

เทคนิคการกระตุ้นกระแสสำหรับสเตปปีงมอเตอร์

EXCITATION CURRENT TECHNIC FOR STEPPING MOTOR



โดย

นายเกียรติศักดิ์ เพ็ชรมี

นายณัฐวุฒิ โกฤกุล

นายสมโภชน์ จริยโสธร

เลขที่.....  
เลขทะเบียน... 36794  
วัน, เดือน, ปี... 29 ต.ค. 2543

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา 2542 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2542

ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เทคนิคการกระตุ้นกระแสสำหรับสเตปปีงมอเตอร์

EXCITATION CURRENT TECHNIC FOR STEPPING MOTOR

ผู้จัดทำ

นายเกียรติศักดิ์ เพ็ชรมี 40012079

นายณัฐวุฒิ โกฏิกุล 40012087

นายสมโภชน์ จริยโสธร 40012105

อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ไสว พงศ์สวัสดิ์)

(อาจารย์วิศรุต ศรีรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## EXCITATION CURRENT TECHNIC FOR STEPPING MOTOR

<b>Staff</b>	Mr.Kiattisak	Pedmee	40012079
	Mr.Nattawut	Kotikul	40012087
	Mr.Somphoch	Chariyasothorn	40012105

<b>Advisor</b>	Mr.Sawai	Pongswatd
	Mr.Wissarut	Srirattana

### Abstract

There are many methods for activating a stepping motor at high frequency range. The one that is often used for this kind of activating is applying high frequency pulses into the motor. Although this methods is often used, it brings lots of effects such as slipping out of a right position that we've expected and when the motor stop moving it causes heat in the motor's body. This thesis for avoid those effects then sinusoidal activating is presented. In order to decrease an excitation induce voltage, then we join an encoder to the stepping motor. The Output of the encoder will be decoded and become sine and cosine signals. Sine cosine signals are sent to a driving motor circuit . For more convenience this thesis connected its system to a computer. Consequently we can verify system error.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุก ๆ ท่านทั้งที่กล่าวถึงและไม่ได้กล่าวถึงที่ให้ความร่วมมือและช่วยเหลือมา โดยตลอด จนกระทั่งโครงการสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ท่านอาจารย์ประภาส - อุกคภิมาพันธ์ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ แนะนำ ให้คำปรึกษา และแก้ปัญหาให้มาโดยตลอด ขอขอบคุณท่านอาจารย์วิศรุต ศรีรัตนะที่ช่วยประสานงานและตรวจสอบปริิณยานิพนธ์ให้ อีกท่านหนึ่งคือท่านอาจารย์ไสว พงศ์สวัสดิ์ ซึ่งเป็นรุ่นพี่ที่ใจดี เป็นอาจารย์ที่คอยเกี่ยวเชิญ โดยท่านอาจารย์ เป็นผู้รับภาระตลอดมานับตั้งแต่ท่านอาจารย์แนะนำโครงการให้ จนมาถึงกระทั่งโครงการสำเร็จ ลุล่วงตามวัตถุประสงค์ในปัจจุบัน

ขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่เลี้ยงดูและให้โอกาสมาจนกระทั่งทุกวันนี้ รวมถึงพระคุณต่าง ๆ ที่ไม่อาจกล่าวพรรณนาออกมาได้หมดสิ้น

ขอบคุณประเทศไทย และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง แห่งนี้ ที่เอื้ออำนวยสถานที่พักพิง ตลอดจนเครื่องมือเครื่องมื่อต่าง ๆ ในการทำโครงการนี้จนผ่านไปได้อย่างดี

นายเกียรติศักดิ์ เพ็ชรมี  
นายณัฐวุฒิ โกฏิกุล  
นายสมโภชน์ จริบโสธร

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 หลักการทำงานของสเตปป์มอเตอร์	5
2.1.1 คุณลักษณะทางสถิตย์ (Static Characteristics)	6
2.1.2 คุณลักษณะทางพลวัต (Dynamic Characteristics)	8
2.2 ประเภทของสเตปป์มอเตอร์	9
2.2.1 สเตปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Stepping Motor)	9
2.2.2 สเตปป์มอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้ (Variable Reluctance Stepping Motor)	11
2.2.3 สเตปป์มอเตอร์แบบไฮบริดจ์ (Hybrid Stepping Motor)	12
2.3 วงจรขับสำหรับสเตปป์มอเตอร์	14
2.3.1 การใช้ตัวต้านทานต่ออนุกรมกับวงจรขับ	15
2.3.2 การใช้วงจรขับแบบใช้แรงดันไฟฟ้าสองระดับ	17
2.3.3 การใช้วงจรขับแบบชอปเปอร์	18
2.3.4 การใช้วงจรขับแบบบริดจ์	19
2.4 การอินเทอร์เฟส	21
2.5 เดลไฟล์ ( Delphi )	23
2.5.1 หน้าจอของเดลไฟล์	23
2.5.2 หน้าต่างหลัก	24
2.5.3 หน้าต่างฟอร์ม	25
2.5.4 หน้าต่างยูนิต	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.5 หน้าต่างออบเจกต์อินสเปกเตอร์	26
บทที่ 3 การออกแบบและพัฒนา	28
3.1 การออกแบบระบบควบคุมความเร็ว	28
3.2 DC BRUSHLESS MODE	29
3.2.1 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแรงดันไฟฟ้า	29
3.2.2 ชุดวงจรปรับค่าระดับแรงดันไฟฟ้าสำหรับวงจรขับเคลื่อน	30
3.2.3 วงจรสวิตซ์ตัดต่อ	31
3.2.4 วงจรขับเคลื่อนแบบสองแกนขวาง	32
3.2.5 หน่วยจัดการข้อมูล (State & Sequencer) และวงจรถอดรหัส (DAC)	34
3.2.6 ส่วนตัวเข้ารหัสและสเตปมอเตอร์ (Encoder & Stepping Motor)	36
3.2.7 วงจรนับสัญญาณ	37
3.3 STEPPING MODE	38
3.4 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม	39
3.4.1 STEPPING MODE	42
3.4.2 DC BRUSHLESS MODE	42
3.4.3 COMPARE MODE	43
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	47
1 การทดลองปรับค่าแรงดันไฟฟ้าควบคุม และดูผลของระดับแรงเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไป	48
2 การทดลองความถี่ที่วงจรมอเตอร์จับได้	42
3 การทดลองในโหมดซีบรัชเลส	51
4 การทดลองเปรียบเทียบความเร็วที่แปรไปตามค่าแรงดัน ที่จ่ายให้กับ DC MOTOR ใน COMPARE MODE	53
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	57
ภาคผนวก	58

## สารบัญญตาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	3
ภาพที่ 2.2 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ	4
ภาพที่ 2.3 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ตัวหมุนเป็นแม่เหล็กถาวร	4
ภาพที่ 2.4 แสดงการหมุนเป็นสเตป	5
ภาพที่ 2.5 การหมุนแบบต่อเนื่อง	5
ภาพที่ 2.6 แสดงกราฟคุณลักษณะของแรงบิดต่อมุมสเตป	7
ภาพที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์คุณลักษณะแรงบิดต่อกระแส	7
ภาพที่ 2.8 แสดงกราฟลักษณะพลวัตของสเตปปึงมอเตอร์	8
ภาพที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของสเตปปึงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรสี่เฟส	9
ภาพที่ 2.10 แสดงโครงสร้างสเตปปึงมอเตอร์แบบแปรความต้านทานสนามแม่เหล็กได้	10
ภาพที่ 2.11 แสดงตำแหน่งของสถานะที่สมมูลย์เมื่อเกิดการกระตุ้นที่เฟสใดเฟสหนึ่ง	11
ภาพที่ 2.12 แสดงหน้าตัดของมอเตอร์สี่เฟส ที่มีฟันโรเตอร์ห้าสิบซี่มุมสเตป 1.8 องศา	11
ภาพที่ 2.13 แสดงโครงสร้างของสเตปปึงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์	12
ภาพที่ 2.14 แสดงภาพการวางโรเตอร์ตามยาวเพื่อใช้สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กขั้วเดียวกัน	12
ภาพที่ 2.15 แสดงหลักการการทำงานของสเตปปึงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์	13
ภาพที่ 2.16 แสดงวงจรสมมูลย์ของสเตปปึงมอเตอร์	13
ภาพที่ 2.17 แสดงการใช้ความต้านทานต่ออนุกรมกับขดลวดของสเตปปึงมอเตอร์	14
ภาพที่ 2.18 แสดงการเพิ่มตัวเก็บประจุในแต่ละส่วนของวงจรจำกัดแรงดัน	15
ภาพที่ 2.19 แสดงผลการเพิ่มตัวเก็บประจุขนานกับความต้านทาน	15
ภาพที่ 2.20 แสดงวงจรขับสเตปปึงมอเตอร์แบบแรงดันไฟฟ้าสองระดับ	16
ภาพที่ 2.21 แสดงวงจรขับแบบชอปเปอร์	17
ภาพที่ 2.22 แสดงวงจรขับแบบบริดจ์ สำหรับการขับแบบสองภาวะขั้ว	18
ภาพที่ 2.23 แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสของการขับสเตปปึงมอเตอร์แบบสองภาวะ	19
ภาพที่ 2.24 แสดงวงจรขับแบบบริดจ์อีกแบบหนึ่งซึ่งใช้แหล่งจ่ายไฟเดียว	19
ภาพที่ 2.25 แสดงบิตต่างๆ ของคำสั่งควบคุม	20
ภาพที่ 2.26 หน้าจอของเดสทอปล์โดยรวม	22
ภาพที่ 2.27 หน้าต่างหลัก	24
ภาพที่ 2.28 สปีคบาร์หน้าต่างหลัก	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 2.29 หน้าต่างฟอร์ม ( Form )	25
ภาพที่ 2.30 หน้าต่างยูนิต ( Unit )	25
ภาพที่ 2.31 หน้าต่างออบเจกต์อินสเปกเตอร์ (Object Inspector)	26
ภาพที่ 3.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมความเร็วที่ออกแบบไว้	28
ภาพที่ 3.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมความเร็วของโหมด DC BRUSHLESS	29
ภาพที่ 3.3 แสดงวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแรงดันไฟฟ้า	30
ภาพที่ 3.4 แสดงวงจรปรับค่าระดับแรงดันไฟฟ้าสำหรับวงจรขับเคลื่อน	31
ภาพที่ 3.5 แสดงวงจรสวิตซ์ตัดต่อ	31
ภาพที่ 3.6 แสดงวงจรขับที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น	33
ภาพที่ 3.7 แสดงสัญญาณของคาร์บอนเวลาทำงานที่ได้จากการมอดูเลตตามความกว้าง	33
ภาพที่ 3.8 แสดงวงจรถอดรหัสสัญญาณชาขนและ โคชาขน	35
ภาพที่ 3.9 แสดงลักษณะของสัญญาณชาขนและ โคชาขนที่ได้จากวงจรถอดรหัส	35
ภาพที่ 3.10 แสดงวงจรมับสัญญาณ	37
ภาพที่ 3.11 แสดงบล็อก ไดอะแกรมของระบบควบคุมความเร็วของโหมด STEPPING	38
ภาพที่ 3.12 แสดงแผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม	40
ภาพที่ 3.13 รูปหน้าตาของโลโก้ของโปรแกรม	41
ภาพที่ 3.14 แสดงหน้าตาหลักของโปรแกรม	41
ภาพที่ 3.15 แสดงหน้าตาการทำงานของโหมด STEPPING	42
ภาพที่ 3.16 แสดงหน้าตาการทำงานของโหมด DC BRUSHLESS	42
ภาพที่ 3.17 แสดงหน้าตาการทำงานของโหมด COMPARE	42
ภาพที่ 3.18 แสดงปุ่มที่ใช้ควบคุมการทำงานและการแสดงผลต่าง ๆ	43
ภาพที่ 3.19 ส่วนของการควบคุมความเร็วมอเตอร์	44
ภาพที่ 3.20 แสดงความเร็วของมอเตอร์ใน DC BRUSHLESS MODE และ STEPPING MODE	44
ภาพที่ 3.21 แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ใน COMPARE MODE	44
ภาพที่ 3.22 แสดงปุ่มควบคุมการกลับสู่เมนูหลัก	45
ภาพที่ 3.23 แสดงปุ่มออกจากการทำงาน	45
ภาพที่ 3.24 ปุ่มแสดงค่าของกราฟแสดงผลที่จุดต่าง ๆ	45

### สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.25 ปุ่มแสดงภาพก่อนพิมพ์	46
ภาพที่ 3.26 แสดงปุ่มที่ใช้ในการเก็บข้อมูลที่จะนำมาแสดงผล	46
ภาพที่ 3.27 แสดงปุ่มที่ใช้ในการแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับ ความเร็วที่แปรเปลี่ยนตาม	46
ภาพที่ 3.28 แสดงปุ่มที่ใช้ในการหยุดการทำงานพร้อมกับการหยุดแสดงกราฟ	46
ภาพที่ 4.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมความเร็วที่ออกแบบขึ้น	47
ภาพที่ 4.2 แสดงวงจรจ่ายแรงดันเปลี่ยนแปลงค่าได้	48
ภาพที่ 4.3 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันควบคุมกับแรงดันเอาต์พุต	49
ภาพที่ 4.4 แสดงวงจรมัดความเร็ว	50
ภาพที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณพัลส์อินพุตกับความเร็วเอาต์พุตที่นับได้	51
ภาพที่ 4.6 ส่วนของการควบคุมแรงดัน	51
ภาพที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงแรงดันกับความเร็วของมอเตอร์ ใน DC BRUSHLESS MODE	53
ภาพที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงแรงดันกับความเร็วของDC MOTOR ใน COMPARE MODE	55

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าขณะที่มีการเปลี่ยนแปลง แรงดันควบคุม	49
ตารางที่ 4.2 แสดงผลของความถี่ที่ตรวจวัดได้ โดยวงจรนับที่ออกแบบพัฒนาขึ้น	50
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของความเร็วมอเตอร์เมื่อแรงดันเปลี่ยนจาก 0-100 %	52
ตารางที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงแรงดันกับความเร็ว ของDC MOTOR ใน COMPARE MODE	54



# บทที่ 1

## บทนำ

มอเตอร์ไฟฟ้าจัดได้ว่าเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับข้อต่อการผลิตในอุตสาหกรรม และเป็นส่วนประกอบในเครื่องใช้ต่างๆ ทั้งในงานควบคุมและงานต้นกำลัง อีกทั้งยังสามารถทำการควบคุมได้ด้วยกระบวนการทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยทั่วไปมอเตอร์ไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งแต่ละประเภทจะมีข้อดีข้อด้อยต่างกันออกไป กล่าวคือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นจะให้แรงบิดขณะเริ่มหมุนสูง การปรับความเร็วทำได้ง่าย การหมุนราบเรียบ และทำการควบคุมความเร็วได้ง่าย แต่มีข้อด้อย คือ ตัวมอเตอร์จะมีขนาดใหญ่กว่าและราคาก็แพงกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ นอกจากนี้ในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดใหญ่ต้องมีกรรมวิธีในการสตาร์ทที่ยุ่งยากและต้องมีการซ่อมบำรุงรักษาเกี่ยวกับแปรงถ่าน มีขีดจำกัดทางด้านแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากมีคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ส่วนในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับนั้นตัวมอเตอร์จะมีขนาดเล็กและไม่มีแปรงถ่าน แต่แรงบิดขณะเริ่มหมุนและการหมุนที่หมุนด้วยความเร็วรอบต่างๆไม่ดี ดังนั้นหากมีการพัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ใช้การควบคุมการกระตุ้นเหมือนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแล้วจะสามารถทำให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับนั้นมีแรงบิดขณะเริ่มหมุนที่ดี และให้ผลการตอบสนองที่สูงขึ้น ลดสัญญาณรบกวนและการซ่อมบำรุงให้น้อยลง ซึ่งจะทำให้สามารถนำมอเตอร์ดังกล่าวนี้ไปใช้งานได้กว้างขวางยิ่งขึ้น

ปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้เป็นการออกแบบและพัฒนาระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้สเตปปีงมอเตอร์ (Stepping Motor) เป็นกรณีศึกษาโดยการใช้การกระตุ้นในรูปแบบกระแสชาน์แบบลูปิด เพื่อให้การหมุนของ สเตปปีงมอเตอร์เป็นไปอย่างราบเรียบและต่อเนื่อง มีแรงบิดขณะเริ่มหมุนที่ดีเทียบเคียงได้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกขดกระตุ้น และได้ออกแบบระบบควบคุมความเร็วแบบลูปิดโดยการควบคุมค่ากระแสชาน์ที่ใช้ในการกระตุ้น เพื่อควบคุมให้มอเตอร์มีค่าความเร็วรอบที่คงที่ในสภาวะงานขนาดต่าง ๆ ซึ่งปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้เป็นการวิจัยและพัฒนาต่อเนื่องในด้านการพัฒนาการควบคุมระบบขับเคลื่อน ได้มีการพัฒนาให้มีการนำคอมพิวเตอรืเข้ามาประยุกต์ใช้ในการควบคุมโดยเป็นลักษณะที่ใช้การติดต่อ ระหว่างอุปกรณ์ระบบขับเคลื่อนทางด้านฮาร์ดแวร์ (Hardware) กับ โปรแกรมควบคุมจากคอมพิวเตอร์ (Software) โดยการผ่านทางการ์ดอินเทอร์เฟซ (Interface Card) ซึ่งเป็นลักษณะโปรแกรมสำเร็จรูป สามารถเรียกใช้งานหรือทำงานได้ตลอดเวลา จึงทำให้สามารถควบคุมระบบและสามารถทำความเข้าใจเกี่ยวกับการใช้งานได้ง่ายสะดวก

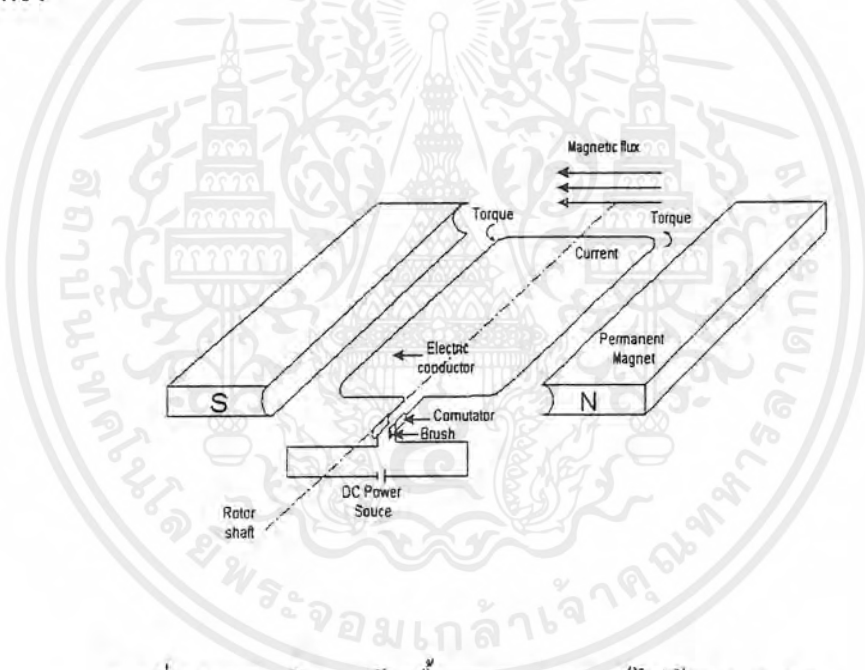
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และรวดเร็วยิ่งขึ้นด้วยเพื่อพัฒนาระบบขับเคลื่อนสเตปป์ิงมอเตอร์ ในรูปแบบกระแสชาชนแบบ  
 ลูปปิดที่มีการหมุนอย่างราบเรียบและต่อเนื่องให้สามารถทำงานได้ในสถานะที่มีภาระงาน โดย  
 มีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาระบบขับเคลื่อนและระบบควบคุมสเตปป์ิงมอเตอร์ในการ  
 ควบคุมความเร็วให้คงที่ตามที่ต้องการ ซึ่งจะทำได้สามารถนำสเตปป์ิงมอเตอร์ไปใช้งานแทน  
 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่เชื่อมกับเครื่องจักรกลและเครื่องมือต่างๆ ซึ่งในปฏิญญาพันธบัตร  
 นี้ได้ใช้สเตปป์ิงมอเตอร์ในการทดลอง เป็นมอเตอร์ขนาดเล็ก 4 เฟส ที่มีค่าแรงดันพิกัดไฟฟ้าขาเข้า  
 24 โวลต์ต่อเฟส ค่ากระแสพิกัด 0.3 แอมป์ต่อเฟส ค่าความต้านทาน 0.8 โอห์ม และความละเอียด  
 200 สเตปป์ิงรอบเป็นกรณีศึกษาในการพัฒนาและควบคุมการทำงาน และใช้ภาระงานจำลองแบบ  
 กระแสไหลวน (Eddy Current Break) ในการทดสอบการควบคุมความเร็วและจากการทดลองโดย  
 การใช้ภาระงานจำลองแบบกระแสไหลวน ปรากฏว่าระบบควบคุมที่มีภาระงานและไม่มีภาระงาน  
 มีการทำงานใกล้เคียงกันและในการทดลองนำระบบขับเคลื่อนดังกล่าวไปใช้กับระบบควบคุม  
 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยทั่วไป ผลปรากฏว่าระบบขับเคลื่อนที่ได้ออกแบบไว้ก็สามารถทำงาน  
 ได้เช่นเดียวกันอีกทั้งสเตปป์ิงมอเตอร์ที่ได้ทำการพัฒนาระบบขับเคลื่อนและระบบควบคุมดังกล่าว  
 มีขนาดเล็กและ ไม่มีแปรงถ่าน ไม่มีซีคอมมิวเตเตอร์ จึงลดแรงเสียดทานทางกลระหว่างแปรงถ่าน  
 กับคอมมิวเตเตอร์และทนต่อกระแสขับเคลื่อนต่อเนื่องได้สูง ลดสัญญาณรบกวนและการซ่อมบำรุง  
 อีกทั้งการสูญเสียในรูปแบบของความร้อนจะลดลงเมื่อเทียบกับสเตปป์ิงมอเตอร์โดยทั่วไป

## บทที่ 2

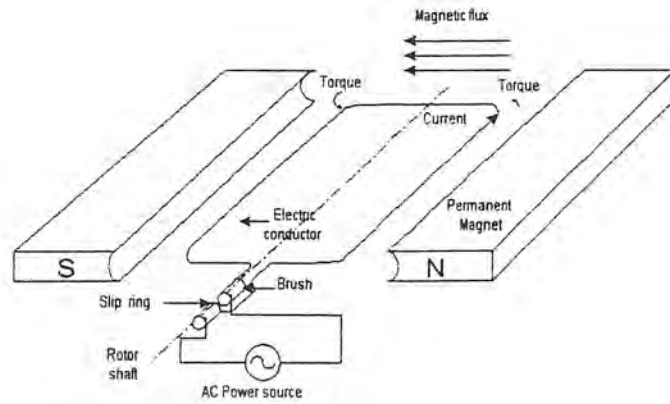
### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

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

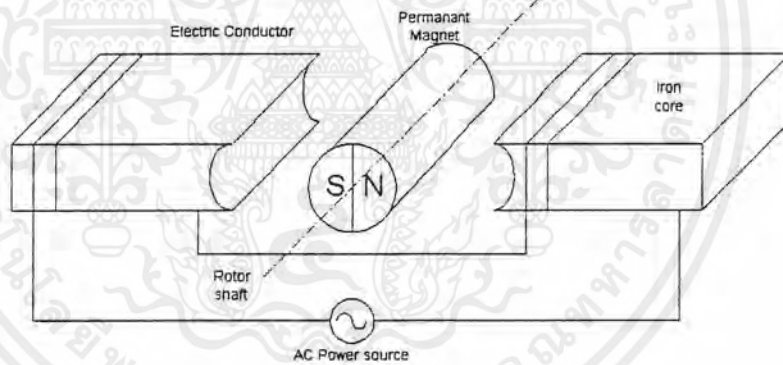


ภาพที่ 2.1 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

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



ภาพที่ 2.2 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ



ภาพที่ 2.3 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ตัวหมุนเป็นแม่เหล็กถาวร

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านนั้นจะอาศัยโครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับตามภาพที่ 2.3 โดยใช้วงจรจับควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดตัวนำในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้สอดคล้องกับการหมุนของตัวหมุนที่เป็นแม่เหล็กถาวร

ในปริณิญาฉบับนี้ได้มีการออกแบบและพัฒนาวงจรจับเคลื่อนและระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เป็นกรณีศึกษา ดังนั้นเพื่อเป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับมอเตอร์

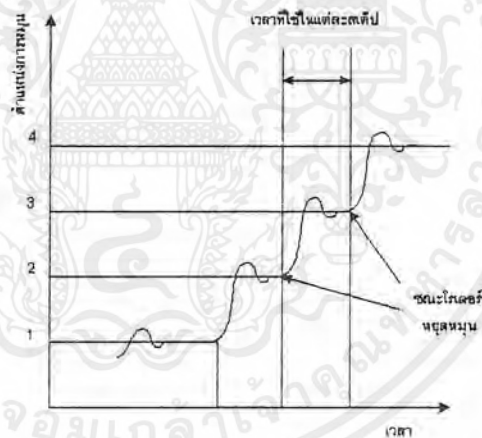
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้ากระแสสลับที่เป็นสเตปป์มอเตอร์และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เนื้อหาในเรื่องนี้จึงกล่าวถึง หลักการทำงานตลอดจนหลักในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ดังกล่าว

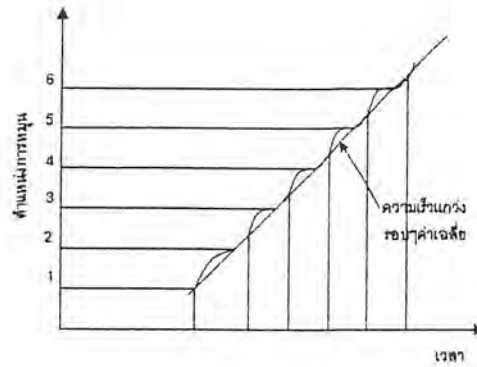
## 2.1 หลักการทำงานของสเตปป์มอเตอร์

สเตปป์มอเตอร์เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิดหนึ่ง que เปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลเป็นการ เคลื่อนที่ทางกล จึงเหมาะสำหรับการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ทางดิจิทัลหรือคอมพิวเตอร์ การทำงาน ของสเตปป์มอเตอร์ในลำดับที่ถูกต้องด้วยวงจรจัดลำดับลอจิกและกระแสที่พอเพียงด้วยวงจรขับ ซึ่งจะ ได้กล่าวโดยละเอียดในหัวข้อ 2.3 ต่อไป

การทำงานของสเตปป์มอเตอร์ตามอัตราเร็วของแต่ละสเตปป์จะแบ่งออกเป็น 2 โหมดการทำงาน คือ โหมดของการหมุนเป็นสเตปป์ (Discrete Mode) และโหมดของการหมุนแบบต่อเนื่อง (Slewing Mode)



ภาพที่ 2.4 แสดงการหมุนเป็นสเตปป์



ภาพที่ 2.5 การหมุนแบบต่อเนื่อง

จากภาพที่ 2.4 แสดงลักษณะการหมุนแบบสเตปซึ่งมีเวลาหยุดนิ่งก่อนที่จะเปลี่ยนสเตปถัดไป ดังนั้นหากมีการเพิ่มอัตราเร็วในแต่ละสเตปให้เร็วขึ้นเป็นไปอย่างต่อเนื่อง การหมุนของสเตปปีงมอเตอร์ก็จะต่อเนื่องดังแสดงในภาพที่ 2.5 ในการนำสเตปปีงมอเตอร์ไปใช้งานไม่ว่าจะเป็นโหมคการทำงานแบบใดหรือเป็นสเตปปีงมอเตอร์แบบไหน ควรจะมีการศึกษาคุณลักษณะต่างๆ เช่น แรงบิด การตอบสนองต่อความถี่สูงสุด และความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดกับค่าของกระแส ทั้งนี้เพื่อให้สามารถควบคุมการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งคุณลักษณะเหล่านี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองลักษณะ คือ

### 2.1.1 คุณลักษณะทางสถิตย์ (Static Characteristics)

คุณลักษณะทางสถิตย์ หมายถึง คุณลักษณะในสภาวะที่มอเตอร์หยุดนิ่งไม่มีการเคลื่อน ไหวซึ่งตำแหน่งที่มีความสมดุลของการหมุนมากที่สุดก็คือตำแหน่งที่ซี่ฟันของโรเตอร์และซี่ฟันของสเตเตอร์มีความสัมพันธ์กันอยู่ในแนวเดียวกัน และยังคงอยู่ในตำแหน่งนี้จนกว่าจะมีการกระตุ้นอีกครั้ง โดยที่ตำแหน่งสมดุลของโรเตอร์มีค่าของแรงบิดเท่ากับศูนย์ ซึ่งถ้าโรเตอร์มีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง มอเตอร์ก็จะทำการสร้างสมดุลให้กับโหลดโดยการสร้างแรงบิดขึ้นมาในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ ผลของแรงบิดกับการเคลื่อนที่ของโรเตอร์จะมีลักษณะคล้ายกับรูปคลื่นซายน์

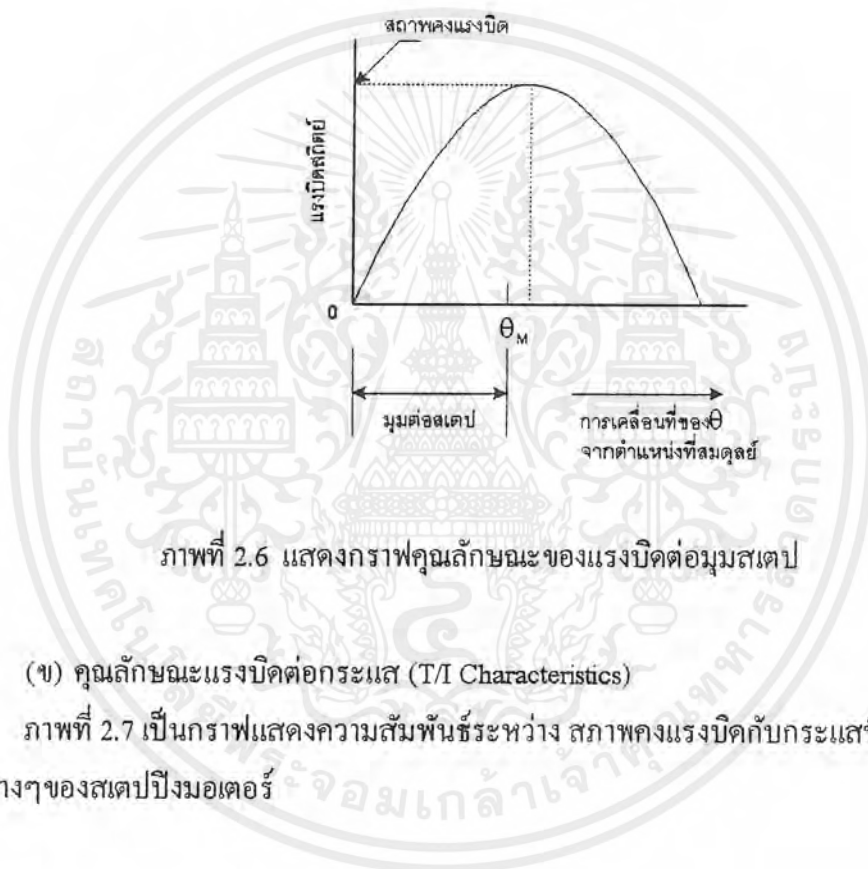
แรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับกระแสที่จ่ายให้เฟสนั้นๆ โดยที่แรงบิดนี้ เรียกว่า สภาพคงแรงบิด (Holding Torque) หรือ แรงบิดสถิตย์ (Static Torque) และคุณลักษณะความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างค่าของแรงบิดกับกระแสที่เปลี่ยนแปลงไปจะเป็นลักษณะเชิงเส้น แต่ก็จะมีขีดจำกัดอยู่ที่จุดอิ่มตัวแม่เหล็กของทั้งโรเตอร์และสเตเตอร์ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแม่เหล็ก โดยที่จุดอิ่มตัวนี้จะ ไม่มีการเพิ่มขึ้นของแรงบิดแม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของกระแสเฟสก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณลักษณะทางสถิตย์จะแสดงความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

(ก) คุณลักษณะของแรงบิดกับมุมสเตป ( $T/\theta$  Characteristics)

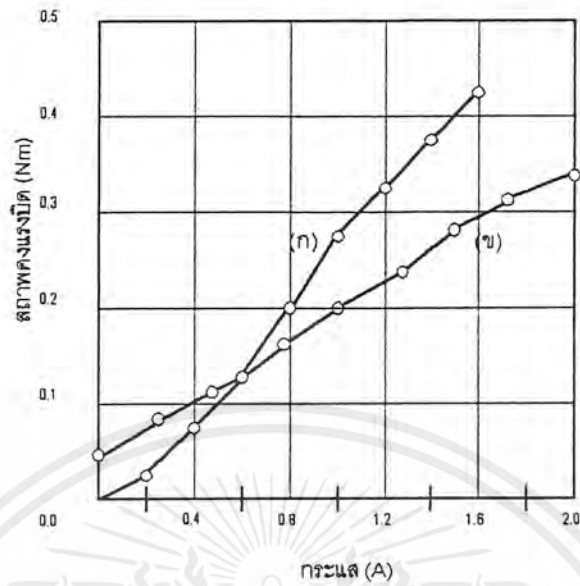
ภาพที่ 2.7 จะเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ แรงบิดสถิตย์สูงสุดที่เกิดขึ้น เรียกว่า สภาพคงแรงบิดที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง  $\theta = \theta_m$  ตำแหน่งที่เกิด สภาพคงแรงบิดขั้นมูลฐานทั้งหมดของมอเตอร์ แสดงถึงแรงบิดที่มีการสะสมอยู่ที่ตัวมอเตอร์โดย จะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของโรเตอร์ แรงบิดสถิตย์จะมีจุดเริ่มต้นที่สภาพคงแรงบิด



ภาพที่ 2.6 แสดงกราฟคุณลักษณะของแรงบิดต่อมุมสเตป

(ข) คุณลักษณะแรงบิดต่อกระแส ( $T/I$  Characteristics)

ภาพที่ 2.7 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สภาพคงแรงบิดกับกระแสที่จ่ายให้กับ เฟส ต่างๆของสเตปปีงมอเตอร์

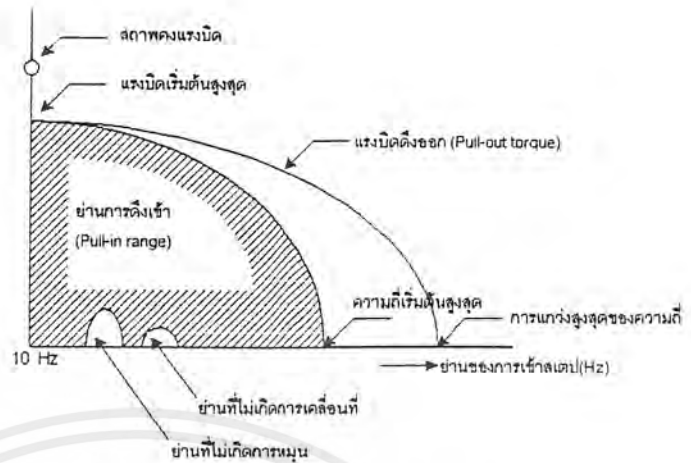


- (ก) คือสเตปป์มอเตอรืแบบแปรค่าความต้านทานทางแม่เหล็กเฟส โดยมีมุมสเตปเท่ากับ 1.8 องศา
- (ข) คือไฮบริดจัมมอเตอรืเฟส มุมสเตปเท่ากับ 1.8 องศา

ภาพที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์คุณลักษณะแรงบิดต่อกระแส

### 2.1.2. คุณลักษณะทางพลวัต (Dynamic Characteristics)

ในการพิจารณาคุณลักษณะสถิตย์ของแรงบิดของสเตปป์มอเตอรื จะพิจารณาก็คือเมื่อไม่มีการเคลื่อนที่ของเพลามอเตอรื แต่การพิจารณาคุณลักษณะทางพลวัตของสเตปป์มอเตอรื นั้น จะมองถึงความสามารถในการสร้างแรงบิดที่สัมพันธ์กับความเร็ว โดยสามารถศึกษาได้จากคู่มือ (Data Sheet) ของบริษัทผู้ผลิต ดังตัวอย่างในภาพที่ 2.8 ซึ่งจะบอกถึงรายละเอียดการใช้งานดังนี้



ภาพที่ 2.8 แสดงกราฟลักษณะพลวัตของสแตปปีงมอเตอร์

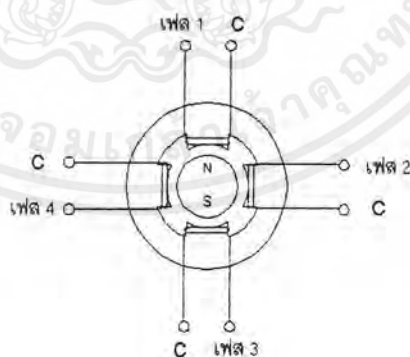
- (ก) คุณลักษณะของแรงบิดดึงเข้า (Pull-in Torque) เป็นคุณลักษณะเริ่มต้น และจะอ้างอิงกับย่านของแรงบิดที่เกิดจากแรงเสียดทานของโหลดที่ซึ่งมอเตอร์สามารถเคลื่อนที่และหยุดได้โดยปราศจากการสูญเสียในสแตป สำหรับย่านความถี่ต่าง ๆ ที่ใช้นั้น จำนวนของพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบจะอยู่ในช่วง 100 เฮิร์ตซ์ (Hz) หรือใกล้เคียง
- (ข) คุณลักษณะของแรงบิดดึงออก (Pull-out Torque) สำหรับพิจารณาคุณลักษณะในขณะที่มอเตอร์เคลื่อนที่ หลังจากที่ได้ทำการทดสอบมอเตอร์ให้เกิดการเคลื่อนที่โดยใช้วงจรขับเคลื่อนลักษณะพิเศษ ในกรณีของการกระตุ้นในย่านของการเคลื่อนที่ด้วยตนเอง (Self Starting Range) ความถี่ของพัลส์จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งมอเตอร์เกิดการเคลื่อนที่โดยปราศจากการเข้าจิ้งหะ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่เกิดจากแรงเสียดทานของโหลดกับความถี่พัลส์สูงสุดจะทำให้มอเตอร์สามารถเคลื่อนที่ได้โดยมีการเข้าจิ้งหะ ซึ่งเรียกว่า คุณลักษณะดึงออก ดังภาพที่ 2.8 โดยที่ขนาดของเส้นโค้งดึงออกจะขึ้นอยู่กับวงจรขับเคลื่อน การต่อเชื่อม (Coupling) เครื่องมือที่ใช้ในการวัด (Measuring Instruments) และเงื่อนไขอื่น
- (ค) ความถี่สูงสุดที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (Maximum Starting Frequency) เป็นการกำหนดการควบคุมความถี่สูงสุดให้มอเตอร์เคลื่อนที่และหยุดได้ในขณะที่ไม่มีโหลดโดยปราศจากการสูญเสียทางสแตป

- (ง) ระดับสูงสุดของอัตราการดึงออก (Maximum Pull-out Rate) เป็นการกำหนดค่าความถี่สูงสุดในขณะที่มอเตอร์สามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อไม่มีโหลดโดยปราศจากการสูญเสียทาง สเตป
- (จ) แรงบิดสูงสุดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ (Maximum Starting Torque) เรียกว่าแรงบิดดึงเข้าสูงสุด (Maximum Pull-in Torque) และเป็นการกำหนดค่าของแรงบิดที่เกิดจากแรงเสียดทานสูงสุดของโหลด ซึ่งทำให้มอเตอร์สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างเข้าจังหวะ กับพัลส์ที่มีความถี่ต่ำประมาณ 10 เฮิร์ตซ์

## 2.2 ประเภทของสเตปปีงมอเตอร์

### 2.2.1 สเตปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Stepping Motor)

สเตปปีงมอเตอร์ชนิดนี้จะใช้แม่เหล็กถาวรเป็นโรเตอร์ และมีซี่ฟันของสเตเตอร์ล้อมรอบภาพที่ 2.9 ตัวอย่างสเตปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรสี่เฟส โดยที่โรเตอร์เป็น ทรงกระบอก สเตเตอร์มีซี่ฟันสี่ซี่ โดยที่แต่ละซี่จะมีขดลวดพันโดยรอบเพื่อทำให้เกิดการสร้างสนามแม่เหล็กเมื่อต้องการให้สเตปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรมีขนาดมุมสเตป (Step) ลึกลงจะต้องเพิ่มจำนวนขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์และหรือจำนวนซี่ฟันของสเตเตอร์ แต่ก็มีขีดจำกัด ในการเพิ่มจำนวนขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ ทั้งนี้เนื่องจากการสร้างแม่เหล็กถาวรให้มีโครงสร้างแบบมีขั้วแม่เหล็กหลาย ๆ ขั้วนั้นทำได้ยาก



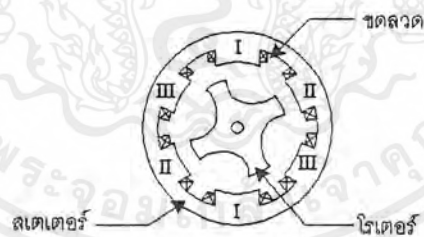
ภาพที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของสเตปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรสี่เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะทั่วไปของมอเตอร์แบบนี้ก็คือ โรเตอร์จะถูกยึดอยู่กับที่แม้ว่าจะไม่มีการกระตุ้นเฟส ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า ดีเทนท์แมคคาไนซั่ม (Detent Mechanism) ข้อเสียของสเตปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรคือมีขนาดมุมสเตปป์ใหญ่ทำให้ความละเอียดของสเตปป์ต่อรอบน้อยมากเนื่องจากว่าโครงสร้างของมอเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร การสร้างแม่เหล็กถาวรให้มีหลายขั้วทำได้ยากดั่งที่กล่าวมาแล้ว ทำให้ไม่สามารถสร้างสเตปป์ให้มีขนาดเล็กลงได้ สเตปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างขนาดเล็กทำให้ค่าของแรงบิดที่ได้ต่อหน่วยปริมาตรมีค่าต่ำ ถ้าต้องการปรับปรุงประสิทธิภาพในเรื่องของแรงบิดแม่เหล็กถาวรที่ใช้จะต้องทำมาจากสารแม่เหล็กที่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กสูง

### 2.2.2 สเตปป์มอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้ (Variable Reluctance Stepping Motor)

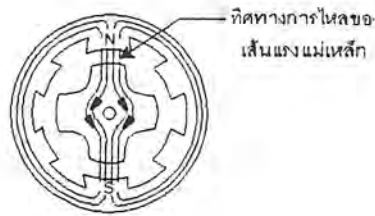
สเตปป์มอเตอร์ชนิดนี้เราสามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า วีอาร์สเตปป์มอเตอร์ (VR Stepping Motor) โดยโครงสร้างมีโรเตอร์และสเตเตอร์ที่ทำจากโลหะซิลิคอน (Silicon) ซึ่งเป็นสารแม่เหล็กที่มีสภาพซึมซาบทางแม่เหล็ก (Permeability) สูงและสามารถให้เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านได้มาก โดยโรเตอร์จะติดอยู่กับแกนของมอเตอร์และสเตเตอร์จะติดอยู่กับโครงของตัวมอเตอร์



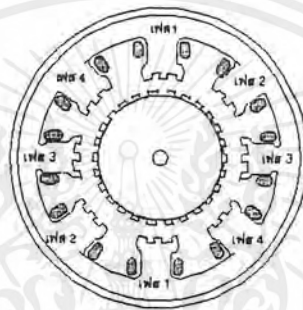
ภาพที่ 2.10 แสดงโครงสร้างสเตปป์มอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานสนามแม่เหล็กได้

ภาพที่ 2.10 เป็นภาพตัดขวางของสเตปป์มอเตอร์ซึ่งเป็นมอเตอร์สามเฟส โดยที่โรเตอร์มีซี่ฟันสี่ซี่ และสเตเตอร์จะมีซี่ฟันหกซี่ อยู่ในตำแหน่งตรงข้ามและทำมุม 180 องศา ต่อกันหรือขนานกันก็ได้ แต่ในภาพต่อในลักษณะอนุกรม จะเห็นว่าฟันของสเตเตอร์สองซี่ที่มีเฟสเดียวกันจะมีขั้วแม่เหล็กตรงข้ามซึ่งกันและกัน ส่วนภาพที่ 2.11 แสดงตำแหน่งของสถานะที่สมดุลเมื่อเกิดการกระตุ้นที่เฟสใดเฟสหนึ่งของมอเตอร์ และภาพที่ 2.12 แสดงการลดขนาดมุมสเตปป์ซึ่งทำให้ได้โดยการเพิ่มจำนวนซี่ฟันของโรเตอร์ให้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



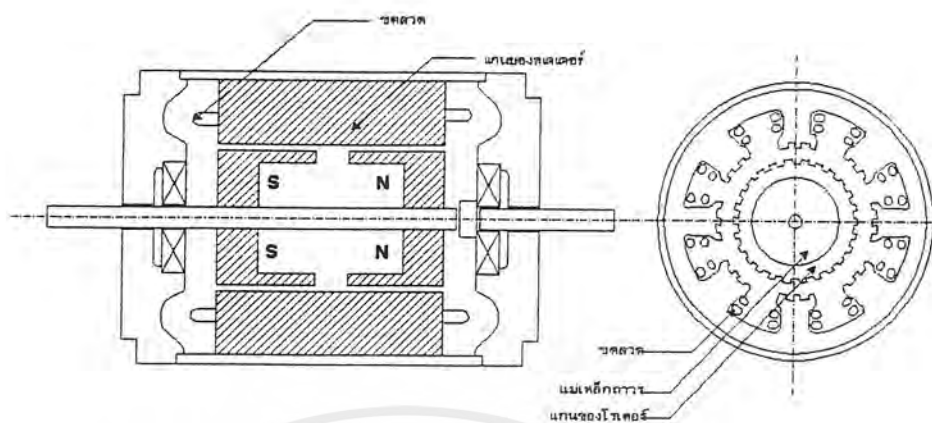
ภาพที่ 2.11 แสดงตำแหน่งของสถานะที่สมดุลย์เมื่อเกิดการกระตุ้นที่เฟสใดเฟสหนึ่ง



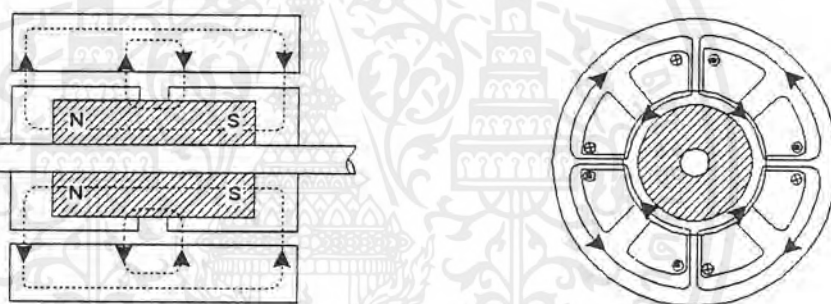
ภาพที่ 2.12 แสดงหน้าตัดของมอเตอร์สี่เฟส ที่มีฟันโรเตอร์ห้าสิบซี่มุมสเตป 1.8 องศา

### 2.2.3 สเตปปีงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์ (Hybrid stepping Motor)

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

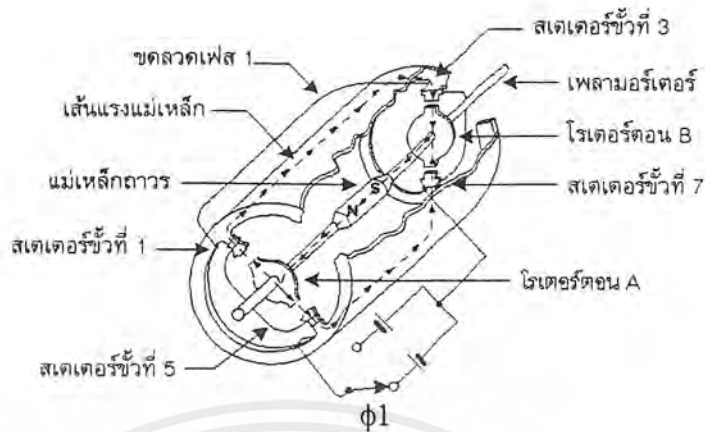


ภาพที่ 2.13 แสดงโครงสร้างของสเตปป์มอเตอร์แบบไฮบริดจ์



ภาพที่ 2.14 แสดงภาพการวางโรเตอร์ตามขาวเพื่อใช้สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กขั้วเดียวกัน

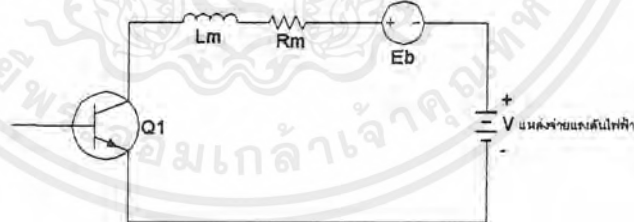
หลักการทำงานของสเตปป์มอเตอร์แบบไฮบริดจ์ ที่แตกต่างจากสเตปป์มอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้ก็คือ แรงบิดที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กจะไม่ขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของซี่ฟันด้วยซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 2.15 ข้อดีของสเตปป์มอเตอร์แบบไฮบริดจ์คือมีขนาดของสเตปป์เล็กทำให้มีความละเอียดของสเตปป์ต่อรอบสูง นอกจากนี้ยังมีค่าของแรงบิดสูงกว่าสเตปป์มอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้ แต่สเตปป์มอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้จะมีแรงเฉื่อยทางกลไกน้อยกว่า



ภาพที่ 2.15 แสดงหลักการทำงานของสเตปป์มอเตอร์แบบไฮบริดจ์

### 2.3 วงจรขับสำหรับสเตปป์มอเตอร์

การพิจารณาถึงหลักการ ในการออกแบบวงจรขับกำลังให้กับขดลวดของสเตปป์มอเตอร์นั้น จะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบหลายอย่างด้วยกัน เนื่องจากการหมุนของสเตปป์มอเตอร์จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Back emf) ซึ่งจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า โดยสามารถเขียนวงจรสมมูลย์ (Equivalent circuit) ในหนึ่งเฟสของสเตปป์มอเตอร์ได้ดังในภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 แสดงวงจรสมมูลย์ของสเตปป์มอเตอร์

โดยทั่วไปสเตปป์มอเตอร์ได้ถูกออกแบบให้ทนความร้อนได้สูงถึง 100 องศาเซลเซียส แต่การใช้งานจริงจะถูกใช้งานที่เงื่อนไขที่ต่ำกว่าจุดอิมิตัวที่กำหนดมา ในการขับสเตปป์มอเตอร์นั้นต้องเลือกใช้อุปกรณ์ที่กินกระแสสูง เนื่องจากชุดขดลวดในแต่ละเฟสของสเตปป์มอเตอร์จะต้องมีการนำและหยุดนำกระแสอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับทรานซิสเตอร์กำลังจากแรงดันช็อคแหลม (Spike Voltage) ที่เกิดจากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

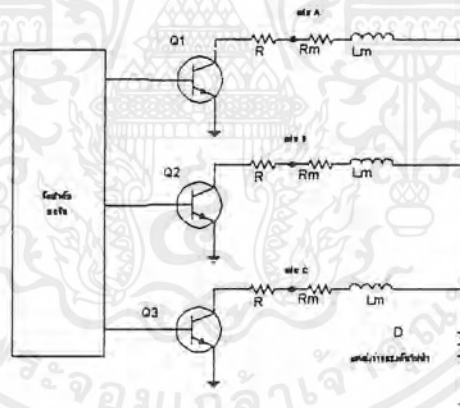
เหนี่ยวนำของกระแสในขดลวด (Inductive Turn Off Spike Voltage) และการเสียดสภาพฉนวนของแรงดัน ซึ่งการออกแบบวงจรขับและวงจรป้องกันสามารถทำได้ดังนี้

### 2.3.1 การใช้ตัวต้านทานต่ออนุกรมกับวงจรขับ

การต่อความต้านทานอนุกรมกับวงจรขับเป็นรูปแบบธรรมดาและราคาถูกที่สุดในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสแตปปีงมอเตอร์คือ การต่อความต้านทานอนุกรมเข้ากับขดขดลวดแต่ละเฟสของสแตปปีงมอเตอร์ การเพิ่มความต้านทานภายนอกทำให้ค่าเวลาคงตัวของวงจรลดลงไป ทำให้เวลาของการเพิ่มและลดระดับของกระแสลดลง

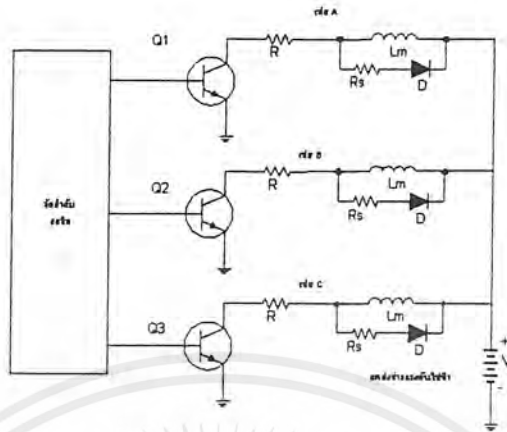
ข้อดีของการต่อความต้านทานอนุกรมคือการสูญเสียกำลังงาน ค่าความต้านทานภายนอกมีมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้ระบบไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ ลักษณะการต่อความต้านทานอนุกรมมีผลดังต่อไปนี้คือ

- (ก) ค่าความต้านทานทั้งหมด จะถูกแทนที่ด้วยความต้านทานตัวเดียวระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตกับตัวสแตปปีงมอเตอร์ ดังภาพที่ 2.17



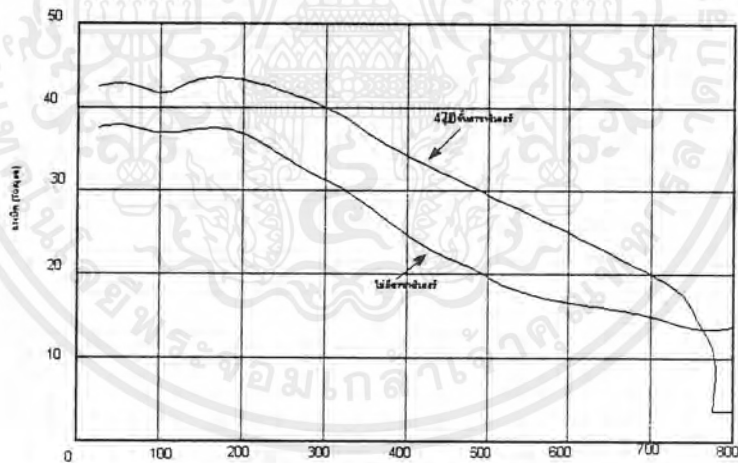
ภาพที่ 2.17 แสดงการใช้ความต้านทานต่ออนุกรมกับขดลวดของสแตปปีงมอเตอร์

- (ข) ความต้านทานอนุกรมจะขนานกับตัวเก็บประจุ ในการเพิ่มตัวเก็บประจุในแต่ละส่วนของโครงข่ายของวงจรจำกัดแรงดัน สามารถช่วยรักษาระดับของแรงดันให้คงที่โดยเฉพาะเมื่อวงจรทำงานมาใกล้ขีดจำกัดสูงสุดของแรงดันที่ทรานซิสเตอร์ทนได้



ภาพที่ 2.18 แสดงการเพิ่มตัวเก็บประจุในแต่ละส่วนของวงจรจำกัดแรงดัน

ในภาพที่ 2.18 แสดงวงจรขั้วกำลังซึ่งใช้ไดโอด-ความต้านทาน และมีการต่อตัวเก็บประจุขนานความต้านทาน ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของแรงบิดดึงออก



ภาพที่ 2.19 แสดงผลการเพิ่มตัวเก็บประจุขนานกับความต้านทาน

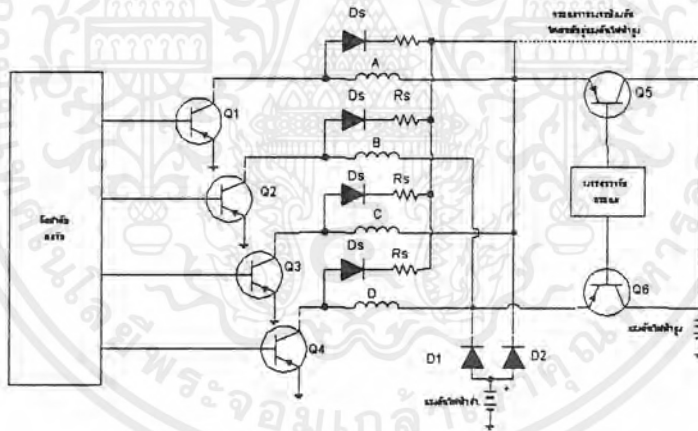
- (ค) ประสิทธิภาพของระบบจะเพิ่มขึ้น ถ้ามีการต่อความต้านทานร่วมกับโหลด (Common Load) ขนานกับทรานซิสเตอร์ระหว่างการใช้ความเร็วสูง วิธีการนี้จะช่วยให้การเปลี่ยนระดับของกระแสเร็วขึ้น แต่จะมีข้อเสียอยู่ที่มีการสูญเสียกำลังงานมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 การใช้วงจรขับแบบใช้แรงดันไฟฟ้าสองระดับ

เป็นวิธีการขับที่มีประสิทธิภาพกว่ารูปแบบของการต่อความต้านทานของอนุกรม ซึ่งใช้แรงดันไฟฟ้าระดับสูงสำหรับการยกกระดักกระแสและตัดต่อไปยังแรงดันไฟฟ้าระดับต่ำ เมื่อถึงอัตรากระแสที่ต้องการหรือถึงเวลาที่กำหนด กระแสที่อยู่ในขดลวดจะไหลผ่านไดโอด D1 โดยแรงดันไฟฟ้าระดับต่ำจะทำงานแทน วิธีการนี้เรียกว่าการขับแบบแรงดันไฟฟ้าคู่หรือการขับแบบสองระดับ

เมื่อพิจารณาการลดลงของเวลาในการเปลี่ยนระดับกระแสของระบบการขับแบบสองระดับ เปรียบเทียบกับแบบการต่อความต้านทานอนุกรม แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดจะยังคงอยู่ทั้งหมด จนกระทั่งกระแสเพิ่มขึ้นจนถึงระดับกระแสที่ต้องการ แม้ว่าค่าเวลาคงตัวจะไม่ลดลงเหมือนในแบบการต่อความต้านทานอนุกรม ค่าการยกกระดักกระแสค่อนข้างจะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นหลังจากแรงดันไฟฟ้าระดับสูงจะตัดต่อไปสู่แรงดันไฟฟ้าระดับต่ำ กระแสจะตกลงและเกิดแรงดันย้อนกลับ



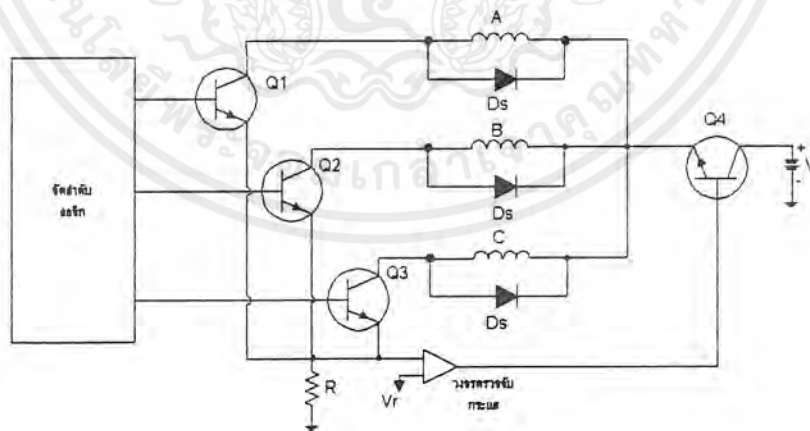
ภาพที่ 2.20 แสดงวงจรขับสเต็ปปีงมอเตอร์แบบแรงดันไฟฟ้าสองระดับ

ขณะที่ทรานซิสเตอร์ Q5 และ Q6 ไม่ทำงาน ไดโอด D1 และ D2 ของแรงดันไฟฟ้าระดับต่ำนำกระแสอยู่ เมื่อแรงดันไฟฟ้าระดับสูงทำงาน ทรานซิสเตอร์ Q5 และ Q6 นำกระแสไดโอด D1 ต้องหยุดนำกระแสทันที และแหล่งจ่ายไฟของแรงดันไฟฟ้าระดับต่ำจะกลายเป็นระบบภายนอกการทำงานจะเป็นลักษณะนี้สลับกันไปตลอดช่วงการทำงาน โดยทั่วไป ไดโอดกระแสสูงจะมีค่าเวลาในการคืนตัวช้า ดังนั้นในกรณีนี้จึงมีความจำเป็นต้องใช้ไดโอดชนิดคืนตัวเร็ว (Fast Recovery Diode) เพื่อทำให้เกิดกระแสยอดแหลม (Current Spike) ในขณะที่มีแหล่งจ่ายเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ในระดับที่ปลอดภัย โดยที่แหล่งจ่ายไฟที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำ ควบคุมแบบให้มีระดับกระแสที่เพียงพอในการต้านกระแสย้อนกลับ

### 2.3.3 การใช้วงจรขับแบบชอปเปอร์

เป็นวงจรขับอีกแบบหนึ่งที่ใช้กับมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง คือใช้การมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation) หรือการมอดูเลตความถี่ (Frequency Modulation) ควบคุมกระแสเฉลี่ยที่ให้กับสเตปป์มอเตอร์ วงจรขับแบบชอปเปอร์อย่างง่าย ๆ แสดงได้ดังภาพที่ 2.21 เมื่อเฟสใดเฟสหนึ่งของมอเตอร์ทำงาน ทรานซิสเตอร์ Q4 จะเปิดและปิดไปสู่แรงดันไฟฟ้าระดับสูงตลอดเวลา การใช้แหล่งจ่ายไฟที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าสูง เป็นสาเหตุให้กระแสในแต่ละเฟสเพิ่มระดับขึ้นอย่างทันทีทันใด เช่นเดียวกับในวงจรขับแบบแรงดันไฟฟ้าสองระดับ คือมีวงจรตรวจระดับกระแสเพื่อจะปรับตั้งค่าการหยุดทำงานของทรานซิสเตอร์ Q4 เมื่อกระแสมาถึงระดับที่ต้องการ และเมื่อกระแสลดลงต่ำกว่ากระแสขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold Current) ทรานซิสเตอร์ Q4 จะทำงานอีกครั้งหนึ่ง การทำงานของวงจรมีแนวโน้มให้กระแสเฉลี่ยคงอยู่ในระดับที่ต้องการ ในกรณีนี้ความถี่ของการตัดช่วงจะอยู่ระหว่าง 1-30 KHz ขึ้นอยู่กับค่าเวลาคงตัวของฟลักซ์ลวดของมอเตอร์และฮิสเตอร์ซิส (Hysteresis) ของวงจรตรวจระดับกระแส ความถี่ของการตัดช่วงมักจะปรับตั้งอยู่สูงกว่าช่วงที่กำหนดเพื่อหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนความถี่ซึ่งเกิดจากการสั่นของมอเตอร์



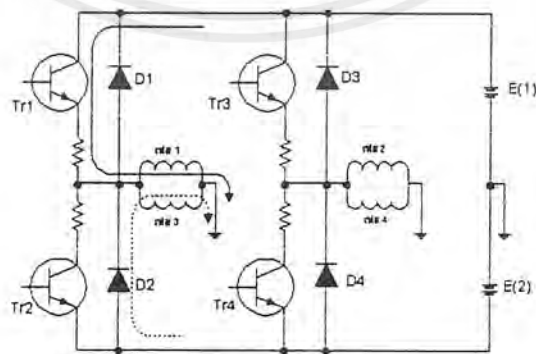
ภาพที่ 2.21 แสดงวงจรขับแบบชอปเปอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 การใช้วงจรขับเคลื่อนแบบบริดจ์

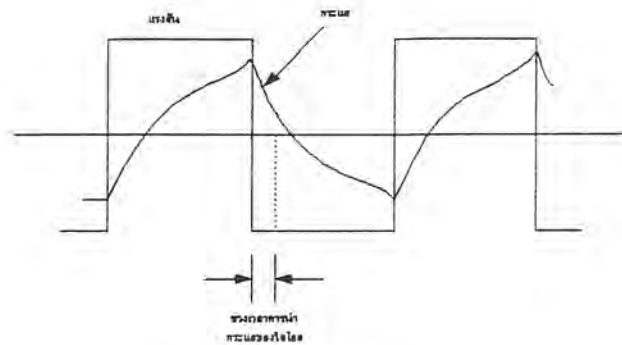
ประสิทธิภาพในการใช้งานของสเตปปีงมอเตอร์จะสูงขึ้น ถ้าควบคุมการไหลของกระแสให้ไหลได้สองทิศทาง ซึ่งช่วยให้แรงบิดเพิ่มขึ้นอีก 20-35% ของการใช้วงจรขับเคลื่อนแบบมีกระแสไหลทางเดียว วงจรขับเคลื่อนแบบบริดจ์มีสองชนิดคือ แบบมีแหล่งจ่ายไฟเดียว และแบบมีแหล่งจ่ายไฟสองแหล่ง ซึ่งจะมีคุณลักษณะในการทำงานดังต่อไปนี้

- (ก) การต่อขดลวดของมอเตอร์ ถ้ามอเตอร์มี 8 ขั้ว กระแสสลับจะสามารถไหลผ่านได้เหมือนกับมอเตอร์สองเฟส
- (ข) การป้องกันอันตรายอันอาจเกิดจากทรานซิสเตอร์ “ทำงาน” ในขณะที่ทรานซิสเตอร์อีกตัวหนึ่งยังนำกระแสอยู่ ทำให้ได้โดยการใส่วงจรหน่วงเวลา คือ ค่าความต้านทานเข้าไประหว่างทรานซิสเตอร์ทั้งสอง
- (ค) การใช้ไดโอดเพื่อป้องกันแรงดันขดลวดไหลกลับ โดยไดโอดจะถูกใส่ขนานเข้าไปกับทรานซิสเตอร์กำลัง เพื่อจำกัดแรงดันขดลวดไหลกลับ เมื่อทรานซิสเตอร์ “หยุดทำงาน” การทำงานของไดโอดจะแตกต่างจากแบบสภาวะชั่วเดียว ถ้า  $T_{r1}$  นำกระแสซึ่งแสดงโดยเส้นทึบ เมื่อ  $T_{r1}$  “หยุดทำงาน” และ  $T_{r2}$  “ทำงาน” กระแสไม่ได้ไหลกลับทิศทาง แต่จะไหลวนผ่านไดโอด D2 และแหล่งจ่ายไฟ E(2) ซึ่งแสดงโดยเส้นปะ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าแหล่งจ่ายไฟ E(2) ขณะนี้จะถูกเก็บประจุ หรือถ้าพิจารณาในทอมของกำลังงานจากสนามแม่เหล็กจะถูกป้อนกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟในขณะที่การขับเคลื่อนแบบสภาวะชั่วเดียว กำลังงานจากสนามแม่เหล็กจะถูกใช้ไปในขดลวดความต้านทานภายนอก และซีเนอร์ไดโอด ทำให้การขับเคลื่อนแบบสองภาวะชั่วมีข้อดีกว่า



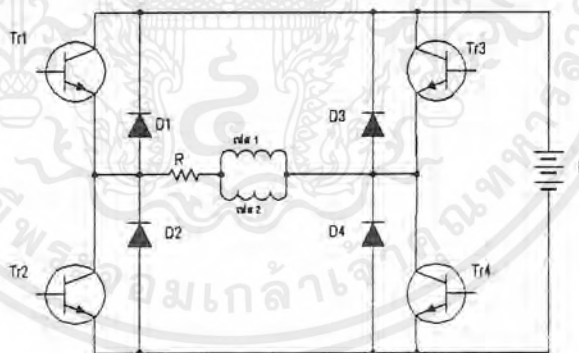
ภาพที่ 2.22 แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสของการขับเคลื่อนแบบสองภาวะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.23 แสดงรูปคลื่นแรงดัน ไฟฟ้าและกระแสของการขับสเตปปีงมอเตอร์แบบสองสถานะ

กระแสในทิศทางกลับสำหรับการขับแบบสภาพชั่วเดียว ต้องใช้วงจรจำกัดแรงดันเกินเพื่อ  
 หน่วงกระแสหลังจาก “หยุดทำงาน” ของทรานซิสเตอร์ แต่สำหรับการขับแบบสองภาวะชั่วจะให้  
 แรงดันไฟฟ้าเพื่อให้กระแสไหลกลับทิศทาง หลังจากกระแสที่เหลืออยู่หลังจากทรานซิสเตอร์หยุด  
 ทำงานกลายเป็นศูนย์ และจะมีกระแสชุดใหม่เพิ่มขึ้นผ่านทรานซิสเตอร์ Tr2 ในทิศทางตรงกัน  
 ข้าม ดังนั้น รูปคลื่นของกระแสจะไม่เป็นตัวชี้กำลัง แต่ขึ้นอยู่กับแรงดันย้อนกลับที่เกิดจากการ  
 เคลื่อนที่ของโรเตอร์



ภาพที่ 2.24 แสดงวงจรขับแบบบริดจ์อีกแบบหนึ่งซึ่งใช้แหล่งจ่ายไฟเดียว

รูปแบบอีกอย่างหนึ่งของการขับแบบสองภาวะชั่ว แสดงได้ในภาพที่ 2.24 ในกรณีนี้จะใช้  
 แหล่งจ่ายไฟเดียวแต่ใช้ทรานซิสเตอร์สี่ตัวสำหรับแต่ละเฟส ความต้านทานจะถูกต่อขนานกับ  
 ขดลวดเพื่อการเพิ่มระดับกระแสที่เร็วขึ้น วงจรหน่วงเวลาจะใช้เพื่อป้องกันทรานซิสเตอร์นำ  
 กระแสเหลืออมกัน (Overlap)

## 2.4 การอินเทอร์เฟซ

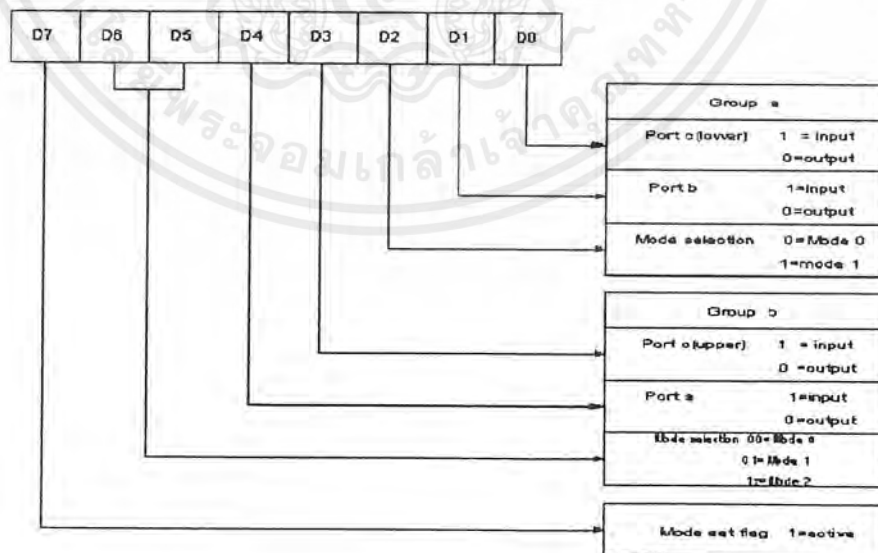
### INPUT / OUTPUT CARD

ลักษณะทั่วไปของ PC CARD เป็นลักษณะของ PC CARD ใช้เชื่อมต่อกับเครื่อง PC เพื่อขยายระบบอินพุตและระบบเอาต์พุตให้ใช้งานได้มากยิ่งขึ้นซึ่งสามารถที่จะรับสัญญาณอินพุตและให้สัญญาณเอาต์พุตออกมาได้ทั้งในรูปแบบของ Digital ทำให้มีการอ่อนตัวในการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ได้มากยิ่งขึ้นซึ่งมีไอซี 8255 (PROGRAMMABLE PHERIPHERAL INTERFACE) จำนวน 2 ตัว ซึ่งสามารถที่จะใช้โปรแกรมกำหนดให้เป็นได้ทั้ง อินพุตและเอาต์พุตตามต้องการของผู้ใช้เองได้ทั้งหมด 9 พอร์ต หรือ 72 บิต I/O ในรูปของสัญญาณดิจิตอลนั่นเอง

#### ชิพสับสแตน 8255 (Programable Peripheral Interface , PPI)

8255 เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อทำหน้าที่เป็นพอร์ต สำหรับการรับส่งข้อมูลแบบขนานระหว่างอุปกรณ์ภายนอกกับไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เราสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงลักษณะการทำงานของพอร์ตให้เป็นเอาต์พุตหรืออินพุตได้เพียงการส่งข้อมูลควบคุมจาก ไมโครคอนโทรลเลอร์ก่อนที่จะเริ่มการใช้งาน

8255 ประกอบด้วยบล็อกการทำงานหลายส่วน ส่วนที่เชื่อมกับอุปกรณ์ภายนอกโดยตรงซึ่งถูกจำแนกออกเป็น 2 กลุ่ม คือ Group A Control และ Group B Control โดยจะสามารถแบ่งออกเป็น 3 พอร์ต ได้แก่ พอร์ต A (PA0-PA7) พอร์ต B (PB0-PB7) และพอร์ต C (PC0-PC7) ส่วนที่กำหนดหน้าที่การทำงานของพอร์ตทั้ง 3 มีชื่อว่า รีจิสเตอร์ควบคุมซึ่งมีรายละเอียดภายในดังรูป



ภาพที่ 2.25 แสดงบิตต่างๆ ของคำสั่งควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหมดการทำงานของ 8255 มีอยู่ทั้งหมด 3 โหมด ได้แก่

- โหมด 0 : Basic I/O
- โหมด 1 : Strobe Input , Store Output
- โหมด 2 : Strobe Bidirection I/O

### การทำงานของ 8255 โหมด 0

ในการกำหนดลักษณะให้ 8255 ทำงานในโหมด 0 นั้นจะต้องส่งคำสั่งควบคุมให้แก่รีจิสเตอร์ควบคุมก่อน คำสั่งควบคุมนี้จะกำหนดลักษณะการทำงานแต่ละพอร์ตของ 8255

### การทำงานของ 8255 โหมด 1

การทำงานของ 8255 โหมด 1 เป็นการทำงานในลักษณะที่มีการตรวจสอบสถานะการรับส่งข้อมูล (Handshaking) สาเหตุที่ต้องเป็นเช่นนี้เพราะเมื่อนำ 8255 ไปต่อกับอุปกรณ์ภายนอกที่มีการทำงานช้ากว่าการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อมีการส่งข้อมูลหลาย ๆ ไบต์อุปกรณ์ภายนอกจะรับข้อมูลไม่ทัน การผิดพลาดจึงเกิดขึ้นได้ ดังนั้นเมื่อใช้งาน 8255 ในโหมดนี้เป็นการกำหนดให้พอร์ต A และพอร์ต B เป็นพอร์ตสำหรับใช้รับส่งข้อมูล ส่วนพอร์ต C ใช้เป็นสัญญาณตอบโต้กับอุปกรณ์ภายนอกโดย 4 บิตบนจะเป็นสัญญาณตอบโต้สำหรับพอร์ต A และ 4 บิตล่างใช้เป็นสัญญาณตอบโต้สำหรับพอร์ต B

### การทำงานของ 8255 โหมด 2

การทำงานในโหมดนี้ก็คือ การใช้พอร์ต A เป็นอินพุตและเอาต์พุตแลตช์ (output latch) หมายถึงการเก็บเอาข้อมูลไว้ เพื่อรออุปกรณ์ภายนอกรับเอาข้อมูลออกไป ส่วนอินพุตแลตช์ (Input Latch) หมายถึงการเก็บข้อมูลที่อุปกรณ์ภายนอกส่งเข้ามา เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านเข้าไปใช้งานในการส่งข้อมูลให้กับอุปกรณ์ภายนอกนั้น ขั้นตอนแรกที่เกิดขึ้นในการทำงานคือ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะต้องส่งข้อมูลไปแลตช์ไว้ในพอร์ต A ซึ่งจะทำให้ OUTPUT BUFFER-FULL (OBF) ถูกเซตให้เป็นจริง สัญญาณนี้จะบอกให้อุปกรณ์ภายนอกรู้ว่า ขณะนี้พอร์ต A มีข้อมูลอยู่และบอกให้ไมโครคอนโทรลเลอร์รู้ว่าข้อมูลของพอร์ต A ที่ส่งไปใช้ยังไม่ถูกอุปกรณ์ภายนอกอ่านออกไป อุปกรณ์ภายนอกจะต้องส่งสัญญาณ ACK (ACKNOWLEDGE) ให้กับ 8255 สัญญาณนี้จะเป็นการอินเเบิล (Enable) ให้ข้อมูลที่อยู่ในพอร์ต A ส่งออกไปยัง PA0-PA7 และเป็นการรีเซ็ต (Reset) ค่า OBF เพื่อเป็นการบ่งบอกให้ไมโครคอนโทรลเลอร์รู้ว่าข้อมูลที่อยู่ภายในพอร์ต A ถูกอุปกรณ์ภายนอกอ่านออกไปแล้ว และสามารถส่งข้อมูลใหม่ไปให้พอร์ต A ได้อีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

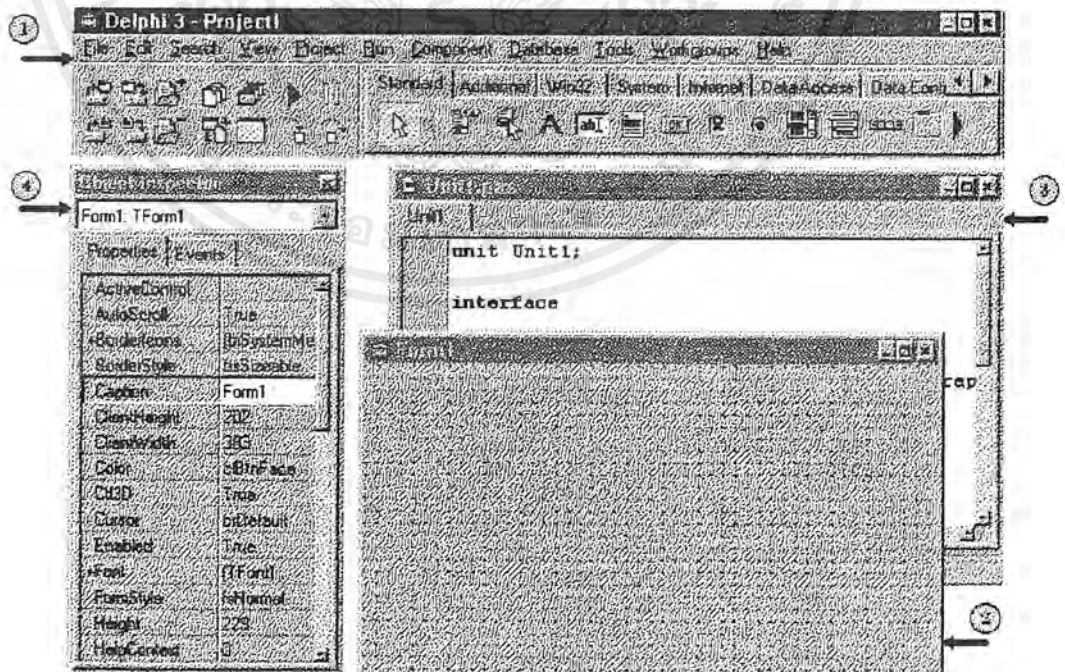
ในการรับข้อมูลจากอุปกรณ์ภายนอกนั้น อุปกรณ์ภายนอกต้องตรวจสอบสถานะของ INPUT BUFFER FULL (IBF) เสียก่อนถ้า IBF มีลอจิกเป็น 1 แสดงว่าขณะนี้พอร์ต A มีข้อมูลอยู่ ไมโครคอนโทรลเลอร์ยังไม่ได้อ่านข้อมูลเข้าไป แต่ถ้ามีลอจิกเป็น 0 แสดงว่าไม่มีข้อมูลอยู่ในพอร์ต A อุปกรณ์ภายนอกจะส่งข้อมูลและสัญญาณ STROBE (STB) ให้ 8255 สัญญาณนี้จะทำให้มีการนำข้อมูลแลตซ์ไว้ในพอร์ต A และเซตให้ IBF มีสถานะเป็นจริง ไมโครคอนโทรลเลอร์จะตรวจสอบสถานะของ IBF ได้โดยการอ่านข้อมูลจากพอร์ต C เมื่อ IBF มีสถานะเป็นจริงแสดงว่าข้อมูลที่พร้อมที่จะให้ไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านออกไปเมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านข้อมูลออกไปแล้ว IBF จะมีสถานะลอจิกเป็น 0 และอุปกรณ์ภายนอกสามารถส่งข้อมูลใหม่เข้ามาได้

## 2.5 เดลไฟล์ ( Delphi )

### 2.5.1 หน้าจอของเดลไฟล์

หน้าจอของเดลไฟล์แบ่งออกได้เป็น 4 ส่วนใหญ่ๆ คือ

1. หน้าต่างหลัก
2. หน้าต่างฟอร์ม ( Form )
3. หน้าต่างยูนิต ( Unit )
4. หน้าต่างออบเจกต์อินสเปกเตอร์ ( Object Inspector )



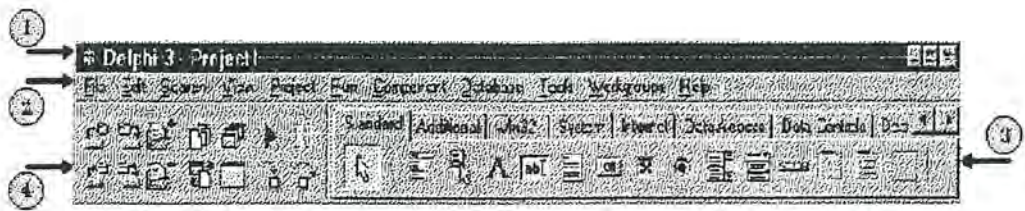
ภาพที่ 2.26 หน้าจอของเดลไฟล์ โดยรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.2 หน้าต่างหลัก

หน้าต่างหลักประกอบด้วย

1. ไตเติลบาร์ ( Title bar ) จะแสดงรายชื่อของชิ้นงาน ( Application ) แต่ละชิ้นงาน
2. เมนูบาร์ ( Menu bar ) จะแสดงรายการตั้งแต่ File จนถึง Help
3. กล่องคอมโปเนนต์ ( Compoment ) จะเป็นที่เก็บคอมโปเนนต์ต่างๆ ที่จะไปวางไว้บนฟอร์ม
4. สปีดบาร์ ( Speed bar ) ประกอบด้วย
  - 4.1 OPEN PROJECT คือ ปุ่มที่ใช้เปิดโปรเจกต์ใหม่ที่เราสร้างไว้แล้ว
  - 4.2 OPEN FILE คือ ปุ่มที่ใช้เปิดไฟล์ใหม่ที่เราสร้างไว้แล้ว
  - 4.3 SAVE ALL คือ ปุ่มที่ใช้เซฟโปรเจกต์ของงานที่กำลังทำอยู่
  - 4.4 SAVE FILE คือ ไฟล์ที่ใช้เซฟเฉพาะบางไฟล์
  - 4.5 ADD FILE TO PROJECT คือ ปุ่มที่ใช้ในการทำยูนิต (ไฟล์นามสกุล PAS ) ของโปรเจกต์อื่น เข้ามาทำงานร่วมกับโปรเจกต์ที่เรากำลังทำงานอยู่
  - 4.6 REMOVE FILE TO PROJECT คือ ปุ่มที่ใช้ในการทำยูนิตของโปรเจกต์ที่กำลังใช้งานอยู่ออกไป
  - 4.7 SELECT UNIT FORM LIST คือ ปุ่มที่ใช้เลือกยูนิตที่มีอยู่แล้วในโปรเจกต์ขึ้นมาใช้งาน
  - 4.8 TOGGLE FORM / UNIT คือ ปุ่มที่ใช้ในการสลับการทำงานระหว่างหน้าต่างฟอร์มกับหน้าต่างยูนิต
  - 4.9 SELECT FORM FROM LIST คือ ปุ่มที่ใช้เลือกฟอร์มที่มีอยู่แล้วในโปรเจกต์ขึ้นมาใช้
  - 4.10 NEW FORM คือ ปุ่มที่ใช้เรียกฟอร์มใหม่ขึ้นมาใช้ร่วมกับโปรเจกต์ที่กำลังใช้งานอยู่
  - 4.11 RUN คือ ปุ่มที่ทำให้ตัว Project Compile เริ่มทำงาน
  - 4.12 TRACE INTO คือ ปุ่มที่ใช้แสดงผลการทำงานของโปรเจกต์ทีละขั้นตอน
  - 4.13 PAUSE คือ ปุ่มที่ทำให้การทำงานของโปรเจกต์หยุดชั่วคราว
  - 4.14 STEP OVER คือ ปุ่มที่ใช้ในการข้ามการแสดงผลบางช่วงไป



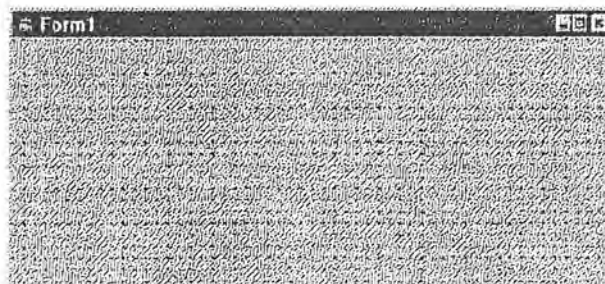
ภาพที่ 2.27 หน้าต่างหลัก



ภาพที่ 2.28 สปีดบาร์หน้าต่างหลัก

หน้าต่างฟอร์มเป็นหน้าต่างที่มีไว้สำหรับแสดงผลในการทำงานของตัวโปรเจกต์ เวลาใช้ให้นำคอมโปเนนต์ที่ต้องการใช้ลงไปวาง แล้วกำหนด Properties กับ Events ในออบเจกต์อินสเปกเตอร์ (Object Inspector)

### 2.5.3 หน้าต่างฟอร์ม

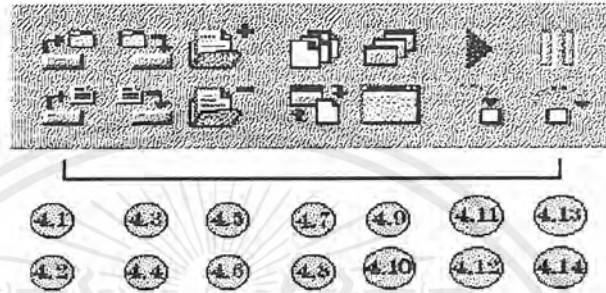


ภาพที่ 2.29 หน้าต่างฟอร์ม (Form)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.4 หน้าต่างยูนิต

หน้าต่างยูนิตเป็นหน้าต่างที่มีไว้สำหรับใส่เงื่อนไขในการทำงานของโปรแกรมโดยผ่านทาง Events ของในออบเจกต์อินสเปกเตอร์ หรือจะใส่เงื่อนไขโดยตรงก็ได้



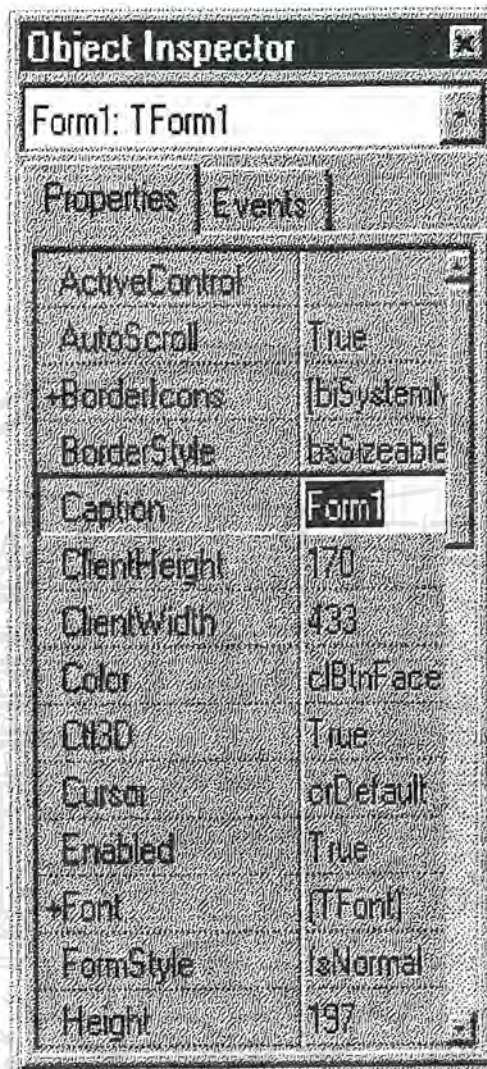
ภาพที่ 2.30 หน้าต่างยูนิต (Unit)

## 2.5.5 หน้าต่างออบเจกต์อินสเปกเตอร์

หน้าต่างออบเจกต์อินสเปกเตอร์จะประกอบด้วย

1. Properties จะเป็นตัวกำหนดการทำงานของคอมโปเนนต์ต่างๆ
2. Events จะเป็นตัวผ่านจากคอมโปเนนต์ไปกำหนดเงื่อนไขต่างๆในยูนิต เช่น
  - OnClick จะทำงานก็ต่อเมื่อเราเลือกด้วยเมาส์หรือกดด้วยคีย์บอร์ด
  - OnMouseDown จะทำงานก็ต่อเมื่อเราคลิกเมาส์ลง
  - OnMouseUp จะทำงานก็ต่อเมื่อเราคลิกเมาส์ขึ้น
  - OnKeyDown จะทำงานโดยการกดคีย์ลง และจะไปทำงานที่ Key Code ที่กำหนดไว้ในเงื่อนไขของ Events นั้นๆ ในโปรแกรม

สามารถแสดงลักษณะของหน้าต่างออบเจกต์อินสเปกเตอร์ได้ดังภาพที่ 2.31



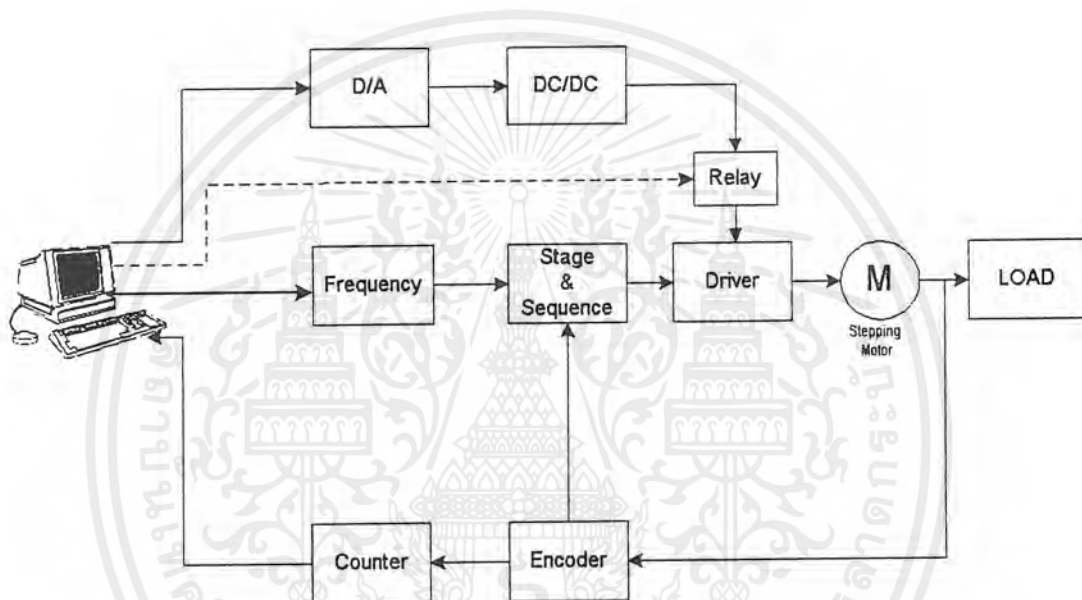
ภาพที่ 2.31 หน้าต่างออบเจกต์อินสเปกเตอร์ (Object Inspector)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การออกแบบและพัฒนา

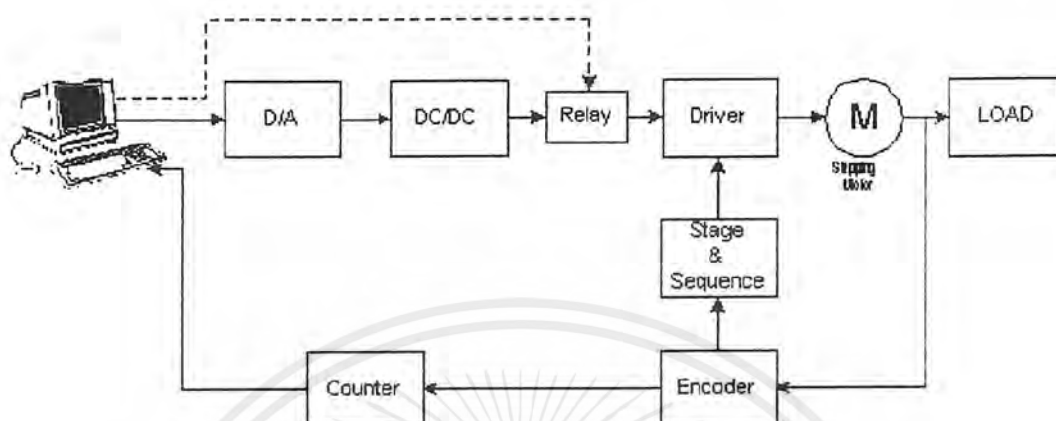
##### 3.1 การออกแบบระบบควบคุมความเร็วโดยการควบคุมค่ากระแสกระตุ้น



ภาพที่ 3.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมความเร็วที่ออกแบบไว้

แบ่งเป็นการทำงานในส่วนของ DC BRUSHLESS MODE และ STEPPING MODE ในส่วน DC BRUSHLESS MODE การควบคุมความเร็วจะใช้คอมพิวเตอร่าาระดับสัญญาณดิจิทัลให้กับวงจร D/A เพื่อนำไปควบคุมวงจร DC/DC ซึ่งเอาท์พุทของวงจร DC/DC จะป้อนให้กับ DRIVER ที่ขับเคลื่อนมอเตอร์อีกทีหนึ่ง เราใช้ ตัวเข้ารหัสที่ต่อกับสเตปมอเตอร์เป็นตัวจ่ายสัญญาณให้กับวงจร COUNTER เพื่อไปคำนวณค่าความเร็วและป้อนให้กับวงจร STAGE & SEQUENCE นำไปสร้างเป็นสัญญาณขาขึ้นแล้วป้อนให้กับวงจร DRIVER กรณีการควบคุมความเร็วใน STEPPING-MODE เราใช้การจ่ายความถี่ให้กับวงจร STAGE & SEQUENCE เพื่อจัดลำดับการหมุนของสเตปมอเตอร์อีกทีหนึ่งซึ่งระบบโดยรวมสามารถแสดงให้เห็นดังภาพที่ 3.1

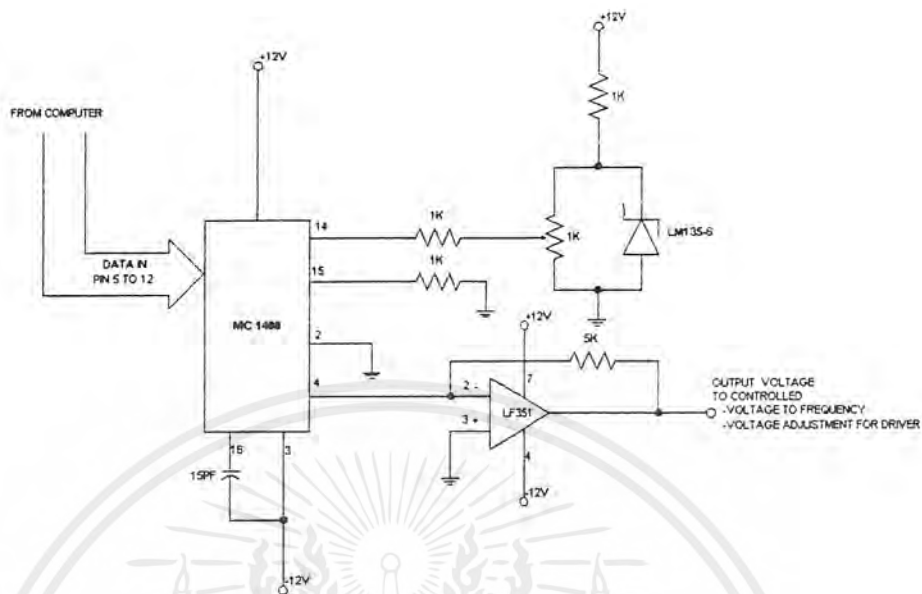
### 3.2 DC BRUSHLESS MODE



ภาพที่ 3.2 แสดงบล็อก ไดอะแกรมของระบบควบคุมความเร็วของโหมด DC BRUSHLESS

#### 3.2.1 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแรงดันไฟฟ้า

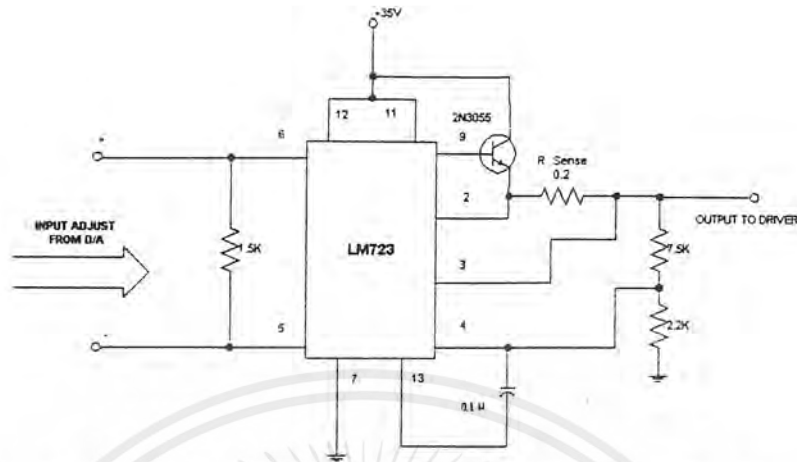
วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแรงดันไฟฟ้าเป็นวงจรที่แปลงระดับข้อมูล (Data) ที่ทำการส่งจากคอมพิวเตอร์ให้เป็นระดับแรงดันไฟฟ้าที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ตามข้อมูลที่ส่งเข้ามา ซึ่งข้อมูลที่ส่งเข้ามาจะได้จากขา 4 ของไอซีเบอร์ MC1408 และจะถูกนำไปขยายค่าให้อยู่ในช่วงของระดับควบคุมที่ต้องการโดยใช้ไอซีเบอร์ LF351 ซึ่งเป็นออปแอมป์ทำหน้าที่ขยายระดับแรงดันและกระแสให้ได้ตามที่จะนำไปใช้ในการควบคุมวงจรจ่ายไฟของวงจรขับเคลื่อนมีข้อมูลเอาต์พุต 8 บิต จึงสามารถเปลี่ยนแปลงระดับค่าสัญญาณไฟฟ้าเอาต์พุตได้ 256 ระดับ โดยที่ข้อมูลเอาต์พุตจะมีค่าสูงสุดเท่าใดขึ้นอยู่กับค่าการปรับค่าแรงดันอ้างอิง (Reference Voltage) ที่ขา 14 ของไอซีเบอร์ MC1408 โดยการปรับค่าความต้านทานที่ตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 1 K $\Omega$  สัญญาณที่ได้จากวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแรงดันไฟฟ้านี้นำไปใช้ในการควบคุมวงจรจ่ายไฟ 35 V ที่เป็นชุดจ่ายไฟให้วงจรขับเคลื่อน



ภาพที่ 3.3 แสดงวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแรงดันไฟฟ้า

### 3.2.2 ชุดวงจรปรับค่าระดับแรงดันไฟฟ้าสำหรับวงจรขับเคลื่อน

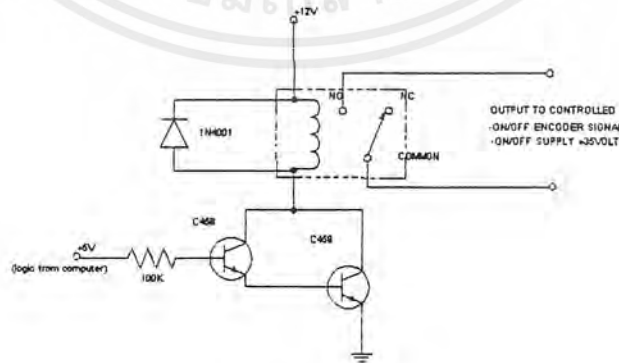
เป็นวงจรที่ให้สัญญาณเอาต์พุตแบบปรับค่าได้ โดยใช้หลักการการเปลี่ยนระดับค่าแรงดันอ้างอิง (Reference Voltage) ของไอซีเบอร์ LM 723 ที่ขา Input Adjust ได้แก่แรงดันตกคร่อมที่ขา 5 และ 6 ซึ่งสัญญาณที่ป้อนจะเป็นระดับแรงดันควบคุมที่แปรไปตามค่าสัญญาณเอาต์พุตที่ต้องการ เราใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3055เป็นตัวขยายกระแสเอาต์พุตให้ได้ตามที่ต้องการโดยเอาต์พุตที่ได้จากวงจรปรับค่าระดับแรงดันไฟฟ้าสำหรับวงจรขับเคลื่อนนี้จะเป็นแรงดันไฟฟ้าในช่วง 3.23-31.8 โวลต์ สามารถจ่ายกระแสได้ 0.9 แอมป์ ซึ่งค่าเอาต์พุตที่จะนำไปใช้เป็นตัวจ่ายไฟให้วงจรขับที่พัฒนาขึ้นดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 แสดงวงจรปรับค่าระดับแรงดันไฟฟ้าสำหรับวงจรขับเคลื่อน

### 3.2.3 วงจรสวิทซ์ตัดต่อ

วงจรสวิทซ์ตัดต่อเป็นวงจรที่ใช้เป็นตัวตัดต่อสัญญาณในขณะที่ทำงานได้แก่ชุดวงจรสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 35 โวลท์ ที่เป็นชุดจ่ายไฟให้กับวงจรขับเคลื่อน ชุดวงจรจ่ายสัญญาณความถี่ที่ป้อนให้กับวงจรในการทำงานโหมคสเตรปิงมอเตอร์ โดยตัววงจรสวิทซ์ตัดต่อนี้ใช้แมกเนติกรีเลย์ทำหน้าที่เป็นสวิทซ์ในการตัดต่อซึ่งตั้งควบคุม โดยใช้คอมพิวเตอร์ป้อนไบอัส (BIAS) ให้กับความต้านทาน 100 กิโลโอห์ม ที่ต่ออยู่กับทรานซิสเตอร์เบอร์ C458 ที่ต่อกันอยู่แบบคาร์ลิงตันเพื่อทำการขยายกระแสและเป็นสวิทซ์ให้กับรีเลย์ โดยมีไดโอดเบอร์ 1N4001 เป็นตัวป้องกันความเสียหาย เนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กขูบตัวหลังจากที่ไม่ได้จ่ายสัญญาณควบคุมจากคอมพิวเตอร์



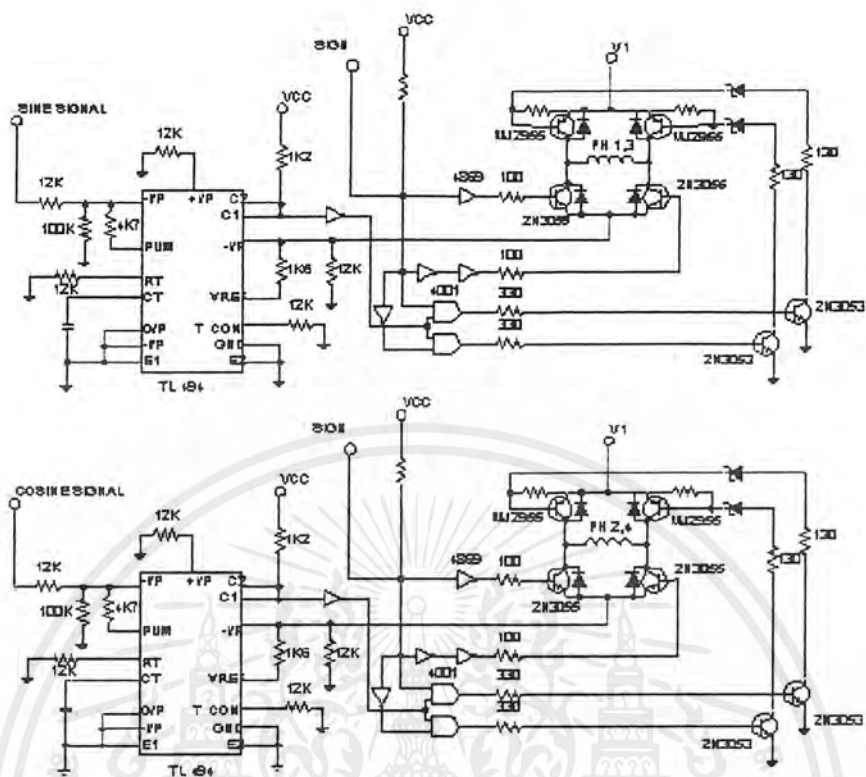
ภาพที่ 3.5 แสดงวงจรสวิทซ์ตัดต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

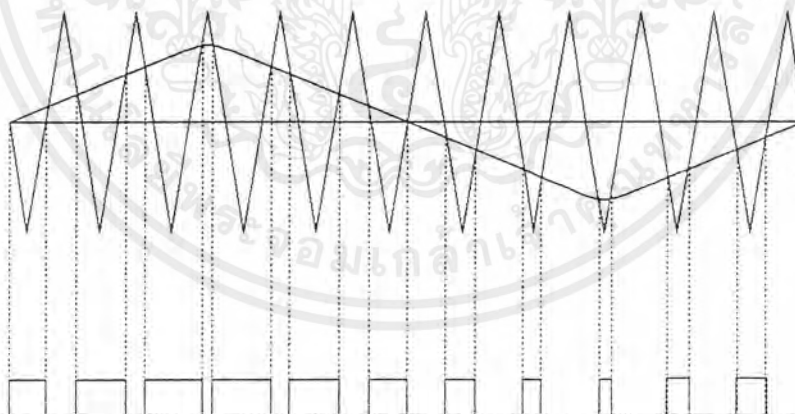
### 3.2.4 วงจรขับเคลื่อนแบบสองแกนขวาง

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

ลักษณะการทำงานของวงจรขับที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นดังภาพที่ 3.8 จะนำสัญญาณ SINE SIGNAL และ COSINE SIGNAL จากเอาต์พุตของวงจร R/R LADDER มาป้อนให้กับ ไอซีเบอร์ TL494 ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแปลงแปลงความกว้างของระดับสัญญาณเอาต์พุตตามระดับสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้ โดยเอาต์พุตของไอซีเบอร์ TL494 ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 3.9จะได้ลักษณะกระแสรูปคลื่นขาขึ้นที่มีความต่อเนื่อง จะถูกนำไปป้อนให้กับทรานซิสเตอร์ขับเคลื่อนได้แก่ ทรานซิสเตอร์ เบอร์ 2N3055 และ MJ2955 เพื่อทำการขับขดลวดของสเตปปีงมอเตอร์ในลักษณะกระแสรูปคลื่นขาขึ้นซึ่งมีผลทำให้มอเตอร์มีการหมุนอย่างต่อเนื่อง ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3053 ไอซีเบอร์ 4069 และ ไอซีเบอร์ 4001 ซึ่งเป็นไอซีชนิดซิมอส ใช้ในการร่วมกันเป็นตัวจัดคู่ลำดับการทำงานของทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3055 และ MJ2955 หรือเป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลของกระแส นั่นเอง โดยรับสัญญาณควบคุมมาจากสัญญาณ SIGN ซึ่งได้มาจากไอซีเบอร์ 74LS374 ที่ทำงานอยู่ในวงจรลอจิกสแตตัสสัญญาณขาขึ้นและ โคขายนั่น



ภาพที่ 3.6 แสดงวงจรขับที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น



Sine Wave PWM

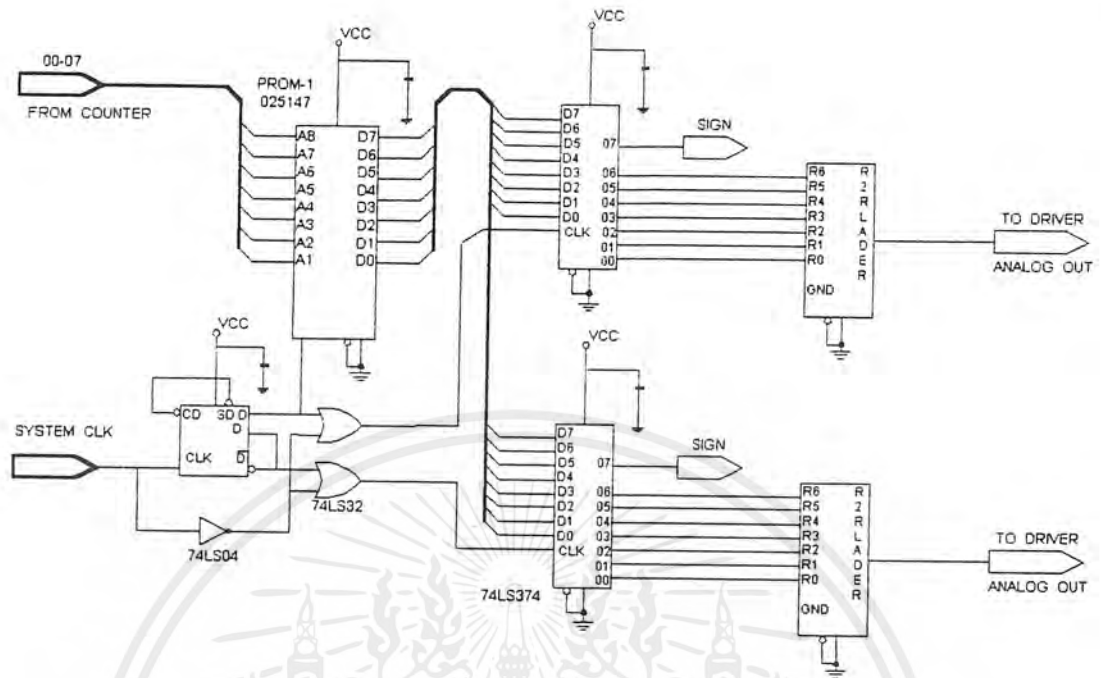
ภาพที่ 3.7 แสดงสัญญาณของค่ารอบเวลาทำงานที่ได้จากการมอดูเลตตามความกว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

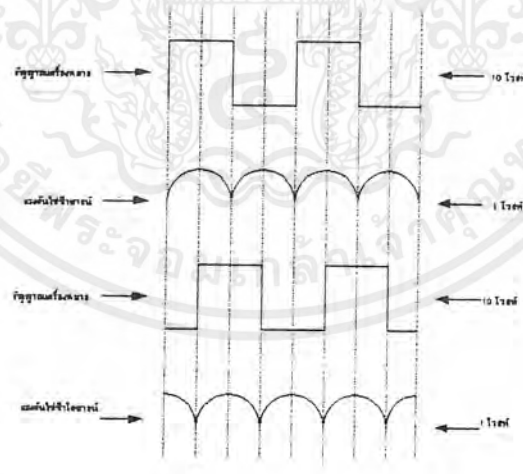
### 3.2.5 หน่วยจัดการข้อมูล (State & Sequencer) และวงจรถอดรหัส (DAC)

หน่วยจัดการข้อมูลและวงจรถอดรหัสเป็นส่วนที่รับสัญญาณจากตัวเข้ารหัส (Encoder) มาวิเคราะห์ทิศทางการหมุนและถอดค่ารหัสในขณะนั้น ๆ ออกมาเป็นสัญญาณรูปคลื่นขาขึ้น และ โขชาขึ้น ซึ่งความละเอียดของรูปคลื่นขาขึ้นที่ได้จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของข้อมูลที่ได้จากตัวเข้ารหัสกับวงจรถอดรหัสที่ใช้วงจรถอดรหัสค่าสัญญาณขาขึ้นและโขชาขึ้นที่ใช้งานวิจัยนี้แสดงดังภาพที่ 3.8 ส่วนภาพที่ 3.9 แสดงลักษณะของสัญญาณขาขึ้นและโขชาขึ้น พร้อมกับสัญญาณเครื่องหมายที่ได้จากวงจรถอดรหัสและตัวเข้ารหัสในหัวข้อ 3.2.6 การทำงานของวงจรถอดรหัสสัญญาณขาขึ้นและโขชาขึ้นจะเริ่มจากมีสัญญาณจากตัวเคาน์เตอร์จำนวน 8 บิตมาเป็นตัวชี้ตำแหน่งของตารางเก็บค่า (TABLE) ที่บันทึกอยู่ในไอซี PROM-1 025147 ที่ขา A1-A8 เพื่อให้ส่งค่าสัญญาณเอาต์พุตเป็นระดับสัญญาณต่าง ๆ ออกทางขา D0-D7 รวม 40 ระดับเพื่อนำไปป้อนให้กับวงจร R/R LADDER โดยผ่านไอซีชิฟเฟอร์เบอร์ 74LS374 ทางขา D0-D7 ซึ่งเป็นไอซี D-FLIPFLOP ก่อน โดยเอาต์พุตของไอซีเบอร์ 74LS374 นี้จะมีค่าสัญญาณเอาต์พุตเหมือนกับสัญญาณเอาต์พุตของไอซีพรมที่ป้อนเข้ามา ซึ่งเอาต์พุตที่ได้จะมีสองแบบ คือ สัญญาณเครื่องหมายและระดับลอจิกจำนวน 40 ค่า และจะถูกนำไปป้อนให้กับวงจร R/R LADDER ทางขา R0-R6 เพื่อแปลงระดับลอจิกให้เป็นเอาต์พุตแบบอนาล็อกเป็นระดับค่าสัญญาณต่าง ๆ ออกไปรวม 40 ระดับโดยสัญญาณรวมที่ได้ออกมาจะเป็นลักษณะสัญญาณขั้นบันไดที่ภาพ โดยรวมเป็น สัญญาณรูปคลื่นขาขึ้น ซึ่งแบ่งเป็นสองชุด คือ แรงดันไฟฟ้าขาขึ้นและแรงดันไฟฟ้าโขชาขึ้น ซึ่งต่างเฟสกันอยู่ 90 องศาตลอดเวลา โดยเราควบคุมการทำงานให้มีความสัมพันธ์กันโดยใช้ SYSTEM CLOCK เป็นตัวควบคุมโดยป้อนให้กับขา CLK ของไอซีเบอร์ 74LS374 ควบคุมให้มีสัญญาณเอาต์พุตออกมาพร้อมกันและอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องสัมพันธ์กัน

รูปร่างของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากวงจร R/R LADDER กับ สัญญาณเครื่องหมายจากไอซีเบอร์ 74LS374 สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.9 และจะถูกนำไปป้อนให้กับวงจรขับที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นดังแสดงในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.8 แสดงวงจรถอดรหัสสัญญาณเซาขันธ์และ โทซายันธ์



ภาพที่ 3.9 แสดงลักษณะของสัญญาณเซาขันธ์และ โทซายันธ์ที่ได้จากวงจรถอดรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.6 ส่วนตัวเข้ารหัสและสเตปป์มอเตอร์ (Encoder & Stepping Motor)

สเตปป์มอเตอร์กับตัวเข้ารหัสมีการเชื่อมต่อแกนเพลลาเข้าด้วยกัน สเตปป์มอเตอร์ที่ใช้เป็นแบบแม่เหล็กถาวร 4 เฟส โดยรายละเอียดอื่น ๆ มีดังนี้

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

จากรายละเอียดสามารถคำนวณหาจำนวนสเตปป์ต่อรอบของสเตปป์มอเตอร์ได้เท่ากับ

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

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

ความละเอียด	2,000	พัลส์ต่อรอบ
จำนวนเอาต์พุต	2	เอาต์พุต
ระดับลอจิก	2	ลอจิกต่อเอาต์พุต

ดังนั้น จำนวนลำดับลอจิกที่ได้ต่อรอบเท่ากับ

$$= (2,000)(2)(2) = 8,000 \text{ ลอจิกต่อรอบ}$$

พิจารณาจำนวนลอจิกจากตัวเข้ารหัส ที่ถูกจัดลำดับเพื่อนำไปถอดรหัสค่าชาชน์ในแต่ละสเตปป์ของมอเตอร์ได้ดังนี้

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

$$= 8,000 / 200$$

$$= 40$$

ดังนั้น สัญญาณชาชน์ที่ถูกถอดรหัสออกมาได้จากข้อมูลจำนวน 40 ข้อมูลซึ่งวงจรถอดรหัสและลักษณะของสัญญาณชาชน์แสดงดังภาพที่ 3.8 และ ภาพที่ 3.9 ข้างต้น จากการทดสอบผลตอบแทนทางด้านความเร็วของสเตปป์มอเตอร์ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนนี้พบว่า ความเร็วรอบของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงตามค่า

แรงดันไฟฟ้า ซึ่งสามารถเขียนสมการเทียบเคียง ได้ดังสมการที่ ①

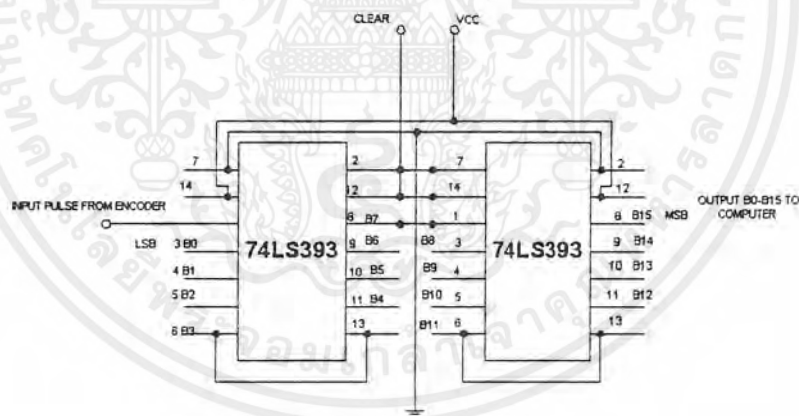
$$N \propto V \quad \text{—————} \quad \text{①}$$

โดยที่ N แทนค่าความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)

V แทนค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ (โวลต์)

### 3.2.7 วงจรนับสัญญาณ

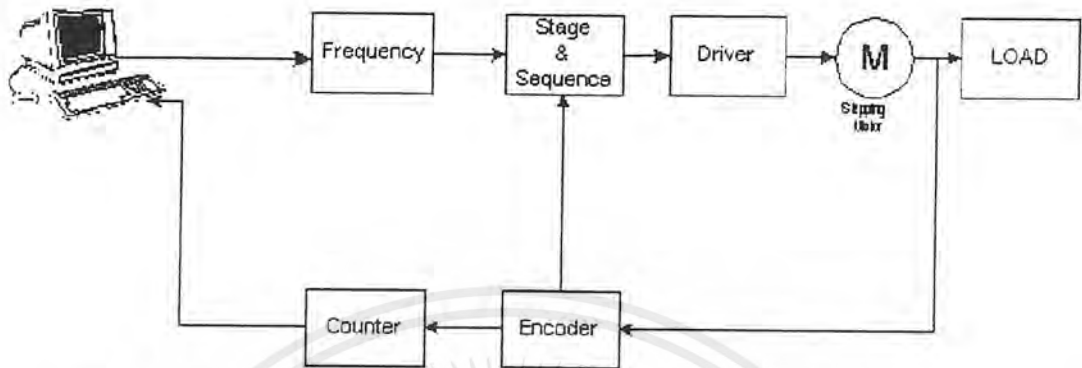
วงจรรับสัญญาณเป็นวงจรที่ใช้รับสัญญาณพัลส์ความถี่ที่ออกมาจากเอนโคเดอร์ โดยใช้ ไอซีเบอร์ 74LS393 ซึ่งมีโครงสร้างภายในเป็น T FLIPFLOP ตามโครงสร้างที่แสดงในภาคผนวก โดยจะนำมาประกอบเข้าด้วยกันเพื่อให้สามารถรองรับจำนวนพัลส์ของเอนโคเดอร์ และสามารถส่งค่าข้อมูลให้กับคอมพิวเตอร์ได้ โดยจะต่อเข้าด้วยกันอย่างไรก็ได้ ตามแต่คุณสมบัติของวงจรที่จะนำไปใช้ ในที่นี้มีเอาต์พุตของวงจรเป็นข้อมูลขนาด 16 บิตป้อนสัญญาณอินพุตเข้ามาทางขา 1 ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตจะถูกป้อนให้กับคอมพิวเตอร์เพื่อนำค่าความถี่ที่ตรวจจับได้ไปประมวลผลในการแสดงผลถึงความเร็วรอบ และประมวลผลช่วยในการควบคุมความเร็วต่อไป



ภาพที่ 3.10 แสดงวงจรรับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 STEPPING MODE



ภาพที่ 3.11 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมความเร็วของโหมด STEPPING

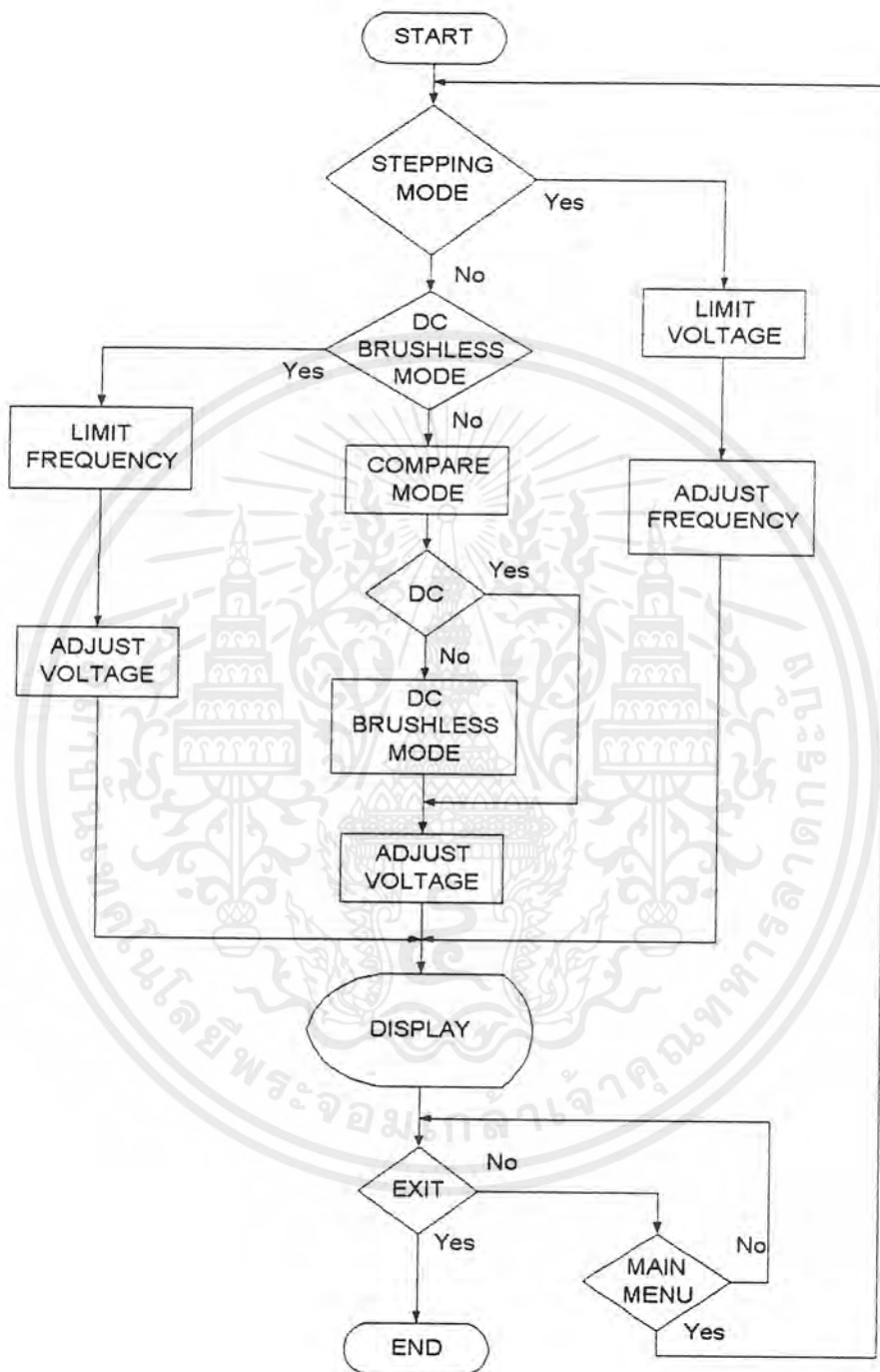
จากบล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของสเตปปีงโหมด จะเห็นว่ามีการทำงานของบล็อกต่าง ๆ เหมือนกับบล็อกการทำงานที่กล่าวมาแล้วของดีซีบรัชเลสโหมด แต่แตกต่างตรงที่มีบล็อก FREQUENCY เข้ามา ซึ่งการทำงานโดยรวมของสเตปปีงโหมด คือเราจะใช้คอมพิวเตอรืเป็นตัวควบคุมในการเปลี่ยนโหมดการทำงานและเช็คความเร็วเหมือนกับดีซีบรัชเลสโหมด แต่ไม่ได้ใช้คอมพิวเตอรืเป็นตัวควบคุมความถี่ที่จ่ายให้คือในบล็อก FREQUENCY จะใช้ตัวกำเนิดความถี่หรือซิกแนลเจนเนอเรเตอร์เป็นตัวป้อนความถี่ให้ โดยใช้คอมพิวเตอรืเป็นตัวเช็คความเร็วและแสดงผลออกมา

### 3.4 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

สามารถอธิบายการทำงานของโพลีชาร์ตได้ดังนี้ คือ เมื่อเข้าสู่โปรแกรมการควบคุม จะมีโหมดการทำงานให้เลือกสามโหมดการทำงานหลักสามโหมดคือ

1. STEPPING MODE ใช้ในการเลือกเพื่อทดสอบการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ในสถานะที่ทำงานเป็นสเตป เหมือนสถานะการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ทั่วไป
2. DC BRUSHLESS MODE ใช้ในการเลือกเพื่อทดสอบการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ในสถานะที่มีกรหมุนอย่างต่อเนื่อง ในลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
3. COMPARE MODE ใช้ในการเลือกเพื่อทดสอบการทำงานของดีซีมอเตอร์และนำมาเปรียบเทียบกับการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ในดีซีบริชเลสโหมด

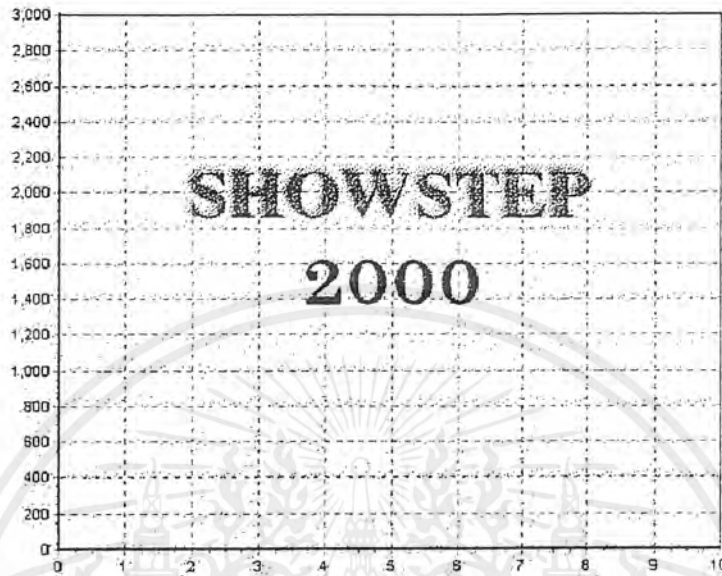
ถ้าเลือกการทำงานแบบสเตปปีงโหมด จะทำการจำกัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรแต่ จะทำการปรับควบคุมความเร็ว โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ที่ป้อนให้ หากเลือกการทำงานแบบดีซีบริชเลสโหมด จะทำการจำกัดความถี่ที่ป้อนให้ แต่จะทำการปรับควบคุมความเร็ว โดยการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันที่ป้อนให้กับวงจรขับ หรือถ้าเลือกอีกโหมดการทำงานหนึ่งคือ โหมดเปรียบเทียบ ( COMPARE MODE ) โดยในโหมดนี้จะให้ทำการเลือก ว่าต้องการจะบันทึกค่าความเร็วของดีซีมอเตอร์หรือสเตปปีงมอเตอร์ในดีซีบริชเลสโหมด ทั้งสองแบบนี้จะมีการทำงานเหมือนกันคือ ปรับควบคุมความเร็ว โดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันควบคุมที่ป้อนให้ ซึ่งในการทำงานของทั้งสามโหมดหลักนี้ จะถูกนำไปแสดงผลที่ หน้าจอควบคุมการทำงานทางจอมอนิเตอร์ของคอมพิวเตอร์ของแต่ละโหมดการทำงาน เมื่อทำการทดลองและบันทึกผลเสร็จแล้ว เราก็สามารถกลับไปสู่หน้าต่างควบคุมหลัก ( MAIN MENU ) หรือจะออกโปรแกรมเลขก็ได้ สามารถแสดงการทำงานทั้งหมดของ โปรแกรมแทนด้วยโพลีชาร์ต ดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 แสดงแผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

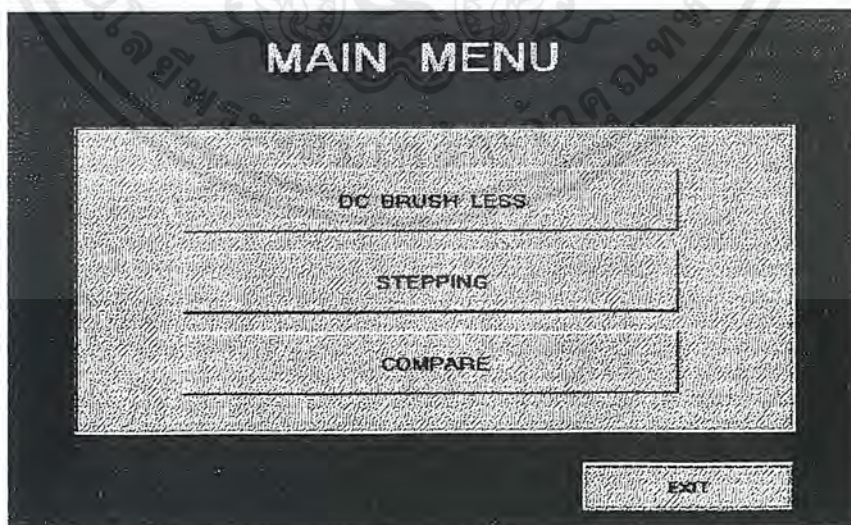
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะเริ่มโปรแกรมจะมี LOGO ของโปรแกรมโชว์ประมาณ 5 วินาที ดังรูป



ภาพที่ 3.13 รูปหน้าต่างโลโกของโปรแกรม

จากนั้นจะเข้าสู่หน้าต่างของเมนูหลัก ซึ่งสามารถเลือกโหมดการทำงานของมอเตอร์ว่าจะทำงานโหมดใดคือ STEPPING MODE หรือ DC BRUSHLESS MODE โดยการกดปุ่มในโหมดที่ต้องการจะทำงาน

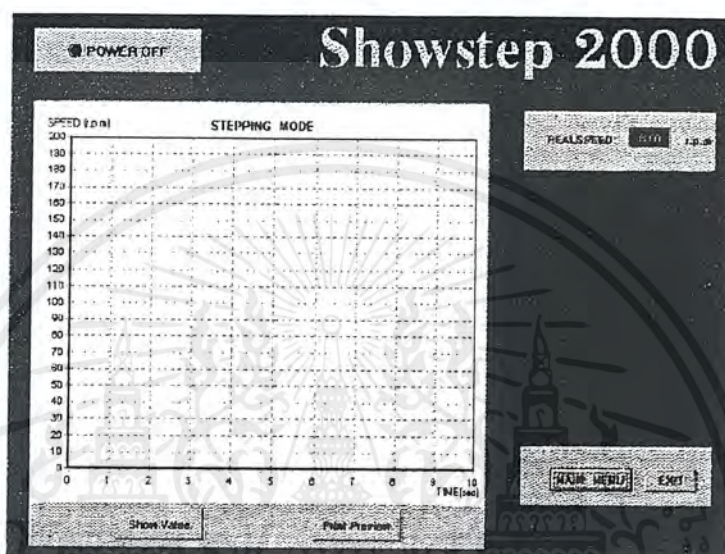


ภาพที่ 3.14 แสดงหน้าต่างหลักของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

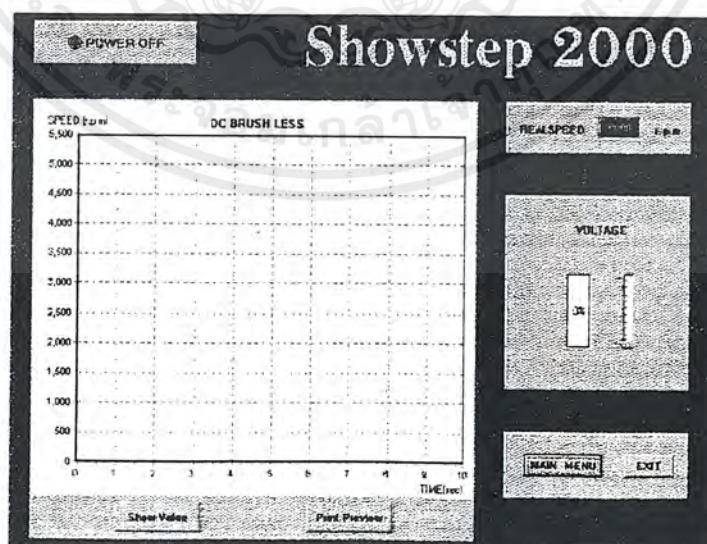
หลังจากทำการเลือกโหมดการทำงานโหมดใดโหมดหนึ่งแล้ว จะมีหน้าต่างควบคุมการทำงานของแต่ละโหมดการทำงานดังต่อไปนี้คือ

### 3.4.1 STEPPING MODE



ภาพที่ 3.15 แสดงหน้าต่างการทำงานของโหมด STEPPING

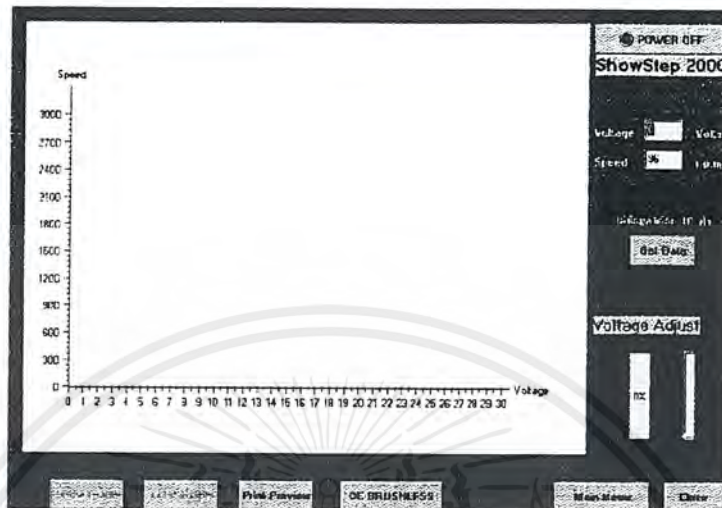
### 3.4.2 DC BRUSHLESS MODE



ภาพที่ 3.16 แสดงหน้าต่างการทำงานของโหมด DC BRUSHLESS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.3 COMPARE MODE



ภาพที่ 3.17 แสดงหน้าต่างการทำงานของ Compare Mode

ในการทำงานทั้งสามโหมด จะมีการควบคุมการทำงานที่จำเป็น ดังนี้

#### ก. ปุ่มควบคุมการทำงานและการแสดงผลต่าง ๆ

ใช้ในการควบคุมการทำงานของฮาร์ดแวร์ทั้งหมด พร้อมทั้งควบคุมการทำงานในส่วนหน้าจอควบคุมของโหมดการทำงานที่เลือก สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 13.18



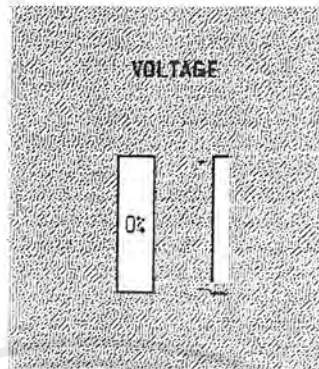
ภาพที่ 3.18 แสดงปุ่มที่ใช้ควบคุมการทำงานและการแสดงผลต่าง ๆ

#### ข. การปรับความเร็วมอเตอร์

การปรับความเร็วของมอเตอร์ แบ่งเป็น

(1) การปรับความเร็วใน DC BRUSHLESS MODE และ COMPARE MODE

ปรับความเร็วโดยการควบคุมจาก SCROLL BAR ดังแสดง ในรูปที่ 3.19



ภาพที่ 3.19 ส่วนของการควบคุมความเร็วมอเตอร์

## (2) การปรับความเร็วใน STEPPING MODE

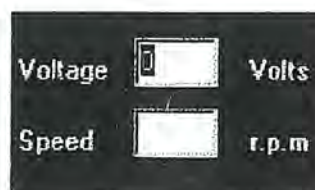
ปรับความเร็วโดยการควบคุมการจ่ายสัญญาณพัลส์กระตุ้นที่จะนำไปทำการจัดลำดับการเคลื่อนที่ของสเตปป์มอเตอร์

### ค. การนับความเร็วรอบของมอเตอร์

การนับความเร็วโดยใช้คอมพิวเตอร์ เราไม่สามารถนับได้โดยตรงจึงต้องสร้างวงจรภายนอกขึ้นมาเพิ่มซึ่งได้แก่วงจรนับที่ได้ออกแบบพัฒนาขึ้นมา จากนั้นก็ทำการสุ่ม เอาค่าของข้อมูลในเวลา 1 ครั้งต่อวินาที มาทำการคำนวณเป็นความเร็วของมอเตอร์อีกทีหนึ่ง



ภาพที่ 3.20 แสดงความเร็วของมอเตอร์ใน DC BRUSHLESS MODE และ STEPPING MODE



ภาพที่ 3.21 แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ใน COMPARE MODE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### ง. ทวบกุม ปุ่มการกลับสู่เมนูหลัก

ใช้เมื่อต้องการกลับไปสู่หน้าต่างเมนูหลัก เพื่อเปลี่ยนโหมดการทำงานอีกครั้งหรือออกจากการทำงานของโปรแกรม แสดงดังภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3.22 แสดงปุ่มควบคุมการกลับสู่เมนูหลัก

#### จ. ปุ่มออกจากการทำงาน

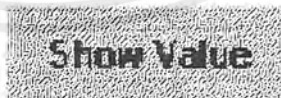
ใช้เมื่อต้องการออกจากการทำงาน หรือจบการทำงานทุกอย่าง แสดงดังภาพที่ 3.23



ภาพที่ 3.23 แสดงปุ่มออกจากการทำงาน

#### ฉ. ปุ่มแสดงค่าของกราฟแสดงผลที่จุดต่าง ๆ

ใช้ในกรณีที่ต้องการให้กราฟที่แสดงอยู่ แสดงค่าตัวเลขกำกับออกมาด้วยเพื่อง่ายต่อการสังเกตค่า ใช้ใน STEPPING MODE และ DC BRUSHLESS MODE แสดงดังรูปที่ 3.24



ภาพที่ 3.24 ปุ่มแสดงค่าของกราฟแสดงผลที่จุดต่าง ๆ

#### ช. ปุ่มแสดงภาพก่อนพิมพ์

ใช้ในกรณีที่ต้องการดูภาพที่จะแสดงออกทางเครื่องพิมพ์ หรือทำการบันทึกค่าเป็นไฟล์ไว้ในที่ที่ต้องการบันทึก เช่น ฟลอปปีดิสก์ (FLOPPY DISK) หรือบันทึกเป็นไฟล์ลงในฮาร์ดดิสก์ เป็นต้น แสดงดังภาพที่ 3.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.25 ปุ่มแสดงภาพก่อนพิมพ์

### ข. การเก็บค่าและแสดงค่าใน COMPARE MODE

จะใช้เฉพาะใน COMPARE MODE เท่านั้นเพื่อเปรียบเทียบการทำงานของ DC BRUSHLESS และ DC MOTOR กระทำโดยเลือกการทำงานก่อนว่าจะเก็บข้อมูลของ DC MOTOR หรือ DC BRUSHLESS การเก็บค่าข้อมูลจะใช้การรับข้อมูลจากการกดปุ่ม GET DATA ที่แสดงดังภาพที่ 3.26 ซึ่งจะต้องทำการเก็บข้อมูลจำนวน 10 ค่าแล้วจึงจะสามารถแสดงผลได้โดยการกดปุ่ม SHOW GRAPH แสดงดังภาพที่ 3.27 เมื่อต้องการต้องการบันทึกค่าก็ทำโดยกดปุ่ม PRINT PREVIEW ดังแสดงในภาพที่ 3.25 และเมื่อดูผลเสร็จสิ้นก็สามารถหยุดการทำงานได้พร้อมกับการหยุดแสดงกราฟ โดยการกดปุ่ม Clear Graph แสดงดังภาพที่ 3.28



ภาพที่ 3.26แสดงปุ่มที่ใช้ในการเก็บข้อมูลที่จะนำมาแสดงผล



ภาพที่ 3.27 แสดงปุ่มที่ใช้ในการแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับความเร็วที่แปรเปลี่ยนตาม



ภาพที่ 3.28 แสดงปุ่มที่ใช้ในการหยุดการทำงานพร้อมกับการหยุดแสดงกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

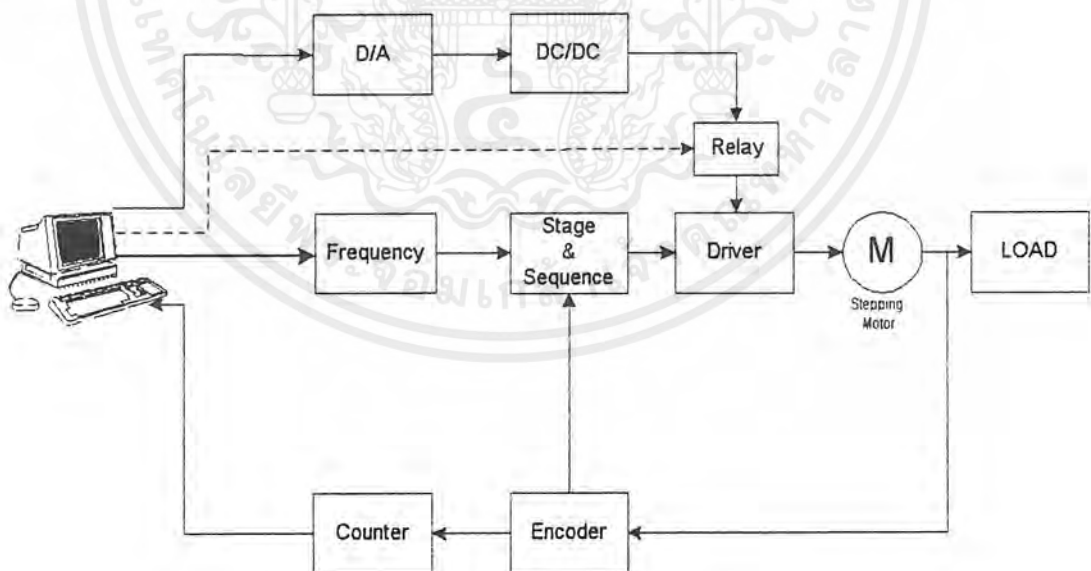
### การทดสอบการทำงานของระบบ

#### 4.1 วัตถุประสงค์การทดลอง

1. เพื่อทดสอบการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับฮาร์ดแวร์ที่พัฒนาขึ้น
2. เพื่อทดสอบการทำงานของวงจร DC / DC ที่พัฒนาขึ้น
3. เพื่อทดสอบการทำงานของวงจรมับที่พัฒนาขึ้น
4. เพื่อทดสอบการทำงานของ โหมดดีซีบรีชเลส
5. เพื่อทดสอบความเร็วของดีซีมอเตอร์ในคอมเพิร์ โหมด
6. เพื่อเปรียบเทียบความเร็วที่ได้จากการควบคุมของวงจรที่พัฒนาขึ้นกับความเร็วที่ได้จากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

#### 4.2 การทดลองและผลการทดลอง

การทำงานของระบบขับเคลื่อนสเตปปีงมอเตอร์ที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นมาสามารถแสดงให้เห็นดังบล็อก ไดอะแกรม ตามภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 แสดงบล็อก ไดอะแกรมของระบบควบคุมความเร็วที่ออกแบบขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีลำดับขั้นตอนการทดลองดังนี้ คือ

1 การทดลองปรับค่าแรงดันไฟฟ้าควบคุม และดูผลของระดับแรงเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นการทดลองเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าควบคุม และดูผลการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมความเร็วที่จ่ายให้แก่วงจรขับเคลื่อน โดยแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมได้จากการปรับค่าแรงดันที่แหล่งจ่ายไฟฟ้า ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1



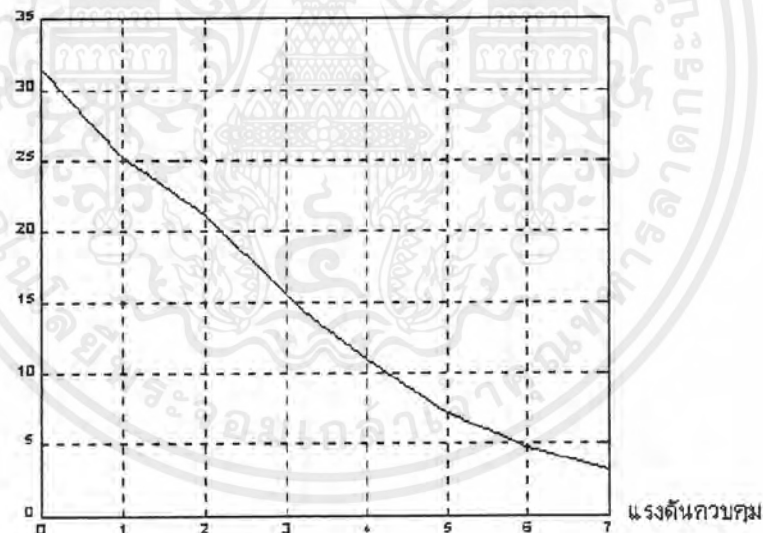
ภาพที่ 4.2 แสดงวงจรจ่ายแรงดันเปลี่ยนแปลงค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Voltage Control (volt)	Voltage Output (volt)
0	31.8
1	25.05
2	21.8
3	15.7
4	11.3
5	7.4
6	4.8
7	3.23

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันควบคุม

แรงดันเอาต์พุต



ภาพที่ 4.3 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันควบคุมกับแรงดันเอาต์พุต

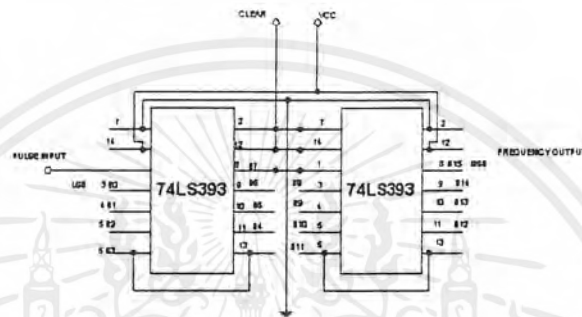
จากตารางแสดงผลการทดลองและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันควบคุมกับแรงดันเอาต์พุต จะเห็นว่าวงจรจ่ายแรงดันเปลี่ยนแปลงค่าได้ที่พัฒนาขึ้น ให้ความถี่ในการปรับค่าแรงดันเอาต์พุตตามค่าแรงดันควบคุมได้เป็นอย่างดี เนื่องจากผลของเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแรงดันไฟฟ้าที่นำมาใช้เป็น แรงดันควบคุมนั้นให้ระดับแรงดันที่คงที่และตัวไอซี เบอร์ LM723เองมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตค่อนข้างดี จึงได้กราฟแสดงความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมพันธ์ระหว่างแรงดันควบคุมกับแรงดันเอาต์พุตออกมาเป็นกราฟที่ใกล้เคียงเส้นตรงดังแสดงในภาพที่ 4.3

## 2. การทดลองความถี่ที่วงจรรนับตรวจวัดได้

เป็นการทดลองค่าที่ตรวจวัดได้โดย วงจรนับที่ทำการออกแบบพัฒนาขึ้น โดยการป้อนสัญญาณพัลส์อินพุต จากเครื่องกำเนิดความถี่จากภายนอก ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

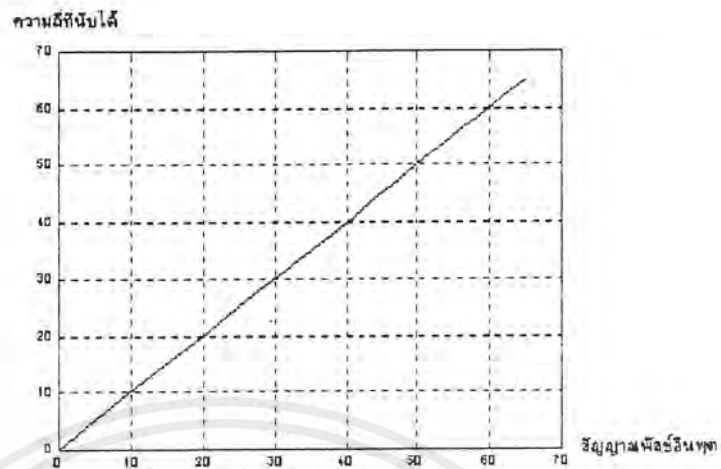


ภาพที่ 4.4 แสดงวงจรรนับความถี่

Pulse Input (KHz)	Frequency output From counter (KHz)
0	0
6.5	6.55
13	13.2
19.5	19.57
26.0	26.12
32.5	32.54
39	39.06
45.5	45.57
52	52.04
58.5	58.52
65	65.11

ตารางที่ 4.2 แสดงผลของความถี่ที่ตรวจวัดได้โดยวงจรรนับที่ออกแบบพัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

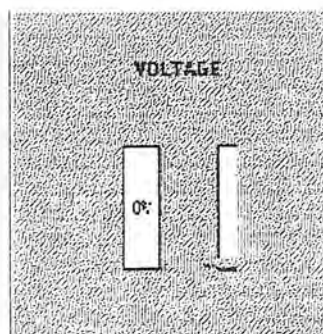


ภาพที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณพัลส์อินพุต กับ ความถี่เอาต์พุตที่นับได้

จากตารางแสดงผลการทดลองและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณพัลส์อินพุต กับความถี่เอาต์พุตที่นับได้ จะเห็นว่าวงจรนับความถี่ที่ออกแบบพัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพในการตรวจนับได้ดีมาก มีความถี่เนียร์มากจนได้ลักษณะกราฟแสดงความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 4.5 ออกมาได้ใกล้เคียงสมการเส้นตรง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความถี่ที่วัดได้โดยใช้ออสซิลโลสโคปวัด จากตัวกำเนิดความถี่โดยตรง ผลที่ได้ออกมาสลับเนื่องมาจากไอซีเบอร์ 74LS393ที่ใช้มีโครงสร้างเป็น T FLIPFLOPที่ต่อกันโดยสมบูรณ์ สามารถนำมาเชื่อมต่อการทำงานได้เป็นอย่างดี มีการต่อใช้งานง่าย จึงลดปัญหาต่างๆ ในด้านความถี่ลงไป เช่น สัญญาณรบกวนต่างๆได้เป็นอย่างดี จึงเหมาะกับการนำมาเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้เป็นอย่างดี ในงานที่ต้องการวัดค่าและรีเซตค่า แต่มีข้อเสียคือในกรณีที่ใช้ความถี่สูงๆ จำเป็นต้องใช้เอาต์พุตของไอซีหลายชุด ทำให้เปลืองพอร์ตที่ใช้ในการติดต่อและข้อจำกัดทางโครงสร้างซึ่งแสดงตาม DATD SHEET ที่แนบมาในภาคผนวก

### 3. การทดลองในไมโครคิตซีบรีลเสส

เป็นการทดลองดูค่าความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไป โดยการปรับค่าแรงดันควบคุมซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3



ภาพที่ 4.6 ส่วนของการควบคุมแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงแรงดัน(volt)	ความเร็วของมอเตอร์ (r.p.m)
7	435
8	833
9	952
10	1071
11	1176
12	1275
13	1368
14	1449
15	1536
16	1612
17	1683
18	1755
19	1815
21	2028
23	2212
25	2396

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของความเร็วมอเตอร์เมื่อแรงดันเปลี่ยนจาก 0-100 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงแรงดัน(volt)	ความเร็วของมอเตอร์ (r.p.m)
2	156
3	288
4	414
5	552
6	678
7	804
8	906
9	1068
10	1200
11	1320
12	1452
13	1590
14	1716
15	1842
16	1968
17	2100
18	2226
19	2352
20	2478

ตารางที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงแรงดันกับความเร็วของDC MOTOR  
ใน COMPARE MODE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถเชื่อมต่อการทำงานระหว่างคอมพิวเตอร์กับฮาร์ดแวร์ที่พัฒนาขึ้นมาได้ดี ซึ่งจากการทดลองวงจรนับโดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวตรวจจับสัญญาณเอาต์พุตของวงจรรับและแสดงผลออกมา จะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการใช้ออสซิลโลสโคปวัดจากตัวกำเนิดความถี่โดยตรง ในด้านผลการทดลองวงจร DC / DC จะเห็นว่าระดับแรงเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไปมีค่าค่อนข้างลิเนียร์ (LINEAR) ตามค่าระดับแรงดันไฟฟ้าควบคุมจึงสามารถนำไปใช้งานได้ดี ส่วนผลการทดลองความเร็วในดีซีบรชเซลล์โหมคที่ได้จากระบบที่พัฒนาขึ้นกับความเร็วที่ได้จากดีซีมอเตอร์จริง จะได้ว่าประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้นมามีค่าที่ใกล้เคียงกับดีซีมอเตอร์จริง ๆ สามารถแสดงผลได้ดังกราฟแสดงผลการทดลองภาพที่ 4.7 และ ภาพที่ 4.8 โดยถ้าเราพิจารณาการทำงานโดยรวมของระบบที่พัฒนาขึ้นมาจะเห็นว่ามีความมีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยค่อนข้างคงที่ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอื่น ๆ ที่ต้องการได้



## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองที่ผ่านมาสามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ให้มีการทำงานได้ 2 แบบ คือ การทำงานในโหมดสเตปปีงมอเตอร์และการทำงานในโหมดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน ( DC BRUSHLESS ) ซึ่งการทำงานในโหมดสเตปปีงมอเตอร์ จะมีการทำงานเหมือนสเตปปีงมอเตอร์ทั่วไปคือ ใช้สัญญาณพัลส์เป็นตัวกระตุ้นกระแสให้กับขดลวดสเตเตอร์ของสเตปปีงมอเตอร์ตามเฟสต่าง ๆ จัดเรียงไปตามตำแหน่งที่จะให้โรเตอร์ของสเตปปีงมอเตอร์หมุนเคลื่อนที่ไป ในที่นี้จัดให้มีการทำงานในลักษณะการหมุนเป็นสเตปไปเรื่อย ๆ ซึ่งกำหนดควบคุมตำแหน่งการหมุนหรือความเร็วรอบของ การหมุนด้วยการควบคุมจำนวนสัญญาณพัลส์ที่ป้อนให้กับวงจรควบคุมสเตปปีงมอเตอร์ ส่วนการทำงานในโหมดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน (DC BRUSHLESS) มีการทำงานที่สามารถควบคุมความเร็วรอบได้ใกล้เคียงกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จากคุณสมบัติที่กล่าวมาที่เราสามารถนำชุดทดลองนี้ไปใช้ในการทดลองศึกษาหรือนำไปใช้ในงานที่ต้องการทำงานประยุกต์ใน ลักษณะเปลี่ยนแปลงโหมดการทำงานระหว่างสเตปปีงมอเตอร์และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในงานอุตสาหกรรมได้ เช่น งานที่กำหนดทิศทางและล็อคตำแหน่งก่อนการหมุนแต่ในขณะหมุนต้องการให้หมุนราบเรียบ จากตัวอย่างที่ยกมาเราจะเห็นว่าชุดทดลองที่ทำการศึกษามะเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานจริงแทน มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมได้หากมีการพัฒนาและปรับปรุงเสถียรภาพให้ดีขึ้นเพราะสามารถควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์จึงมีการใช้งานที่ง่าย และสามารถตรวจสอบความผิดพลาดของชุดทำงานได้

ปัญหาที่พบในงานวิจัยจะเป็นปัญหาในด้านการอินเตอร์เฟสระหว่างคอมพิวเตอร์และฮาร์ดแวร์ เนื่องจากผลของข้อจำกัดทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ โดยเฉพาะปัญหาทางด้านฮาร์ดแวร์ที่มีจำนวนมากทำให้มีขนาดใหญ่ จะเป็นปัญหายากในการซ่อมบำรุงกรณีฮาร์ดแวร์เสียหาย และปัญหาที่เกิดจากผลของกราวด์ระหว่างฮาร์ดแวร์และกราวด์ของคิจิตอลจากคอมพิวเตอร์ ซึ่งแนวทางแก้ไขอาจทำได้โดยพัฒนาฮาร์ดแวร์ให้มีขนาดเล็กลงโดยการปรับปรุงฮาร์ดแวร์ที่เหมาะสมใหม่หรืออาจจะพัฒนาโดยการเขียนโปรแกรมฮาร์ดแวร์บันทึกลงในไอซีฟรอม เพื่อลดขนาดฮาร์ดแวร์โดยจะมีผลไปถึงด้านการลดขนาดราคา ความยากในการใช้งาน และการซ่อมบำรุงเมื่อฮาร์ดแวร์เสียหายลงไปได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Symbol		Parameter	DM74LS393			Units
			Min	Nom	Max	
$V_{CC}$		Supply Voltage	4.75	5	5.25	V
$V_{IH}$		High Level Input Voltage	2			V
$V_{IL}$		Low Level Input Voltage			0.8	V
$I_{OH}$		High Level Output Current			-0.4	mA
$I_{OL}$		Low Level Output Current			8	mA
$f_{CLK}$		Clock Frequency (Note 2)	0		25	MHz
$f_{CLK}$		Clock Frequency (Note 3)	0		20	MHz
$t_w$		Pulse Width (Note 8)	A			ns
		Clear High	20			
$t_{REL}$		Clear Release Time (Notes 4, 8)	25			ns
$T_A$		Free Air Operating Temperature	0		70	°C

Note 1: The "Absolute Maximum Ratings" are those values beyond which the safety of the device cannot be guaranteed. The device should not be operated at these limits. The parametric values defined in the "Electrical Characteristics" table are not guaranteed at the absolute maximum ratings. The "Recommended Operating Conditions" table will define the conditions for actual device operation.

### Electrical Characteristics

over recommended operating free air temperature range (unless otherwise noted)

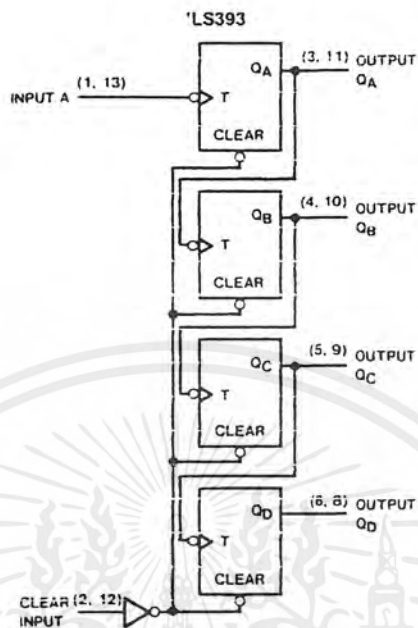
Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ (Note 5)	Max	Units
$V_I$	Input Clamp Voltage	$V_{CC} = \text{Min}, I_I = -18 \text{ mA}$			-1.5	V
$V_{OH}$	High Level Output Voltage	$V_{CC} = \text{Min}, I_{OH} = \text{Max}$ $V_{IL} = \text{Max}, V_{IH} = \text{Min}$	2.7	3.4		V
$V_{OL}$	Low Level Output Voltage	$V_{CC} = \text{Min}, I_{OL} = \text{Max}$ $V_{IL} = \text{Max}, V_{IH} = \text{Min}$ $I_{OL} = 4 \text{ mA}, V_{CC} = \text{Min}$		0.35 0.25	0.5 0.4	V
$I_I$	Input Current @ Max Input Voltage	$V_{CC} = \text{Max}, V_I = 7\text{V}$ $V_{CC} = \text{Max}, V_I = 5.5\text{V}$	Clear A		0.1 0.2	mA
$I_{IH}$	High Level Input Current	$V_{CC} = \text{Max}, V_I = 2.7\text{V}$	Clear A		20 40	$\mu\text{A}$
$I_{IL}$	Low Level Input Current	$V_{CC} = \text{Max}, V_I = 0.4\text{V}$	Clear A		-0.4 -1.6	mA
$I_{OS}$	Short Circuit Output Current	$V_{CC} = \text{Max}$ (Note 6)	-20		-100	mA
$I_{CC}$	Supply Current	$V_{CC} = \text{Max}$ (Note 7)		15	26	mA

Note 2:  $C_L = 15 \text{ pF}$ ,  $R_L = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$  and  $V_{CC} = 5\text{V}$ .  
 Note 3:  $C_L = 50 \text{ pF}$ ,  $R_L = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$  and  $V_{CC} = 5\text{V}$ .  
 Note 4: The symbol ( $\downarrow$ ) indicates that the falling edge of the clear pulse is used for reference.  
 Note 5: All typicals are at  $V_{CC} = 5\text{V}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .  
 Note 6: Not more than one output should be shorted at a time, and the duration should not exceed one second.  
 Note 7:  $I_{CC}$  is measured with all outputs open, both CLEAR inputs grounded following momentary connection to 4.5V, and all other inputs grounded.  
 Note 8:  $T_A = 25^\circ\text{C}$ , and  $V_{CC} = 5\text{V}$ .

Switching Characteristics							
at $V_{CC} = 5V$ and $T_A = 25^\circ C$							
Symbol	Parameter	From (Input) To (Output) *	$R_L = 2 k\Omega$				Units
			$C_L = 15 pF$		$C_L = 50 pF$		
			Min	Max	Min	Max	
$f_{MAX}$	Maximum Clock Frequency	A to $Q_A$	25		20		MHz
$t_{PLH}$	Propagation Delay Time Low to High Level Output	A to $Q_A$		20		24	ns
$t_{DHL}$	Propagation Delay Time High to Low Level Output	A to $Q_A$		20		30	ns
$t_{PLH}$	Propagation Delay Time Low to High Level Output	A to $Q_D$		60		87	ns
$t_{PHL}$	Propagation Delay Time High to Low Level Output	A to $Q_D$		60		87	ns
$t_{PHL}$	Propagation Delay Time High to Low Level Output	Clear to Any Q		39		45	ns

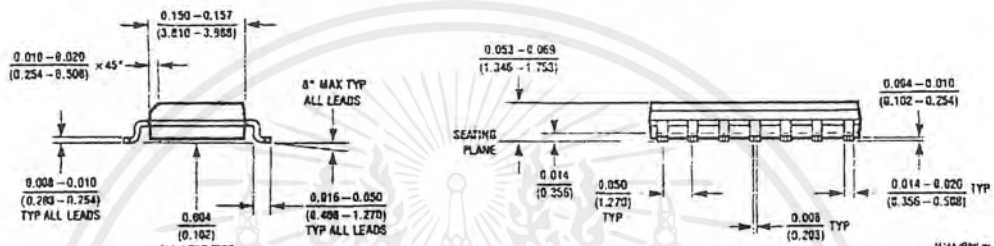
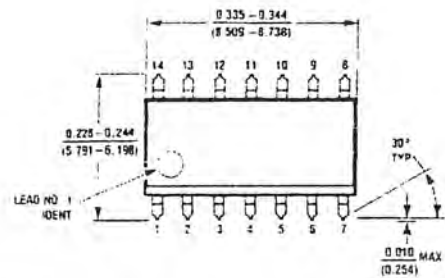
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Logic Diagram

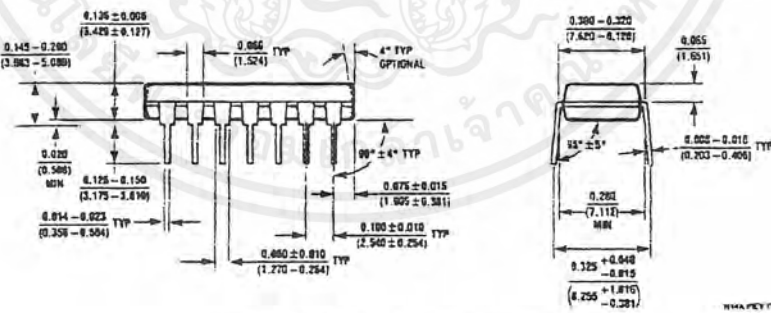
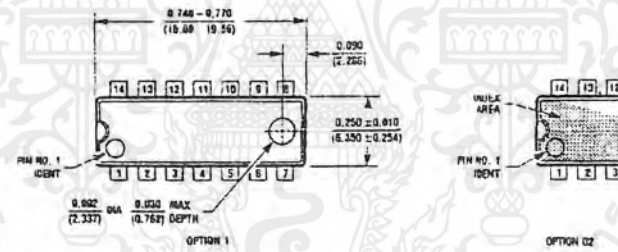


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Physical Dimensions** inches (millimeters) unless otherwise noted



**14-Lead Small Outline Molded Package (M)**  
**Order Number DM74LS393M**  
**Package Number M14A**



**14-Lead Molded Dual-In-Line Package (N)**  
**Order Number DM74LS393N**  
**Package Number N14A**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



#### LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component in any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

Fairchild Semiconductor  
Corporation  
Americas  
Customer Response Center  
Tel: 1-888-622-6372

Fairchild Semiconductor  
Europe  
Fax: +49 (0) 1 80-530 85 88  
Email: europe.support@nsc.com  
Deutsch Tel: +49 (0) 8 141-35-0  
English Tel: +44 (0) 1 793-85-68-68  
Italy Tel: +39 (0) 2 57 5631

Fairchild Semiconductor  
Hong Kong Ltd.  
13th Floor, Straight Block,  
Ocean Centre, 5 Canton Rd.,  
Tsimshatsui, Kowloon  
Hong Kong  
Tel: +852 2737-7200  
Fax: +852 2314-0061

National Semiconductor  
Japan Ltd.  
Tel: 81-3-5620-6175  
Fax: 81-3-5620-6179

[www.fairchildsemi.com](http://www.fairchildsemi.com)

Fairchild does not assume any responsibility for use of any circuitry described, no circuit patent licenses are implied and Fairchild reserves the right at any time without notice to change said circuitry and specifications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# **Designing Switching Voltage Regulators with TL494**

## **Application Report**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Abstract

In this application report, the TL494 switching power supply control is discussed in detail. A general overview of the device's architecture presents the primary functions contained in the 16-pin dual-in-line package and its features. An in-depth study of each of the device's primary building blocks highlights the versatility and limitations of the control circuit and gives a thorough understanding of their interrelationship. Applying the control circuit to several basic applications demonstrates the circuits' usefulness and outlines some still unresolved problems.

## Introduction

Over the past few years, a series of monolithic integrated circuits for the control of switching power supplies have been introduced. One of these, the TL494, combines many of the features previously requiring several control circuits. The TL494 simplifies many design problems with its unique architecture. It is the purpose of this application report to give the reader a thorough understanding of the TL494, its features, its performance characteristics, and its limitations.

## The Basic Device

The design of the TL494 not only incorporates the primary building blocks required for the control of a switching power supply but also addresses many basic problems and reduces the amount of additional circuitry required in a total design. Figure 1 shows a block diagram of the TL494.

## Principle of Operation

The TL494 is a fixed-frequency pulse-width-modulation (PWM) control circuit. Modulation of output pulses is accomplished by comparison of the sawtooth waveform, created by the internal oscillator on the timing capacitor ( $C_T$ ), to either of two control signals. The output stage is enabled during that portion of time when the sawtooth voltage is greater than the control signals. As the control signals increase, the period of time the sawtooth input is greater decreases; therefore, the output pulse duration decreases. A pulse-steering flip-flop alternately directs the modulated pulse to each of the two output transistors. Figure 2 illustrates the relationship between the pulses and signals.

The control signals are derived from two sources: the dead-time (off-time) control circuit and the error amplifier circuit. The dead-time-control input is compared directly by the dead-time-control comparator. This comparator has a fixed 100-mV offset. With the control input biased to ground, the output is inhibited during the portion of time the sawtooth waveform is below 110 mV. This provides a preset dead time of approximately 3%, which is the minimum dead time that can be programmed. The PWM comparator compares the control signal created by the error amplifiers. One function of the error

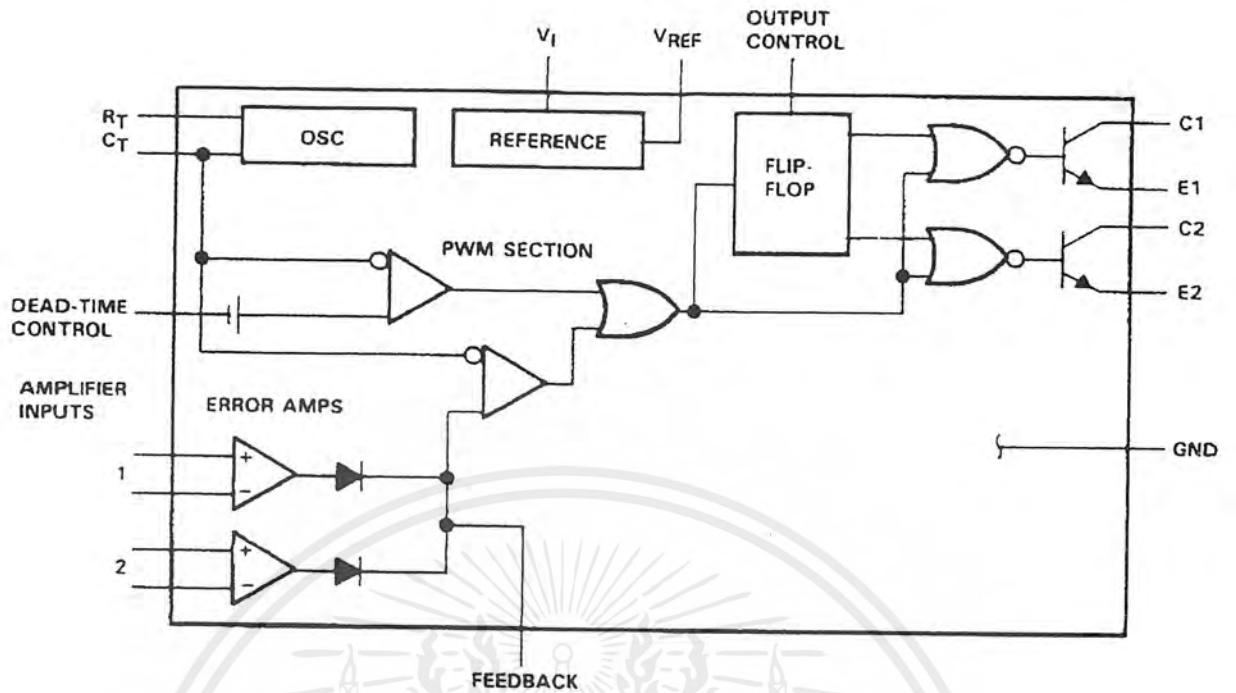


Figure 1. TL494 Block Diagram

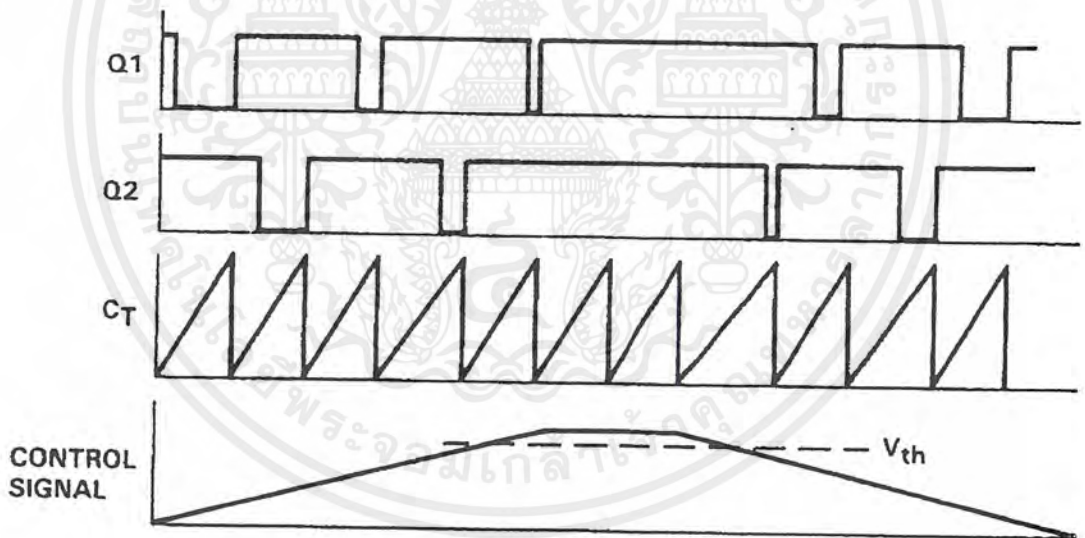


Figure 2. TL494 Modulation Technique

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

amplifier is to monitor the output voltage and provide sufficient gain so that millivolts of error at its input will result in a control signal of sufficient amplitude to provide 100% modulation control. The error amplifiers can also be used to monitor the output current and provide current limiting to the load.

### 5-V Reference Regulator

The TL494 internal 5-V reference regulator is shown in Figure 3. In addition to providing a stable reference, it acts as a preregulator and establishes a stable supply from which the output-control logic, pulse-steering flip-flop, oscillator, dead-time-control comparator, and PWM comparator are powered. The regulator employs a band-gap circuit as its primary reference to maintain a thermal stability of less than 100-mV variation over the operating free-air temperature range of 0°C to 70°C. Short-circuit protection is provided to protect the internal circuit from excessive load or short-circuit conditions. Designed primarily as an internal reference and preregulator, 10 mA of load current is available for additional bias circuits. The reference is internally programmed to an initial accuracy of  $\pm 5\%$  and maintains a stability of less than 25-mV variation over an input voltage range of 7 V to 40 V. For input voltages less than 7 V, the regulator saturates within 1 V of the input voltage and tracks it, as shown in Figure 4.

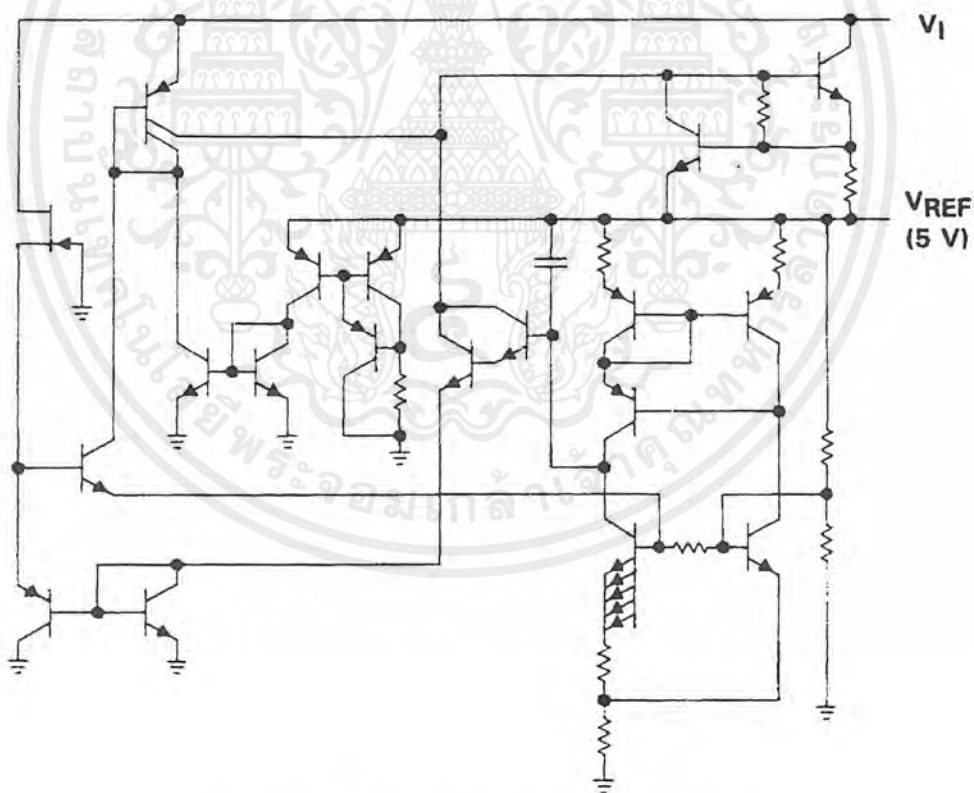


Figure 3. 5-V Reference Regulator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

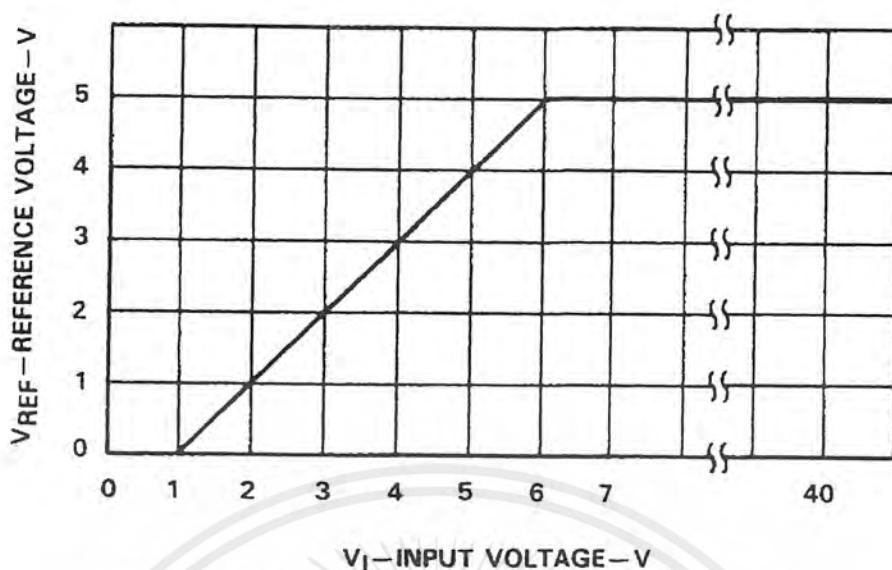


Figure 4. Reference Voltage vs Input Voltage

### Oscillator

A schematic of the TL494 internal oscillator is presented in Figure 5. The oscillator provides a positive sawtooth waveform to the dead-time and PWM comparators for comparison to the various control signals.

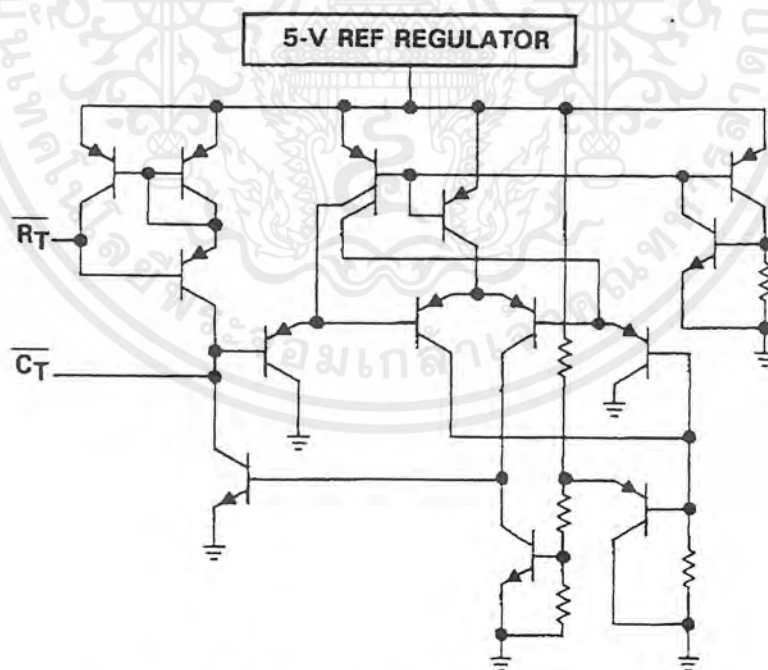


Figure 5. Internal Oscillator Schematic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Operation Frequency

The frequency of the oscillator is programmed by selection of the timing components  $R_T$  and  $C_T$ . The oscillator charges the external timing capacitor,  $C_T$ , with a constant current — the value of which is determined by the external timing resistor,  $R_T$ . This produces a linear-ramp voltage waveform. When the voltage across  $C_T$  reaches 3 V, it is discharged by the oscillator circuit and the charging cycle is reinitiated. The charging current is determined by the formula:

$$I_{\text{CHARGE}} = \frac{3 \text{ V}}{R_T}$$

The period of the sawtooth is:

$$t = \frac{3 \text{ V} \cdot C_T}{I_{\text{CHARGE}}} \quad t = R_T \cdot C_T$$

The frequency of the oscillator then becomes:

$$f_{\text{OSC}} = \frac{1}{R_T \cdot C_T}$$

The oscillator frequency, however, is only equal to the output frequency for single-ended applications; for push-pull applications, the output frequency is one-half the oscillator frequency:

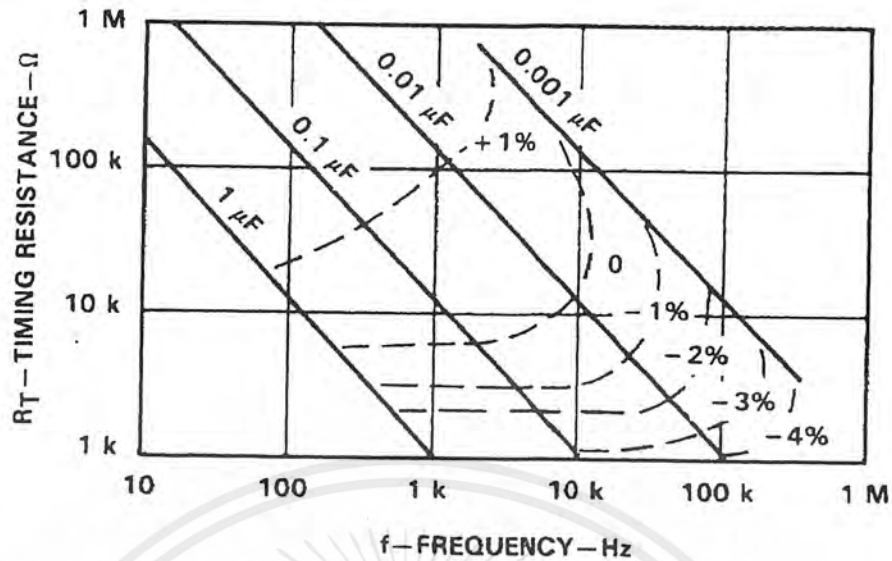
$$\text{Single-ended applications: } f = \frac{1}{R_T \cdot C_T}$$

$$\text{Push-pull applications: } f = \frac{1}{2R_T \cdot C_T}$$

The oscillator is programmable over a range from 1 kHz to 300 kHz. Practical values for  $R_T$  and  $C_T$  range from 1 k $\Omega$  to 500 k $\Omega$  and 470 pF to 10  $\mu$ F, respectively. A plot of the oscillator frequency versus  $R_T$  and  $C_T$  is shown in Figure 6. The stability of the oscillator, for free-air temperature variations from 0 °C to 70 °C for various ranges of  $R_T$  and  $C_T$ , is also indicated in Figure 6.

### Operation Above 150 kHz

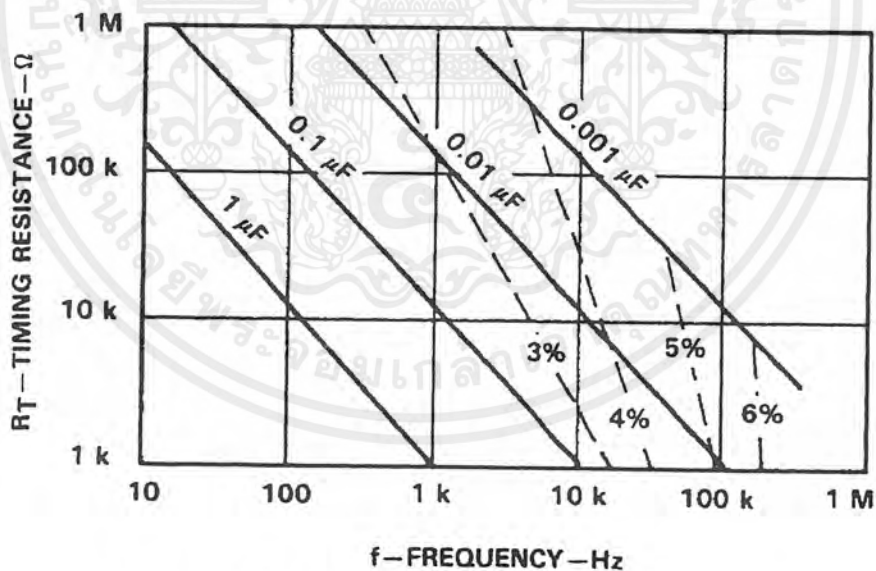
At an operation frequency of 150 kHz, the period of the oscillator is 6.67  $\mu$ s. The dead time established by the internal offset of the dead-time comparator ( $\approx 3\%$  period) yields a blanking pulse of 200 ns. This is the minimum blanking pulse acceptable to assure proper toggling of the pulse-steering flip-flop. For frequencies above 150 kHz, additional



NOTE: The percent of oscillator frequency variation over the 0°C to 70°C free-air temperature range is represented by dashed lines.

**Figure 6. Oscillator Frequency vs  $R_T/C_T$**

dead time (above 3%) is provided internally to assure proper triggering and blanking of the internal pulse-steering flip-flop. Figure 7 shows the relationship of internal dead time (expressed in percent) provided for various values of  $R_T$  and  $C_T$ .



**Figure 7. Variation of Dead Time vs  $R_T/C_T$**

## LM723/LM723C Voltage Regulator

### General Description

The LM723/LM723C is a voltage regulator designed primarily for series regulator applications. By itself, it will supply output currents up to 150 mA; but external transistors can be added to provide any desired load current. The circuit features extremely low standby current drain, and provision is made for either linear or foldback current limiting.

The LM723/LM723C is also useful in a wide range of other applications such as a shunt regulator, a current regulator or a temperature controller.

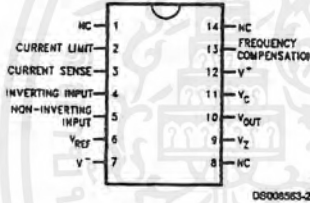
The LM723C is identical to the LM723 except that the LM723C has its performance guaranteed over a 0°C to +70°C temperature range, instead of -55°C to +125°C.

### Features

- 150 mA output current without external pass transistor
- Output currents in excess of 10A possible by adding external transistors
- Input voltage 40V max
- Output voltage adjustable from 2V to 37V
- Can be used as either a linear or a switching regulator

### Connection Diagrams

Dual-In-Line Package

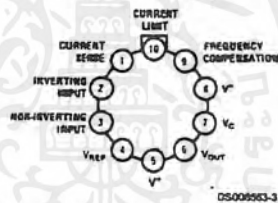


DS008563-2

Top View

Order Number LM723J/883 or LM723CN  
See NS Package J14A or N14A

Metal Can Package

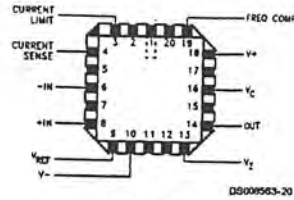


DS008563-3

Top View

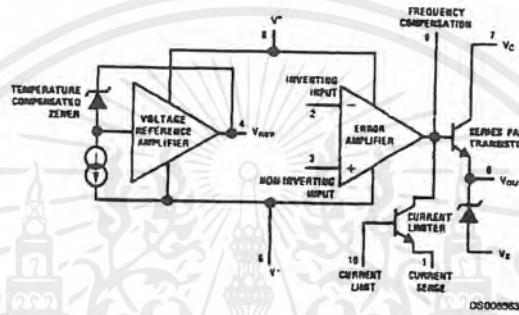
Note: Pin 5 connected to case.  
Order Number LM723H, LM723H/883 or LM723CH  
See NS Package H10C

Connection Diagrams (Continued)



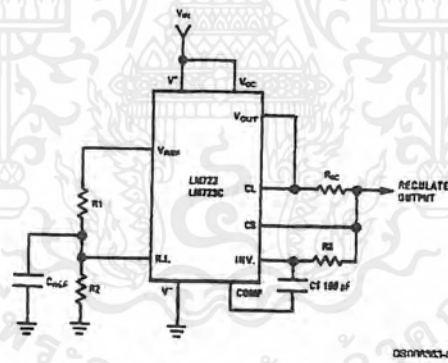
Top View  
Order Number LM723E/883  
See NS Package E20A

Equivalent Circuit\*



\*Pin numbers refer to metal can package.

Typical Application



Note:  $R3 = \frac{R1 R2}{R1 + R2}$

for minimum temperature drift.

Typical Performance

Regulated Output Voltage	5V
Line Regulation ( $\Delta V_{IN} = 3V$ )	0.5mV
Load Regulation ( $\Delta I_L = 50 \text{ mA}$ )	1.5mV

FIGURE 1. Basic Low Voltage Regulator  
( $V_{OUT} = 2 \text{ to } 7 \text{ Volts}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Absolute Maximum Ratings** (Note 1)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

(Note 10)

Pulse Voltage from $V^+$ to $V^-$ (50 ms)	50V
Continuous Voltage from $V^+$ to $V^-$	40V
Input-Output Voltage Differential	40V
Maximum Amplifier Input Voltage (Either Input)	8.5V
Maximum Amplifier Input Voltage (Differential)	5V
Current from $V_Z$	25 mA
Current from $V_{REF}$	15 mA
Internal Power Dissipation Metal Can (Note 2)	800 mW

Cavity DIP (Note 2)	900 mW
Molded DIP (Note 2)	660 mW
Operating Temperature Range	
LM723	-55°C to +150°C
LM723C	0°C to +70°C
Storage Temperature Range	
Metal Can	-65°C to +150°C
Molded DIP	-55°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 4 sec. max.)	
Hermetic Package	300°C
Plastic Package	260°C
ESD Tolerance	1200V
(Human body model, 1.5 k $\Omega$ in series with 100 pF)	

**Electrical Characteristics** (Note 3) (Note 10)

Parameter	Conditions	LM723			LM723C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Line Regulation	$V_{IN} = 12V$ to $V_{IN} = 15V$ $-55^\circ C \leq T_A \leq +125^\circ C$ $0^\circ C \leq T_A \leq +70^\circ C$		0.01	0.1		0.01	0.1	% $V_{OUT}$
	$V_{IN} = 12V$ to $V_{IN} = 40V$		0.02	0.2		0.1	0.5	% $V_{OUT}$
Load Regulation	$I_L = 1 mA$ to $I_L = 50 mA$ $-55^\circ C \leq T_A \leq +125^\circ C$ $0^\circ C \leq T_A \leq +70^\circ C$		0.03	0.15		0.03	0.2	% $V_{OUT}$
				0.6			0.6	% $V_{OUT}$
Ripple Rejection	$f = 50 Hz$ to $10 kHz$ , $C_{REF} = 0$		74			74		dB
	$f = 50 Hz$ to $10 kHz$ , $C_{REF} = 5 \mu F$		86			86		dB
Average Temperature Coefficient of Output Voltage (Note 8)	$-55^\circ C \leq T_A \leq +125^\circ C$ $0^\circ C \leq T_A \leq +70^\circ C$		0.002	0.015		0.003	0.015	%/°C
Short Circuit Current Limit	$R_{SC} = 10\Omega$ , $V_{OUT} = 0$		65			65		mA
Reference Voltage		6.95	7.15	7.35	6.80	7.15	7.50	V
Output Noise Voltage	$BW = 100 Hz$ to $10 kHz$ , $C_{REF} = 0$		86			86		$\mu V_{rms}$
	$BW = 100 Hz$ to $10 kHz$ , $C_{REF} = 5 \mu F$		2.5			2.5		$\mu V_{rms}$
Long Term Stability			0.05			0.05		%/1000 hrs
Standby Current Drain	$I_L = 0$ , $V_{IN} = 30V$		1.7	3.5		1.7	4.0	mA
Input Voltage Range		9.5		40	9.5		40	V
Output Voltage Range		2.0		37	2.0		37	V
Input-Output Voltage Differential		3.0		38	3.0		38	V
$\theta_{JA}$	Molded DIP					105		°C/W
$\theta_{JA}$	Cavity DIP		150					°C/W
$\theta_{JA}$	H10C Board Mount in Still Air		165			165		°C/W
$\theta_{JA}$	H10C Board Mount in 400 LFM/min Air Flow		66			66		°C/W
$\theta_{JC}$			22			22		°C/W

Note 1: "Absolute Maximum Ratings" indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is functional, but do not guarantee specific performance limits.

Note 2: See derating curves for maximum power rating above 25°C.

Note 3: Unless otherwise specified,  $T_A = 25^\circ C$ ,  $V_{IN} = V^- = V_C = 12V$ ,  $V^+ = 0$ ,  $V_{OUT} = 5V$ ,  $I_L = 1 mA$ ,  $R_{SC} = 0$ ,  $C_1 = 100 pF$ ,  $C_{REF} = 0$  and divider impedance as seen by error amplifier  $\leq 10 k\Omega$  connected as shown in Figure 1. Line and load regulation specifications are given for the condition of constant chip temperature. Temperature drifts must be taken into account separately for high dissipation conditions.

Note 4:  $L_1$  is 40 turns of No. 20 enameled copper wire wound on Ferroxcube P36/22-387 pot core or equivalent with 0.009 in. air gap.

Note 5: Figures in parentheses may be used if R1/R2 divider is placed on opposite input of error amp.

Note 6: Replace R1/R2 in figures with divider shown in Figure 13.

Note 7:  $V^+$  and  $V_{CC}$  must be connected to a +3V or greater supply.

Note 8: For metal can applications where  $V_Z$  is required, an external 6.2V zener diode should be connected in series with  $V_{OUT}$ .

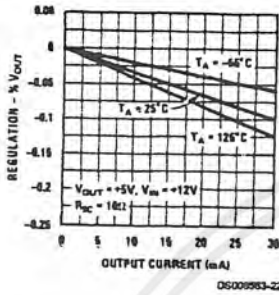
## Electrical Characteristics (Note 3) (Note 10) (Continued)

Note 9: Guaranteed by correlation to other tests.

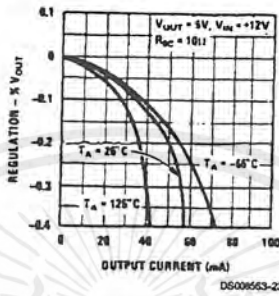
Note 10: A military RETS specification is available on request. At the time of printing, the LM723 RETS specification complied with the Min and Max limits in this table. The LM723E, H, and J may also be procured as a Standard Military Drawing.

### Typical Performance Characteristics

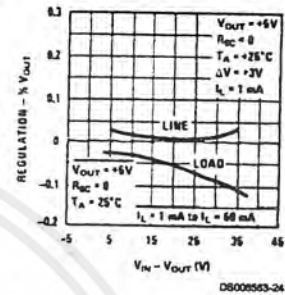
Load Regulation Characteristics with Current Limiting



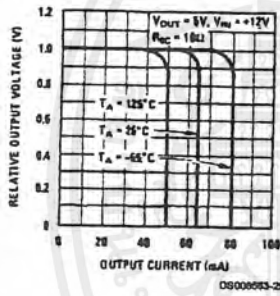
Load Regulation Characteristics with Current Limiting



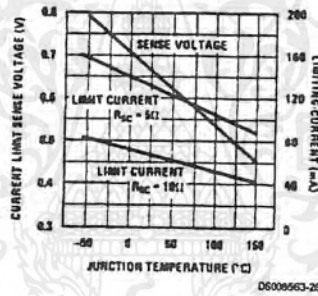
Load & Line Regulation vs Input-Output Voltage Differential



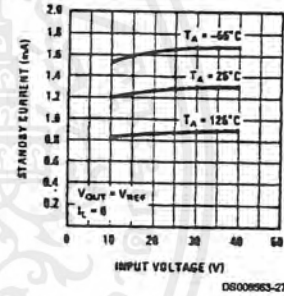
Current Limiting Characteristics



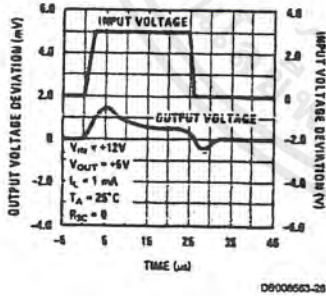
Current Limiting Characteristics vs Junction Temperature



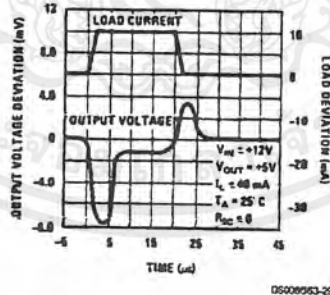
Standby Current Drain vs Input Voltage



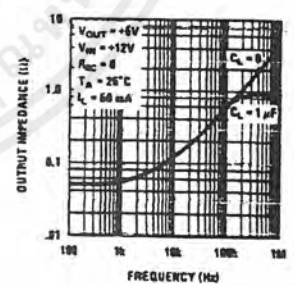
Line Transient Response



Load Transient Response



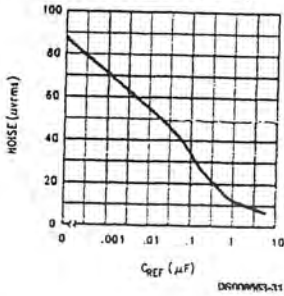
Output Impedance vs Frequency



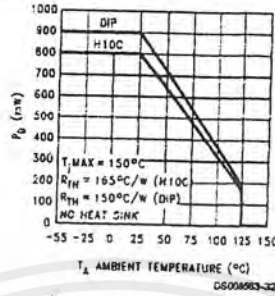
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Maximum Power Ratings

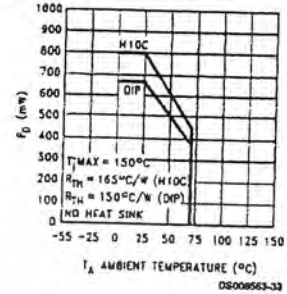
**Noise vs Filter Capacitor**  
( $C_{REF}$  in Circuit of Figure 1)  
(Bandwidth 100 Hz to 10 kHz)



**LM723**  
**Power Dissipation vs**  
**Ambient Temperature**



**LM723C**  
**Power Dissipation vs**  
**Ambient Temperature**



**TABLE 1. Resistor Values (kΩ) for Standard Output Voltage**

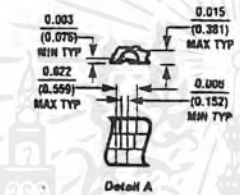
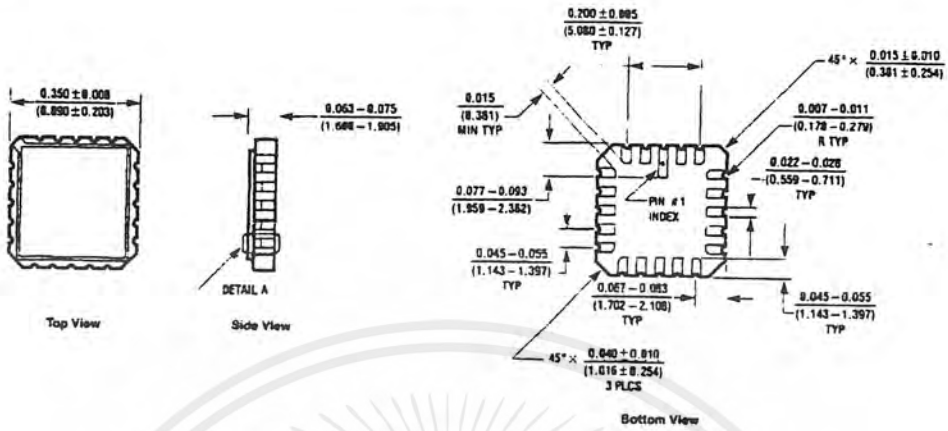
Positive Output Voltage	Applicable Figures (Note 5)	Fixed Output ±5%		Output Adjustable ±10% (Note 6)			Negative Output Voltage	Applicable Figures	Fixed Output ±5%		5% Output Adjustable ±10%		
		R1	R2	R1	P1	R2			R1	R2	R1	P1	R2
	+3.0	1, 5, 6, 9, 12 (4)	4.12	3.01	1.8	0.5	1.2	+100	7	3.57	102	2.2	10
+3.6	1, 5, 6, 9, 12 (4)	3.57	3.65	1.5	0.5	1.5	+250	7	3.57	255	2.2	10	240
+5.0	1, 5, 6, 9, 12 (4)	2.15	4.99	0.75	0.5	2.2	-6 (Note 7)	3, (10)	3.57	2.43	1.2	0.5	0.75
+6.0	1, 5, 6, 9, 12 (4)	1.15	6.04	0.5	0.5	2.7	-9	3, 10	3.48	5.36	1.2	0.5	2.0
+9.0	2, 4, (5, 6, 9, 12)	1.87	7.15	0.75	1.0	2.7	-12	3, 10	3.57	8.45	1.2	0.5	3.3
+12	2, 4, (5, 6, 9, 12)	4.87	7.15	2.0	1.0	3.0	-15	3, 10	3.65	11.5	1.2	0.5	4.3
+15	2, 4, (5, 6, 9, 12)	7.87	7.15	3.3	1.0	3.0	-28	3, 10	3.57	24.3	1.2	0.5	10
+28	2, 4, (5, 6, 9, 12)	21.0	7.15	5.6	1.0	2.0	-45	8	3.57	41.2	2.2	10	33
+45	7	3.57	48.7	2.2	10	39	-100	8	3.57	97.6	2.2	10	91
+75	7	3.57	78.7	2.2	10	68	-250	8	3.57	249	2.2	10	240

**TABLE 2. Formulae for Intermediate Output Voltages**

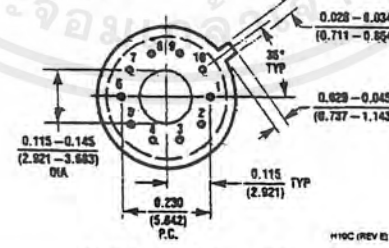
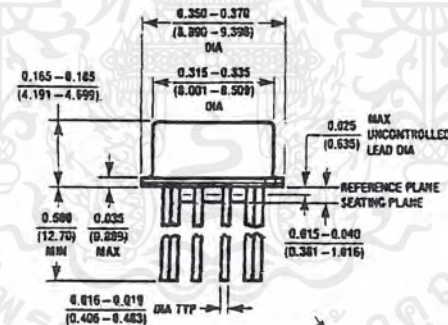
Outputs from +2 to +7 volts (Figures 1, 4, 5, 6, 9, 12)	Outputs from +4 to +250 volts (Figure 7)	Current Limiting
$V_{OUT} = \left( V_{REF} \times \frac{R2}{R1 + R2} \right)$	$V_{OUT} = \left( \frac{V_{REF}}{2} \times \frac{R2 - R1}{R1} \right); R3 = R4$	$I_{LIMIT} = \frac{V_{SENSE}}{R_{SC}}$
Outputs from +7 to +37 volts (Figures 2, 4, 5, 6, 9, 12)	Outputs from -6 to -250 volts (Figures 3, 8, 10)	Foldback Current Limiting
$V_{OUT} = \left( V_{REF} \times \frac{R1 + R2}{R2} \right)$	$V_{OUT} = \left( \frac{V_{REF}}{2} \times \frac{R1 + R2}{R1} \right); R3 = R4$	$I_{KNEE} = \left( \frac{V_{OUT} R3}{R_{SC} R4} + \frac{V_{SENSE} (R3 + R4)}{R_{SC} R4} \right)$ $I_{SHORT\ CKT} = \left( \frac{V_{SENSE}}{R_{SC}} \times \frac{R3 + R4}{R4} \right)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Physical Dimensions** inches (millimeters) unless otherwise noted



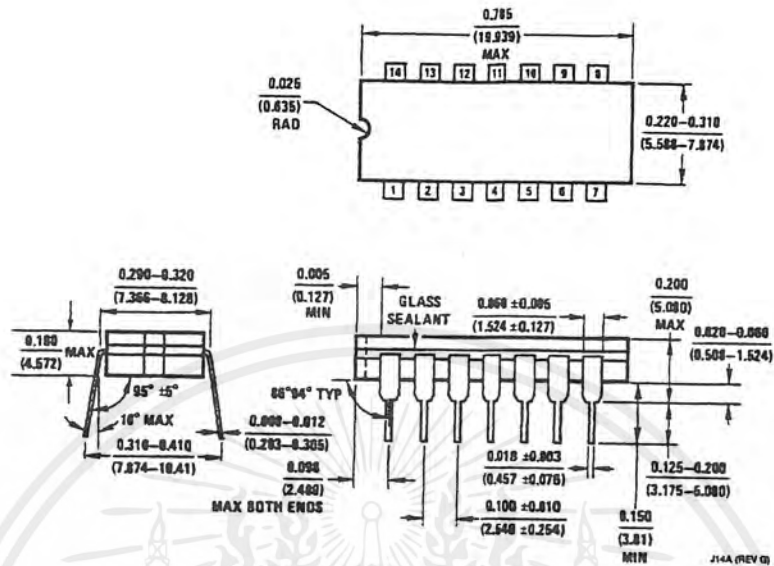
**Leadless Chip Carrier Package (E)**  
Order Number LM723E/883  
NS Package E20A



**Metal Can Package (H)**  
Order Number LM723H, LM723H/883 or LM723CH  
NS Package H10C

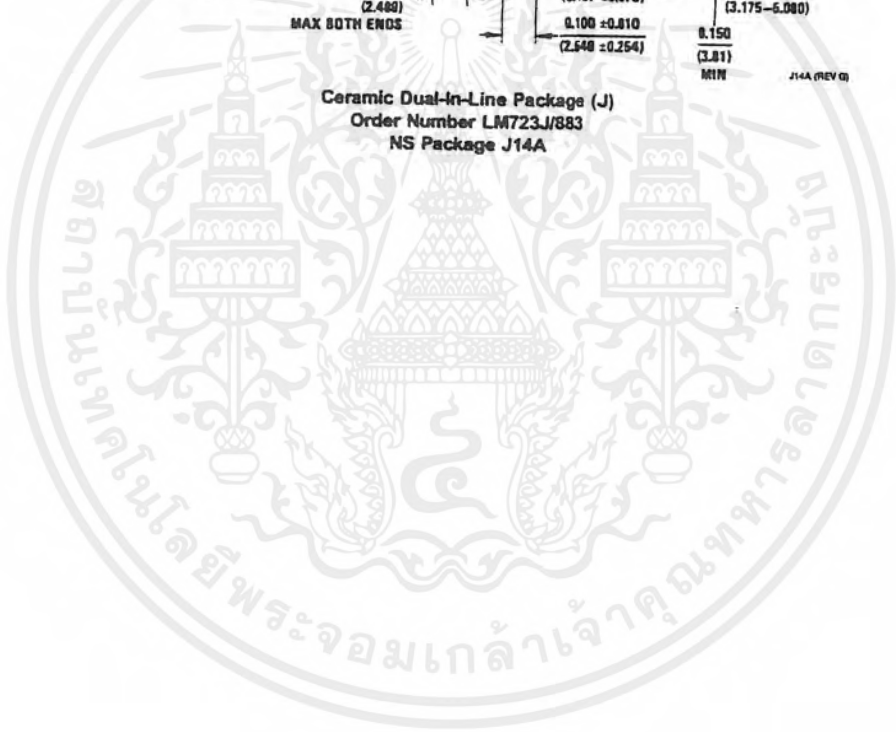
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Physical Dimensions** inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)



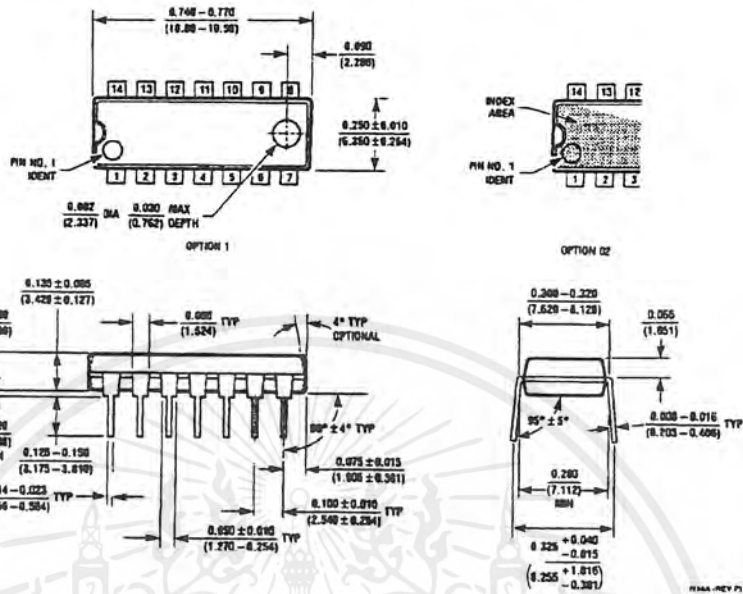
Ceramic Dual-In-Line Package (J)  
Order Number LM723J/883  
NS Package J14A

J14A (REV 0)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Physical Dimensions** inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)



**Molded Dual-In-Line Package (N)**  
**Order Number LM723CN**  
**NS Package N14A**

**LIFE SUPPORT POLICY**

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT AND GENERAL COUNSEL OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

**National Semiconductor Corporation**  
 Americas  
 Tel: 1-800-272-9959  
 Fax: 1-800-737-7018  
 Email: support@nsc.com

**National Semiconductor Europe**  
 Fax: +49 (0) 1 80-530 85 86  
 Email: europe.support@nsc.com  
 Deutsch Tel: +49 (0) 1 80-530 85 85  
 English Tel: +49 (0) 1 80-532 78 32  
 Français Tel: +49 (0) 1 80-532 93 58  
 Italiano Tel: +49 (0) 1 80-534 16 80

**National Semiconductor Asia Pacific Customer Response Group**  
 Tel: 65-2544466  
 Fax: 65-2504466  
 Email: asa.support@nsc.com

**National Semiconductor Japan Ltd.**  
 Tel: 81-3-6639-7560  
 Fax: 81-3-6639-7507

www.national.com

National does not assume any responsibility for use of any circuitry described, no circuit patent licenses are implied and National reserves the right at any time without notice to change said circuitry and specifications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้