

วงจรถควบคุมความเร็วรอบคงที่ของมอเตอร์กระแสตรง  
A CIRCUIT FOR CONSTANT-SPEED CONTROL  
OF DC MOTORS

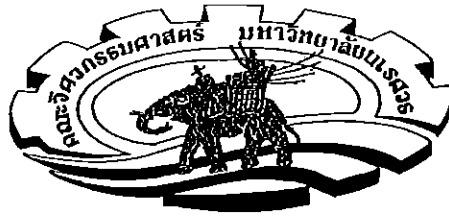
นายปวีณ อินสุวรรณ รหัส 48361608  
นายเอกพงศ์ ภิรมย์วงศ์ รหัส 48364609

15080939. e.2

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ...../...../.....
เลขทะเบียน..... 05200093
เลขเรียกหนังสือ.....
มหาวิทยาลัยนเรศวร

ป.ร.  
1467๑.  
25๕1.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร  
ปีการศึกษา 2551



## ใบรับรองโครงการวิจัย

หัวข้อโครงการ      วงจรควบคุมความเร็วรอบคงที่ของมอเตอร์กระแสตรง  
ผู้เขียนโครงการ      นายปวีณ    อินสุวรรณ์    รหัส 48361608  
   นายเอกพงศ์    ภิรมย์วงศ์    รหัส 48364609  
อาจารย์ที่ปรึกษา      ดร. นิพัทธ์    จันทรมินทร์  
สาขาวิชา              วิศวกรรมไฟฟ้า  
ภาควิชา                  วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
ปีการศึกษา              2551

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี อนุมัติให้โครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะกรรมการสอบโครงการวิจัย

..... ประธานกรรมการ  
(ดร. นิพัทธ์    จันทรมินทร์)

..... กรรมการ  
(ดร. ศุภวรรณ    พลพิทักษ์ชัย)

..... กรรมการ  
(ดร. มุขัฎา    สงฆ์จันทร์)

หัวข้อโครงการ	วงจรควบคุมความเร็วรอบคงที่ของมอเตอร์กระแสตรง
ผู้เขียนโครงการ	นายปวีณ อินสุวรรณ์ รหัส 48361608 นายเอกพงศ์ ภิรมย์วงศ์ รหัส 48364609
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. นิพัทธ์ จันทรมินทร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2551

.....

### บทคัดย่อ

ในโรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบันยังมีการใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อขับภาระอยู่เป็นจำนวนมากเพราะมอเตอร์กระแสตรงเป็นมอเตอร์ที่มีแรงบิดเริ่มหมุนสูงและยังสามารถปรับความเร็วรอบได้ง่ายกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ในโรงงานอุตสาหกรรมอาจมีการใช้มอเตอร์กระแสตรงในการสร้างผลิตภัณฑ์ซึ่งอาจใช้ความเร็วรอบที่คงที่แต่ถ้าหากเกิดการลดลงของความเร็วรอบอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่ผลิตภัณฑ์ได้ โครงการนี้จึงเล็งเห็นปัญหาที่เกิดขึ้นจึงได้ทำการสร้างวงจรเพื่อควบคุมความเร็วรอบให้คงที่ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อที่จะลดปัญหาที่เกิดขึ้น โดยจำลองขนาดของมอเตอร์ให้มีขนาดเล็กเพื่อง่ายต่อการควบคุมและใช้ความถี่ของมอเตอร์ในการขับภาระ

**Project Title**            A Circuit for Constant-Speed Control of DC Motors  
**Name**                    Mr. Phaween Insuwan            ID. 48361608  
                                  Mr. Aekapong Phiromvong      ID. 48364609  
**Project Advisor**        Mr. Niphat Jantharamin, Ph.D.  
**Major**                    Electrical Engineering  
**Department**            Electrical and Computer Engineering  
**Academic Year**         2008

---

### ABSTRACT

This thesis presents a control circuit for constant-speed drive of dc motors. Nowadays, electric DC motors are still widely used for driving loads in industries because they provide high starting torque and are more suitable for speed variation, compared with AC motors. In industries, DC motors are often required to run at constant rotational speed in manufacturing processes so that the products would not be damaged. This project is therefore aimed at developing a control circuit for constant-speed drive regarding load variations. Hereby, a small motor was chosen for testing in order to reduce the complexity of control circuitry.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียน โครงการขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร. นิพัทธ์ จันทรมินทร์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้คอยชี้แนะแนวทางตลอดการทำโครงการ นอกจากนี้ยังขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ยืมใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่างๆอันประโยชน์ต่อการดำเนินโครงการอย่างยิ่ง

นอกจากนี้คณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับผู้เขียนโครงการ ทางผู้เขียนโครงการใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณคุณเมณฑต์ พิกเอม ที่ให้คำแนะนำในการทำโครงการช่วงแรก

ขอขอบคุณคุณณัฏฐมงคล ชุ่มวงศ์ ที่ให้คำแนะนำในการทำโครงการช่วงการออกแบบและให้แนวคิดในการออกแบบวงจร

ขอขอบคุณคุณฤดา ชุ่มวงศ์ ที่ให้คำแนะนำและให้อุปกรณ์ในการทำฐานและแท่นมอเตอร์

ขอขอบคุณคุณอังกร วานิชปราการกิจ ที่ช่วยให้แนวคิด และคำปรึกษาในการออกแบบวงจร รวมทั้งคำแนะนำเกี่ยวกับวงจรที่ใช้ปฏิบัติงานจริง

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาอย่างหาที่เปรียบมิได้ที่ให้ความรัก ความหวังดี กำลังใจ และคอยสนับสนุนในทุก ๆ ด้านตลอดมา

นายปวีณ อินสุวรรณ

นายเอกพงษ์ ภิรมย์วงศ์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ.....	2
1.6 งบประมาณ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	3
2.1 หลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง.....	3
2.1.1 การทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	4
2.1.2 การทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า.....	6
2.1.3 แรงบิด.....	10
2.2 สมการความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	11
2.3 คุณสมบัติมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	12
2.3.1 คุณสมบัติมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน.....	12
2.3.2 คุณสมบัติมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม.....	15
2.3.3 คุณสมบัติมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม.....	17
2.3.4 การเปรียบเทียบมอเตอร์ชนิดต่างๆ.....	18
2.3.5 ความสามารถในการเร่งและหน่วงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง..	19
2.4 การควบคุมความเร็วรอบคงที่โดยไม่ขึ้นอยู่กับค่าโหลด.....	20

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การสร้างวงจรการทำงาน.....	22
3.1 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมด้วยการมอดูเลตความกว้างพัลส์.....	22
3.1.1 ขั้นตอนการสร้างวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์.....	22
3.1.2 การเลือกใช้อุปกรณ์ของวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์.....	22
3.2 การสร้างวงจรป้อนกลับ.....	25
3.2.1 ขั้นตอนการสร้างวงจรวจรป้อนกลับ.....	25
3.2.2 การเลือกใช้อุปกรณ์ของวงจrp้อนกลับ.....	25
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	30
4.1 ผลการทดลองการหาค่าคงที่ของมอเตอร์.....	30
4.2 ผลการทดลองของวงจรควบคุมมอเตอร์โดยไม่ขึ้นอยู่กับค่าโหลด.....	31
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	35
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	35
5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข.....	35
เอกสารอ้างอิง.....	37
ภาคผนวก ก รายละเอียดของไอซี TL494CN.....	38
ภาคผนวก ข รายละเอียดของมอเตอร์ IRF 510N.....	44
ภาคผนวก ค รายละเอียดไอซี LM324N.....	47
ภาคผนวก ง รายละเอียดของมอเตอร์.....	52
ภาคผนวก จ ข้อมูลจากการทดลองวัดค่าความเร็วรอบเทียบกับแรงดันป้อนเข้าของมอเตอร์.....	58
ภาคผนวก ฉ ข้อมูลจากวัดค่าความเร็วรอบในการทดลองแบบต่างๆ.....	60
ประวัติผู้เขียนโครงการ.....	65

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ส่วนประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง..... 3
2.2	การเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ..... 4
2.3	ทิศการเคลื่อนที่ของตัวนำในสนามแม่เหล็กตามกฎมือขวา..... 6
2.4	การสร้างแรงบิดจนทำให้อาร์เมเจอร์หมุน..... 8
2.5	รูปวงจรรวมควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรง..... 21
3.1	รูปและขาต่างๆของ TL494CN..... 23
3.2	แผนภาพของวงจรภายใน TL494CN..... 23
3.3	แผนภาพของวงจรภายใน TL494CN..... 24
3.4	รูปและขาต่างๆของ LM324N..... 25
3.5	แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในวงจรทั้งหมด..... 26
3.6	แผงวงจรด้านหน้าวงจร..... 27
3.7	แผงวงจรด้านหลังวงจร..... 28
3.8	วงจรที่ต่อกับมอเตอร์..... 28
3.9	มอเตอร์ต่อกับ โหลด..... 29
4.1	ค่าแรงดันเทียบกับความเร็วรอบของมอเตอร์แต่ละตัว..... 30
4.2	การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ในกรณีที่ 1..... 32
4.3	การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ในกรณีที่ 2..... 33
4.4	การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ในกรณีที่ 3..... 33
4.5	การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ในกรณีที่ 4..... 34



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

มอเตอร์นับเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าต่างๆเนื่องจากการทำหน้าที่เป็นตัวต้นกำลัง โดยแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ ก็คือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ โดยมีลักษณะการใช้งานที่ต่างกันในปัจจุบัน โรงงานอุตสาหกรรมนิยมใช้มอเตอร์กระแสสลับมากกว่าเนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนขนาดเล็กกว่า และต้องการการบำรุงรักษาน้อยกว่ามอเตอร์กระแสตรงที่พิกัดเท่ากัน

อย่างไรก็ตามมอเตอร์กระแสตรงก็ยังมิใช่อุปกรณ์งานที่ต้องการแรงบิดเริ่มต้นสูงและต้องการควบคุมความเร็วในช่วงต่างๆเพราะว่าการควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงจะทำได้ง่ายกว่า และสามารถปรับความเร็วได้ในช่วงกว้างกว่าในกรณีของมอเตอร์กระแสสลับแต่ความเร็วรอบของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามค่าโหลดที่ต่ออยู่ดังนั้น โครงการนี้จึงมุ่งเน้นการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงให้มีค่าคงที่โดยไม่ขึ้นอยู่กับค่าของ โหลด

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อศึกษาวิธีควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรง
- 2) เพื่อออกแบบและสร้างวงจรควบคุมความเร็วรอบคงที่ของมอเตอร์กระแสตรง

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1) ศึกษาหลักการทำงานและวิธีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรง
- 2) ออกแบบวงจรควบคุมความเร็วรอบโดยใช้การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control)
- 3) สร้างวงจรควบคุมความเร็วรอบตามที่ออกแบบแล้วทำการทดสอบและสรุปผล

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

รายละเอียด	ปี 2551							ปี 2552		
	มี.ย	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค
1. ศึกษาหลักการการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง	■									
2. ศึกษาวิธีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรง	■	■								
3. ออกแบบวงจรควบคุมความเร็วรอบ	■	■	■							
4. สร้างวงจรควบคุมฯ				■	■					
5. ทำการทดสอบและปรับปรุงวงจรควบคุมฯ				■	■	■				
6. วิเคราะห์และสรุปผลโครงการ							■	■	■	
7. สรุปผลการทำโครงการและจัดทำรายงาน							■	■	■	■

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

- 1) เข้าใจวิธีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงแบบต่างๆ
- 2) สามารถสร้างวงจรควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงได้

## 1.6 งบประมาณ

- |                                       |                  |
|---------------------------------------|------------------|
| 1) ค่ามอเตอร์กระแสตรง                 | 800 บาท          |
| 2) ค่าวงจรควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ | 1,000 บาท        |
| 3) ค่าเอกสาร                          | 1,500 บาท        |
| รวมเป็นเงิน (สองพันบาทถ้วน)           | <u>3,300 บาท</u> |

หมายเหตุ: ถัวเฉลี่ยทุกรายการ

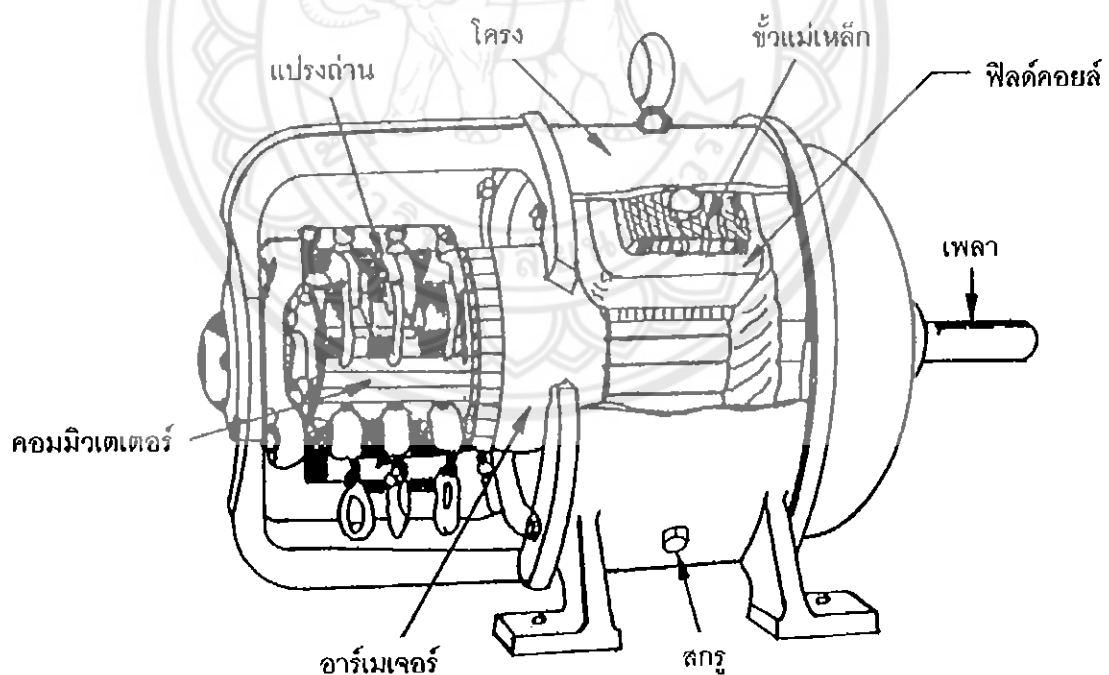
## บทที่ 2

### ทฤษฎีควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรง

ส่วนประกอบหลักของวงจรควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงที่ศึกษาในโครงการนี้คือเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง (DC machine) และวงจรควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ในบทนี้จึงได้อธิบายทฤษฎีและหลักการทำงานพื้นฐานของอุปกรณ์หลักดังกล่าว

#### 2.1 หลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

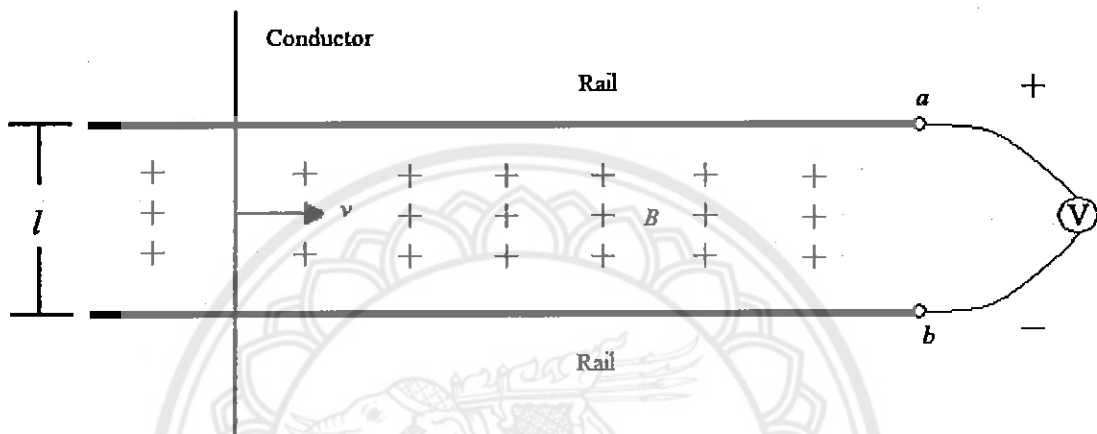
พลังงานสามารถเปลี่ยนจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งได้ ในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงมีการแปลงรูประหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานกล โดยทั่วไปเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงสามารถทำงานเป็นได้ทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (DC generator) และมอเตอร์ไฟฟ้า (DC motor) โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า และมอเตอร์ไฟฟ้าเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง [2]

### 2.1.1 การทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator action)

ขณะที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ด้านออก (Output) ของเครื่องจักร หลักการพื้นฐานในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถอธิบายได้โดยพิจารณารูปที่ 2.2 ส่วนของแท่งตัวนำอันหนึ่งมีความยาว  $l$  วางอยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ  $B$  แท่งตัวนำสามารถเคลื่อนที่และสัมผัสกับรางคู่ขนานซึ่งเชื่อมต่อกับโวลต์มิเตอร์เพื่อวัดแรงดันที่เกิดขึ้นระหว่างจุด  $a$  และจุด  $b$



รูปที่ 2.2 การเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [3]

ถ้าแท่งตัวนำเคลื่อนที่ไปทางขวาตามรูปที่ 2.2 เส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องวงจรจะมีค่าเปลี่ยนแปลง ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าขึ้นตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) ซึ่งจะมีใจความว่า “แรงขับเคลื่อนทางไฟฟ้า (Electromotive force, EMF) จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในวงจรที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็ก ถ้า (1) เส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องวงจรมีค่าเปลี่ยนแปลง หรือ (2) มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างแท่งตัวนำตัดกับเส้นแรงแม่เหล็ก” โดยการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าตามรูปที่ 2.3 จะสอดคล้องกับกรณีที่สอง

เมื่อแท่งตัวนำเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v$  ภายใต้สนามแม่เหล็ก แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรสามารถวัดได้ด้วยเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้า (Voltmeter) และคำนวณได้จาก

$$\bar{e} = l\bar{v} \times \bar{B} \quad (2.1)$$

โดยที่

$\bar{e}$  คือเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

$l$  คือความยาวของแท่งตัวนำในสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเมตร (m)

$\bar{v}$  คือเวกเตอร์ของความเร็วในการเคลื่อนที่ของตัวนำ มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (m/s)

$\bar{B}$  คือเวกเตอร์ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเทสลา (T)

ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นจะเป็นไปตามกฎมือขวา ถ้าสนามแม่เหล็กหรือการเคลื่อนที่ของแท่งนำมีการกลับทิศ จะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับขั้ว แต่หากทั้งสนามแม่เหล็กและการเคลื่อนที่ของแท่งตัวนำกลับทิศ ขั้วของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะคงเดิม

ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าคำนวณได้จาก

$$e = lvB \sin \theta \quad (2.2)$$

โดยที่  $\theta$  คือมุมระหว่าง  $\vec{v}$  และ  $\vec{B}$

เราจะพบว่าขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่าสูงสุดเมื่อ  $\theta = 90^\circ$  นั่นคือทิศการเคลื่อนที่ของแท่งตัวนำตั้งฉากกับทิศของสนามแม่เหล็ก เราสามารถเขียนได้ว่า

$$e = lvB \quad (2.3)$$

จริง ๆ แล้วแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สร้างขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกชนิดจะเป็นไฟกระแสสลับในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง แรงเคลื่อนไฟฟ้าดังกล่าวจะถูกแปลงเป็นไฟกระแสตรงโดยคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ซึ่งนอกจากจะทำหน้าที่เป็นสะพานไฟเชื่อมต่อระหว่างแท่งตัวนำของอาร์เมเจอร์ (Armature) กับแปรงถ่าน (Brush) ออกสู่วงจรภายนอกแล้วยังทำหน้าที่เป็นตัวเรียงกระแส (Rectifier) เพื่อแปลงแรงดันไฟกระแสสลับที่ถูกสร้างขึ้นภายในเครื่องจักรให้กลายเป็นแรงดันไฟกระแสตรงที่ขั้วค้ำออกของเครื่องจักร

ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สร้างขึ้นขึ้นอยู่กับจำนวนแท่งตัวนำบนอาร์เมเจอร์ จำนวนขั้วแม่เหล็ก และลักษณะการเชื่อมต่อของแท่งตัวนำบนอาร์เมเจอร์ นั่นคือ

$$E_a = \frac{ZP}{60a} \phi n = k_g \phi n \quad (2.4)$$

$$\text{หรือ} \quad E_a = \frac{ZP}{2\pi a} \phi \omega = k_m \phi \omega \quad (2.5)$$

โดยที่  $E_a$  คือแรงเคลื่อนไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

$Z$  คือจำนวนแท่งตัวนำบนอาร์เมเจอร์

$P$  คือจำนวนขั้วแม่เหล็ก

$a$  คือจำนวนเส้นทางขนานบนอาร์เมเจอร์

$\phi$  คือปริมาณเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวบมายเลข (Wb)

$n$  คือความเร็วรอบของโรเตอร์ มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (rpm)

$\omega$  คือความเร็วรอบของโรเตอร์ มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที (rad/s)

$k_g$  คือค่าคงที่ของเครื่องจักร ( $k_g = ZP/60a$ )

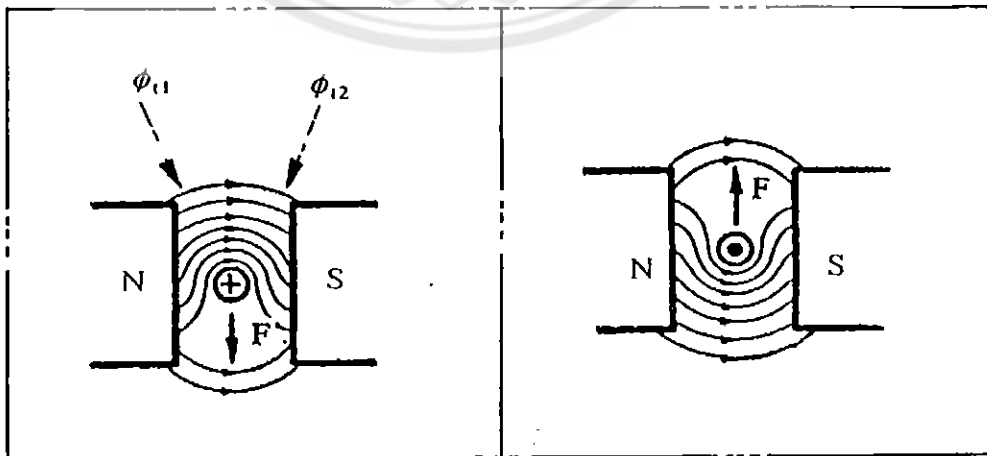
$k_m$  คือค่าคงที่ของเครื่องจักร ( $k_m = ZP/2\pi a$ )

จะเห็นว่าเราสามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสร้างขึ้นได้โดยควบคุมความเร็วรอบของเครื่องต้นกำลัง (Prime mover) หรือควบคุมกระแสกระตุ้นเพื่อเปลี่ยนค่าปริมาณเส้นแรงแม่เหล็ก

2.1.2 การทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า (Motor action)

หน้าที่ของมอเตอร์ไฟฟ้าคือการสร้างแรงบิด (Torque) ซึ่งจะทำให้โรเตอร์หมุน ในการนี้ มอเตอร์จำเป็นจะต้องสร้างแรง (Force) เพื่อจะทำให้เกิดแรงบิด ซึ่งทำได้โดยวางแท่งตัวนำไว้ในสนามแม่เหล็กแล้วปล่อยกระแสให้ไหลผ่านแท่งตัวนำนั้น ในทางปฏิบัติจะมีแท่งตัวนำจำนวนมากอยู่บนอาร์มเจอร์ ดังนั้นในมอเตอร์กระแสตรง แหล่งกำเนิดไฟกระแสตรงจะจ่ายให้มอเตอร์ผ่านทางแปรงถ่าน คอมมิวเตเตอร์จะเปลี่ยนทิศการไหลของกระแสในกลุ่มแท่งตัวนำที่อยู่ภายใต้ขั้วแม่เหล็ก นั่นคือกระแสในแท่งตัวนำแต่ละตัวจะไหลกลับทิศเมื่อแท่งตัวนำนั้นเคลื่อนที่ผ่านจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง (ขั้วที่ต่างกัน) ที่อยู่ติดกัน ผลที่เกิดขึ้นคือแท่งตัวนำทั้งหมดจะถูกแรงกระทำในทิศเดียวกัน จึงทำให้อาร์มเจอร์หมุน

การเกิดแรงกระทำบนแท่งตัวนำที่วางอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 2.3 สนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งจากขั้วเหนือไปขั้วใต้ เมื่อมีกระแสไหลเข้าสู่แท่งตัวนำ (รูปซ้าย) กระแสจะสร้างสนามแม่เหล็กรอบแท่งตัวนำโดยมีทิศตามเข็มนาฬิกา ซึ่งไปเสริมความเข้มสนามแม่เหล็กที่อยู่เหนือแท่งตัวนำและหักล้างกับสนามแม่เหล็กที่อยู่ใต้ตัวนำ ทำให้สนามแม่เหล็กซึ่งเดิมมีค่าสม่ำเสมอเกิดความบิดเบี้ยวไป นั่นคือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กด้านบนสูงกว่าด้านล่าง ผลคือเส้นแรงแม่เหล็กด้านบนพยายามบิดตัวให้กลับสู่สภาพเดิม จึงเกิดการดันแท่งตัวนำให้เคลื่อนที่ลง เมื่อกระแสไหลผ่านแท่งตัวนำในทิศพุ่งออก (รูปขวา) จะเกิดผลตรงกันข้ามกับที่อธิบาย



รูปที่ 2.3 ทิศการเคลื่อนที่ของตัวนำในสนามแม่เหล็กตามกฎมือขวา [2]

มาข้างต้น นั่นคือกระแสจะสร้างสนามแม่เหล็กรอบแท่งตัวนำในทิศทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งไปเสริมความเข้มสนามแม่เหล็กที่อยู่ใต้แท่งตัวนำและหักล้างกับสนามแม่เหล็กที่อยู่เหนือตัวนำ ทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กด้านล่างสูงกว่าด้านบน จึงเกิดการดันแท่งตัวนำให้เคลื่อนที่ขึ้น

แรงผลักตัวนำให้เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กตามรูปที่ 2.3 จะมากหรือน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลในแท่งตัวนำและความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศระหว่างขั้วเหนือกับขั้วใต้ดังนี้

$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B} \quad (2.6)$$

โดยที่

$\vec{F}$  คือเวกเตอร์ของแรงผลักแท่งตัวนำ มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)

$l$  คือความยาวของตัวนำในสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเมตร (m)

$I$  คือเวกเตอร์ของกระแสไฟฟ้าในแท่งตัวนำ มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

$\vec{B}$  คือเวกเตอร์ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเทสลา (T)

ทิศของแรงที่กระทำบนแท่งตัวนำจะเป็นไปตามกฎมือขวา ถ้าทิศการไหลของกระแสหรือทิศของสนามแม่เหล็กมีการกลับทิศ จะทำให้แรงที่กระทำบนแท่งตัวนำมีการกลับทิศ แต่หากทั้งกระแสและสนามแม่เหล็กกลับทิศ แรงที่กระทำบนแท่งตัวนำจะมีทิศคงเดิม

ขนาดของแรงจะคำนวณได้จาก

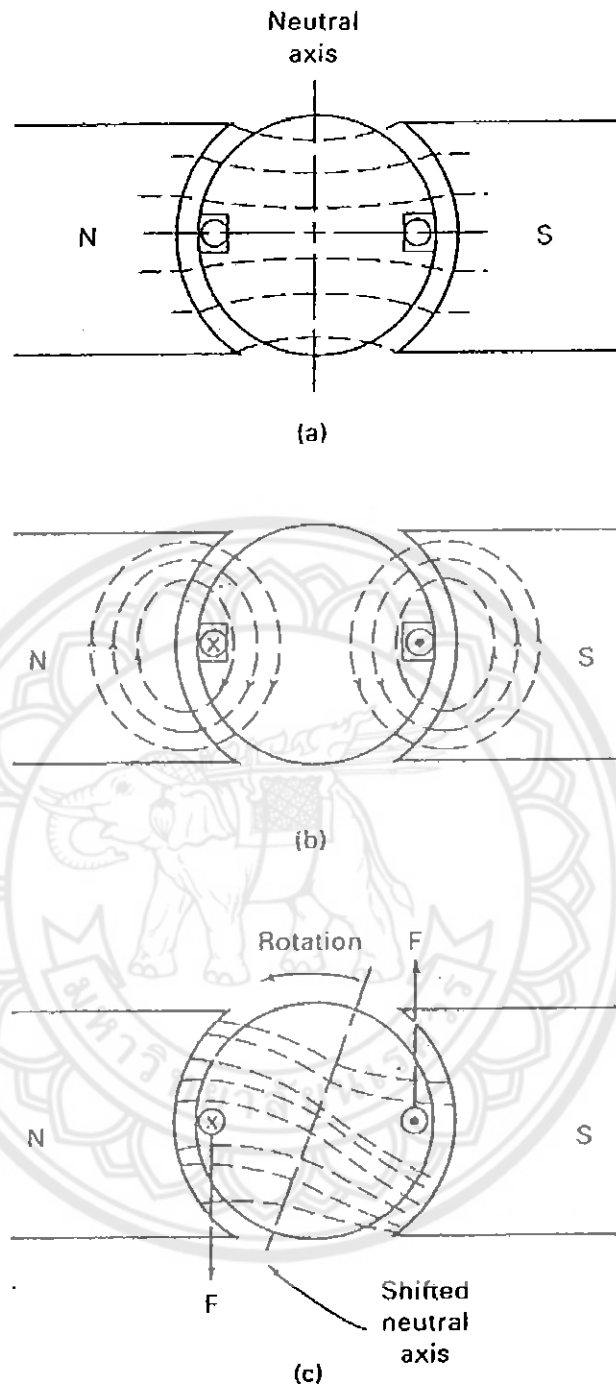
$$F = I l B \sin \theta \quad (2.7)$$

โดยที่  $\theta$  คือมุมระหว่าง  $I$  และ  $B$

เราจะพบว่าขนาดของแรงจะมีค่าสูงสุดเมื่อ  $\theta = 90^\circ$  นั่นคือทิศการไหลของกระแสในแท่งตัวนำตั้งฉากกับทิศของสนามแม่เหล็ก เราสามารถเขียนได้ว่า

$$F = I l B \quad (2.8)$$

รูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงการสร้างแรงเพื่อทำให้เกิดการหมุนของอาร์เมเจอร์ในมอเตอร์กระแสตรง เมื่อแท่งตัวนำที่วางอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก (รูป a) มีกระแสไหลผ่าน กระแสจะสร้างสนามแม่เหล็กรอบแท่งตัวนำ (รูป b) ทำให้สนามแม่เหล็กหลักของมอเตอร์ผิดเพี้ยนไป (รูป c) จึงเกิดแรงกระทำบนแท่งตัวนำที่ทำให้เคลื่อนที่จากบริเวณที่เส้นแรงแม่เหล็กมีความหนาแน่นสูงไปยังบริเวณที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า ในที่นี้ความหนาแน่นสูงสุดเกิดขึ้นในบริเวณด้านบนของขดลวดด้านซ้าย (ที่อยู่ภายใต้ขั้วเหนือ) และด้านล่างของขดลวดด้านขวา (ที่อยู่ภายใต้ขั้วใต้) จึงเกิดแรงกระทำบนอาร์เมเจอร์ทำให้หมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 2.4 การสร้างแรงบิดจนทำให้อาร์เมเจอร์หมุน [3]

- (a) แท่งตัวนำบนอาร์เมเจอร์วางอยู่ในสนามแม่เหล็กหลัก  
 (b) สนามแม่เหล็กที่สร้างจากกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์  
 (c) การเกิดแรงกระทำต่อแท่งตัวนำบนอาร์เมเจอร์

จากหลักการการทำงานของมอเตอร์ แรงที่กระทำบนแท่งตัวนำบนอาร์เมเจอร์ทำให้อาร์เมเจอร์หมุน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องกับแท่งตัวนำดังกล่าว เนื่องจากแท่งตัวนำเหล่านี้มีกระแสไหลผ่าน จึงทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นในแท่งตัวนำ ดังนั้นขณะที่มอเตอร์



กำลังหมุนจะเกิดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย แต่การทำงานเป็นมอเตอร์จะมีผลมากกว่าการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพราะทิศการไหลของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ถูกกำหนดโดยแหล่งกำเนิดซึ่งคงที่ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะมีทิศตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดเพื่อจำกัดค่ากระแสอาร์เมเจอร์ให้อยู่ในระดับที่เพียงพอจะขับ โหลด เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ต้านแรงดันแหล่งกำเนิดโดยตรง ตามกฎของเลนส์ (Lenz's law) จึงเรียกว่า “แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ” (Counter EMF หรือ Back EMF)

ขณะที่อาร์เมเจอร์หมุน แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะถูกสร้างขึ้นในแท่งตัวนำเดียวกันนั้น เพราะแท่งตัวนำเคลื่อนที่ตัดกับสนามแม่เหล็กในขณะที่เครื่องจักรกลทำหน้าที่เป็นมอเตอร์ ซึ่งทิศของแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ถูกกำหนดโดยกฎมือขวา

จากกฎของโอห์ม เราสามารถคำนวณหากระแสอาร์เมเจอร์ได้จาก

$$I_a = \frac{V_t - E_a}{R_a} \quad (2.9)$$

โดยที่

$I_a$  คือกระแสอาร์เมเจอร์ มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

$V_t$  คือแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องจักร มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

$E_a$  คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

$R_a$  คือค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์ มีหน่วยเป็น โอห์ม ( $\Omega$ )

ในมอเตอร์กระแสตรง แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจำกัดกระแสอาร์เมเจอร์ให้อยู่ในระดับที่โหลดต้องการ ดังนั้นจะต้องมีค่าต่ำกว่าแรงดันของแหล่งกำเนิด ( $=V_t$ ) โดยทั่วไป แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะมีค่าอยู่ในช่วง 80% ถึง 95% ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว

จากสมการ (2.9) จะพบว่าผลต่างระหว่างแรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะบ่งบอกถึงค่ากำลังสูญเสียในอาร์เมเจอร์ (Armature copper loss) เพราะว่า

$$V_t - E_a = I_a R_a$$

คูณทั้งสองข้างของสมการด้วย  $I_a$

$$V_t I_a - E_a I_a = I_a^2 R_a$$

$$\text{จากรูป จะได้} \quad V_a I_a - I_a^2 R_a = E_a I_a \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.10) ผลคูณระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับและกระแสอาร์เมเจอร์คือ กำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้น (Developed power,  $P_d$ ) นั่นคือ

$$P_d = E_a I_a \quad (2.11)$$

กำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนี้สามารถคำนวณจากผลต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้อาร์เมเจอร์  $V_a I_a$  และกำลังสูญเสียในอาร์เมเจอร์  $I_a^2 R_a$  ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ามอเตอร์ที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับสูงเมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้จะทำงานมีประสิทธิภาพสูงกว่ามอเตอร์ที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับต่ำ ในทางปฏิบัติหลักการนี้นำไปสู่การออกแบบให้ความต้านทานของอาร์เมเจอร์มีค่าต่ำ เพื่อให้กำลังสูญเสียในอาร์เมเจอร์มีค่าต่ำ

### 2.1.3 แรงบิด

กำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจะต้องมีค่าเพียงพอในการขับ โหลดทางกลที่เพลของมอเตอร์ นอกเหนือไปจากการเอาชนะค่าความสูญเสียทางกลของตัวมอเตอร์เองซึ่งประกอบด้วย กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (Core losses) แรงต้านของอากาศ (Windage) ซึ่งเกิดขึ้นขณะที่มอเตอร์หมุน และแรงเสียดทาน (Friction losses) ที่เกิดขึ้นในแบร์ริง (Bearing) ที่รองรับอาร์เมเจอร์

จากการศึกษาทฤษฎี เราทราบว่าแรงบิดคำนวณได้จากผลคูณระหว่างแรงและแขนของแรง (Arm) ในกรณีของเครื่องจักรกลไฟฟ้า แขนของแรงคือความยาวของรัศมีของอาร์เมเจอร์

$$T = F \cdot r = I B \cdot r \quad (2.12)$$

จากสมการ (2.3) และ (2.12) เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับได้ดังนี้

$$E_a I_a = T \omega \quad (2.13)$$

สมการ (2.13) บ่งบอกกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมีค่าเท่ากับกำลังทางกลที่เกิดขึ้น ความสัมพันธ์นี้ใช้ได้กับทั้งการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการทำงานเป็นมอเตอร์ นอกจากนี้สมการนี้ยังยืนยันหลักการแปลงพลังงานระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานกลในเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งได้กล่าวไปแล้วในตอนต้น

จากสมการ (2.5) และ (2.13)

$$T = \frac{E_a I_a}{\omega} = \frac{ZP}{2\pi a} \phi I_a = k_m \phi I_a \quad (2.14)$$

## 2.2 สมการความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรง

จากสมการของแรงเคลื่อนไฟฟ้า  $E_a = (ZP/60a)\phi n = k_g \phi n$  ในสมการที่ (2.4) และสมการ  $E_a = V - I_a R_a$  ในสมการที่ (2.9) ค่าความเร็วรอบ  $n$  จะหาได้จากการการนำค่า  $E_a$  จากสมการที่ (2.9) นำไปในสมการที่ (2.4) จะได้ว่า  $V - I_a R_a = (ZP/60a)\phi n$  เพราะฉะนั้นค่าความเร็วรอบจึงเท่ากับ  $n = (V - I_a R_a / \phi)(60a / ZP)V$  เมื่อกำหนดให้  $60a / ZP$  เป็นค่าคงที่ สมการความเร็วรอบจึงเท่ากับ

$$n = K_a \frac{V_t - I_a R_a}{\phi} \quad (2.15)$$

โดยที่  $n$  คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (rpm)

$\phi$  คือ เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวบมาเลข (Wb)

$K_a$  คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ  $60a / ZP$

จากสมการข้างต้น ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์นั้นจะมีตัวแปรที่สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์คือ

ก) การปรับความต้านทานอาร์เมเจอร์ (Armature Resistance)

จาก 
$$n = K_a \frac{V_t - I_a R_a}{\phi}$$

เมื่อกำหนดให้  $\phi$  มีค่าคงที่ การปรับค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์  $R_a$  จะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของแรงดันจะส่งผลถึงความเร็วรอบของมอเตอร์ กล่าวคือ เมื่อเพิ่มค่าความต้านทาน แรงดัน  $E_a$  จะมีค่าลดลง ส่งผลให้ความเร็วรอบลดลง

ข) การปรับกระแสสนาม (Field Current)

การปรับความเร็วรอบวิธีนี้ทำได้โดยการปรับกระแสสนามหรือสนามแม่เหล็ก  $\phi$

จาก 
$$n = K_a \frac{V_t - I_a R_a}{\phi}$$

ถ้าให้แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์คงที่ จะเห็นว่า ความเร็วของมอเตอร์จะแปรผกผันกับเส้นแรงแม่เหล็ก ( $\phi$ ) นั่นคือ

$$n \propto \frac{1}{\phi}$$

เมื่อทำให้เส้นแรงแม่เหล็กลดลง ความเร็วของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ความเร็วของมอเตอร์จะลดลง การปรับความเร็วของรอบมอเตอร์ด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่ปรับความเร็วอย่างละเอียด สามารถปรับความเร็วได้หลายระดับ ช่วงพิกัดความเร็วปรับได้กว้าง และให้ประสิทธิภาพสูง

ภายหลังจากตัดตัวต้านทานเริ่มหมุนออกจากอาร์เมเจอร์เรียบร้อยแล้ว ความเร็วรอบอาจปรับให้สูงขึ้นได้แต่ไม่สามารถปรับให้ลดลงได้

ก) แรงดันอาร์เมเจอร์ (Armature Voltage)

จาก 
$$n = K_a \frac{V_t - I_a R_a}{\phi}$$

ถ้าให้  $R_a$  และ  $\phi$  คงที่ ความเร็วของมอเตอร์จะแปรผันตรงกับค่าแรงดันไฟฟ้า นั่นคือ

$$n \propto V_t$$

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ด้วยวิธีปรับขนาดของค่าแรงดันอาร์เมเจอร์นี้มีข้อเสียคือ พลังงานส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปเนื่องจากความต้านทานเริ่มหมุน (Starting resistance) และถ้ามีการเปลี่ยนแปลงโหลดเล็กน้อยก็จะส่งผลให้ความเร็ววนั้นเปลี่ยนแปลง

## 2.3 คุณสมบัติของมอเตอร์กระแสตรง

### 2.3.1 คุณสมบัติของมอเตอร์กระแสตรงแบบขนาน (Shunt motor)

จากสมการ  $n = K_a (V_t - I_a R_a) / \phi$  จะเห็นได้ว่าเมื่อมอเตอร์ทำงาน ถ้าลดโหลดให้มีค่าต่ำลง  $I_a$  จะต่ำลงด้วย แต่เนื่องจาก  $\phi$  มีค่าเกือบคงที่ เมื่อ  $V_t$  คงที่ ดังนั้นความเร็วรอบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น และถ้าให้โหลดหรือกระแส  $I_a$  มีค่าลดลง ความเร็วรอบจะลดลงน้อยมาก นั่นคือการคุมค่าความเร็ว (Speed regulation) มีค่าน้อยมาก

ถ้าพิจารณาเรื่องอาร์เมเจอร์รีแอคชัน (Armature reaction) ถ้า  $I_a$  มีค่าน้อยๆ  $\phi$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และถ้า  $I_a$  มีค่ามากๆ  $\phi$  จะมีค่าลดลงเล็กน้อย จากคุณสมบัติข้างต้นนี้จะเห็นว่ามอเตอร์กระแสตรงแบบขนานจะเหมาะสมกับงานที่ต้องการการคุมค่าความเร็วน้อยๆ เช่นงานด้านเครื่องมือเครื่องจักร แต่ไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องการแรงบิดสูงๆ

ก) สมรรถนะในการหมุนขั้วโหลด

ความเร็วรอบจะลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วรอบค่อนข้างจะคงที่ตรงเท่าที่มอเตอร์ยังคงต่ออยู่กับแรงดันของแหล่งกำเนิดที่คงที่ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่ามอเตอร์แบบขนานเป็นมอเตอร์ที่หมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ ถ้าพิจารณาให้ละเอียดจะพบว่า การเปลี่ยนแปลงของโหลด ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กในสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ แต่อย่างไรก็ตามเท่าที่มอเตอร์ยังคงต่ออยู่กับแรงดันของแหล่งกำเนิดที่คงที่ อย่างไรก็ตามเมื่อมอเตอร์หมุนขั้วโหลดเพิ่มขึ้น มอเตอร์จะกินกระแส  $I_a$  สูงขึ้น ขณะที่เส้นแรงแม่เหล็ก  $\phi$  คงที่ แรงบิดของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้น และทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลงเล็กน้อย

ความเร็วรอบขณะหมุนขั้วงานเต็ม โหลดของมอเตอร์แบบขนานจะมีความเร็วรอบสูงกว่า  
 ขณะไม่มีโหลดเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากขณะที่มอเตอร์หมุนขั้ว โหลดจะมีกระแสไหลผ่านขดลวดอาร์  
 เมเจอร์ ทำให้เกิดอาร์เมเจอร์รีแอกชันขึ้น เส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศระหว่างขั้วเหนือกับขั้วใต้  
 จะลดลงเล็กน้อยถึงแม้ว่ากระแสของขดลวดสนามแม่เหล็ก ( $I_f$ ) จะคงที่ก็ตาม จึงทำให้ความเร็วรอบ  
 ของมอเตอร์สูงขึ้นเล็กน้อย

#### ข) ความต้านทานเริ่มหมุน

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเริ่มหมุนนั้นยังไม่มีแรงเคลื่อน ไฟฟ้าย้อนกลับเกิดขึ้นเพื่อ  
 ควบคุมค่ากระแสของมอเตอร์ให้อยู่ในพิสัยเต็ม โหลดตามขนาดกำลังของมอเตอร์ที่ต้องการได้ และ  
 เนื่องจากขดลวดอาร์เมเจอร์มีความต้านทานน้อยมากจึงกินกระแสขณะเริ่มหมุนสูงจนเกินไปจนอาจ  
 ทำให้มอเตอร์เสียหายได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมกระแสขณะเริ่มหมุนของมอเตอร์ให้เหลือไม่เกิน  
 1.5 เท่าหรือ 150% ของกระแสเต็ม โหลดเท่านั้น โดยการต่อความต้านทานเริ่มหมุนอนุกรมกับอาร์  
 เมเจอร์ ภายหลังจากมอเตอร์หมุนไปได้ความเร็วรอบตามต้องการ จะมีแรงเคลื่อน ไฟฟ้าย้อนกลับ  
 เกิดขึ้นและควบคุมกระแสของมอเตอร์ให้ลดลงไปตามขนาดกำลังของมอเตอร์เรียบร้อยแล้ว จึงตัด  
 ความต้านทานเริ่มหมุนออกจากวงจรอาร์เมเจอร์ทันที ไม่เช่นนั้นแล้วความต้านทานเริ่มหมุนจะร้อน  
 ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ลดลง

#### ค) แรงบิดเริ่มหมุน

ค้ำยเหตุที่ขดลวดสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แบบขนานต่อ โดยตรงกับแรงดันของ  
 แหล่งกำเนิดซึ่งมีค่าคงที่ เส้นแรงแม่เหล็กในสนามแม่เหล็กของมอเตอร์จึงคงที่ แต่จะมีค่าลดลงเพียง  
 เล็กน้อยเนื่องจากอาร์เมเจอร์รีแอกชัน อย่างไรก็ตามแรงบิดของมอเตอร์ยังคงแปรผันตรงกับกระแส  
 อาร์เมเจอร์

กระแสอาร์เมเจอร์ขณะเริ่มหมุนหาได้โดยตรงจากความต้านทานอนุกรม (ความต้านทาน  
 เริ่มหมุน) เท่านั้นและเส้นแรงแม่เหล็กของมอเตอร์คงที่ตลอดเวลาไม่ว่ามอเตอร์จะหมุนหรือไม่ก็ตาม  
 ค้ำยเหตุนี้แรงบิดเริ่มหมุนจึงแปรผันตรงกับกระแสเริ่มหมุนดังสมการนี้

$$T_{st} = K\phi I_{a,st}$$

โดยที่

$T_{st}$  คือ แรงบิดเริ่มหมุน

$I_{a,st}$  คือ กระแสอาร์เมเจอร์เริ่มหมุน

ถ้ามอเตอร์ขณะเริ่มหมุนกินกระแสเท่ากับกระแสอาร์เมเจอร์เต็ม โหลด แรงบิดเริ่มหมุนจะมี  
 ค่าเท่ากับแรงบิดที่กินกระแสอาร์เมเจอร์เต็ม โหลดเช่นเดียวกัน ดังนั้นมอเตอร์ขณะเริ่มหมุนที่กิน

กระแส 200% ของกระแสเต็ม โหลดจะทำให้แรงบิดเริ่มหมุนมีค่าเท่ากับ 200% ของแรงบิดเต็ม โหลด ด้วยเหตุนี้เราจึงสามารถกำหนดแรงบิดเริ่มหมุนของมอเตอร์แบบขนานได้ตามต้องการ โดยกำหนดค่าความต้านทานเริ่มหมุนซึ่งจะควบคุมกระแสขณะเริ่มหมุนของมอเตอร์ให้อยู่ในพิสัยที่ต้องการ

### ง) วิธีควบคุมความเร็ว

มอเตอร์แบบขนานสามารถควบคุมความเร็วได้ด้วยวิธีปรับค่าเส้นแรงแม่เหล็กและปรับค่าแรงดันอาร์เมเจอร์ดังนี้

#### ➢ การควบคุมความเร็วด้วยวิธีปรับค่าเส้นแรงแม่เหล็ก

การปรับค่าเส้นแรงแม่เหล็กภายในขดลวดสนามสามารถกระทำได้ด้วยการต่อมอเตอร์กับแรงดันของแหล่งกำเนิดที่คงที่ แล้วปรับค่าความต้านทานของตัวต้านทานแปรค่า หรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า "รีโอสแตต" (Rheostat) ซึ่งต่ออนุกรมกับขดลวดสนาม มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วรอบดังนี้

เมื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กลดลง มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วรอบเพิ่มขึ้น

เมื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วรอบลดลง

ซึ่งจะสามารถอธิบายเป็นสมการดังต่อไปนี้

$$\text{จาก } V_t = E_a + I_a R_a$$

เมื่อกำหนดให้  $V_t$  และ  $I_a$  ค่าคงที่ จะได้  $E_a = V_t - I_a R_a =$  ค่าคงที่

เราสามารถทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เพิ่มขึ้น โดยปรับความต้านทานของรีโอสแตตเพิ่มขึ้น กระแสขดลวดสนามจะลดลง ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กลดลง แรงเคลื่อน ไฟฟ้าย้อนกลับจะลดลง ทำให้มอเตอร์กินกระแสอาร์เมเจอร์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงบิดของมอเตอร์เพิ่มขึ้น และความเร็วรอบจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยอัตโนมัติ สรุปคือความเร็วรอบของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเพียง ใดนั้นขึ้นอยู่กับ การทำให้จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กลดลงเท่าใด

เมื่อต้องการให้ความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าลดลง เราจะทำกรปรับลดค่าความต้านทานของรีโอสแตตให้ต่ำลงเหลือศูนย์ จึงเหลือเฉพาะขดลวดความต้านทานของขดลวดชุดขนานเพียงอย่างเดียว เส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้น ทำให้แรงเคลื่อน ไฟฟ้าย้อนกลับมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันมอเตอร์จะกินกระแสอาร์เมเจอร์ลดลง แรงบิดของมอเตอร์จะลดลง ทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลงโดยอัตโนมัติ

เมื่อให้ขนาดมอเตอร์ที่เท่ากันถ้าให้หมุนขั้วงานด้วยความเร็วรอบที่ต่างกันมอเตอร์จะให้แรงบิดหมุนขั้วงานต่างกันคือมอเตอร์ที่หมุนขั้วงานด้วยความเร็วรอบที่สูงกว่าจะให้แรงบิดหมุนขั้วต่ำกว่าและมอเตอร์ที่หมุนขั้วงานด้วยความเร็วรอบที่ต่ำกว่า จะให้แรงบิดหมุนขั้วสูงกว่า

การปรับความเร็วรอบของมอเตอร์แบบขนานด้วยวิธีปรับค่าเส้นแรงแม่เหล็กในสนามแม่เหล็กนี้ยังคงให้สมรรถนะในการขับโหลดเหมือนเดิมอัตราความแตกต่างกันระหว่างความเร็วรอบก็ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักหรืออาจกล่าวได้ว่ามอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ไม่ว่าเส้นแรงแม่เหล็กจะมากหรือน้อยกว่าปรกติก็ตามความเร็วรอบของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไปไม่เกินพิกัดประมาณ 15-20%

#### ➢ การควบคุมความเร็วรอบด้วยวิธีการปรับค่าแรงดันอาร์เมเจอร์

ความเร็วรอบของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามค่าแรงดันอาร์เมเจอร์ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของรีโอสแตตที่ต่ออนุกรมอยู่กับอาร์เมเจอร์ ส่วนขดลวดสนามต่อขนานกับแหล่งกำเนิดซึ่งมีค่าแรงดันคงที่ เส้นแรงแม่เหล็กจึงมีค่าคงที่ และมอเตอร์จะกินกระแสอาร์เมเจอร์คงที่ ขณะที่ให้หมุนขับโหลดคงที่ ความเร็วของมอเตอร์จะแปรผันตรงกับแรงดันอาร์เมเจอร์ นั่นคือเมื่อปรับเพิ่มค่าความต้านทานของรีโอสแตต แรงดันอาร์เมเจอร์จะลดลง ทำให้ความเร็วของมอเตอร์ลดลง

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ด้วยวิธีนี้มีข้อเสียคือ พลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่จะสูญเสียไปในความต้านทานเริ่มหมุน ยิ่งกว่านั้นการเปลี่ยนแปลงของโหลดเพียงเล็กน้อยจะทำให้แรงดันอาร์เมเจอร์เปลี่ยนแปลงไปด้วยตามค่าความต้านทานของรีโอสแตต การควบคุมความเร็วโดยวิธีนี้ไม่เหมาะกับงานที่ต้องการปรับความเร็วรอบอย่างละเอียด

#### จ) การเปรียบเทียบวิธีการควบคุมความเร็ว

การควบคุมความเร็วรอบด้วยวิธีปรับค่าเส้นแรงแม่เหล็กเป็นการปรับความเร็วของมอเตอร์อย่างละเอียด และสามารถปรับความเร็วได้หลายระดับ จึงทำให้ปรับช่วงพิกัดความเร็วได้กว้างและให้ประสิทธิภาพสูง ภายหลังจากตัดความต้านทานเริ่มหมุนออกจากวงจรอาร์เมเจอร์เรียบร้อยแล้วความเร็วรอบอาจปรับให้สูงขึ้นได้แต่ไม่สามารถปรับให้ต่ำลงได้

การควบคุมความเร็วด้วยวิธีการปรับค่าแรงดันอาร์เมเจอร์ เป็นวิธีปรับค่าความเร็วอย่างหยาบ ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ลดลงเนื่องจากมีพลังงานไฟฟ้าส่วนหนึ่งสูญหายไปในความต้านทานเริ่มหมุนที่ต่ออนุกรมอยู่กับขดลวดอาร์เมเจอร์ และเราสามารถควบคุมให้ความเร็วลดลงได้เท่านั้น

### 2.3.2 คุณสมบัติของมอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรม (Series Motor)

มอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรมจะต่างกับมอเตอร์กระแสตรงแบบขนานตรงที่  $\phi$  จะไม่คงที่ แต่จะมีค่าเพิ่มและลดตาม  $I_a$  เนื่องจากว่า  $\phi \propto I_a$  และ  $\tau_a \propto \phi I_a$  ดังนั้น  $\tau_a \propto I_a^2$  แต่ถ้า  $I_a$  มีค่ามากจนทำให้ทุกๆส่วนของแกนเหล็กอิ่มตัว แม้จะเพิ่มกระแสให้มากกว่านี้ก็ตาม  $\phi$  จะมีค่าเกือบคงที่ นั่นคือหลังจากที่แกนเหล็กเริ่มอิ่มตัวจะได้สมการแรงบิดดังนี้  $\tau_a \propto I_a$  เพราะฉะนั้นถ้า  $I_a$  มี

การเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้างแล้ว ในย่านที่  $I_a$  มีค่าน้อยๆจะได้  $\tau_a \propto I_a^2$  ในขณะที่ในย่านที่  $I_a$  มีค่ามากๆจะได้  $\tau_a \propto I_a$

โดยทั่วไปมอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรมจะใช้กระแส 1.3 ถึง 1.7 เท่าของกระแสพิคัดในการขับเคลื่อนให้หมุน ดังนั้นแรงบิดที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้หมุนจะมีค่ามากกว่าแรงบิดที่กระแสพิคัดมาก ถ้ายังทำให้กระแสขับเคลื่อนมีค่ามากกว่าแรงบิดขับเคลื่อนจะยิ่งมีค่ามากขึ้นเช่นกัน แต่สำหรับกรณีมอเตอร์กระแสตรงแบบขนาน เนื่องจากแรงบิด  $\tau_a \propto I_a$  ถ้าให้กระแสขับเคลื่อนเท่ากับ 1.5 เท่าจะได้แรงบิดขับเคลื่อนเพียง 1.5 เท่าของแรงบิดพิคัดเท่านั้น แต่ถ้าเป็นกรณีของมอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรมจะได้แรงบิดขับเคลื่อนมากกว่า 1.5 เท่า ดังนั้นถ้าใช้กระแสขับเคลื่อนในอัตราส่วนที่เท่า ๆ กันมอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรมจะให้แรงบิดขับเคลื่อนมากกว่า

สำหรับการคุมค่าความเร็วจะเห็นว่าเมื่อกระแสมีค่าเปลี่ยนไปเล็กน้อยมอเตอร์แบบอนุกรมจะให้ความเร็วรอบที่เปลี่ยนไปมาก แม้ว่า  $V$  จะมีค่าคงที่ก็ตาม เพราะเมื่อกระแสโหลด  $I_a$  เปลี่ยนไป  $\phi$  จะเปลี่ยนแปลงตาม  $I_a$

จากสมการ 
$$n \propto \frac{V - I_a(R_s + R_a)}{\phi}$$

โดยที่  $R_s$  คือค่าความต้านทานของขดลวดสนาม จะเห็นว่าเมื่อ  $I_a$  เพิ่มขึ้นไม่เพียงแต่จำนวนรอบจะมีค่าลดลงแต่ในขณะเดียวกันจำนวนส่วนจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นมอเตอร์กระแสตรงแบบขนานจึงจัดอยู่ในประเภทความเร็วรอบคงที่ แต่มอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรมจัดอยู่ในประเภทที่สามารถเปลี่ยนค่าความเร็วรอบได้

#### ก) สมรรถนะในการขับโหลด

อาร์เมเจอร์ต่ออนุกรมกับขดลวดสนามแม่เหล็กและต่ออนุกรมกับแรงดันของแหล่งกำเนิด เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงกระแสอาร์เมเจอร์และเส้นแรงแม่เหล็กในสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไปในที่สุด ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าความเร็วรอบของมอเตอร์อนุกรมจะเปลี่ยนไปตามการเปลี่ยนแปลงของ โหลด ด้วยเหตุนี้จึงเรียกมอเตอร์อนุกรมนี้ว่า เครื่องจักรกลความเร็วปรับค่าได้ (Variable Speed Machine) และพบว่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดเพียงเล็กน้อยจะมีผลทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไปได้อย่างมาก นั่นคือ

เมื่อทำให้โหลดเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลง

เมื่อทำให้โหลดลดลงจะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เพิ่มขึ้น

มอเตอร์อนุกรมที่หมุนขั้วงานกลด้วยแรงดันของแหล่งกำเนิดคงที่ ขณะเพิ่ม โหลด กระแสอาร์เมเจอร์รวมทั้งแรงบิดของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะลดลง จึงอาจกล่าวได้ว่าเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นกระแสอาร์เมเจอร์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ



จะลดลงทำให้ความเร็วรอบลดลง โดยจะลดลงในอัตราส่วนที่มากกว่าการเพิ่มขึ้นของเส้นแรงแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก

ด้วยเหตุที่เส้นแรงแม่แปรผันตรงกับกระแสอาร์เมเจอร์ ถ้าเพิ่มโหลดจนทำให้กระแสอาร์เมเจอร์เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าแล้ว เส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้น 2 เท่า ความเร็วรอบจะลดลงมากกว่า 2 เท่า ของความเร็วเดิม ในทางตรงกันข้ามถ้าลดกระแสอาร์เมเจอร์ลงให้เหลือเพียงครึ่งหนึ่ง เส้นแรงแม่เหล็กจะลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่ง และความเร็วรอบจะเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิม 2 เท่า

ความเร็วรอบขณะหมุนตัวเปล่า (ไร้โหลด) ของมอเตอร์อนุกรมจะมีพิกัดไม่แน่นอนเนื่องจากแรงบิดในขณะนี้มีค่าน้อยมาก ความเร็วรอบจึงสูงมากจนกระทั่งมอเตอร์ให้กำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับใกล้เคียงกับแรงดันของแหล่งกำเนิด ขณะนี้มอเตอร์ก็กระแสอาร์เมเจอร์น้อยมาก เส้นแรงแม่เหล็กในสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยมาก ทำให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบสูงมากสูงจนสามารถทำให้เกิดแรงเหวี่ยงมากพอที่จะเหวี่ยงให้ตัวนำอาร์เมเจอร์หลุดออกจากร่อง (Slot) ของแกนอาร์เมเจอร์ซึ่งจะทำให้มอเตอร์เสียหาย ด้วยเหตุนี้ในการขับหมุน โหลดของมอเตอร์อนุกรมจึงห้ามหมุนขับด้วยระบบสายพานอย่างเด็ดขาด โดยจะให้ต่อตรงกับโหลดที่ต้องการหมุนขับเท่านั้น

#### ข) ความต้านทานเริ่มหมุน

มอเตอร์ขณะเริ่มหมุนจะไม่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเกิดขึ้นบนตัวนำอาร์เมเจอร์ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมกระแสขณะเริ่มหมุนให้อยู่ในพิกัดที่ต้องการด้วยการต่อกับความต้านทานเริ่มหมุนหรือต่อกับกล่องควบคุมซึ่งประกอบด้วยรีเลย์โหลดเกินและรีเลย์โหลดขาด (Overload and underload relays) รีเลย์โหลดเกินเป็นอุปกรณ์ตัดวงจรมอเตอร์ออกจากระบบเมื่อมอเตอร์กระแสเกินมากเกินไป ในขณะที่รีเลย์โหลดขาดเป็นอุปกรณ์ตัดวงจรมอเตอร์ออกจากระบบเมื่อโหลดที่หมุนขับลดลงจนกระทั่งทำให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบที่สูงจนเกินไป

#### ค) แรงบิดเริ่มหมุน

เมื่อกระแสขดลวดอนุกรมไม่คงที่จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามกระแสอาร์เมเจอร์ไปตามกระแสอาร์เมเจอร์ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามโหลดจนกระทั่งวงจรแม่เหล็กถึงจุดอิ่มตัวแรงบิดเริ่มหมุนของมอเตอร์อนุกรมจะแปรผัน โดยตรงกับกระแสอาร์เมเจอร์ยกกำลังสอง ( $T_{st} \propto I_a^2$ ) ด้วยเหตุนี้แรงบิดเริ่มหมุนของมอเตอร์อนุกรมจะเพิ่มขึ้นทันทีทันใดตามการเพิ่มขึ้นของกระแสอย่างรวดเร็ว

### 2.3.3 คุณสมบัติของมอเตอร์กระแสตรงแบบผสม (Compound Motor)

มอเตอร์กระแสตรงแบบผสมคือมอเตอร์กระแสตรงซึ่งอาศัยการทำงานร่วมกันของขดลวดแบบอนุกรมซึ่งให้แรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่องสูงและขดลวดแบบขนานซึ่งจะให้ความเร็วรอบเกือบคงที่ในอัตราส่วนที่เหมาะสม มอเตอร์กระแสตรงแบบผสมจะให้กระแสจำนวนมากไหลผ่านขดลวด

แบบอนุกรมในช่วงเริ่มเดินเครื่องจึงให้คุณสมบัติของมอเตอร์กระแสตรงในช่วงนี้ กล่าวคือให้แรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่องสูงกว่ามอเตอร์กระแสตรงแบบขนานในปริมาณของกระแสเริ่มเดินเดียวกัน หลังจากนั้นเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นเรื่อยๆ กระแส  $I_a$  ซึ่งไหลผ่านขดลวดแบบอนุกรมจะน้อยลง ทำให้บทบาทของขดลวดแบบอนุกรมน้อยลง ในช่วงการทำงานนี้มอเตอร์แบบผสมจะแสดงคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับมอเตอร์กระแสตรงแบบขนาน กล่าวคือให้ความเร็วรอบเกือบคงที่ มอเตอร์แบบผสมเหมาะที่จะนำไปขับเคลื่อน โหลดในลักษณะเช่นลิฟต์

ในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการผลิตบางชนิดซึ่งต้องการความเร็วรอบคงที่ตลอดไม่ว่าโหลดจะเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามแม้จะเลือกใช้มอเตอร์กระแสตรงแบบขนาน ก็ไม่สามารถตอบสนองความต้องการนี้ได้ ทั้งนี้เพราะจากคุณสมบัติทางด้านความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงแบบขนานนี้ จะเห็นว่าเมื่อโหลดมีค่าเปลี่ยนแปลงไปอัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนเศษและส่วนในสมการความเร็วรอบจะมีค่าไม่เท่ากัน ปัญหานี้แก้ไขได้ด้วยการใช้มอเตอร์กระแสตรงแบบคิฟเฟอเรนเชียลคอมพาวด์ (Differential compound) และในช่วงการเปลี่ยนแปลงของโหลดจากสภาวะไร้โหลดจนถึงโหลดเต็มทีมนั้นจะให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนเศษและจำนวนส่วนในสมการความเร็วรอบเท่ากัน ดังนั้นการคุมค่าความเร็วของมอเตอร์ชนิดนี้จะมีค่าประมาณศูนย์ (หมายความว่าความเร็วรอบขณะไร้โหลดกับความเร็วรอบขณะ โหลดเต็มทีมนั้นมีค่าใกล้เคียงมาก)

แต่เนื่องจากมอเตอร์กระแสตรงแบบคิฟเฟอเรนเชียลคอมพาวด์มีข้อเสียอย่างมากตรงที่แรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่องมีค่าต่ำและในช่วงเริ่มเดินมอเตอร์อาจหมุนกลับทิศได้เพราะขดลวดแบบอนุกรมและขดลวดแบบขนานต่ออยู่ในลักษณะที่ให้แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive Force) หักล้างกัน ในช่วงเริ่มเดินเครื่องขดลวดแบบอนุกรมจะมีแรงเคลื่อนแม่เหล็กสูงกว่าปกติจนอาจมีค่ามากกว่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กของขดลวดแบบขนานได้ ในปัจจุบันจึงไม่นิยมใช้มอเตอร์ชนิดนี้ ในกรณีที่ต้องการใช้มอเตอร์ซึ่งให้ความเร็วรอบที่คงที่ เราจะหันไปใช้มอเตอร์กระแสตรงชนิดอื่นแทน

#### 2.3.4 การเปรียบเทียบของมอเตอร์กระแสตรงแบบขนานและอนุกรม

ก) คุณลักษณะของมอเตอร์แบบขนาน

- มอเตอร์แบบขนานถือว่ามีความเร็วคงที่อย่างพอเพียงในการใช้งาน
- แรงบิดเริ่มหมุนของมอเตอร์แบบขนานมีค่าไม่สูงเหมือนมอเตอร์แบบอนุกรมเมื่อเปรียบเทียบในกรณีที่ต้องกินกระแสไฟที่เท่าๆกัน

ข) การนำมอเตอร์แบบขนานไปใช้งาน

- ใช้กับงานที่ต้องการให้มีความเร็วคงที่ (โดยประมาณ) จากช่วงที่ไม่ได้รับโหลดทางกลจนถึงช่วงที่ได้รับโหลดทางกลเต็มที่

➢ เมื่อต้องการนำไปหมุนหรือขับโหลดต่างๆกัน โดยโหลดแต่ละชนิดต้องการความเร็วคงที่ที่ค่าหนึ่ง เช่นนำไปใช้กับงานเครื่องกลึงซึ่งต้องการใช้ความเร็วในการกลึงและตัดโลหะแต่ละชนิดด้วยความเร็วคงที่ที่แตกต่างกันจนกว่าจะสำเร็จเป็นงานๆไป ในกรณีเช่นนี้มอเตอร์กระแสตรงแบบขนานจะเหมาะสม เพราะสามารถทำการควบคุมความเร็วที่ค่าต่างๆที่มอเตอร์ได้อย่างเหมาะสมกับลักษณะของงานแต่ละอย่าง รวมทั้งยังทำให้ง่ายและประหยัดในการขับมอเตอร์ด้วย

ค) คุณลักษณะของมอเตอร์แบบอนุกรม

➢ แรงบิดเริ่มหมุนมีค่าสูงมาก

➢ เมื่อต้องขับ โหลดมาก ๆ จะมีความเร็วต่ำ แต่ในสภาวะไร้อะไร โหลดจะมีความเร็วสูงมากจนอาจทำให้มอเตอร์เสียหาย

ง) การนำมอเตอร์แบบอนุกรมไปใช้งาน

➢ ใช้แรงบิดสูง ๆ เช่น การขับรถราง เป็นต้น

➢ สามารถนำไปต่อโดยตรงกับโหลดต่าง ๆ ได้ เช่น พัดลม โดยความเร็วจะเพิ่มขึ้นตามค่าแรงบิด

➢ ในกรณีที่โหลดไม่ต้องการความเร็วคงที่ การที่มอเตอร์ได้รับโหลดมากขึ้น (ซึ่งเป็นตัวทำให้ความเร็วลดลง) กลับกลายเป็นข้อดีของมอเตอร์อนุกรมเพราะมอเตอร์แบบอนุกรมจะไม่กินไฟเพิ่มขึ้นมาก ทั้งที่แรงบิดนั้นต้องใช้มาก เช่นถ้าต้องการให้แรงบิดเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ปรากฏว่ากระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ต้องการเพิ่มขึ้นนั้นเป็นแค่เพียง 40 ถึง 50% เท่านั้น ( $I_o \propto \sqrt{T}$ )

➢ มอเตอร์แบบอนุกรมนี้ไม่ควรนำไปใช้กับงานที่อาจเกิดค่าโหดน้อยๆขึ้นมา เช่นนำไปใช้กับปั๊มหนีศูนย์กลาง (Centrifugal pump) หรือขับ โหลดที่ใช้สายพานเป็นตัวดูด

### 2.3.5 ความสามารถในการเร่งหรือหน่วงความเร็วรอบ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่โหลดต้องการ หรือที่เรียกว่า “โหลดแรงบิด” (Torque load) กับแรงบิดที่มอเตอร์จ่ายให้กับโหลด หรือ “แรงบิดมอเตอร์” (Motor torque) เพื่อให้เข้าใจได้ง่าย จึงขอยกตัวอย่างมอเตอร์กระแสตรงแบบขนานในการอธิบายการหมุนของมอเตอร์ในขณะที่มีโหลดทางกลนั้นจะเท่ากับการใส่แรงเบรกกระทำต่อแกนของอาร์เมเจอร์ เมื่อโหลดแรงบิดสูงขึ้นจะส่งผลให้แรงเบรกที่กระทำต่อแกนอาร์เมเจอร์มีค่ามากขึ้น นั่นคือขณะที่มอเตอร์กำลังหมุนภายใต้โหลดค่าหนึ่งด้วยเสถียรภาพที่ดี ถ้าให้โหลดแรงบิดมีค่าสูงขึ้นหรือแรงเบรกที่กระทำมีค่ามากขึ้นจะทำให้เกิดความหน่วงขึ้น ความเร็วรอบจะมีค่าลดลง สำหรับกรณีของมอเตอร์แบบขนานทราบค่าที่แรงดันระหว่างขั้วมีค่าคงที่อาจถือได้ว่า  $\phi$  มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นถ้าความเร็วรอบน้อยลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ ( $E_b$ ) จะมีค่าต่ำลง แต่เนื่องจาก  $I_o = (V_t - E_b) / R_o$  และ  $T = K\phi I_o$

แรงบิดมอเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นความเร็วรอบจะลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งทำให้แรงบิดมอเตอร์เท่ากับ โหลดแรงบิดพอดี จากนั้นมอเตอร์จะเริ่มหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่และทำงานที่จุดนี้ต่อไป

ในทางตรงกันข้าม ถ้าโหลดแรงบิดมีค่าน้อยกว่าแรงบิดมอเตอร์ แรงที่หมุนแกนอาร์เมเจอร์ จะมากกว่าแรงเบรกทำให้เกิดความเร่งขึ้นและความเร็วรอบจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะมีค่ามากขึ้นกระแสอาร์เมเจอร์จะน้อยลง แรงบิดมอเตอร์จะลดลง ความเร่งจะน้อยลงจนเป็นศูนย์เมื่อแรงบิดจากมอเตอร์มีค่าเท่ากับ โหลดแรงบิดพอดี จากนั้นมอเตอร์จะเริ่มหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่และทำงานที่จุดนี้ต่อไป ในการเริ่มเดินมอเตอร์จากสภาพที่หยุดนิ่งจนกระทั่งหมุนนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากศูนย์ ในช่วงแรกสุดนั้นเนื่องจากมีกระแสสูงมาก แรงบิดจากมอเตอร์จะมีค่าสูงกว่า โหลดแรงบิดมาก จึงทำให้เกิดความเร่งสูงมาก ความเร็วรอบจะสูงขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่ง โหลดแรงบิดเท่ากับมอเตอร์แรงบิดและความเร็วรอบจะคงที่ โหลดแรงบิดจะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบหรือมีค่าคงที่เมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนไปหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของ โหลด เช่นพัดลมยิ่งหมุนที่ความเร็วรอบสูงขึ้นแรงบิดที่ โหลดต้องการจะยิ่งมีค่ามากขึ้น ในขณะที่เครื่องกลึงไม่ว่าความเร็วรอบจะเปลี่ยนไปอย่างไรก็ตาม โหลดจะต้องการแรงบิดเกือบคงที่ตลอดเวลา

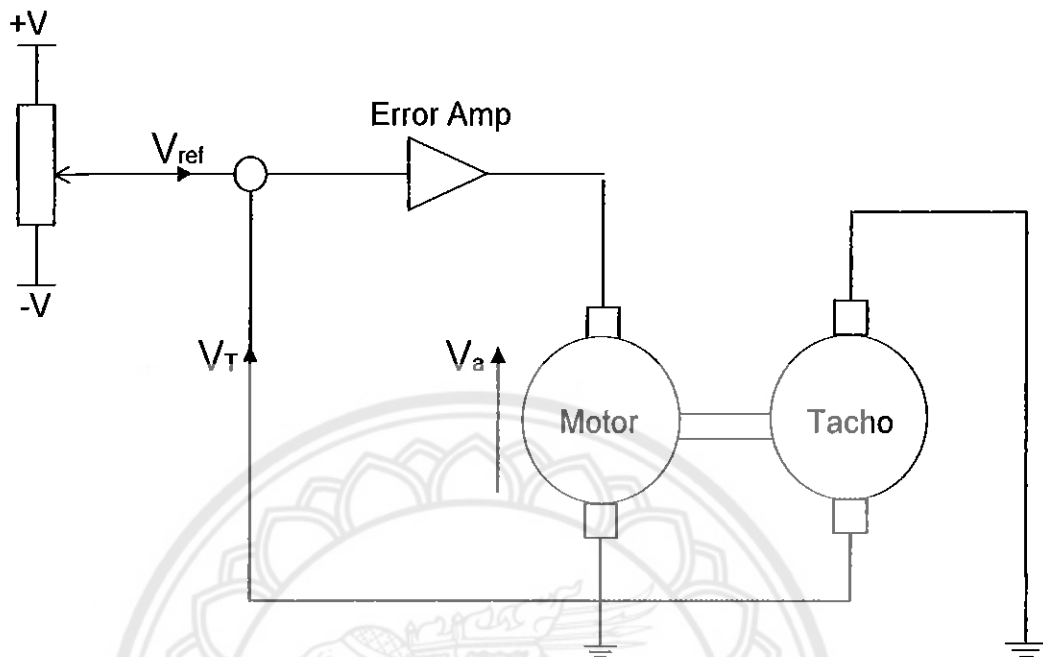
จากทฤษฎี หลักการ และคุณสมบัติของมอเตอร์กระแสตรงที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเห็นได้ว่าการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงโดยวิธีการควบคุมแรงดันเป็นวิธีที่ง่ายต่อการควบคุมดังนั้น โครงการนี้จึงเลือกวิธีการควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงจากการควบคุมแรงดัน

#### 2.4 การควบคุมความเร็วรอบคงที่ (Constant-speed control)

รูปที่ 2.5 แสดงแผนภาพวงจรควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรง เมื่อป้อนแรงดัน  $V_{ref}$  ให้กับวงจรขณะที่ยังไม่ได้ต่อ โหลดจะส่งผลให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบค่าหนึ่งที่ต้องการ มาตรวัดความเร็ว (Tachometer) จะทำหน้าที่วัดความเร็วรอบของมอเตอร์ที่หมุนแล้วจะเปลี่ยนความเร็วรอบเป็นแรงดันไฟฟ้า ( $V_T$ ) ซึ่งจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับ  $V_{ref}$  แล้วค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะผ่านวงจรขยายความผิดพลาด (Error amplifier) ค่าที่ได้เป็นแรงดันที่ถูกส่งไปขับมอเตอร์

เมื่อต่อ โหลดจะทำให้โหลดแรงบิดสูงกว่าแรงบิดมอเตอร์ ความเร็วรอบของมอเตอร์จึงลดลงจากค่าที่เกิดขึ้นขณะที่ไร้โหลด มาตรวัดความเร็วรอบจะส่งค่าแรงดัน  $V_T$  (ซึ่งแปรผันตรงกับค่าความเร็วรอบในขณะนั้น) ไปเปรียบเทียบกับ  $V_{ref}$  จะได้ค่าความผิดพลาดสูงขึ้น ส่งผลให้แรงดันที่ไปขับมอเตอร์มีค่าสูงขึ้น เพื่อเร่งความเร็วรอบของมอเตอร์ให้สูงขึ้นนั่นเอง เมื่อมอเตอร์หมุนเร็วขึ้น ค่า  $V_T$  ที่ได้จากมาตรวัดความเร็วจะเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความผิดพลาดลดลง ความเร็วรอบของมอเตอร์จึง

เพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ลดลง จนกระทั่งค่าแรงบิดมอเตอร์มีค่าเท่ากับ โหลดแรงบิด มอเตอร์จึงขับ โหลด ด้วยความเร็วคงที่ ซึ่งถือว่ามอเตอร์ทำงานในสถานะอยู่ตัวอีกครั้ง



รูปที่ 2.5 รูปวงจรควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรง

เมื่อลดโหลดจะทำให้โหลดแรงบิดมีค่าต่ำกว่าแรงบิดมอเตอร์ ส่งผลให้เกิดการเร่ง มอเตอร์ จึงหมุนเร็วขึ้นเกินค่าที่ต้องการ มาตรการวัดความเร็วรอบจะส่งค่าแรงดัน  $V_T$  ไปเปรียบเทียบกับ  $V_{ref}$  จะ ได้ค่าความผิดพลาดเป็นค่าลบ ส่งผลให้แรงดันที่ไปขับมอเตอร์มีค่าน้อยลง เพื่อชะลอความเร็วรอบ ของมอเตอร์ให้ต่ำลงนั่นเอง เมื่อมอเตอร์หมุนช้าลง ความแตกต่างระหว่างค่า  $V_T$  ที่ได้จากมาตรการ วัดความเร็วกับ  $V_{ref}$  จะลดลง จนกระทั่งค่าแรงบิดมอเตอร์มีค่าเท่ากับ โหลดแรงบิด มอเตอร์จึงขับ โหลด ด้วยความเร็วคงที่ ซึ่งถือว่ามอเตอร์ทำงานในสถานะอยู่ตัวอีกครั้ง

## บทที่ 3

### การสร้างวงจรการทำงาน

จากการศึกษาวงจรและวิธีการควบคุมในบทที่ 2 ผู้จัดทำโครงการได้เลือกใช้วงจรควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้การมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation, PWM) ร่วมกับวงจรป้อนกลับ ดังนั้นในบทนี้จึงได้อธิบายกระบวนการสร้างวงจรทั้งสองขึ้นดังแสดงในหัวข้อต่อไป

#### 3.1 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมด้วยการมอดูเลตความกว้างพัลส์

ในโครงการนี้วงจรควบคุมที่ทำงานด้วยการมอดูเลตความกว้างพัลส์จะถูกใช้เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์เพื่อใช้ขับโหลดที่ความเร็วรอบที่ต้องการ

##### 3.1.1 ขั้นตอนการสร้างวงจร

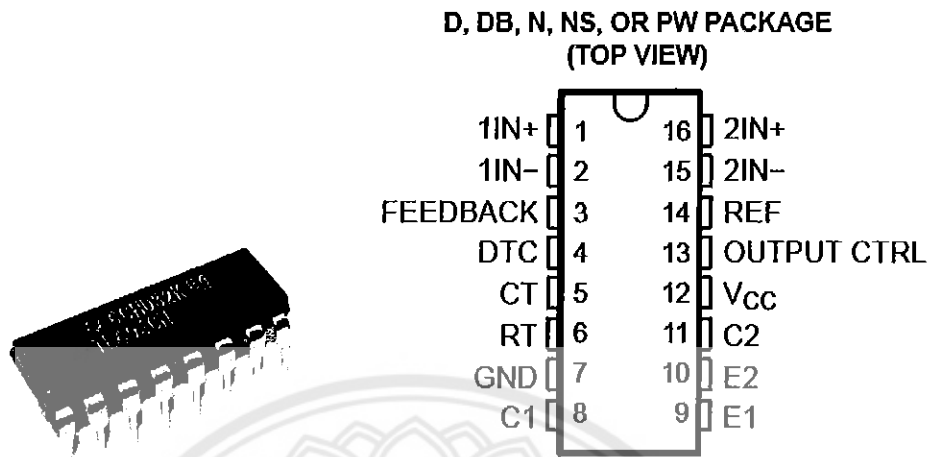
- ก) ออกแบบวงจรสร้างสัญญาณควบคุมด้วยการมอดูเลตความกว้างพัลส์ โดยการศึกษาจากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ และจัดซื้ออุปกรณ์
- ข) ต่อยังวงจรตามแบบที่ได้ทำการศึกษาและออกแบบมา โดยการต่อยังวงจรเข้ากับแผ่นโปรโตบอร์ด (Protoboard)
- ค) ใช้ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) วัดค่าสัญญาณควบคุมสวิทช์ และใช้มัลติมิเตอร์ (Multimeter) วัดค่าแรงดันด้านออก
- ง) ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับวงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์
- จ) ศึกษาและสร้างวงจรขับมอเตอร์ โดยใช้ไอซีหมายเลข TL494CN
- ฉ) ต่อยังวงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์บนโปรโตบอร์ด และทดลองการทำงาน
- ช) ทดสอบการทำงานของวงจร โดยวัดค่าแรงดันด้านออก และสังเกตรูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากใช้ออสซิลโลสโคป

##### 3.1.2 การเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับสร้างวงจร

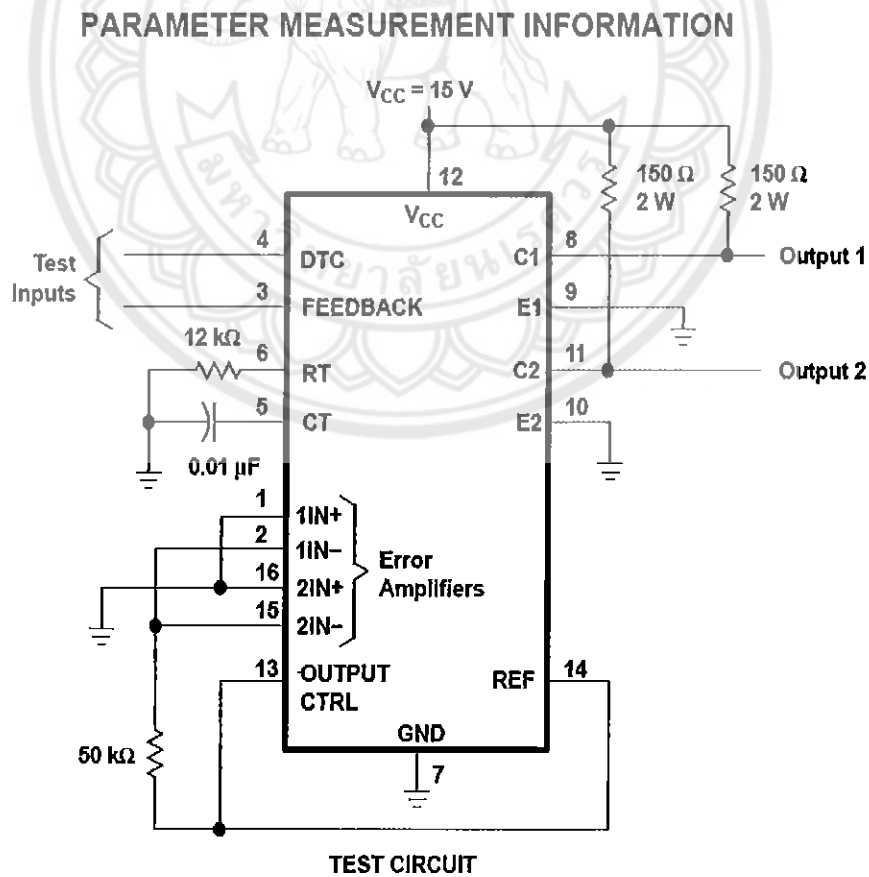
- ก) วงจรสร้างสัญญาณควบคุมด้วยการมอดูเลตความกว้างพัลส์

ในโครงการนี้ใช้ไอซีสำเร็จรูปหมายเลข TL494CN (รูปที่ 3.1) ซึ่งใช้งานง่าย และสร้างความถี่สูงรวมทั้งรักษาระดับแรงดันคงที่ ภายในวงจรของไอซี TL494CN จะป้องกันไม่ให้เกิด

สัญญาณพัลส์คู่ที่ออกมาจากแต่ละวงจรด้านออกและสามารถเลือกรูปแบบผลลัพธ์ของสัญญาณที่ออกมาจากขา 8 และ 11



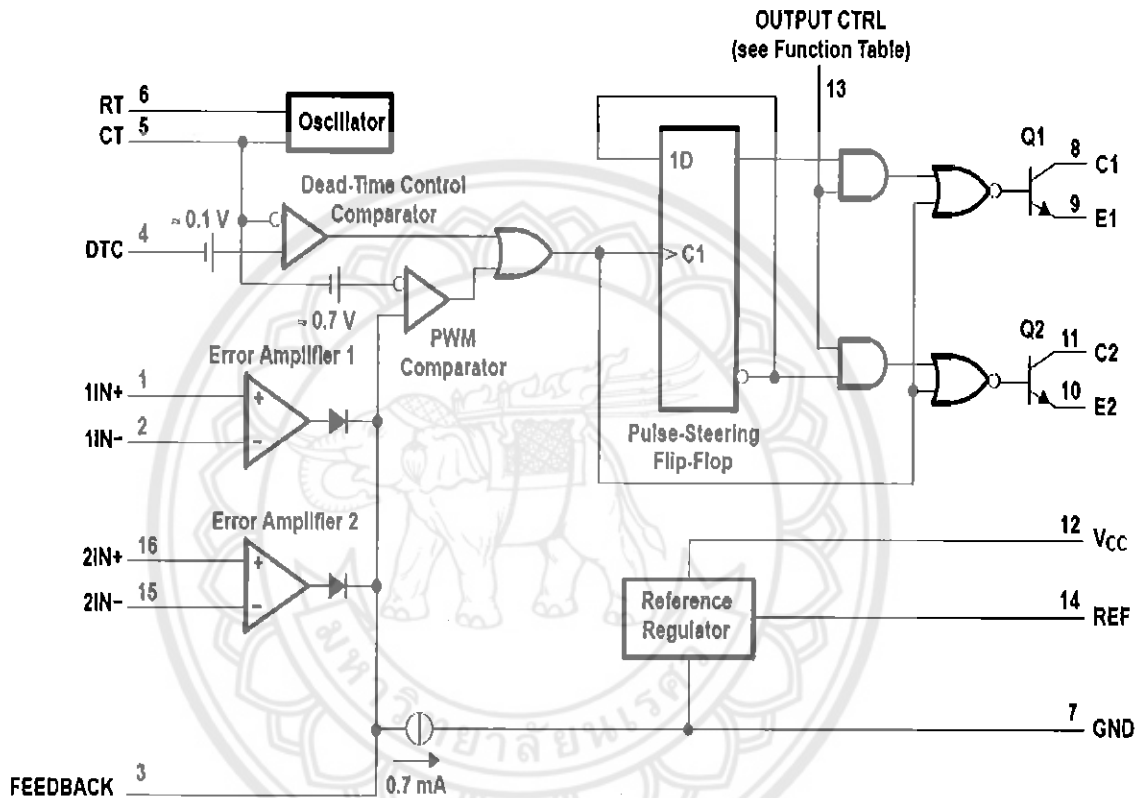
รูปที่ 3.1 รูปและขนาดต่างๆของไอซี TL494CN



รูปที่ 3.2 แผนภาพของวงจรภายใน TL494CN

หลักการการทำงานของ TL494CN แสดงได้ดังรูปที่ 3.2 โดยจะรับแรงดันด้านเข้าทางขาที่ 12 และรับค่าแรงดันอ้างอิงทางขาที่ 14 และมีการต่อสายดินออกทางขาที่ 7 ภายในไอซีจะมีวงจรการมอดูเลตความกว้างพัลส์เพื่อรับสัญญาณต่าง ๆ มาประมวลผลแล้วสร้างเป็นสัญญาณพัลส์ก่อนที่จะส่งสัญญาณออกทางขาที่ 8 และ 11 เพื่อใช้ในการควบคุมมอสเฟต รายละเอียดของ TL494CN สามารถอ่านเพิ่มเติมได้จากภาคผนวก ก

### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



รูปที่ 3.3 แผนภาพของวงจรภายใน TL494CN

จากรูปที่ 3.3 เป็นแผนภาพการทำงานของวงจรภายในไอซี TL494CN ซึ่งเมื่อรับสัญญาณป้อนกลับเข้ามาที่ขา 3 และรับสัญญาณจากตัวเก็บประจุไทม์มิง (Timing capacitor) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของออสซิลเลเตอร์เข้ามาที่ขา 5 เพื่อนำสัญญาณทั้งสองที่ได้รับไปเปรียบเทียบกันด้วยตัวเปรียบเทียบที่ดับเบิลยูเอ็ม (PWM comparator) จากนั้นส่งสัญญาณที่ได้ผ่านตัวออคเกต (OR gate) ซึ่งจะใช้เป็นสัญญาณนาฬิกาเพื่อส่งผ่านไปยังตัวดีฟลิปฟลอป (D Flip-Flop) ที่มีสัญญาณด้านขาเข้า 1 สัญญาณแต่จะมีสัญญาณด้านขาออก 2 สัญญาณแล้วของตัวดีฟลิปฟลอปก็จะทำงานสัมพันธ์กับสัญญาณนาฬิกาที่ป้อนเข้ามา หากไม่มีสัญญาณนาฬิกาที่ป้อนเข้ามาทริกจะไม่มีเปลี่ยนแปลงใดๆ ทางสัญญาณด้านออก สัญญาณที่ได้จะส่งผ่านตัวแอนดเกต (AND gate) และนอเกต (NOR gate) ไปยังสัญญาณด้านออก 2 ชุดคือขาที่ 8 กับ 9 และขาที่ 10 กับ 11 ซึ่งสัญญาณที่ออกจากขาที่ 8 และ 10 จะผ่านไปยังขาเกต (Gate) ของมอสเฟตซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ในโครงการนี้ได้เลือกใช้มอสเฟต



หมายเลข IRF510 ซึ่งทนกระแสได้มากและมีความเร็วสวิตซิ่ง (Switching speed) สูงในการปิดเปิด เพื่อส่งสัญญาณออกจากขาเดรน (Drain) ซึ่งใช้ขั้วมอเตอร์ต่อไป รายละเอียดของมอเตอร์หมายเลข IRF510 สามารถดูได้จากภาคผนวก ข

มร.

4969.

2551.

### 3.2 วงจรป้อนกลับ

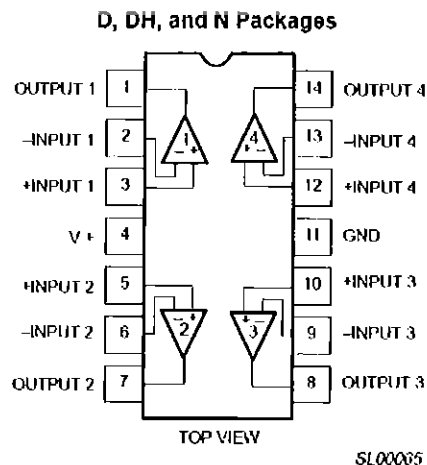
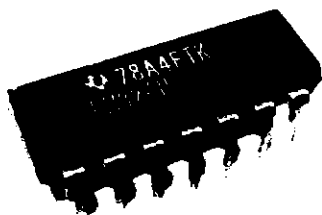
วงจรป้อนกลับจะรับสัญญาณจากมาตรวัดความเร็วแล้วแปลงเป็นสัญญาณควบคุมเพื่อปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ (ทั้งขณะไร้โหลดและมีโหลด) ให้กลับมาหมุนด้วยความเร็วคงที่

#### 3.2.1 ขั้นตอนการสร้างวงจรป้อนกลับ

- ก) ออกแบบวงจรป้อนกลับ โดยการศึกษาจากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ และจัดซื้ออุปกรณ์
- ข) ต่อยังตามแบบที่ได้ทำการศึกษาและออกแบบมาโดยการต่อวงจรเข้ากับแผ่นโปรโตบอร์ด
- ค) นำวงจรที่ได้ต่อเข้ากับมอเตอร์และวงจรสร้างสัญญาณควบคุมด้วยการมอดูเลตความกว้างพัลส์
- ง) ทดสอบการทำงานของวงจร โดยวัดแรงดันด้านออกจากเทค โคมิเตอร์

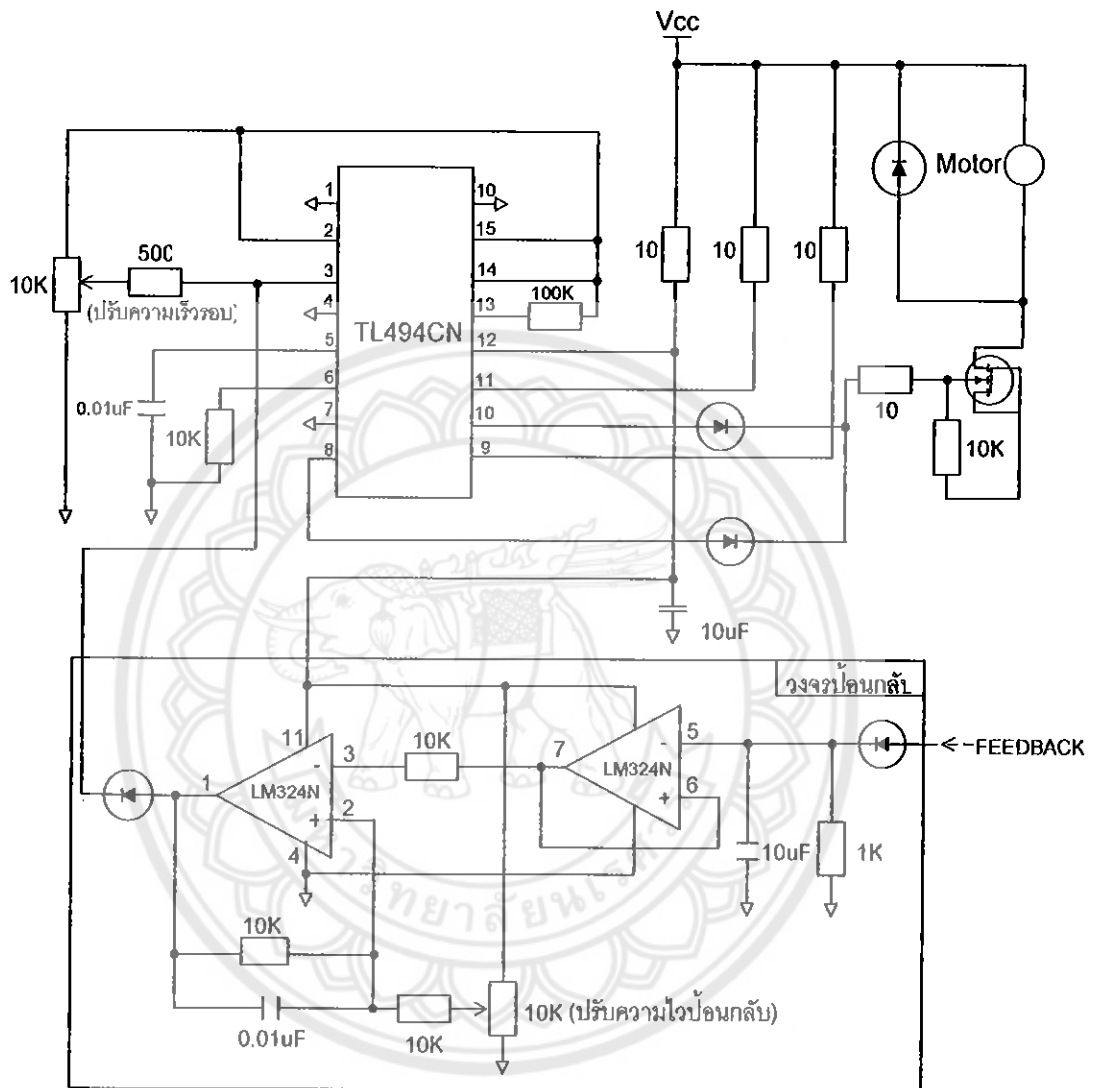
#### 3.2.2 การเลือกใช้อุปกรณ์ของวงจรป้อนกลับ

การสร้างวงจรป้อนกลับมีกระบวนการเช่นเดียวกับกรณีสร้างวงจรสร้างสัญญาณควบคุมซึ่งอธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.1.1 และ 3.1.2 ดังนั้นในที่นี้จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุแบบเดียวกันและค่าเท่ากับกรณีวงจรสร้างสัญญาณแรงดันควบคุมแต่ในวงจรป้อนกลับจะใช้ออปแอมป์ในไอซีหมายเลข LM324N ซึ่งใช้งานได้ง่าย โดยสามารถทำงานได้ทันทีหลังจากเราป้อนไฟบวกกับกราวด์ (Ground) รูปและขาต่างๆของไอซี LM324N แสดงดังในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 รูปและขาต่างๆของ LM324N

แผนภาพการเชื่อมต่อวงจรป้อนกลับ วงจรสร้างสัญญาณควบคุมด้วยการมอดูเลตความกว้างพัลส์ และสวิทช์ รวมทั้งมอเตอร์ในโครงการนี้แสดงดังรูปที่ 3.5

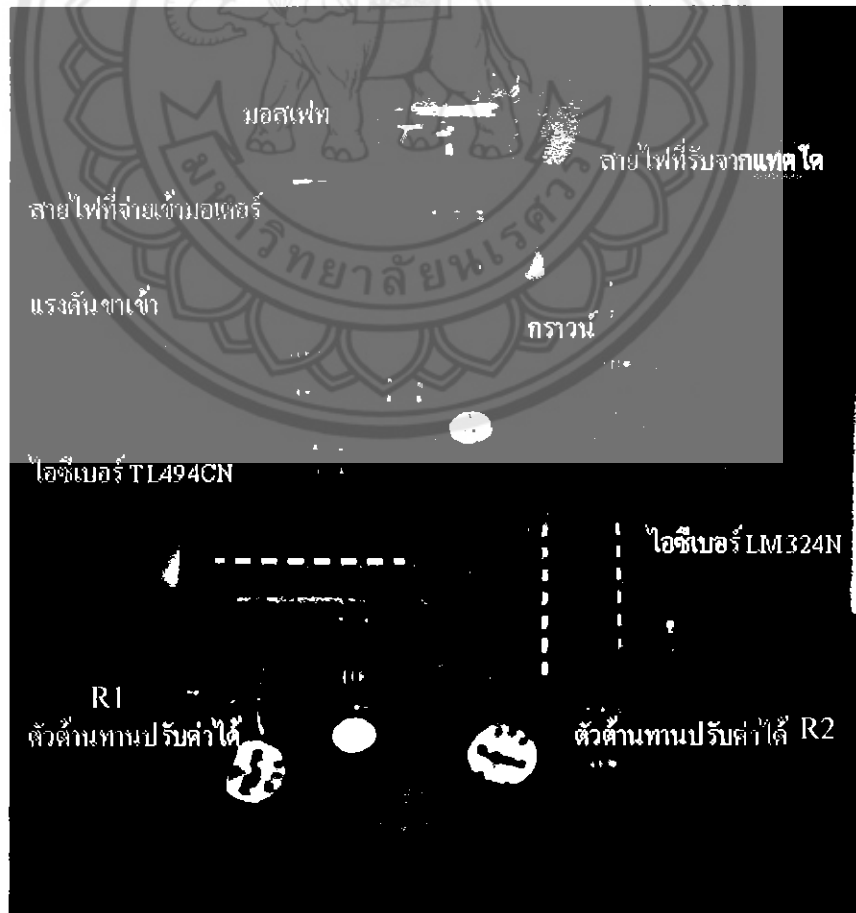


รูปที่ 3.5 แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในวงจรทั้งหมด

จากแผนรูปที่ 3.5 เมื่อมีสัญญาณแรงดันที่รับมาจากตัวมาตรวัดความเร็วจะมาเข้าวงจรบัฟเฟอร์ (Buffer) ซึ่งวงจรบัฟเฟอร์นี้จะทำหน้าที่ป้องกันวงจรสองวงจรมีความต่างกันเรื่องกระแสและแรงดันที่ต้องการป้อนให้ทางสัญญาณด้านเข้าของอีกวงจรเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันหรือกระแสทางด้านสัญญาณด้านออกของวงจรอีกภาคหนึ่ง แต่ถ้าวงจรทางด้านรับนั้นมีอิมพีแดนซ์ด้านขาเข้า (Input impedance) ต่ำคือเสมือนมีค่าความต้านทานในทางสัญญาณด้านขาเข้าต่ำ เมื่อป้อน

สัญญาณที่มีกระแสและแรงดันน้อยๆเข้าไปวงจรที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำกว่าสัญญาณอาจจะถูกลดทอนหายไป ในทางภาคสัญญาณด้านขาเข้าได้ ดังนั้นแนวคิดและทฤษฎีในการออกแบบวงจรนั้นจะต้องมีวงจรบัฟเฟอร์เพื่อทำหน้าที่ปรับความต่างของอิมพีแดนซ์ของด้านเข้าและด้านออกของวงจรส่วนย่อย เพื่อให้เกิดการถ่ายข้อมูลของสัญญาณน้อยที่สุด ซึ่งวงจรบัฟเฟอร์นี้จะมีอัตราขยายเป็นหนึ่งกล่าวคือแรงดันที่เข้ามานั้นจะไม่มีเปลี่ยนแปลงแรงดันขาเข้าจะเท่ากับแรงดันด้านออก เมื่อแรงดันนั้นได้ผ่านวงจรบัฟเฟอร์ออกมาทางขา 7 แล้วจะผ่านเข้าไปในวงจรเปรียบเทียบแรงดัน เพื่อเปรียบเทียบแรงดันที่มาจากออปแอมป์ขา 7 กับแรงดันที่ได้ตั้งเอาไว้ตอนแรก ซึ่งแรงดันที่ปรับนั้นจะขึ้นอยู่กับความต้านทานปรับค่าได้ ซึ่งเมื่อปรับความต้านทานไว้ที่ค่าสูงสุดแรงดันตกคร่อมความต้านทานจะมากขึ้นทำให้เกิดการเปรียบเทียบแรงดันที่รับมาจากขา 7 ของออปแอมป์และแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานจะมีค่าน้อยทำให้วงจรเปรียบเทียบมีอัตราขยายที่น้อย ในทางตรงกันข้ามเมื่อปรับค่าความต้านทานไว้ที่ค่าน้อยสุด แรงดันตกคร่อมความต้านทานก็จะมีน้อยเมื่อวงจรรับแรงดันจากออปแอมป์ขาที่ 7 จากวงจรบัฟเฟอร์ก็จะทำให้เกิดการเปรียบเทียบแรงดันที่มีค่าความแตกต่างมากทำให้เกิดการขยายที่มีอัตราสูง เมื่อเปรียบเทียบแรงดันแล้วก็จะถูกส่งออกไปยังขาที่ 3 ของไอซี TL494CN

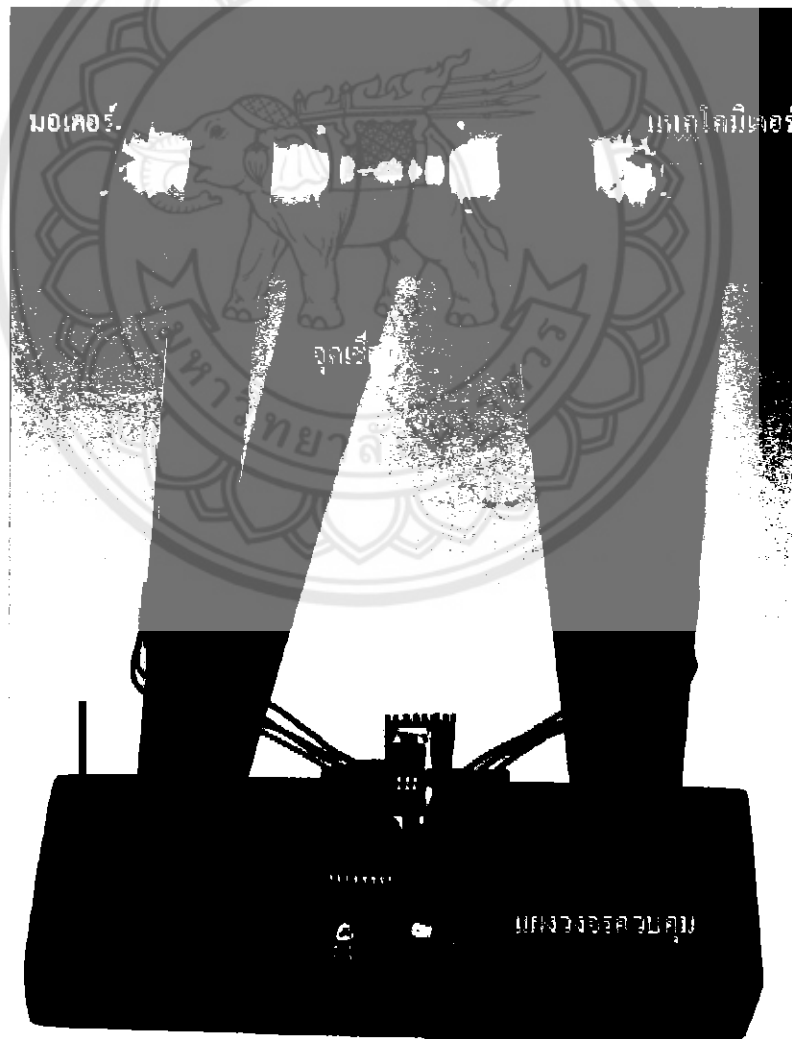
แผงวงจรและชิ้นงานที่สร้างขึ้นใน โครงงานนี้แสดงในรูปที่ 3.6 ถึง 3.9



รูปที่ 3.6 แผงวงจรด้านหน้าของวงจร



รูปที่ 3.7 แผงวงจรด้านหลังของวงจร



รูปที่ 3.8 วงจรควบคุมที่ต่อกับมอเตอร์



รูปที่ 3.9 มอเตอร์ต่อกับโหลด

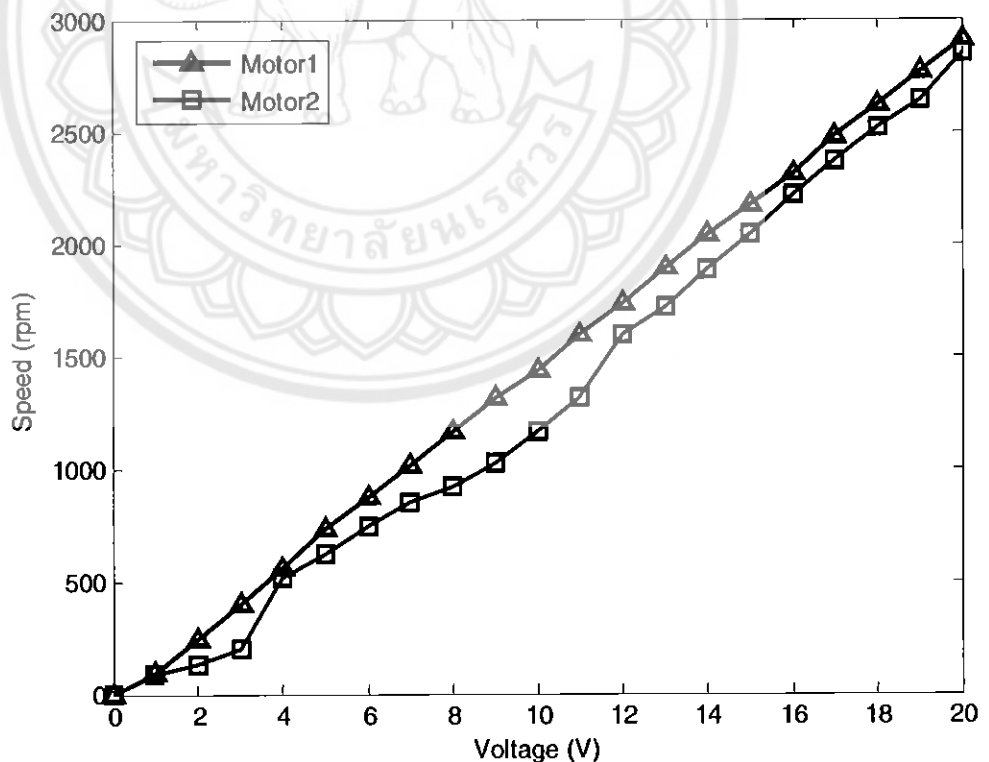
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดลองเพื่อหาค่าคงที่ของมอเตอร์

เครื่องจักรกลกระแสตรงที่ผู้จัดทำโครงงานเลือกมาใช้นั้นประกอบด้วยแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet) เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กคงที่ ทำให้ลดความยุ่งยากในการควบคุม ในโครงงานจะใช้เครื่องจักรกลสองตัวที่มีมาจากสายการผลิตเดียวกันและมีพิกัดเท่ากัน โดยจะกำหนดให้ตัวหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นมอเตอร์เพื่อการทดสอบ ส่วนอีกตัวจะทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อใช้งานเป็นมาตรฐานความเร็ว โดยเพลลาของเครื่องจักรกลทั้งสองตัวจะเชื่อมต่อกัน (Direct coupling)

การทดลองในขั้นแรกเริ่มจากการทดสอบเพื่อหาค่าคงที่ของมอเตอร์ในขณะที่หมุนอิสระ ปราศจากโหลดทั้งสองตัวเพื่อตรวจสอบว่ามอเตอร์ตัวใดเหมาะสมที่จะทำหน้าที่เป็นมาตรฐานความเร็ว โดยการวัดค่าแรงดันเทียบกับความเร็วรอบของมอเตอร์แต่ละตัวดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ค่าแรงดันเทียบกับความเร็วรอบของมอเตอร์ของมอเตอร์แต่ละตัว

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าถึงแม้จะเป็นมอเตอร์ชนิดเดียวกันแต่กราฟที่แสดงออกมานั้นก็ทำให้เห็นถึงความแตกต่างของมอเตอร์ทั้งสองตัวนี้ ดังนั้นสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงดันย่อมมีความแตกต่างกันด้วย

ถ้ากำหนดให้  $n$  คือ ความเร็วรอบ (rpm) และ  $V_t$  คือแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ (V)

สำหรับมอเตอร์ตัวที่หนึ่ง สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันที่ขั้ว คือ

$$n = 150 \cdot V_t - 26 \quad (4.1)$$

สำหรับมอเตอร์ตัวที่สอง สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันที่ขั้ว คือ

$$n = 150 \cdot V_t - 150 \quad (4.2)$$

จากสมการข้างต้นมอเตอร์ตัวที่หนึ่งจึงมีความเหมาะสมที่จะทำหน้าที่เป็นมาตรวัดความเร็ว เพราะว่าจากกราฟแสดงให้เห็นถึงความเป็นเส้นตรงซึ่งเหมาะที่จะทำหน้าที่เป็นมาตรวัดความเร็วซึ่งทำหน้าที่แปลงความเร็วรอบให้เป็นแรงดัน

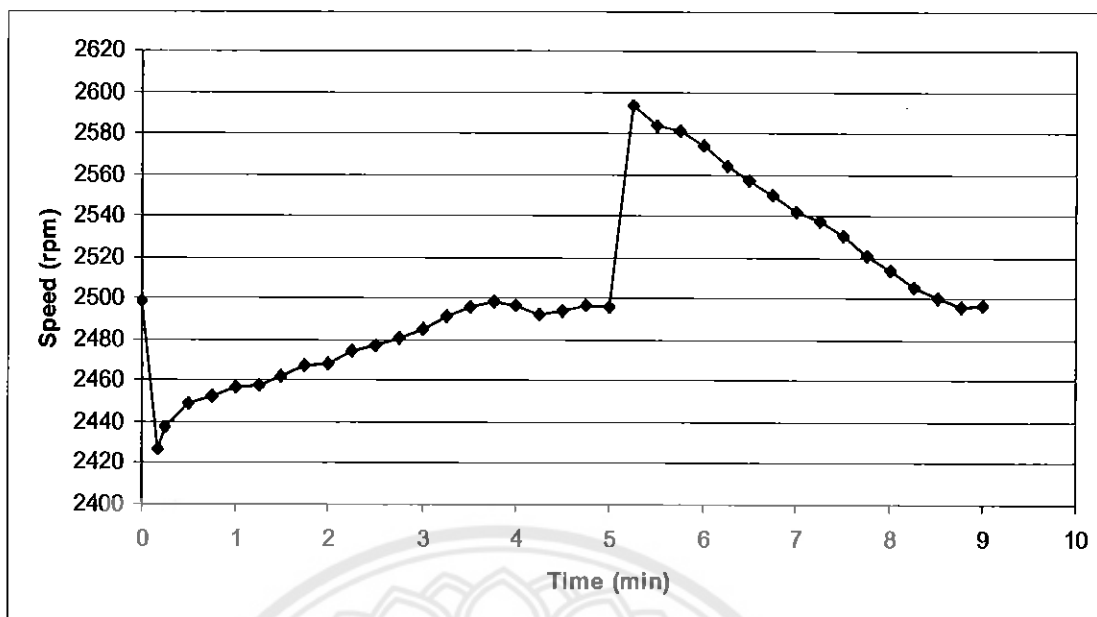
การทดลองในขั้นต่อไปเป็นการทดสอบวงจรที่ได้กล่าวมาจากบทที่ 3

#### 4.2 ผลการทดลองของวงจรควบคุมมอเตอร์โดยไม่ขึ้นอยู่กับโหลด

ในการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 จะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลองซึ่งทุกกรณีนั้นใช้โหลดขนาด 125 กรัม และรับแรงดันจากแหล่งกำเนิดกระแสตรง 20 V เท่ากันทั้งหมด

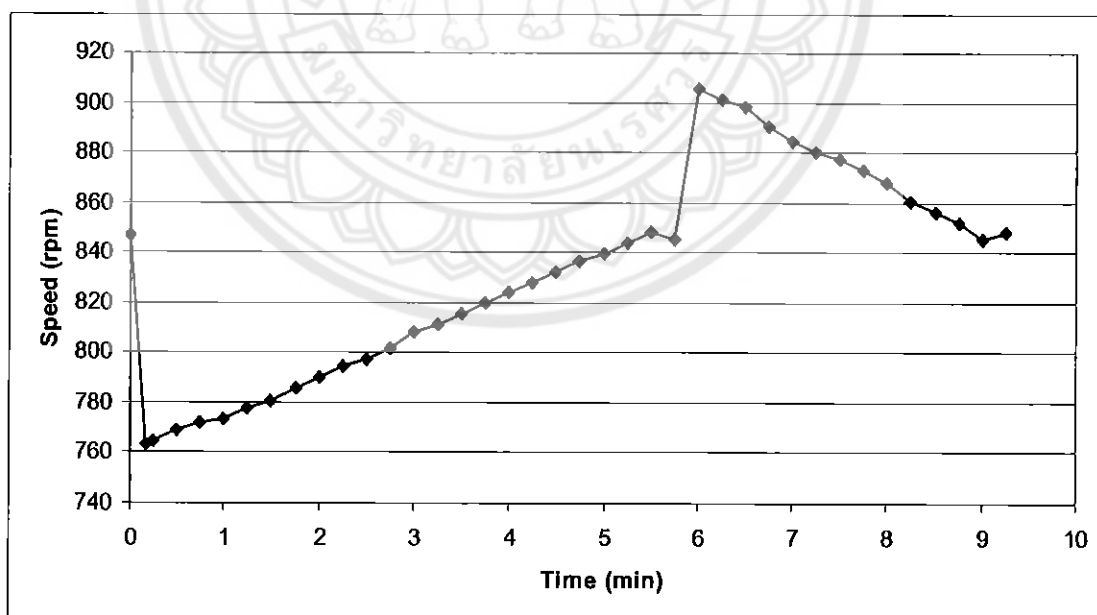
กำหนดให้ค่า  $R_1$  คือค่าความต้านทานปรับค่าได้จากวงจร TL494CN และค่า  $R_2$  คือค่าความต้านทานปรับค่าได้จากวงจร LM324N

การทดลองที่ 1 เริ่มจากการปรับ  $R_1$  โดยปรับไว้ค่าสูงสุดและ  $R_2$  ไว้ที่ค่าต่ำสุดแล้วจึงจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 20 V เข้าไปในวงจรและวัดความเร็วรอบด้านออกที่ขั้วของมาตรวัดความเร็ว คังแสดงคังกราฟในรูปที่ 4.2 เมื่อก่อนใส่โหลดความเร็วรอบวัดจากมาตรวัดความเร็วคือ 2498.5 rpm หลังจากนั้นใส่โหลดขนาด 125 กรัม จึงทำให้ค่าความเร็วรอบซึ่งวัดจากมาตรวัดความเร็วลดลงไปอยู่ที่ 2426.5 rpm หลังจากนั้นทุก ๆ 0.25 นาที จะทำการวัดค่าความเร็วรอบซึ่งพบว่าความเร็วรอบของมาตรวัดความเร็วเพิ่มขึ้นทุก ๆ 0.25 นาที หลังจากนั้นประมาณ 3.50 นาที มอเตอร์เริ่มหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่และเท่ากับความเร็วรอบขณะไร้โหลด หลังจากนั้นจึงทำการปลดโหลดออกทำให้ความเร็วรอบที่วัดจากมาตรวัดความเร็วเพิ่มขึ้นสูงจนถึงค่า 2638 rpm ซึ่งสูงกว่าความเร็วรอบขณะไร้โหลด หลังจากนั้นทุก ๆ 0.25 นาที จะพบว่ามอเตอร์เริ่มหมุนด้วยความเร็วรอบที่ลดลงและคงที่เท่ากับความเร็วเริ่มแรกก่อนใส่โหลดคือ 2498.5 rpm ซึ่งให้เวลาในการที่ทำงานทั้งหมดเป็นเวลา 08.75 นาที ผลการทดลองแสดงคังกราฟในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ในการทดลองที่ 1

การทดลองที่ 2 เริ่มจากการปรับค่า R1 โดยปรับไว้ค่าต่ำสุดและปรับค่า R2 ไว้ที่ค่าสูงสุด แล้วจ่ายแรงดันกระแสตรงขนาด 20 V ต่อโหลดขนาด 125 กรัม และวัดความเร็วได้ผลการทดลอง แสดงคิงกราฟในรูปที่ 4.3



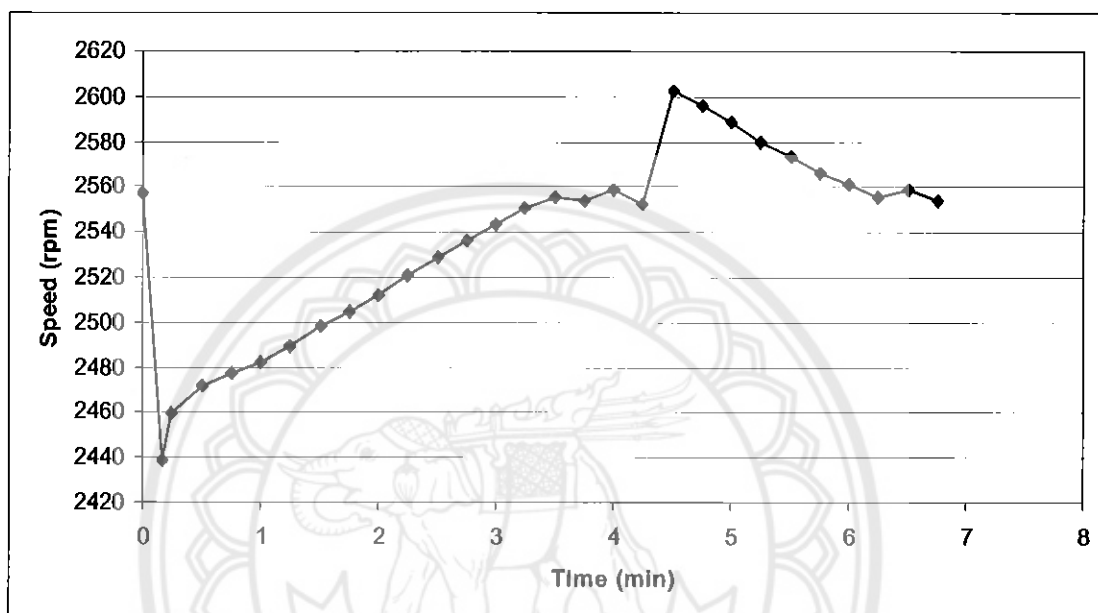
รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ในการทดลองที่ 2

จากกราฟในรูปที่ 4.3 ขณะไม่มีโหลด แรงดันที่วัดได้จากขั้วของมอเตอร์มีค่า 8.46 V และความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่า 847 rpm หลังจากใส่โหลดขนาด 125 กรัม ทำให้ความเร็วรอบลดลงเหลือ 763 rpm หลังจากนั้น 5.75 นาทีมอเตอร์จึงเริ่มหมุนด้วยความเร็วรอบเท่าความเร็วก่อนใส่โหลด



คือ 847 rpm หลังจากนั้นปลดโหลดออกทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เพิ่มขึ้นเป็น 905.5 rpm หลังจากนั้น 3.25 นาที มอเตอร์จึงเริ่มหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วเริ่มแรกก่อนใส่โหลดซึ่งมีค่าความเร็วเท่ากับ 847 rpm ใช้เวลาในการทำงานทั้งหมด 8.60 นาที

การทดลองที่ 3 เริ่มจากการปรับค่า R1 และ R2 ไว้ที่ค่าสูงสุดแล้วจ่ายแรงดันกระแสตรงขนาด 20 V เข้าไปในวงจรและใช้ขนาดโหลด 125 กรัม ผลการทดลองแสดงดังกราฟในรูปที่ 4.4

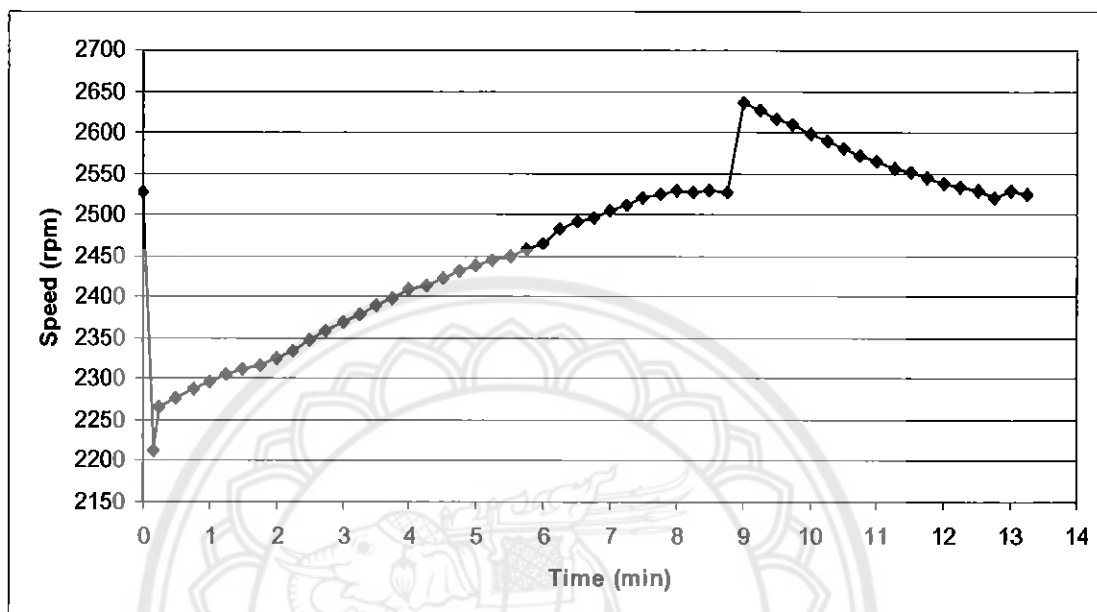


รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ในการทดลองที่ 3

จากกราฟในรูปที่ 4.4 เมื่อจ่ายแรงดันกระแสตรงขนาด 20 V เข้าไปในวงจร วัดค่าแรงดันขาเข้าของมอเตอร์ได้ 20.26 V วัดความเร็วรอบได้ 2557 rpm หลังจากนั้นใส่โหลดขนาด 125 กรัม พบว่าความเร็วรอบตกลงเหลือ 2438.5 rpm หลังจากนั้นวัดค่าความเร็วรอบทุกๆ 0.25 นาที พบว่าความเร็วรอบเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่าคงที่ที่ความเร็วรอบ 2557 rpm โดยใช้เวลา 3.50 นาที หลังจากนั้นทำการปลดโหลดออกทำให้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นเป็น 2602 rpm หลังจากนั้นทำการวัดความเร็วรอบทุกๆ 0.25 นาที พบว่าความเร็วรอบลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าคงที่เท่ากับความเร็วรอบขณะไม่มีโหลดซึ่งมีค่าเท่ากับ 2557 rpm โดยใช้เวลาทำงานทั้งหมด 5.50 นาที

จากการทดลองทั้ง 3 กรณีพบว่า การปรับความต้านทานของ R1 และ R2 ให้มีค่าสูงสุดทำให้การปรับความเร็วรอบใช้เวลาที่น้อยที่สุด ทั้งนี้เพราะการปรับค่าตัวต้านทานปรับค่าได้ของทั้งสองวงจรมีผลต่อการเพิ่มและลดระดับแรงดันให้กับวงจร ซึ่งส่งผลถึงความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วย ดังนั้นการปรับตัวต้านทานปรับค่าได้ทั้งสองค่าจึงเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการทำงานแบบป้อนกลับเพราะใช้เวลาในการทำงานที่น้อยกว่ากรณีที่ 1 และ 2

การทดลองที่ 4 เป็นการทดลองเพื่อทดสอบว่าถ้ามีการเพิ่ม โหลด วงจรควบคุมจะสามารถรักษาความเร็วรอบคงที่ได้ตามหลักการที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 หรือไม่ โดยทำการเพิ่มโหลดให้มีขนาด 250 กรัม และป้อนแรงดัน 20 V และวัดความเร็วรอบได้ 2527 rpm โดยปรับ R1 และ R2 ไว้ที่ค่าสูงสุดจะได้กราฟดังแสดงต่อไปนี้



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ในการทดลองที่ 4

จากกราฟในรูปที่ 4.5 จะพบว่าวงจรควบคุมมอเตอร์สามารถทำงานได้แม้จะมีขนาด โหลด ที่มากขึ้นกว่าโหลดเดิมและให้ผลออกมาในลักษณะเดียวกับการทดลองทั้ง 3 กรณี แต่ที่แตกต่างกันคือ ระยะเวลาที่วงจรควบคุมใช้เพื่อรักษาความเร็วรอบคงที่นั่นคือ การทดลองที่ 4 นี้ได้ทำการเพิ่มขนาด ของโหลดเป็น 2 เท่าของการทดลองในกรณีที่ 1 ถึง 3 ทำให้ใช้เวลาในการป้อนกลับของสัญญาณมีค่า มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการทำงานของมอเตอร์ชนิดนี้สามารถขับโหลดได้ไม่เกิน 1 กิโลกรัม มิฉะนั้นมอเตอร์อาจเสียหายได้ การบันทึกผลการทดลองทั้ง 4 กรณีแสดงในภาคผนวก จ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลองในโครงการ พร้อมเสนอแนะแนวทางการนำโครงการนี้ไปพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นต่อไป

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

วงจรควบคุมที่สร้างขึ้นในโครงการนี้สามารถรักษาความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ จากผลการทดลองในบทที่ 4 จะพบว่าวงจรป้อนกลับสามารถทำงานได้ตามหลักการที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.4 การทำงานของวงจรป้อนกลับนั้นสามารถทำงานให้เห็นผลของการเปลี่ยนแปลงได้โดยการปรับตัวต้านทานปรับค่าได้ ในการปรับค่าตัวต้านทานปรับค่าได้ในแต่ละค่านั้นย่อมส่งผลต่อวงจรป้อนกลับที่มีลักษณะแตกต่างกันไปซึ่งแสดงไว้ในบทที่ 4 ซึ่งการปรับค่าตัวต้านทานปรับค่าได้โดยการปรับค่าให้มากที่สุดนั้นจะส่งผลในการตอบสนองที่ไวกว่าการปรับในกรณีต่างๆ แต่ถึงอย่างไรก็ตาม ผลในการตอบสนองนั้นก็ยังมีข้อจำกัดอยู่คือผลการตอบสนองที่ได้นั้นจะส่งผลไวหรือช้าขึ้นอยู่กับขนาดของโหลดที่ใช้ก็เป็นตัวแปรสำคัญที่จะกำหนดเวลาในการที่จะทำให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบที่คงที่ด้วย ซึ่งถ้าใช้โหลดที่มีขนาดเล็กผลการตอบสนองในวงจรป้อนกลับก็จะส่งผลให้เร็วและเห็นการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ไวกว่าแต่ถ้าใช้โหลดที่มีขนาดมากความไวในการตอบสนองของวงจรป้อนกลับก็ช้าตามขนาดของโหลด อย่างไรก็ตามถ้าใช้โหลดที่มีขนาดมากเกินกว่าพิกัดของมอเตอร์ก็จะทำให้มอเตอร์เกิดความเสียหายได้ ซึ่งมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นมอเตอร์กระแสตรงขนาดพิกัดแรงดัน 24 V กระแส 1.5 A ซึ่งสามารถดูรายละเอียดของมอเตอร์อย่างละเอียดได้ที่ภาคผนวก ง

#### 5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

ก) การสั่นและการแกว่งของโหลดขณะมอเตอร์ทำงาน จากการสั่นของโหลดนั้นย่อมส่งผลต่อการตอบสนองของวงจรป้อนกลับกล่าวคือในการสั่นของโหลดนั้นจะส่งผลถึงความถี่ของมอเตอร์ขณะหมุนจึงทำให้ผลการตอบสนองมีค่าไม่สม่ำเสมอการแก้ไขควรใช้สายพานที่ใช้คล้องมอเตอร์เพื่อเพิ่มความถี่ให้มีขนาดที่สั้นลงเพื่อลดการแกว่งของมอเตอร์และควรลดขนาดของโหลดให้มีขนาดที่เล็กลงแต่น้ำหนักที่ใช้ควรมีน้ำหนักเท่าเดิม

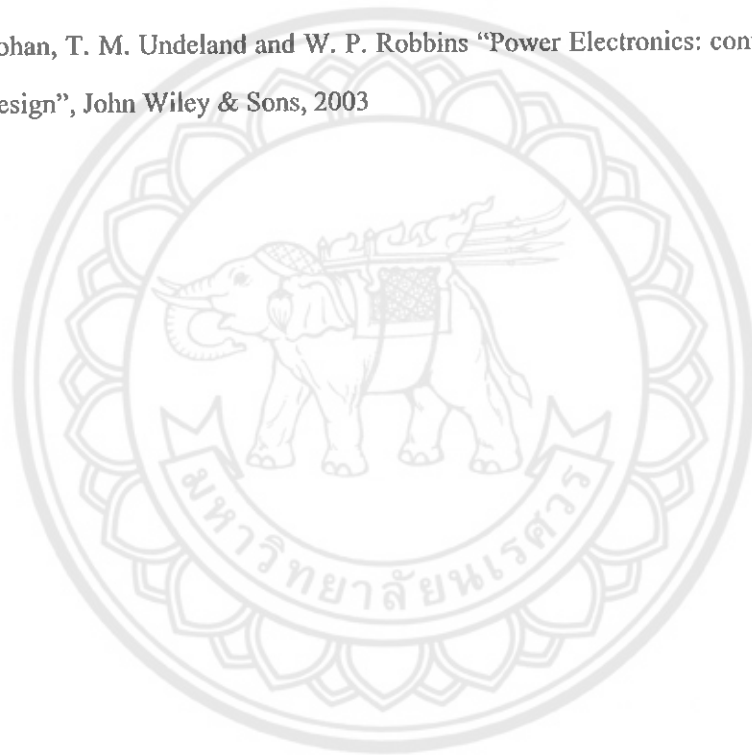
ข) การหมุนที่อิสระของมอเตอร์กับมาตรวัดความเร็วตรงที่จุดเชื่อมต่อกับในกรณีที่ขับโหลดนานๆ ทำให้ค่าความเร็วรอบที่ได้นั้นมีขนาดลดลงและไม่สามารถทำให้ความเร็วรอบมีค่าเท่ากับ

ความเร็วรอบที่ต้องการได้ การแก้ไขควรทำการเชื่อมจุดต่อระหว่างมอเตอร์กับมาตรวัดความเร็วให้มีความมั่นคงและแข็งแรง แต่การเชื่อมต้องทำให้แกนเพลลาของมอเตอร์และมาตรวัดความเร็วนั้นตรงกันเพราะถ้าการเชื่อมจุดต่อระหว่างมอเตอร์กับมาตรวัดความเร็วไม่ตรงกันแล้วจะทำให้การหมุนของมอเตอร์และมาตรวัดความเร็วตรงจุดเชื่อมเกิดความฝืด ซึ่งจะส่งผลถึงค่าความเร็วรอบด้วย



## เอกสารอ้างอิง

- [1] ไชยชาญ หินเกิด “เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1”, บริษัทประชาชน, กรุงเทพฯ, 2537
- [2] คร.วิริยะ พิเชษฐจำเริญ “เครื่องกลไฟฟ้า 1”, บริษัทเอ็น-เอชการพิมพ์, กรุงเทพฯ, 2535
- [3] P. F. Ryff “Electric Machinery”, Prentice Hall International, Inc., 1994
- [4] คร.ปัญญา ขอดโหวาท “เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง 1”, ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ, กรุงเทพฯ, 2546
- [5] ศศ.ศุภชัย สุรินทร์วงศ์ “เครื่องกลไฟฟ้า 1 ตอน 2”, บริษัทประชาชน, กรุงเทพฯ, 2538
- [6] N. Mohan, T. M. Undeland and W. P. Robbins “Power Electronics: converters, applications, and design”, John Wiley & Sons, 2003



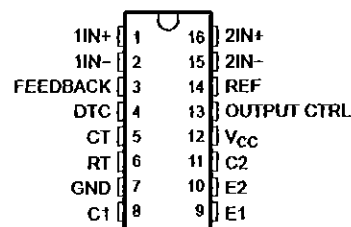
ภาคผนวก ก

รายละเอียดของไอซี TL494CN



**FEATURES**

- Complete PWM Power-Control Circuitry
- Uncommitted Outputs for 200-mA Sink or Source Current
- Output Control Selects Single-Ended or Push-Pull Operation
- Internal Circuitry Prohibits Double Pulse at Either Output
- Variable Dead Time Provides Control Over Total Range
- Internal Regulator Provides a Stable 5-V Reference Supply With 5% Tolerance
- Circuit Architecture Allows Easy Synchronization

D, DB, N, NS, OR PW PACKAGE  
(TOP VIEW)**DESCRIPTION**

The TL494 incorporates all the functions required in the construction of a pulse-width-modulation (PWM) control circuit on a single chip. Designed primarily for power-supply control, this device offers the flexibility to tailor the power-supply control circuitry to a specific application.

The TL494 contains two error amplifiers, an on-chip adjustable oscillator, a dead-time control (DTC) comparator, a pulse-steering control flip-flop, a 5-V, 5%-precision regulator, and output-control circuits.

The error amplifiers exhibit a common-mode voltage range from  $-0.3\text{ V}$  to  $V_{CC} - 2\text{ V}$ . The dead-time control comparator has a fixed offset that provides approximately 5% dead time. The on-chip oscillator can be bypassed by terminating RT to the reference output and providing a sawtooth input to CT, or it can drive the common circuits in synchronous multiple-rail power supplies.

The uncommitted output transistors provide either common-emitter or emitter-follower output capability. The TL494 provides for push-pull or single-ended output operation, which can be selected through the output-control function. The architecture of this device prohibits the possibility of either output being pulsed twice during push-pull operation.

The TL494C is characterized for operation from  $0^{\circ}\text{C}$  to  $70^{\circ}\text{C}$ . The TL494I is characterized for operation from  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $85^{\circ}\text{C}$ .

**AVAILABLE OPTIONS**

T <sub>A</sub>	PACKAGED DEVICES <sup>(1)</sup>				
	SMALL OUTLINE (D)	PLASTIC DIP (N)	SMALL OUTLINE (NS)	SHRINK SMALL OUTLINE (DB)	THIN SHRINK SMALL OUTLINE (PW)
$0^{\circ}\text{C}$ to $70^{\circ}\text{C}$	TL494CD	TL494CN	TL494CNS	TL494CDB	TL494CPW
$-40^{\circ}\text{C}$ to $85^{\circ}\text{C}$	TL494ID	TL494IN	—	—	—

(1) The D, DB, NS, and PW packages are available taped and reeled. Add the suffix R to device type (e.g., TL494CDR).



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of the Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

Copyright © 1983–2005, Texas Instruments Incorporated

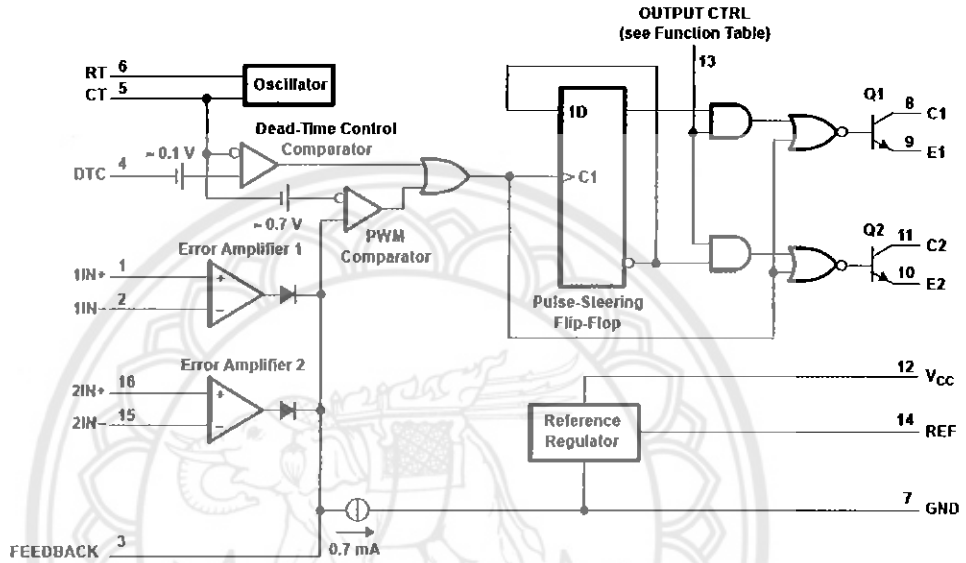
**TL494**  
**PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS**  
 SLVS074E—JANUARY 1983—REVISED FEBRUARY 2005



**FUNCTION TABLE**

INPUT TO OUTPUT CTRL	OUTPUT FUNCTION
$V_i = \text{GND}$	Single-ended or parallel output
$V_i = V_{ref}$	Normal push-pull operation

**FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM**





**Absolute Maximum Ratings<sup>(1)</sup>**

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

		MIN	MAX	UNIT
$V_{CC}$	Supply voltage <sup>(2)</sup>		41	V
$V_I$	Amplifier input voltage		$V_{CC} + 0.3$	V
$V_O$	Collector output voltage		41	V
$I_O$	Collector output current		250	mA
$\theta_{JA}$	Package thermal impedance <sup>(3)(4)</sup>	D package	73	°C/W
		DB package	82	
		N package	67	
		NS package	64	
		PW package	108	
Lead temperature 1.6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds			260	°C
$T_{stg}$	Storage temperature range	-65	150	°C

- (1) Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.
- (2) All voltages are with respect to the network ground terminal.
- (3) Maximum power dissipation is a function of  $T_J(\text{max})$ ,  $\theta_{JA}$ , and  $T_A$ . The maximum allowable power dissipation at any allowable ambient temperature is  $P_D = (T_J(\text{max}) - T_A) / \theta_{JA}$ . Operating at the absolute maximum  $T_J$  of 150°C can affect reliability.
- (4) The package thermal impedance is calculated in accordance with JESD 51-7.

**Recommended Operating Conditions**

		MIN	MAX	UNIT	
$V_{CC}$	Supply voltage	7	40	V	
$V_I$	Amplifier input voltage	-0.3	$V_{CC} - 2$	V	
$V_O$	Collector output voltage		40	V	
	Collector output current (each transistor)		200	mA	
	Current into feedback terminal		0.3	mA	
$f_{osc}$	Oscillator frequency	1	300	kHz	
$C_T$	Timing capacitor	0.47	10000	nF	
$R_T$	Timing resistor	1.8	500	k $\Omega$	
$T_A$	Operating free-air temperature	TL494C	0	70	°C
		TL494I	-40	85	

## TL494 PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS

SLVS074E—JANUARY 1983—REVISED FEBRUARY 2005



### Electrical Characteristics

over recommended operating free-air temperature range,  $V_{CC} = 15\text{ V}$ ,  $f = 10\text{ kHz}$  (unless otherwise noted)

#### Reference Section

PARAMETER	TEST CONDITIONS <sup>(1)</sup>	TL494C, TL494I			UNIT
		MIN	TYP <sup>(2)</sup>	MAX	
Output voltage (REF)	$I_O = 1\text{ mA}$	4.75	5	5.25	V
Input regulation	$V_{CC} = 7\text{ V to }40\text{ V}$		2	25	mV
Output regulation	$I_O = 1\text{ mA to }10\text{ mA}$		1	15	mV
Output voltage change with temperature	$\Delta T_A = \text{MIN to MAX}$		2	10	mV/V
Short-circuit output current <sup>(3)</sup>	REF = 0 V		25		mA

- (1) For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.  
 (2) All typical values, except for parameter changes with temperature, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .  
 (3) Duration of short circuit should not exceed one second.

#### Oscillator Section

$C_T = 0.01\ \mu\text{F}$ ,  $R_T = 12\ \text{k}\Omega$  (see Figure 1)

PARAMETER	TEST CONDITIONS <sup>(1)</sup>	TL494C, TL494I			UNIT
		MIN	TYP <sup>(2)</sup>	MAX	
Frequency			10		kHz
Standard deviation of frequency <sup>(3)</sup>	All values of $V_{CC}$ , $C_T$ , $R_T$ , and $T_A$ constant		100		Hz/kHz
Frequency change with voltage	$V_{CC} = 7\text{ V to }40\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$		1		Hz/kHz
Frequency change with temperature <sup>(4)</sup>	$\Delta T_A = \text{MIN to MAX}$			10	Hz/kHz

- (1) For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.  
 (2) All typical values, except for parameter changes with temperature, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .  
 (3) Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula:

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

- (4) Temperature coefficient of timing capacitor and timing resistor are not taken into account.

#### Error-Amplifier Section

See Figure 2

PARAMETER	TEST CONDITIONS	TL494C, TL494I			UNIT
		MIN	TYP <sup>(1)</sup>	MAX	
Input offset voltage	$V_O (\text{FEEDBACK}) = 2.5\text{ V}$		2	10	mV
Input offset current	$V_O (\text{FEEDBACK}) = 2.5\text{ V}$		25	250	nA
Input bias current	$V_O (\text{FEEDBACK}) = 2.5\text{ V}$		0.2	1	$\mu\text{A}$
Common-mode input voltage range	$V_{CC} = 7\text{ V to }40\text{ V}$		-0.3 to $V_{CC} - 2$		V
Open-loop voltage amplification	$\Delta V_O = 3\text{ V}$ , $V_O = 0.5\text{ V to }3.5\text{ V}$ , $R_L = 2\ \text{k}\Omega$		70	95	dB
Unity-gain bandwidth	$V_O = 0.5\text{ V to }3.5\text{ V}$ , $R_L = 2\ \text{k}\Omega$		800		kHz
Common-mode rejection ratio	$\Delta V_O = 40\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$		65	80	dB
Output sink current (FEEDBACK)	$V_{IO} = -15\text{ mV to }-5\text{ V}$ , $V (\text{FEEDBACK}) = 0.7\text{ V}$		0.3	0.7	mA
Output source current (FEEDBACK)	$V_{IO} = 15\text{ mV to }5\text{ V}$ , $V (\text{FEEDBACK}) = 3.5\text{ V}$		-2		mA

- (1) All typical values, except for parameter changes with temperature, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

### Electrical Characteristics

over recommended operating free-air temperature range,  $V_{CC} = 15\text{ V}$ ,  $f = 10\text{ kHz}$  (unless otherwise noted)

#### Output Section

PARAMETER		TEST CONDITIONS	MIN	TYP <sup>(1)</sup>	MAX	UNIT
Collector off-state current		$V_{CE} = 40\text{ V}$ , $V_{CC} = 40\text{ V}$		2	100	$\mu\text{A}$
Emitter off-state current		$V_{CC} = V_C = 40\text{ V}$ , $V_E = 0$			-100	$\mu\text{A}$
Collector-emitter saturation voltage	Common emitter	$V_E = 0$ , $I_C = 200\text{ mA}$		1.1	1.3	V
	Emitter follower	$V_{O(OC1\text{ or }OC2)} = 15\text{ V}$ , $I_E = -200\text{ mA}$		1.5	2.5	V
Output control input current		$V_I = V_{ref}$			3.5	$\text{mA}$

(1) All typical values, except for temperature coefficient, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

#### Dead-Time Control Section

See Figure 1

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP <sup>(1)</sup>	MAX	UNIT
Input bias current (DEAD-TIME CTRL)	$V_I = 0$ to $5.25\text{ V}$		-2	-10	$\mu\text{A}$
Maximum duty cycle, each output	$V_I$ (DEAD-TIME CTRL) = 0, $C_T = 0.01\text{ }\mu\text{F}$ , $R_T = 12\text{ k}\Omega$		45		%
Input threshold voltage (DEAD-TIME CTRL)	Zero duty cycle		3	3.3	V
	Maximum duty cycle	0			

(1) All typical values, except for temperature coefficient, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

#### PWM Comparator Section

See Figure 1

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP <sup>(1)</sup>	MAX	UNIT
Input threshold voltage (FEEDBACK)	Zero duty cycle		4	4.5	V
Input sink current (FEEDBACK)	$V$ (FEEDBACK) = $0.7\text{ V}$	0.3	0.7		$\text{mA}$

(1) All typical values, except for temperature coefficient, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

#### Total Device

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP <sup>(1)</sup>	MAX	UNIT
Standby supply current	$R_T = V_{ref}$ , All other inputs and outputs open	$V_{CC} = 15\text{ V}$	6	10	$\text{mA}$
		$V_{CC} = 40\text{ V}$	9	15	$\text{mA}$
Average supply current	$V_I$ (DEAD-TIME CTRL) = $2\text{ V}$ , See Figure 1		7.5		$\text{nA}$

(1) All typical values, except for temperature coefficient, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

#### Switching Characteristics

$T_A = 25^\circ\text{C}$

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP <sup>(1)</sup>	MAX	UNIT
Rise time	Common-emitter configuration, See Figure 3		100	200	ns
Fall time			25	100	ns
Rise time	Emitter-follower configuration, See Figure 4		100	200	ns
Fall time			40	100	ns

(1) All typical values, except for temperature coefficient, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

ภาคผนวก ข

รายละเอียดของมอสเฟต IRF510N



**5.6A, 100V, 0.540 Ohm, N-Channel Power MOSFET**

This N-Channel enhancement mode silicon gate power field effect transistor is an advanced power MOSFET designed, tested, and guaranteed to withstand a specified level of energy in the breakdown avalanche mode of operation. All of these power MOSFETs are designed for applications such as switching regulators, switching converters, motor drivers, relay drivers, and drivers for high power bipolar switching transistors requiring high speed and low gate drive power. These types can be operated directly from integrated circuits.

Formerly developmental type TA17441.

**Ordering Information**

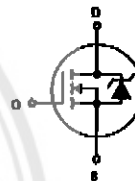
PART NUMBER	PACKAGE	BRAND
IRF510	TO-220AB	IRF510

NOTE: When ordering, include the entire part number.

**Features**

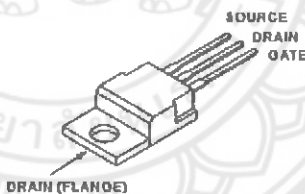
- 5.6A, 100V
- $r_{DS(ON)} = 0.540\Omega$
- Single Pulse Avalanche Energy Rated
- SOA is Power Dissipation Limited
- Nanosecond Switching Speeds
- Linear Transfer Characteristics
- High Input Impedance
- Related Literature
  - TB334 "Guidelines for Soldering Surface Mount Components to PC Boards"

**Symbol**



**Packaging**

JEDEC TO-220AB



## IRF510

Absolute Maximum Ratings  $T_C = 25^\circ\text{C}$ , Unless Otherwise Specified

	IRF510	UNITS	
Drain to Source Voltage (Note 1) .....	$V_{DS}$	100	V
Drain to Gate Voltage ( $R_{GS} = 20\text{k}\Omega$ ) (Note 1) .....	$V_{DGS}$	100	V
Continuous Drain Current .....	$I_D$	5.6	A
$T_C = 100^\circ\text{C}$ .....	$I_D$	4	A
Pulsed Drain Current (Note 3) .....	$I_{DM}$	20	A
Gate to Source Voltage .....	$V_{GS}$	$\pm 20$	V
Maximum Power Dissipation .....	$P_D$	43	W
Linear Derating Factor .....		0.29	$W/^\circ\text{C}$
Single Pulse Avalanche Energy Rating (Note 4) .....	$E_{AS}$	19	mJ
Operating and Storage Temperature Range .....	$T_J, T_{STG}$	-55 to 175	$^\circ\text{C}$
Maximum Temperature for Soldering Leads at 0.063in (1.6mm) from Case for 10s. ....	$T_L$	300	$^\circ\text{C}$
Package Body for 10s, See Techbrief 334 .....	$T_{pkg}$	280	$^\circ\text{C}$

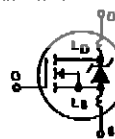
CAUTION: Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

## NOTE:

- $T_J = 25^\circ\text{C}$  to  $150^\circ\text{C}$ .

Electrical Specifications  $T_C = 25^\circ\text{C}$ , Unless Otherwise Specified

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Drain to Source Breakdown Voltage	$BV_{DSS}$	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu\text{A}$ , (Figure 10)	100	-	-	V
Gate to Threshold Voltage	$V_{GS(TH)}$	$V_{GS} = V_{DS}, I_D = 250\mu\text{A}$	2.0	-	4.0	V
Zero-Gate Voltage Drain Current	$I_{DSS}$	$V_{DS} = 95V, V_{GS} = 0V$	-	-	25	$\mu\text{A}$
		$V_{DS} = 0.8 \times \text{Rated } BV_{DSS}, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$	-	-	250	$\mu\text{A}$
On-State Drain Current (Note 2)	$I_{D(ON)}$	$V_{DS} > I_{D(ON)} \times r_{DS(ON)MAX}, V_{GS} = 10V$ (Figure 7)	5.8	-	-	A
Gate to Source Leakage Current	$I_{GSS}$	$V_{GS} = \pm 20V$	-	-	$\pm 100$	nA
Drain to Source On Resistance (Note 2)	$r_{DS(ON)}$	$V_{GS} = 10V, I_D = 3.4A$ (Figures 8, 9)	-	0.4	0.54	$\Omega$
Forward Transconductance (Note 2)	$g_{fs}$	$V_{GS} = 50V, I_D = 3.4A$ (Figure 12)	1.3	2.0	-	S
Turn-On Delay Time	$t_{d(ON)}$	$I_D = 5.6A, R_{GS} = 24\Omega, V_{DD} = 50V, R_L = 8\Omega, V_{DD} = 50V, V_{GS} = 10V$	-	8	12	ns
Rise Time	$t_r$	MOSFET switching times are essentially independent of operating temperature	-	25	63	ns
Turn-Off Delay Time	$t_{d(OFF)}$		-	15	7	ns
Fall Time	$t_f$		-	12	50	ns
Total Gate Charge (Gate to Source + Gate to Drain)	$Q_g(TOT)$	$V_{GS} = 10V, I_D = 5.6A, V_{DS} = 0.8 \times \text{Rated } BV_{DSS}, I_{G(REF)} = 1.5mA$ (Figure 14)	-	5.0	30	nC
Gate to Source Charge	$Q_{gs}$	Gate charge is essentially independent of operating temperature.	-	2.0	-	nC
Gate to Drain "Miller" Charge	$Q_{gd}$		-	3.0	-	nC
Input Capacitance	$C_{ISS}$	$V_{GS} = 0V, V_{DS} = 25V, f = 1.0MHz$ (Figure 11)	-	135	-	pF
Output Capacitance	$C_{OSS}$		-	80	-	pF
Reverse-Transfer Capacitance	$C_{RSS}$		-	20	-	pF
Internal Drain Inductance	$L_D$	Measured From the Contact Screw On Tab To Center of Die	-	3.5	-	nH
		Measured From the Drain Lead, 6mm (0.25in) From Package to Center of Die	-	4.5	-	nH
Internal Source Inductance	$L_S$	Measured From The Source Lead, 6mm (0.25in) From Header to Source Bonding Pad	-	7.5	-	nH
Junction to Case	$R_{\theta JC}$		-	-	3.5	$^\circ\text{C/W}$
Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	Free air operation	-	-	80	$^\circ\text{C/W}$



ภาคผนวก ค

รายละเอียดของไอซี LM324N



## Low power quad op amps

LM124/224/324/324A/  
SA534/LM2902

## DESCRIPTION

The LM124/SA534/LM2902 series consists of four independent, high-gain, internally frequency-compensated operational amplifiers designed specifically to operate from a single power supply over a wide range of voltages.

## UNIQUE FEATURES

In the linear mode, the input common-mode voltage range includes ground and the output voltage can also swing to ground, even though operated from only a single power supply voltage.

The unity gain crossover frequency and the input bias current are temperature-compensated.

## FEATURES

- Internally frequency-compensated for unity gain
- Large DC voltage gain: 100 dB
- Wide bandwidth (unity gain): 1 MHz (temperature-compensated)
- Wide power supply range Single supply:  $3 V_{DC}$  to  $30 V_{DC}$  or dual supplies:  $\pm 1.5 V_{DC}$  to  $\pm 15 V_{DC}$
- Very low supply current drain: essentially independent of supply voltage (1 mW/top amp at  $\pm 5 V_{DC}$ )
- Low input biasing current: 45 nA<sub>DC</sub> (temperature-compensated)
- Low input offset voltage: 2 mV<sub>DC</sub> and offset current: 5 nA<sub>DC</sub>
- Differential input voltage range equal to the power supply voltage
- Large output voltage:  $0V_{DC}$  to  $V_{CC} - 1.5 V_{DC}$  swing

## PIN CONFIGURATION

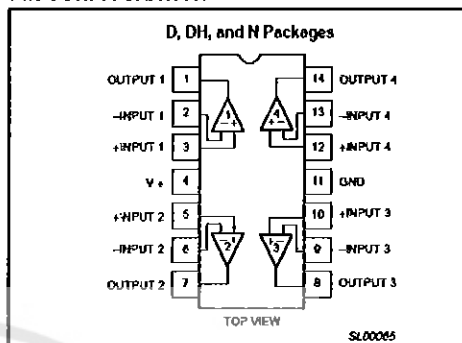


Figure 1. Pin configuration.

## ORDERING INFORMATION

DESCRIPTION	TEMPERATURE RANGE	ORDER CODE	DWG #
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-55 °C to +125 °C	LM124N	SOT27-1
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	-25 °C to +85 °C	LM224D	SOT108-1
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-25 °C to +85 °C	LM224N	SOT27-1
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	0 °C to +70 °C	LM324AD	SOT108-1
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	0 °C to +70 °C	LM324AN	SOT27-1
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	0 °C to +70 °C	LM324D	SOT108-1
14-Pin Plastic Thin Shrink Small Outline Package (TSSOP)	0 °C to +70 °C	LM324DH	SOT402-1
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	0 °C to +70 °C	LM324N	SOT27-1
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	-40 °C to +85 °C	SA534D	SOT108-1
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-40 °C to +85 °C	SA534N	SOT27-1
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	-40 °C to +125 °C	LM2902D	SOT108-1
14-Pin Plastic Thin Shrink Small Outline Package (TSSOP)	-40 °C to +125 °C	LM2902DH	SOT402-1
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-40 °C to +125 °C	LM2902N	SOT27-1



## Low power quad op amps

LM124/224/324/324A/  
SA534/LM2902

## DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

 $V_{CC} = 5\text{ V}$ ;  $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	TEST CONDITIONS	LM124/LM224			LM324/SA534/LM2902			UNIT
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
$V_{OS}$	Offset voltage <sup>1</sup>	$R_S = 0\ \Omega$		$\pm 2$	$\pm 5$		$\pm 2$	$\pm 7$	mV
		$R_S = 0\ \Omega$ , over temp.			$\pm 7$			$\pm 9$	
$\Delta V_{OS}/\Delta T$	Temperature drift	$R_S = 0\ \Omega$ , over temp.		7			7		$\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
$I_{IAS}$	Input current <sup>2</sup>	$I_{IN}(+)$ or $I_{IN}(-)$		45	150		45	250	nA
		$I_{IN}(+)$ or $I_{IN}(-)$ , over temp.		40	300		40	500	
$\Delta I_{IAS}/\Delta T$	Temperature drift	Over temp.		50			50		$\text{pA}/^{\circ}\text{C}$
$I_{OS}$	Offset current	$I_{IN}(+) - I_{IN}(-)$		$\pm 3$	$\pm 30$		$\pm 5$	$\pm 50$	nA
		$I_{IN}(+) - I_{IN}(-)$ , over temp.			$\pm 100$			$\pm 150$	
$\Delta I_{OS}/\Delta T$	Temperature drift	Over temp.		10			10		$\text{pA}/^{\circ}\text{C}$
$V_{CM}$	Common-mode voltage range <sup>3</sup>	$V_{CC} \leq 30\text{ V}$	0		$V_{CC} - 1.5$	0		$V_{CC} - 1.5$	V
		$V_{CC} \leq 30\text{ V}$ , over temp.	0		$V_{CC} - 2$	0		$V_{CC} - 2$	
CMRR	Common-mode rejection ratio	$V_{CC} = 30\text{ V}$	70	85		65	70		dB
$V_{OUT}$	Output voltage swing	$R_L = 2\text{ k}\Omega$ , $V_{CC} = 30\text{ V}$ , over temp.	26			26			V
$V_{OH}$	Output voltage high	$R_L \leq 10\text{ k}\Omega$ , $V_{CC} = 30\text{ V}$ , over temp.	27	28		27	28		V
$V_{OL}$	Output voltage low	$R_L \leq 10\text{ k}\Omega$ , over temp.		5	20		5	20	mV
$I_{CC}$	Supply current	$R_L = \infty$ , $V_{CC} = 30\text{ V}$ , over temp.		1.5	3		1.5	3	mA
		$R_L = \infty$ , over temp.		0.7	1.2		0.7	1.2	
$A_{VOL}$	Large-signal voltage gain	$V_{CC} = 15\text{ V}$ (for large $V_O$ swing); $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	50	100		25	100		V/mV
		$V_{CC} = 15\text{ V}$ (for large $V_O$ swing); $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ , over temp.	25			15			
	Amplifier-to-amplifier coupling <sup>5</sup>	$f = 1\text{ kHz}$ to $20\text{ kHz}$ , input referred		-120			-120		dB
PSRR	Power supply rejection ratio	$R_S \leq 0\ \Omega$	65	100		65	100		dB
$I_{OUT}$	Output current source	$V_{IN+} = +1\text{ V}$ , $V_{IN-} = 0\text{ V}$ , $V_{CC} = 15\text{ V}$	20	40		20	40		mA
		$V_{IN+} = +1\text{ V}$ , $V_{IN-} = 0\text{ V}$ , $V_{CC} = 15\text{ V}$ , over temp.	10	20		10	20		
	Output current sink	$V_{IN-} = +1\text{ V}$ , $V_{IN+} = 0\text{ V}$ , $V_{CC} = 15\text{ V}$	10	20		10	20		
		$V_{IN-} = +1\text{ V}$ , $V_{IN+} = 0\text{ V}$ , $V_{CC} = 15\text{ V}$ , over temp.	5	8		5	8		
			$V_{IN-} = +1\text{ V}$ , $V_{IN+} = 0\text{ V}$ , $V_O = 200\text{ mV}$	12	50		12	50	$\mu\text{A}$
$I_{SC}$	Short-circuit current <sup>4</sup>		10	40	50	10	40	50	mA
GBW	Unity gain bandwidth			1			1		MHz
SR	Slew rate			0.3			0.3		V/ $\mu\text{s}$
$V_{NOISE}$	Input noise voltage	$f = 1\text{ kHz}$		40			40		nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
$V_{DIF}$	Differential input voltage <sup>3</sup>				$V_{CC}$			$V_{CC}$	V

## Low power quad op amps

LM124/224/324/324A/  
SA534/LM2902

## DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Continued)

 $V_{CC} = 5\text{ V}$ ,  $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	TEST CONDITIONS	LM324A			UNIT
			Min	Typ	Max	
$V_{OS}$	Offset voltage <sup>1</sup>	$R_S = 0\ \Omega$		$\pm 2$	$\pm 3$	mV
		$R_S = 0\ \Omega$ , over temp.			$\pm 5$	
$\Delta V_{OS}/\Delta T$	Temperature drift	$R_S = 0\ \Omega$ , over temp.		7	30	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
$I_{BIAS}$	Input current <sup>2</sup>	$I_{IN(+)} \text{ or } I_{IN(-)}$		45	100	nA
		$I_{IN(+)} \text{ or } I_{IN(-)}$ , over temp.		40	200	
$\Delta I_{BIAS}/\Delta T$	Temperature drift	Over temp.		50		$\mu\text{A}/^\circ\text{C}$
$I_{OS}$	Offset current	$I_{IN(+)} - I_{IN(-)}$		$\pm 5$	$\pm 30$	nA
		$I_{IN(+)} - I_{IN(-)}$ , over temp.			$\pm 75$	
$\Delta I_{OS}/\Delta T$	Temperature drift	Over temp.		10	300	$\mu\text{A}/^\circ\text{C}$
$V_{CM}$	Common-mode voltage range <sup>3</sup>	$V_{CC} \leq 30\text{ V}$	0		$V_{CC} - 1.5$	V
		$V_{CC} \leq 30\text{ V}$ , over temp.	0		$V_{CC} - 2$	V
CMRR	Common-mode rejection ratio	$V_{CC} = 30\text{ V}$	65	85		dB
$V_{OUT}$	Output voltage swing	$R_L = 2\text{ k}\Omega$ , $V_{CC} = 30\text{ V}$ , over temp.	26			V
$V_{OH}$	Output voltage high	$R_L \leq 10\text{ k}\Omega$ , $V_{CC} = 30\text{ V}$ , over temp.	27	28		V
$V_{OL}$	Output voltage low	$R_L \leq 10\text{ k}\Omega$ , over temp.		5	20	mV
$I_{CC}$	Supply current	$R_L = \infty$ , $V_{CC} = 30\text{ V}$ , over temp.		1.5	3	mA
		$R_L = \infty$ , over temp.		0.7	1.2	mA
$A_{VOL}$	Large-signal voltage gain	$V_{CC} = 15\text{ V}$ (for large $V_O$ swing), $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	25	100		V/mV
		$V_{CC} = 15\text{ V}$ (for large $V_O$ swing), $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ , over temp.	15			V/mV
	Amplifier-to-amplifier coupling <sup>5</sup>	$f = 1\text{ kHz}$ to $20\text{ kHz}$ , input referred		-120		dB
PSRR	Power supply rejection ratio	$R_S \leq 0\ \Omega$	65	100		dB
$I_{OUT}$	Output current source	$V_{IN+} = +1\text{ V}$ , $V_{IN-} = 0\text{ V}$ , $V_{CC} = 15\text{ V}$	20	40		mA
		$V_{IN+} = +1\text{ V}$ , $V_{IN-} = 0\text{ V}$ , $V_{CC} = 15\text{ V}$ , over temp.	10	20		mA
	Output current sink	$V_{IN-} = +1\text{ V}$ , $V_{IN+} = 0\text{ V}$ , $V_{CC} = 15\text{ V}$	10	20		mA
		$V_{IN-} = +1\text{ V}$ , $V_{IN+} = 0\text{ V}$ , $V_{CC} = 15\text{ V}$ , over temp.	5	8		mA
		$V_{IN-} = +1\text{ V}$ , $V_{IN+} = 0\text{ V}$ , $V_O = 200\text{ mV}$	12	50		$\mu\text{A}$
$I_{SC}$	Short-circuit current <sup>4</sup>		10	40	60	mA
$V_{DIFF}$	Differential input voltage <sup>3</sup>				$V_{CC}$	V
GBW	Unity gain bandwidth			1		MHz
SR	Slew rate			0.3		V/ $\mu\text{s}$
$V_{NOISE}$	Input noise voltage	$f = 1\text{ kHz}$		40		nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$

## NOTES:

- $V_O = 1.4\text{ V}_{DC}$ ,  $R_S = 0\ \Omega$  with  $V_{CC}$  from  $5\text{ V}$  to  $30\text{ V}$  and over full input common-mode range ( $0\text{ V}_{CC+}$  to  $V_{CC} - 1.5\text{ V}$ ).
- The direction of the input current is out of the IC due to the PNP input stage. This current is essentially constant, independent of the state of the output so no loading change exists on the input lines.
- The input common-mode voltage of either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than  $0.3\text{ V}$ . The upper end of the common-mode voltage range is  $V_{CC} - 1.5$ , but either or both inputs can go to  $+32\text{ V}$  without damage.
- Short-circuits from the output to  $V_{CC}$  can cause excessive heating and eventual destruction. The maximum output current is approximately  $40\text{ mA}$  independent of the magnitude of  $V_{CC}$ . At values of supply voltage in excess of  $+15\text{ V}_{DC}$ , continuous short-circuits can exceed the power dissipation ratings and cause eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.
- Due to proximity of external components, insure that coupling is not originating via stray capacitance between these external parts. This typically can be detected as this type of coupling increases at higher frequencies.

Low power quad op amps

LM124/224/324/324A/  
SA534/LM2902

EQUIVALENT CIRCUIT

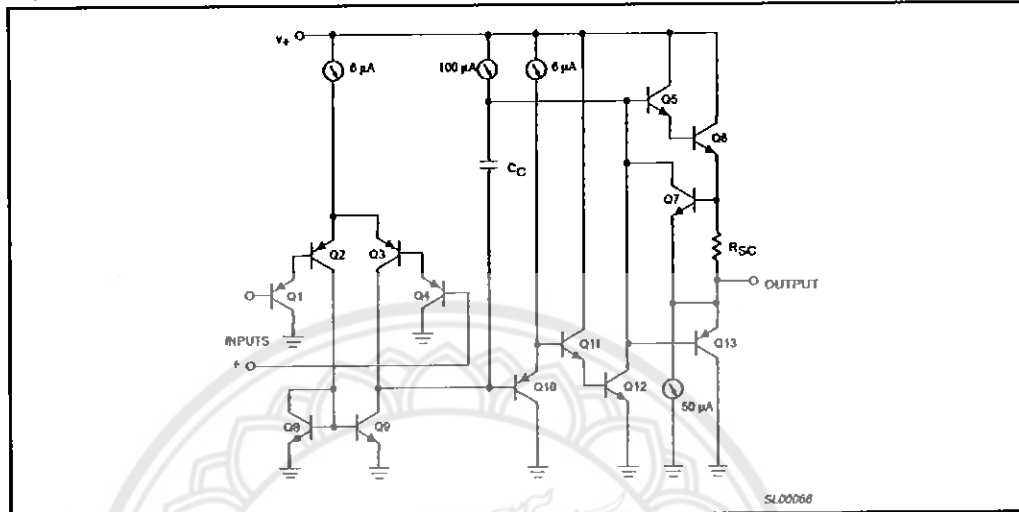


Figure 2. Equivalent circuit.

ภาคผนวก ง

รายละเอียดของมอเตอร์

**Mabuchi DC/PM Brush RS-385SH-16120**



## 24 Volt Motors

Year		1985/86	1987	1988	1989-92	1994	1995-97	1998	1999
Manufacturer		Plymouth	Canon	TRW/ Globe	HP/ Buhler	HP/ Buhler	HP/ Mabuchi	HP/ Mabuchi	HP/ Mabuchi
Type		Rubber Band #33	DC/PM Brush	DC/PM Brush	DC/PM Brush	DC/PM Brush	DC/PM Brush	DC/PM Brush	DC/PM Brush
Model Number			CN22	403A6	3140-0812/ 1.13.041.006	1645-60170/ 1.13.043.230	C2162-60006/ DN505728	RS-555SB -19160	RS-385SH -16120
Rating	[volts]		24	24	19.1	19.1	19.0	15.0	24.0
Test	[volts]		24	24	19.1	19.1	24.0	24.0	24.0
Stall Current	[amps]			1.5	1.26	2.0	2.5	1.6	2.52
Stall Torque	[N-cm]		0.28	5.65	4.86	18.4	28.7	9.4	4.75
Stall Torque	[in-oz]		0.40	8.00	6.88	26.1	40.6	13.3	6.7
No Load Speed	[rpm]		3,000	2,750	4,550	1,950	4,550	3,540	11,000
No Load Speed	[rad/sec]		314	288	476	204	476	371	1,152
Max. Power	[Watts]		0.22	4.07	5.79	9.4	34.2	8.72	13.7
Max. Power	[milli-hp]		0.29	5.46	7.76	12.6	45.8	11.7	18.2
Duration	[sec]		15.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
Energy	[Joules]	20.0	3.3	122	173	282	1,026	262	411
Weight	[grams]	0.5	47.2	240	172	417	224	220	70
Weight	[oz]	0.018	1.7	8.5	6.0	14.72	7.9	7.76	2.47
Power/Weight	[Watts/kg]		4.66	17.0	33.7	22.5	153	39.6	195.7
Energy/Weight	[Joules/kg]	40,000	69.9	509	1,006	676	4,580	1,191	5,871

## 24 Volt Motors, Continued

Year		1989-92	1994	1995-97	1998	1999
Manufacturer		HP/ Buhler	HP/ Buhler	HP/ Mabuchi	HP/ Mabuchi	HP/ Mabuchi
Type		DC/PM Brush	DC/PM Brush	DC/PM Brush	DC/PM Brush	DC/PM Brush
Model Number		3140-0812/ 1.13.041.006	1645-60170/ 1.13.043.230	C2162-60006/ DN505728	RS-555SB -19160	RS-385SH -16120
No Load Current	[Amps]	0.04	0.07	0.15	0.10	0.085
Start Up Voltage	[Volts]	1.5	1.5	2.0	3.0	1.5
Resistance	[Ohms]	15.2	9.6	8.2	11.6	6.3
Elect. Time Const	[msec]	0.5	1.2		0.9	
Mech. Time Const	[msec]	14.0	7.1		16.0	
Motor Constant	[N-cm/ $\sqrt{Watt}$ ]	1.2	3.0	1.8	1.78	0.75
Torque Constant	[N-cm/Amp]	4.87	9.3	4.8	6.08	1.9
Voltage Constant	[V/Krpm]	5.1	0.1		6.4	2.0
Inertia	[g-cm <sup>2</sup> ]	16.0	67.8	45.0	50	8.0
Shaft Diameter	[mm]	3.0	3.96	3.1	3.32	2.3
Shaft Diameter	[in]	0.118	0.156	0.123	0.131	0.091
Shaft Length	[mm]			85.0	85.0	13.8
Motor Diameter	[mm]	30.0	40.0	37.0	37.5	27.7
Motor Length	[mm]	56.5	77.0	64.0	66.0	57.0

### 12 Volt Motors

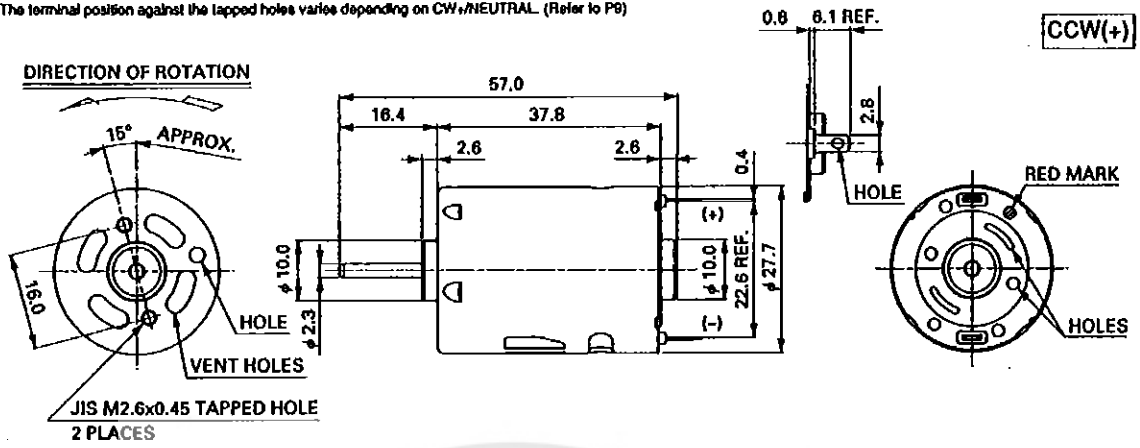
Year		1994-95,98	1994-99
Manufacturer		GM/ITT	GM/ITT
Type		Clutch DC/PM Brush	No Clutch DC/PM Brush
Model Number			
Rating	[volts]	12	12
Stall Current	[amps]		
Stall Torque	[N-cm]	1.196	1.227
Stall Torque	[in-oz]	1.69	1.73
Max. Speed	[rpm]	4,250	4,050
Max. Speed	[rad/sec]	445.1	424.1
Max. Power	[Watts]	1.33	1.30
Max. Power	[milli-hp]	1.78	1.74
Duration	[sec]	30.0	30.0
Energy	[Joules]	39.9	39.0
Weight	[grams]	45.4	41.0
Weight	[oz]	1.6	1.4
Power/Weight	[Watts/kg]	29.3	31.7
Energy/Weight	[Joules/kg]	878.9	951.2

Mabuchi RS-385SH-16120

両回転または逆回転で使用の場合は、端子の位置が異なります。(9ページ参照)  
 The terminal position against the lapped hole varies depending on CW/NEUTRAL. (Refer to P9)

UNIT: MILLIMETERS

CCW(+)



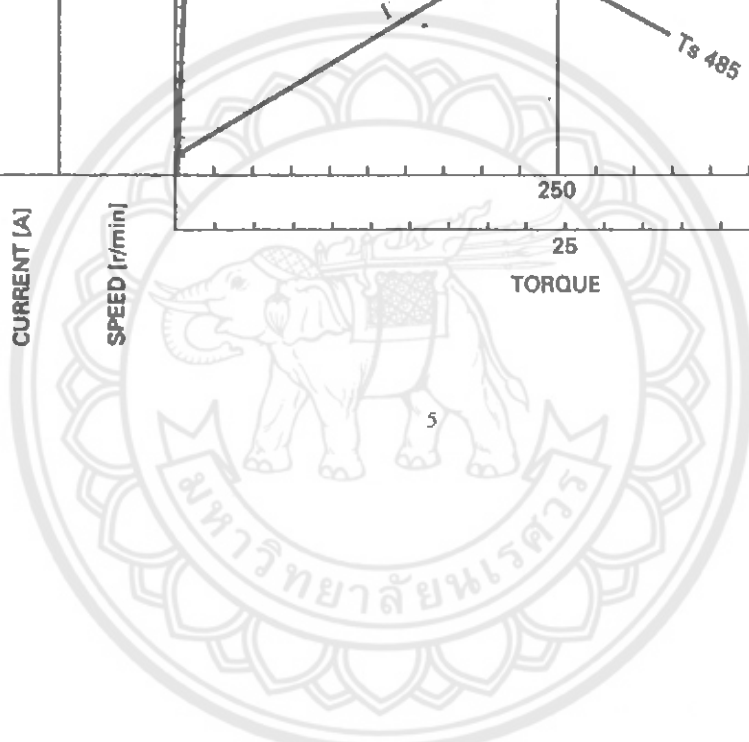
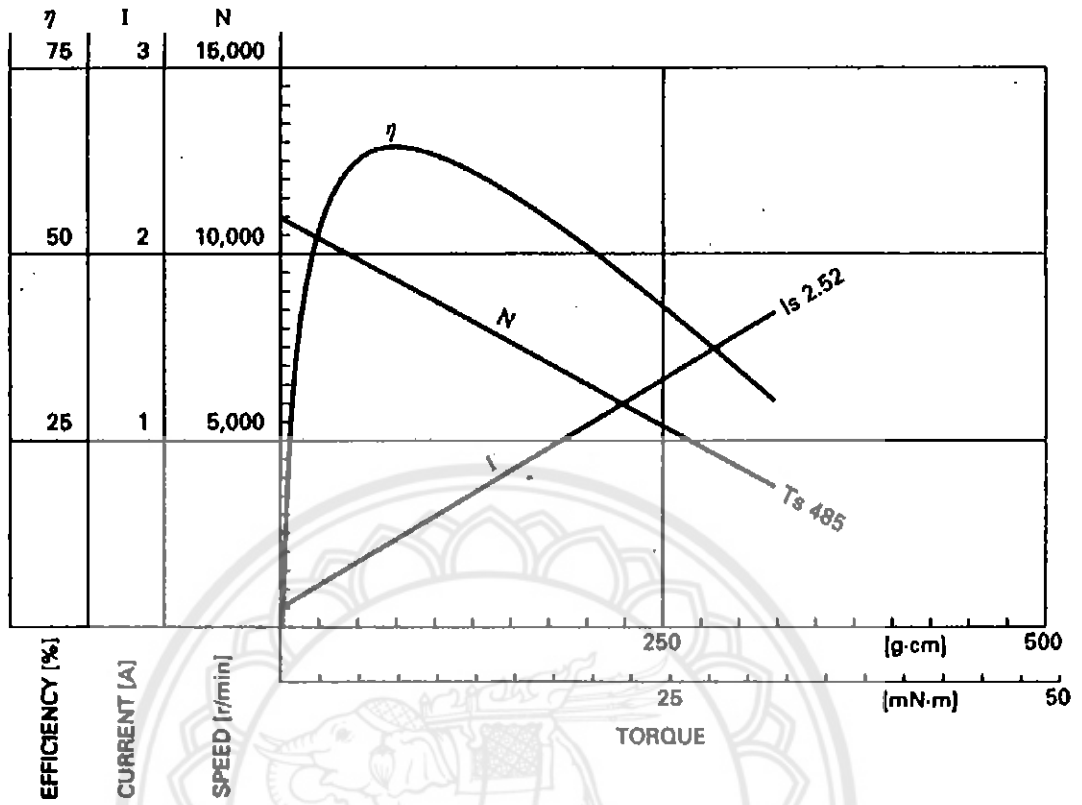
取付けネジはモータケース面より4.0以下  
 Usable male screw length 4.0 max. from motor mounting surface.

WEIGHT: 70g (APPROX)





Mabuchi RS-385SH-16120, Operating at 24.0 Volts



ภาคผนวก จ

ข้อมูลจากการทดลองวัดค่าความเร็วรอบ  
เทียบกับแรงดันป้อนเข้าของมอเตอร์



ตารางแสดงความเร็วรอบและแรงดันของมอเตอร์ตัวที่ใช้เป็นมอเตอร์

แรงดัน (V)	ความเร็วรอบ (rpm)	
	มอเตอร์ 1	มอเตอร์ 2
1	88.7	79.12
2	238.18	127.06
3	395.1	196.6
4	557.6	512.88
5	735.14	614.82
6	874.72	740.14
7	1017	848.5
8	1165.2	919.6
9	1308.2	1020.62
10	1438.2	1159.6
11	1588.6	1314.8
12	1728.8	1595.2
13	1886	1716.6
14	2039.6	1878.2
15	2172.5	2037
16	2315.2	2217.4
17	2475.8	2366.8
18	2615.4	2515.8
19	2768.7	2632.6
20	2908.8	2847.6

ภาคผนวก ง

ข้อมูลจากวัดค่าความเร็วรอบในการทดลองแบบต่างๆ



ผลการทดลองที่ 1 ถึง 3

ค่า R1 คือ ค่าความต้านทานปรับค่าได้จากวงจร TL494CN

ค่า R2 คือ ค่าความต้านทานปรับค่าได้จากวงจร LM324N

ขนาดโหลดที่ใช้คือ 125 กรัม

เวลา (วินาที)	R1 ปิดสุด R2 ปิด		R1 ปิด R2 ปิดสุด		R1 ปิดสุด R2 ปิดสุด	
	$V_{in} = 20$		$V_{in} = 8.46$		$V_{in} = 20.26$	
	$V_{out} = 16.83$		$V_{out} = 5.82$		$V_{out} = 17.22$	
	แรงดันตอน ใส่ load (V)	แรงดัน ตอนปลด load (V)	แรงดัน ตอนใส่ load (V)	แรงดันตอน ปลด load (V)	แรงดันตอน ใส่ load (V)	แรงดันตอน ปลด load (V)
10	16.35	17.46	5.26	6.21	16.43	17.52
15	16.42	17.40	5.27	6.18	16.57	17.48
30	16.50	17.38	5.30	6.16	16.65	17.43
45	16.52	17.33	5.32	6.11	16.69	17.37
60	16.55	17.27	5.33	6.07	16.72	17.33
75	16.56	17.22	5.36	6.04	16.77	17.28
90	16.59	17.17	5.38	6.02	16.83	17.25
105	16.62	17.12	5.41	5.99	16.87	17.21
120	16.63	17.09	5.44	5.96	16.92	17.23
135	16.67	17.04	5.47	5.91	16.98	17.20
150	16.69	16.98	5.49	5.88	17.03	
165	16.71	16.93	5.52	5.85	17.08	
180	16.74	16.88	5.56	5.81	17.13	
195	16.78	16.84	5.58	5.83	17.18	
210	16.81	16.81	5.61		17.21	
225	16.83	16.82	5.64		17.20	
240	16.82		5.67		17.23	
255	16.79		5.69		17.19	

## ผลการทดลองที่ 1 ถึง 3 (ต่อ)

เวลา (วินาที)	R1 ปิดสุด R2 ปิด $V_{in} = 20 \text{ V}$ $V_{out} = 16.83 \text{ V}$		R1 ปิด R2 ปิดสุด $V_{in} = 8.46 \text{ V}$ $V_{out} = 5.82 \text{ V}$		R1 ปิดสุด R2 ปิดสุด $V_{in} = 20.26 \text{ V}$ $V_{out} = 17.22 \text{ V}$	
	แรงดันตอน ใส่ load (V)	แรงดัน ตอนปลด load (V)	แรงดัน ตอนใส่ load (V)	แรงดันตอน ปลด load (V)	แรงดันตอน ใส่ load (V)	แรงดันตอน ปลด load (V)
255	16.80		5.72			
270	16.82		5.75			
285	16.81		5.77			
300			5.80			
315			5.83			
330			5.81			

## ผลการทดลองที่ 4

ค่า R1 คือ ค่าความต้านทานปรับค่าได้จากวงจร TL494CN

ค่า R2 คือ ค่าความต้านทานปรับค่าได้จากวงจร LM324N

ขนาดโหลดที่ใช้คือ 250 กรัม

วัดขนาดแรงดันขาเข้าวัดที่มัลติมิเตอร์ได้ 20 V

วัดขนาดแรงดันขาออกวัดที่มัลติมิเตอร์ได้ 17.02 V

เวลา (วินาที)	แรงดันที่วัดได้จากมาตรวัดความเร็ว (V)
10	14.92
15	15.28
30	15.35
45	15.43
60	15.48
75	15.54

เวลา (วินาที)	แรงดันที่วัดได้จากมาตรวัดความเร็ว (V)
90	15.59
105	15.61
120	15.68
135	15.74
150	15.82
165	15.89
180	15.97
195	16.03
210	16.1
225	16.16
240	16.23
255	16.27
270	16.32
285	16.38
300	16.43
315	16.47
330	16.51
345	16.56
360	16.61
375	16.73
390	16.78
405	16.82
420	16.87
435	16.91
450	16.97
465	17.01
480	17.04
495	17.02
510	17.03
525	17.02

เวลา (วินาที)	แรงดันที่วัดได้จากมาตรวัดความเร็ว (V)
540	17.75
555	17.68
570	17.61
585	17.56
600	17.49
615	17.43
630	17.38
645	17.32
660	17.27
675	17.21
690	17.19
705	17.14
720	17.1
735	17.07
750	17.04
765	16.98
780	17.03
795	17.01



## ประวัติผู้เขียนโครงการ



ชื่อ-นามสกุล: นายเอกพงศ์ ภิรมย์วงศ์  
 วันเกิด: 27 มิถุนายน 2529  
 ภูมิลำเนา: 192 หมู่ 9 ต. แม่ใส อ. เมือง จ. พะเยา 56000  
 ประวัติการศึกษา  
 ประถมศึกษา: โรงเรียนชุมชนบ้านแม่ใส จ. พะเยา  
 มัธยมศึกษา: โรงเรียนพากทวันวิทยาคม จ. พะเยา  
 Email: ee.nu\_gift@hotmail.com



ชื่อ-นามสกุล: นายปวีณ อินสุวรรณ  
 วันเกิด: 26 กันยายน 2529  
 ภูมิลำเนา: 18 หมู่ 7 ต. ห้วยลาน อ. ดอกคำใต้ จ. พะเยา 56120  
 ประวัติการศึกษา  
 ประถมศึกษา: โรงเรียนบ้านทุ่งต้นศรี จ. พะเยา  
 มัธยมศึกษา: โรงเรียนดอกคำใต้วิทยาคม พะเยา จ. พะเยา  
 Email: pushirokung@hotmail.com