 4.3 แสดงลักษณะของสัญญาณชานน์และโคชานน์ที่ได้จากวงจรถอดรหัส

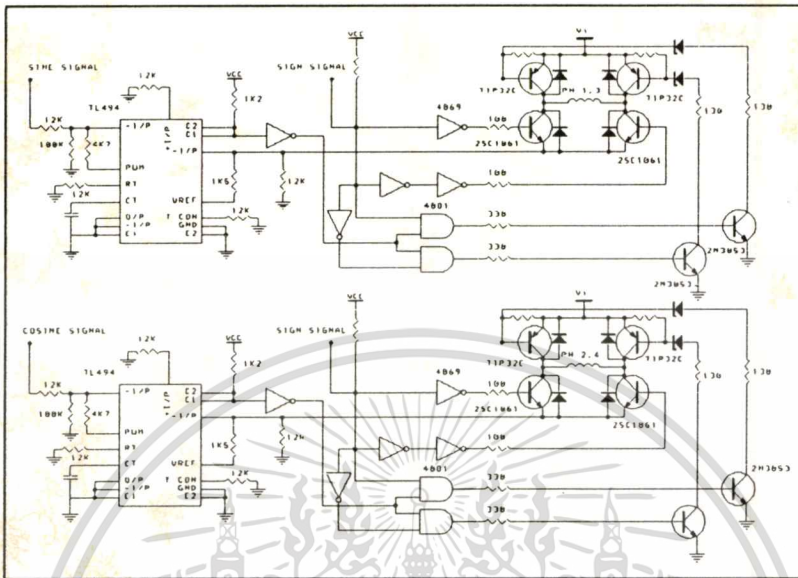


ภาพที่ 4.4 แสดงลักษณะของสัญญาณขาอินและโคขาอินที่ได้จากการวัดในวงจรจริง



ภาพที่ 4.5 แสดงวงจรขับเคลื่อนแบบสองแกนขวาง

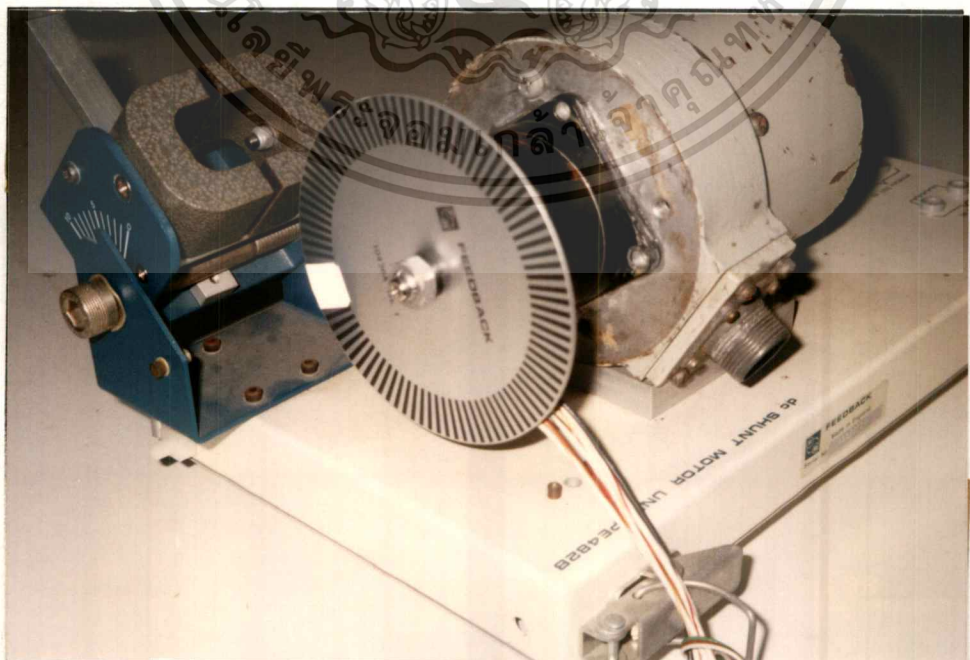
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 แสดงวงจรขับที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น

4.1.2 ส่วนตัวเข้ารหัสและสเต็ปมอเตอร์ (Encoder & Stepping Motor)

สเต็ปมอเตอร์กับตัวเข้ารหัสมีการเชื่อมต่อแกนเพลลาเข้าด้วยกันแสดงดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 แสดงการติดตั้งสเต็ปมอเตอร์เข้ากับตัวเข้ารหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้เฉพาะในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเตปป์มอเตอร์ที่ใช้เป็นแบบแม่เหล็กถาวร 4 เฟส โดยรายละเอียดอื่นๆ มีดังนี้

ความละเอียด	1.8	องศาต่อสเตปป์
ความต้านทาน	0.8	โอห์ม
พิกัดกระแสไฟฟ้า	0.3	แอมแปร์
พิกัดแรงดันไฟฟ้า	24	โวลท์

จากรายละเอียดสามารถคำนวณหาจำนวนสเตปป์ต่อรอบของสเตปป์มอเตอร์ได้เท่ากับ

$$= \frac{360^\circ}{1.8^\circ} = 200 \text{ สเตปป์ต่อรอบ}$$

ตัวเข้ารหัสที่ใช้ มีเอาต์พุตจำนวน 2 ชุด คือชุด A กับชุด B สัญญาณที่ได้ต่างเฟสกันอยู่ 90 องศา ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ความละเอียด	2,000	พัลส์ต่อรอบ
จำนวนเอาต์พุต	2	เอาต์พุต
ระดับลอจิก	2	ลอจิกต่อเอาต์พุต

ดังนั้น จำนวนลำดับลอจิกที่ได้ต่อรอบเท่ากับ

$$= (2,000)(2)(2)$$

$$= 8,000 \text{ ลอจิกต่อรอบ}$$

พิจารณาจำนวนลอจิกจากตัวเข้ารหัส ที่ถูกจัดลำดับเพื่อนำไปถอดรหัสค่าชานี้ในแต่ละสเตปป์ของมอเตอร์ได้ดังนี้

$$\text{จำนวนข้อมูลต่อสเตปป์} = (\text{จำนวนลอจิกที่ได้ต่อรอบ}) / (\text{จำนวนสเตปป์ของมอเตอร์ต่อรอบ})$$

$$= 8,000 / 200$$

$$= 40$$

ดังนั้น สัญญาณชานี้ที่ถูกถอดรหัสออกมาได้จากข้อมูลจำนวน 40 ข้อมูลซึ่งวงจรถอดรหัสและลักษณะของสัญญาณชานี้แสดงดังภาพที่ 4.2 และ 4.3 ข้างต้น

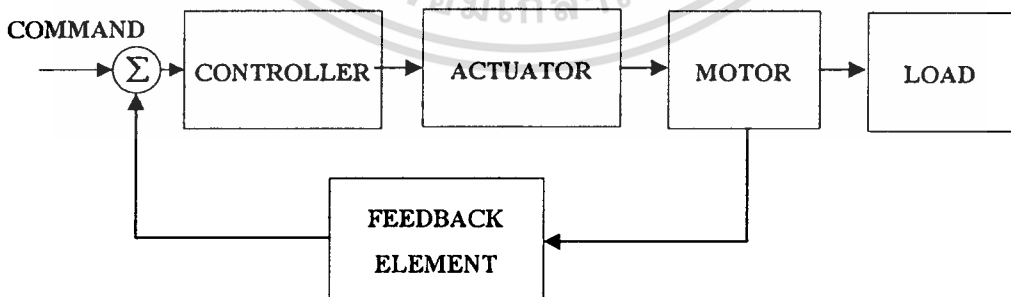
จากการทดสอบผลตอบแทนทางด้านความเร็วของสเตปป์มอเตอร์ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนนี้พบว่า ความเร็วรอบของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าแรงดันไฟฟ้า^[1] ซึ่งสามารถเขียนสมการเทียบเคียง ได้ดังนี้

$$N \propto V \quad (4.1)$$

โดยที่ N แทนค่าความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)
V แทนค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ (โวลท์)

4.2 การออกแบบระบบควบคุมความเร็วโดยการควบคุมค่ากระแสกระตุ้น

การพัฒนา ระบบขับเคลื่อนสเตปป์มอเตอร์ โดยการกระตุ้นด้วยกระแสรูปคลื่นซายน์แบบรูปปิด ทำให้สเตปป์มอเตอร์มีผลตอบแทนทางด้านความเร็วเทียบเคียงกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แต่ในสภาวะที่มีการะงานระบบขับเคลื่อนดังกล่าว ไม่สามารถควบคุมค่าแรงบิดให้มีค่าตามที่ต้องการได้ จึงทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลงเมื่อมอเตอร์มีการะงาน การใช้ระบบควบคุมแบบรูปปิดมาควบคุมค่ากระแสที่ใช้ในการกระตุ้นให้มีค่ากระแสในการกระตุ้นที่เหมาะสมกับขนาดของภาระงานที่มอเตอร์ได้รับ จะสามารถควบคุมให้มอเตอร์มีความเร็วรอบที่คงที่ได้ในสภาวะที่มีการะงาน ซึ่งระบบควบคุมโดยทั่วไปแสดงได้ดังรูปที่ 4.8

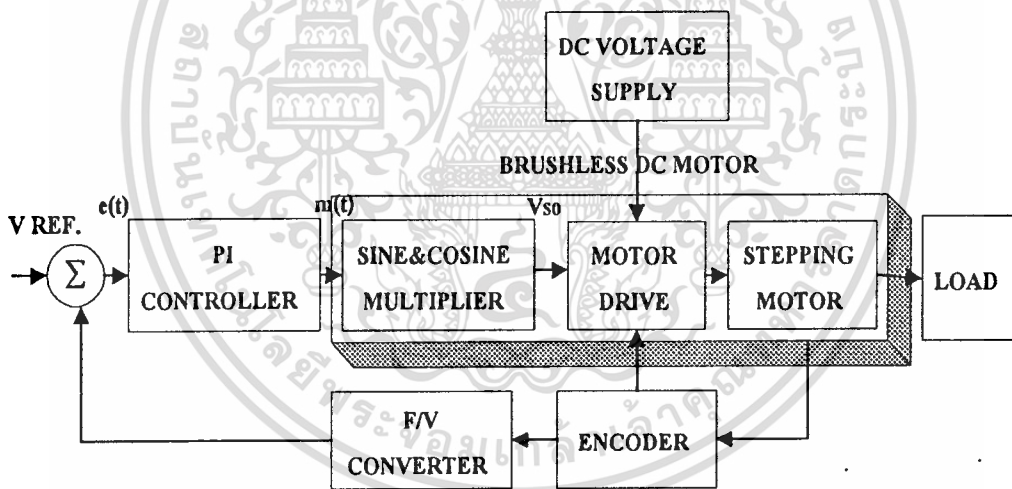


ภาพที่ 4.8 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมความเร็วโดยทั่ว ๆ ไป

จากภาพที่ 4.8 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมความเร็วโดยทั่ว ๆ ไปของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสัญญาณคำสั่ง (Command) อาจจะอยู่ในรูปของความถี่หรือระดับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบควบคุมและฟังก์ชันการควบคุม ส่วนตัวกระทำ (Actuator) ต้องสามารถให้ค่าเอาต์พุตที่เหมาะสมกับตัวมอเตอร์และสามารถให้ผลการตอบสนองที่สอดคล้องกับของมอเตอร์ ส่วนตัวป้อนกลับ (Feedback Element) เอาต์พุตที่ออกมาอาจจะอยู่ในรูปของความถี่ (ในกรณีที่ใช้ตัวเข้ารหัส) หรือ ระดับแรงดันไฟฟ้า (ในกรณีที่เป็นเทคโนโลยีเซนเซอร์เรเตอร์) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบของการควบคุมและสัญญาณคำสั่งข้างต้น

ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวควบคุมแบบ Proportional + Integral (PI) ควบคุมการทำงานของ Actuator ที่เป็นวงจรมัลติพลายเออร์ (Multiplier) เป็นตัวควบคุมค่ากระแสกระตุ้น ด้วยการปรับขนาดของสัญญาณรูปคลื่นไซน์และโคไซน์ โดยที่เอาต์พุตของตัวควบคุมจะได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าแตกต่างระหว่างระดับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงกับแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับที่เป็นสัดส่วนกับค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จากวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า ซึ่งระบบโดยรวมสามารถเขียนแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



ภาพที่ 4.9 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมความเร็วที่ออกแบบไว้

จากบล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมความเร็วประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

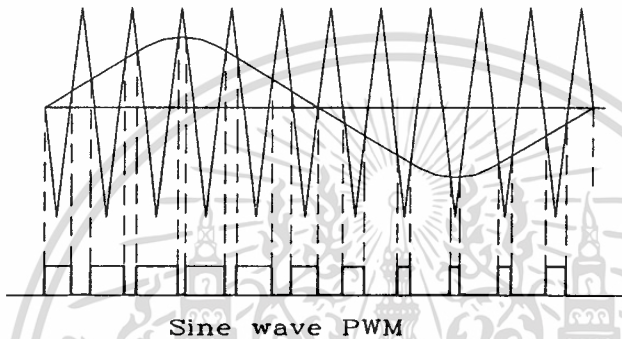
1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Motor)
2. ตัวควบคุมแบบ PI (PI Controller)
3. วงจรมัลติพลายเออร์ (Multiplier Circuit)
4. ตัวเข้ารหัส (Encoder)
5. วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า (F/V Converter)

6. การใช้งาน (Load)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านตามที่ได้กล่าวมาในหัวข้อ 4.1 นั้น ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้แปรค่าตามค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ โดยที่ค่าขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะแปรค่าตามค่าวงรอบการทำงาน (DutyCycle : D) ควบคุมการทำงานของทรานซิสเตอร์ในวงจรขับเคลื่อนตามภาพที่ 4.4 ซึ่งสามารถเขียนรูปสัญญาณของค่ารอบเวลาทำงานได้ดังนี้



ภาพที่ 4.10 แสดงสัญญาณของค่ารอบเวลาทำงานที่ได้จากการมอดูเลตตามความกว้าง

จากภาพที่ 4.4 และ 4.10 สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วและค่ารอบเวลาการทำงานได้ดังนี้

$$N \propto V$$

$$V = D \cdot V_i$$

$$N \propto (D \cdot V_i)$$

(4.2)

โดยที่ D แทนค่ารอบเวลาทำงาน (เปอร์เซ็นต์)

V_i แทนค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ป้อนให้กับวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ (โวลท์)

4.2.2 ตัวควบคุมแบบ PI (PI Controller)

ตัวควบคุมแบบ PI ที่ใช้ในการควบคุมจะทำหน้าที่เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าแตกต่างระหว่างค่าของเอาต์พุตของระบบที่ได้จากวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า กับค่าระดับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง จากนั้นจะสร้างสัญญาณควบคุมตามฟังก์ชันการทำงานแบบ PI ไปควบคุมการทำงานของ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของวงจรแปลงสัญญาณเอซีเป็นดีซีแบบเต็มคลื่น ตัวควบคุมแบบ PI สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง สัญญาณควบคุม $m(t)$ กับสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน $e(t)$ ดังนี้^[9]

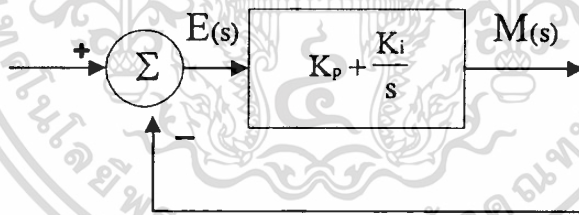
$$m(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) \cdot dt \tag{4.3}$$

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) \tag{4.4}$$

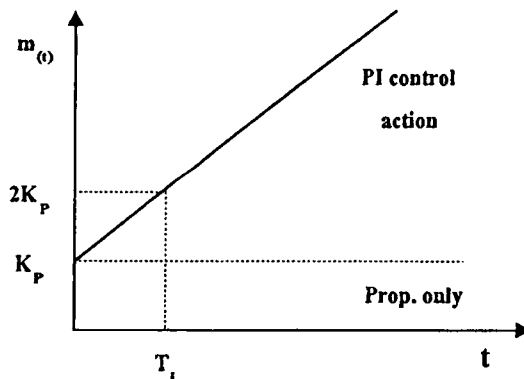
$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \tag{4.5}$$

- โดยที่ K_p แทนค่าของ Proportional Gain
 T_i แทนค่าของ Integral Time
 K_i แทนค่าของ Integral Gain

ค่า K_p และ K_i เป็นค่าที่ปรับได้ ซึ่งสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ตามภาพที่ 4.11



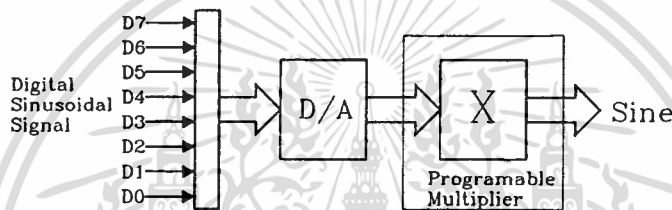
ภาพที่ 4.11 แสดงบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบ PI



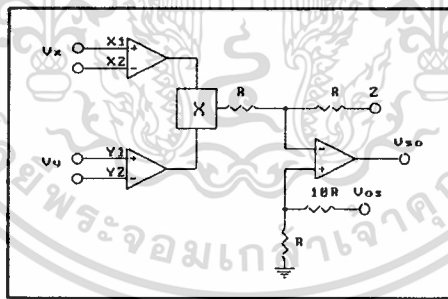
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 4.12 แสดงเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ PI เมื่ออินพุตเป็น Unit step โปรดโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 วงจรมัลติพลายเออร์ (Multiplier Circuit)

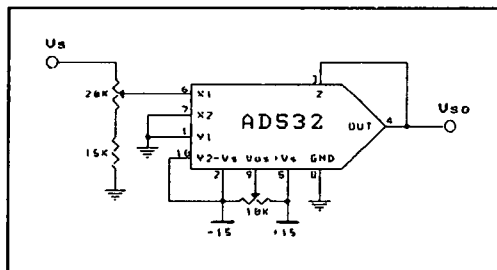
การควบคุมแรงบิดของระบบขับเคลื่อนสเตปมอเตอร์ที่ได้ออกแบบขึ้นมา นั้น จะใช้การปรับขนาดของกระแสชาวน์ที่ใช้ในการกระตุ้น ซึ่งการปรับขนาดของกระแสชาวน์ก็ทำได้โดยการปรับขนาดของสัญญาณชาวน์และโคชาวน์ที่ใช้ในการควบคุมการกระตุ้น ระบบควบคุมแรงบิดที่ได้ออกแบบจะใช้การปรับขนาดของสัญญาณชาวน์และโคชาวน์ด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่สามารถกำหนดค่าและเปลี่ยนแปลงค่าฟังก์ชันได้ ภาพที่ 4.13 แสดงลักษณะการปรับขนาดของสัญญาณชาวน์แบบโปรแกรมได้ที่นำมาใช้ ในระบบควบคุมเพื่อควบคุมแรงบิด



ภาพที่ 4.13 แสดงการปรับขนาดของสัญญาณชาวน์แบบ โปรแกรมได้



ภาพที่ 4.14 แสดงหลักการกำหนดค่าฟังก์ชันที่ใช้ในการปรับขนาดสัญญาณชาวน์และโคชาวน์



เอกสารภาพที่ 4.15 แสดงวงจรที่ใช้ในการปรับขนาดสัญญาณชาวน์และโคชาวน์แบบโปรแกรมได้ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำมาใช้

จากภาพที่ 4.15 ค่าแรงดันเอาต์พุตสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V_{so} &= \frac{(X1 - X2)(Y1 - Y2)}{10} \\ &= \frac{(Vs - 0)(0 - (-15))}{10} \\ &= 1.5Vs \end{aligned} \quad (4.6)$$

โดยที่ V_{so} แทนค่าขนาดแรงดันขายน้ทางด้านเอาต์พุต

V_s แทนค่าขนาดแรงดันขายน้ทางด้านอินพุต

4.2.4 ตัวเข้ารหัส (Encoder)

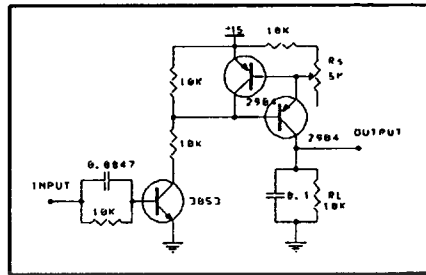
ตัวเข้ารหัสที่ใช้เป็นตัวเดียวกับตัวเข้ารหัสที่ใช้ในการควบคุมการหมุนของระบบขับเคลื่อน ในส่วนของการควบคุมความเร็วจะนำสัญญาณจากตัวเข้ารหัสมาเป็นสัญญาณตรวจจับความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยการป้อนสัญญาณเข้ารหัสที่ได้ผ่านวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าเพื่อแปลงความถี่ที่เป็นสัดส่วนกับความเร็วของมอเตอร์ในขณะนั้นๆ เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าเพื่อไปเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง

4.2.5 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า (F/V Converter)

วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าจะรับความถี่จากตัวเข้ารหัสที่เพลตต่ออยู่กับมอเตอร์ ซึ่งสามารถพิจารณาค่าความถี่ที่ได้ดังนี้

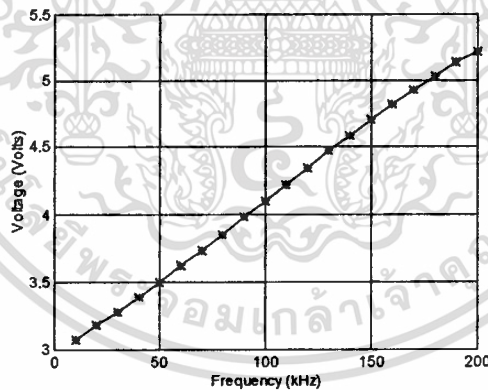
ที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ 4,000 รอบ/นาที ความละเอียดของตัวเข้ารหัส 2,000 พัลส์/รอบ ค่าความถี่ที่ได้จากตัวเข้ารหัสเท่ากับ

$$\begin{aligned} &= \left(\frac{4,000 \times 2,000}{60} \right) \\ &= 133.33 \text{ kHz} \end{aligned}$$



ภาพที่ 4.16 แสดงวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ได้พัฒนาขึ้นมาใช้

วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นมาใช้นี้ เพื่อต้องการให้สามารถตอบสนองย่านความถี่เพื่อการใช้งานได้กว้างขึ้น ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ (ความเร็วรอบของมอเตอร์) ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันที่พัฒนาขึ้น แสดงดังภาพที่ 4.17

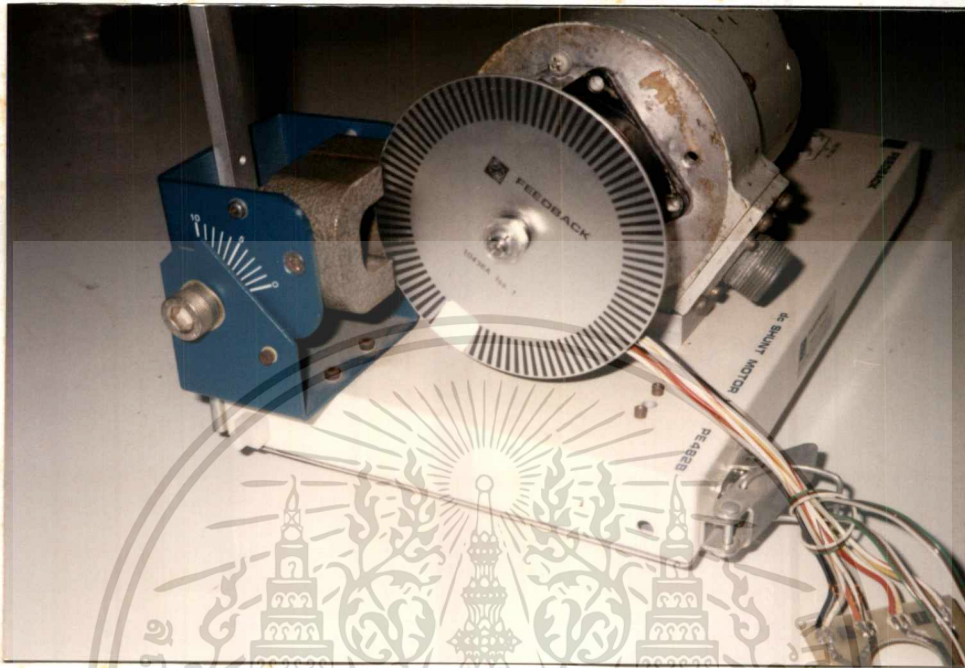


ภาพที่ 4.17 แสดงกราฟผลการตอบสนองของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน

2.2.6 ภาระงาน (Load)

ภาระงานที่ใช้ในการทดสอบเป็นภาระงานจำลองแบบกระแสไหลวน (Eddy Current Break) ที่มีการปรับระดับการให้ภาระกับมอเตอร์โดยการปรับขนาดของหน้าสัมผัสที่สัมผัสกับแผ่นงานที่ต่ออยู่กับเพลาของมอเตอร์ ดังแสดงตามภาพที่ 4.18

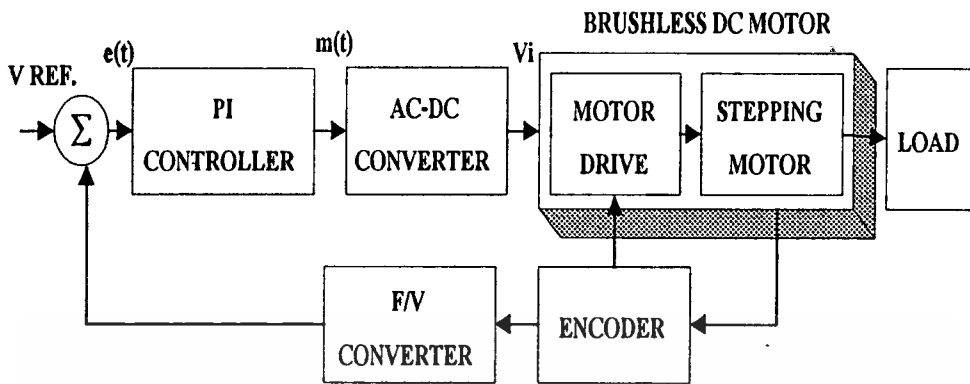
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.18 แสดงการให้ภาระงานกับมอเตอร์

4.3 การออกแบบระบบควบคุมความเร็วโดยการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้า

การควบคุมความเร็วของระบบขับเคลื่อนสแตปปีงมอเตอร์ โดยการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรขับเคลื่อน ซึ่งในที่นี้จะประยุกต์ใช้ระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมาทดลองควบคุมระบบขับเคลื่อนที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งสามารถเขียนระบบควบคุมได้ตามภาพที่ 4.19

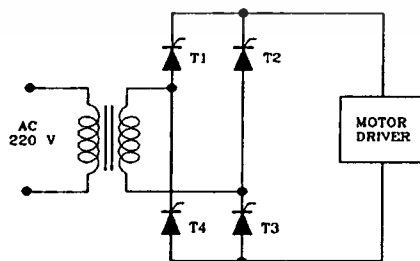


ภาพที่ 4.19 แสดงระบบควบคุมความเร็วที่ใช้การควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้า

ระบบควบคุมความเร็วตามภาพที่ 4.19 นั้น ความเร็วรอบของสเต็ปมิงมอเตอร์ที่ใช้วงจรขับเคลื่อนที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นมาจะมีค่าความเร็วรอบแปรค่าตามค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรขับเคลื่อน ดังนั้นหากมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรขับเคลื่อน ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลง ซึ่งในระบบควบคุมดังกล่าวจะใช้วงจรแปลงสัญญาณเอซีเป็นดีซี

วงจรแปลงสัญญาณเอซีเป็นดีซี (AC-DC Converter)

ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ตามค่าแรงดันไฟฟ้าแตกต่างระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (V_{REF}) กับค่าแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (V_F) ที่เป็นสัดส่วนกับความเร็วของมอเตอร์จากวงจรแปลงสัญญาณความถี่เป็นแรงดัน



ภาพที่ 4.20 แสดงวงจรแปลงสัญญาณเอซีเป็นดีซี

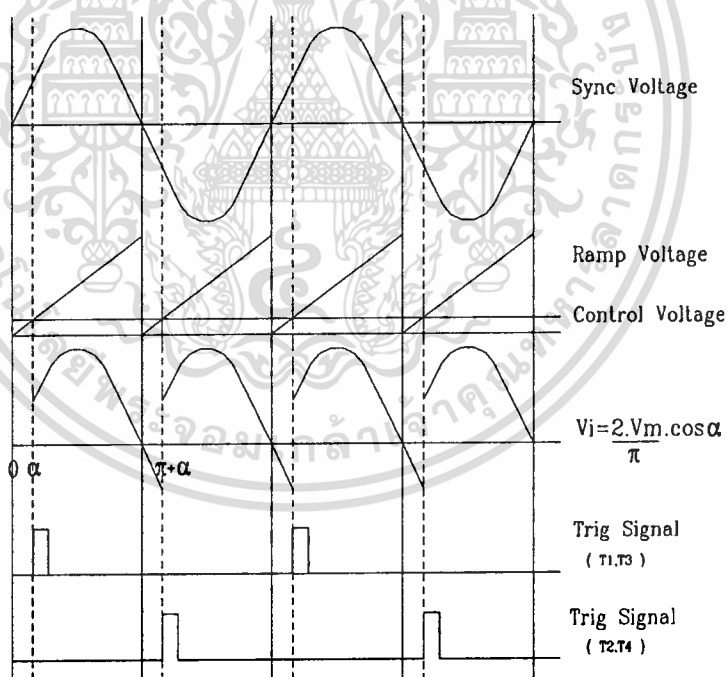
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.20 ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณเอซีเป็นดีซีแบบเต็มคลื่นที่ป้อนให้กับวงจรขับเคลื่อนจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าไปตามค่ามุมทริก (Trig) ของเอสซีอาร์ ที่เปลี่ยนแปลงค่าไปตามค่าสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ PI ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 4.21

จากภาพ ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณเอซีเป็นดีซีจะเปลี่ยนแปลงตามค่ามุมทริก ซึ่งสามารถแสดงในรูปของสมการได้ดังนี้

$$V_i = \frac{2 \cdot V_m}{\pi} (\cos \alpha) \quad (4.7)$$

โดยที่ V_m แทนค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (โวลต์)
 α แทนค่ามุมทริกของเอสซีอาร์ (เรเดียน)



ภาพที่ 4.21 แสดงการสร้างสัญญาณทริกให้กับเอสซีอาร์

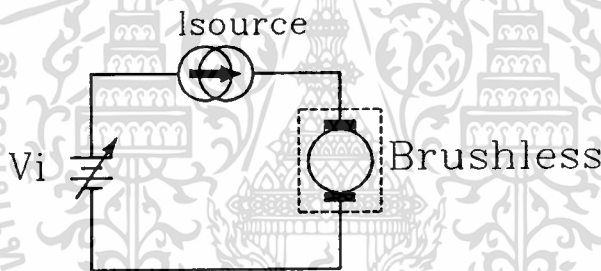
บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองระบบขับเคลื่อนและระบบควบคุมความเร็วและแรงบิดที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นมา นั้น จะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือการทดลองผลการตอบสนองทางความเร็วของระบบขับเคลื่อนสแตปปีงมอเตอร์ และการทดลองการทำงานของระบบควบคุมความเร็วในสภาวะการทำงานจริง

5.1 การทดลองผลการตอบสนองทางความเร็ว

การทดลองการทำงานของระบบขับเคลื่อนสแตปปีงมอเตอร์เพื่อดูผลการตอบสนองทางความเร็วของสแตปปีงมอเตอร์ สามารถแสดงได้ตามภาพที่ 5.1

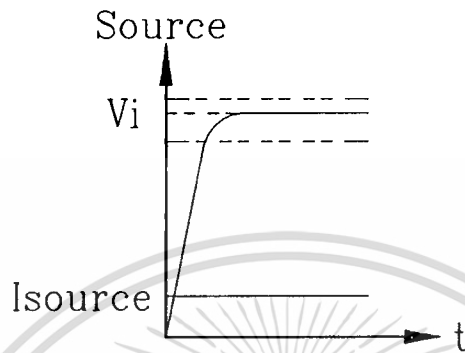


ภาพที่ 5.1 แสดงลักษณะของระบบควบคุมโดยรวมที่ได้ออกแบบไว้

จากภาพ ระบบขับเคลื่อนที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นมา นั้น จะมีแหล่งจ่ายกระแสอยู่ในรูปภายในวงจรขับเคลื่อน ดังนั้น ในการทดลองผลตอบสนองทางความเร็วจะทำการทดลอง 2 แบบ ดังนี้คือ

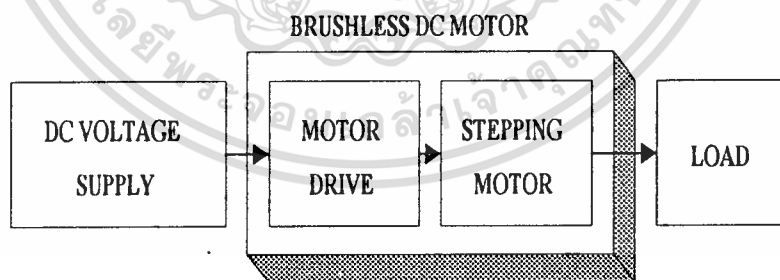
1. การทดลองโดยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรขับเคลื่อนและคงค่ากระแสกระตุ้น
2. การทดลองโดยการปรับค่ากระแสกระตุ้นในวงจรขับเคลื่อนและคงค่าแรงดันไฟฟ้า

5.1.1 การทดลองโดยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรขับเคลื่อนและคงค่ากระแสกระตุ้น



ภาพที่ 5.2 แสดงลักษณะการปรับค่าแรงดันไฟฟ้า

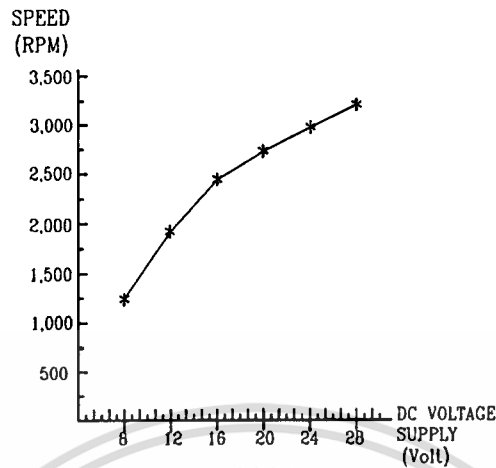
จากภาพ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรขับเคลื่อนที่ค่าแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ และใช้ตัววัดความเร็วรอบแบบดิจิตอลชนิดใช้แสง (Digital Photo Tachometer) เป็นเครื่องมือในการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ ซึ่งแสดงลักษณะของระบบที่ใช้ในการทดลอง ดังภาพที่ 5.3



ภาพที่ 5.3 แสดงระบบที่ใช้ในการทดลองผลการตอบสนองทางความเร็วเมื่อปรับค่าแรงดันไฟฟ้า

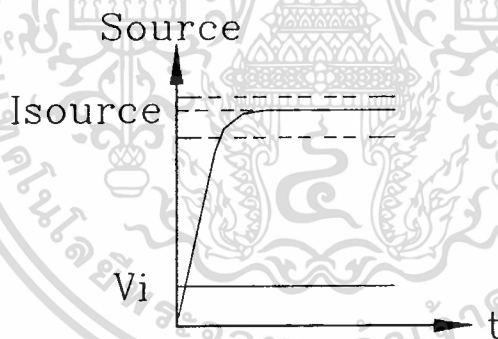
การทดลองตามภาพที่ 5.3 เป็นการทดลองในสภาวะที่มอเตอร์ไม่มีภาระงาน โดยทำการเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรขับเคลื่อนที่ค่าแรงดันไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ผลที่ได้คือค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าแรงดันแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรขับเคลื่อน ดังแสดงในภาพที่ 5.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.4 แสดงผลการตอบสนองทางความเร็วของระบบขับเคลื่อนเมื่อปรับค่าแรงดันไฟฟ้า

5.1.2 การทดลองโดยการปรับค่ากระแสกระตุ้นในวงจรขับเคลื่อนและคงค่าแรงดันไฟฟ้า



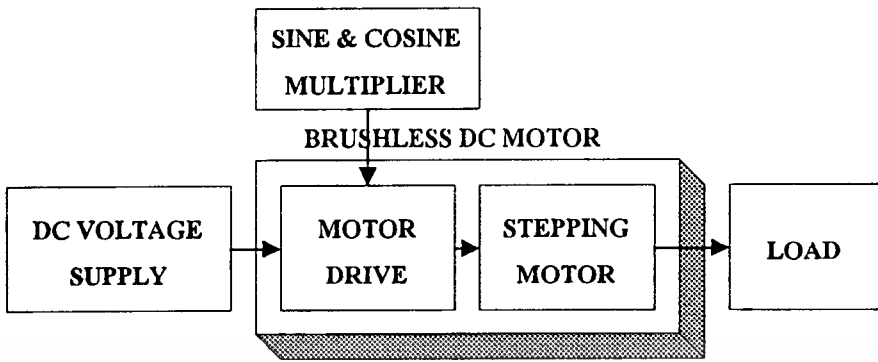
ภาพที่ 5.5 แสดงลักษณะการปรับค่ากระแสกระตุ้น

การปรับค่ากระแสกระตุ้นจะทำได้โดยการปรับขนาดของสัญญาณชานซ์และโคชานซ์ที่ใช้ในการควบคุมการกระตุ้นด้วยวงจรมัลติพลายเออร์ ซึ่งระบบที่ใช้ในการทดลองแสดงได้ดังภาพที่ 5.6

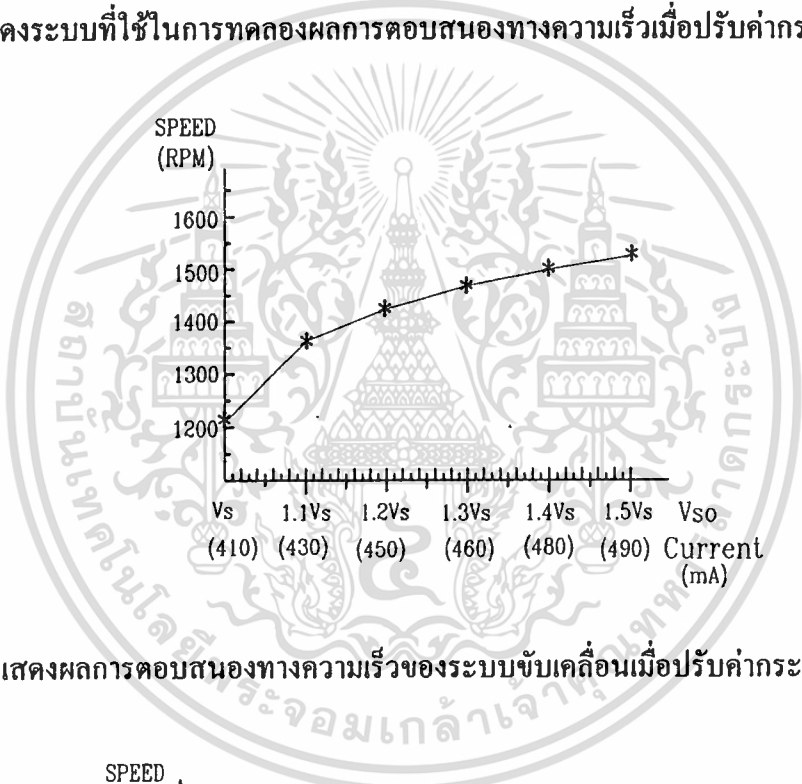
จากการทดลองผลตอบสนองทางความเร็วของระบบขับเคลื่อน โดยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสกระตุ้น จะเห็นว่าความเร็วรอบของมอเตอร์นั้นสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามที่ต้องการ แต่เมื่อนำมอเตอร์ดังกล่าวนี้ไปใช้ในสภาวะที่มีการทำงาน โดยทำการเปลี่ยนค่าภาระงานที่ให้กับมอเตอร์ค่าต่าง ๆ 4 ค่า ผลที่ได้คือค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีค่าลดลง เมื่อมอเตอร์มีค่าภาระงานมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 5.7 และ 5.8 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

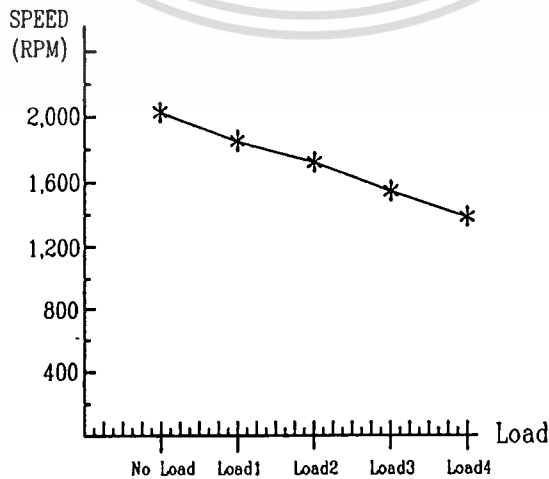
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.6 แสดงระบบที่ใช้ในการทดลองผลการตอบสนองทางความเร็วเมื่อปรับค่ากระแสกระตุ้น



ภาพที่ 5.7 แสดงผลการตอบสนองทางความเร็วของระบบขับเคลื่อนเมื่อปรับค่ากระแสกระตุ้น

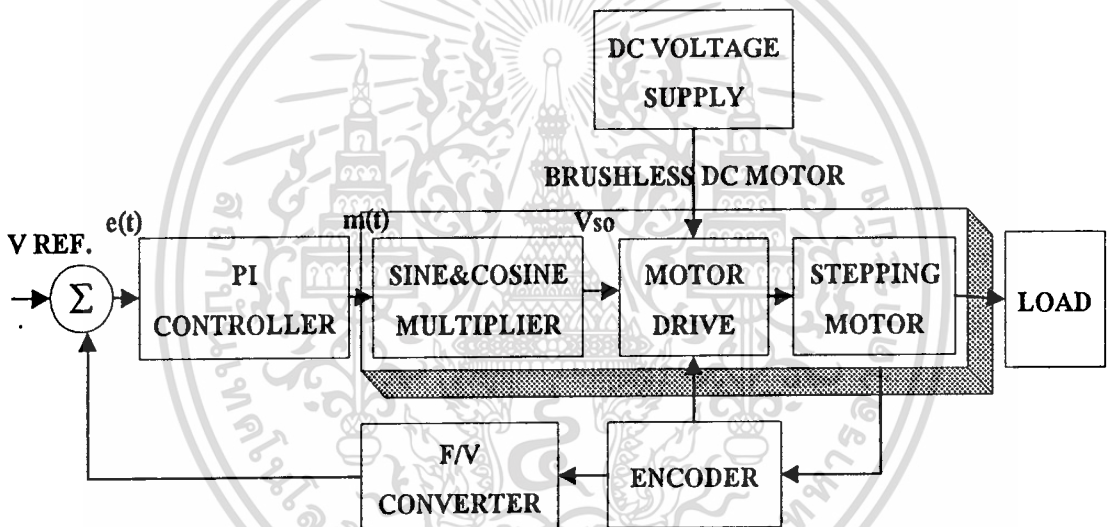


ภาพที่ 5.8 แสดงผลการตอบสนองทางความเร็วของระบบขับเคลื่อนเมื่อมีการะงาน

5.2 การทดลองการทำงานของระบบควบคุมความเร็ว

5.2.1 การทดลองระบบควบคุมความเร็วโดยการควบคุมค่ากระแสกระตุ้น

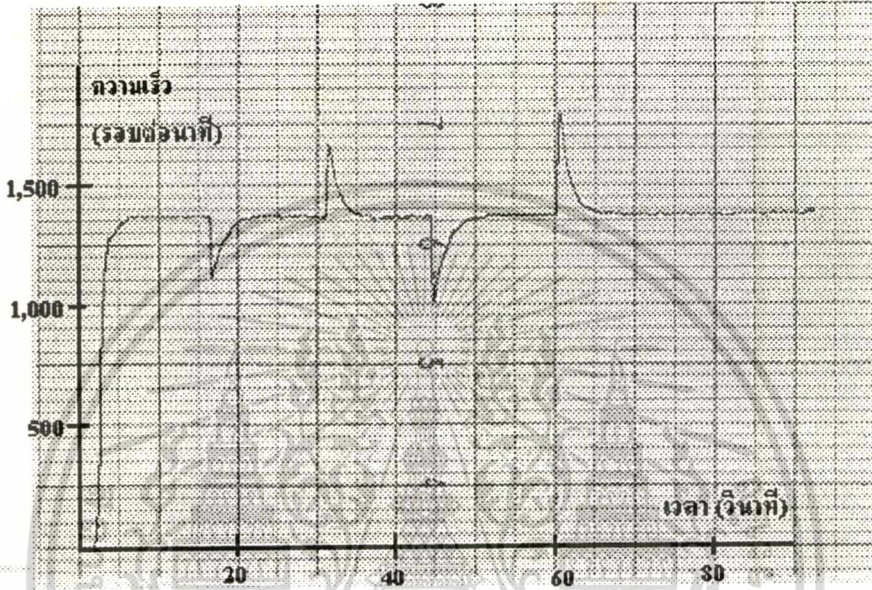
ระบบขับเคลื่อนที่ได้ออกแบบมานั้นเมื่อมีการงานค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จะลดลงและไม่สามารถควบคุมให้มีค่าที่คงที่ได้ การใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับมาควบคุมค่ากระแสกระตุ้นให้มีค่าสอดคล้องกับขนาดของภาระงานที่มอเตอร์ได้รับ ทำให้มอเตอร์มีค่าแรงบิดที่สามารถรักษาค่าความเร็วให้มีค่าคงที่ได้เมื่อมอเตอร์มีการทำงาน ซึ่งระบบที่ใช้ในการทดลองแสดงดังภาพที่ 5.9



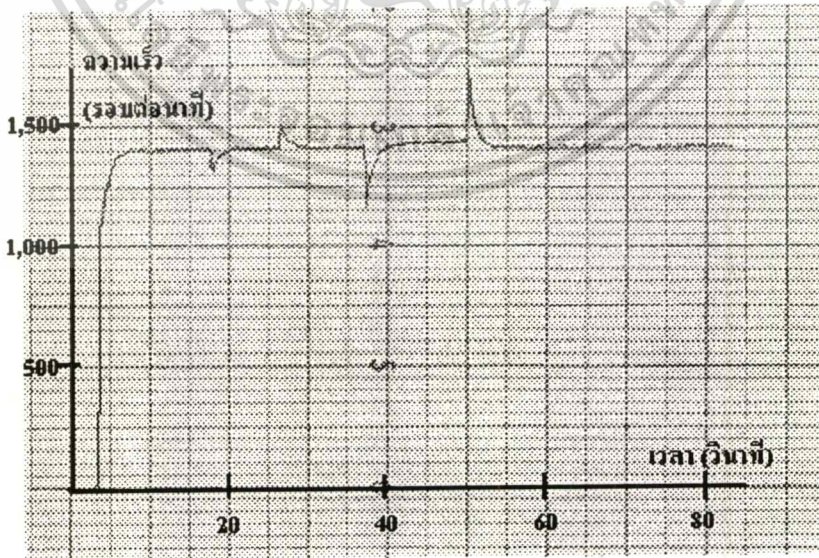
ภาพที่ 5.9 แสดงระบบควบคุมความเร็วโดยการควบคุมค่ากระแสกระตุ้น

การทดลองของระบบควบคุมตามภาพที่ 5.9 จะทำการทดลองโดยการคงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรขับเคลื่อน และทำการควบคุมค่ากระแสกระตุ้นด้วยการควบคุมขนาดของสัญญาณรูปคลื่นไซน์และโคไซน์ด้วยตัวควบคุมแบบ PI ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังภาพที่ 5.10 และภาพที่ 5.11 ในการทดลองจะใช้ PORTABLE RECORDER TYPE 3057 ของ โยโกกาวา เป็นตัวบันทึกผลการทดลอง โดยทำการกำหนดค่า CHART SPEED เท่ากับ 6 เซนติเมตรต่อนาที และจากผลการทดลองเมื่อมีการให้ภาระงานกับมอเตอร์ พบว่าค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จะลดลงชั่วขณะก่อนที่จะปรับค่าความเร็วเข้าสู่ค่าที่กำหนด และเมื่อถึงภาระงานออกจะทำให้ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์เพิ่มขึ้นจากค่าที่กำหนดชั่วขณะก่อนที่จะปรับเข้าสู่ค่าที่กำหนดดั้งเดิม และการเอกลักษณะได้ให้ภาระงานกับมอเตอร์ 2 ค่า สังเกตได้ว่าเมื่อมอเตอร์ได้รับการงานมากขึ้น จะทำให้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วรอบของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงจากค่าที่กำหนดมากขึ้น แต่ก็สามารถปรับค่าความเร็วเข้าสู่ค่าที่กำหนดได้ และเมื่อมีการปรับค่า K_p ของตัวควบคุมให้มีค่ามากขึ้น จะทำให้ผลการตอบสนองของระบบเร็วขึ้นด้วย



ภาพที่ 5.10 แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วเมื่อ $K_p=40\%, K_i=40\%$

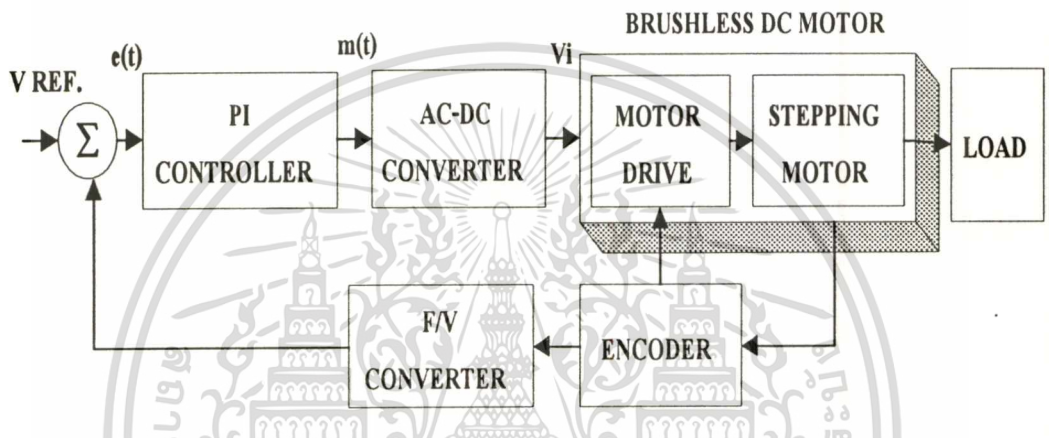


ภาพที่ 5.11 แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วเมื่อ $K_p=70\%, K_i=40\%$

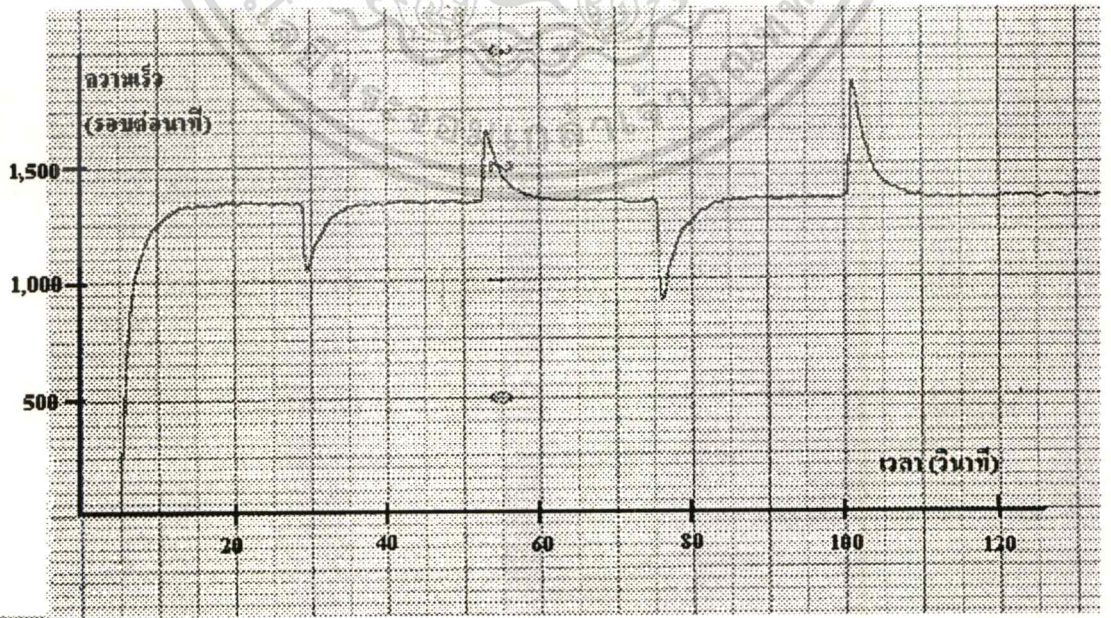
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 การทดลองระบบควบคุมความเร็วโดยการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้า

การควบคุมความเร็วโดยการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรขับเคลื่อน จะใช้ วงจรแปลงสัญญาณเอซีเป็นดีซีแบบเต็มคลื่นที่ใช้กับระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยทั่ว ๆ ไป มาทดลองใช้กับระบบขับเคลื่อนที่ได้ออกแบบไว้ ระบบควบคุมนั้นจะสามารถ แสดงได้ตามภาพที่ 5.12



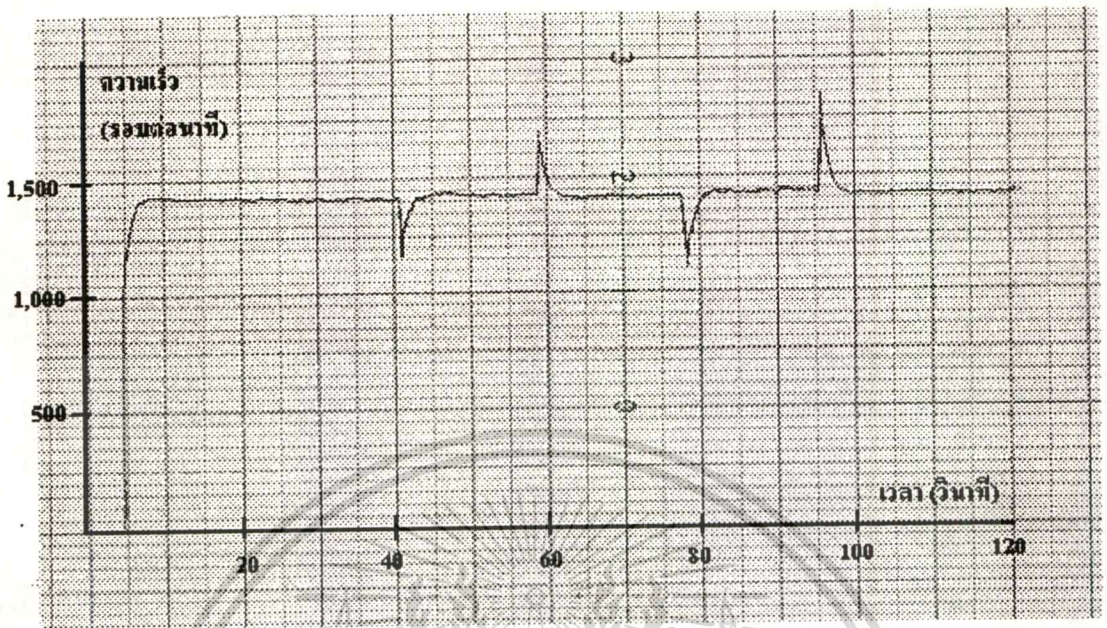
ภาพที่ 5.12 แสดงระบบควบคุมความเร็ว โดยการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้า



ภาพที่ 5.13 แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วเมื่อ $K_p=10\%, K_i=30\%$

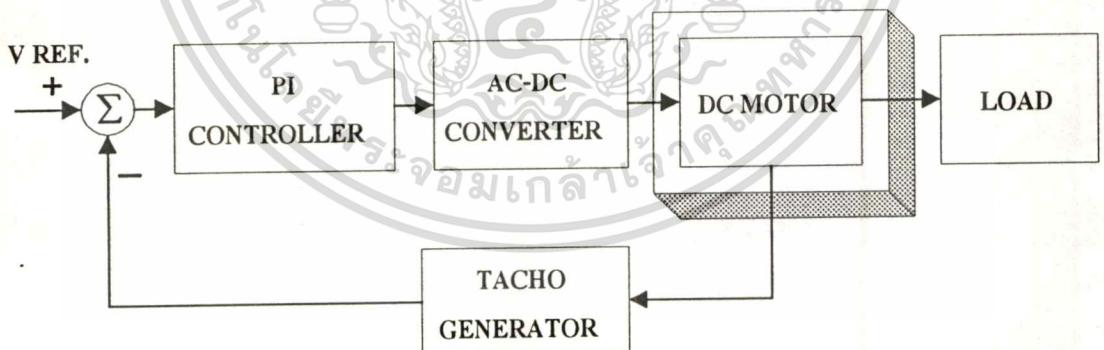
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อเผยแพร่ทางเว็บไซต์เป็นการค้า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



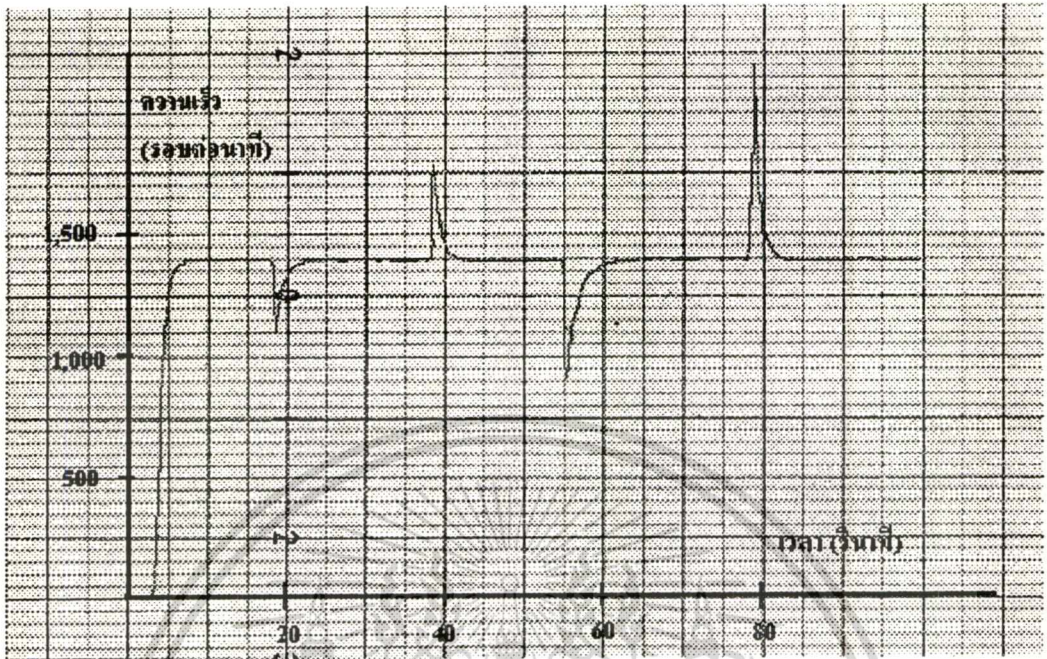
ภาพที่ 5.14 แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วเมื่อ $K_p=50\%$, $K_i=30\%$

5.2.3 การทดลองระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้า

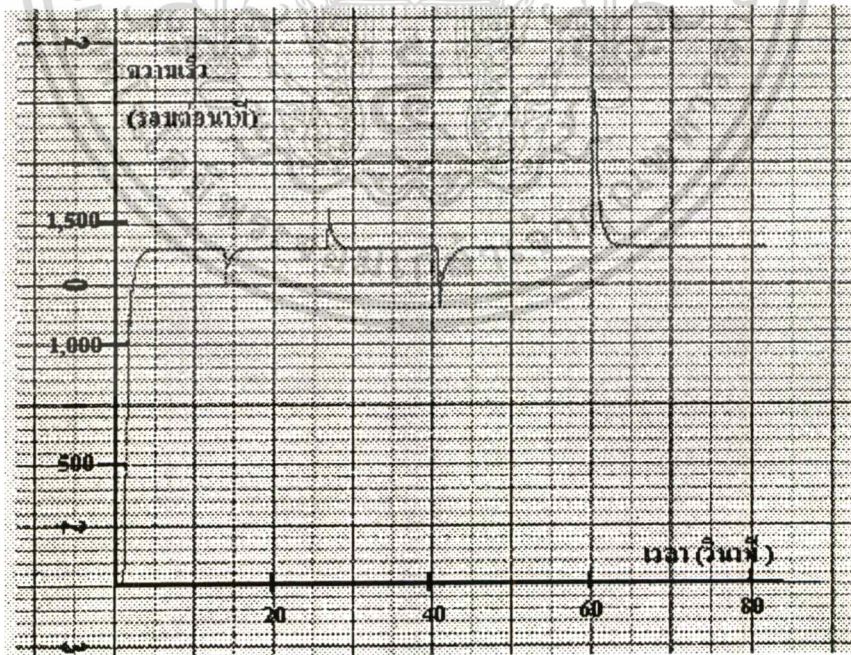


ภาพที่ 5.15 แสดงระบบควบคุมความเร็วที่ใช้ในการทดลองกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



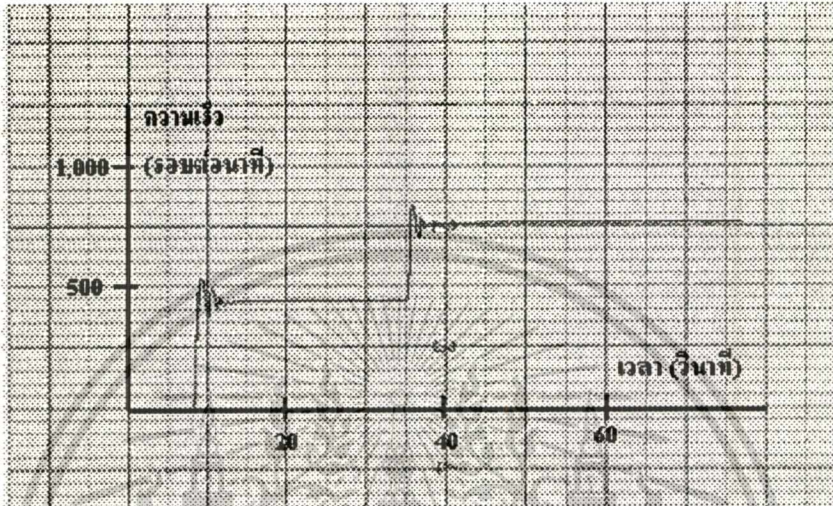
ภาพที่ 5.16 แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วเมื่อ $K_p=10\%$, $K_i=30\%$



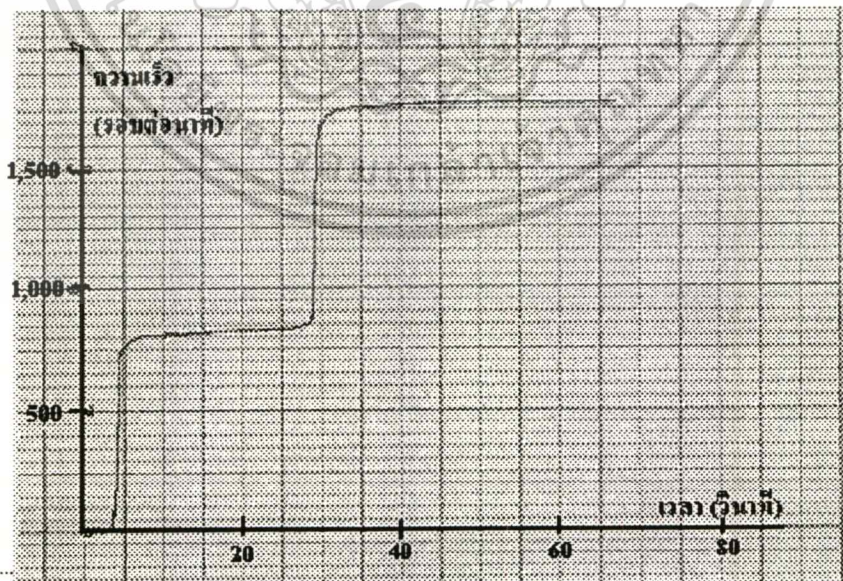
ภาพที่ 5.17 แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วเมื่อ $K_p=50\%$, $K_i=30\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.4 การทดลองผลการตอบสนองทางความเร็วของระบบควบคุม ต่อการเปลี่ยนแปลง สเตปอินพุต

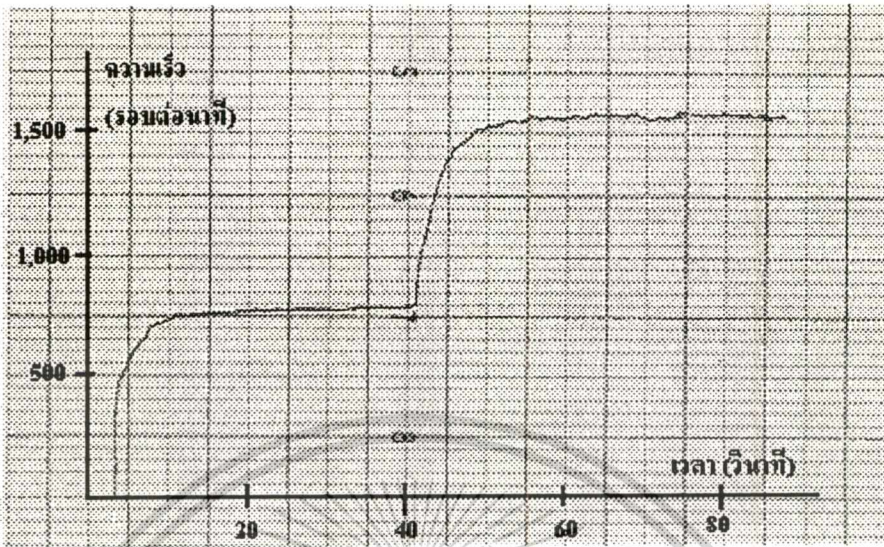


ภาพที่ 5.18 แสดงผลตอบสนองทางความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต่อการเปลี่ยนแปลงของสเตปอินพุต



ภาพที่ 5.19 แสดงผลตอบสนองทางความเร็วของสเตปมอเตอร์ที่ควบคุมค่ากระแสกระตุ้นต่อการเปลี่ยนแปลงสเตปอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.20 แสดงผลตอบสนองทางความเร็วของสเตปิ่งมอเตอร์ที่ควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงสเตปอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

การกระตุ้นสเตปป์มอเตอร์ในรูปแบบกระแสชานน์แบบลูปปิด ทำให้การหมุนของสเตปป์มอเตอร์เป็นไปอย่างราบเรียบและต่อเนื่อง เทียบเคียงได้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกขดกระตุ้น แต่เมื่อนำมอเตอร์ดังกล่าวไปใช้งานในสภาวะที่มีภาระงานขนาดต่างๆ พบว่าค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จะลดลงและไม่สามารถควบคุมให้คงที่ตามที่ต้องการได้ อีกทั้งผลตอบสนองทางความเร็วก็ลดลงเนื่องจากไม่มีการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ให้มีค่าสอดคล้องกับขนาดของภาระงานที่มอเตอร์ได้รับ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการพัฒนาระบบขับเคลื่อนและออกแบบระบบควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ดังกล่าว เพื่อให้มอเตอร์สามารถควบคุมความเร็วให้คงที่ได้เมื่อนำไปใช้งานในสภาวะที่มีภาระงานขนาดต่างๆ โดยการออกแบบระบบควบคุมค่ากระแสกระตุ้นให้มีค่าเหมาะสมกับขนาดของภาระงานที่มอเตอร์ได้รับเพื่อให้มอเตอร์มีแรงบิดเหมาะสมกับขนาดของภาระงานและสามารถควบคุมความเร็วให้มีค่าคงที่เมื่อมอเตอร์มีภาระงาน

จากการออกแบบระบบควบคุมความเร็วและแรงบิดเพื่อนำมาใช้ควบคุมการทำงานของวงจรขับเคลื่อนของสเตปป์มอเตอร์ดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าระบบที่ได้ออกแบบไว้สามารถทำให้มอเตอร์มีผลการตอบสนองที่ดีขึ้นกว่าการใช้ระบบควบคุมแบบเดิม ซึ่งระบบควบคุมแบบเดิมในที่นี้จะหมายถึงระบบควบคุมความเร็วที่ใช้การควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้วย วงจรแปลงสัญญาณเอซีเป็น ดีซี ส่วนระบบควบคุมที่ได้พัฒนาขึ้นมาจะใช้การควบคุมค่ากระแสกระตุ้นในระบบขับเคลื่อนซึ่งสามารถสรุปเปรียบเทียบได้ตามตารางดังนี้

คุณลักษณะ	ระบบควบคุมแบบเดิม	ระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นมา
ผลการตอบสนองทางความเร็วต่อสเตปอินพุต	ช้ากว่าระบบที่ได้พัฒนาขึ้นมา	เร็วกว่าระบบเดิม
ผลตอบสนองทางความเร็วต่อสเตปโหลด	ให้ผลการตอบสนองที่ดี	ให้ผลการตอบสนองที่ดี มีการแกว่งจากค่าที่กำหนดต่ำ
การควบคุมความเร็วเมื่อมีการะงาน	สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ ตามภาระงานที่กำหนด	สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ ตามภาระงานที่กำหนด
สัญญาณรบกวน	มีค่าค่อนข้างสูง	ต่ำ

นอกจากนี้ระบบขับเคลื่อนและระบบควบคุมที่ได้พัฒนาและออกแบบขึ้น ตัวมอเตอร์มีขนาดเล็ก และไม่มีแปรงถ่าน ทนต่อกระแสขับเคลื่อนต่อเนื่องได้สูง ลดสัญญาณรบกวนและการซ่อมบำรุงในส่วน of แปรงถ่าน

ปัญหาที่พบในงานวิจัยจะเป็นปัญหาทางด้านฮาร์ดแวร์ ที่มีจำนวนอุปกรณ์และวงจรลอจิกต่าง ๆ เป็นจำนวนมากทำให้ระบบที่ออกแบบขึ้นมาี้มีขนาดใหญ่ อีกทั้งตัวเข้ารหัสที่มีความละเอียดสูงๆ จะหาได้ยากและมีราคาแพง ดังนั้นหากมีการพัฒนาต่อไปโดยการลดอุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดแวร์ให้น้อยลงและเปลี่ยนมาใช้ระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing) แทนวงจรลอจิกและตัวเข้ารหัสในการวิเคราะห์การหมุนของสเตปปีงมอเตอร์ จะลดปัญหาเกี่ยวกับอุปกรณ์ต่าง ๆ และลดขนาดของฮาร์ดแวร์ลงไปได้ และพัฒนาการเขียนฟังก์ชันการควบคุมในรูปแบบของซอฟต์แวร์จะทำให้การทำงานของระบบทำได้ง่ายและมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] วิสชุด ศรีรัตนะ, ไสว เหล่าไม้, ประภาส อุดคคกิมพันธ์, รศ.พิพัฒน์ เลาหสงคราม "มอเตอร์ กระแสตรงที่ไม่มีแปรงถ่านโดยใช้สเตปป์มอเตอร์ " ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบัน ครั้งที่ 18 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 1995
- [2] ไสว เหล่าไม้, วิสชุด ศรีรัตนะ, ศศ. ประภาส อุดคคกิมพันธ์, รศ.กิตติ ติรเศรษฐ " การควบคุม ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน โดยใช้สเตปป์มอเตอร์เป็นกรณี ศึกษา" วิศวกรรมลาดกระบัง " คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ- ทหารลาดกระบัง ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2541
- [3] วิสชุด ศรีรัตนะ "การออกแบบและพัฒนาเทคนิคการขับสเตปป์มอเตอร์ให้หมุนต่อเนื่องใน รูปแบบกระแส" วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ.2540
- [4] รศ.ดร.โยธิน เปรมปราณีรัชต์ "วิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์" สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 1983
- [5] Takashi Kenjo "Stepping motors and their microprocessor controls" OXFORD, 1984
- [6] A.E. Fitzgerald, Charles. kingsley, Jr., Stephen D.Umans "ELECTRIC MACHINERY" Singapore, 1986
- [7] Electro-Craft Corporation "DC MOTOR SPEED CONTROL SERVO SYSTEM" Electro- Craft Corporation .USA
- [8] Muhammad H.Rashid "Power Electronics" Prentice Hall International, Inc.
- [9] KATSUHIKO OGATA "MODERN CONTROL ENGINEERING" Prentice Hall International, Inc.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ทางจิตตกรรมในป่า

ครั้งที่ 18*



จัดโดย - -

คณะจิตตกรรมศาสตร์

- - - - -

มอเตอร์กระแสตรงที่ไม่มีแปรงถ่านโดยใช้สเต็ปมอเตอร์
DC BUSHLESS MOTOR BY USING STEPPING MOTOR

วิศรุต ศรีรัตนะ* ไสว เหล่าไม้* ประภาช อุดคึกิมาพันธุ์** พิพัฒน์ เลานสงคราม***

บทคัดย่อ

การใช้เทคนิคในรูปแบบกระแสคลื่นไซน์ควบคุมแรงบิดต่อความเร็วที่เปลี่ยนแปลงให้คงที่ในสเต็ปมอเตอร์ จะมีการสูญเสียพลังงานความร้อนสูงถ้าให้มอเตอร์ทำงานอย่างต่อเนื่องที่ความเร็วรอบสูง ในบทความนี้จะเสนอการปรับปรุงเทคนิคการย่อยสเต็ปในรูปแบบกระแสย่อยใหม่ ผลที่ได้จะประหยัดเชื้อเพลิงและทำงานให้มีคุณสมบัติเทียบเคียงกับมอเตอร์กระแสตรงที่ไม่มีแปรงถ่าน

มอเตอร์ ซึ่งเป็นผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ มีค่าคงที่ตลอดย่านความเร็วตอบสนองของมอเตอร์ แต่กำลังงานสูญเสียของขดลวดที่อยู่ในรูปของพลังงานความร้อนจะมีค่าสูงขึ้นสัมพันธ์กับความเร็วตอบสนองเช่นกัน แม้ในภาวะที่ไม่มีมีการขับเคลื่อนเพลลาของมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ก็ตาม การสูญเสียกำลังงานนี้เป็นผลมาจาก กระแสที่ไหลสุดขั้วของสเตเตอร์ถูกควบคุมให้มีขนาดสอดคล้องกับตำแหน่งของโรเตอร์และสเตเตอร์ในรูปแบบไซน์ ขณะเดียวกันค่าแรงดันเหนี่ยวนำ จะมีค่าสูงขึ้นสัมพันธ์กับความเร็วตอบสนองที่โรเตอร์ เป็นผลให้กำลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้นโดยที่ความเร็วตอบสนองเป็นความเร็วควบคุมได้จากการกระตุ้นภายนอกดังสม-

Abstract

The technic of sinusoidal current control for constant torque will cause a loss in power dissipation. Therefor, this paper proposes an improvement technic by dividing the sinusoidal current in small stripes. This will conguer the mentioned problem. The resultant of this method is equivalent to the characteristic of DC bushless motor.

$$W = \frac{K \cdot N \cdot I}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^2 \theta \cdot d\theta \quad [1]$$

I = Current control

บทนำ

การให้กำลังงานในรูปประจกระแสไซน์เป็นการแก้ปัญหาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากกระแสหมุนที่เพลารอง

จากสมการที่ 1 ถ้า N อยู่ในสภาวะลอยตัว และ I ยังคงอยู่ในสภาวะควบคุมจะเป็นผลให้ N เป็นตัวสร้างสมดุลย์กระแสเหนี่ยวนำให้มีทิศทางย้อนกระแสควบคุมที่จ่ายให้กับสเต็ปมอเตอร์ เป็นผลให้การสูญเสียกำลังงานในขดลวดลดลง และ N จะมีค่าดังสมการ

$$N = K_1 \cdot V_s \quad [2]$$

N = Rotor revolution (RPM)

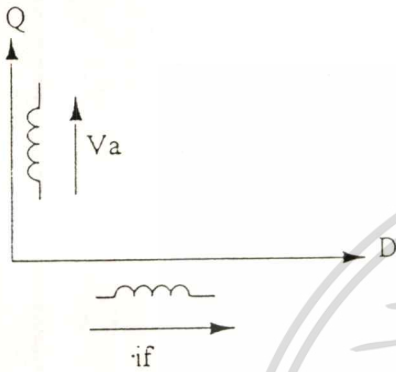
K₁ = Machine constant (DC)

V_s = Supply voltage (DC)

*รองศาสตราจารย์ **อาจารย์ **นักศึกษาระดับปริญญาโท
ภาควิชาเทคโนโลยีการวิศวกรรม อุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะต้องจัดลำดับการกระตุ้น ให้สัมพันธ์กับการหมุนของโรเตอร์เทียบกับสเตเตอร์ ที่มีมุมของเวกเตอร์เส้นแรงแม่เหล็กของสเตเตอร์และโรเตอร์ทำมุม 90 องศาทางแม่เหล็กแสดงได้ดังแผนประสานดังนี้



รูปที่ 1 แสดงแผนประสานเทียบเคียง มอเตอร์กระแสตรงทั่วไป

รูปที่ 1 เป็นแผนประสานที่ใช้เทียบเคียงกับเครื่องจักรไฟฟ้าแบบกระแสตรง สำหรับบทความนี้เลือกสเต็ปมอเตอร์เป็นกรณีศึกษาเนื่องจากโรเตอร์ของมอเตอร์ประเภทนี้เป็นแม่เหล็กถาวรและ สเตเตอร์เป็นแม่เหล็กไฟฟ้า จึงมีการปรับแผนประสานระหว่างแกน D และแกน Q โดยที่แกน D และ Q ของเครื่องจักรไฟฟ้าแบบกระแสตรง จะแสดงถึงสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ

หลักการทํางาน

วงจรที่สร้างขึ้นเพื่อทดสอบการทำงานประกอบด้วยหน่วยต่าง ๆ ดังนี้

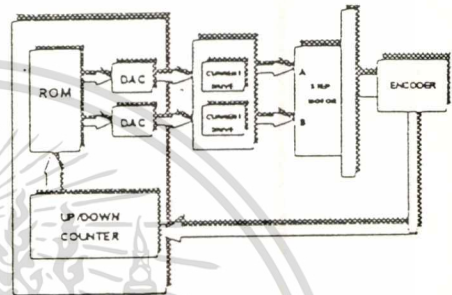
- หน่วยขับเคลื่อนชนิดป้อนกลับแบบ 2 ควอเตอร์น 2 หน่วย ใช้ขับเคลื่อนและสุวัดลวดของสเต็ปมอเตอร์ 2 ชุด มีมุมของขั้วแม่เหล็ก 90 องศาทางไฟฟ้า
- หน่วยกำเนิดข้อมูลสัญญาณชานัน ประกอบด้วยหน่วยความจำแบบอ่านได้อย่างเดียว (ROM), หน่วยนับแบบโปรแกรมได้, หน่วยแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก

หน่วยถอดรหัสการหมุนของตัวเข้ารหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ENCODER)

- หน่วยเข้ารหัสซึ่งติดตั้งอยู่กับเพลลาของสเต็ปมอเตอร์มีความละเอียด 2000P/R
- สเต็ปมอเตอร์ ที่มีความละเอียด 1.8 องศาต่อสเต็ป ความต้านทานของขดลวด 0.8 โอห์ม



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่จัดสร้างขึ้น

การกำเนิดกระแสรูปชานัน และโคชานันจะสัมพันธ์กับตำแหน่งของเพลลาโดยการติดตั้งวงจรเข้ารหัสเชิงมุม ดังนั้นเมื่อเพลลาของมอเตอร์หมุนไป จะเป็นผลทำให้เวกเตอร์ของเส้นแรงแม่เหล็กยังคงทำมุมกับแม่เหล็กถาวร 90 องศาทางไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา ความละเอียดของสัญญาณชานันขึ้นอยู่กับขนาดของข้อมูล ซึ่งบรรจุลงในหน่วยความจำแบบอ่านได้อย่างเดียว สามารถหาขนาดข้อมูลได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จำนวนของสเต็ปในหนึ่งรอบ} &= \frac{360^\circ}{1.8^\circ} \\ &= 200 \text{ สเต็ป} \end{aligned}$$

จำนวนข้อมูลต่อสเต็ป

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{ขนาดความละเอียดของตัวเข้ารหัส}}{\text{จำนวนสเต็ปในหนึ่งรอบ}} \\ &= \frac{8000}{200} \\ &= 40 \text{ ข้อมูลต่อสเต็ป} \end{aligned}$$

ขนาดความสูงเชิงมุมในรูปแบบชายนี และ โคขายนีจะถูกปรับเข้าสู่ขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ เพื่อเป็นตัวกำหนดขนาดของกระแส หรือปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กให้กับสเตเตอร์ในขณะที่โรเตอร์ทำมุมกับสเตเตอร์ 0 ถึง 1.8 องศา หรือหนึ่งสเตป การเคลื่อนที่ของโรเตอร์เปรียบได้กับมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่านทั่วไป โดยที่แปรงถ่านของมอเตอร์ดังกล่าวนี้เป็นอุปกรณ์ติดต่อสุดของขดลวดซึ่งพันอยู่บนโรเตอร์ เมื่อเราติดตามทดสอบกระแสในขดลวดระหว่างการเคลื่อนที่จากขั้วแม่เหล็กขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง จะพบปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นรูปแบบของชายนีเช่นกัน ดังนั้นกระบวนการในการกำหนดกระแสให้กับขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ เปรียบได้กับอุปกรณ์ติดต่อสุดขดลวดใน โรเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน ที่เรียกว่า คอมมิวเตเตอร์นั่นเอง

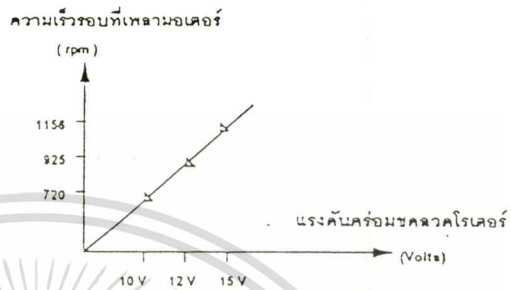
การทดสอบการทำงาน

ระบบที่ทำการทดสอบ แสดงดังบล็อกไดอะแกรมที่ 2 โดยมีเงื่อนไขของการทดสอบดังนี้

- กำหนดความละเอียดของรูปแบบกระแสชายนีและโคขายนีออกเป็น 40 ส่วน ที่มี 0 ถึง 59 องศาทางไฟฟ้า
- กำหนดขดลวดของกระแสชายนีไว้ที่ 600 มิลลิแอมป์
- กำหนดแรงดันอิมิตัวของกระแสควบคุมไว้ที่ 10 , 12 และ 15 โวลท์

การทดสอบการทำงานของมอเตอร์ จะทำการทดสอบเพียง 2 สภาวะได้แก่ การทดสอบสภาวะที่ไม่มีภาระ และการทดสอบภาวะลัดโรเตอร์เท่านั้น การทดสอบความเร็วตอบสนองต่อแรงดัน โดยการกำหนดแรงดันคร่อมลิวท์ 10 โวลท์ให้แรงดันรณะมอเตอร์หยุดนิ่ง มอเตอร์สามารถหมุนออกตัวได้อย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นความเร็วรอบของมอเตอร์จะคงที่อยู่ที่ 700 รอบต่อนาที และเมื่อทดสอบโดยการเปลี่ยน

แรงดันคร่อมลิวท์เป็น 12 และ 15 โวลท์ ตามลำดับ ผลการทดลองที่ได้สามารถแสดงดังแผนประสานความเร็ว และแรงดันคร่อมลิวท์ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ของแกนประสานระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันคร่อมลิวท์

หลังจากการทดสอบความเร็วตอบสนองต่อแรงดันพบว่า มีคุณสมบัติที่สอดคล้องกับมอเตอร์กระแสตรงแบบฟิลด์ชานาน (DC Shunt field) หรือ มอเตอร์กระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร ดังแสดงในสมการที่ 3

$$\omega = \frac{V_a - (R_a + L \frac{d}{dt}) \cdot i_a}{k_f \cdot i_f} \tag{3}$$

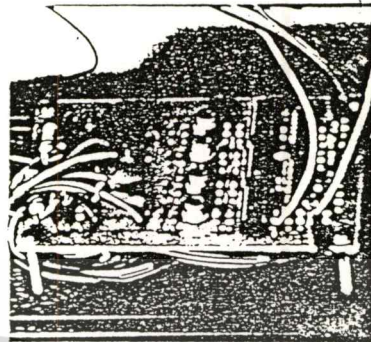
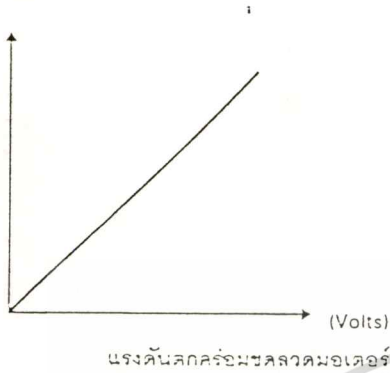
- V_a = Armature voltage
- i_a = Current control
- R_a = Armature resistance
- ω = Radius per second

จากสมการที่ 3 สามารถแสดงความสัมพันธ์ของแกนประสานระหว่างความเร็วรอบ กับแรงดันคร่อมขดลวดที่โรเตอร์ได้ดังรูปที่ 4

เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติเดิมของสเตปป์มอเตอร์ที่รักษาค่าของกระแสในขณะจ่ายให้กับขดลวดอย่างคงที่ เมื่อทำการกระตุ้นให้โรเตอร์หมุนไปโดยค่อย ๆ เพิ่มความเร็วของมอเตอร์อย่างช้า ๆ พบว่า มอเตอร์เริ่มเสถียรภาพของกฎของโคโรนาที่ความเร็วรอบประมาณ 700 - 755 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

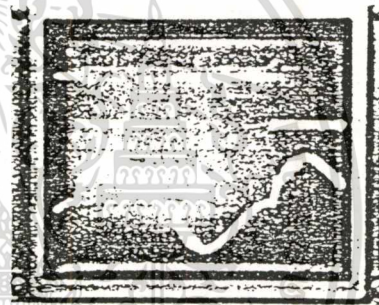
ความเร็วรอบที่เพลามอเตอร์
(rpm)



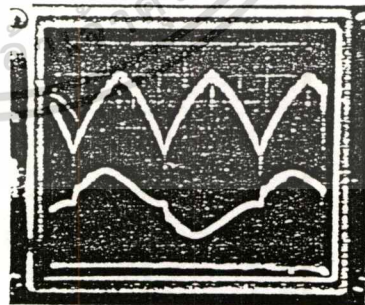
รูปที่ 4 แกนประสานแสดงผลตอบสนอง ความเร็ว
รอบต่อแรงดันของกระแสตรงที่ลัดชานาน

รูปที่ 6 วงจรรับกระแส

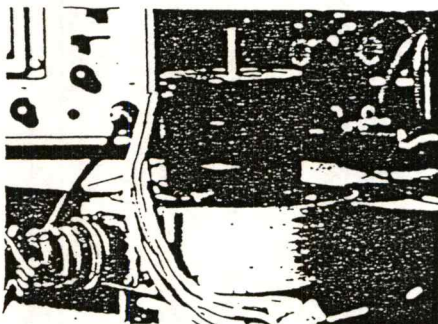
การทดสอบแรงบิด กระทำโดยการลัด
โรเตอร์และเริ่มจ่ายแรงดันกระแสสลับ 12 โวลต์ พบว่า
ไม่เกิดการเคลื่อนไหวใด ๆ และเมื่อปล่อยโรเตอร์ให้
เป็นอิสระ เพลาของโรเตอร์สามารถหมุนออกตัวด้วย
ความเร็วสูงทันที เมื่อทำการทดสอบเทียบกับวิธีการ
ของสแตปป์มอเตอร์ทั่วไป ซึ่งใช้สแตปป์ตัวเดียวกัน
นั้น โดยกำหนดความเร็วไว้ที่ 200 รอบต่อนาที การ
ทดสอบในเงื่อนไขเดียวกันหลังจากปล่อยโรเตอร์ให้เป็น
อิสระ เพลาของโรเตอร์จะเกิดการสั่นตัวและไม่มีการ
เคลื่อนที่แต่อย่างใด เนื่องจากมอเตอร์เสียเสถียรภาพ
ของการซิงโครไนซ์ อย่างไรก็ตามการทดสอบแรงบิดนี้ไม่
สามารถทำได้โดยสมบูรณ์ เนื่องจากขาดเครื่องมือที่ใช้
ในการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์ขนาดเล็ก



รูปที่ 7 แสดงการกำเนิดกระแสชวายน ความถี่
ประมาณ 14 KHz, 8 V_{pp}



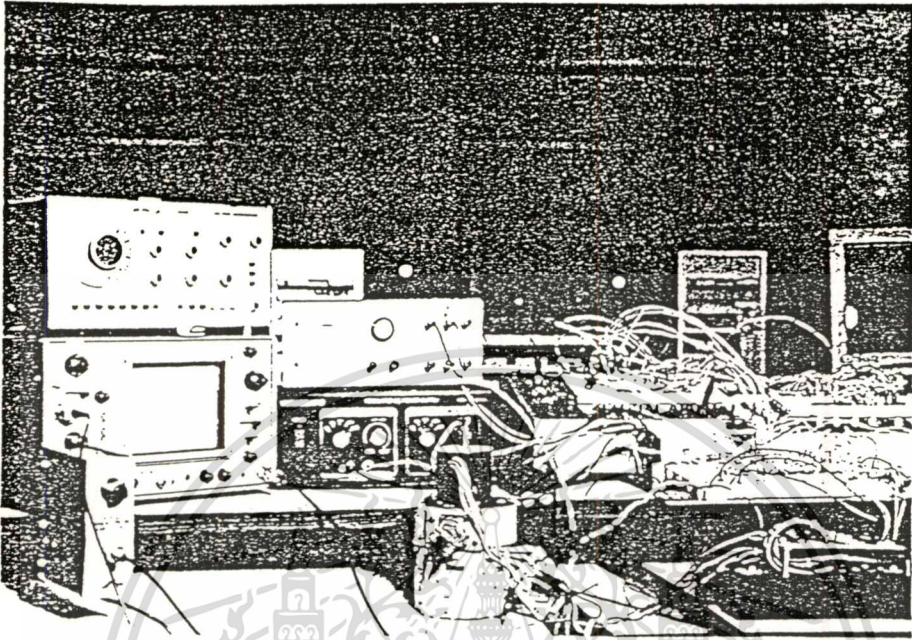
รูปที่ 8 แสดงกระแสในขดลวด ความถี่
ประมาณ 14 KHz, 5 V_{pp}



รูปที่ 5 รูปแสดงการติดตั้งวงจรวอร์เรอ์สกับ

สแตปป์มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 แสดงระบบรวมทั้งหมดที่จัดสร้างขึ้น

บทสรุป

สแต็ปป์มอเตอร์ที่ได้รับบุงเทคนิคการกระตุ้นในรูปแบบของกระแสดังกล่าวทำให้ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลดีขึ้น ผลจากการทดสอบพบว่าคุณสมบัติของแรงบิด และผลตอบสนองความเร็วดีขึ้นอย่างมาก เมื่อเทียบกับคุณสมบัติเดิมของสแต็ปป์มอเตอร์ ที่มีการกระตุ้นโดยวิธีย่อยกระแสแบบเดิม อย่างไรก็ตามเทคนิคการกระตุ้นกระแสที่ได้กล่าวในบทความนี้ยังมีความยุ่งยากในด้านโครงสร้างของอุปกรณ์เข้ารหัส ซึ่งต้องใช้อุปกรณ์เข้ารหัสความละเอียดสูง และต้องมีการปรับตำแหน่งของขั้วแม่เหล็ก ให้มีความสอดคล้องกับวงจรนับก่อนการใช้งาน หากได้มีการพัฒนาเอาอุปกรณ์เข้ารหัสแบบสับคูร์มาใช้กับเทคนิคที่ได้กล่าวมาแล้วนี้ คาดว่าสามารถที่จะนำเอามอเตอร์ชนิดนี้ไปใช้ในงานเชิงอุตสาหกรรมได้อย่างแน่นอน

เอกสารอ้างอิง

[1] ประภาส อุดกนิมาพันธ์, วิริยะ กองรัตน์, "มีนิลเตป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวันไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เทคนิคกับคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมสแต็ปป์มอเตอร์" ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[2] ประภาส อุดกนิมาพันธ์, วิริยะ กองรัตน์, "มีนิลเตป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวันไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เทคนิคกับคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมสแต็ปป์มอเตอร์" ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[3] B.W. Williams, "Power Electronics Device, Drivers and Application", Macmillian, 1978

[4] David Finney, "Variable Frequency AC Motor Drive System", Peter Peregrins Ltd., 1988

[5] K.S. Rajashekara, Joseph Vithyathil, "Protection and Switch Aid Networks for Transistors Bridge Inverters", IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol IE-33, No 2, 1985

[6] Takashi Kenjo, "Power Electronics for The Microprocessor Age", OXFORD PRESS, 1990

[7] W. Shepard and L.N. Hulley, "Power Electronics and Motor Control", Cambridge University, 1987

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 14 ฉบับที่ 2

มิถุนายน 2541

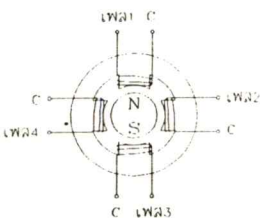
1. การออกแบบการใช้งานช่องสัญญาณควมเทียมของดาวเทียมไทยคม 1
อัญชลลา ราศรีมินทร์ กัลยา จันทร์ชานนา สุวิพล สิริอิทธิภาค 1
2. หลักการออกแบบคอนเวอร์เตอร์ SEPIC เพื่อแก้ไขเพาเวอร์แฟกเตอร์ใน โหมมคณารนำกระแสไฟฟ้าแบบต่อ
เนื่อง
บุญเลิศ มัดศิริ นนทวัฒน์ จุลเดชะ 11
3. การทดสอบการลดเสียงของอุปกรณ์เสียงแบบ Helmholtz
อัครเดช สีนฤภาค ปราโมทย์ เรืองฤทธิ์ 24
4. เครื่องวัดความต้านทานดิน
วิญญู แสงสินสิขกิจ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ 31
5. การประยุกต์ใช้วงจรแปลงกระแสไฟฟ้สลับที่ใช้หลักการเรโซแนนท์กับอิเล็กทรอนิกส์สับสลาสต์
วิเชียร เต็มอนุภาพกุล วัลลภ สุระกำพลธร 38
6. การสร้างตัวควบคุม PIDA สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบแยกตัวกระตุ้น
วิทยา ทิพย์สุวรรณพร สุพรรณ กุลพานิชย์ เกียรติอนันต์ สุขชู 49
7. การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน โดยใช้สแตปปีงมอเตอร์เป็นกรณีศึกษา
ไสว เหล็กไม้ วิศรุต ศรีรัตนะ ประภาส อุดคกิมาทันธุ์ กิตติ ตีระเศรษฐ 58
8. วงจรผลิตสัญญาณอย่างง่ายโดยการประมาณสัญญาณไซน์จากสัญญาณสามเหลี่ยม
วินัย ศิลาธรรม จริญญา เลิศจรสร่วมดี วิภา แสงพิสิทธิ 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

การทำงานของสเตปป์มอเตอร์ตามอัตราเร็วของสเตปป์แต่ละสเตปป์แบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ การหมุนเป็นสเตปป์และหมุนแบบต่อเนื่อง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการกระตุ้นในการหมุนแบบต่อเนื่องโดยการให้กำลังงานในรูปแบบกระแสชาน^[1] นั้น เป็นการแก้ปัญหาแรงคั้นเหนียวน้ำที่เกิดจากการหมุนที่เพลลาของมอเตอร์ เพื่อให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์มีค่าคงที่ตลอดย่านความเร็วตอบสนอง ทำให้สเตปป์มอเตอร์นี้มีคุณสมบัติเทียบเคียงได้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกขดกระตุ้น แต่เมื่อนำสเตปป์มอเตอร์นี้มาใช้ในงานภายใต้สภาวะของภาระงานค่าต่าง ๆ พบว่าความเร็วของมอเตอร์จะลดลงและมีค่าไม่คงที่ตามต้องการ จึงได้นำวงจรแปลงสัญญาณเอซีเป็นดีซีแบบเต็มคลื่นมาใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์โดยวงจรนี้จะทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้วงจรขับเคลื่อนสเตปป์มอเตอร์ตามค่าของแรงคั้นไฟฟ้าอ้างอิงและค่าแรงคั้นไฟฟ้าป้อนกลับ (ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วที่ต้องการและความเร็วจริงของมอเตอร์ตามลำดับ) ผลก็คือสามารถจะควบคุมความเร็วของสเตปป์มอเตอร์ได้ในสภาวะของภาระงานค่าต่างๆ โดยมีผลตอบสนองความเร็วที่เร็วกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และยังสามรถลดพลังงานสูญเสียในขดลวดที่อยู่ในรูปของความร้อนได้อีกด้วย สำหรับการกลับทิศทางของการหมุนนั้นทำได้โดยการกลับลำดับการกระตุ้นขดลวดของมอเตอร์ซึ่งสามารถกระทำได้อย่างทันทีทันใด อีกทั้งในเวลาหยุดนิ่งจะมีตัวตรวจจับกระแสภายในป้อนกลับให้กับวงจรขับเคลื่อนจึงทำให้มอเตอร์นี้ไม่เกิดความร้อนและไม่มีการสั่นในเวลาหยุดนิ่งเหมือนกับสเตปป์มอเตอร์ทั่วไป

2. ทฤษฎีและหลักการการทำงานทั่วไป



รูปที่ 1 โครงสร้างของสเตปป์มอเตอร์แบบ 4 เฟส

โครงสร้างของสเตปป์มอเตอร์แบบ 4 เฟสจะแสดงได้ดังรูปที่ 1 การกระตุ้นการทำงานโดยทั่วไปทำได้โดยการจัดลำดับการกระตุ้นตามตารางที่ 1.1 และ 1.2

ลำดับที่	เฟสที่ 1	เฟสที่ 2	เฟสที่ 3	เฟสที่ 4
1	●			
2		●		
3			●	
4				●

ตารางที่ 1.1 แสดงการกระตุ้นสเตปป์มอเตอร์ทีละเฟส

ลำดับที่	เฟสที่ 1	เฟสที่ 2	เฟสที่ 3	เฟสที่ 4
1	●			
2	●	●		
3		●		
4		●	●	
5			●	
6			●	●
7				●
8	●			●

ตารางที่ 1.2 แสดงการย่อยสเตปป์ในการกระตุ้นสเตปป์มอเตอร์ในหนึ่งรอบ

ในทางทฤษฎีนั้น ถ้าเพิ่มอัตราเร็วในแต่ละสเตปป์ให้มากขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยการเพิ่มความถี่ของสัญญาณพัลส์กระตุ้น (Exciting pulse) และมีความสัมพันธ์ได้ดังนี้^[2]

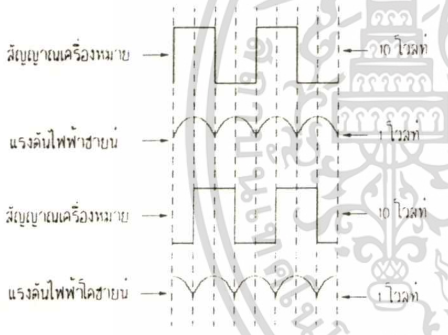
$$N = \frac{60f}{S} \tag{1}$$

- โดยที่ N คือ ความเร็วรอบที่เพลลา (รอบ/นาที)
- f คือ อัตราเร็วของสเตปป์ (สเตปป์/วินาที)
- S คือ จำนวนสเตปป์ทั้งหมด (สเตปป์/รอบ)

จาก (1) เมื่อเพิ่มอัตราเร็วของสเตปป์ให้มากขึ้น ความเร็วของสเตปป์มอเตอร์จะมากขึ้นด้วย แต่จากการทดสอบพบว่าสเตปป์มอเตอร์จะตอบสนองได้ดีที่ช่วง

การเพิ่มอัตราเร็วของสเตปป์มอเตอร์ให้มากขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้มอเตอร์ใช้งานที่ความเร็วสูงเกินไป และจะมีความร้อนเกิดขึ้นที่ตัวมอเตอร์ด้านการคำนวณค่าไม่ถูกต้องทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2 แสดงถึงสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมการกระตุ้นที่ได้พัฒนาขึ้นในการวิจัยนี้ โดยสัญญาณเครื่องหมายจะเป็นตัวกำหนดทิศทางกระแสของกระแสในเฟสต่าง ๆ ของสเตปป์มอเตอร์ ส่วนสัญญาณขาขึ้นและโคขาขึ้น (ซึ่งได้จากการใช้ตัวเข้ารหัสที่มีความละเอียด 2,000 พัลส์ต่อรอบ จำนวน 2 ชุด (A,B) โดยต่อเข้ากับสเตปป์มอเตอร์ที่มีความละเอียด 1.8 องศาต่อสเตปป์ จึงทำให้สัญญาณที่ได้ในรูปที่ 2 มีความละเอียด 40 ข้อมูลต่อสเตปป์) จะเป็นตัวกำหนดจังหวะในการกระตุ้นให้ขดลวดในเฟสต่างๆของสเตปป์มอเตอร์ การควบคุมการกระตุ้นด้วยสัญญาณขาขึ้นและโคขาขึ้นนี้จะทำให้การหมุนของสเตปป์มอเตอร์เกิดความต่อเนื่อง และมีการตอบสนองทางความเร็วได้สูงขึ้น



รูปที่ 2 แสดงสัญญาณที่ถูกย่อสเกลให้เป็นรูปขาขึ้น

นอกจากนี้ ความเร็วรอบของสเตปป์มอเตอร์จะแปรค่าไปตามค่าของแรงดันอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรขับเคลื่อนสเตปป์มอเตอร์ (V_i)¹¹ โดยสามารถจะแสดงได้ในรูปของสมการ ที่ 2

$$N = KV_i \tag{2}$$

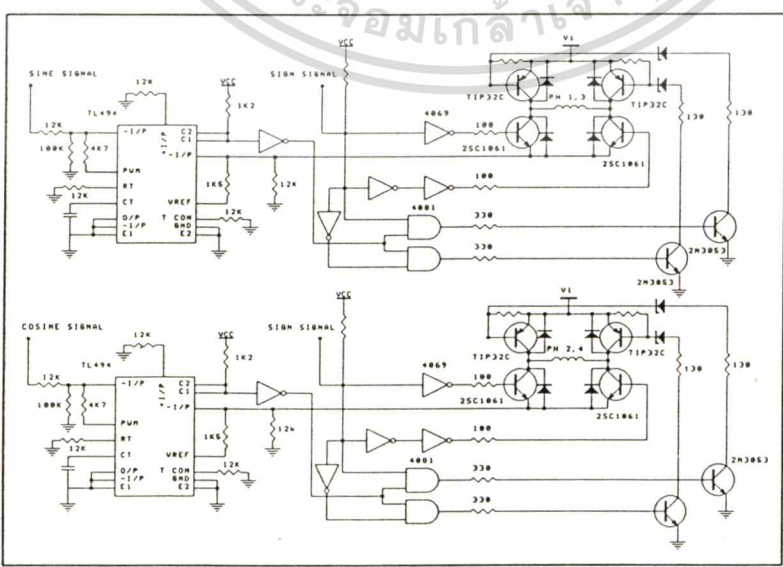
โดยที่ K คือ ค่าคงที่ของมอเตอร์
 V_i คือ แรงดันอินพุตของวงจรขับ

ความเร็วรอบตาม (2) นั้นสามารถเทียบเคียงได้กับสมการความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกขดกระตุ้นทั่วไปตามสมการที่ 3¹³ หรือสมการที่ 4

$$\omega = \frac{E_a - I_a R_a}{K_v I_f} \tag{3}$$

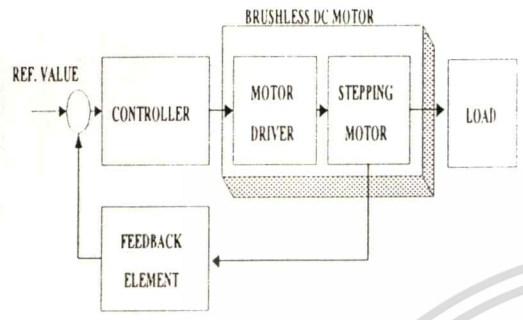
$$N = \left(\frac{60}{2\pi} \right) \frac{E_a - I_a R_a}{K_v I_f} \tag{4}$$

รูปที่ 3 แสดงถึงวงจรขับเคลื่อนที่ใช้ วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์นี้จะสามารถขับสเตปป์มอเตอร์ให้หมุนอย่างราบเรียบและต่อเนื่องได้ แต่เมื่อนำสเตปป์มอเตอร์ไปใช้ในสถานะที่มีการทำงานต่างๆ พบว่ามอเตอร์ดังกล่าวไม่สามารถควบคุมความเร็วรอบให้คงที่ได้ จึงได้ทำการศึกษาและออกแบบส่วนควบคุมและป้อนกลับเพื่อควบคุม



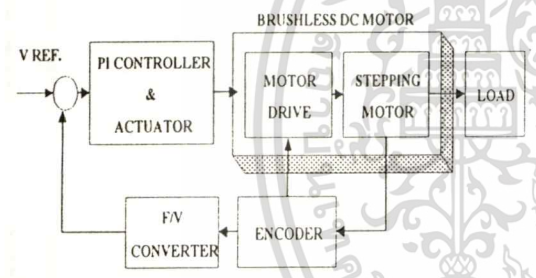
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3 แสดงวงจรถูกขับเคลื่อนที่ใช้ ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้สเตปมอเตอร์นี้มีความเร็วคงที่เมื่อมีการงานค่าต่างๆ ตามที่กำหนด บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมความเร็วแสดงได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมความเร็ว

3. การออกแบบและหลักการทำงาน

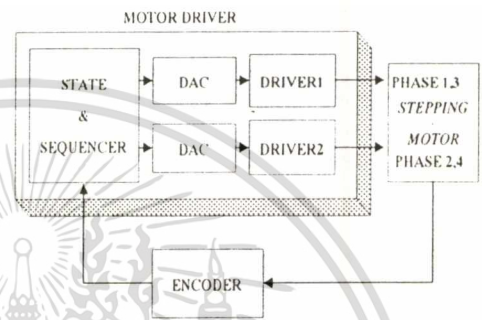


รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมความเร็วที่ใช้

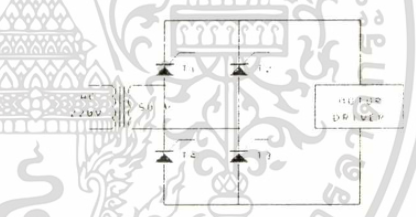
รูปที่ 5 เป็นบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมความเร็วที่ใช้ ตัวควบคุม (Controller) จะทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ตามค่าของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงและค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับที่เป็นสัดส่วนกับความเร็ว ซึ่งตัวควบคุมที่ใช้เป็นตัวควบคุม Proportional+Integral (PI) สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมจะถูกส่งไปควบคุม Actuator ซึ่งเป็นวงจรแปลงสัญญาณเอซีเป็นดีซีแบบเต็มคลื่น เพื่อควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์

รูปที่ 6 แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมของระบบขับเคลื่อนและย่อยสเตปตามลำดับ อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณป้อนกลับ(Feedback Element) นั้นจะเป็นแทคโคเจเนอเรเตอร์ (Tachogenerator) หรือตัวเข้ารหัส (Encoder) ก็ได้ แต่เนื่องจากมีตัวเข้ารหัสใช้ในวงจรขับเคลื่อนอยู่แล้วไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่นี้จึงใช้สัญญาณจากตัวเข้ารหัส (ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วของมอเตอร์) ป้อนให้วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า (Frequency to Voltage Converter: F/V) ที่ได้ ออกแบบขึ้น จากนั้นนำแรงดันไฟฟ้านี้ไปกลับกลับไปเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงและค่าแรงดันไฟฟ้าแตก่างจะถูกส่งไปยังตัวควบคุมต่อไป



รูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมระบบขับเคลื่อนและย่อยสเตป



รูปที่ 7 วงจรแปลงสัญญาณเอซีเป็นดีซีแบบเต็มคลื่น

รูปที่ 7 แรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณเอซีเป็นดีซีแบบเต็มคลื่น (V_d) จะเป็นแรงดันอินพุต (V_i) ให้กับวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยที่ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณเอซีเป็นดีซีแบบเต็มคลื่นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามมุมทริกของเอสซีอาร์^[1] ดังสมการที่ 5

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha) \tag{5}$$

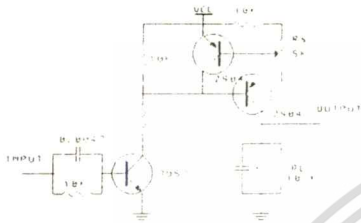
โดยที่ V_m คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด

α คือ ค่ามุมทริกของเอสซีอาร์

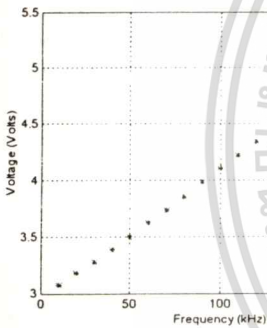
สำหรับค่ามุมทริกของเอสซีอาร์จะเปลี่ยนแปลง

ค่าไปตามค่าของสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ PI โดยที่ค่ามุมทริกจะเปลี่ยนแปลงอยู่ช่วง 0-180 องศา

รูปที่ 8 แสดงถึงวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น ซึ่งค่าแรงดันเกาต์ทุกจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ (ความเร็วของมอเตอร์) สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับแรงดันไฟฟ้าของวงจรที่ได้ออกแบบนี้จะแสดงได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบ



รูปที่ 9 แสดงกราฟการตอบสนองของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า

การทำงานของส่วนต่าง ๆ จะอธิบายได้ดังนี้ คือ เมื่อกำหนดความเร็วที่ต้องการ โดยการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ก็จะมีแรงดันไฟฟ้าป้อนให้กับวงจรแปลงสัญญาณแอสซิงโครนัสเป็นดิจิตอลแบบเต็มคลื่น ตามการควบคุมแบบ PI เพื่อควบคุมการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์ ซึ่งเมื่อมอเตอร์เริ่มหมุน ตัวเข้ารหัสที่ต่ออยู่กับเพลาของมอเตอร์จะส่งสัญญาณเอาต์พุตที่เป็นสถานะลอจิก (40 ข้อมูลต่อสเตป) ให้กับวงจรจัดระดับสัญญาณ (State and Sequencer Circuit) และวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าตามลำดับ สำหรับวงจรจัดระดับสัญญาณ จะวิเคราะห์ทิศทางการหมุนพร้อมทั้งถอดรหัสค่าซายน์และโคไซน์ ป้อนให้กับวงจรแปลงเอ็กสแรนเป็นเอ็กสแรนที่สวนเวสสำหรับวงจรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนกว่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ซายน์และโคไซน์ (Driver) ซึ่งจะทำให้สเตปมอเตอร์มีการหมุนที่ราบเรียบและต่อเนื่องเทียบเคียงได้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในเวลาเดียวกัน วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าซึ่งรับข้อมูลจากตัวเข้ารหัสก็จะทำหน้าที่แปลงค่าความถี่จากตัวเข้ารหัสเป็นแรงดันไฟฟ้าเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง และแรงดันไฟฟ้าแตกต่างจะถูกส่งไปยังตัวควบคุมและ Actuator เพื่อควบคุมให้มอเตอร์มีความเร็วที่ตามค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ได้กำหนดไว้ต่อไป

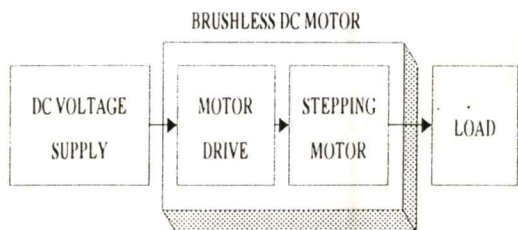
4. การทดสอบการทำงาน

การทดสอบการทำงานแยกออกเป็น 3 แบบคือ

1. การทดสอบการทำงานของสเตปมอเตอร์ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนที่ได้พัฒนาขึ้น
2. การทดสอบการควบคุมความเร็วของสเตปมอเตอร์ในสถานะที่มีภาระงาน โดยใช้ Eddy Current Break เป็นภาระงานจำลอง
3. การทดสอบการตอบสนองความเร็วของสเตปมอเตอร์เปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

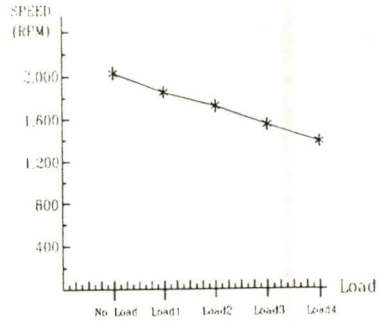
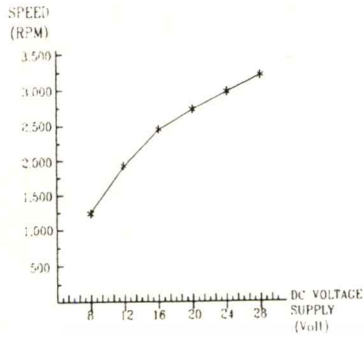
4.1 การทดสอบการทำงานของสเตปมอเตอร์ ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนที่พัฒนาขึ้น ตามค่าแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ

การทดสอบการทำงานของสเตปมอเตอร์ จะทำการทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรขับเคลื่อน ในสถานะที่มอเตอร์ไม่มีภาระงานดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 10 ซึ่งจากการทดลองพบว่าความเร็วรอบของมอเตอร์จะแปรค่าตามค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ ดังแสดงในรูปที่ 11



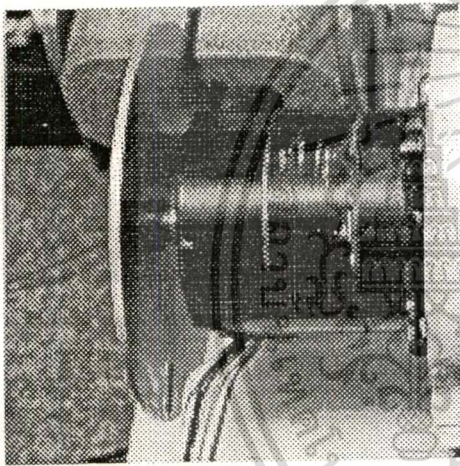
รูปที่ 10 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของสเตปมอเตอร์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11 แสดงผลการตอบสนองทางความเร็วของมอเตอร์
ตามระบบในรูปที่ 10 ในสภาวะที่ไม่มีภาระงาน

รูปที่ 13 แสดงกราฟผลการตอบสนองทางความเร็วของ
มอเตอร์ ตามระบบในรูปที่ 10 ในสภาวะที่มีภาระงาน



รูปที่ 12 แสดงการให้ภาระงานกับมอเตอร์ที่ใช้ในการ
ทดสอบ

4.2 การทดสอบการทำงานของระบบควบคุมความเร็ว
ระบบที่ใช้ทดสอบเกี่ยวกับการควบคุมความเร็ว
แสดงได้ดังรูปที่ 5 และใช้ PORTABLE RECORDER
TYPE 3057 ของโยโกกาว่า โดยกำหนดค่า CHART
SPEED เท่ากับ 6 ซม./นาที

รูปที่ 12 แสดงถึงการให้ภาระงานกับมอเตอร์โดยใช้
Eddy Current Brake เป็นภาระงานจำลอง แรงดันไฟฟ้าที่
ป้อนให้วงจรถับเคลื่อนมีค่าคงที่เท่ากับ 12 โวลต์ จากนั้น
ทำการทดสอบการทำงานของมอเตอร์เมื่อไม่มีภาระงาน
และเมื่อมีภาระงานค่าต่าง ๆ 4 ค่า จากการทดสอบพบว่า
เมื่อมอเตอร์มีค่าภาระงานมากขึ้น ความเร็วรอบของ
มอเตอร์จะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 13

จากรูปที่ 11 และรูปที่ 13 จะเห็นว่าสเปคปิง
มอเตอร์ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนที่ได้พัฒนาขึ้นนี้มีคุณสมบัติ
ในการตอบสนองทางความเร็วเทียบเคียงได้กับมอเตอร์
ไฟฟ้ากระแสตรง

รูปที่ 14 แสดงผลการตอบสนองทางความเร็วของมอเตอร์

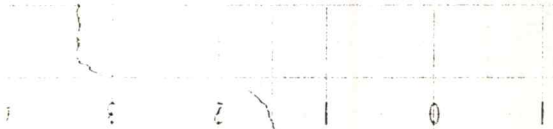
เมื่อมีการควบคุมความเร็วรอบ เมื่อ $K_p=10\%$, $K_i=30\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดสอบผลตอบสนองทางความเร็วของสเตปิ่ง

69

มอเตอร์เปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ
แยกขดกระตุ้น



รูปที่ 15 แสดงผลการตอบสนองทางความเร็วของมอเตอร์
เมื่อมีการควบคุมความเร็วรอบเมื่อ $K_p=50\%$, $K_i=30\%$

รูปที่ 16 แสดงผลการตอบสนองทางความเร็วของสเตป
ปิ่งมอเตอร์

จากผลการทดสอบตามรูปที่ 14 เป็นการทดสอบ
การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ เมื่อ $K_p = 10\%$ และ
 $K_i = 30\%$ สำหรับรูปที่ 15 จะกำหนดให้ $K_p = 50\%$ และ
 $K_i = 30\%$ โดยทดสอบการควบคุมความเร็วรอบจาก
1,000 รอบต่อนาทีไปเป็น 1,500 รอบต่อนาที ขณะที่ไม่มี
ภาระงานและมีภาระงานต่างกัน 2 ค่า จะเห็นว่าเมื่อให้
ภาระงานกับมอเตอร์ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที
ความเร็วของมอเตอร์จะลดลงชั่วขณะก่อนที่จะปรับ
ความเร็วเข้าสู่ค่าที่ต้องการ และยังพบว่าเมื่อมอเตอร์มี
ภาระงานมากขึ้น การตอบสนองทางความเร็วของระบบ
จะช้าลง แต่เมื่อมีการปรับค่า K_p ให้มากขึ้น ค่าของ K_p ที่
สูงกว่าจะสามารถให้ผลการตอบสนองที่เร็วกว่า และเมื่อ
มีการนำภาระงานออก ความเร็วรอบของมอเตอร์จะสูง
ขึ้นชั่วขณะก่อนที่จะกลับเข้าสู่ค่าเดิม



รูปที่ 17 แสดงผลการตอบสนองทางความเร็วของมอเตอร์

ไฟฟ้ากระแสตรง

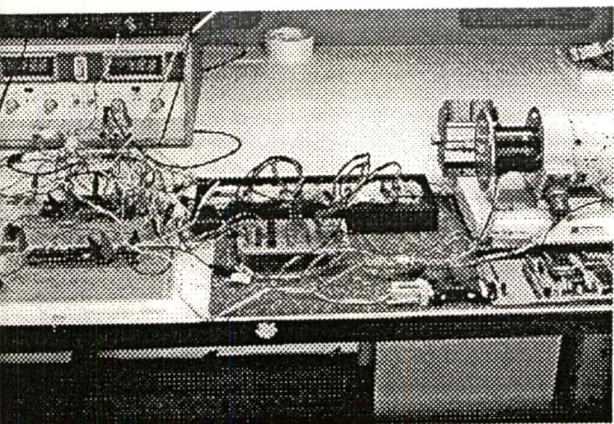
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบในรูปที่ 16 และรูปที่ 17 เป็นการทดสอบผลตอบสนองทางความเร็ว โดยใช้สเตปปีงมอเตอร์และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกขดกระตุ้นที่มีขนาดใกล้เคียงกัน คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงของ FRACMO พิกัดแรงดันไฟฟ้า 50 โวลต์ พิกัดกระแส 1.0 แอมแปร์ พิกัดของความเร็วยุโรป 3,000 รอบต่อนาที ซึ่งการทดสอบจะเริ่มที่ค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง 12 โวลต์ จากนั้นจึงเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้า 15 โวลต์ในทันทีทันใด โดยใช้ค่า CHART SPEED ที่ 60 ซม./นาที และค่าในช่วงการวัดความเร็วรอบ 1 ช่องแทนความเร็ว 500 รอบต่อนาที ซึ่งจะเห็นว่าสเตปปีงมอเตอร์ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนที่พัฒนาขึ้นสามารถให้ผลการตอบสนองทางความเร็วที่ดีกว่าและมีการแกว่งน้อยกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกขดกระตุ้น

นอกจากนี้ ในการทดสอบยังพบว่าความสูญเสียในรูปความร้อนของสเตปปีงมอเตอร์ก็ลดลงด้วยตามสมการ ⁽¹⁾

$$w = \frac{KNI}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^2 \alpha t d\theta \quad (6)$$

จากสมการ N อยู่ในสภาวะลอยตัว และ I เป็นค่ากระแสที่ถูกควบคุมด้วยวงจรขับเคลื่อน ซึ่งจะเป็นผลให้ N เป็นตัวสร้างสมมูลกระแสเหนี่ยวนำให้มีทิศทางย้อนกระแสควบคุมที่จ่ายให้กับสเตปปีงมอเตอร์ ทำให้กำลังงานสูญเสียในขดลวดลดลง



5. สรุป

สเตปปีงมอเตอร์ที่ใช้เทคนิคการกระตุ้นในรูปแบบกระแสชาน์แบบลูปปิด จะสามารถหมุนได้อย่างราบเรียบและต่อเนื่องเทียบเคียงได้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกขดกระตุ้น แต่เมื่อมีการให้ภาระงานกับ สเตปปีงมอเตอร์นี้ ความเร็วของมอเตอร์จะลดลง ในงานวิจัยนี้จึงได้นำตัวควบคุมแบบ PI มาประยุกต์ใช้ร่วมกับวงจรแปลงสัญญาณเอซีเป็นดีซีแบบเต็มคลื่นและวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์ ซึ่งผลจากการทดสอบพบว่า สามารถควบคุมให้สเตปปีงมอเตอร์นี้หมุนได้อย่างราบเรียบและต่อเนื่องได้ที่ความเร็วรอบที่ต้องการและในสภาวะที่มีการภาระงาน ก็ยังสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ให้คงที่ได้ ทำให้สามารถนำสเตปปีงมอเตอร์นี้มาใช้งานแทนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ โดยมีข้อดีคือ เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่ไม่มีแปรงถ่าน จึงลดการสูญเสียและการซ่อมบำรุงในส่วนของแปรงถ่าน นอกจากนี้ขนาดของตัวหมุนของสเตปปีงมอเตอร์จะเล็กและมีน้ำหนักเบากว่าตัวหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แต่สามารถให้แรงบิดที่สูง และยังสามารถตอบสนองทางความเร็วได้ดีกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

6. เอกสารอ้างอิง

1. วิศรุต ศรีรัตนะ ไสว เหล็กไม้ ประภาย อุดคกนิมาพันธุ์ รัต. พิพัฒน์ เลหาสงคราม "มอเตอร์กระแสตรงที่ไม่มีแปรงถ่านโดยใช้สเตปปีงมอเตอร์" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 18 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร พ.ศ. 2538 หน้า 890-894
2. Takashi Kenjo, "Stepping Motor and their Microprocessor Control", Claren Press, Oxford.
3. Muhammad H. Rashid "Power Electronics" Prentice Hall International, Inc.
4. อนุวัฒน์ จางวานิชเลิศ "การควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4 ควอดแรนท์โดยไมโครคอนโทรลเลอร์" วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 สกต. พ.ศ. 2540 หน้า 67-77

เอกสารรูปที่ 18 แสดงภาพระบบโดยรวมสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

FIGURE 1 — BLOCK DIAGRAM

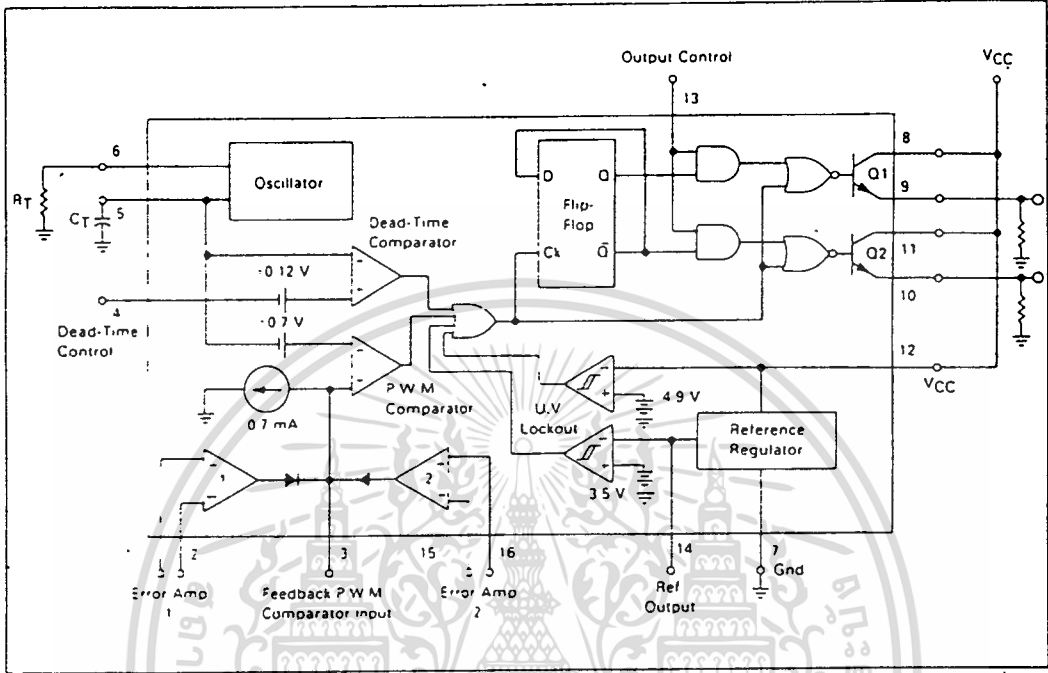
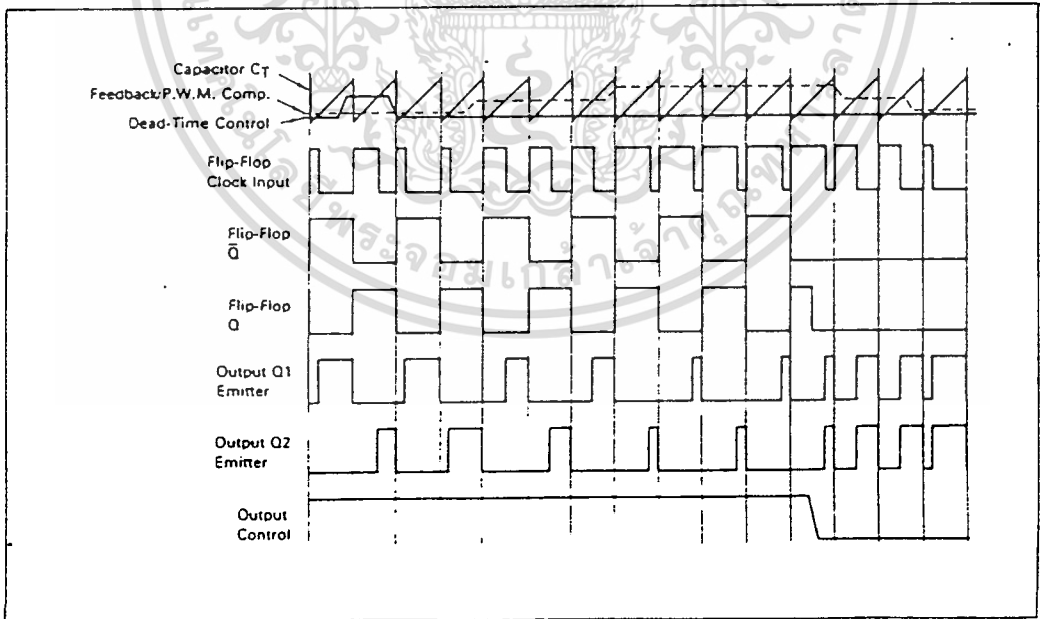


FIGURE 2 — TIMING DIAGRAM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

Description

The TL494 is a fixed-frequency pulse width modulation control circuit, incorporating the primary building blocks required for the control of a switching power supply. (See Figure 1.) An internal-linear sawtooth oscillator is frequency-programmable by two external components, R_T and C_T . The approximate oscillator frequency is determined by:

$$f_{osc} = \frac{1.1}{R_T \cdot C_T}$$

For more information refer to Figure 4.

Output pulse width modulation is accomplished by comparison of the positive sawtooth waveform across capacitor C_T to either of two control signals. The NOR gates, which drive output transistors Q1 and Q2, are enabled only when the flip-flop clock-input line is in its low state. This happens only during that portion of time when the sawtooth voltage is greater than the control signals. Therefore, an increase in control-signal amplitude causes a corresponding linear decrease of output pulse width. (Refer to the timing diagram shown in Figure 2.)

The control signals are external inputs that can be fed into the dead-time control, the error amplifier inputs, or the feedback input. The dead-time control comparator has an effective 120 mV input offset which limits the minimum output dead time to approximately the first 4% of the sawtooth-cycle time. This would result in a maximum duty cycle on a given output of 96% with the output control grounded, and 48% with it connected to the reference line. Additional dead time may be imposed on the output by setting the dead time-control input to a fixed voltage, ranging between 0 to 3.3 V.

The pulse width modulator comparator provides a means for the error amplifiers to adjust the output pulse width from the maximum percent on-time, established by the dead time control input, down to zero, as the voltage at the feedback pin varies from 0.5 to 3.5 V. Both error amplifiers have a common-mode input range from -0.3 V to ($V_{CC} - 2$ V), and may be used to sense power-supply output voltage and current. The error-amplifier outputs are active high and are ORed together at the non-inverting input of the pulse-width modulator comparator. With this configuration, the amplifier that demands minimum output on-time, dominates control of the loop.

When capacitor C_T is discharged, a positive pulse is generated on the output of the dead-time comparator, which clocks the pulse-steering flip-flop and inhibits the output transistors, Q1 and Q2. With the output-control connected to the reference line, the pulse-steering flip-flop directs the modulated pulses to each of the two output transistors alternately for push-pull operation. The output frequency is equal to half that of the oscillator. Output drive can also be taken from Q1 or Q2, when single-ended operation with a maximum on-time of less than 50% is required. This is desirable when the output transformer has a ringback winding with a catch diode used for snubbing. When higher output-drive currents are required for single-ended operation, Q1 and Q2 may be connected in parallel, and the output-mode pin must be tied to ground to disable the flip-flop. The output frequency will now be equal to that of the oscillator.

The TL494 has an internal 5 V reference capable of sourcing up to 10 mA of load current for external bias circuits. The reference has an internal accuracy of $\pm 5.0\%$ with a typical thermal drift of less than 50 mV over an operating temperature range of 0 to 70°C.

FIGURE 3 — FUNCTIONAL TABLE

Input	Output Function	$\frac{f_{out}}{f_{osc}} =$
Output Control		
Grounded	Single-ended P.W.M. at Q1 and Q2	1
At V_{ref}	Push-pull operation	0.5

TL494

MAXIMUM RATINGS (Full operating ambient temperature range applies unless otherwise noted)

Rating	Symbol	TL494C	TL494I	TL494M	Unit
Power Supply Voltage	V _{CC}	42	42	42	V
Collector Output Voltage	V _{C1} , V _{C2}	42	42	42	V
Collector Output Current (each transistor) (1)	I _{C1} , I _{C2}	500	500	500	mA
Amplifier Input Voltage Range	V _{IR}	-0.3 to 42	-0.3 to 42	-0.3 to 42	V
Power Dissipation (for T _A ≤ 45°C)	PD	1000	1000	1000	mW
Operating Junction Temperature	T _J				°C
Plastic Package		125	125	—	°C
Ceramic Package		150	150	150	°C
Operating Ambient Temperature Range	T _A	0 to 70	-25 to 85	-55 to 125	°C
Storage Temperature Range	T _{stg}				°C
Plastic Package		-55 to 125	-55 to 125	—	
Ceramic Package		-65 to 150	-65 to 150	-65 to 150	

NOTE 1: Maximum thermal limits must be observed

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristics	Symbol	N Suffix Plastic Package	J Suffix Ceramic Package	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient	R _{θJA}	80	100	°C/W
Derating Ambient Temperature	T _A	45	50	°C

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Condition/Value	Symbol	TL494			Unit
		Min	Typ	Max	
Power Supply Voltage	V _{CC}	7.0	15	40	V
Collector Output Voltage	V _{C1} , V _{C2}	—	30	40	V
Collector Output Current (each transistor)	I _{C1} , I _{C2}	—	—	200	mA
Amplifier Input Voltage	V _{in}	-0.3	—	V _{CC} - 2.0	V
Current into Feedback Terminal	I _{fb}	—	—	0.3	mA
Reference Output Current	I _{ref}	—	—	10	mA
Timing Resistor	R _T	1.8	30	500	kΩ
Timing Capacitor	C _T	0.0047	0.001	10	μF
Oscillator Frequency	f _{osc}	1.0	40	200	kHz

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_{CC} = 15 V, C_T = 0.01 μF, R_T = 12 kΩ unless otherwise noted.)

For typical values T_A = 25°C, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies unless otherwise noted.

Characteristic	Symbol	TL494C,I			TL494M			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Reference Voltage (I _O = 1.0 mA)	V _{ref}	4.75	5.0	5.25	4.75	5.0	5.25	V
Line Regulation (V _{CC} = 7.0 V to 40 V)	Reg _{line}	—	2.0	25	—	2.0	25	mV
Load Regulation (I _O = 1.0 mA to 10 mA)	Reg _{load}	—	3.0	15	—	3.0	15	mV
Short-Circuit Output Current (V _{ref} = 0 V)	I _{SC}	15	35	75	15	35	75	mA

REFERENCE SECTION

Reference Voltage (I _O = 1.0 mA)	V _{ref}	4.75	5.0	5.25	4.75	5.0	5.25	V
Line Regulation (V _{CC} = 7.0 V to 40 V)	Reg _{line}	—	2.0	25	—	2.0	25	mV
Load Regulation (I _O = 1.0 mA to 10 mA)	Reg _{load}	—	3.0	15	—	3.0	15	mV
Short-Circuit Output Current (V _{ref} = 0 V)	I _{SC}	15	35	75	15	35	75	mA

TL494

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15\text{ V}$, $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\ \text{k}\Omega$ unless otherwise noted.)

For typical values $T_A = 25^\circ\text{C}$, for min-max values T_A is the operating ambient temperature range that applies unless otherwise noted.

Characteristic	Symbol	TL494CJ			TL494M			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
OUTPUT SECTION								
Collector Off-State Current ($V_{CC} = 40\text{ V}$, $V_{CE} = 40\text{ V}$)	$I_{C(OH)}$	—	20	100	—	20	100	μA
Emitter Off-State Current ($V_{CC} = 40\text{ V}$, $V_C = 40\text{ V}$, $V_E = 0\text{ V}$)	$I_{E(OH)}$	—	—	100	—	—	150	μA
Collector-Emitter Saturation Voltage (2) Common-Emitter ($V_E = 0\text{ V}$, $I_C = 200\text{ mA}$)	$V_{SAT(IC)}$	—	1.1	1.3	—	1.1	1.5	V
Emitter-Follower ($V_C = 15\text{ V}$, $I_E = -200\text{ mA}$)	$V_{SAT(IE)}$	—	1.5	2.5	—	1.5	2.5	V
Output Control Pin Current Low State ($V_{OC} = 0.4\text{ V}$)	I_{OCL}	—	10	—	—	10	—	μA
High State ($V_{OC} = V_{ref}$)	I_{OCH}	—	2.2	3.5	—	0.2	3.5	mA
Output Voltage Rise Time Common-Emitter (See Figure 13)	t_r	—	100	200	—	100	200	ns
Emitter-Follower (See Figure 14)		—	100	200	—	100	200	ns
Output Voltage Fall Time Common-Emitter (See Figure 13)	t_f	—	25	100	—	25	100	ns
Emitter-Follower (See Figure 14)		—	40	100	—	40	100	ns

Characteristic	Symbol	TL494			Unit
		Min	Typ	Max	
ERROR AMPLIFIER SECTIONS					
Input Offset Voltage (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	V_{IO}	—	20	10	mV
Input Offset Current (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	I_{IO}	—	50	250	nA
Input Bias Current (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	I_{IB}	—	0.1	1.0	μA
Input Common-Mode Voltage Range ($V_{CC} = 40\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$)	V_{ICR}	0.3 to $V_{CC} - 2.0$	—	—	V
Open-Loop Voltage Gain ($V_O = 3.0\text{ V}$, $V_O = 0.5$ to 3.5 V , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	A_{VOL}	70	95	—	dB
Unity-Gain Crossover Frequency ($V_O = 0.5$ to 3.5 V , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	f_c	—	350	—	kHz
Phase Margin at Unity-Gain ($V_O = 0.5$ to 3.5 V , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	ϕ_m	—	65	—	deg
Common-Mode Rejection Ratio ($V_{CC} = 40\text{ V}$)	CMRR	65	90	—	dB
Power Supply Rejection Ratio ($V_{CC} = 33\text{ V}$, $V_O = 2.5\text{ V}$, $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	PSRR	—	100	—	dB
Output Sink Current (V_O (Pin 3) = 0.7 V)	I_O	0.3	0.7	—	mA
Output Source Current (V_O (Pin 3) = 3.5 V)	I_O	2.0	4.0	—	mA

NOTE 2: Low duty cycle pulse techniques are used during test to maintain junction temperature as close to ambient temperatures as possible.

TL494

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15\text{ V}$, $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\ \text{k}\Omega$ unless otherwise noted.)

For typical values $T_A = 25^\circ\text{C}$, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies unless otherwise noted.

Characteristic	Symbol	TL494			Unit
		Min	Typ	Max	
PWM COMPARATOR SECTION (Test Circuit Figure 12)					
Input Threshold Voltage (Zero duty cycle)	V_{TH}	—	3.5	4.5	V
Input Sink Current ($V_{Pin\ 3} = 0.7\ \text{V}$)	I_{i-}	0.3	0.7	—	mA
DEAD-TIME CONTROL SECTION (Test Circuit Figure 12)					
Input Bias Current (Pin 4) ($V_{Pin\ 4} = 0\ \text{to}\ 5.25\ \text{V}$)	$I_{IB\ (DT)}$	—	-2.0	-10	μA
Maximum Duty Cycle, Each Output, Push-Pull Mode ($V_{Pin\ 4} = 0\ \text{V}$, $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\ \text{k}\Omega$) ($V_{Pin\ 4} = 0\ \text{V}$, $C_T = 0.001\ \mu\text{F}$, $R_T = 30\ \text{k}\Omega$)	DC_{max}	45 —	48 45	50 50	%
Input Threshold Voltage (Pin 4) (Zero Duty Cycle) (Maximum Duty Cycle)	V_{TH}	— 0	2.8 —	3.3 —	V
OSCILLATOR SECTION					
Frequency ($C_T = 0.001\ \mu\text{F}$, $R_T = 30\ \text{k}\Omega$)	f_{osc}	—	40	—	kHz
Standard Deviation of Frequency* ($C_T = 0.001\ \mu\text{F}$, $R_T = 30\ \text{k}\Omega$)	σ_{osc}	—	3.0	—	%
Frequency Change with Voltage ($V_{CC} = 7.0\ \text{V}\ \text{to}\ 40\ \text{V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$)	$\Delta f_{osc}\ (\Delta V)$	—	0.1	—	%
Frequency Change with Temperature ($\Delta T_A = T_{low}\ \text{to}\ T_{high}$) ($C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\ \text{k}\Omega$)	$\Delta f_{osc}\ (\Delta T)$	—	—	12	%
UNDERVOLTAGE LOCKOUT SECTION					
Turn-On Threshold (V_{CC} Increasing, $I_{ref} = 1.0\ \text{mA}$)	V_{th}	5.5	6.43	7.0	V
TOTAL DEVICE					
Standby Supply Current (Pin 6 at V_{ref} , All Other Inputs and Outputs Open) ($V_{CC} = 15\ \text{V}$) ($V_{CC} = 40\ \text{V}$)	I_{CC}	— —	5.5 7.0	10 15	mA
Average Supply Current ($V_{Pin\ 4} = 2.0\ \text{V}$) (See Figure 12) ($C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\ \text{k}\Omega$, $V_{CC} = 15\ \text{V}$)	—	—	7.0	—	mA

* Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula, $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (X_n - \bar{X})^2}{N - 1}}$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (X_n - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

TL494

FIGURE 4 — OSCILLATOR FREQUENCY versus TIMING RESISTANCE

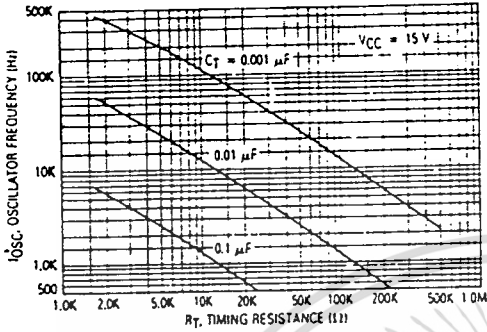


FIGURE 5 — OPEN-LOOP VOLTAGE GAIN AND PHASE versus FREQUENCY

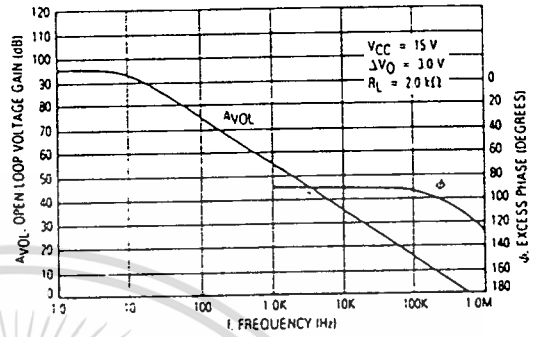


FIGURE 6 — PERCENT DEAD-TIME versus OSCILLATOR FREQUENCY

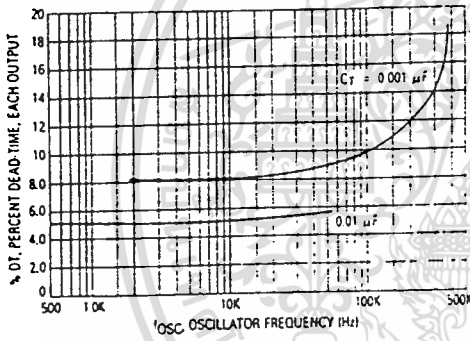


FIGURE 7 — PERCENT DUTY CYCLE versus DEAD-TIME CONTROL VOLTAGE

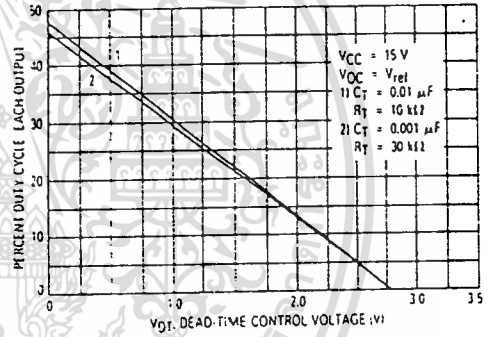


FIGURE 8 — EMITTER FOLLOWER CONFIGURATION OUTPUT SATURATION VOLTAGE versus EMITTER CURRENT

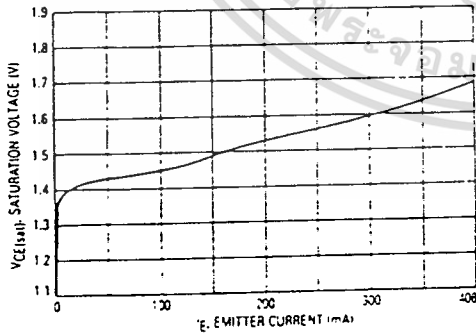
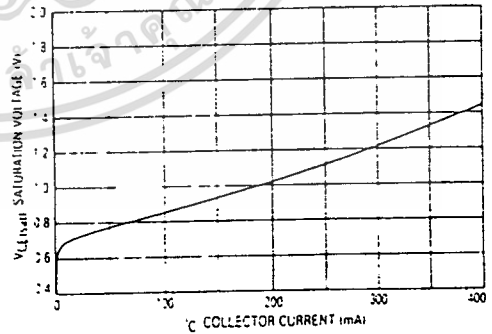


FIGURE 9 — COMMON EMITTER CONFIGURATION OUTPUT SATURATION VOLTAGE versus COLLECTOR CURRENT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

FIGURE 15 — ERROR-AMPLIFIER SENSING TECHNIQUES

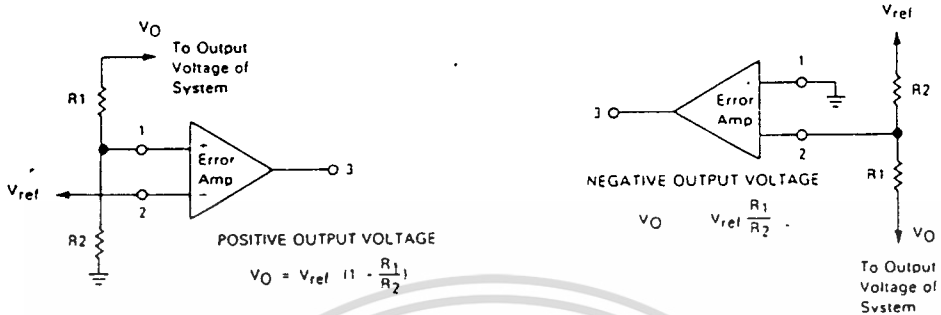


FIGURE 16 — DEAD-TIME CONTROL CIRCUIT

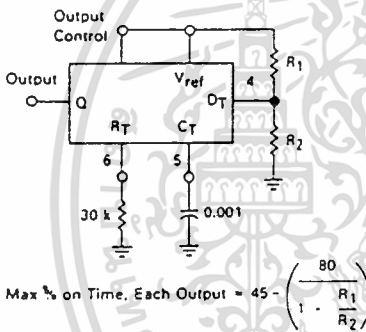


FIGURE 17 — SOFT-START CIRCUIT

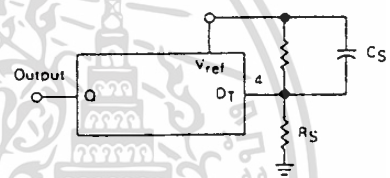
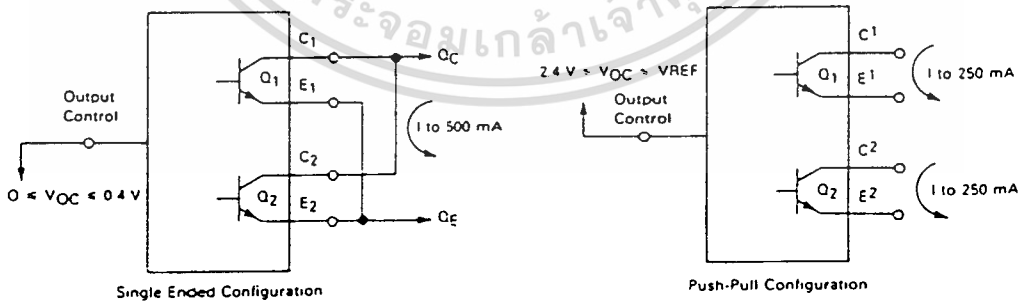


FIGURE 18 — OUTPUT CONNECTIONS FOR SINGLE-ENDED AND PUSH-PULL CONFIGURATIONS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

FIGURE 19 — SLAVING TWO OR MORE CONTROL CIRCUITS

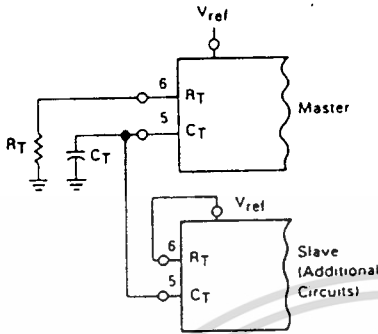


FIGURE 20 — OPERATION WITH $V_{IN} > 40$ V USING EXTERNAL ZENER

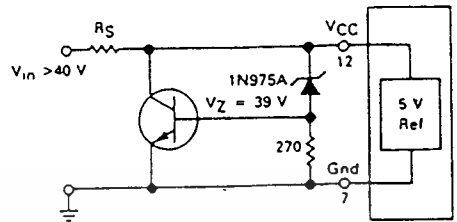
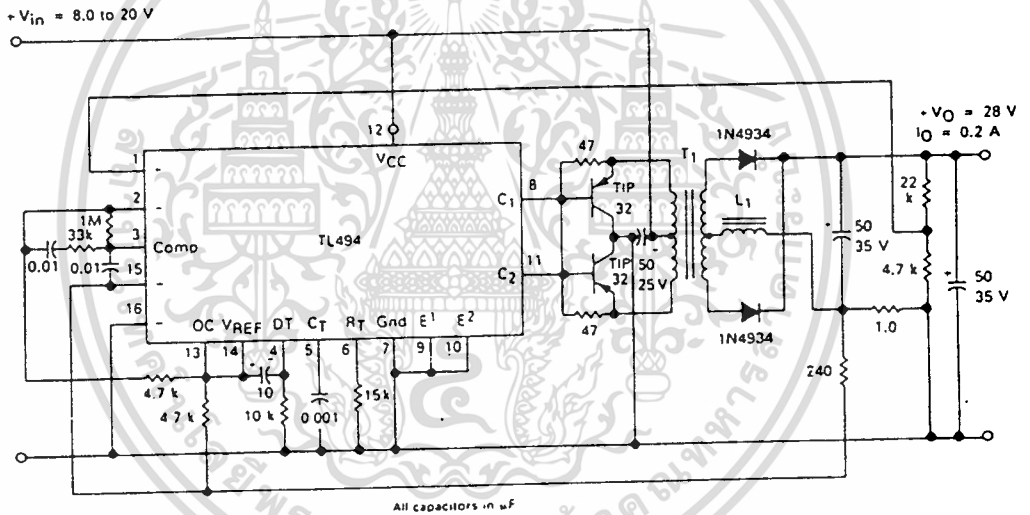


FIGURE 21 — PULSE-WIDTH MODULATED PUSH-PULL CONVERTER



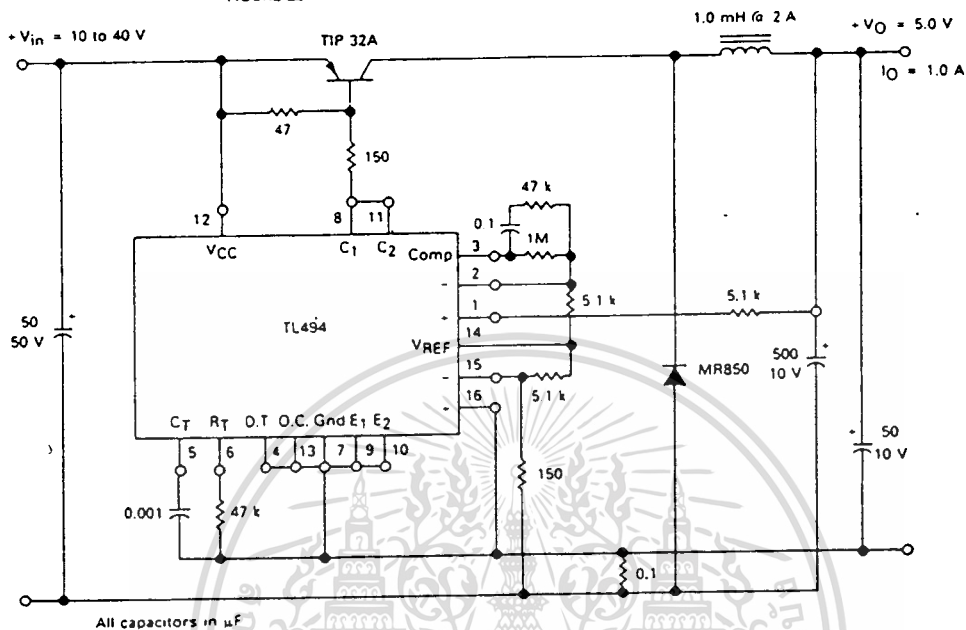
All capacitors in μ F
 L1 — 3.5 mH @ 0.3 A
 T1 — Primary: 20T C.T. #28 AWG
 Secondary: 120T C.T. #36 AWG
 Core: Ferroxcube 1408P-L00-3C8

TEST	CONDITIONS	RESULTS
Line Regulation	$V_{in} = 10$ V to 40 V	14 mV 0.28%
Load Regulation	$V_{in} = 28$ V, $I_O = 1$ mA to 1 A	3.0 mV 0.06%
Output Ripple	$V_{in} = 28$ V, $I_O = 1.0$ A	65 mV P-P P.A.R.D.
Short Circuit Current	$V_{in} = 28$ V, $R_L = 0.1 \Omega$	1.6 amps
Efficiency	$V_{in} = 28$ V, $I_O = 1$ A	71%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

FIGURE 22 — PULSE-WIDTH MODULATED STEP-DOWN CONVERTER



TEST	CONDITIONS	RESULTS
Line Regulation	$V_{in} = 8.0 \text{ to } 40 \text{ V}$	3.0 mV 0.01%
Load Regulation	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_O = 0.2 \text{ to } 200 \text{ mA}$	5.0 mV 0.02%
Output Ripple	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_O = 200 \text{ mA}$	40 mV p-p P.A.R.D.
Short Circuit Current	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, R_L = 0.1 \Omega$	250 mA
Efficiency	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_O = 200 \text{ mA}$	72%

ประวัติผู้เขียน

นายไสว พงศ์สวัสดิ์ เกิดวันศุกร์ ที่ 9 เมษายน 2514 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จ การศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2537 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2538 ผลงานทางวิชาการที่เป็นที่ยอมรับและได้รับการตีพิมพ์ ได้แก่ เรื่องมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่มีแปรงถ่านโดยใช้สเตปป์มอเตอร์ การควบคุมความเร็วของ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านโดยใช้สเตปป์มอเตอร์เป็นกรณีศึกษา เคยได้รับทุน ไปทำวิจัยเรื่อง การควบคุมมอเตอร์การพัฒนาระบบขับเคลื่อนของมอเตอร์ ณ ประเทศ ญี่ปุ่น ใน ปี พ.ศ. 2540 ปัจจุบัน รับราชการเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง