

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบ และพัฒนาเทคนิคการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้หมุนต่อเนื่องในรูปแบบกระแส
DESIGN AND DEVELOPMENT OF DRIVER TECHNIQUE FOR MOVING
SMOOTHLY IN STEPPING MOTOR WITH SINE MODULATION



นายวิสรุต ศรีรัตน์
MR. WITSARUT SRIRATANA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2540

ISBN 974-622-018-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขที่.....
เลขทะเบียน..... 28914
วัน, เดือน, ปี 1 1 พ.ศ. 2540

**DESIGN AND DEVELOPMENT OF DRIVER TECHNIQUE FOR MOVING
SMOOTHLY IN STEPPING MOTOR WITH SINE MODULATION**



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

1997

ISBN 974-622-018-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบ และพัฒนาเทคนิคการขับเคลื่อนมอเตอร์
ให้หมุนต่อเนื่องในรูปแบบกระแส

นักศึกษา

นายวิศรุต ศรีรัตน์

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ. พิพัฒน์ เกาหสงคราม

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม

ผศ. ประภาส อุคคกิมพันธ์

ระดับการศึกษา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา

เทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.

2540

บทคัดย่อ

ปัจจุบันนี้ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับได้ถูกพัฒนาใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับเครื่องจักรกลในโรงงานอุตสาหกรรม วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอการพัฒนาระบบขับเคลื่อนเพื่อควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ โดยการจัดลำดับการกระตุ้นกำลังงานให้กับชุดขดลวดในแต่ละเฟสของสเตปป์มอเตอร์ ให้มีความสอดคล้องกับการหมุนของโรเตอร์เทียบกับสเตเตอร์ที่มุมเวกเตอร์ของเส้นแรงแม่เหล็กทำมุมกัน 90 องศาทางไฟฟ้า ระบบขับเคลื่อนนี้จะควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์และโคไซน์ที่ป้อนให้กับขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ โดยการให้วงจรเปิดปิดกระแส เพื่อให้มีกระแสไหลผ่านชุดขดลวดในแต่ละเฟสของสเตปป์มอเตอร์ได้สองทิศทาง ทำให้สเตปป์มอเตอร์ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพดีขึ้นเทียบเคียงได้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง คือสามารถควบคุมแรงบิดที่เพลลาของสเตปป์มอเตอร์ให้มีค่าคงที่ตามต้องการแม้ว่าจะทำงานที่ความเร็วรอบต่ำ มีการลื่นไถลน้อยกว่าที่ความเร็วรอบสูง ในขณะที่สเตปป์มอเตอร์ทั่วไปมีแรงบิดที่ไม่คงที่เมื่อทำงานที่ความเร็วรอบต่ำ และมีการลื่นไถลที่ความเร็วรอบสูง นั่นคือจุดบกพร่องบางประการของสเตปป์มอเตอร์ได้ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น

Thesis Title	Design and Development of Driver Technique for Moving Smoothly in Stepping Motor with Sine Modulation
Student	Mr. Witsarut Sriratana
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Phiphat Laohasongkram
Thesis Co Advisor	Asst. Prof. Prapart Ukakimaparn
Level of Study	Master of Engineering in Electrical Engineering
Department	Industrial Instrumentation Technology King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	1997

Abstract

Recently, AC motors is rapidly developed and widely applied for most machines used in industries area. This thesis presents the design and develop of driver system to control the operation of stepping motor. The excite power to the winding in each phase of stepping motor is sequenced in corresponding with the rotation of rotor by 90° of electric flux when compare with its stator. This driver system will control the amount of the sinusoidal and cosine electrical current applied to the windings of stepping motor by switching circuits, and cause the full wave flows through the winding in each phase of stepping motor. Using this driver system, the better efficiency of stepping motor is obtained and equivalent to the DC motor. The constant torque of stepping motor at any low speed operation can be accurately controlled while the very small slip at high speed is also obtained. This means that some disadvantages of stepping motor is improved because remarkable slip at high speed and non-constant torque at low speed operations are usually found in general stepping motors.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ก็เพราะได้รับการช่วยเหลือ และอนุเคราะห์จากหลาย ๆ ท่านด้วยกันซึ่งผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้ง และขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม ที่ได้ใช้เป็นสถานที่ในการทำวิจัย และให้การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยจนงานวิจัยสำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ พิพัฒน์ เลหาสงคราม อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ดูแลเอาใจใส่ตลอดระยะเวลาในการเรียนปริญญาโท นอกจากนี้ยังให้คำชี้แนะในการทำผลงานวิจัย (Paper) และวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประภาส อุดคคิมพันธ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้ความเมตตาชี้แนะในส่วนของทางด้านวิชาการ ตลอดจนให้แนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างทำงานวิจัย อีกทั้งให้คำปรึกษาและเพิ่มพูนความรู้ทางด้านวิชาการอยู่ตลอดเวลา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ กิตติ ตีรเศรษฐ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้คำปรึกษาถึงปัญหาต่าง ๆ และช่วยให้คำชี้แนะในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนคอยกระตุ้นเตือนให้พยายามทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จโดยเร็ว

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม ที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด และที่ขาดไม่ได้คือขอขอบพระคุณบุคลากรภาคที่ให้ความอนุเคราะห์ในการจัดพิมพ์เอกสารต่าง ๆ ให้กับผู้วิจัย

ขอขอบคุณมูลนิธิเพื่อการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร (C&C) ที่ให้เงินสนับสนุนในการทำวิจัยจำนวนหนึ่ง ทำให้การวิจัยเป็นไปได้อย่างต่อเนื่อง

และที่สำคัญที่สุดขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงคือคุณพ่อปรีชา และคุณแม่คำปน ศรีรัตนะ ที่คอยเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด และได้ช่วยสนับสนุนในด้านของทุนวิจัยและค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ในระหว่างระยะเวลาที่ผู้วิจัยเรียนปริญญาตรีและปริญญาโท ซึ่งถ้าไม่ได้บุคคลทั้งสอง ผู้วิจัยก็ไม่สามารถที่จะผ่านอุปสรรคต่างๆ นานับประการ มาเป็นตรงจุดนี้ได้

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทั้งที่เอ่ยชื่อ หรือไม่ได้เอ่ยชื่อก็ตาม ขอกราบขอบพระคุณอีกครั้ง

วิสูตร ศรีรัตนะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 แนวคิดในการนำเสนอวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
2 พื้นฐานของสเตปป์มอเตอร์.....	3
2.1 หลักการทำงานโดยทั่วไปของสเตปป์มอเตอร์ (Stepping Motors).....	3
2.2 ประเภทของสเตปป์มอเตอร์.....	5
2.2.1 สเตปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Stepping Motor).....	5
2.2.2 สเตปป์มอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้ (Variable - Reluctance Stepping Motor).....	6
2.2.3 สเตปป์มอเตอร์แบบไฮบริดจ์ (Hybrid Stepping Motor).....	9
2.3 ตัวเข้ารหัสของเพลามอเตอร์ (Encoder of Shaft).....	11
2.3.1 ตัวเข้ารหัสแบบเพิ่มค่า (Incremental Encoder).....	11
2.3.2 ความละเอียดของตัวเข้ารหัสแบบเพิ่มค่า.....	12
2.3.3 เอาต์พุตของตัวเข้ารหัส.....	13
3 การควบคุมสเตปป์มอเตอร์.....	15
3.1 คุณลักษณะของสเตปป์มอเตอร์ (Specification of Stepping Motor Characteristics).....	15
3.1.1 คุณลักษณะทางสถิตย (Static Characteristics).....	15
3.1.2 คุณลักษณะทางพลวัต (Dynamic Characteristics).....	17

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.2 การควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์.....	18
3.3 หลักการออกแบบวงจรขับสเตปป์มอเตอร์.....	20
3.4 วงจรจำกัดแรงดันเกิน (Suppressors Circuit).....	21
3.4.1 วงจรจำกัดแรงดันเกินโดยใช้ไดโอด (Diode Suppressor Circuit).....	22
3.4.2 วงจรจำกัดแรงดันเกินโดยใช้ไดโอด-ความต้านทาน (Diode-Resistor Suppressor Circuit).....	23
3.4.3 วงจรจำกัดแรงดันเกินโดยใช้ซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode Suppressor Circuit).....	24
3.5 เทคนิคการเพิ่มระดับกระแสอย่างรวดเร็ว (Overdriving Method).....	24
3.6 วงจรขับสำหรับสเตปป์มอเตอร์.....	27
3.6.1 วงจรขับแบบใช้แรงดันไฟฟ้าสองระดับ	27
3.6.2 วงจรขับแบบชอปเปอร์.....	28
3.6.3 วงจรขับแบบบริดจ์ (Bridge Current Driver).....	29
4 การพัฒนาระบบขับเคลื่อนของสเตปป์มอเตอร์.....	31
4.1 ระบบขับเคลื่อนสเตปป์มอเตอร์ที่พัฒนา.....	31
4.2 หลักการทำงานของระบบขับเคลื่อนที่พัฒนา.....	32
4.2.1 หน่วยจัดการข้อมูล และถอดรหัสสัญญาณชานน์และโคชานน์.....	33
4.2.2 หน่วยขับกระแสชนิดป้อนกลับแบบสองแกนขวาง.....	38
4.2.3 หน่วยเข้ารหัสและสเตปป์มอเตอร์.....	41
5 การทดสอบการทำงานของระบบ.....	44
5.1 การทดสอบการทำงานในส่วนต่างๆ ของระบบ.....	44
5.1.1 การทดสอบความเร็วรอบของเฟลอมอเตอร์.....	44
5.1.2 การทดสอบแรงบิดที่เฟลาของมอเตอร์.....	46
5.2 ข้อเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ระหว่างสเตปป์มอเตอร์ที่ใช้ระบบขับ เคลื่อนที่พัฒนา กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและสเตปป์มอเตอร์ทั่วไป.....	51
6 ข้อเสนอแนะและวิจารณ์.....	53
6.1 ปัญหาและจุดบกพร่องของระบบ.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
6.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาระบบต่างๆ.....	53
6.3 บทสรุป.....	53
บรรณานุกรม.....	55
ภาคผนวก.....	56
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์.....	57
บทความวิจัยในวารสารสถานแห่งประเทศไทย ปีที่ 45 เล่มที่ 8 เรื่อง มินิสเตปเทคนิคสำหรับสเตปปีงมอเตอร์ในรูปแบบกระแส.....	58
บทความวิจัยในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบัน ครั้งที่ 18 เรื่อง มอเตอร์กระแสตรงที่ไม่มีแปรงถ่านโดยใช้สเตปปีงมอเตอร์.....	63
ภาคผนวก ข รายละเอียดข้อมูลของไอซีเบอร์ TL494.....	69
ประวัติผู้เขียน.....	80

สารบัญญภาพ

	หน้า
2.1 แสดงบล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) ของตัวควบคุมสำหรับควบคุมการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์.....	3
2.2 แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในลักษณะต่าง ๆ.....	3
2.3 แสดงแรงดึงดูดซึ่งทำให้เกิดแรงบิด หมุนโรเตอร์ให้อยู่ในตำแหน่งที่สมดุล.....	4
2.4 แสดงโครงสร้างของสเตปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรสี่เฟส.....	5
2.5 แสดงโครงสร้างของสเตปปีงมอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้.....	6
2.6 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น.....	7
2.7 แสดงตำแหน่งของสถานะที่สมดุลเมื่อเกิดการกระตุ้นที่เฟสใดเฟสหนึ่ง.....	8
2.8 แสดงโรเตอร์และสเตเตอร์ของมอเตอร์สามเฟสและสี่เฟส ตามลำดับ.....	8
2.9 แสดงภาพหน้าตัดของมอเตอร์สี่เฟส ที่มีฟันโรเตอร์ห้าสิบซี่ มุมสเตป 1.8 องศา.....	9
2.10 แสดงโครงสร้างของสเตปปีงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์.....	9
2.11 แสดงภาพการวางโรเตอร์ตามยาวเพื่อใช้สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กขั้วเดียวกัน.....	10
2.12 แสดงหลักการการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์.....	10
2.13 แสดงตัวอย่างกลไกของการเพิ่มค่าโดยใช้แสง.....	11
2.14 แสดงถึงตัวตรวจจับแบบมีช่องปิดเปิดให้แสงผ่านได้ช่องเดียวและแบบมีหลายช่อง.....	11
2.15 แสดงถึงผลของแสงที่เดินในแนวเดียวกันและแสงที่แตกกระจาย.....	12
2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นเชิงเส้นกับความไม่ได้ศูนย์กลาง.....	13
2.17 (ก) แสดงตัวอย่างรูปคลื่นเอาต์พุตสี่เหลี่ยมของตัวเข้ารหัสช่องเดียวสองทิศทาง (ข) แสดงตัวอย่างสัญญาณของตัวเข้ารหัสสองช่อง มีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา สองทิศทาง.....	14
3.1 แสดงกราฟคุณลักษณะทางสถิติของสเตปปีงมอเตอร์ขนาดสามเฟส.....	15
3.2 แสดงกราฟคุณลักษณะของแรงบิดต่อมุมสเตป (θ).....	16

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
3.3 แสดงความสัมพันธ์คุณลักษณะของแรงบิดต่อกระแส.....	17
(ก) คือสเตปป์ิงมอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานทางแม่เหล็กสี่เฟส โดยมีมุมสเตปป์เท่ากับ 1.8 องศา	
(ข) คือไฮบริดจ์มอเตอร์สี่เฟส มุมสเตปป์เท่ากับ 1.8 องศา	
3.4 แสดงกราฟคุณลักษณะทางพลวัต ของสเตปป์ิงมอเตอร์.....	17
3.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการขับเคลื่อนสเตปป์ิงมอเตอร์.....	19
3.6 แสดงวงจรพื้นฐานของวงจรขับเคลื่อนต่าง ๆ.....	20
(ก) การขับเคลื่อนด้วยตัวเดียว	
(ข) การขับเคลื่อนสองภาวะขั้ว	
(ค) การขับเคลื่อนสองภาวะขั้ว	
3.7 แสดงวงจรสมมูลย์ของสเตปป์ิงมอเตอร์.....	21
3.8 แสดงวงจรจำกัดแรงดันเกินโดยใช้ไดโอด.....	22
3.9 แสดงวงจรป้องกันแรงดันเกินโดยใช้ไดโอด.....	23
3.10 แสดงวงจรป้องกันแรงดันเกินที่ใช้ไดโอด-ความต้านทาน.....	23
3.11 แสดงวงจรป้องกันแรงดันเกินโดยใช้ซีเนอร์ไดโอด.....	24
3.12 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อเวลาของการใช้วงจรป้องกันต่างๆ.....	24
3.13 แสดงการใช้ความต้านทานต่ออนุกรมกับชุดขดลวดของสเตปป์ิงมอเตอร์.....	25
3.14 แสดงการเพิ่มตัวเก็บประจุที่แต่ละส่วนของวงจรจำกัดแรงดัน.....	26
3.15 แสดงผลการต่อตัวเก็บประจุนานกับความต้านทาน.....	26
3.16 แสดงวงจรขับเคลื่อนสเตปป์ิงมอเตอร์แบบแรงดันไฟฟ้าสองระดับ.....	27
3.17 แสดงวงจรขับเคลื่อนแบบชอปเปอร์.....	28
3.18 แสดงวงจรขับเคลื่อนแบบบริดจ์ สำหรับการขับเคลื่อนสองภาวะขั้ว.....	29
3.19 แสดงรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสของการขับเคลื่อนสเตปป์ิงมอเตอร์ แบบสองภาวะขั้ว.....	30
3.20 แสดงวงจรขับเคลื่อนบริดจ์อีกแบบหนึ่งซึ่งใช้แหล่งจ่ายไฟเดียว.....	30

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
4.1 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของ โรเตอร์และสเตเตอร์ในขณะที่มีการกระตุ้นให้มอเตอร์ทำงาน.....	32
4.2 แสดงบล็อก ไดอะแกรมของระบบขับเคลื่อนที่พัฒนาขึ้น.....	32
4.3 แสดงวงจรนับขึ้นลง และจัดลำดับลอจิกของสัญญาณที่ได้ออกแบบขึ้น.....	33
4.4 แสดงการเทียบเฟสของสัญญาณพัลส์จากตัวเข้ารหัสชุด A และ B.....	34
4.5 แสดงวงจรถอดรหัสสัญญาณชานน์และโคชานน์ และวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกที่ได้ออกแบบขึ้น.....	35
4.6 แสดงลักษณะของแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นชานน์และโคชานน์ และสัญญาณเครื่องหมาย.....	36
4.7 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของแรงดัน ไฟฟ้ารูปคลื่นชานน์และโคชานน์ที่วัดจาก ANALOG OUT 1 และ 2 ในรูปที่ 4.5	37
4.8 แสดงแผนผังวงจรในส่วนของวงจรนับขึ้นลง และจัดลำดับลอจิกของสัญญาณรวมทั้งวงจรถอดรหัสสัญญาณชานน์และโคชานน์ และวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก.....	37
4.9 แสดงวงจรขับแบบสองแกนขวาง.....	38
4.10 แสดงลักษณะของกระแสที่ไหลในขดลวดของสเตปปีงมอเตอร์ที่ใช้กับระบบขับเคลื่อนที่พัฒนาขึ้น.....	39
4.11 แสดงวงจรขับที่ใช้ในระบบที่ได้ออกแบบขึ้น.....	40
4.12 แสดงแผนผังวงจรขับ.....	41
4.13 แสดงตัวเข้ารหัสและสเตปปีงมอเตอร์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา.....	42
4.14 แสดงการติดตั้งของระบบทั้งหมดที่พัฒนาขึ้น.....	42
5.1 กราฟแสดงผลตอบสนองของความเร็วรอบต่อแรงดัน ไฟฟ้าทางด้านอินพุต.....	45
5.2 แสดงการทดสอบความเร็วรอบในการหมุนของเพลาสเตปปีงมอเตอร์.....	46
5.3 กราฟแสดงผลตอบสนองของความเร็วรอบต่อแรงดัน ไฟฟ้าทางด้านอินพุต ในขณะที่มีโหลดต่างกัน.....	47

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
5.4 กราฟแสดงผลตอบสนองระหว่างแรงบิดที่เกิดขึ้นต่อความเร็วรอบของ สเตปป์มอเตอร์ที่ใช้กับระบบขับเคลื่อนที่พัฒนาขึ้น.....	48
5.5 แสดงการหาค่าของแรงบิด ในขณะที่มีการหมุนที่เพลลาของสเตปป์มอเตอร์ด้วย แม่เหล็กถาวร (โพลด 1).....	48
5.6 แสดงการหาค่าของแรงบิด ในขณะที่มีการหมุนที่เพลลาของสเตปป์มอเตอร์ด้วย แม่เหล็กถาวร (โพลด 2).....	49
5.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรง ที่ได้จากการดึงที่เพลลาของสเตปป์มอเตอร์ กับแรงบิดที่เกิดขึ้น.....	50
5.8 แสดงการทดสอบแรงบิดทางสถิตย์โดยการใช้เครื่องชั่งสปริง.....	50



บทที่ 1

บทนำ

เครื่องจักรกลไฟฟ้าในปัจจุบันส่วนใหญ่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบในการเปลี่ยนรูปจากกำลังงานไฟฟ้าให้เป็นกำลังงานกล มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้อยู่โดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้าแต่ละประเภทนั้นจะมีทั้งข้อดี และจุดบกพร่องที่แตกต่างกันไป ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นการนำเสนอถึงการแก้ไขจุดบกพร่องต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้าแต่ละประเภท โดยจะเน้นที่สเตปป์มอเตอร์ (Stepping motor) เป็นสำคัญ เนื่องจากว่าสเตปป์มอเตอร์ที่ใช้กัน โดยทั่วไปยังมีข้อจำกัดอยู่มาก โดยเฉพาะผลตอบสนองของแรงบิดที่มีต่อโหลด โดยแรงบิดที่เกิดขึ้นที่เพลลาของสเตปป์มอเตอร์จะมีค่าไม่คงที่ในขณะที่ขับเคลื่อนด้วยความเร็วรอบต่ำ และเกิดการลื่นไถล (Slip) ขึ้นในขณะที่ขับเคลื่อนด้วยความเร็วรอบสูง อันเนื่องมาจากการสูญเสียการเข้าจ้งหะกันระหว่างโรเตอร์ (Rotor) เทียบกับสเตเตอร์ (Stator)

1.1 แนวคิดในการนำเสนอวิทยานิพนธ์

จากข้อจำกัดต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นของสเตปป์มอเตอร์จึงได้มีแนวความคิดในการพัฒนาสร้างระบบขับเคลื่อน และการจัดลำดับของลอจิก (Logic) ในการป้อนกำลังงานให้กับชุดขดลวดในแต่ละเฟสของสเตปป์มอเตอร์ ให้มีความสอดคล้องกับการหมุนของโรเตอร์เทียบกับสเตเตอร์ โดยใช้เทคนิคใหม่ในรูปแบบกระแส ซึ่งผลที่ได้ทำให้สามารถควบคุมแรงบิดที่เกิดขึ้นในขณะที่มีการหมุนของเพลลามอเตอร์ และสามารถแก้ไขข้อบกพร่องอื่นๆ ของสเตปป์มอเตอร์ได้ จะเปรียบเสมือนเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่ใช่แปร่งถ่านนั่นเอง

แนวคิดดังกล่าวจะใช้หลักการ หรือเทคนิคในการให้กำลังงานกับสเตปป์มอเตอร์ โดยทำการจัดลำดับข้อมูลลอจิกที่ได้จากชุดของตัวเข้ารหัส แล้วถอดรหัสข้อมูลลอจิกให้เป็นค่าไซน์ (Sine) ที่เป็นค่าของมุม 0-360 องศา โดยมีค่าสูงสุดสำหรับปริมาณเชิงเลขเท่ากับ 510 ด้วยโปรแกรม จากนั้นจะส่งให้กับวงจรขับ (Driver) โดยที่ในระบบขับเคลื่อนนั้น วงจรขับจะทำหน้าที่เปิดปิด (Switching) กระแสเป็นช่วง ๆ ขึ้นอยู่กับสัญญาณกระตุ้นที่เข้ามา เพื่อป้อนให้กับขดลวดอาร์มาเจอร์ (Armature) ของสเตปป์มอเตอร์ และเมื่อทำการทดสอบกระแสในขดลวดระหว่างการเคลื่อนที่จากขั้วแม่เหล็กขั้วหนึ่งไปยังขั้วแม่เหล็กอีกขั้วหนึ่ง พบว่าปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux) ที่เกิดขึ้นนั้นเป็นรูปแบบของสัญญาณไซน์เช่นเดียวกัน ดังนั้นกระบวนการในการกำหนดกระแสให้กับขดลวดในโรเตอร์ของสเตปป์มอเตอร์จึงเปรียบได้กับแปร่งถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั่นเอง รายละเอียดต่าง ๆ จะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 4 และบทที่ 5

1.2 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาสร้างระบบขับเคลื่อนสำหรับสเตปปีงมอเตอร์เพื่อแก้ไขจุดบกพร่องต่างๆ ให้มีคุณสมบัติและประสิทธิภาพในการทำงานทัดเทียมกับข้อดีของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และสามารถใช้งานได้จริงกับเครื่องจักรกลทางอุตสาหกรรม โดยในที่นี้ จะใช้สเตปปีงมอเตอร์ขนาดเล็กที่มีข้อกำหนดค่าความละเอียด 200 สเตป ค่าความต้านทาน 0.8 โอห์ม ค่าของกระแส 0.3 แอมแปร์ต่อเฟส และค่าของแรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ต่อเฟส เป็นกรณีศึกษาในการพัฒนาสร้างระบบขับเคลื่อน

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 6 บท ดังนี้

บทที่ 1. กล่าวถึงแนวคิดและหลักการ โดยสังเขป ในการพัฒนาสร้างระบบขับเคลื่อนของสเตปปีงมอเตอร์ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ และขอบเขตของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2. กล่าวถึงหลักการงานโดยทั่วไป และประเภทของสเตปปีงมอเตอร์ ทั้งนี้เพื่อทำความเข้าใจในโครงสร้างและคุณสมบัติเบื้องต้นของสเตปปีงมอเตอร์แต่ละประเภท อีกทั้งเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาต่อไป

บทที่ 3. กล่าวถึงการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์ เพื่อใช้สำหรับเปรียบเทียบกับระบบขับเคลื่อนของสเตปปีงมอเตอร์ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้เทคนิคใหม่ ซึ่งจะได้นำเสนอในบทที่ 4

บทที่ 4. กล่าวถึงหลักการงานของระบบขับเคลื่อนที่พัฒนาขึ้นโดยใช้เทคนิคใหม่ รวมทั้งแนวคิด และวงจรในแต่ละส่วนของระบบ

บทที่ 5. กล่าวถึงผลของการทดสอบระบบขับเคลื่อนที่พัฒนาขึ้นโดยใช้เทคนิคใหม่ โดยเปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และสเตปปีงมอเตอร์ทั่วไป

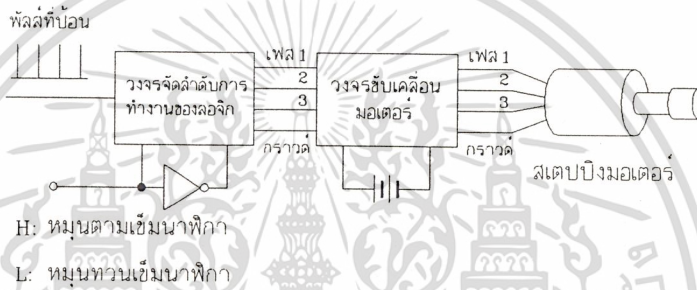
บทที่ 6. เป็นบทสรุปและวิจารณ์ โดยกล่าวถึงปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับการพัฒนา พร้อมทั้งข้อเสนอแนะต่าง ๆ

บทที่ 2

พื้นฐานของสเตปปีงมอเตอร์

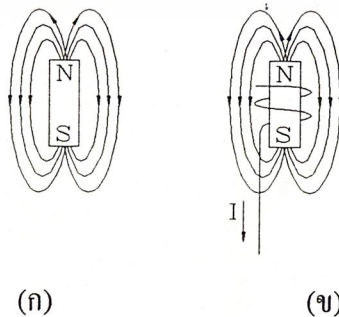
2.1 หลักการทำงานโดยทั่วไปของสเตปปีงมอเตอร์ (Stepping Motors)

สเตปปีงมอเตอร์เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิดหนึ่ง ซึ่งการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์นั้น จะขึ้นอยู่กับพัลส์(Pulse) ที่ป้อนให้กับขดลวดเฟสของมอเตอร์ในลำดับที่ถูกต้องด้วยวงจรลอจิกสำหรับจัดลำดับ และกระแสที่พอเพียงโดยวงจรขับ



ภาพที่ 2.1 แสดงบล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) ของตัวควบคุมสำหรับควบคุมการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์

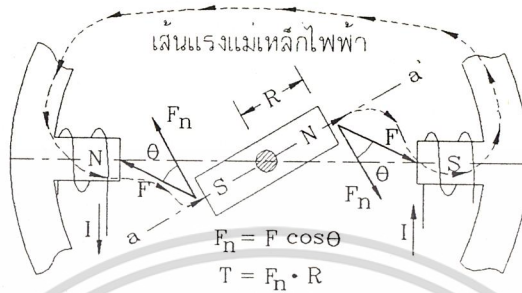
จากบล็อกไดอะแกรมภาพที่ 2.1 แสดงถึงหลักการทำงานพื้นฐานของสเตปปีงมอเตอร์ ซึ่งตัวควบคุมประกอบด้วยวงจรลอจิกสำหรับจัดลำดับ วงจรขับสัญญาณความถี่อินพุต และสัญญาณควบคุมทิศทางการหมุน ส่วนของตัวควบคุมของสเตปปีงมอเตอร์จะเชื่อมต่อ (Interface) ได้โดยตรงกับไมโครโปรเซสเซอร์หรือไมโครคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 2.2 แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในภาพที่ 2.2 แสดงหลักการพื้นฐานของเส้นแรงแม่เหล็ก โดยภาพ (ก) แสดงสนามแม่เหล็ก(Magnetic Field) ที่เกิดจากแม่เหล็กถาวร ส่วนภาพ(ข) แสดงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแส (I)



ภาพที่ 2.3 แสดงแรงดึงดูดซึ่งทำให้เกิดแรงบิด (Torque) หมุนโรเตอร์ให้อยู่ในตำแหน่งที่สมดุล

จากภาพที่ 2.3 จะเห็นว่าแท่งแม่เหล็กที่ติดอยู่กับเพลา (Shaft) จะสามารถหมุนได้โดยอิสระ แม้ว่าจะไม่มีขั้วไฟฟ้ามากระตุ้นที่สเตเตอร์ ซึ่งถ้าก่อนที่จะมีกระแสไฟฟ้ามากระตุ้นที่สเตเตอร์ ตำแหน่งของโรเตอร์แม่เหล็กอยู่ตามแกน a-a' ซึ่งทำมุม θ กับแกนของขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นจะได้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากการดึงดูดของขั้วแม่เหล็กที่ต่างกัน ทำให้เกิดส่วนของแรงบิดปกติ

$$F_n = F \cos \theta \quad (\text{แรงนี้ตั้งฉากกับแกน a-a'}) \quad (2-1)$$

เมื่อ F คือแรงแม่เหล็กที่เกิดจากการดึงดูดของขั้วแม่เหล็กที่ต่างกัน

F_n คือแรงปกติที่เป็นผลมาจากแรงแม่เหล็ก

θ คือมุมที่เกิดจากตำแหน่งแกนของอาร์มาเจอร์แม่เหล็ก กับตำแหน่งแกนขั้วของแม่เหล็กไฟฟ้า

จะได้ผลรวมของแรงบิดดังนี้

$$T = F_n R \quad (2-2)$$

ทำให้โรเตอร์หมุนไปในทิศตามเข็มนาฬิกา จนกว่าแกนของโรเตอร์ a-a' จะอยู่ในแนวเดียวกับแกนของสเตเตอร์ ถ้าหากมีคู่ของขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าหลายๆ ขั้ววางอยู่ตำแหน่งรอบๆ

สเตเตอร์ และถ้าหากขั้วเหล่านั้นถูกกระตุ้นด้วยกระแสสลับ ในลักษณะที่เรียงลำดับและต่อเนื่องไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

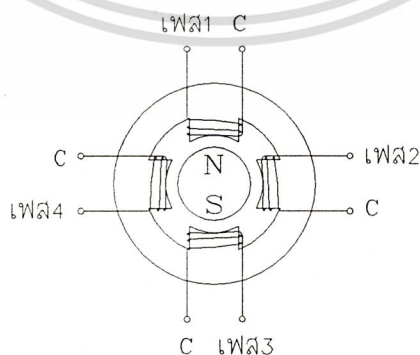
ก็จะทำให้โรเตอร์หมุนไปตามการหมุนของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเปิดปิดวงจร (Switching) ที่เรียงลำดับของขดลวดขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าของสเตเตอร์

2.2 ประเภทของสเตปปีงมอเตอร์

2.2.1 สเตปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Stepping Motor)

สเตปปีงมอเตอร์ชนิดนี้จะใช้ แม่เหล็กถาวรเป็นโรเตอร์ และมีซี่ฟันของสเตเตอร์ล้อมรอบ ภาพที่ 2.4 เป็นตัวอย่างของสเตปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรสี่เฟส โดยที่โรเตอร์เป็นทรงกระบอก สเตเตอร์มีซี่ฟันสี่ซี่ โดยที่แต่ละซี่จะมีขดลวดพันโดยรอบ เพื่อทำให้เกิดการสร้างสนามแม่เหล็ก เมื่อต้องการให้สเตปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรมีขนาดมุมสเตป (Step) เล็กกลง จะต้องเพิ่มจำนวนขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์และจำนวนซี่ฟันของสเตเตอร์ แต่ก็มีขีดจำกัดในการเพิ่มจำนวนขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ เนื่องจากการสร้างแม่เหล็กถาวรให้มีโครงสร้างแบบมีขั้วแม่เหล็กหลายๆ ขั้วนั้นทำได้ยาก

ลักษณะทั่วไปของมอเตอร์แบบนี้ก็คือ โรเตอร์จะถูกยึดอยู่กับที่แม้ว่าจะไม่มีการกระตุ้นเฟส ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า ดีเทนท์แมคคาไนคซึม (Detent Mechanism) ข้อเสียของสเตปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรคือมีขนาดมุมสเตปใหญ่ ทำให้มีความละเอียดของสเตปต่อรอบน้อยมาก เนื่องจากว่าโครงสร้างของโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร การสร้างแม่เหล็กถาวรให้มีหลายขั้วทำได้ยากดังที่กล่าวมาแล้ว ทำให้ไม่สามารถสร้างสเตปให้มีขนาดเล็กกลงได้ สเตปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างขนาดเล็ก ทำให้ค่าของแรงบิดที่ได้ต่อหน่วยปริมาตรมีค่าต่ำ ถ้าต้องการปรับปรุงประสิทธิภาพในเรื่องของแรงบิด แม่เหล็กถาวรที่ใช้จะต้องทำมาจากสารแม่เหล็กที่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กสูง

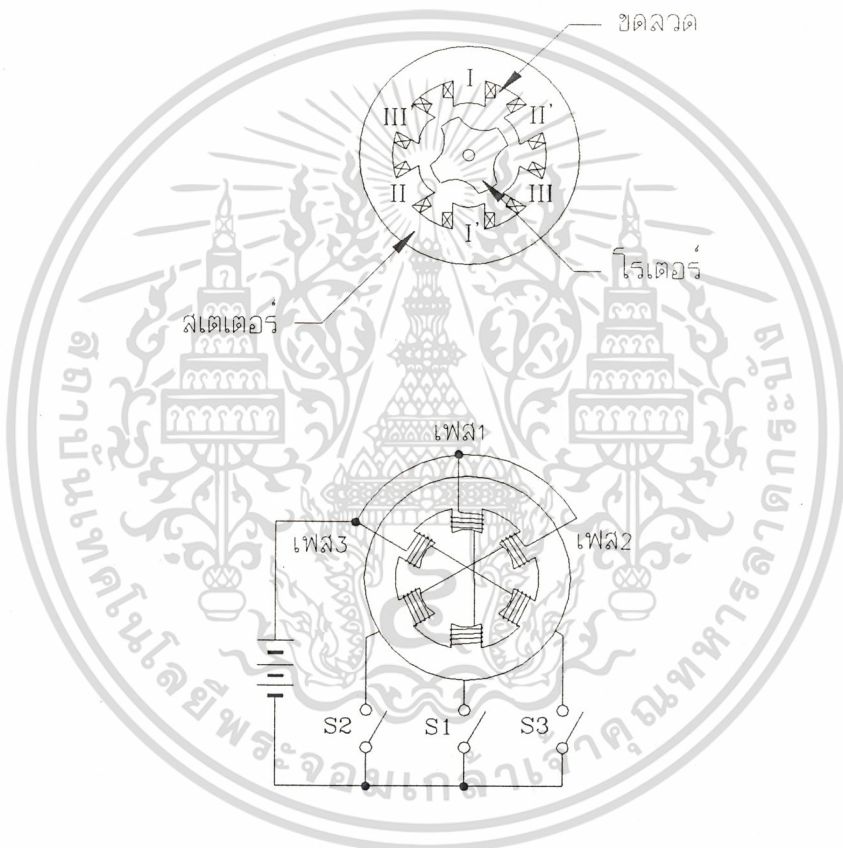


ภาพที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของสเตปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรสี่เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 สเตปปีงมอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้ (Variable Reluctance Stepping Motor)

สเตปปีงมอเตอร์ชนิดนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า วีอาร์สเตปปีงมอเตอร์ (VR Stepping Motor) โดยโครงสร้างมีโรเตอร์และสเตเตอร์ทำจากโลหะซิลิคอน (Silicon) ซึ่งเป็นสารแม่เหล็กที่มีสภาพซึมซาบทางแม่เหล็ก (Permeability) สูง และสามารถให้เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านได้มาก โดยโรเตอร์จะติดอยู่กับแกนของมอเตอร์ และสเตเตอร์จะติดอยู่กับโครงของตัวมอเตอร์ ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของสเตปปีงมอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้

ในภาพ เป็นภาพตัดขวางของสเตปปีงมอเตอร์ซึ่งเป็นมอเตอร์สามเฟส โดยที่โรเตอร์มีซี่ฟันสี่ซี่ และสเตเตอร์จะมีซี่ฟันหกซี่ อยู่ในตำแหน่งตรงข้ามและทำมุม 180 องศา ต่อกันเป็นอนุกรมหรือขนานก็ได้ แต่ในภาพต่อในลักษณะอนุกรม จะเห็นว่าฟันของสเตเตอร์สองซี่ที่มีเฟสเดียวกันจะมีขั้วแม่เหล็กตรงข้ามซึ่งกันและกัน สมมุติว่าฟัน I, II และ III มีขั้วเป็นขั้วเหนือ (N)

และ I', II', III' เป็นขั้วใต้ (S) เมื่อมีการกระตุ้น กระแสแต่ละเฟสจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้น ดังภาพที่ 2.6

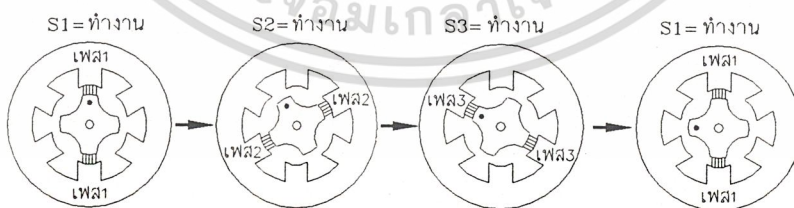
นอกจากนี้พื้นของโรเตอร์จะมีตำแหน่งในแนวเดียวกันกับพื้นของสเตเตอร์ มีผลทำให้ความต้านทานทางแม่เหล็กมีค่าน้อยที่สุด โดยจะถือว่าสถานะนี้เป็นสถานะที่สมดุล และเป็นตำแหน่งที่มีเส้นแรงแม่เหล็กสั้นที่สุด ดังภาพที่ 2.7

โครงสร้างพื้นฐานของสเตปมอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้จะมีลักษณะดังนี้

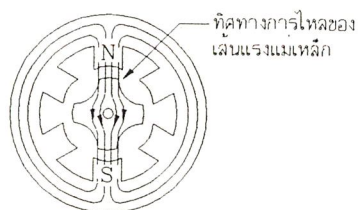
1) ช่องว่างอากาศ(Airgap) ควรจะมีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งหมายถึงว่าช่องว่างอากาศระหว่างพื้นของโรเตอร์กับสเตเตอร์ควรมีค่าความห่างกันน้อยมาก เพื่อให้เกิดค่าของแรงบิดสูงสุด และมีตำแหน่งที่แน่นอนมากขึ้น เนื่องจากว่าระดับของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive Force) มีระดับเดียวกัน ช่องอากาศขนาดเล็ก จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กสูงกว่า ซึ่งมีผลทำให้ค่าของแรงบิดสูงมากขึ้น

2) สำหรับมุมสเตปเล็ก ๆ จากภาพที่ 2.8 (ก) แสดงมอเตอร์สามเฟส ที่สเตเตอร์มีฟันสิบสองซี่ และมีฟันที่โรเตอร์แปดซี่ ส่วนภาพที่ 2.8 (ข) เป็นภาพมอเตอร์สี่เฟส ที่สเตเตอร์มีฟันแปดซี่ และโรเตอร์มีฟันหกซี่ โดยทั้งสองภาพนี้มีมุมสเตปเท่ากับ 15 องศา

3) ในการสร้างสเตปมอเตอร์ให้มีโครงสร้างแบบหลายชุดวางซ้อนกัน (Stack) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในเรื่องของแรงบิดนั้น ชุดแต่ละชุดที่วางซ้อนจะถูกกำหนดเป็นหนึ่งเฟส โดยโรเตอร์และสเตเตอร์จะมีซี่ฟันเหมือนกัน ทำให้เกิดการเพิ่มแรงบิดต่อปริมาตรของโรเตอร์ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องจักร



ภาพที่ 2.6 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 2.7 แสดงตำแหน่งของสถานะที่สมดุลเมื่อเกิดการกระตุ้นที่เฟสใดเฟสหนึ่ง



ภาพที่ 2.8 แสดงโรเตอร์และสเตเตอร์ของมอเตอร์สามเฟสและสี่เฟส ตามลำดับ

โดยที่จำนวนสเตเตอร์รอบ (S) หาได้จากสมการ

$$S = 360 / \phi_m - mN_r \quad (2-3)$$

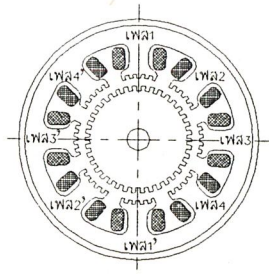
เมื่อ ϕ_m คือความสัมพันธ์ระหว่างมุมสเตป

m คือมุมเฟส

N_r คือจำนวนฟันของโรเตอร์

ในการลดขนาดมุมสเตปลง จำนวนซี่ฟันของโรเตอร์จะต้องเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 2.9

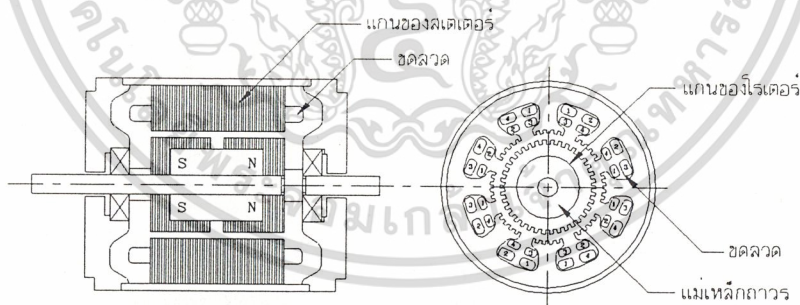
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.9 แสดงภาพหน้าตัดของมอเตอร์สี่เฟส ที่มีฟันโรเตอร์ห้าสิบซี่ มุมสเตป 1.8 องศา

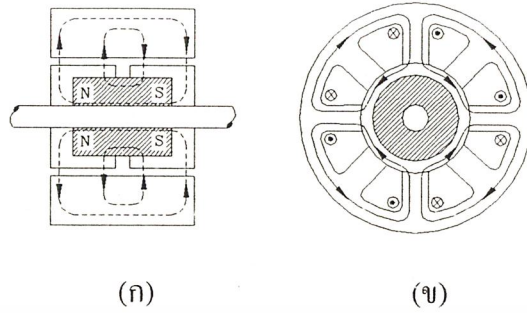
2.2.3 สเตปป์มอเตอรืแบบไฮบริดจ์ (Hybrid Stepping Motor)

เป็นสเตปป์มอเตอรืที่มีโรเตอรืเป็นแม่เหล็กถาวร การใช้ชื่อว่าไฮบริดจ์ได้มาจากการรวมหลักสำคัญของมอเตอรืแบบแม่เหล็กถาวร และแบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้เข้าด้วยกัน สเตปป์มอเตอรืแบบไฮบริดจ์จะมีโครงสร้างของสเตเตอร์คล้ายกับโครงสร้างของสเตปป์มอเตอรืแบบแปรค่าความต้านทานแม่เหล็กได้ แต่การพันและการต่อขดลวดจะต่างกัน โดยในหนึ่งเฟสของสเตปป์มอเตอรืแบบแปรค่าความต้านทานแม่เหล็กได้จะมีขดลวดอยู่สองขด และขดลวดทั้งสองจะพันอยู่ที่ขั้วเดียวกัน ในลักษณะของสองภาวะขั้ว (Bipolar) ซึ่งจะทำให้ขั้วแม่เหล็กมีความต่างกันขณะที่มีการกระตุ้นแต่ละครั้ง แสดงได้ดังภาพที่ 2.10



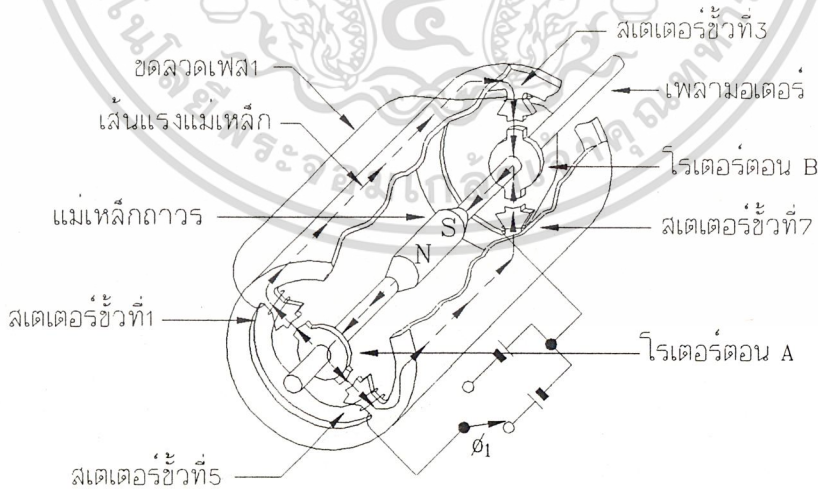
ภาพที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของสเตปป์มอเตอรืแบบไฮบริดจ์

ลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่งของสเตปป์มอเตอรืแบบไฮบริดจ์ก็คือ ตัวโรเตอรืจะเป็นแม่เหล็กถาวร รูปร่างทรงกระบอกตามยาวอยู่ในแกนเหล็กของโรเตอรื เพื่อใช้สร้างสนามแม่เหล็กขั้วเดียว ดังแสดงในภาพที่ 2.11 โดยที่แต่ละขั้วของแม่เหล็กจะถูกล้อมรอบด้วยฟันเหล็กอ่อน ฟันของโรเตอรืกับสเตเตอร์จะอยู่ในตำแหน่งที่เหลื่อมกันอยู่ 90 องศา



ภาพที่ 2.11 แสดงภาพการวางโรเตอร์ตามยาวเพื่อใช้สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กขั้วเดียวกัน

หลักการการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์ ที่แตกต่างจากสเตปปีงมอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้ก็คือ แรงบิดที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กจะไม่ขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของซี่ฟันด้วย ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 2.12 ข้อดีของสเตปปีงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์คือมีขนาดของสเตปเล็ก ทำให้มีความละเอียดของสเตปต่อรอบสูง นอกจากนี้ยังมีค่าของแรงบิดสูงกว่าสเตปปีงมอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้ แต่สเตปปีงมอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้ จะมีแรงเฉื่อยทางกลไกน้อยกว่า



ภาพที่ 2.12 แสดงหลักการการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ตัวเข้ารหัสของเพลามอเตอร์ (Encoder of Shaft)

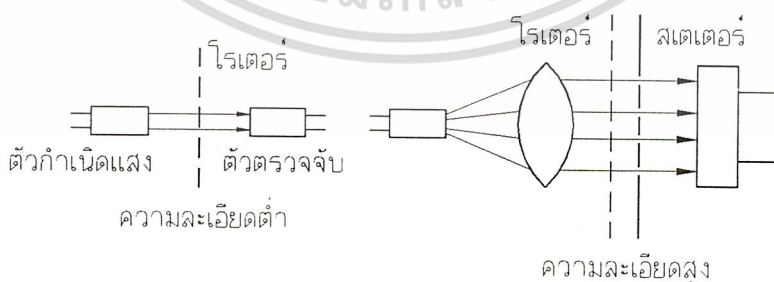
2.3.1 ตัวเข้ารหัสแบบเพิ่มค่า (Incremental Encoder)

ในระบบการบังคับตำแหน่งหรือความเร็วของมอเตอร์ ต้องใช้ตัวเข้ารหัสแบบเพิ่มค่าหรือตัวเข้ารหัสสำหรับรักษาตำแหน่ง และสำหรับสร้างสัญญาณป้อนกลับ โดยที่ตัวเข้ารหัสจะสร้างสัญญาณพัลส์ที่แปรผันตรงกับการหมุนของเพล สามารถนำไปใช้ในการรับรู้ความเร็วของเพลมอเตอร์ในรูปของอัตราจำนวนพัลส์ได้

ตัวเข้ารหัสแบบเพิ่มค่าประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ คือ ตัวกำเนิดแสง (Light Source) งานหมุน (Rotary Disk) งานอยู่กับที่ (Stationary Mask) และตัวตรวจจับ (Sensor) บนแผ่นงานหมุนซึ่งทำเป็นช่องโดยรอบดังแสดงในภาพ 2.13 และบนแผ่นงานอยู่กับที่จะมีช่องสำหรับให้แสงผ่านตรงเข้าไปยังตัวตรวจจับ ถ้าเป็นตัวเข้ารหัสที่ใช้วัดความเร็วค่า อาจไม่ต้องมีแผ่นงานอยู่กับที่ก็ได้ ส่วนตัวกำเนิดแสงอาจจะเป็นหลอดไฟหรือ LED ดังแสดงในภาพ 2.14



ภาพที่ 2.13 แสดงตัวอย่างกลไกของการเพิ่มค่าโดยใช้แสง



ภาพที่ 2.14 แสดงถึงตัวตรวจจับแบบมีช่องปิดเปิดให้แสงผ่านได้ช่องเดียว และแบบมีหลายช่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ความละเอียดของตัวเข้ารหัสแบบเพิ่มค่า

ความละเอียดของตัวเข้ารหัสคือ จำนวนคาบเวลาของสัญญาณเอาต์พุตต่อการหมุนของเพลา 1 รอบ ซึ่งบอกเป็นจำนวนพัลส์ต่อรอบ หรือจำนวนไซเคิล (Cycle) ต่อ 360 องศาหมุนทางกล หรือไซเคิลต่อองศา ตัวเข้ารหัสที่ใช้กันทั่วไปมีค่าความละเอียดตั้งแต่ 15 ถึง 10,000 พัลส์ต่อรอบ

ในทางปฏิบัตินั้น เนื่องจากแสงที่ออกจากแหล่งกำเนิดเป็นลำแสงเดี่ยว ถ้าต้องการให้แสงที่ผ่านช่องไปยังตัวตรวจจับเป็นเส้นตรงพร้อมๆกัน ก็จะกระทำโดยใช้เลนส์ (Lens) หรือตัวสะท้อนลักษณะพาราโบลา (Parabolic Refractor) ดังแสดงในภาพที่ 2.15

จำนวนพัลส์ต่อ 1 รอบของสัญญาณที่ตัวเข้ารหัสสร้างออกมามจะเท่ากับจำนวนช่องว่างบนแผ่นจานหมุน และความกว้างของช่องว่างกับความกว้างของแถบที่ระหว่างช่องว่างจะเท่ากัน ความกว้างของช่องว่าง (W) สามารถจะคำนวณได้จาก

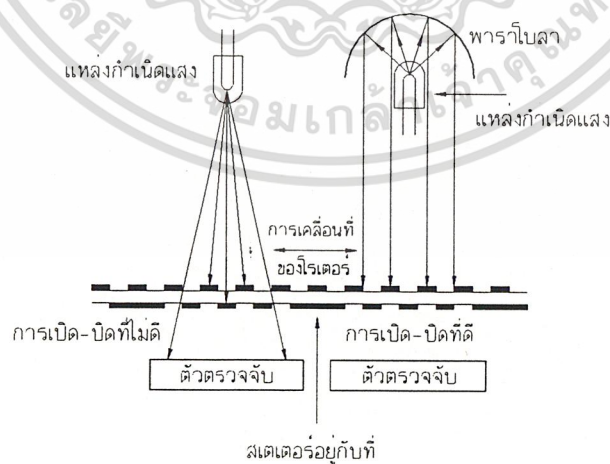
$$W = \frac{\pi D}{2N} \quad (2-4)$$

เมื่อ

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเพ็ทเทิน

N คือ จำนวนของความละเอียดเป็นพัลส์ต่อรอบ

W คือ ความกว้างของช่องว่าง



ภาพที่ 2.15 แสดงถึงผลของแสงที่เดินในแนวเดียวกันและแสงที่แตกกระจาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าตัวแปรของสมการ (2-4) นี้หาได้จากภาพ 2.16 ถ้าให้ D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นงานหมุนของตัวเข้ารหัส ค่าประมาณที่ใกล้เคียงมากของค่าความกว้างของช่องว่าง แสดงได้ดังนี้

$$W = \frac{0.75\pi D}{2N} \tag{2-5}$$

ตัวอย่าง ถ้าแผ่นหมุนของตัวเข้ารหัสมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ต้องการค่าความละเอียด 200 พัลส์ต่อรอบ จะได้ความกว้างของช่องว่างเท่ากับ 0.002356 นิ้ว



ภาพที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นเชิงเส้น (Linear) กับความไม่ได้ศูนย์กลาง

2.3.3 เอาต์พุตของตัวเข้ารหัส

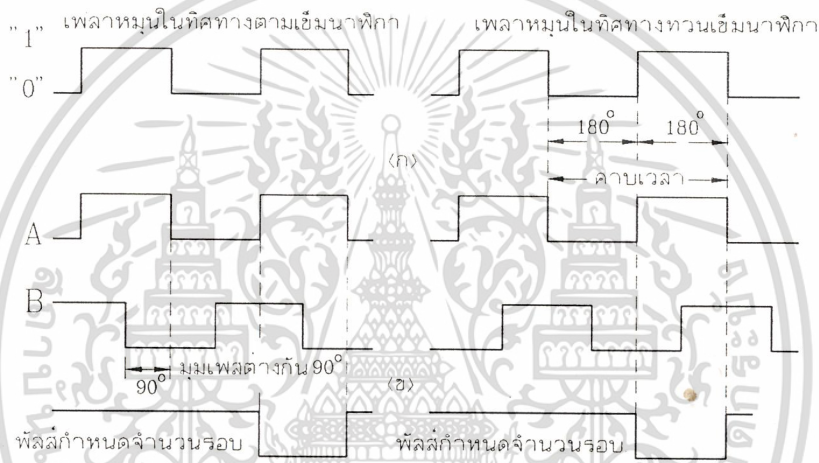
โดยทั่วไป สัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากตัวเข้ารหัสโดยตรง จะมีระดับไม่เพียงพอในการควบคุมหรือสำหรับการประมวลผลสัญญาณ ดังนั้นจึงต้องมีวงจรขยายและแปลงรูปร่างของสัญญาณต่อไว้ในตัวเข้ารหัสด้วยเสมอ สัญญาณลูกคลื่นที่ได้จากตัวตรวจจับปกติแล้วจะเป็นรูปสัญญาณสามเหลี่ยมหรือรูปสัญญาณซายน์ ขึ้นอยู่กับความละเอียดที่ต้องการ รูปสัญญาณเหล่านี้สามารถทำให้เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมได้ โดยการต่อตัวเปรียบเทียบ (Comparator) เข้ากับภาคขยายเชิงเส้นของตัวเข้ารหัส ซึ่งจะทำได้เอาต์พุตเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมตามต้องการ

ภาพที่ 2.17 (ก) แสดงถึงลูกคลื่นเอาต์พุตสี่เหลี่ยมของเข้ารหัสชนิดหนึ่งช่อง ไม่ว่าเพลจะหมุนในทิศทางใดสัญญาณที่ได้จะออกมาเหมือนกัน จึงเหมาะที่จะใช้กับงานที่ไม่กำหนดทิศทางเท่านั้น ส่วนในภาพที่ 2.17 (ข) แสดงสัญญาณสองชุด ที่ได้จากเข้ารหัสชนิดสองช่องเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณสองช่องนี้จะต่างกัน 90 องศาทางไฟฟ้า สัญญาณสองช่องนี้ถูกเรียกว่าเป็นแกนขวางกัน (Quadrature) และเหมาะที่จะใช้ในการรับรู้ทิศทางการหมุนของเพลลา หรือใช้ควบคุมระบบที่ซับซ้อนอื่น ๆ จากสัญญาณในภาพ 2.17 (ข) จะเห็นได้ว่าสัญญาณทั้งสองช่อง จะเริ่มจาก 0 ถึง 1 และ 1 ถึง 0 ขึ้นอยู่กับทิศทางการหมุนของแผ่นหมุนของตัวเข้ารหัส

ในตัวเข้ารหัสแบบเพิ่มค่าบางชนิด จะมีพัลส์ที่แสดงถึงจำนวนรอบของการหมุนสำหรับใช้ในการอ้างอิง พัลส์ที่ใช้แสดงจำนวนรอบนี้จะเกิดขึ้นหนึ่งพัลส์ต่อหนึ่งรอบ โดยทั่วไปแล้วใช้บอกถึงตำแหน่งเชิงกล หรือใช้เป็นสัญญาณเคลียร์ (Clear) จำนวนที่นับไว้ในหน่วยเก็บข้อมูล



ภาพที่ 2.17 (ก) แสดงตัวอย่างถูกคลื่นเอาต์พุตที่เหลื่อมของตัวเข้ารหัสช่องเดียวสองทิศทาง
(ข) แสดงตัวอย่างสัญญาณของตัวเข้ารหัสสองช่อง มีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา
สองทิศทาง

ในบทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงหลักการทำงานโดยทั่วไป และประเภทของสเตปปีงมอเตอร์ ทั้งนี้เพื่อทำความเข้าใจในโครงสร้าง และคุณสมบัติเบื้องต้นของสเตปปีงมอเตอร์ในแต่ละประเภท ส่วนการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์นั้นจะกล่าวต่อไปในบทที่ 3

บทที่ 3

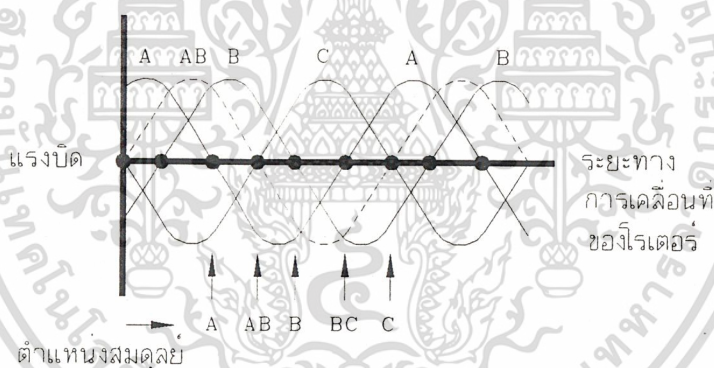
การควบคุมสเตปปีงมอเตอร์

3.1 คุณลักษณะของสเตปปีงมอเตอร์ (Specification of Stepping Motor Characteristics)

ในการใช้งานสเตปปีงมอเตอร์ไม่ว่าจะเป็นชนิดไหนก็ตาม ควรจะต้องมีการศึกษาคุณลักษณะต่าง ๆ เช่น แรงบิด การตอบสนองต่อความถี่สูงสุด และความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดกับค่าของกระแส เพื่อให้สามารถควบคุมการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งคุณลักษณะเหล่านี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองลักษณะดังนี้

3.1.1 คุณลักษณะทางสถิตย (Static Characteristics)

คุณลักษณะทางสถิตย หมายถึงคุณลักษณะในสภาวะที่มอเตอร์หยุดนิ่งไม่มีการเคลื่อนไหวน ซึ่งสามารถแสดงได้โดยกราฟของแรงบิดในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แสดงกราฟคุณลักษณะทางสถิตยของสเตปปีงมอเตอร์ขนาดสามเฟส

ตำแหน่งที่มีความสมดุลง่ายของการหมุนมากที่สุดก็คือ ตำแหน่งที่ซี่ฟันของโรเตอร์และซี่ฟันของสเตเตอร์มีความสัมพันธ์กันอยู่ในแนวเดียวกัน และยังคงอยู่ในตำแหน่งนี้จนกว่าจะมีการกระตุ้นอีกครั้ง โดยที่ตำแหน่งสมดุลง่ายของโรเตอร์จะมีค่าของแรงบิดเท่ากับศูนย์ ซึ่งถ้าโรเตอร์มีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง มอเตอร์ก็จะทำการสร้างสมดุลง่ายให้กับโหลดโดยการสร้างแรงบิดขึ้นมา ในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ ผลของแรงบิดกับการเคลื่อนที่ของโรเตอร์จะมีลักษณะคล้ายกับรูปคลื่นไซน์

แรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้น จะขึ้นอยู่กับกระแสที่จ่ายให้เฟสนั้น ๆ โดยที่แรงบิดนี้เรียกว่าสภาพคงแรงบิด (Holding Torque) หรือแรงบิดสถิตย (Static Torque) และลักษณะความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าขึ้นระหว่างค่าของแรงบิดกับกระแสที่เปลี่ยนแปลงไปจะเป็นลักษณะเชิงเส้น แต่ก็จะมีขีดจำกัดอยู่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่จุดอิมิตัวของทั้งโรเตอร์ และสเตเตอร์ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแม่เหล็ก โดยที่จุดอิมิตัวนี้จะไม่มีการเพิ่มขึ้นของแรงบิดแม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของกระแสฟลักก็ตาม

คุณลักษณะทางสถิตย์จะแสดงความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

(ก) คุณลักษณะของแรงบิดกับมุมสเตป (T/θ Characteristics)

ภาพที่ 3.2 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ แรงบิดสถิตย์สูงสุดที่เกิดขึ้นเรียกว่าสภาพคงแรงบิดที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง $\theta = \theta_m$ ตำแหน่งที่เกิดสภาพคงแรงบิดนี้จะมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งสมดุขยของโรเตอร์ ซึ่งสภาพคงแรงบิดก็คือลักษณะของแรงบิดขั้นมูลฐานทั้งหมดของมอเตอร์ แสดงถึงแรงบิดที่มีการสะสมอยู่ที่ตัวมอเตอร์ โดยจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของโรเตอร์ แรงบิดสถิตย์จะมีจุดเริ่มต้นที่สภาพคงแรงบิด



ภาพที่ 3.2 แสดงกราฟคุณลักษณะของแรงบิดต่อมุมสเตป (θ)

(ข) คุณลักษณะของแรงบิดกับกระแส (T/I Characteristics)

ภาพที่ 3.3 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สภาพคงแรงบิดกับกระแสที่จ่ายให้กับเฟสต่างๆ ของสเตปปีงมอเตอร์

หยุดได้โดยปราศจากการสูญเสียในสเตป สำหรับย่านความถี่ต่าง ๆ ที่ใช้นั้น จำนวนของพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบจะอยู่ในช่วง 100 เฮิร์ตซ์ (H_z) หรือใกล้เคียง

(ข) คุณลักษณะของแรงบิดดึงออก (Pull-out Torque) ใช้สำหรับพิจารณาคุณลักษณะในขณะที่มอเตอร์เคลื่อนที่หลังจากที่ได้ทำการทดสอบมอเตอร์ให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยใช้วงจรขับเคลื่อนลักษณะพิเศษ ในกรณีของการกระตุ้นในย่านของการเคลื่อนที่ด้วยตัวเอง (Self Starting Range) ความถี่ของพัลส์จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งมอเตอร์เกิดการเคลื่อนที่โดยปราศจากการเข้าจังหวะ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่เกิดจากแรงเสียดทานของโหลดกับความถี่พัลส์สูงสุดจะทำให้มอเตอร์สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างมีการเข้าจังหวะซึ่งจะเรียกว่า คุณลักษณะดึงออก ดังภาพที่ 3.4 โดยที่ขนาดของเส้นโค้งดึงออกจะขึ้นอยู่กับวงจรขับเคลื่อน การต่อเชื่อม (Coupling) เครื่องมือที่ใช้ในการวัด (Measuring Instruments) และเงื่อนไขอื่นๆ

(ค) ความถี่สูงสุดที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (Maximum Starting Frequency) เป็นการกำหนดการควบคุมความถี่สูงสุดให้มอเตอร์เคลื่อนที่ และหยุดได้ในขณะที่ไม่มีโหลด โดยปราศจากการสูญเสียทางสเตป

(ง) ระดับสูงสุดของอัตราการดึงออก (Maximum Pull-out Rate) เป็นการกำหนดค่าความถี่สูงสุดในขณะที่มอเตอร์สามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อไม่มีโหลด โดยปราศจากการสูญเสียทางสเตป

(จ) แรงบิดสูงสุดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ (Maximum Starting Torque) เรียกว่าแรงบิดดึงเข้าสูงสุด (Maximum Pull-in Torque) และเป็นการกำหนดค่าของแรงบิดที่เกิดจากแรงเสียดทานสูงสุดของโหลด ซึ่งทำให้มอเตอร์สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างเข้าจังหวะ กับพัลส์ที่มีความถี่ต่ำประมาณ 10 เฮิร์ตซ์

3.2 การควบคุมการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์

วงจรที่ใช้ควบคุมสเตปปีงมอเตอร์ส่วนใหญ่เป็นวงจรลอจิกและวงจรภาคกำลัง ซึ่งใช้สำหรับสเตปปีงมอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานแม่เหล็กได้ สเตปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรและสเตปปีงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์ ประสิทธิภาพของสเตปปีงมอเตอร์ขึ้นอยู่กับวงจรขับเคลื่อนที่ใช้เช่นแรงบิดทางพลวัต ความเร็วการตอบสนองต่อความถี่และการหน่วงเป็นต้น นอกจากนี้ พารามิเตอร์บางอย่างเช่นประสิทธิภาพ และการสูญเสียกำลัง (Power Dissipation) ก็ขึ้นอยู่กับวงจรขับเคลื่อนเช่นกัน

รูปแบบการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์ โดยทั่วไปเป็นการควบคุมภาควงจรกำลังและลำดับการจ่ายกำลังงานให้กับขดลวดในเฟสต่างๆ ของสเตปปีงมอเตอร์ วงจรกำลังจะทำงานในทิศทางเดียว หรือสองทิศทางขึ้นอยู่กับวงจรจัดลำดับลอจิก ซึ่งใช้เป็นสัญญาณขับเคลื่อน (Base) ของ

ทรานซิสเตอร์กำลัง ซึ่งจะเพิ่มขนาดสัญญาณเพื่อจ่ายกระแสให้ขดลวดมอเตอร์และต้องใช่วงจรการป้องกันชัตเตอร์กำลัง ซึ่งจะเพิ่มขนาดสัญญาณเพื่อจ่ายกระแสให้ขดลวดมอเตอร์และต้องใช่วงจรการป้องกันชัตเตอร์กำลัง ซึ่งจะเพิ่มขนาดสัญญาณเพื่อจ่ายกระแสให้ขดลวดมอเตอร์และต้องใช่วงจรการป้องกันชัตเตอร์กำลัง ซึ่งจะเพิ่มขนาดสัญญาณเพื่อจ่ายกระแสให้ขดลวดมอเตอร์และต้องใช่วงจรการป้องกันชัตเตอร์กำลัง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำกัดกระแส เมื่อใช้การกระตุ้นแบบใช้แรงดันเกิน(Over Exciting) เพื่อรักษาเสถียรภาพการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ และใช้วงจรจำกัดแรงดันเกิน (Suppression Circuit) เพื่อจำกัดแรงดันยอดแหลม (Spike Voltage) ให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยของการใช้งานทรานซิสเตอร์กำลัง

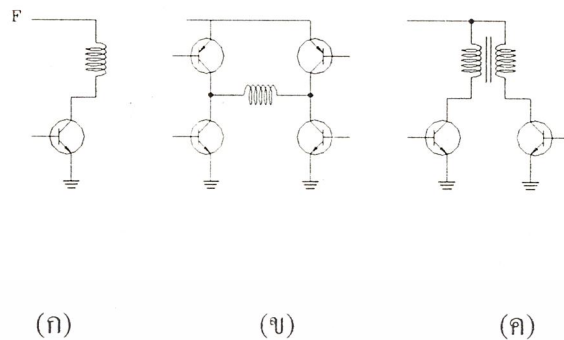
วงจรจัดลำดับลอจิก(Sequencer Logic Circuit) จะมีการทำงานเป็นลักษณะของวงจรรนับแบบวงแหวน (Ring Counter) ซึ่งมีขนาดเท่ากับจำนวนเฟสของสเตปปีงมอเตอร์ วงจรจัดลำดับลอจิกจะใช้กระตุ้นวงจรขับได้ครั้งละหนึ่งเฟสเรียงตามลำดับไป



ภาพที่ 3.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการขับสเตปปีงมอเตอร์

สัญญาณจากวงจรจัดลำดับลอจิกจะถูกขยายให้เพียงพอที่จะจ่ายให้กับสเตปปีงมอเตอร์ ดังนั้นจึงต้องป้อนสัญญาณนี้ให้กับวงจรถานซิสเตอร์กำลัง เพื่อเพิ่มค่ากระแสให้เพียงพอที่จะจ่ายให้ขดลวดของสเตปปีงมอเตอร์

สเตปปีงมอเตอร์ สามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างของการพันขดลวดได้เป็นสองชนิดคือแบบขดลวดขั้วเดียว (Single Winding) แบบสองภาวะขั้ว (Bipolar) สำหรับสเตปปีงมอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานแม่เหล็กได้ มีโครงสร้างของการพันขดลวดแบบขั้วเดียว ส่วนสเตปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรจะมีโครงสร้างของการพันขดเป็นแบบสองขั้ว คือแบบสองภาวะขั้ว และวงจรขับสำหรับขดลวดที่มี โครงสร้างแบบสองภาวะขั้วจะต้องใช้วงจรขับแบบขั้วเดียว (Unipolar)



ภาพที่ 3.6 แสดงวงจรพื้นฐานของวงจรขับแบบต่างๆ

(ก) การขับแบบขั้วเดียว

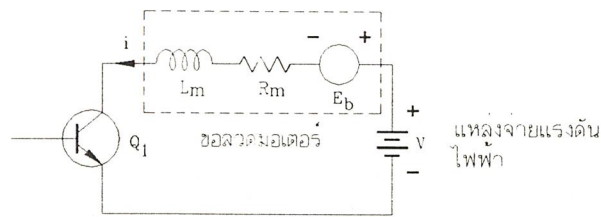
(ข) การขับแบบสองภาวะขั้ว

(ค) การขับแบบสองภาวะขั้ว

การขยายกำลังขับทำได้โดยใช้วงจรแบบคาร์ลิงตัน (Darlington) เมื่อสัญญาณจากวงจรจัดลำดับลอจิกเท่ากับหนึ่ง จะเป็นสัญญาณขับให้วงจรคาร์ลิงตันทำงาน กระแสจะไหลจากแหล่งจ่ายไฟผ่านสเตปป์มอเตอร์ลงสู่กราวด์ (Ground) และเมื่อสัญญาณจากวงจรจัดลำดับลอจิกเท่ากับศูนย์ ทรานซิสเตอร์กำลังจะหยุดทำงาน แม้ว่าวงจรคาร์ลิงตันจะมีแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์ที่สูงกว่าวงจรขยายที่ใช้ทรานซิสเตอร์ตัวเดียว แต่วงจรคาร์ลิงตันนี้ไม่ต้องการสัญญาณขับเบสเป็นแรงดันไฟฟ้าสูง ซึ่งใช้ลอจิกสูงของทีทีแอล (Transistor Transistor Logic :TTL) ก็เพียงพอที่จะขับเบสของวงจรคาร์ลิงตันให้นำกระแสได้ ดังนั้นจึงต่อไดโอด (Diode) D1 อนุกรมเข้ากับเบสของ Q1 เพื่อแยกแรงดันไฟฟ้าต่ำและแรงดันไฟฟ้าสูงออกจากกัน การแยกโคดเดี่ยว (Isolation) แบบนี้ จะช่วยป้องกันการเสียหายฉนวน (Breakdown) ของคอลเลคเตอร์ (Collector) และเบสของทรานซิสเตอร์กำลัง

3.3 หลักการออกแบบวงจรขับสเตปป์มอเตอร์

การพิจารณาถึงหลักการ การออกแบบวงจรขับกำลังให้กับขดลวดของสเตปป์มอเตอร์นั้น ต้องคำนึงถึงองค์ประกอบหลายอย่างด้วยกัน เนื่องจากการหยุดหมุนของสเตปป์มอเตอร์จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Back emf) ซึ่งจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า โดยสามารถเขียนวงจรสมมูลย์ (Equivalent circuit) ในหนึ่งเฟสของสเตปป์มอเตอร์ได้ดังในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 แสดงวงจรสมมูลย์ของสเตปป์มอเตอรื

โดยทั่วไปสเตปป์มอเตอรืได้ถูกออกแบบให้ทนความร้อนได้สูงถึง 100 องศาเซลเซียส แต่ในการใช้งานจริงจะถูกใช้งานที่เงื่อนไขต่ำกว่าจุดอิมิตัวที่กำหนดมา แต่ในการขับสเตปป์มอเตอรืนั้นต้องเลือกใช้อุปกรณ์ที่กินกระแสสูง เนื่องจากชุดขดลวดในแต่ละเฟสของสเตปป์มอเตอรืจะต้องมีการนำและหยุดนำกระแสอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบ เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับทรานซิสเตอร์กำลังจากแรงดันยอดแหลม (Spike Voltage) ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสในขดลวด (Inductive Turn Off Spike Voltage) และการเสียดภาพฉับพลันของแรงดัน

3.4 วงจรจำกัดแรงดันเกิน (Suppressors Circuit)

ปัญหาหลักสองประการของการควบคุมสเตปป์มอเตอรื คือการยกระดับของกระแส (Build up Current) และการลดระดับของกระแส (Decay) เมื่อมีการนำและหยุดนำกระแสของวงจรขับในแต่ละเฟส และเมื่อใช้งานสเตปป์มอเตอรืที่ความถี่สูงขึ้น เวลาในการนำกระแสของแต่ละเฟสจะไม่เพียงพอที่จะทำให้การยกระดับกระแสมาถึงระดับที่ต้องการได้ทัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเหนี่ยวนำของขดลวดในแต่ละเฟส และเมื่อหยุดป้อนกำลังงานให้กับเฟสที่ถูกกระตุ้น กระแสก็จะไม่ได้ลดลงโดยทันทีแต่จะมีการลดระดับของกระแสลงช้าๆ เป็นผลทำให้การตอบสนองของเฟสถัดมาช้าลงหรือตอบสนองไม่ทัน ซึ่งมีผลทำให้สเตปป์มอเตอรืสูญเสียเสถียรภาพและหยุดทำงานลงได้

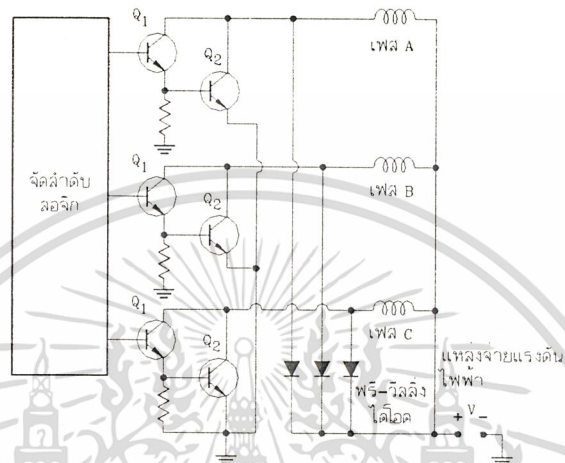
พิจารณาวงจรสมมูลย์ของการจ่ายกำลังงานให้กับชุดขดลวดในแต่ละเฟสของสเตปป์มอเตอรื โดยไม่สนใจแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์ Q1 กระแสคงตัวในขดลวดมีค่าเท่ากับ V/R_m เมื่อทรานซิสเตอร์ Q1 หยุดนำกระแสกำลังงานที่เหลืออยู่ในขดลวดจะพยายามไหลในทิศทางเดิม การหยุดนำกระแสของทรานซิสเตอร์ Q1 แรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์ Q1 จะมีค่าเท่ากับ $L_m di/dt$

จะเกิดแรงดันยอดแหลมซึ่งมีค่ามากกว่า V_{CE} จึงเป็นสาเหตุให้เกิดการเสียดภาพฉับพลันของทรานซิสเตอร์

เนื่องจากลักษณะการพันขดลวดของสเตปป์มอเตอรืเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดัน

ไม่ว่าการณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยอดแหลมได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องป้องกันแรงดันยอดแหลมให้อยู่ในระดับที่ทรานซิสเตอร์สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย ดังนั้นวงจรจับที่ใช้ควรจะมีวงจรจำกัดแรงดันเกิน สำหรับป้องกันการเกิดแรงดันยอดแหลมให้กับทรานซิสเตอร์กำลัง ดังแสดงในภาพที่ 3.8



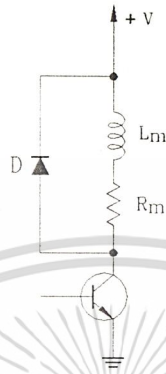
ภาพที่ 3.8 วงจรจำกัดแรงดันเกินโดยใช้ไดโอด

3.4.1 วงจรจำกัดแรงดันเกินโดยใช้ไดโอด (Diode Suppressor Circuit)

เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดของวงจรจำกัดแรงดัน ซึ่งต่อไดโอดในลักษณะไดโอดหมุนเปล่า (Free Wheeling Diode) คร่อมแต่ละเฟสของสเตปป์มอเตอร์ ระหว่างที่เฟสนำกระแสไดโอดจะถูกไบอัสกลับทาง ซึ่งเหมือนกับมีความต้านทานสูงขนานอยู่กับขดลวด เมื่อหยุดจ่ายกำลังงานให้กับขดลวด ขั้วทั้งสองของขดลวดจะกลับขั้ว ไดโอดจะกลับสภาพเป็นได้รับการไบอัสตรง (Forward Bias) และมีความต้านทานต่ำค่าแรงดันตกคร่อมที่ไดโอดได้รับจะเปลี่ยนจาก V_{CE} ไปเป็น $+V$ ดังนั้นทรานซิสเตอร์ $Q1$ ต้องมีอัตราของการทนต่อแรงดันมากกว่า $+V$

เมื่อหยุดทำการจ่ายกระแสให้กับเฟสนั้น กำลังงานที่เก็บอยู่ในขดลวดจะสูญเสียผ่านทางความต้านทาน (R) ของวงจรซึ่งรวมทั้งความต้านทานของขดลวด และความต้านทานเมื่อมีการไบอัสตรงของของไดโอดหมุนเปล่า ซึ่งค่าความต้านทานของไดโอดขณะไบอัสตรงมีค่าน้อยมากพอที่จะตัดทิ้งได้ ค่าเวลาคงตัว (Time Constant) ของการลดระดับของกระแส ในขณะที่ใช้ความเร็วต่ำมีค่ามากทำให้กระแสของแต่ละเฟส จะลดลงช้าเมื่อมีการหยุดนำกระแสของวงจรจับ ผลของการหยุดนำกระแสของขดลวดแต่ละเฟสของสเตปป์มอเตอร์นี้ทำให้เกิดแรงบิดหน่วง (Retarding Torque) ขึ้น

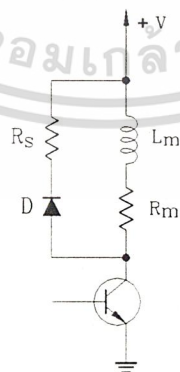
การเลือกอัตราการนำกระแสของไดโอดนั้น จะเลือกค่าที่ไดโอดหยุดนำกระแสธรรมดาประมาณครึ่งเท่าของกระแสสูงสุด ถ้าใช้อัตราเร็วของการเข้าสแตปต่ำ ค่ากระแสเฉลี่ยของไดโอดจะมีค่าน้อยมาก และไดโอดจะกำจัดออกโดยปราศจากการหน่วงของทรานซิสเตอร์กำลัง



ภาพที่ 3.9 แสดงวงจรป้องกันแรงดันเกินโดยใช้ไดโอด

3.4.2 วงจรจำกัดแรงดันเกินโดยใช้ไดโอด-ความต้านทาน (Diode-Resistor Suppressor Circuit)

เมื่อต้องการอัตราเร็วที่สูงขึ้น กำลังงานในขดลวดของเฟสที่หยุดนำกระแสจะต้องกระจายออกอย่างรวดเร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งทำได้โดยเพิ่มค่าความต้านทาน R_S อนุกรมเข้ากับไดโอด หมุนเปล่าเพื่อลดค่าเวลาคงตัวของวงจร และเวลาคงตัวที่เกิดขึ้นระหว่างที่กระแสลดลงตอนนี้กลายเป็น $L_m / (R_m + R_S)$ ค่าสูงสุดของความต้านทานที่ใช้จำกัดระดับของแรงดัน R_S ขึ้นอยู่กับแรงดันพังทลายของ V_{CE}



ภาพที่ 3.10 แสดงวงจรป้องกันแรงดันเกินที่ใช้ ไดโอด-ความต้านทาน

3.4.3 วงจรจำกัดแรงดันเกิดโดยใช้ซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode Suppressor Circuit)

การนำเอาซีเนอร์ไดโอดมาใช้ในวงจร จะทำให้กระแสลดลงได้อย่างรวดเร็วกว่าการจำกัดแรงดันแบบใช้ไดโอด-ความต้านทาน เนื่องจากว่าแรงดันของเฟสที่หุุดนำกระแสจะเพิ่มขึ้นสู่ระดับซึ่งทำให้ซีเนอร์ไดโอดถึงจุดเสียดสภาพกลับพลันของแรงดันและเริ่มนำกระแส กำลังงานจะถูกกระจายไปในรูปของความร้อน สำหรับการเปรียบเทียบการอัตราการลดลงของกระแสของวงจรจำกัดแรงดันเกินแต่ละแบบนี้ แสดงดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.11 แสดงวงจรป้องกันแรงดันเกินโดยใช้ซีเนอร์ไดโอด

ภาพที่ 3.12 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อเวลาของการใช้วงจรป้องกันต่างๆ

3.5 เทคนิคการเพิ่มระดับกระแสอย่างรวดเร็ว (Overdriving Method)

เมื่อต้องการเพิ่มอัตราเร็วของการเพิ่มกระแสในขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ แรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ ต้องมีค่ามากพอจนสามารถเอาชนะความเหนี่ยวนำของขดลวด และแรงดันย้อนกลับได้ ความเหนี่ยวนำจะเป็นข้อจำกัดของการใช้งานสเตปป์มอเตอร์ที่ความเร็วสูง เมื่อความเร็วในเอกสารนี้และหุุดนำกระแสของขดลวดในแต่ละเฟสเพิ่มขึ้นเวลา แต่เวลาในขณะนั้นไม่เพียงพอที่จะอาร์คไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยกระดัดบกระแสเพื่อให้เกิดแรงบุดได้ทัน ดังนั้นความเร็วของการทำงานของสเตรปมอดเตอร์จะถูกจำกัด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานให้กับตัวสเตรปมอดเตอร์ จำเป็นต้องมีการเพิ่มระดับของกระแสเพื่อลดเวลาในการยกระดัดบกระแส และเวลาในการลดระดับของกระแสในแต่ละเฟส วิธีการนี้ใช้สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านความเร็ว ให้กับสเตรปมอดเตอร์ ซึ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้

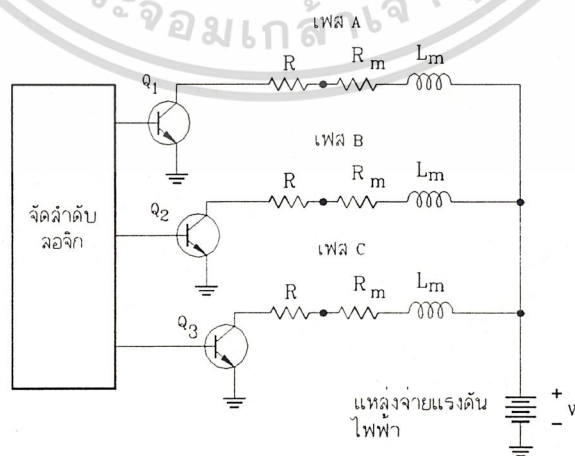
- 1) การใช้ความต้านทานต่ออนุกรมกับวงจรรขับ (Series-Resistance Driver)
- 2) การใช้วงจรรขับแบบใช้แรงดันสองระดับ (Bilevel Voltage Driver)
- 3) การใช้วงจรรขับแบบชอปเปอร์ (Chopped Voltage Driver)

การเพิ่มรูปแบบของวงจรรขับจำกัดระดับแรงดัน จะใช้สำหรับการปรับปรุงอัตราการเพิ่มและลดของกระแส โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดดังต่อไปนี้

การต่อความต้านทานอนุกรมกับวงจรรขับ เป็นรูปแบบธรรมดาและราคาถูกที่สุด ในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสเตรปมอดเตอร์ คือการต่อความต้านทานอนุกรมเข้ากับชุดขดลวดแต่ละเฟสของสเตรปมอดเตอร์ การเพิ่มความต้านทานภายนอกทำให้ค่าเวลาคงตัวของวงจรถดจาก L_m/R_m ไปเป็น $L_m/(R_m+R)$ ทำให้เวลาของการเพิ่มและลดระดับของกระแสลดลง

ข้อเสียของการต่อความต้านทานอนุกรมคือ การสูญเสียกำลังงาน ค่าความต้านทานภายนอกมีมากขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุให้ระบบไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ ลักษณะการต่อความต้านทานอนุกรมมีผลดังต่อไปนี้คือ

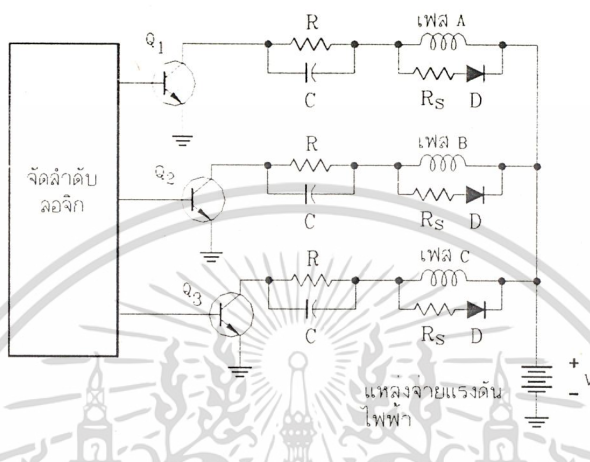
(ก) ค่าความต้านทานทั้งหมด จะถูกแทนที่ด้วยความต้านทานตัวเดียวระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตกับตัวสเตรปมอดเตอร์ ดังภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 แสดงการใช้ความต้านทานต่ออนุกรมกับขดลวดของสเตรปมอดเตอร์

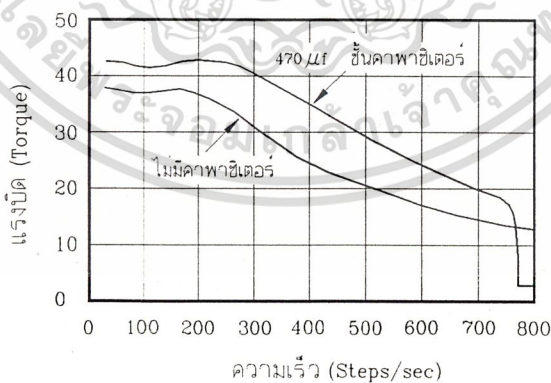
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตเห็นาไปไซบะระยชนด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) ความต้านทานอนุกรมจะขนานกับตัวเก็บประจุ ในการเพิ่มตัวเก็บประจุในแต่ละส่วนของโครงข่ายของวงจรจำกัดแรงดัน สามารถช่วยรักษาระดับของแรงดันให้คงที่ โดยเฉพาะเมื่อวงจรทำงานมาใกล้ขีดจำกัดสูงสุด ของแรงดันที่ทรานซิสเตอร์ทนได้



ภาพที่ 3.14 แสดงการเพิ่มตัวเก็บประจุในแต่ละส่วนของวงจรจำกัดแรงดัน

ในภาพที่ 3.15 แสดงวงจรขับกำลังซึ่งใช้ไดโอด-ความต้านทาน และมีการต่อตัวเก็บประจุขนานกับความต้านทาน ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของแรงบิดตั้งออก



ภาพที่ 3.15 แสดงผลการเพิ่มตัวเก็บประจุขนานกับความต้านทาน

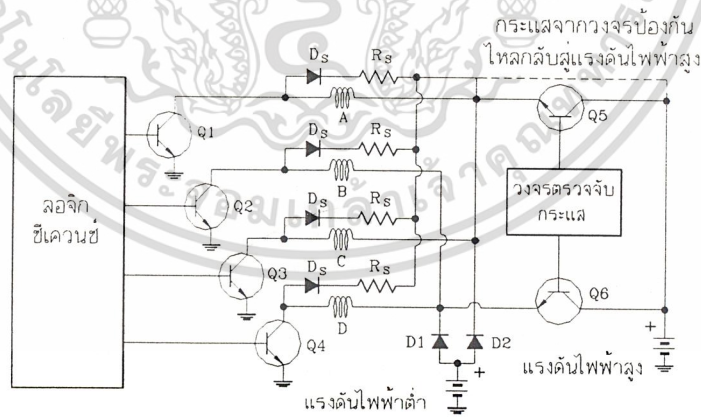
(ค) ประสิทธิภาพของระบบจะเพิ่มขึ้นถ้ามีการต่อความต้านทานร่วมกับโหลด (Common Load) ขนานกับทรานซิสเตอร์ระหว่างการใช้ความเร็วสูง วิธีการนี้จะช่วยให้การเปลี่ยนระดับของกระแสเร็วขึ้น แต่จะมีข้อเสียอยู่ที่มีการสูญเสียกำลังมาก

3.6 วงจรขับสำหรับสเตปปีงมอเตอร์

3.6.1 วงจรขับแบบใช้แรงดันไฟฟ้าสองระดับ

เป็นวิธีการขับที่มีประสิทธิภาพกว่ารูปแบบของการต่อความต้านทานอนุกรม ซึ่งใช้แรงดันไฟฟ้าระดับสูงสำหรับการยกกระดบกระแส และตัดต่อไปยังแรงดันไฟฟ้าระดับต่ำ เมื่อถึงอัตรากระแสที่ต้องการหรือถึงเวลาที่กำหนด กระแสที่อยู่ในขดลวดจะไหลผ่านไดโอด D1 โดยแรงดันไฟฟ้าระดับต่ำจะทำงานแทน วิธีการนี้เรียกว่าการขับแบบแรงดันไฟฟ้าคู่หรือการขับแบบสองระดับ

เมื่อพิจารณาการลดลงของเวลาในการเปลี่ยนระดับกระแส ของระบบการขับแบบสองระดับเปรียบเทียบกับแบบการต่อความต้านทานอนุกรม แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดจะยังคงอยู่ที่ทั้งหมดจนกระทั่งกระแสเพิ่มขึ้นจนถึงระดับกระแสที่ต้องการ แม้ว่าค่าเวลาคงตัวจะไม่ลดลงเหมือนในแบบการต่อความต้านทานอนุกรม ค่าการยกกระดบกระแสค่อนข้างจะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นหลังจากแรงดันไฟฟ้าระดับสูงจะตัดต่อไปสู่แรงดันไฟฟ้าระดับต่ำ กระแสจะตกลงและเกิดแรงดันย้อนกลับ



ภาพที่ 3.16 แสดงวงจรขับสเตปปีงมอเตอร์แบบแรงดันไฟฟ้าสองระดับ

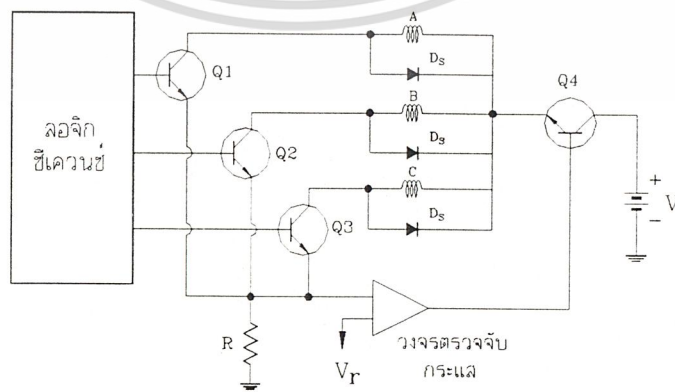
ขณะที่ทรานซิสเตอร์ Q5 และ Q6 ไม่ทำงาน ไดโอด D1 และ D2 ของแรงดันไฟฟ้าระดับต่ำนำกระแสอยู่ เมื่อแรงดันไฟฟ้าระดับสูงทำงาน ทรานซิสเตอร์ Q5 และ Q6 นำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้งานเอกสารนี้ กรุณาอย่าเผยแพร่เอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดโอด D1 ต้องหยุดนำกระแสทันที และแหล่งจ่ายไฟของแรงดันไฟฟ้าระดับต่ำจะกลายเป็นระบบภายนอก การทำงานจะเป็นลักษณะนี้สลับกันไปตลอดช่วงการทำงาน ไดโอดกระแสสูงโดยทั่วไปจะมีค่าเวลาในการคืนตัวช้า ดังนั้นในกรณีนี้จึงมีความจำเป็นต้องใช้ไดโอดชนิดคืนตัวเร็ว(Fast Recovery Diode) เพื่อให้เกิดกระแสยอดแหลม (Current Spike) ในขณะที่มีแหล่งจ่ายไฟอยู่ในระดับที่ปลอดภัย โดยที่แหล่งจ่ายไฟที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำ ควรออกแบบให้มีระดับกระแสที่เพียงพอในการต้านกระแสย้อนกลับ

3.6.2 วงจรขับแบบชอปเปอร์

เป็นวงจรขับอีกแบบหนึ่งที่ใช้กับมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง คือใช้การมอดูเลตความกว้างพัลส์ หรือการมอดูเลตความถี่ (Frequency Modulation) ควบคุมกระแสเฉลี่ยที่ให้กับสเตปป์มอเตอร์ วงจรขับแบบชอปเปอร์อย่างง่าย ๆ แสดงได้ดังภาพที่ 3.17 เมื่อเฟสใดเฟสหนึ่งของมอเตอร์ทำงาน ทราานซิสเตอร์ Q4 จะเปิดและปิดไปสู่อำนาจระดับสูงตลอดเวลา การใช้แหล่งจ่ายไฟที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าสูง เป็นสาเหตุให้กระแสในแต่ละเฟสเพิ่มระดับขึ้นอย่างทันทีทันใด เช่นเดียวกับในวงจรขับแบบแรงดันไฟฟ้าสองระดับ คือมีวงจรตรวจระดับกระแส เพื่อจะปรับตั้งค่าการหยุดทำงานของทรานซิสเตอร์ Q4 เมื่อกระแสมาถึงระดับที่ต้องการ และเมื่อกระแสตกลงต่ำกว่ากระแสขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold Current) ทรานซิสเตอร์ Q4 จะทำงานอีกครั้งหนึ่ง การทำงานของวงจรมีจะยอมให้กระแสเฉลี่ยคงอยู่ในระดับที่ต้องการ ในกรณีนี้ความถี่ของการตัดช่วงจะอยู่ระหว่างหนึ่งถึงสามสิบกิโลเฮิรตซ์ ขึ้นอยู่กับค่าเวลาคงตัวของการพันขดลวดของมอเตอร์และฮิสเตอร์ซิส(Hysteresis) ของวงจรตรวจระดับกระแส ความถี่ของการตัดช่วงมักจะปรับตั้งอยู่สูงกว่าช่วงที่กำหนดเพื่อหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำซึ่งเกิดจากการสั่นของมอเตอร์



ภาพที่ 3.17 แสดงวงจรขับแบบชอปเปอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยาดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

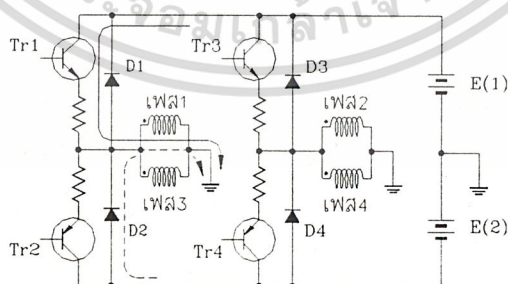
3.6.3 วงจรขับแบบบริดจ์ (Bridge Current Driver)

ประสิทธิภาพในการใช้งานของสเตปปีงมอเตอร์จะสูงขึ้น ถ้าควบคุมการไหลของกระแสให้ไหลได้สองทิศทาง ซึ่งช่วยให้แรงบิดเพิ่มขึ้นอีก 20-35% ของการใช้วงจรขับแบบมีกระแสไหลทางเดียว วงจรขับแบบบริดจ์มีสองชนิดคือ แบบมีแหล่งจ่ายไฟเดียว และแบบมีแหล่งจ่ายไฟสองแหล่ง ซึ่งจะมีคุณลักษณะในการทำงานดังต่อไปนี้

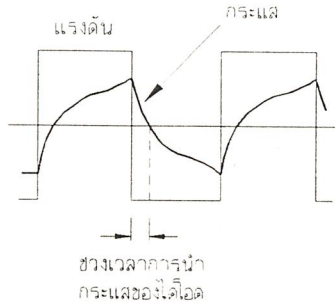
(ก) การต่อขดลวดของมอเตอร์ ถ้ามอเตอร์มี 8 ขั้ว กระแสสลับจะสามารถไหลผ่านได้เหมือนกับมอเตอร์สองเฟส

(ข) การป้องกันอันตรายอันอาจเกิดจากทรานซิสเตอร์ “ทำงาน” ในขณะที่ทรานซิสเตอร์อีกตัวหนึ่งยังนำกระแสอยู่ ทำได้โดยการใส่วงจรหน่วงเวลา คือค่าความต้านทานเข้าไประหว่างทรานซิสเตอร์ทั้งสอง

(ค) การใช้ไดโอดเพื่อป้องกันแรงดันย้อนกลับ โดยไดโอดจะถูกใส่ขนานเข้าไปกับทรานซิสเตอร์กำลัง เพื่อจำกัดแรงดันย้อนกลับ เมื่อทรานซิสเตอร์ “หยุดทำงาน” การทำงานของไดโอดจะแตกต่างจากแบบสภาพขั้วเดียวถ้า Tr1 นำกระแสซึ่งแสดงโดยเส้นทึบ เมื่อ Tr1 “หยุดทำงาน” และ Tr2 “ทำงาน” กระแสไม่ได้ไหลกลับทิศทาง แต่จะไหลวนผ่านไดโอด D2 และแหล่งจ่ายไฟ E(2) ซึ่งแสดงโดยเส้นปะ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าแหล่งจ่ายไฟ E(2) ขณะนี้จะถูกเก็บประจุ หรือถ้าพิจารณาในเทอมของกำลังงาน กำลังงานจากสนามแม่เหล็กจะถูกป้อนกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟ ในขณะที่การขับสเตปปีงมอเตอร์แบบสภาพขั้วเดียว กำลังงานจากสนามแม่เหล็กจะถูกใช้ไปในขดลวด ความต้านทานภายนอกและซีเนอร์ไดโอด ซึ่งทำให้การขับแบบสองภาวะขั้วมีข้อดีกว่า

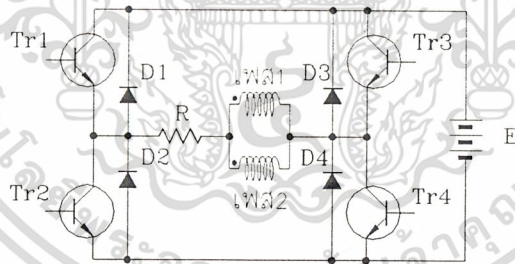


ภาพที่ 3.18 แสดงวงจรขับแบบบริดจ์ สำหรับการขับแบบสองภาวะขั้ว



ภาพที่ 3.19 แสดงรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสของการขับสเตรปิ้งมอเตอร์แบบสองภาวะชั่ว

กระแสในทิศทางกลับสำหรับการขับแบบสภาพชั่วเดียว ต้องใช้วงจรจำกัดแรงดันเกินเพื่อหน่วงกระแสหลังจาก “หยุดทำงาน” ของทรานซิสเตอร์ แต่สำหรับการขับแบบสองภาวะชั่วจะให้แรงดันไฟฟ้าเพื่อให้กระแสไหลกลับทิศทาง หลังจากกระแสที่เหลืออยู่หลังจากทรานซิสเตอร์หยุดทำงานกลายเป็นศูนย์ และจะมีกระแสชุดใหม่เพิ่มขึ้นผ่านทรานซิสเตอร์ Tr2 ในทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้น รูปคลื่นของกระแสจะไม่เป็นตัวชี้กำลัง แต่ขึ้นอยู่กับแรงดันย้อนกลับที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของโรเตอร์



ภาพที่ 3.20 แสดงวงจรขับแบบบริดจ์อีกแบบหนึ่งซึ่งใช้แหล่งจ่ายไฟเดียว

รูปแบบอีกอย่างหนึ่งของการขับแบบสองภาวะชั่ว แสดงได้ในภาพที่ 3.20 ในกรณีนี้จะใช้แหล่งจ่ายไฟเดียวแต่ใช้ทรานซิสเตอร์สี่ตัวสำหรับแต่ละเฟส ความต้านทานจะถูกต่อขนานกับขดลวดเพื่อการเพิ่มระดับกระแสที่เร็วขึ้น วงจรหน่วงเวลาจะใช้เพื่อป้องกันทรานซิสเตอร์นำกระแสเหลื่อมกัน (Overlap)

ในบทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงการควบคุมสเตรปิ้งมอเตอร์ เพื่อใช้สำหรับเปรียบเทียบกับระบบของการควบคุมสเตรปิ้งมอเตอร์ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้เทคนิคใหม่ ซึ่งจะได้นำเสนอต่อไปใน

บทที่ 4
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

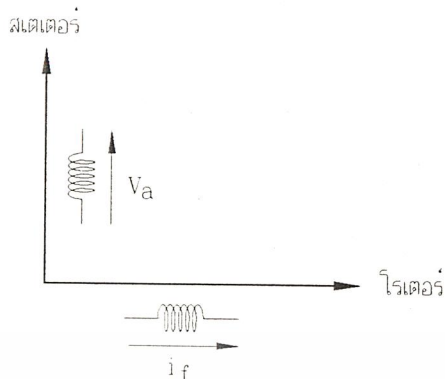
บทที่ 4

การพัฒนาระบบขับเคลื่อนของสเตปป์มอเตอร์

ในบทนี้ จะกล่าวถึงการพัฒนาของระบบขับเคลื่อนสำหรับสเตปป์มอเตอร์ เพื่อให้สเตปป์มอเตอร์มีประสิทธิภาพในการทำงานดีขึ้น ในการควบคุมความเร็วรอบให้มีความเร็วได้ตามที่ต้องการ และควบคุมให้สเตปป์มอเตอร์มีแรงบิดที่คงที่ในทุกสภาวะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะที่มีการขับเคลื่อนด้วยความเร็วรอบต่ำ

4.1 ระบบขับเคลื่อนสเตปป์มอเตอร์ที่พัฒนา

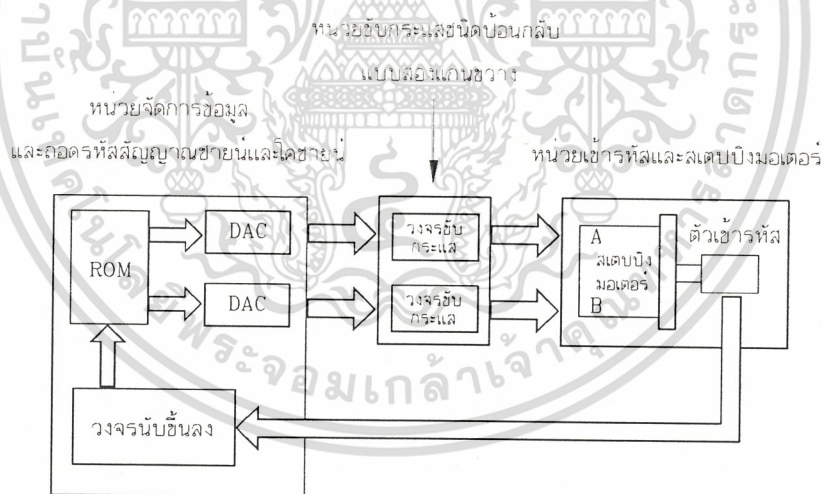
ระบบขับเคลื่อนของสเตปป์มอเตอร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ จะใช้ตัวเข้ารหัสสองชุดในการอ่านข้อมูลซึ่งเป็นตำแหน่งของเพลามอเตอร์ แล้วส่งข้อมูลนี้ไปยังหน่วยจัดการข้อมูล และถอดรหัสสัญญาณไซน์ (Sine) และโคไซน์ (Cosine) เพื่อตรวจสอบทิศทางการหมุนของเพลามอเตอร์ จัดลำดับและถอดรหัสข้อมูล จากนั้นสร้างแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์และโคไซน์เพื่อป้อนให้หน่วยขับกระแสชนิดป้อนกลับแบบสองแกนขวางจำนวนสองชุด (2 Quadratures) เพื่อเปิดปิด (Switching) กระแสที่ป้อนให้กับขดลวดของมอเตอร์ ซึ่งจะทำได้ตามความต้องการ การให้พลังงานกับมอเตอร์ในลักษณะนี้จะเป็นการแก้ปัญหาในเรื่องของแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากการหมุนที่เพลามอเตอร์ เป็นผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์มีค่าคงที่ตลอดย่านความเร็วตอบสนองของมอเตอร์ แต่จะมีข้อเสียคือ กำลังงานสูญเสียของขดลวดที่อยู่ในรูปของพลังงานความร้อน จะมีค่าสูงมากขึ้น โดยจะสัมพันธ์กับความถี่ตอบสนองเช่นกันถึงแม้จะไม่มีระบบขับเคลื่อนที่เพลามอเตอร์ให้เคลื่อนที่ก็ตาม การสูญเสียกำลังงานนี้ เป็นผลมาจากการที่กระแสที่ไหลเข้าสู่ขดลวดของสเตเตอร์ถูกควบคุมให้มีขนาดสอดคล้องกับตำแหน่งของโรเตอร์และสเตเตอร์ในรูปคลื่นไซน์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการจัดลำดับของการกระตุ้น ให้มีความสัมพันธ์กับการหมุนของโรเตอร์เทียบกับสเตเตอร์ที่มุมเวกเตอร์ของเส้นแรงแม่เหล็กทำมุม 90 องศาทางไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของโรเตอร์และสเตรเตอร์ในขณะที่มีการกระตุ้นให้มอเตอร์ทำงาน

4.2 หลักการทำงานของระบบขับเคลื่อนที่พัฒนา

การทำงานโดยทั่วไปของระบบที่พัฒนาขึ้น สามารถแสดงได้ดังบล็อกไดอะแกรมต่อไปนี้



ภาพที่ 4.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบขับเคลื่อนที่พัฒนาขึ้น

ระบบขับเคลื่อนที่พัฒนาขึ้น จะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญต่าง ๆ ดังนี้

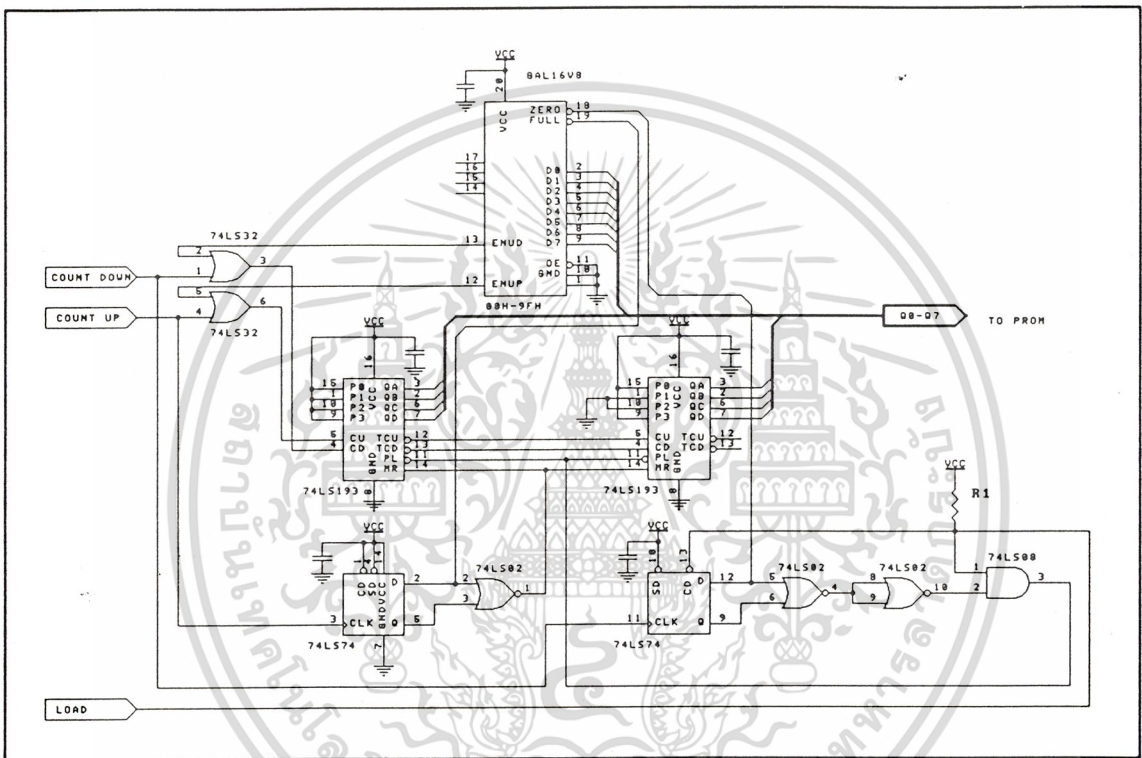
- 1) หน่วยจัดการข้อมูล และถอดรหัสสัญญาณขาเข้าและโคชายน
- 2) หน่วยขับเคลื่อนแบบสองแกนขวาง
- 3) หน่วยเข้ารหัสและสเตรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 หน่วยจัดการข้อมูล และถอครหัสสัญญาณชายนและโคชายน

หน่วยจัดการข้อมูล และถอครหัสสัญญาณชายนและโคชายน จะประกอบด้วย

- 1) วงจรนับขึ้นลง (Up-Down Counter) และจัดลำดับลอจิก (Logic) ของสัญญาณ
- 2) วงจรถอครหัสสัญญาณชายนและโคชายน
- 3) วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (Digital to Analog Converter : DAC)

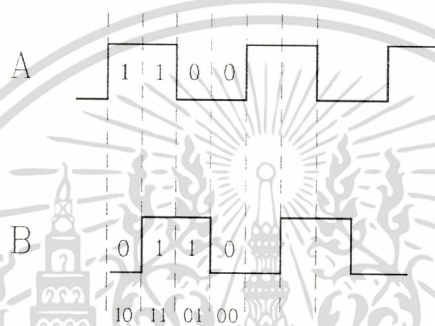


ภาพที่ 4.3 แสดงวงจรถอครหัสสัญญาณและจัดลำดับลอจิกของสัญญาณที่ได้ ออกแบบขึ้น

ในภาพที่ 4.3 เป็นวงจรถอครหัสสัญญาณและจัดลำดับลอจิกของสัญญาณ โดยจะทำหน้าที่รับข้อมูลจาก Count up และ Count down ที่ต่ออยู่กับหน่วยเข้ารหัส ซึ่งหน่วยเข้ารหัสนี้ประกอบไปด้วยตัวเข้ารหัสสองชุดคือชุด A และชุด B ข้อมูลนี้จะอยู่ในลักษณะของภาพคลื่นพัลส์ซึ่งทำมุมต่างเฟสกัน 90 องศา ดังแสดงในภาพที่ 4.4 จำนวนข้อมูลของสภาวะลอจิกต่อการหมุนไปหนึ่งสเตปของสเตปปีงมอเตอร์ที่ได้รับมาจากตัวเข้ารหัสจะมีค่าเท่าใดนั้น ขึ้นอยู่กับความละเอียดของตัวเข้ารหัสและจำนวนสเตปต่อรอบของสเตปปีงมอเตอร์ ข้อมูลสภาวะลอจิกเหล่านี้จะถูกนับเพื่อตรวจสอบว่าเฟลมอเตอร์ในเวลานั้นหมุนตามเข็มนาฬิกาหรือหมุนทวนเข็มนาฬิกา ในการกำหนดให้เฟลของสเตปปีงมอเตอร์หมุนไปในทิศทางใดนั้น ขึ้นอยู่กับการกำหนดลำดับการกระตุ้นที่เฟส (Phase Sequence) ให้กับมอเตอร์ โดยลำดับในการกระตุ้นที่เฟสของสเตปปีงมอเตอร์จะได้มาจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ด้วย การคัดลอกหรือการนำข้อมูลไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมายและไม่รับผิดชอบต่อความเสียหายใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรถอดรหัส สัญญาณขาขึ้นและโคขาขึ้นซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป ในการจัดลำดับการกระตุ้นเฟสของสเตปป์มอเตอร์ให้มีความสัมพันธ์กับการหมุนของโรเตอร์เทียบกับสเตเตอร์ ที่มุมเวกเตอร์ของเส้นแรงแม่เหล็กทำมุม 90 องศาทางไฟฟ้านั้น จะทำให้การเคลื่อนที่ของโรเตอร์จากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่งมีความราบเรียบขึ้น มีผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ดีขึ้นตามไปด้วย โดยในที่นี้กำหนดให้การนับขึ้นหมายถึงการหมุนตามเข็มนาฬิกา และการนับลงหมายถึงการหมุนทวนเข็มนาฬิกา จากนั้นจะนำข้อมูลนี้ไปจัดเรียงลำดับ เพื่อส่งต่อไปยังวงจรถอดรหัสสัญญาณขาขึ้นและโคขาขึ้น



ภาพที่ 4.4 แสดงการเทียบเฟสของสัญญาณพัลส์จากตัวเข้ารหัสชุด A และ B

จากภาพที่ 4.4 ในหนึ่งลูกคลื่นสัญญาณ ข้อมูลที่อ่านเข้ามาจะถูกวิเคราะห์โดยหน่วยความจำแบบอ่านค่าได้อย่างเดียว (GAL16V8) ที่ถูกโปรแกรมให้ทำการจัดเรียงลำดับลอจิกของสัญญาณเพื่อทำการวิเคราะห์หาทิศทางของการหมุนของเฟลมอเตอร์ ในที่นี้จำนวนลำดับของสัญญาณจะมีทั้งหมดสี่สถานะ คือ 10, 11, 01, 00 วนเช่นนี้ไปเรื่อยๆ

ตัวเข้ารหัสที่ใช้มีความละเอียด 2,000 พัลส์ต่อรอบ (Pulse/Revolution) และมีจำนวนสองชุด คือชุด A และชุด B จำนวนลำดับของสัญญาณทั้งหมดจะสามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{จำนวนลำดับของสัญญาณ} &= \text{ความละเอียดของตัวเข้ารหัส} \times \text{ระดับของสถานะลอจิกของ} \\
 &\hspace{15em} \text{ตัวเข้ารหัส ชุด A และชุด B} \\
 &= 2,000 \times 4 \\
 &= 8,000 \text{ ลอจิกต่อรอบ}
 \end{aligned}$$

ในส่วนของสเตปป์มอเตอร์นั้น จะมีรายละเอียดของพิกัด (Specifications) ดังนี้

- ความละเอียด = 1.8 องศาต่อสเตป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนค่าความต้านทานซึ่ง = 0.8 โอห์ม เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

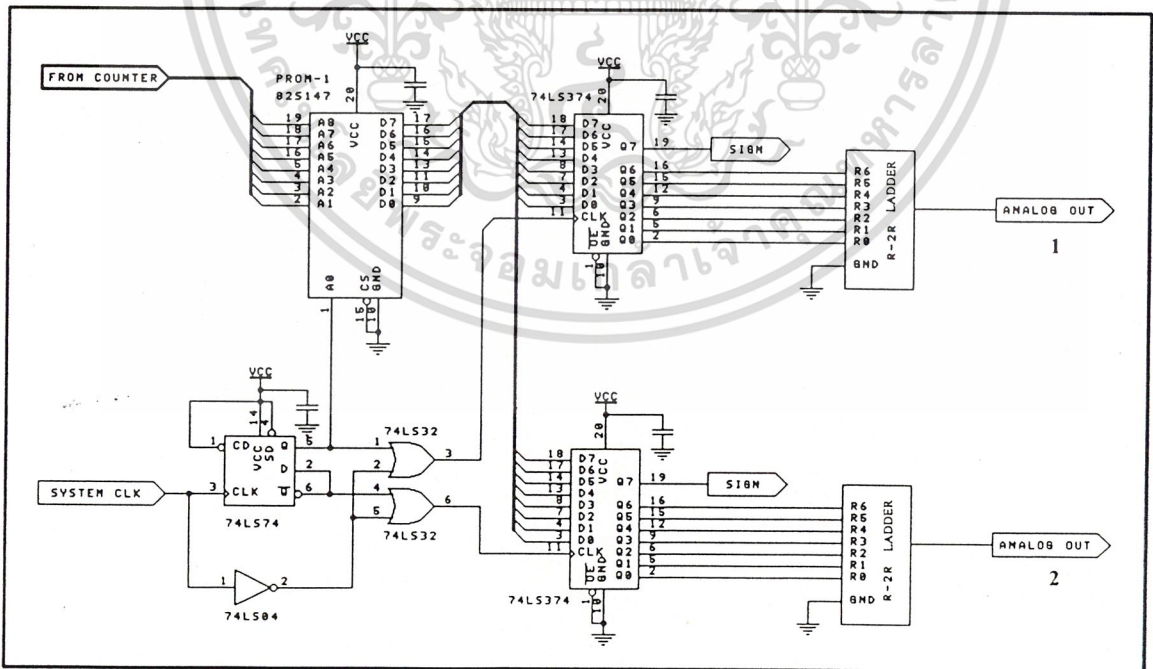
- ค่าของกระแส = 0.3 แอมแปร์ต่อเฟส
- ค่าของแรงดันไฟฟ้า = 24 โวลต์ต่อเฟส

จากค่าความละเอียดของสเตปป์มอเตอร์ 1.8 องศาต่อสเตปป์ ดังนั้น จำนวนสเตปป์ที่มอเตอร์หมุนไป 1 รอบจะมีจำนวนเท่ากับ 200 สเตปป์ ($360/1.8 = 200$)

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น จำนวนข้อมูลในหนึ่งสเตปป์ คือ

$$\begin{aligned} \text{จำนวนข้อมูลของวงจรมับในหนึ่งสเตปป์} &= \frac{\text{จำนวนลำดับของสัญญาณ}}{\text{จำนวนสเตปป์ ต่อรอบ}} \\ &= \frac{8,000}{200} \\ &= 40 \text{ ลอจิกต่อสเตปป์} \end{aligned}$$

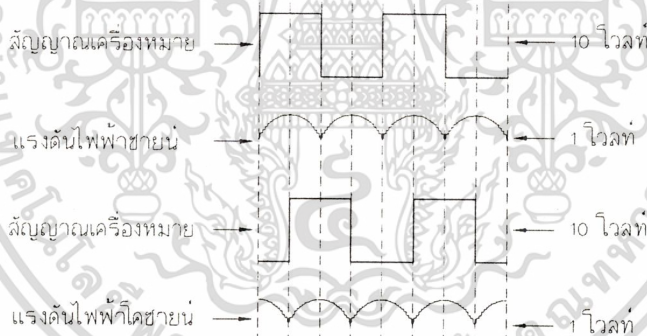
ดังนั้น วงจรมับขึ้นลงจะถูกออกแบบให้รับตั้งแต่ 00H ถึง 9FH ซึ่งค่าที่นับได้จะถูกส่งไปยังวงจรถอดรหัสสัญญาณชานน์และโคชชานน์ ในภาพที่ 4.5 ต่อไป



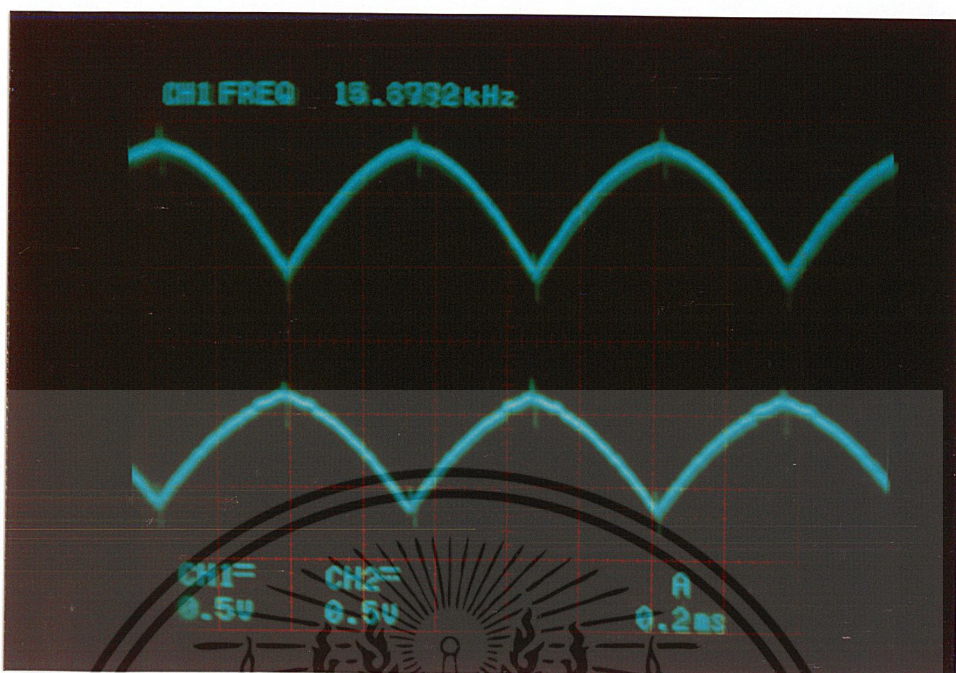
ภาพที่ 4.5 แสดงวงจรถอดรหัสสัญญาณชานน์และโคชชานน์ และวงจรมแปลงสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เป็นอนาล็อกที่ได้ออกแบบขึ้นมานั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

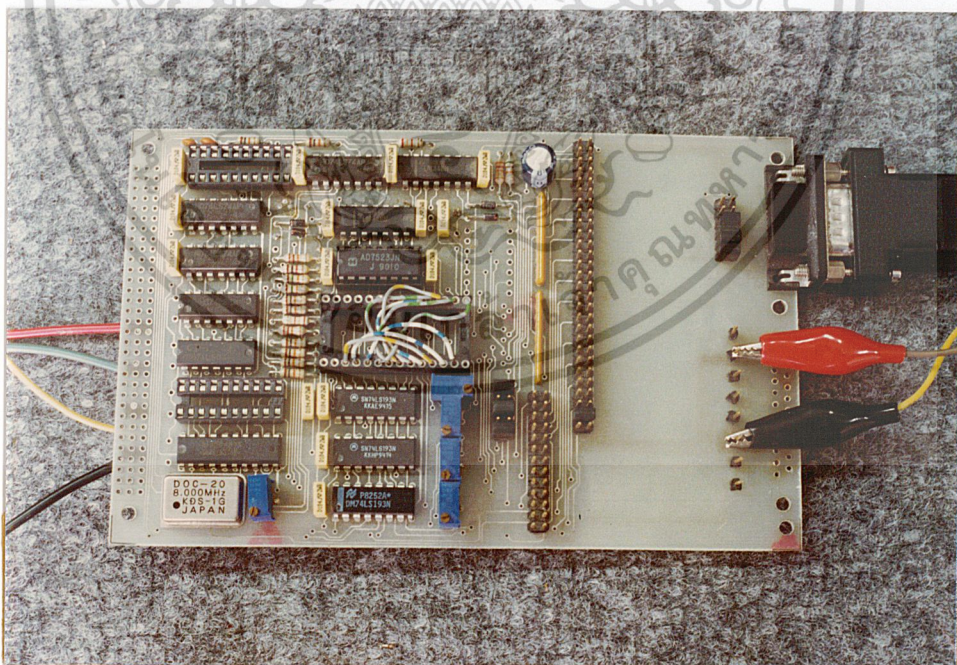
ในภาพที่ 4.5 เป็นส่วนของวงจรถอดรหัสสัญญาณขาขึ้นและโคชาชน ซึ่งจะรับค่าข้อมูลจำนวน 40 ลอจิกต่อสเตปเข้ามายังหน่วยความจำแบบอ่านได้อย่างเดียว(PROM-1 825147) และหน่วยความจำตัวนี้จะนำค่าของข้อมูลในขณะนั้นมาถอดรหัส เป็นข้อมูลที่มีความละเอียดขนาดแปดบิต (8 bits) ตามโปรแกรมประมวลผลซึ่งป้อนเก็บอยู่ภายในหน่วยความจำ ข้อมูลที่ถูกถอดรหัสออกมาจะอยู่ในลักษณะของแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นขาขึ้น ที่เป็นค่าของมุม 0-360 องศา โดยมีค่าสำหรับปริมาณเชิงเลขสูงสุดเท่ากับ 510 หรือ 2^8 พร้อมกันนี้วงจรถอดรหัสสัญญาณขาขึ้นและโคชาชน ก็จะสร้างสัญญาณเครื่องหมาย (Sign) ออกมาพร้อมกับการถอดรหัสด้วย จากนั้นจะส่งข้อมูลแปดบิตนี้ไปยังวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกโดยผ่านวงจรบันได (R-2R Ladder) เพื่อแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นขาขึ้นและโคชาชน ที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ของข้อมูลดังแสดงในภาพที่ 4.6 และสัญญาณที่วัดได้จริงจากออสซิลโลสโคปแสดงในภาพที่ 4.7 สัญญาณเครื่องหมายนี้จะทำหน้าที่ควบคุมการเปิดปิดให้ทรานซิสเตอร์ (Transistor) ในหน่วยขับกระแสชนิดป้อนกลับแบบสองแกนขวงทำงาน



ภาพที่ 4.6 แสดงลักษณะของแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นขาขึ้นและโคชาชน และสัญญาณเครื่องหมาย



ภาพที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์และโคไซน์ที่วัดจาก ANALOG OUT 1 และ 2 ในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.8 แสดงแผงวงจรในส่วนของวงจรนับขึ้นลง และจัดลำดับลอจิกของสัญญาณ รวมทั้งวงจรถอดรหัสสัญญาณไซน์และโคไซน์ และวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็น

อนาล็อก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

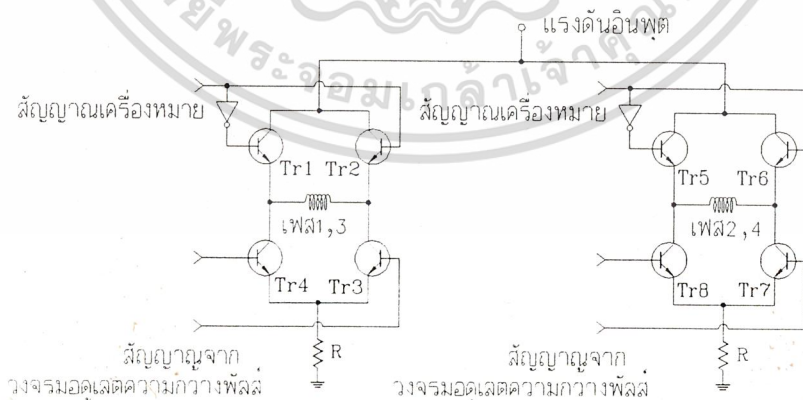
4.2.2 หน่วยขับเคลื่อนชนิดป้อนกลับแบบสองแกนขวาง

หน่วยขับเคลื่อนชนิดป้อนกลับแบบสองแกนขวาง ประกอบไปด้วย

- 1) วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation : PWM)
- 2) วงจรขับเคลื่อนชนิดป้อนกลับแบบสองแกนขวาง

วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์ จะทำหน้าที่รับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นซายน์และโคซายน์ที่ได้มาจาก ANALOG OUT 1 และ 2 ของวงจรถอดรหัสสัญญาณซายน์และโคซายน์ในภาพที่ 4.5 เพื่อทำการเปิดปิดการทำงานของทรานซิสเตอร์ในวงจรขับ โดยทำงานร่วมกับสัญญาณเครื่องหมาย สัญญาณเอาต์พุตของวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์จะมีการเปลี่ยนแปลงรอบการทำงาน (Duty Cycle) ขึ้นอยู่กับค่าของแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นซายน์และโคซายน์กับตัวตรวจวัดกระแส (Sensor) ที่ต่ออยู่ในวงจรขับเคลื่อนชนิดป้อนกลับแบบสองแกนขวาง

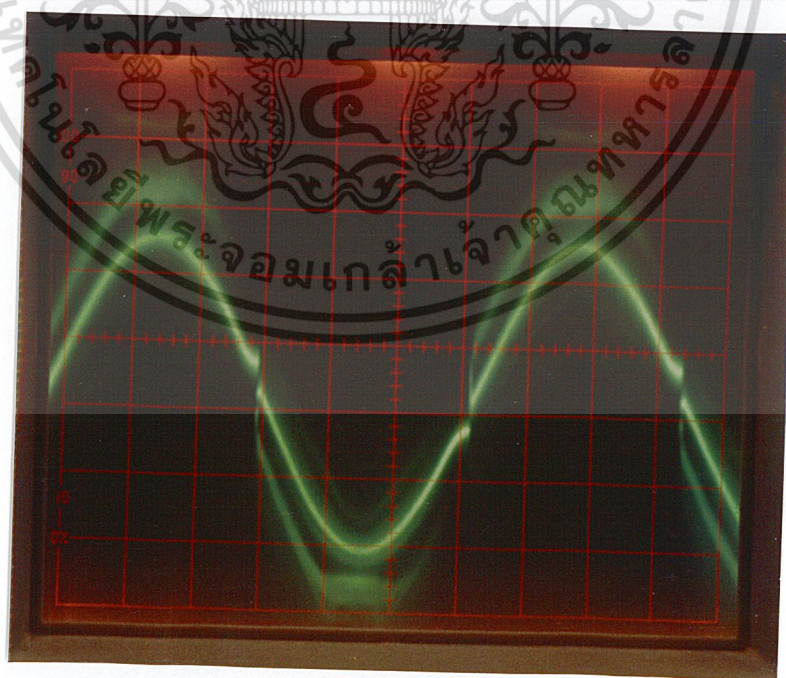
วงจรขับเคลื่อนชนิดป้อนกลับแบบสองแกนขวางมีจำนวนสองชุด แต่ละชุดต่ออยู่กับเฟสสองเฟสของสเตปปีงมอเตอร์ที่ต่อขนานกันอยู่ โดยทรานซิสเตอร์ในวงจรขับจะทำหน้าที่เปิดปิดเพื่อส่งผ่านกระแสรูปคลื่นซายน์และโคซายน์ให้กับขดลวดของสเตปปีงมอเตอร์ทั้งสองชุด ดังนั้นขดลวดทั้งสองชุดจะถูกควบคุมให้กระแสไหลในขดลวดเป็นไปตามทิศทางที่กำหนด โดยข้อมูลที่มาจกหน่วยจัดการข้อมูลที่ส่งผ่านวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์เข้ามา เอาต์พุตของวงจรขับแบบสองแกนขวางแต่ละชุดจะมีลักษณะเป็นแบบเต็มลูกคลื่น คือสามารถทำงานได้ทั้งสองทิศทาง ทั้งนี้เพื่อให้มีการถ่ายเทกำลังงานเข้าและออกจากตัวเหนี่ยวนำได้สองทิศทาง ซึ่งจะสามารสร่างและควบคุมการไหลของกระแสซายน์ที่ไหลในขดลวดของสเตปปีงมอเตอร์ให้เป็นไปได้ทั้งซีกบวกและซีกลบ



ภาพที่ 4.9 แสดงวงจรขับเคลื่อนแบบสองแกนขวาง

ภาพที่ 4.9 เป็นลักษณะของการเปิดปิดของวงจรขับซึ่งมีสองขั้นตอนด้วยกันคือ ขั้นตอนแรกเมื่อมีสัญญาณเครื่องหมายที่มีลักษณะเป็นซีกบวกพร้อมกับแรงดันไฟฟ้าซายน์ ที่ได้จากวงจรไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอดูเลตความกว้างพัลส์เข้ามา สัญญาณเครื่องหมายจะไปไปอัสให้ Tr2 และ Tr4 นำกระแส ทำให้เกิดกระแสไหลจาก Tr2 ไปยัง Tr4 โดยผ่าน เฟสที่1 และเฟสที่3 ของสเตปป์มอเตอร์ โดยที่ Tr2 จะเป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลของกระแสในซีกบวกขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับสัญญาณเครื่องหมายที่เข้ามา ส่วน Tr4 จะทำหน้าที่ในการเปิดปิดแรงดันไฟฟ้าชายน์ ที่ได้มาจากวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์ให้เกิดเป็นกระแสรูปคลื่นชายน์ในซีกบวก ส่วนในขั้นตอนที่สองคือ ขณะที่สัญญาณเครื่องหมายในซีกลบเข้ามา Tr1 และ Tr3 ก็จะนำกระแส ส่วน Tr2 กับ Tr4 จะหยุดนำกระแส ดังนั้นกระแสจะไหลย้อนกลับทิศทาง คือไหลจาก Tr1 ไปยัง Tr3 โดยผ่าน เฟสที่1 และเฟสที่3 ของสเตปป์มอเตอร์ ทำให้เกิดซีกของสัญญาณที่ตรงกันข้ามกับการนำกระแสของ Tr2 และ Tr4 ซึ่งจะมีความสอดคล้องกับสัญญาณเครื่องหมายที่เข้ามาเช่นกัน โดยที่ Tr3 จะทำหน้าที่เปิดปิดแรงดันไฟฟ้าชายน์ที่ได้มาจากวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์ให้เกิดเป็นกระแสรูปคลื่นชายน์ในซีกลบ สรุปแล้วการกลับทิศทางการไหลของกระแสจะถูกควบคุมด้วยสัญญาณเครื่องหมาย โดยการสลับการทำงานกันเป็นคู่ๆ ระหว่าง Tr1 กับ Tr3 และ Tr2 กับ Tr4 ซึ่งจะมีผลทำให้กระแสที่ไหลในขดลวดมีลักษณะเป็นรูปคลื่นชายน์ดังแสดงในภาพที่ 4.10



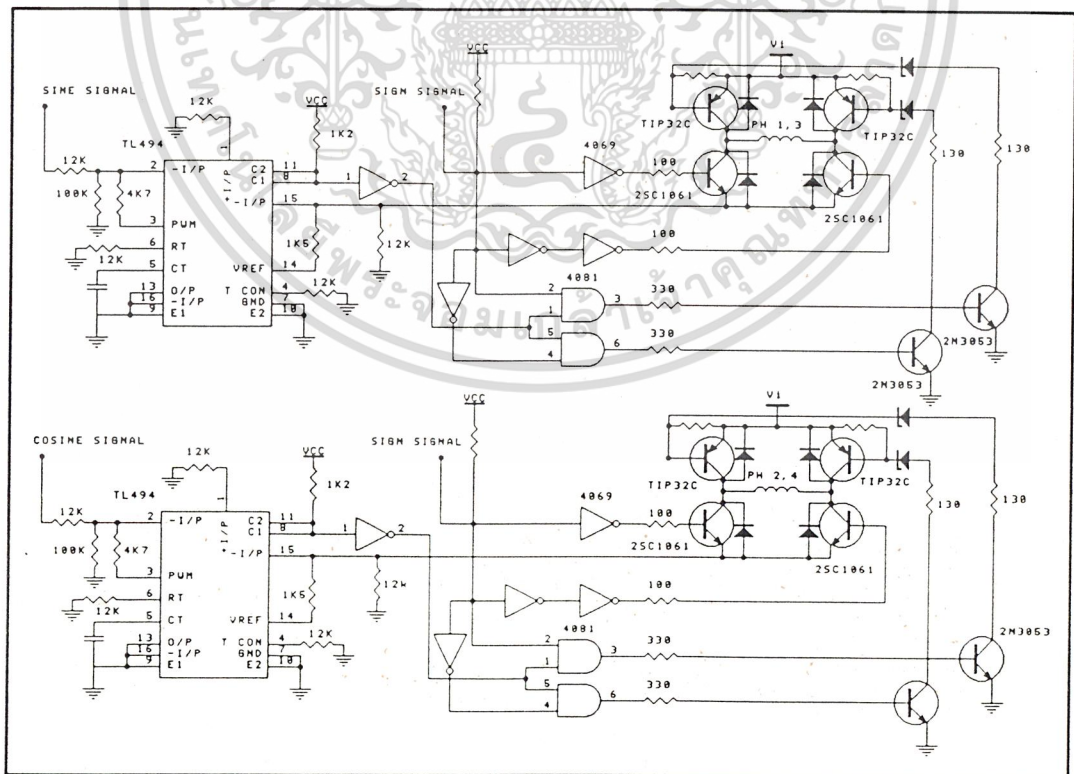
ภาพที่ 4.10 แสดงลักษณะของกระแสที่ไหลในขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ที่ใช้กับระบบ

ขับเคลื่อนที่พัฒนาขึ้น

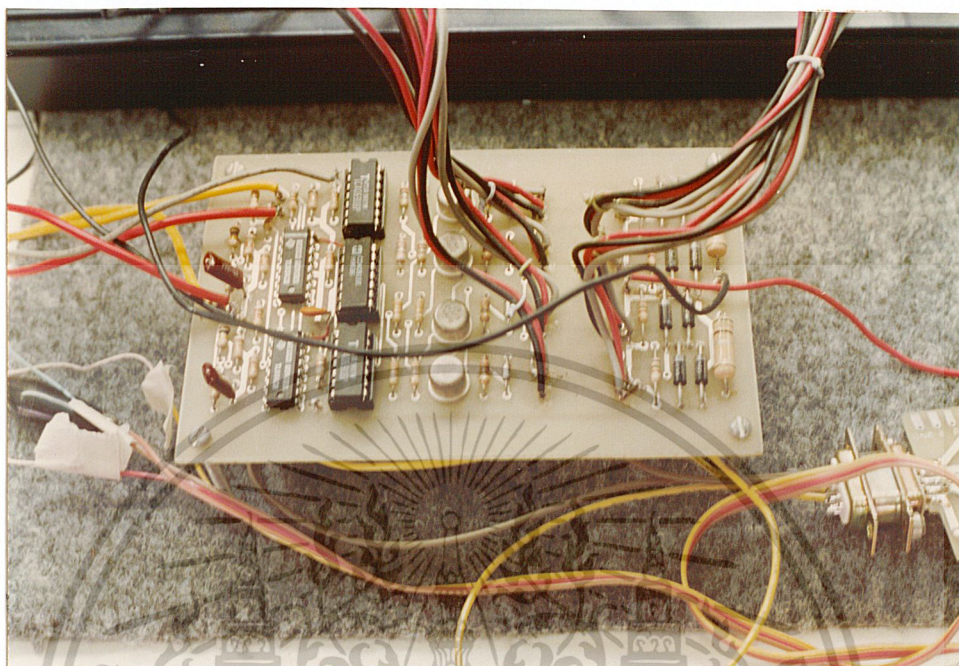
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ตัวต้านทาน (R) ที่ต่ออนุกรมอยู่กับ Tr3,Tr4 และTr7,Tr8 เป็นตัวต้านทานตรวจจับ ซึ่งจะทำหน้าที่ในการรักษาเสถียรภาพการทำงาน ให้กับสเตปป์มอเตอร์ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตให้กับชุดของวงจรจับ

การใช้กระแสรูปลิ้นชาชน์และโคชาชน์ในการควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ แทนการใช้สัญญาณพัลส์เนื่องจากว่า การเปลี่ยนแปลงของข้อมูลในแต่ละระดับของกระแสรูปลิ้นชาชน์และโคชาชน์ จะ เป็นไปอย่างต่อเนื่องและมีความละเอียดมากกว่าสัญญาณพัลส์ โดยที่ความต่อเนื่องและความละเอียดของการเปลี่ยนแปลงในแต่ละระดับของข้อมูลนี้จะมีผลต่อการหมุนของเพลตสเตปป์มอเตอร์มาก ในส่วนของสัญญาณพัลส์นั้นการเปลี่ยนแปลงระดับของข้อมูลจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด คือจากลอจิก “1” เป็นลอจิก “0” ซึ่งในช่วงของการเปลี่ยนแปลงระดับของข้อมูลดังกล่าวนี้ จะมีผลทำให้เพลตของสเตปป์มอเตอร์เกิดการกระตุกในขณะที่มีการหมุน แต่ถ้าเป็นลักษณะของกระแสรูปลิ้นชาชน์และโคชาชน์ การเปลี่ยนแปลงระดับของข้อมูลจะเป็นไปทีละสเตปตามข้อมูลที่ได้รับเข้ามา จึงทำให้การหมุนของเพลตสเตปป์มอเตอร์มีความราบเรียบมากกว่า การใช้สัญญาณพัลส์เป็นตัวควบคุม ซึ่งวงจรจับแบบสองแกนขวางที่ใช้ในระบบที่ได้ออกแบบขึ้นแสดงในภาพที่ 4.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภายใต้การคุ้มครองของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ภาพที่ 4.11 แสดงวงจรจับที่ใช้ในระบบที่ได้ออกแบบขึ้นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



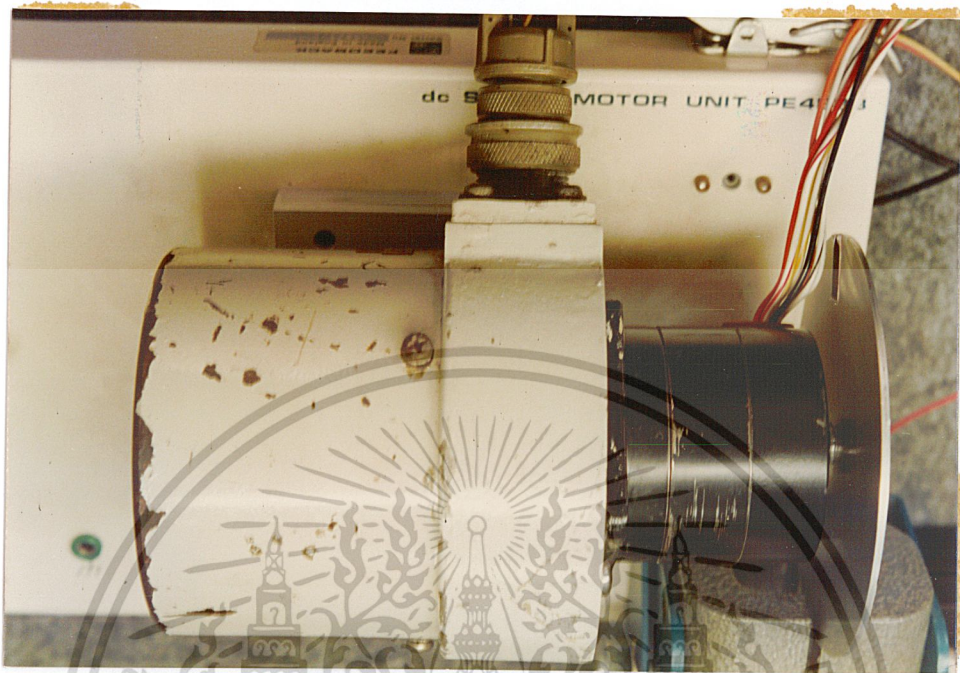
ภาพที่ 4.12 แสดงแผงวงจรขับ

เมื่อมอเตอร์หมุนไปตามการจัดลำดับของกรกระดุนจากวงจรขับแล้ว ตัวเข้ารหัสที่ต่ออยู่กับเพลามอเตอร์ก็จะหมุนไปด้วย และตัวเข้ารหัสก็จะส่งค่าข้อมูลต่าง ๆ ให้กับหน่วยจัดการข้อมูล และถอดรหัสสัญญาณชานน์และโคชานน์อีก และทำงานไปในลักษณะนี้ไปเรื่อย ๆ จนสเตปป์มอเตอร์หยุดทำงาน

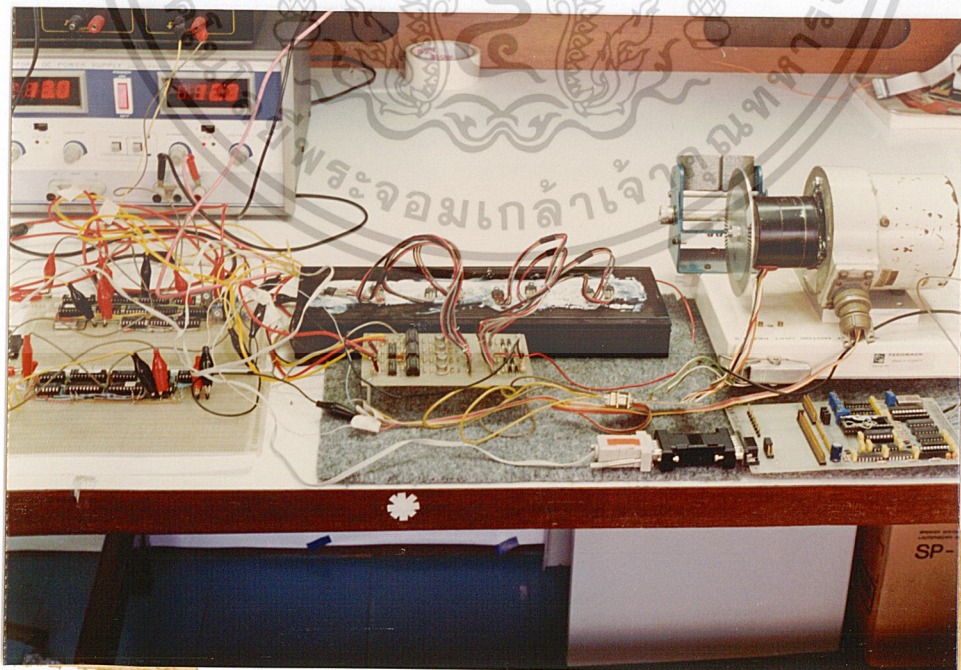
4.2.3 หน่วยเข้ารหัสและสเตปป์มอเตอร์

หน่วยเข้ารหัสประกอบไปด้วยตัวเข้ารหัสสองชุด คือชุด A และชุด B ซึ่งทำมุมต่างเฟสกัน 90 องศา แต่ละชุดมีความละเอียด 2,000 พัลส์ต่อรอบ ต่ออยู่กับเพลลาของมอเตอร์ เพื่อทำหน้าที่สร้างข้อมูลซึ่งเป็นลูกคลื่นพัลส์ที่มีจำนวนพัลส์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วในการหมุนของเพลลามอเตอร์ แล้วส่งข้อมูลนี้ไปยังหน่วยจัดการข้อมูล และถอดรหัสสัญญาณชานน์และโคชานน์ เพื่อควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ดังที่กล่าวมาแล้ว

สเตปป์มอเตอร์จะมีจำนวนสเตปป์ทั้งหมดเท่ากับ 200 สเตปป์ แต่ละสเตปป์มีมุมต่างกัน 1.8 องศา ความละเอียดและความเที่ยงตรงในการควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์นี้จะขึ้นอยู่กับจำนวนชุดของตัวเข้ารหัส ความละเอียดของตัวเข้ารหัส (จำนวนพัลส์ต่อรอบ) และจำนวนสเตปป์ต่อรอบของสเตปป์มอเตอร์



ภาพที่ 4.13 แสดงตัวเข้ารหัสและสเตปิ่งมอเตอร์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา



ภาพที่ 4.14 แสดงการติดตั้งของระบบทั้งหมดที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในเชิงวิชาการเท่านั้น ไม่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในภาพที่ 4.14 เป็นการติดตั้งส่วนต่างๆ ของระบบที่พัฒนาขึ้นเข้าด้วยกัน เพื่อใช้ในการทดสอบการทำงานของระบบที่พัฒนาขึ้นทั้งหมด ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดสอบการทำงานของระบบ

5.1 การทดสอบการทำงานในส่วนต่างๆ ของระบบ

5.1.1 การทดสอบความเร็วรอบของเฟลตามอเตอร์

ในการทดสอบความเร็วรอบของเฟลตามอเตอร์โดยใช้ระบบขับเคลื่อนที่พัฒนาขึ้นนั้น จะทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตให้มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ แล้วทำการวัดหาความเร็วรอบของเฟลตามอเตอร์ ด้วยมิเตอร์วัดความเร็วรอบแบบดิจิตอลชนิดใช้แสง (Digital Photo Tachometer) จากการทดสอบความเร็วรอบ โดยการเพิ่มขนาดของแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตให้สูงขึ้นนั้น จะมีผลทำให้ความเร็วรอบของเฟลตามอเตอร์สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งหมายความว่าความเร็วรอบแปรผันตามค่าของแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต โดยที่แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยทางด้านเอาต์พุตสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$V_o = V_i \cdot D \quad (5-1)$$

เมื่อ V_o คือ แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยทางด้านเอาต์พุต ที่ตกรวมที่ตัวต้านทานตรวจจับ
 V_i คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต
 D คือ รอบการทำงาน

จากสมการ $D = \frac{t_{on}}{T}$ แทนค่า D ลงในสมการที่ (5-1) จะได้

$$V_o = V_i \cdot \frac{t_{on}}{T} \quad (5-2)$$

เมื่อ t_{on} คือ คาบเวลาในช่วงการทำงาน
 T คือ คาบเวลาทั้งหมดในหนึ่งรอบ

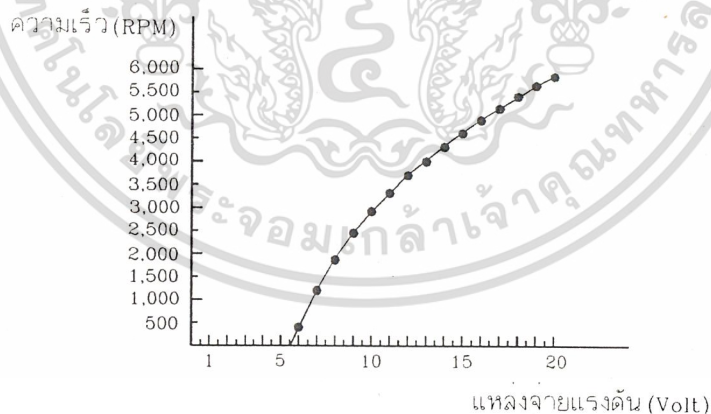
จากสมการที่ 5-1 ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต จะทำให้แรงดันตกรวมที่ตัวต้านทานตรวจจับเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งจะมีผลต่อความเร็วรอบที่เกิดขึ้นที่เฟลาของไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเตปป์มอเตอร์ เนื่องจากว่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมที่ตัวต้านทานตรวจจับจะถูกส่งป้อนกลับไปทำการเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงในไอซีเบอร์ TL494 ซึ่งเป็นไอซีมอดูเลตความกว้างพัลส์ แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์จะถูกส่งไปไบอัสที่ขาเบส (Base) ของทรานซิสเตอร์ Tr3, Tr4 และ Tr7, Tr8 เพื่อใช้ในการกำหนดขนาดของกระแสที่ป้อนให้กับชุดขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ในแต่ละเฟส ซึ่งจะมีผลกับความเร็วรอบที่เกิดขึ้นที่เพลลาของสเตปป์มอเตอร์ด้วย ดังสมการ

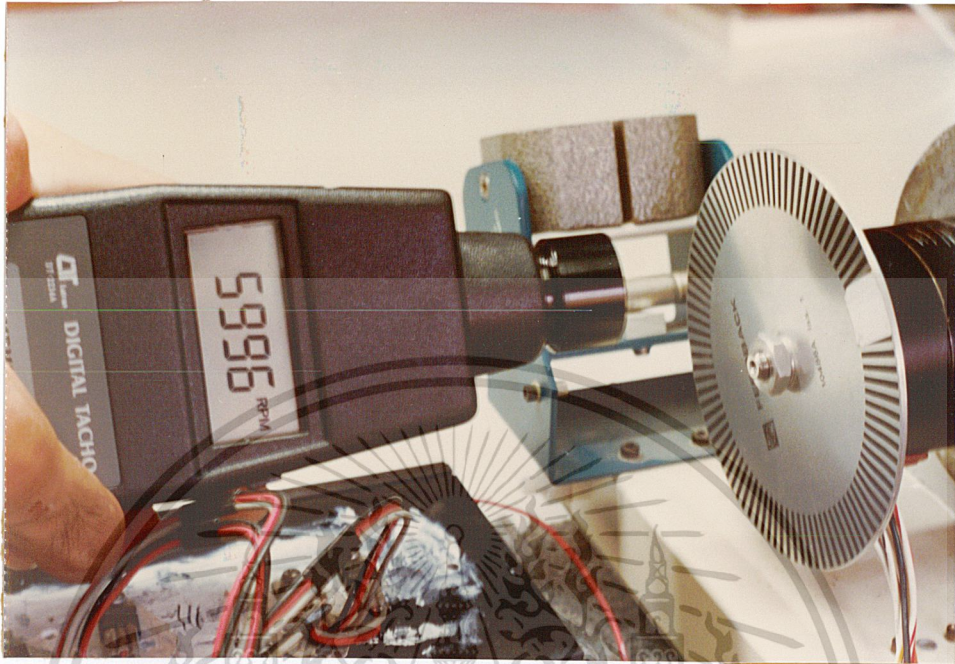
$$\omega = K V_{i_{on}} f \quad (5-3)$$

- เมื่อ ω คือ ความเร็วเชิงมุมของสเตปป์มอเตอร์
 K คือ ค่าคงที่ ที่เกี่ยวข้องกับตัวสเตปป์มอเตอร์
 f คือ ความถี่ที่ได้จากวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์

จากสมการที่ (5-3) สามารถแสดงผลตอบสนองของความเร็วยกกับแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตได้ดังกราฟที่ 5.1



ภาพที่ 5.1 กราฟแสดงผลตอบสนองของความเร็วยกกับแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต



ภาพที่ 5.2 แสดงการทดสอบความเร็วรอบในการหมุนของเพลาสเตปปีงมอเตอร์

5.1.2 การทดสอบแรงบิดที่เพลาสเตปปีงมอเตอร์

ในการทดสอบแรงบิดที่เพลาสเตปปีงมอเตอร์นั้นจะทำการทดสอบสองคุณลักษณะด้วยกันคือ

ก) การทดสอบแรงบิดทางพลวัต วิธีการทดสอบแรงบิดในลักษณะนี้จะกระทำในขณะที่มีการหมุนที่เพลาสเตปปีงมอเตอร์ โดยจะใช้แม่เหล็กถาวรเป็นโหลด (Load) ในการหมุนที่เพลาสเตปปีงมอเตอร์ ดังภาพที่ 5.5 และ 5.6 จากนั้นทำการวัดจำนวนรอบในการหมุนของเพลาสเตปปีงมอเตอร์ด้วยมิเตอร์วัดความเร็วรอบแบบดิจิทัลชนิดใช้แสง ซึ่งจะสามารถคำนวณหาค่าของแรงบิดได้จากผลตอบสนองของความเร็วรอบต่อแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต จากสมการ

$$P = T \cdot N \quad (5-4)$$

เมื่อ P คือ กำลังงานที่ป้อนให้กับขดลวดของมอเตอร์ มีหน่วยเป็นวัตต์

T คือ แรงบิดที่อาร์มาเจอร์ของมอเตอร์

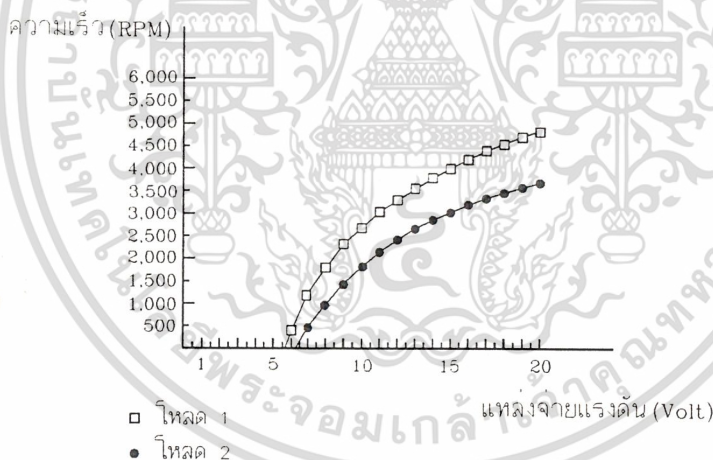
N คือ จำนวนรอบในการหมุนของเพลามอเตอร์

จากสมการที่ (5-4) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$T = K \frac{V}{N} \quad (5-5)$$

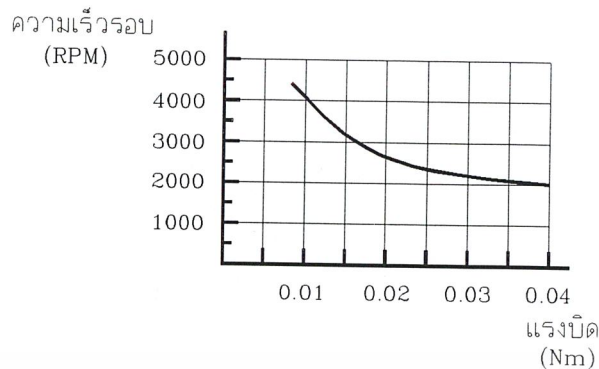
ในการทดสอบกำลังงานเพื่อหาค่าของแรงบิดที่เพลของมอเตอร์ กำหนดให้กระแสที่ไหลผ่านขดลวดมีค่าคงที่

จากการทดสอบค่าแรงบิดที่เพลของสเตปป์มอเตอร์ ในขณะที่ทำการลดโหลดที่มีขนาดต่าง ๆ จะเห็นว่าสเตปป์มอเตอร์ยังคงรักษาเสถียรภาพการทำงานได้เช่นเดียวกันกับในกรณีที่ไม่มี การต่อโหลด ในกราฟภาพที่ 5.3 ค่าแรงบิดที่เพลของสเตปป์มอเตอร์จะเป็นอัตราส่วน ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์กับจำนวนรอบในการหมุนของเพลมอเตอร์ นั่นคือเมื่อเพลของสเตปป์มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบต่ำ จะมีค่าของแรงบิดเกิดขึ้นมาก ทำให้ไม่เกิดการลื่นไถลขึ้นภายในสเตปป์มอเตอร์ในขณะที่มีการลดโหลด



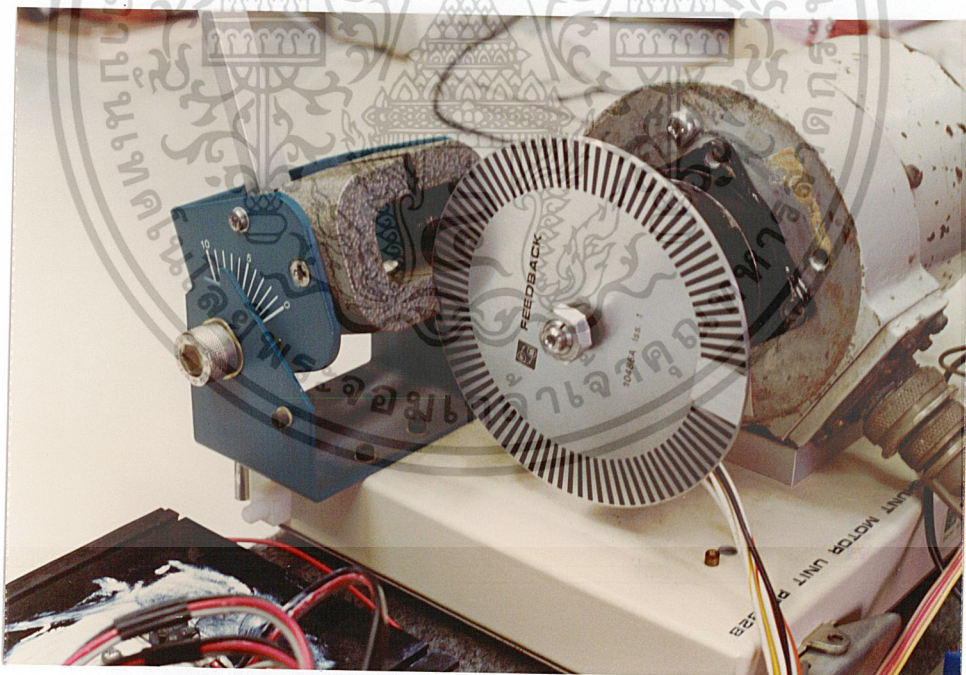
ภาพที่ 5.3 กราฟแสดงผลตอบสนองของความเร็วรอบต่อแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต ในขณะที่โหลดต่างกัน

จากกราฟในภาพที่ 5.3 สามารถแสดงผลตอบสนองของแรงบิดที่เกิดขึ้นต่อความเร็วรอบในการหมุนของเพลสเตปป์มอเตอร์ที่ใช้กับระบบขับเคลื่อนที่พัฒนาขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 5.4



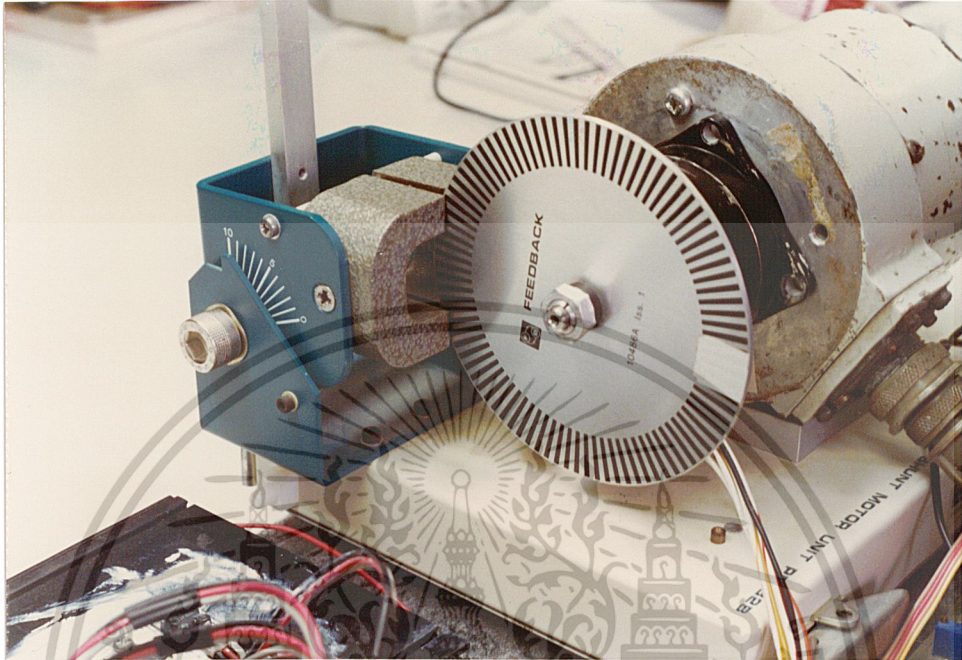
ภาพที่ 5.4 กราฟแสดงผลตอบสนองระหว่างแรงบิดที่เกิดขึ้นต่อความเร็วรอบของสเตปปีงมอเตอร์ที่ใช้กับระบบขับเคลื่อนที่พัฒนาขึ้น

พิจารณาจากกราฟในภาพที่ 5.4 จะเห็นว่าค่าของแรงบิดที่เกิดขึ้น จะเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วรอบ



ภาพที่ 5.5 แสดงการหาค่าของแรงบิด ในขณะที่มีการจุดที่เพลของสเตปปีงมอเตอร์ด้วยแม่เหล็กถาวร (โหลด 1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.6 แสดงการหาค่าของแรงบิด ในขณะที่มีการหุดที่เพลลาของสเตปปีงมอเตอร์ด้วยแม่เหล็กถาวร (โหลด 2)

(ข) การทดสอบแรงบิดทางสถิตย์ ในการทดสอบแรงบิดทางสถิตย์นั้นจะพิจารณาในสภาวะที่เพลลาของสเตปปีงมอเตอร์ไม่มีการเคลื่อนที่ การทดสอบกระทำได้โดยการใช้เครื่องชั่งสปริง (Spring Scales) เป็นตัวดึงที่เพลลาของสเตปปีงมอเตอร์ซึ่งจะทำให้เกิดแรง (Force) ที่มีทิศทางสวนทางกับแรงบิดที่เกิดขึ้น โดยสามารถหาค่าของแรงบิดที่เกิดขึ้นได้จากสมการ

$$T = r \cdot F \quad (5-6)$$

เมื่อ r คือ รัศมีของเพลลามอเตอร์

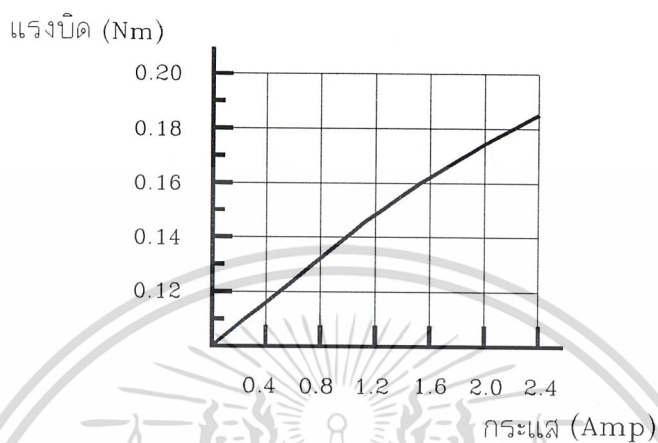
F คือ แรงที่ได้จากการดึงที่เพลลาของสเตปปีงมอเตอร์

จากสมการจะเห็นว่า แรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับแรงที่ได้จากการดึงที่เพลลาของสเตปปีงมอเตอร์ ดังนั้นแม้ว่าเพลลาของสเตปปีงมอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วสูงหรือต่ำ ค่าแรงบิดที่เอกสารเกิดขึ้นจะมีค่าคงที่ตลอดย่านการใช้งานของสเตปปีงมอเตอร์ ไม่อนุ โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

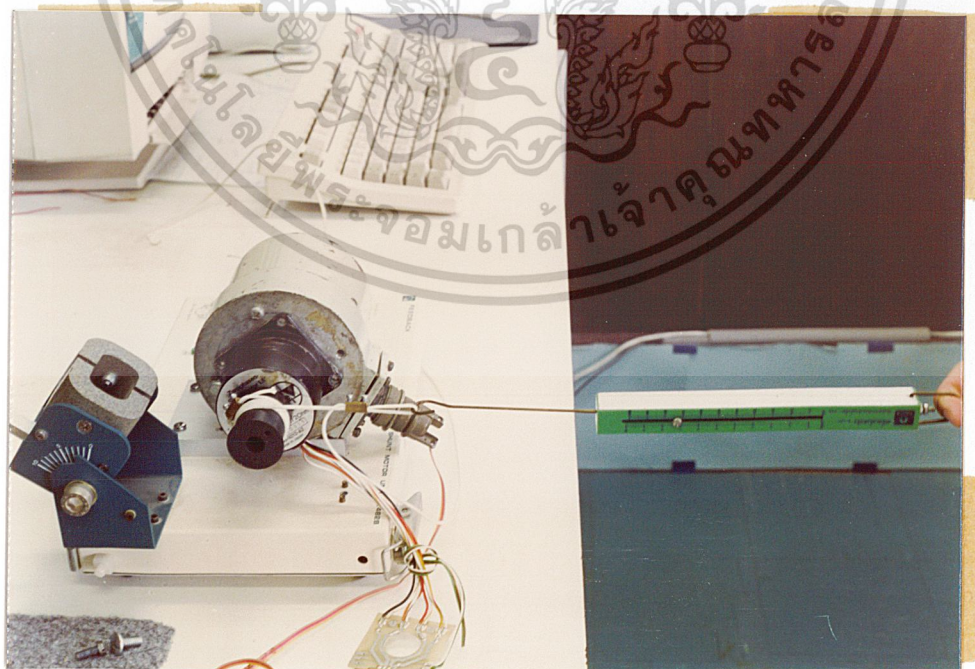
ระหว่างแรงบิดที่ได้จากสมการกับกระแสที่ป้อนให้กับชุดขดลวดของสเตปปีงมอเตอร์

ดั่งภาพ

ที่ 5.7



ภาพที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่เกิดขึ้นกับกระแสที่ป้อนให้กับชุดขดลวดของสเตปปีงมอเตอร์



ภาพที่ 5.8 แสดงการทดสอบแรงบิดทางสถิติโดยใช้เครื่องชั่งสปริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการใช้หลักการของการมอดูเลตความกว้างพัลส์ ทำให้ค่าของแรงดัน V_o เกือบจะคงที่ตลอด และการตรวจจับค่ากระแสในวงจรจับด้วยตัวต้านทานตรวจจับ จะรักษาค่าของกระแสที่ไหลในขดลวดให้คงที่เสมอ จึงทำให้การสูญเสียที่เกิดขึ้นในรูปของกำลังงานความร้อนลดน้อยลงตามสมการ

$$w = \frac{KNI}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^2\theta \, d\theta \quad (5-7)$$

เมื่อ W = กำลังงานสูญเสียมี หน่วยเป็นจูลล์

N = จำนวนรอบในการหมุนของเฟลาตเตปิ้งมอเตอร์

5.2 ข้อเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ระหว่างสเตปป์มอเตอร์ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนที่พัฒนา กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและสเตปป์มอเตอร์ทั่วไป

สเตปป์มอเตอร์ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนที่พัฒนา	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	สเตปป์มอเตอร์ทั่วไป
1. ไม่ใช้แปรงถ่านในการส่งกำลังงานให้กับขดลวดของโรเตอร์	1. จำเป็นต้องมีแปรงถ่าน ทำให้มีขีดจำกัดในการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับขดลวดอาร์มาเจอร์	1. ไม่ใช้แปรงถ่านในการส่งกำลังงานให้กับขดลวดของโรเตอร์
2. แรงบิดมีค่าคงที่แม้ขณะขับเคลื่อนด้วยความเร็วรอบต่ำ	2. แรงบิดมีค่าคงที่แม้ขณะขับเคลื่อนด้วยความเร็วรอบต่ำ	2. แรงบิดมีค่าไม่คงที่ในขณะที่ขับเคลื่อนด้วยความเร็วรอบต่ำ
3. สามารถเพิ่มความเร็วยุติได้โดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต	3. มีขีดจำกัดในการเพิ่มความเร็วยุติและแรงบิด ขึ้นอยู่กับขนาดของมอเตอร์	3. มีขีดจำกัดในการเพิ่มความเร็วยุติและแรงบิดขึ้นอยู่กับความถี่และแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวด
4. มีกำลังงานสูญเสียต่ำในขณะที่ไม่มีโหลด และมีโหลด	4. ขณะที่ไม่มีโหลด จะมีกำลังงานสูญเสียในรูปของความร้อนเกิดขึ้นในขดลวดสูง	4. ขณะที่ไม่มีโหลด จะมีกำลังงานสูญเสียในรูปของความร้อนเกิดขึ้นในขดลวดสูง
5. ไม่เกิดการลื่นไถลขึ้นที่ความเร็วรอบสูง	5. ไม่เกิดการลื่นไถลขึ้นที่ความเร็วรอบสูง	5. มีการลื่นไถลเกิดขึ้นที่ความเร็วรอบสูง
6. ที่แรงดันอินพุตเท่ากัน แรงบิดจะสูงกว่าแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและสเตปป์มอเตอร์ทั่วไป	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเตรปมอเตอรืทืใช้ระบบขับเคลือนที่พัฒนา	มอเตอรืไฟฟ้ากระแสตรง	สเตรปมอเตอรืทั่วไป
7. สเตรปมอเตอรืที่นำมาใช้กับระบบจะมีขนาดเลืกกว่าในกรณีที่ขับไหลคเท่ากัน	-	-
8. สามารถนำไปใช้กับสเตรปมอเตอรืขนาดต่าง ๆ ในงานอุตสาหกรรมได้อย่างกว้างขวาง	8. มีข้อจำกัดกับการใช้งานทางด้านอุตสาหกรรม ขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องจักร	8. มีข้อจำกัดกับการใช้งานทางด้านอุตสาหกรรม ขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องจักร

จากตารางข้อเปรียบเทียบคุณสมบัติข้างต้นของมอเตอร์ไฟฟ้าทั้งสามชนิดจะเห็นว่า สเตรปมอเตอรืที่ใช้ระบบขับเคลือนที่พัฒนาขึ้น จะมีประสิทธิภาพโดยรวมดีกว่าสเตรปมอเตอรืโดยทั่วไป หรือเทียบเคียงกับมอเตอรืไฟฟ้ากระแสตรง โดยจะกล่าวถึงบทสรุปในบทที่ 6 ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ข้อเสนอแนะและวิจารณ์

6.1 ปัญหาและจุดบกพร่องของระบบ

ปัญหาใหญ่ในการทดสอบการทำงานคือ สเตปปีงมอเตอร์ที่นำมาใช้เป็นกรณีศึกษามีขนาดเล็ก จึงไม่สามารถที่จะนำมาเปรียบเทียบความเร็วและแรงบิดที่เพลลาของสเตปปีงมอเตอร์ขนาดต่าง ๆ กันได้ และถ้าใช้ตัวเข้ารหัสที่มีความละเอียดมากกว่านี้จะทำให้การทำงานของสเตปปีงมอเตอร์มีประสิทธิภาพดีมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังขาดเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์ขนาดเล็ก จึงทำให้การคำนวณค่าแรงบิดของสเตปปีงมอเตอร์มีความคลาดเคลื่อนไปบ้าง

6.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาระบบต่างๆ

ในงานวิจัยต่อไปนั้น ถ้านำเอาระบบการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing) มาใช้ในการคำนวณค่าต่าง ๆ ของข้อมูลที่ได้รับจากตัวเข้ารหัส จะสามารถตัดการใส่วงจรฮาร์ดแวร์ (Hardware) ในส่วนของหน่วยจัดการข้อมูลและถอดรหัสสัญญาณชานซ์และโคชานซ์ไปได้ โดยการโปรแกรมให้ระบบการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลทำงานแทน ซึ่งระบบนี้จะทำการชดเชยค่าของข้อมูลต่าง ๆ ที่รับเข้ามา และปรับแต่งค่าของข้อมูลที่ได้ส่งให้กับวงจรขับเพื่อป้อนให้กับสเตปปีงมอเตอร์ต่อไป จากการทำงานดังกล่าวจะทำให้ค่าของสัญญาณไฟฟ้าที่ได้มีความสอดคล้องกับการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ที่นำมาใช้ร่วมกับระบบที่พัฒนาขึ้น และน่าจะทำให้สเตปปีงมอเตอร์มีประสิทธิภาพดีขึ้น อีกทั้งยังสามารถควบคุมตำแหน่งในการหมุนของเพลลามอเตอร์ได้อย่างเที่ยงตรงอีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถนำเอาระบบที่พัฒนาขึ้นไปควบคุมการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ได้ทุกตัว

6.3 บทสรุป

จากการทำงานในส่วนต่าง ๆ ของระบบขับเคลื่อนที่พัฒนาขึ้นนั้น เมื่อนำไปใช้กับสเตปปีงมอเตอร์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา ประสิทธิภาพการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์จะดีขึ้นมาก โดยจากการทดสอบให้สเตปปีงมอเตอร์เดินรอบต่ำที่ความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ ถึง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ขนาดของขั้วแม่เหล็ก 1.8 องศา ต่อหนึ่งสเตป กระแสสูงสุด 1.2 แอมป์ สามารถให้การหมุนของเพลลา สเตปปีงมอเตอร์เป็นไปได้อย่างราบเรียบและการสั่นสะเทือนต่ำ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสเตปปีงมอเตอร์ตัวเดียวกัน เมื่อป้อนกระแสเป็นลำดับแบบพัลส์ให้กับสเตปปีงมอเตอร์ ผลการตอบสนอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อการหมุนที่ได้จะเกิดการลื่นไถลในช่วงความถี่ 500 ถึง 600 เฮิรตซ์ ตลอดจนการสั่นสะเทือนสูงที่ความถี่ต่ำ อีกทั้งในระบบขับเคลื่อนที่พัฒนาขึ้นมีการเปลี่ยนกำลังงานไฟฟ้าให้เป็นกำลังงานกลอย่างสมบูรณ์ พลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในรูปของความร้อนจึงลดน้อยลง ทำให้ผลตอบสนองของความเร็วยวและแรงบิดต่อแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตดีขึ้นมาก และที่สำคัญคือ ไม่เกิดการลื่นไถลขึ้นภายในตัวของสเตปป์มอเตอร์ในขณะที่มีการขับเคลื่อนด้วยความเร็วยวสูง ดังที่ได้กล่าวไว้ในตารางข้อเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ระหว่างสเตปป์มอเตอร์ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนที่พัฒนา กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและสเตปป์มอเตอร์ทั่วไป (หัวข้อที่ 5.2) ดังนั้น ถ้านำเอา ระบบขับเคลื่อนที่พัฒนาขึ้นนี้ไปใช้กับสเตปป์มอเตอร์ต่างๆ ไป ผลที่ได้คือจะทำให้ข้อบกพร่องต่างๆ ของสเตปป์มอเตอร์หมดไป อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพดีเทียบเคียงกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยทั่วไปด้วย



บรรณานุกรม

- [1] ประภาส อุดคคกิมพันธ์, วิริยะ กองรัตน์, “ มินิสเตปเทคนิคกับคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุม สเตปปีงมอเตอร์ ” ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบัน ครั้งที่ 14, มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์, 1991
- [2] วิสรุต ศรีรัตนะ, ประภาส อุดคคกิมพันธ์, รศ.พิพัฒน์ เถาหงคราม, “ มินิสเตปเทคนิค สำหรับสเตปปีงมอเตอร์ในรูปแบบกระแส ” วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย” ปีที่45 เล่มที่8, 1992
- [3] วิสรุต ศรีรัตนะ, ไสว เหล่าไม้, ประภาส อุดคคกิมพันธ์, รศ.พิพัฒน์ เถาหงคราม “ มอเตอร์กระแสตรงที่ไม่มีแปรงถ่านโดยใช้สเตปปีงมอเตอร์ ” ประชุมวิชาการทางวิศวกรรม ไฟฟ้า 9 สถาบัน ครั้งที่ 18, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 1995
- [4] รศ.ดร.โยชิน 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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The seal of Rajabhat Buriram University is a circular emblem. It features a central five-tiered stupa (chedi) with a sunburst radiating from its top. This central stupa is flanked by two smaller, three-tiered stupas. The entire design is set against a background of intricate floral and geometric patterns. The Thai text 'มหาวิทยาลัยราชภัฏบรียรัมย์' (Mahavithayalai Rajabhat Buriram) is inscribed around the perimeter of the seal.

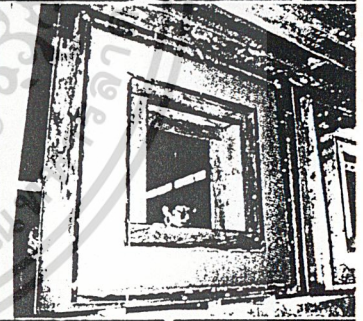
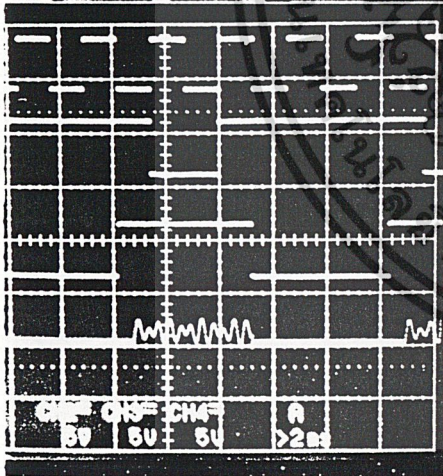
ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

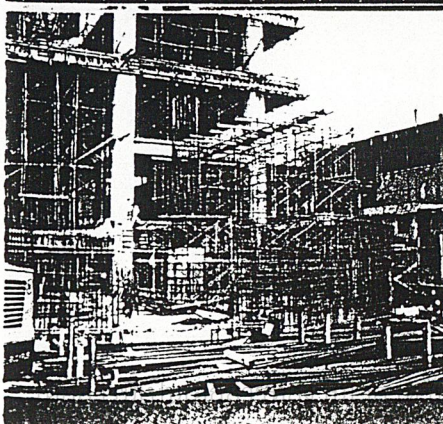
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิศวกรรมสาร

อาคาร รร.รอยัล พลาซ่ากลุ่ม



เล่มนี้พบกับ



กรมการไฟฟ้าพลัง

เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้า

- มีนิสเตปเทคนิคในรบบกระแส
- เหล็ก...องค์ประกอบสำคัญของงานก่อสร้าง
- การสื่อสารข้อมูลทางดีทอลสัญญาณ

40

มินิสเตปเทคนิคสำหรับ สเตปปีงมอเตอร์ในรูปแบบกระแส Ministep Technique with Sine Modulation

บทคัดย่อ

ความไม่คงที่ของแรงบิดต่อความเร็วที่เปลี่ยนแปลงของสเตปปีงมอเตอร์อื่นเนื่องจากแรงดันย้อนกลับขณะป้อนกำลังงานในลักษณะของแรงดันรูปคลื่นไซน์ชอยด์ให้กับขดลวดของสเตปปีงมอเตอร์ จากผลการวิจัยที่ผ่านมา^[1] มีการเสนอเทคนิคการชดเชยด้วยอัตราขยายของแรงดันที่มีความสัมพันธ์กับความเร็วที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจจับความเร็ว วิธีดังกล่าวมีข้อเสียคือจะต้องมีการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับกำลังการขยายของแรงดันที่ซับซ้อน ในบทความนี้จะเสนอเทคนิคใหม่ของการใช้กำลังงานในลักษณะของ กระแสรูปคลื่นไซน์ชอยด์ในการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์ ข้อดีของวิธีการนี้คือไม่ต้องมีการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับกำลังการขยายของแรงดัน และไม่ใช้อุปกรณ์ตรวจจับความเร็วในการชดเชยกำลังงาน ให้กับสเตปปีงมอเตอร์ ซึ่งกระแสรูปคลื่นไซน์ชอยด์ที่ป้อนให้กับมอเตอร์นี้ จะทำให้แรงบิดต่อความเร็วที่เปลี่ยนแปลงยังคงที่ตลอดย่านความเร็วของสเตปปีงมอเตอร์ และยังคงรักษาคุณสมบัติความราบเรียบในการหมุนของสเตปปีงมอเตอร์โดยปราศจากการสั่นไหว

1. บทนำ

การขับเคลื่อนสเตปปีงมอเตอร์ โดยใช้รูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (Pulse) โดยทั่วไปจะเกิดการกระตุกที่เพลลา เทคนิคของมินิสเตปจะทำการขับโดยในแต่ละเฟสถูกแบ่งเป็นสเตปย่อย ๆ ซึ่งรวมแล้วจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นแบบไซน์ชอยด์ (Sinusoidal wave) ซึ่งจะมีผลทำให้การเคลื่อนที่ของตัวหมุน (Rotor) มีลักษณะของการเคลื่อนที่เชิงมุมเป็นธรรมชาติมากที่สุด ผลก็คือการเคลื่อนที่ที่เป็นไปได้อย่างราบเรียบ เทคนิคในการป้อนกำลังงานให้กับสเตปปีงมอเตอร์ที่ใช้ในบทความนี้ คือการใช้กำลังงานในรูปแบบของกระแสไซน์ชอยด์ โดยการใช้เทคนิคสองเทคนิคร่วมกันคือ มินิสเตปเทคนิค (Ministep Technique) กับวิธีการพัลส์วิตมอดดูเลชัน (Pulse Width Modulation : PWM) กล่าวคือมินิสเตปแบบคลื่นไซน์ชอยด์ มีผลทำให้เกิดการแผ่กระจายของสนามแม่เหล็กที่ขั้ว (Pole) เป็นธรรมชาติกับการเคลื่อนที่เชิงมุมของสเตปปีงมอเตอร์มากที่สุด ทำให้เกิดความราบเรียบของการหมุนที่เพลลาของสเตปปีงมอเตอร์ ส่วนวิธีการพัลส์วิตมอดดูเลชันเป็นการควบคุมอัตราการใช้ของกระแสไฟฟ้าให้คงที่ ด้วยการสวิตซ์แหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งมีผลทำให้ค่าของแรงบิด (Torque) ที่เพลลาของสเตปปีงมอเตอร์คงที่ตลอดช่วงความเร็วในการใช้งานของสเตปปีงมอเตอร์

2. แนวความคิดและหลักการ

การเคลื่อนที่ของตัวหมุน (Rotor) เกิดขึ้นเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำระหว่างตัวหมุนที่เป็นแม่เหล็กถาวร กับสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกกระตุ้น (Excite) หรือขับแบบพัลส์ (Pulse) ในแต่ละเฟสของ

มอเตอร์นั้น ผลตอบสนองของการเคลื่อนที่ต่อกระแสไฟฟ้าที่กระตุ้นเข้าไป ทำให้การเคลื่อนที่ของตัวหมุนเกิดการกระตุก (Overshoot) ดังนั้นจึงนำค่าไซน์ชอยด์ 0-180 องศา มาใช้แทนพัลส์ดังกล่าวเพื่อให้สนามแม่เหล็กมีความเข้มที่สอดคล้องกับการหมุนของตัวหมุนในแต่ละเฟส

3. หลักการทำงาน

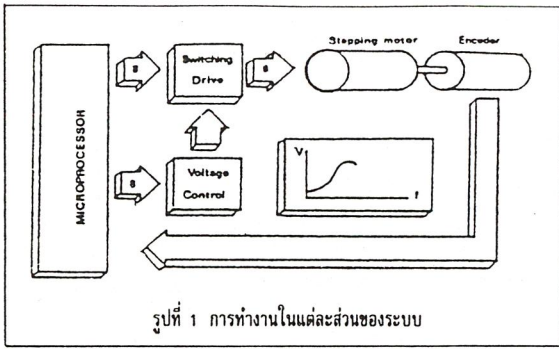
จากบทความที่เคยลงเสนอก่อนแล้ว ในประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบัน ครั้งที่ 14 เรื่อง มินิสเตปเทคนิคกับคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมสเตปปีงมอเตอร์^[1] ในบทความดังกล่าวได้เสนอวิธีการป้อนกำลังงานให้กับสเตปปีงมอเตอร์ในลักษณะของแรงดันรูปคลื่นไซน์ชอยด์ โดยใช้เทคนิคการชดเชยด้วยอัตราขยายของแรงดัน ที่มีความสัมพันธ์กับความเร็วที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจจับความเร็ว (Encoder) ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้ เริ่มจากตารางค่าไซน์ชอยด์ที่เป็นค่าของมุม 0-180 องศา ที่ค่าสูงสุดสำหรับปริมาณเชิงเลขที่มีค่าเท่ากับ 255 เป็นสัดส่วนกับตัวประกอบของไซน์ชอยด์โดยคอมพิวเตอร์จะทำหน้าที่สังเคราะห์ด้วยโปรแกรม และส่งออกมาด้วยความเร็วที่ต้องการ

โดยที่วงจรแปลงสัญญาณเชิงเลขเป็นระดับแรงดัน (Digital to Analog) เป็นแบบ Multiply หมายถึง ระดับแรงดันที่ทางออกมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างแรงดันอ้างอิงกับค่าปริมาณเชิงเลข (Numerical) ที่ทางเข้า เพื่อให้สามารถปรับค่าของอัตราขยายได้

วงจรขับที่ได้ทำการทดลอง ใช้วงจรขยายให้แรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านทางออก เป็นสัดส่วนกับอัตราขยายแรงดันทางเข้า และใช้แหล่งจ่ายกำลังงานแบบสวิตซ์ (Switching)

ส่วนชดเชยอัตราขยายต่อความเร็ว เมื่อความเร็วมอเตอร์เคลื่อนที่ไปถึงระดับที่ทำให้แรงดันย้อนกลับมีค่าเท่ากับแรงดันที่จ่ายให้ ผลคือทำให้ไม่มีกระแสไหลจึงจำเป็นต้องทำการชดเชยแรงดันให้กับมอเตอร์เพิ่มขึ้นเพื่อควบคุมให้ได้ความเร็วที่ต้องการ ส่วนนี้เป็นหน้าที่ของโปรแกรมในการตัดสินใจว่าต้องชดเชยในปริมาณเท่าใด ปริมาณที่ต้องชดเชยดังกล่าว เป็นปริมาณเชิงเลขจากคอมพิวเตอร์จะต้องการแปลงเป็นระดับแรงดันก่อน และแรงดันที่ได้นี้ก็คือแรงดันอ้างอิง ในส่วนการตรวจสอบตำแหน่งจะใช้อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่ง (Encoder) เพื่อตรวจจับตำแหน่ง หรือจังหวะของการหมุนที่ถูกยึดติดกับตัวหมุน แล้วส่งสัญญาณให้คอมพิวเตอร์ทำให้คอมพิวเตอร์สามารถรับรู้ถึงตำแหน่ง ผลที่ได้ดังกล่าวจะนำไปควบคุมให้การหมุนของตัวตรวจจับตำแหน่งสอดคล้องกับการขับด้วยสนามแม่เหล็กในแต่ละเฟสที่เลื่อนไป

ในส่วนของหน้าที่การทำงานของหน่วยต่าง ๆ ที่วิจัยขึ้นมาใหม่ จะมีความแตกต่างจากบทความที่กล่าวมาแล้วข้างต้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

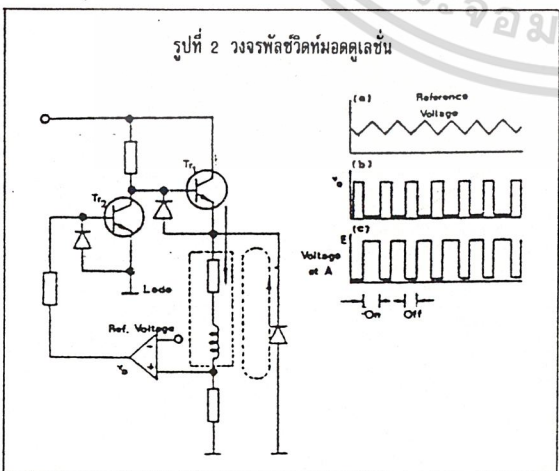


รูปที่ 1 การทำงานในแต่ละส่วนของระบบ

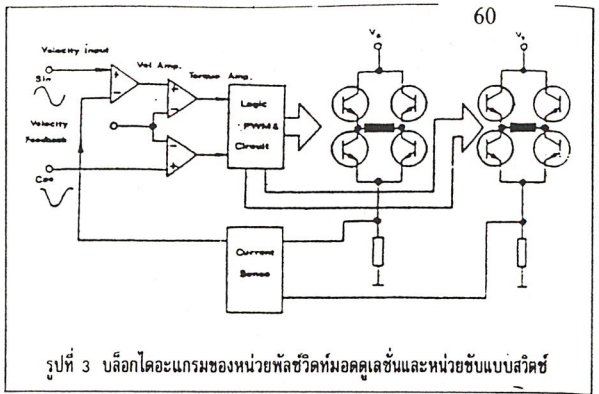
จากรูปที่ 1 แสดงหลักการกว้าง ๆ เริ่มจากการสร้างรูปคลื่นไซน์ชอยด์ โดยให้คอมพิวเตอร์อ่านค่าของไซน์ชอยด์ 0-180 องศา ในตารางและส่งออกมา 512 ค่า โดยความละเอียด (Resolution) คือ 180/512 องศาต่อมินิสเตปให้กับวงจรแปลงสัญญาณเชิงเลขเป็นระดับแรงดันส่งต่อไปยังตัวขับ (Driver), มอเตอร์ และภาระ (Load) ตามลำดับ ส่วนอุปกรณ์ตรวจสอบการหมุนถูกต่ออยู่ที่เพลาของมอเตอร์ และส่งสัญญาณให้กับวงจรปรับสภาวะสัญญาณ (Signal Conditioner) ส่งกลับให้คอมพิวเตอร์ในลักษณะการป้อนกลับ เพื่อให้รับรู้ถึงตำแหน่งของตัวหมุนและความเร็ว โดยผู้ใช้จะต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็น ได้แก่ค่าคงที่ของขั้วแม่เหล็ก จำนวนขององศาต่อเฟส (Degree per Step Size), และความเร็วที่ต้องการ ซึ่งสามารถกำหนดให้เป็นแบบปริมาณเชิงเลข (Numerical) หรือระดับแรงดันที่เป็นสัดส่วนกับความเร็ว (Speed Command or Voltage Command) ส่วนรูปที่ 2 เป็นวิธีการของพัลส์วิตท์มอดดูเลชั่น (Pulse Width Modulation)

ในรูปที่ 3 เป็นบล็อกไดอะแกรมของหน่วยพัลส์วิตท์มอดดูเลชั่นและหน่วยขับแบบสวิตช์ เพื่อผ่านแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันกำลังให้กับขดลวดของสเตปป์มอเตอร์สองชุด คือขดลวดทั้งสองชุดจะถูกควบคุมให้ปริมาณกระแสที่ไหลในขดลวดเป็นไปตามค่าที่กำหนด โดยหน่วยมินิสเตปเป็นตัวกำเนิดสัญญาณแรงดันไซน์ชอยด์ ซึ่งแรงดันนี้ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นจากไมโครโปรเซสเซอร์ โดยส่งข้อมูลผ่านหน่วยเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก (Digital to Analog)

ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของสเตปป์มอเตอร์อยู่ในช่วง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ความถี่นี้ทำให้ความเร็วรอบของเพลาสเตปป์มอเตอร์อยู่ในช่วง 600 รอบต่อนาที การควบคุมการไหลของกระแสของหน่วยขับ



รูปที่ 2 วงจรพัลส์วิตท์มอดดูเลชั่น



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมของหน่วยพัลส์วิตท์มอดดูเลชั่นและหน่วยขับแบบสวิตช์

แบบสวิตช์และหน่วยพัลส์วิตท์มอดดูเลชั่นจะรับสัญญาณแรงดันต้นคกรวมที่ตัวต้านทาน เพื่อใช้เป็นตัวตรวจจกระแส (Current Pickup Resistor) ซึ่งสัญญาณนี้เรียกว่า สัญญาณป้อนกลับกระแส ความแตกต่างของสัญญาณแรงดันกระแสป้อนกลับและแรงดันสัญญาณที่สังเคราะห์จากหน่วยมินิสเตปจะเป็นผลทำให้หน่วยพัลส์วิตท์มอดดูเลชั่นส่งสัญญาณควบคุมการเปิด-ปิดเป็นสัดส่วนกับค่าความต่างนั้นไปควบคุมหน่วยขับแบบสวิตช์เป็นผลทำให้กระแสที่ไหลในขดลวดมีค่าขึ้นอยู่กับแรงดันที่ได้จากการสังเคราะห์ของหน่วยมินิสเตป ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$I_m = (V_m / L)t$$

เมื่อ I_m คือการเพิ่มขึ้นของกระแสในขดลวดเป็นกระแสชั่วขณะ

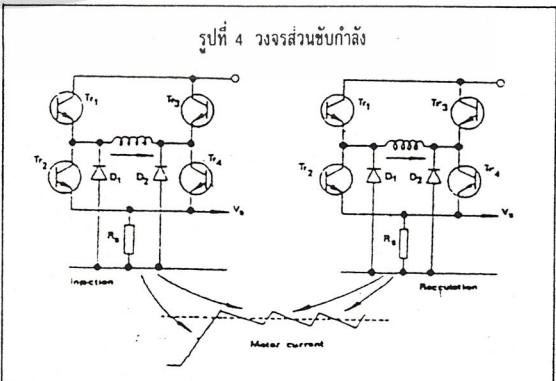
V_m คือแรงดันกำลัง

L คือค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตปป์มอเตอร์

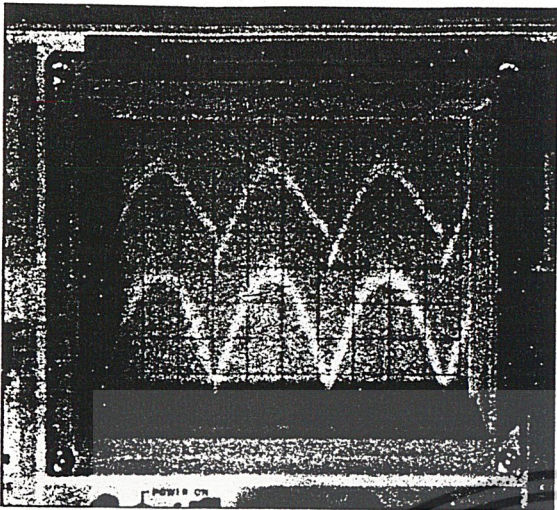
t คือคาบเวลาของสภาวะสวิตช์ปิดวงจร

อย่างไรก็ตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3 แสดงเพื่อที่จะอธิบายถึงหลักการการทำงานของหน่วยขับแบบสวิตช์เท่านั้น หน่วยขับแบบสวิตช์ได้ถูกออกแบบให้มีลักษณะของการทำงานแบบฟูลบริดจ์ (Full Bridge) ทั้งนี้เพื่อให้มีการถ่ายเทพลังงานเข้า-ออกจากตัวเหนี่ยวนำได้สองทิศทาง โดยไม่ต้องกลับขั้วของตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถที่จะควบคุมการไหลของกระแสในขดลวดที่ไหลในขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ให้เป็นได้ทั้งในเชิงบวก และเชิงลบ

รูปที่ 4 เป็นลักษณะของการสร้างสวิตช์ของหน่วยขับแบบสวิตช์ ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกเป็นการปล่อยกระแสให้ไหลเข้าสู่ขดลวด (Injection) ในเวลาที่ T_r และ T_r นำกระแส และในขั้นตอนที่ 2 คือดึงพลังงานที่สะสมไว้ในขดลวด (Reculation) ของสเตปป์มอเตอร์



รูปที่ 4 วงจรส่วนขับเคลื่อน

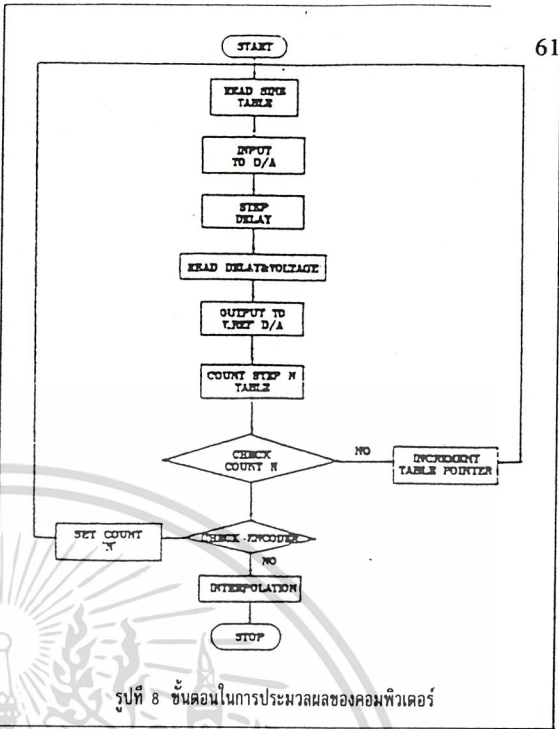
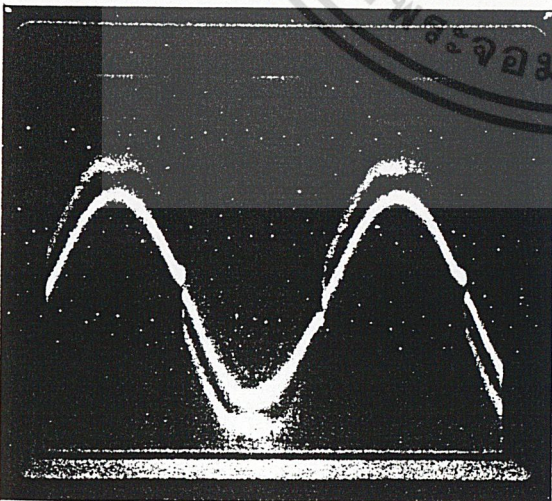


รูปที่ 5 รูปแรงดันไขวชอยค้ำอิงเปรียบเทียบกับกระแสที่ตรงจับ



รูปที่ 6 แรงดันไขวชอยค้ำอิงกับการสวิตซ์ก้อให้เกิดการไหลของกระแสในวงจร

รูปที่ 7 ผลลัพธ์ของกระแสที่ขดลวดมอเตอร์



รูปที่ 8 ขั้นตอนในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์

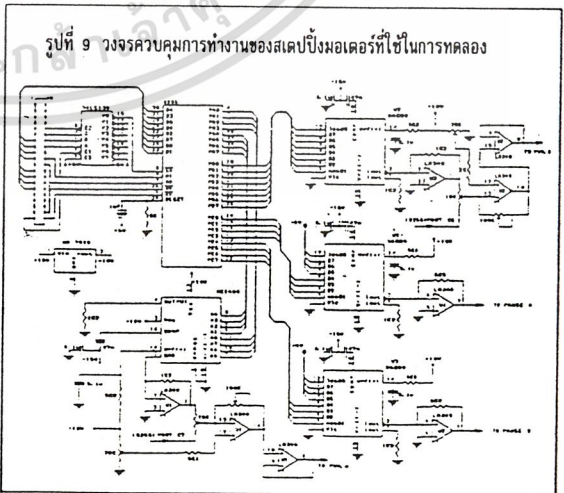
เตอร์ โดย T_r และไดโอด D ,

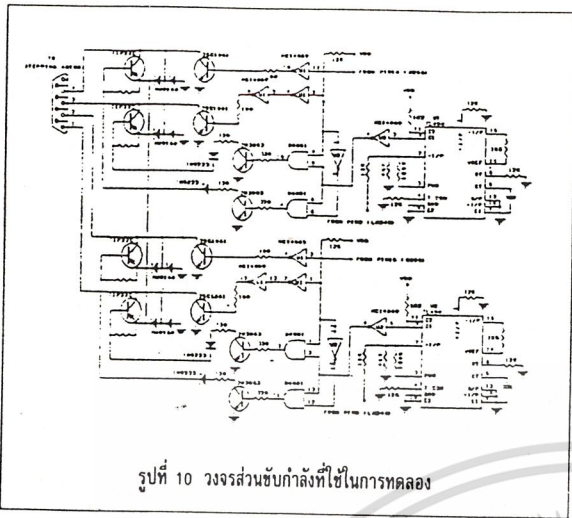
ผลของการสวิตซ์ข้างต้น เมื่อวัดแรงดันตกคร่อมที่ความต้านทานตรงจับกระแส (Rs) แรงดันที่ได้จะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไขวชอยค้ำอิง แต่มีเฉพาะรูปคลื่นสัญญาณในชีกบวเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 5 ในขณะที่เดียวกันหน่วยมินิสเตปจะทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลของกระแส โดยการสลับการทำงานระหว่าง T_1 กับ T_3 และที่ T_4 กับ T_2 ซึ่งสัญญาณที่ได้จากการสลับขั้วไปมา เป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 6 ผลที่ได้จากการสลับขั้วไปมาจะทำให้กระแสที่ไหลในขดลวดมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไขวชอยค้ำอิง ดังรูปที่ 7

4. ลำดับขั้นตอนการประมวลผลของคอมพิวเตอร์

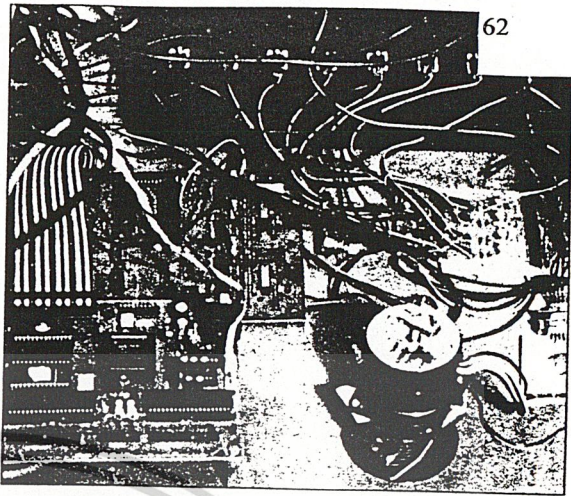
แสดงได้ด้วยแผนผังการทำงานในรูปที่ 8

รูปที่ 9 วงจรควบคุมการทำงานของสเปปมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง





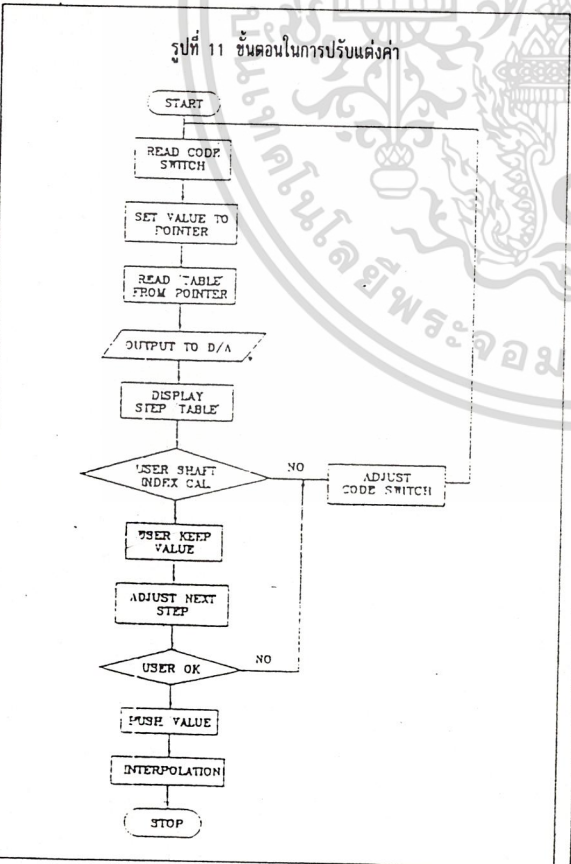
รูปที่ 10 วงจรส่วนขับเคลื่อนที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 12 ระบบที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้

5. ผลการทดลอง

จากการทดลอง เนื่องจากขดลวดแม่เหล็กของสเตปป์มอเตอร์ไม่ได้ถูกออกแบบมาให้มีลักษณะการกระจายความเข้มของสนามแม่เหล็กเป็นแบบเคลื่อนรูปไซนูซอยด์ เมื่อป้อนแรงดันรูปไซนูซอยด์แล้วจึงทำให้เกิดการกระตุก ดังนั้นจึงได้ทำการแก้ไขโดยการปรับแต่งตารางค่าไซนูซอยด์ขึ้นมาใหม่ โดยจะใช้วิธีการสังเคราะห์ขึ้นเอง และใช้ตารางค่าไซนูซอยด์เดิมเป็นตัวอ้างอิงในการปรับค่าในตารางให้เหมาะสมต่อการเคลื่อนที่ในแต่ละเฟส ซึ่งวิธีการปรับแต่งค่าหรือการแก้ค่านั้น เป็นหน้าที่ของโปรแกรม ดังแสดงในแผนผังการทำงานในรูปที่ 11



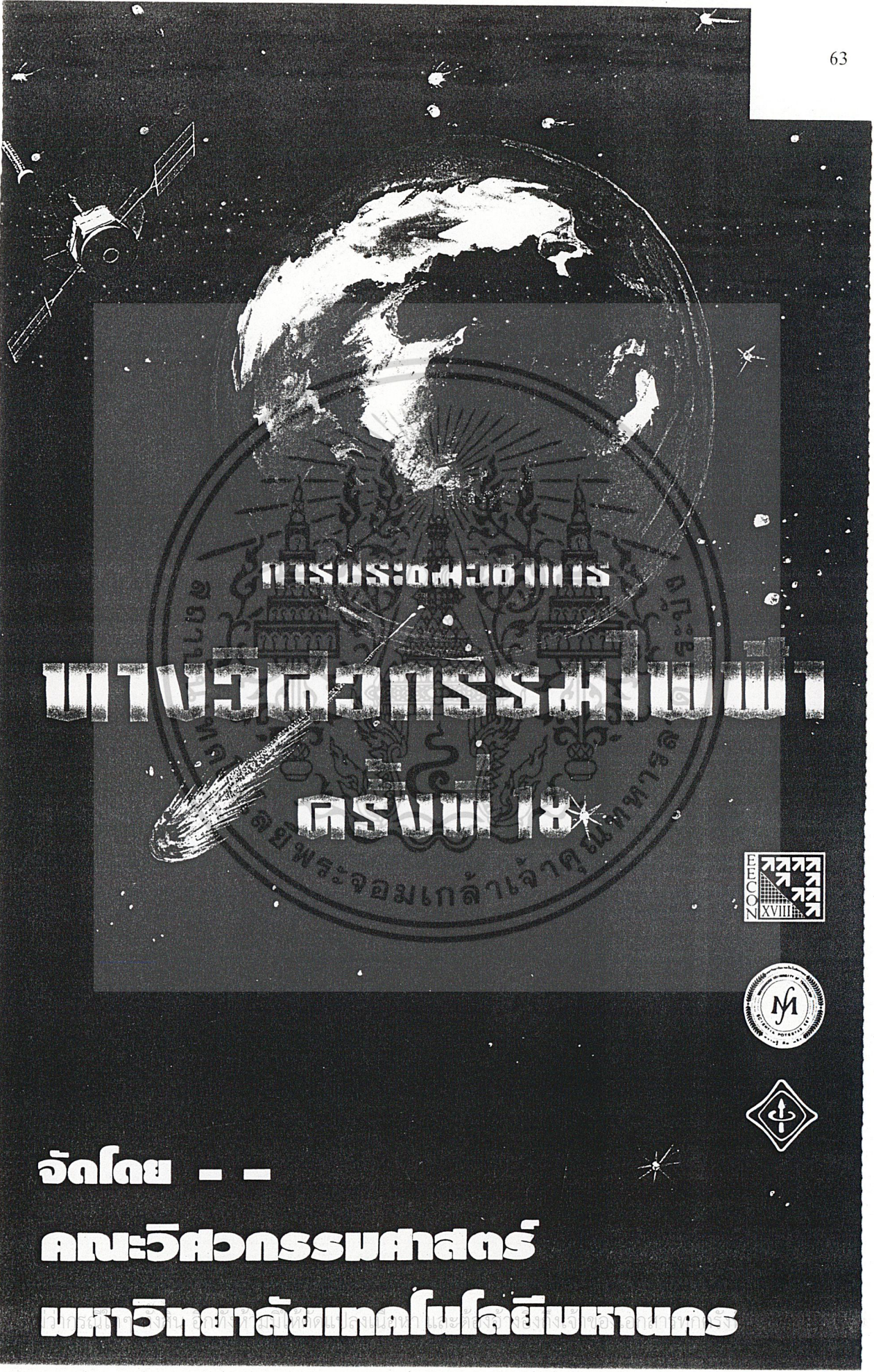
เมื่อทำการปรับแต่งตารางค่าไซนูซอยด์แล้วทำการทดลองโดยให้สเตปป์มอเตอร์เดินรอบค่า ที่ความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ ถึง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยขับกระแสรูปไซนูซอยด์ขนาดความละเอียด (Resolution) 256 ระดับ ขนาดขั้นแม่เหล็ก 1.8 องศา ต่อหนึ่งสเตป ความสูงของกระแสสูงสุด (I_{max}) 1.2 แอมป์ (Ampere) สามารถให้ผลของการหมุนปรากฏที่เพลาได้อย่างราบเรียบและการสิ้นสะท้อนค่า การทดสอบแรงบิด (Torque) ทำโดยการดูดภาระ (Load) ขนาด 10 กิโลกรัมที่โต๊ะเคลื่อนแบบใช้เกียร์ขับเคลื่อนขนาด 2.5 มิลลิเมตรตรอบรอบ สามารถทำได้โดยไม่เกิดการเลื่อนไถล ซึ่งเมื่อเทียบกับสเตปป์มอเตอร์ตัวเดียวกัน เมื่อป้อนกระแสเป็นลำดับแบบพัลส์ (Pulse) ผลตอบสนองต่อการหมุนที่ได้จะเกิดการเลื่อนไถลในช่วงความถี่ 500 ถึง 600 เฮิร์ตซ์ ตลอดจนเกิดการสิ้นสะท้อนสูงที่ความถี่ต่ำ อย่างไรก็ตามในการทดลองให้สเตปป์มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบประมาณ 1,200 รอบต่อนาทีในระยะเวลาานาน ๆ จะมีการสูญเสียในรูปของความร้อนที่ค่อนข้างสูง อนึ่งการทดลองตามบทความนี้เป็นารทดลองที่ไม่มีภาระป้อนกลับในรูปของตำแหน่งและความเร็ว

6. สรุป

จากผลการทดลองปรากฏว่า สเตปป์มอเตอร์หมุนได้อย่างราบเรียบเป็นที่น่าพอใจ และสามารถนำไปใช้กับสเตปป์มอเตอร์ทั่ว ๆ ไปได้ จากคุณสมบัติดังกล่าวนี้สามารถที่จะนำเอาสเตปป์มอเตอร์ซึ่งมีอยู่มากมายและราคาถูก มาใช้แทนมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) ได้

7. เอกสารอ้างอิง

- (1) ประภาส อุดคคิมพันธ์, วิริยะ กองรัตน์, "มินีสเตปเทคนิคกับคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมสเตปป์มอเตอร์", ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบัน ครั้งที่ 14, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 1991
- (2) B.W. Williams, "Power Electronics Devices, Drivers and Application", Macmillan, 1978.
- (3) David Finney, "Variable Frequency AC Motor Drive System", Peter Peregrins Ltd., 1988.
- (4) K.S. Rajashekar, Joseph Vithyathil, "Protection and Switch Aid Networks for Transistors Bridge Inverters", IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol IE-33, No.2, 1986.
- (5) Takashi Kenjo, "Power Electronics for the Microprocessor Age", OXFORD PRESS, 1990.
- (6) W. Shepher and L.N. Hulley, "Power Electronics and Motor Control", Cambridge University, 1987.



ศาสตราจารย์ ดร.

นางจตุพรพรหมศรี งามนิตย์

คสว. ๓๑๘



จัดโดย - -

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

มอเตอร์กระแสตรงที่ไม่มีแปรงถ่านโดยใช้สเต็ปมิ่งมอเตอร์ DC BUSHLESS MOTOR BY USING STEPPING MOTOR

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

บทคัดย่อ

การใช้เทคนิคในรูปแบบกระแสคลื่นไซน์ควบคุมแรงบิดต่อความเร็วที่เปลี่ยนแปลงให้คงที่ในสเต็ปมิ่งมอเตอร์ จะมีการสูญเสียพลังงานความร้อนสูงถ้าให้มอเตอร์ทำงานอย่างต่อเนื่องที่ความเร็วรอบสูง ในบทความนี้จะเสนอการปรับปรุงเทคนิคการย่อยสเต็ปในรูปแบบกระแสย่อยใหม่ ผลที่ได้จะขจัดข้อเสียและทำงานให้มีคุณสมบัติเทียบเคียงกับมอเตอร์กระแสตรงที่ไม่มีแปรงถ่าน

Abstract

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

บทนำ

การให้กำลังงานในรูปแบบของกระแสขั้วเป็นแกปปัญหาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากการหมุนที่เพลลาของ

มอเตอร์ ซึ่งเป็นผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ มีค่าคงที่ตลอดย่านความเร็วตอบสนองของมอเตอร์ แต่กำลังงานสูญเสียของขดลวดที่อยู่ในรูปของพลังงานความร้อนจะมีค่าสูงขึ้นสัมพันธ์กับความเร็วตอบสนองเช่นกัน แม้ในภาวะที่ไม่มีการขับเคลื่อนเพลลาของมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ก็ตาม การสูญเสียกำลังงานนี้เป็นผลมาจาก กระแสที่ไหลสู่ขดลวดของสเตเตอร์ถูกควบคุมให้มีขนาดสอดคล้องกับตำแหน่งของโรเตอร์และสเตเตอร์ในรูปแบบขั้ว ขณะเดียวกันค่าแรงดันเหนี่ยวนำ จะมีค่าสูงขึ้นสัมพันธ์กับความเร็วตอบสนองที่โรเตอร์ เป็นผลให้กำลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้นโดยที่ความเร็วตอบสนองเป็นความเร็วควบคุมได้จากการกระตุ้นภายนอกดังสมการ

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

I = Current control

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

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

N = Rotor revolution (RPM)

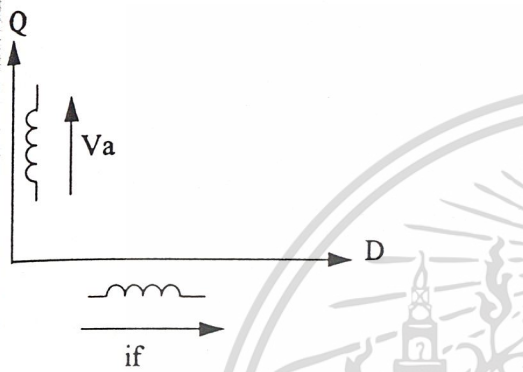
K_1 = Machine constant (DC)

V_S = Supply voltage (DC)

***รองศาสตราจารย์ **อาจารย์ *นักศึกษาริปัญญาโท
ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะต้องจัดลำดับการกระตุ้น ให้สัมพันธ์กับการหมุนของโรเตอร์เทียบกับสเตเตอร์ ที่มุมของเวกเตอร์เส้นแรงแม่เหล็กของสเตเตอร์และโรเตอร์ทำมุม 90 องศาทางแม่เหล็กแสดงได้ดังแกนประสานดังนี้



รูปที่ 1 แสดงแกนประสานเทียบเคียงมอเตอร์กระแสตรงทั่วไป

รูปที่ 1 เป็นแกนประสานที่ใช้เทียบเคียงกับเครื่องจักรไฟฟ้าแบบกระแสตรง สำหรับบทความนี้เลือกสเต็ปिंगมอเตอร์เป็นกรณีศึกษาเนื่องจากโรเตอร์ของมอเตอร์ประเภทนี้เป็นแม่เหล็กถาวรและ สเตเตอร์เป็นแม่เหล็กไฟฟ้า จึงมีการปรับแกนประสานระหว่างแกน D และแกน Q โดยที่แกน D และ Q ของเครื่องจักรไฟฟ้าแบบกระแสตรง จะแสดงถึงสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ

หลักการทํางาน

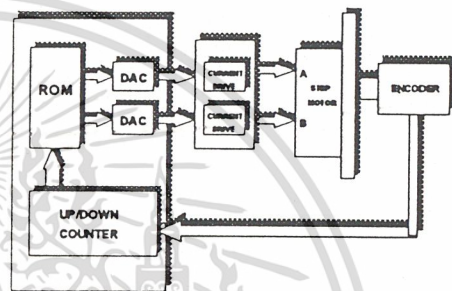
วงจรที่สร้างขึ้นเพื่อทดสอบการทำงานประกอบด้วยหน่วยต่าง ๆ ดังนี้

- หน่วยขับเคลื่อนชนิดบ็อนกัลดแบบ 2 ควอดแรนต์ 2 หน่วย ใช้ขับเคลื่อนชุดขดลวดของสเต็ปिंगมอเตอร์ 2 ขด มีมุมของขั้วแม่เหล็ก 90 องศาทางไฟฟ้า

- หน่วยกำเนิดข้อมูลสัญญาณชานน์ ประกอบด้วยหน่วยความจำแบบอ่านได้อย่างเดียว (ROM), หน่วยนับแบบโปรแกรมได้, หน่วยแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก

(ENCODER)

- หน่วยเข้ารหัสซึ่งติดต่อกับเพลลาของสเต็ปिंगมอเตอร์มีความละเอียด 2000P/R
- สเต็ปिंगมอเตอร์ ที่มีความละเอียด 1.8 องศาต่อสเต็ป ความต้านทานของขดลวด 0.8 โอห์ม



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่จัดสร้างขึ้น

การกำเนิดกระแสรูปชานน์ และโคชานน์จะสัมพันธ์กับตำแหน่งของเพลลาโดยการติดตั้งวงจรเข้ารหัสเชิงมุม ดังนั้นเมื่อเพลลาของมอเตอร์หมุนไป จะเป็นผลทำให้เวกเตอร์ของเส้นแรงแม่เหล็กยังคงทำมุมกับแม่เหล็กถาวร 90 องศาทางไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา ความละเอียดของสัญญาณชานน์ขึ้นอยู่กับขนาดของข้อมูล ซึ่งบรรจุลงในหน่วยความจำแบบอ่านได้อย่างเดียว สามารถหาขนาดข้อมูลได้ดังนี้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดความสูงเชิงมุมในรูปแบบชานีย์ และ โคชานีย์จะถูกขับเข้าสู่ขดลวดของสเต็ปป์มอเตอร์ เพื่อเป็นตัวกำหนดขนาดของกระแส หรือปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กให้กับสเตเตอร์ในขณะที่โรเตอร์ทำมุมกับสเตเตอร์ 0 ถึง 1.8 องศา หรือหนึ่งสเต็ป การเคลื่อนที่ของโรเตอร์เปรียบได้กับมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่านทั่วไป โดยที่แปรงถ่านของมอเตอร์ดังกล่าวนี้เป็นอุปกรณ์ตัดต่อชุดของขดลวดซึ่งพันอยู่บนโรเตอร์ เมื่อเราติดตามทดสอบกระแสในขดลวดระหว่างการเคลื่อนที่จากขั้วแม่เหล็กขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง จะพบว่าปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นรูปแบบของชานีย์เช่นกัน ดังนั้นกระบวนการในการกำหนดกระแสให้กับขดลวดของสเต็ปป์มอเตอร์ เปรียบได้กับอุปกรณ์ตัดต่อชุดขดลวดใน โรเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน ที่เรียกว่า คอมมิวเตเตอร์นั่นเอง

การทดสอบการทำงาน

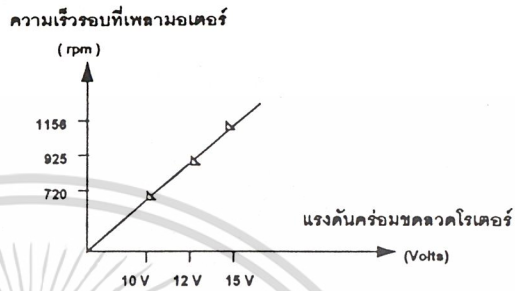
ระบบที่ทำการทดสอบ แสดงดังบล็อกไดอะแกรมที่ 2 โดยมีเงื่อนไขของการทดสอบดังนี้

- กำหนดความละเอียดของรูปแบบกระแสชานีย์และโคชานีย์ออกเป็น 40 ส่วน ที่มุม 0 ถึง 90 องศาทางไฟฟ้า
- กำหนดขดของกระแสชานีย์ไว้ที่ 600 มิลลิแอมป์
- กำหนดแรงดันอิมิตัวของกระแสควบคุมไว้ที่ 10 , 12 และ 15 โวลต์

- การทดสอบการทำงานของมอเตอร์ จะทำการทดสอบเพียง 2 สภาวะได้แก่ การทดสอบสภาวะที่ไม่มีภาระ และการทดสอบภาระลัดครโรเตอร์เท่านั้น

การทดสอบความเร็วตอบสนองต่อแรงดัน โดยการกำหนดแรงดันคร่อมสวิทช์ 10 โวลต์ให้แรงดันขณะมอเตอร์หยุดนิ่ง มอเตอร์สามารถหมุนออกตัวได้อย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นความเร็วรอบของมอเตอร์จะคงที่อยู่ที่ 700 รอบต่ออนาที และเมื่อทดสอบโดยการเปลี่ยน

แรงดันคร่อมสวิทช์เป็น 12 และ 15 โวลต์ ตามลำดับ ผลการทดลองที่ได้สามารถแสดงดังแกนประสานความเร็ว และแรงดันคร่อมสวิทช์ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ของแกนประสานระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันคร่อมสวิทช์

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

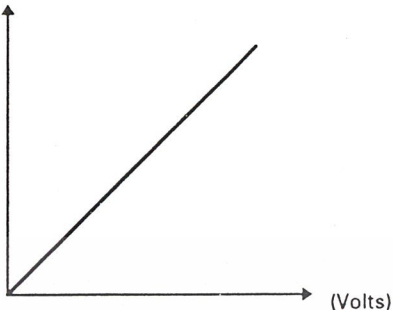
ω = Radius per second

จากสมการที่ 3 สามารถแสดงความสัมพันธ์ของแกนประสานระหว่างความเร็วรอบ กับแรงดันคร่อมขดลวดที่โรเตอร์ได้ดังรูปที่ 4

เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติเดิมของสเต็ปป์มอเตอร์ที่รักษาค่าของกระแสในขณะจ่ายให้กับขดลวดอย่างคงที่ เมื่อทำการกระตุ้นให้โรเตอร์หมุนไปโดยค่อย ๆ เพิ่มความเร็วของมอเตอร์อย่างช้า ๆ พบว่า มอเตอร์เริ่มเสียเสถียรภาพของการซิงโครไนซ์ที่ความเร็วรอบประมาณ 700 - 785 รอบต่ออนาที

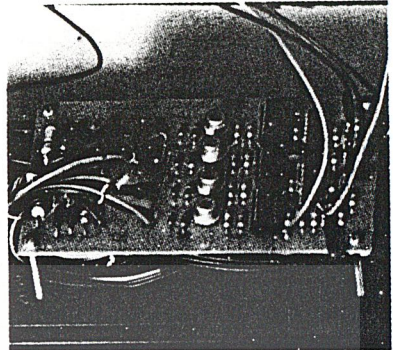
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วรอบที่เพลามอเตอร์
(rpm)



แรงดันตกคร่อมขดลวดมอเตอร์

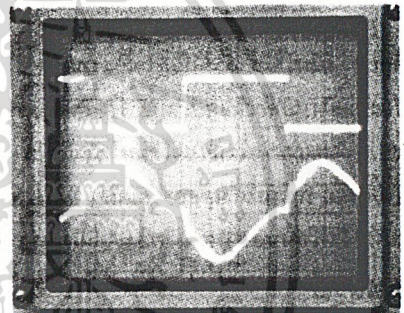
67



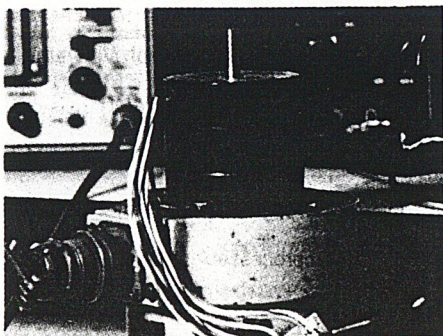
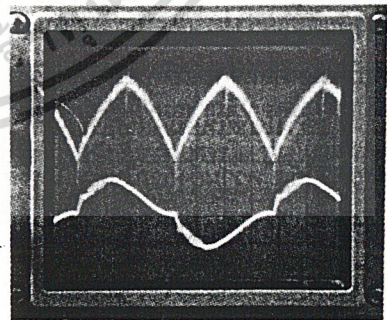
รูปที่ 4 แกนประสานแสดงผลตอบสนอง ความเร็ว
รอบต่อแรงดันของกระแสตรงฟัลด์ชานาน

รูปที่ 6 วงจรขับกระแส

การทดสอบแรงบิด กระทำโดยการล๊อค
โรเตอร์และเริ่มจ่ายแรงดันคร่อมสวิทซ์ 12 โวลท์ พบว่า
ไม่เกิดการเคลื่อนไหวใด ๆ และเมื่อปล่อยโรเตอร์ให้
เป็นอิสระ เพลาของโรเตอร์สามารถหมุนออกตัวด้วย
ความเร็วสูงทันที เมื่อทำการทดสอบเทียบกับวิธีการ
ของสเต็ปป์มอเตอร์ทั่วไป ซึ่งใช้สเต็ปป์ตัวเดียวกัน
นั้น โดยกำหนดความเร็วไว้ที่ 600 รอบต่อนาที การ
ทดสอบในเงื่อนไขเดียวกันหลังจากปล่อยโรเตอร์ให้เป็น
อิสระ เพลาของโรเตอร์จะเกิดการสั่นตัวและไม่มีการ
เคลื่อนที่แต่อย่างใด เนื่องจากมอเตอร์เสียเสถียรภาพ
ของการซิงโครไนซ์ อย่างไรก็ตามการทดสอบแรงบิดนี้ไม่
สามารถทำได้โดยสมบูรณ์ เนื่องจากขาดเครื่องมือที่ใช้
ในการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์ขนาดเล็ก



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

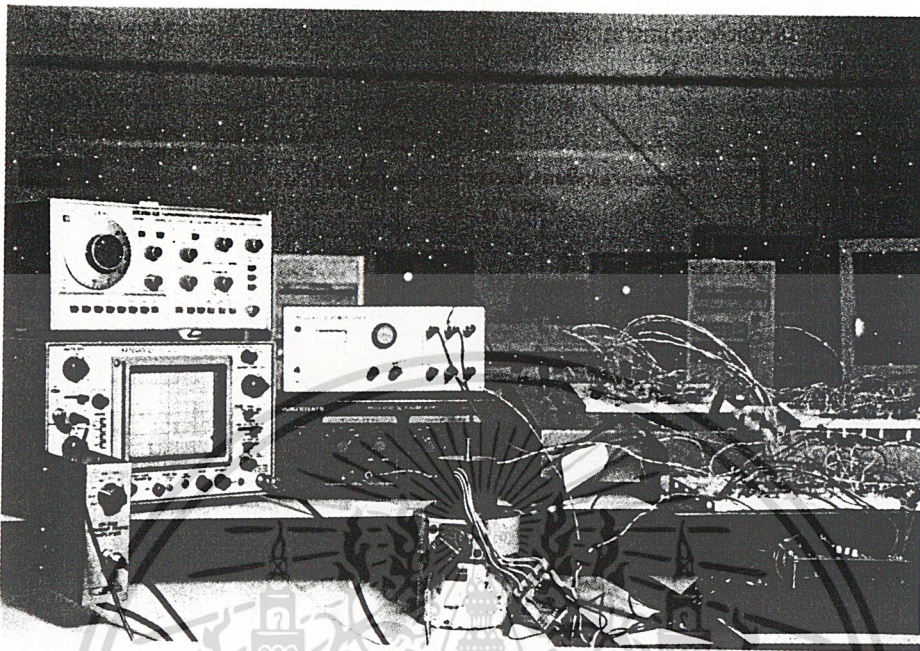


รูปที่ 8 แสดงกระแสในขดลวด ความถี่
ประมาณ 14 KHz, 5 V_{pp}

รูปที่ 5 รูปแสดงการติดตั้งวงจรเข้ากับ

สเต็ปป์มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 แสดงระบบรวมทั้งหมดที่จัดสร้างขึ้น

บทสรุป

สแต็ปป์มอเตอร์ที่ได้ปรับปรุงเทคนิคการกระตุ้นในรูปแบบของกระแสดังกล่าวทำให้ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลดีขึ้น ผลจากการทดสอบพบว่าคุณสมบัติของแรงบิด และผลตอบสนองความเร็วดีขึ้นอย่างมาก เมื่อเทียบกับคุณสมบัติเดิมของสแต็ปป์มอเตอร์ ที่มีการกระตุ้นโดยวิธีย่อกระแสแบบเดิม อย่างไรก็ตามเทคนิคการกระตุ้นกระแสที่ได้อีกกล่าวในบทความนี้ยังมีความยุ่งยากในด้านโครงสร้างของอุปกรณ์เข้ารหัส ซึ่งต้องใช้อุปกรณ์เข้ารหัสความละเอียดสูง และต้องมีการปรับตำแหน่งของขั้วแม่เหล็ก ให้มีความสอดคล้องกับวงจรนับก่อนการใช้งาน หากได้มีการพัฒนาเอาอุปกรณ์เข้ารหัสแบบสังกะสี มาใช้กับเทคนิคที่ได้กล่าวมาแล้วนี้ คาดว่าสามารถที่จะนำเอามอเตอร์ชนิดนี้ไปใช้ในงานเชิงอุตสาหกรรมได้อย่างแน่นอน

เอกสารอ้างอิง

[1] ปรึกษา อุดคคิมาพันธ์, วิริยะ กองรัตน์, "มินิสแต็ปเทคนิคกับคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมสแต็ปป์มอเตอร์"

ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบัน ครั้งที่ 14, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 1991

[2] วิศรุต ศรีรัตน์นะ, ปรึกษา อุดคคิมาพันธ์, รศ.พิพัฒน์ เลานสงคราม, "มินิสแต็ปเทคนิคสำหรับสแต็ปป์มอเตอร์ในรูปแบบกระแส, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย", 1992

[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, 1986

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

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

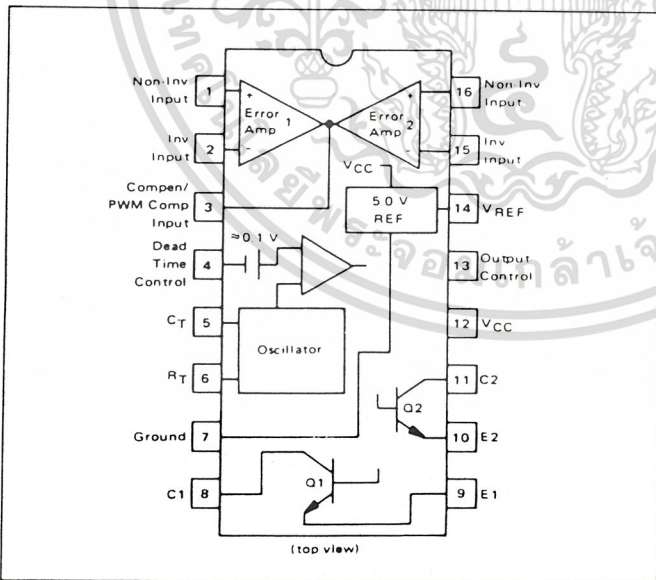
MOTOROLA
SEMICONDUCTOR
TECHNICAL DATA

3

**SWITCHMODE
PULSE WIDTH MODULATION
CONTROL CIRCUITS**

The TL494 is a fixed frequency, pulse width modulation control circuit designed primarily for Switchmode power supply control. This device features:

- Complete Pulse Width Modulation Control Circuitry
- On-Chip Oscillator With Master Or Slave Operation
- On-Chip Error Amplifiers
- On-Chip 5 Volt Reference
- Adjustable Dead-Time Control
- Uncommitted Output Transistors Rated to 500 mA Source Or Sink
- Output Control For Push-Pull Or Single-Ended Operation
- Undervoltage Lockout



The TL494C is specified over the commercial operating range of 0°C to 70°C. The TL494I is specified over the industrial range of -25°C to 85°C. The TL494M is specified over the full military range of -55°C to 125°C.

TL494

**SWITCHMODE
PULSE WIDTH MODULATION
CONTROL CIRCUITS**

SILICON MONOLITHIC
INTEGRATED CIRCUITS



J SUFFIX
CERAMIC PACKAGE
CASE 620



N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 648

ORDERING INFORMATION

Device	Temperature Range	Package
TL494CN TL494CJ	0° to +70°C	Plastic DIP Ceramic DIP
TL494IN TL494IJ	-25° to +85°C	Plastic DIP Ceramic DIP
TL494MJ	-55° to +125°C	Ceramic DIP

TL494

FIGURE 1 — BLOCK DIAGRAM

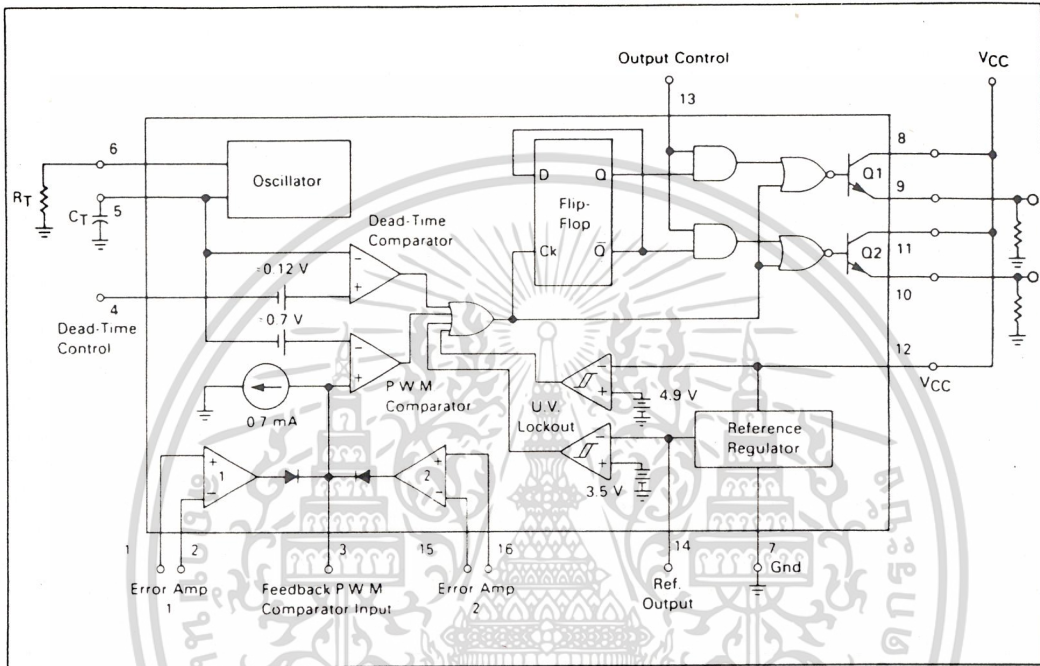
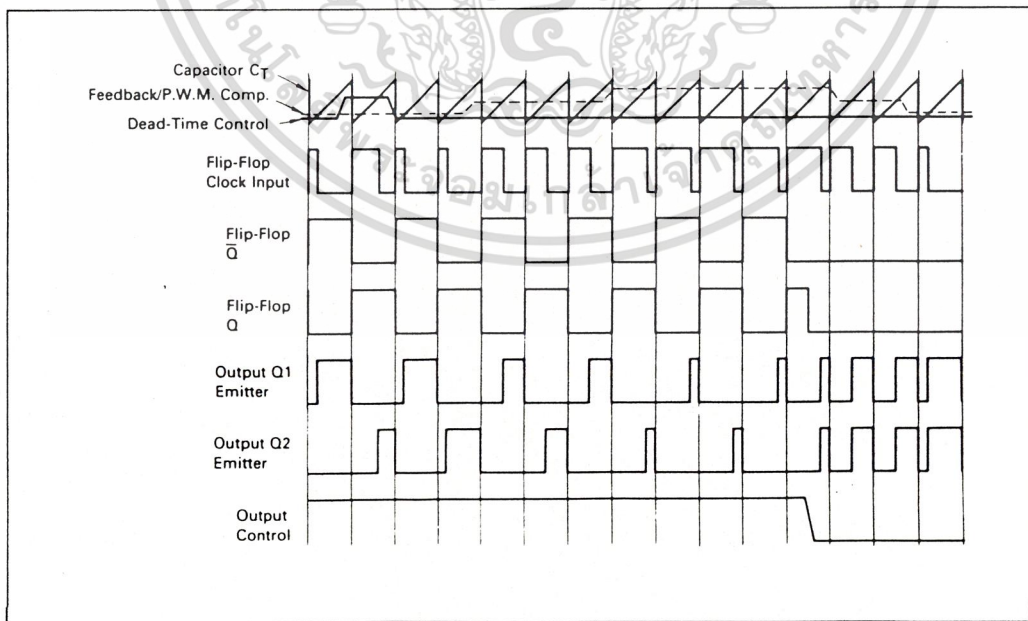


FIGURE 2 — TIMING DIAGRAM



MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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:

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

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	$f_{out} = f_{osc}$
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 (at $T_A \leq 45^\circ\text{C}$)	P_D	1000	1000	1000	mW
Operating Junction Temperature	T_J				$^\circ\text{C}$
Plastic Package		125	125	—	$^\circ\text{C}$
Ceramic Package		150	150	150	$^\circ\text{C}$
Operating Ambient Temperature Range	T_A	0 to 70	-25 to 85	-55 to 125	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{stg}				$^\circ\text{C}$
Plastic Package		-55 to 125	-55 to 125	—	$^\circ\text{C}$
Ceramic Package		-65 to 150	-65 to 150	-65 to 150	$^\circ\text{C}$

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	$R_{\theta JA}$	80	100	$^\circ\text{C}/\text{W}$
Derating Ambient Temperature	T_A	45	50	$^\circ\text{C}$

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	k Ω
Timing Capacitor	C_T	0.0047	0.001	10	μF
Oscillator Frequency	f_{osc}	1.0	40	200	kHz

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	TL494C,I			TL494M			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	

REFERENCE SECTION

Reference Voltage ($I_O = 1.0\ \text{mA}$)	V_{ref}	4.75	5.0	5.25	4.75	5.0	5.25	V
Line Regulation ($V_{CC} = 7.0\ \text{V}$ to $40\ \text{V}$)	Reg_{line}	—	2.0	25	—	2.0	25	mV
Load Regulation ($I_O = 1.0\ \text{mA}$ to $10\ \text{mA}$)	Reg_{load}	—	3.0	15	—	3.0	15	mV
Short-Circuit Output Current ($V_{ref} = 0\ \text{V}$)	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	TL494C,I			TL494M			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
OUTPUT SECTION								
Collector Off-State Current ($V_{CC} = 40\text{ V}$, $V_{CE} = 40\text{ V}$)	$I_{C(off)}$	—	2.0	100	—	2.0	100	μA
Emitter Off-State Current ($V_{CC} = 40\text{ V}$, $V_C = 40\text{ V}$, $V_E = 0\text{ V}$)	$I_{E(off)}$	—	—	100	—	—	150	μA
Collector-Emitter Saturation Voltage (2) Common-Emitter ($V_E = 0\text{ V}$, $I_C = 200\text{ mA}$)	$V_{SAT(C)}$	—	1.1	1.3	—	1.1	1.5	V
Emitter-Follower ($V_C = 15\text{ V}$, $I_E = -200\text{ mA}$)	$V_{SAT(E)}$	—	1.5	2.5	—	1.5	2.5	V
Output Control Pin Current Low State ($V_{OC} \leq 0.4\text{ V}$)	I_{OCL}	—	10	—	—	10	—	μA
High State ($V_{OC} = V_{ref}$)	I_{OCH}	—	0.2	3.5	—	0.2	3.5	mA
Output Voltage Rise Time Common-Emitter (See Figure 13) Emitter-Follower (See Figure 14)	t_r	—	100	200	—	100	200	ns
Output Voltage Fall Time Common-Emitter (See Figure 13) Emitter-Follower (See Figure 14)	t_f	—	25	100	—	25	100	ns

Characteristic	Symbol	TL494			Unit
		Min	Typ	Max	

ERROR AMPLIFIER SECTIONS

Input Offset Voltage (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	V_{IO}	—	2.0	10	mV
Input Offset Current (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	I_{IO}	—	5.0	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 ($\Delta V_O = 3.0\text{ V}$, $V_O = 0.5\text{ to }3.5\text{ V}$, $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	A_{VOL}	70	95	—	dB
Unity-Gain Crossover Frequency ($V_O = 0.5\text{ to }3.5\text{ V}$, $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	f_c	—	350	—	kHz
Phase Margin at Unity-Gain ($V_O = 0.5\text{ to }3.5\text{ V}$, $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	ϕ_m	—	65	—	deg
Common-Mode Rejection Ratio ($V_{CC} = 40\text{ V}$)	CMRR	65	90	—	dB
Power Supply Rejection Ratio ($\Delta V_{CC} = 33\text{ V}$, $V_O = 2.5\text{ V}$, $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	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) ($V_{Pin\ 4} = 0\ \text{to}\ 5.25\ \text{V}$)	$I_{IB}\ (\text{DT})$	—	-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* ($C_T = 0.001\ \mu\text{F}$, $R_T = 30\ \text{k}\Omega$)	$\sigma_{f_{osc}}$	—	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. //

$$\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

FIGURE 4 -- OSCILLATOR FREQUENCY versus TIMING RESISTANCE

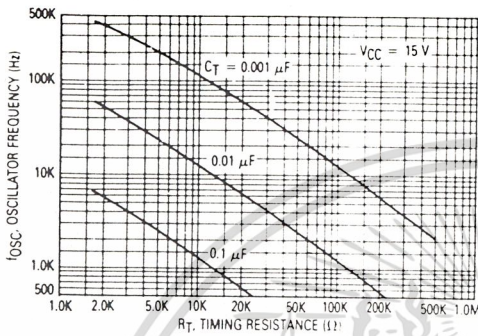


FIGURE 5 -- OPEN-LOOP VOLTAGE GAIN AND PHASE versus FREQUENCY

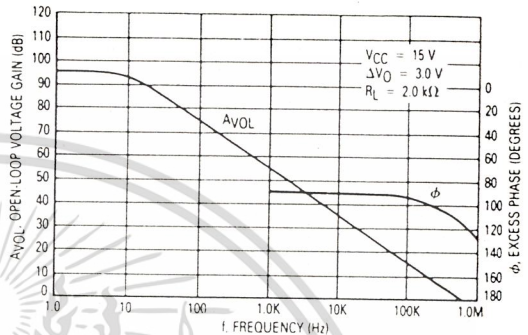


FIGURE 6 -- PERCENT DEAD-TIME versus OSCILLATOR FREQUENCY

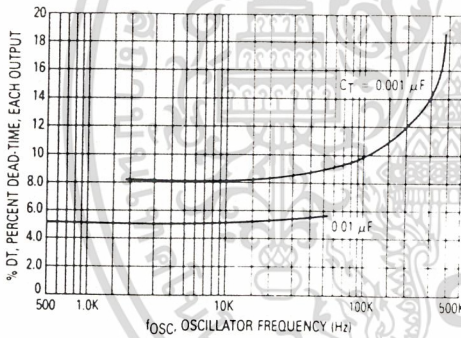


FIGURE 7 -- PERCENT DUTY CYCLE versus DEAD-TIME CONTROL VOLTAGE

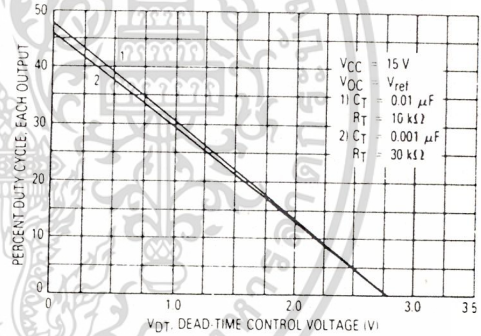


FIGURE 8 -- EMITTER FOLLOWER CONFIGURATION OUTPUT SATURATION VOLTAGE versus EMITTER CURRENT

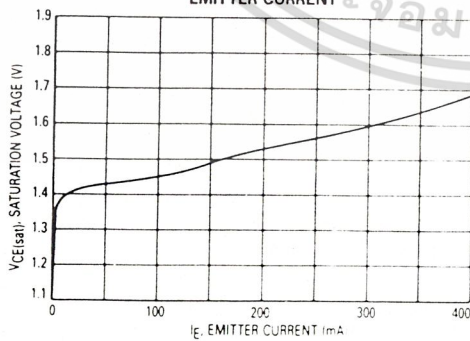
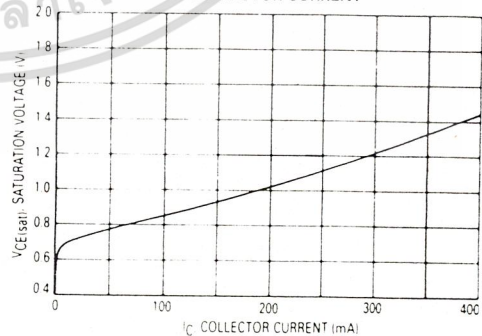


FIGURE 9 -- COMMON EMITTER CONFIGURATION OUTPUT SATURATION VOLTAGE versus COLLECTOR CURRENT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

FIGURE 15 — ERROR-AMPLIFIER SENSING TECHNIQUES

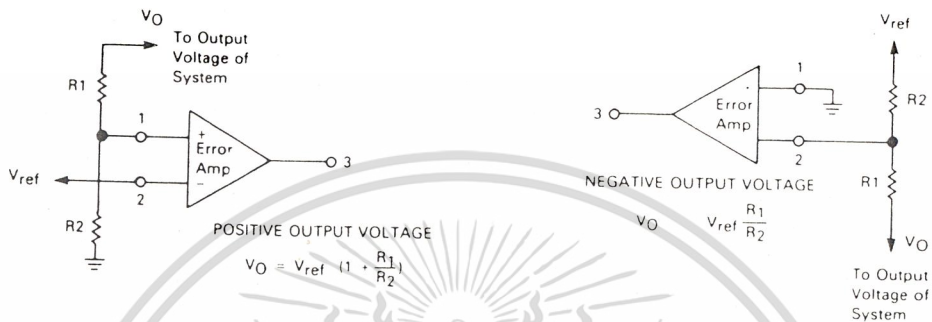
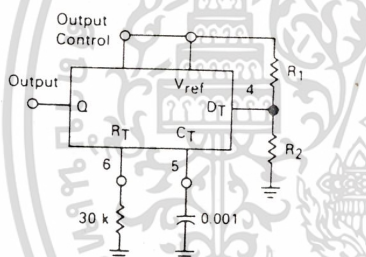


FIGURE 16 — DEAD-TIME CONTROL CIRCUIT



Max % on Time, Each Output = $45 \left(\frac{80}{1 + \frac{R_1}{R_2}} \right)$

FIGURE 17 — SOFT-START CIRCUIT

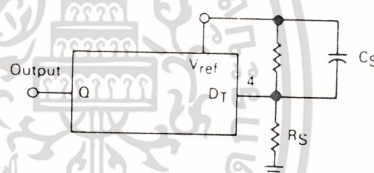
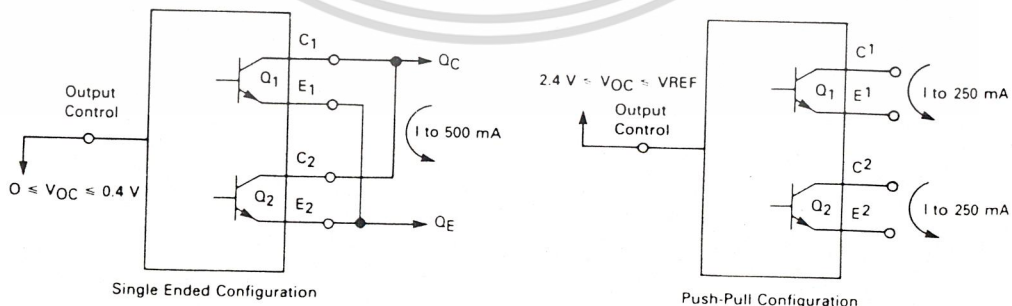


FIGURE 18 — OUTPUT CONNECTIONS FOR SINGLE-ENDED AND PUSH-PULL CONFIGURATIONS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

FIGURE 19 — SLAVING TWO OR MORE CONTROL CIRCUITS

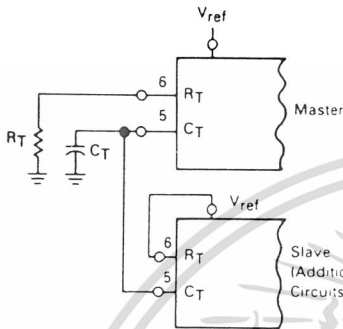


FIGURE 20 — OPERATION WITH $V_{IN} > 40$ V USING EXTERNAL ZENER

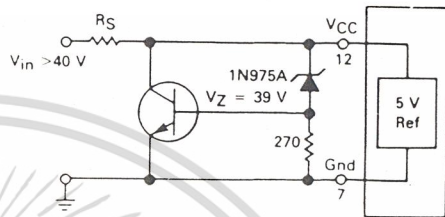
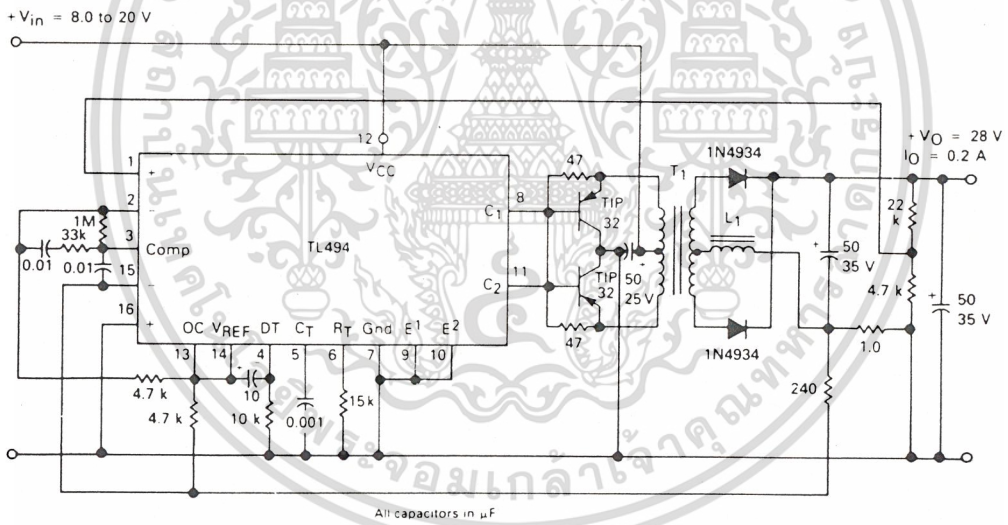


FIGURE 21 — PULSE-WIDTH MODULATED PUSH-PULL CONVERTER



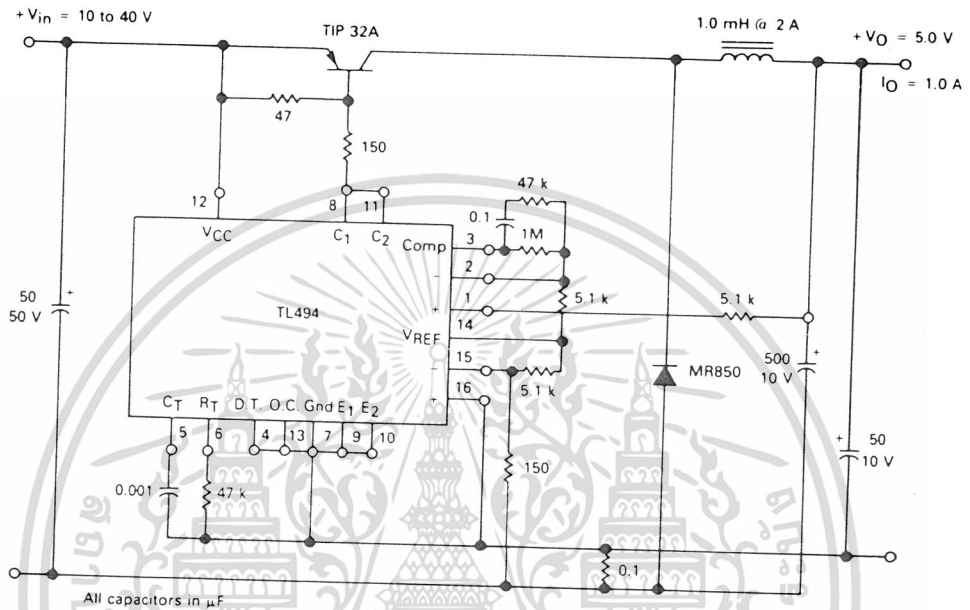
- L1 — 3.5 mH (α 0.3 A)
- T1 — Primary: 20T C.T. #28 AWG
Secondary: 120T C.T. #36 AWG
Core: Ferroxcube 1408P-L00-3C8

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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายวิสูตร ศรีรัตนะ เกิดวันอังคารที่ 6 มกราคม พ.ศ. 2513 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี พ.ศ. 2535 ผลงานทางวิชาการที่เป็นที่ยอมรับและได้รับการตีพิมพ์ ได้แก่ บทความวิจัยในวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ปีที่ 45 เล่มที่ 8 เรื่องมินิสเตปเทคนิคสำหรับสเตปปีงมอเตอร์ในรูปแบบกระแส, บทความวิจัยในประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบัน ครั้งที่ 18 เรื่องมอเตอร์กระแสตรงที่ไม่มีแปรงถ่านโดยใช้สเตปปีงมอเตอร์ เคยได้รับทุนสนับสนุนการทำวิจัยจากมูลนิธิเพื่อการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร (C&C) เป็นเงินจำนวนหนึ่ง ปัจจุบันรับราชการอยู่ที่ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

