

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การขับเคลื่อนมอเตอร์ในโหมดไมโครสเตปแบบวงจรเปิด

**THE APPROCH TO DRIVE STEPPING MOTOR
IN MICROSTEP WITH OPENLOOP**



นายพีรศักดิ์	ยอดทอง
นายวัฒนา	อุณหวนิชย์
นายสุรัชย์	แก้วใจจง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วันเดือนปี 7 เม.ย. 2548

.....
.....

**THE APPROCH TO DRIVE STEPPING MOTOR
IN MICROSTEP WITH OPENLOOP**

**PEERASUK YODTONG
WATTANA UNHAVANIT
SURACHAI KAEWJAIJONG**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
DEPARTMENT OF INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2003

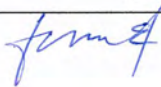
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท การขับสเตปปีงมอเตอร์ในโหมดไมโครสเตปแบบวงจรเปิด
THE APPROCH TO DRIVE STEPPING MOTOR
IN MICROSTEP WITH OPENLOOP

นักศึกษาผู้จัดทำ นายพีรศักดิ์ ยอดทอง รหัสประจำตัว 44015434
นายวัฒนา อุณหวิชัย รหัสประจำตัว 44015443
นายสุรชัย แก้วใจจง รหัสประจำตัว 44015451

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
ปีการศึกษา 2546

อาจารย์ควบคุมปริญญาโท	ลายมือชื่อ
อาจารย์เชื้อ นกอยู่	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 23 มีนาคม พ.ศ. 2547
สถานที่สอบ ณ ห้องสอบปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

ภาควิชารับรองแล้ว



(รศ. ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญาานิพนธ์	การขับสเตปปีงมอเตอร์ในโหมดไมโครสเตปแบบวงจเปิด
	THE APPROCH TO DRIVE STEPPING MOTOR IN MICROSTEP WITH OPENLOOP
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายพีรศักดิ์ ยอดทอง นายวัฒนา อุดมวิชัย นายสุรชัย แก้วใจจง
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์เชื้อ นกอยู่
ปีการศึกษา	2546

บทคัดย่อ

ขนาดสเตปของสเตปปีงมอเตอร์โดยทั่วๆ ไปจะมีขนาดเล็กสุดประมาณ 0.5 องศาของสเตป ซึ่งบางครั้งอาจจะใหญ่เกินไปในการที่จะนำไปใช้ในงานบางประเภทเช่น ในระบบของเครื่องพิมพ์ของเครื่องพล็อตเตอร์หรือระบบแขนกล เป็นต้น อีกทั้งการใช้งานของสเตปปีงมอเตอร์ด้วยขนาดสเตปปกติยังเกิดปัญหาการสั่นหรือเกิดโอเวอร์ชูทของสเตปการเคลื่อนที่ของตัวโรเตอร์ของสเตปปีงมอเตอร์อีกด้วย ดังนั้นเพื่อที่จะเพิ่มความละเอียดให้แก่ขนาดสเตปและลดปัญหาการเกิดโอเวอร์ชูทของตำแหน่งการเคลื่อนที่แกนหมุนสเตปปีงมอเตอร์ จึงมีการขับหรือควบคุมให้สเตปปีงมอเตอร์ทำงานในโหมดไมโครสเตป ซึ่งทำได้โดยการขับสเตปปีงมอเตอร์ทีละสองเฟสหรือมากกว่า ด้วยสัญญาณที่ทำให้กระแสในแต่ละเฟสของสเตปปีงมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนกัน หรือมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสในลักษณะของคลื่นรูปไซน์ ซึ่งได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะทอร์กของสเตปปีงมอเตอร์ด้วยสมการลิเนียร์และไซน์ตามลำดับ แทนการขับด้วยสัญญาณที่มีคุณลักษณะแรงดันคงที่ในโหมดการทำงานปกติของสเตปปีงมอเตอร์แต่เนื่องจากกราฟคุณลักษณะทอร์กของสเตปปีงมอเตอร์จะมีลักษณะที่ไม่เหมือนกันหรือมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้ขนาดไมโครสเตปที่ได้เมื่อขับสเตปปีงมอเตอร์ในโหมดไมโครสเตปด้วยสัญญาณดังกล่าวทั้งสองมีขนาดไม่เที่ยงตรงเท่าที่ควร ดังนั้นปริญาานิพนธ์ฉบับนี้จึงแนะนำการขับสเตปปีงมอเตอร์ในโหมดไมโครสเตปแบบใหม่ด้วยสัญญาณอ้างอิงหรือสัญญาณควบคุมที่ได้จากการทดสอบโดยตรง ซึ่งได้จากการนำไมโครโพรเซสเซอร์มาช่วยในการควบคุมและหาปริมาณการจ่ายกระแสในแต่ละเฟสของสเตปปีงมอเตอร์ เพื่อให้ได้ค่ากระแสอ้างอิงที่เหมาะสมในแต่ละเฟสที่ทุกๆ ตำแหน่งไมโครสเตปย่อยๆ ที่ต้องการ การขับสเตปปีงมอเตอร์ให้ทำงานในโหมดไมโครสเตปด้วยสัญญาณอ้างอิงที่ได้จากการทดสอบโดยตรงนี้จะทำให้ความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสเตปสูงกว่าการขับสเตปปีงมอเตอร์แบบเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	The Approach To Drive Stepping Motor In Microstep With Openloop
Authors	Mr. Peerasuk Yodtong Mr. Wattana Unhavanit Mr. Surachai Kaewjaijong
Thesis Advisor	Mr. Chuae Nokyu
Year	2003

ABSTRACT

Normally, the step size of the conventional stepping motor is not less than 0.5 degree per step. It is too large for certain applications such as printers, plotters, robot arms and etc. Furthermore the operation of stepping motor in the full step size also cause overshoot problem of the rotor position. To eliminate or decrease the problem microstepping is required. The formal methods to stepping motor in microstep excitation mode are driven the stepping motor with the proportional or sinusoidal reference signal. These reference signal are obtained by calculating of linear and sine approximations to stepping motor static torque displacement ($T-\theta$) characteristic curve, respectively. However, the stepping motor static torque –displacement characteristic curve are not identical for each displacement angles. For this reason, the microstep sizes are not quite accurate. The thesis presents a new technique to drive stepping motor in microstep excitation mode called “the approach to drive stepping motor in microstep excitation mode with direct tested signal” This technique takes into account of stepping motor nonlinearities as above mentioned. To find the direct tested signal, the technique based on microprocessor control to quantify the proper current in all windings of stepping motor at every microstep angles and the accuracy of microstep size is observed by an optical encode circuit with interfaced to the microprocessor. The technique gives better accuracy of microstep size when compared to the formal methods obtained from simple linear and sine approximations to torque-displacement characteristic curve.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเพราะได้รับความเมตตาจาก อาจารย์เชื้อ นกอยู่ ที่ได้ให้คำแนะนำแก่ผู้วิจัยตลอดมา อีกทั้งยังเอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ในการทำปริญญา นิพนธ์นี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่าน ที่ได้คำแนะนำอันเป็น ประโยชน์ต่อการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

และที่ลืมเสียมิได้คือ ขอกราบขอบพระคุณคุณแม่ อันเป็นที่รักยิ่ง ที่สนับสนุนและเป็น แรงบันดาลใจในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ(ABSTRACT)	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญภาพ	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 รายละเอียดของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานและหลักการทำงานของสเตปมอเตอร์	4
2.1 บทนำ	4
2.2 โครงสร้างและหลักการทำงานของสเตปมอเตอร์	5
2.2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของสเตปมอเตอร์ชนิดต่าง ๆ	5
2.2.2 ทฤษฎีพื้นฐานและคุณลักษณะของทอร์คของสเตปมอเตอร์	12
2.3 รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของสเตปมอเตอร์	16
2.4 สมการไดนามิกของสเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ได้ชนิดหลายสเตค	17
2.5 การควบคุมการทำงานของสเตปมอเตอร์	18
2.6 หลักการออกแบบวงจรขับเคลื่อนสเตปมอเตอร์	20
2.7 ปัญหาของวงจรขับเคลื่อนสเตปมอเตอร์และการแก้ปัญหา	21
2.7.1 การใช้วงจรจำกัดแรงดันเกิน	21
2.7.2 การใช้เทคนิคของการเพิ่มกระแสตัวอย่างรวดเร็ว	25
2.8 วงจรขับเคลื่อนสเตปมอเตอร์โดยทั่วไป	27
2.8.1 วงจรขับเคลื่อนแบบใช้โวลเตจสองระดับ	27
2.8.2 วงจรขับเคลื่อนแบบชอปเปอร์	28
2.8.3 วงจรขับเคลื่อนแบบบริดจ์	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 วงจรขับสเตปมอเตอร์สำหรับการขับแบบไมโครสเตป	30
2.10 สรุป	33
บทที่ 3 การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาควบคุมการขับสเตปมอเตอร์แบบไมโครสเตป	34
3.1 บทนำ	34
3.2 ส่วนประกอบของระบบการขับสเตปมอเตอร์แบบไมโครสเตปและการควบคุมแบบวงจรเปิด	34
3.3 วงจรของไมโครคอนโทรลเลอร์	35
3.4 วงจรควบคุมการจ่ายกระแสแบบสัดส่วนต่อกัน	37
3.4.1 วงจรภาคแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก	37
3.4.2 วงจรรวมชนิด A/D	39
3.5 ทฤษฎีการทำงานของวงจรมอเตอร์แรงดันเป็นกระแส	44
3.5.1 ข้อเสนอแนะการนำไปใช้งาน	46
3.5.2 การปรับค่าออฟเซตและสเปน	47
3.5.3 การกำหนดลีดแองเกิลสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพในเรื่องทอร์ค	50
3.6 โปรแกรมควบคุมการขับสเตปมอเตอร์แบบต่างๆ	51
3.6.1 โปรแกรมควบคุมการขับสเตปมอเตอร์โดยทั่วไป	51
3.6.2 โปรแกรมควบคุมการขับสเตปมอเตอร์แบบไมโครสเตปโดยใช้สัญญาณควบคุมการเปลี่ยนแปลงกระแสแบบเป็นสัดส่วนต่อกัน	52
3.7 สรุป	53
บทที่ 4 ผลการทดลอง	54
4.1 บทนำ	54
4.2 ลักษณะของสัญญาณควบคุม	54
4.3 ผลการทดลอง	54
4.4 สรุปผลการทดลอง	57
4.5 ข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนาต่อไปในอนาคต	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	59
ภาคผนวก	60
ภาคผนวก ก. แสดงรูปส่วนประกอบของวงจร	60
ภาคผนวก ข. โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 อินพุตเป็นตัวกำหนดผ่านของการรับแรงคั้นแอนะลอกอินพุต	41
4.1 แสดงผลการวัดทอร์ค	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงคอนโทลเลอร์สำหรับควบคุมการทำงานของสเตปมอเตอร์	4
2.2 แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในลักษณะต่าง ๆ	4
2.3 แสดงแรงดึงดูดทำให้เกิดทอร์คที่หมุน โรเตอร์ให้ไปอยู่ที่ตำแหน่งสมดุลย์	5
2.4 แสดงโครงสร้างของสเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร	6
2.5 แสดงการทำงานของสเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรขนาดสี่เฟส	6
2.6 แสดงสเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้	7
2.7 แสดงตำแหน่งสมดุลเมื่อเฟสใดเฟสหนึ่งของสเตปมอเตอร์ถูกกระตุ้น	8
2.8 แสดงการเปลี่ยนลำดับสเตปในการเคลื่อนที่ของสเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้	8
2.9 แสดงโครงสร้างของไฮบริดสเตปมอเตอร์	10
2.10 แสดงหลักการทำงานของไฮบริดสเตปมอเตอร์	11
2.11 รูปแสดงคุณลักษณะทางสเตติกของสเตปมอเตอร์ขนาดสามเฟส	12
2.12 รูปแสดงคุณลักษณะทางไดนามิกของสเตปมอเตอร์	14
2.13 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการขับเคลื่อนสเตปมอเตอร์	19
2.14 แสดงการขับเคลื่อนสเตปมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์และไบโพลาร์	20
2.15 แสดงวงจรสมมูลย์ของสเตปมอเตอร์	21
2.16 วงจรกำจัดแรงดันเกินโดยใช้ไดโอด	22
2.17 แสดงวงจรป้องกันแรงดันเกินโดยใช้ไดโอด-ความต้านทาน	23
2.18 แสดงวงจรป้องกันแรงดันเกินโดยใช้ซีเนเบอร์	24
2.19 แสดงการเพิ่มตัวเก็บประจุที่แต่ละส่วนของวงจรจำกัดแรงดัน	24
2.20 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสต่อเวลาของการใช้วงจรป้องกันแบบต่าง ๆ	25
2.21 แสดงการใช้ความต้านทานต่ออนุกรมกับขดลวดของสเตปมอเตอร์	26
2.22 แสดงผลของการต่อตัวเก็บประจุขนานกับความต้านทาน	26
2.23 แสดงวงจรขับเคลื่อนสเตปมอเตอร์แบบใช้โวลเตจสองระดับ	27
2.24 แสดงวงจรขับเคลื่อนแบบชอปเปอร์	28
2.25 แสดงวงจรขับเคลื่อนแบบบริดจ์สำหรับการขับเคลื่อนแบบไบโพลาร์	29
2.26 แสดงรูปคลื่นของโวลเตจและกระแสของการขับเคลื่อนแบบไบโพลาร์	29
2.27 แสดงอีกรูปแบบหนึ่งของวงจรขับเคลื่อนแบบบริดจ์ซึ่งใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงเดียว	30
2.28 แสดงคุณลักษณะของทอร์คที่เปลี่ยนแปลงเมื่อขับเคลื่อนสเตปมอเตอร์แบบกระตุ้นทีละสองเฟส	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรขับสเตปมอเตอร์แบบไมโครสเตปพร้อมทั้งการควบคุมแบบวงจรเปิด	34
3.2 วงจรของไมโครคอนโทรลเลอร์	36
3.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมการสร้างกระแสแบบเป็นสัดส่วนต่อกัน	37
3.4 แสดงวงจรภาคแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกแสดงเพียง 1 เฟส	38
3.5 การจัดวางขาวงจรรวมเบอร์ ADC 0804	40
3.6 แสดงการต่อ ADC0840 กับระบบไมโครโปรเซสเซอร์และไดอะแกรมเวลาแสดงการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล	42
3.7 แสดงการทดสอบ ADC0804 ทำหน้าที่เป็นตัวแปลง ADC	43
3.8 วงจรวัดแสงด้วย ADC0804	44
3.9 แสดงโครงสร้างของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส	45
3.10 วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสสูง 0 – 10 A	47
3.11 แสดงวงจรขับแบบแปลงโวลเตจเป็นกระแส	48
3.12 วงจร A/D ทั้ง 4 เฟส	49
3.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงของลิตแองเกิลค่าต่างๆ เพื่อเปลี่ยนแปลงค่าทอร์ค	50
3.14 แสดงโฟลว์ชาร์ตควบคุมการขับสเตปมอเตอร์โดยทั่วไป	52
3.15 แสดงโฟลว์ชาร์ตของการขับสเตปมอเตอร์แบบไมโครสเตปโดยใช้สัญญาณควบคุมการเปลี่ยน แปลงกระแสแบบสัดส่วนต่อกัน	52
4.1 แสดงการขับแบบกระตุ้นแบบกระตุ้นทีละสองเฟส โดยเฟสทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสแบบเป็นสัดส่วนต่อกัน และมีขนาดสเตปเท่ากับสเตปปกติ	54
4.2 แสดงการขับแบบกระตุ้น แบบกระตุ้นทีละสองเฟส โดยเฟสทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสแบบเป็นสัดส่วนต่อกัน และมีขนาดสเตปเท่ากับ 1/2 เท่าของสเตปปกติ	55
4.3 แสดงการขับแบบกระตุ้น แบบกระตุ้นทีละสองเฟส โดยเฟสทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงของ กระแสแบบเป็นสัดส่วนต่อกัน และมีขนาดสเตปเท่ากับ 1/4 เท่าของสเตปปกติ	55
4.4 แสดงการขับแบบกระตุ้น แบบกระตุ้นทีละสองเฟส โดยเฟสทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสแบบเป็นสัดส่วนต่อกัน และมีขนาดสเตปเท่ากับ 1/8 เท่าของสเตปปกติ	56
4.5 แสดงการขับแบบกระตุ้น แบบกระตุ้นทีละสองเฟส โดยเฟสทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสแบบเป็นสัดส่วนต่อกัน และมีขนาดสเตปเท่ากับ 1/16 เท่าของสเตปปกติ	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แสดงการขับแบบกระตุ้น แบบกระตุ้นทีละสองเฟสโดยเฟสทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสแบบเป็นสัดส่วนต่อกัน และมีขนาดสลับเท่ากับ $1/256$ เท่าของสลับปกติ	57
ก1 แสดงวงจรขับซึ่งใช้วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสโดยใช้เพาเวอร์มอสเฟตที่ภาคเอาต์พุต	61
ก2 แสดงวงจร Digital to Analog	61
ก3 แสดงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์	62
ก4 แสดงวงจรภาคจ่ายไฟ	62
ก5 แสดงวงจร Analog to Digital	63
ก6 แสดงระบบรวมและการทดสอบของระบบควบคุมมอเตอร์แบบวงจรถูกเปิดโดยใช้หลักการของไมโครสลับ	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

สเตปมอเตอร์คืออุปกรณ์ที่เคลื่อนที่เป็นสเตป โดยการกระตุ้นด้วยวิธีการทางแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลอินพุทซึ่งเป็นสัญญาณพัลส์ ไปเป็นการเคลื่อนที่แบบอนาลอก ที่เอาท์พุท สเตปมอเตอร์บางครั้งถูกเรียกว่าสเตปปีงมอเตอร์หรือสเตปมอเตอร์ คือ อุปกรณ์ซึ่งเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นโดยโวลเตจหรือกระแสซึ่งโดยมากจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เอาท์พุทของสเตปมอเตอร์จะมีจำนวนเท่ากับจำนวนของคำสั่งอินพุท ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์โดย เมื่อป้อนแต่ละพัลส์ให้กับสเตปมอเตอร์จะมีการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้น 1 สเตป

สเตปมอเตอร์มีการใช้งานประมาณ 40 กว่าปีมาแล้ว สมัยก่อนการใช้งานสเตปมอเตอร์มีประสิทธิภาพต่ำสู่อีมอเตอร์และดีซีมอเตอร์ไม่ได้ แต่เมื่อไม่นานมานี้มีการนำดิจิทัลคอมพิวเตอร์เข้ามาใช้จึงได้เปลี่ยนรูปแบบการควบคุมสเตปมอเตอร์ใหม่ โดยใช้การควบคุมโดยไมโครโปรเซสเซอร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งทำให้ใช้งานสเตปมอเตอร์ได้สะดวกขึ้นและมีประโยชน์ในการใช้สอยมากขึ้น ปัจจุบันนี้สเตปมอเตอร์ได้ถูกนำมาใช้ในอุปกรณ์ที่ใช้งานร่วมกับคอมพิวเตอร์เช่น พรินเตอร์ ดิสก์ไดรฟ์ และนอกจากนี้ยังถูกใช้งานในอุปกรณ์ที่ใช้การควบคุมเชิงตัวเลข (numerical control) การควบคุมกระบวนการ (process control) และการควบคุมอุปกรณ์ทางเครื่องมือกล (machine tool control) เป็นต้น

การควบคุมการทำงานของสเตปมอเตอร์โดยทั่วไป ใช้วงจรขับซึ่งให้สเตปมอเตอร์ตอบสนองต่อสัญญาณพัลส์ซึ่งทำให้มอเตอร์เคลื่อนที่เป็นจังหวะต่อเนื่องกัน การเคลื่อนที่ลักษณะนี้ทำให้เกิดการออสซิลเลทระหว่างสเตปมอเตอร์ของการเคลื่อนที่ ทำให้สเตปมอเตอร์สั่นระหว่างใช้งาน การแก้ปัญหาดังกล่าวกระทำได้ด้วยวิธีการแดมป์(damping methods) ของสเตปมอเตอร์[1] ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาตามลักษณะเฉพาะของมอเตอร์แต่ละตัว ส่วนในที่นี้เป็นการศึกษาถึงวิธีการควบคุมการขับสเตปมอเตอร์ ซึ่งสามารถลดการออสซิลเลททางแมคคานิกส์ให้มีขนาดลดลง เทคนิคของไมโครสเตปเป็นวิธีการหนึ่ง ซึ่งใช้แก้ปัญหานี้ ซึ่งนอกจากจะช่วยให้อิเวอรัชทูทในแต่ละสเตปมีขนาดลดลงแล้ว การสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนขณะที่ใช้งานมอเตอร์น้อยลง ซึ่งจะช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ให้นานขึ้น ความน่าเชื่อถือของระบบดีขึ้น และนอกจากนั้นยังเพิ่มความละเอียดของสเตปเชิงมุม เพื่อการควบคุมตำแหน่งที่ละเอียดขึ้นและการควบคุมแบบวงจรมีจะช่วยให้ความถูกต้องแม่นยำทางการควบคุมตำแหน่งดีขึ้น และความ

น่าเชื่อถือได้ของระบบมากขึ้น นอกจากนี้การควบคุมแบบวงจรมีเปิดยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในเรื่องของทอร์กและการตอบสนองต่อความถี่ของสเตปมอเตอร์ให้สูงขึ้นด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาวิธีการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบต่าง ๆ เพื่อการนำสเตปมอเตอร์มาใช้งานให้มีประสิทธิภาพที่สูงสุด
- 2) เพื่อศึกษาการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่สามารถลดการออกซิเดชันทางแมคคานิกส์หรือลดการเกิดโอเวอร์ฮูทในแต่ละสเตปของการเคลื่อนที่ให้น้อยลง
- 3) เพื่อศึกษาวิธีการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ ให้มีความละเอียดของขนาดสเตปเชิงมุมเพิ่มขึ้นหรือให้มีจำนวนสเตปต่อรอบสูงขึ้น
- 4) เพื่อให้มีความถูกต้องแม่นยำ (accuracy) ในการควบคุมตำแหน่งของการเคลื่อนที่ของสเตปมอเตอร์ให้เพิ่มขึ้นโดยการใช้การควบคุมแบบวงจรมีเปิด(open-loop control)
- 5) เพื่อลดการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน (loss) ของระบบให้น้อยลง ทำให้สามารถยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ให้เพิ่มขึ้น และเพิ่มความน่าเชื่อถือได้ของระบบให้มากขึ้น

1.3 รายละเอียดของโครงการ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมา และหลักการใช้งานสเตปมอเตอร์โดยทั่วไป รวมทั้งวัตถุประสงค์และรายละเอียดของการวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงโครงสร้าง และคุณสมบัติพื้นฐานของสเตปมอเตอร์ ในเทอมของคุณลักษณะทางสแตติกและไดนามิก คุณลักษณะในเรื่องของทอร์ก นอกจากนี้ยังกล่าวถึงเรื่องสเตปมอเตอร์ชนิดต่าง ๆ วิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์พื้นฐานโดยทั่วไป และวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไมโครสเตปซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในงานนี้

บทที่ 3 กล่าวถึงการนำไมโครคอนโทรลเลอร์ มาช่วยในการสร้างสัญญาณควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไมโครสเตป โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับอุปกรณ์ทางฮาร์ดแวร์สร้างสัญญาณควบคุมกระแสที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไมโครสเตป

บทที่ 4 แสดงการทดสอบผลของการวิจัย การขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไมโครสเตปและสัญญาณที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบต่าง ๆ

ภาคผนวกประกอบด้วย

- โปรแกรมควบคุมระบบ
- การควบคุมแบบวงจรมีเปิดโดยให้หลักการของเวฟฟอร์มดีเทคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1) ช่วยลดการเกิดการอสชิลเลททางแมคคานิกส์ ซึ่งช่วยในการสั่นของสเตปมอเตอร์ ขณะที่ทำงานหรือขณะที่มีการเคลื่อนที่ลดน้อยลง
- 2) ช่วยในการถูกต้องแม่นยำในการควบคุมตำแหน่ง และช่วยให้เสถียรภาพของระบบดีขึ้น
- 3) ช่วยลดการสูญเสีย (loss) ของระบบในส่วนของวงจรขับในขณะที่ใช้งานสเตปมอเตอร์ และช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์เนื่องจากอุปกรณ์ไม่ต้องทำงานหนักเกินไป
- 4) ช่วยให้ความน่าเชื่อถือได้ (reliability) ของระบบดีขึ้น
- 5) สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานควบคุมที่ต้องการความละเอียดของการควบคุมตำแหน่งมากได้

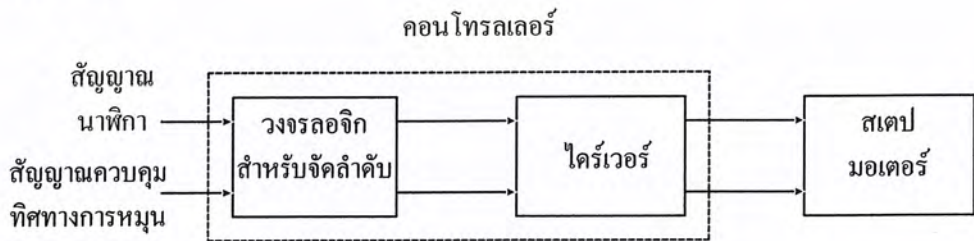
บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานและหลักการทำงานของสเตปมอเตอร์

2.1 บทนำ

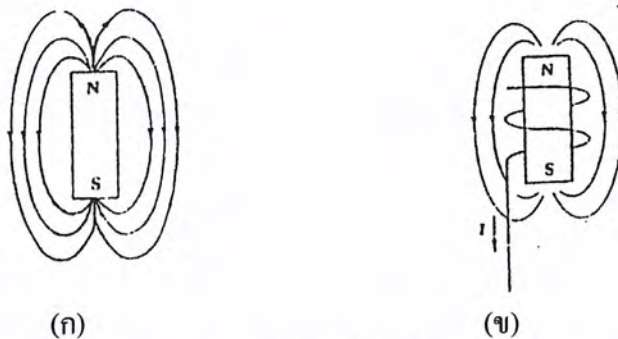
สเตปมอเตอร์แบ่งออกได้เป็นหลายชนิดด้วยกัน เช่น สเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้ (variable-reluctance) สเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร (permanent magnet) สเตปมอเตอร์แบบไฮบริด (hybrid) และสเตปมอเตอร์แบบลิเนียร์ (linear) เป็นต้น แต่ที่ใช้งานกันบ่อยส่วนใหญ่มักจะเป็นแบบสเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้ และสเตปมอเตอร์แบบไฮบริด หลักการทำงานของสเตปมอเตอร์โดยทั่วไป

หลักการพื้นฐานของสเตปมอเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นคอนโทรลเลอร์ ประกอบด้วยวงจรลอจิกจัดลำดับ วงจรขับสัญญาณความถี่อินพุท และสัญญาณควบคุมทิศทางการหมุน คอนโทรลเลอร์ของสเตปมอเตอร์จะอินเทอร์เฟสได้โดยตรงกับไมโครโปรเซสเซอร์ หรือไมโครคอมพิวเตอร์



รูปที่ 2.1 แสดงคอนโทรลเลอร์สำหรับควบคุมการทำงานของสเตปมอเตอร์

ในรูปที่ 2.2 แสดงหลักการพื้นฐานของเส้นแรงแม่เหล็ก



รูปที่ 2.2 แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในลักษณะต่าง ๆ

ก) สนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวร

ข) สนามแม่เหล็กของแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแส I

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 โครงสร้างและหลักการทำงานของสเตปมอเตอร์

จากรูป แท่งแม่เหล็กถาวรติดอยู่บนเพลลา และสามารถหมุนได้อย่างอิสระในขณะที่ไม่มีขั้วไฟฟ้าที่สเตเตอร์ ถ้าก่อนมีขั้วไฟฟ้าตำแหน่งของโรเตอร์แม่เหล็กอยู่ตามแกน a-a' ซึ่งทำมุม θ กับแกนของขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า

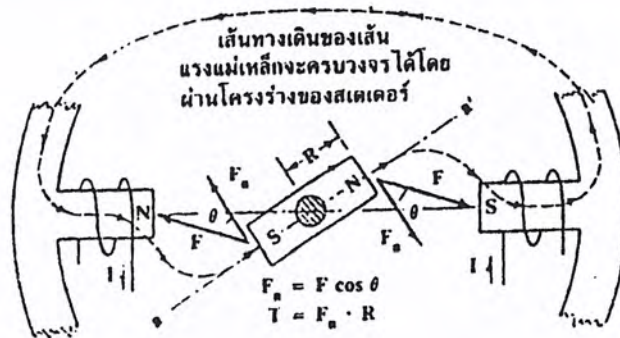
ดังนั้นจะได้แรงแม่เหล็กที่เกิดจากการดึงดูดของขั้วแม่เหล็กที่ต่างกันทำให้เกิดส่วนของแรงบิดปกติ

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

จะได้ทอร์กผลรวม

$$T = F_n \cdot R$$

(ทำให้โรเตอร์หมุนไปในทิศทาง CW จนกว่าแกนของโรเตอร์ a-a' อยู่ในแนวเดียวกับของสเตเตอร์)



รูปที่ 2.3 แสดงแรงดึงดูดทำให้เกิดทอร์กที่หมุนโรเตอร์ให้ไปอยู่ในตำแหน่งที่สมดุล

ถ้าหากมีขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าหลาย ๆ ขั้ว รอบ ๆ สเตเตอร์และถ้าหากขั้วเหล่านั้นถูกกระตุ้นด้วยกระแสพัลส์ ในรูปแบบที่เรียงลำดับกันไปโรเตอร์ก็จะหมุนในรูปลักษณะของสเตปที่เป็นไปตามการหมุนของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการสวิตซ์ที่เรียงลำดับของขดลวดขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าของสเตเตอร์

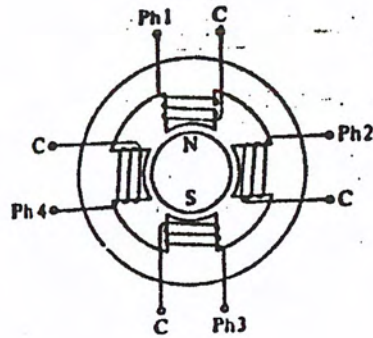
2.2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของสเตปมอเตอร์ชนิดต่าง ๆ

ก) สเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร

สเตปมอเตอร์ชนิดนี้ใช้แม่เหล็กถาวรแบบโรเตอร์ และมีซี่ฟันของสเตเตอร์ล้อมรอบ ซี่ฟันของสเตเตอร์ถูกพันด้วยขดลวดสำหรับสร้างสนามแม่เหล็ก เมื่อต้องการใช้สเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร มีขนาดมุมสเตปเล็กลงจะต้องเพิ่มจำนวนขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์และจำนวนซี่ฟันของ สเตเตอร์ แต่ก็มีขีดจำกัดในการเพิ่มจำนวนแม่เหล็กของโรเตอร์ เนื่องจากการสร้างแม่เหล็กถาวรสร้างให้มีโครงสร้างแบบมีขั้วแม่เหล็กหลายขั้วทำได้ยาก

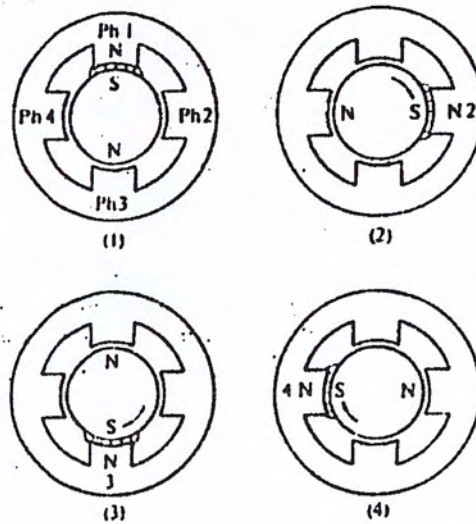
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของสเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร

ตัวอย่างการทำงานของสเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร สมมติว่าสเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรขนาดสี่เฟสมีโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวรทรงกระบอก และสเตเตอร์มีสี่ขั้วพันซึ่งรอบๆ พันด้วยขดลวดมีรูปแบบพื้นฐานของการทำงานคือ เมื่อสร้างสัญญาณกระตุ้นตามลำดับเฟสโรเตอร์จะหมุนไปตามทิศทางของการกระตุ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5



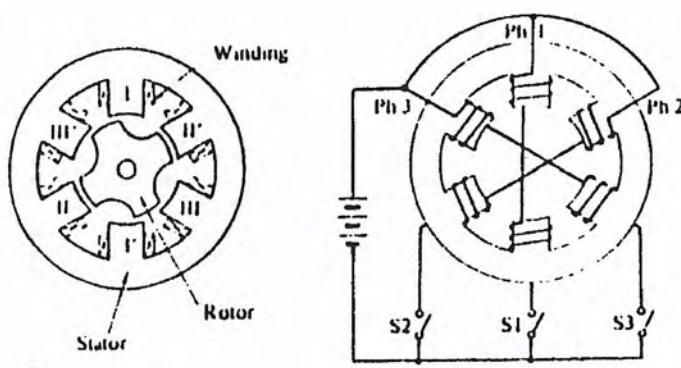
รูปที่ 2.5 แสดงการทำงานในสเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรขนาดสี่เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสียของสเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรคือ มีขนาดมมแม่เหล็กใหญ่ทำให้มีความละเอียดของสเตปต่อรอบน้อยเนื่องจากโครงสร้างของโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร การสร้างแม่เหล็กถาวรให้มีหลายขั้วทำได้ยาก ทำให้ไม่สามารถสร้างสเตปขนาดเล็กได้ สเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างขนาดเล็ก ทำให้ค่าทอร์กที่ได้ต่อหน่วยปริมาตรมีค่าต่ำ ถ้าต้องการปรับปรุงประสิทธิภาพในเรื่องของทอร์กแม่เหล็กถาวรที่ใช้ต้องทำจากสารแม่เหล็กที่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กสูง แต่สารแม่เหล็กที่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กมากราคาสูง สารแม่เหล็กราคาถูก เช่น เฟอร์ไรท์ มีสภาพความเป็นแม่เหล็กน้อยจึงให้ค่าทอร์กต่ำ

ข) สเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ได้

โครงสร้างของสเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ได้ มีโรเตอร์และสเตเตอร์ทำจากโลหะซัลโคอนซึ่งเป็นสารแม่เหล็กที่มีสภาพซึมซับได้ทางแม่เหล็กสูงและยอมในสนามแม่เหล็กจำนวนมากไหลผ่านได้



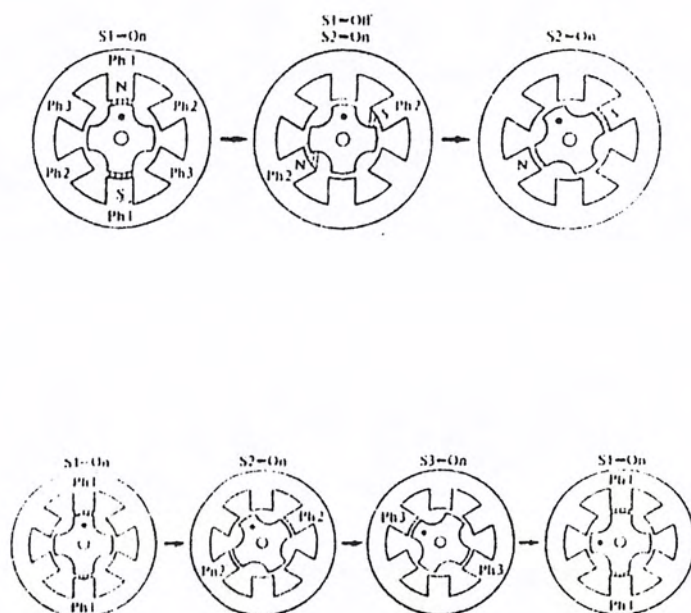
รูปที่ 2.6 แสดงสเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ได้

ในรูปเป็นสเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ได้ขนาดสามเฟสโดยโครงสร้างของโรเตอร์มี 4 ขั้วเฟสและสเตเตอร์มี 6 ขั้วเฟสและแต่ละเฟสของสเตเตอร์มี 2 ขั้วเฟสที่อยู่ตรงกันข้ามกันและอยู่ห่างกัน 180 องศาต่ออนุกรมกันอยู่ ทั้งสองขั้วเฟสของเฟสหนึ่งของสเตเตอร์จะมีขั้วตรงข้ามกัน ดังนั้นจากขั้วเฟส I, II, III จะเป็นขั้วเหนือและ I, II และ III จะเป็นขั้วใต้ เมื่อมอเตอร์ได้รับการกระตุ้น เมื่อเฟสหนึ่งถูกกระตุ้นสนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้น ดังรูป 6 ดังนั้นถ้าโรเตอร์ I และ I จะวางตัวอยู่ในแนวเดียวกันซึ่งซึ่งมีค่ารีลักแตนซ์น้อยที่สุด สถานะเป็นสถานะที่จุดสมดุลเป็นจุดซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กสั้นที่สุด แสดงดังในรูป



รูปที่ 2.7 แสดงตำแหน่งสมดุทธ์เมื่อเฟสใดเฟสหนึ่งของสเตปมอเตอร์ถูกกระตุ้น

จากรูป 2.7 สมมติว่า โรเตอร์และสเตเตอร์ไม่ได้อยู่ในแนวเดียวกันเส้นแรงของเฟสที่ถูกกระตุ้นมีค่ารีล็กเต้นซ์มาก สเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีล็กเต้นซ์ได้จะทำตัวให้มีค่ารีล็กเต้นซ์ต่ำที่สุดโดยวางตัวอยู่ในแนวเดียวกันกับแนวของเส้นแรงแม่เหล็ก



รูปที่ 2.8 แสดงการเปลี่ยนลำดับสเตปในการเคลื่อนที่ของสเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีล็กเต้นซ์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติพื้นฐานสำหรับโครงสร้างของสเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ได้

1) ช่องว่างอากาศระหว่างซี่ฟันของโรเตอร์ และสเตเตอร์ที่ต้องเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้ค่าของทอร์กมากขึ้น และมีความถูกต้องแม่นยำทางตำแหน่งดีขึ้น เนื่องจากที่ระดับแมกเน็ทโมทีฟฟอร์ซ (magnetomotive force) ระดับเดียวกัน ช่องอากาศขนาดเล็กจะให้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่าซึ่งมีผลทำให้มีค่าทอร์กสูงกว่า และทำให้มีความคลาดเคลื่อนในการเคลื่อนที่จากจุดสมดุลมีน้อยกว่าช่องอากาศขนาดใหญ่

2) สำหรับโครงสร้างที่ต้องการมุมสเตปขนาดเล็กความสัมพันธ์ระหว่างมุมสเตป (\cdot) มุมเฟส(m) จำนวนซี่ฟันของโรเตอร์(N_r) และจำนวนสเตป (S) หาได้จากสมการ

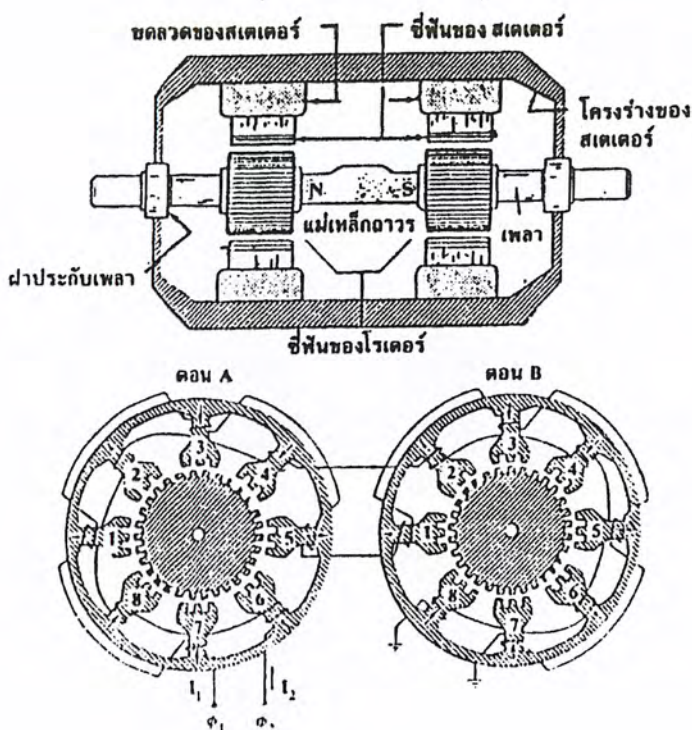
$$S = 360 / \cdot - mN_r$$

เพื่อจะลดขนาดมุมสเตปลง จำนวนซี่ฟันของโรเตอร์จะต้องเพิ่มขึ้นซี่ฟันของสเตเตอร์จะต้องเพิ่มขึ้นด้วย โดยโครงสร้างแต่ละขั้วของเฟสใด ๆ จะมีหลายซี่ฟันแต่จำนวนซี่ฟันของสเตเตอร์ไม่ใช่องค์ประกอบโดยตรงที่จะกำหนดมุมสเตปมอเตอร์

3) การสร้างสเตปมอเตอร์ให้มีโครงสร้างแบบหลายสเตค เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในเรื่องของทอร์กการสร้างสเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ได้ให้มีโครงสร้างแบบหลายสเตคนี้แต่ละสเตค จะถูกกำหนดเป็นหนึ่งเฟสโดยโรเตอร์และสเตเตอร์จะมีซี่ฟันเหมือนกัน การสร้างสเตปมอเตอร์ให้มีโครงสร้างแบบหลายสเตคนี้ เพื่อประสิทธิภาพในเรื่องของทอร์กซี่ฟันที่เหมือนกันระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์เพื่อช่วยเพิ่มทอร์กต่อหน่วยปริมาตรของโรเตอร์ ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของแมชชีน (machine)

ค) สเตปมอเตอร์แบบไฮบริด

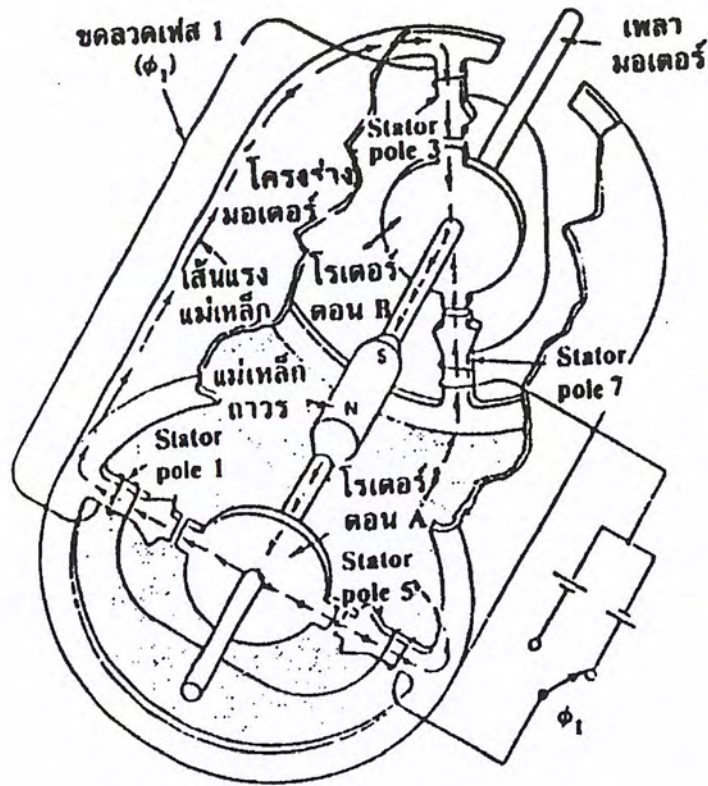
เป็นรูปแบบหนึ่งของสเตปมอเตอร์ซึ่งมีโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร ไฮบริด หมายถึงการทำงานร่วมกันของมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร และมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ได้ ไฮบริดสเตปมอเตอร์มีโครงสร้างของสเตเตอร์คล้ายกับโครงสร้างของสเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ได้ แต่การต่อขดลวดต่างกัน โดยในหนึ่งเฟสของสเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ได้จะมีสองขดลวดและขดลวดทั้งสองจะพันอยู่ที่ขั้วเดียวกันใน โดยที่หนึ่งจะมีค่าแค้นหนึ่งเฟส ขณะที่ไฮบริดมอเตอร์จะมีขดลวดของสองเฟสถูกพันอยู่ที่ขั้วเดียวกัน โดยที่ขั้วหนึ่งจะไม่เป็นของเฟสใดเฟสหนึ่ง โครงสร้างของขดลวดสองขดลวดที่ถูกพันที่ขั้วเดียวกันถูกเรียกว่าเป็นรูปแบบของไบไฟลาร์ (bifilar) ซึ่งจะให้ขั้วแม่เหล็กที่แตกต่างกันในการกระตุ้นแต่ละครั้ง



รูปที่ 2.9 แสดง โครงสร้างไฮบริดสเตปมอเตอร์

คุณสมบัติที่สำคัญของไฮบริดสเตปมอเตอร์คือ โครงสร้างของมอเตอร์มีแม่เหล็กถาวรอยู่ที่กึ่งกลางระหว่างเฟสทั้งสอง การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กทำได้โดยใช้สนามแม่เหล็กซึ่งสร้างจากสเตเตอร์ซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กแบบเฮเทอโพลาร์ (heteropolar field) ดังนั้นทอร์คเกิดการทำงานร่วมกันของสนามแม่เหล็กสองชนิดคือ สนามจากแม่เหล็กถาวร และสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่เกิดจากการกระตุ้นขดลวดแต่ละขด โครงสร้างของซี่ฟันของสเตเตอร์จะใหญ่กว่าซี่ฟันของโรเตอร์เล็กน้อย เพื่อเพิ่มความถูกต้องแม่นยำทางตำแหน่งของการเคลื่อนที่

หลักการทำงานของไฮบริดมอเตอร์ที่แตกต่างจากสเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีล็กแต้นซ์ได้คือ แรงบิดที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กจะไม่ขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดอย่างเฉยแต่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของซี่ฟันด้วย ซึ่งซี่ฟันถูกออกแบบเพื่อให้ได้โครงสร้างขนาดเล็ก และใช้แม่เหล็กถาวรเป็นแกนกลางเพื่อลดผลของการออสซิลเลททางแมคคานิกส์



รูปที่ 2.10 แสดงหลักการทำงานของไฮบริดสเตปมอเตอร์

ข้อดีของไฮบริดสเตปมอเตอร์คือ มีขนาดสเตปขนาดเล็กมีความละเอียดต่อรอบสูง มีค่าทอร์คสูงกว่าสเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักเต้นซ์ได้ แต่สเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักเต้นซ์ได้มีแรงเฉื่อยทางแมคคานิกส์น้อยกว่าสเตปมอเตอร์แบบไฮบริด

นอกจากสเตปมอเตอร์ทั้งสามที่กล่าวมาแล้วยังมีสเตปมอเตอร์ชนิดอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึงอีกเช่น ลิเนียร์สเตปมอเตอร์ ซึ่งเป็นสเตปมอเตอร์ที่ได้รับการออกแบบให้มีการเคลื่อนที่แบบเป็นเชิงเส้น อิเล็กโทรไฮดรอลิกสเตปมอเตอร์ ซึ่งเป็นสเตปมอเตอร์กำลังสูงสำหรับใช้ในอุตสาหกรรม เป็นต้น แต่ที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นสเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักเต้นซ์ได้ชนิดหลายสแตน ซึ่งจะพิจารณาโครงสร้างและสมการคณิตศาสตร์เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างระบบควบคุมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานสเตปมอเตอร์ต่อไป

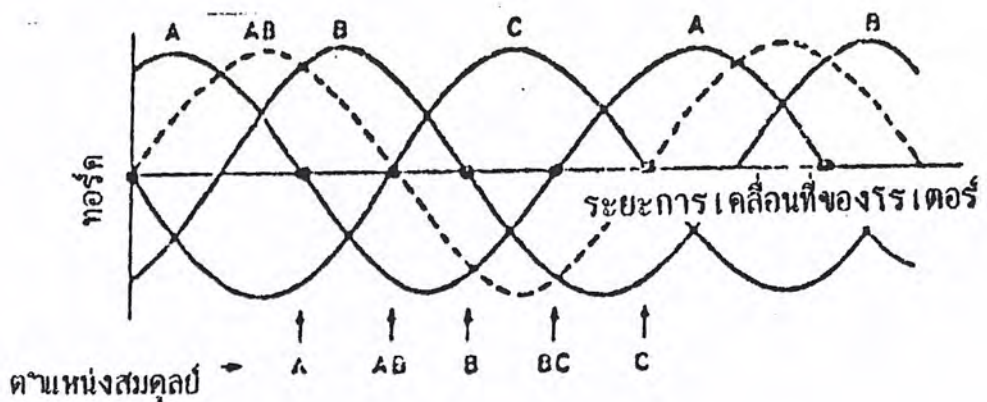
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ทฤษฎีพื้นฐานและคุณลักษณะของแรงบิดของสเตปมอเตอร์

การศึกษาคุณสมบัติของสเตปมอเตอร์ เพื่อให้สามารถควบคุมการทำงานของสเตปมอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพ ต้องศึกษาถึงคุณลักษณะต่าง ๆ เช่นคุณลักษณะเกี่ยวกับทอร์ก ค่าของความเร็วสูงสุดที่มอเตอร์สามารถตอบสนองได้ คุณลักษณะเกี่ยวกับกระแสซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงค่าทอร์ก ซึ่งคุณลักษณะเหล่านี้ศึกษาได้จากกราฟแสดงคุณลักษณะของ สเตปมอเตอร์ ซึ่งมีรายละเอียดที่ศึกษาได้ดังต่อไปนี้

1) คุณลักษณะของสแตติกของสเตปมอเตอร์

คุณลักษณะของสแตติก เป็นคุณลักษณะขณะที่ยังไม่มีการหมุน แสดงโดยกราฟของทอร์กดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.11 รูปแสดงคุณลักษณะทางสแตติกของสเตปมอเตอร์ขนาดสามเฟส

จุดสมมูลของการหมุน คือจุดซึ่งซิปฟันของโรเตอร์และซิปฟันของสเตเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กันอยู่ในแนวเดียวกัน มันคงอยู่ในตำแหน่งนี้อย่างไม่มีกำหนดจนกว่าจะได้รับสัญญาณกระตุ้นครั้งต่อไป ที่ตำแหน่งสมมูลของโรเตอร์จะมีค่าทอร์กที่สูงที่สุด ถ้ามอเตอร์เคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเนื่องจากโหลด T_L มอเตอร์ก็จะสร้างทอร์กขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามเพื่อให้สมมูลกับโหลด แรงที่เกิดขึ้นนี้เป็นพลังงานที่สะสมอยู่เมื่อมอเตอร์อยู่ในสถานะหยุดนิ่งซึ่งจะมีทิศทางตรงข้ามกับจุดสมมูลเริ่มต้น ผลของทอร์กกับการเคลื่อนที่ของโรเตอร์จะมีลักษณะคล้ายคลื่นรูปซายน์ (รูปร่างจริงจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโรเตอร์และสเตเตอร์ซึ่งจะเป็นคาบกับซิปฟันของโรเตอร์)

ค่าทอร์กสูงสุดที่ขึ้นอยู่กับกระแสที่จ่ายให้เฟสนั้น ทอร์กนี้จะถูกเรียกว่า โหลดทอร์กหรือ สแตติกทอร์ก ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของทอร์กและกระแสค่อนข้างจะมีลักษณะเป็นเชิงเส้น แต่จะมีขีดจำกัดที่คุณสมบัติการเกิดการอิมตัวของโรเตอร์และสเตเตอร์ซึ่งมีโครงสร้าง

เป็นแม่เหล็ก ที่จุดอิมตัวนี้จะไม่มีการเพิ่มของทอร์กเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของกระแสเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทฯ ซึ่งการเผยแพร่เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่สัญญาใด ๆ ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทอร์กของมอเตอร์จะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อมอเตอร์เคลื่อนที่ไป $1/2 P_r$ ถ้าการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ข้ามจุดสมดุลไป หรือไปที่ตำแหน่งอื่นซึ่งเป็นจำนวนเท่าของซี่ฟันของโรเตอร์ จะทำให้เกิดการ loss ของพัลส์อินพุท ทำให้เกิดการไปซิงโครไนส์ระหว่างคำสั่งพัลส์อินพุทกับการตอบสนองของสเตปการเคลื่อนที่เพื่อไม่ให้เกิดเหตุการณ์นี้ขึ้น มอเตอร์ต้องมีโฮลดิ้งทอร์กสูงกว่าโหลดทอร์ก

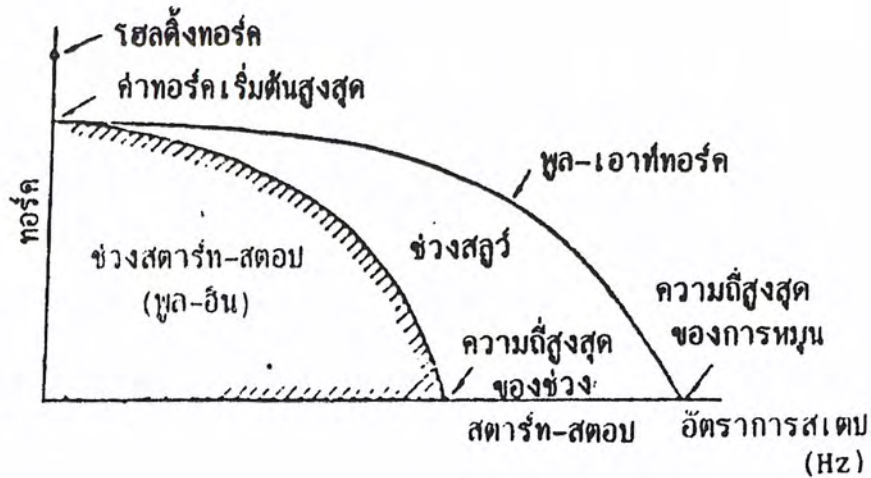
ในการเคลื่อนที่ไปยังข้างหน้าของโรเตอร์ผ่านจุดสมดุลเริ่มต้น ถ้าเป็นแรงเสียดทานมีค่ามากกว่าทอร์กโรเตอร์จะหยุดก่อนถึงตำแหน่งสมดุล ความไม่แน่นอนของตำแหน่งจากจุดสมดุลคือ ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่ง ค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งนี้จะไม่มีการสะสม จะมีค่าเท่ากันที่ตำแหน่งที่ 1 กับตำแหน่งที่ 1000 การลดความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งต้องลดโหลดหรือเพิ่มโฮลดิ้งทอร์ก กราฟแสดงคุณลักษณะทางสเตปจะแสดงถึงความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้คือ

- คุณลักษณะของทอร์กกับมุมสเตป (T/θ characteristics) เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กและตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ สเตปทอร์กที่สูงสุดเรียกว่า “โฮลดิ้งทอร์ก (holaing torque)” ซึ่งเกิดขึ้นที่ $\theta = \theta_n$ ตำแหน่งที่เกิดโฮลดิ้งทอร์ก จะมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งสมดุลของโรเตอร์ โฮลดิ้งทอร์กคือลักษณะทอร์กมูลฐานทั้งหมดของมอเตอร์ซึ่งแสดงทอร์กที่สะสมอยู่ที่ตัวมอเตอร์ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของโรเตอร์ สเตปทอร์กและไดนามิกทอร์กจะมีจุดเริ่มต้นที่โฮลดิ้งทอร์ก

- คุณลักษณะของทอร์กกับกระแส (T/I characteristics) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโฮลดิ้งทอร์กกับกระแสที่จ่ายให้เฟสต่าง ๆ ของสเตปมอเตอร์

2) คุณลักษณะทางไดนามิกของสเตปมอเตอร์

การพิจารณาสเตปทอร์กของสเตปมอเตอร์พิจารณาเมื่อมอเตอร์ไม่ได้เคลื่อนที่ การพิจารณาคุณลักษณะทางไดนามิกของสเตปมอเตอร์ เป็นการพิจารณาความสามารถในการสร้างทอร์กกับฟังก์ชันของความเร็วซึ่งศึกษาได้จากกราฟของผู้ผลิต ซึ่งจะบอกถึงช่วงการใช้งานดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.12 รูปแสดงคุณลักษณะทางไดนามิกของสเตปมอเตอร์

ช่วง start-stop การทำงานของมอเตอร์ในช่วงนี้ มอเตอร์จะหยุดหรือสตาร์ทใหม่ หรือเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามโดยปราศจากการ loss สเตป ช่วงสตาร์ท-สตอป บางครั้งเรียกว่า ช่วงพูล-อิน ค่าทอร์คในการใช้งานช่วงนี้เรียกว่า พูล-อินทอร์ค (pull-in torque) ค่าพูล-อินทอร์คของสเตปมอเตอร์ คือ ฟริกชันโหลดทอร์ค (friction load torque) ซึ่งมอเตอร์สามารถหมุนหรือหยุดได้โดยปราศจากการขาดหายไปของสเตป ค่าพูล-อินทอร์คขึ้นอยู่กับค่าโหลดทอร์ค

ช่วงมอเตอร์หมุน (slew-range) จากกราฟจะเป็นช่วงที่แรงเงา ถ้ามอเตอร์ทำงานในช่วงนี้ จะไม่สามารถหยุดหรือสตาร์ทหรือเปลี่ยนทิศทางได้ ช่วงการทำงานนี้จะอยู่ระหว่างช่วงกราฟของ พูล-อินทอร์ค กับพูล-เอาต์ทอร์ค เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของการตอบสนองของมอเตอร์ที่ ช่วงความถี่ต่าง ๆ จนถึงความถี่สูงสุด โดยการทำงานยังคงซิงโครไนท์กับวงจรถับ พูลเอาต์ทอร์คของสเตปมอเตอร์ไม่ได้ถูกจำกัดไว้ที่จุดทำงานใดจุดทำงานหนึ่ง หรือมีทรานเฟอร์ฟังก์ชันมาเกี่ยวข้องเหมือนในกรณีดีซีมอเตอร์ การกำหนดกราฟนี้กำหนดให้มอเตอร์ทำงานเฉพาะภายในเส้นกราฟ และไม่ทำงานภายนอกเส้นกราฟ กราฟของพูล-เอาต์ทอร์คสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงการขับเคลื่อน พูล-เอาต์ทอร์คจะลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น การลดลงของทอร์คนี้ เนื่องมาจากการลดลงของกระแสจากสมการ

$$I = E/R (1 - \theta^{-T/t})$$

$$T = 2\pi / W_s$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคับปลิ่งให้เกิดแรงเฉื่อย (inertia) หรือการใช้ระบบการควบคุมแบบวงจรปิด (closedloop control) จะช่วยให้คุณสมบัติของทอร์คและการตอบสนองต่อความถี่ดีขึ้น ในระบบเปิด (openloop) มอเตอร์จะสามารถทำงานที่ค่าทอร์คต่ำกว่าค่าที่สามารถเป็นไปได้ แต่สำหรับการควบคุมแบบวงจรปิดจะสามารถทำงานได้ที่ใกล้ ๆ กราฟของไดนามิกทอร์ค ความถี่สูงสุดซึ่งมอเตอร์สามารถทำงานได้โดยไม่มีการหายขาดไปของสเตป ความถี่สูงสุดนี้บางครั้งถูกเรียกว่า ค่าความถี่สูงสุดของการหมุน (maximum slewing frequency) ค่าทอร์คสูงสุดของการเริ่มต้นการทำงานของมอเตอร์ (maximum starting torque) มีความสัมพันธ์กับค่าพลูเอาท์ทอร์คสูงสุดซึ่งเป็นทอร์คของแรงเสียดทานของโพลซึ่งมอเตอร์ยังสามารถเริ่มต้นการทำงานได้โดยยังชิงโครไนท์กับขบวนคำสั่งพัลส์ (pulse train)

สัญลักษณ์ต่าง ๆ ของสเตปมอเตอร์

N_r	=	จำนวนซี่ฟันของโรเตอร์
N_s	=	จำนวนซี่ฟันของสเตเตอร์
N_p	=	จำนวนเฟส
P_r	=	ความห่างระหว่างปลายซี่ฟัน โรเตอร์ (องศา)
P_s	=	ความห่างระหว่างปลายซี่ฟันของสเตเตอร์ (องศา)
ϕ_s	=	มุมสเตป (องศา)
R_s	=	อัตราการสเตปหรือความเร็วในการสเตป (สเตป/รอบ)
X	=	$N_G / N_p =$ จำนวนซี่ฟันของสเตปต่อเฟส

พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสเตปมอเตอร์

1. ความห่างระหว่างปลายซี่ฟัน โรเตอร์และสเตเตอร์

$$P_r = 360 / N_r \text{ และ } P_s = 360 / N_s$$

2. มุมสเตป (step angle)

เมื่อโรเตอร์เคลื่อนที่ในขนาดมุม P_r ได้เท่ากับ N_p สเตป ดังนั้นเราจะหามุมสเตปได้

$$\phi_s = P_r / N_p = 360 / N_r N_p \text{ องศา/สเตป}$$

มุมสเตปจะเท่ากับความแตกต่างระหว่าง P_r และ P_s ดังนั้นเราจะหามุมสเตปได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi_s = I P_r - P_s I \quad \text{องศา/สเตป}$$

3. อัตราการสเตป (stepping rate)

ความเร็วในการสเตปต่อรอบ (360 องศา) หาได้เป็น

$$R_s = 360 / \phi_s = N_r N_s \quad \text{สเตป/รอบ}$$

4. ความเร็วของสเตปมอเตอร์ (speed of step motor)

เมื่อเราป้อนอินพุตพัลส์ที่มีความถี่ (f) สเตปต่อพัลส์ให้กับสเตปมอเตอร์จะสเตปไปด้วยความเร็ว (สเตป/พัลส์) x f (พัลส์/วินาที)

$$1/R_s \text{ (รอบ/สเตป)} \times f \text{ (พัลส์/วินาที)} \text{ (สเตป/พัลส์)} \times 60 \text{ (วินาที/นาที)}$$

$$\text{ความเร็วของมอเตอร์ (w)} = 60 f / R_s = 60 f / N_r N_p$$

$$\text{หรือ } X = R_s / N_p (N_p + 1) = N_r / (N_p + 1)$$

จำนวนโพลของสเตเตอร์ต่อเฟส (X) จะสัมพันธ์กับอัตราการสเตปหรือจำนวนซี่ฟันของโรเตอร์

จากค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ทำให้รู้ความสามารถของสเตปมอเตอร์ และนอกจากนั้นยังมีพารามิเตอร์อื่นที่สำคัญที่ต้องรู้ในการศึกษาควบคุมการทำงานของสเตปมอเตอร์ คือ จำนวน สเตปต่อรอบ (resolution) ที่มอเตอร์สามารถทำงานได้ความถูกต้องแม่นยำ (accuracy) ซึ่งแสดงในลักษณะของความผิดพลาดเชิงมุมของตำแหน่งของการตอบสนองแบบสเตปเดียว (single step) เป็นต้น

2.3 รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของสเตปมอเตอร์

ทฤษฎีการคำนวณพื้นฐานของสเตปมอเตอร์มีลักษณะเหมือนกับอุปกรณ์แปลงกลับพลังงานทางแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetics energy conversion device) ดังนั้นจึงต้องเข้าใจหลักการทำงานของอุปกรณ์เหล่านี้เสียก่อน

การแสดงตัวเป็นสารแม่เหล็กแบบเฟอร์โร (ferromagnetics material) ของสเตปมอเตอร์ จะให้คุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ซึ่งเกิดการอิ่มตัว (saturate) ของฟลักซ์ เกิดกระแสไหลวน (eddy current) และมีการสูญเสียจากฮิสเทอรีซิส (hysteresis effect) ซึ่งเป็นรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่ยาก

ในสเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ได้ มีทั้งแบบสเตคเดียว (single stack) และแบบหลายสเตค (multistack) สำหรับสเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ได้หลายสเตค การพันขดลวดจะแยกสำหรับแต่ละสเตค ดังนั้นสภาพความเป็นแม่เหล็กสำหรับแต่ละเฟสจะไม่ขึ้นต่อกัน

การพิจารณาแบบนี้ทำให้ได้รูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่ง่าย แต่สำหรับสเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ได้ชนิดสแตกเดียว จะมีสแตกเดียวของสเตเตอร์ ดังนั้นในการวิเคราะห์จะต้องพิจารณาถึงการคัปปลิงทางแม่เหล็กระหว่างเฟส ดังนั้นจึงมีความซับซ้อนของรูปแบบทางคณิตศาสตร์มากกว่า

2.4 สมการทางไดนามิกของสเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ได้ชนิดหลายสแตก

รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของสเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ จะพิจารณาในเชิงคณิตศาสตร์โดยให้สเตปมอเตอร์มีจำนวนเฟสหรือจำนวนสแตกเท่ากับ n สแตก โดยแต่ละสแตกมีจำนวนขั้วฟัน N_r ขั้วฟัน และมีขนาดของมุมสเตปเท่ากับ $360/2n$

สมมติเป็นรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ว่า ไม่มีการอิมตัวของวงจรมแม่เหล็ก คือพิจารณาเป็นรูปแบบเชิงเส้น (linear model)

สมการโวลเตจแสดงดังต่อไปนี้

$$V_k = R_k I_k + d\lambda_k / dt \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

ฟลักซ์ลิงค์ (flux linkage) จะไม่มีส่วนของมุขวลคัปปลิง (mutual coupling) ระหว่างเฟสจะได้

$$\lambda = L_k i_k \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

เมื่อ L_k แสดงค่าเฉลี่ยของการเหนี่ยวนำตัวเอง (self-inductance) ของเฟส k ถ้ากรณีนี้เป็นการพิจารณารูปแบบที่เป็นเชิงเส้น L_k จะไม่ใช่ฟังก์ชันของ i_k แต่จะเหมือนกับฟังก์ชันของตำแหน่งของโรเตอร์ θ

จะสังเกตได้ว่าค่าเหนี่ยวนำ (inductance) จะมากที่สุดที่ตำแหน่งสมดุลย์ และจะมีค่าน้อยที่สุดที่นอกแนวเส้นทางของตำแหน่งสมดุลย์ ถ้าพิจารณาในเทอมของความเกี่ยวข้องทางตำแหน่งระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ค่าเหนี่ยวนำของเฟสจะมากที่สุด เมื่อขั้วฟันของสเตเตอร์และโรเตอร์อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน และจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อขั้วฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์ไม่ได้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันมากที่สุด

กราฟแสดงความเหนี่ยวนำ ถูกประมาณโดยฟังก์ชัน \cos ดังนี้

$$L_k = L_{k0} + L_{kl} \cos\theta N_k \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

$L_{k0} + L_{kl}$ เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของขั้วของสเตเตอร์ จำนวนรอบของการพันขดลวดของแต่ละเฟส และจำนวนขั้วของสเตเตอร์สแตก

แทนที่สมการ 2.2 ลงในสมการ 2.1 L_k เป็นฟังก์ชันของ θ อย่างเดียว ดังนั้นสมการของโวลเตจแสดงโดย

$$V_k = R_k I_k + L_k di_k / dt + i_k V_k / \partial \theta d\theta / dt \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

ทอร์กของสเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ได้ชนิดหลายสเตค คิดโดยไม่มีการอิมิตัวเมื่อมวลอินดักแต้นซ์ เท่ากับศูนย์ จะได้สมการทอร์กดังนี้

$$T = 1/2 \sum 4L_k / 4\theta i_k^2 \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

ถ้าโรเตอร์ถูกกระตุ้นเฟสเดียว ดังนั้นสมการของทอร์กต่อเฟสคือ

$$T_a = N_r L_l / 2 i_a^r \sin N_r \theta \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

ถ้า $N_r L_l / 2$ ถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ k_r ดังนั้นจะได้

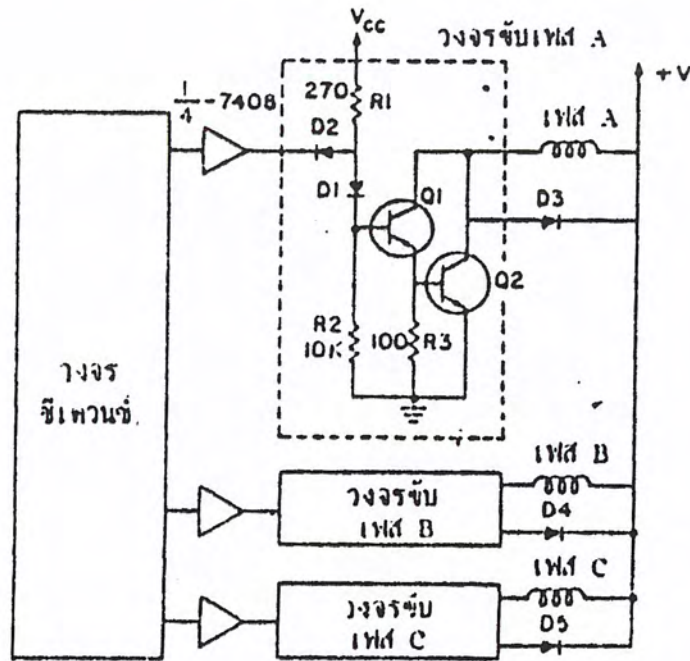
$$T_a = -kT i_a^2 \sin N_r \theta \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

2.5 การควบคุมการทำงานของสเตปมอเตอร์

วงจที่ใช้ควบคุมสเตปมอเตอร์ส่วนใหญ่เป็นวงจรถลอกิกและวงจรภาคกำลัง ซึ่งใช้สำหรับสเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ได้ สเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร และสเตปมอเตอร์แบบไฮบริด ประสิทธิภาพของสเตปมอเตอร์ขึ้นอยู่กับวงจที่ใช้ เช่น ไดนามิกทอร์ก ความเร็ว การตอบสนองต่อความถี่และการแดมป์ (damping) เป็นต้น นอกจากนั้นยังมีพารามิเตอร์บางอย่างเช่นประสิทธิภาพ (efficiency) และการสูญเสียกำลัง (power dissipation) ก็ขึ้นอยู่กับวงจรับเช่นกัน

รูปแบบการควบคุมสเตปมอเตอร์โดยทั่วไป เป็นการควบคุมภาควงจรกำลังและลำดับการจ่ายพลังงานให้กับขดลวดในเฟสต่างๆ ของสเตปมอเตอร์ วงจรกำลังจะทำงานในทิศทางเดียวหรือสองทิศทางขึ้นอยู่กับวงจรจัดลำดับลอกิก ซึ่งใช้เป็นสัญญาณขับเคลื่อนของทรานซิสเตอร์กำลังซึ่งจะเพิ่มขนาดเพื่อจ่ายกระแสให้ขดลวดของมอเตอร์ และต้องใช่วงจรจำกัดกระแส เมื่อใช้การกระตุ้นแบบใช้แรงดันเกิน (over excitation) เพื่อรักษาเสถียรภาพการทำงานของสเตปมอเตอร์ และใช่วงจรจำกัดแรงดันเกิน (suppression circuit) เพื่อจำกัดสไปค์โวลเตจ (spike voltage) ให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยของการใช้ของการใช้งานทรานซิสเตอร์กำลัง

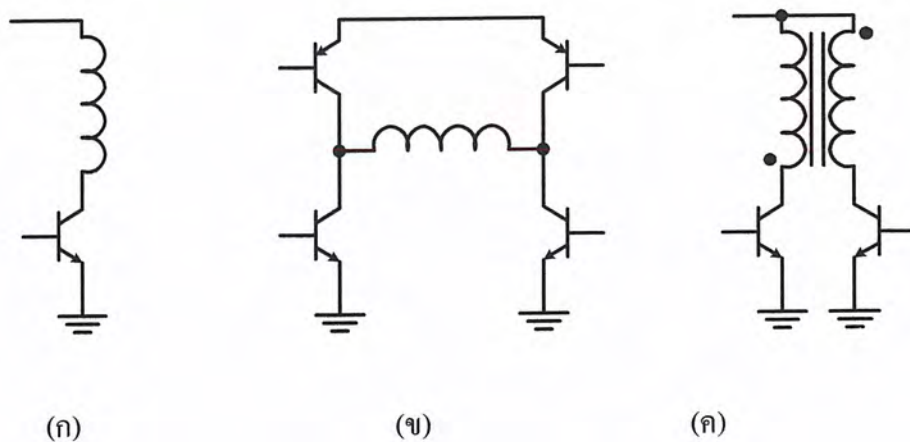
วงจรจัดลำดับลอกิก (ring counter) ซึ่งมีขนาดเท่ากับจำนวนเฟสของสเตปมอเตอร์ การใช่วงจรจัดลำดับลอกิกจะกระตุ้นวงจรับได้ครั้งละหนึ่งเฟสเรียงตามลำดับกันไป



รูปที่ 2.13 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์

สัญญาณจากวงจรจัดลำดับลอจิกจะต้องถูกขยายให้เพียงพอที่จะจ่ายให้กับสเตปมอเตอร์ ดังนั้นจึงต้องป้อนสัญญาณนี้ให้กับวงจรทรานซิสเตอร์กำลัง (power transistor) อีกทีหนึ่งเพื่อที่จะเพิ่มค่าและกระแสให้เพียงพอที่จะจ่ายให้ขดลวดของสเตปมอเตอร์

สเตปมอเตอร์สามารถแบ่งตามลักษณะ โครงสร้างของการพันขดลวดได้เป็นสองชนิด คือ แบบขดลวดขั้วเดียว (single winding) และแบบไบโพลาร์ สำหรับสเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารีล็กแตนซ์ได้มีโครงสร้างของการพันขดลวดแบบขั้วเดียว ส่วนมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรจะมีโครงสร้างของการพันขดเป็นแบบสองขั้ว คือ แบบไบโพลาร์วงจรขับที่ใช้สำหรับโครงสร้างขดลวดที่มีขั้วเดียวจะเป็นแบบไบโพลาร์และวงจรขับสำหรับขดลวดที่มีโครงสร้างแบบไบโพลาร์จะต้องใช้วงจรแบบยูนิโพลาร์



รูปที่ 2.14 แสดงการขับแบบ unipolar และ bipolar

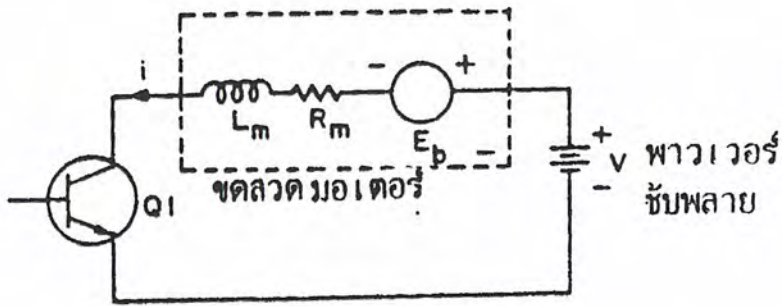
- (ก) หลักการขับสเตปมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์
- (ข) หลักการขับสเตปมอเตอร์แบบไบโพลาร์
- (ค) การใช้วงจรขับแบบยูนิโพลาร์ขับเคลื่อนแบบไบโพลาร์

การขยายวงจรขับทำได้โดยใช้วงจรแบบคาร์ลิงตัน (darlington) เมื่อสัญญาณจากวงจรจัดลำดับลอจิกเท่าหนึ่ง จะเป็นสัญญาณขับให้วงจรคาร์ลิงตันทำงาน กระแสไหลจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงผ่านสเตปมอเตอร์ลงสู่กราวด์ และเมื่อสัญญาณจากวงจรจัดลำดับลอจิกเท่ากับศูนย์ จะหยุดการทำงานของทรานซิสเตอร์กำลัง

แม้ว่าวงจรคาร์ลิงตัน จะมีโวลเตจอิ่มตัว (saturation voltage) ที่สูงกว่าขนาดวงจรที่ใช้ทรานซิสเตอร์ตัวเดียว แต่วงจรคาร์ลิงตันนี้ไม่ต้องการสัญญาณขับเบสเป็นโวลเตจสูง ซึ่งใช้ลอจิกสูงของ ทีทีแอล ก็เพียงพอที่จะขับเบสของวงจรคาร์ลิงตัน ให้นำกระแสได้ ดังนั้นจึงต่อไดโอด D1 อนุกรมเข้ากับเบสของ Q1 เพื่อแยกโวลเตจต่ำและโวลเตจสูงออกจากกัน การไอโซเลชัน (Isolation) แบบนี้จะช่วยป้องกันการเบรคควาน์ของคอลเลคเตอร์-เบสของทรานซิสเตอร์กำลัง

2.6 หลักการออกแบบวงจรขับสเตปมอเตอร์

การพิจารณาหลักการการออกแบบวงจรขับกำลังได้คำนึงถึงหลายแฟกเตอร์ด้วยกัน เนื่องจากการหยุดหมุนของสเตปมอเตอร์จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (back emf) ซึ่งจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง ซึ่งจะเขียนวงจรสมมูล (equivalent circuit) ของ 1 เฟสของสเตปมอเตอร์ได้ดังในรูป



รูปที่ 2.15 แสดงวงจรสมมูลย์ของสเตปมอเตอร์

สเตปมอเตอร์ถูกออกแบบให้ทนความร้อนได้สูงถึง 100 C แต่ในการใช้งานจริงจะถูกใช้งานที่เงื่อนไขต่ำกว่าจุดอิมิต์ที่กำหนดมา แต่ในการขับสเตปมอเตอร์ต้องใช้อุปกรณ์ที่กินกระแสสูง เนื่องจากแต่ละเฟสต้องออนและออฟอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงต้องออกแบบทรานซิสเตอร์กำลังจากสไปค์ โวลเตจที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสในขดลวด (inductive turn off spike voltage) และ โวลเตจเบรคกราวน์ (breakdown voltage) เพื่อป้องกันการเสียหายของทรานซิสเตอร์กำลัง

2.7 ปัญหาของวงจรขับสเตปมอเตอร์และการแก้ปัญหา

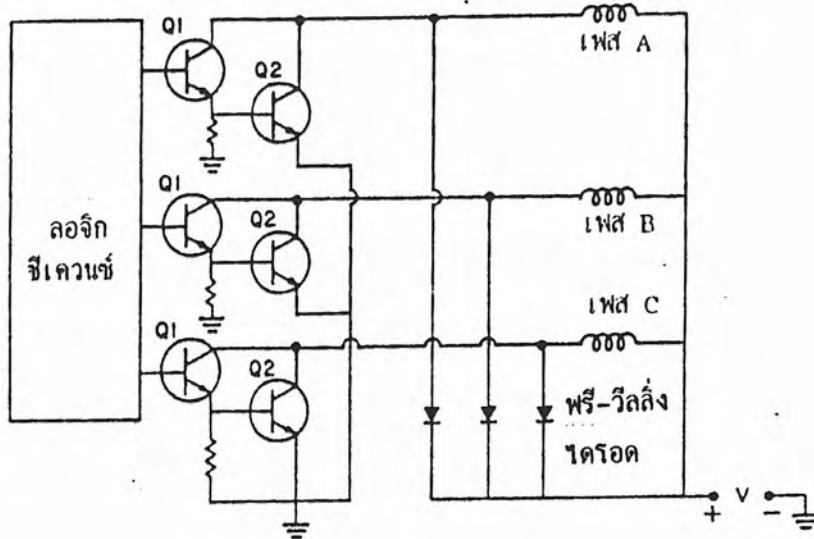
2.7.1 วงจรจำกัดแรงดันเกิน (Suppression Circuit)

ปัญหาหลักสองอย่างของการควบคุมสเตปมอเตอร์ การยกกระดัดกระแส (build up current) และการลดระดับของกระแส (decay) เมื่อมีการ ออน และ ออฟ ของวงจรขับในแต่ละเฟส และเมื่อใช้งานของสเตปมอเตอร์ที่ความถี่สูงขึ้น เวลาในการออนแต่ละเฟส จะไม่เพียงพอที่จะทำให้การยกกระดัดกระแสมาถึงระดับที่ต้องการได้ทัน ซึ่งขึ้นอยู่กับความเหนี่ยวนำของขดลวดในแต่ละเฟส และเมื่อหยุดจ่ายพลังงานให้กับเฟสที่ถูกกระตุ้น กระแสไม่ได้ลดลงทันทีแต่จะมีลดระดับของกระแสลงช้า ๆ เป็นทำให้การตอบสนองของเฟสถัดมาช้าลง หรือตอบสนองไม่ทันซึ่งมีผลทำให้สเตปมอเตอร์หยุดทำงานได้

พิจารณาวงจรสมมูลย์ของการจ่ายพลังงานในแต่ละเฟส เมื่อไม่สน โวลเตจตกคร่อมทรานซิสเตอร์ Q_1 กระแสคงตัวในขดลวดมีค่าเท่ากับ V/R_m เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_1 หยุดนำกระแสพลังงานที่เหลืออยู่ในขดลวด จะพยายามไหลในทิศทางเดิม การหยุดนำกระแสของทรานซิสเตอร์ Q_1 โวลเตจตกคร่อมทรานซิสเตอร์ Q_1 จะมีค่าเท่ากับ $L_m di/dt$ จะเกิดโวลเตจ สไปค์ ซึ่งมีค่ามากกว่า V_{co} จึงเป็นสาเหตุให้เกิดการเบรคดาวน์ของทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากลักษณะการพันขดลวดของสเตปมอเตอร์เป็นสาเหตุให้ทำให้เกิดสไปค์โวลเตจได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องป้องกันสไปค์โวลเตจให้อยู่ในระดับที่ทรานซิสเตอร์สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย ดังนั้น วงจรควรมีวงจรจำกัดแรงดันเกินสำหรับป้องกันการเกิดสไปค์โวลเตจให้กับทรานซิสเตอร์กำลัง รูปแบบของวงจรจำกัดแรงดันเกินแสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.16 วงจรจำกัดแรงดันเกินโดยใช้ไดโอด

1. วงจรจำกัดแรงดันเกินโดยใช้ไดโอด (diode suppression circuit) เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดของวงจรจำกัดแรงดัน ซึ่งไดโอดในลักษณะฟรีวีลลิ่งไดโอด (free wheeling diode) คร่อมแต่ละเฟสของมอเตอร์ ระหว่างที่เฟสนำกระแสไดโอดจะถูกไบแอสกลับทาง ซึ่งเหมือนกับการมีอิมพีแดนซ์สูงขนานอยู่กับขดลวด เมื่อหยุดจ่ายพลังงานให้กับขดลวด ขั้วทั้งสองของขดลวดจะกลับขั้ว ไดโอดจะกลับสภาพเป็นได้รับการไบแอสตรง (forward bias) และมีอิมพีแดนซ์ต่ำค่าโวลเตจตกคร่อมที่ไดโอดได้รับจะเปลี่ยนจาก V_{co} ไปเป็น $+V$ ดังนั้นทรานซิสเตอร์ Q_1 ต้องมีอัตราของการทนต่อโวลเตจมากกว่า $+V$

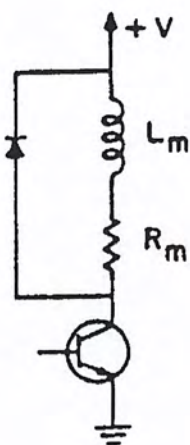
เมื่อหยุดจ่ายให้กับกระแสเฟสนั้น พลังงานที่เก็บอยู่ในขดลวดจะสูญเสียผ่านทางแรงต้านทาน R ของวงจรซึ่งรวมทั้งความต้านทานของขดลวด และความต้านทานเมื่อมีการไบแอสตรงของฟรีวีลลิ่งไดโอด ซึ่งค่าความต้านทานของไดโอดขณะไบแอสตรงมีค่าน้อยมากพอที่จะตัดทิ้งได้ ค่าเวลาคงตัว (time constant) ของการลดระดับของกระแส (decay) ในขณะที่ใช้ความแรงต่ำมีค่ามากทำให้กระแสของแต่ละเฟสจะลดลงช้าเมื่อมีการออฟของวงจรขับ ผลของการออฟของแต่ละเฟสของมอเตอร์นี้ ทำให้เกิดทอร์กหน่วง (retarding torque)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกอัตราการนำกระแสของไดโอด เลือกค่าที่ไดโอดหยุดนำกระแสธรรมดาประมาณ $1/2$ เท่าของกระแสสูงสุด ถ้าใช้อัตราเร็วของสเตปต่ำ ค่ากระแสเฉลี่ยที่เห็นไดโอดจะมีค่าน้อยมาก และไดโอดจะกำจัดออกโดยปราศจากการแคมป์ของทรานซิสเตอร์กำลัง

2. การใช้ความต้านทาน – ไดโอด

เมื่อต้องการอัตราเร็วที่สูงขึ้น พลังงานในขดลวดของเฟสที่ออฟจะต้องกระจายออกอย่างรวดเร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งทำได้โดยเพิ่มความต้านทาน R_a อนุกรมเข้ากับพรีวิลติงไดโอด เพื่อลดค่าเวลาคงตัวของวงจร เวลาคงตัวระหว่างที่กระแสลดลงตอนนี้กลายเป็น $L_m/(R_m + R_a)$ ค่าสูงสุดของความต้านทานที่ใช้จำกัดระดับโวลเตจ (suppression resistance) R_a ขึ้นอยู่กับโวลเตจเบรคดาวน์ของ V_{co}



รูปที่ 2.17 แสดงวงจรป้องกันแรงดันเกินที่ใช้ ไดโอด – ความต้านทาน

Voltage เครื่อง collector – emitter ของทรานซิสเตอร์คือ

$$V_{co} = -V - R_a I_m = V(1 - R_s/R_m)$$

ดังนั้น $V_{co} < V_{cor}$ นำไปสู่

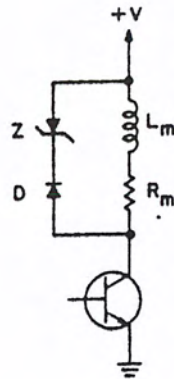
$$R_a < R_m V_{cor}/V - 1$$

3. การใช้ซินเนอร์ไดโอด

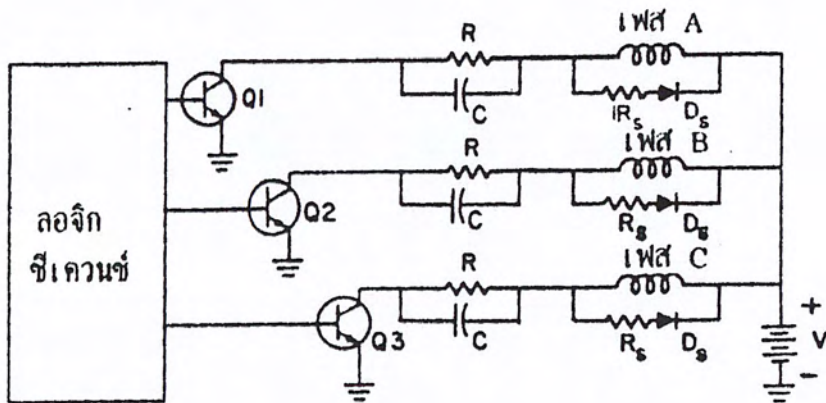
สำหรับการลดลงของกระแสที่เร็วกว่าการใช้ ไดโอด – ความต้าน ได้มีการนำซินเนอร์ไดโอดมาใช้แทน โดยโวลเตจของเฟสที่ออฟจะเพิ่มขึ้นสู่ระดับซึ่งทำให้ซินเนอร์ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการเบรคคาวน์และเริ่มนำกระแส พลังงานจะถูกกระจายไปในรูปของความร้อน สำหรับการเปรียบเทียบการอัตราการลดลงของกระแสของวงจรจำกัดเกินแต่ละแบบ แสดงดังในรูป



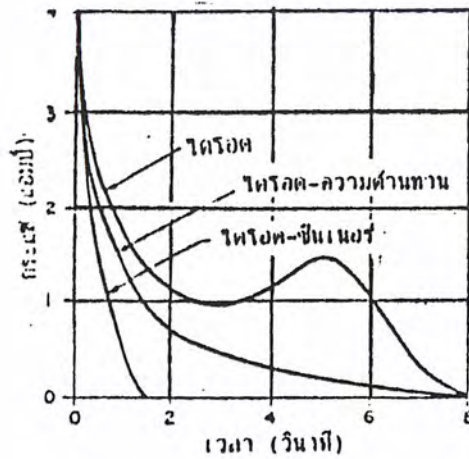
รูปที่ 2.18 แสดงวงจรป้องกันแรงดันเกินโดยใช้ซีนเนอร์ไดโอด



รูปที่ 2.19 แสดงการเพิ่มตัวเก็บประจุที่แต่ละส่วนของวงจรจำกัดแรงดัน

การเพิ่มตัวเก็บประจุในแต่ละส่วนของ โครงข่ายวงจรจำกัดแรงดันสามารถช่วยรักษา ระดับโวลเตจ โดยเฉพาะเมื่อวงจรทำงานมาใกล้ขีดจำกัดสูงสุดของแรงดันที่ทรานซิสเตอร์ทนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อเวลาของการใช้วงจรป้องกันต่างๆ

2.7.2 เทคนิคการเพิ่มระดับกระแสอย่างรวดเร็ว (overdriving method)

เมื่อเพิ่มอัตราเร็วของการเพิ่มกระแสในขดลวดของสเตปมอเตอร์ ไฟเลี้ยงของมอเตอร์ต้องมีค่ามากพอจนสามารถเอาชนะความเหนียวนำของขดลวด และแรงดันย้อนกลับ (back emf) ความเหนียวนำจะขัดขวางการใช้งานมอเตอร์ที่ความเร็วสูง เมื่อความเร็วในการสวิตช์แต่ละเฟสเพิ่มขึ้นเวลาไม่เพียงพอที่จะยกระดับกระแสเพื่อให้เกิดแรงบิดได้ทัน ดังนั้นความเร็วของการทำงานของมอเตอร์ถูกจำกัด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานให้กับมอเตอร์ มีวิธีการของ โอเวอร์ไดรฟ์ (overdriving method) เพื่อลดเวลาในการยกระดับกระแส และเวลาในการลดระดับกระแสของแต่ละเฟสวิธีการนี้ ใช้สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านความเร็วให้กับมอเตอร์ ซึ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้

- 1) การใช้ความต้านทานต่ออนุกรมกับวงจรขับ (series – resistance driver)
- 2) การใช้วงจรขับแบบใช้โวลเตจสองระดับ (bilevel voltage driver)
- 3) การใช้วงจรขับแบบชอปเปอร์ (chopped voltage driver)

การเพิ่มรูปแบบของวงจรจำกัดระดับแรงดัน ซึ่งจะถูกใช้เกี่ยวกับการปรับปรุงอัตราการเพิ่ม – ลด ของกระแส จะกล่าวถึงรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การต่อความต้านทานอนุกรมกับวงจรขับ (series resistance driver)

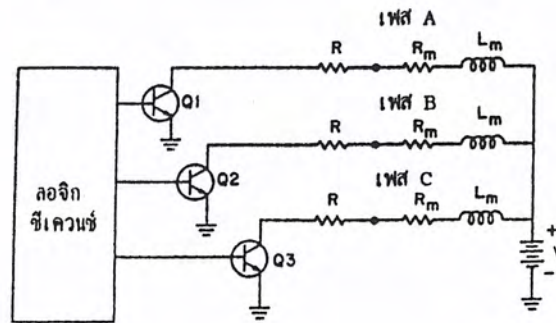
เป็นรูปแบบธรรมดาและราคาถูกที่สุด ในการเพิ่มประสิทธิภาพของสเตปมอเตอร์ คือการต่อความต้านทานอนุกรมเข้ากับขดลวดแต่ละเฟสของมอเตอร์ การเพิ่มความต้านทานภายนอกทำให้ค่าเวลาคงตัวของวงจรลดจาก Lm/Rm ไปเป็น $Lm/(Rm+R)$ ทำให้เวลาเพิ่ม – ลดระดับกระแส

ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

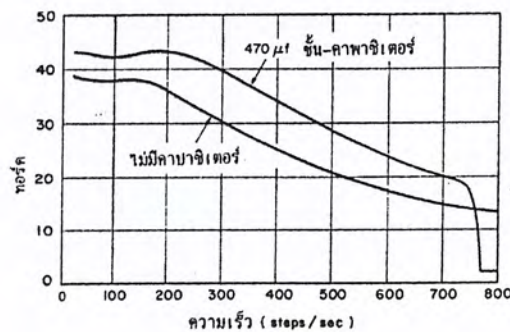
ข้อเสีย ของการต่อความต้านทานอนุกรม คือ การสูญเสียกำลัง ค่าความต้านทานต่อภายนอกมีมากขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุให้ระบบไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ ลักษณะการต่อความต้านทานอนุกรมมีผลดังต่อไปนี้คือ

1) จำนวนความต้านทานถูกแทนที่โดย ความต้านทานตัวเดียวระหว่างแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงกับมอเตอร์



รูปที่ 2.21 การใช้ความต้านทานต่ออนุกรมกับขดลวดของสเตปมอเตอร์

2) ความต้านทานอนุกรมจะขนานกับตัวเก็บประจุเพื่อเตรียมส่วนที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำระหว่างการเกิดทรานเซียน (transient) รูปที่ 17 แสดงวงจรขับกำลังซึ่งมีไดโอด - ความต้านทานการต่อตัวเก็บประจุขนานกับความต้านทานทำให้มีการเพิ่มขึ้นของพลู-เอาทอร์ทอร์ค ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.22 แสดงผลการต่อตัวเก็บประจุขนานกับความต้านทาน

ค) ประสิทธิภาพของระบบจะเพิ่มขึ้น โดยการต่อความต้านทานแบบคอมมอน โหลด (common load) ขนานกับทรานซิสเตอร์ระหว่างการใช้ความเร็วสูง วิธีการนี้จะช่วยให้การเปลี่ยนกระแสระดับเร็วขึ้น แต่จะมีข้อเสียอยู่ที่การสูญเสียกำลังมาก

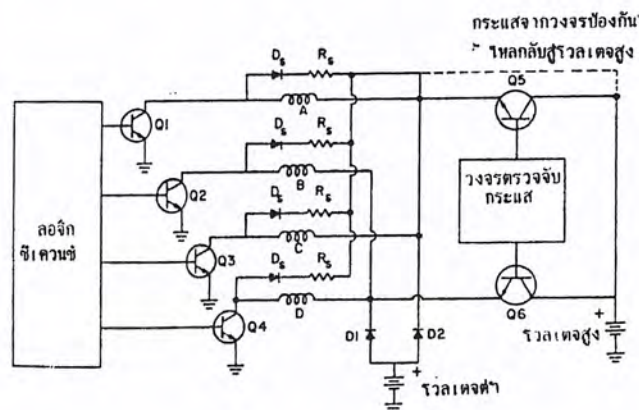
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 วงจรขับสเตปมอเตอร์โดยทั่วไป

2.8.1 วงจรขับแบบใช้โวลเตจสองระดับ (bilevel voltage)

เป็นวิธีการขับที่มีประสิทธิภาพกว่ารูปแบบของการต่อความต้านทานอนุกรม ซึ่งโวลเตจสูงสำหรับการยกกระดัดกระแส และสวิตช์ไปยังโวลเตจต่ำเมื่อมาถึงอัตรากระแสที่ต้องการหรือมาถึงเวลาที่กำหนด วิธีการนี้เรียกว่าการขับแบบโวลเตจคู่หรือการขับแบบสองระดับ การขับแบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการขับแบบมีความต้านทานต่ออนุกรม ซึ่งมีการทำงานสวิตช์ไปที่โวลเตจสูงเมื่อกระแสมาถึงระดับที่ต้องการเมื่อถึงเวลาที่ตั้งไว้โวลเตจสูงจะสวิตช์ออฟ กระแสที่อยู่ในขดลวดนี้จะไหลผ่านไดโอด D_1 โดยโวลเตจระดับต่ำจะทำงานแทน

เมื่อพิจารณาการลดลงของเวลาในการเปลี่ยนระดับกระแสของระบบการขับสองระดับเปรียบเทียบกับแบบการต่อความต้านทานอนุกรม โวลเตจคร่อมขดลวดจะยังคงอยู่ทั้งหมดจนกระทั่งกระแสเพิ่มขึ้น จนถึงระดับกระแสที่ต้องการ แม้ค่าเวลาดังกล่าวจะไม่ลดลงเหมือนในแบบการต่อความต้านทานอนุกรม ค่าการยกกระดัดกระแสค่อนข้างจะมีลักษณะเป็นเชิงเส้น หลังจากโวลเตจสูงสวิตช์ไปสู่วอลเตจต่ำ กระแสจะตกลงและเกิดแรงดันย้อนกลับ



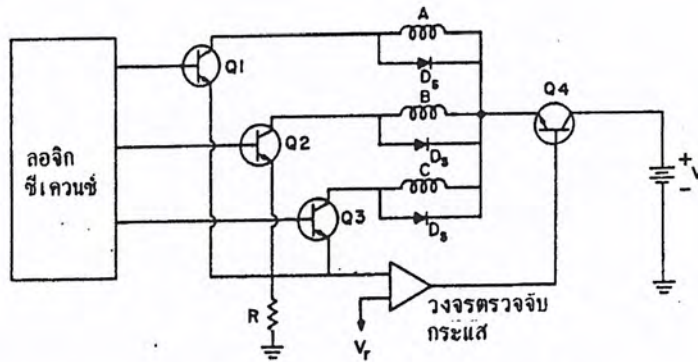
รูปที่ 2.23 แสดงวงจรขับสเตปมอเตอร์แบบโวลเตจสองระดับ

ขณะที่ทรานซิสเตอร์ Q_5 และ Q_6 ไม่ทำงานไดโอด D_1 และ D_2 ของระดับโวลเตจต่ำนำกระแสอยู่ เมื่อโวลเตจสูงทำงานทรานซิสเตอร์ Q_5 และ Q_6 นำกระแสไดโอด D_1 ต้องหยุดนำกระแสทันทีและแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงโวลเตจต่ำจะกลายเป็นระบบภายนอก การทำงานจะเป็นลักษณะนี้สลับกันไปตลอดช่วงการทำงาน ไดโอดกระแสสูงโดยทั่วไปจะมีค่าเวลาในการคืนตัวช้า มักจะอยู่ในระดับ μsec ดังนั้นในกรณีนี้จึงมีความจำเป็นต้องใช้ไดโอดชนิดคืนตัวเร็ว (Fast Recovery Diode) เพื่อให้การเกิดสไปค์ของกระแส (current spike) ในขณะที่มีแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงอยู่ในระดับที่ปลอดภัยโดยที่แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงที่มีระดับโวลเตจต่ำควรออกแบบให้มีระดับกระแสที่เพียงพอในการต้านกระแสย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2 วงจรขับแบบชอปเปอร์ (Chopped - voltage Driver)

เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะใช้งานมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง คือ การใช้พัลส์วิดมอดคูเลชัน หรือฟริควเอนซีมอดคูเลชัน (frequency modulation) ควบคุมกระแสเฉลี่ยที่จะให้กับสเตปมอเตอร์ วงจรง่าย ๆ ของวงจรขับแบบชอปเปอร์แสดงดังรูปที่ 19 เมื่อเฟสใดเฟสหนึ่งของมอเตอร์อินทราซินคเตอร์ Q_4 จะสวิตช์ไปสู่โวลเตจระดับสูงออนและออฟตลอดเวลา การใช้ไฟเลี้ยงที่มีระดับโวลเตจสูงเป็นสาเหตุให้กระแสในแต่ละเฟสเพิ่มระดับอย่างทันทีทันใด เหมือนในวงจรขับแบบโวลเตจสองระดับ มีวงจรตรวจระดับกระแสเพื่อจะเซ็ทค่าการออฟของสวิตช์ซึ่งทรานซิสเตอร์ Q_4 เมื่อกระแสมาถึงระดับที่ต้องการและเมื่อกระแสลดลงต่ำกว่าค่าเทรชโฮลด์ (threshold) ทรานซิสเตอร์ Q_4 จะออนอีกครั้งหนึ่งการทำงานของวงจรมีจะยอมให้กระแสเฉลี่ยคงอยู่ในระดับที่ต้องการ ดังแสดงในรูป 20 ในกรณีนี้ความถี่ของชอปป์จะอยู่ระหว่าง 1 KHz - 30 KHz ขึ้นอยู่กับค่าเวลาคงตัวของกัปันขดลวดของมอเตอร์และฮิสเทอรีซิส (hysteresis) ของวงจรตรวจระดับกระแส ความถี่ของชอปป์มักจะเซ็ทอยู่สูงกว่าช่วงที่กำหนดเพื่อหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำ ซึ่งเกิดจากการสั่นของมอเตอร์

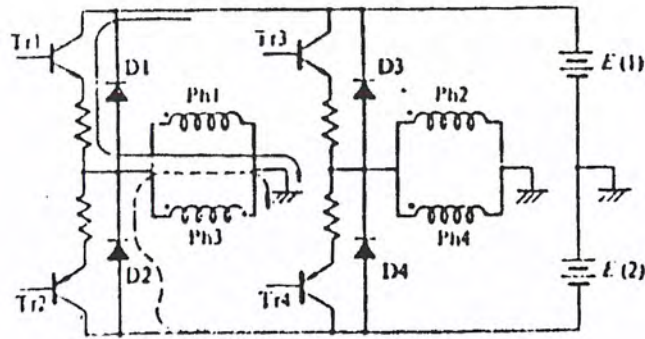


รูปที่ 2.24 แสดงวงจรขับแบบชอปเปอร์

2.8.3 วงจรขับแบบบริดจ์

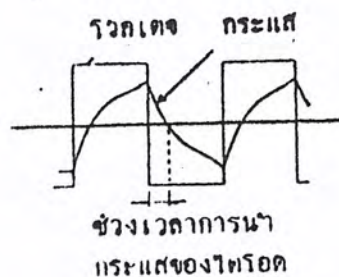
ประสิทธิภาพในการใช้งานสเตปมอเตอร์จะสูงขึ้นถ้าควบคุมการไหลของกระแสให้ไหลได้ในสองทิศทาง ซึ่งช่วยให้ทอร์คเพิ่มขึ้น 20 - 36% ของการใช้วงจรขับแบบมีกระแสไหลทางเดียว วงจรขับสเตปมอเตอร์แบบบริดจ์มีสองชนิด คือ แบบมีแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงเดียวและแบบมีสองไฟเลี้ยงเดียว (single supply) และแบบมีแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงสองแหล่ง (double supplies) ซึ่งจะมีคุณสมบัติในการทำงานดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 แสดงวงจรขับแบบบริดจ์สำหรับการขับแบบไบโพลาร์

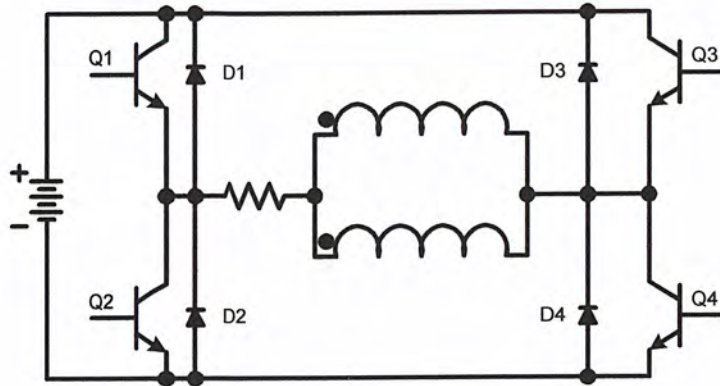
1. การต่อขดลวดของมอเตอร์ถ้ามอเตอร์มี 8 ขั้ว กระแสสลับจะสามารถไหลผ่านได้ เหมือนกับมอเตอร์สองเฟส
2. การป้องกันอันตรายอันเกิดจากทรานซิสเตอร์ออนในขณะที่อีกตัวหนึ่งยังนำกระแสอยู่ ทำได้โดยการใส่วงจรหน่วงเวลาคือความต้านทานเข้าไประหว่างทรานซิสเตอร์ทั้งสอง
3. การใช้ไดโอดเพื่อป้องกันสไปค์โวลเตจโดยไดโอดจะถูกใส่ขนานเข้าไปกับทรานซิสเตอร์กำลังเพื่อกำจัดสไปค์โวลเตจเมื่อทรานซิสเตอร์ “ออฟ” การทำงานของไดโอดจะแตกต่างจากแบบ unipolar ถ้า Tr1 นำกระแสซึ่งแสดงโดยเส้นทึบ เมื่อ Tr1 “ออฟ” และ Tr2 “ออน” กระแสไม่ได้ไหลกลับทิศแต่จะไหลผ่านไดโอด D2 และเบตเตอร์ E2 ซึ่งแสดงโดยเส้นประ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าเบตเตอร์ D2 ตอนนี้จะถูกประจุ หรือถ้าพิจารณาในเทอมของพลังงาน พลังงานจากสนามแม่เหล็กจะถูกป้อนกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง ในขณะที่การขับสเตปมอเตอร์แบบ unipolar พลังงานจากสนามแม่เหล็กจะถูกใช้ไปในขดลวด ไดโอดความต้านทานภายนอกและซีเนอร์ไดโอด ซึ่งทำให้การขับแบบไบโพลาร์มีข้อดีกว่า



รูปที่ 2.26 แสดงรูปคลื่นของโวลเตจและกระแสของการขับสเตปมอเตอร์แบบไบโพลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. กระแสในทิศทางกลับสำหรับการขับแบบ unipolar ต้องใช้วงจร suppression เพื่อแดมป์กระแสหลังจากออฟทราวนซิสเตอร์ แต่สำหรับการขับแบบ bipolar จะให้โวลเตจเพื่อให้กระแสไหลกลับทิศ หลังจากกระแสที่เหลืออยู่หลังจากทรานซิสเตอร์ออฟกลายเป็นศูนย์ และจะมีกระแสชุดใหม่เพิ่มขึ้นผ่านทรานซิสเตอร์ Tr2 ในทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้นรูปคลื่นของกระแสจะไม่เป็นเอกซ์โปเนนเชียล ขึ้นอยู่กับ emf ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของโรเตอร์



รูปที่ 2.27 แสดงอีกรูปแบบหนึ่งของวงจรขับแบบบริดจ์ซึ่งใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงเดียว

อีกรูปแบบหนึ่งของการขับแบบไบโพลาร์ แสดงดังในรูป ซึ่งในกรณีนี้จะใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงเดียว แต่ใช้ทรานซิสเตอร์สี่ตัวสำหรับแต่ละเฟส ความต้านทานจะถูกต่อขนานกับขดลวดเพื่อการเพิ่มระดับกระแสที่เร็วขึ้น วงจรหน่วงเวลาใช้เพื่อป้องกันทรานซิสเตอร์นำกระแส overlap กัน

2.9 วงจรขับสเตปมอเตอร์สำหรับการขับแบบไมโครสเตป

ขนาดสเตปมอเตอร์ปกติของสเตปปิ้งมอเตอร์ สามารถแบ่งเป็นสเตปการเคลื่อนที่ขนาดเล็กได้เรียกว่ามินิสเตปหรือไมโครสเตป ซึ่งจากเดิมในการใช้การขับสเตปมอเตอร์แบบสเตปปกติ แรงบิดของแต่ละเฟสจะเปลี่ยนแปลงแบบไซน์ (sine) กับตำแหน่งโรเตอร์ดังนี้

$$T_A = -KT I_A \sin P\theta$$

$$T_B = -KT I_B \sin P\theta$$

หลักการงานโดยทั่ว ๆ ไปของสเตปมอเตอร์ขดลวดที่พันอยู่ที่สเตเตอร์ ถูกกระตุ้นโดยกระแสบวกหรือลบทำให้การเคลื่อนที่เชิงมุมมีการเปลี่ยนแปลงไป $/2p$ สำหรับการกระตุ้นแต่ละครั้งการขับแบบไมโครสเตป จะกำหนดให้ใช้การขับแบบกระตุ้นที่ละสองเฟสกระแสในแต่ละเฟส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นสัดส่วนของกระแสสูงสุดของเฟสนั้น กระแสในเฟสทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงแบบต่อเนื่อง และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเป็นสัดส่วนต่อกัน จะได้ว่า

$$I_a = I \cos \phi$$

$$I_b = I \cos (\theta - \pi/2)$$

ดังนั้นทอร์ก ทั้งหมดที่ผลิตโดยมอเตอร์

$$\begin{aligned} T &= T_A + T_B = -KT.I [\sin p\theta \cos \phi + \sin (p\theta - \pi/2) \cos (\theta - \pi/2)] \\ &= -KT.I \sin (p\theta - \phi) \end{aligned}$$

และตำแหน่งสมดุลย์ สำหรับมุมโหลด (load angle) เท่ากับศูนย์คือ

$$\theta = \phi/p$$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าจุดสมดุลย์ของโรเตอร์สามารถอยู่ที่ตำแหน่งใด ๆ ในสเตปเล็ก ๆ ระหว่างสเตปใหญ่ ($\theta = 0, \pi/2p, \pi/p, 3\pi/2p$) ถ้าขดลวดที่สเตเตอร์ถูกกระตุ้นด้วยสัดส่วนของกระแสที่ถูกต้อง การควบคุมการขับเคลื่อนไมโครสเตป กระแสในขดลวดจะมีหลายระดับ ดังนั้น การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ที่เคลื่อนที่เป็นในไมโครสเตประหว่างสเตปใหญ่ จะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงระดับกระแสในขดลวดระหว่างสองเฟสที่ได้รับการกระตุ้น ดังนั้นจะได้

$$\text{Microstep length} = \text{rator length} = \text{rotor tootor pitch}/2nl$$

ในการขับเคลื่อนสเตป จุดสมดุลย์ของการหมุนจะวางตัวอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันของซี่ฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์ซึ่งไม่ขึ้นกับระดับของกระแส แต่สำหรับตำแหน่งสมดุลย์ของมินิสเตปจะขึ้นกับกระแสในแต่ละเฟส และระดับความผิดพลาดของกระแสทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในลักษณะความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่ง (position error) ความต้องการในการเปลี่ยนแปลงกระแสกับตำแหน่งของโรเตอร์สามารถพิจารณาจาก คุณลักษณะของทอร์ก ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงแบบโคไซน์ (cosine) กับตำแหน่งที่ต้องการ โดยทอร์กจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสในแต่ละเฟส การเกิดการอิมตัวของกระแสแม่เหล็กเป็นสาเหตุให้แรงบิดและตำแหน่งเปลี่ยนไปจากความสัมพันธ์แบบเป็นเชิงเส้น แต่ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการปรับระดับกระแสเพื่อจะได้รูปแบบไมโครสเตปที่เหมือนกัน

เมื่อไมโครสเตปสามารถสร้างได้ขนาดเล็กกว่าขนาดเต็มสเตปปกติ (อาจจะลดลงได้ถึงขนาดหลาย ๆ ไมโครสเตปต่อหนึ่งสเตป) ความละเอียดทางตำแหน่งของสเตปปิ้งมอเตอร์จะดีขึ้น แต่ทำให้ค่าสูงสุดของทอร์กจะถูกระมาณเท่ากับทอร์กของไมโครสเตปนั้น ๆ ดังนั้นความผิดพลาดทางตำแหน่ง (position error) ขึ้นอยู่กับโหลดทอร์กโดยทั่วไปเมื่อสเตปปิ้งมอเตอร์ทำงาน

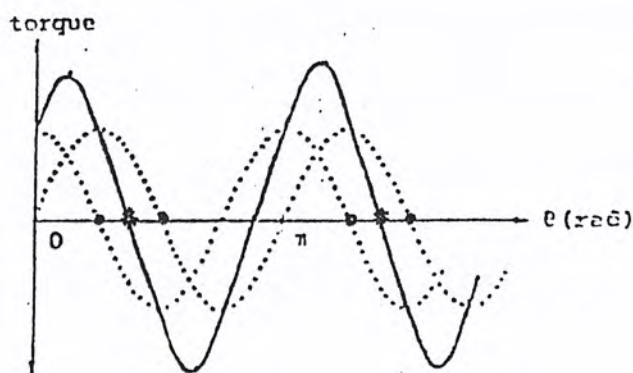
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เต็มสเตรปปกติจะมีการเรโซแนนซ์ทางแมคคานิกส์ แต่การจับแบบไมโครสเตรปจะช่วยให้มีความสม่ำเสมอในการเคลื่อนที่ระหว่างขนาดสเตรปแบบเต็มสเตรปปกติ

ความถูกต้องแม่นยำของสเตรปมอเตอร์ขึ้นอยู่กับความถูกต้องแม่นยำของวงจรถวลุม โดยเฉพาะที่ระดับกระแสต่ำ การไม่สมดุลย์ทางเฟสทำให้ไม่เกิดความคลาดเคลื่อนทางการควบคุมตำแหน่ง ในวิธีการจับแบบไมโครสเตรป วงจรพัลส์วิดมอดูเลชันมักจะถูกใช้เมื่อต้องการความถูกต้องแม่นยำทางตำแหน่งสูงมากกว่าการใช้วงจรง่าย ๆ โดยทั่วไป

กระแสในแต่ละเฟสจะต้องสร้างสเตรปขึ้นได้ทันทีตามโพรไฟล์ อาจจะเป็นรูปแบบไซน์ โดยโพรไฟล์เดียวกันไม่สามารถให้การตอบสนองที่เหมาะสม สำหรับแต่ละมอเตอร์ ดังนั้นจุดประสงค์ของการสร้างสัญญาณควบคุมแบบไมโครสเตรป เพื่อต้องการให้ใช้งานได้กับสัญญาณหลายชนิดซึ่งต้องปรับระดับกระแสของโพรไฟล์กระแส ข้อมูลของโพรไฟล์ถูกเก็บไว้ใน EPROM การเปลี่ยนแปลงของโพรไฟล์จะเกี่ยวกับการบวกรหรือการลบฮาร์โมนิกที่สามออกจากรูปคลื่นไซน์พื้นฐาน

ข้อเสียของไมโครสเตรป คือ เรื่องราคาของวงจรถวลุมการจ่ายกระแส เพื่อกระตุ้นขดลวดเนื่องจากต้องการกระแสหลายระดับ ความซับซ้อนของวงจรถวลุมจึงมีมากขึ้นซึ่งทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการสร้างวงจรถวลุมมากขึ้น



รูปที่ 2.28 แสดงการเปลี่ยนแปลงของทอร์กและจุดสมดุลของการหมุนระหว่างสองเฟสที่ได้รับ การกระตุ้นเมื่อใช้การจับแบบกระตุ้นที่ละสองเฟส

2.10 สรุป

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงโครงสร้างพื้นฐานและหลักการทำงานของสเตปมอเตอร์ รวมทั้งคุณลักษณะของทอร์คของสเตปมอเตอร์ ซึ่งต้องพิจารณาถึงความสามารถและข้อจำกัดในการทำงาน เพื่อนำมาสร้างเป็นระบบควบคุมที่ต้องการ นอกจากนี้ยังกล่าวถึงวงจรควบคุมและวงจรขับสเตปมอเตอร์โดยทั่วไป ปัญหาที่เกิดขึ้นกับวงจรและการแก้ปัญหา และสุดท้ายได้กล่าวถึงแนวความคิดและหลักการของการสร้างระบบควบคุมแบบไมโครสเตป โดยการพิจารณาจากคุณลักษณะของทอร์ค

บทที่ 3

การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไมโครสเตป

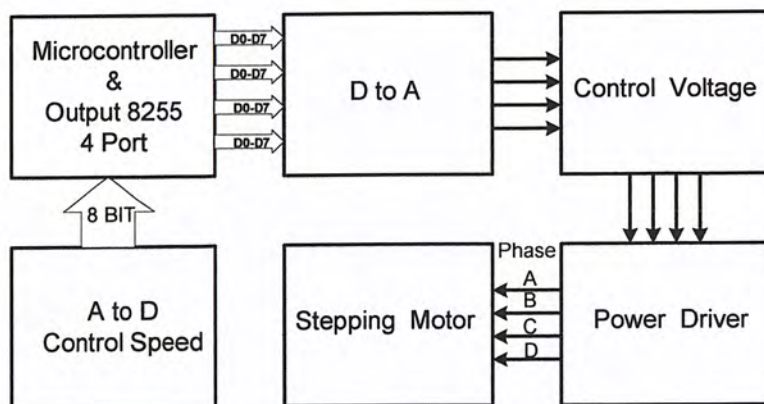
3.1 บทนำ

โดยทั่วไปการขับเคลื่อนมอเตอร์ใช้วงจรขับเคลื่อนแบบโวลเตจคงที่ ซึ่งควบคุมการเคลื่อนที่ของสเตปมอเตอร์ได้เฉพาะการขับเคลื่อนแบบเต็มสเตปและแบบครึ่งสเตปเท่านั้น ไม่สามารถควบคุมการขับเคลื่อนแบบละเอียดขั้นได้ จึงได้มีการสร้างชุดควบคุมขึ้นมาสำหรับการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไมโครสเตป โดยการสร้างสัญญาณควบคุมการจ่ายกระแสของแต่ละเฟสให้เป็นสัดส่วนต่อกัน โดยการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณควบคุม อาศัยหลักการของวงจรแปลงสัญญาณจากดิจิตอลเป็นอนาลอก แต่วงจรแปลงสัญญาณจากดิจิตอลเป็นอนาลอกโดยทั่วไปใช้ได้กับระดับโวลเตจต่ำๆ เท่านั้น แต่ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ต้องใช้ระดับกระแสสูง และใช้ระดับโวลเตจสูง ดังนั้นจึงต้องสร้างอุปกรณ์ขึ้นมาสำหรับการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้สามารถทนโวลเตจสูงได้ และเพื่อความสะดวกในการสร้างสัญญาณควบคุม ซึ่งต้องการการเปลี่ยนแปลงที่ละเอียดและต่อเนื่อง จึงได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 8031 มาควบคุมการทำงานทั้งหมดของระบบ

3.2 ส่วนประกอบของส่วนควบคุมระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไมโครสเตปและการควบคุมวงจรเปิด

3.2.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบ

ไมโครสเตป



รูปที่ 3.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไมโครสเตปและการควบคุมแบบ

วงจรเปิด

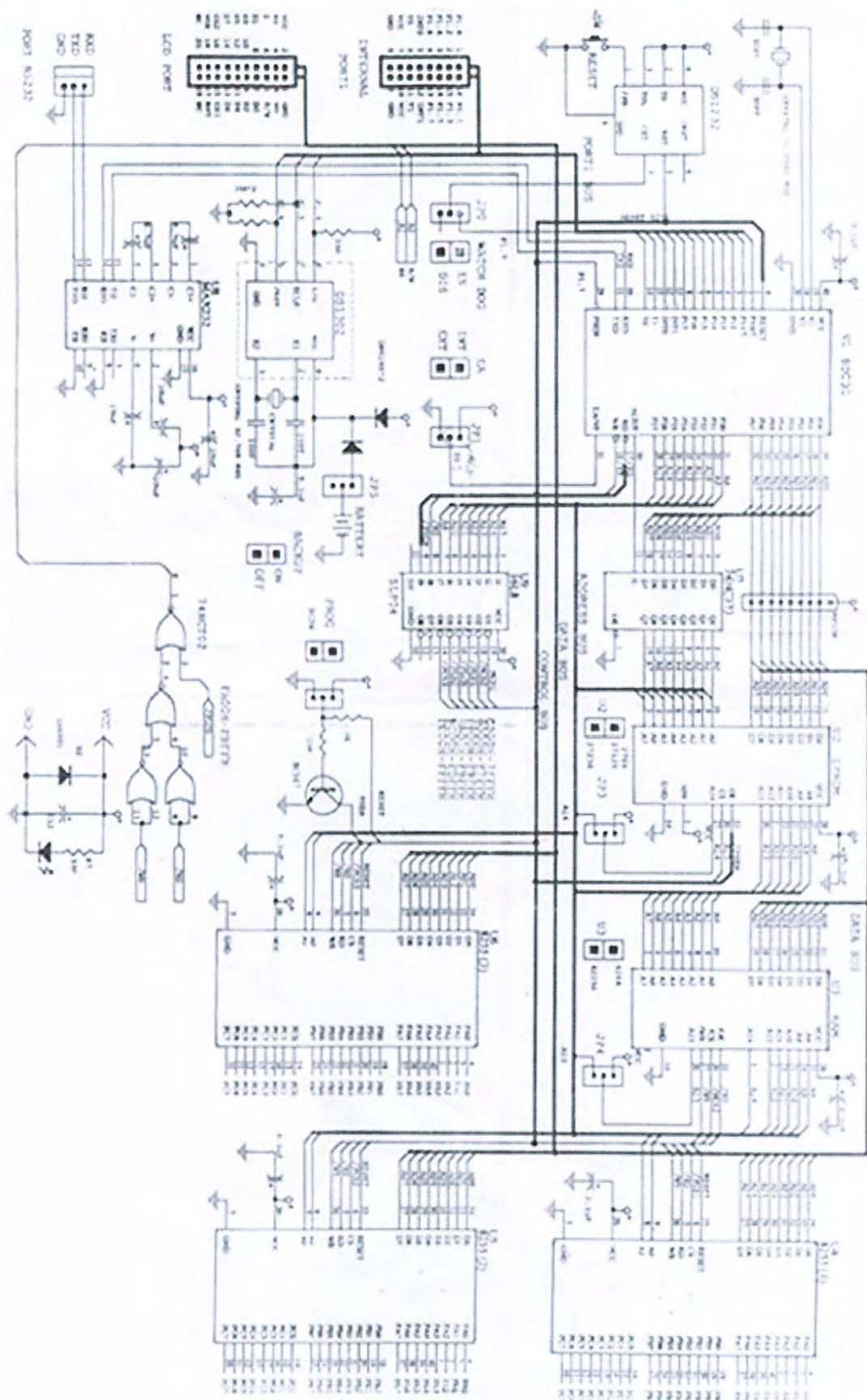
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบควบคุมของการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไมโครสเตป ซึ่งแสดงในบล็อกไดอะแกรมนี้ ระบบประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งควบคุมการกระแสของวงจรขับ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานร่วมกับวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก สำหรับการสร้างสัญญาณที่เป็นขั้นบันไดหรือลักษณะสัญญาณไซน์ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสัญญาณควบคุมได้โดยการควบคุมจากซอฟต์แวร์ สัญญาณที่ได้จากวงจรแปลงสัญญาณจากดิจิทัลเป็นอนาล็อก นี้จะให้เป็นสัญญาณควบคุมส่วนขยายกระแสของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ ระบบนี้จะมีส่วนป้อนกลับโดยการคับปลิ่งกับออฟติคัลเอนโค้ดเดอร์ป้อนสัญญาณเป็นผลตอบสนองจากการเคลื่อนที่ของสเตปมอเตอร์กลับไปให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งของการเคลื่อนที่ที่ต้องการ ดังแสดงในบล็อกไดอะแกรมของระบบ

3.3 วงจรของไมโครคอนโทรลเลอร์

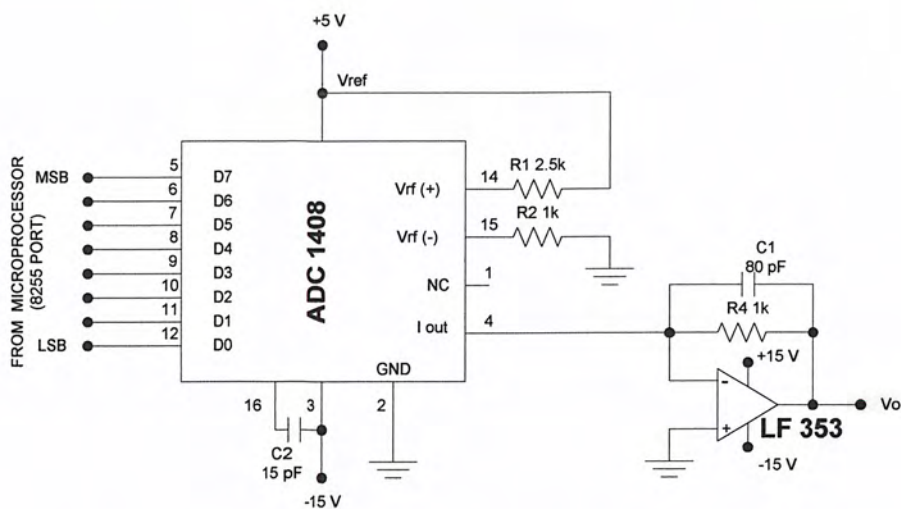
การควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไมโครสเตปและแบบวงจรปิด จะมีความสะดวกในการควบคุมมากขึ้น ถ้าใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาเป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบแทนที่จะใช้ระบบเป็นฮาร์ดแวร์ทั้งหมด เนื่องจากสามารถเปลี่ยนแปลงหรือสร้างสัญญาณควบคุมได้ตามต้องการ ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่นำมาใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 89C51 ซึ่งสามารถเชื่อมต่อกับไมโครคอมพิวเตอร์ได้ทั้งหมดและส่งข้อมูลผ่านพอร์ทอนุกรม RS-232 ไปยังบอร์ดของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยบอร์ดของไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีส่วนของวงจรแปลงอนุกรมไปเป็นสัญญาณขนานระดับ TTL สำหรับการควบคุมของระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไมโครสเตปต่อไป ดังแสดงในบล็อกไดอะแกรมของรูปที่ 3.1

สำหรับการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไมโครสเตป ต้องการสร้างสัญญาณที่มีระดับโวลเตจต่างระดับหลายระดับ ดังนั้นจึงต้องการอินพุทเอาต์พุทพอร์ทขนาด 8 บิตจำนวนสี่ชุดเท่ากับจำนวนเฟสของสเตปมอเตอร์ที่ใช้ การสร้างสัญญาณโวลเตจต่างระดับต้องการการทำงานร่วมกันระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจร R-2R ladder ซึ่งสามารถปรับระดับโวลเตจได้เท่ากับระดับไฟเลี้ยงของภาควงจรขับ โดยความละเอียดของระดับโวลเตจที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้จะเท่ากับจำนวนบิต ของวงจร R-2R ladder โดยลำดับการทำงานของอินพุทเอาต์พุทแต่ละชุดจะสลับการทำงานกันไปตามลำดับเฟสของสเตปมอเตอร์ และจะใช้พอร์ทภายใน (internal port) ของไมโครคอนโทรลเลอร์ 89C51 เป็นส่วนของการตรวจสอบสัญญาณป้อนกลับจากออฟติคัลเอนโค้ดเดอร์ สำหรับการควบคุมแบบวงจรปิดวงจรของไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงดังในรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 แสดงวงจรของไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงวงจรภาคแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกแสดงเพียง 1 เฟส

จากภาพ กระแส I_0 คือ กระแสเอาต์พุตที่ได้จาก MC 1408 กระแส นี้จะขึ้นอยู่กับ กระแสภาวะ “0” หรือ “1” ของสัญญาณ ไบนารีทางอินพุตดังสมการ ต่อไปนี้

$$I_0 = \frac{V_{ref}}{R_1} \left(\frac{D_7}{2} + \frac{D_6}{4} + \frac{D_5}{8} + \frac{D_4}{16} + \frac{D_3}{32} + \frac{D_2}{64} + \frac{D_1}{128} + \frac{D_0}{256} \right)$$

- เมื่อ
- I_0 = กระแสเอาต์พุตของ DAC (mA)
 - R_1 = ค่าความต้านทานที่ต่อทางขา 14 ของไอซี MC 1408 ($k\Omega$)
 - V_{ref} = ค่าแรงดันอ้างอิง (โวลต์)
 - D_0 - D_7 = สัญญาณ ไบนารีทางอินพุต

จากสมการดังกล่าวจะเห็นว่า กระแส I_0 จะเป็นศูนย์เมื่อสัญญาณ ไบนารีทางอินพุต (D_0 - D_7) มีค่าเท่ากับ “0” ในทางตรงกันข้ามกระแส I_0 นี้ จะมีค่าสูงสุดเมื่อทุกบิตทางอินพุตเป็น “1” หรือ กล่าวได้ว่า กระแส I_0 นี้ ฟังก์ชันของภาวะของสัญญาณไบนารีทางอินพุต และสามารถเปลี่ยนค่า I_0 นี้ เป็นค่าแรงดันเอาต์พุต (V_0) ได้โดยการเลือกใช้ค่า R_f ที่เหมาะสมได้ ดังนั้นวงจรนี้จะให้ สัญญาณแรงดันเอาต์พุต V_0 ตามต้องการ

$$V_0 = I_0 R_f$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างเมื่อใช้ $V_{ref} = 2$ โวลต์ $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ และ $R_f = 2.7 \text{ k}$ เราจะใช้ช่วงแรงดันเอาต์พุต 0 ถึง 5.38 โวลต์ คือ เมื่อทุกบิตของไบนารีอินพุตเป็น “0” (D_0 - D_7) จะได้ $I_0 = 0$ หรือ $V_0 = 0$ โวลต์และเมื่อ D_0 - D_7 ทุกบิตมีค่าเป็น “1” แล้ว

$$I_0 = \frac{2}{1\text{K}2} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{16} + \frac{1}{32} + \frac{1}{64} + \frac{1}{128} + \frac{1}{256} \right)$$

ดังนั้น จะได้ค่าเอาต์พุตโวลต์สูงสุด

$$\begin{aligned} V_0 &= I_0 R_f \\ &= (1.992 \text{ mA}) (2.7 \text{ k}\Omega) \\ &= 5.38 \text{ V} \end{aligned}$$

ดังนั้น ช่วงของเอาต์พุตของวงจรจะเท่ากับ 0 ถึง 5.38 โวลต์

3.4.2 วงจรรวมชนิด A/D

วงจรรวมชนิด A/D มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในท้องตลาดไม่น้อยกว่า 300 เบอร์ ที่มีคุณลักษณะที่แตกต่างกัน วงจรรวมชนิด A/D แบ่งออกได้ 2 กลุ่มคือ (1) ชนิดเอาต์พุตเป็นบิตซีดี และ (2) A/D ชนิดเอาต์พุตเป็นเลขฐาน 2 สำหรับชนิดเอาต์พุตเป็นบิตซีดีใช้งานทั่วไปในโวลต์มิเตอร์ พานอลมิเตอร์ หรือดิจิตอลมัลติมิเตอร์ และสำหรับชนิดเอาต์พุตเป็นเลขฐาน 2 มีตั้งแต่ 4 บิต ถึง 16 บิตใช้ในระบบไมโครโพรเซสเซอร์และระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ มีชื่อเฉพาะว่า $\mu\text{p-type A/D Converter}$

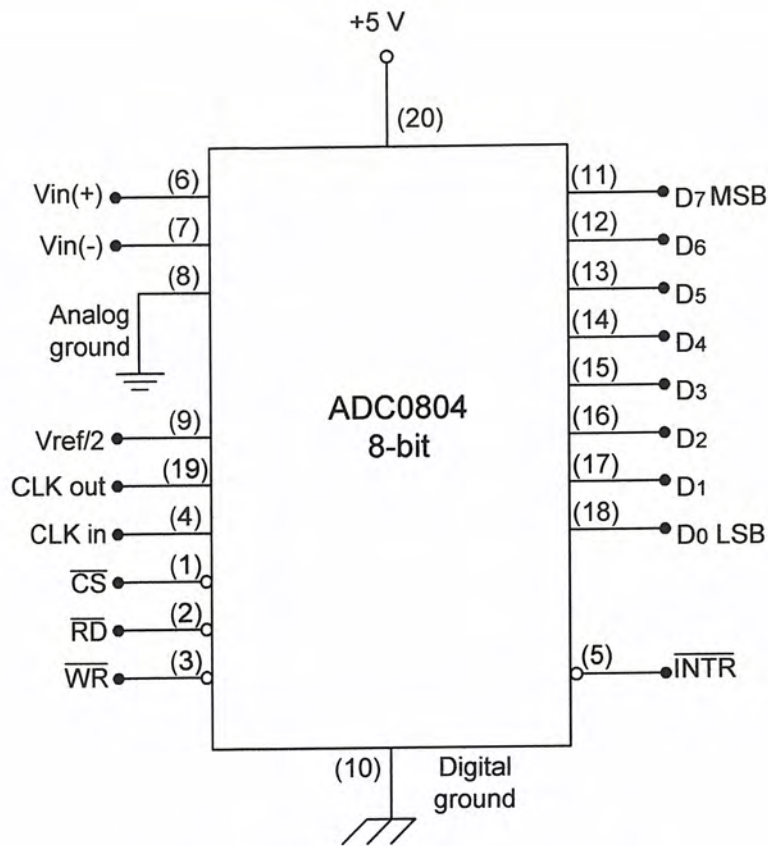
วงจรรวมเบอร์ ADC 0804 เป็นวงจรรวมแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิตอลเอาต์พุตขนาด 8 บิต เอาต์พุตเป็นเลขฐาน 2 มีขา 20 ขา ตัวถังแบบ DIP ลักษณะการจัดวางขาแสดงในรูปที่ 14.28 รายละเอียดและหน้าที่ของแต่ละขามีดังนี้

ขา 1 คือขา CS รับสัญญาณการเลือกทำงานจากไมโครโพรเซสเซอร์

ขา 2 คือขา RD (Read) ขาคควบคุมการอ่านข้อมูลจาก ADC0804 โดยสัญญาณควบคุมมาจากไมโครโพรเซสเซอร์

ขา 3 คือขา WR (Write) ขาคควบคุมการเขียนข้อมูลลงใน ADC0804 โดยสัญญาณควบคุมมาจากไมโครโพรเซสเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 การจัดวางขาของวงจรรวมเบอร์ ADC 0804

ขา 4 คือขา CLR IN รับสัญญาณนาฬิกาจากภายนอก

ขา 5 คือขา INTR (Interrupt) รับสัญญาณอินเทอร์รัพท์มาจากไมโครโพรเซสเซอร์ (ADC0804 ออกแบบมาให้ใช้กับไมโครโพรเซสเซอร์ ขนาด 8 บิตโดยตรง ใช้ได้หลายเบอร์ เช่น Z80, 8085, 6502 และ 6800 เป็นต้น)

ขา 6 คือขา $V_n (+)$ เป็นอินพุตรับแรงดันบวก

ขา 7 คือขา $V_n (-)$ เป็นอินพุตรับแรงดันลบ (0V)

ขา 8 คือขา A GND จุดดินของวงจรแอนะล็อกภายใน ADC0804

ขา 9 คือขา $V_{ref}/2$ เป็นอินพุตรับแรงดันอ้างอิง

ขา 10 คือขา D GND จุดลงดินของวงจรดิจิทัลภายใน ADC0804

ขา 11-18 คือขา Digital output ขา 11 คือขา D7(MSB) และขา 18 คือขา D0 (LSB)

ขา 19 คือขา CLK out เป็นอินพุตสำหรับต่อตัวต้านทานภายนอกสำหรับสัญญาณนาฬิกา

ขา 20 คือขา V_{cc} (or Ref) เป็นขาจ่ายกำลังไฟฟ้า +5 Vcc

วงจรรวม ADC0804 โครงสร้างของวงจรดิจิทัลภายในเป็นแบบซิมอส มีความเร็วในการแปลงสัญญาณแต่ละรอบเท่ากับ $100 \mu\text{S}$ โครงสร้างภายในเป็นแบบ Successive approximation

หรือแบบประมาณค่าต่อเนื่อง และรับแรงดันแอนะล็อกอินพุตได้ในย่าน 0 ถึง +5V ด้านเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

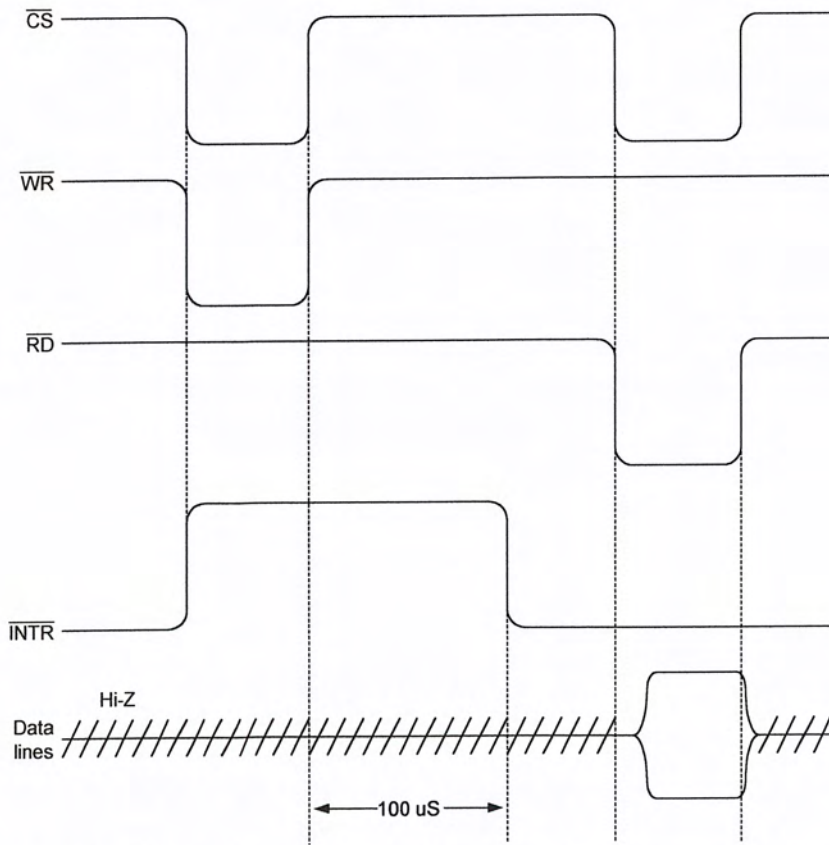
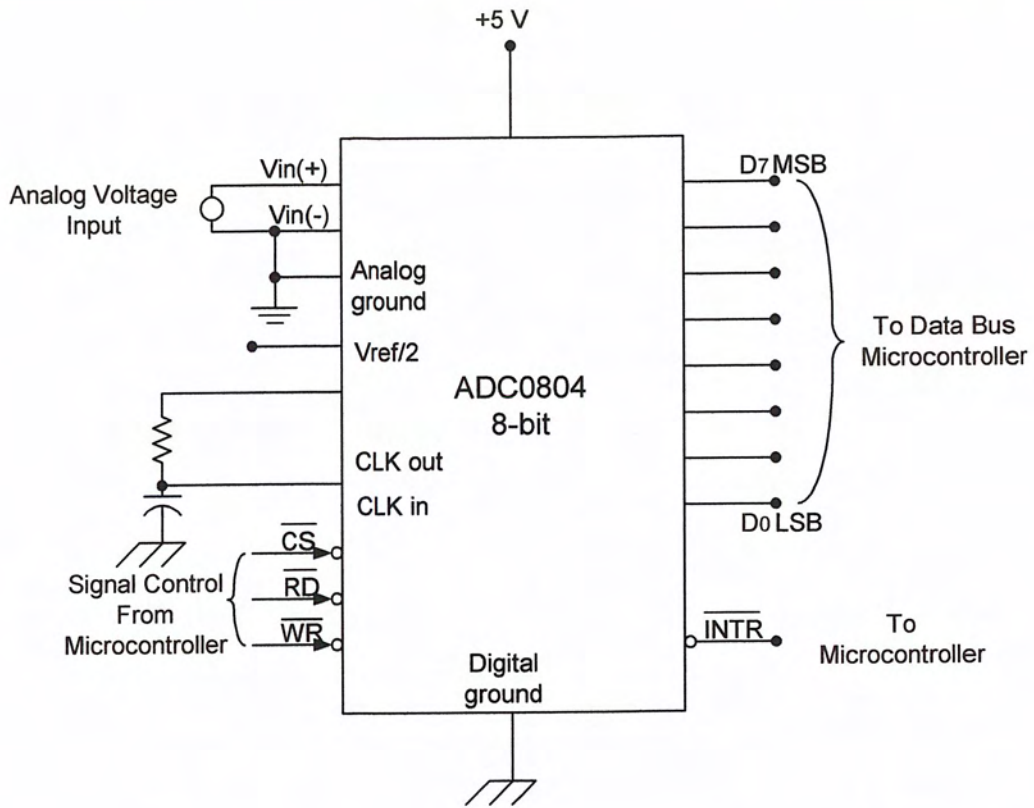
ดิจิตอลมีลอจิก 3 สถานะเป็นบัฟเฟอร์ทำให้ต่อเข้ากับบัสข้อมูลของระบบไมโครโปรเซสเซอร์ได้โดยตรง สะดวกต่อการใช้งาน ค่าความแยกชัดต่อบิตคือ 19.6 mV (เมื่อ $V_{cc} = +5V$ ดังนั้น $Steps = 5V/255 = 19.6$ mV) ความถี่ของสัญญาณที่เหมาะสมคือ $f = 1/1.1RC$ ค่าในคู่มือกำหนด $R = 10k\Omega$ และ $C = 150pF$ R และ C นี้ต่อที่ขา CLK out และ CLK in ดังรูปที่ 14.28 เมื่อแทนค่า $R = 10k\Omega$ $C = 150pF$ จะได้ความถี่ของสัญญาณภายในเท่ากับ 606 kHz แต่ถ้าใช้สัญญาณนาฬิกาภายนอก ต้องต่อเข้าที่ขา CLK out และเปิดวงจร CLK in ที่ความถี่ 606 kHz เวลาในการแปลงข้อมูลแต่ละรอบ คือ 100 การต่อจุดดินของวงจรรวม ADC0840 ควรแยกกันระหว่างจุดดินของดิจิตอล และจุดดินของแอนะล็อก จะเห็นว่าในรูปที่ 14.28 และ 14.29 จะใช้สัญลักษณ์จุดดินต่างกัน เนื่องจากในระบบดิจิตอลมีสัญญาณรบกวนมากกว่าอาจทำให้การทำงานไม่สมบูรณ์ได้

สำหรับอินพุต $V_{in}/2$ เป็นตัวกำหนดผ่านของการรับแรงดันแอนะล็อกอินพุต และกำหนดค่าความแยกชัด (mV) ดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 3.1 อินพุตเป็นตัวกำหนดผ่านของการรับแรงดันแอนะล็อกอินพุต

$V_{in}/2(V)$	แรงดันอินพุต (V)	ค่าแรงแยกชัด (mV)
เปิดวงจร	0-5.0	19.6
2.25	0-4.5	17.6
2.00	0-4.0	15.7
1.50	0-3.0	11.8

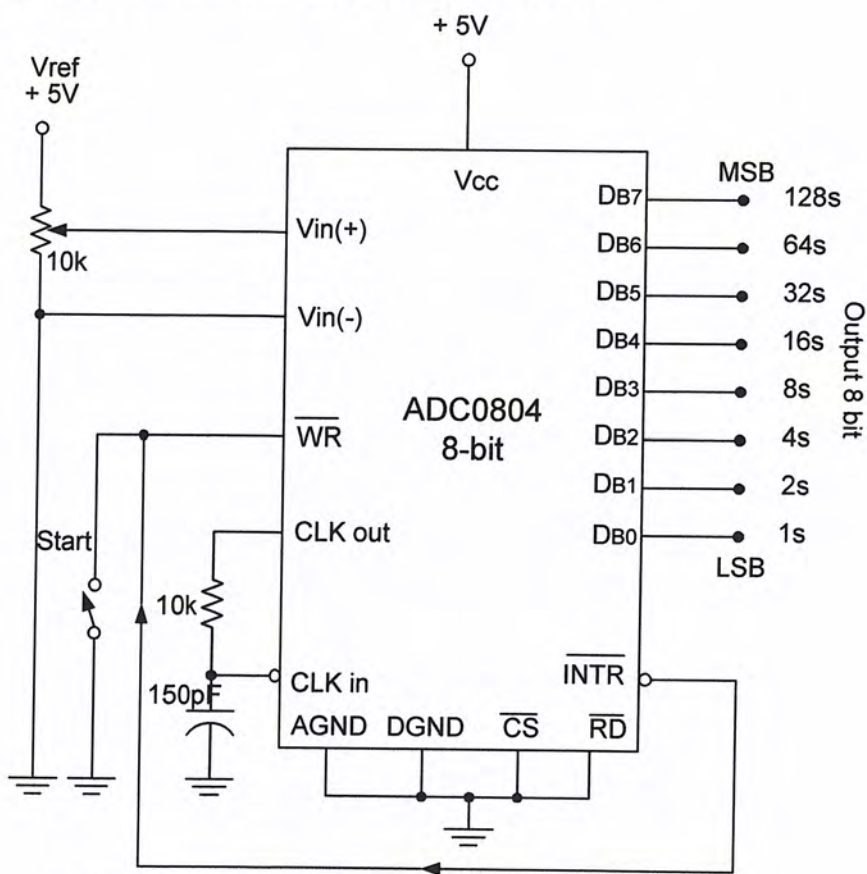
วงจรการต่อวงจรรวมเบอร์ ADC0804 กับระบบไมโครโปรเซสเซอร์ และไคอะแกรมเวลาของสัญญาณ CS WR RD และ INTR แสดงในรูปที่ 14.29 (a), (b) เมื่อได้รับคำสั่ง CS และ WR มาจากไมโครโปรเซสเซอร์ จะใช้เวลาในการแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิตอลประมาณ 100 จากนั้นไมโครโปรเซสเซอร์จะสั่ง CS และ RD เพื่ออ่านข้อมูลดิจิตอลจาก ADC0804 เข้าสู่ข้อมูลของไมโครโปรเซสเซอร์ ดังแสดงในไคอะแกรมในรูปที่ 14.29 (b)



รูปที่ 3.6 แสดงการต่อ ADC0840 กับระบบไมโครโปรเซสเซอร์และไคอะแกรมเวลา แสดงการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

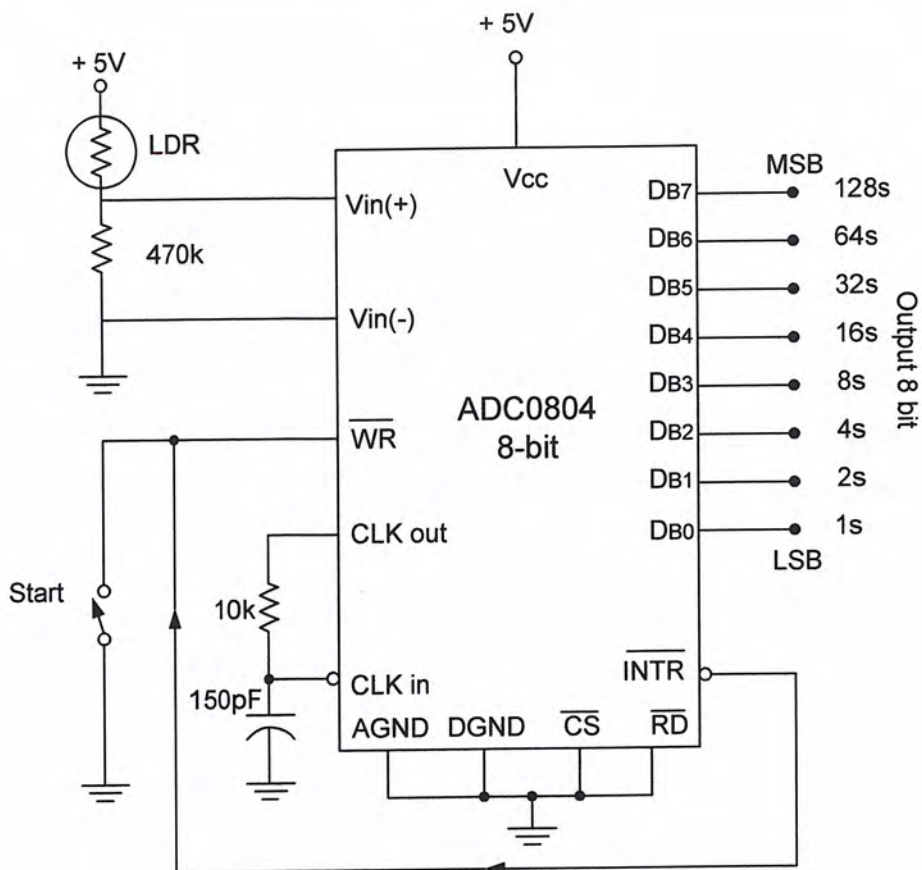
วงจรการต่อ ADC0804 เพื่อทดสอบการทำงานในกระบวนการแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล แสดงในรูปที่ 14.30 โดยต่อแรงดันแอนะล็อกอินพุตเข้าที่ขา $V_{in}(+)$ และ $V_{in}(-)$ ต่อจุดดิน ใช้ $R_{10} \text{ K}\Omega$ เป็นชนิดปรับค่าแรงดันด้านเข้าของวงจรตั้งแต่ 0-5.12 สวิตช์ Start ต่อเข้ากับขา WR และ INTR สำหรับขา CS และ RD ต่อลงจุดดิน ขาสัญญาณนาฬิกา CLK out, CLK in ต่อ R, C ภายนอกโดยใช้สัญญาณนาฬิกาภายใน ADC0804 และขา $V_{ref}/2$ เปิดวงจร ดังนั้นจะรับ V_{in} ได้ 0-5 V และมีค่าความแยกชัดเท่ากับ 19.6 mV ต่อบิต เมื่อปรับค่า $R_{10} \text{ K}\Omega$ ด้านอินพุตไปตำแหน่งต่ำสุด ($V_{in} = 0 \text{ V}$) ไบนารีเอาต์พุตจะเป็น “0” และเมื่อปรับค่า $R_{10} \text{ K}\Omega$ ด้านอินพุตไปตำแหน่งสูงสุด ($V_{in} = 5 \text{ V}$) ไบนารีเอาต์พุตจะเป็น “1” ทั้ง 8 บิต



รูปที่ 3.7 แสดงการทดสอบ ADC0804 ทำหน้าที่เป็นตัวแปลง A/D

เมื่อนำวงจรรวมเบอร์ ADC0804 ไปสร้างประยุกต์เป็นมิเตอร์วัดแสง (Light meter) ได้ ดังรูปที่ 14.31 โดยต่อโฟโตเซลล์ในวงจร คือ R_3 ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่า R ของโฟโตเซลล์จะทำให้แรงดันตกคร่อม R_2 (แรงดัน V_{in}) เปลี่ยนแปลงไป ผลคือ ข้อมูลดิจิทัลเอาต์พุตจะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณความสว่างของแสงที่ตกกระทบโฟโตเซลล์ (R_3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 วงจรวัดแสงด้วย ADC0804

วงจรการวัดแสงด้วย ADC0804 สามารถดัดแปลงให้แสดงผลกับตัวเลข 7 ส่วน ชนิดแอนนอยด์ร่วม โดยใช้ตัวขับชนิดที่แอลเบอร์ 7447 ดังรูปที่ 14.32 โดยใช้ดิจิทัลเอาต์พุตเพียง 4 บิต $D_2 - D_4$ และใช้สัญญาณนาฬิกาความถี่ 1Hz จากวงจรอะอสเตเบิลที่ใช้ไทม์เมอร์เบอร์ 555 เพื่อให้วงจรรวม ADC0804 อ่านค่าการเปลี่ยนแปลงความสว่างของแสงที่ตกกระทบ R_3 ทุก 1 วินาที

3.5 ทฤษฎีการทำงานของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส

จากรูปโครงสร้างและการจัดวงจรใช้งานเบื้องต้น XTR 110 ในรูปที่ 2 จะเห็นว่าสามารถแบ่งส่วนการทำงานออกเป็น (1) ตัวต้านทานเป็นเน็ตเวอร์คสำหรับแบ่งแรงดันคือ $R_1 - R_5$ (2) ส่วนแปลงแรงดันเป็นกระแส ประกอบด้วย A_2, Q_1, R_6, R_7 (3) วงจรแปลงกระแสเป็นกระแสประกอบด้วย A_2, R_8, R_9 และ Q_{EXT} (4) วงจรกำเนิดแรงดันอ้างอิงขนาด 10 โวลต์

ความต้านทาน $R_1 - R_5$ นั้นทำหน้าที่รวมแรงดันจากอินพุตสามแหล่งเพื่อป้อนให้แก่อินพุตของออฟแอมป์ A_1 คือจากอินพุต V_{IN1} (10 โวลต์ฟูลสเกล) V_{IN2} (โวลต์ฟูลสเกล) และ $V_{REF IN}$ สำหรับปรับออฟเซต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออปแอมป์ A_1 จะทำการเปลี่ยนแรงดันที่อินพุตเป็นกระแสจ่ายไปที่ตัวต้านทานสเปน (span) R_6 และ R_7 โดยมีทรานซิสเตอร์ Q_1 เป็นแบบคาร์ลิงตันอัตราขยายสูงเป็นตัวคั้งกระแสผ่าน R_8 ซึ่งกระแสที่ผ่าน R_8 มีค่าเท่ากับ

$$I_{R8} = [(V_{REF} IN/16) + (V_{IN1}/4) + V_{(IN2)/2}] / R_{SPAN}$$

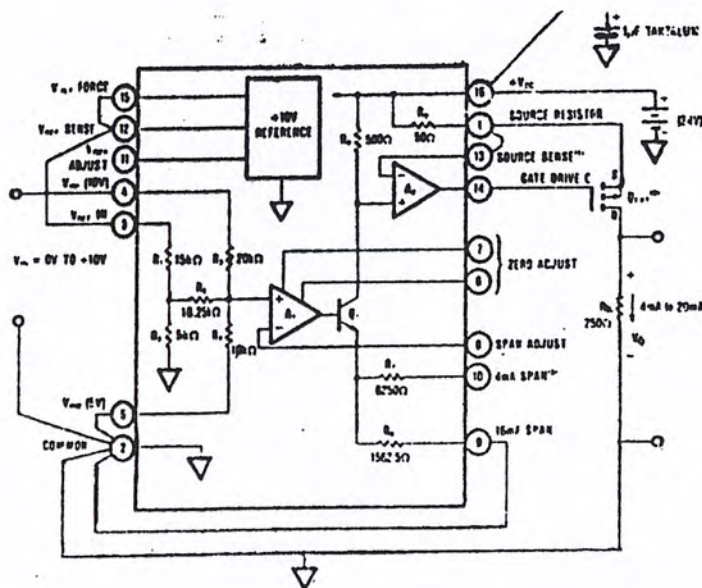
เมื่อ R_{SPAN} คือความต้านทานจาก Q_1 ไปยังคอมมอน ส่วนออปแอมป์ A_2 จะแปลงแรงดันที่ตกคร่อม R_8 เป็นกระแสความต้านทาน R_9 ไปยังมอสเฟตภายนอก (Q_{ext}) และโดยที่ไม่มีกระแสไหลที่เกิดกระแสทั้งหมดจึงผ่านไปเอาท์พุท (I_{OUT}) ซึ่งกระแสเอาท์พุทนี้จะมีค่าเป็น 10 เท่าของกระแสที่ผ่าน R_8 โดยการใส่ทรานซิสเตอร์ภายนอกช่วยทำให้ยังคงความเที่ยงตรง ของการทำงานของไอซีไว้ได้

ดังนั้นกระแสเอาท์พุทสามารถคิดได้จาก

$$I_o = 10 [(V_{REF} IN/16) + (V_{IN1}/4) + (V_{IN2}/2)] / R_{SPAN}$$

ถ้าต้องการกระแสเอาท์พุท 40 mA สามารถใช้ตัวต้านทานภายนอกแทน R_9 ได้

ทางด้านแรงดันอ้างอิง 10 โวลต์นั้นสามารถใช้ประโยชน์ในการปรับออฟเซตทางด้านอินพุท ถ้าต้องการกระแสสูงกว่านี้ก็สามารถใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ต่อภายนอกช่วยขยายได้



รูปที่ 3.9 แสดงโครงสร้างของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1 ข้อเสนอแนะการนำไปใช้งาน

เพื่อประสิทธิภาพในการทำงานและความเที่ยงตรงสูงในการใช้งานจึงควรมีข้อปฏิบัติดังนี้ แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง + V_{CC} จะต้องอยู่ใกล้กับไอซีมากที่สุด ถ้าเดินสายมาควรวัดเกิลยวและควรมีตัวเก็บประจุบายพาสใกล้ไอซีมากที่สุด

การต่อมอสเฟตที่เอาท์พุท (ขา 14 และ ขา 1) ให้ต่อขา 13 เข้ากับขา 1 ตรงๆ เพื่อลดผลของความต้านทานจากขา 1 ไปยังขาซอร์สของเฟตที่เอาท์พุทขา 14 นี้ใช้ทรานซิสเตอร์แทนมอสเฟตก็ได้แต่ความเที่ยงตรงจะลดลงเล็กน้อย คือ ออฟแอมป์ A_2 จะต้องมียัตราขับเบสของทรานซิสเตอร์ประมาณ 300 A (ใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP)

ในการเลือกมอสเฟตมีข้อพิจารณาคือ

1) ต้องมียัตราทนกำลังประมาณ 1.5 เท่าของกำลังสูญเสีย (P) หรืออย่างต้องมีค่าไม่น้อยกว่าค่ากำลังสูญเสียซึ่งคำนวณได้จาก

$$P_A = P_D - (T - 25) / \theta_{JA}$$

เมื่อ P_A คือค่ากำลังสูญเสียที่อุณหภูมิแวดล้อมสูงสุด

T_A คืออุณหภูมิแวดล้อมสูงสุด

P_D คือกำลังสูญเสียสูงสุดที่ 25°C (I V)

θ_{JA} คือความต้านทานความร้อนจากจังก์ชันไปยังอากาศ (ต้องดูจากค่าตัวชี้ของเบอร์นั้นๆ)

2) แรงดันเบรกคาว์ระหว่างเดรนกับซอร์สต้องมากกว่า V_{DS} สูงสุดที่คาดไว้ ซึ่งรวมแรงดันอื่นๆที่เกิดขึ้นกับกราวด์ร่วมระหว่างตัวรับตัวส่งด้วย

3) แรงดันเบรกคาว์ระหว่างเดรนกับซอร์สต้องสูงกว่า + V_{CC} เนื่องจากแรงดัน V_{CC} จะต้องจ่ายให้กับเกตกับซอร์สภายใต้ภาวะขาเดรนเปิดวง (V_G เป็นศูนย์โวลต์) มอสเฟตส่วนใหญ่ทนได้เพียง 20 โวลต์

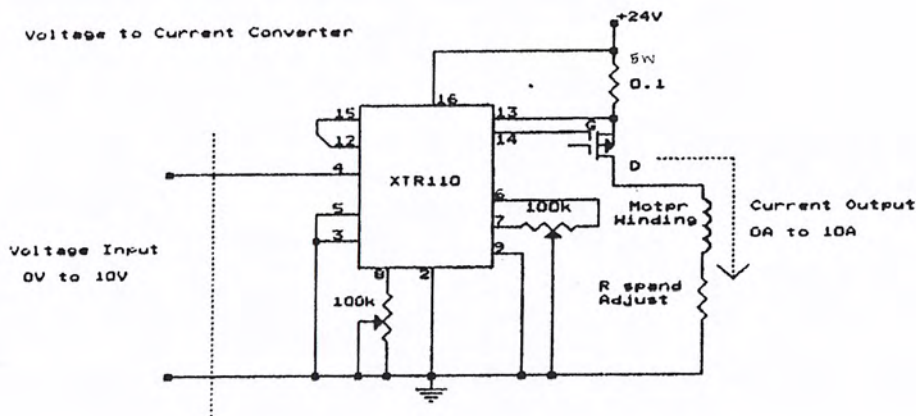
ขาคอมมอนของวงจรถือเป็นขาต่อร่วมจริงๆ คือ จะต้องต่อร่วมกันที่จุดเดียวและใกล้เคียงกับขา 2 ของ XTR 110 มากที่สุดยกเว้นสายรีเทิร์นของ I_{OUT} จะต่อห่างจากขา 2 แยกไปไหนก็ได้

สำหรับแรงดันอ้างอิง 10 โวลต์นั้นจะถูกรегูเลทที่ขา 12 จึงเป็นจุดป้อนกลับแรงดัน ดังนั้นจึงควรต่อใช้งานที่ขา 12 ซึ่งแรงดันอ้างอิงนี้สามารถปรับแต่งได้โดยใช้วงจรรูป

3.5.2 การปรับค่าออฟเซตและสเปน

ค่าออฟเซตของกระแสเอาต์พุตสามารถปรับแต่งได้โดยใช้ความต้านทานปรับค่าได้ดังตัวอย่าง ในรูปที่ 4 (R_1) วิธีการปรับก็คือต่ออินพุตของวงจรให้เป็นศูนย์โวลต์แล้วปรับ R_1 ให้ได้กระแสเอาต์พุต 4 mA แต่ถ้าต้องการให้เอาต์พุตได้ 0 mA จริงๆจะต้องตั้งแรงดันให้สูงกว่าศูนย์โวลต์เล็กน้อยแล้วปรับ R ให้กระแสเอาต์พุตเป็นศูนย์เอาต์พุตก็จะได้ 0 mA ด้วย

ส่วนการปรับสเปนหรือช่วงกวาดที่กระแสเอาต์พุตฟูลสเกล ก็ทำได้โดยการใช้ตัวความต้านทานปรับค่า R_2 (ในรูปที่ 4) ซึ่งจะใช้งานร่วมกับ R_1 ด้วยคือ การปรับมีผลต่อกัน ต้องมีการปรับไปปรับมาหลายรอบจึงจะได้ตามที่ต้องการ

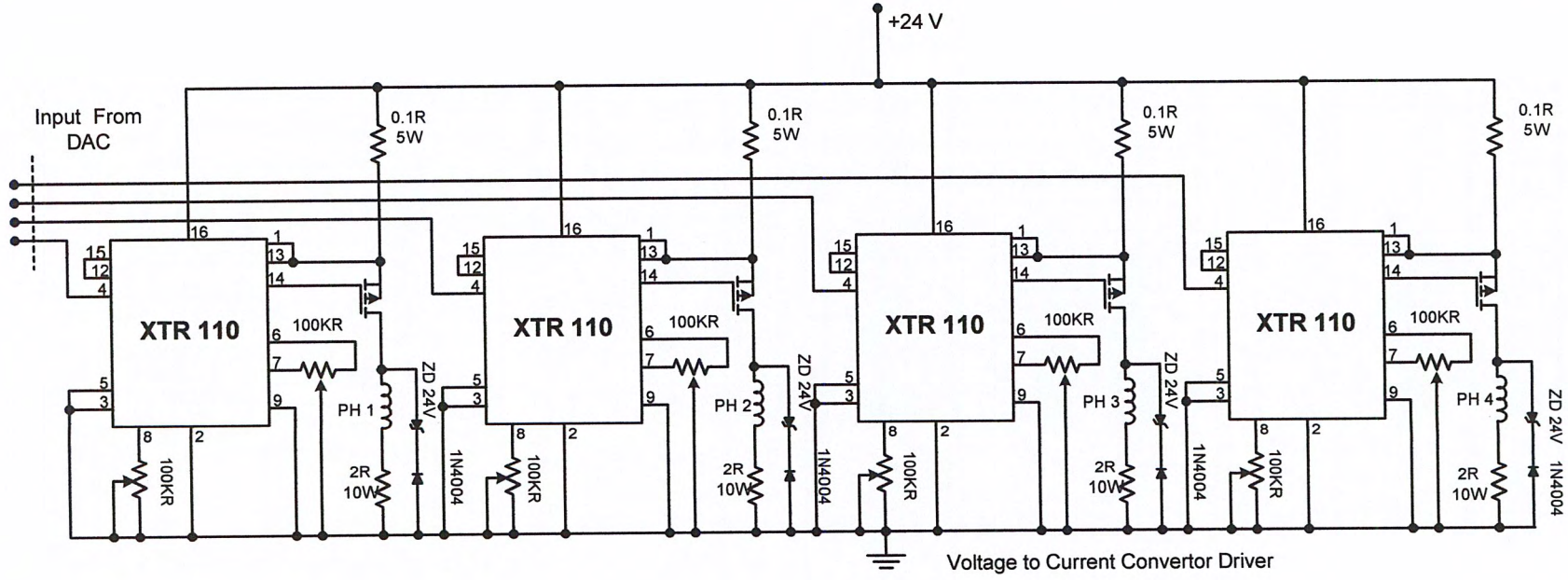


รูปที่ 3.10 วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสสูง 0 – 10 A

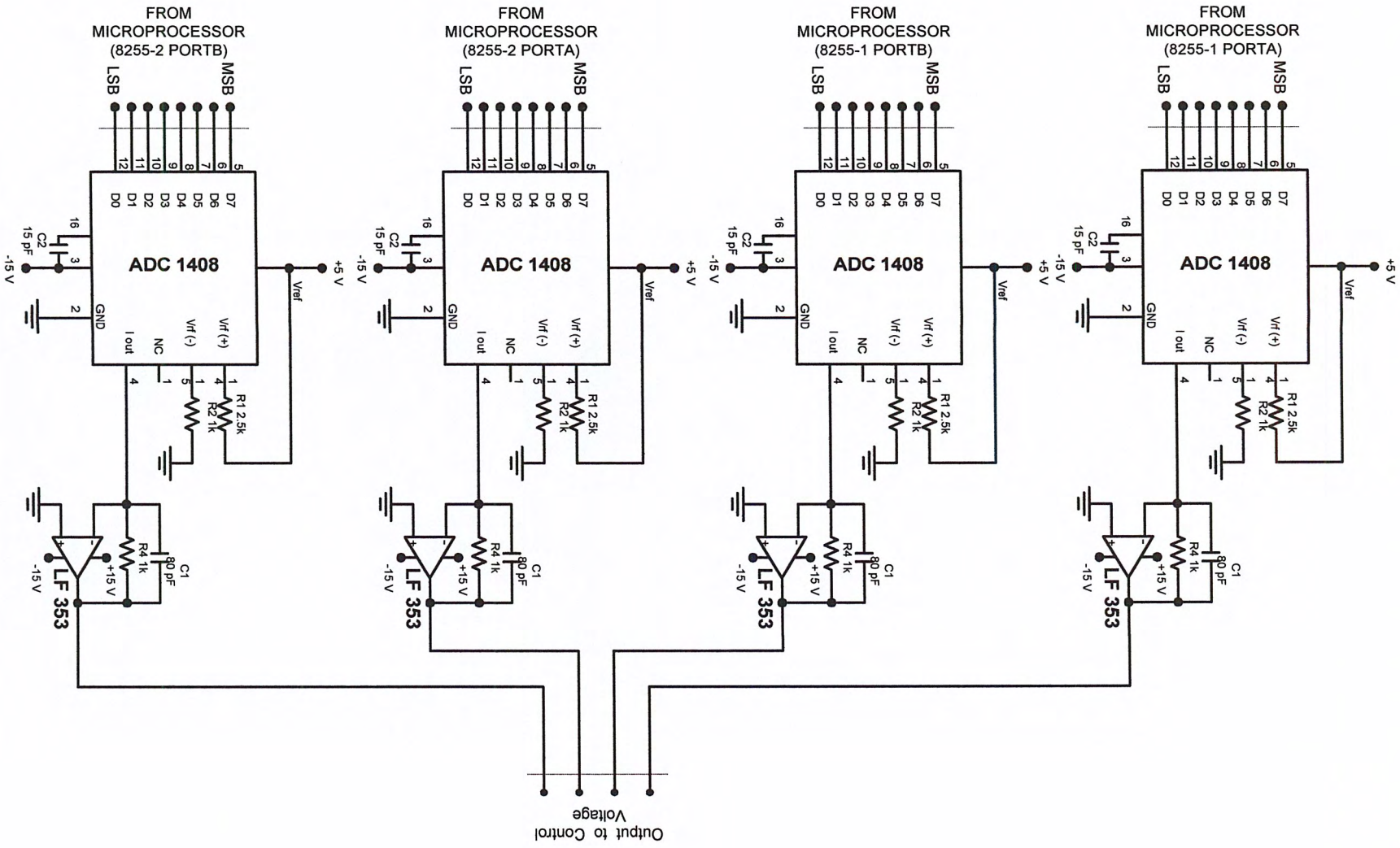
ถ้าหากต้องการขยายช่วงสเปนออกไปอีก (น้อยกว่า 40 mA) ตัวต้านทาน 50 โอห์มภายในไอซี สามารถแทนได้ด้วยตัวต้านทานภายนอกต่อระหว่างขา 13 และ 16 ค่าที่ใช้คำนวณได้จาก

$$R_{EXT} = R_9 \left(\frac{\text{Span}_{old}}{\text{Span}_{new}} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

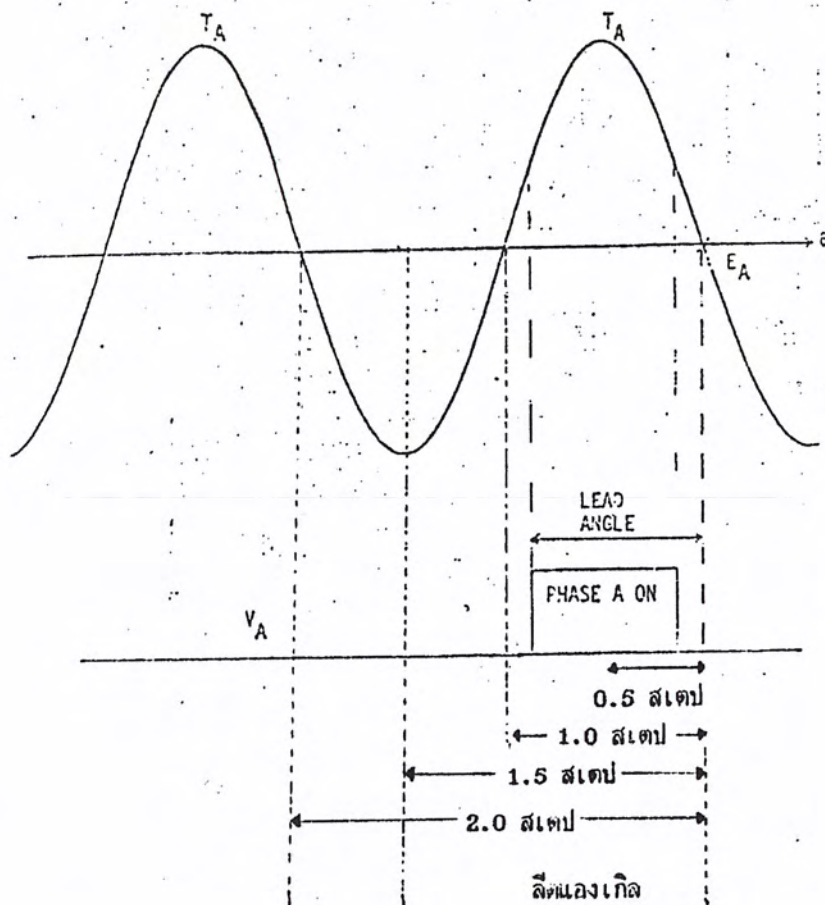


รูปที่ 3.1 แสดงวงจรขับเคลื่อนแบบแปลงโวลต์ตกเป็นกระแส



අච්ඡා 3.12 2405 A/D ඔ 4 වැනි

3.5.3 การกำหนดลิตแองเกิลสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพในเรื่งทอร์ค



รูปที่ 3.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงของลิตแองเกิลค่าต่างๆ เพื่อเปลี่ยนแปลงค่าทอร์ค

ลิตแองเกิล = ระยะทางจากจุดที่กระตุ้นเฟสนั้นถึงจุดสมดุลย์ของเฟสนั้น

สวิทชิงแองเกิล = ระยะทางจากจุดที่กระตุ้นเฟสนั้นถึงจุดสมดุลย์ของเฟสนั้น

สวิทชิงแองเกิล = 2 Step - ลิตแองเกิล

ลิตแองเกิลจะมีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ค่าลบ เช่น -0.5, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 สเตป

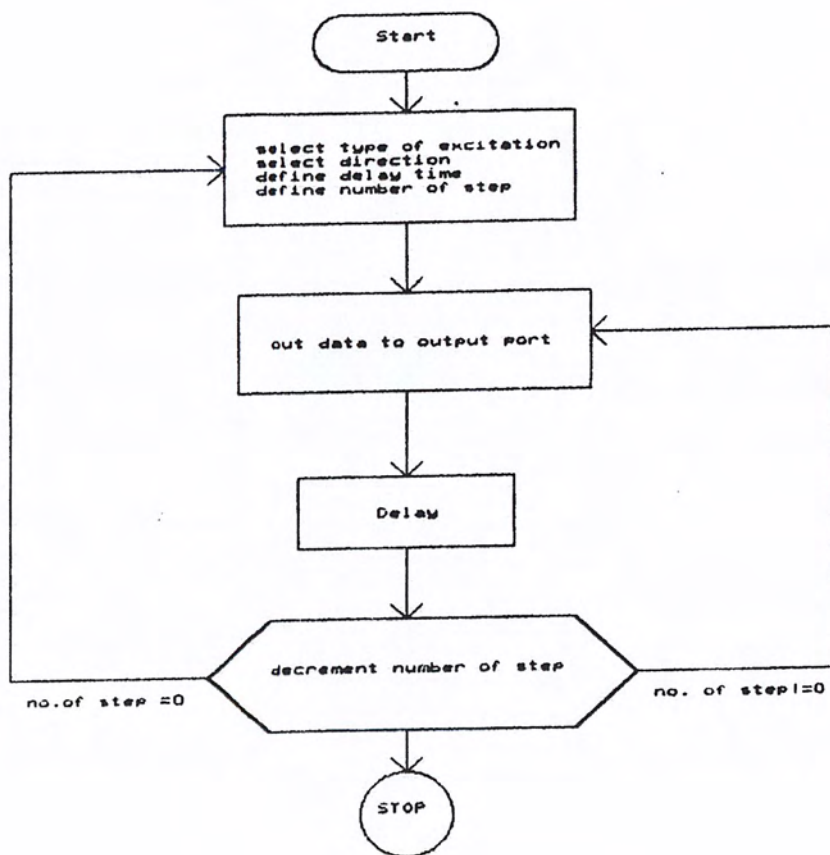
สำหรับสเตปมอเตอร์ขนาดสี่เฟส ที่ลิตแองเกิลขนาด 2.0 สเตปจะมีค่าทอร์คสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 โปรแกรมควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบต่างๆ

3.6.1 โปรแกรมควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยทั่วไป

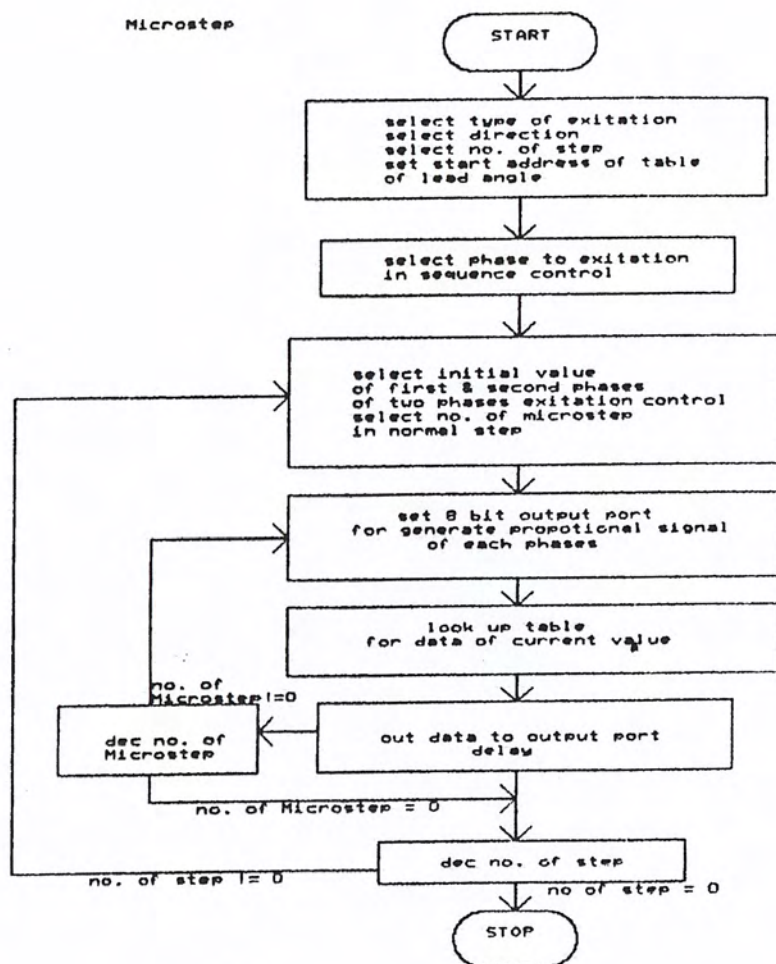
เป็นโปรแกรมควบคุมสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบพื้นฐานที่สุด สำหรับการศึกษาคอบสนองแบบสเตปเดียวซึ่งใช้สำหรับเปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อสเตปกับการขับแบบไมโครสเตป การควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบกระตุ้นที่ละเฟสมีโพล์ชาร์ต ดังแสดงในรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.14 แสดงโพล์ชาร์ตควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 โปรแกรมควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไมโครสเตป โดยใช้สัญญาณควบคุมการเปลี่ยนแปลงกระแสแบบเป็นสัดส่วนต่อกัน



รูปที่ 3.15 แสดงโฟลว์ชาร์ตของการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไมโครสเตป โดยใช้สัญญาณควบคุมการเปลี่ยนแปลงกระแสแบบสัดส่วนต่อกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 สรุป

ระบบควบคุมแบบไมโครสเตปและการควบคุมแบบวงจรถัด โครงสร้างระบบประกอบด้วย ส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งเป็นส่วนควบคุม ไมโครคอนโทรลเลอร์จะเชื่อมต่อกับ ไมโครคอมพิวเตอร์ เพื่อความสะดวกในการแก้ไขข้อมูลและการสร้างสัญญาณควบคุมได้ตาม ต้องการ ระบบที่สร้างขึ้นต้องการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของกระแสให้เปลี่ยนแปลงได้หลายระดับ และมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องได้ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำงานร่วมกับวงจร D/A เพื่อ สร้างสัญญาณควบคุมการจ่ายกระแสของวงจรขับให้กับแต่ละเฟสของสเตปมอเตอร์ สำหรับการ ควบคุมแบบวงจรถัดมีออฟติคัลเลนโค้ดเดอร์เป็นตัวสร้างสัญญาณป้อนกลับสำหรับการควบคุม ตำแหน่ง และนอกจากนั้นยังมีส่วนของการวัดผลตอบสนองของการเคลื่อนที่แบบเป็นสเตป เพื่อ วัดผลการเกิดโอเวอร์ชูทและผลการตอบสนองของทอร์คเมื่อใช้ระบบควบคุมการขับสเตปและการ ควบคุมแบบวงจรถัด

สเตปมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบเป็นสเตปมอเตอร์แบบแปรค่ารัล็กแดนซ์ได้ชนิดหลายสเตค ของ SANYO DENKI ซึ่งทนกระแสได้ถึง 1.5 แอมป์และมีอัตราการทำงานต่อโวลต์ได้ 4.5 โวลต์ โดยมี ขนาดของสเตปมุม 7.5 องศา/สเตป หรือมีความละเอียดของสเตป 48 สเตป / รอบ

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

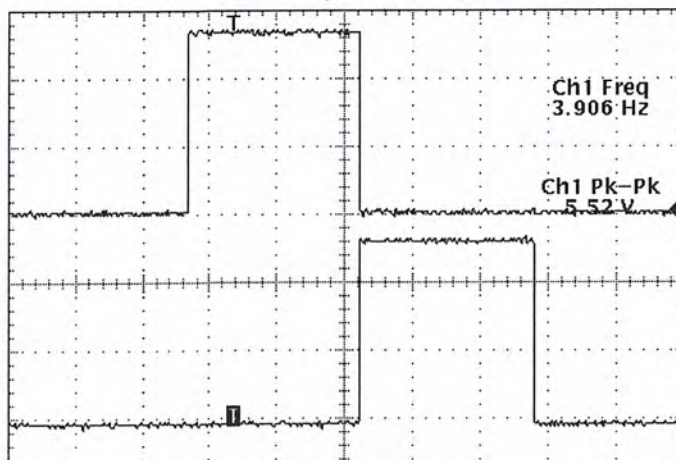
การทดสอบการควบคุมแบบวงจรเปิด จะทดสอบการรับสเตปมอเตอร์แบบซิงเกิลสเตป หรือการขับแบบขนาดสเตปปกติเปรียบเทียบกับการขับสเตปแบบไมโครสเตป ซึ่งจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบทั้งสอง โดยการวัดผลการตอบสนองของการเกิดโอเวอร์ชูทในการเคลื่อนที่ของแต่ละสเตปเปรียบเทียบกับกัน ซึ่งจะเปรียบเทียบกันระหว่างการขับสเตปมอเตอร์แบบมีขนาดสเตปปกติและแบบไมโครสเตป และเปรียบเทียบกันระหว่างการขับแบบไมโครสเตปซึ่งใช้รูปแบบของสัญญาณควบคุมกระแสแตกต่างกัน

4.2 ลักษณะของสัญญาณควบคุม

เปรียบเทียบลักษณะของสัญญาณอ้างอิง ที่ใช้ควบคุมให้สเตปปี้งมอเตอร์ทำงานในไมโครสเตปแบบเดิม คือสัญญาณอ้างอิงที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเตปปี้งมอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้นและสมการชายนี และหลักการใหม่ที่นำเสนอ คือ สัญญาณอ้างอิงที่ได้จากการทดสอบโดยตรง โดยสัญญาณที่ได้นี้วัดจากเอาต์พุตของวงจรรักษาแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก หรืออินพุตของภาคควบคุมกระแสและกำลังของสเตปปี้งมอเตอร์

4.3 ผลการทดลอง

4.1 รูปแสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสแต่ละเฟสแบบเป็นสัดส่วนต่อกันที่ขนาดสเตปต่างๆ เมื่อใช้การขับแบบกระตุ้นที่ละสองเฟส



รูปที่ 4.1 แสดงการขับแบบกระตุ้นแบบกระตุ้นที่ละสองเฟส โดยเฟสทั้งสองมีเปลี่ยนแปลง

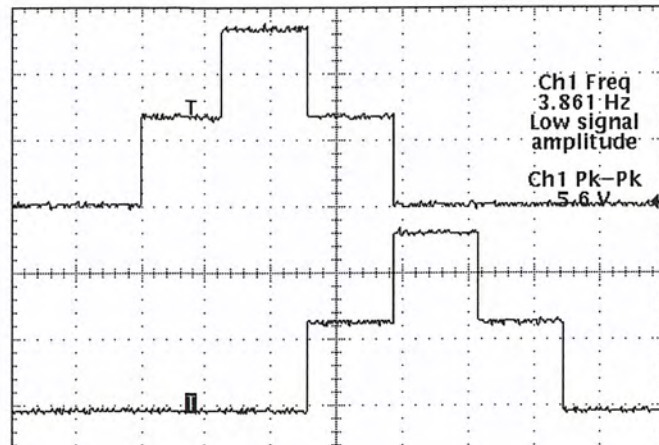
ของกระแสแบบเป็นสัดส่วนต่อกัน และมีขนาดสเตป เท่ากับสเตปปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณช่องบน : กระแสของเฟส

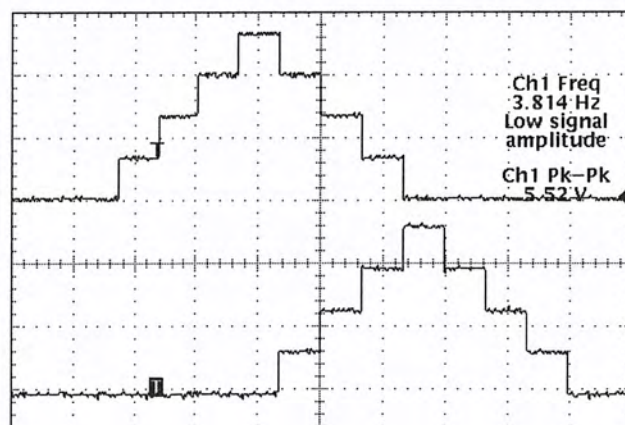
สัญญาณช่องล่าง : กระแสของเฟสที่สอง



รูปที่ 4.2 แสดงการขับเคลื่อนแบบกระตุ้น แบบกระตุ้นที่ละสองเฟส โดยเฟสทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสแบบเป็นสัดส่วนต่อกัน และมีขนาดสลับเท่ากับ $\frac{1}{2}$ เท่าของสลับปกติ

สัญญาณช่องบน : กระแสของเฟสแรก

สัญญาณช่องล่าง : กระแสของเฟสที่สอง

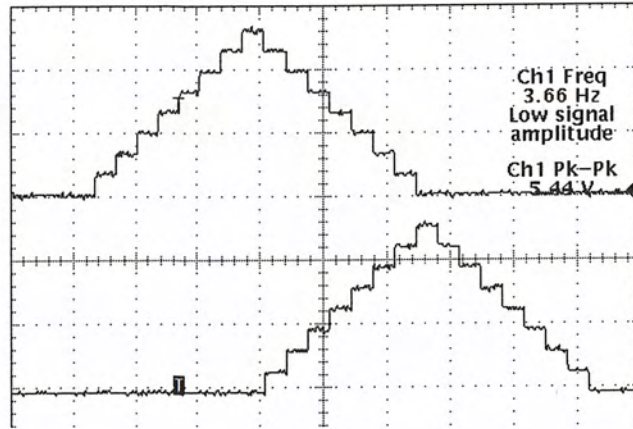


รูปที่ 4.3 แสดงการขับเคลื่อนแบบกระตุ้น แบบกระตุ้นที่ละสองเฟส โดยเฟสทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสแบบเป็นสัดส่วนต่อกัน และมีขนาดสลับเท่ากับ $\frac{1}{4}$ เท่าของสลับปกติ

สัญญาณช่องบน : กระแสของเฟสแรก

สัญญาณช่องล่าง : กระแสของเฟสที่สอง

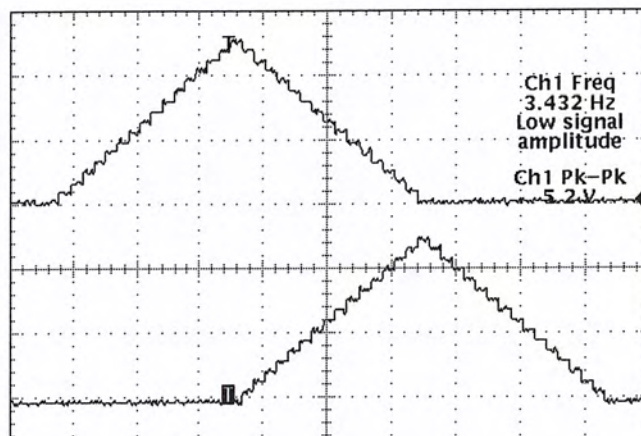
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงการขับแบบกระตุ้น แบบกระตุ้นทีละสองเฟส โดยเฟสทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสแบบเป็นสัดส่วนต่อกัน และมีขนาดสเตรเท่ากับ 1/8 เท่าของสเตรปกติ

สัญญาณช่องบน : กระแสของเฟสแรก

สัญญาณช่องล่าง : กระแสของเฟสที่สอง

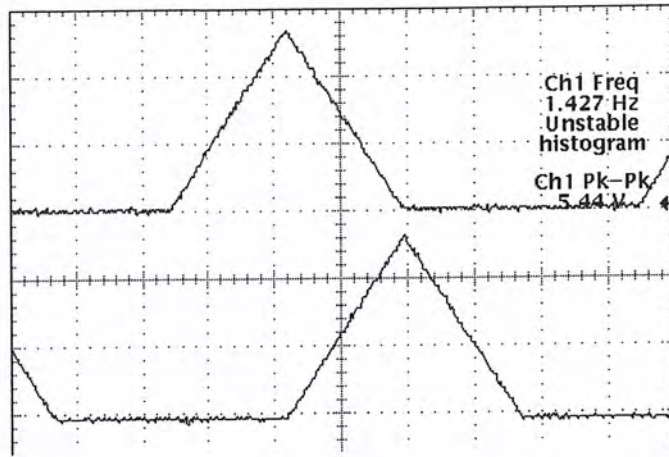


รูปที่ 4.5 แสดงการขับแบบกระตุ้น แบบกระตุ้นทีละสองเฟส โดยเฟสทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสแบบเป็นสัดส่วนต่อกัน และมีขนาดสเตรเท่ากับ 1/16 เท่าของสเตรปกติ

สัญญาณช่องบน : กระแสของเฟสแรก

สัญญาณช่องล่าง : กระแสของเฟสที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงการจับแบบกระตุ้น แบบกระตุ้นทีละสองเฟส โดยเฟสทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสแบบเป็นสัดส่วนต่อกัน และมีขนาดสเตปเท่ากับ $1/256$ เท่าของสเตปปกติ
 สัญญาณช่องบน : กระแสของเฟสแรก
 สัญญาณช่องล่าง : กระแสของเฟสที่สอง

4.4 สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบการตอบสนองของสเตปมอเตอร์โดยใช้การจับแบบกระตุ้นทีละเฟส ป้อนกระแสให้แต่ละเฟสของสเตปมอเตอร์ให้มีค่าแบบเป็นสัดส่วนต่อกัน ซึ่งทำให้สามารถแบ่งสเตปการเคลื่อนที่ของสเตปมอเตอร์ให้เป็นสเตปขนาดเล็กลง ตามความละเอียดของอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงกระแส แต่การควบคุมโดยการป้อนกระแสให้เป็นสัดส่วนต่อกันจะมีความไม่สม่ำเสมอของสเตปที่ใกล้จุดสมดุลของแต่ละเฟส

เมื่อพิจารณาจากคุณลักษณะทางสแตติกทอร์คของสเตปมอเตอร์ขนาดสี่เฟส ทอร์คของแต่ละเฟสจะมีลักษณะคล้ายคลื่นรูปไซน์ ที่จุดสมดุลของเฟสแรกทอร์คของเฟสแรกจะมีค่าเป็นศูนย์ ที่จุดนั้นเฟสที่สองจะมีค่าสูงสุด และเฟสที่สามมีค่าทอร์คเป็นศูนย์ ขณะที่ทอร์คของเฟสที่สองลดลง จากค่าสูงสุดลงมาสู่ค่าศูนย์นั้นเฟสที่สามจะมีการเปลี่ยนแปลงของทอร์คไปสู่ค่าสูงสุด การเปลี่ยนแปลงในลักษณะเช่นนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงตามลำดับเฟสต่อเนื่องกันไป

จากการทดลองวัดสัญญาณและสังเกตการหมุนของสเตปปั๊มมอเตอร์ ที่ความถี่เดียวกัน ขนาดสเตปใดๆ จะมีความเร็วในการหมุนมากกว่าขนาดสเตปเล็กๆ เช่นที่ขนาดสเตปปกติหรือขนาดสเตป $1/2$ เท่าของปกติจะมีความเร็วในการหมุนที่มากกว่าขนาด $1/256$ เท่าของสเตปปกติ แต่ว่าความราบเรียบของสเตปนั้นจะน้อยกว่า ซึ่งที่ขนาดสเตปเล็กๆ นี้ จะมีความราบเรียบของสเตปมาก และเมื่อลองวัดทอร์คจะเห็นได้ว่าทอร์คของขนาดสเตปเล็กๆ จะมีมากกว่าทอร์คของขนาดสเตปใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวัดทอร์ก

ขนาดสเตปที่ใช้ในการทดลอง	จำนวนสเตปย่อย (step)	ขนาดแรงดันของแต่ละสเตปย่อย(V)	ความถี่ที่วัดทอร์ก (Hz)	ทอร์กที่วัดได้ (N.m)
1	1	5	100	3
1/2	2	2.5	100	5
1/4	4	1.25	100	6.5
1/8	8	0.625	100	8
1/16	16	0.3125	100	10
1/256	256	0.01953	100	21

4.5 ข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนาต่อไปในอนาคต

ความเที่ยงตรงของขนาด ไมโครสเตปที่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการด้วยกัน ได้แก่ ชนิด และโครงสร้างของตัวสเตปปีงมอเตอร์ที่ใช้ ประสิทธิภาพของวงจรที่ใช้ควบคุมปริมาณกระแสในแต่ละเฟสของสเตปปีงมอเตอร์ และลักษณะการควบคุมหรือขับสเตปปีงมอเตอร์

ลักษณะการควบคุมหรือขับสเตปปีงมอเตอร์ของงานชิ้นนี้จะอยู่ในลักษณะลูปเปิด ซึ่งพัฒนาต่อไปโดยควบคุมในลักษณะลูปปิดแล้ว ความเที่ยงตรงของขนาด ไมโครสเตปที่ได้จะมีค่าสูงขึ้น อีกทั้งการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์ให้ทำงานในโหมดไมโครสเตปนั้น ต้นทุนวงจรควบคุมของระบบจะสูงกว่าวงจรควบคุมในโหมดการทำงานปกติมาก ดังนั้นหากสามารถออกแบบวงจรควบคุมของระบบไมโครสเตปให้มีประสิทธิภาพสูงโดยใช้ต้นทุนต่ำแล้ว จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน

บรรณานุกรม

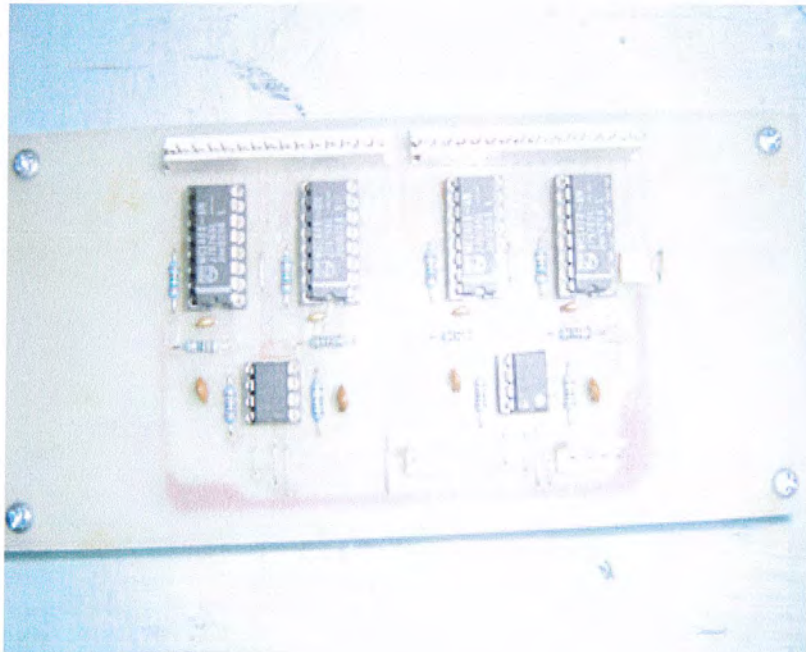
- [1] Muhammed F.Rahman,Aun-Neow Poo, “An Application Oriented Test Procedure for Designing Microstepping Step Motor Controller,” IEEE Transaction on industrial Electronics, VOL.35,NO.4,November 1988.
- [2] Muhammed F.Rahman,Aun-Neow Poo, “Approaches to Design of Ministepping Step Motor Controllers and Their Acuracy Consideration,” IEEE Transaction on industrial Electronics, VOL.IE-32, August 1985.
- [3] Takashi Kenjo, “Stepping motor an their microprocessor controls,” Claren Press, Oxford, 1986.
- [4] P.P. Acarnley, “Stepping motors : a guild to modern theory and practice,” IEEE Control Engineering Service 19, Peregrius Ltd., 1982.
- [5] โยชิน เปรมปราณีรัตน์, “ระบบเซอร์โวและอิเล็กทรอนิกส์คอนโทรลมอเตอร์,” ตำราชุดวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2533
- [6] วุฒิชัย สังขกุล, “วิธีการหากระแสอ้างอิงเพื่อใช้ควบคุมสเตปปีงมอเตอร์ให้ทำงานในโหมดไมโครสเตป,” วารสารวิศวกรรมสาร, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, ฉบับที่ 4, เมษายน พ.ศ. 2538.

ภาคผนวก ก
แสดงรูปส่วนประกอบของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

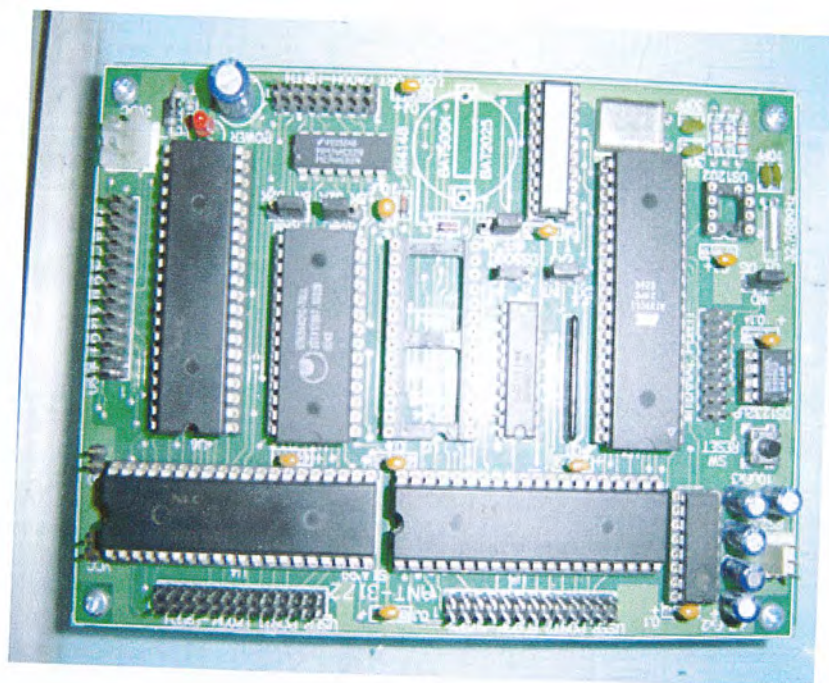


รูป ก 1 แสดงวงจรขับซึ่งใช้วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสโดยใช้เพาเวอร์มอสเฟตที่ภาคเอาต์พุต

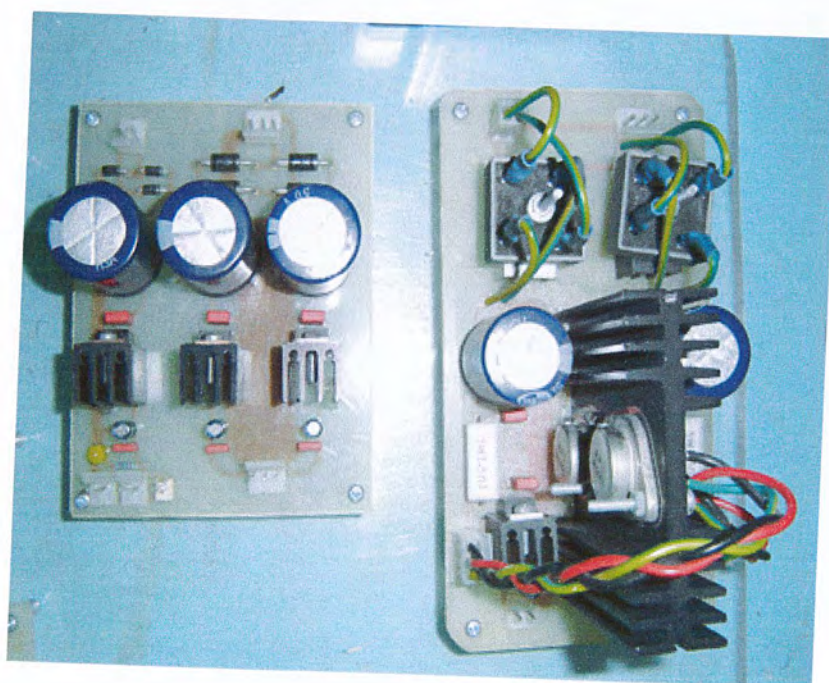


รูป ก 2 แสดงวงจร Digital to Analog

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

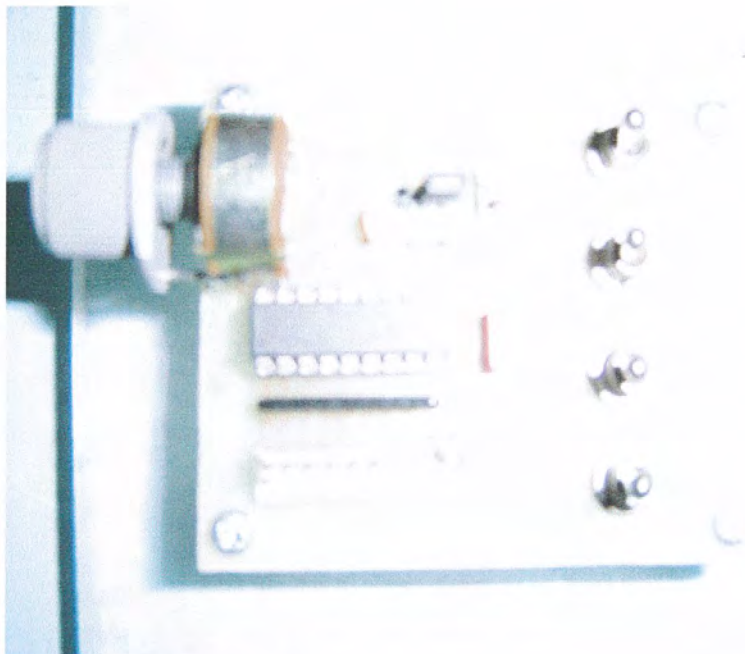


รูป ก 3 แสดงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

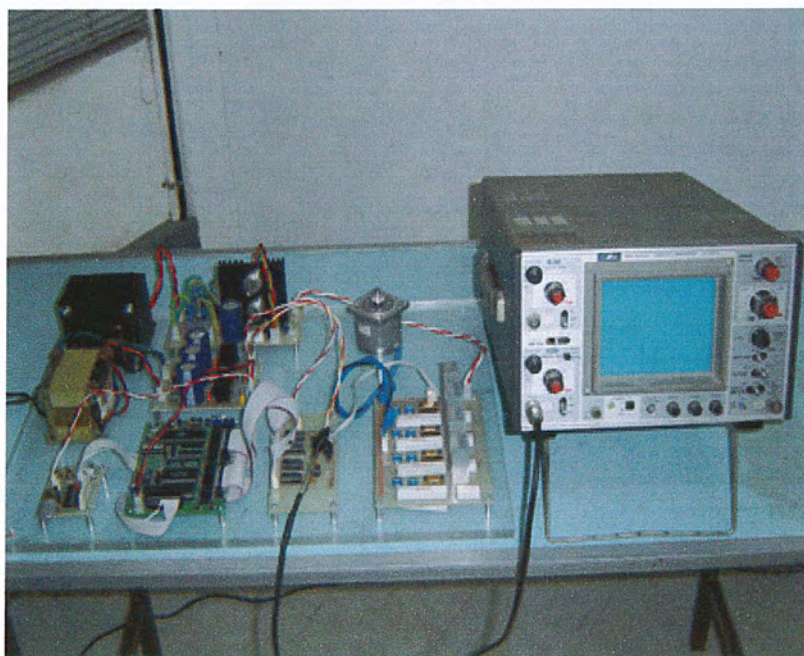


รูป ก 4 แสดงวงจรภาคจ่ายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ก 5 แสดงวงจร Analog to Digital



รูป ก 6 แสดงระบบรวมและการทดสอบของระบบควบคุมมอเตอร์แบบวงจรถัดโดยใช้หลักการของ ไมโครสเตป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมสำหรับขับสเตปมอเตอร์

```

DP1:      EQU   30H
DP2:      EQU   31H
DP3:      EQU   32H
DP4:      EQU   33H
CP1:      EQU   34H
CP2:      EQU   35H
CP3:      EQU   36H
CP4:      EQU   37H
COUNT:   EQU   38H
MODE:     EQU   39H

;F800H    EQU   P1
;F801H    EQU   P2
;FC00H    EQU   P3
;FC01H    EQU   P4

;FE00H    EQU   VOLUME INPUT
;FE01H    EQU   SELECTOR INPUT

```

```

ORG 0000H
ACALLDELAY

```

```

MOV DPTR,#0F803H
MOV A,#80H           ;Control port all OUT
MOVX @DPTR,A
ACALLDELAY

```

```

MOV DPTR,#0FC03H
MOV A,#80H
MOVX @DPTR,A       ;Control port all OUT

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACALLDELAY

MOV DPTR,#0FE03H

MOV A,#9BH ;Control port all IN

MOVX @DPTR,A

ACALLDELAY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

*****
*****      SELECT MODE      *****
*****

```

```

NEW_STEP:  MOV  DPTR,#0FE01H
           MOVX A,@DPTR
           ANL  A,#00FH
           MOV  CP1,#00H
           MOV  CP2,#00H
           MOV  CP3,#00H

```

```

           CJNE A,#00H,SM_0
           MOV  MODE,#016
           MOV  P1,A
           AJMP MODE1

```

```

SM_0:     CJNE A,#01H,SM_1
           MOV  MODE,#08
           MOV  P1,A
           AJMP MODE2

```

```

SM_1:     CJNE A,#02H,SM_2
           MOV  MODE,#04
           MOV  P1,A
           AJMP MODE4

```

```

SM_2:     CJNE A,#03H,SM_3
           MOV  MODE,#02
           MOV  P1,A
           AJMP MODE8

```

```

SM_3:     CJNE A,#04H,SM_4
           MOV  MODE,#01

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV P1,A
AJMP MODE16

SM_4:    AJMP MODE256

MODE1:   MOV CP4,#254D
         MOV B,#254D
         MOV COUNT,#01D
         AJMP STEP_1

MODE2:   MOV CP4,#254D
         MOV B,#127D
         MOV COUNT,#02D
         AJMP STEP_1

MODE4:   MOV CP4,#252D
         MOV B,#63D
         MOV COUNT,#4D
         AJMP STEP_1

MODE8:   MOV CP4,#248D
         MOV B,#31D
         MOV COUNT,#8D
         AJMP STEP_1

MODE16:  MOV CP4,#240D
         MOV B,#15D
         MOV COUNT,#16D
         AJMP STEP_1

MODE256: AJMP STEP256

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
*****
*****      DRIVE STEP MOTOR      *****
*****      1 , 1/2 , 1/4 , 1/8 , 1/16      *****
*****
```

```
STEP_1:      MOV  R3,COUNT

STEP_11:     MOV  A,CP4                ;P4 DOWN

              SUBB A,B

              MOV  CP4,A

              MOV  DPTR,#0FC01H

              MOVX @DPTR,A

              MOV  A,CP1                ;P1 UP

              ADD  A,B

              MOV  CP1,A

              MOV  DPTR,#0F800H

              MOVX @DPTR,A

              ACALLBUSY

              DJNZ R3,STEP_11
```

```
*****
```

```
STEP_2:      MOV  R3,COUNT                ;P1 DOWN

              MOV  A,CP1

              SUBB A,B

              MOV  CP1,A

              MOV  DPTR,#0F800H

              MOVX @DPTR,A

              MOV  A,CP2                ;P2 UP

              ADD  A,B

              MOV  CP2,A
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
MOV DPTR,#0F801H
```

```
MOVX @DPTR,A
```

```
ACALLBUSY
```

```
DJNZ R3,STEP_2
```

```
*****
```

```

STEP_3:  MOV R3,COUNT           ;P2 DOWN
         MOV A,CP2
         SUBB A,B
         MOV CP2,A
         MOV DPTR,#0F801H
         MOVX @DPTR,A

         MOV A,CP3           ;P3 UP
         ADD A,B
         MOV CP3,A
         MOV DPTR,#0FC00H
         MOVX @DPTR,A

         ACALLBUSY
         DJNZ R3,STEP_3

```

```
*****
```

```

STEP_4:  MOV R3,COUNT
         MOV A,CP3           ;P3 DOWN
         SUBB A,B
         MOV CP3,A
         MOV DPTR,#0FC00H
         MOVX @DPTR,A

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
MOV  A,CP4           ;P4 UP
ADD  A,B
MOV  CP4,A
MOV  DPTR,#0FC01H
MOVX @DPTR,A
```

```
ACALLBUSY
DJNZ R3,STEP_4
```

```
AJMP NEW_STEP
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

*****
*****      MODE 256      *****
*****

```

```
*****
```

```

STEP256:   MOV   CP4,#255D
           MOV   COUNT,#255D
           MOV   R3,COUNT
           MOV   B,#1
STEP256_11: MOV   A,CP4           ;P4 DOWN
           SUBB  A,B
           MOV   CP4,A
           MOV   DPTR,#0FC01H
           MOVX  @DPTR,A

           MOV   A,CP1           ;P1 UP
           ADD   A,B
           MOV   CP1,A
           MOV   DPTR,#0F800H
           MOVX  @DPTR,A

           ACALLBUSY256
           DJNZ  R3,STEP256_11

```

```
*****
```

```

           MOV   R3,COUNT           ;P1 DOWN
STEP256_2: MOV   A,CP1
           SUBB  A,B
           MOV   CP1,A
           MOV   DPTR,#0F800H

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOVX @DPTR,A

MOV  A,CP2           ;P2 UP
ADD  A,B
MOV  CP2,A
MOV  DPTR,#0F801H
MOVX @DPTR,A

ACALLBUSY256
DJNZ R3,STEP256_2

```

```

MOV  R3,COUNT       ;P2 DOWN
STEP256_3:  MOV  A,CP2
SUBB  A,B
MOV  CP2,A
MOV  DPTR,#0F801H
MOVX @DPTR,A

MOV  A,CP3           ;P3 UP
ADD  A,B
MOV  CP3,A
MOV  DPTR,#0FC00H
MOVX @DPTR,A

ACALLBUSY256
DJNZ R3,STEP256_3

```

```
MOV  R3,COUNT
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

STEP256_4:  MOV  A,CP3           ;P3 DOWN
            SUBB A,B
            MOV  CP3,A
            MOV  DPTR,#0FC00H
            MOVX @DPTR,A

            MOV  A,CP4           ;P4 UP
            ADD  A,B
            MOV  CP4,A
            MOV  DPTR,#0FC01H
            MOVX @DPTR,A

            ACALLBUSY256
            DJNZ R3,STEP256_4

```

```

,*****

```

```

AJMP NEW_STEP

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

***** DELAY *****

```
BUSY:  MOV  DPTR,#0FE00H
        MOVX A,@DPTR
        MOV  R1,A
        PUSH B
        MOV  B,#15D
        MOV  A,MODE
        MUL  AB
        MOV  05,A
        POP  B
```

```
BU1:   MOV  R2,05
        DJNZ R2,$
        DJNZ R1,BU1
```

```
RET
```

```
BUSY256:  MOV  DPTR,#0FE00H
           MOVX A,@DPTR
           MOV  R1,A
```

```
BU256_1:  MOV  R2,#01
           DJNZ R2,$
           DJNZ R1,BU256_1
           RET
```

```
DELAY:   MOV  R1,#0FFH
```

```
DEL1:    MOV  R2,#0FFH
```

```
          DJNZ R2,$
```

```
          DJNZ R1,DEL1
```

```
          RET
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
DELAY2:  MOV  R1,#08H
          MOV  R2,#0FFH
          MOV  R3,#0FFH
          DJNZ R3,$
          DJNZ R2,DEL22
          DJNZ R1,DEL21
          RET
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้