

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมสแตมป์มอเตอร์แบบไมโครสแตมป์โดยไมโครคอนโทรลเลอร์



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**62298**
วัน,เดือน,ปี.....**8 ส.ค. 2549**

b.....*lib 62298*.....
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Stepping Motor Control on Microstep by Microcontroller



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Bachelor
Of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การควบคุมสเตรปปีงมอเตอร์แบบไมโครสเตปโดยไมโครคอนโทรลเลอร์

นักศึกษา นายณัฐพนธ์ จาตุรพาณิชย์
นายทศพล เกริกกิตาการ


ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์


สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จิติ หนูแก้ว

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อ.เบญจพล ต้นผู้

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาลัทธิวิศวกรรมบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	รศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย	
กรรมการ	อ.ทศิยาภรณ์ ทิววงศ์	
กรรมการ	อ.ภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์	
กรรมการที่ปรึกษา	รศ.ดร.จิติ หนูแก้ว	
กรรมการที่ปรึกษาร่วม	อ.เบญจพล ต้นผู้	


.....
(รองศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ)
หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบไมโครสเตปโดยไมโครคอนโทรลเลอร์

นักศึกษา นายณัฐพนธ์ จาตุรพณิชย์
นายทศพล เกริกกิตาการ

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

ปีการศึกษา 2548

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จิตติ หนูแก้ว
อ.เบญจพล ตันธุ์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ให้ทำงานในโหมดการเคลื่อนที่แบบไมโครสเตป โดยการป้อนสัญญาณสำหรับควบคุมขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ให้เป็นสัญญาณอนาล็อกในรูปสัญญาณไซน์และโคไซน์ที่สัมพันธ์กัน ซึ่งขนาดของการเคลื่อนที่ของไมโครสเตปจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสัญญาณไซน์และโคไซน์ที่จ่ายให้กับสเตปป์มอเตอร์ และความเร็วในการเคลื่อนที่จะแปรผันกับความถี่ของสัญญาณไซน์และโคไซน์ที่ป้อน สำหรับสเตปป์มอเตอร์แบบไมโครสเตปนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการการเคลื่อนที่ในระยะน้อยๆ เช่น การปรับกระจกในระบบไมโครสแกนอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

Special Project Title Stepping Motor Control on Microstep by Microcontroller

Name Mr. Nattapon Jaturapanich
 Mr. Thosapon Klerkkidakan

Department Applied Physics **Faculty of Science**

Program Applied Physics

Academic Year 2005

Special Project Advisor Assoc. Prof. Dr. Jiti Nukeaw
 Mr. Benchapol Tunhoo

ABSTRACT

This special project will be study about control stepping motor in micro-step mode. Analog input signal with sine and cosine waveform will be drive to stepping motor. Resolution of micro-step had been influence of ration of sine and cosine input signal and speed of micro-step have depend on frequency of input signal.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ หากขาดการช่วยเหลือจากผู้ที่เกี่ยวข้อง ที่ให้คำปรึกษา

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. จิติ หนูแก้ว ,อาจารย์ เบญจพล ต้นธุ์ และอาจารย์ทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ที่ให้คำปรึกษา และคำแนะนำ ทำให้มีความรู้ในเรื่องที่ सम्มนาเพิ่มมากขึ้น

เพื่อนๆ ในภาคฟิสิกส์ประยุกต์ ที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

ขอบคุณเทคโนโลยีในปัจจุบัน ที่ย่อโลกให้เล็กลง ทำให้การค้นคว้ามีความถูกต้องและรวดเร็ว

ขอขอบคุณผู้อ่านโครงการพิเศษนี้ทุกท่าน ที่ให้ความสนใจ และสมาชิกในครอบครัว ที่เป็นกำลังใจ เอาใจใส่ เลี้ยงดูตั้งแต่เล็กจนโตและส่งเสียให้รำเรียนในระดับมหาวิทยาลัย

ณัฐพันธ์ จาตุรพาณิชย์
ทศพล เกริกกิตติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตในการศึกษา	1
1.4 ระยะเวลาในการดำเนินการ	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 ความหมายของสเต็ปปีงมอเตอร์	3
2.2 หลักการทำงานของสเต็ปปีงมอเตอร์	3
2.3 ชนิดของสเต็ปปีงมอเตอร์	5
2.4 วิธีการกระตุ้นการขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์	9
2.4.1 ลำดับการทำงานในโหมดปกติด้วยการกระตุ้นแบบหนึ่งเฟส	11
2.4.2 ลำดับการทำงานในโหมดปกติด้วยการกระตุ้นแบบสองเฟส	11
2.4.3 ลำดับการทำงานในโหมดการเคลื่อนที่ครึ่งสเต็ป	12
2.4.4 ลำดับการทำงานไมโครสเต็ปด้วยการกระตุ้นแบบสองเฟส	13
2.5 กรรมวิธีในการแคมป์ปีง	14
2.6 คุณลักษณะเฉพาะของสเต็ปปีงมอเตอร์	16
2.6.1 คุณลักษณะเฉพาะทางสถิติศาสตร์	16
2.6.2 คุณลักษณะเฉพาะทางพลศาสตร์	18
2.7 ทฤษฎีพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของสเต็ปมอเตอร์	19
2.7.1 สมการพื้นฐานในการเคลื่อนที่	19
2.7.1.1 สเต็ปมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

2.7.1.2	สเต็ปมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลักแตนซ์	23
2.7.2	ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของสเต็ปมอเตอร์	24
2.7.2.1	การทำงานแบบเฟสเดียว	25
2.7.2.2	การขับโดยแหล่งจ่ายกระแส	26
2.7.2.3	การกระตุ้นแบบ 2 เฟส โดยการขับด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน	28
2.7.2.4	ผลตอบสนองของสเต็ปเดียว	29
2.7.2.5	ทรานเฟอร์ฟังก์ชันอันดับที่สอง	29
2.7.2.6	ทรานเฟอร์ฟังก์ชันอันดับที่สาม	29
2.8	วงจรขับสเต็ปปั๊มมอเตอร์	31
2.8.1	วงจรขับแบบขั้วเดียว	32
2.8.2	วงจรขับแบบสองขั้ว	33
2.8.3	วงจรขับแบบไมโครสเต็ป	33
2.9	การควบคุมสเต็ปปั๊มมอเตอร์ในโหมดไมโครสเต็ป	34
2.9.1	การคำนวณหากระแสอ้างอิงในโหมดไมโครสเต็ปจากกราฟของสเต็ปปั๊มมอเตอร์	34
2.9.1.1	การคำนวณหากระแสอ้างอิงโดยการประมาณคุณลักษณะของกราฟ $T-\theta$ ในลักษณะเชิงเส้น	35
2.9.1.2	การคำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงโดยการประมาณกราฟคุณลักษณะของมอเตอร์ด้วยค่า Sine	37
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย	39
3.1	ประกอบบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C51ED2	39
3.2	สร้างวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก	41
3.3	ศึกษาการเขียน โปรแกรมที่ใช้ในการเขียน โปรแกรมควบคุมสเต็ปปั๊มมอเตอร์แบบไมโครสเต็ป	41
3.4	สร้างวงจรขับมอเตอร์	43
3.5	ศึกษาการทำงานสเต็ปปั๊มมอเตอร์แบบไมโครสเต็ป และพัฒนาโปรแกรมเพื่อให้สอดคล้องกับการทำงาน	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

3.5.1 การสังเกตลูกคลื่นจากการเปลี่ยนแปลงการค่าความถี่และ ค่าความละเอียดของมุมการหมุนของมอเตอร์	44
3.5.2 การทดลองการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์	44
3.5.3 การทดลองโดยใช้ไมโครมิเตอร์	45
3.5.4 การทดลองโดยการวัดการเคลื่อนที่ของสกรู	46
3.5.5 การทดลองโดยใช้อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์เพื่อวัดรีฟรังก์ชันการแทรกสอด	47
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	49
4.1 การสังเกตลูกคลื่นจากการเปลี่ยนแปลงการค่าความถี่และ ค่าความละเอียดของมุมการหมุนในหนึ่งลูกคลื่น	50
4.2 การทดลองการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์	52
4.3 การทดลองโดยใช้ไมโครมิเตอร์	52
4.4 การทดลองโดยการวัดการเคลื่อนที่ของสกรู	53
4.5 ทดลองวัดการเคลื่อนที่โดยชุดทดลองอินเตอร์ฟีโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน โดยสังเกตความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงรีฟรังก์ชันการแทรกสอดกับการ เคลื่อนที่ของมอเตอร์	54
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	57
5.1 สรุปผลการทดลอง	57
5.2 ข้อเสนอแนะ	57
เอกสารอ้างอิง	58
ภาคผนวก	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงระยะเวลาในการทำงาน	2
ตารางที่ 2.1 แสดงลำดับขั้นแบบปกติด้วยการกระตุ้นหนึ่งเฟส	11
(ก) สำหรับสเตปป์มอเตอร์ชนิด 3 เฟส	
(ข) สำหรับสเตปป์มอเตอร์ชนิด 4 เฟส	
ตารางที่ 2.2 แสดงลำดับการทำงานในโหมดปกติด้วยการกระตุ้นแบบสองเฟส	12
(ก) สำหรับสเตปป์มอเตอร์ชนิด 3 เฟส	
(ข) สำหรับสเตปป์มอเตอร์ชนิด 4 เฟส	
ตารางที่ 2.3 แสดงลำดับการกระตุ้นให้โหมดเฟสครึ่ง	13
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองเมื่อกำหนดให้มอเตอร์เคลื่อนที่ไป 0.5 มิลลิเมตร	52
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองเมื่อกำหนดให้มอเตอร์เคลื่อนที่ไป 0.2 มิลลิเมตร	53
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองการวัดรีการแทรกสอดเมื่อมอเตอร์หมุนไปครึ่งรอบ (0.5 มิลลิเมตร)	55
ตารางที่ 4.4 แสดงจำนวนรีการแทรกสอดเมื่อกำหนดค่าระยะทางการเคลื่อนที่ของมอเตอร์	56

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงตำแหน่งของสเตเตอร์คือตรงเลข 1, 2, 3 และ rotor คือ x-y	3
รูปที่ 2.2 ส่วนของการควบคุมสำหรับการทำงานของสแต็ปปีงมอเตอร์	4
รูปที่ 2.3 แสดงแรงดึงคู่ที่ทำให้เกิดทอร์กเพื่อหมุนอาร์เมเจอร์ให้ไปอยู่ในตำแหน่งสมดุล	4
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของสแต็ปปีงมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร 4 เฟส	5
รูปที่ 2.5 ภาพตัดโครงสร้างและการพันขดลวดของ VRSM ชนิด 3 เฟส	6
รูปที่ 2.6 ตำแหน่งการเหนี่ยวนำที่สมดุลเมื่อกระตุ้นที่เฟส 1	7
รูปที่ 2.7 ลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงบิด	7
รูปที่ 2.8 ตำแหน่งการหมุนเมื่อกระตุ้นจากเฟส 1 ไปยังเฟส 2	7
รูปที่ 2.9 ลำดับการเคลื่อนที่ของ VRSM เมื่อกระตุ้นครบทั้ง 3 เฟส	7
รูปที่ 2.10 โครงสร้างภายในของ HSM และการวางขดลวด	8
รูปที่ 2.11 โครงสร้างโรเตอร์ของ HSM	9
รูปที่ 2.12 ลักษณะซี่ฟันของ HSM บางชนิด	9
รูปที่ 2.13 วงจรการกระตุ้นพื้นฐาน 3 แบบ	10
(ก) การพันแบบโมนิโพลาร์กับการกระตุ้นสแต็ปปีงมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์	
(ข) การพันแบบโมนิโพลาร์กับการกระตุ้นสแต็ปปีงมอเตอร์แบบไบโพลาร์	
(ค) การพันแบบไบโพลาร์กับการกระตุ้นสแต็ปปีงมอเตอร์แบบไบโพลาร์	
รูปที่ 2.14 ลักษณะกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดด้วยการกระตุ้นในโหมคมินิสเตปหรือไมโครสเตป	13
(ก) รูปกระแสในการกระตุ้นในโหมคมินิสเตป หรือไมโครสเตปในลักษณะลิเนียร์	
(ข) รูปกระแสในการกระตุ้นในโหมคมินิสเตป หรือไมโครสเตปในลักษณะคลื่นซายน์	
รูปที่ 2.15 (ก) แสดงการแกว่งในการเคลื่อนที่แต่ละสเตปของสแต็ปปีงมอเตอร์	14
(ข) การรีโซแนนซ์ของสแต็ปปีงมอเตอร์	
รูปที่ 2.16 การเกิดรีโซแนนซ์ในสแต็ปปีงมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลักแตนซ์ได้ขนาด 15 องศาต่อสเตป	15
รูปที่ 2.17 (ก) สลิปคลัทช์แคมป์เปอร์ (ข) รีซิสตีฟแคมป์ปีง	15
รูปที่ 2.18 (ก) คาปาซิตีฟแคมป์ปีง (Capacitive Damping)	16
(ข) ทู-เฟสแคมป์ปีง (Two-Phase Damping)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 2.19	คุณลักษณะเฉพาะของ T/θ	17
รูปที่ 2.20	คุณลักษณะเฉพาะของ T/I สเตปปีงมอเตอร์	17
	(ก) สำหรับสเตปมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลักแตนซ์ 4 เฟสมุมสเตป 1.8 องศา	
	(ข) สำหรับสเตปมอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์มี 2 เฟสมุมสเตป 1.8 องศา	
รูปที่ 2.21	กราฟคุณลักษณะทางพลศาสตร์	19
รูปที่ 2.22	โครงสร้างของสเตเตอร์และโรเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เส้นแรงแม่เหล็ก	19
รูปที่ 2.23	สเตปมอเตอร์แบบไฮบริดจ์; $p = N_r$	21
รูปที่ 2.24	ลักษณะการควบคุมตำแหน่ง	21
รูปที่ 2.25	กราฟคุณลักษณะ $T - \theta$ ของมอเตอร์ด้วยการประมาณค่าโดยเส้นตรง	27
รูปที่ 2.26	ผลตอบสนองของระบบอันดับที่สอง	30
รูปที่ 2.27	เวลาที่เข้าสู่ค่าสุดท้าย	30
รูปที่ 2.28	ค่าแอมป์ α และ β และค่า K เท่ากับ (r/L)	31
รูปที่ 2.29	วงจรถับแบบขั้วเดียว	32
รูปที่ 2.30	วงจรถับสำหรับสเตปปีงมอเตอร์ที่พันขดลวดแบบไบฟีลาร์และใช้การขับแบบโมโนฟีลาร์	33
รูปที่ 2.31	วงจรถับแบบสองขั้ว	33
รูปที่ 2.32	ลักษณะของ motor torque-displacement ($T - \theta$) characteristics	35
รูปที่ 2.33	การประมาณค่ากระแสจากเคิร์ฟ ($T - \theta$) ด้วยสมการเชิงเส้น	36
รูปที่ 2.34	กระแสที่ได้จากการประมาณเคิร์ฟ ($T - \theta$) ด้วยสมการเชิงเส้น	36
รูปที่ 2.35	กราฟคุณลักษณะ $T - \theta$ ที่เกิดขึ้นจริงสำหรับหนึ่งเฟส	38
รูปที่ 3.1	รูปแผนผังหลักการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์	39
รูปที่ 3.2	รูปบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C51ED2	40
รูปที่ 3.3	Schematic ของวงจรถับ AT89C51ED2	40
รูปที่ 3.4	รูปวงจรของ DAC0808	41
รูปที่ 3.5	แผนผังของโปรแกรมในการทำคลื่น sine และ cosine	42
รูปที่ 3.6	รูปวงจรของ TDA2030	43
รูปที่ 3.7	แผนผังการทำงานทั้งหมด	44
รูปที่ 3.8	แสดงชุดทดลองการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 3.9 แสดงรอยบากของมอเตอร์และจุดที่ใช้เปรียบเทียบ	45
รูปที่ 3.10 แสดงไมโครมิเตอร์	46
รูปที่ 3.11 แสดงการต่อไมโครมิเตอร์เข้ากับสเตปปีงมอเตอร์	46
รูปที่ 3.12 แสดงชุดทดลองการวัดการเคลื่อนที่ของสกรู	47
รูปที่ 3.13 แสดงไมโครมิเตอร์กับจุดที่ใช้อ้างอิง	47
รูปที่ 3.14 แสดงอุปกรณ์วัดรีวการแทรกสอด	48
รูปที่ 3.15 แสดงการต่อสเตปปีงมอเตอร์เข้ากับอุปกรณ์วัดรีวการแทรกสอด	48
รูปที่ 4.1 แสดงรูปคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงสเทปแบบเป็นขั้นบันได	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

มอเตอร์ที่ใช้งานในปัจจุบัน มีมากมายหลายรูปแบบแล้วแต่ชนิดของการใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นด้านกำลังเพื่อเพิ่มความเร็วรอบ หรือด้านความแม่นยำของมอเตอร์ แนวโน้มในการแข่งขันการพัฒนาประสิทธิภาพของมอเตอร์จะมุ่งไปทางด้านการพัฒนา กำลังของมอเตอร์ เพื่อให้มีกำลังสูง และมีความเร็วรอบมากๆ สำหรับในงานที่ต้องการความแม่นยำสูง ในระดับไมโครเมตร จึงต้องใช้มอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

เทคโนโลยีของการขับเคลื่อนเครื่องจักรในระดับไมโคร ซึ่งเครื่องจักรกลที่มีประสิทธิภาพต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศเป็นส่วนใหญ่ แนวทางการสร้างเทคโนโลยีขึ้นใช้เองก็เป็นแนวทางในการช่วยแก้ไขปัญหาค่าได้ทางหนึ่ง

ดังนั้นการทำโครงการเพื่อควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบไมโครสเตปขึ้นเพื่อเป็นการพัฒนา มอเตอร์ในด้านความแม่นยำสูงๆในระดับไมโครเมตร ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานที่ต้องการความละเอียดสูงได้

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาลักษณะ โครงสร้างและหลักการทำงานของสเตปป์มอเตอร์แบบไมโครสเตป
2. เพื่อสร้างโปรแกรมควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบไมโครสเตป
3. สามารถวิเคราะห์เทคนิคในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการสร้าง
4. เพื่อสามารถพัฒนาสเตปป์มอเตอร์แบบไมโครสเตปและนำไปใช้ในงาน

1.3 ขอบเขตในการศึกษา

1. เขียนโปรแกรมควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบไมโครสเตปโดยใช้ภาษา C
2. สร้างสเตปป์มอเตอร์แบบไมโครสเตปที่มีความละเอียดระดับไมโครเมตร
3. สร้างอุปกรณ์ควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบไมโครสเตปโดยรับค่าจากชุดควบคุม และแสดงผลทางหน้าจอ LCD
4. ทดลองและหาเทคนิคการแก้ปัญหา เพื่อพัฒนาคุณภาพของสเตปป์มอเตอร์แบบไมโครสเตปต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ระยะเวลาในการดำเนินการ

ตารางที่ 1.1 แสดงระยะเวลาในการทำงาน

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ	2548						
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1. ประกอบบอร์ด AT89C52RD2	█						
2. ศึกษาการทำงานของสเตปป์มอเตอร์	█	█					
3. ต่อดวงจร DAC และเขียนโปรแกรม		█	█				
4. ต่อดวงจรขับสเตปป์มอเตอร์			█	█			
5. ประกอบชุดทดลอง				█	█		
6. ทดลองอุปกรณ์และพัฒนาโปรแกรม					█	█	█
7. จัดทำเอกสารประกอบ	█	█	█	█	█	█	█

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสร้างสเตปป์มอเตอร์แบบไมโครสเตปเพื่อใช้งานกับเครื่องมือจริงได้
2. นำความรู้ที่ทำในโครงการนี้ ไปประยุกต์ใช้ในการทำโครงการอื่นๆ ที่เกี่ยวกับสเตปป์มอเตอร์หรือเครื่องมือที่จำเป็นต้องใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุม
3. สามารถพัฒนาระบบควบคุมให้สเตปป์มอเตอร์แบบไมโครสเตปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

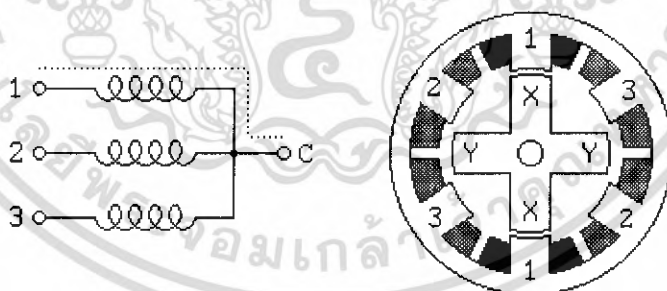
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ความหมายของสเต็ปมอเตอร์

สเต็ปมอเตอร์คือมอเตอร์ที่สามารถให้เพลาหมุนในลักษณะเป็นขั้นๆ หรือเป็นสเต็ป สเต็ปละกี่องศาขึ้นอยู่กับโครงสร้างและการออกแบบชุดควบคุม โดยการป้อนอินพุตพัลส์ที่มีความถี่ค่าหนึ่งซึ่งจะทำให้เกิดการหมุนไปหนึ่งสเต็ปในแต่ละพัลส์ ซึ่งชุดควบคุมนั้นสามารถออกแบบให้หมุนเป็นสเต็ปหรือหมุนอย่างต่อเนื่องและสามารถกลับทางหมุนได้

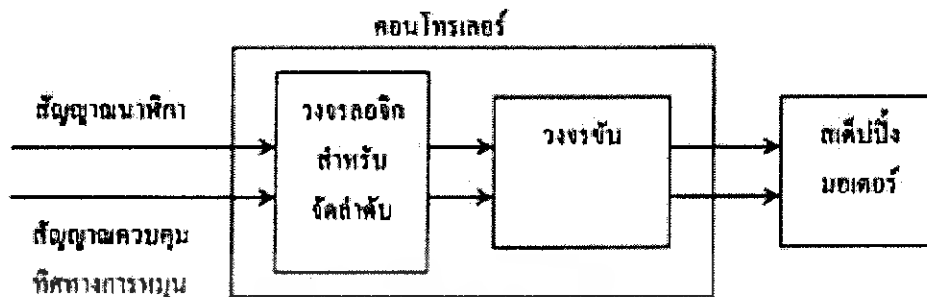
สเต็ปมอเตอร์มีส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ สเตเตอร์(stator) เป็นส่วนที่อยู่กับที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ซึ่งจะมีส่วนที่มีขดลวดพันล้อมอยู่บนแกนเหล็ก อีกส่วนคือ โรเตอร์(rotor) เป็นส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ จากรูป 2.1 โดยเมื่อจ่ายไฟเข้าที่ขดลวดที่พันอยู่บนสเตเตอร์ ที่ขด 1 ก่อน จะทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กขึ้นที่ตำแหน่ง 1 และผลักให้โรเตอร์ (จากรูปคือ x-y) เกิดการเคลื่อนที่ได้ การเคลื่อนที่นี้คือการเคลื่อนที่ 1 สเต็ปและถ้าหยุดจ่ายไฟเข้าที่ขดลวด 1 และไปจ่ายไฟเข้าที่ขดลวด 2 แทน จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่บริเวณ 2 บนสเตเตอร์และจะทำให้สนามแม่เหล็กนี้ผลักโรเตอร์ให้เคลื่อนที่ต่อไปได้ และถ้าเราหยุดจ่ายกระแสเข้าที่ 2 และไปจ่ายเข้าที่ขด 3 แทนก็จะทำให้สนามแม่เหล็กมาเกิดที่บริเวณ 3 และผลักให้โรเตอร์เคลื่อนที่ต่อไปได้อีก



รูปที่ 2.1 แสดงตำแหน่งของสเตเตอร์คือตรงเลข 1, 2, 3 และ โรเตอร์คือ x-y

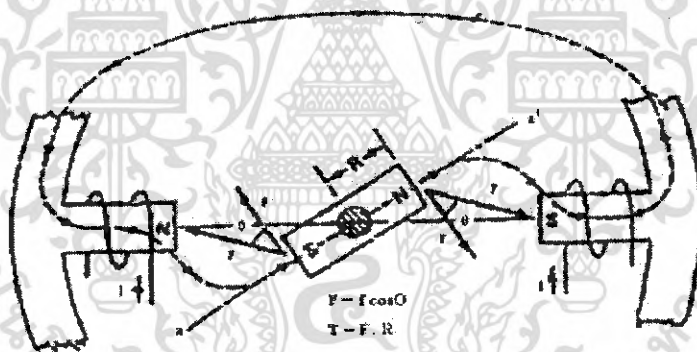
2.2 หลักการทำงานของสเต็ปมอเตอร์

การทำงานของสเต็ปมอเตอร์ ขึ้นอยู่กับพัลส์ที่ป้อนให้กับขดลวดเฟสของมันในลักษณะที่ถูกต้อง ด้วยวงจรลอจิกสำหรับจัดลำดับ(Sequencer logic) และสามารถจ่ายกระแสให้กับสเต็ปมอเตอร์ได้อย่างเพียงพอโดยวงจรขับ (Driver)



รูปที่ 2.2 ส่วนของการควบคุมสำหรับการทำงานของสเต็ปปีงมอเตอร์

ส่วนของการควบคุมของสเต็ปปีงมอเตอร์นั้นจะสามารถต่อเชื่อม (Interface) ได้โดยตรงได้กับไมโครโพรเซสเซอร์หรือไมโครคอมพิวเตอร์ โดยสเต็ปปีงมอเตอร์จะสามารถกำหนดตำแหน่งของโหลดได้อย่างเที่ยงตรงมาก เนื่องจากแต่ละอินพุตพัลส์จะทำให้สเต็ปปีงมอเตอร์เคลื่อนที่ไปหนึ่งสเต็ปพอดี



รูปที่ 2.3 แสดงแรงดึงดูดที่ทำให้เกิดทอร์กเพื่อหมุนอาร์เมเจอร์ให้ไปอยู่ในตำแหน่งสมดุล

จากรูปที่ 2.3 แท่งแม่เหล็กถาวรติดอยู่บนเพลลา และหมุนได้อิสระเหมือนอาร์เมเจอร์มีขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า 2 ขั้ว ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงโลหะที่สเตเตอร์ ตำแหน่งแกนอาร์เมเจอร์แม่เหล็กคือ a-a' ซึ่งต่างไปจากตำแหน่งแกนขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าน้อยเป็นมุม θ แรงแม่เหล็กที่เกิดจากแรงดึงดูดของขั้วแม่เหล็กที่ต่างกัน ทำให้เกิดแรงปกติซึ่งตั้งฉากกับแกน a-a' จะเป็นไปตามสมการ

$$F = f \cdot \cos \theta \quad (2.1)$$

เมื่อ $F =$ แรงปกติซึ่งตั้งฉากกับแกน a-a' (N)

$f =$ แรงดึงดูดจากขั้วแม่เหล็กที่ต่างกัน (N)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

θ = มุมระหว่างแกนอาร์เมเจอร์และแกนขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า (องศา)

ค่าแรงบิดรวมที่ทำให้อาร์เมเจอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (Clock Wise: CW) จนกว่าแกนของอาร์เมเจอร์ a-a' จะอยู่ในแนวเดียวกับแกนตั้งของสเตเตอร์เป็นไปตามสมการ

$$T = F \cdot R \quad (2.2)$$

เมื่อ T = แรงบิดรวมที่ทำให้อาร์เมเจอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (N.m)

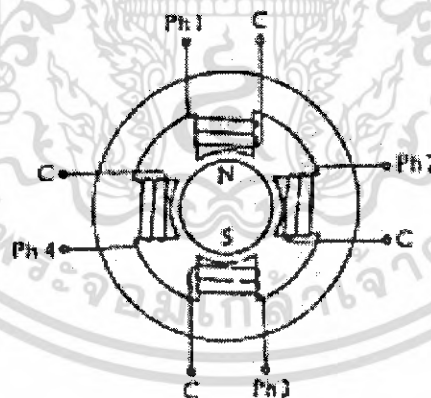
F = แรงปกติที่ตั้งฉากกับแกน a-a' (N)

R = รัศมีของแกนอาร์เมเจอร์ (m)

2.3 ชนิดของสเต็ปปีงมอเตอร์

แบ่งตามลักษณะ โครงสร้าง ได้ดังนี้

1. ชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Stepping Motor: PMSM) โครงสร้างของสเต็ปปีงมอเตอร์ แบบแม่เหล็กถาวรแสดงได้ ดังภาพที่ 2.4 สามารถสังเกตสเต็ปปีงมอเตอร์ชนิดนี้ได้โดยการทดลองหมุนด้วยมือเปล่าจะรู้สึกรู้สึกว่ามีการสะดุดเป็นขั้นๆ เพราะการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กถาวร โดยในภาพที่ 2.4 เป็นสเต็ปปีงมอเตอร์แบบ 4 เฟส โดยแต่ละเฟสมีการพันขดลวดอยู่บน 1 ขั้วของสเตเตอร์ ดังนั้นในการออกแบบมอเตอร์ชนิดนี้ สเตเตอร์จะต้องมี 4 ขั้ว



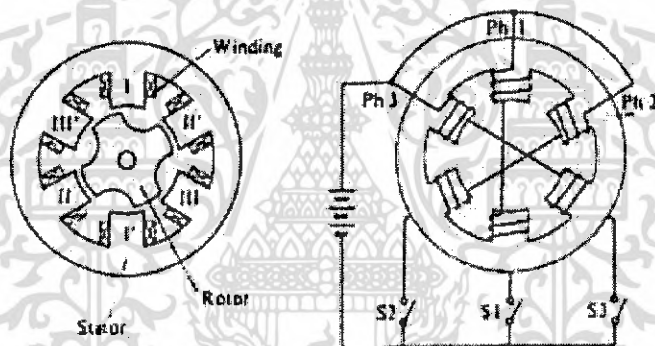
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของสเต็ปปีงมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร 4 เฟส

จากตัวอย่างของสเต็ปปีงมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรดังภาพที่ 2.4 ส่วนของโรเตอร์นั้นจะเป็นแม่เหล็กถาวรซึ่งมี 2 ขั้ว คือ ขั้วเหนือ(N) และขั้วใต้(S) โดยมีขดลวดพันอยู่บนสเตเตอร์ 4 ชุดให้ขั้ว C ต่อกันไปที่ขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟ และขั้ว Ph1, Ph2, Ph3, Ph4 จะต่อผ่านสวิตช์ของแต่ละเฟสก่อนที่จะไปรวมกันที่ขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟ ซึ่งตามโครงสร้างนี้จะทำให้โรเตอร์หมุนได้สเต็ปละ 90 องศา เช่นถ้าต้องการให้หมุนตามเข็มนาฬิกา ก็จ่ายไฟให้ทำงานในลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ph1 → Ph2 → Ph3 → Ph4 ตามลำดับ ซึ่งสเต็ปป์มอเตอร์ชนิดนี้จะให้แรงบิดน้อย

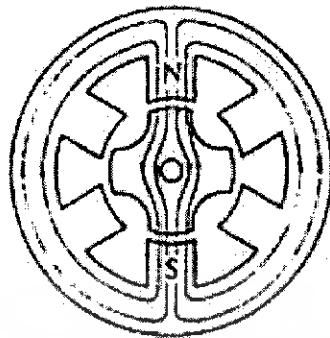
2. ชนิดคาร์ลัคแตนซ์แปรค่าได้ (Variable Reluctance Stepping Motor: VRSM) ลักษณะภายในของ VRSM จะมีลักษณะเป็นฟันยื่นออกมาโดยรอบของโรเตอร์ และสเตเตอร์ก็มีส่วนที่ยื่นออกมาเป็นซี่ฟันคล้ายกับโรเตอร์เช่นกัน ในภาพที่ 2.5 จะแสดงภาพตัดของสเต็ปป์มอเตอร์ ชนิด 3 เฟส โดยสเตเตอร์จะมีฟัน 6 ซี่ ดังนั้นขั้วแม่เหล็กในแต่ละเฟสจะเกิดจากซี่สเตเตอร์ 2 ซี่ที่อยู่ตรงข้ามกัน ซึ่งจะพันขดลวดให้เกิดเป็นขั้วเหนือ 1 ซี่และขั้วใต้ 1 ซี่ ส่วนของโรเตอร์จะมีฟันยื่นออกมา 4 ซี่ โดยรอบของโรเตอร์เช่นกัน โครงสร้างโรเตอร์และสเตเตอร์ของ VRSM โดยทั่วไปทำมาจาก Laminated silicon steel ส่วนที่เป็นลักษณะคล้ายซี่ฟันยื่นออกมาจากโรเตอร์ และสเตเตอร์จะช่วยให้เกิดการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าดีกว่าส่วนที่ไม่เป็นฟัน ยื่นออกมา ดังนั้นเพื่อให้เกิดความสมดุลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซี่ฟันของโรเตอร์เมื่ออยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง ควรจะโค้งรับพอดีกับซี่ฟันของสเตเตอร์ดังรูปที่ 2.5



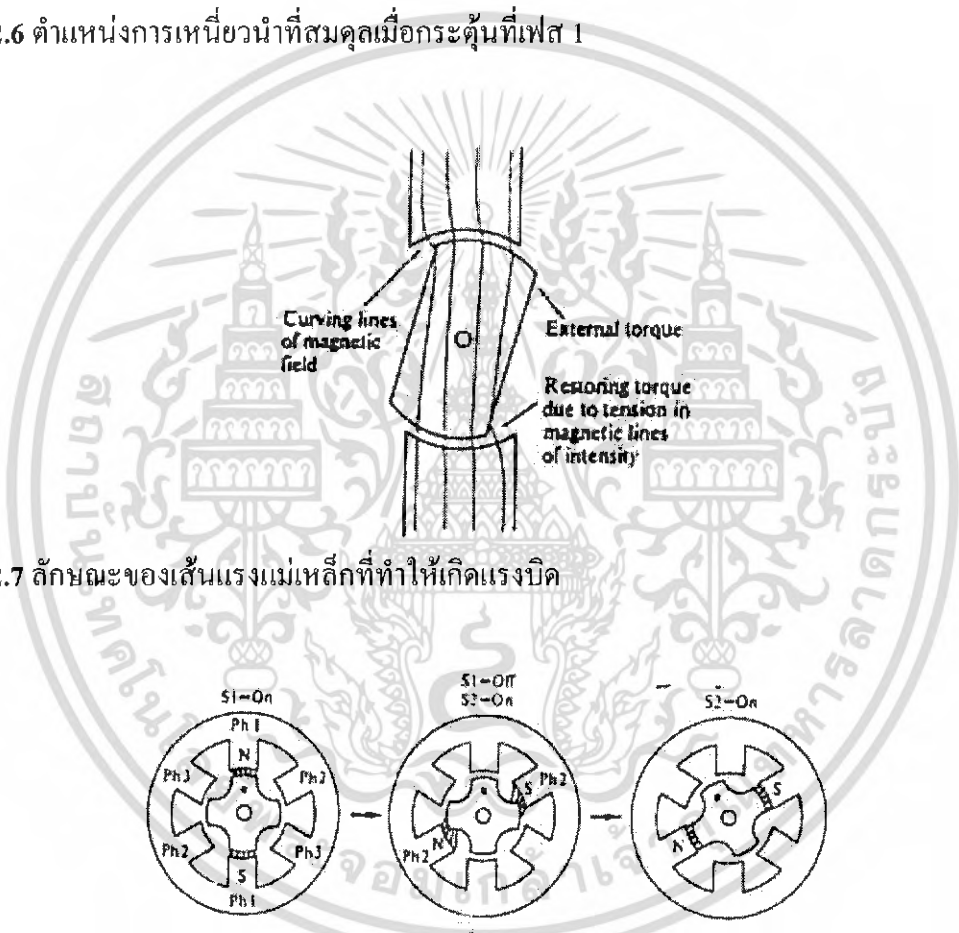
รูปที่ 2.5 ภาพตัดโครงสร้างและการพันขดลวดของ VRSM ชนิด 3 เฟส

ในภาพที่ 2.5 จะแบ่งซี่ฟันของสเตเตอร์ออกเป็น 2 ส่วน คือซี่ฟันในส่วนของขั้วเหนือ(N) และซี่ฟันของขั้วใต้(S) โดยซี่ I, II, III จะเป็นขั้วเหนือ และซี่ I', II', III' จะเป็นขั้วใต้

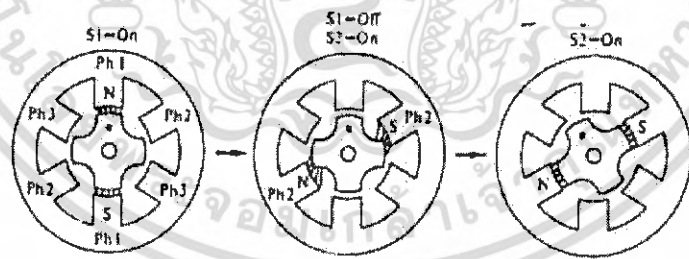
หลักการทำงานคือ เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปในเฟสที่ 1 ของ VRSM โดยการให้ S1 “on” จะทำให้กระแสไฟไหลในขดลวดของเฟสที่ 1 ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในสเตเตอร์ ที่ขั้วเหนือไปขั้วใต้ ผ่านซี่ฟันของสเตเตอร์ที่ยื่นออกมาคือขั้ว I จะเป็นขั้วเหนือและ I' จะเป็นขั้วใต้ ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นจะไปเหนี่ยวนำกับซี่ฟันของโรเตอร์ที่อยู่ใกล้ขั้ว I และ I' จะทำให้โรเตอร์หยุดหมุน ดังแสดงในรูปที่ 2.6



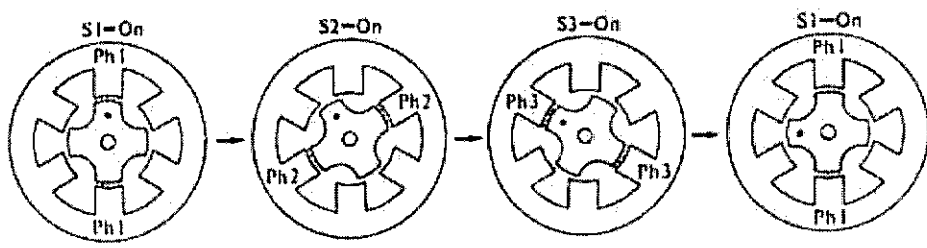
รูปที่ 2.6 ตำแหน่งการเหนี่ยวนำที่สมดุลเมื่อกระตุ้นที่เฟส 1



รูปที่ 2.7 ลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงบิด



รูปที่ 2.8 ตำแหน่งการหมุนเมื่อกระตุ้นจากเฟส 1 ไปยังเฟส 2



รูปที่ 2.9 ลำดับการเคลื่อนที่ของ VRSM เมื่อกระตุ้นครบทั้ง 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ต่างๆใน VRSM คือ

มุมสเต็ป: θ_s (องศา)

จำนวนเฟส: N_p (เฟส)

จำนวนขั้วแม่เหล็กต่อเฟส: P (ขั้ว)

อัตราการสเต็ป: f_s (Hz)

$$\text{จำนวนการสเต็ป} \quad S = \frac{360}{\theta} \quad (\text{สเต็ป}) \quad (2.3)$$

$$\text{จำนวนขั้วของสเตเตอร์} \quad N_s = N_p \cdot P \quad (\text{ขั้ว}) \quad (2.4)$$

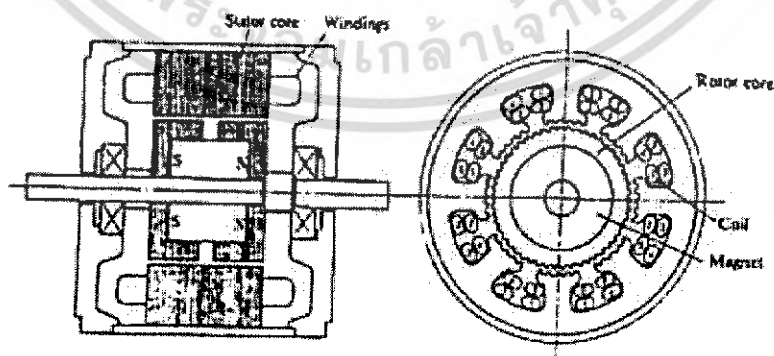
$$\text{จำนวนขั้วของโรเตอร์} \quad N_r = \frac{S}{N_p} \quad (\text{ขั้ว}) \quad (2.5)$$

$$\text{ความห่างระหว่างขั้วของสเตเตอร์} \quad P_s = \frac{360}{N_s} \quad (\text{องศา}) \quad (2.6)$$

$$\text{ความห่างระหว่างขั้วของโรเตอร์} \quad P_r = \frac{360}{N_r} \quad (\text{องศา}) \quad (2.7)$$

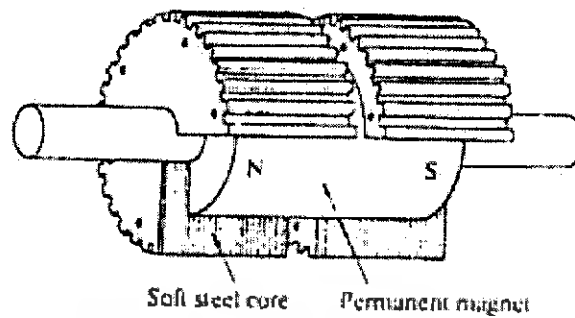
$$\text{ความเร็วของสเต็ปมอเตอร์} \quad n = \frac{60 \cdot f}{S} \quad (\text{r.p.m.}) \quad (2.8)$$

3. ชนิดไฮบริด (Hybrid Stepping Motor: HSM) โครงสร้างของ HSM จะมีแม่เหล็กถาวรฝังอยู่ในโรเตอร์ ในการทำงานของ HSM จะทำงานผสมระหว่างสเต็ปมอเตอร์แบบ PMSM และแบบ VRSM ลักษณะโครงสร้างของแกนสเตเตอร์จะเหมือน VRSM แต่จำนวนขดลวดและการต่อจะแตกต่างจาก VRSM คือใน VRSM จะมีจำนวนขดลวดอยู่ 2 ขด ต่อ 2 ขั้ว ใน 1 เฟส แต่สำหรับ HSM จะมีจำนวนขดลวดอยู่ 4 ขด ต่อ 2 ขั้ว ใน 1 เฟส



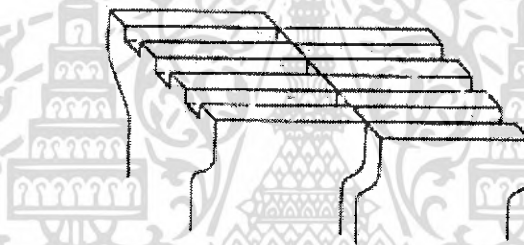
รูปที่ 2.10 โครงสร้างภายในของ HSM และการวางขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 โครงสร้างโรเตอร์ของ HSM

ซี่ฟันโรเตอร์ของ HSM ทั้ง 2 ส่วน จะมีระยะความเอียงต่างกัน $\frac{1}{2}$ ซี่ (Half tooth pitch) แต่ HSM บางชนิดซี่ฟันของสเตเตอร์จะเอียงกันแทนส่วนซี่ฟันของโรเตอร์ โดยจะเรียงในแนวเดียวกัน ดังภาพที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ลักษณะซี่ฟันของ HSM บางชนิด

นอกจากสเต็ปป์มอเตอร์ทั้ง 3 ชนิดที่กล่าวมาแล้ว ในปัจจุบันได้มีการออกแบบสเต็ปป์มอเตอร์สำหรับการใช้งานอื่นๆ อีกหลายรูปแบบ แต่จะใช้กับงานเฉพาะด้านเท่านั้น จึงไม่ค่อยได้พบเห็น

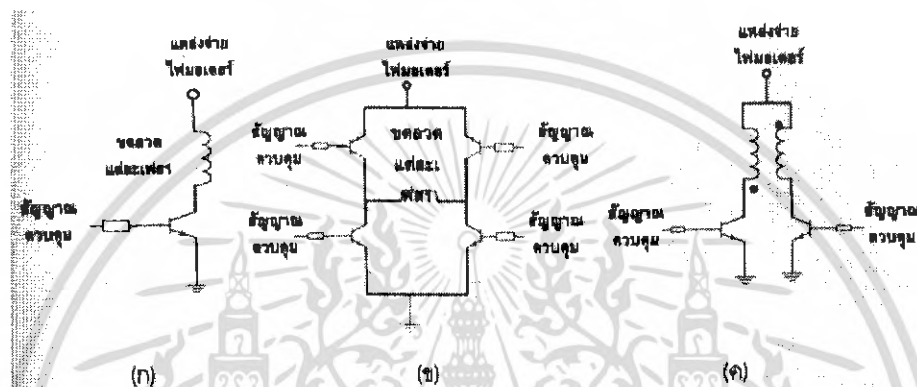
2.4 วิธีการกระตุ้นการขับเคลื่อนสเต็ปป์มอเตอร์

ลักษณะของโหมดที่ใช้ในการขับเคลื่อนสเต็ปป์มอเตอร์นั้น มีอยู่ด้วยการหลายแบบและที่จะอธิบายต่อไปนี้ คือการกระตุ้นตามการพันขดลวดในหัวขั้ว การพันขดลวด ในการกระตุ้นการทำงานของคู่ขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าหรือเฟสของขดลวด สามารถกระทำได้ 3 วิธีอย่างใดอย่างหนึ่ง

1. การพันแบบโมโนโพลาร์ ขั้วที่เกิดจากการกระตุ้นอาจจะเป็นขั้วเหนือหรือขั้วใต้ อย่งใดอย่างหนึ่งไม่สามารถเปลี่ยนขั้วได้ในขณะใช้งาน หรือไม่สามารถสับไปมาได้ วิธีนี้เรียกว่า การกระตุ้นแบบขั้วเดียว (Unipolar Excitation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การพันแบบโมโนฟิลาาร์ ที่สามารถกลับขั้วทิศทางของกระแสได้เนื่องจากใช้วงจรบริดจ์เป็นตัวสวิตช์ควบคุม ซึ่งวงจรบริดจ์อาจจะใช้ทรานซิสเตอร์ 4 ตัว หรือสวิตช์ 4 ตัวต่อหนึ่งเฟส วิธีการนี้เรียกว่า การกระตุ้นแบบ 2 ขั้ว (Bipolar Excitation)
3. การพันแบบไบโพลาร์ สามารถที่จะกระตุ้นให้ขั้วของสเตเตอร์เป็นขั้วเหนือหรือขั้วใต้ได้ เนื่องจากการพันของขดลวดที่มี 2 ขดมีการพันกลับทิศทางกัน และอาศัยสวิตช์หนึ่งตัวต่อเฟส



รูปที่ 2.13 วงจรการกระตุ้นพื้นฐาน 3 แบบ

- (ก) การพันแบบโมโนฟิลาาร์ กับการกระตุ้นสเตปป์มอเตอร์แบบยูนิโพลาร์
- (ข) การพันแบบโมโนฟิลาาร์ กับการกระตุ้นสเตปป์มอเตอร์แบบไบโพลาร์
- (ค) การพันแบบไบโพลาร์ กับการกระตุ้นสเตปป์มอเตอร์แบบไบโพลาร์

ลักษณะการกระตุ้นทั้ง 3 แบบ สามารถแสดงเป็นวงจรได้ในรูปที่ 2.13 เป็นวงจรการกระตุ้นพื้นฐานที่ในการขับหรือจ่ายกระแสให้กับขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ เมื่อต้องการให้สเตปป์มอเตอร์เคลื่อนที่หรือหมุนอย่างต่อเนื่อง จึงจำเป็นต้องจัดลำดับการกระตุ้นให้แต่ละเฟสได้รับกระแสตามลำดับและทิศทางที่ต้องการให้โรเตอร์เคลื่อนที่ไป โดยมีหลายวิธีในการกระตุ้น แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะ 4 วิธีเท่านั้นคือ การกระตุ้นแบบเฟสเดียว (Single Phase Excitation) เป็นการกระตุ้นที่ละเฟสตามจังหวะนาฬิกา, การกระตุ้นแบบสองเฟส (Two Phase Excitation) เป็นการกระตุ้นพร้อมกันที่ละสองเฟสตามจังหวะนาฬิกา, แบบกระตุ้นครึ่งสเตป (Half – Step Excitation) เป็นการรวมเอาสองแบบแรกเข้าด้วยกัน โดยสลับกันระหว่างแบบแรกและแบบที่สอง สำหรับแบบสุดท้ายคือ การกระตุ้นแบบมินิสเตป (ministep excitation) หรือการกระตุ้นแบบไมโครสเตป (Microstep Excitation) เป็นการกระตุ้นในแบบที่สอง และให้กระแสทั้งสองเฟสเปลี่ยนแปลงขึ้นและลงเป็นสัดส่วนกันซึ่งได้จากการประมาณค่าคุณลักษณะทอร์คของมอเตอร์

2.4.1 ลำดับการทำงานในโหมดปกติด้วยการกระตุ้นแบบหนึ่งเฟส (One phase excitation)

จากตารางที่ 2.1 เป็นการแสดงลำดับการกระตุ้นในแบบหนึ่งเฟสสำหรับสเตปป์มอเตอร์ที่มี 3 เฟส และ 4 เฟส ในเส้นแรงเงาในตารางแสดงถึงเฟสที่ถูกกระตุ้น เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนลำดับของการกระตุ้นของเฟสต่างๆ เป็นดังนี้ คือจากเฟส 1 ไปเฟส 2 และเฟส 3 เป็นลักษณะ CW ถ้าต้องการให้หมุนในทางกลับกันก็ต้องกระตุ้นจากเฟส 3 ไปเฟส 2 และเฟส 1 การทำงานในลักษณะนี้บางครั้งจะถูกเรียกว่า เป็นการขับแบบทีละเฟสในโหมดหนึ่งสเตปหรือเต็มสเตป

ตารางที่ 2.1 แสดงลำดับขับแบบปกติด้วยการกระตุ้นหนึ่งเฟส

(ก) สำหรับสเตปป์มอเตอร์ชนิด 3 เฟส

(ข) สำหรับสเตปป์มอเตอร์ชนิด 4 เฟส

ลำดับพัลส์	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ขดลวดเฟสที่ 1	■	■			■			■		
ขดลวดเฟสที่ 2			■			■			■	
ขดลวดเฟสที่ 3				■			■			■

(ก)

ลำดับพัลส์	R	1	2	3	4	5	6	7	8
ขดลวดเฟสที่ 1	■	■				■			
ขดลวดเฟสที่ 2			■				■		
ขดลวดเฟสที่ 3				■				■	
ขดลวดเฟสที่ 4					■				■

(ข)

2.4.2 ลำดับการทำงานในโหมดปกติด้วยการกระตุ้นแบบสองเฟส (Two phase excitation)

การทำงานของมอเตอร์ในลักษณะนี้เรียกว่า การทำงานทีละสองเฟส ซึ่งมีลำดับการกระตุ้นดังแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์กันระหว่างตัวโรเตอร์และสเตเตอร์ในการเกิดตำแหน่งที่สมดุลกัน จากตารางที่ 2.2 เป็นลำดับการกระตุ้นที่ใช้สำหรับสเตปป์มอเตอร์ชนิด 3 และ 4 เฟส การทำงานคือ เมื่อเรากระตุ้นเฟสที่ 1 และ 2 ด้วยพัลส์ที่ 1 ตำแหน่งแกนจะอยู่ในสภาวะสมดุลและเมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พัลส์ที่ 2 เข้ามาจะไปกระตุ้นให้เฟสที่ 3 ทำงานและเฟสที่ 1 หยุด ในขณะที่เฟสที่ 2 ยังคงทำงานค้างอยู่ นั่นคือจะมีอยู่ 2 เฟสที่ทำงานพร้อมกัน จะทำให้โรเตอร์เคลื่อนที่ไปครึ่งละหนึ่งสเตป ซึ่งการเกิดลักษณะนี้เป็นการกระตุ้นในโหมดหนึ่งสเตป

ตารางที่ 2.2 แสดงลำดับการทำงานใน โหมดปกติด้วยการกระตุ้นแบบสองเฟส

(ก) สำหรับสเตปป์มอเตอร์ชนิด 3 เฟส

(ข) สำหรับสเตปป์มอเตอร์ชนิด 4 เฟส

ลำดับพัลส์	R	1	2	3	4	5	6	7	8
ขดลวดเฟสที่ 1	■	■		■	■		■	■	
ขดลวดเฟสที่ 2		■	■		■	■		■	■
ขดลวดเฟสที่ 3			■	■		■	■		■

(ก)

ลำดับพัลส์	R	1	2	3	4	5	6	7	8
ขดลวดเฟสที่ 1	■	■			■	■			
ขดลวดเฟสที่ 2		■	■			■	■		
ขดลวดเฟสที่ 3			■	■			■	■	
ขดลวดเฟสที่ 4				■	■			■	■

(ข)

2.4.3 ลำดับการทำงานในโหมดการเคลื่อนที่ครึ่งสเตป (Half step excitation) การกระตุ้นในลักษณะนี้จะเป็นการรวมเอาการขับแบบทีละเฟสและสองเฟสรวมกัน และได้แสดงให้เห็นในตารางที่ 2.3 สำหรับสเตปป์มอเตอร์ชนิด 3 เฟส ในที่นี้จะมีสภาวะของพัลส์ 2 ตัว คือ A และ B โดย A จะแสดงถึงการเคลื่อนที่แบบการกระตุ้นทีละเฟส และ B เป็นตัวแสดงถึงการกระตุ้นทีละสองเฟส ซึ่งจะเป็นการเคลื่อนที่จากตำแหน่งสมดุล และมีลำดับการกระตุ้นในตารางที่ 2.2 (ข)

ตารางที่ 2.3 แสดงลำดับการกระตุ้นให้โหมคเฟสครึ่ง

จำนวนสเตป A	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
จำนวนสเตป B	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ขดลวดเฟสที่ 1													
ขดลวดเฟสที่ 2													
ขดลวดเฟสที่ 3													
ขดลวดเฟสที่ 4													

2.4.4 ลำดับการทำงานไมโครสเตปด้วยการกระตุ้นแบบสองเฟส (Microstep excitation)

โดยปกติแล้วสเตปปีงมอเตอร์มักจะเป็นการขับในโหมคปกติแต่จากการทำงานดังกล่าวไม่สะดวกต่อการที่จะนำไปใช้งาน จึงได้มีการพัฒนาขึ้นให้สามารถแบ่งขนาดสเตปปกติให้เล็กลงไปอีกเป็นจำนวนเท่าของสเตปปกติ ซึ่งเรียกว่าการกระตุ้นในโหมคไมโครสเตปขึ้นอยู่กับจำนวนสเตปย่อยๆ เหล่านั้น ซึ่งจะเป็นการควบคุมกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดในเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ในลักษณะเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นสัดส่วนกัน โดยส่วนมากนิยมควบคุมให้กระแสทั้งสองเฟสเป็นลักษณะการประมาณจากคุณสมบัติของสเตปมอเตอร์ ในแบบลิเนียร์และแบบซายน์ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.14 ลักษณะกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดด้วยการกระตุ้นในโหมคไมโครสเตป

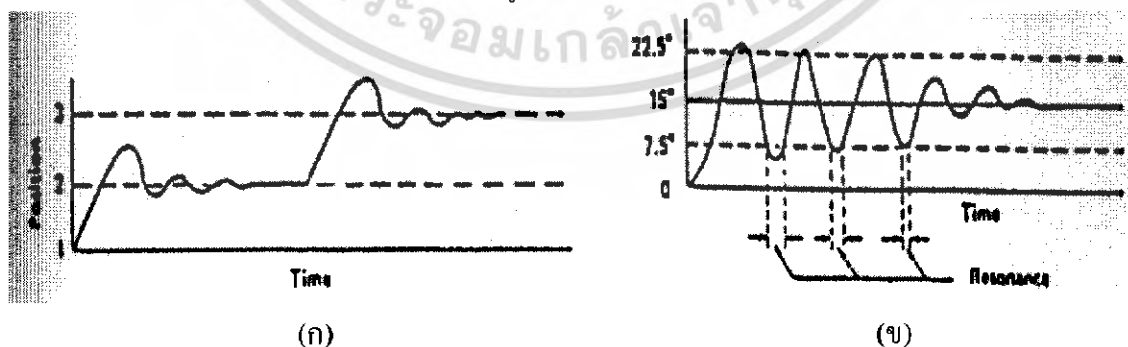
(ก) รูปกระแสในการกระตุ้นในโหมคไมโครสเตปในลักษณะลิเนียร์

(ข) รูปกระแสในการกระตุ้นในโหมคไมโครสเตปในลักษณะคลื่นซายน์

2.5 กรรมวิธีในการแดมป์จิ่ง (Damping Method)

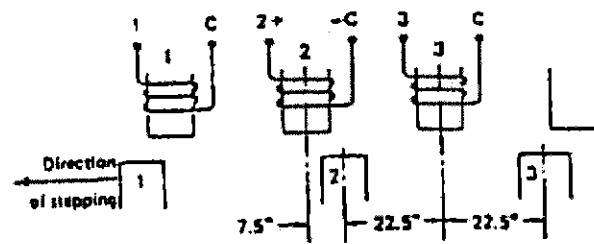
ในกรณีที่เกิดปัญหาของรีโซแนนซ์ขึ้นกับสเตปมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีล็กแตนซ์ได้ และบางครั้งกับสเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร โดยเฉพาะเมื่อมีความถี่ที่เกิดจากโหลดสูง รีโซแนนซ์จะเป็นตัวบ่งบอกการขาดความสามารถที่จะทำให้โรเตอร์เคลื่อนที่ตามคำสั่งได้ และบางครั้งเป็นความถี่รีโซแนนซ์ธรรมชาติของมอเตอร์เกิดขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียจิ่งหวะของสเตปไปหรือเรียกว่าการออสซิลเลทชัน (Oscillation) การเกิดเหตุการณ์นี้ เป็นการเพิ่มความเร็วในการหมุนของสเตปมอเตอร์เป็นลิเนียร์กับความถี่ที่ป้อนให้กับสเตปมอเตอร์แต่เมื่อป้อนความถี่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าๆ หนึ่ง สเตปมอเตอร์จะหยุดหมุนเนื่องจากการที่โรเตอร์หมุนตามฟลักซ์แม่เหล็กไม่ทัน เรียกว่า มอเตอร์เกิดการออสซิลเลท ซึ่งมอเตอร์แต่ละตัวมีค่าความถี่ไม่เท่ากัน และการกระตุ้นแต่ละแบบก็จะให้ความถี่ออสซิลเลทต่างกันไป เมื่อลดความถี่ที่จุดออสซิลเลทลงมอเตอร์จะไม่หมุนทันทีจนกว่าความถี่จะลดลงถึงค่าๆ หนึ่ง สเตปมอเตอร์จึงจะเริ่มหมุนอีกครั้ง นั่นคือมอเตอร์มีฮิสเตอร์ซิส

การเคลื่อนที่ทางไดนามิกส์ของสเตปจิ่งมอเตอร์จะเป็นตัวช่วยบอกถึงการหาค่ารีโซแนนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 เมื่อมอเตอร์เคลื่อนที่จากสเตปที่ 1 ไปยังสเตปที่ 2 จะเกิดพลังงานจลน์ขึ้นที่โรเตอร์ซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญที่ทำให้เกิดการแกว่งแดมป์ขึ้น โดยสนามแม่เหล็กที่ช่วยเสริมกันและกันในการผลักให้โรเตอร์หมุนกระแสะจะไหลวนในขดลวด และการสูญเสียฮิสเตอร์ซิส (Hysteresis loss) อย่างไรก็ตามในสเตปจิ่งมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีล็กแตนซ์ได้ (ซึ่งไม่มีส่วนประกอบที่เป็นแม่เหล็กถาวร) ในส่วนนี้จะมีผลกระทบน้อยมากต่อค่าแดมป์ จากรูปที่ 2.15 และ 2.16 แสดงให้เห็นถึงสถานะของการแกว่งสำหรับสเตปมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีล็กแตนซ์ได้ที่มีขนาด 15 องศา ซึ่งมีขั้วคู่ 2 ขั้ว ตำแหน่งแกนโรเตอร์จะแกว่งออกไป 7.5 องศา จากตำแหน่งสุดท้าย ดังนั้นจึงมีวิธีการลดค่ารีโซแนนซ์เนื่องจากการแดมป์อยู่หลายวิธีดังนี้



รูปที่ 2.15 (ก) แสดงการแกว่งในการเคลื่อนที่แต่ละสเตปของสเตปจิ่งมอเตอร์

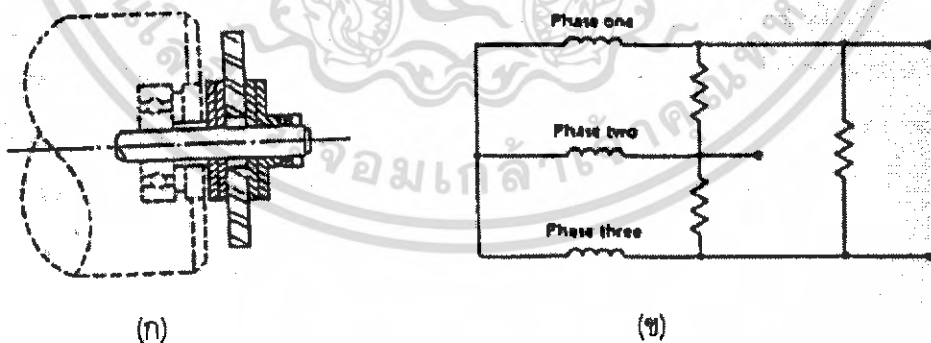
(ข) การรีโซแนนซ์ของสเตปจิ่งมอเตอร์



รูปที่ 2.16 การเกิดรีโซแนนซ์ในสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลักแตนซ์ได้ขนาด 15 องศาต่อสเตป

1. สลิปคลัทช์ แคมป์ปิ้ง (Slip-Clutch Damping) เป็นวิธีที่ใช้อุปกรณ์ทางกลเข้ามาช่วย โดยหลักการเพิ่มแรงเสียดทานในการหมุนเข้าไปในระบบ ซึ่งผลของแรงเสียดทานนี้จะทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ลดลง ผลที่ตามมาคือโอเวอร์ชูทและอันเดอร์ชูทลดลง แรงเสียดทานนี้จะถูกควบคุมโดยแรงกดจากสปริง และส่วนวงแหวนใส่เฟรอนคั้นเอาไว้ ดังรูปที่ 2.17 (ก) สำหรับการติดตั้งจะอยู่ตอนท้ายของเพลารอเตอร์ของมอเตอร์ ข้อเสียของการลดวิธีนี้คือผลตอบสนองต่อความเร็วลดลง

2. รีซิสติฟแคมป์ปิ้ง (Resistive Damping) เป็นวิธีหนึ่งจะช่วยลดการเกิดออสซิลเลท คือการเพิ่มตัวต้านทานเข้าไปในขดลวดสเตเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ข) ตัวต้านทานนี้จะยอมให้อัตรากระแสไหลผ่านเฟสที่ 1 ในขณะที่เท่ากับอัตราที่ขดลวดต้องการ และตัวความต้านทานนี้จะจำกัดกระแสส่วนที่เหลืออยู่ให้ไหลผ่านเฟสที่ 2 (กรณีกระตุ้นแบบเฟสเดียว) ดังนั้นผลที่ได้รับคือกระแสที่ไหลในเฟสที่ 2 จะทำให้เกิดแรงบิดกลับทางหรือแรงต้านการหมุนไปข้างหน้า ซึ่งแรงนี้จะป้องกันการเกิดออสซิลเลทหรือการแกว่งของโรเตอร์ได้นั่นคือไม่ให้โรเตอร์เกิดการเร่งมากเกินไป จึงทำให้ลดโอเวอร์ชูทได้

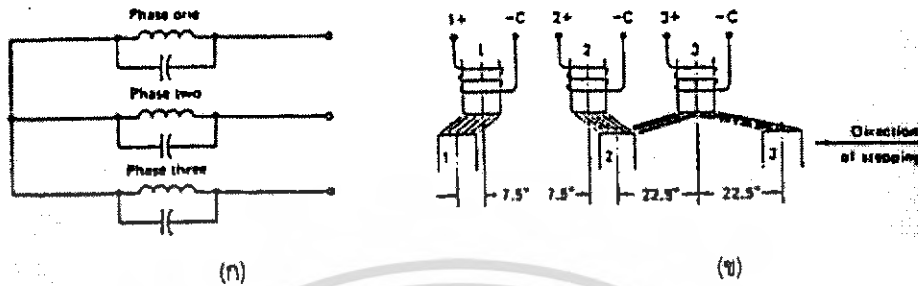


รูปที่ 2.17 (ก) สลิปคลัทช์แคมป์เปอร์

(ข) รีซิสติฟแคมป์ปิ้ง

3. คาปาซิทีแคมป์ปิ้ง (Capacitive Damping) เป็นการใส่ตัวเก็บประจุเข้าไปขนานกับขดลวดสเตเตอร์ในแต่ละเฟสดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ก) วิธีนี้ทำให้แรงบิดกลับทางขึ้น จากรูปจะเห็นได้ว่าในช่วงระยะเวลาสั้นๆ เมื่อเฟสหนึ่งกำลังลดลงในขณะที่อีกสองเฟสมีกำลังเพิ่มขึ้น ตัวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนเว็บไซต์ใดๆ ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เก็บประจุที่เฟสหนึ่งจะคายประจุออกมา ในการคายประจุจึงเป็นการลดกระแสให้กับขดลวดทำให้เกิดแรงต้านขึ้นซึ่งเป็นแรงกลับทิศกับการเคลื่อนที่ของโรเตอร์



รูปที่ 2.18 (ก) คาปาซิตีฟแคมป์ปิ้ง (Capacitive Damping)

(ข) ทู-เฟสแคมป์ปิ้ง (Two-Phase Damping)

4. ทู-เฟสแคมป์ปิ้ง (Two-Phase Damping) เป็นวิธีการกระตุ้นการทำงานของขดลวดในสเตเตอร์พร้อมกัน 2 ชุด การกระตุ้นแบบนี้เพราะว่าเพื่อให้โรเตอร์หมุนไปอยู่กึ่งกลางระหว่างขดลวดสองชุดที่ถูกกระตุ้น ซึ่งจะแสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 2.18 (ข) มุมของการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ใหม่นี้จะไม่แตกต่างจากการกระตุ้นแบบเฟสเดียว การกระตุ้นแบบนี้จะทำให้โรเตอร์แบ่งกำลังแรงบิดเท่าๆ กันให้มาด้านซึ่งกันและกันในการรวมกันของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งข้อได้เปรียบอย่างหนึ่งในการกระตุ้นแบบสองเฟสก็คือ ให้กำลังงานออกมาประมาณ 2 เท่า ของการกระตุ้นแบบเฟสเดียว

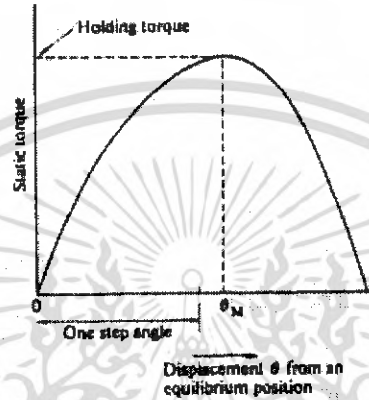
5. รีโทรทอร์ก (Retrotorque Damping) หรือเรียกว่าการแคมป์โดยอาศัยแรงบิดต้านกลับ การแคมป์วิธีนี้เป็นการใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมแรงบิดต้านกลับ ใช้หลักการคร่าวๆ เป็นการให้การกระตุ้นเฟสมอเตอร์แบบเฟสเดียวเป็นการจ่ายพัลส์ให้ขดลวดที่กำลังทำงานอยู่ เพื่อให้เกิดแรงต้านกลับ ซึ่งจะทำการจำกัดโอเวอร์ซุทและอันเดอร์ซุทได้ วิธีการนี้ไม่ได้เพิ่มกำลังในการทำงานแต่เป็นการเพิ่มความซับซ้อนในการออกแบบวงจรมากกว่า

2.6 คุณลักษณะเฉพาะของสเตปป์มอเตอร์

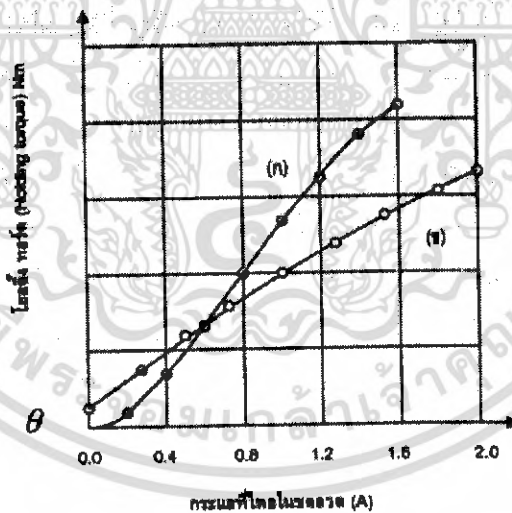
2.6.1 คุณลักษณะเฉพาะทางสถิตยศาสตร์ เป็นส่วนที่เกี่ยวข้องกับสเตปมอเตอร์โดยตรง และแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะดังนี้คือ

1. คุณลักษณะเฉพาะของ T/θ ของสเตปมอเตอร์ที่รักษาภาวะสมดุลของตำแหน่งเอาไว้ได้เนื่องจากกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ในลักษณะที่เป็นการกระตุ้นแบบเฟสเดียวและสองเฟส และแรงบิดภายนอกที่เกิดขึ้นที่แกน โรเตอร์ทำให้เกิดมุมการเคลื่อนที่ไปหนึ่งสเตปซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างมุมในการเคลื่อนที่และแรงบิดที่เกิดจากกระแส สามารถแสดงอยู่ในรูปที่ 2.19 จากรูปเส้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โค้งนี้เรียกว่าคุณลักษณะเฉพาะของ T/θ ค่าสูงสุดของแรงบิดที่สภาวะอยู่กับที่เรียกว่า แรงบิดยึดเกาะ (Holding torque) ซึ่งเกิดขึ้นที่ $\theta = \theta_M$ แรงบิดสถิตย์นี้จะไม่เคลื่อนไหวไปยังตำแหน่งสมดุลเดิมแต่มันจะต่อต้านทิศทางที่จะไปยังตำแหน่งถัดไป ดังนั้นแรงบิดยึดเกาะจะถูกจำกัดความว่าเป็นแรงบิดสูงสุดที่ใช้กับเฟลมอเตอร์ ในการกระตุ้นเฟลมอเตอร์ โดยไม่คำนึงถึงการเคลื่อนที่ต่อเนื่องที่เกิดจากแรงบิดยึดเกาะไม่ได้ถูกแยกออกจากตำแหน่งสภาวะสมดุลเสมอ



รูปที่ 2.19 คุณลักษณะเฉพาะของ T/θ



รูปที่ 2.20 คุณลักษณะเฉพาะของ T/I สเตปมอเตอร์

(ก) สำหรับสเตปมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลักแตนซ์ 4 เฟลมอเตอร์ 1.8 องศา

(ข) สำหรับสเตปมอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์มี 2 เฟลมอเตอร์ 1.8 องศา

2. คุณลักษณะของ T/I ของสเตปมอเตอร์ แรงบิดยึดเกาะที่เพิ่มขึ้นกับกระแสที่เพิ่มขึ้น มีความสัมพันธ์กัน ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.20 เป็นการเปรียบเทียบคุณลักษณะเฉพาะ T/I ของสเตป

มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้กับสเตปมอเตอร์แบบไฮบริดจ์ ทั้งสองชนิดมีมุมสเตปในการเคลื่อนที่เท่ากันคือ 1.8 องศา

2.6.2 คุณลักษณะเฉพาะทางพลศาสตร์

เป็นส่วนแสดงรายละเอียดเกี่ยวกับการสตาร์ทหรือการเคลื่อนที่เรียกว่าเป็นคุณลักษณะเฉพาะทางพลศาสตร์ และแสดงคุณลักษณะทางพลศาสตร์ได้ดังรูปที่ 2.21 และสามารถกำหนดส่วนสำคัญต่างๆ โดยแบ่งเป็นหัวข้อได้ดังนี้

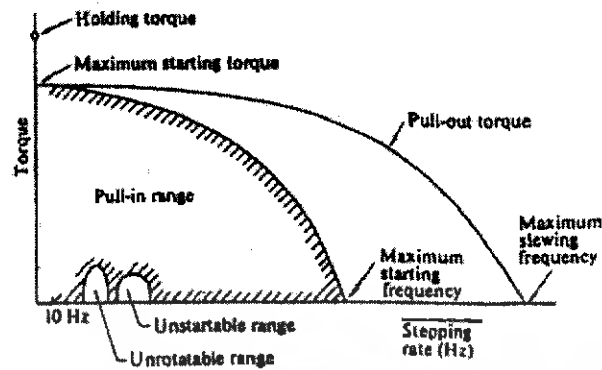
1. คุณลักษณะของแรงบิดพลูอิน (Pull-in torque Characteristic) หรือเรียกอีกได้เป็นคุณลักษณะการสตาร์ทและอ้างถึงย่านของภาระแรงบิดเสียดทาน ซึ่งทำให้สเตปมอเตอร์สามารถสตาร์ทและหยุดโดยไม่ทำให้เกิดการสูญเสียสเตป สำหรับความถี่ต่างๆ ในขบวนการพัลส์สัญญาณจำนวนของพัลส์ในลำดับการกระตุ้นที่ใช้ในการทดสอบเป็น 100 Hz หรือมากกว่านี้ เหตุผลที่ใช้คำว่าย่านแทนคำว่าสูงสุดเพราะว่ามอเตอร์ไม่สามารถสตาร์ทหรือรักษาการหมุนปกติที่ภาระแรงเสียดทานน้อยๆ

2. คุณลักษณะของแรงบิดพลูเอาท์ทอร์ก (Pull-Out Torque) หรืออาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าคุณลักษณะของการหมุนของมอเตอร์ เมื่อทดสอบมอเตอร์โดยระบบโหมคในการกระตุ้น และเพิ่มความถี่อินพุทพัลส์ขึ้นเรื่อยๆ ในที่สุดสเตปมอเตอร์จะหมุนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งขนาดของแรงเสียดทานแรงบิด และขนาดความถี่ที่สูงสุดที่ทำให้มอเตอร์หมุนได้อย่างต่อเนื่องเรียกว่า พลูเอาท์ทอร์ก

3. ความถี่สตาร์ทสูงสุด (Maximum Starting Frequency) หมายถึง ค่าความถี่สูงสุดที่ ให้สเตปมอเตอร์เริ่มและหยุดหมุน โดยไม่ทำให้เกิดการสูญเสียสเตป

4. อัตราพลูเอาท์สูงสุด (Maximum Pull-Out Rate) หมายถึง ค่าความถี่สูงสุดที่ทำให้อัตราความเร็วของสเตปมอเตอร์คงที่ หรือค่าความถี่สูงสุดที่ยังทำให้เกิดการหมุนอย่างต่อเนื่องของสเตปมอเตอร์

5. แรงบิดสูงสุดที่เริ่มสตาร์ท (Maximum Starting Torque) หรือบางครั้งเรียกว่า ค่าแรงบิดพลูอินสูงสุด (Maximum Pull-In Torque) คือ แรงบิดเสียดทานสูงสุดที่ทำให้สเตปมอเตอร์สามารถสตาร์ทพร้อมกันกับขบวนการพัลส์ที่ความถี่ต่ำกว่า 10 Hz



รูปที่ 2.21 กราฟคุณลักษณะทางพลศาสตร์

2.7 ทฤษฎีพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของสเตปมอเตอร์

คุณลักษณะทางไดนามิกส์ มีความสำคัญเช่นเดียวกับคุณลักษณะทางสแตติกทฤษฎีต่างๆ ทางไดนามิกส์ ได้มีการนำเสนออยู่มากมายท่ามกลางการนำเสนอเหล่านี้ ทฤษฎีของ “ลอเรนส์” และ “ฮิวจ์” มีความน่าสนใจและครอบคลุมถึงส่วนที่สำคัญของสเตปมอเตอร์รุ่นใหม่ๆ ดังจะได้อธิบายในรายละเอียดต่อไป

2.7.1 สมการพื้นฐานในการเคลื่อนที่

ในรูปที่ 2.22 ใช้วิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกิดการออสซิลเลท และการหน่วงเวลาทางไฟฟ้าของสเตปมอเตอร์ ในรูป ก) เป็นมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร(permanent magnet) และรูป ข) เป็นชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้(variable reluctance) แบบขั้นเดียว โดยเฟสของขดลวดทั้งสองกำหนดให้เป็นเฟส A และเฟส B ซึ่งสามารถแยกการวิเคราะห์เป็นหัวข้อได้ดังนี้



รูปที่ 2.22 โครงสร้างของสเตเตอร์และ โรเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่เส้นแรงแม่เหล็ก

2.7.1.1 สเตปมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร(permanent magnet) และชนิดไฮบริดจ์ (hybrid) ค่าเส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยง(flux linkage) ที่เกิดขึ้นจากแม่เหล็กถาวรมีค่าเท่ากับ $n\Phi_m$ แรงบิดที่เกิดจากกระแสที่ไหลในขดลวด A คือ i_a และแรงบิดที่เกิดจากกระแสที่ไหลในขดลวด B คือ i_b จะได้ค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นเมื่อมีการจ่ายกระแสมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau_A = -pn\Phi_m i_A \sin p\theta \quad (2.9)$$

$$\tau_B = -pn\Phi_m i_B \sin p(\theta - \lambda) \quad (2.10)$$

เมื่อ p เป็นจำนวนคู่ขั้วแม่เหล็กแต่สามารถแทนได้ด้วย N_p (จำนวนซี่ฟันของโรเตอร์) ในกรณีที่เป็นชนิดไฮบริดจ์สเตปมอเตอร์ ที่แสดงในรูปที่ 2.22 จะพบว่าที่จุดกึ่งกลางของขั้ว A จะเป็นจุดเริ่มต้นของมุม θ ของฟลักซ์รั้งจ (flux linkage) และ $n\Phi$ เป็นการประมาณค่ามุมของฟลักซ์รั้งจ ลักษณะการกระจายแบบไซน์

$$n\Phi = n\Phi_m \cos p\theta \quad (2.11)$$

ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวดเฟส A (induc e.m.f.) มีค่าเป็น

$$e_{eA} = -n \frac{d\phi}{dt} = -n \frac{d\Phi d\theta}{dt d\theta} = (np\Phi_m \sin p\theta)\theta \quad (2.12)$$

เมื่อเทียบสมการที่ (2.9) และ สมการที่ (2.12) จะได้ว่า

$$\tau_A = -e_{eA} \frac{i_A}{\theta}$$

เพราะฉะนั้นสมการ การเคลื่อนที่ของโรเตอร์มีค่าเป็น

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + pn\Phi_m i_A \sin p\theta + pn\Phi_m i_B \sin p(\theta - \lambda) = 0 \quad (2.13)$$

เมื่อ D เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการหน่วงจากอากาศ (damping) ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากแรงเสียดทานและสถานะของแม่เหล็กไฟฟ้าอันดับที่ 2 เป็นผลที่ทำให้เกิดฮิสเตอร์รีซิส (hysteresis) และกระแสไหลวน ดังนั้นสมการแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดของสเตเตอร์จะได้เป็น

$$V - ri_A - L \frac{di_A}{dt} - M \frac{di_B}{dt} + \frac{d(n\Phi_m \cos p\theta)}{dt} = 0 \quad (2.14)$$

$$V - ri_B - L \frac{di_B}{dt} - M \frac{di_A}{dt} + \frac{d(n\Phi_m \cos p(\theta - \lambda))}{dt} = 0 \quad (2.15)$$

เมื่อ V : ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วกระแส

L : ค่าความเหนี่ยวนำของแต่ละเฟส

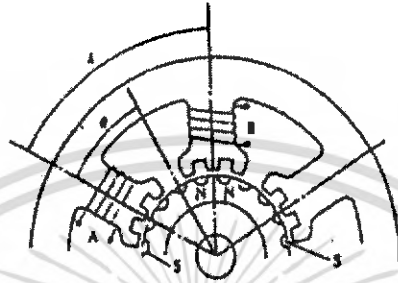
M : ค่าความเหนี่ยวนำร่วม

r : ค่าความต้านทานของวงจรรสเตเตอร์

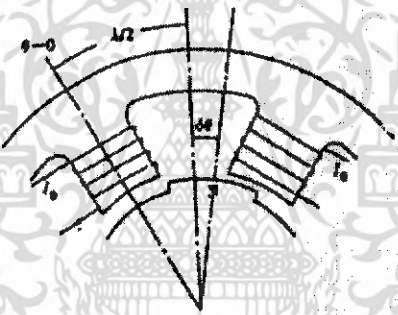
ในสมการนี้สมมติให้ค่า L และค่า m เป็นอิสระกับค่า θ ซึ่งเป็นตัวอธิบายถึงความแตกต่างทางไดนามิกส์ ระหว่างการกระตุ้นเฟสแบบเฟสเดียวและกระตุ้นเฟสแบบสองเฟส ซึ่งสามารถจำแนกปัญหาของการกระตุ้นทั้งสองแบบ ประการแรก เรากำหนดให้ $\lambda = 0$ ในช่วงผลลัพธ์สุดท้ายคือการเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมายนั่นเอง

จากสมการที่ (2.13) ถึง (2.15) เป็นการดิฟเฟอเรนเชียลแบบลิเนียร์ เพื่อไม่ให้เกิดความยุ่งยากซับซ้อนในการวิเคราะห์ ถ้าขดลวดของสองเฟสและค่ากระแส i_0 เป็นค่าคงที่ ในทิศทางไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางซ้ายได้ ในตำแหน่งสถานะสมดุลให้เป็น $\theta = \lambda/2$ ในรูปที่ 2.24 ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นเป็น $\delta\theta$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา แต่ในการวิเคราะห์จะเป็นสัญญาณเพียงขนาดเล็กเท่านั้น เมื่อโรเตอร์หมุนหรือแกว่งกระแสในขดลวดทั้งสองจะเกิดการหักเหจากค่าเดิมไปเป็น $\delta i_A(t)$ และ ให้สมการที่ (2.13) และสมการที่ (2.14) เป็นสมการเส้นตรงเพราะฉะนั้นสามารถพิจารณาได้ดังนี้



รูปที่ 2.23 สเตปมอเตอร์แบบไฮบริดจ์; $p = N_r$



รูปที่ 2.24 ลักษณะการควบคุมตำแหน่ง

จากรูปที่ 2.23 และ 2.24 จะได้ว่า

$$\theta = \frac{\lambda}{2} + \delta\theta \quad (2.16)$$

$$i_A = I_0 + \delta i_A \quad (2.17)$$

$$i_B = I_0 + \delta i_B \quad (2.18)$$

ดังนั้นเราจะได้อ่า

$$\sin p\theta = \sin\left(\frac{p\lambda}{2} + p\delta\theta\right) = \sin\frac{p\lambda}{2} \cos p\delta\theta + \cos\frac{p\lambda}{2} \sin p\delta\theta \quad (2.19)$$

เมื่อ $p\delta\theta$ เป็นมุมที่มีขนาดเล็กมาก

$$\cos p\delta\theta \approx 1 \quad (2.20)$$

$$\sin p\delta\theta \approx p\delta\theta \quad (2.21)$$

ดังนั้นจะลดรูปสมการที่ (2.19) ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sin p\theta = \sin \frac{p\lambda}{2} + p \cos \frac{p\lambda}{2} (\delta\theta) \quad (2.22)$$

ในทำนองเดียวกันจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \sin p(\theta - \lambda) &= \sin p\left(\frac{p\lambda}{2} + \delta\theta - \lambda\right) = -\sin p(\delta\theta - \lambda) \\ &= -\sin \frac{p\lambda}{2} + p\left(\cos \frac{p\lambda}{2}\right)(\delta\theta) \end{aligned} \quad (2.23)$$

โดยเราจะแทนสมการ (2.16), (2.17), (2.18), (2.22) และ (2.23) ลงใน (2.13) เราจะได้สมการใหม่

$$\begin{aligned} J \frac{d^2(\delta\theta)}{dt^2} + D \frac{d(\delta\theta)}{dt} + pn\Phi_m(I_0 + \delta i_A) \left\{ \sin \frac{p\lambda}{2} + p \left(\cos \frac{p\lambda}{2} \right) (\delta\theta) \right\} \\ - pn\Phi_m(I_0 - \delta i_B) \left\{ \sin \frac{p\lambda}{2} - p \left(\cos \frac{p\lambda}{2} \right) (\delta\theta) \right\} = 0 \end{aligned} \quad (2.24)$$

ถ้าเราไม่สนใจสัญญาณรบกวน $(\delta i_A, \delta\theta)$ เราก็จะได้สมการดิฟเฟอเรนเชียลแบบลิเนียร์

$$J \frac{d^2(\delta\theta)}{dt^2} + D \frac{d(\delta\theta)}{dt} + p^2\Phi_m n I_0 \left(\cos \frac{p\lambda}{2} \right) (\delta\theta) + p\Phi_m n \left(\sin \frac{p\lambda}{2} \right) (\delta i_A + \delta i_B) = 0 \quad (2.25)$$

ซึ่งผลที่ตามมาจะคล้ายกับ วิธีพิจารณาในสมการ (2.24) และ (2.25) ให้เป็นสมการเส้นตรงโดย

$$r(\delta i_A) + L \frac{d(\delta i_A)}{dt} + M \frac{d(\delta i_B)}{dt} - p\Phi_m n \sin I_0 \left(\frac{p\lambda}{2} \right) \frac{d(\delta\theta)}{dt} = 0 \quad (2.26)$$

$$r(\delta i_B) + L \frac{d(\delta i_B)}{dt} + M \frac{d(\delta i_A)}{dt} + p\Phi_m n \sin I_0 \left(\frac{p\lambda}{2} \right) \frac{d(\delta\theta)}{dt} = 0 \quad (2.27)$$

ถ้าเราพิจารณาต่อไป เราจะพบว่า ฟังก์ชันที่แสดงตำแหน่งของโรเตอร์ $\delta\theta(t)$ หลังจากทีโรเตอร์เคลื่อนจากตำแหน่งสภาวะสมดุลเริ่มต้นที่มุม θ_i ยิ่งไปกว่านี้ปัญหาที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งก็คือ กระแส i_A และ i_B จะเป็นอย่างไร ซึ่งในการคำนวณหาค่านั้น เรามุ่งที่จะแก้ปัญหาจากสมการที่สภาวะเริ่มต้น $\delta\theta = \theta_i$ และ $d(\delta\theta)/dt = 0$ ที่ $t = 0$ เราจะแก้สมการโดยวิธีการแปลงลาปลาซ โดยให้ $d/dt = S$ และ $d^2/dt^2 = S^2$ ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$\delta\theta(t) \rightarrow \Theta(s)$$

$$\delta i_A(t) \rightarrow I_A(s)$$

$$\delta i_B(t) \rightarrow I_B(s)$$

และแก้สมการได้เป็น

$$I_A = -I_B = \frac{p\Phi_m n \sin\left(\frac{p\lambda}{2}\right)(s\Theta - \theta_i)}{(r + L_p s)} \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Theta = \frac{\left[S^2 + \left(\frac{r}{L_p} + \frac{D}{J} \right) S + \left(\frac{r}{L_p} \frac{D}{J} + K_p \omega_{np}^2 \right) \right]}{S^3 + \left(\frac{r}{L_p} + \frac{D}{J} \right) S^2 + \left[\frac{r}{L_p} \frac{D}{J} + K_p \omega_{np}^2 (1 + K_p) \right] S + \left(\frac{r}{L_p} \right) \omega_{np}^2} \quad (2.29)$$

เมื่อ

$$L_p = L - M \quad (2.30)$$

$$K_p = \frac{n\Phi_m \sin^2\left(\frac{p\lambda}{2}\right)}{L_p I_0 \cos\left(\frac{p\lambda}{2}\right)} \quad (2.31)$$

$$\omega_{np}^2 = \frac{2p^2\Phi_m n I_0 \cos\left(\frac{p\lambda}{2}\right)}{J} \quad (2.32)$$

สมการที่ (2.29) จะเป็นผลมาจากพฤติกรรม $\theta(t)$ ซึ่งเป็นสมการที่สำคัญมาก และควรสังเกตลักษณะในเทอมส่วนของสมการกำลังสามกับเทอมในส่วนของ S มากที่สุด ซึ่งมีความหมายทางฟิสิกส์ สมการที่ (2.28) จะแสดงถึงกระแสชั่วขณะในเฟส A และเฟส B ซึ่งมีค่าเท่ากันแต่มีทิศทางตรงกันข้ามกัน

2.7.1.2 สเต็ปมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลักแตนซ์ (VR สเต็ปมอเตอร์) ในการคำนวณใช้สเต็ปมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลักแตนซ์ขั้นเดียว แต่สามารถที่จะนำไปประยุกต์กับสเต็ปมอเตอร์แบบหลายขั้นได้ โดยการเซ็ทค่าความเหนี่ยวนำร่วมเท่ากับศูนย์ ค่าความเหนี่ยวนำเฉพาะตัวและค่าความเหนี่ยวนำร่วมตามรูปที่ 2.22(ข) ซึ่งมีรูปแบบแสดงตามสมการดังนี้

$$L_A = L_0 + L \cos 2p\theta \quad (2.33)$$

$$L_B = L_0 + L \cos 2p(\theta - \lambda) \quad (2.34)$$

$$L_{AB} = M_0 + M \cos 2p\left(\theta - \frac{\lambda}{2}\right) \quad (2.35)$$

เครื่องหมายลบสำหรับ M_0 ตามสมการที่ (2.35) แสดงให้เห็นว่ากระแสในทิศทางบวกจะสร้างฟลักซ์ลิงก์เกจที่เป็นลบให้แก่ขดลวดชุดอื่น แรงบิดที่ถูกสร้างโดยกระแส i_A และ i_B แสดงโดยสมการ

$$\tau = \frac{1}{2} i_A^2 \frac{dL_A}{d\theta} + \frac{1}{2} i_B^2 \frac{dL_B}{d\theta} + i_A i_B \frac{dM_{AB}}{d\theta} \quad (2.36)$$

$$= i_A^2 p L \sin 2p\theta + i_B^2 p L \sin 2p(\theta - \lambda) + 2i_A i_B p M \sin 2p\left(\theta - \frac{\lambda}{2}\right) \quad (2.37)$$

สมการในการเคลื่อนที่คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + i_A^2 pL \sin 2p\theta + i_B^2 pL \sin 2p(\theta - \lambda) + 2i_A i_B pM \sin 2p\left(\theta - \frac{\lambda}{2}\right) = 0 \quad (2.38)$$

สมการศักดาไฟฟ้าสำหรับขดลวดสองชุด

$$V - ri_A - \frac{d(L_A i_A)}{dt} - \frac{d(M_{AB} i_B)}{dt} = 0 \quad (2.39)$$

$$V - ri_B - \frac{d(L_B i_B)}{dt} - \frac{d(M_{AB} i_A)}{dt} = 0 \quad (2.40)$$

สมการที่ถูกทำให้เป็นสมการเส้นตรงได้

$$J \frac{d^2(\delta\theta)}{dt^2} + D \frac{d(\delta\theta)}{dt} + 4p^2 I_0^2 (M + L \cos p\lambda) (\delta\theta) + 2pL_0 \sin p\lambda (\delta i_A - \delta i_B) = 0 \quad (2.41)$$

$$r(\delta i_A) + (L_0 + L \cos p\lambda) \frac{d(\delta i_A)}{dt} + (M - M_0) \frac{d(\delta i_B)}{dt} - 2pI_0 L \sin p\lambda \frac{d(\delta\theta)}{dt} = 0 \quad (2.42)$$

$$r(\delta i_B) + (L_0 + L \cos p\lambda) \frac{d(\delta i_B)}{dt} + (M - M_0) \frac{d(\delta i_A)}{dt} + 2pI_0 L \sin p\lambda \frac{d(\delta\theta)}{dt} = 0 \quad (2.43)$$

สมการที่ (2.41) และ (2.42) มีตัวแปร $\delta\theta$, δi_A และ δi_B ที่เหมือนกันกับสมการที่ (2.25) ถึง (2.27) สำหรับ PM สเต็ปมอเตอร์ และวิธีการแก้ปัญหของสมการเหมือนกับสภาวะเริ่มต้นคือ

$$I_A = -I_B = \frac{2pL_0 L \sin(p\lambda)(s\Theta - \theta_i)}{(r + L_V S)} \quad (2.44)$$

$$\Theta = \frac{\left[S^2 + \left(\frac{r}{L_p} + \frac{D}{J} \right) S + \left(\frac{r}{L_V} \frac{D}{J} + K_p \omega_{nv}^2 \right) \right] \theta_i}{S^3 + \left(\frac{r}{L_V} + \frac{D}{J} \right) S^2 + \left[\frac{r}{L_V} \frac{D}{J} + K_p \omega_{nv}^2 (1 + K_V) \right] S + \left(\frac{r}{L_V} \right) \omega_{nv}^2} \quad (2.45)$$

เมื่อ

$$L_V = L_0 + L \cos p\lambda - M + M_0 \quad (2.46)$$

$$K_V = \frac{2L^2 \sin^2 p\lambda}{L_V (M + L \cos 2p(\theta - \lambda))} \quad (2.47)$$

$$\omega_{nv}^2 = \frac{4p^2 I_0^2 (M + L \cos p\lambda)}{J} \quad (2.48)$$

2.7.2 ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของสเต็ปมอเตอร์

จากสมการที่ (2.29) และ (2.45) จะเป็นสมการที่บอกถึงขอบเขตของตำแหน่งชั่วขณะของ $\delta\theta$ กับสภาวะเริ่มต้น $\delta\theta = \theta_i$ ก่อนที่จะมีคุณลักษณะของการแกว่งแบบหน่วงได้ตอบกลับมา ดังนั้นเราจึงต้องกำหนดเป็นทรานเฟอร์ฟังก์ชันของสเต็ปมอเตอร์ สเต็ปมอเตอร์ที่ใช้โดยทั่วไป จะถูกใช้เป็นตำแหน่งที่ $\theta = \lambda/2$ เมื่อถูกกระตุ้นเฟสทั้งสองเท่าๆ กัน จะเป็นตัวให้ถูกแสดงค่าเป็น $\theta = \lambda/2$ และแปลงค่าโดยวิธีลาปลาซทรานฟอร์ม ค่าที่ได้จะถูกแสดงเป็น Θ_0 และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ทำลาปลาซทรานฟอร์มค่าตำแหน่งที่แท้จริง $\delta\theta(t)$ ให้เป็น Θ_0 ดังนั้นก็จะได้ทรานเฟอร์ฟังก์ชันเป็น

$$G(S) = \frac{\Theta_0}{\Theta_i} \quad (2.49)$$

2.7.2.1 การทำงานแบบเฟสเดียว ในสภาวะก่อนหน้าเมื่อ $\lambda = 0$ ขดลวดทำงานอยู่หนึ่งเฟสการแก๊สมการหนึ่งเฟสสามารถที่จะใส่ค่า $\lambda = 0$ ลงในสมการสองเฟสได้ ในทอมสุดท้ายของแต่ละสมการตั้งแต่สมการที่ (2.25) ถึง (2.27) และ (2.38) ถึง (2.40) เท่ากับศูนย์ และสมการทางกลรวมทั้งสมการทางไฟฟ้าไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับ สมการที่แปลงสำหรับ PM สเต็ปมอเตอร์ได้จากสมการที่ (2.25) ในส่วนของ VR สเต็ปมอเตอร์จะได้จากสมการที่ (2.40) เพื่อที่จะได้ค่าในกรณีของ PM สเต็ปมอเตอร์ ใส่ค่า $\lambda = 0$ ลงในสมการที่ (2.25) เราก็จะได้

$$J \frac{d^2(\delta\theta)}{dt^2} + D \frac{d(\delta\theta)}{dt} + 2p^2 \Phi_M n I_0 \delta\theta = 0 \quad (2.50)$$

$$\delta\theta = \theta_0 - \theta_i \quad (2.51)$$

ซึ่งสามารถเขียนสมการ (2.50) ใหม่ได้เป็น

$$J \frac{d^2\theta_0(t)}{dt^2} + D \frac{d\theta_0(t)}{dt} + 2p^2 \Phi_M n I_0 \theta_0(t) = 2p^2 \Phi_M n I_0 \delta\theta_i \quad (2.52)$$

ลาปลาซทรานฟอร์มของสมการเมื่อเงื่อนไขเริ่มต้น $\theta_0 = 0, d\theta/dt$ ที่ $t = 0$ คือ

$$(S^2 J + SD + 2p^2 \Phi_M n I_0) \Theta_0(S) = 2p^2 \Phi_M n I_0 \delta\theta_i \quad (2.53)$$

จากที่ผ่านมาจะได้ทรานเฟอร์ฟังก์ชันเป็น

$$G(S) = \frac{\Theta_0}{\Theta_i} = \frac{2p^2 \Phi_M n I_0}{JS^2 + DS + 2p^2 \Phi_M n I_0} = \frac{\omega_{np}^2}{S^2 + \frac{SD}{J} + \omega_{np}^2} \quad (2.54)$$

เพราะฉะนั้น ω_{np} หรือความถี่เชิงมุมธรรมชาติได้เป็น

$$\omega_{np} = \sqrt{\frac{2p^2 \Phi_M n I_0}{J}} \quad (2.55)$$

$$\text{หรือ } \omega_{np} = \sqrt{\frac{N_0 K_T n I_0}{J}} \quad (2.56)$$

จากสมการที่ (2.56) ซึ่งเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าเป็นของไฮบริดจ์สเต็ปมอเตอร์, K_T เป็นค่าของแรงบิดคงที่โดย

$$K_T = 2nN_r K_T I_0 \Phi_M \quad (2.57)$$

แรงบิดรวม τ ได้จากการรวมกันระหว่าง τ_A และ τ_B แต่ $\lambda = 0$ สำหรับการกระตุ้นแบบหนึ่งเฟส และ $p = N_r$ สำหรับไฮบริดจ์สเต็ปมอเตอร์ ผลสุดท้ายก็คือ

$$\tau = -2N_r n \Phi_M I_0 \sin(\delta\theta N_r) \quad (2.58)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าหากตำแหน่งของโรเตอร์ $\delta\theta$ เข้าใกล้ศูนย์ $\sin(N_r\delta\theta) = N_r\delta\theta$ ดังนั้นเราจะได้

$$\tau = -2N_r^2 n \Phi_M I_0 \delta\theta \quad (2.59)$$

ถ้าหากแรงบิดที่เกิดขึ้นในสเต็ปมอเตอร์เป็นแบบสมการเส้นตรงตาม $\delta\theta$ ดังนั้นจะแสดงได้ในรูป

$$\tau = -K_T N_r I_0 \delta\theta \quad (2.60)$$

เมื่อนำสมการ (2.58) และ (2.60) มาเปรียบเทียบกับจะพบว่าค่าคงที่ของแรงบิดตามสมการที่ (2.60) จะอยู่ในรูปของสมการ (2.57) เมื่อแทน p ด้วย N_r ในสมการที่ (2.55) และประมาณค่า n โดยใช้สมการ (2.57) เราจะได้จากสมการที่ (2.56) สำหรับ ω_{np} พบว่าจำนวนรอบจะเป็น $2n$ ให้แทนที่ด้วย n_1 ก็จะได้จำนวนรอบในหนึ่งเฟสในมอเตอร์ปกติ KT จะแสดงโดย

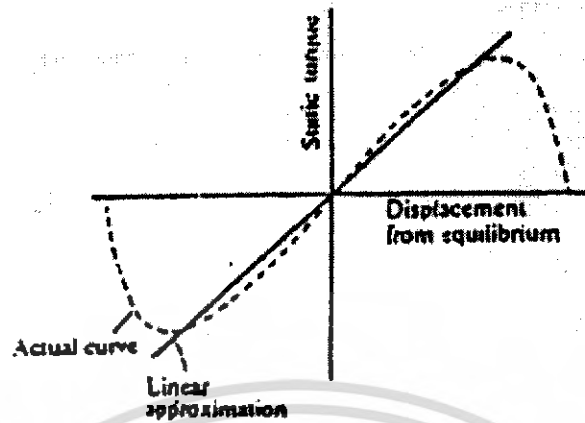
$$K_T = n_1 N_r \Phi_M \quad (2.61)$$

ค่าคงที่ของแรงบิดตามที่แสดงในทางทฤษฎี แต่ค่าที่ได้จากการประมาณจาก เส้นโค้งคุณลักษณะของ T/θ โดยวิธีเส้นตรงดังรูปที่ 2.25 ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในรูปของสมการที่ (2.54) สามารถเขียนมาจากสมการที่ (2.29) เมื่อ $\lambda = 0$ ในกรณีนี้ค่าความเหนี่ยวนำร่วม (mutual inductance, M) จะเหมือนกันกับค่าความเหนี่ยวนำด้วยตัวเอง (self-inductance, L) และ L_p ของสมการที่ (2.30) เริ่มเป็นศูนย์ หลังจากทำการคูณทั้งเศษและส่วนด้วย L_p / r เราใส่ $L_p = 0$ ก็จะได้

$$\Theta = \frac{\left(S + \frac{D}{J}\right)\theta_i}{S^2 + \left(\frac{D}{J}\right)S + \omega_{np}^2} \quad (2.62)$$

ถ้าหากเราเปลี่ยนเศษด้วยค่าคงที่ ซึ่งก็จะทำให้ค่าของฟังก์ชันเป็นหนึ่งหน่วย เมื่อ $S = 0$ มันก็จะเป็นทรานเฟอร์ฟังก์ชัน และทรานเฟอร์ฟังก์ชันของ VR สเต็ปมอเตอร์ก็มีวิธีพิจารณคล้ายๆ กัน

2.7.2.2 การขับโดยแหล่งจ่ายกระแส มีหลายทางเลือกที่จะใช้วิธีการกระตุ้นจากแรงดันหรือกระแสในสมการที่ (2.14) และ (2.15) หรือ (2.39) และ (2.40) ค่าแรงดันคงที่ที่ถูกนำมาใช้ซึ่งก็หมายความว่า แหล่งจ่ายแรงดันถูกนำมาใช้ ถ้าหากว่ามอเตอร์ถูกขับโดยแหล่งจ่ายกระแส สำหรับทรานเฟอร์ฟังก์ชันที่ขับด้วยกระแสจะนำมากล่าวไว้ด้วย



รูปที่ 2.25 กราฟคุณสมบัติลักษณะ $T - \theta$ ของมอเตอร์ด้วยการประมาณค่าโดยเส้นตรง

$$\tau = CN_r I_M \sin \rho \quad (2.63)$$

เมื่อ C = ค่าคงที่ที่ได้จากขนาดของมอเตอร์และจำนวนรอบ

I_M = ค่ากระแสสูงสุด

ค่ามุมของแรงบิด ρ มาจาก

$$\rho = \xi_1 - \xi_0 \quad (2.64)$$

เมื่อ ξ_1 = มุมทางไฟฟ้าของตำแหน่งโรเตอร์ที่ต้องการ

ξ_0 = มุมทางไฟฟ้าของตำแหน่งโรเตอร์ที่แท้จริง

จากสมการที่ (2.79) และ (2.80) เมื่อเราต้องการควบคุมตำแหน่งโดยใช้การขับเคลื่อนรูปไซน์ จะได้ว่า

$$\xi_1 = \omega t \quad (2.65)$$

ซึ่งก็หมายความว่าตำแหน่งที่ต้องการจะเปลี่ยนไปตาม ω ถ้าหาก ξ_1 ถูกกำหนดที่ ωt_1 ที่ $t = t_1$ ก็คาดว่าโรเตอร์จะอยู่ที่ตำแหน่ง $\rho = 0$, ω ในสมการที่ (2.65) เท่ากับความถี่เชิงมุมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยจากสมการที่ (2.76) และ (2.77) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันกับจำนวนของซี่ฟัน N_r และมุมทางไฟฟ้าจะสัมพันธ์กันกับมุมทางกล

$$\theta_i = \frac{\xi_i}{N_r} \quad (2.66)$$

$$\theta_0 = \frac{\xi_0}{N_r} \quad (2.67)$$

ดังนั้นแรงบิดจากสมการ (2.63) จะเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} \tau &= CN_r I_M \sin N_r (\theta_i - \theta_0) \\ &= K_T I_M N_r \sin N_r (\theta_i - \theta_0) \end{aligned} \quad (2.68)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อค่าคงที่ของแรงบิดเป็น

$$K_T = CN_r \quad (2.69)$$

ถ้า $\theta_i = \theta_0$ จะได้ว่า

$$\tau = K_T I_M N_r (\theta_i - \theta_0) \quad (2.70)$$

สมการของการเคลื่อนที่จะเป็น

$$J \frac{d^2 \theta_0}{dt^2} + D \frac{d\theta_0}{dt} = K_T I_M N_r (\theta_i + \theta_0) \quad (2.71)$$

และเมื่อลาปลาซทรานฟอร์มเมื่อให้สถานะเริ่มต้นเท่ากับศูนย์

$$(S^2 J + SD + K_T I_M N_r) \Theta(S) = K_T I_M N_r \Theta_i \quad (2.72)$$

จากสมการก็จะได้ทรานเฟอร์ฟังก์ชันเป็น

$$G(S) = \frac{\Theta_0}{\Theta_i} = \frac{\omega_{np}^2}{S^2 + \left(\frac{D}{J}\right)S + \omega_{np}^2} \quad (2.73)$$

ทรานเฟอร์ฟังก์ชันสเต็ปมอเตอร์ที่ขับโดยแหล่งจ่ายกระแสกระตุ้นแบบสองเฟสจะเป็นเช่นเดียวกันกับขับโดยแหล่งจ่ายแรงดันที่กระตุ้นแบบเฟสเดียว ทรานเฟอร์ฟังก์ชันสามารถที่จะได้มาจากสมการที่ (2.29) ซึ่งแหล่งจ่ายกระแสมีอิมพีแดนซ์ภายในมีค่าเป็นอนันต์ หลังจากที่คุณ r/L ทั้งเทอมเศษและเทอมส่วนแล้วเราตั้งค่า $r = \alpha$

$$\Theta = \frac{\left(S + \frac{D}{J}\right)\theta_i}{S^2 + \left(\frac{D}{J}\right)S + \omega_{np}^2} \quad (2.74)$$

เปลี่ยนแปลงเทอมเศษ โดยการเปลี่ยนเป็นค่าหนึ่งหน่วยเมื่อ $S = 0$ เราจะได้ทรานเฟอร์ฟังก์ชันสมการ (2.73) เป็นการหาทรานเฟอร์ฟังก์ชันของสเต็ปมอเตอร์แบบไฮบริดจ์และแบบแม่เหล็กถาวร สำหรับสเต็ปมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลักแตนซ์ได้หาในแนวเดียวกัน

2.7.2.3 การกระตุ้นแบบ 2 เฟส โดยการขับด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน ทรานเฟอร์ฟังก์ชันได้มาจากสมการที่ (2.29) ในทำนองเดียวกันสเต็ปมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลักแตนซ์ได้มีรูปแบบทรานเฟอร์ฟังก์ชันที่ใกล้เคียงกัน

$$\Theta = \frac{\left(\frac{r}{L_p}\right)\omega_{np}^2}{S^3 + \left(\frac{r}{L_v} + \frac{D}{J}\right)S^2 + \left[\frac{r}{L_v} \frac{D}{J} + \omega_{np}^2 (1 + K_p)\right]S + \left(\frac{r}{L_p}\right)\omega_{np}^2} \quad (2.75)$$

2.7.2.4 ผลตอบสนองสเต็ปเดียว (Single step response) เรามาพิจารณาถึงผลตอบสนองชั่วขณะของสเต็ปมอเตอร์ เราน่าที่จะเปรียบเทียบกรณีของทรานเฟอร์ฟังก์ชันอันดับที่สองกับกรณีทรานเฟอร์ฟังก์ชันอันดับที่สาม ซึ่งก็หมายถึงการเปรียบเทียบกันระหว่างการกระตุ้นเฟสแบบเฟสเดียวกับการกระตุ้นเฟสแบบสองเฟส

2.7.2.5 ทรานเฟอร์ฟังก์ชันอันดับที่สอง ทรานเฟอร์ฟังก์ชันสำหรับการขับเคลื่อนเฟสเดียวและการขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายกระแสซึ่งเขียนได้จาก

$$G(S) = \frac{\Theta_0}{\Theta_i} = \frac{\omega^2}{S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2} \quad (2.76)$$

เมื่อ ζ คือ อัตราส่วนแดมป์ (damping ratio) และมีค่ามาจาก

$$\zeta = \frac{D}{2J\omega_n} \quad (2.77)$$

จากสมการที่ (2.76) เป็นที่รู้กันทั่วไปว่าเป็นทฤษฎีของการควบคุมป้อนกลับ ผลตอบสนองเริ่มต้นหรือผลตอบสนองของ θ_0 ต่อสเต็ปฟังก์ชันของ θ_i ซึ่งความแตกต่างของเส้นผลตอบสนองจะขึ้นอยู่กับขนาดของ ζ ที่แสดงในรูปที่ 2.26 โดยทั่วไปผลตอบสนองจะแกว่งได้ก็ต่อเมื่อ $\zeta < 1$ โดยเหตุที่ว่าอัตราส่วนแดมป์ของสเต็ปมอเตอร์ธรรมดาต่างๆ ไปจะน้อยกว่า 0.5 ผลตอบสนองก็จะแกว่ง เวลาที่โรเตอร์จะเข้าสู่ตำแหน่งสภาวะสมดุลมักจะอ้างถึง settling time เสมอ เวลา settling time แสดงได้ดังรูปที่ 2.27

2.7.2.6 ทรานเฟอร์ฟังก์ชันอันดับที่สาม สมการของการหมุนในการขับเคลื่อนสองเฟสและสมการแรงดันจะไม่เป็นอิสระต่อกัน ในสมการที่ (2.28) หรือสมการที่ (2.44) แสดงถึงการเคลื่อนที่ที่ทำให้เกิด e.m.f. เท่ากันและกระแสที่กระตุ้นเฟสในทิศทางตรงกันข้าม กระแสที่เกิดขึ้นมาจะหมุนเวียนวางซ้อนทับกับกระแสเดิม I_0 กระแสรวมที่มาจากแหล่งจ่ายยังคงอยู่ที่ $2I_0$ และจะไม่ถูกดูดเข้าไปในแหล่งจ่ายถ้าโรเตอร์เคลื่อนที่แบบแกว่ง กระแสก็จะไหลวนเวียนและแกว่งด้วย และจะทำให้เกิดความร้อนในขดลวด ด้วยเหตุที่ว่าปรากฏการณ์ที่แสดงบอกถึงพลังงานจลน์ของโรเตอร์จะถูกดูดซึมให้เปลี่ยนเป็นความร้อนสูญเสียแต่โรเตอร์จะแกว่งลดลงอย่างรวดเร็ว การอธิบายถึงสนามแม่เหล็กของการแกว่งแบบหมุนวนในการกระตุ้นเฟสแบบสองเฟสถูกวิเคราะห์โดย “ลอเรนสัน” และ “ฮิวจ์” ในทอมส่วนของทรานเฟอร์ฟังก์ชันถ้าให้มีค่าเท่ากับศูนย์ เราเรียกว่า “สมการคุณลักษณะ” เมื่อให้ค่าแดมป์เป็นค่าคงที่ D , ความต้านทานของอากาศสมมติให้เท่ากับศูนย์ เพราะฉะนั้นสมการคุณลักษณะของการขับเคลื่อนสองเฟสคือ

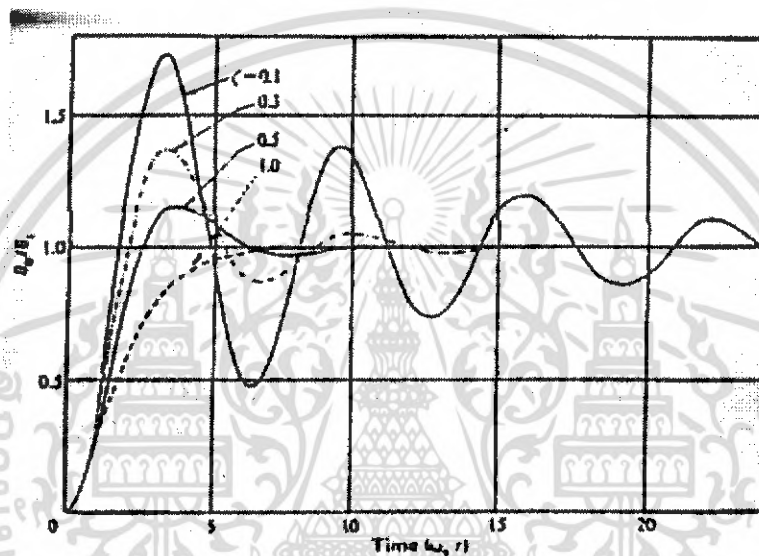
$$S^3 + \left(\frac{r}{L}\right)S^2 + \omega_n^2(1 + K_p)S + \left(\frac{r}{L}\right)\omega_n^2 = 0 \quad (2.78)$$

เมื่อ

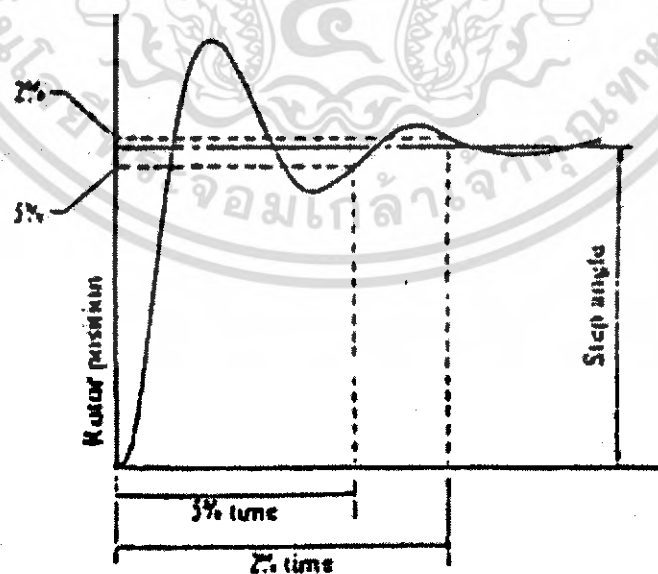
r/L = ส่วนของค่าคงตัวเวลาที่เป็ผลมาจากวงจร

K = ค่าคงที่ที่ไม่มีขนาด เป็นค่าแควมปิ่งซึ่งมีอยู่แล้วที่ถูกวัดได้จากมอเตอร์

ω_n = Undamped natural frequency ของการแกว่งที่ประมาณว่าสมดุล

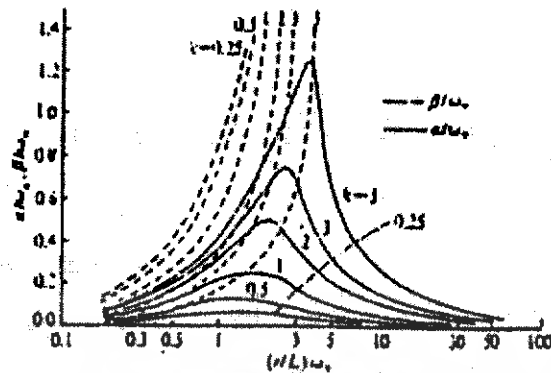


รูปที่ 2.26 ผลตอบสนองของระบบอันดับที่สอง



รูปที่ 2.27 เวลาที่เข้าสู่ค่าสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 ค่าเดมปีง α และ β และค่า K เท่ากับ (r/L)

ค่ารากของสมการจะมีค่าจริงและค่าคู่สังยุคกัน (conjugate) สำหรับค่า $0 < k < 8$ และมอเตอร์ส่วนมากจะมีค่า k น้อยกว่า 1 ดังนั้น สมการสามารถแสดงได้เป็น

$$(S + \alpha)(S + \beta)^2 + \omega^2 = 0 \quad (2.79)$$

เมื่อแปลงสมการที่ (2.79) ให้เป็นผลตอบสนองทางเวลาก็จะเป็น

$$\theta(t) = Ae^{-\alpha t} + Be^{-\beta t} \cos(\omega t - \gamma) \quad (2.80)$$

เมื่อ A, B และ λ เป็นค่าคงที่ที่หามาจากสภาวะเริ่มต้น เมื่อพิจารณาถึงสมการที่ (2.80) ความเป็นไปได้ที่เข้าสู่สภาวะสมดุลได้อย่างรวดเร็วได้ ถ้า α และ β ทั้งสองค่านี้มีขนาดใหญ่ ตัวแปร α, β, ω มีความสัมพันธ์กันในระบบตัวแปร r, L, k, ω_n โดยสมการ

$$a + 2\beta = rL, \quad a(\beta^2 + \omega^2) = (rL)\omega_n^2, \quad \beta^2 + \omega^2 + 2a\beta = (1+k)\omega_n^2 \quad (2.81)$$

จากสมการแสดงได้ดังรูปที่ 2.28 ค่า β/ω_n เป็นค่าสูงสุดที่ $(r/L)\omega_n$ สำหรับในแต่ละค่า k แสดงในรูปที่ 2.28 ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าสูงสุดแสดงได้ในสมการที่ 2.82 ถึง 2.84

$$\text{ค่าสูงสุดของ} \quad \beta/\omega_n = k/4 \quad (2.82)$$

$$\text{ค่าของ} \quad \left(\frac{r}{L}\right)\omega_n = \left(1 + \frac{k}{2}\right) \quad (2.83)$$

$$\text{ได้ค่าเหมาะสมกับค่าของ} \quad a/\omega_n = 1 \quad (2.84)$$

2.8 วงจรขับสเตปป์มอเตอร์ (Drive Circuit)

สัญญาณควบคุมสำหรับสเตปมอเตอร์จะเป็น Low power ตระกูล TTL แต่สเตปมอเตอร์ต้องการกระแสด้วยแรงดัน 5 V และกระแส 3 A จึงจำเป็นต้องใช้วงจรควบคุมการเชื่อมต่อซึ่งได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อการเชื่อมต่อ เพราะฉะนั้นวงจรขับจึงเป็นแบบพื้นฐานที่สามารถเชื่อมต่อกับวงจรจัดลำดับได้ ซึ่งจะแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ การขับแบบขั้วเดียว (Unipolar Drive) และการขับแบบสองขั้ว (Bipolar Drive)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1 วงจรขับแบบขั้วเดียว (Unipola Drive Circuit) วงจรขับนี้เป็นการขับที่ง่ายที่สุด ซึ่งสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 2.29 ซึ่งเป็นวงจรขับสำหรับสเตปมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลักแตนซ์ได้ที่ 3 เฟส สำหรับเฟสที่ถูกกระตุ้นจะถูกแยกเป็นอิสระกับเฟสอื่นๆ ซึ่งสัญญาณการกระตุ้นเรียกว่า สัญญาณควบคุมเฟส (Phase Control Signal) จากรูปขดลวดถูกกระตุ้นได้จากการสวิตช์ อนุกรม ของทรานซิสเตอร์ในลักษณะอิ่มตัว (Saturated) แหล่งจ่ายไฟดีซีซึ่งจะตกคร่อมขดลวดและ forcing resistance ซึ่งทำให้เกิดกระแสเต็มพิกัดที่ขดลวดต้องการเป็นไปตามสมการที่ 2.85 และสำหรับพันแบบไบโพลาร์ แต่ใช้วงจรขับแบบโมนโพลาร์แสดงในรูปที่ 2.30

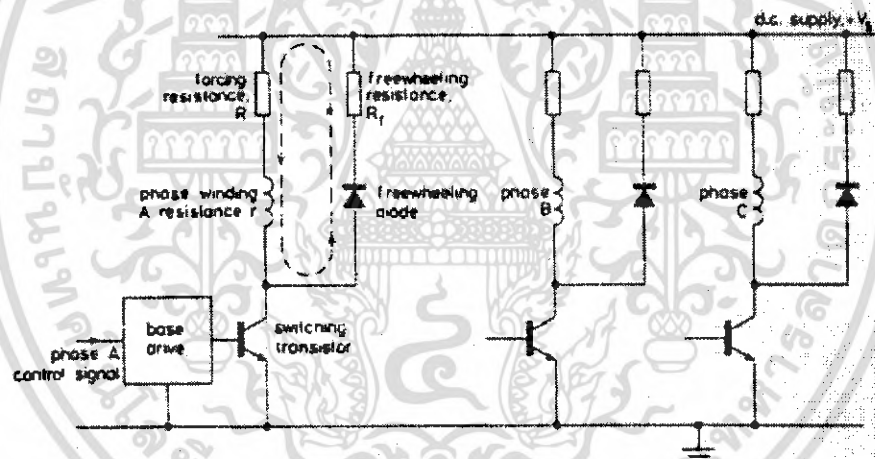
$$V_s = I(r + R) \quad (2.85)$$

V_s = แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงมอเตอร์

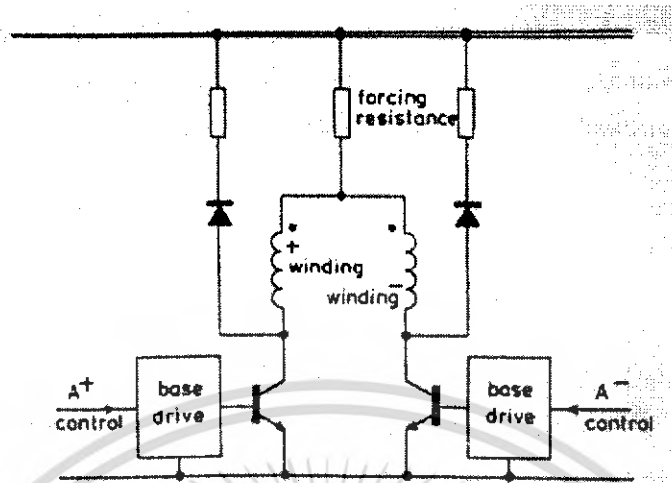
I = กระแสที่จ่ายให้กับขดลวดมอเตอร์

r = ความต้านทานของขดลวดในแต่ละเฟส

R = ความต้านทานของตัวต้านทานที่นำมาต่ออนุกรม

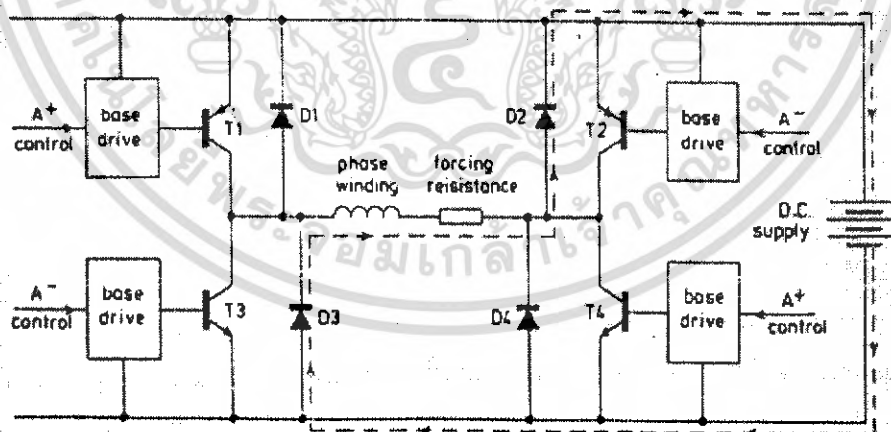


รูปที่ 2.29 วงจรขับแบบขั้วเดียว



รูปที่ 2.30 วงจรขับสำหรับสเตปปีงมอเตอร์ที่พันขดลวดแบบไบเฟลาร์และใช้การขับแบบโมนิฟลาร์

2.8.2 วงจรขับแบบสองขั้ว (Bipolar Drive Circuit) การขับในลักษณะของหนึ่งเฟสแต่ใช้ทรานซิสเตอร์ 4 ตัว เพื่อบังคับทิศทางการไหลของกระแสให้เข้าขดลวดของสเตปมอเตอร์ ซึ่งสามารถเลือกได้จากการให้ทรานซิสเตอร์ทำงานเป็นคู่ แสดงได้ในรูปที่ 2.31 จากรูปต้องป้อนพัลส์แบบบวกให้กับขาเบสของทรานซิสเตอร์ชนิด เอ็นพีเอ็น (NPN) ที่ต้องการให้ทำงานหรือนำกระแส และป้อนสัญญาณพัลส์แบบลบให้ทรานซิสเตอร์ชนิด พีเอ็นพี (PNP) ทั้งสองตัวต้องนำกระแสพร้อมกันตามทิศทางการไหลของกระแสที่ใช้เส้นประแสดงทิศทาง



รูปที่ 2.31 วงจรขับแบบสองขั้ว

2.8.3 วงจรขับแบบไมโครสเตป (Microstep Drive Circuit) ขนาดสเตปปกติของสเตปปีงมอเตอร์สามารถแบ่งให้เคลื่อนที่เป็นสเตปเล็กๆ ดังนั้นจึงอธิบายถึงวิธีการคำนวณ โดยประมาณจากแรงบิดของแต่ละเฟสซึ่งเปลี่ยนแปลงแบบไซน์ กับตำแหน่งโรเตอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_A = -kTi_A \sin p\theta \quad (2.86)$$

$$T_B = -kTi_B \sin p\theta \quad (2.87)$$

จากหลักการโดยทั่วไปของสเตปมอเตอร์ เมื่อมีการกระตุ้นให้ขดลวดนำกระแส ซึ่งอาจจะ เป็นบวกลหรือลบ จะทำให้การเคลื่อนที่เชิงมุมเปลี่ยนไป $\theta/2P$ สำหรับการเคลื่อนที่หนึ่งสเตปใน แต่ละครั้ง สำหรับการเคลื่อนที่เป็นไมโครสเตปสามารถกำหนดตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้จาก การจ่ายกระแสของขดลวดในเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ให้เป็นสัดส่วนกัน และให้เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง จนกว่าการเคลื่อนที่ได้ 1 สเตปปกติ และสามารถหากระแสทั้งสองเฟสได้ตามสมการที่ 2.90 และ 2.91

$$i_a = i \cos p\theta \quad (2.88)$$

$$i_b = i \cos(\theta - \pi/2) \quad (2.89)$$

จะได้ทอร์คที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็น

$$T = T_A + T_B \\ = -kT(\sin p\theta \cos \Phi + \sin(p\theta - \pi/2)\cos(\theta - \pi/2)) \quad (2.90)$$

$$= -kT(\sin p\theta - \Phi) \quad (2.91)$$

และที่ตำแหน่งสมดุลค่ามุมจะมีค่าเท่ากับ 0 นั่นคือ

$$p\theta = \Phi / p \quad (2.92)$$

ดังนั้นจุดสมดุลของโรเตอร์อยู่ที่ตำแหน่งใดๆ ในสเตปเล็กๆ ซึ่งอยู่ระหว่างสเตปปกติ $\theta = 0, \pi/2p, \pi/p, 3\pi/2p$ เป็นต้น ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นในขดลวดทั้งสองเฟสจะมีหลายระดับ ระหว่างสเตปปกติ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{Microstep Length} = \text{rotor length} = \text{rotor tooth pitch}/2nl \quad (2.93)$$

2.9 การควบคุมสเตปปั๊มมอเตอร์ในโหมดไมโครสเตป

2.9.1 การคำนวณหากระแสอ้างอิงในโหมดไมโครสเตปจากรูปของสเตปปั๊มมอเตอร์

(Calculation of microstep current reference form T – θ Characteristics)

การทำงานของสเตปปั๊มมอเตอร์ในลักษณะการเคลื่อนที่แบบไมโครสเตป ขึ้นอยู่กับการควบคุมการจ่ายกระแสให้กับขดลวดของมอเตอร์ ในลักษณะ 2 เฟสพร้อมๆ กัน แบบเป็นสัดส่วนกัน โดยได้จากการประมาณค่าคุณลักษณะของแรงบิด (Torque, T) ของสเตปปั๊มมอเตอร์รอบตำแหน่งดีเทนท์ จะมีความสัมพันธ์กับกระแส (I) และตำแหน่งเชิงมุม (θ) ดังแสดงในรูปที่ 2.32 ลักษณะของแรงบิด(torque, T) รอบจุดดีเทนท์ จะมีความสัมพันธ์กับกระแสและขนาดของมุม (displacement, θ) ดังแสดงในรูปที่ 2.33

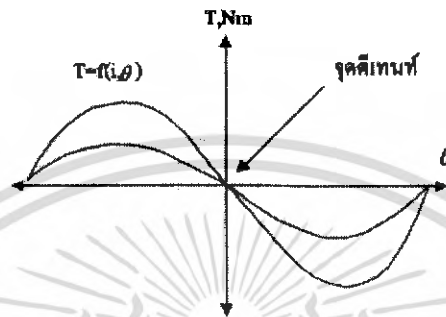
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เมื่อ } T = f(I, \theta) \quad (2.94)$$

ถ้าจัดสมการของ T ให้อยู่ในรูปของตัวแปรเพียงตัวเดียวหรือหนึ่งตัวจะได้

$$\text{เมื่อให้ } I \text{ เป็นค่าคงที่ จะได้สมการ } T = f_i(\theta) \quad (2.95)$$

$$\text{เมื่อให้ } \theta \text{ เป็นค่าคงที่ จะได้สมการ } T = f_\theta(I) \quad (2.96)$$



รูปที่ 2.32 ลักษณะของ motor torque-displacement ($T - \theta$) characteristics

ถ้าจุดตีเทนท์ที่ต้องการ $\theta = n(\theta_s / m)$ โดยที่ m คือ จำนวนที่จะแบ่งขนาดสเตปปกติ θ_s เป็นสเตปย่อยและ n คือ จำนวนจริง $1, 2, 3, \dots$ กระแสอ้างอิง $(i)_k$ สำหรับแต่ละ n จะคำนวณได้จากสมการที่ (2.95) และ (2.96) โดยแรงบิดที่จุดตีเทนท์ที่ต้องการมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยที่ K คือ จำนวนเฟสของมอเตอร์ภายใต้เงื่อนไขต่อไปนี้

1. คุณสมบัติของแรงบิดที่เกิดขึ้นของมอเตอร์ที่ใช้ อันเนื่องมาจากผลรวมของกระแสเมื่อทำงานในโหมดไมโครสเตปจะมีค่าคงเดิม
2. ผลรวมของ Motor dissipation จะต้องไม่เกินพิกัดของมอเตอร์
3. ขนาดของไมโครสเตปทุกสเตปจะต้องเท่ากัน

ในเงื่อนไขที่ 3 มีลักษณะเชิงเส้นทุกๆ ตำแหน่งของโรเตอร์และเงื่อนไขที่ 2 สามารถแทนได้ด้วยสมการในรูปสามเหลี่ยม (Triangle) และไซน์ (Sinusoids) จึงจะสามารถหาค่าได้ดังนี้

2.9.1.1 การคำนวณหากระแสอ้างอิงโดยการประมาณคุณลักษณะของกราฟ $T - \theta$ ในลักษณะเชิงเส้น (Linear Approximation to $T - \theta$ Characteristics) ในการประมาณกราฟคุณลักษณะของ $(T - \theta)$ ในลักษณะเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.34 ลักษณะเคิร์ฟสามารถหาค่า T ได้จาก

$$T_1 = -K_1 I_1 \theta \quad (2.97)$$

$$T_2 = -K_2 I_2 \theta + K_0 I_2 \quad (2.98)$$

เมื่อ I_1 คือกระแสของขดลวดเฟสที่ 1

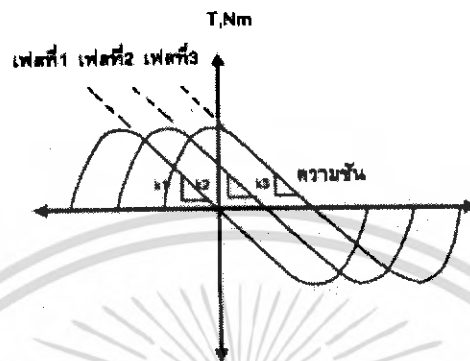
I_2 คือกระแสของขดลวดเฟสที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

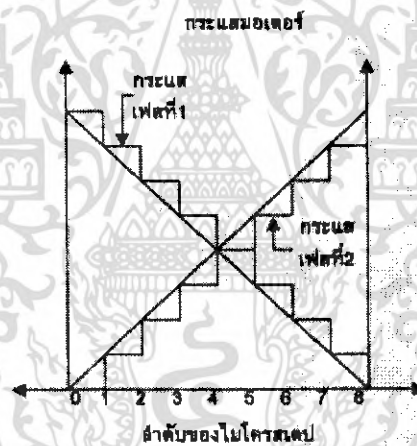
K_1 คือแรงบิดคงที่ของขดลวดเฟสที่ 1

K_0, K_2 คือแรงบิดคงที่ของขดลวดเฟสที่ 2

θ คือตำแหน่งไมโครสเตปที่ต้องการ



รูปที่ 2.33 การประมาณค่ากระแสจากเคิร์ฟ (T- θ) ด้วยสมการเชิงเส้น



รูปที่ 2.34 กระแสที่ได้จากการประมาณเคิร์ฟ (T- θ) ด้วยสมการเชิงเส้น

T_1, T_2 คือแรงบิดที่เกิดขึ้นจากกระแสของเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ซึ่งภายใต้เงื่อนไข ผลรวมของ

$$T_2 + T_1 = 0 \quad (2.99)$$

รวมสมการที่ (2.97), (2.98), (2.99) จะได้

$$\theta = \frac{K_0 I_2}{K_1 I_1 + K_2 I_2} \quad (2.100)$$

ถ้าการประมาณให้เคิร์ฟคุณลักษณะของแต่ละเฟสมีค่าเท่ากันแล้ว $K_1 = K_2$ และความชันของเคิร์ฟ T- θ ของมอเตอร์ที่ตำแหน่งใหม่จะเท่ากับเคิร์ฟ T- θ เดิม นั่นคือ

$$\frac{d(T_1 + T_2)}{d\theta} = -K_1 = -K_2 = -K \quad (2.101)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสมการที่ (5.101) จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อ

$$I_2 + I_1 = 1 \quad (2.102)$$

ดังนั้นจะได้

$$\theta = \frac{K_0 I_2}{K} \quad (2.103)$$

$$I_2 = 1 - \frac{\theta}{\theta_s} \quad (2.104)$$

แสดงให้เห็นว่าในกรณีกระแสในเฟสที่ 1 จะลดลงในลักษณะของสเตปที่เป็นช่วงๆ (Discret Step) ในขณะที่กระแสในขดลวดของเฟสที่ 2 จะเพิ่มขึ้นในขนาดสเตปที่เท่ากันแสดงดังรูปที่ 2.34

2.9.1.2 การคำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงโดยการประมาณกราฟคุณลักษณะของมอเตอร์ด้วยค่า Sine (Sine approximation to T- θ Characteristics) จากรูปที่ 2.33 สามารถที่จะประมาณเกิรฟ T- θ ได้ด้วยค่าซายน์ได้ดังนี้

$$T_1 = -T_0 I_1 \sin \theta \quad (2.105)$$

$$T_2 = T_0 I_2 \sin(\theta + \theta_s) \quad (2.106)$$

เมื่อ $T_1 + T_2 = 0$ ที่จุดตีเทนท์และ $\frac{I_2}{I_1} = \frac{\tan \theta}{\tan \theta \cos \theta_s + \sin \theta_s}$ (2.107)

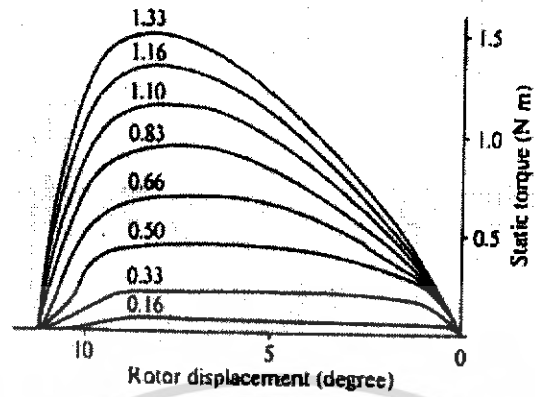
เพื่อที่จะคงคุณลักษณะของเกิรฟ T- θ เมื่อทำงานในโหมดไมโครสเตป จึงกำหนดให้แรงบิดที่ตำแหน่งใดๆ รวมกันเท่ากับ T_1 หรือ T_2 ดังนั้นจะได้

$$T_0 T_2 \sin(\theta + \theta_s) - T_0 T_1 \sin \theta = T_0 \sin(\theta_s) / m \quad (2.108)$$

เมื่อ $\theta' = \theta - \theta_s / m$; $m = 1, 2, 3, \dots$ เมื่อนำสมการที่ (2.107) และ (2.108) มารวมกันเพื่อหาค่า I_1 จะได้

$$I_1 = \frac{\sin \frac{\theta_s}{M}}{\frac{\tan \theta}{\tan \theta \cos \theta_s + \sin \theta_s} \sin(\theta' + \theta_s) - \sin \theta'} \quad (2.109)$$

จากสมการที่ (2.107) และ (2.109) สามารถที่จะหา I_1 และ I_2 ทุกๆ ตำแหน่งตีเทนท์ที่ต้องการได้ เมื่อได้ค่ากระแสอ้างอิงที่คำนวณได้เหล่านี้แล้ว จากนั้นจะถูกแปลงเป็นค่าทางเชิงตัวเลขและเก็บไว้ในหน่วยความจำซึ่งอยู่บนคอมพิวเตอร์และส่งค่าที่ได้ออกไปยังวงจรถับและควบคุมกระแสต่อไป และในรูปที่ 2.35 เป็นกราฟคุณลักษณะที่เกิดขึ้นจริงในหนึ่งเฟสของสเตปป์มอเตอร์



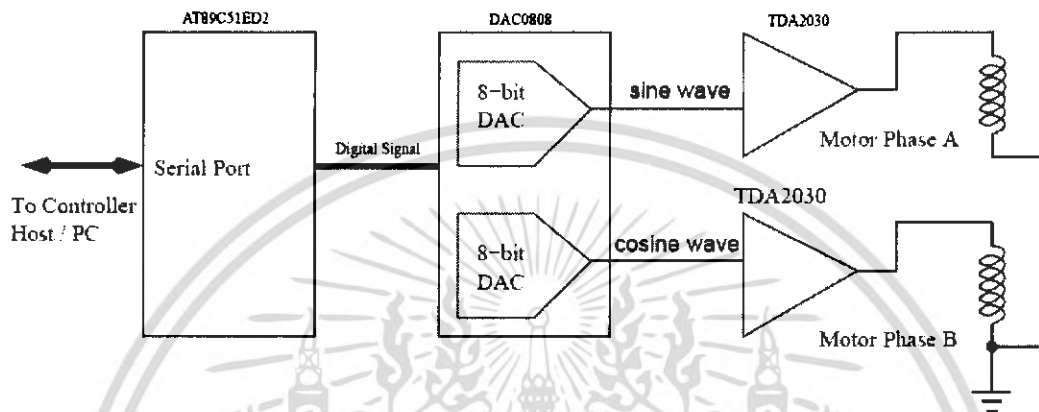
รูปที่ 2.35 กราฟคุณสมบัติขณะ $T-\theta$ ที่เกิดขึ้นจริงสำหรับหนึ่งเฟส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย



รูปที่ 3.1 รูปแผนผังหลักการทำงานของสเต็ปโป้มอเตอร์

ขั้นตอนการดำเนินงานเริ่มแรกเขียนโปรแกรมเพื่อสร้างคลื่น sine และ cosine ที่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของสเต็ปมอเตอร์ได้โดยผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C51ED2 ส่งค่าออกเป็นข้อมูลดิจิทัลทางพอร์ต 1, 2, 4 และ 5 เชื่อมต่อกับวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (DAC) เพื่อแปลงข้อมูลจากดิจิทัลเป็นอนาล็อก หลังจากนั้นส่งข้อมูลคลื่น sine และ cosine ที่เป็นอนาล็อกให้วงจรขับมอเตอร์ เพื่อใช้ขับให้สเต็ปโป้มอเตอร์ทำงาน รายละเอียดขั้นตอนดำเนินงานแบ่งออกเป็น 5 ส่วนหลักๆ ที่สำคัญ คือ

3.1 ประกอบบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C51ED2

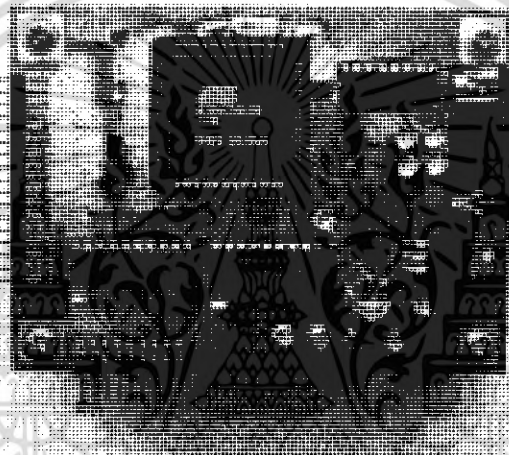
บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C51ED2 อยู่ในตระกูล 80C51 เป็นชิพเดี่ยวขนาด 8 บิต และมีหน่วยความจำ 64 kbyte ใช้ในการประมวลผล เพื่อนำค่าที่ได้ส่งต่อไปยังพอร์ตต่างๆ ซึ่งในชิพตัวนี้ ซึ่งมีพอร์ตทั้งหมด 6 พอร์ต แล้วส่งต่อไปยังวงจรต่างๆ เช่นวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (DAC) หรือการนำค่าไปแสดงผลทาง LCD เป็นต้น ซึ่งบอร์ดคอนโทรลเลอร์นี้

ขั้นตอนการทำงาน

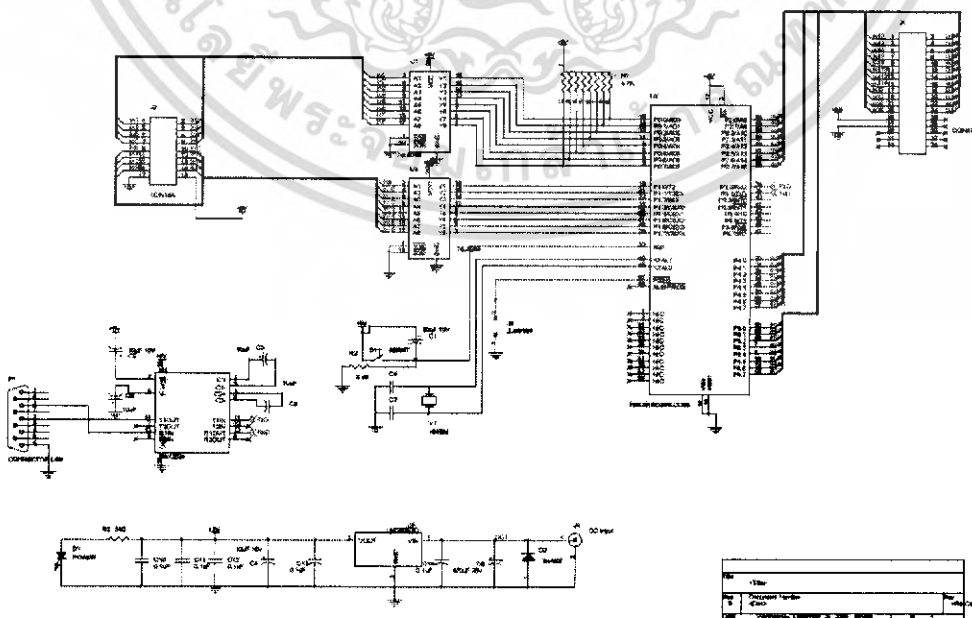
3.1.1 ลงอุปกรณ์ต่างๆ ลงบอร์ด

3.1.2 ทดลองใช้บอร์ด โดยเขียนโปรแกรมง่ายๆ เช่น ให้แสดงค่าตัวหนังสือผ่านทางซีเรียลพอร์ตหรือ ทำไฟกระพริบโดยผ่านทางพอร์ตต่างๆ

3.1.3 ทดลองอัปเดตโปรแกรมลงชิพ โดยการใส่ jumper ไว้ที่บอร์ด แล้วอัปเดตด้วยโปรแกรม Atmel Flip 2.4.2 จากนั้นให้บอร์ดแสดงผล ต้องนำ jumper ออก จึงจะแสดงได้



รูปที่ 3.2 รูปบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C51ED2



รูปที่ 3.3 Schematic ของวงจรบอร์ด AT89C51ED2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 สร้างวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (digital to analog converter: DAC)

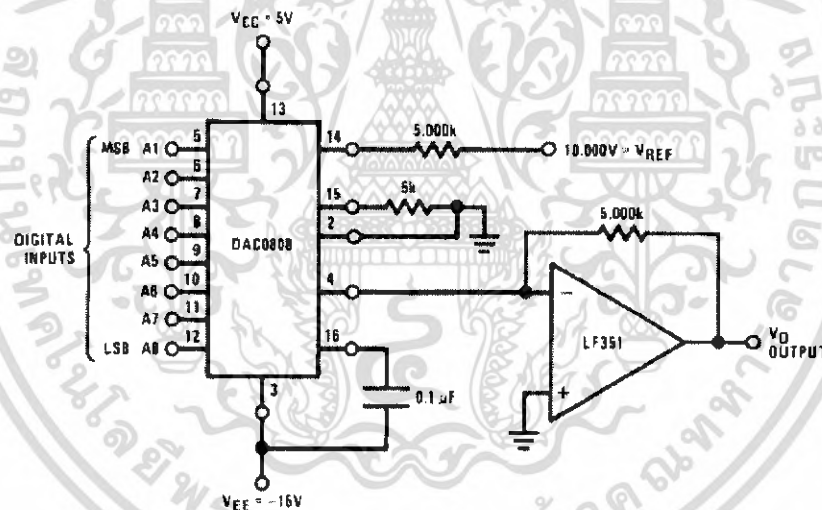
วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกนี้ จะใช้ชิพเบอร์ DAC0808 ซึ่งจะรับข้อมูลได้ 8 บิต แล้วแปลงให้ได้สัญญาณอนาล็อกตามที่กำหนดได้

ขั้นตอนการทำงาน

3.2.1 ลงอุปกรณ์ต่างๆ ลงบอร์ด ทำทั้งหมด 4 ชุด

3.2.2 ทดลองวงจร โดยการต่อคิพสวิตช์ เข้ากับบิตอินพุททั้ง 8 บิตของวงจรเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก เพื่อป้อนไฟ 5V ให้บิตต่างๆ ในรูปแบบของเลขฐานสองที่เป็นรหัสดิจิทัล และใช้โวลท์มิเตอร์วัดที่เอาต์พุทของวงจรให้ได้เอาต์พุทที่สัมพันธ์กับค่าอินพุทที่ป้อนเข้าไป โดยคิพสวิตช์

3.2.3 ต่อเอาต์พุท port 1, 2, 4 และ 5 ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C51ED2 เข้ากับอินพุทของวงจรเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก



รูปที่ 3.4 รูปวงจรของ DAC0808

3.3 ศึกษาการเขียนโปรแกรมที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์แบบไมโครสเต็ป

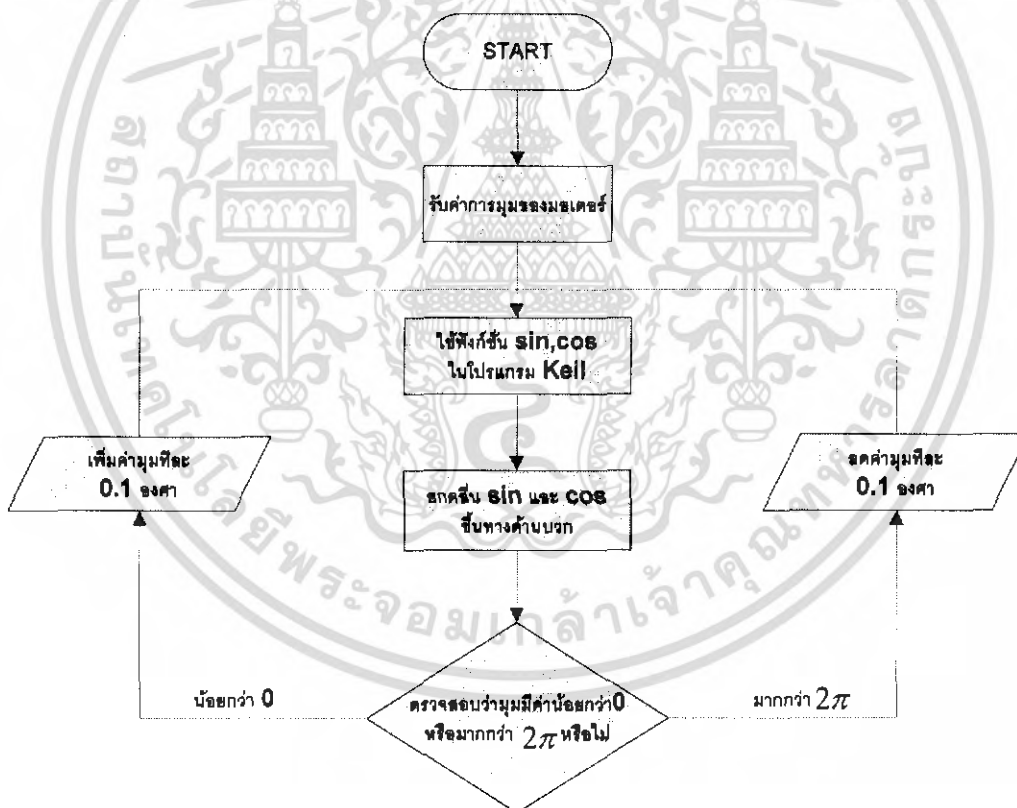
จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของสเต็ปปีงมอเตอร์แบบไมโครสเต็ป จะต้องถูกควบคุมกระแสในการขับเคลื่อนได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องเขียน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อที่จะควบคุมค่าต่างๆ ได้อย่างถูกต้อง

ขั้นตอนการทำงาน

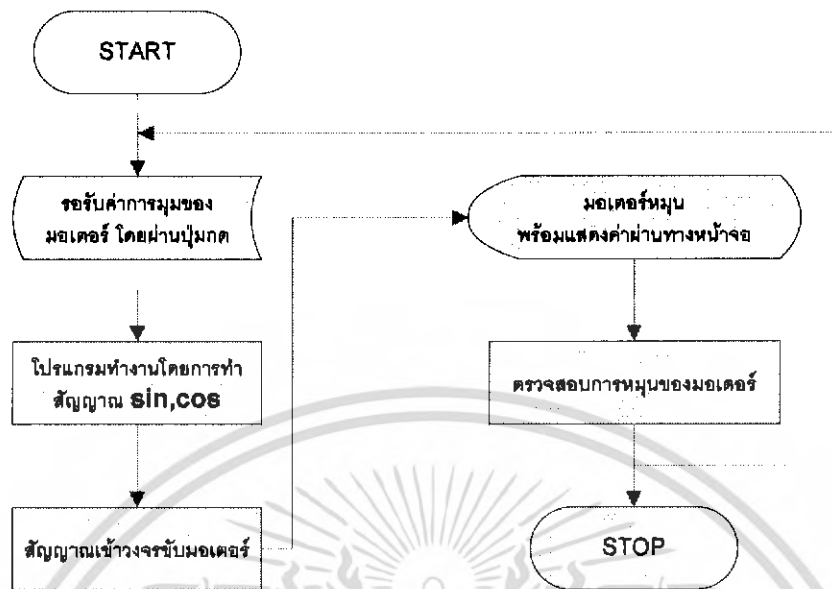
3.3.1 เขียนโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม Keil uVision 2 โดยใช้ภาษาซีในการเขียน ซึ่งจะต้องทำให้เกิดค่า sine และ cosine ในลักษณะมีมุมวนรูปตั้งแต่ 0 จนถึง 2π เรเดียน จะได้ข้อมูลคลื่น sine และ cosine ที่เป็นแบบดิจิทัลและส่งชุดข้อมูลคลื่น sine และ cosine ที่เป็นแบบดิจิทัลออกทางพอร์ต 1, 2, 4 และ 5 ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C51ED2 โดยแต่ละพอร์ตจะมีสัญญาณต่างกัน 90 องศา

3.3.2 อัปเดตโปรแกรมลงบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C51RD2 และทดลองโปรแกรมโดยการใช้ออสซิลอโคป วัดสัญญาณคลื่น sine และ cosine ที่เอาท์พุทของเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก ซึ่งรับค่าจากพอร์ต 1, 2, 4 และ 5 มาแปลงเป็นสัญญาณอนาลอกแล้ว

3.3.3 พัฒนาโปรแกรมให้สามารถควบคุมคาบของสัญญาณคลื่น sine และ cosine ได้โดยการป้อนค่าปริมาณของคาบตามที่ต้องการ



รูปที่ 3.5 แผนผังของโปรแกรมในการทำคลื่น sine และ cosine



รูปที่ 3.7 แผนผังการทำงานทั้งหมด

จากนั้นทำการทดลองเพื่อสังเกตการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ และยืนยันว่ามอเตอร์สามารถเคลื่อนที่เป็นไปตามที่เราต้องการจริง

ในการทดลองจะทดลองทั้งหมด 5 วิธีดังนี้

3.5.1 การสังเกตลูกคลื่นจากการเปลี่ยนแปลงการค่าความถี่และความละเอียดของมุมการหมุนของมอเตอร์

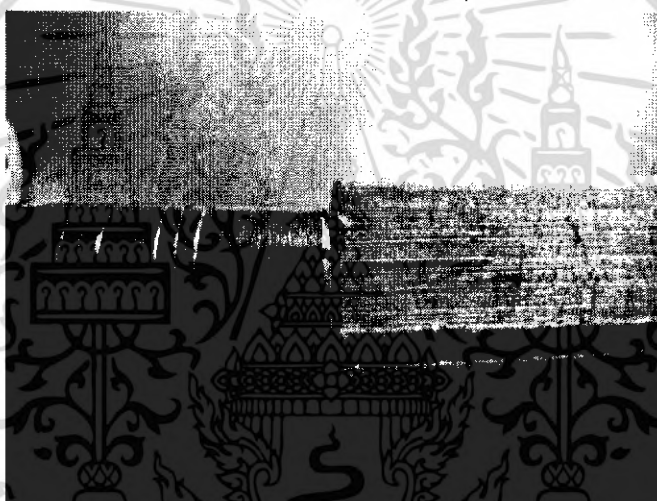
ในวิธีนี้เป็นการสังเกตสัญญาณที่ออกมาจากเอาต์พุทของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก โดยสัญญาณที่ออกมาจะเป็นคลื่นไซน์ จากนั้นทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่และความละเอียดของมุมการหมุนของมอเตอร์ แล้วสังเกตลูกคลื่นจากออสซิโลสโคป

3.5.2 การทดลองการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์

การทดลองนี้จะทดลองสังเกตจากการมองด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 20 เท่า โดยการทำรอยบากไว้ที่ส่วนของปลายแกนหมุนของมอเตอร์กับจุดที่นำมาเปรียบเทียบ แล้วเอารอยบากทั้งสองเลื่อนให้ตรงกัน จากนั้นทดลองหมุนมอเตอร์ให้ครบรอบ แล้วสังเกตจากกล้องจุลทรรศน์ว่ารอยค่อนั้นกลับมาตรงกันอีกหรือไม่



รูปที่ 3.8 แสดงชุดทดลองการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์

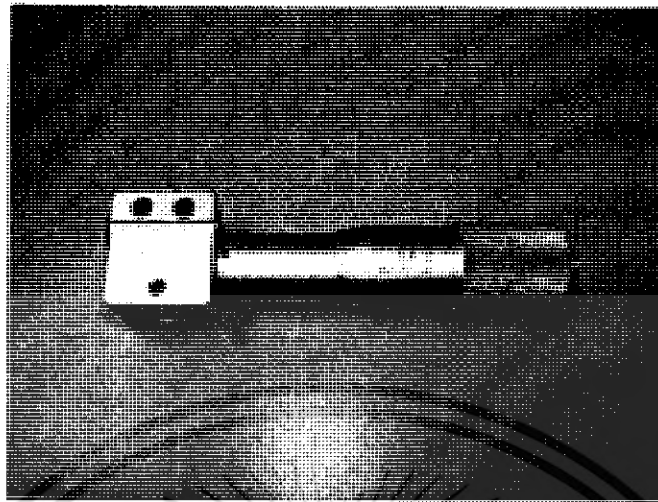


รูปที่ 3.9 แสดงรอยบากของมอเตอร์แต่ละจุดที่ใช้เปรียบเทียบ

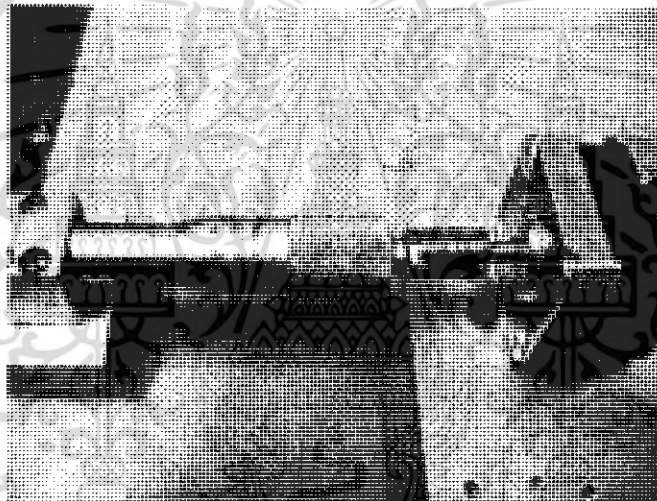
3.5.3 การทดลองโดยใช้ไมโครมิเตอร์

เพื่อให้การทดลองแม่นยำยิ่งขึ้น จึงใช้ไมโครมิเตอร์วัดการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ โดยไมโครมิเตอร์หนึ่งรอบจะได้ระยะ 0.5 มิลลิเมตร นำไมโครมิเตอร์ไปต่อกับมอเตอร์เพราะฉะนั้นในการหมุนของมอเตอร์หนึ่งรอบก็ควรจะได้ 0.5 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แสดงไมโครมิเตอร์

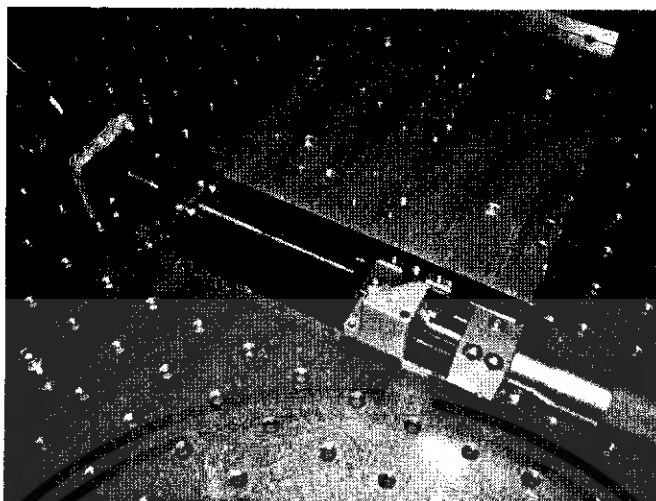


รูปที่ 3.11 แสดงการวัดไมโครมิเตอร์ที่วัดโดยคนไปไมโครมิเตอร์

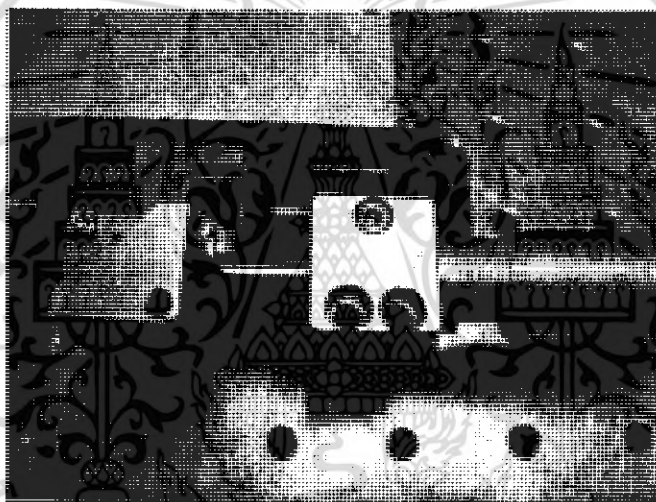
3.5.4 การทดลองโดยการวัดการเคลื่อนที่ของสกรู

นำมอเตอร์มาติดกับชุดสกรู การหมุนหนึ่งรอบของสกรูจะเลื่อนตำแหน่งไป 1 มิลลิเมตร ในการวัดทำได้โดยนำไมโครมิเตอร์มาวัดที่ปลายชุดสกรู แล้วหมุนไมโครมิเตอร์ให้ติดกับส่วนที่อ้างอิงที่ติดอยู่กับเกลียวหมุน แล้วอ่านค่าที่ไมโครมิเตอร์ จากนั้นสั่งให้มอเตอร์หมุนออกจากไมโครมิเตอร์ไปหนึ่งรอบ เมื่อครบรอบแล้ว ให้หมุนไมโครมิเตอร์เข้าไปติดกับส่วนที่อ้างอิงอีกครั้ง แล้วอ่านค่าดูว่ามีการเลื่อนตำแหน่งไป 1 มิลลิเมตรหรือไม่ ทำแบบนี้ซ้ำไปหลายๆ ครั้ง เพื่อให้ได้ค่าที่แน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แสดงชุดทดลองการวัดการเคลื่อนที่ของสกรู

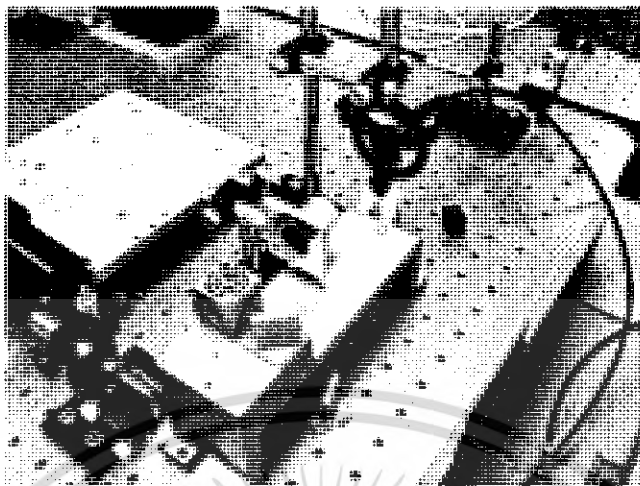


รูปที่ 3.13 แสดงไมโครมิเตอร์กับจุดที่ใช้อ้างอิง

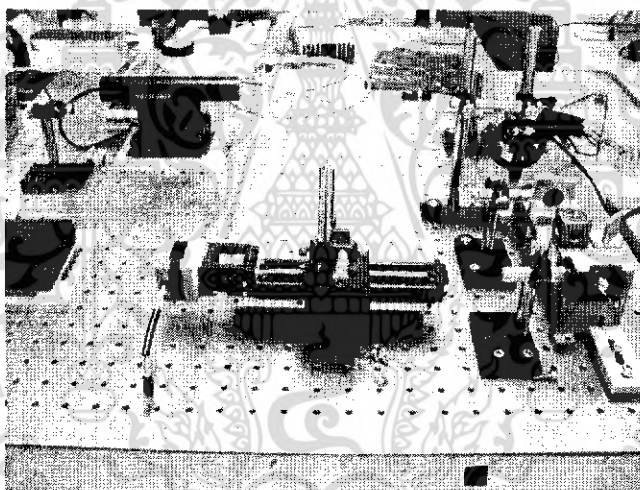
3.5.5 การทดลองโดยใช้อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์เพื่อวัดการแทรกสอด

นำมอเตอร์ไปต่อกับชุดสกรูเพื่อให้มีการเลื่อนตำแหน่งแบบ ไป-กลับ จากนั้นจึงทดลองดูการเคลื่อนที่ โดยการใช้อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์แบบไมโครเลชันวัดการแทรกสอด แล้วนำค่าที่ทดลองไปหาระยะทางการเคลื่อนที่ต่อสเกลปี่งมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แสดงอุปกรณ์วัดรีจิสเตอร์การแทรกสอด



รูปที่ 3.15 แสดงการต่อสแต็ทไฟมอเตอร์เข้ากับอุปกรณ์วัดรีจิสเตอร์การแทรกสอด

เมื่อทดลองทุกขั้นตอนแล้ว จากนั้นจึงออกแบบหลายวงจรทุกวงจร คือ วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก และวงจรข้ามมอเตอร์ โดยใช้โปรแกรม Orcad 9.1 ในการออกแบบหลายวงจร เพื่อประกอบเป็นกล่องอุปกรณ์การควบคุมมอเตอร์ โดยไม่ต้องเชื่อมโยงกับเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อรับค่า แต่จะใช้การรับค่าโดยกรกดค่าต่างๆ ผ่านปุ่มกด แล้วแสดงผลผ่านทางจอแอลซีดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

การทำงานของสเตปป์มอเตอร์ในโหมดไมโครสเตป ถูกควบคุมโดยตัวแปร 2 ตัว คือ ความละเอียดมุมการหมุนของสเตปมอเตอร์หรือเทียบได้กับจำนวนสเตปของหนึ่งลูกคลื่น และความถี่ของลูกคลื่นในหนึ่งลูก ซึ่งในหนึ่งลูกคลื่นเราสามารถกำหนดจำนวนสเตปได้ และยังสามารถเปลี่ยนค่าความถี่ได้อีกเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.1 แสดงรูปคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงสเตปแบบเป็นขั้นบันได

มอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองมีความละเอียดสเตปละ 1.8 องศา ในหนึ่งลูกคลื่นจะเปลี่ยนแปลงการหมุนของสเตปมอเตอร์ไป 4 สเตป แอมพลิจูดของลูกคลื่นถูกควบคุมความละเอียดได้สูงสุด 256 ค่า จากคลื่นซายน์ที่แอมพลิจูดสูงสุดถึงต่ำสุดมีการเคลื่อนที่ของลูกคลื่นไปครึ่งลูก ดังนั้นจะหมุนมอเตอร์ไป 2 สเตป ดังนั้น

$$2 \times 1.8 = 3.6 \text{ องศา}$$

ความละเอียดสูงสุดที่สามารถควบคุมให้มอเตอร์หมุนได้

$$3.6 \div 256 = 0.014 \text{ องศา}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองจะแบ่งเป็น 5 การทดลอง คือ

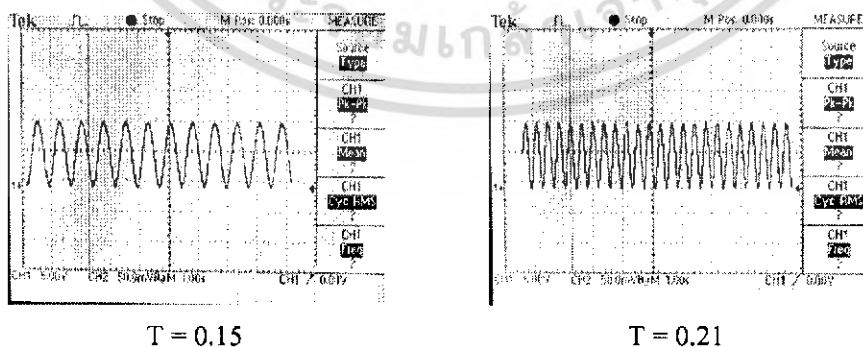
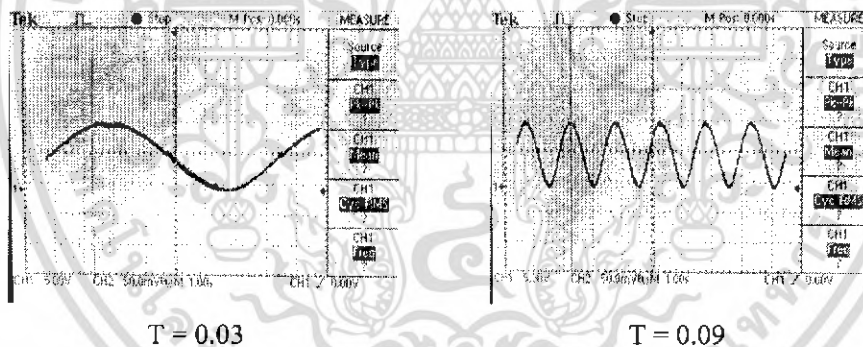
4.1 การสังเกตลูกคลื่นจากการเปลี่ยนแปลงการค่าความถี่และค่าความละเอียดของมุมการหมุนในหนึ่งลูกคลื่น

วิธีการทดลอง

1. ต่อชุดขับสเตปปีงมอเตอร์เข้ากับออสซิลอโคป
2. สังเกตลูกคลื่น และบันทึกผลการทดลอง
3. เปลี่ยนแปลงค่าความถี่และค่าความละเอียดของมุมการหมุนของลูกคลื่น sine ในแต่ละลูก แล้วทำซ้ำข้อ 2

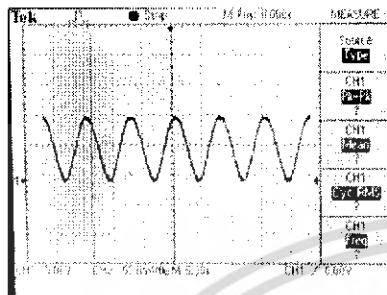
ผลการทดลอง

ตอนที่ 1 สังเกตลูกคลื่นจากการเปลี่ยนแปลงค่าความละเอียดของมุมการหมุนของมอเตอร์ (T) ในหนึ่งลูกคลื่น โดยอ้างอิงจากแกน $y = 5$ โวลต์ แกน $x = 1$ วินาที

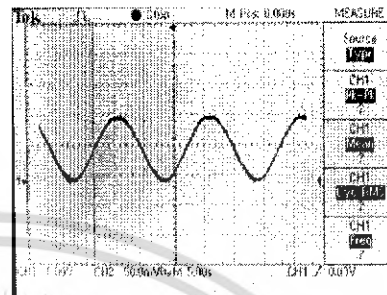


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

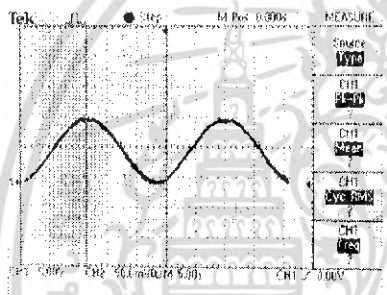
ตอนที่ 2 สังเกตลูกคลื่นจากการเปลี่ยนค่าความถี่ของลูกคลื่น โดยอ้างอิง $T = 0.01$ แคน $y = 5$ โวลต์
 แคน $x = 5$ วินาที



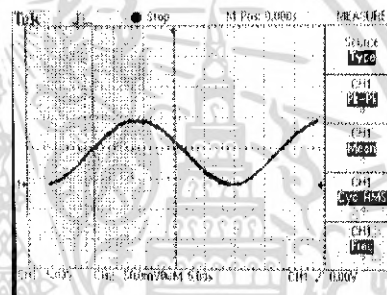
ความถี่ 0.131 Hz



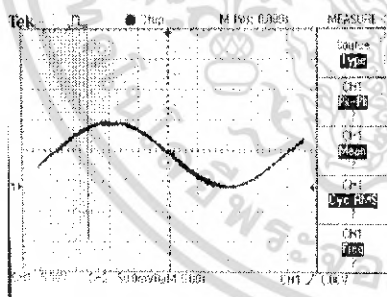
ความถี่ 0.0632 Hz



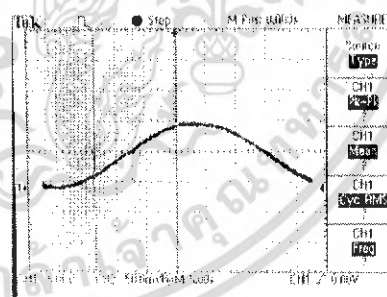
ความถี่ 0.042 Hz



ความถี่ 0.0316 Hz



ความถี่ 0.025 Hz



ความถี่ 0.021 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดลองการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์

วิธีการทดลอง

1. ทำรอยบากที่แกนของมอเตอร์และจุดที่ใช้อ้างอิง แล้วทำให้รอยบากของทั้งสองให้ตรงกัน
2. สั่งให้มอเตอร์หมุนไปหนึ่งรอบ จากนั้นสังเกตว่ารอยบากทั้งสองกลับมาตรงกันอีกหรือไม่
3. ทำซ้ำข้อที่ 2 แต่เปลี่ยนค่าความถี่และค่าความละเอียดในการหมุนมอเตอร์ในแต่ละครั้ง

ผลการทดลอง

เมื่อสังเกตจากสายตามองผ่านกล้องขยาย แล้วสั่งให้มอเตอร์หมุนไปหนึ่งรอบโดยการเปลี่ยนแปลงทั้งค่าความถี่และค่าความละเอียดของมุมของมอเตอร์ ปรากฏว่าเมื่อหมุนครบหนึ่งรอบมอเตอร์จะเลื่อนกลับมาที่จุดอ้างอิงเดิม

4.3 การทดลองโดยใช้ไมโครมิเตอร์

วิธีการทดลอง

1. ต่อไมโครมิเตอร์ให้ติดกับมอเตอร์
2. สั่งให้มอเตอร์หมุนไปหนึ่งรอบ แล้วสังเกตว่าไมโครมิเตอร์เลื่อนไปเท่าใด
3. ทดลองเปลี่ยนค่าความถี่และค่าความละเอียดของมุมในการหมุนมอเตอร์ แล้วสังเกตการเคลื่อนที่ของมอเตอร์อีกครั้ง
4. ทดลองโดยกำหนดค่าการเคลื่อนที่ในระยะเวลาต่างๆ แล้วทดลองเหมือนข้อที่ 3

ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองเมื่อกำหนดค่าให้มอเตอร์เคลื่อนที่ไป 0.5 มิลลิเมตร

ค่าการหน่วงเวลา (s)	จำนวนความละเอียด (องศา)				
	0.03 องศา	0.06 องศา	0.09 องศา	0.12 องศา	0.15 องศา
10	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
20	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
50	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
100	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
200	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองเมื่อกำหนดให้มอเตอร์เคลื่อนที่ไป 0.2 มิลลิเมตร

ค่าการหน่วงเวลา (s)	จำนวนความละเอียด (องศา)				
	0.03 องศา	0.06 องศา	0.09 องศา	0.12 องศา	0.15 องศา
10	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
20	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
50	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
100	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
200	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

ไมโครมิเตอร์หมุนหนึ่งรอบจะได้ระยะ 0.5 มิลลิเมตร เมื่อให้มอเตอร์หมุน ปรากฏว่าระยะที่ไมโครมิเตอร์วัดได้มีค่าเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร แสดงว่ามอเตอร์เลื่อนมาอยู่ที่จุดเดิม จากนั้นทดลองโดยการเปลี่ยนค่าความถี่และค่าความละเอียดของมุม เมื่อหมุนครบรอบก็ยังคงวัดได้เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตรเหมือนเดิม

เมื่อมีการกำหนดระยะทางการเคลื่อนที่ในระยะต่างๆ เช่น 0.2, 0.4, 0.6 มิลลิเมตร แล้วลองเพิ่มไปเรื่อยๆ ผลปรากฏว่ามอเตอร์สามารถหยุดตามระยะที่กำหนดไว้ได้ เพราะฉะนั้นจึงทำให้สามารถควบคุมระยะทางการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ได้

4.4 การทดลองโดยการวัดการเคลื่อนที่ของสกรู

วิธีการทดลอง

1. นำไมโครมิเตอร์มาต่อที่ชุดสกรู แล้วนำส่วนที่อ้างอิงนำติดกับส่วนที่เลื่อน
2. หมุนไมโครมิเตอร์ให้ไปติดกับส่วนอ้างอิง แล้วอ่านค่าที่ไมโครมิเตอร์
3. สั่งให้มอเตอร์หมุนออกห่างจากไมโครมิเตอร์ โดยหมุนไปหนึ่งรอบ
4. หมุนไมโครมิเตอร์ให้ไปติดกับส่วนที่อ้างอิงอีกครั้ง แล้วสังเกตระยะการเคลื่อนที่
5. เปลี่ยนค่าการหมุนของมอเตอร์ คือค่าความถี่และค่าความละเอียดของมุมในการหมุน แล้วทำตามข้อ 2 อีกครั้ง

ผลการทดลอง

ระยะการหมุนของชุดสกรูหนึ่งรอบจะมีระยะทาง 1 มิลลิเมตร เมื่อเลื่อนจุดอ้างอิงออกจากไมโครมิเตอร์ไปหนึ่งรอบ และเมื่อหมุนไมโครมิเตอร์มาให้ติดกับจุดอ้างอิงเหมือนเดิม ผลปรากฏว่าค่าที่อ่านจากไมโครมิเตอร์มีค่าห่างจากค่าก่อนหมุนมอเตอร์ไป 1 มิลลิเมตรพอดี และเมื่อเปลี่ยนค่าทั้งค่าความถี่และค่าความละเอียด ผลที่ออกมาจะมีค่าคงเดิมเสมอ

4.5 ทดลองวัดการเคลื่อนที่โดยชุดทดลองอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบไมเคิลสัน โดยสังเกตความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงรีฟการแทรกสอดกับการเคลื่อนที่ของมอเตอร์

ตอนที่ 1 ทดลองการเคลื่อนที่ของมอเตอร์แล้วสังเกตรีฟการแทรกสอด เพื่อเปรียบเทียบกับค่าของทฤษฎี

วิธีการทดลอง

1. ต่อชุดขับสเตปปีงมอเตอร์เข้ากับชุดทดลอง Interferometer แบบ Michelson
2. ให้ค่าความละเอียดของมุมการหมุนเริ่มต้นที่ 0.01 แล้วให้มอเตอร์หมุนไปที่ละครึ่งรอบ (หรือเคลื่อนที่ไป 0.5 มิลลิเมตร)
3. นับจำนวนรีฟการแทรกสอด และบันทึกผลการทดลอง
4. เพิ่มค่าจำนวนความละเอียดของสเตปไปทีละ 0.01 แล้วทำซ้ำข้อ 3

ผลการทดลอง

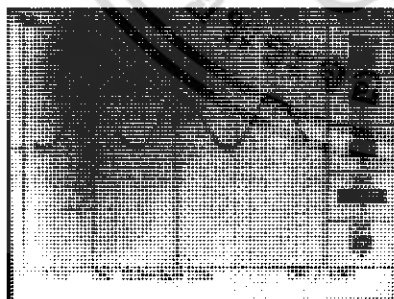
สูตรการหาระยะทางการเคลื่อนที่ คือ

$$d = \frac{n\lambda}{2}$$

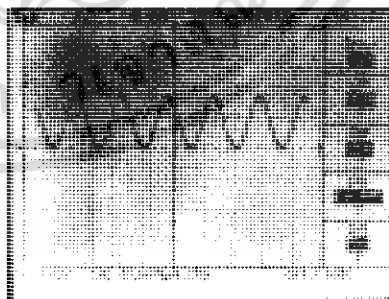
d = ระยะทางที่กระจกเลื่อนไป

n = จำนวนรีฟการแทรกสอด

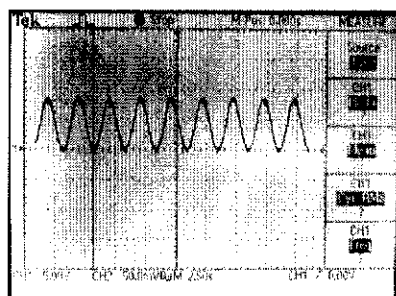
λ = ความยาวคลื่น (632.8 nm)



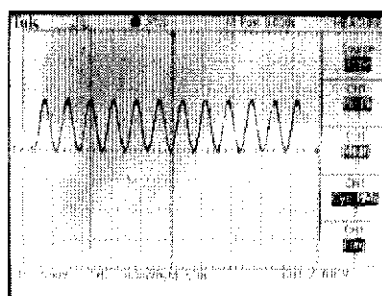
T = 0.01



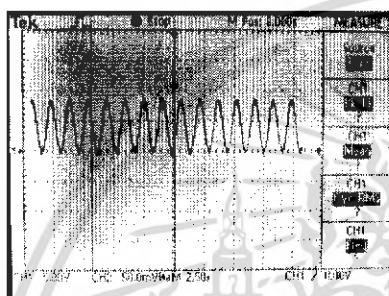
T = 0.02



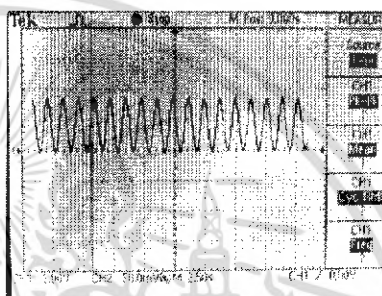
T = 0.03



T = 0.04



T = 0.05



T = 0.06

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองการวัดรีการแทรกสอดเมื่อมอเตอร์หมุนไปครึ่งรอบ (0.5 มิลลิเมตร)

	ครั้งที่วัด	ความละเอียดของสเปป (องศา)					
		0.01 องศา	0.02 องศา	0.03 องศา	0.04 องศา	0.05 องศา	0.06 องศา
จำนวนรีการแทรกสอด (n)	ครั้งที่ 1	1523	1603	1755	1662	1647	1655
	ครั้งที่ 2	1685	1353	1562	1720	1595	1735
	ครั้งที่ 3	1611	1586	1666	1630	1550	1537
	ครั้งที่ 4	1595	1690	1637	1728	1488	1618
	ครั้งที่ 5	1779	1710	1512	1628	1547	1423
	ครั้งที่ 6	1595	1389	1461	1611	1364	1510
	ครั้งที่ 7	1556	1553	1411	1765	1468	1710
	ครั้งที่ 8	1615	1547	1580	1608	1410	1555
	ครั้งที่ 9	1535	1508	1449	1545	1479	1449
	ครั้งที่ 10	1543	1523	1767	1414	1624	1444
	ค่าเฉลี่ย	1604	1546	1580	1631	1517	1564
ระยะทาง (ไมโครเมตร)		507.5	489.1	499.9	516	479.9	494.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากทฤษฎี

$$\text{ค่า } \lambda = 632.8 \text{ นาโนเมตร}$$

$$\text{ค่า } d = 0.5 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้นสามารถหาค่าจำนวนริ้วการแทรกสอดได้จากสมการ

$$d = \frac{n\lambda}{2}$$

$$n = \frac{2d}{\lambda}$$

$$n = \frac{2 \times 0.5 \times 10^{-3}}{632.8 \times 10^{-9}}$$

$$n = 1580$$

เมื่อนำค่าจำนวนริ้วการแทรกสอดที่คำนวณได้ ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง จะเห็นว่าค่าที่ได้ มีค่าใกล้เคียงกัน

ตอนที่ 2 สังเกตการเพิ่มขึ้นของริ้วการแทรกสอด เมื่อมอเตอร์เคลื่อนที่ไปในค่าที่กำหนด เมื่อทดลองเปลี่ยนระยะการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เปรียบเทียบกับค่าสังเกตริ้วการแทรกสอด

เช่น 100 ไมโครเมตร จะมีการเปลี่ยนแปลงริ้วไป 316 ริ้ว จากสมการ

$$d = \frac{n\lambda}{2}$$

$$n = \frac{2d}{\lambda}$$

$$n = \frac{2 \times 100 \times 10^{-6}}{632.8 \times 10^{-9}}$$

$$n = 316$$

ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.4 แสดงจำนวนริ้วการแทรกสอดเมื่อกำหนดค่าระยะทางการเคลื่อนที่ของมอเตอร์

ระยะทาง (ไมโครเมตร)	จำนวนริ้วการแทรกสอด					ค่าเฉลี่ย	ระยะทางที่มาจากการ คำนวณ(ไมโครเมตร)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
20	64	68	66	72	71	68.2	21.5
40	126	124	122	127	128	125.4	39.6
60	190	186	187	193	186	188.4	59.6
80	233	238	246	253	259	245.8	77.7
100	272	280	263	354	312	296.2	93.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในโครงการพิเศษนี้ สิ่งที่ต้องการจากการทำงานคือ การสร้างมอเตอร์ให้สามารถหมุนในมุมองศาที่เล็กๆได้ การเขียนโปรแกรมควบคุมการหมุนของมอเตอร์ต้องทำให้การเคลื่อนที่ของมอเตอร์มีความสัมพันธ์กัน เพื่อให้มีการคั้งหรือผลักของแรงแม่เหล็กในมอเตอร์ โดยการป้อนสัญญาณไฟฟ้าจะเป็นแบบสัญญาณคลื่นไซน์ แล้วต้องให้สัญญาณในเฟสที่ใกล้กัน ต้องต่างกัน 90 องศาไปเรื่อยๆ ในหนึ่งซีกลูกคลื่นสามารถหมุนแกนของมอเตอร์ไป 4 สเตปปกติ มอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองมีความละเอียดสเตปละ 1.8 องศา ความละเอียดของการหมุนของมอเตอร์สามารถควบคุมได้จากการป้อนความละเอียดที่ต่างกันของสัญญาณคลื่นไซน์จากโปรแกรม ความละเอียดสูงสุดที่สามารถสร้างได้คือ มุมการหมุนของมอเตอร์ 0.01 องศา ความเร็วในการหมุนสามารถควบคุมได้จากการหน่วงเวลาระหว่างลูกคลื่นในแต่ละลูก

การทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างการควบคุม โปรแกรมกับมุมการหมุนของมอเตอร์โดยชุดทดลองอินเตอร์เฟรมิเตอร์แบบไมเคิลสัน โดยสังเกตความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงร็วการแทรกสอดกับการเคลื่อนที่ของมอเตอร์จากการควบคุม โดยโปรแกรม โดยทดลองที่ระยะ 20 ถึง 100 ไมโครเมตร ได้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกับการคำนวณทางทฤษฎี และการทดลองเปลี่ยนความละเอียดของมุมการหมุนที่ระยะต่างๆกัน พบว่าที่ค่าความละเอียดต่างๆกันให้ผลการเคลื่อนที่ในระยะที่กำหนดใกล้เคียงกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

การวัดผลการทดลองการหมุนของมอเตอร์โดยชุดทดลองอินเตอร์เฟรมิเตอร์แบบไมเคิลสันให้ผลการทดลองที่คลาดเคลื่อน ไม่สามารถวัดระยะที่เล็กมากๆได้ เนื่องจากผลของการสั่นของสภาพแวดล้อมและตัวมอเตอร์ และในการวัดระยะที่สถานะเร็วมากๆทำให้ตัวจับสัญญาณไม่สามารถนับร็วการแทรกสอดได้ทัน

เอกสารอ้างอิง

ชาวดิ พิษฐ์รัตน์. 2536. การควบคุมสเตปมอเตอร์แบบวงจรถัดโดยใช้หลักการของไมโครสเตป.

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง.

ศาสตราจารย์ รุฒิพัฒน์พันธุ์. 2545. ชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อใช้ทดแทนระบบนิวแมติก.

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Features

- 80C52 Compatible
 - 8051 Instruction Compatible
 - Six 8-bit I/O Ports (64 Pins or 68 Pins Versions)
 - Four 8-bit I/O Ports (44 Pins Version)
 - Three 16-bit Timer/Counters
 - 256 Bytes Scratch Pad RAM
 - 9 Interrupt Sources with 4 Priority Levels
- Integrated Power Monitor (POR/PFD) to Supervise Internal Power Supply
- ISP (In-System Programming) Using Standard V_{CC} Power Supply
- Boot ROM Contains Low Level Flash Programming Routines and a Default Serial Loader
- High-speed Architecture
 - In Standard Mode:
 - 40 MHz (V_{CC} 2.7V to 5.5V, both internal and external code execution)
 - 60 MHz (V_{CC} 4.5V to 5.5V and Internal Code execution only)
 - In X2 mode (6 Clocks/machine cycle)
 - 20 MHz (V_{CC} 2.7V to 5.5V, both internal and external code execution)
 - 30 MHz (V_{CC} 4.5V to 5.5V and Internal Code execution only)
- 64K Bytes On-chip Flash Program/Data Memory
 - Byte and Page (128 Bytes) Erase and Write
 - 100k Write Cycles
- On-chip 1792 bytes Expanded RAM (XRAM)
 - Software Selectable Size (0, 256, 512, 768, 1024, 1792 Bytes)
 - 768 Bytes Selected at Reset for T89C51RD2 Compatibility
- On-chip 2048 Bytes EEPROM Block for Data Storage (AT89C51ED2 Only)
 - 100K Write Cycles
- Dual Data Pointer
- Variable Length MOVX for Slow RAM/Peripherals
- Improved X2 Mode with Independent Selection for CPU and Each Peripheral
- Keyboard Interrupt Interface on Port 1
- SPI Interface (Master/Slave Mode)
- 8-bit Clock Prescaler
- 16-bit Programmable Counter Array
 - High Speed Output
 - Compare/Capture
 - Pulse Width Modulator
 - Watchdog Timer Capabilities
- Asynchronous Port Reset
- Full-duplex Enhanced UART with Dedicated Internal Baud Rate Generator
- Low EMI (Inhibit ALE)
- Hardware Watchdog Timer (One-time Enabled with Reset-Out), Power-off Flag
- Power Control Modes: Idle Mode, Power-down Mode
- Single Range Power Supply: 2.7V to 5.5V
- Industrial Temperature Range (-40 to +85°C)
- Packages: PLCC44, VQFP44, PLCC68, VQFP64, PDIL40

Description

AT89C51RD2/ED2 is high performance CMOS Flash version of the 80C51 CMOS single chip 8-bit microcontroller. It contains a 64-Kbyte Flash memory block for code and for data.

The 64-Kbytes Flash memory can be programmed either in parallel mode or in serial mode with the ISP capability or with software. The programming voltage is internally generated from the standard V_{CC} pin.



8-bit Flash Microcontroller

AT89C51RD2
AT89C51ED2

Rev. 4235D-8051-12/03



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DAC0808

8-Bit D/A Converter

General Description

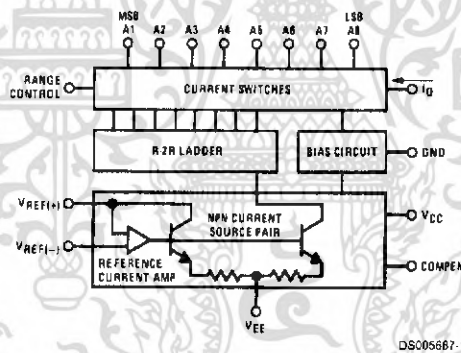
The DAC0808 is an 8-bit monolithic digital-to-analog converter (DAC) featuring a full scale output current settling time of 150 ns while dissipating only 33 mW with $\pm 5V$ supplies. No reference current (I_{REF}) trimming is required for most applications since the full scale output current is typically ± 1 LSB of $255 I_{REF}/256$. Relative accuracies of better than $\pm 0.19\%$ assure 8-bit monotonicity and linearity while zero level output current of less than $4 \mu A$ provides 8-bit zero accuracy for $I_{REF} \geq 2$ mA. The power supply currents of the DAC0808 is independent of bit codes, and exhibits essentially constant device characteristics over the entire supply voltage range.

The DAC0808 will interface directly with popular TTL, DTL or CMOS logic levels, and is a direct replacement for the MC1508/MC1408. For higher speed applications, see DAC0800 data sheet.

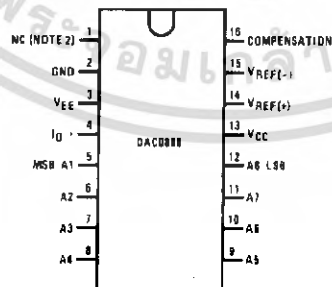
Features

- Relative accuracy: $\pm 0.19\%$ error maximum
- Full scale current match: ± 1 LSB typ
- Fast settling time: 150 ns typ
- Noninverting digital inputs are TTL and CMOS compatible
- High speed multiplying input slew rate: 8 mA/ μs
- Power supply voltage range: $\pm 4.5V$ to $\pm 18V$
- Low power consumption: 33 mW @ $\pm 5V$

Block and Connection Diagrams



Dual-In-Line Package

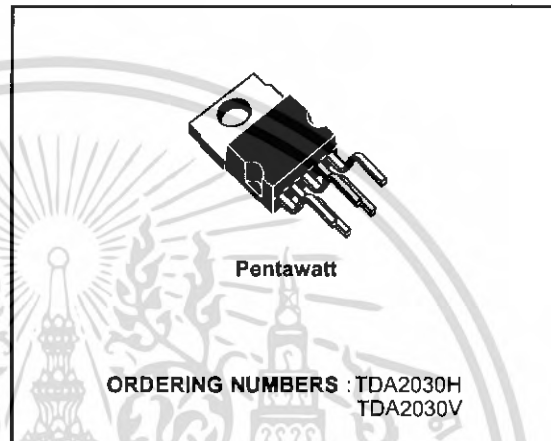


Top View
Order Number DAC0808
See NS Package M16A or N16A

14W Hi-Fi AUDIO AMPLIFIER

DESCRIPTION

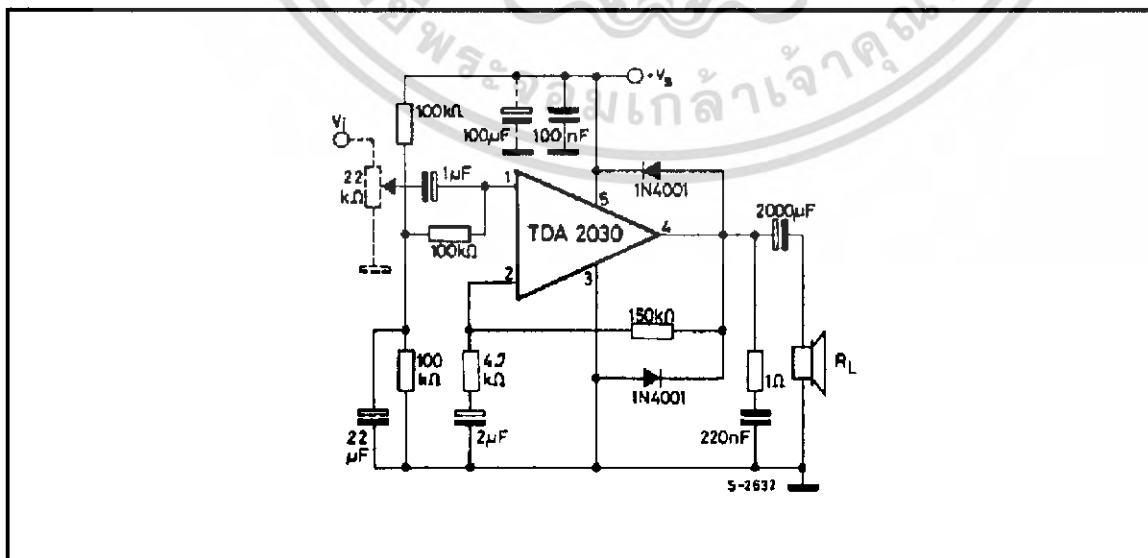
The TDA2030 is a monolithic integrated circuit in Pentawatt® package, intended for use as a low frequency class AB amplifier. Typically it provides 14W output power ($d = 0.5\%$) at 14V/4Ω; at ± 14V the guaranteed output power is 12W on a 4Ω load and 8W on a 8Ω (DIN45500). The TDA2030 provides high output current and has very low harmonic and cross-over distortion. Further the device incorporates an original (and patented) short circuit protection system comprising an arrangement for automatically limiting the dissipated power so as to keep the working point of the output transistors within their safe operating area. A conventional thermal shut-down system is also included.



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_s	Supply voltage	± 18	V
V_i	Input voltage	V_s	
V_i	Differential input voltage	± 15	V
I_o	Output peak current (internally limited)	3.5	A
P_{tot}	Power dissipation at $T_{case} = 90^\circ\text{C}$	20	W
T_{stg}, T_j	Storage and junction temperature	-40 to 150	$^\circ\text{C}$

TYPICAL APPLICATION



LM741

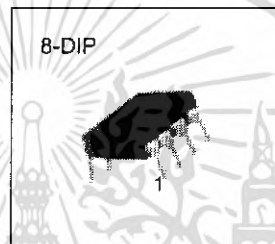
Single Operational Amplifier

Features

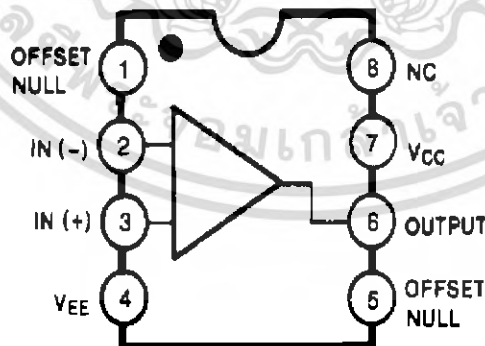
- Short circuit protection
- Excellent temperature stability
- Internal frequency compensation
- High Input voltage range
- Null of offset

Description

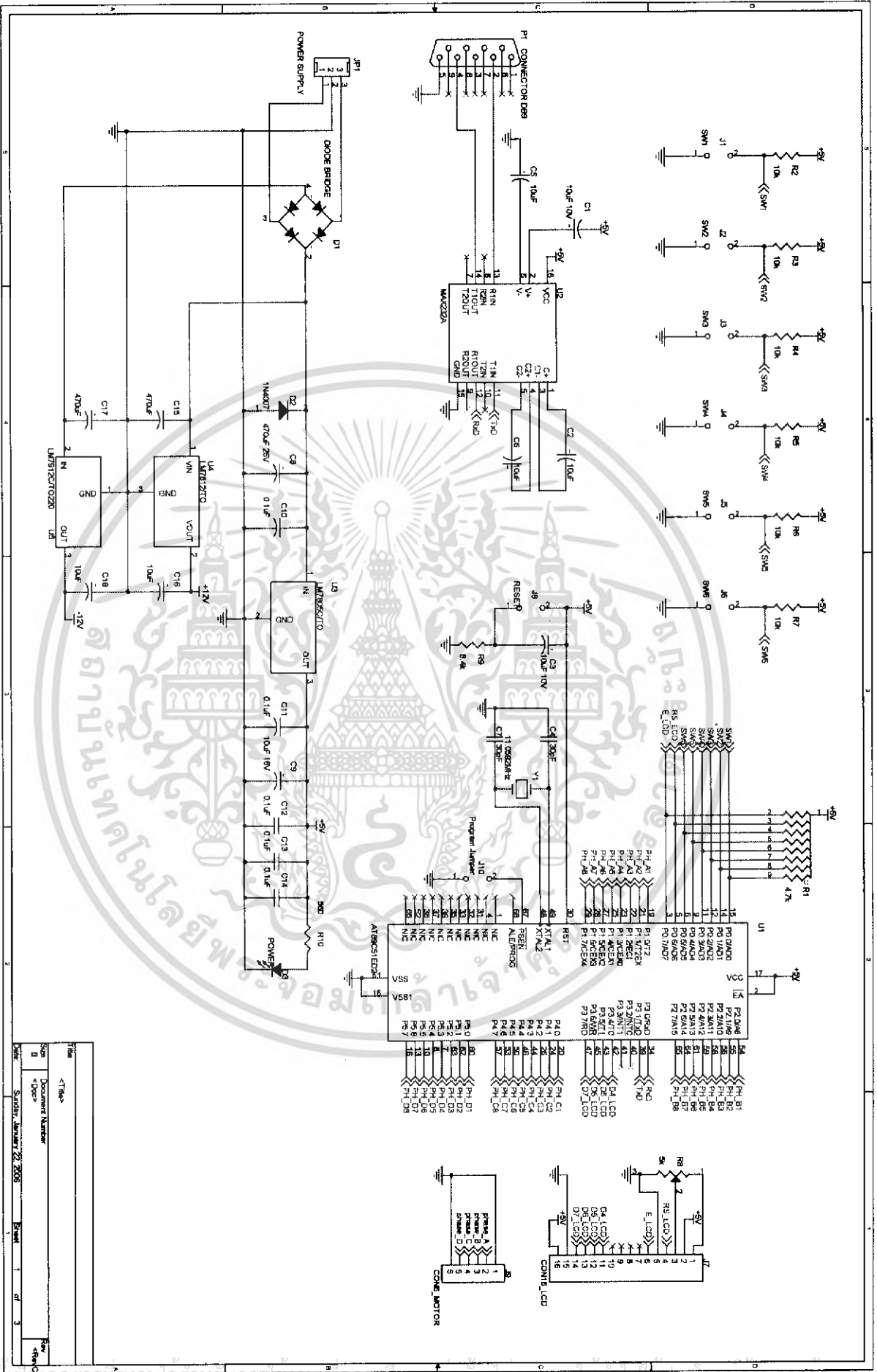
The LM741 series are general purpose operational amplifiers. It is intended for a wide range of analog applications. The high gain and wide range of operating voltage provide superior performance in integrator, summing amplifier, and general feedback applications.



Internal Block Diagram

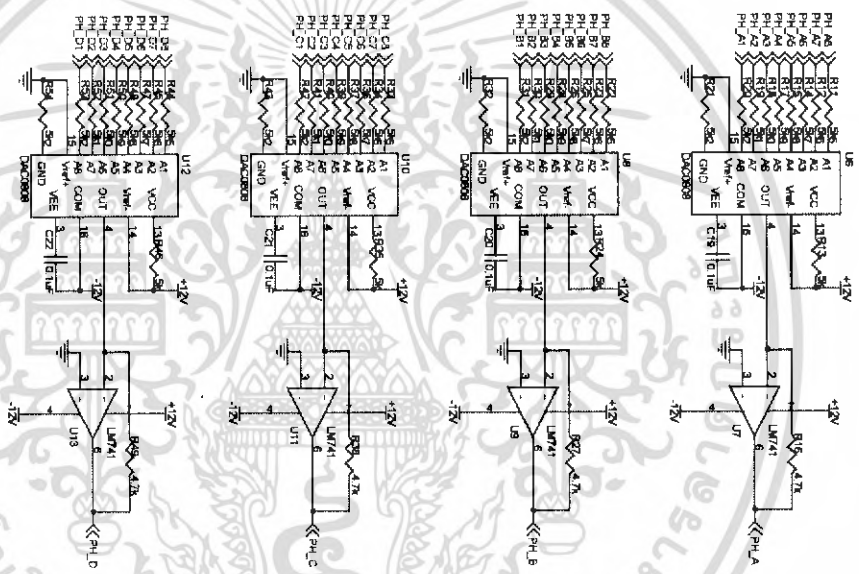


Rev. 5.0



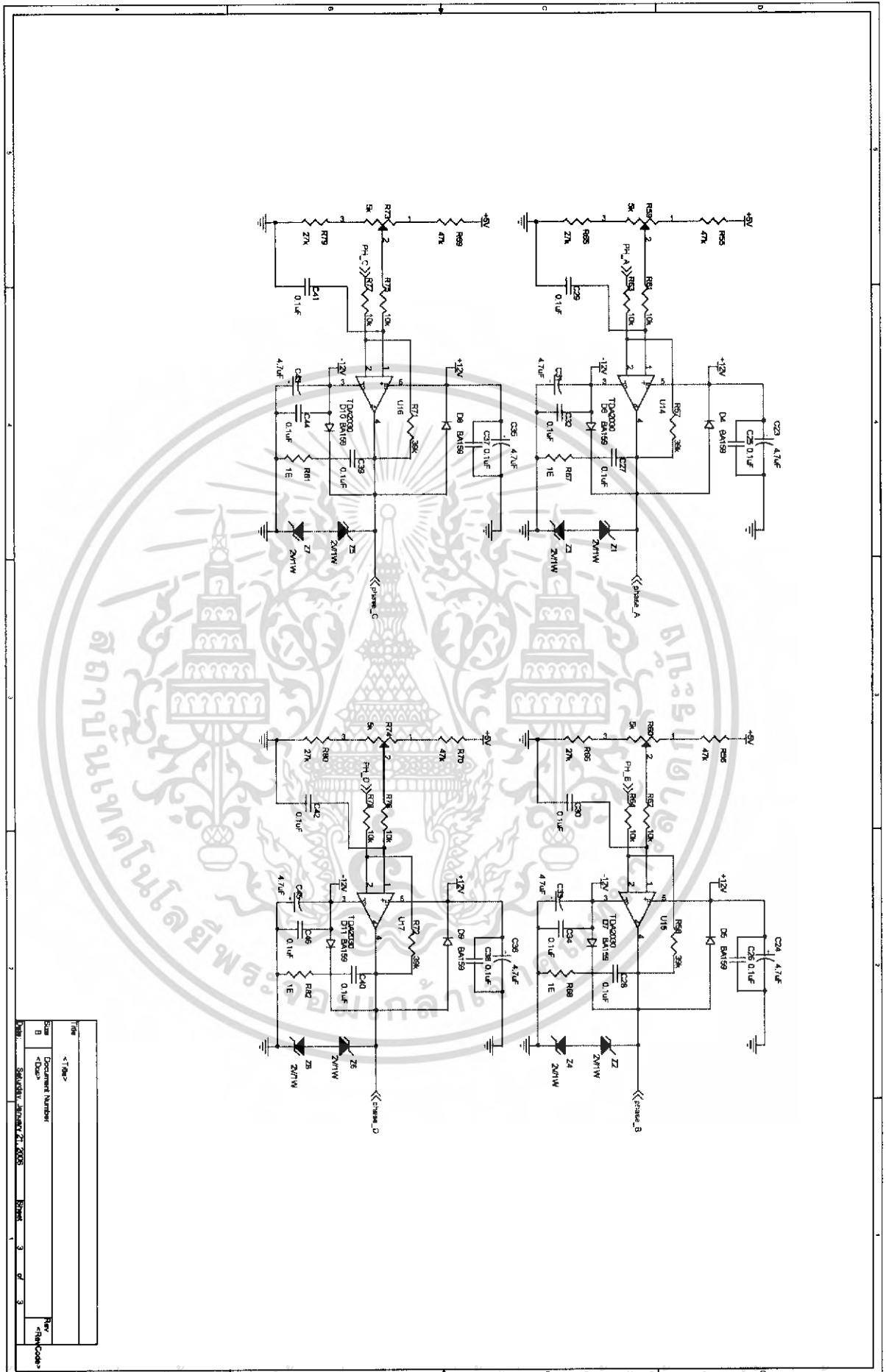
File	<Title>
Size	Document Number
Doc	<Doc>
Sheet	Sunday, January 22, 2006 1 of 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยไว้ ณ ที่นี้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Title	<Title>
Size	8
Document Number	<Doc>
Date	Sat, 21 Aug 2008
Sheet	2 of 3
Rev	<Rev Code>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้ผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Rev	<TRev>
Doc	Document Number
Rev	<Doc>
Rev	<RevCode>
Rev	<RevCode>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในโครงการวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลระบบได้แก้ไขเอกสารนี้แล้ว กรุณา
 ไม่ว่าการแก้ไขใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#include <stdio.h>
#include <reg52.h>
#include <math.h>
#include <lcddrv.c>

sbit sw_1=P0^0;
sbit sw_2=P0^1;
sbit sw_3=P0^2;
sbit sw_4=P0^3;
sbit sw_5=P0^4;
sbit sw_6=P0^6;

int
delay_va,loop_1,loop_2,loop_4,loop_5,output_1,output_2,output_3,output_4,rotate_sw,state,num,step_lcd,lcd_
4,lcd_5,lcd_6,temp_1,temp_2;
float temp_sin1,temp_sin2,loop_3,p,temp_3,temp_4,lcd_1,lcd_2,lcd_3;

int delay(int n)          /*normal delay function*/
{
    for(loop_1=0;loop_1<n;loop_1++)
    {
        for(loop_2=0;loop_2<50;loop_2++)
            continue;
    }
}

int delay1(int m)        /*delay can push switch function*/
{
    for(loop_4=0;loop_4<m;loop_4++)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
    for(loop_5=0;loop_5<50;loop_5++)
    {
        if(sw_1==0)
        {
            loop_3=100;
            loop_4=m;
            loop_5=100;
        }
        else if(sw_2==0)
        {
            loop_4=m;
            loop_5=100;
        }
        else if(sw_3==0)
        {
            loop_3=100;
            loop_4=m;
            loop_5=100;
        }
        else if(sw_4==0)
        {
            loop_4=m;
            loop_5=100;
        }
        else if(sw_5==0)
        {
            loop_4=m;
            loop_5=100;
        }
        else if(sw_6==0)
        {
            loop_4=m;
            loop_5=100;
        }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        }
    }
}

```

```

speed() /*speed motor function*/
{
    LCDWI(0x01);
    delay(4);
    LCDWI(0xc6);
    lcd_puts(0xc6," ----");
    lcd_puts(0x97,"Motor Running!");
    for(loop_3=0;loop_3<(2*3.1415);loop_3+=0.5)
    {
        temp_sin2=sin(loop_3);
        temp_sin1=cos(loop_3);
        temp_sin2=temp_sin2*1000;
        temp_sin1=temp_sin1*1000;
        if(temp_sin2<=0)
        {
            temp_sin2=temp_sin2*(-1);
            temp_sin2=(temp_sin2*127)/1000;
            output_3=temp_sin2+127;
            output_1=127-temp_sin2;
        }
        else if(temp_sin2>0)
        {
            output_1=(temp_sin2*128)/1000;
            output_3=128-output_1;
            output_1=output_1+127;
        }
        if(temp_sin1<=0)
        {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        temp_sin1=temp_sin1*(-1);
        temp_sin1=(temp_sin1*127)/1000;
        output_4=temp_sin1+127;
        output_2=127-temp_sin1;
    }
    else if(temp_sin1>0)
    {
        output_2=(temp_sin1*128)/1000;
        output_4=128-output_2;
        output_2=output_2+127;
    }
    if(rotate_sw==1)
    {
        P1=output_1;
        P2=output_2;
        P4=output_3;
        P5=output_4;
    }
    else if(rotate_sw==0)
    {
        P5=output_1;
        P4=output_2;
        P2=output_3;
        P1=output_4;
    }
}
}
LCDWI(0x01);
delay(4);
LCDWI(0x80);
lcd_puts(0x80,"Start");
delay(4);
lcd_puts(0xc5,"Micro ");
LCDWI(0xcb);
LCDWD(0x30+lcd_1);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

LCDWI(0xcc);
LCDWD(0x2e);
LCDWI(0xcd);
LCDWD(0x30+lcd_2);
LCDWI(0xce);
LCDWD(0x30+lcd_3);
LCDWI(0x99);
lcd_puts(0x99,"Delay ");
LCDWI(0x9f);
LCDWD(0x30+lcd_4);
LCDWI(0xa0);
LCDWD(0x30+lcd_5);
LCDWI(0xa1);
LCDWD(0x30+lcd_6);
if(rotate_sw==0)
{
LCDWI(0x91);
lcd_puts(0x91,"CCW");
}
else
{
LCDWI(0x91);
lcd_puts(0x91,"CW");
LCDWI(0x93);
LCDWD(0x20);
}
}

wel()
{
delay(4);
lcd_puts(0xc5,"Welcome to");
lcd_puts(0x96,"Microstep Motor!");

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

delay(5000);
}

set()
{
    LCDWI(0x01);          /*show value in LCD*/
    delay(4);
    LCDWI(0x80);
    lcd_puts(0x80,"Stop");
    delay(4);
    lcd_puts(0xc5,"Micro ");
    LCDWI(0xcb);
    LCDWD(0x30+lcd_1);
    LCDWI(0xcc);
    LCDWD(0x2e);
    LCDWI(0xcd);
    LCDWD(0x30+lcd_2);
    LCDWI(0xce);
    LCDWD(0x30+lcd_3);
    LCDWI(0x99);
    lcd_puts(0x99,"Delay ");
    LCDWI(0x9f);
    LCDWD(0x30+lcd_4);
    LCDWI(0xa0);
    LCDWD(0x30+lcd_5);
    LCDWI(0xa1);
    LCDWD(0x30+lcd_6);
    if(rotate_sw==0)      /*control CW or CCW*/
    {
        LCDWI(0x91);
        lcd_puts(0x91,"CW");
        LCDWI(0x93);
        LCDWD(0x20);
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

if(sw_1==0)
{
speed();
}
if(sw_5==0)
{
lcd_1=lcd_1+1;
delay(500);
}
else if(sw_6==0)
{
lcd_1=lcd_1-1;
delay(500);
}
if(lcd_1>9)
{
lcd_1=0;
}
else if(lcd_1<0)
{
lcd_1=9;
}
if(sw_3==0)
{
state=1;
step_lcd=100;
delay(500);
}
else if(sw_4==0)
{
step_lcd=1;
delay(500);
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

while(step_lcd==1)
{
    if(sw_2==0)
    {
        if(rotate_sw==0)
        {
            rotate_sw=1;
            LCDWI(0x91);
            lcd_puts(0x91,"CCW");
        }
        else
        {
            rotate_sw=0;
            LCDWI(0x91);
            lcd_puts(0x91,"CW");
            LCDWI(0x93);
            LCDWD(0x20);
        }
        delay(800);
        LCDWI(0xcd);
        LCDWD(0x20);
        delay(500);
        LCDWI(0xcd);
        LCDWD(0x30+lcd_2);
        delay(500);
        if(sw_1==0)
        {
            speed();
        }
        if(sw_5==0)
        {
            lcd_2=lcd_2+1;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        delay(500);
    }
    else if(sw_6==0)
    {
        lcd_2=lcd_2-1;
        delay(500);
    }
    if(lcd_2>9)
    {
        lcd_2=0;
    }
    else if(lcd_2<0)
    {
        lcd_2=9;
    }
    if(sw_3==0)
    {
        state=1;
        step_lcd=100;
        delay(500);
    }
    else if(sw_4==0)
    {
        step_lcd=2;
        delay(500);
    }
}

while(step_lcd==2)
{
    if(sw_2==0)
    {
        if(rotate_sw==0)
        {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        rotate_sw=1;
        LCDWI(0x91);
        lcd_puts(0x91,"CCW");
    }
    else
    {
        rotate_sw=0;
        LCDWI(0x91);
        lcd_puts(0x91,"CW");
        LCDWI(0x93);
        LCDWD(0x20);
    }
    delay(800);
}
LCDWI(0xce);
LCDWD(0x20);
delay1(500);
LCDWI(0xce);
LCDWD(0x30+lcd_3);
delay1(500);
if(sw_1==0)
{
    speed();
}
if(sw_5==0)
{
    lcd_3=lcd_3+1;
    delay(500);
}
else if(sw_6==0)
{
    lcd_3=lcd_3-1;
    delay(500);
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if(lcd_3>9)
{
lcd_3=0;
}
else if(lcd_3<0)
{
lcd_3=9;
}
if(sw_3==0)
{
state=1;
step_lcd=100;
delay(500);
}
else if(sw_4==0)
{
step_lcd=3;
delay(500);
}
}
while(step_lcd==3)
{
if(sw_2==0)
{
if(rotate_sw==0)
{
rotate_sw=1;
LCDW1(0x91);
lcd_puts(0x91,"CCW");
}
else
{
rotate_sw=0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        LCDWI(0x91);
        lcd_puts(0x91,"CW");
        LCDWI(0x93);
        LCDWD(0x20);
    }
    delay(800);
}
LCDWI(0x9f);
LCDWD(0x20);
delay1(500);
LCDWI(0x9f);
LCDWD(0x30+lcd_4);
delay1(500);
if(sw_1==0)
{
    speed();
}
if(sw_5==0)
{
    lcd_4=lcd_4+1;
    delay(500);
}
else if(sw_6==0)
{
    lcd_4=lcd_4+1;
    delay(500);
}
}
if(lcd_4>9)
{
    lcd_4=0;
}
else if(lcd_4<0)
{
    lcd_4=9;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    }
    if(sw_3==0)
    {
        state=1;
        step_lcd=100;
        delay(500);
    }
    else if(sw_4==0)
    {
        step_lcd=4;
        delay(500);
    }
}
while(step_lcd==4)
{
    if(sw_2==0)
    {
        if(rotate_sw==0)
        {
            rotate_sw=1;
            LCDWI(0x91);
            led_puts(0x91,"CCW");
        }
        else
        {
            rotate_sw=0;
            LCDWI(0x91);
            led_puts(0x91,"CW");
            LCDWI(0x93);
            LCDWD(0x20);
        }
    }
    delay(800);
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

LCDWI(0xa0);
LCDWD(0x20);
delay1(500);
LCDWI(0xa0);
LCDWD(0x30+lcd_5);
delay1(500);
if(sw_1==0)
{
speed();
}
if(sw_5==0)
{
lcd_5=lcd_5+1;
delay(500);
}
else if(sw_6==0)
{
lcd_5=lcd_5-1;
delay(500);
}
if(lcd_5>9)
{
lcd_5=0;
}
else if(lcd_5<0)
{
lcd_5=9;
}
if(sw_3==0)
{
state=1;
step_lcd=100;
delay(500);
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

else if(sw_4==0)
{
    step_lcd=5;
    delay(500);
}
}

while(step_lcd==5)
{
    if(sw_2==0)
    {
        if(rotate_sw==0)
        {
            rotate_sw=1;
            LCDWI(0x91);
            lcd_puts(0x91,"CCW");
        }
        else
        {
            rotate_sw=0;
            LCDWI(0x91);
            lcd_puts(0x91,"CW");
            LCDWI(0x93);
            LCDWD(0x20);
        }
        delay(800);
    }
    LCDWI(0xa1);
    LCDWD(0x20);
    delay1(500);
    LCDWI(0xa1);
    LCDWD(0x30+lcd_6);
    delay1(500);
    if(sw_1==0)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    {
    speed();
    }
    if(sw_5==0)
    {
        lcd_6=lcd_6+1;
        delay(500);
    }
    else if(sw_6==0)
    {
        lcd_6=lcd_6-1;
        delay(500);
    }
    if(lcd_6>9)
    {
        lcd_6=0;
    }
    else if(lcd_6<0)
    {
        lcd_6=9;
    }
    if(sw_3==0)
    {
        state=1;
        step_lcd=100;
        delay(500);
    }
    else if(sw_4==0)
    {
        step_lcd=0;
        delay(500);
    }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    }
    if(lcd_1==0)
    {
        if(lcd_2==0)
        {
            if(lcd_3==0)
            {
                LCDWI(0x01);
                delay(4);
                lcd_puts(0xc6,"NO DATA");
                delay(5000);
                state=0;
                step_lcd=0;
            }
        }
    }

run()
{
    temp_1=lcd_4*100; /*calculate*/
    temp_2=lcd_5*10;
    delay_va=temp_1+temp_2+lcd_6;
    temp_3=lcd_2/10;
    temp_4=lcd_3/100;
    p=lcd_1+temp_3+temp_4;
    while(state==1)
    {
        if(sw_1==0)
        {
            LCDWI(0x01);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

delay(4);
LCDWI(0xc6);
lcd_puts(0xc6," - - -");
lcd_puts(0x97,"Motor Running!");
for(loop_3=0;loop_3<(2*3.1415);loop_3+=0.5)
{
    temp_sin2=sin(loop_3);
    temp_sin1=cos(loop_3);
    temp_sin2=temp_sin2*1000;
    temp_sin1=temp_sin1*1000;
    if(temp_sin2<=0)
    {
        temp_sin2=temp_sin2*(-1);
        temp_sin2=(temp_sin2*127)/1000;
        output_3=temp_sin2+127;
        output_1=127-temp_sin2;
    }
    else if(temp_sin2>0)
    {
        output_1=(temp_sin2*128)/1000;
        output_3=128-output_1;
        output_1=output_1+127;
    }
    if(temp_sin1<=0)
    {
        temp_sin1=temp_sin1*(-1);
        temp_sin1=(temp_sin1*127)/1000;
        output_4=temp_sin1+127;
        output_2=127-temp_sin1;
    }
    else if(temp_sin1>0)
    {
        output_2=(temp_sin1*128)/1000;
        output_4=128-output_2;
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        output_2=output_2+127;
    }
    if(rotate_sw==1)
    {
        P1=output_1;
        P2=output_2;
        P4=output_3;
        P5=output_4;
    }
    else if(rotate_sw==0)
    {
        P5=output_1;
        P4=output_2;
        P2=output_3;
        P1=output_4;
    }
    LCDWI(0x01);
    delay(4);
}
else
{
    LCDWI(0x80);
    lcd_puts(0x80,"Start");
    delay(4);
    lcd_puts(0xc5,"Micro ");
    LCDWI(0xcb);
    LCDWD(0x30+lcd_1);
    LCDWI(0xcc);
    LCDWD(0x2e);
    LCDWI(0xcd);
    LCDWD(0x30+lcd_2);
    LCDWI(0xce);
    LCDWD(0x30+lcd_3);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

LCDWI(0x99);
led_puts(0x99,"Delay ");
LCDWI(0x9f);
LCDWD(0x30+lcd_4);
LCDWI(0xa0);
LCDWD(0x30+lcd_5);
LCDWI(0xa1);
LCDWD(0x30+lcd_6);
if(rotate_sw==0)
{
    LCDWI(0x91);
    led_puts(0x91,"CW");
    LCDWI(0x93);
    LCDWD(0x20);
}
else
{
    LCDWI(0x91);
    led_puts(0x91,"CCW");
}
for(loop_3=0;loop_3<(2*3.1415);loop_3+=p) /*build sine wave*/
{
    temp_sin2=sin(loop_3);
    temp_sin1=cos(loop_3);
    temp_sin2=temp_sin2*1000;
    temp_sin1=temp_sin1*1000;
    if(temp_sin2<=0)
    {
        temp_sin2=temp_sin2*(-1);
        temp_sin2=(temp_sin2*127)/1000;
        output_3=temp_sin2+127;
        output_1=127-temp_sin2;
    }
    else if(temp_sin2>0)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
    output_1=(temp_sin2*128)/1000;
    output_3=128-output_1;
    output_1=output_1+127;
}
if(temp_sin1<=0)
{
    temp_sin1=temp_sin1*(-1);
    temp_sin1=(temp_sin1*127)/1000;
    output_4=temp_sin1+127;
    output_2=127-temp_sin1;
}
else if(temp_sin1>0)
{
    output_2=(temp_sin1*128)/1000;
    output_4=128-output_2;
    output_2=output_2+127;
}
if(rotate_sw==1) /*export sine wave*/
{
    P1=output_1;
    P2=output_2;
    P4=output_3;
    P5=output_4;
}
else if(rotate_sw==0)
{
    P5=output_1;
    P4=output_2;
    P2=output_3;
    P1=output_4;
}
if(sw_1==0)
{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

}

i_LCD();
rotate_sw=0;
state=0;
step_lcd=0;
led_1=led_2=led_3=led_4=led_5=led_6=0;
wel();
while(1)
{
    set();
    run();
}
}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้