

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ ๔ จตุภาคโดยใช้ไอจีบีที
และการจำลองระบบด้วยซิมูลิงค์

4 QUADRANT DC DRIVES BY IGBT
WITH ANALYSYS SYSTEM MODEL IN SIMULINK



โดย

นาย คมศักดิ์ ภูมิบุตรา

นาย จริยญา ก้อนคำ

นาย จีระศักดิ์ กล้าท่า

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ว.พ.

ปีการศึกษา 2544

๑๖๑๗

๒๕๔๔

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 45977

วัน, เดือน, ปี 26 ก.พ. 2546

.b.....

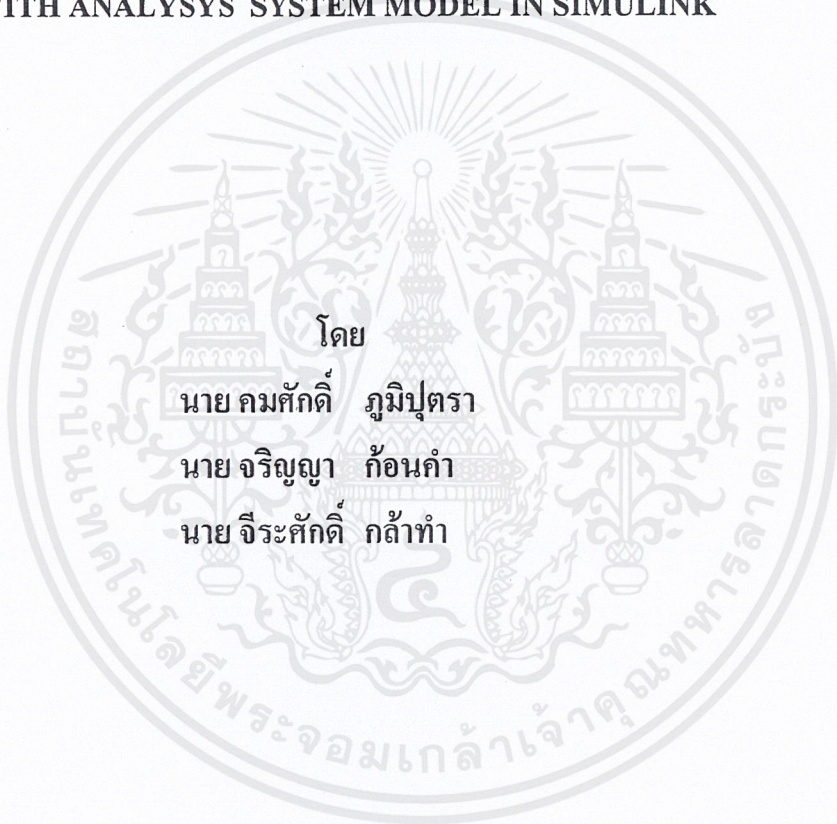
.i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2544

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4 จตุภาคโดยใช้ไอจีบีที
และการจำลองระบบด้วยซิมูลิงก์

4 QUADRANT DC DRIVES BY IGBT
WITH ANALYSYS SYSTEM MODEL IN SIMULINK



โดย

นาย คมศักดิ์ ภูมิบุตร

นาย จริยญา ก้อนคำ

นาย จีระศักดิ์ กล้าทำ

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ

อ.สุรินทร์ คำฝอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2544

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ สี่ขั้วภาคโดยใช้ไอจีบีที
และการจำลองระบบด้วยซิมูลิ้งค์

ผู้จัดทำ

1. นาย คมศักดิ์ ภูมิบุตร รหัสนักศึกษา 41014053
2. นาย จริญญา ก้อนคำ รหัสนักศึกษา 41014063
3. นาย จิระศักดิ์ กล้าทำ รหัสนักศึกษา 41014079

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ. ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ.สุรินทร์ คำฝอย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4 จตุภาคโดยใช้ไอจีบีที และการจำลองระบบด้วยซิมูลิงค์

นาย คมศักดิ์	ภูมิบุตร	
นาย จริญญา	ก้อนคำ	
นาย จิระศักดิ์	กล้าทำ	
รศ. ดร. วิริยะ	พิเชฐจำเริญ	อาจารย์ที่ปรึกษา
อ.สุรินทร์	คำฝอย	อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบบขดลวดแยก กระตุ้น โดยควบคุมให้สามารถทำงานได้ใน 4 ลักษณะคือ การหมุนในทิศทางฟอร์เวิร์ด การเบรคใน ทิศทางฟอร์เวิร์ด การหมุนในทิศทางรีเวิร์ส และการเบรคในทิศทางรีเวิร์ส ซึ่งจะเลือกใช้มอเตอร์กระแส ตรงขนาด 1.50 กิโลวัตต์ 15 แอมแปร์ 130 โวลต์ 1,800 รอบต่อนาที ซึ่งจุดมุ่งหมายของโครงการนี้คือ การพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพของการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ โดยการใช้สัญญาณพีดีบี เบิ้ลยูเอ็มแบบยูนิโพลาร์ ซึ่งทำให้สามารถเพิ่มการตอบสนองของมอเตอร์ในการควบคุมแบบลูปปิด แต่ จะเพิ่มความซับซ้อนของวงจรควบคุม นอกจากนี้ยังทำการจำลองระบบการควบคุมมอเตอร์โดยใช้ โปรแกรม MATLAB เพื่อทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลกับการทดลองจริง

**4 QUADRANT DC MOTOR DRIVES BY IGBT
WITH ANALYSIS SYSTEM MODEL IN SIMULINK**

Comsak Bhoomiputra

Jarinya Konkam

Jeerasak Klatam

Assoc.Prof.Dr.Viriya Pichetjamroen Advisor

Surin Khomfoi

Advisor

2001

ABSTRACT

This project presents the speed control of a four quadrant separately excited DC motor, which is controlled in four-direction that consist of rotating forward, forward breaking, rotating reverse and breaking reverse. A rating motor is 1.50 kW ,15A ,130 V and 1800 rpm.1800.The objective of the project is the improvement of the speed controller by using unipolar PWM controlled signal and the analyzing of control system with Matlab program .

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญ	III
สารบัญภาพ	VI
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	3
2.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	3
2.1.1 ส่วนที่อยู่กับที่(Stator Part)	3
2.1.2 ส่วนที่เคลื่อนที่ (Rotor Part)	7
2.2 สมการหลักของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง	11
2.2.1 สมการศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วแปร่งถ่าน	11
2.2.2 สมการแรงบิด	13
2.3 ชนิดของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง	15
2.4 การควบคุมความเร็วรอบ	15
2.5 การปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ดีซีแบบกระตุ้นแยกและแบบ斬ตัด	15
2.5.1 การปรับวงจรสนาม	15
2.5.2 การปรับความต้านทาน	16
2.6 การเบรกมอเตอร์	16
บทที่ 3 การควบคุมมอเตอร์แบบสี่จตุภาค (4-Quadrant)	18
3.1 ลักษณะการทำงานของมอเตอร์แบบ 4 ควอดแดรนต์	18
3.1.1 ควอดแดรนต์ที่ 1 การหมุนในทิศทางฟอร์เวิร์ด	18
3.1.2 ควอดแดรนต์ที่ 2 การเบรกในทิศทางฟอร์เวิร์ด	18
3.1.3 ควอดแดรนต์ที่ 3 การหมุนในทิศทางรีเวิร์ส	18
3.1.4 ควอดแดรนต์ที่ 4 การเบรกในทิศทางรีเวิร์ส	18
3.2 การควบคุมการสวิตซ์ซึ่งโดยใช้สัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบยูนิโพลาร์	19

	หน้า
บทที่ 4 ทฤษฎีเกี่ยวกับไอจีบีที (IGBT)	23
4.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับไอจีบีที	23
4.2 สัญลักษณ์และโครงสร้างของไอจีบีที	23
4.3 สถานะนำกระแส	25
4.4 สถานะหยุดนำกระแส	26
4.5 การแลตช์ในไอจีบีที	27
4.6 การป้องกันการแลตช์	28
4.7 วงจรสมมูลย์ของไอจีบีที	29
4.8 ลักษณะการสวิตช์	30
4.9 พื้นที่ทำงานที่ปลอดภัย	32
บทที่ 5 ระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	33
5.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	34
5.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุมแบบพีไอ	37
บทที่ 6 ทฤษฎีและขั้นตอนการใช้งาน Simulink ของโปรแกรม MATLAB	39
บทที่ 7 วงจรที่ใช้ในโครงการ	44
7.1 โครงสร้างและส่วนประกอบโดยรวม	44
7.2 วงจรกำลัง (Power Circuit)	44
7.3 วงจรควบคุม (Control Circuit)	45
7.3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ดับเบิ้ลยูเอ็มซีชนิดยูนิโพลาร์ (Generate PWM Circuit)	45
7.3.2 วงจรดับสัญญาณ (Deadtime Circuit)	45
7.3.3 วงจรขยายสัญญาณขับขาเกต (Gate Drive Circuit)	47
7.3.4 วงจรแปลงสัญญาณความถี่ให้เป็นสัญญาณแรงดัน (F/V Circuit)	47
7.3.5 วงจรควบคุมแบบพีไอ (PI-Control Circuit)	48
7.3.6 วงจรเบรคแบบไดนามิก (Dynamic Breaking Circuit)	49
บทที่ 8 การทดลองและผลการทดลอง	50
8.1 การทดลองหาค่า R_a , R_f โดยวิธีการ V-I Method	51
8.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว โรเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า	53
8.3 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว โรเตอร์กับกระแสฟิวส์	55
8.4 การทดสอบการทำงานและวัดสัญญาณเอาต์พุตทั้งระบบ	56

เอกสาร 8.4 การทดสอบการทำงานและวัดสัญญาณเอาต์พุตทั้งระบบ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
8.5 การทดลองหาค่าความเร็วของมอเตอร์ขณะขับโหลดแบบรูปเปิดที่โหลดค่าต่าง ๆ	68
8.6 การทดลองหาค่าความเร็วของมอเตอร์ขณะขับโหลดแบบรูปเปิดที่โหลดค่าต่าง ๆ	73
8.7 การเปรียบเทียบการขับมอเตอร์แบบรูปเปิดกับแบบรูปปิดที่โหลดค่าต่าง ๆ	78
8.8 สรุปผลการทดลองในส่วนของวงจรจริง	79
8.9 การวิเคราะห์ระบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB	80
8.10 สรุปผลการทดลองของวิเคราะห์การจำลองระบบบนโปรแกรม MATLAB	91
บทที่ 9 สรุปและวิจารณ์	92
9.1 สรุปผลโครงการ	92
9.2 ปัญหาที่พบในโครงการ	92
9.3 แนวทางการพัฒนา	93
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

VI

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แผนผังการทำงาน (Block Diagram) ของโครงการ	2
รูปที่ 2.1 เปลือกหรือโครง	3
รูปที่ 2.2 ขั้วแม่เหล็ก	4
รูปที่ 2.3 ขดลวดสนามแม่เหล็ก	5
รูปที่ 2.4 การตรวจสอบการต่อขดลวดฟิลด์คอยล์	5
รูปที่ 2.5 แปร่งถ่านและช่องถ่าน	6
รูปที่ 2.6 แกนเหล็กอาร์เมเจอร์	6
รูปที่ 2.7 ขดลวดอาร์เมเจอร์	7
รูปที่ 2.8 ลักษณะของคอมมิวเตเตอร์	8
รูปที่ 2.9 รูปตัดของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง	9
รูปที่ 2.10 ส่วนต่าง ๆ ของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง	9
รูปที่ 3.1 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4 ควอดแรนท	18
รูปที่ 3.2 การสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มแบบยูนิโพลาร์	19
รูปที่ 3.3 สัญญาณเอาต์พุต 4 ชุดที่จะนำไปขับอุปกรณ์สวิตซ์ซิง	19
รูปที่ 3.4 ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์(Full Bridge Converter)	20
รูปที่ 3.5 สัญญาณเอาต์พุต 4 ชุดและสัญญาณแรงดันตกคล่อมมอเตอร์ ในรูปแบบการหมุนในทิศทางฟอร์เวิร์ด	20
รูปที่ 3.6 สัญญาณเอาต์พุต 4 ชุดและสัญญาณแรงดันตกคล่อมมอเตอร์ ในรูปแบบการเบรคในทิศทางฟอร์เวิร์ด	21
รูปที่ 3.7 สัญญาณเอาต์พุต 4 ชุดและสัญญาณแรงดันตกคล่อมมอเตอร์ ในรูปแบบการหมุนในทิศทางรีเวิร์ส	21
รูปที่ 3.8 สัญญาณเอาต์พุต 4 ชุดและสัญญาณแรงดันตกคล่อมมอเตอร์ ในรูปแบบการเบรคในทิศทางรีเวิร์ส	22
รูปที่ 4.1 สัญลักษณ์ไอจีบีทีในลักษณะของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์และมอสเฟตตามลำดับ	23
รูปที่ 4.2 โครงสร้างของไอจีบีทีชนิดเอ็นแชนเนลเป็นภาพตัดขวาง	24
รูปที่ 4.3 กราฟลักษณะคุณสมบัติการถ่ายโอนของไอจีบีที	24
รูปที่ 4.4 กราฟลักษณะคุณสมบัติระหว่างกระแสและแรงดันของไอจีบีที	25
รูปที่ 4.5 ทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลในขณะนำกระแส	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 4.6 โครงสร้างที่ปรับปรุงเพื่อป้องกันการแลตช์ในของไอจีบีที	28
รูปที่ 4.7 โครงสร้างที่มีไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์และมอสเฟตแฝงอยู่ภายใน	29
รูปที่ 4.8 ลักษณะของกระแสและแรงดันขณะนำกระแส	31
รูปที่ 4.9 ลักษณะของกระแสและแรงดันขณะหยุดนำกระแส	31
รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4- Quadrant	33
รูปที่ 5.2 วงจรสมมูลย์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกขดลวดกระตุ้น	34
รูปที่ 5.3 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	36
รูปที่ 5.4 บล็อกของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	37
รูปที่ 5.5 กราฟของผลตอบสนองแบบพี	38
รูปที่ 5.6 กราฟของผลตอบสนองแบบไอ	38
รูปที่ 5.7 บล็อกของระบบควบคุมพีไอ	38
รูปที่ 6.1 คำสั่งเปิดการทำงานของ Simulink	39
รูปที่ 6.2 ส่วนประกอบต่างๆบนหน้าต่าง Library Simulink	40
รูปที่ 6.3 พื้นที่ทำงานของ Simulink	40
รูปที่ 6.4 การนำอุปกรณ์มาไว้ในพื้นที่ทำงาน	40
รูปที่ 6.5 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบ	41
รูปที่ 6.6 การจำลองระบบของระบบ Open Loop	41
รูปที่ 6.7 การจำลองระบบของระบบ Close Loop	42
รูปที่ 6.8 การใส่ค่าพารามิเตอร์ของ PI Control	42
รูปที่ 6.9 ผลการวิเคราะห์การทำงานของระบบ โดยแสดงผลทาง Scope	43
รูปที่ 7.1 โครงสร้างและส่วนประกอบโดยรวม	44
รูปที่ 7.2 วงจรกำลัง	44
รูปที่ 7.3 วงจรกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบยูนิโพลาร์	45
รูปที่ 7.4 วงจรเคดไทม์	46
รูปที่ 7.5 วงจรขยายสัญญาณขับไอจีบีที	47
รูปที่ 7.6 วงจรแปลงสัญญาณความถี่เป็นสัญญาณแรงดัน	48
รูปที่ 7.7 วงจรไดนามิกเบรก	49
รูปที่ 7.8 วงจรพีไอคอนโทรล	49
รูปที่ 8.1 การต่อวงจรทดลองเพื่อหาค่าRa	51
รูปที่ 8.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสอาร์เมเจอร์	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 8.3 การต่อวงจรทดลองเพื่อหาค่า R_f	52
รูปที่ 8.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสฟิลต์	53
รูปที่ 8.5 การต่อวงจรทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วโรเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขณะไร้อภาระ	54
รูปที่ 8.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันที่ป้อนเข้า	54
รูปที่ 8.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสฟิลต์	55
รูปที่ 8.8 ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรง	56
รูปที่ 8.9 การสร้างสัญญาณ PWM โดยการนำสัญญาณ สามเหลี่ยมมาตัดกับสัญญาณควบคุม 2 สัญญาณ	56
รูปที่ 8.10 สัญญาณเอาต์พุต PWM ชุดที่ 1 ที่ความถี่ 5 kHz	57
รูปที่ 8.11 สัญญาณเอาต์พุต PWM ชุดที่ 2 ที่ความถี่ 5 kHz	57
รูปที่ 8.12 สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรเคดไทม์ที่มีช่วงเวลาเคดไทม์เป็น 8 μ s	58
รูปที่ 8.13 สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรขับเคลื่อน	58
รูปที่ 8.14 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตคกร้อมอาร์เมเจอร์ในทิสฟอว์เวิร์ด	59
รูปที่ 8.15 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตคกร้อมอาร์เมเจอร์ในทิสรีเวิร์ส	59
รูปที่ 8.16 สัญญาณแรงดันคกร้อมบัสบาร์ขณะฟอว์เวิร์ดเบรกที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที	60
รูปที่ 8.17 สัญญาณแรงดันคกร้อมบัสบาร์ขณะรีเวิร์สเบรกที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที	60
รูปที่ 8.18 สัญญาณแรงดันคกร้อมบัสบาร์ขณะฟอว์เวิร์ดเบรกที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที	61
รูปที่ 8.19 สัญญาณแรงดันคกร้อมบัสบาร์ขณะรีเวิร์สเบรกที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที	61
รูปที่ 8.20 สัญญาณกระแสอาร์เมเจอร์ที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาทีขณะไม่มีโหลด	62
รูปที่ 8.21 สัญญาณกระแสอาร์เมเจอร์ที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาทีขณะมีโหลดที่ 2.0 N.m	62
รูปที่ 8.22 สัญญาณกระแสอาร์เมเจอร์ที่ความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาทีขณะไม่มีโหลด	63
รูปที่ 8.23 สัญญาณกระแสอาร์เมเจอร์ที่ความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาทีขณะมีโหลดที่ 2.0 N.m	63
รูปที่ 8.24 สัญญาณกระแสอาร์เมเจอร์ที่ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาทีขณะไม่มีโหลด	64
รูปที่ 8.25 สัญญาณกระแสอาร์เมเจอร์ที่ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาทีขณะมีโหลดที่ 2.0 N.m	64
รูปที่ 8.26 สัญญาณเอาต์พุตของ F/V ในขณะที่ขับ โหลดที่ 2.0 N.m ที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที	65
รูปที่ 8.27 สัญญาณกระแสอาร์เมเจอร์ในทิสฟอว์เวิร์ดในขณะที่ขับ โหลดที่ 2.0 N.m ที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที	65
รูปที่ 8.28 สัญญาณเอาต์พุตของ F/V ในขณะที่ขับ โหลดที่ 2.0 N.m ที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที	66

รูปที่ 8.29 สัญญาณกระแสอาร์เมเจอร์ในทิสฟอว์เวิร์ดในขณะที่ขั้วโพลที่ 2.0 N.m ที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที	66
รูปที่ 8.30 สัญญาณเอาต์พุตของ F/V ในขณะขั้วโพลที่ 2.0 N.m ที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที	67
รูปที่ 8.31 สัญญาณกระแสอาร์เมเจอร์ในทิสฟอว์เวิร์ดในขณะที่ขั้วโพลที่ 2.0 N.m ที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที	67
รูปที่ 8.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์ ขณะที่ขั้วโพลค่าต่างๆแบบลูเปิด ที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที	68
รูปที่ 8.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์ ขณะที่ขั้วโพลค่าต่างๆแบบลูเปิด ที่ความเร็ว 900 รอบต่อนาที	69
รูปที่ 8.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์ ขณะที่ขั้วโพลค่าต่างๆแบบลูเปิด ที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที	70
รูปที่ 8.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์ ขณะที่ขั้วโพลค่าต่างๆแบบลูเปิด ที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที	71
รูปที่ 8.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์ ขณะที่ขั้วโพลค่าต่างๆแบบลูเปิด ที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที	72
รูปที่ 8.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์ ขณะที่ขั้วโพลค่าต่างๆแบบลูปิด ที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที	73
รูปที่ 8.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์ ขณะที่ขั้วโพลค่าต่างๆแบบลูปิด ที่ความเร็ว 900 รอบต่อนาที	74
รูปที่ 8.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์ ขณะที่ขั้วโพลค่าต่างๆแบบลูปิด ที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที	75
รูปที่ 8.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์ ขณะที่ขั้วโพลค่าต่างๆแบบลูปิด ที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที	76
รูปที่ 8.41 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์ ขณะที่ขั้วโพลค่าต่างๆแบบลูปิด ที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที	77
รูปที่ 8.42 การเปรียบเทียบการขั้วโพลแบบลูเปิดกับแบบลูปิด ที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที	78
รูปที่ 8.43 การเปรียบเทียบการขั้วโพลแบบลูเปิดกับแบบลูปิด ที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที	78

	หน้า
รูปที่ 8.44 ระบบจำลองของระบบลูปเปิด	80
รูปที่ 8.45 ระบบจำลองของระบบลูปปิด	80
รูปที่ 8.46 ความสัมพันธ์ความเร็วรอบกับกระแสฟลักซ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด	81
รูปที่ 8.47 ความสัมพันธ์ความเร็วรอบกับกระแสฟลักซ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด	82
รูปที่ 8.48-รูปที่ 8.63 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วรอบ และการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแส	83-90



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 8.1 ค่าแรงดันและกระแสอาร์เมเจอร์	51
ตารางที่ 8.2 ค่าแรงดันและกระแสฟิลด์	52
ตารางที่ 8.3 ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสอาร์เมเจอร์ที่ความเร็วรอบต่างๆ	54
ตารางที่ 8.4 ค่าแรงดันขดลวดฟิลด์และกระแสฟิลด์ที่ความเร็วรอบต่างๆ	55
ตารางที่ 8.5 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที ที่ค่าโหลดต่างๆแบบลูเปิด	68
ตารางที่ 8.6 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความเร็ว 900 รอบต่อนาที ที่ค่าโหลดต่างๆแบบลูเปิด	69
ตารางที่ 8.7 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที ที่ค่าโหลดต่างๆแบบลูเปิด	70
ตารางที่ 8.8 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที ที่ค่าโหลดต่างๆแบบลูเปิด	71
ตารางที่ 8.9 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที ที่ค่าโหลดต่างๆแบบลูเปิด	72
ตารางที่ 8.10 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที ที่ค่าโหลดต่างๆแบบลูปิด	73
ตารางที่ 8.11 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความเร็ว 900 รอบต่อนาที ที่ค่าโหลดต่างๆแบบลูปิด	74
ตารางที่ 8.12 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที ที่ค่าโหลดต่างๆแบบลูปิด	75
ตารางที่ 8.13 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที ที่ค่าโหลดต่างๆแบบลูปิด	76
ตารางที่ 8.14 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที ที่ค่าโหลดต่างๆแบบลูปิด	77
ตารางที่ 8.15 ค่าความเร็วรอบและกระแสเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง	81
ตารางที่ 8.16 ค่าความเร็วรอบและกระแสเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและจุดเริ่มต้นของโครงการ

เนื่องจากในปัจจุบันนี้ วิทยาการและความเจริญก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์ ได้เข้ามามีบทบาทในการดำรงชีวิตของมนุษย์มากขึ้น โดยเราจะประยุกต์เอาวิทยาการและความเจริญก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์ เหล่านั้นมาสร้างเทคโนโลยีต่างๆ เพื่ออำนวยความสะดวกสบายในการดำรงชีวิต ซึ่งเทคโนโลยีต่างๆ เพื่ออำนวยความสะดวกสบายในการดำรงชีวิต ซึ่งเทคโนโลยีต่างๆ ที่เกิดขึ้นมามากมามีมอเตอร์เป็นจุดเริ่มต้น หรือเป็นต้นกำเนิดเสมอ ไม่ว่าจะเป็นเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม ยานพาหนะในการขนส่งและติดต่อสื่อสาร โรงจักรไฟฟ้า เป็นต้น สามารถนำไปประยุกต์และนำความรู้ที่ได้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์แก่สังคม

ในส่วนของมอเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา คณะผู้จัดทำโครงการ ได้เลือกใช้มอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแนวทางในการศึกษาก่อนที่จะประยุกต์การศึกษาไปยังมอเตอร์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีการควบคุมความเร็วหรือตำแหน่งกระทำได้ง่ายและมีความซับซ้อนน้อย การควบคุมความเร็วรอบทำได้ในช่วงกว้าง วงจรควบคุมมีราคาถูก และราคาของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงถูกกว่าเมื่อเทียบกับมอเตอร์ชนิดอื่น เหมาะสมสำหรับคณะผู้จัดทำ ซึ่งไม่มีงบประมาณที่มากนัก (เบิกไม่ได้เลย) ถึงแม้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีอัตราส่วนของกำลังงานที่ได้ออกมาต่อน้ำหนักจะอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำ มีอัตราเร็วที่จำกัดอยู่ที่ค่าหนึ่ง และมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง อันเนื่องมาจากแปรงถ่าน และคอมมิวเตเตอร์ ก็ตาม

การศึกษาหลักการทำงานและการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงน่าจะเป็นพื้นฐานที่ดีสำหรับการศึกษามอเตอร์ชนิดอื่นที่ยังยากซับซ้อนต่อไป และสามารถประยุกต์นำความรู้ ที่ได้ไปช่วยสร้างสรรค์สังคมต่อไป

วัตถุประสงค์ของการทำโครงการ

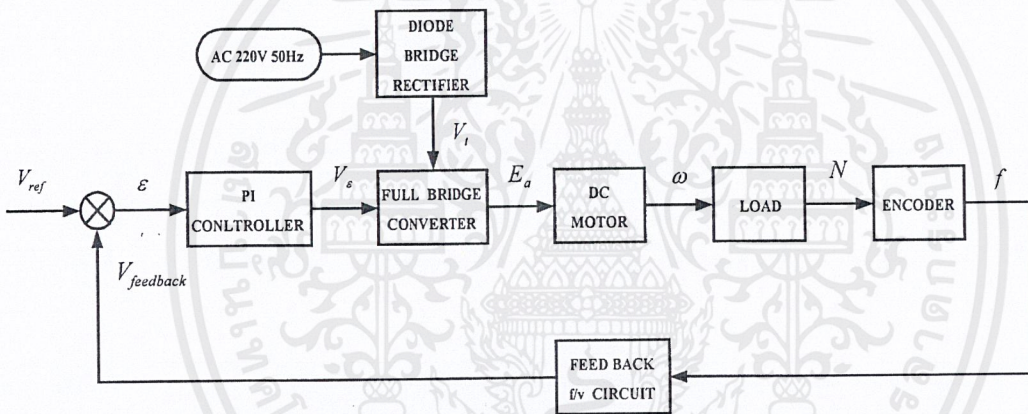
- 1) เพื่อศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
- 2) เพื่อศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
- 3) เพื่อศึกษาหลักการและเปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีการป้อนกลับและระบบที่ไม่มีการป้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) เพื่อศึกษาลักษณะและคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอยู่ก่อนที่จะนำไปใช้จริง
- 5) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยชนิดต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
- 6) เพื่อเป็นการศึกษาขั้นต้นหรือเป็นต้นแบบก่อนที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานจริง
- 7) เพื่อพัฒนาแนวคิดและพัฒนาตัวเองของคณะผู้จัดทำ และนำความรู้ที่ได้ไปพัฒนาสังคมและประเทศชาติต่อไป

ขอบเขตของโครงการ

ขอบเขตของโครงการนี้สามารถแสดงเป็นแผนผังการทำงาน (Block Diagram) ได้ดังนี้



รูปที่ 1.1 แผนผังการทำงาน (Block Diagram) ของโครงการ

โครงการนี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วนประกอบอยู่ 2 ส่วนคือ ส่วนของวงจรกำลังและส่วนของวงจรควบคุม ส่วนของวงจรควบคุมจะใช้วงจร ดิจิทัล-อนาล็อกคอนเวอร์เตอร์ ในการปรับศักดาไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในส่วนของการควบคุมจะใช้สัญญาณการควบคุมแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar) ซึ่งลักษณะการควบคุมจะพิจารณาและเปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีป้อนกลับและระบบที่ไม่มีป้อนกลับ พร้อมทั้งการจำลองระบบด้วยส่วนของ Simulink บนโปรแกรม MATLAB

บทที่ 2

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง คือ เครื่องกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล

2.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

โดยโครงสร้างจะมีส่วนประกอบใหญ่ๆ อยู่ 2 ส่วน คือ

2.1.1 ส่วนที่อยู่กับทึ่ (Stator Part) ประกอบด้วย

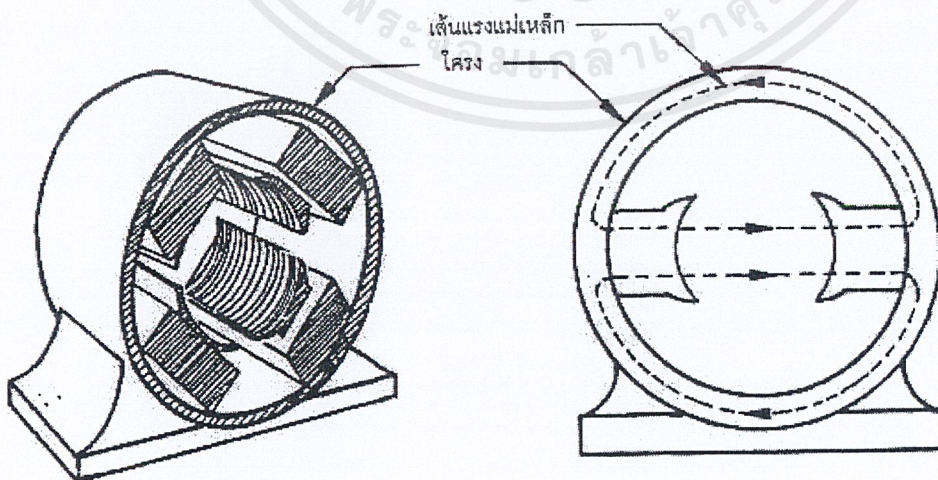
1) เปลือกหรือโครง (Frame or Yoke)

ทำมาจากเหล็กหล่อ หรือสารแม่เหล็ก ทำหน้าที่ คือ

- ยึดขั้วแม่เหล็กและส่วนประกอบทั้งหมด
- เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Circuit)

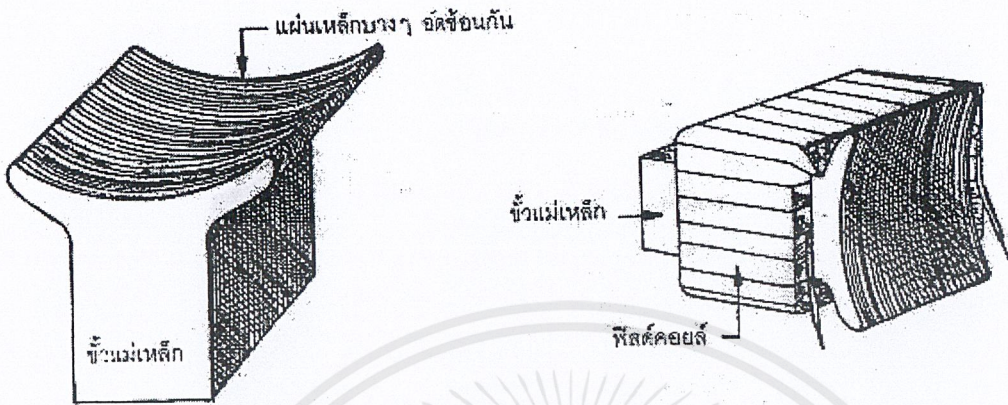
2) ขั้วแม่เหล็ก (Pole Shoes)

ทำมาจากแผ่นเหล็กบางๆ (Laminate Sheet Steel) อัดซ้อนเข้าด้วยกัน โดยแต่ละแผ่นจะเคลือบไว้ด้วยฉนวน ขั้วแม่เหล็กจะยื่นออกมาจากโครงโดยขั้วแม่เหล็กนี้จะถูกยึดเข้ากับโครงด้วยสกรู



รูปที่ 2.1 เปลือกหรือโครง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ขั้วแม่เหล็ก

ขดลวดสนามแม่เหล็ก (Field coil or field winding) หรือเรียกว่าขดลวดฟิลต์คอยล์ เป็นลวดตัวนำที่พันไว้รอบขั้วแม่เหล็ก ขดลวดสนามแม่เหล็กจะพันจากแบบภายนอก แล้วสวมเข้ากับขั้วแม่เหล็ก ซึ่งขั้วแม่เหล็กนั้นสามารถถอดได้ ขดลวดสนามแม่เหล็กนี้จะต้องมีขนาดที่พอดี คือไม่แน่นหรือหลวมจนเกินไป เพราะถ้าแน่นจนเกินไปขณะประกอบอาจทำให้ขดลวดเกิดการรั่วลงดินได้ และในขณะเดียวกันถ้าหลวมจนเกินไปก็อาจทำให้เกิดอาการสั่นของขดลวดขณะใช้งาน และจำทำให้ปิดฝาครอบหัวท้ายไม่ได้อีกด้วย ขดลวดสนามแม่เหล็กทำหน้าที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็ก ขดลวดฟิลต์คอยล์มี 2 ชนิด คือ

- (1) ขดลวดชันทฟิลต์ (shunt field or shunt winding) ขดลวดนี้จะพันด้วยลวดเส้นเล็ก ดังนั้นความต้านทานจะสูง
- (2) ขดลวดซีรีส์ฟิลต์ (series field or series winding) ขดลวดนี้จะพันด้วยลวดเส้นใหญ่ ดังนั้นความต้านทานจะต่ำ

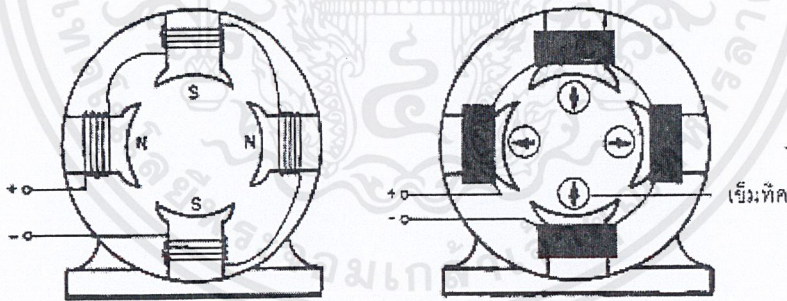
ขดลวดทั้งสองชุดนี้พันอยู่บนแกนขั้วแม่เหล็กอันเดียวกัน โดยขดลวดชันทฟิลต์จะพันอยู่ด้านในสุด ส่วนขดลวดซีรีส์ฟิลต์จะพันไว้ด้านนอกสุดและมีจำนวนรอบเพียงเล็กน้อย จะต้องมีความต้านระหว่างขดลวดชันทฟิลต์กับขดลวดซีรีส์ฟิลต์ด้วยดังแสดงในรูปที่ 3 ขดลวดทั้งสองชุดนี้จะต้องพันไปในทิศทางเดียวกัน และขดลวดในแต่ละชุดนั้นจะต้องต่ออนุกรมเข้าด้วยกันระหว่างขั้วแม่เหล็กให้ถูกต้องด้วย เพราะจะทำให้ขั้วแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือและขั้วใต้สลับกันไป

การตรวจสอบการต่อว่าถูกต้องหรือไม่นั้นเราสามารถตรวจสอบได้ด้วยการใช้เข็มทิศ หรือใช้แท่งแม่เหล็กถาวรตรวจสอบ โดยจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับฟิลต์คอยล์ และใช้เข็มทิศหรือ

แท่งแม่เหล็กถาวรสอดเข้าไปที่ด้านหน้าของขั้วแม่เหล็กแต่ละขั้ว ขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะต้องสลับกันไป เมื่อทำการตรวจสอบขดชั้นดีฟิวด์แล้ว ก็ให้ทำการตรวจสอบขดซีรีส์ฟีลด์ในทำนองเดียวกัน และขั้วแม่เหล็กที่แสดงออกเนื่องจากขดซีรีส์ฟีลด์นั้นจะต้องเหมือนกันกับขั้วแม่เหล็กที่ได้จากขดชั้นฟีลด์



รูปที่ 2.3 ขดลวดสนามแม่เหล็ก

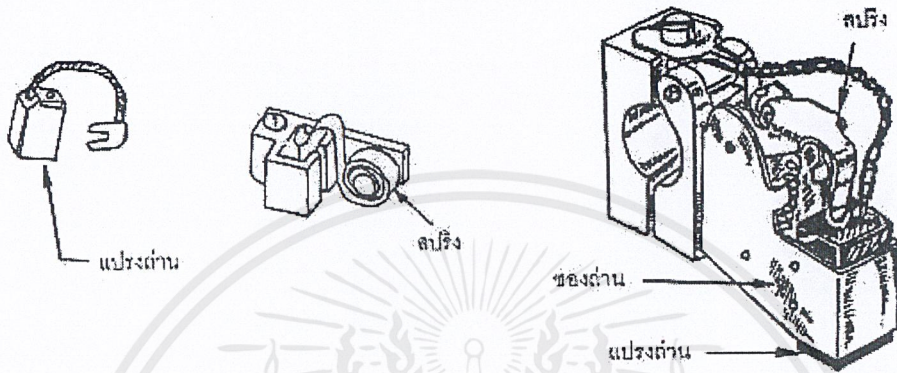


รูปที่ 2.4 การตรวจสอบการต่อขดลวดฟีลด์คอยล์

แปรงถ่านและแบรริง (Brushes and bearing) แปรงถ่านทำหน้าที่เป็นสะพานไฟจากคอมมิเตเตอร์ไปยังวงจรรภายนอก แปรงถ่านทำมาจากคาร์บอนอัดแน่นจะมีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าบรรจุอยู่ในช่องถ่าน โดยที่แปรงถ่านนี้จะมีลวดทองแดงยึดติดอยู่ด้วยเพื่อต่อไฟออกไปใช้งาน และถูกกดด้วยสปริงให้สัมผัสกับคอมมิวเตเตอร์ตลอดเวลา และช่องถ่านจะถูกยึดติดอยู่กับฝาครอบ ส่วนแบรริงหรือลูกปืนนั้นจะเป็นตัวรับน้ำหนักทั้งหมดที่ได้รับจากตัวหมุนและช่วยลดแรงเสียดทานของเพลลาขณะที่ย่ออาร์เมเจอร์หมุนปกติ แบรริงจะยึดติดอยู่ที่ฝาครอบทั้ง 2 ด้าน ของเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำเนิดไฟฟ้า แปร่งถ่านและช่องถ่านแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ในเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรงนี้จะต้องมี แปร่งถ่านอย่างน้อย 2 แปร่ง และแปร่งถ่านทั้งสองต้องสามารถหมุนปรับตำแหน่งได้พร้อมกัน ดังนั้น ช่องถ่านทั้ง 2 จะต้องอยู่บนตัวปรับอันเดียวกันด้วย

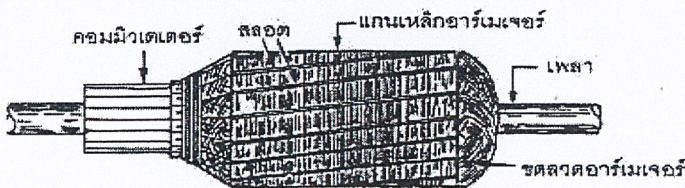
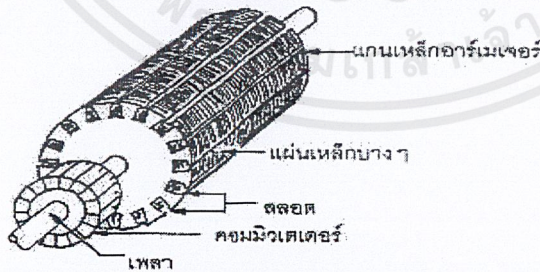


รูป 2.5 แปร่งถ่านและช่องถ่าน

ฝาปิดหัวท้ายหรือฝาครอบ (End plate) ทำมาจากเหล็กหล่อเช่นเดียวกับ โครง ทำหน้าที่รองรับ เพลตของส่วนหมุน และยึดช่องถ่าน

2.1.2 ส่วนที่เคลื่อนที่ (Rotor Part) ประกอบด้วย

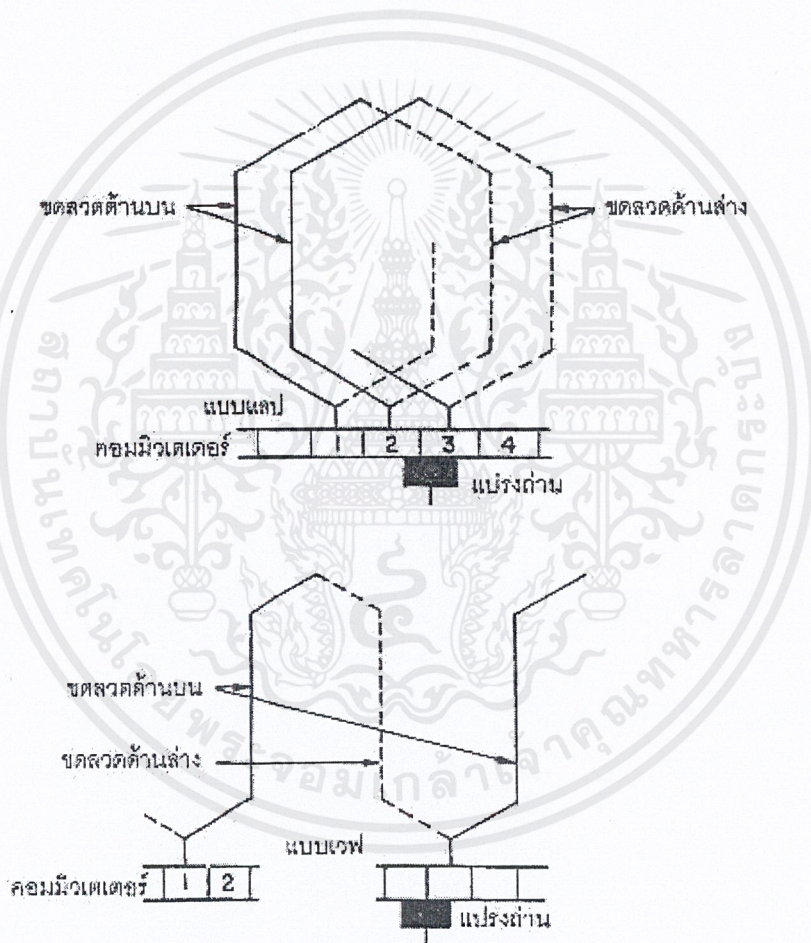
แกนเหล็กอาร์เมเจอร์ (Armature core) ทำมาจากแผ่นเหล็กบางๆ ที่ด้านหนึ่งฉาบด้วยฉนวนอัด ซ้อนเข้าด้วยกันเป็นรูปทรงกระบอกเพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอรีซิส และกระแสไหลวนในแกน เหล็ก แกนเหล็กอาร์เมเจอร์เป็นที่สำหรับบรรจุขดลวดอาร์เมเจอร์ และที่แกนเหล็กอาร์เมเจอร์นี้จะเจาะ รูไว้ด้วย เพื่อช่วยในการระบายความร้อนอันเนื่องมาจากความสูญเสีย



รูปที่ 2.6 แกนเหล็กอาร์เมเจอร์

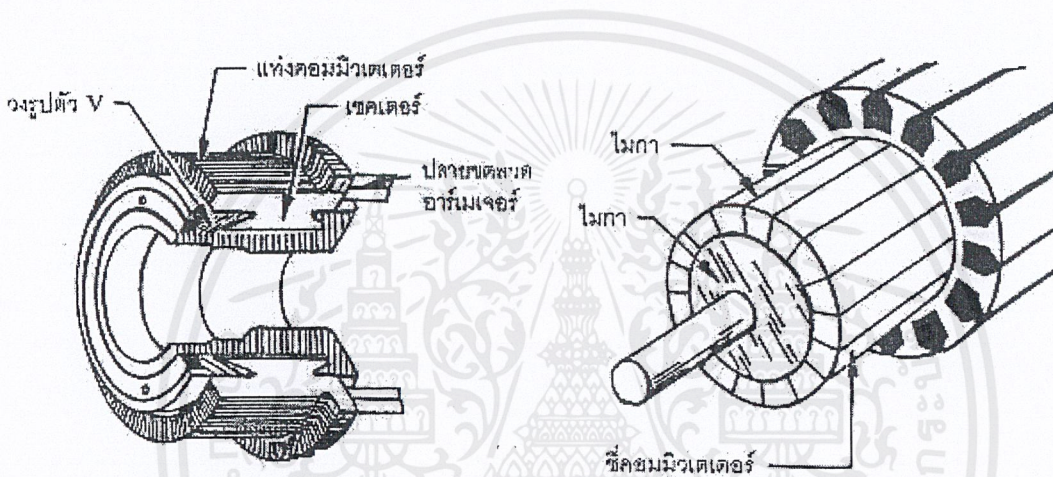
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature coil or Armature winding) คือขดลวดที่บรรจุลงในช่องสลอตของแกนเหล็กอาร์เมเจอร์โดยขดลวดนั้นทำมาจากลวดทองแดงอาบฉนวน ขดลวดอาร์เมเจอร์จะนิยมพันจากแบบภายนอก แล้วจึงนำไปบรรจุลงในสลอต เพราะจะทำให้ขดลวดแต่ละขดมีความยาวและมีน้ำหนักสมดุลไม่เกิดการแกว่งขณะหมุน ขดลวดอาร์เมเจอร์มีการพันเป็นแบบแลป (lap) หรือแบบเวฟ (wave) ปลายของขดลวดจะถูกนำมาต่อเข้ากับคอมมิวเตเตอร์



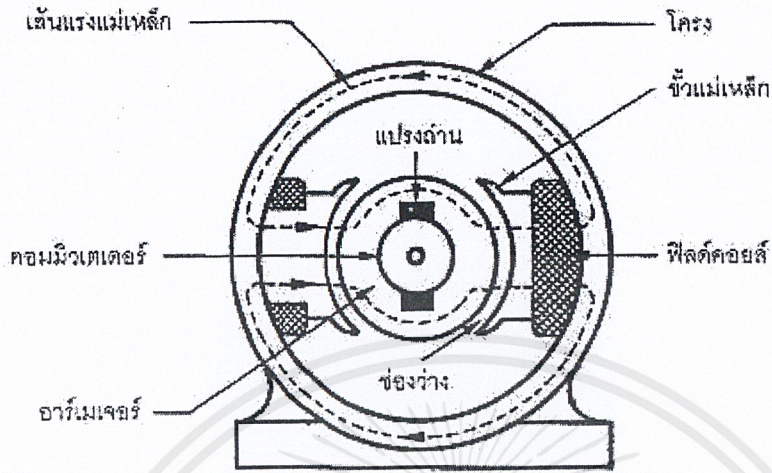
รูปที่ 2.7 ขดลวดอาร์เมเจอร์

คอมมิวเตเตอร์ (Commutator) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดขึ้นในขดลวดอาร์เมเจอร์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง คอมมิวเตเตอร์ทำจากแท่งทองแดงที่มีลักษณะคล้ายลิ้ม เพื่อให้สามารถนำมาประกอบเข้าด้วยกันเป็นรูปทรงกระบอก คอมมิวเตเตอร์แต่ละอันนั้นเรียกว่าซี่ และในระหว่างซี่ทองแดงแต่ละซี่จะคั่นไว้ด้วยฉนวนหนาที่แข็งแรง และคอมมิวเตเตอร์นี้จะยึดติดไว้บนเพลลาอันเดียวกับแกนเหล็กอาร์เมเจอร์

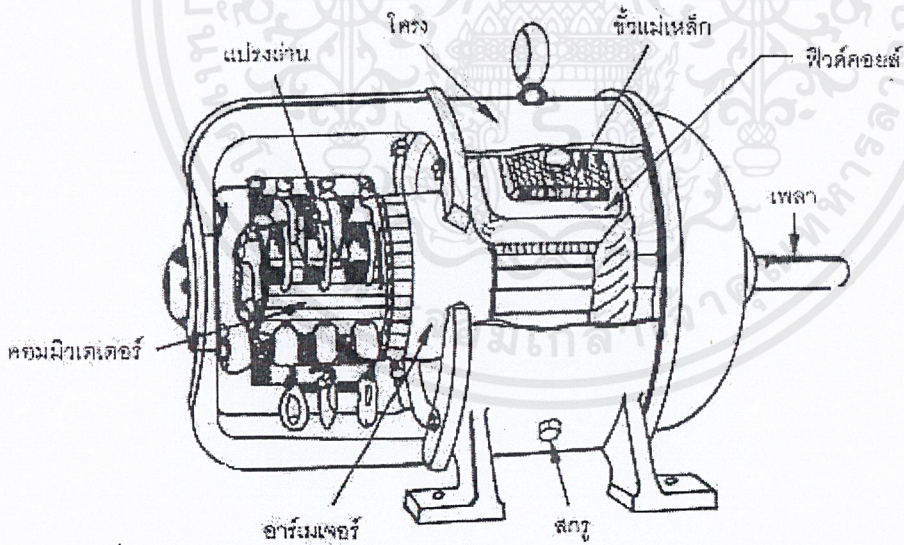


รูปที่ 2. 8 ลักษณะของคอมมิวเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 รูปตัดของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 2.10 ส่วนต่าง ๆ ของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2) สมการหลักของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง

2.2.1) สมการศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วแปรงถ่าน E_a

ศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างแปรงถ่านสามารถหาค่าได้จากสมการหลัก เมื่อแท่งตัวนำความยาว 1 เคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็กอันเกิดจากอิทธิพลของขั้วแม่เหล็กภายในวงจร จะเกิดศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น ความเร็วที่เคลื่อนที่เป็น N รอบต่อนาที และมีรัศมีของตัวอเนเจอร์เท่ากับ r_a เมตร ดังนั้นความเร็วของแท่งตัวนำที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็กจะมีขนาดเท่ากับ

$$U = \frac{N \times 2\pi r_a}{60} \text{ เมตร/วินาที} \quad (2.1)$$

ขนาดของสนามแม่เหล็กภายใต้ขั้วแม่เหล็กจะเป็นค่าของเส้นแรงแม่เหล็ก จะเป็นค่าของเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ หาคด้วยพื้นที่หน้าตัดของขั้วแม่เหล็กนั้น

$$B = \frac{\phi d}{r_a \theta_a} = A \quad (2.2)$$

เมื่อ $r_a \theta$ เป็นความกว้างของขั้วแม่เหล็ก

ความหนาของตัวโรเตอร์จะเท่ากับความยาวของแท่งตัวนำเท่ากับ l_a

ในเครื่องจักรขนาดเท่าๆกัน ค่าของ B โดยประมาณแสดงไว้ในตารางที่ 1 ศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแท่งตัวนำตัวอย่างนี้ ขณะอยู่ใต้อิทธิพลของขั้วแม่เหล็ก จะมีค่าเท่ากับ $\frac{N 2\pi \phi d}{60 \theta}$ โวลต์ ภายใน 1 รอบ มุม θ ที่หมุนไปเป็นมุม 2π และแท่งตัวนำจะตัดผ่านขั้วแม่เหล็กทั้งหมด p ขั้ว ดังนั้นศักดาไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบนแท่งตัวนำเดียวจะมีค่าเท่ากับ

$$e = \frac{\phi d N p}{60} \quad \text{โวลต์} \quad (2.3)$$

เมื่อ ϕd เป็นจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วมีหน่วยเป็น Wb

ดังนั้นศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างแปรงถ่านของเครื่องจักรไฟฟ้า อันหนึ่งอันใดจะมีขนาดเท่ากับ

$$E_a = \frac{\phi d p N Z_a}{60 a} \quad (2.4)$$

เมื่อ Z_a เป็นจำนวนแท่งตัวนำทั้งหมดที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของขั้วแม่เหล็ก
 a เป็นจำนวนวงจรขนานที่เกิดขึ้นในตัวโรเตอร์ระหว่างขั้วแปรงถ่าน
 จากสมการ (1) นี้เมื่อเครื่องไฟฟ้าสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว ตัวแปรที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ก็มีแต่
 เพียงค่าของความเร็ว N และค่าของเส้นแรงแม่เหล็ก ϕd เท่านั้น ดังนั้นสมการ (2.4) สามารถเขียนรวบ
 รัดอย่างง่ายเป็น

$$E_a = KN \phi_d \quad (2.5)$$

เมื่อ K เป็นค่าคงตัวของเครื่องจักรที่สร้างขึ้น

1. สมการความเร็วรอบของตัวมอเตอร์ไฟฟ้า N

เราสามารถจัดรูปของสมการ (2.4) เสียใหม่เราสามารถหาค่าความเร็วรอบในค่าของตัวแปร
 อื่นๆ ได้ดังนี้

$$N = \frac{60 a E_a}{p Z_a \phi_d} \quad (2.6)$$

จากสมการ (2.6) นี้จะเห็นได้ว่าถ้าเราต้องการควบคุมความเร็วของเครื่องจักรที่มีอยู่แล้ว ตัวแปรที่
 สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้คงมีแต่เพียงค่าศักดาไฟฟ้าระหว่างตัวแปรงถ่าน E_a และค่าเส้นแรงแม่เหล็ก
 ϕ_d เท่านั้น
 ดังนั้นสมการ (2.6) สามารถเขียนรวบรัดได้เป็น

$$N = \frac{E_a}{K \phi_d} \quad (2.7)$$

2. สมการแรงบิดของเครื่องจักรไฟฟ้า T

เมื่อแท่งตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอยู่ในสนามแม่เหล็กซึ่งตั้งฉากกันจะมีแรงเกิดขึ้นบนแท่งตัวนำนั้น เท่ากับผลคูณของสนามแม่เหล็ก กระแสไฟฟ้าและความยาวของแท่งตัวนำนั้น ในเครื่องจักรไฟฟ้าก็เช่นเดียวกัน แรงที่กระทำบนแท่งตัวนำตัวใดตัวหนึ่ง อยู่ภายใต้อิทธิพลของขั้วแม่เหล็ก ซึ่งให้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ B แต่ในเครื่องไฟฟ้าความหนาแน่นเส้นแรงไม่แม่เหล็ก B นี้จะมีเฉพาะช่วงตรงเป็นขั้วแม่เหล็กอยู่เท่านั้น ส่วนอื่นจะมีน้อยมาก ดังนั้นเราจึงต้องใช้ค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B_{mean} ภายในเครื่องจักรซึ่งจะหาได้จากอัตราส่วนของความกว้างขั้วแม่เหล็ก $r_a \theta$ และระยะ พิชท์ P อันเป็นระยะความกว้างตามเส้นรอบวงของตัวโรเตอร์ เครื่องจักรจากจุดกึ่งกลางขั้วแม่เหล็กอันหนึ่งถึงจุดกึ่งกลางขั้วแม่เหล็กอันต่อไป คือจากขั้วเหนือไปขั้วใต้ถัดไป ดังนั้น

$$B_{mean} = B \frac{r_a \theta}{P} \quad (2.8)$$

ดังนั้นค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B ในรูปสมการของเส้นแรงแม่เหล็ก B ในรูปสมการของเส้นแรงแม่เหล็กภายในขั้วแม่เหล็กรวมตลอดเส้นรอบวงจะมีค่าเฉลี่ยหาได้จาก

$$B_{mean} = \frac{\phi_d P}{2\pi r_a l_a} \quad (2.9)$$

ให้ I_c เป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในแท่งตัวนำแต่ละตัว ดังนั้นแรงที่เกิดขึ้นบนแท่งตัวนำแต่ละตัวจะมีค่าเท่ากับ

$$F = \frac{\phi_d P I_c l_a}{2\pi r_a l_a} \quad (2.10)$$

$$= \frac{\phi_d P I_c l_a}{2\pi r_a} \quad (2.11)$$

ให้ I_a เป็นกระแสที่ไหลผ่านแปรงถ่าน ดังนั้น I_a จะมีค่าเท่ากับ $a I_c$ และจำนวนตัวนำทั้งหมด Z_a ดังนั้นแรงทั้งหมดที่กระทำบนแปรงถ่านเหล่านั้นเท่ากับ

$$F_{Total} = \frac{Z_a \phi_a p I_a}{2\pi r_a a} \quad (2.12)$$

แรงบิด (Torque) ที่เกิดขึ้นจะเท่ากับแรงที่กระทำรอบ F_{total} คูณกับแขนของแรงดันเป็นรัศมีของตัวโรเตอร์เอง ดังนั้นแรงบิด (Torque) จะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{Z_a \phi_a p I_a}{2\pi a} \quad (2.13)$$

- เมื่อ Z_a เป็นจำนวนแปรงถ่านตัวนำได้อธิพลของสนามแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็ก
 ϕ_a เป็นจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็กจากเครื่องจักร
 p เป็นจำนวนขั้วของเครื่องจักร
 I_a เป็นกระแสที่ไหลระหว่างแปรงถ่าน
 a เป็นจำนวนวงจรมอเตอร์ที่เกิดขึ้นในตัวโรเตอร์ระหว่างขั้วแปรงถ่าน

แรงบิดอันเกิดจากอำนาจแม่เหล็กไฟฟ้านี้ ยังไม่ใช่แรงบิดที่วัดได้จากหัวเพลลา เพราะยังมีการสูญเสีย จากความฝืดและแรงเสียดทานอีกหลายชนิด ซึ่งในการคำนวณจะต้องนำมาลบออกจากสมการ (2.13) ก่อนที่จะได้ค่าแรงบิดที่หัวเพลลาโดยตรง

ในการหาค่าแรงบิดทางไฟฟ้านี้ ถ้าเราตัดค่าการสูญเสียจากความฝืดและแรงเสียดทานออก เราสามารถประมาณหาค่าของแรงบิด ของเครื่องจักรขณะหมุนด้วยความเร็วคงตัวได้โดยอาศัย หลักการคงค่าของพลังงาน โดยคิดกำลังไฟฟ้าที่ขั้วของแปรงถ่าน และกำลังงานกลที่หัวเพลลาที่ขนาดเท่ากัน ดังนั้นเราสามารถคิดค่าแรงบิดได้จากสมการ

$$E_a I_a = T \omega_m \quad (2.14)$$

เมื่อ ω_m เป็นความเร็วเชิงมุมของเครื่องจักรมีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3) ชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบ่งเป็น 4 ชนิด ดังนี้

- 1) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก (Separately Excited DC Motor)
- 2) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน (Shunt DC Motor)
- 3) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม (Series DC Motor)
- 4) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม (Compound DC Motor)

ในโครงการนี้จะนำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก (Separately Excited DC Motor) มาใช้ ดังนั้นจะกล่าวถึงเฉพาะมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกเท่านั้น

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก (Separately Excited DC Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกการควบคุมสัปดาห์ที่ตกค่ออาร์เมเจอร์และขดสนาม (Field) นั้นอิสระต่อกัน ขณะที่การทำงานเป็นมอเตอร์สัปดาห์ที่ขั้ว (V_t) จะมีค่ากว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (E_a) ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าจะจ่ายออกมาจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวดอาร์เมเจอร์ โดยสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$V_t = E_a + I_a R_a$$

- เมื่อ I_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์ (armature current), A
 V_t คือ สัปดาห์ที่ขั้วตกค่ออาร์เมเจอร์ (armature voltage), V
 R_a คือ ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (resistance of the armature Circuit), Ω

2.4) การควบคุมความเร็วรอบ

ความเร็วรอบของมอเตอร์ดีซีสามารถเขียนแสดงได้ดังสมการที่ (2.15)

$$\frac{E}{K\phi} = \frac{V - I_a r_a}{K\phi} \quad (2.15)$$

ดังนั้นในการปรับความเร็วรอบมอเตอร์จึงสามารถทำได้โดยการปรับ V , $I_a r_a$ หรือ ϕ อย่างไม่อย่างหนึ่ง การปรับความเร็วรอบจึงสามารถแบ่งคร่าวๆ ออกได้ 3 ชนิด คือ

1. การปรับวงจรสนาม เป็นวิธีปรับความเร็วรอบโดยการปรับกระแสสนามหรือสนามแม่เหล็ก ϕ
2. การปรับความต้าน เป็นวิธีปรับความเร็วรอบโดยการปรับค่า R ซึ่งต่ออนุกรมอยู่กับอาร์มาเจอร์ เพื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันตกคร่อม $I_a R$
3. การปรับแรงดัน เป็นวิธีปรับความเร็วรอบโดยการปรับแรงดันแหล่งจ่าย V การปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ดีซีแต่ละแบบสามารถอธิบายได้ในหัวข้อต่อไป

2.5) การปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ดีซีแบบกระตุ้นและแบบขัณฑ์

การปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ดีซีแบบกระตุ้นแยกและแบบขัณฑ์ มี 2 วิธีดังนี้

2.5.1) การปรับวงจรสนาม เป็นวิธีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์โดยการปรับฟลักซ์ไอสตัทหรือกระแสกระตุ้นเพื่อให้ ϕ เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้แรงดันแหล่งจ่ายซึ่งป้อนที่ขั้วต้องรักษาให้มีค่าคงที่ที่ค่าแรงดันพิกัดเสมอ ฟลักซ์ไอสตัทจะต่ออนุกรมกับชุดขดลวดสนาม โครงสร้างของฟลักซ์ไอสตัทจะเหมือนกับในกรณีของเครื่องกำเนิดแบบขัณฑ์ทุกประการ

2.5.2) การปรับความต้านทาน เป็นวิธีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์โดยการปรับค่าความต้านซึ่งต่ออนุกรมอยู่ในวงจรอาร์มาเจอร์เพื่อให้แรงดันตกคร่อมมีค่ามากหรือน้อยเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน V_b ระหว่างแปรงถ่าน

เนื่องจากแรงดันแหล่งจ่ายที่ป้อนให้มอเตอร์มีค่าคงที่ตลอด ϕ ในสมการจึงมีค่าคงที่เสมอ ดังนั้น

$$n \propto V - I_a (R + r_a)$$

2.6 การเบรกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ในการเบรกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ ได้แก่

2.6.1 ปลั๊กกิง (Plugging) เป็นการเบรกมอเตอร์โดยการพยายามหมุนมอเตอร์กลับทางอย่างทันทีทันใด พลังงานจลน์ในมอเตอร์จะกลายเป็นความร้อนไปในตัวของมอเตอร์เอง แล้วกระจายสูญหายไป ในดีซีมอเตอร์เราจะทำด้วยการกลับทิศของกระแสฟีดล์ หรือกลับทิศทางของแรงดันที่ป้อนเข้าอาร์เมเจอร์อย่างทันทีทันใด ซึ่งทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าได้กลับ (back emf) ของมอเตอร์กลับทิศและจะช่วยให้กระแสที่ไหลผ่านมอเตอร์ มีขนาดมากกว่ากระแสที่ไหลอยู่เดิมทำให้มีแรงหมุนที่กลับทิศสวนทางกับทิศการหมุนเดิมและจะมีความร้อนเกิดขึ้นและสูญหายไป ในมอเตอร์ ทำให้มอเตอร์หยุดหมุนอย่างรวดเร็ว

ข้อดีของการเบรกแบบปลั๊กกิงทำให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนี้อย่างรวดเร็ว แต่มีข้อเสียคือเกิดความร้อนที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อมีการกลับทิศทางหมุน ดังนั้นถ้าความร้อนเกิดขึ้นมากจะส่งผลต่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจนเกิดความเสียหายได้

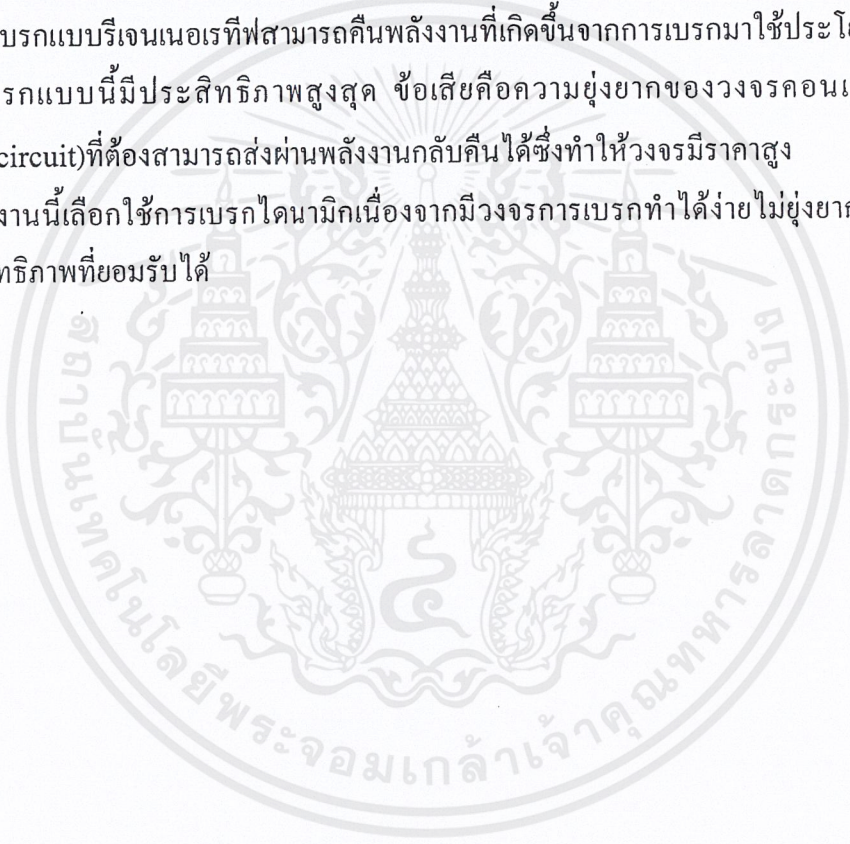
2.6.2 ไดนามิกเบรกกิง (Dynamic Breaking) เป็นวิธีการเบรกมอเตอร์ด้วยการทำให้พลังงานจลน์ในมอเตอร์กลายเป็นความร้อนที่ตัวของมอเตอร์เอง หรือในตัวความต้านทานภายนอกแล้วกระจายหายไป ซึ่งมีความแตกต่างจากวิธีปลั๊กกิงตรงที่ ทำการเบรกมอเตอร์โดยการทำให้มอเตอร์เปลี่ยนหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วให้กระแสที่เกิดขึ้นไหลผ่านเข้าไปในตัวต้านทานภายนอกแล้ววนกลับครบวงจรผ่านขดลวดของมอเตอร์ ก็จะทำให้มีความร้อนเกิดขึ้นแล้วกระจายหายไปและพร้อมกันนั้นจะมีแรงหมุน หมุนกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์

ข้อดีการเบรกแบบไดนามิกคือการนำพลังงานที่เกิดขึ้นจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่กลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงชั่วขณะหนึ่งนั้นมาถ่ายเทให้ตัวต้านทานภายนอก เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดความร้อนภายในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ข้อเสียคือแรงบิดที่เกิดขึ้นของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงลดลงเนื่องจากผลของกลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

2.6.3 รีเจนเนอเรทีฟเบรกกิง (Regenerative Breaking) เป็นวิธีการเบรกมอเตอร์โดยอาศัยหลักการป้อนกลับค่าบวก คือ ทำให้พลังงานจลน์ของมอเตอร์ที่กำลังวิ่งอยู่ให้เปลี่ยนหน้าทีเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ด้วยการเพิ่มฟิลต์ให้มีค่าสูงขึ้นซึ่งจะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ ก็จะเป็นเหตุให้มอเตอร์ซึ่งขณะนี้ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าส่งกระแสไฟฟ้าจากมอเตอร์กลับเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้า ซึ่งเท่ากับเป็นการคืนพลังงานจลน์ที่มอเตอร์ให้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแล้วมอเตอร์ก็จะหมุนช้าลงหรือหยุดหมุน

ข้อดีการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟสามารถคืนพลังงานที่เกิดขึ้นจากการเบรกมาใช้ประโยชน์ได้ ทำให้การเบรกแบบนี้มีประสิทธิภาพสูงสุด ข้อเสียคือความยุ่งยากของวงจรคอนเวอร์เตอร์(converter circuit)ที่ต้องสามารถส่งผ่านพลังงานกลับคืนได้ซึ่งทำให้วงจรมีราคาสูง

ในโครงการนี้เลือกใช้การเบรกไดนามิกเนื่องจากมีวงจรการเบรกทำได้ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อนและมีประสิทธิภาพที่ยอมรับได้



บทที่ 3

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4 ควอดแดรนต์

3.1 ลักษณะการทำงานของมอเตอร์แบบ 4 ควอดแดรนต์

3.1.1 ควอดแดรนต์ที่ 1 การหมุนในทิศทางฟอร์เวิร์ด(Forward Motoring)

ทำการควบคุมทิศทางของแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า(V_a) กระแสไฟฟ้าในขดลวดอาเมเจอร์(I_a) มีค่าเป็นบวก ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ(E_a) แรงบิด(T) ของมอเตอร์มีค่าในทิศทางบวก

3.1.2 ควอดแดรนต์ที่ 2 การเบรกในทิศทางฟอร์เวิร์ด(Forward Breaking)

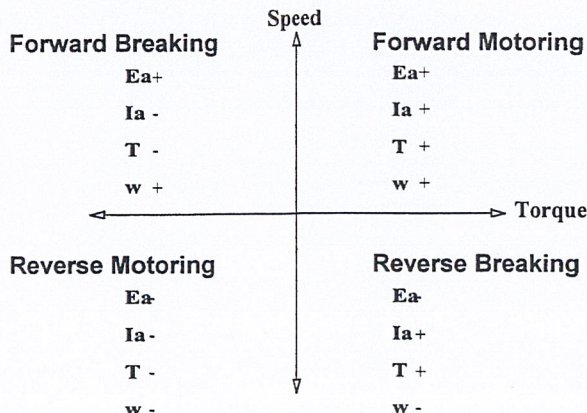
ทำการควบคุมให้กระแสไฟฟ้าในขดลวดอาเมเจอร์(I_a) ไหลกลับทิศทาง ส่วนแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ(E_a) มีทิศทางเป็นบวกเหมือนเดิมแต่จะมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า(V_a) ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดแรงบิดเหนี่ยวนำ(T) เป็นลบและต้านทานแรงบิดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่เป็นบวก ทำให้เกิดการหมุนในทิศตรงข้ามหรือเบรกขึ้น ซึ่งในสภาวะนี้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่งพลังงานกลับคืนไปยังแหล่งจ่าย

3.1.3 ควอดแดรนต์ที่ 3 การหมุนในทิศทางรีเวิร์ส(Reverse Motoring)

ทำการควบคุมกระแสในขดลวดอาเมเจอร์ให้ไหลในทิศลบเหมือนเดิม และทำการกลับทิศแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า(V_a) ให้มีทิศเป็นลบ ซึ่งเป็นทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (E_a) แรงบิด(T)มีทิศเป็นลบ เป็นผลทำให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกลับทิศการหมุน

3.1.4 ควอดแดรนต์ที่ 4 การเบรกในทิศทางรีเวิร์ส(Reverse Breaking)

ทำการควบคุมให้กระแสไฟฟ้าในขดลวดอาเมเจอร์(I_a) ไหลกลับทิศทางเป็นในทิศทางบวกเพื่อสร้างแรงบิดในทิศทางบวกต้านกับแรงบิด แต่แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ(E_a)ยังมีทิศทางเป็นลบเหมือนเดิมทำให้มอเตอร์เกิดการเบรกขึ้นและเช่นเดียวกับควอดแดรนต์ที่2สภาวะนี้มอเตอร์จะเปลี่ยนหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่งพลังงานกลับคืนไปยังแหล่งจ่าย



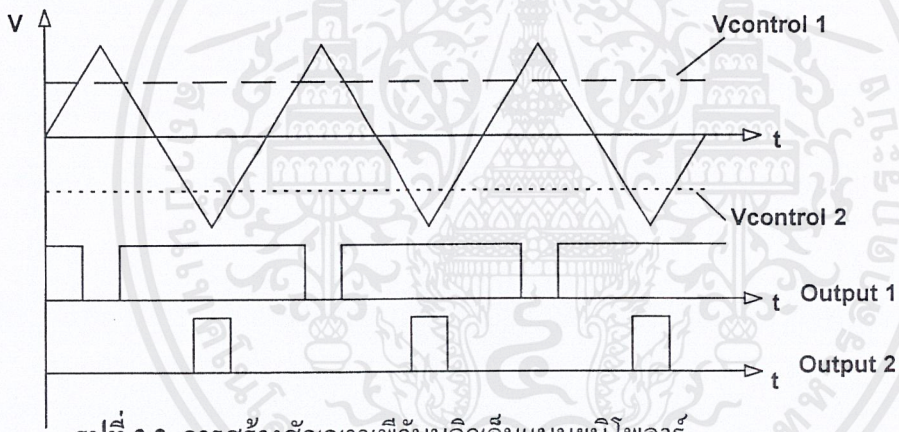
เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 3.1 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4 ควอดแดรนต์ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การควบคุมการสวิตช์ซึ่งโดยใช้สัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบยูนิโพลาร์

(PWM Unipolar Switching Controlled)

การควบคุมการทำงานของมอเตอร์ จะทำการควบคุมแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์โดยใช้ อุปกรณ์สวิตช์ซึ่ง ซึ่งสัญญาณที่ป้อนให้กับอุปกรณ์นั้นจะใช้สัญญาณพีดับบลิวเอ็ม(PWM) ซึ่งมีอยู่ 2 แบบก็คือ แบบไบโพลาร์(Bipolar)และ แบบยูนิโพลาร์(Unipolar) ซึ่งในโครงการนี้จะใช้การสวิตช์ซึ่งแบบยูนิโพลาร์เพราะมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับแบบไบโพลาร์ คือ ทำให้กระแสที่เอาท์พุตมีความต่อเนื่องและมีค่ารีปเปิลของกระแสย่อย ค่าแรงดันเอาท์พุตที่ตกคร่อมมอเตอร์ไม่มีการสูญเสียทางด้านซีกลบเหมือนแบบไบโพลาร์ และมีความถี่ในการสวิตช์ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่า

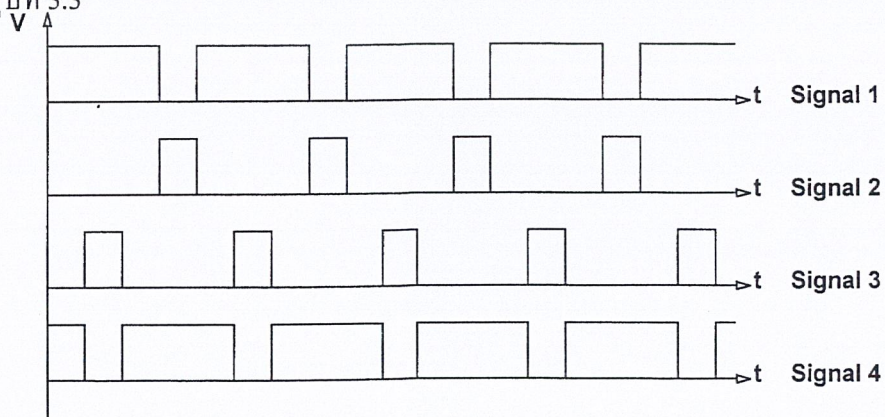
หลักการของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบยูนิโพลาร์ก็คือ ทำการสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม (Saw tooth Signal) ขึ้นมาแล้วนำไปทำการมอดูเลต(Modulation) กับสัญญาณควบคุม (Control Signal) 2 สัญญาณ และทำให้ได้เอาท์พุตออกมา 2 สัญญาณ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบยูนิโพลาร์

จากสัญญาณเอาท์พุตที่ได้ 2 ชุดก็นำสัญญาณไปทำการกลับเฟสทำให้ได้สัญญาณออกมาเป็น 4

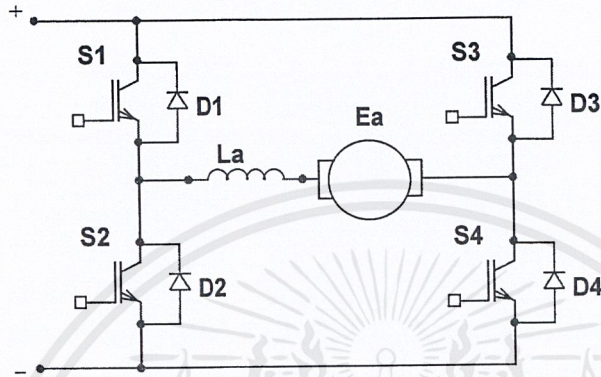
ชุด ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 สัญญาณเอาท์พุต 4 ชุดที่จะนำไปขับอุปกรณ์สวิตช์ซึ่ง

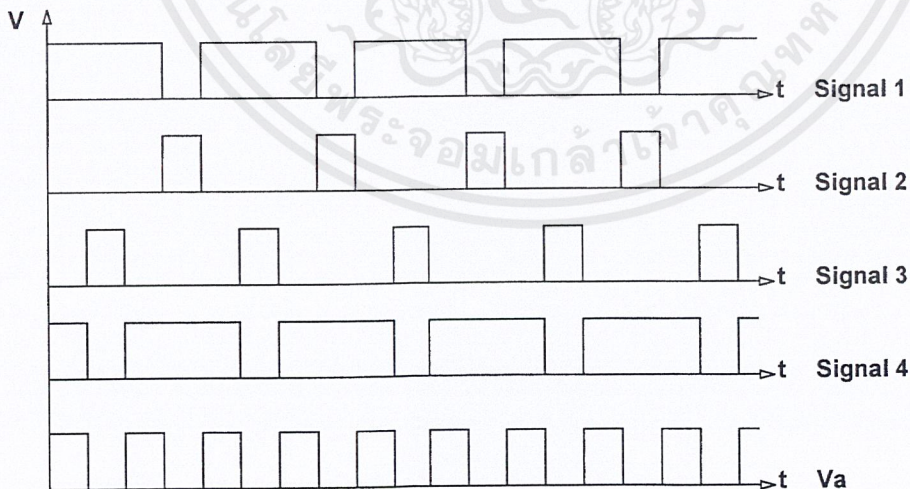
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสัญญาณทั้ง 4 ชุดไปขับอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง ในโครงงานนี้ใช้ไอจีบีที (IGBT) โดยต่อกันเป็นลักษณะฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Full Bridge Converter) ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งลักษณะในการทำงานแบบ 4-ควอดแรนต์ จะสามารถอธิบายได้ดังนี้



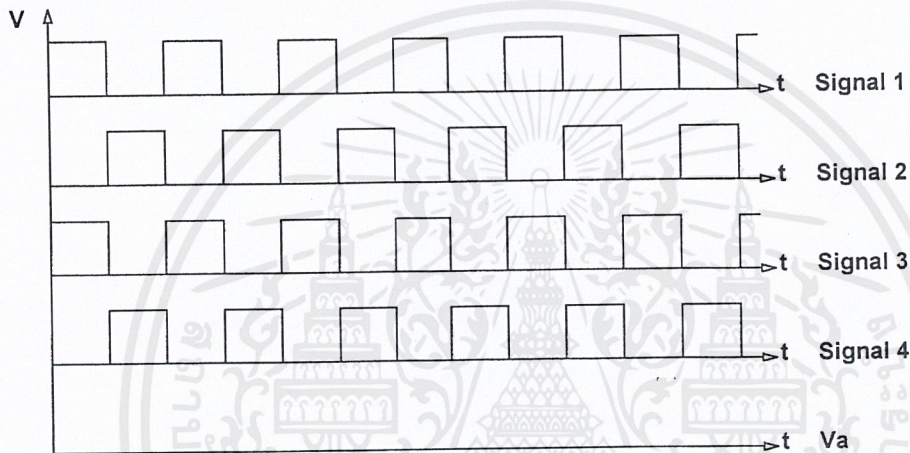
รูปที่ 3.4 ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Full Bridge Converter)

ควอดแรนต์ที่ 1 : เมื่อป้อนสัญญาณ PWM ทั้ง 4 ชุดให้กับสวิตซ์ทั้ง 4 ตัวตามลำดับ เมื่อต้องการควบคุมให้มอเตอร์หมุนในทิศทางฟอร์เวิร์ด จะทำการปรับค่า Duty cycle ของสัญญาณชุดที่ 1 ให้มีค่ามากกว่าสัญญาณชุดที่ 3 ก็จะเป็นผลให้สัญญาณชุดที่ 4 มีค่ามากกว่าสัญญาณชุดที่ 2 ทำให้แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมมอเตอร์มีค่าเป็นบวก ซึ่งกระแสอาร์เมเจอร์ (I_a) , ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (E_a) เกิดขึ้นในทิศทางบวก ส่งผลให้แรงบิดมีค่าเป็นบวก



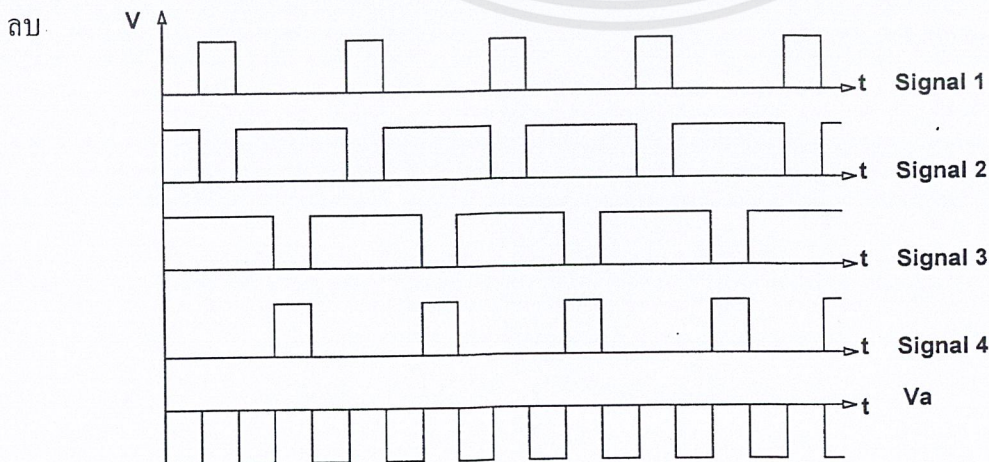
รูปที่ 3.5 สัญญาณเอาต์พุต 4 ชุดและสัญญาณแรงดันตกคร่อมมอเตอร์ ในรูปแบบการหมุนในทิศฟอร์เวิร์ด

ควอดแรนที่ 2 : เมื่อต้องการควบคุมให้มอเตอร์หมุนในทิศทางฟอร์เวิร์ดเบรก จะทำการปรับค่า Duty cycle ของสัญญาณชุดที่ 1 ให้มีเท่ากับสัญญาณชุดที่ 3 (Duty cycle 50%) ก็จะเป็นผลให้สัญญาณชุดที่ 4 ให้มีเท่ากับสัญญาณชุดที่ 2 ทำให้แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมมอเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ แต่ในสภาวะนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ(E_b) ยังคงมีค่าเป็นบวกและมีค่าสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย ทำให้มอเตอร์เปลี่ยนหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จ่ายพลังงานออกไป โดยทิศทางของกระแสจะกลับทิศเป็นลบ จ่ายผ่านไดโอด D1 และครบวงจรผ่านไดโอด D4 ส่งผลให้เกิดแรงบิดมีค่าเป็นลบต้านกับแรงบิดเดิม ทำให้เกิดการเบรก



รูปที่ 3.6 สัญญาณเอาต์พุต 4 ชุดและสัญญาณแรงดันตกคร่อมมอเตอร์ในการเบรกฟอร์เวิร์ด

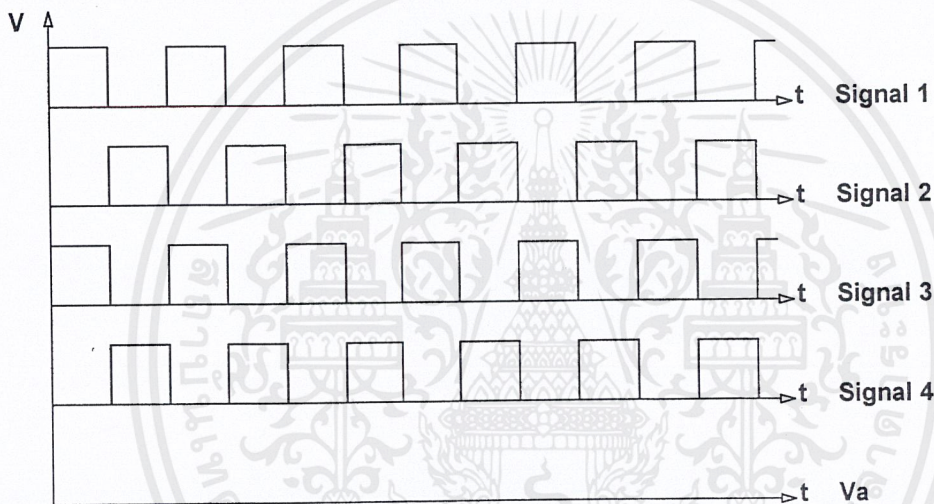
ควอดแรนที่ 3 : เมื่อต้องการควบคุมให้มอเตอร์หมุนในทิศทางรีเวิร์ส จะทำการปรับค่า Duty cycle ของสัญญาณชุดที่ 1 ให้มีค่าน้อยกว่าสัญญาณชุดที่ 3 ก็จะเป็นผลให้สัญญาณชุดที่ 4 มีค่าน้อยกว่าสัญญาณชุดที่ 2 ทำให้แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมมอเตอร์มีค่าเป็นลบ กระแสอาร์เมเจอร์(I_a)จะไหลในทิศทางลบ , ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ(E_b) ก็มีค่าเป็นลบเช่นกัน ส่งผลให้เกิดแรงบิดมีค่าเป็นลบ



รูปที่ 3.7 สัญญาณเอาต์พุต 4 ชุดและสัญญาณแรงดันตกคร่อมมอเตอร์ในการหมุนแบบรีเวิร์ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควอดแตรนที่ที่ 4 : เมื่อต้องการควบคุมให้มอเตอร์หมุนในทิศทางรีเวิร์สเบรก เช่นเดียวกับควอดแตรนที่ที่ 2 คือ ทำการปรับค่า Duty cycle ของสัญญาณชุดที่ 1 ให้มีเท่ากับสัญญาณชุดที่ 3 (Duty cycle 50%) ก็จะเป็นผลให้สัญญาณชุดที่ 4 ให้มีเท่ากับสัญญาณชุดที่ 2 ทำให้แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมมอเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ แต่ในสถานะนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ(E_b) ยังคงมีค่าเป็นลบและมีค่าสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย ทำให้มอเตอร์เปลี่ยนหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จ่ายพลังงานออกไป โดยทิศทางของกระแสจะกลับทิศเป็นลบ จ่ายผ่านไดโอด D3 และครบวงจรผ่านไดโอด D2 ส่งผลให้เกิดแรงบิดมีค่าเป็นบวกต้านกับแรงบิดเดิม ทำให้เกิดการเบรก



รูปที่ 3.8 สัญญาณเอาต์พุต 4 ชุดและสัญญาณแรงดันตกคร่อมมอเตอร์ในการเบรกรีเวิร์ส

บทที่ 4 เทคโนโลยีไอจีบีที

(Insulate Gate Bipolar Trasistor: IGBT)

4.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับไอจีบีที

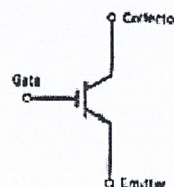
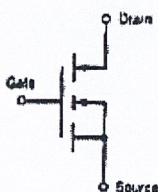
อุปกรณ์เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์คอนโทรล ได้แก่ เอสซีอาร์ (SCR), ไตรแอก (TRIAC), ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (BJT) และ มอสเฟต (MOSFET) โดยเฉพาะไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์และมอสเฟต ที่จะเป็นจุดพัฒนาการของอุปกรณ์ทั้งสองชนิดก็มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป กล่าวคือ

ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์จะอยู่ในสถานะนำกระแสจะมีอัตราการสูญเสียกำลังงานต่ำ มีอัตราแรงดันและขยายกระแสได้สูง แต่ความเร็วในการสวิตช์ทำงานยังต่ำอยู่ โดยเฉพาะช่วงหยุดนำกระแส จะมีช่วงเวลาที่ยาวกว่า ซึ่งจะเป็นคุณสมบัติที่ตรงกันข้ามกับมอสเฟต ที่มีความเร็วในการสวิตช์ทำงานนำกระแส และหยุดนำกระแสได้เร็วกว่ามาก แต่ก็มีอัตราการสูญเสียกำลังงานสูงมากเช่นกัน

จากเหตุผลที่กล่าวมาของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์และมอสเฟตจึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ประเภทนี้จนสามารถได้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพาเวอร์คอนโทรลชนิดใหม่ขึ้นมา โดยคุณสมบัติต่างๆ จะรวมเอาข้อได้เปรียบของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์และมอสเฟตเข้ามารวมไว้ในอุปกรณ์ชนิดใหม่นี้ โดยมีการตั้งชื่อว่า ไอจีบีที (Insulate Gate Bioplar Transistor: IGBT)

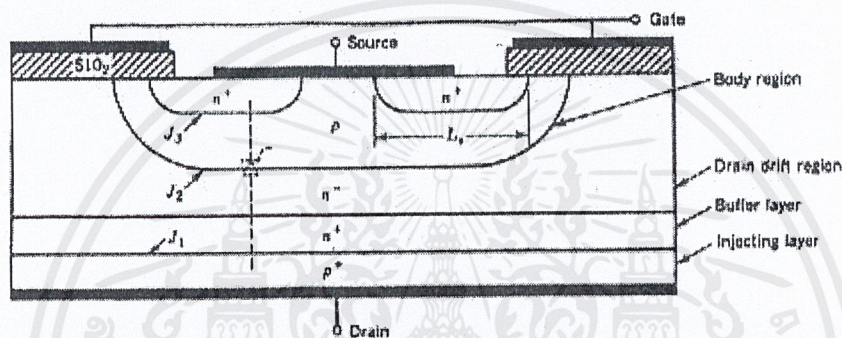
4.2 สัญลักษณ์และโครงสร้างของไอจีบีที

ไอจีบีทีก่อนข้างจะเป็นอุปกรณ์ชนิดใหม่ สัญลักษณ์แทนชนิดและตัวไอจีบีที มี 2 ชนิดคือ แบบเอ็นแชนเนล (N-Channal IGBT Type) และแบบพีแชนเนล (P-Channal IGBT Type) นอกจากนี้สามารถเขียนอยู่ในลักษณะของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์และมอสเฟตได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เป็นลักษณะไอจีบีทีชนิดเอ็นแชนเนลที่นิยมใช้กันมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ารูปที่ 4.1 สัญลักษณ์ไอจีบีทีในลักษณะของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์และมอสเฟตตามลำดับ

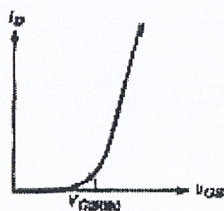
จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่ามีลักษณะคล้ายกับสัญลักษณ์ของมอสเฟตมาก เพียงแต่ว่าสัญลักษณ์ของไอจีบีทีนั้นจะมีลูกศรเพิ่มขึ้นมาตรงขาเดรน ลักษณะของลูกศรจะชี้เข้าหาตัวหรือชี้เข้าหาชั้นของซิลิคอนภายในตัวไอจีบีทีใช้สัญลักษณ์ในรูป (ก) นี้ ส่วนสัญลักษณ์ในรูป (ข) จะเหมือนกับสัญลักษณ์ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ แต่ตรงขาเกต(หรือเบสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์) จะเพิ่มขีดขึ้นมาอีกหนึ่งขีด เพื่อชี้ให้เห็นว่าขีดที่เพิ่มมานี้ไม่ได้ต่อกันโดยตรงกับขาที่ต่อออกมาภายนอก



รูปที่ 4.2 โครงสร้างของไอจีบีทีชนิดเอ็นแซนเนลเป็นภาพตัดขวาง

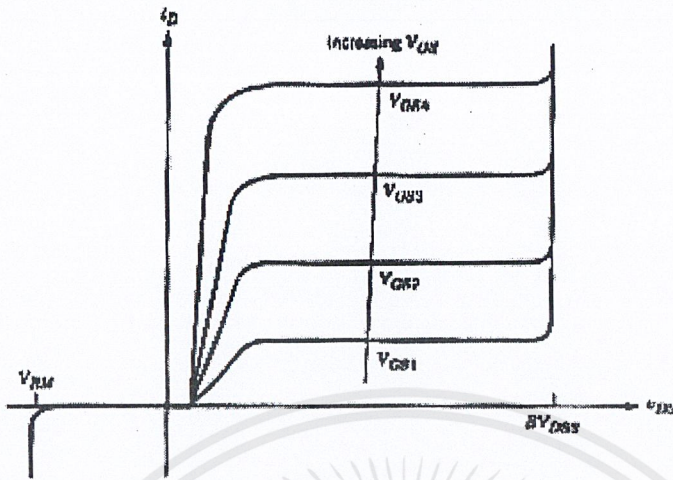
โครงสร้างของไอจีบีทีชนิดเอ็นแซนเนลแสดงเป็นภาพตัดขวางได้ดังรูปที่ โครงสร้างโดยรวมส่วนใหญ่มีลักษณะคล้ายกันกับโครงสร้างของมอสเฟตมาก จะแตกต่างกันตรงที่ไอจีบีที จะมีชั้น P⁺ หรือชั้นอินเจกติ้ง (injecting) ต่ออยู่ระหว่างขาเดรน ซึ่งในมอสเฟตนั้นไม่มีจากการที่ขาเกตถูกกั้นด้วยชั้นของซิลิคอนออกไซด์ (SiO₂) เป็นผลทำให้ความต้านทานอินพุตที่ขาเกตมีค่าสูงมากเหมือนกับเพาเวอร์มอสเฟต โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วง 10⁹ โอห์ม

จากผลดังกล่าว ทำให้ลักษณะของกราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของไอจีบีทีมีลักษณะคล้ายกับกราฟของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ แต่การควบคุมกระแสเดรนจะอาศัยการควบคุมแรงดันระหว่างขาเกตกับขาซอร์สมากกว่า การควบคุมกระแสที่ขานี้เหมือนกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ซึ่งกราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของไอจีบีที



รูปที่ 4.3 กราฟลักษณะคุณสมบัติการถ่ายโอนของไอจีบีที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟลักษณะคุณสมบัติระหว่างกระแสและแรงดันของ ไอจีบีที

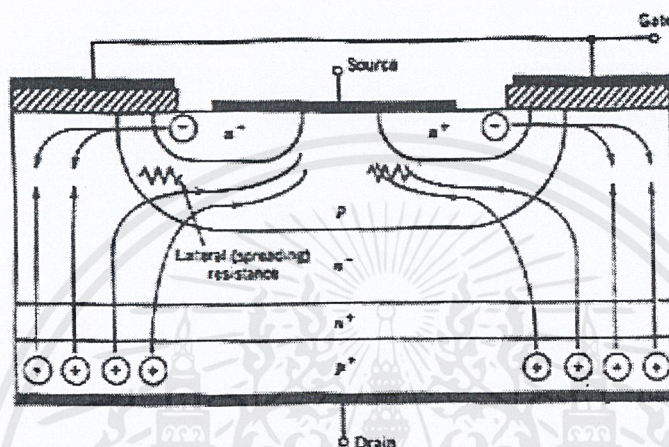
รูปกราฟแสดงให้เห็นว่าส่วนใหญ่ของเส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงแต่จะเริ่มโค้งที่กระแสเดรนมีค่าต่ำๆ นั่นก็คือจุดที่แรงดันระหว่างขาเกตและขาซอร์สต่ำลงใกล้แรงดันจุดเริ่มเปลี่ยนสถานะการทำงาน (จุด Threshold voltage : $V_{GS(th)}$) โดยถ้าแรงดันระหว่างเกตและซอร์สนี้ต่ำกว่าแรงดันที่จุด $V_{GS(th)}$ แล้วไอจีบีทีจะอยู่ในสถานะหยุดนำกระแสหรือคัตออฟ ในกรณีของไอจีบีทีชนิดพีเซนเนลนั้น คุณสมบัติจะคล้ายกับเอ็นเซนเนล แต่โครงสร้างและสัญลักษณ์จะมีลักษณะตรงกันข้ามกับเอ็นเซนเนล เช่น ชนิดของสารที่ได้ไปจากเอ็นเซนเนลก็จะเปลี่ยนเป็นตรงกันข้าม, สัญลักษณ์ลูกศรก็จะกลับเอาหัวลูกศรกลับไปในทางตรงกันข้าม

4.3 สถานะนำกระแส

เมื่อขาเดรนได้รับแรงดันไบแอสตรง คือ เป็นบวกเมื่อเทียบกับซอร์ส และแรงดันระหว่างเกตกับซอร์สมีค่าเกิน $V_{GS(th)}$ ประจุไฟฟ้าบวกที่เกิดจากแรงดันที่ขาเกตจะดึงเอาอิเล็กตรอนให้มารวมกันอยู่ในบริเวณแกนใต้เกต ทำให้ชั้นบอดี้ (body layer) ตรงส่วนใต้เกตแปรสภาพเป็น n ทำให้เกิดการต่อกันของบริเวณ n^- (drift region) เข้ากับบริเวณซอร์ส n^+ (source region) ซึ่งลักษณะเช่นนี้เหมือนกับการทำงานของ มอสเฟต

กระแสอิเล็กตรอนที่ไหลจากขาซอร์สผ่านบริเวณใต้เกตมายังบริเวณลอยเลื่อน n^- จะรวมกับโฮลที่เป็นพาหะข้างน้อยที่ถูกฉีดมาจากชั้นอินเจกต์ดิง p^+ (ดูรูปโครงสร้างในรูปที่ 2) เพราะรอยต่อ J1 ได้รับแรงดันไบแอสตรง ทำให้ IGBT อยู่ในสถานะนำกระแส เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าจากเดรนไปซอร์สได้ การรวมกันของโฮลและอิเล็กตรอนภายในบริเวณ n^- เรียกว่า การมอดูเลตสภาพนำ (conductivity modulation)

ผลของการมอดูเลตนี้จะทำให้ความต้านทานของบริเวณ n^- มีค่าต่ำลง เป็นการเพิ่มความ สามารถในการขับผ่านกระแสได้สูงขึ้น ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกับทรานซิสเตอร์กำลัง ผลของความ ต้านทานที่ลดลง ทำให้แรงดันตกคร่อมที่สภาวะนำกระแสลดต่ำลง การสูญเสียกำลังงานขณะนำ กระแสจึงลดลงด้วย ทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลแสดงไว้ในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลในขณะนำกระแส

4.4 สภาวะหยุดนำกระแส

เมื่อแรงดันระหว่างเกตและซอร์สลดลงต่ำกว่าแรงดัน $V_{GS(th)}$ จะทำให้มีแรงดันไม่เพียงพอ สำหรับการแปรสภาพชั้นบอดี้ p เป็น n ได้ ทำให้บริเวณ n^- ไม่ต่อกับบริเวณซอร์ส n^+ ไอจีบีทีในสภาวะ นี้รอยต่อ J_2 ที่ได้รับแรงดัน โปแอสดกลับจะทำให้เกิดกระแสรั่วไหลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้ยังทำ ให้เกิดบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) ขึ้นที่รอยต่อ J_2 ด้วย

บริเวณปลอดพาหะนี้จะขยายบริเวณกว้างขึ้นจนกินเข้ามายังบริเวณ n^- มากกว่าที่จะขยายไปยัง บริเวณชั้นบอดี้ p ทั้งนี้เพราะชั้นบอดี้ p มีความหนาแน่นในการโด๊ปสารมากกว่า ถ้าความหนาแน่นของ สารที่โด๊ปในบริเวณลอยเลื่อน n^- มากเพียงพอ ก็จะทำให้การขยายขอบบริเวณปลอดพาหะไม่สามารถ แตะกับชั้นอินเจกต์ติ้ง p^+ ได้ ชั้นบัฟเฟอร์ n^+ (buffer layer) (ดังรูปที่ 4.2) ก็ไม่จำเป็นต้องทำให้เกิดขึ้น หรือไม่จำเป็นต้องโด๊ปสาร

ทั้งนี้เพราะการแตะกันของบริเวณทั้งสองจะทำให้เกิดการพังทลายทางด้านโอบแอสดตรง สำหรับ ไอจีบีทีที่ไม่มีการโด๊ปสารในชั้นบัฟเฟอร์ n^+ นี้ จะเรียกว่าไอจีบีทีแบบสมมาตร ซึ่งจะมีอัตราทนแรงดัน ย้อนกลับ (V_{RM} หรือ BV_{SDS}) สูงพอๆ กับค่าอัตราทนแรงดันไหลตรง (BV_{SDS}) เหมาะสำหรับการนำไป ประยุกต์ใช้ในวงจรไฟฟ้ากระแสกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลดความหนาบริเวณ n^+ ลงแต่ยังคงความสามารถของอัตราทนต์แรงดันไหลตรงไว้ สามารถทำได้โดยเพิ่มชั้นบัฟเฟอร์ n^+ เข้าไป เพื่อป้องกันการแตกร้าวของบริเวณปลอดพาหะกับบริเวณอินเจ็กต์ p^+ ซึ่งจะเรียก ชนิดนี้ว่า ไอจีบีทีแบบไม่สมมาตร และจากการลดความหนาของบริเวณลอยเลื่อน n^+ ลง จะช่วยส่งผลให้เกิดข้อดีสองประการ คือ

- ทำให้แรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำลง เป็นผลให้การสูญเสียกำลังงานลดน้อยลงด้วย

- ช่วยลดช่วงเวลาหยุดนำกระแสให้สั้นลงได้

แต่ข้อเสียของการเพิ่มชั้นบัฟเฟอร์ n^+ ก็มี คือจะลดความสามารถของอัตราทนต์แรงดันย้อนกลับให้น้อยลงเหลือเพียงไม่กี่สิบโวลต์ ทั้งนี้เพราะเมื่อ ไอจีบีทีได้รับแรงดันไบแอสกลับที่ขาแตรน รอยต่อ J_1 ซึ่งทั้งสองข้างมีความหนาแน่นในการโด๊ปของสารมาก จะไม่สามารถทนแรงดันย้อนกลับได้สูง ดังนั้น ไอจีบีทีชนิดนี้จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

4.5 การแลตซ์ในไอจีบีที

นอกจากโหนดส่วนใหญ่ที่รวมกับอิเล็กตรอนภายในบริเวณ n^+ แล้ว ยังมีกระแสไหลบางส่วนที่ไหลข้ามบริเวณ n^+ เข้าสู่บริเวณชั้นบอดี้ p โดยตรง ผลของกระแสไหลนี้ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความต้านทานข้างเคียง (Lateral resistance) ดังในรูปที่ 4.2 ถ้าแรงดันนี้มีค่ามากพอคือประมาณ 0.7 โวลต์ จะทำให้รอยต่อ J_2 ได้รับไบแอสตรง เป็นผลให้อิเล็กตรอนจากบริเวณซอร์ส n^+ ถูกฉีดเข้าไปในชั้นบอดี้ p

ถ้าดูจากวงจรสมมูลในรูปที่ 4.5 จะหมายถึงขาเบสและอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นได้รับแรงดันไบแอสตรงส่งผลให้ทรานซิสเตอร์ซึ่งแฝงอยู่ในโครงสร้างของ ไอจีบีทีอยู่ในภาวะแลตซ์การนำกระแส ทำให้ที่ขาเกตไม่สามารถควบคุมปริมาณของกระแสแตรนได้อีกต่อไป แต่การควบคุมกระแสแตรนนี้จะขึ้นอยู่กับตัวต้านทานที่นำมาต่อในวงจรภายนอก ถ้าหากมีการแลตซ์เกิดขึ้นเป็นเวลานาน อาจทำให้ ไอจีบีทีเสียหายได้ เพราะมีการสูญเสียกำลังงานเกินค่าพิคกที่ทนได้

ส่วนใหญ่หรือเป็นมาตรฐานคู่มือของผู้ผลิต มักจะมีการบอกค่ากระแสแตรนสูงสุด ที่สามารถไหลผ่าน ไอจีบีทีได้โดยยังไม่เกิดการแลตซ์ขึ้น (I_{DM}) แต่เนื่องจากกระแสแตรนถูกกำหนดหรือควบคุมโดยตรงจากแรงดันระหว่างขาเกตกับซอร์ส บางครั้งคู่มือจึงบอกค่าแรงดันระหว่างเกตและซอร์สสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแลตซ์ แทนการบอกค่ากระแสแตรนสูงสุด (I_{DM})

การแลตซ์ที่กล่าวถึงข้างต้นเรียกว่าการแลตซ์ใน โหมดสแตติก เพราะเกิดขึ้นเมื่อกระแสที่ไหลในสถานะนำกระแสมีค่าเกิน I_{DM} แต่ลักษณะการแลตซ์นี้ก็สามารถเกิดขึ้นได้ เรียกว่าใน โหมดไดนามิก ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนการทำงานจากสถานะนำกระแสเข้าสู่สถานะหยุดนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

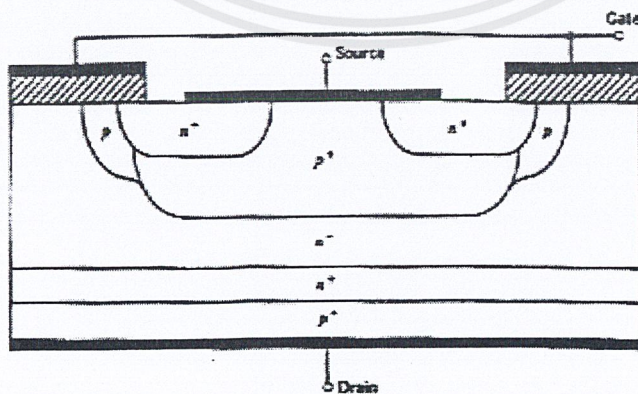
ได้ด้วย บางครั้งการแลตซ์นี้อาจเกิดขึ้นได้แม้ว่ากระแสตรงขณะนำกระแสยังมีค่าต่ำกว่า I_{DM} ก็ตาม ทั้งนี้เพราะเมื่อไอจีบีทีเริ่มหยุดนำกระแส กระแสตรงจะตกลงอย่างรวดเร็ว รอยต่อ J_2 จะรองรับแรงดันขย้อนกลับที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน

ผลที่เกิดขึ้นจะทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายบริเวณชั้นบอดี p โดยเฉพาะจะขยายเข้าสู่บริเวณ n^+ มากกว่า เพราะมีความหนาแน่นของการโด๊ปต่ำกว่า การขยายบริเวณปลอดพาหะอย่างรวดเร็ว จะทำให้โฮลที่ค้างอยู่ในบริเวณ n^+ ขณะกระแสและขงไมใดรวมกับอิเล็กตรอนหลุดรอดจากการขัดขวางของบริเวณปลอดพาหะเข้าไปสะสมอยู่ในบริเวณรอยต่อ J_2 เป็นการเพิ่มกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานข้างเคียงให้สูงขึ้น ทำให้ทรานซิสเตอร์ภายในไอจีบีทีเกิดการแลตซ์ขึ้นได้ เมื่อเกิดการแลตซ์ขึ้นแรงดันตกคร่อมซาออร์สและตรงขณะนำกระแสจะมีค่าต่ำกว่าระดับปกติ นอกจากนี้การแลตซ์ยังสามารถเกิดขึ้นได้อีก เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่รอยต่อ ในขณะที่กระแสตรงยังมีค่าต่ำกว่า I_{DM} อยู่เช่นกัน

4.6 การป้องกันการแลตซ์

การหลีกเลี่ยงการแลตซ์ของ IGBT สามารถทำได้ทั้งผู้ผลิตและผู้ใช้งานเอง ผู้ผลิตอาจจะออกแบบโครงสร้างในส่วนบริเวณบอดี p ให้มีความต้านทานข้างเคียงค่าต่ำสุด เพื่อจะได้เพิ่มค่าของ I_{DM} ให้มากที่สุด ซึ่งเป็นการลดโอกาสที่จะเกิดการแลตซ์ลงได้

วิธีแรกอาจทำได้โดยลดความกว้างของบริเวณซอร์ส n^+ ลง นั่นคือลดค่า L_S ที่แสดงในรูปที่ 4.2 ลงนั่นเอง วิธีที่สองเป็นการแบ่งระดับความหนาแน่นในการโด๊ปสารของบริเวณบอดี p ดังในรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าบริเวณบอดี p ภายใต้เกตจะโด๊ปด้วยความหนาแน่นในระดับปกติ 10^{16} cm^{-3} และมีความหนาแน่นน้อยกว่าของบริเวณซอร์ส n^+ แต่ส่วนอื่นที่เหลือของบริเวณบอดี p จะโด๊ปด้วยความหนาแน่นที่มากกว่า 10^{19} cm^{-3} รวมถึงความหนาแน่นก็จะมากกว่าด้วย



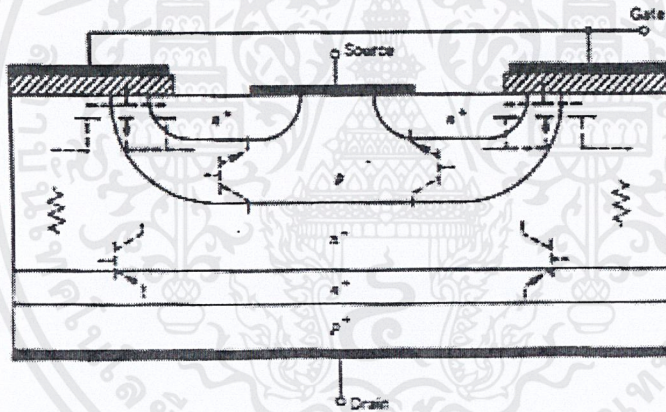
รูปที่ 4.6 โครงสร้างที่ปรับปรุงเพื่อป้องกันการแลตซ์ในของไอจีบีที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับผู้ใช้งานก็สามารถป้องกันการแลตช์ในโหมดสแตติกได้ โดยออกแบบไม่ให้กระแสที่ไหลในโหนดไหลเกินค่ากระแส I_{DM} และป้องกันการแลตช์ในโหมดไดนามิกได้ โดยหน่วงเวลาขณะหยุดนำกระแสให้ยาวนานขึ้น เพื่อให้โอสที่ยังค้างอยู่ในบริเวณ n- มีเวลาพอที่จะรวมกับอิเล็กตรอนเป็นการลดกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานข้างเคียงให้น้อยลงได้ การหน่วงเวลาขณะหยุดนำกระแสให้ยาวนานขึ้น ทำได้โดยเพิ่มความต้านทานภายนอกอนุกรมเข้ากับขาเกตของไอจีบีที

4.7 วงจรสมมูลของไอจีบีที

วงจรสมมูลของไอจีบีทีที่แสดงไว้ในรูปที่ 6 ซึ่งในรูปที่ 6 (ก) นั้นจะเห็นว่าในบริเวณบอดี้ p ชั้น บริเวณ n- และชั้นอินเจกต์ติ้ง p+ จะคล้ายกับทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็นพี โดยแทนได้ด้วยขาคอลเล็กเตอร์, เบส และอิมิตเตอร์ ตามลำดับ และ บริเวณ n- เชื่อมขาเบสของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพีเข้ากับขาเบสของมอสเฟต ซึ่งเมื่อเขียนวงจรสมมูลออกมาจะได้วงจรดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 โครงสร้างที่มีไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์และมอสเฟตแฝงอยู่ภายใน

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าป็นวงจรคาร์ลิงตัน โดยมีมอสเฟตเป็นตัวขับทรานซิสเตอร์พีเอ็นพี แต่มีจุดพิเศษที่แตกต่างจากวงจรทั่วไป คือกระแสครนส่วนใหญ่จะไหลจากอิมิตเตอร์มายังเบส ผ่านความต้านทานบริเวณลอยเลื่อน และผ่านขาเบสของมอสเฟตลงที่ขาซอร์ส จะมีกระแสส่วนน้อยเท่านั้นที่ไหลจากอิมิตเตอร์มายังคอลเล็กเตอร์และขาซอร์ส สำหรับวงจรสมมูลในรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าภายในไอจีบีทีมีทรานซิสเตอร์แฝงอยู่ด้วย โดยดูได้จากที่ทรานซิสเตอร์ เอ็นพีเอ็นและพีเอ็นพี ต่อเข้าด้วยกัน ในลักษณะที่มีการป้อนกลับ ทำให้เห็นได้ชัดถึงเหตุที่ทำให้เกิดการแลตช์ของไอจีบีที

โดยถ้ากระแสส่วนน้อยที่ไหลผ่านจากอิมิตเตอร์มายังคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพี ผ่านความต้านทานข้างเคียงแล้วทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความต้านทานสูงกว่า 0.7 โวลต์ ทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นจะนำกระแส ส่งผลให้เกิดการแลตซ์ขึ้นใน ไอจีบีทีสำหรับแรงดันตกคร่อมขาเดรนและซอร์สของไอจีบีทีขณะนำกระแส ($V_{DS(ON)}$) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_{DS(ON)} = V_{J1} + V_{drift} + I_D R_{channel} \quad (4.1)$$

เมื่อ V_{J1} เป็นแรงดันไบแอสตรงที่ตกคร่อมรอยต่อพีเอ็น จึงมีค่าค่อนข้างจะคงที่ จะมีการเปลี่ยนแปลงบ้างก็เพียงเล็กน้อย เพราะมีความสัมพันธ์โดยตรงในลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียลกับกระแส ทำให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.7-1 โวลต์

V_{drift} เป็นแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานบริเวณลอยเลื่อน ซึ่งความต้านทานนี้มีค่าค่อนข้างคงที่ แต่เมื่อเทียบกับค่าแรงดันในมอสเฟตแล้วจะมีค่าน้อยกว่า เพราะผลของการมอดูเลตสภาพนาที่ เกิดขึ้นในไอจีบีที

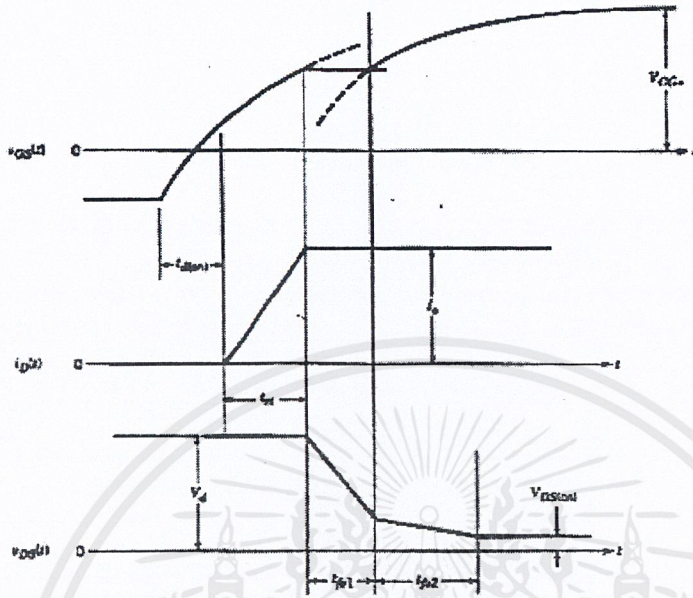
$R_{channel}$ เป็นค่าความต้านทานในย่าน 1-1,000 โอห์ม มีค่าค่อนข้างจะคงที่

$(I_D R_{channel})$ เป็นแรงดันตกคร่อมมอสเฟต

ดังนั้นจึงพอจะสรุปได้ว่า $V_{DS(ON)}$ จะมีค่าสูงมากขึ้นตามค่ากระแสเดรนที่สูงขึ้น โดยทั่วไป จะสามารถทำงานได้ในอุณหภูมิรอยต่อสูงสุดถึง 150 องศาเซลเซียส และผลของการเปลี่ยนอุณหภูมิจากค่าอุณหภูมิห้องไปถึงค่าสูงสุดนี้ จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า $V_{DS(ON)}$ เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เพราะ ไอจีบีที มีค่า $V_{DS(ON)}$ เป็นผลรวมระหว่างแรงดันตกคร่อมมอสเฟตที่มีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิเป็นบวก (หมายถึงอุณหภูมิสูงขึ้นแรงดันตกคร่อมก็จะสูงขึ้นตาม) กับแรงดันตกคร่อม ความต้านทานบริเวณลอยเลื่อนที่มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเป็นลบ

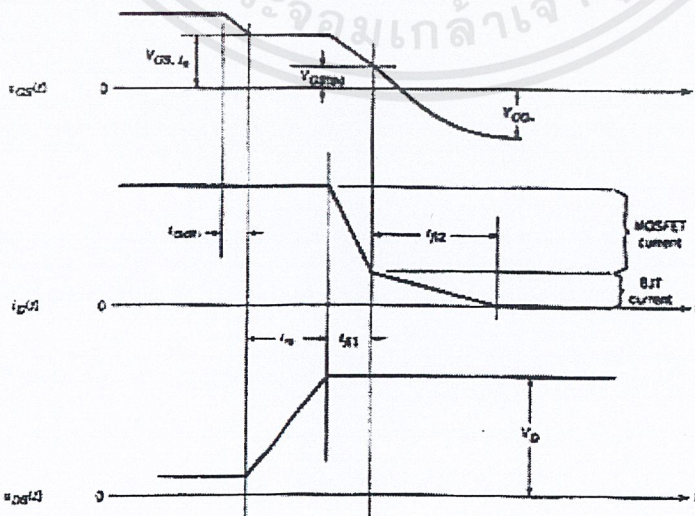
4.8 ลักษณะการสวิทช์

ลักษณะของสัญญาณกระแสและแรงดันในช่วงเวลาที่เกิดการนำกระแสและหยุดนำกระแส แสดงไว้ในรูปที่ 4.8 ช่วงเวลาในการนำกระแสของ ไอจีบีที แสดงไว้ในรูปที่ 4.8 ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับการนำกระแสของมอสเฟต คือจะมีเวลาก่อนการนำกระแส ($t_{d(on)}$) นับตั้งแต่เวลาที่แรงดันที่แฉกคั่นระหว่างเกตกับซอร์สอยู่ในช่วง V_{GG} จนถึง $V_{GS(th)}$ ความจริงแล้วการป้อนแรงดันนี้จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดจากค่า V_{GG} เป็น V_{GG+} แต่กลับมีลักษณะเป็นเอ็กซ์โปเนนเชียล



รูปที่ 4.8 ลักษณะของกระแสและแรงดันขณะนำกระแส

เหตุที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากผลการชาร์จประจุของตัวเก็บประจุระหว่างเกตกับซอร์สและเกตกับเดรนภายในไอจีบีทีแรงดันที่ขาเดรนจะอยู่ที่อยู่ในช่วงเวลาที่ขาขึ้น (t_r) หรือในช่วงเวลาที่กระแสเดรนยังไม่ถึงค่ากระแสทำงาน (I_o) หลังจากนั้นกระแสเดรนก็จะคงที่ แต่แรงดันจะตกลงสู่ค่า $V_{DS(on)}$ โดยแบ่งช่วงเวลาลงเป็นสองช่วง คือช่วง t_{fv1} เป็นช่วงที่ทำงานอยู่ในย่านความต้านทานสูง ($R_{channel}$) ส่วน t_{fv2} ช่วงที่ทำงานอยู่ในย่านความต้านทานต่ำ ($R_{channel}$)



รูปที่ 4.9 ลักษณะของกระแสและแรงดันขณะหยุดนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 จะเป็นรูปแสดงลักษณะของกระแสและแรงดันในช่วงเวลาที่ไอจีบีทีหยุดนำกระแสจะเห็นว่ากระแสเดรนจะยังคงที่อยู่ตลอดช่วงเวลาที่แรงดันขาเดรนเพิ่มขึ้น และช่วงเวลาขณะที่กระแสเดรนที่แตกต่างชัดเจนสองช่วง โดยช่วงแรก t_{on} จะเป็นช่วงหยุดนำกระแสของมอสเฟตภายใน ไอจีบีที และช่วง t_{off} จะเป็นช่วงหยุดนำกระแสของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพี ซึ่งจะช้ากว่ามอสเฟต ทำให้ช่วงเวลานี้นานกว่าช่วงแรกและมีการสูญเสียกำลังงานมากในช่วงนี้

4.9 พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัย

ไอจีบีที มีพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยทั้งในระหว่างนำกระแสและหยุดนำกระแส โดยมีพื้นที่การทำงานปลอดภัยในขณะไบแอสตรง (Forward Bias Safe Operation Area : FBSOA) ที่กว้างมากเปรียบได้กับเกือบเป็นสี่เหลี่ยม สำหรับเวลาในการสวิตช์ที่สั้นๆ แต่จะแคบลงเมื่อเวลาในการสวิตช์ยาวนานขึ้น ซึ่งถ้าเทียบกับเพาเวอร์มอสเฟตแล้ว ไอจีบีทีจะทำงานได้ในช่วงพื้นที่ที่กว้างกว่าเมื่อเวลาในการสวิตช์เท่ากัน

ในช่วงระหว่างเริ่มนำกระแสและขณะที่นำกระแสแล้ว จุดการทำงานของ ไอจีบีที จะต้องมีความแรงดันและกระแสที่ขาเดรนอยู่ในพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยในช่วงไบแอสตรงเสมอ หากไม่เช่นนั้นแล้วจะทำให้เกิดการเสียหายขึ้นที่ ไอจีบีที จากรูปพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยของ ไอจีบีที นี้จะแสดงถึงขีดจำกัดของกระแสเดรน, อัตราแรงดันไหลตรง และอุณหภูมิรอยต่อของ ไอจีบีที ตามลำดับ

สำหรับพื้นที่การทำงานปลอดภัยในช่วงไบแอสกลับ (reverse bias safe operating area : RBSOA) จะแตกต่างจากในช่วงไบแอสตรง คดขยในรูปนี้จะแสดงค่าจำกัดของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขาเดรนต่อเวลา (dv_{DS}/dt) ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงระหว่างหยุดนำกระแส แทนขีดจำกัดทางด้านอุณหภูมิรอยต่อ และจะมีพื้นที่แคบลง ถ้า dv_{DS}/dt มีค่าสูงมากขึ้น ส่วนเหตุผลที่ถูกจำกัดโดยค่านี้เพราะไม่ต้องการให้เกิดการแลตซ์ขึ้นที่ ไอจีบีที

ค่า dv_{DS}/dt นี้จะมีผลโดยตรงกับช่วงเวลาหยุดนำกระแส หมายความว่าถ้ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงเร็วจะทำให้ช่วงเวลาหยุดนำกระแสสั้น แต่ก็ยังถือว่าขีดจำกัดที่ขีดจำกัด dv_{DS}/dt ของ ไอจีบีที มีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ตัวอื่นๆ ดังนั้นความจำเป็นในการใช้วงจรสแน็บเบอร์เพื่อป้องกันการแลตซ์ก็ไม่มีมีความจำเป็นต้องใช้ และการควบคุมค่า (dv_{DS}/dt) ที่เกิดขึ้นยังทำได้ง่ายขึ้นด้วยการออกแบบวงจรจับเกตที่มีค่าความต้านทานที่ต่อกับขาเกตและค่า V_{GG} ที่เหมาะสม

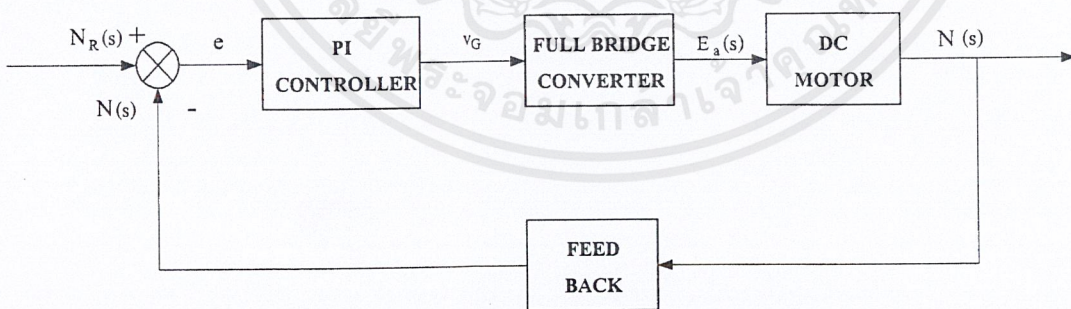
บทที่ 5

ระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor Control System)

ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนิยมแบบลูปปิด(Close Loop) เนื่องจากมีข้อดีมากคือ ผลตอบสนองของความเร็วรอบมอเตอร์ที่สูง ค่าความผิดพลาดของสภาวะคงตัวน้อย และระบบควบคุมมอเตอร์นั้นมีเสถียรภาพสูง ซึ่งดีกว่าการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบลูปเปิด นอกจากนี้การควบคุมมอเตอร์แบบลูปเปิด(Open Loop)เป็นที่นิยมใช้กันมากในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถควบคุมมอเตอร์ได้ทั้งแรงบิดคงที่ ความเร็วรอบคงที่ หรือควบคุมได้ทั้งความเร็วรอบและตำแหน่งตามต้องการ ที่เรียกว่า เซอร์โว(Servo)

แต่การควบคุมมอเตอร์นั้นเป็นการควบคุมที่ต้องวิเคราะห์ผลตอบสนองทางไดนามิก ซึ่งโดยทั่วไปการควบคุมมอเตอร์ทุกประเภทสมควรที่จะมีระบบชดเชยป้อนกลับเพื่อทำให้ผลตอบสนองไดนามิกของระบบอยู่ในระดับที่ดีที่สุด และระบบชดเชยป้อนกลับที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์คือ ระบบชดเชยแบบพีไอหรือระบบควบคุมแบบพีไอ(PI Controller)

สำหรับโครงการนี้สนใจการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ ซึ่งมีบล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4- Quadrant

จากบล็อกไดอะแกรมอธิบายการทำงานคือ เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีโหลดที่เปลี่ยนแปลงไปความเร็วรอบย่อมเปลี่ยนแปลงในทิศทางผกผันกัน จากนั้นเอนโค้ดเดอร์(Encoder) แปลงความเร็วรอบที่ได้เป็นสัญญาณแรงดันเพื่อป้อนกลับสู่ระบบควบคุมแบบพีไอ ซึ่งทำหน้าที่สร้างสัญญาณชดเชยที่สามารถควบคุมวงจรถูกปรังค์คอนเวอร์เตอร์(Full Bridge Converter) ซึ่งทำหน้าที่

ควบคุมแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์มากขึ้น เพื่อให้มอเตอร์นั้นกลับสู่ความเร็วรอบคงเดิมได้อย่างรวดเร็วและมีเสถียรภาพ

การหาผลตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ให้คงที่นั้น ต้องทำการถ่ายโอนฟังก์ชันของระบบ ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาเปลี่ยนเป็นฟังก์ชันของความถี่โดยใช้วิธีลาเพลส(Laplace Transform) ดังนั้นส่วนที่เป็นฟังก์ชันถ่ายโอน(Transfer Function) คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและระบบชดเชยชนิดพีโอ ในส่วนของวงจรถูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์และระบบป้อนกลับ(Feed back) นั้นจะให้ค่าเป็น 1 เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ

5.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

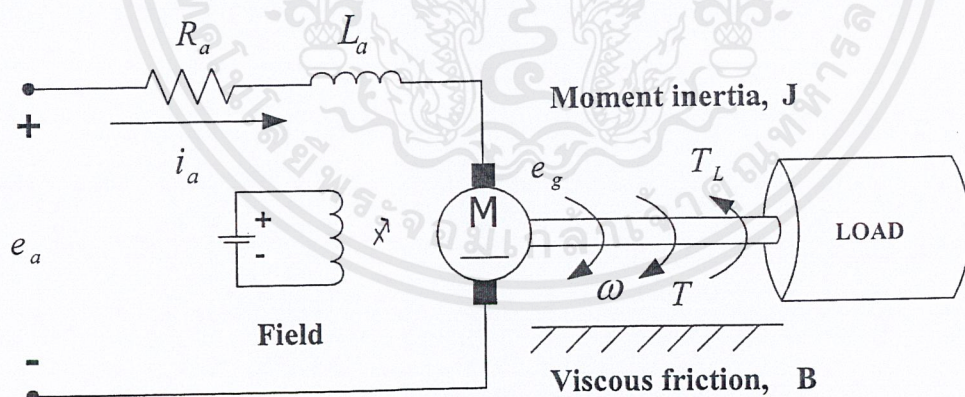
จากรูปที่ 5.2 วงจรสมมูลย์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกขดลวดกระตุ้น ได้สมการแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าดังนี้

$$e_a = e_g + R_a i_a + L \frac{di_a}{dt} \quad (5.1)$$

$$e_g = K_t \omega \quad (5.2)$$

ได้สมการแรงบิดดังนี้

$$t = T_L + B\omega + J \frac{d\omega}{dt} \quad (5.3)$$



รูปที่ 5.2 แสดงวงจรสมมูลย์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกขดลวดกระตุ้น

$$t = K_t i_a \quad (5.4)$$

เมื่อ

- e_a = แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์(Armature voltage)
- e_g = แรงดันเหนี่ยวย้อนกลับ(Back EMF)
- R_a = ค่าความต้านทานในขดลวดอาร์เมเจอร์(Armature resistance)
- i_a = ค่ากระแสไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์(Armature current)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L_a	=	ค่าความเหนี่ยวนำขดลวดอาร์เมเจอร์(Armature inductance)
K_t	=	ค่าคงที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้า(Electromagnetic field constant)
ω	=	ความเร็วรอบของมอเตอร์(motor speed)
t	=	แรงบิดของมอเตอร์(motor torque)
	=	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ (Moment of inertia at motor)
B	=	ค่าความเสียดทานหนืดของมอเตอร์และโหลด(Viscous friction of motor)
T_L	=	แรงบิดของโหลด(Load torque)

จากสมการที่(5.1),(5.2),(5.3) และ (5.4) ใช้วิธีแปลงลาปลาซเป็นฟังก์ชันของความถี่ได้ดังนี้

$$E_a(s) = E_g(s) + RI_a(s) + LsI_a(s) \quad (5.5)$$

$$E_g(s) = K_t \Omega(s) \quad (5.6)$$

เมื่อ Ω = ความเร็วรอบของมอเตอร์

จากสมการที่ (5.5) จัดอยู่ในรูปกระแสไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์

$$I_a = \frac{E_a - E_g}{R_a + sL_a} = \frac{[E_a - E_g]1/R_a}{1 + s\tau_a} \quad (5.7)$$

เมื่อ $\tau_a = L_a/R_a$ คือค่าคงที่ของเวลาทางไฟฟ้า

ได้สมการแรงบิดดังนี้

$$T(s) = T_L + B\Omega(s) + Js\Omega(s) \quad (5.8)$$

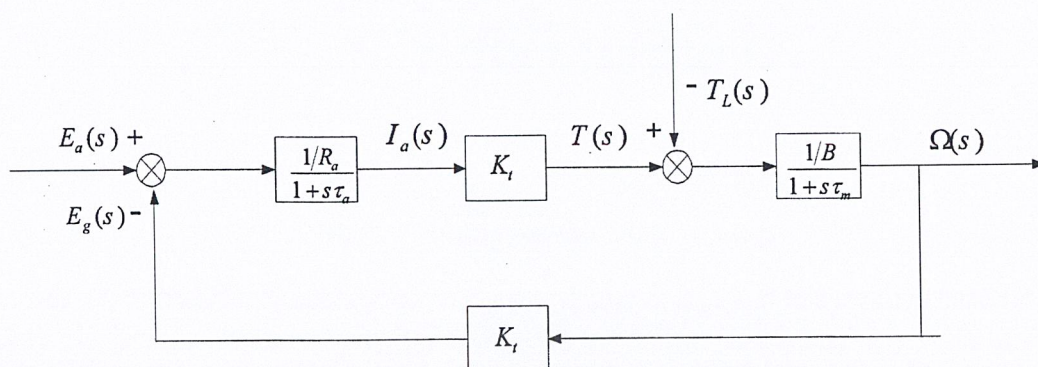
$$T(s) = K_t I_a(s) \quad (5.9)$$

จากสมการที่ (5.8) จัดอยู่ในรูปความเร็วรอบของมอเตอร์

$$\Omega = \frac{T - T_L}{B + sJ} = \frac{[T - T_L]1/B}{1 + s\tau_m} \quad (5.10)$$

เมื่อ $\tau_m = J/B$ คือค่าคงที่ของเวลาทางกล

จากความสัมพันธ์ของสมการ (5.7), (5.10), (5.6) และ (5.9) สามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 บล็อกโคอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากบล็อกโคอะแกรมในรูปที่ $\Omega(s)$ เป็นสัญญาณเอาต์พุต $E_a(s)$ เป็นสัญญาณอินพุต และ $T_L(s)$ เป็นสัญญาณรบกวน ดังนั้นการหาผลตอบสนองรวมของ $\Omega(s)$ ต้องหาผลตอบสนองของแต่ละอินพุตซึ่งต้องใช้ทฤษฎีซ้อนทับ (Superposition) ได้สมการดังนี้

$$\Omega(s) = \frac{G_1(s)}{1 + G_1(s)H_1(s)} E_a(s) - \frac{G_2(s)}{1 + G_2(s)H_2(s)} T_L(s) \quad (5.11)$$

ดังนั้น

$$G_1 = \frac{1/R_a}{1 + s\tau_a} K_t \frac{1/B}{1 + s\tau_m}$$

$$H_1 = K_t$$

$$G_2 = \frac{1/B}{1 + s\tau_m}$$

$$H_2 = \frac{K_t^2/R_a}{1 + s\tau_a}$$

จากสมการ $\tau_m \gg \tau_a$ ดังนั้น $\tau_a \cong 0$ เนื่องจาก ค่า τ_m จะมีผลตอบสนองต่อความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลง ($\Delta\omega_m$) และค่า τ_a จะมีผลตอบสนองต่อกระแสไหลในอาร์เมเจอร์ที่เปลี่ยนแปลง (Δi_a) เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเริ่มหมุนจากหยุดจนกระทั่งมีความเร็วรอบคงที่ค่าหนึ่ง $\Delta\omega_m$ มีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคงที่ค่าหนึ่ง ดังนั้น τ_m จะมีค่าอยู่ค่าหนึ่ง แต่ในทางกลับกัน Δi_a มีค่าเพิ่มขึ้นสูงระดับหนึ่งแล้วกลับมีผลลดลงเรื่อยๆจนมีค่าน้อยมาก ดังนั้น τ_a จึงมีค่าน้อยมากด้วย

ดังนั้นจะได้

$$\Omega = \frac{K_t}{R_a B (1 + \tau_m) + K_t^2} E_a - \frac{R_a}{R_a B (1 + \tau_m) + K_t^2} T_L \quad (5.12)$$

เมื่อ $T_L = K_t I_a$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Omega = \frac{K_t E_a - K_t R_a I_a}{R_a B (1 + \tau_m) + K_t^2} \quad (5.13)$$

แต่ ถ้า $K_t R_a I_a \ll K_t E_a$ จึงประมาณให้ค่า $K_t R_a I_a = 0$ จะได้

$$\Omega = \frac{K_t E_a}{R_a B (1 + \tau_m) + K_t^2} \quad (5.14)$$

จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\Omega = \frac{k_m E_a}{1 + s \tau_{m1}}$$

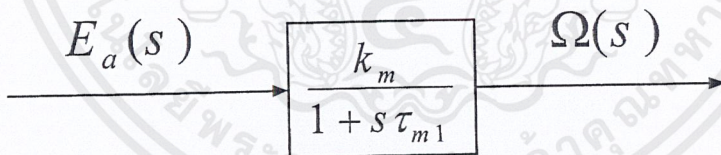
$$\frac{\Omega(s)}{E_a(s)} = \frac{k_m}{1 + s \tau_{m1}} \text{ (G)} \quad (5.15)$$

เมื่อ

$$k_m = \frac{K_t}{R_a B + K_t^2}$$

$$\tau_{m1} = \frac{R_a B}{R_a B + K_t^2}$$

จากสมการ (5.15) เขียนอยู่ในรูปบล็อกได้ดังรูปที่



รูปที่ 5.4 บล็อกของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

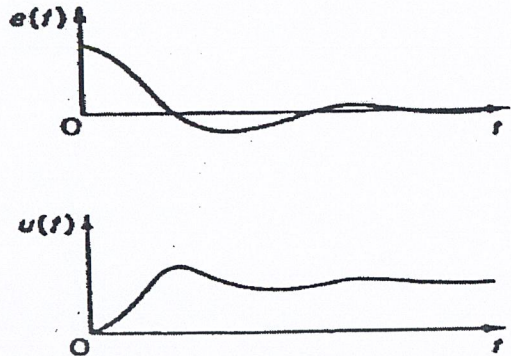
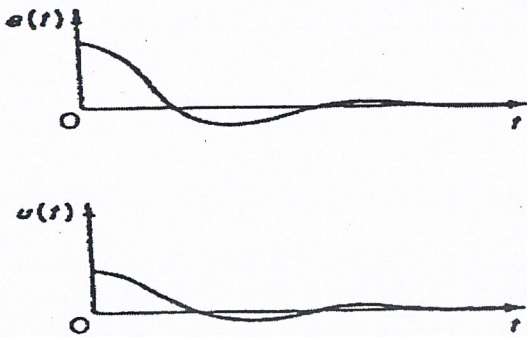
5.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรรวมแบบพีไอ

ระบบควบคุมแบบพีไอ (PI: Proportional plus integral controller) เป็นการรวมระบบควบคุมแบบพี (Proportional controller) และระบบควบคุมแบบไอ (Integral controller) เข้าด้วยกัน

ระบบควบคุมแบบพี (Proportional controller) ในสภาวะทรานเซียนต์ผลตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด และในสภาวะคงที่ผลตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าคงที่ ซึ่งอาจจะมีค่ามากกว่า, เท่ากับ หรือต่ำกว่าสัญญาณค่าผิดพลาดที่เข้ามา

ระบบควบคุมแบบไอ (Integral controller) ในสภาวะทรานเซียนต์ผลตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ เป็นตามค่าเวลาอินทิกรัลของสัญญาณค่าผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 กราฟของผลตอบสนองแบบพี

รูปที่ 5.6 กราฟของผลตอบสนองแบบไอ

ผลลาด และในสถานะคงที่ผลตอบสนองของสัญญาณค่าความผิดพลาดต้องมีค่าเป็นศูนย์เสมอจึงจะทำให้อินทิกรัลหยุด

ดังนั้นระบบควบคุมแบบพีไอ ในสถานะทรานเซียนท์ผลตอบสนองเป็นไปตามระบบควบคุมแบบพี และในสถานะคงที่เป็นไปตามระบบควบคุมแบบไอ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ (5.20)

$$e_o(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt \tag{5.20}$$

แปลงเป็นฟังก์ชันถ่ายโอน

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = K_p + \frac{K_i}{s} \tag{5.21}$$

โดยที่ K_p

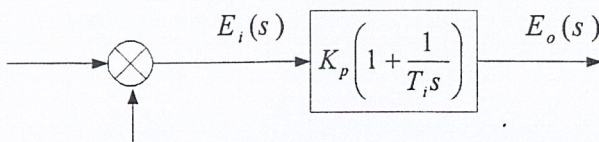
เป็นอัตราขยายของการควบคุมแบบพี

T_i

เรียกว่า ช่วงเวลาอินทิกรัล(Integral time)

$\frac{1}{T_i}$

เป็น ค่า Reset rate คือจำนวนครั้งต่อนาทีที่สัญญาณควบคุมมีค่าเป็น 2 เท่า



รูปที่ 5.7 บล็อกของระบบควบคุมพีไอ

การควบคุมมอเตอร์โดยทั่วไปใช้ระบบควบคุมแบบพีไอ เนื่องจากการควบคุมแบบพีนั้นจะเกิดความคลาดเคลื่อนที่สถานะคงตัว ซึ่งในฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์จำเป็นต้องมีส่วนอินทิเกรเตอร์ (1/s) เพื่อกำจัดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น จึงต้องใช้ระบบการควบคุมแบบไอร่วมด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ทฤษฎีและขั้นตอนการใช้งาน Simulink ของโปรแกรม MATLAB

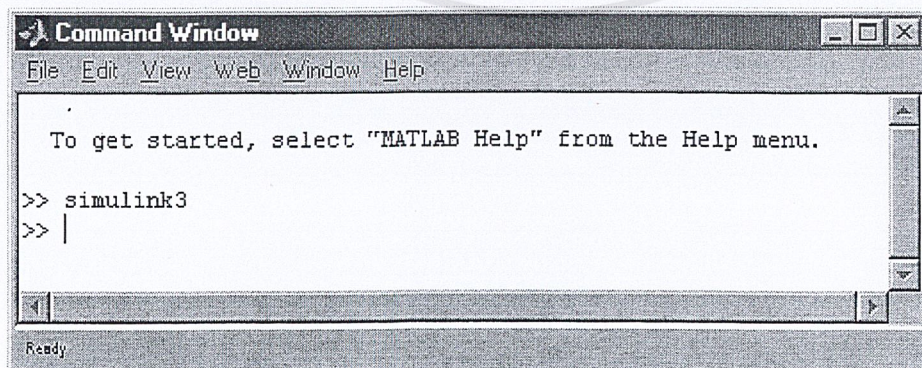
การจำลอง, ทดสอบ และวิเคราะห์ระบบด้วย Simulink

Simulink คือ เครื่องมือ (toolbox) ที่อยู่ในโปรแกรม MATHLAB โดย Simulink จะทำงานภายใต้หน้าต่างที่เป็นการเชื่อมต่อทางด้านรูปภาพ (GUI) ของ Simulink เท่านั้น ซึ่ง Simulink มาจากคำสองคำ คือ Simulation และ Link การใช้งาน Simulink จะกระทำโดยนำ block diagram ของแต่ละ block ในหน้าต่าง Library simulink มาต่อกันตามที่เราต้องการ โดย Simulink สามารถจำลอง ทดสอบและวิเคราะห์การทำงานของระบบพลศาสตร์ในเชิงเวลาได้ทั้งระบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ระบบเวลาต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง การจำลองระบบสามารถกระทำได้โดยการป้อนอินพุตให้กับระบบที่สร้างไว้แล้วดูผลเอาต์พุตของระบบเนื่องจากอินพุตที่ป้อนเข้าไป

การทดลองใน โครงการ 4-Quadrant DC drivers นี้จะนำ Simulink มาช่วยในการวิเคราะห์ระบบ การควบคุมมอเตอร์โดยการวิเคราะห์จะนำเอาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์มาวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบและทดลองเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เป็นตัวแปร ในระบบควบคุมที่ใช้ในการทดลอง แล้วจึงพิจารณาว่าค่าใดที่เหมาะสมต่อการออกแบบระบบควบคุม เพื่อที่จะนำไปใช้ในการสร้างวงจรควบคุมมอเตอร์ที่ทดสอบให้มีเสถียรภาพมากที่สุดทำให้เราสามารถที่จะออกแบบงานที่จะใช้ได้เหมาะสม โดยโครงการนี้จะใช้วงจรควบคุมในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ (Ws)

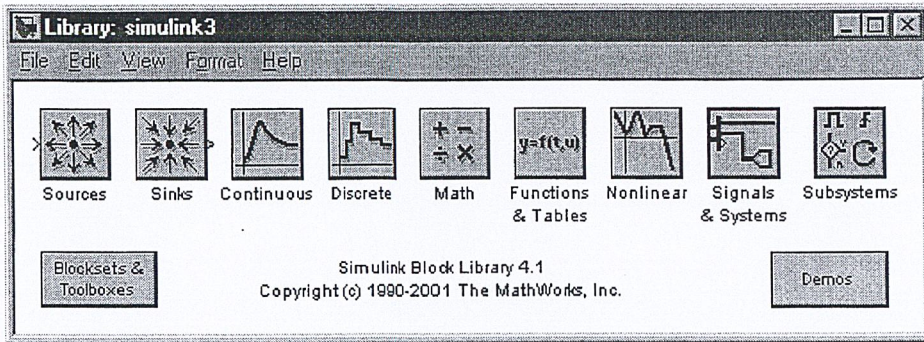
6.1 ขั้นตอนของการใช้งานโปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Simulink มีดังนี้

1. เปิดโปรแกรม MATHLAB แล้วพิมพ์คำว่า Simulink3 เข้าไป โปรแกรมจะเปิดส่วนของ Simulink ขึ้นมาดังรูป



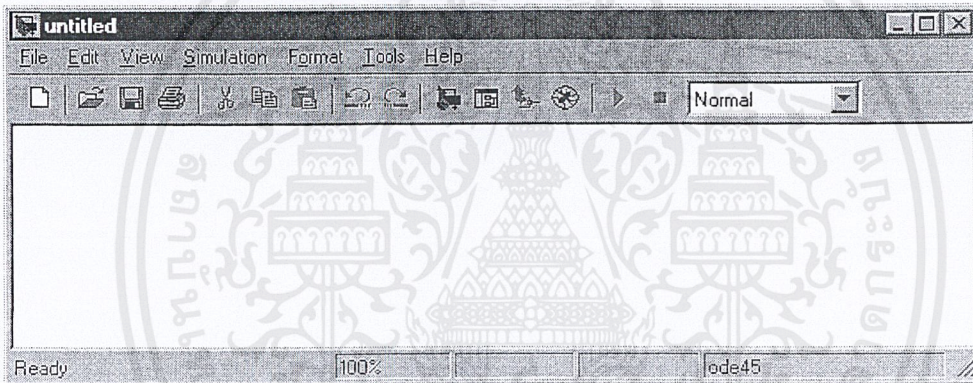
รูปที่ 6.1 คำสั่งเปิดการทำงานของ Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



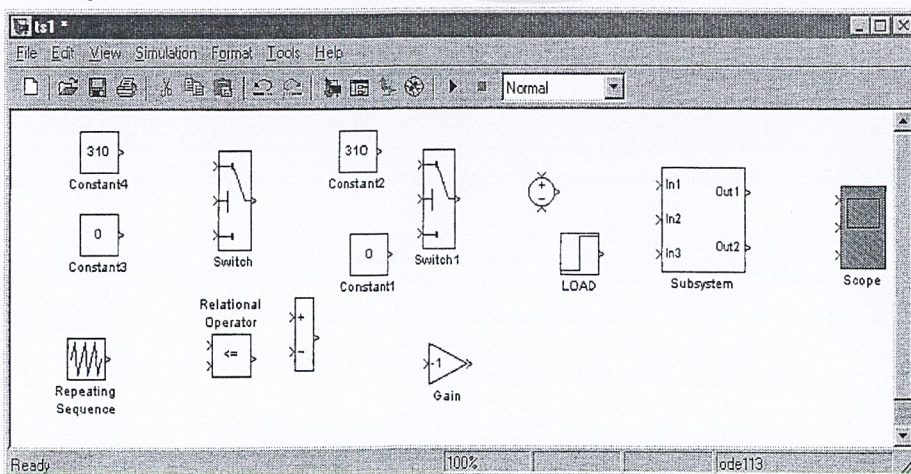
รูปที่ 6.2 ส่วนประกอบต่างๆบนหน้าต่าง Library Simulink

2. สร้างพื้นที่ทำงาน โดยไปที่ File > New > Model



รูปที่ 6.3 พื้นที่ทำงานของ Simulink

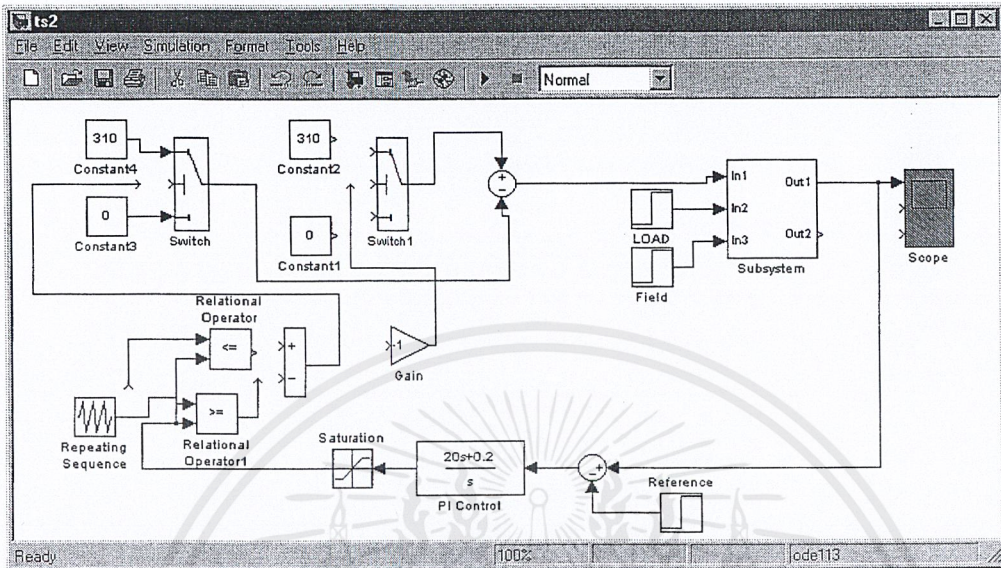
3. จากหน้าต่าง Library ของ Simulink นำอุปกรณ์ที่จะใช้ในระบบบมาวางไว้ในพื้นที่ทำงาน ดังรูป



รูปที่ 6.4 การนำอุปกรณ์มาไว้ในพื้นที่ทำงาน

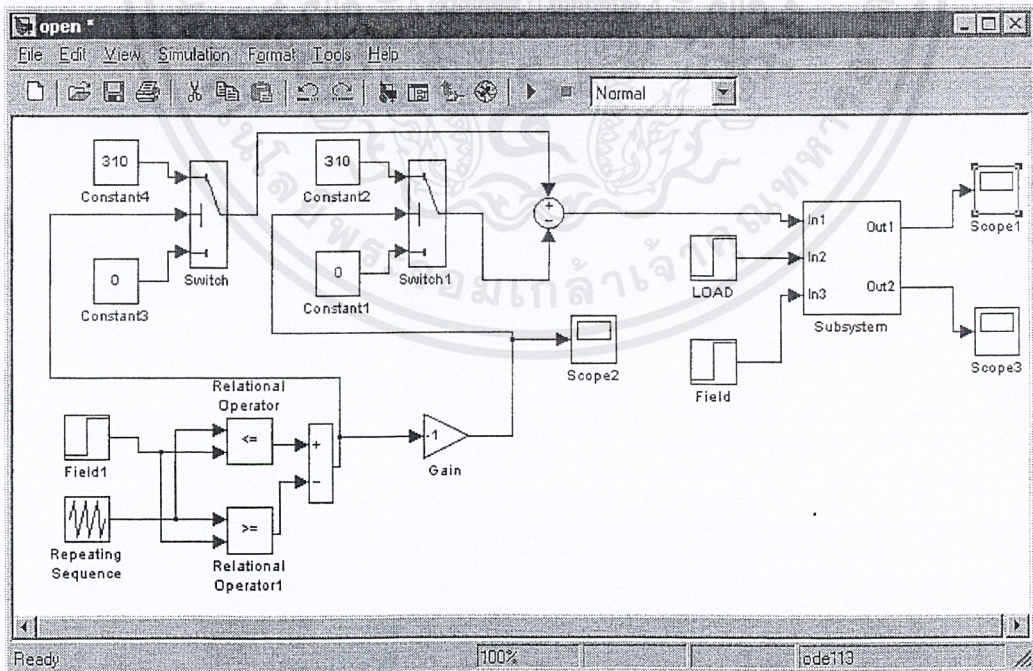
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ลากเส้นเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบจำลองดังรูป



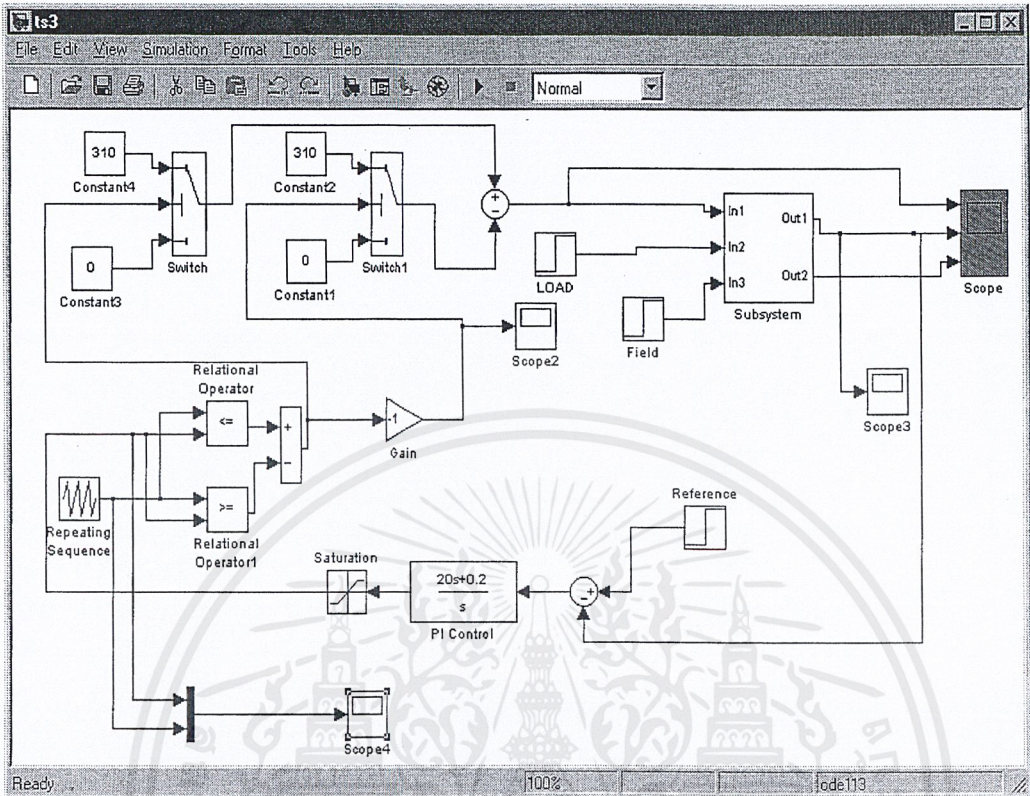
รูปที่ 6.5 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบ

5. ระบบจำลองของโครงการงาน 4-Quadrant DC drivers ที่ใช้ในการวิเคราะห์ แสดงดังรูป



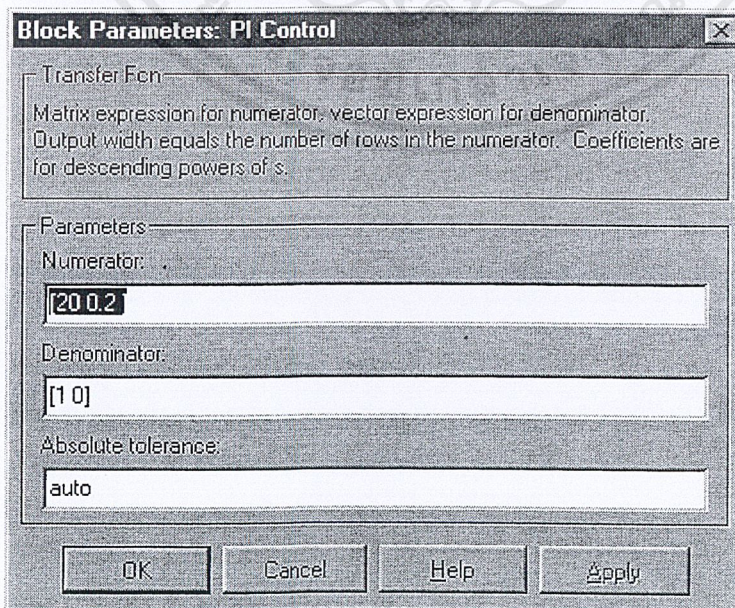
รูปที่ 6.6 การจำลองระบบของระบบ Open Loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.7 การจำลองระบบของระบบ Close Loop

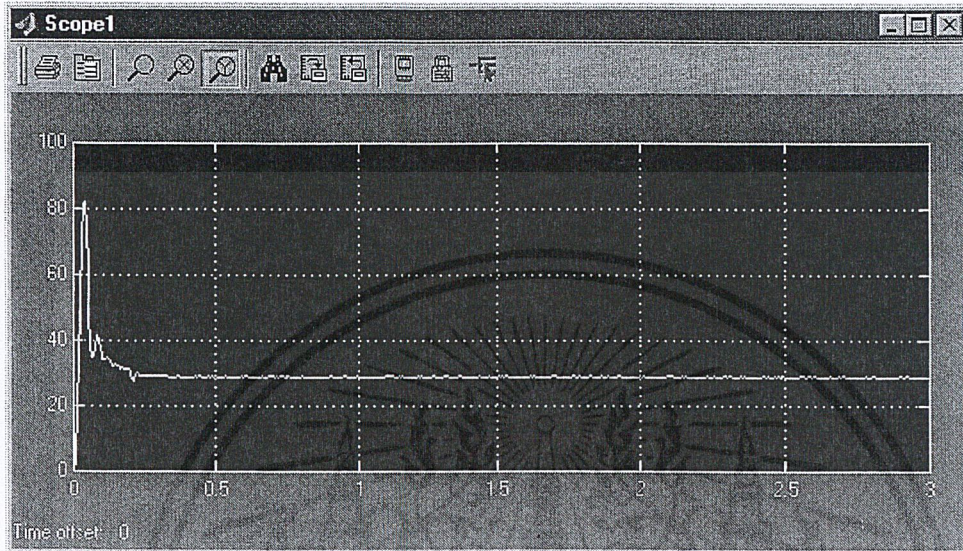
- ใส่ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่างๆในระบบโดยดับเบิลคลิกที่อุปกรณ์นั้น เช่น ต้องการใส่ค่าพารามิเตอร์ของชุด PI Control



รูปที่ 6.8 การใส่ค่าพารามิเตอร์ของ PI Control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ ห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. วิเคราะห์ผลการจำลองระบบโดยไปที่ Simulink > RUN หรือ คลิกที่ไอคอน Scope บนหน้าต่างของ Simulink

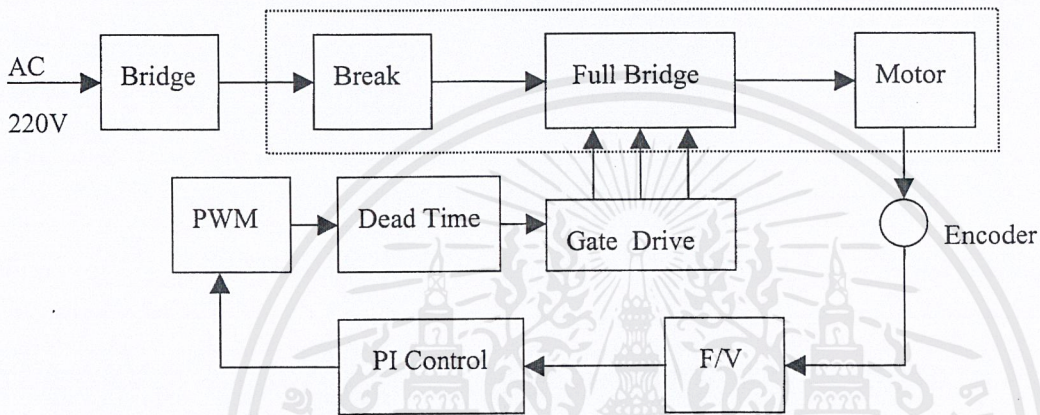


รูปที่ 6.9 ผลการวิเคราะห์การทำงานของระบบโดยแสดงผลทาง Scope

บทที่ 7 วงจรที่ใช้ในโรงงาน

7.1 โครงสร้างและส่วนประกอบโดยรวม

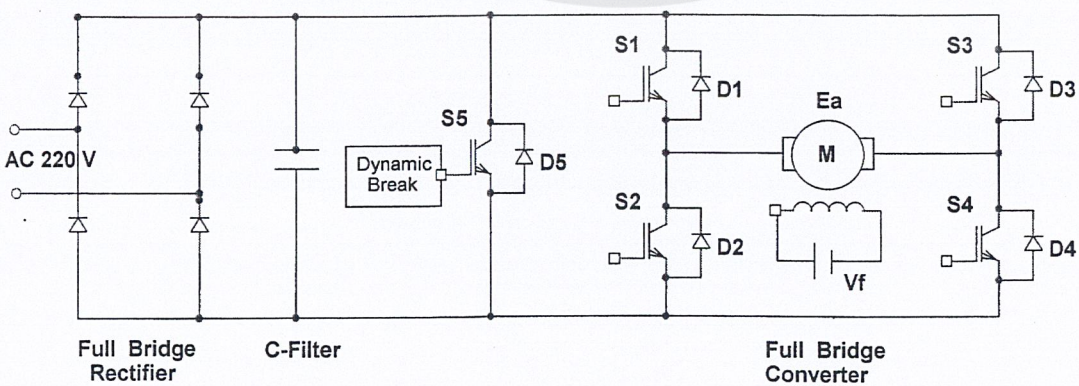
โครงสร้างโดยรวมของวงจรทั้งหมดที่ใช้สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



รูปที่ 7.1 โครงสร้างและส่วนประกอบโดยรวม

7.2 วงจรกำลัง (Power Circuit)

ในส่วนของวงจรกำลังจะเริ่มจาก การที่รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V ผ่านเข้ามายังวงจร ฟูลบริดจ์เรกติไฟเออร์ (Full Bridge Rectifier) ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แล้วผ่านการกรองแรงดันโดย C-Filter แล้วส่งจ่ายให้กับวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Full Bridge Converter) เพื่อควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับตัวมอเตอร์



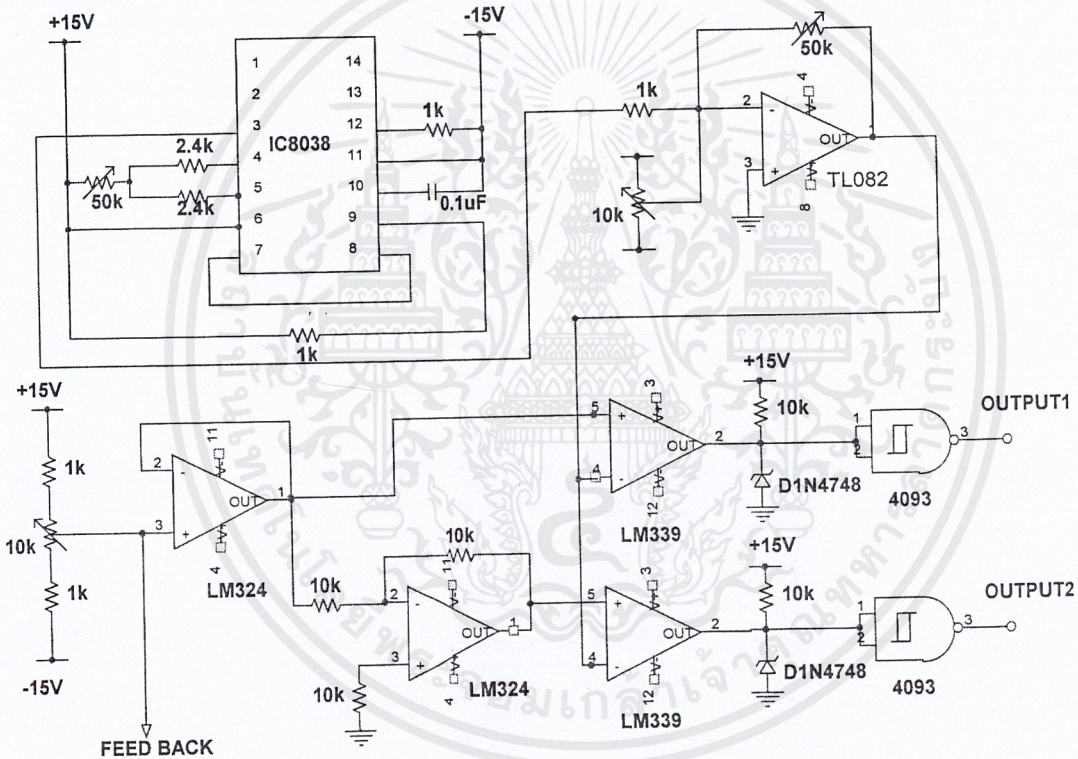
รูปที่ 7.2 วงจรกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3 วงจรควบคุม (Control Circuit)

7.3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็มชนิดยูนิโพลาร์ (Generate PWM Circuit)

จะใช้หลักการสัญญาณสามเหลี่ยม นำมาเมื่อคูณกับสัญญาณควบคุมที่เป็นสัญญาณไฟตรง ทำให้ได้เอาต์พุตออกมา 2 สัญญาณ โดยไอซี 8038 ทำหน้าที่สร้างสัญญาณสามเหลี่ยมออกมา จากขา 3 ส่งมาปรับเกนขยายและปรับแรงดันออฟเซตด้วยออปแอมป์ TL082 จากนั้นสัญญาณจะถูกนำมาเมื่อคูณกับสัญญาณควบ 2 สัญญาณที่อินเวอร์สกันที่ส่วนเปรียบเทียบสัญญาณซึ่งใช้ออปแอมป์ LM339 ก็จะได้เอาต์พุตออกมา ในวงจรนี้สามารถปรับค่าความถี่ได้โดยการปรับที่ตัวต้านทานปรับค่าได้ 50k โดยในโครงการนี้เลือกใช้ค่าความถี่ 2.5 kHz



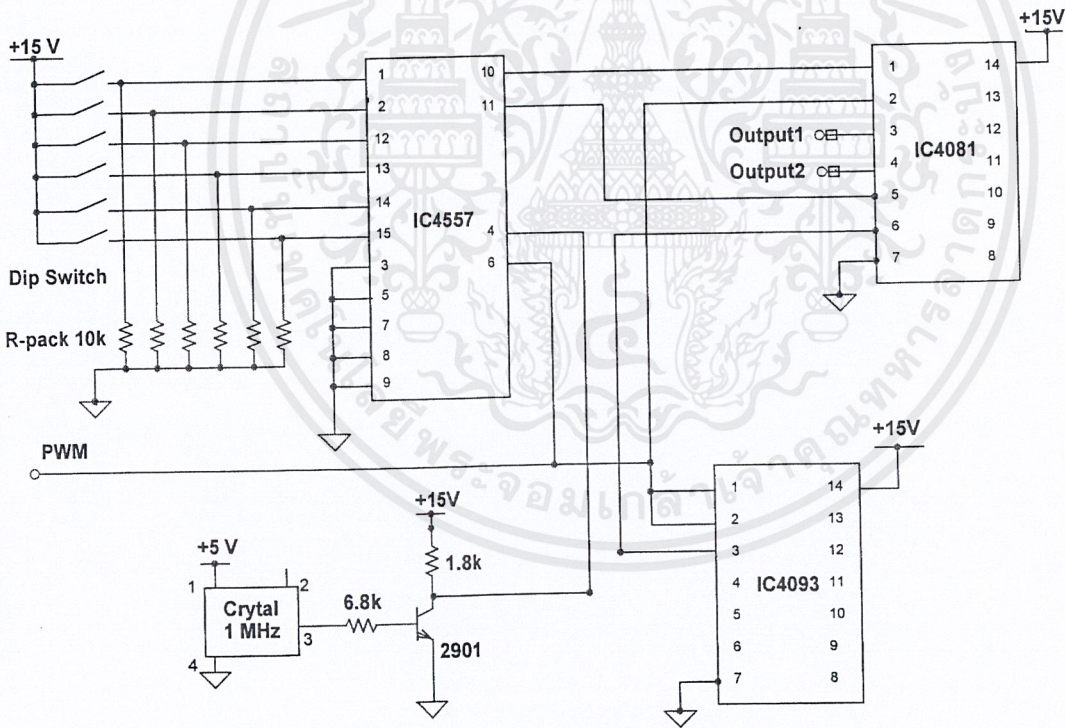
รูปที่ 7.3 วงจรกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบยูนิโพลาร์

7.3.2 วงจรดับสัญญาณ (Deadtime Circuit)

เป็นวงจรที่รับสัญญาณจากวงจรพีดับบลิวเอ็ม เพื่อทำการแยกสัญญาณเป็น 2 ชุด คือ u , \bar{u} สัญญาณมีลักษณะตรงข้ามกันและมีการหน่วงเวลา เพื่อป้องกันไม่ให้สวิตช์ในกิ่งเดียวกัน ทำงานพร้อมกัน ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดการลัดวงจรจนทำให้เกิดความเสียหายแก่สวิตช์ทั้ง 2 คู่ หลังจากนั้นสัญญาณที่ได้จากวงจรเดดไทม์จะถูกส่งไปยังวงจรขับสัญญาณ

การทำงานของวงจรเดดไทม์รูป 8.4 ไอซีเบอร์ 4557 เป็นไอซีซีพรีจิสเตอร์ที่ขา 1, 2, 12, 13, 14 และ 15 ต่อกับสวิตช์เพื่อรับไฟ +15 V ซึ่งเป็นส่วนที่สามารถปรับช่วงเวลาเดดไทม์ที่เกิด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นมากหรือน้อย ที่ขา 4 รับสัญญาณออสซิลเลเตอร์จากคริสตัล 1 MHz โดยที่มีไอซีเบอร์ TR2901 ทำหน้าที่เพิ่มแรงดัน ที่ขา 3, 5, 7, 8 และ 9 ต่อลงกราวด์ ที่ขา 6 ทำหน้าที่รับสัญญาณจากวงจรพีดับบลิวเอ็ม ที่ขา 10 เป็นเอาต์พุต Q และที่ขา 11 เป็นเอาต์พุต \bar{Q} ซึ่งสัญญาณที่ได้จากเอาต์พุต \bar{Q} จะซิงฟลิวจากสัญญาณเอาต์พุต Q ตามการอนสวิตซ์ที่กล่าวมาข้างต้น และได้นำสัญญาณเข้าที่ขา 1 และขา 5 ของไอซีเบอร์ 4081 ตามลำดับ จากไอซีเบอร์ 4093 เป็นไอซีที่มีลอจิกชนิดทริกแอนเกทบรรจุกภายใน นั่นคือที่ขา 1, 2 รับสัญญาณจากวงจรพีดับบลิวเอ็มเข้าชนิดทริกแอนเกท ที่ขา 3 เป็นสัญญาณออกจากชนิดทริกแอนเกท นำสัญญาณไปเข้าที่ขา 6 ของไอซีเบอร์ 4081 ซึ่งไอซีเบอร์ 4081 เป็นไอซีที่มีลอจิกแอนเกทบรรจุกภายใน ที่ขา 2 ของไอซีตัวนี้รับสัญญาณจากวงจรพีดับบลิวเอ็ม และรวมกับสัญญาณเดิมที่ขา 1 มาเข้าลอจิกแอนเกทได้สัญญาณเอาต์พุต U ที่ขา 3 และที่ขา 4 เป็นสัญญาณเอาต์พุต \bar{U} ที่เกิดจากสัญญาณขา 5, 6 ดังที่ได้กล่าวมา

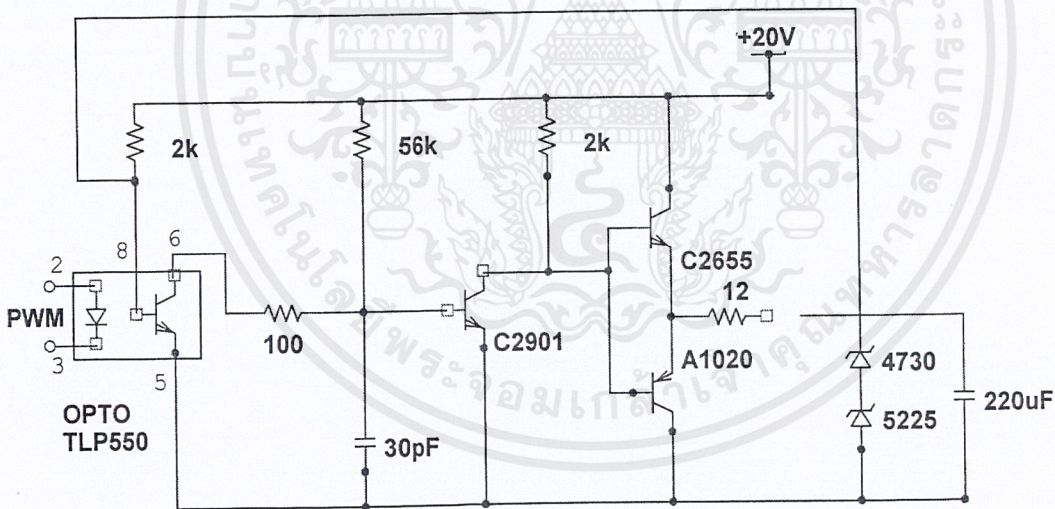


รูปที่ 7.4 วงจรเดคไทม์

7.3.3 วงจรขยายสัญญาณขับไอจีบีที (Gate Drive Circuit)

ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ออปโตคัปเปิลเลอร์ (Opto coupler) ซึ่งใช้ในการแยกวงจรควบคุมออกจากวงจรถูกขับเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดกับวงจรถูกขับ และ ส่วนวงจรขยายที่ใช้คลาสเอบี (Class AB) มีหลักการทำงานดังนี้ เริ่มต้นสัญญาณ PWM ผ่านเข้ามาในออปโตคัปเปิลเลอร์ เบอร์ TLP 550 ซึ่งทำให้ LED (Light Emitting Diode) เปล่งแสงขึ้นและส่งสัญญาณแสงไปทรานซิสเตอร์ที่อยู่ภายในให้ทำงานเป็นสวิตช์ตามลักษณะของสัญญาณที่เข้ามา 2 และขา 3 จากนั้นสัญญาณเอาต์พุตจะส่งต่อมายังส่วนวงจรขยาย

วงจรขยายเริ่มจาก ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ C2901 เป็นตัวขยายสัญญาณ และส่งสัญญาณมาที่ทรานซิสเตอร์ เบอร์ C2655 และเบอร์ A1020 ที่ต่อกันเป็นวงจรขยายคลาสเอบีดังรูปที่ 3.11 ซึ่งจะไบแอส (Bias) ทรานซิสเตอร์ เบอร์ C2655 ให้ทำหน้าที่ขยายในโซ่คิลบวคและทรานซิสเตอร์ เบอร์ A1020 ทำหน้าที่ขยายในโซ่คิลลอป จากนั้นนำเอาที่พุททั้งสองมารวมกันจะได้สัญญาณเอาต์พุตที่สูงขึ้น ซึ่งค่าแอมพลิจูดทั้งโซ่คิลบวคและโซ่คิลลอปขึ้นกับซีเนอร์ไดโอดที่ต่อในรูป สุดท้ายสัญญาณที่ได้จะส่งไปยังขาเกตของไอจีบีที



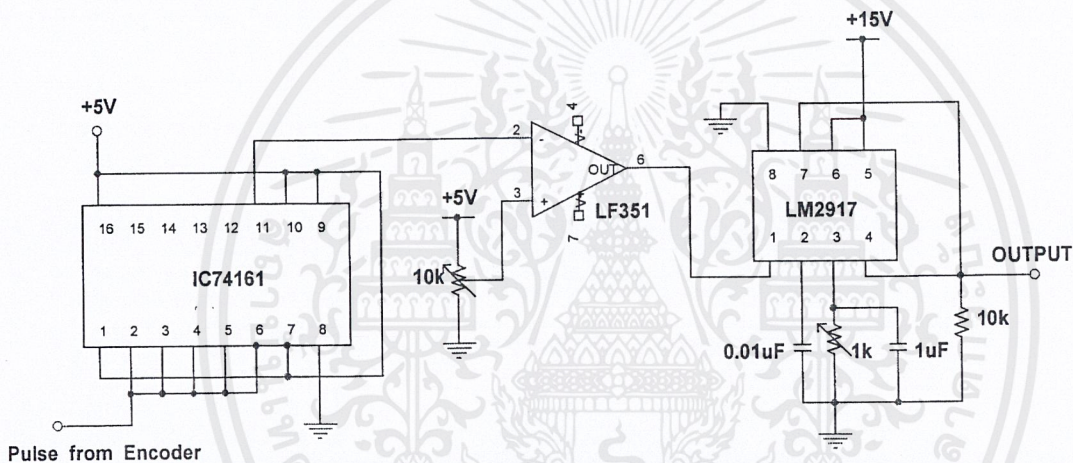
รูปที่ 7.5 วงจรขยายสัญญาณขับ ไอจีบีที

7.3.4 วงจรแปลงสัญญาณความถี่ให้เป็นสัญญาณแรงดัน (F/V Circuit)

ในการแปลงสัญญาณความถี่เป็นสัญญาณแรงดัน จะใช้วงจรเฟสล็อกคูลูป (Phase Lock Loop) ในการแปลง โดยจะรับสัญญาณความถี่จากเซ็นเซอร์แล้วแปลงเป็นสัญญาณแรงดันนำไปใช้เปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงที่คอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปวงจร 8.6 ส่วนประกอบหลักคือไอซีเบอร์ LM2917 ซึ่งเป็นไอซีเฟลต็อคคูป ซึ่งรับอินพุทเป็นสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่ต่างๆ ที่ขา 1 แล้วได้เอาที่พุทออกที่ขา 4 โดยสามารถปรับค่าแรงดันดิซีที่ออกมาโดยการปรับที่ตัวต้านทานปรับค่าได้ 100k แต่เนื่องจากไอซี LM2917 นี้มีข้อจำกัดในการตอบสนองได้เฉพาะในช่วงความถี่ 0 – 10k และต้องรับค่าสัญญาณพัลส์ที่มีค่าในช่วงซีกบวกและลบ แต่เอนโค้ดเดอร์นั้นให้ค่าความถี่ที่มีค่าสูงกว่าที่ตัวไอซีจะตอบสนองได้ และให้สัญญาณพัลส์ที่มีค่าเฉพาะช่วงซีกบวก จึงต้องใช้วงจรหารความถี่เข้ามาช่วย โดยใช้ไอซีเบอร์ 74161 เข้ามาหารความถี่ และเมื่อได้เอาที่พุทออกมาต้องนำมาทำการแปลงพัลส์ให้เป็นซีกบวกและลบ โดยใช้ออปแอมป์ LF351 เป็นตัวคอมพารเตอรื ก็จะได้อสัญญาณส่งไปให้LM2917



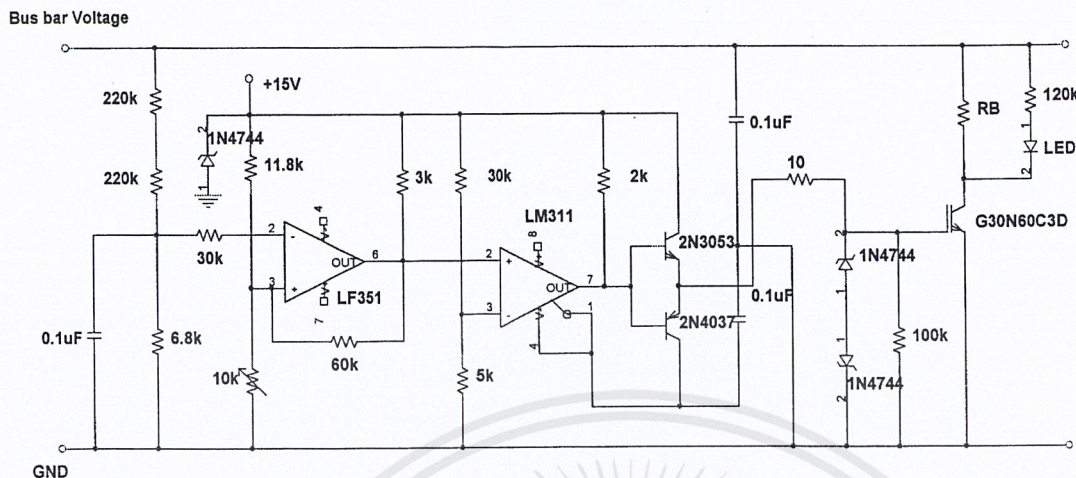
รูปที่ 7.6 วงจรแปลงสัญญาณความถี่เป็นสัญญาณแรงดัน

7.3.5 วงจรเบรกแบบไดนามิก (Dynamic Breaking Circuit)

วงจรนี้จะทำหน้าที่ในการตรวจสอบระดับแรงดันดิซี ที่มาจากวงจรเร็คติไฟเออร์ป้อนให้กับวงจรคอนเวอร์เตอร์ เนื่องจากในขณะที่เบรกระดับแรงดันดิซีจะมีค่าสูงกว่าระดับปกติและเป็นอันตรายต่ออุปกรณ์กำลังที่อาจจะเสียหายได้ ดังนั้นเมื่อแรงดันขณะที่มีแรงดันสูงเกินกว่าปกติวงจรจะทำหน้าที่ดึงพลังงานที่เกินมานั้น ส่งผ่านไปยังความต้านทานภายนอก ให้สูญเสียไปในรูปความร้อน

การทำงานของวงจรเริ่มจาก ออปแอมป์ LF351 ทำหน้าที่เปรียบเทียบระดับแรงดันในขณะที่เบรกกับแรงดันอ้างอิง ถ้าแรงดันสูงกว่าระดับแรงดันอ้างอิง ก็ส่งสัญญาณผ่านชุดขยายสัญญาณที่มีทรานซิสเตอร์ 2N2053 และ 2N4037 ขยายสัญญาณไปทริกขาเกตของสวิตช์ G30N60C3D ให้ทำงานทำให้กระแสไหลผ่านตัวต้านทาน และพลังงานก็จะสูญเสียไปในรูปความร้อนที่ตัวต้านทาน

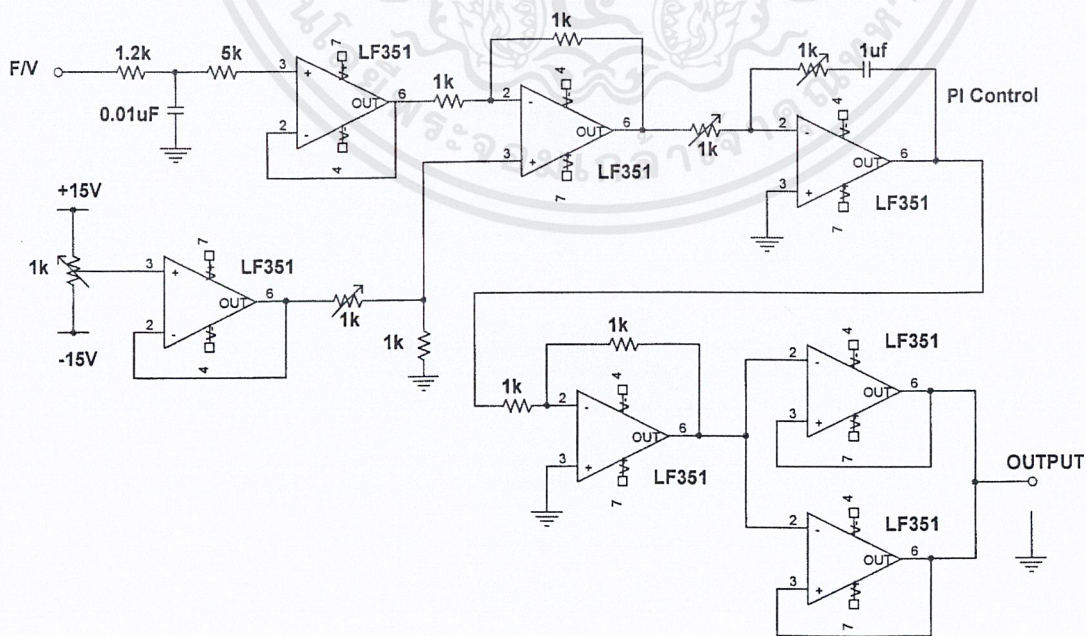
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.7 วงจรไดนามิกเบรก

7.3.6 วงจรควบคุมแบบพีไอ (PI-Control Circuit)

การทำงานของวงจรพีไอคอนโทรล จะเริ่มจากการที่รับอินพุตมาจากวงจร F/V ผ่านการกรองสัญญาณและผ่านชุดบัฟเฟอร์ จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังส่วนเปรียบเทียบสัญญาณ โดยจะเปรียบเทียบสัญญาณ F/V กับสัญญาณอ้างอิงที่สามารถปรับค่าได้ในช่วง -15 V ถึง $+15\text{ V}$ หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังส่วนของพีไอคอนโทรล ซึ่งทำหน้าที่ปรับผลตอบสนองของสัญญาณเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด สุดท้ายเอาท์พุทที่ได้ก็จะส่งไปยังส่วนขยายเกนของสัญญาณ แล้วถูกส่งป้อนกลับไปยังวงจรกำเนิดสัญญาณพีดับเบิลวีเอ็ม



รูปที่ 7.8 วงจรพีไอคอนโทรล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

การทดลองและผลการทดลอง

จากที่ได้ทำการศึกษาและออกแบบสร้างวงจรครบทุกส่วนแล้ว ก็จะทำทำการทดลองเพื่อเก็บผลแล้วนำมาวิเคราะห์ ซึ่งจะทำการทดลองในหัวข้อต่างๆดังนี้

- การทดลองหาค่า R_a , R_f โดยวิธี V-I Method
- การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว โรเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า
- การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว โรเตอร์กับกระแสฟลักซ์
- การทดสอบการทำงานและวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจรทั้งระบบ
- การทดลองนำวงจรไปขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบลูปปิด
- การทดลองนำวงจรไปขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบลูปเปิด
- การเปรียบเทียบการขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบลูปปิดและลูปเปิด
- การทดลองจำลองการขับมอเตอร์ไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม Matlab

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

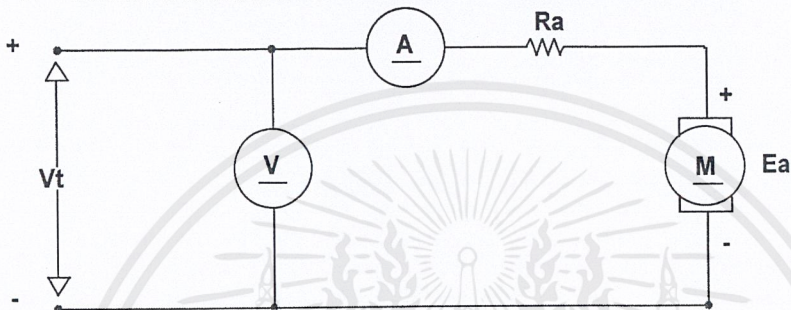
1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดแยกกระตุ้น(DC Motor NIKKI POWERPACK)
ซึ่งมีพิกัดดังนี้
พิกัดแรงดันอาร์เมเจอร์ : 130 V
พิกัดกระแสอาร์เมเจอร์: 15 A
พิกัดกำลังไฟฟ้า: 1.5 kW
พิกัดความเร็ว: 1800 rpm
พิกัดแรงดันขดลวดฟิลด์: 180 V
2. Digital Storage Oscilloscope YOGOGAWA DL1520
3. 1- ϕ Variac 0-260 V 5A
4. Multimeter SANWA YX361-TR
5. DC Voltmeter
6. DC Ampmeter
7. Ecoder
8. Tacho-meter
9. ชุดทดสอบภาระ ประกอบตัว Torque-meter ,แผงหลอดไฟ, สายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.1 การทดลองหาค่า R_a, R_f โดยวิธี V-I Method

8.1.1 ขั้นตอนการทดลองหาค่า R_a

1. ทำการต่อวงจรการทดลองตามรูป 8.1 ซึ่งจะป้อนแรงดันให้เฉพาะในส่วนของขดอาร์เมเจอร์ ซึ่งแรงดันที่ป้อนให้กับขดฟิลด์จะกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์
2. ป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่วงจร โดยการเพิ่มแรงดันที่ป้อนเข้าจนถึงค่าที่ตั้งไว้
3. ทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า และกระแสอาร์เมเจอร์

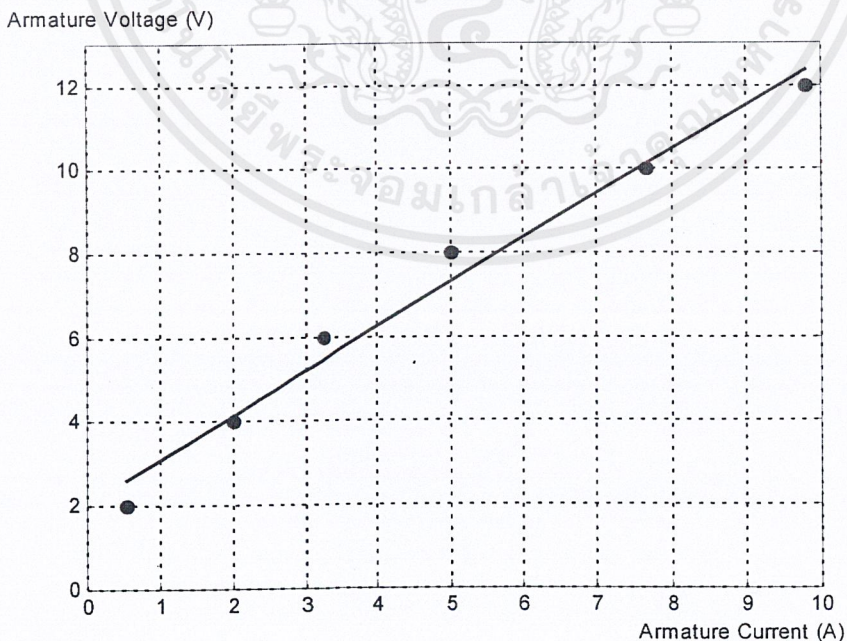


รูปที่ 8.1 การต่อวงจรทดลองเพื่อหาค่า R_a

ผลการทดลอง

V_t (V)	2	4	6	8	10	12
I_a (A)	0.55	2.00	3.23	5.00	7.65	9.80

ตารางที่ 8.1 ค่าแรงดันและกระแสอาร์เมเจอร์



รูปที่ 8.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสอาร์เมเจอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการคำนวณหาค่า R_a จาก

$$R_a = \frac{\Delta V_t}{\Delta I_a} \quad (8.1)$$

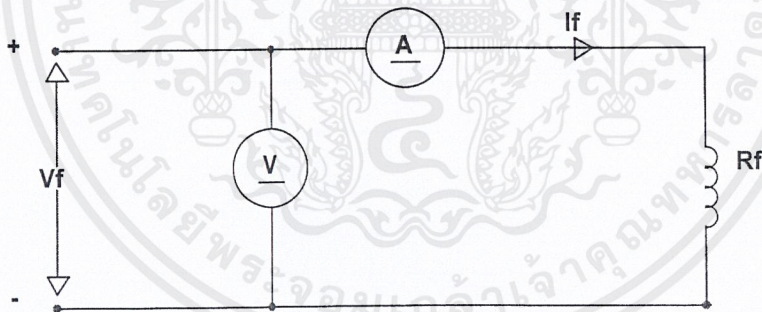
จะได้

$$R_a = \frac{10 - 4}{7.65 - 2.00}$$

$$R_a = 1.06 \ \Omega$$

8.1.2 ขั้นตอนการทดลองหาค่า R_f

1. ทำการต่อวงจรการทดลองตามรูป 8.3 ซึ่งจะป้อนแรงดันให้เฉพาะในส่วนของขดฟิลต์ ซึ่งแรงดันที่ป้อนให้กับขดอาร์เมเจอร์จะกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์
2. ป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่วงจร โดยการเพิ่มแรงดันที่ป้อนเข้าจนถึงค่าที่ตั้งไว้
3. ทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า และกระแสฟิลต์

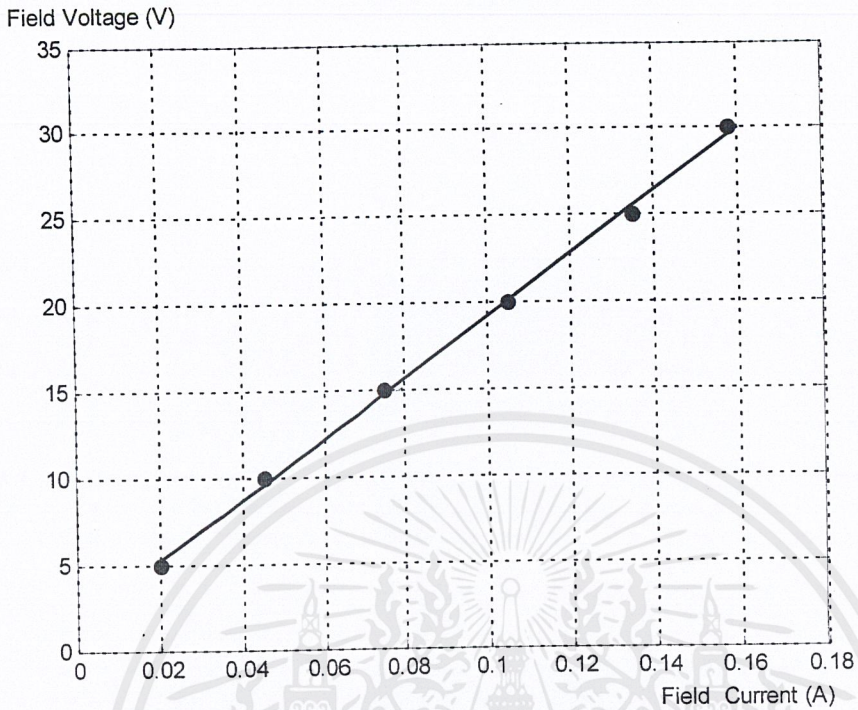


รูปที่ 8.3 การต่อวงจรทดลองเพื่อหาค่า R_f

ผลการทดลอง

V_f (V)	5	10	15	20	25	30
I_f (A)	0.020	0.045	0.075	0.105	0.135	0.158

ตารางที่ 8.2 ค่าแรงดันและกระแสฟิลต์



รูปที่ 8.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสฟิลด์

ทำการคำนวณหาค่า R_f จาก

$$R_f = \frac{\Delta V_f}{\Delta I_f} \quad (8.2)$$

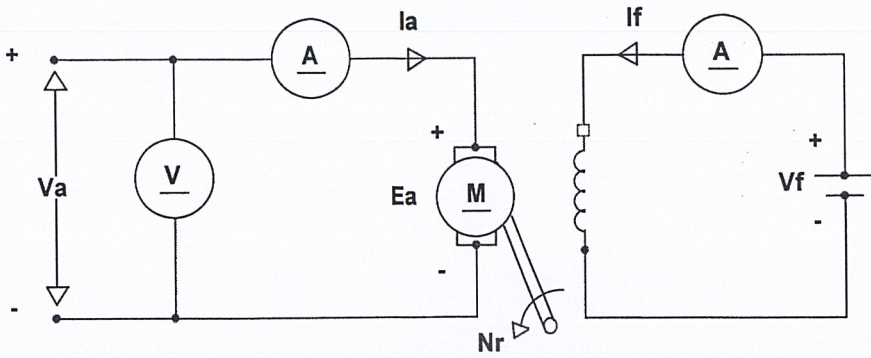
จะได้

$$R_f = \frac{25 - 10}{0.135 - 0.045}$$

$$R_f = 166.67 \text{ } \Omega$$

8.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วโรเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการต่อวงจรการทดลองตามรูป 8.5 โดยป้อนแรงดันไฟฟ้าให้ขดลวดฟิลด์ คงที่ที่ค่าพิกัด 180 V
2. ทำการปรับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเพื่อให้ได้ความเร็วรอบตามที่กำหนด
3. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าและค่ากระแสอาร์เมเจอร์ที่ความเร็วรอบต่างๆ

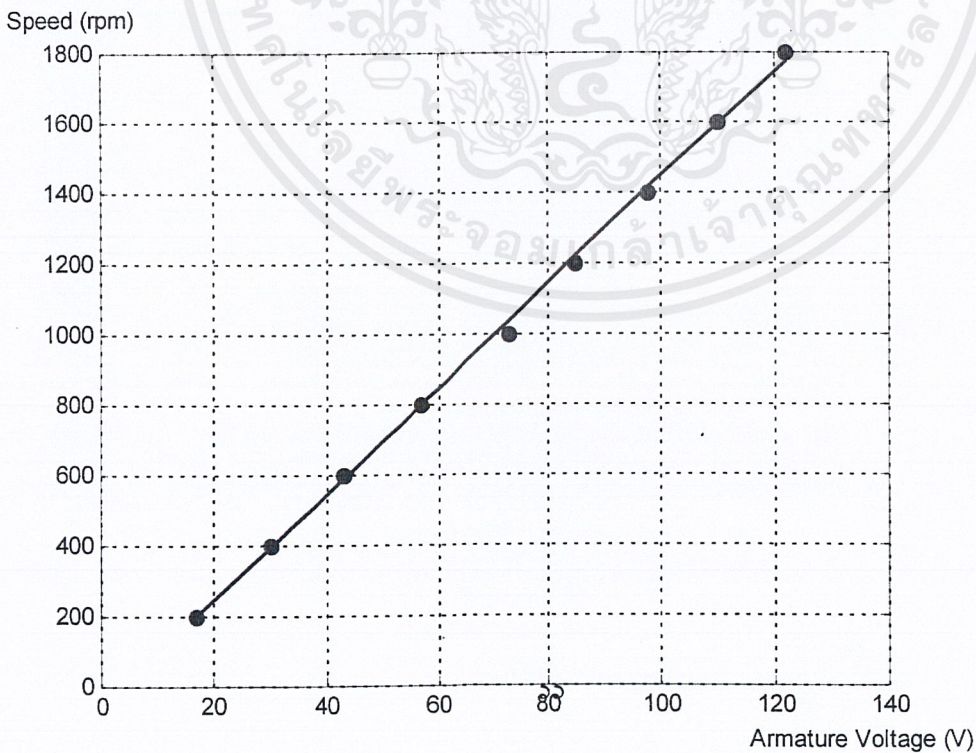


รูปที่ 8.5 การต่อวงจรทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วโรเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขณะไร้ภาระ

ผลการทดลอง

N_r (rpm)	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800
V_t (V)	17	30	43	57	73	85	98	110	122
I_a (A)	0.48	0.55	0.62	0.70	0.74	0.77	0.80	0.84	0.86

ตารางที่ 8.3 ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสอาร์เมเจอร์ที่ความเร็วรอบต่างๆ



รูปที่ 8.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันที่ป้อนเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.3 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วโรเตอร์กับกระแสฟิลด์

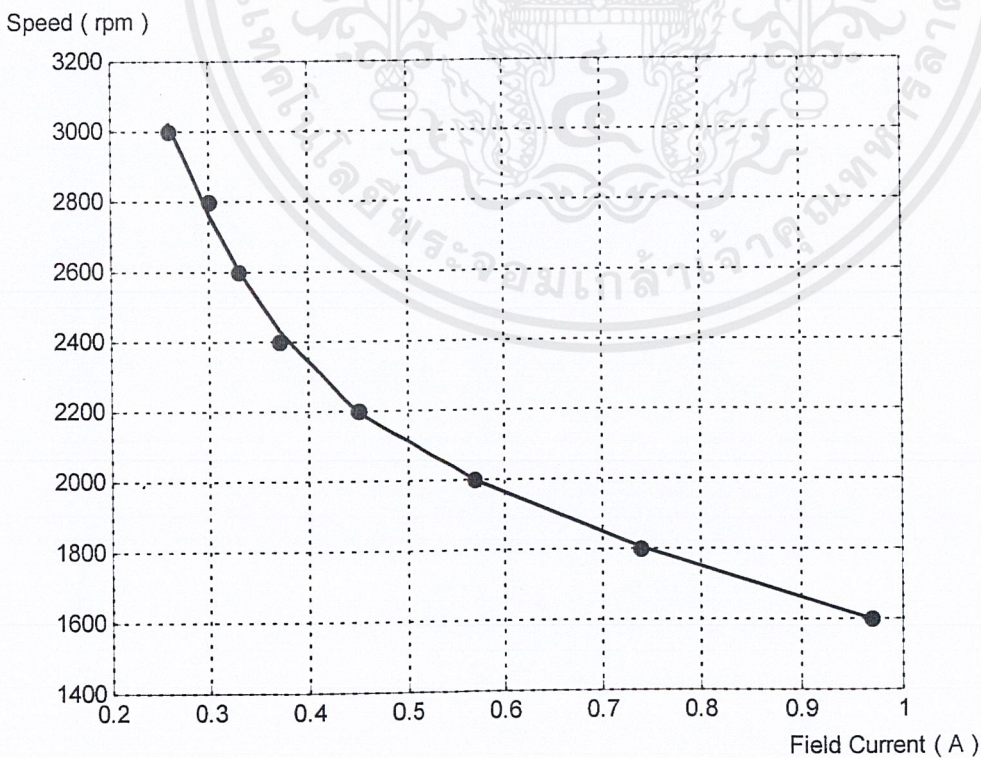
ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการต่อวงจรการทดลองตามรูป 8.5 โดยป้อนแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าให้มีค่าคงที่ที่พิกัด 130 V
2. ทำการปรับแรงดันขดลวดฟิลด์เพื่อให้ได้ความเร็วรอบตามที่กำหนด
3. บันทึกค่าแรงดันขดลวดฟิลด์และค่ากระแสฟิลด์ที่ความเร็วรอบต่างๆ

ผลการทดลอง

$N_r(\text{rpm})$	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
$V_f(\text{V})$	192	150	118	92	76	68	60	54
$I_f(\text{A})$	0.97	0.74	0.57	0.45	0.37	0.33	0.30	0.26

ตารางที่ 8.4 ค่าแรงดันขดลวดฟิลด์และกระแสฟิลด์ที่ความเร็วรอบต่างๆ



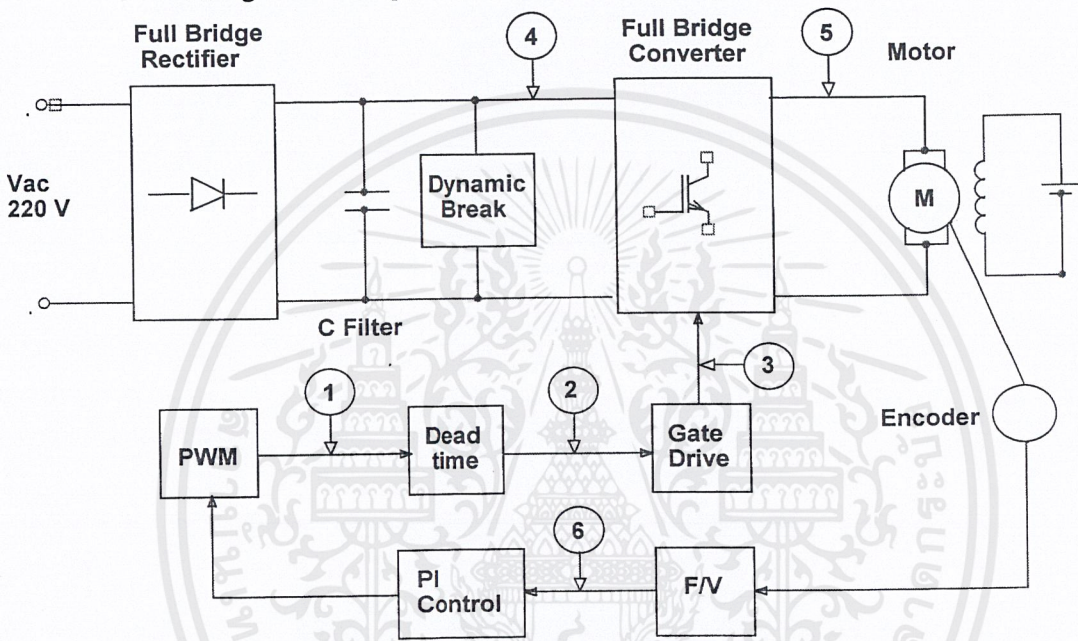
รูปที่ 8.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสฟิลด์

8.4 การทดสอบการทำงาน และวัดสัญญาณเอาต์พุตทั้งระบบ

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการจัดวงจรการทดลองทั้งระบบตามรูป 8.8
2. ทำการวัดสัญญาณและบันทึกค่าสัญญาณตามลำดับหมายเลขโดยใช้ Digital Storage Oscilloscope

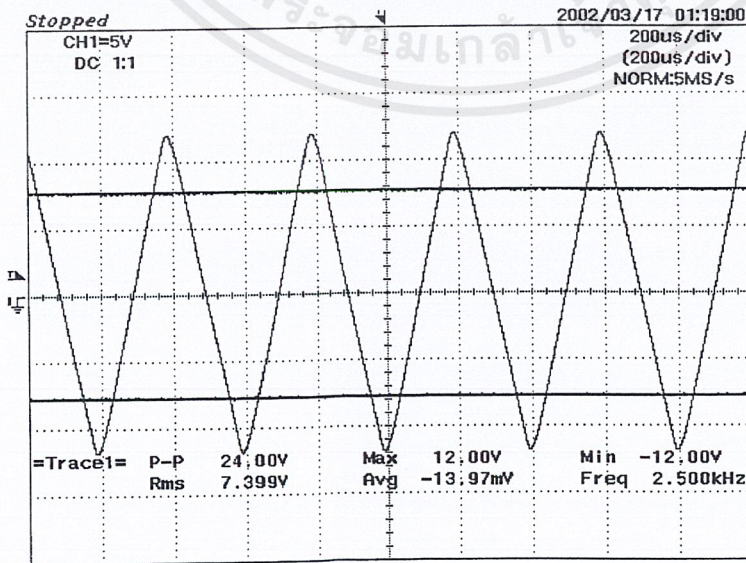
Storage Oscilloscope



รูปที่ 8.8 ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรง

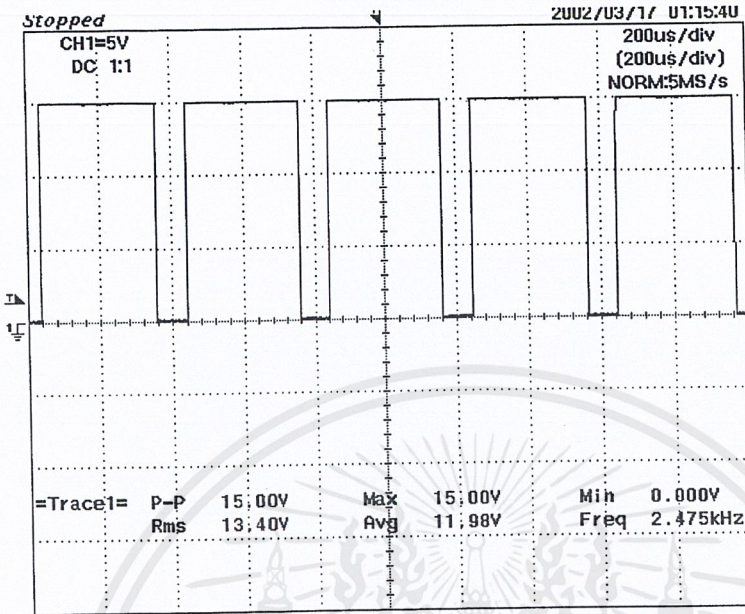
ผลการทดลอง

8.4.1 ผลจากการวัดสัญญาณในส่วนของวงจรสร้างสัญญาณพีดีบีลิวเอ็ม

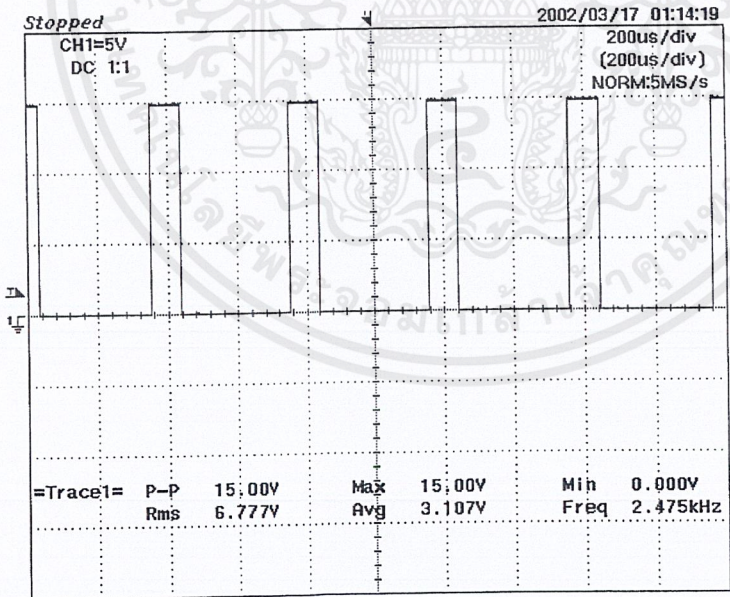


รูปที่ 8.9 การสร้างสัญญาณ PWM โดยการนำสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเนื้อหาที่ละเอียดและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

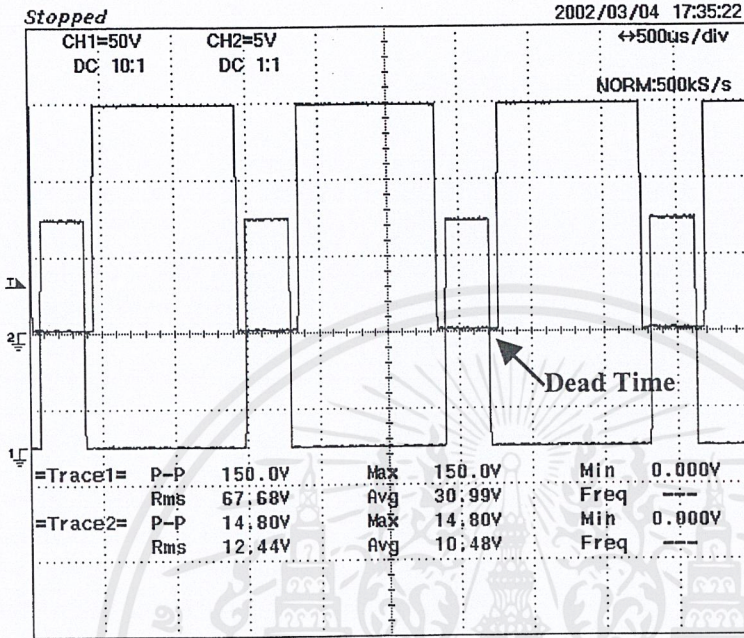


รูปที่ 8.10 สัญญาณเอาต์พุต PWM ชุดที่ 1 ที่ความถี่ 5 kHz



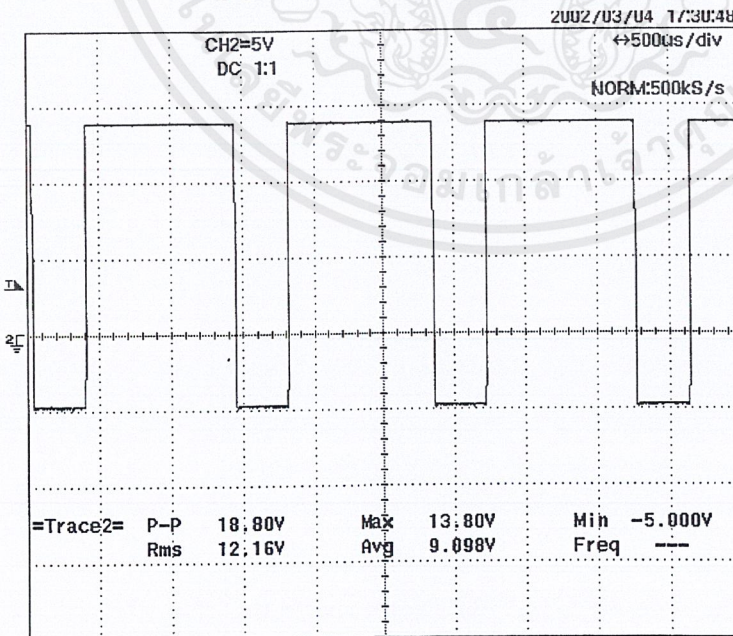
รูปที่ 8.11 สัญญาณเอาต์พุต PWM ชุดที่ 2 ที่ความถี่ 5 kHz

8.4.2 ผลจากการวัดสัญญาณในส่วนของวงจรเดาท์ไทม์ (Dead Time)



รูปที่ 8.12 สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรเดาท์ไทม์ที่มีช่วงเวลาเดาท์ไทม์เป็น 8 μ S

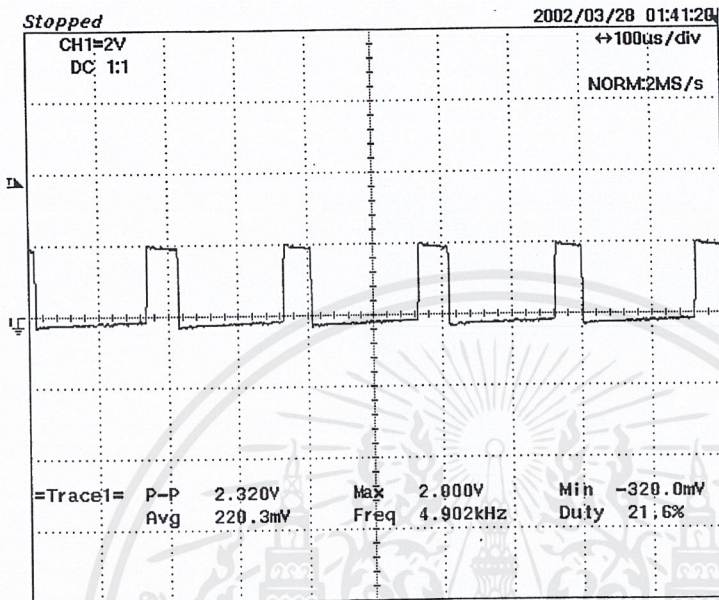
8.4.3 ผลจากการวัดสัญญาณในส่วนของวงจรขับเกต (Gate Drive)



รูปที่ 8.13 สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรขับเกต

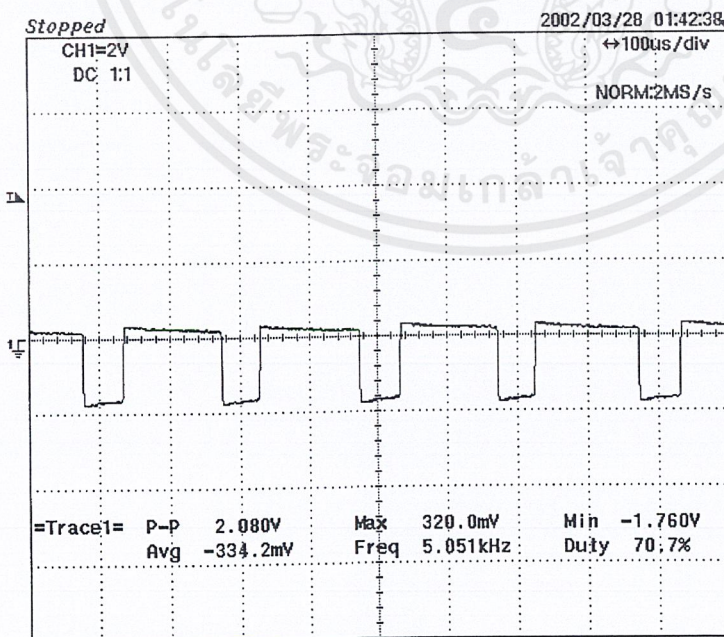
8.4.4 ผลจากการวัดสัญญาณในส่วนคอนเวอร์เตอร์

8.4.4.1 แรงดันตกคร่อมอาร์เมเจอร์ในทิศทางฟอร์เวิร์ด



รูปที่ 8.14 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตคร่อมอาร์เมเจอร์ในทิศทางฟอร์เวิร์ด

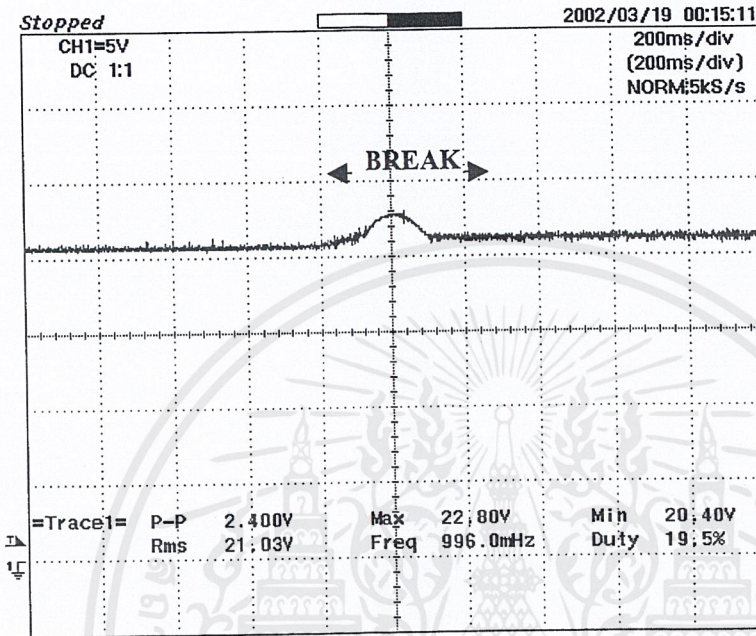
8.4.4.2 แรงดันตกคร่อมอาร์เมเจอร์ในทิศทางรีเวิร์ส



รูปที่ 8.15 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตคร่อมอาร์เมเจอร์ในทิศทางรีเวิร์ส

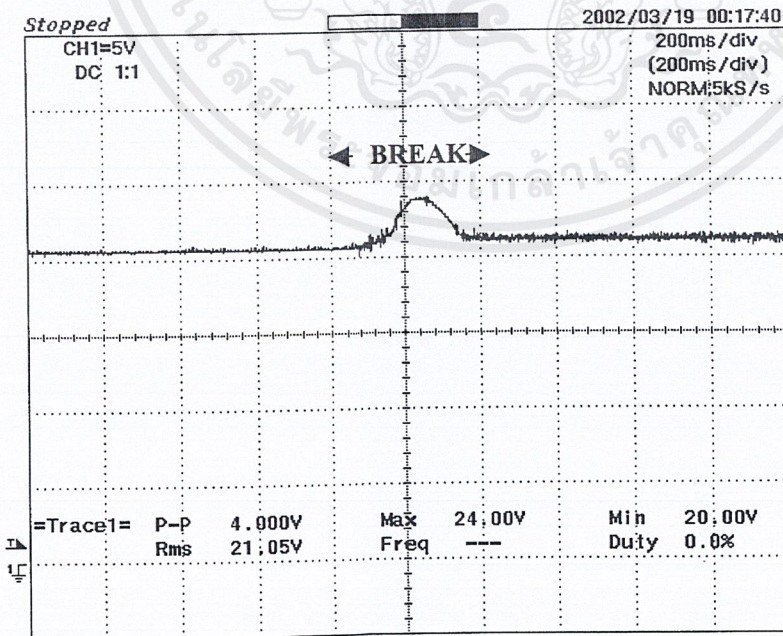
8.4.4.3 สัญญาณขณะเบรกมอเตอร์

ฟอร์เวิร์ดเบรกที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที



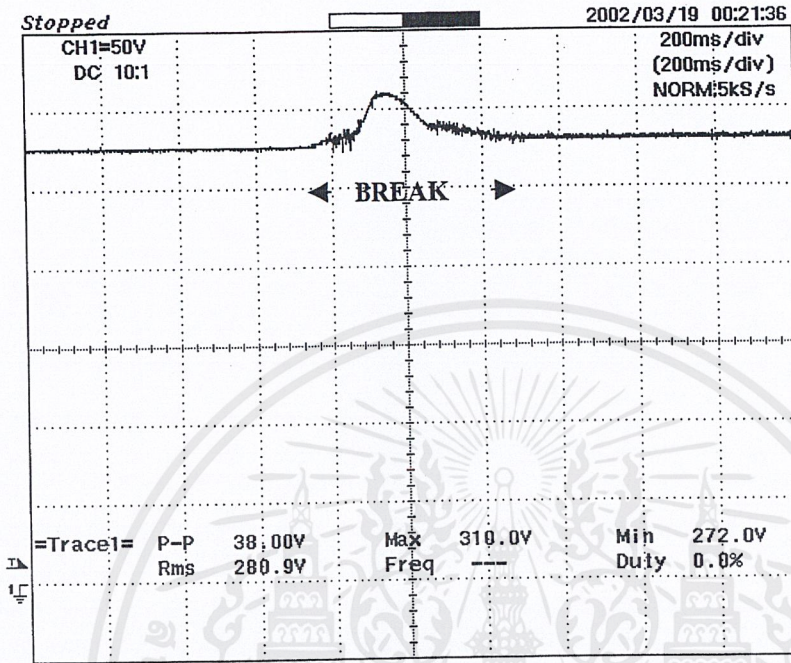
รูปที่ 8.16 สัญญาณแรงดันตกคร่อมบัสบาร์ขณะฟอร์เวิร์ดเบรกที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที

รีเวิร์สเบรกที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที



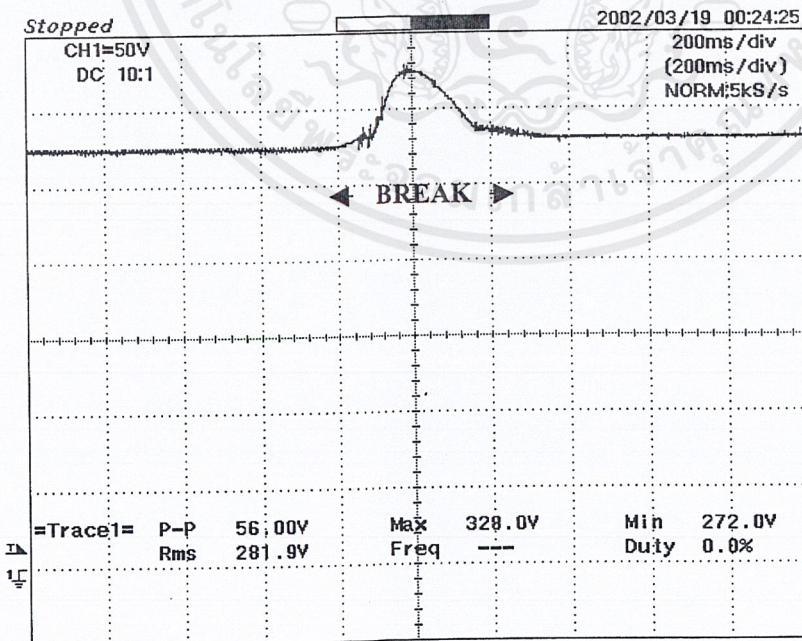
รูปที่ 8.17 สัญญาณแรงดันตกคร่อมบัสบาร์ขณะรีเวิร์สเบรกที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที

ฟอร์เวิร์ดเบรกที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที



รูปที่ 8.18 สัญญาณแรงดันตกคร่อมบัสบาร์ขณะฟอร์เวิร์ดเบรกที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที

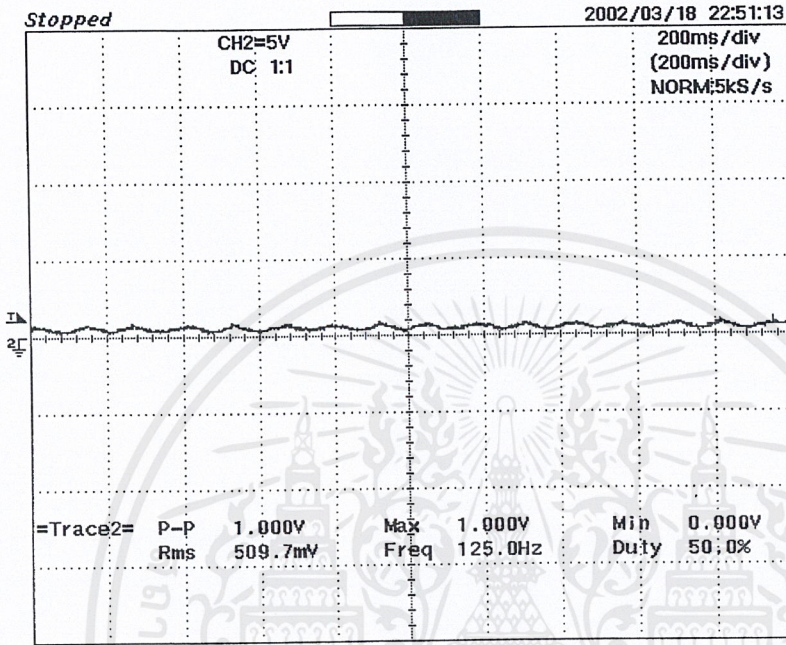
รีเวิร์สเบรกที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที



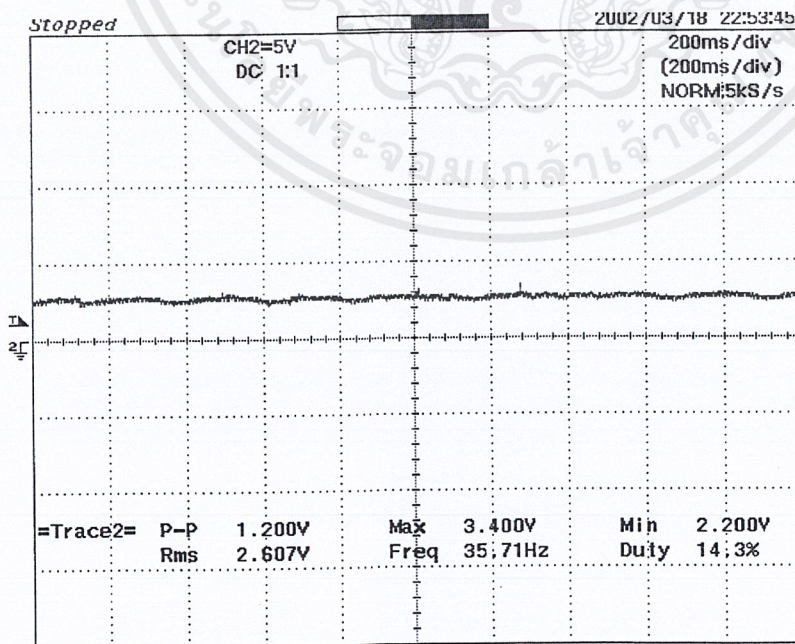
รูปที่ 8.19 สัญญาณแรงดันตกคร่อมบัสบาร์ขณะรีเวิร์สเบรกที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.4.5 ผลจากการวัดสัญญาณกระแสอาร์เมเจอร์ขณะไม่มีโหลดเทียบกับขณะมีโหลด
กระแสอาร์เมเจอร์ขณะมอเตอร์หมุนในทิศฟอร์เวิร์ดที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที

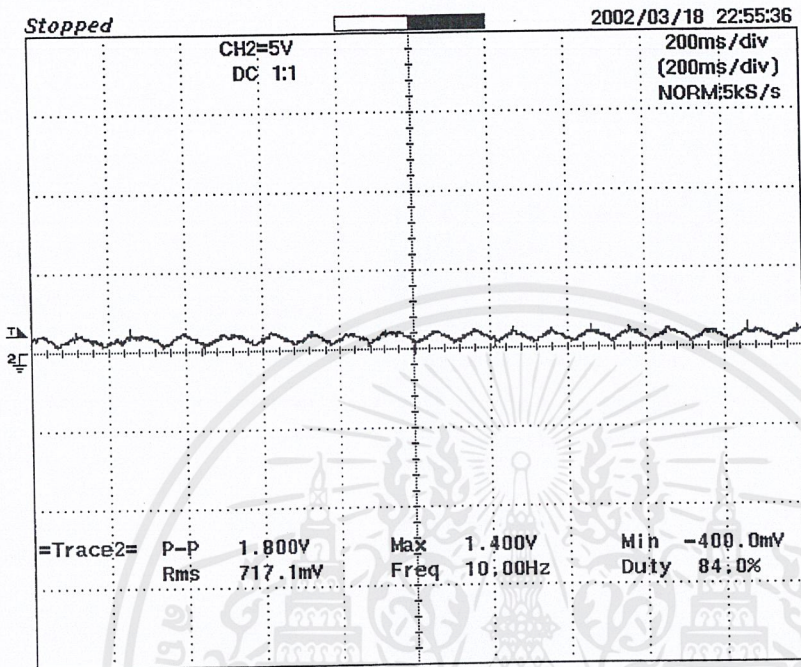


รูปที่ 8.20 สัญญาณกระแสอาร์เมเจอร์ที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาทีขณะไม่มีโหลด

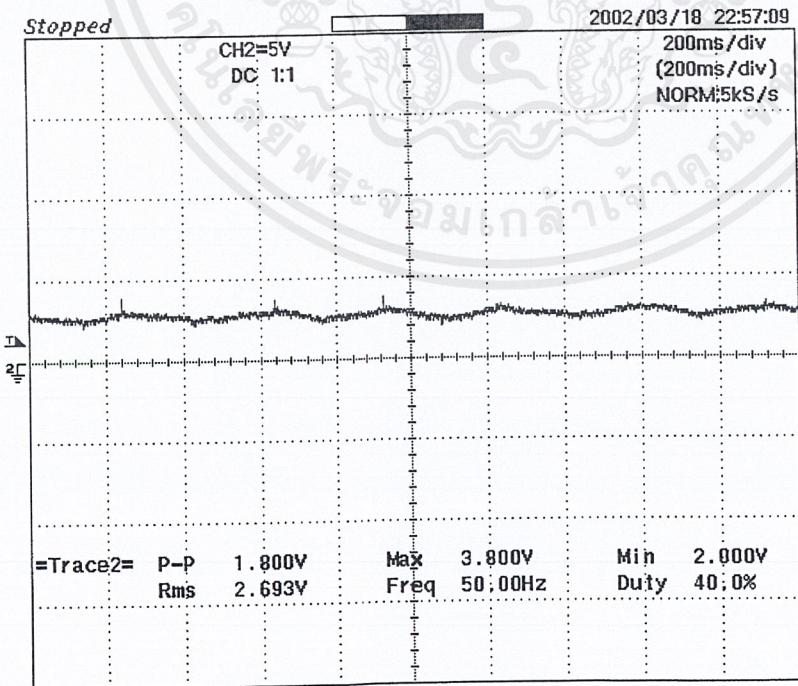


รูปที่ 8.21 สัญญาณกระแสอาร์เมเจอร์ที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาทีขณะมีโหลดที่ 2.0 N.m
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสอาร์เมเจอร์ขณะมอเตอร์หมุนในทิศทางที่เร็วที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที



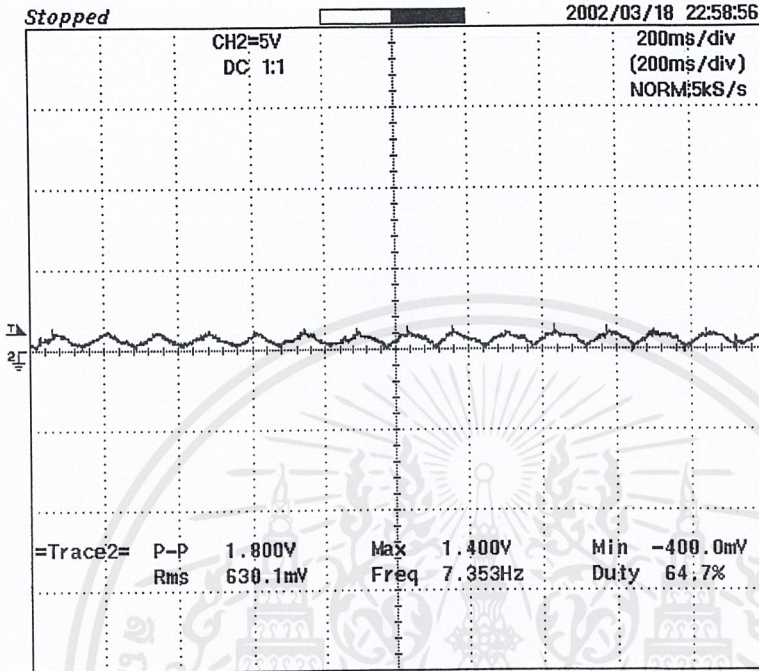
รูปที่ 8.22 สัญญาณกระแสอาร์เมเจอร์ที่ความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาทีขณะไม่มีโหลด



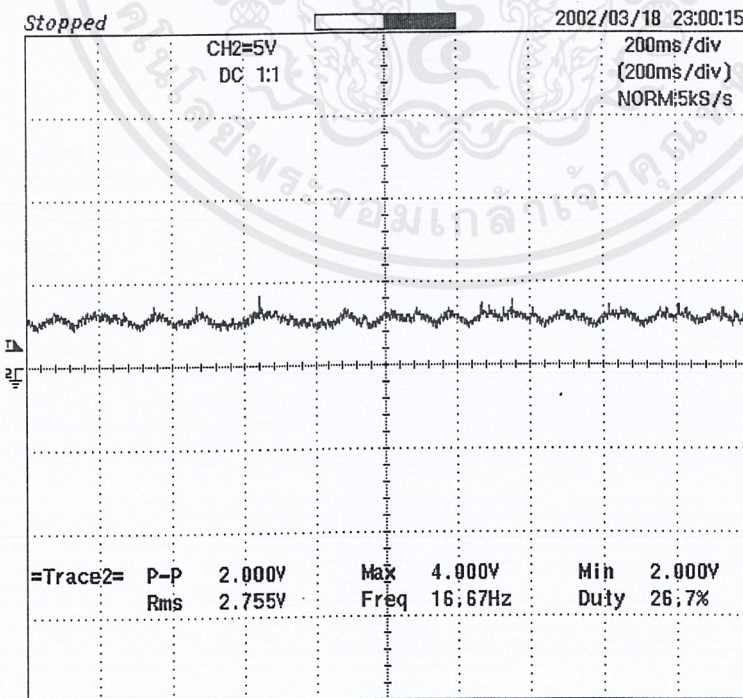
รูปที่ 8.23 สัญญาณกระแสอาร์เมเจอร์ที่ความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาทีขณะมีโหลดที่ 2.0 N.m

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสอาร์เมเจอร์ขณะมอเตอร์หมุนในทิศทางที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที



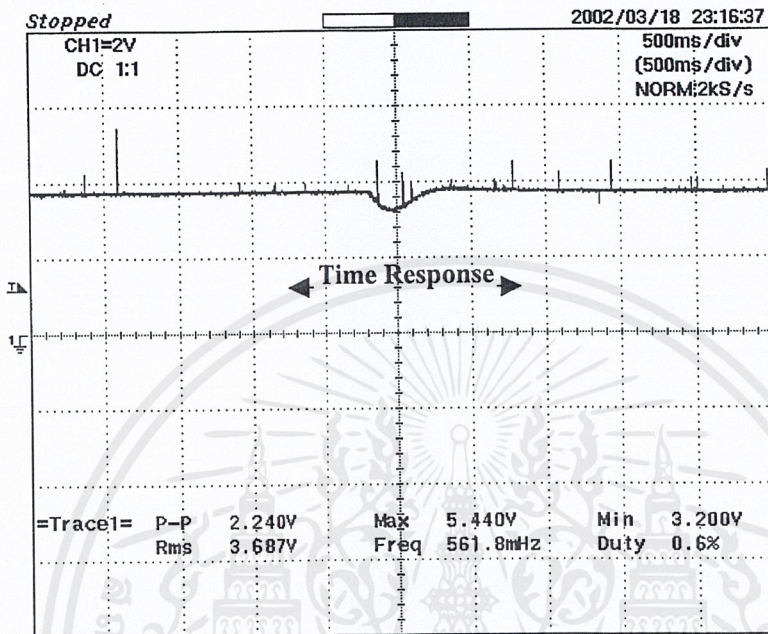
รูปที่ 8.24 สัญญาณกระแสอาร์เมเจอร์ที่ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาทีขณะไม่มีโหลด



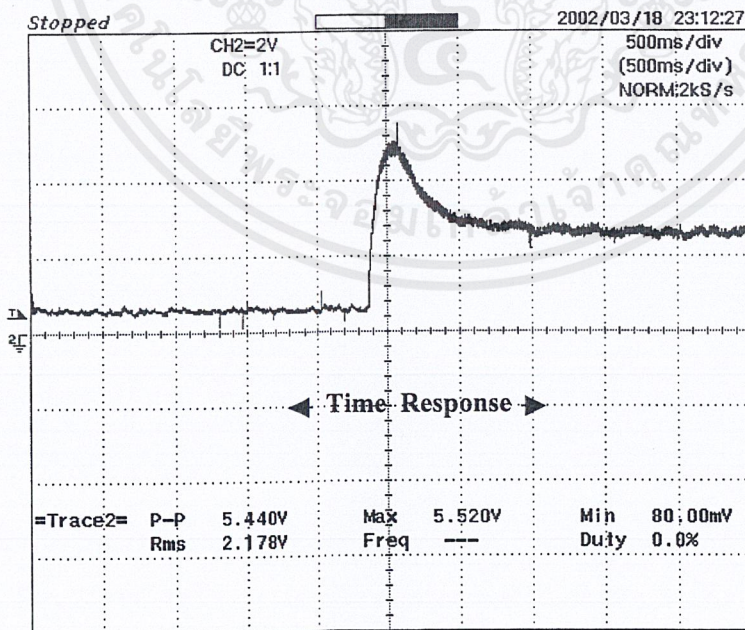
รูปที่ 8.25 สัญญาณกระแสอาร์เมเจอร์ที่ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาทีขณะมีโหลดที่ 2.0 N.m
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.4.6 ผลจากการวัดสัญญาณผลตอบสนองของคอนโทรลเลอร์

ขณะขับมอเตอร์ที่มีโหลด 2.0 N.m ที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที

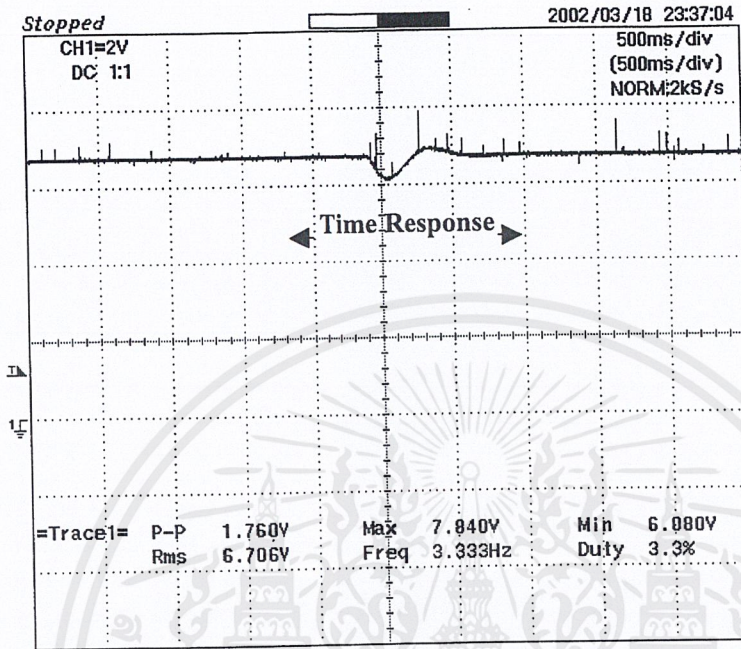


รูปที่ 8.26 สัญญาณเอาต์พุตของ F/V ในขณะขับโหลดที่ 2.0 N.m ที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที

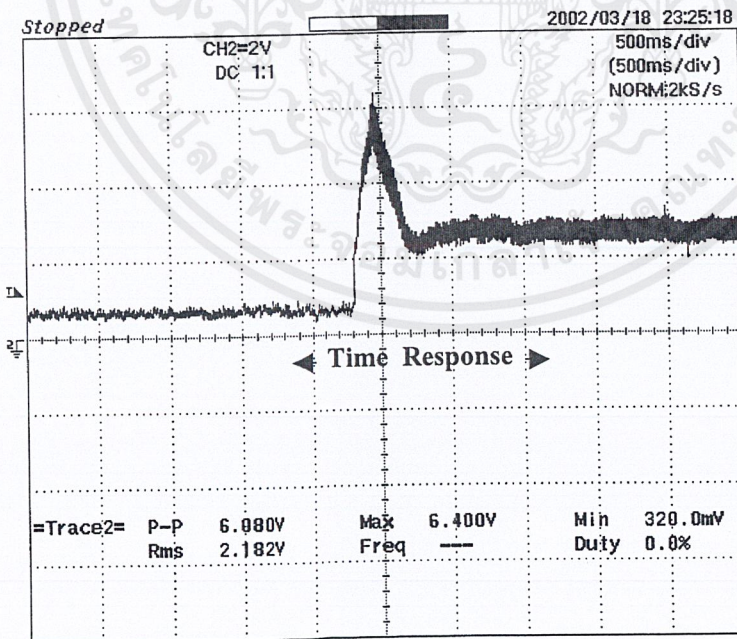


รูปที่ 8.27 สัญญาณกระแสอาร์เมเจอร์ในทิสฟลอร์เวิร์ดในขณะขับโหลดที่ 2.0 N.m ที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที

ขณะขับเคลื่อนที่มีโหลด 2.0 N.m ที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที

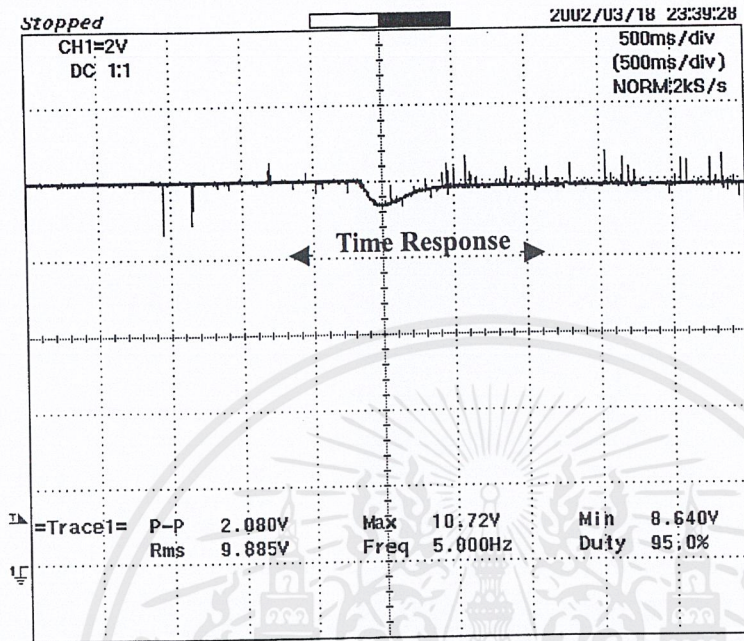


รูปที่ 8.28 สัญญาณเอาต์พุตของ F/V ในขณะขับโหลดที่ 2.0 N.m ที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที

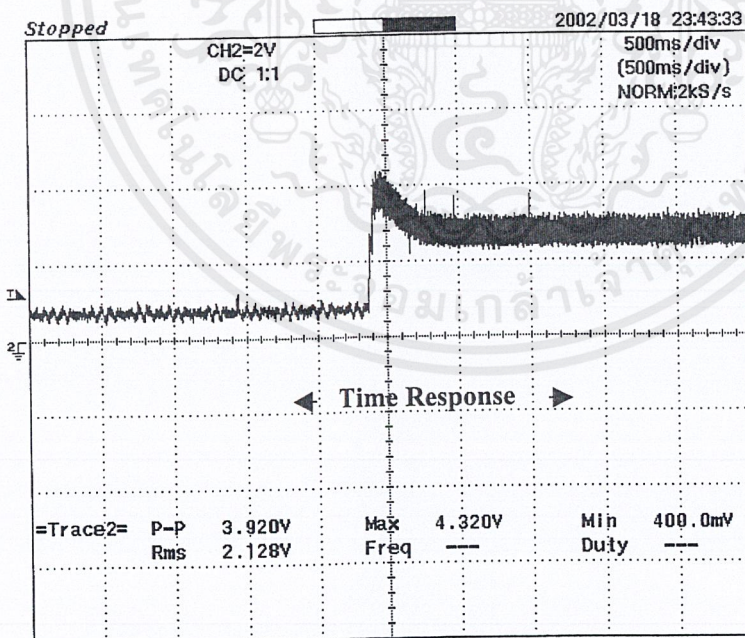


รูปที่ 8.29 สัญญาณกระแสอาร์เมเจอร์ในทิสฟอว์เวิร์ดในขณะขับโหลดที่ 2.0 N.m ที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที

ขณะขับมอเตอร์ที่มีโหลด 2.0 N.m ที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที



รูปที่ 8.30 สัญญาณเอาต์พุตของ F/V ในขณะที่ขับโหลดที่ 2.0 N.m ที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที



รูปที่ 8.31 สัญญาณกระแสอาร์มเจอร์ในทิสฟวร์เวิร์ดในขณะที่ขับโหลดที่ 2.0 N.m ที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที

8.5 การทดลองหาค่าความเร็วของมอเตอร์ขณะขับโหลดแบบรูปเปิดที่โหลดค่าต่างๆ

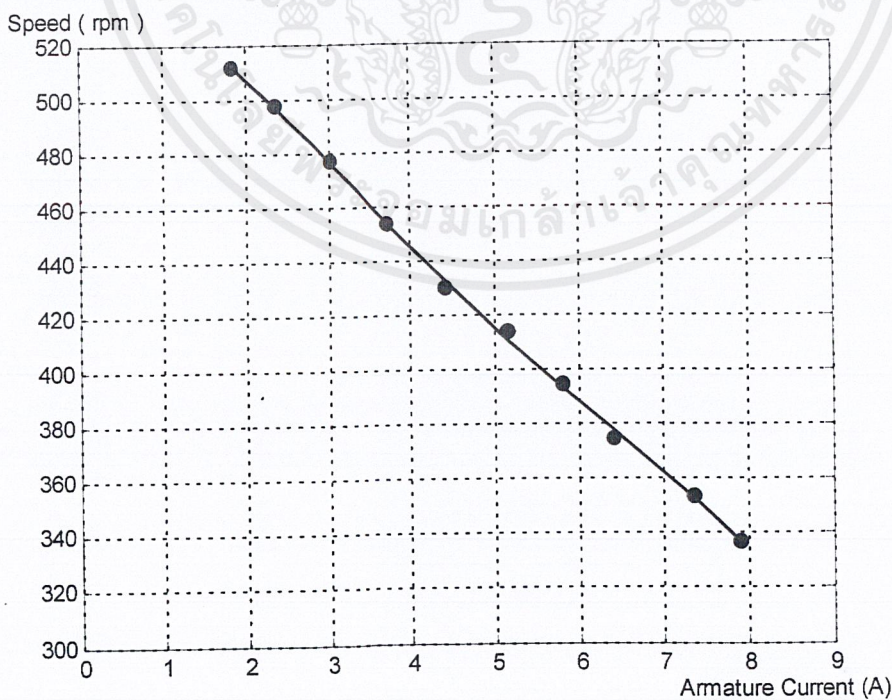
ขั้นตอนการทดลอง

1. นำวงจรไปขับมอเตอร์แบบรูปเปิดที่ความเร็ว 600 , 900 , 1200 , 1500 , 1800 รอบต่อนาทีตามลำดับ
2. ขณะที่ยกมอเตอร์ที่ความเร็วต่างๆ ทำการใส่โหลดขนาด 0.3 , 0.6 , 0.9 , 1.2 , 1.5 , 1.8 , 2.1 , 2.4 และ 2.7 N.m ตามลำดับ
3. ขณะที่ทำกรใส่โหลดที่ค่าต่างๆ ทำการบันทึกค่าความเร็วรอบ , แรงดันอาร์เมเจอร์ และกระแสอาร์เมเจอร์
3. ทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบต่อกระแส

8.5.1 ที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที $V_f = 180 \text{ V}$, $V_a = 40 \text{ V}$, $I_a = 0.89 \text{ A}$

T (N.m)	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7
N (rpm)	512	498	477	454	430	414	395	375	354
V_a (V)	38.8	37.0	36.6	35.0	34.0	32.8	32.0	31.2	30.5
I_a (A)	1.81	2.34	3.00	3.70	4.40	5.15	5.80	6.40	7.35

ตารางที่ 8.5 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาทีที่ค่าโหลดต่างๆแบบรูปเปิด



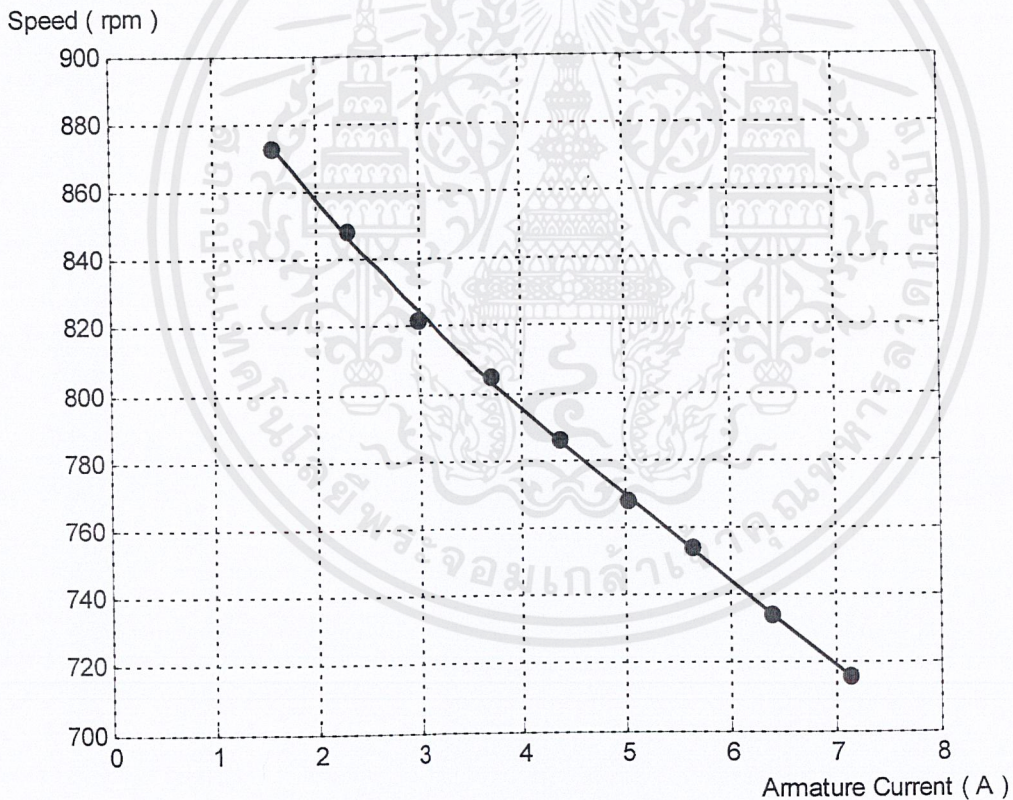
รูปที่ 8.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยขอสงวนสิทธิ์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.5.2 ที่ความเร็ว 900 รอบต่อนาที $V_f = 180 \text{ V}$, $V_a = 61.5 \text{ V}$, $I_a = 1.03 \text{ A}$

T (N.m)	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7
N (rpm)	873	848	822	805	786	768	754	734	716
V_a (V)	61.0	59.8	59.0	58.4	57.8	57.2	56.8	56.2	55.8
I_a (A)	1.58	2.30	2.98	3.72	4.38	5.02	5.63	6.39	7.13

ตารางที่ 8.6 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความเร็ว 900 รอบต่อนาทีที่ค่าโหลดต่างๆแบบลูปเปิด

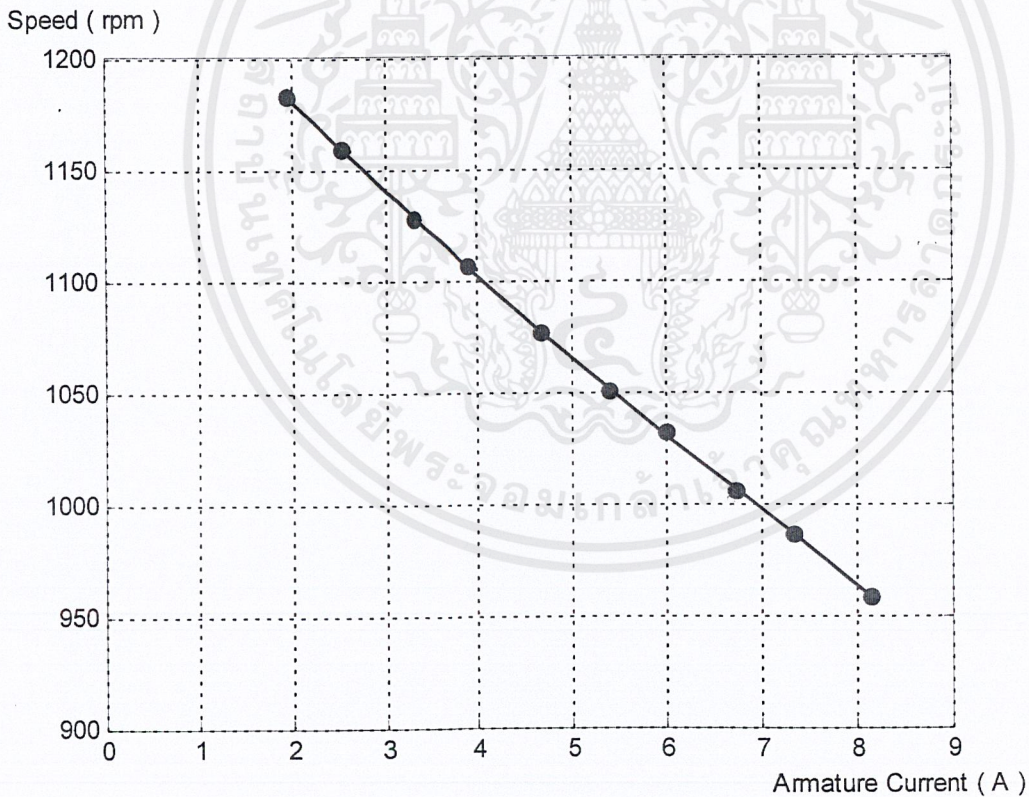


รูปที่ 8.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์
ขณะขับโหลดค่าต่างๆแบบลูปเปิด ที่ความเร็ว 900 รอบต่อนาที

8.5.3 ที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที $V_f = 180 \text{ V}$, $V_a = 83.0 \text{ V}$, $I_a = 1.28 \text{ A}$

T (N.m)	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7
N (rpm)	1183	1159	1128	1107	1077	1050	1032	1006	986
V_a (V)	82.0	80.9	79.8	79.0	77.5	76.2	75.5	74.5	73.8
I_a (A)	1.93	2.52	3.28	3.88	4.67	5.40	6.01	6.73	7.33

ตารางที่ 8.7 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาทีที่ค่าโหลดต่างๆแบบลูปเปิด



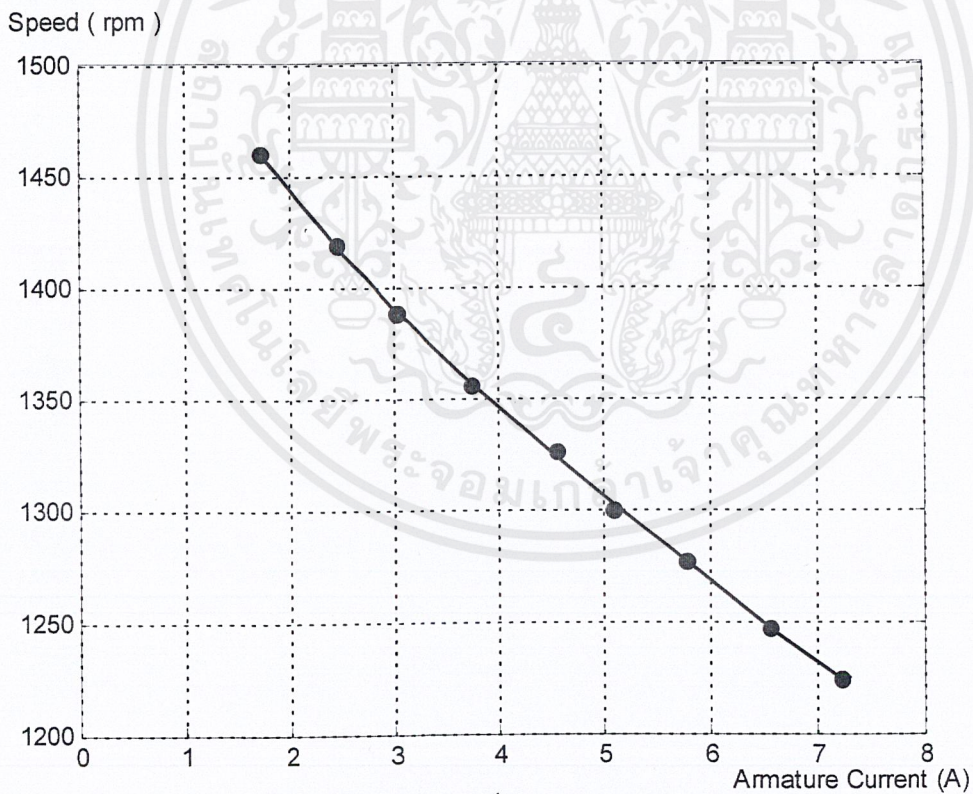
รูปที่ 8.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์

ขณะจับโหลดค่าต่างๆแบบลูปเปิด ที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที

8.5.4 ที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที $V_f = 180 \text{ V}$, $V_a = 104.0 \text{ V}$, $I_a = 1.08 \text{ A}$

T (N.m)	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7
N (rpm)	1460	1419	1388	1356	1326	1300	1277	1247	1224
V_a (V)	102.0	100.0	99.0	98.0	96.0	95.0	94.0	93.0	92.0
I_a (A)	1.72	2.45	3.02	3.75	4.56	5.10	5.77	6.56	7.22

ตารางที่ 8.8 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาทีที่ค่าโหลดต่างๆแบบลูเปิด

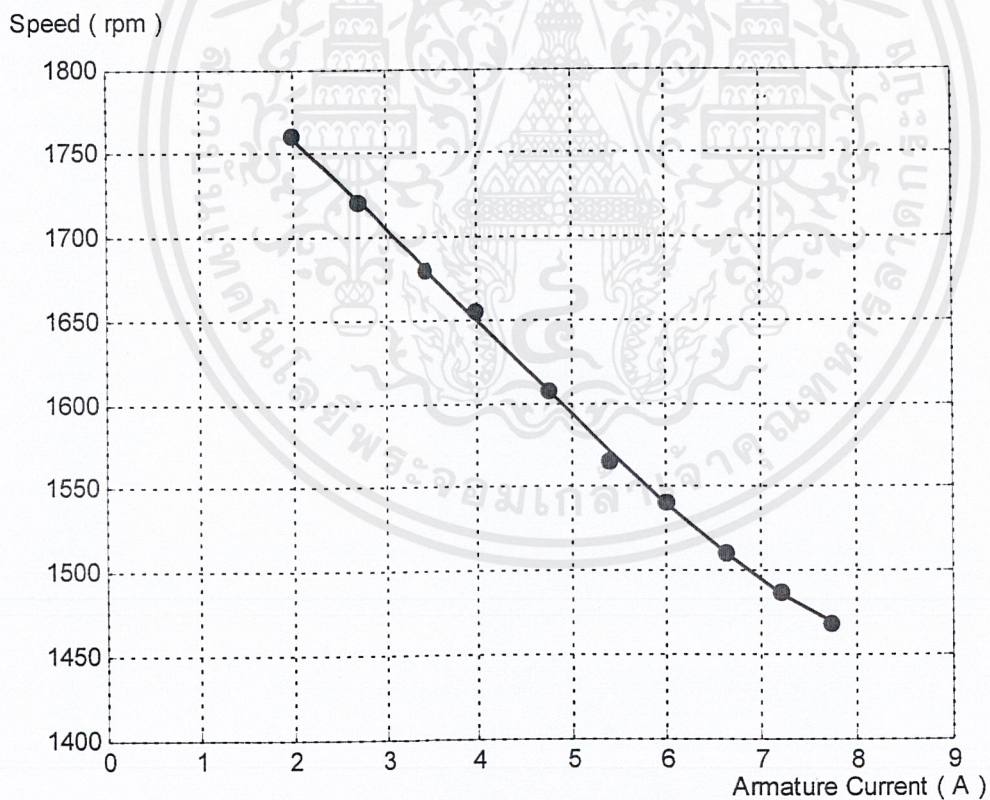


รูปที่ 8.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์
ขณะขับ โหลดค่าต่างๆแบบลูเปิด ที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที

8.5.5 ที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที $V_f = 180 \text{ V}$, $V_a = 124.0 \text{ V}$, $I_a = 1.37 \text{ A}$

T (N.m)	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7
N (rpm)	1761	1721	1680	1655	1608	1566	1541	1511	1487
V_a (V)	122.0	119.8	119.0	118.0	114.0	112.0	111.0	110.0	108.0
I_a (A)	1.98	2.68	3.42	3.98	4.75	5.41	6.01	6.62	7.21

ตารางที่ 8.9 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาทีที่ค่าโหลดต่างๆแบบลูปเปิด



รูปที่ 8.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์

ขณะขับ โหลดค่าต่างๆแบบลูปเปิด ที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที

8.6 การทดลองหาค่าความเร็วของมอเตอร์ขณะขับโหลดแบบลูปิดที่โหลดค่าต่างๆ

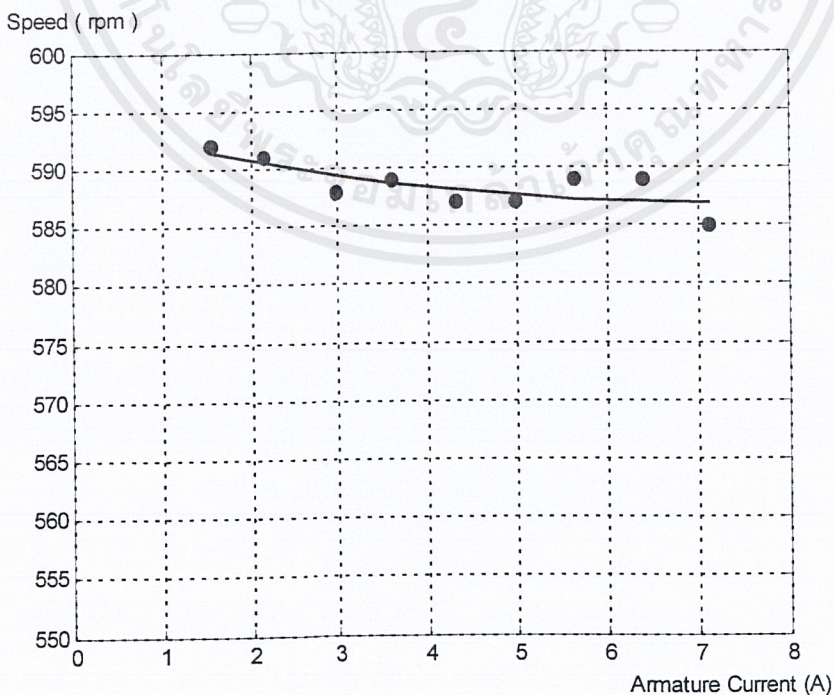
ขั้นตอนการทดลอง

1. นำวงจรไปขับมอเตอร์แบบลูปิดที่ความเร็ว 600 , 900 , 1200 , 1500 , 1800 รอบต่อนาทีตามลำดับ
2. ขณะที่ยกน้ำหนักที่ความเร็วต่างๆ ทำการใส่โหลดขนาด 0.3 , 0.6 , 0.9 , 1.2 , 1.5 , 1.8 , 2.1 , 2.4 และ 2.7 N.m ตามลำดับ
3. ขณะที่ทำการใส่โหลดที่ค่าต่างๆ ทำการบันทึกค่าความเร็วรอบ , แรงดันอาร์มีเจอร์ และกระแสอาร์มีเจอร์
4. ทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบต่อกระแส

8.6.1 ที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที $V_f = 180 \text{ V}$, $V_a = 43.2 \text{ V}$, $I_a = 0.92 \text{ A}$

T (N.m)	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7
N (rpm)	592	591	588	589	587	587	589	589	585
V_a (V)	43.8	44.0	45.2	45.3	46.1	46.2	47.9	47.8	48.0
I_a (A)	1.53	2.12	2.97	3.61	4.32	4.99	5.63	6.38	7.11

ตารางที่ 8.10 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาทีที่ค่าโหลดต่างๆแบบลูปิด

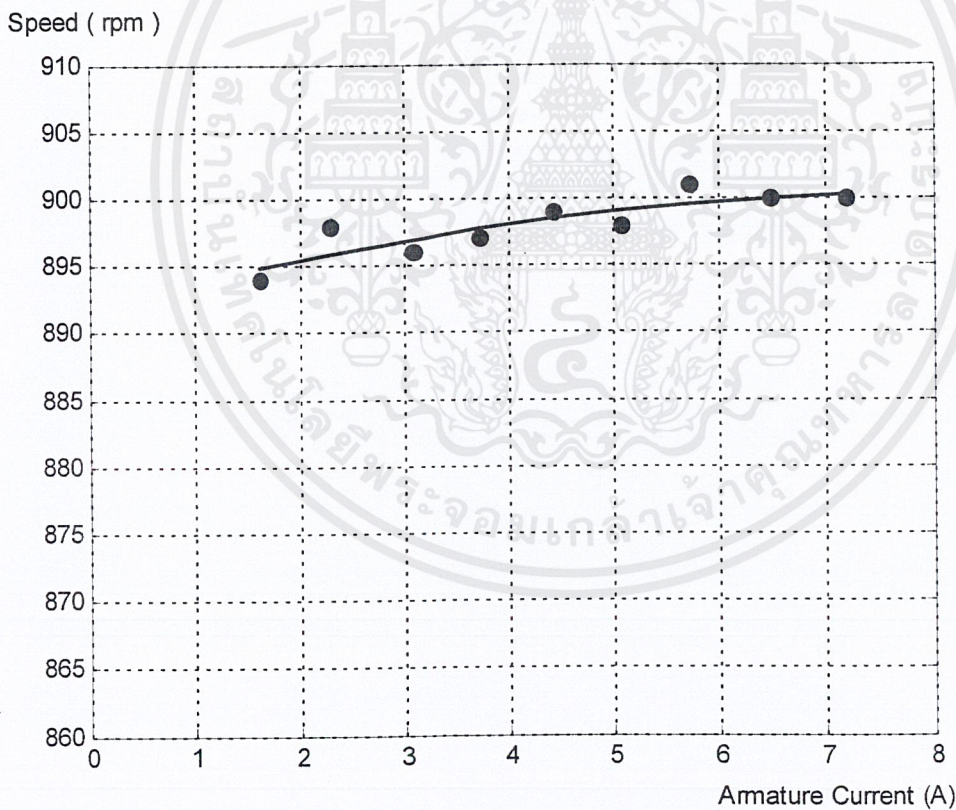


รูปที่ 8.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์มีเจอร์

8.6.2 ที่ความเร็ว 900 รอบต่อนาที $V_f = 180 \text{ V}$, $V_a = 61.5 \text{ V}$, $I_a = 1.03 \text{ A}$

T (N.m)	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7
N (rpm)	894	898	896	897	899	898	901	900	900
V_a (V)	62.0	63.1	63.3	64.4	64.9	65.2	66.0	66.8	67.1
I_a (A)	1.62	2.27	3.06	3.73	4.44	5.08	5.72	6.48	7.18

ตารางที่ 8.11 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความเร็ว 900 รอบต่อนาทีที่ค่าโหลดต่างๆแบบลูปปิด

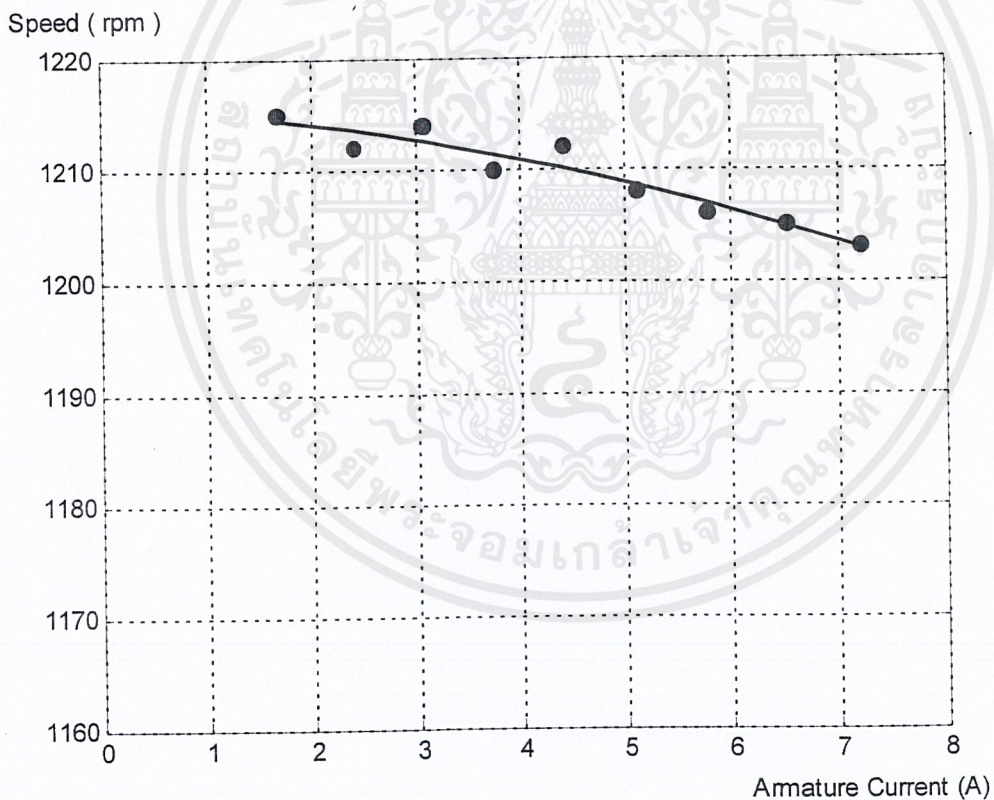


รูปที่ 8.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์
ขณะขับโหลดค่าต่างๆแบบลูปปิด ที่ความเร็ว 900 รอบต่อนาที

8.6.3 ที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที $V_f = 180 \text{ V}$, $V_a = 82.2 \text{ V}$, $I_a = 1.07 \text{ A}$

T (N.m)	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7
N (rpm)	1215	1212	1214	1210	1212	1208	1206	1205	1203
V_a (V)	83.0	83.9	84.5	84.0	85.0	85.2	86.0	86.4	87.1
I_a (A)	1.67	2.38	3.05	3.75	4.42	5.12	5.77	6.52	7.20

ตารางที่ 8.12 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาทีที่ค่าโหลดต่างๆแบบลูปปิด

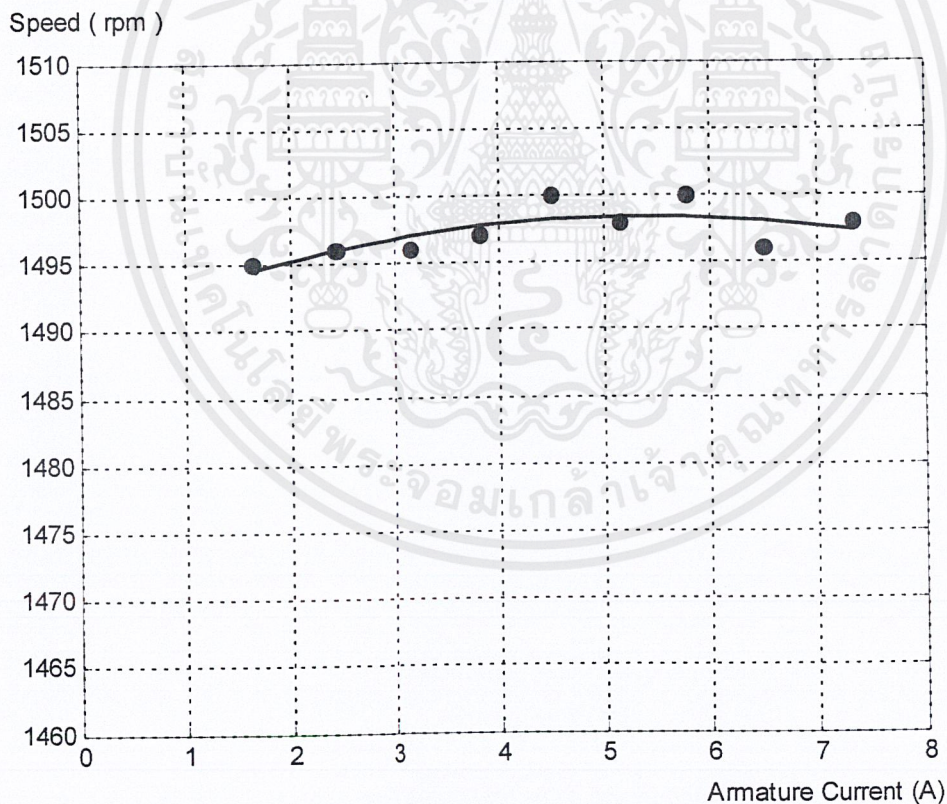


รูปที่ 8.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์
ขณะขับโหลดค่าต่างๆแบบลูปปิด ที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที

8.6.4 ที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที $V_f = 180 \text{ V}$, $V_a = 104.0 \text{ V}$, $I_a = 1.11 \text{ A}$

T (N.m)	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7
N (rpm)	1495	1496	1496	1497	1500	1498	1500	1496	1498
V_a (V)	105.0	106.0	106.0	105.0	106.0	108.0	109.0	109.0	110.0
I_a (A)	1.63	2.42	3.16	3.82	4.51	5.16	5.78	6.49	7.33

ตารางที่ 8.13 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาทีที่ค่าโหลดต่างๆแบบลูปปิด

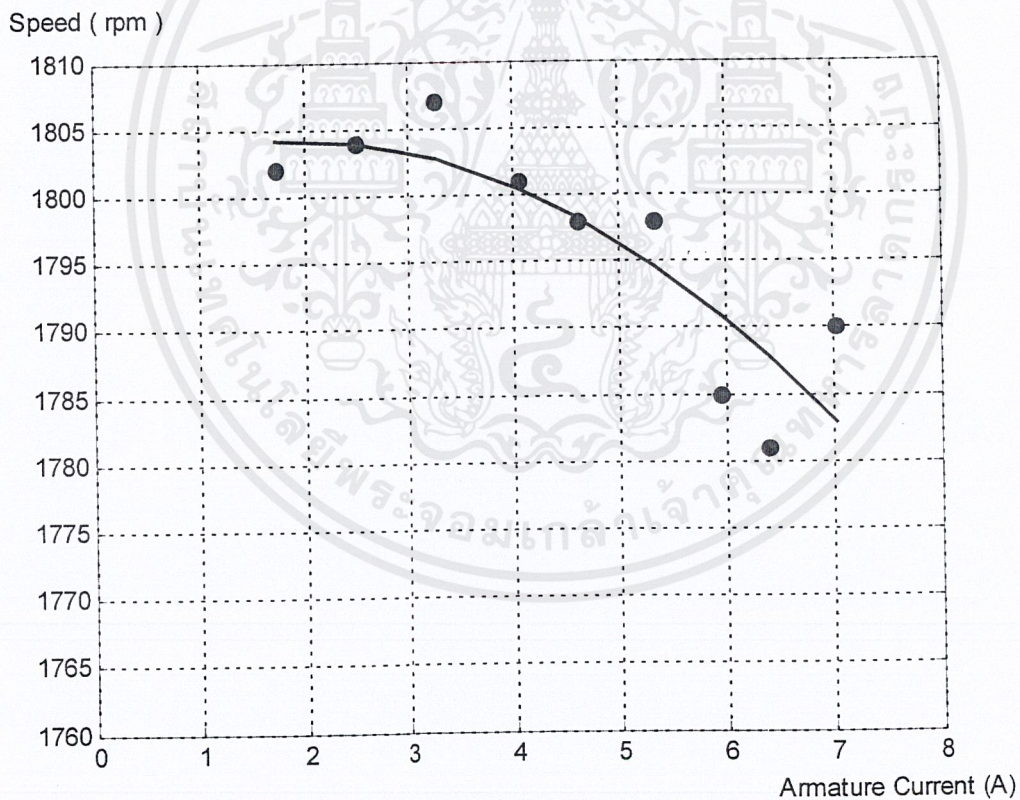


รูปที่ 8.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์มเจอร์
ขณะขับโหลดค่าต่างๆแบบลูปปิด ที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที

8.6.5 ที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที $V_f = 180 \text{ V}$, $V_a = 122.0 \text{ V}$, $I_a = 1.08 \text{ A}$

T (N.m)	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7
N (rpm)	1802	1804	1807	1801	1798	1798	1785	1781	1790
V_a (V)	123.0	124.0	125.0	126.0	126.0	126.0	126.0	127.0	127.0
I_a (A)	1.73	2.48	3.27	4.06	4.62	5.33	5.94	6.38	7.02

ตารางที่ 8.14 ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาทีที่ค่าโหลดต่างๆแบบลูปปิด

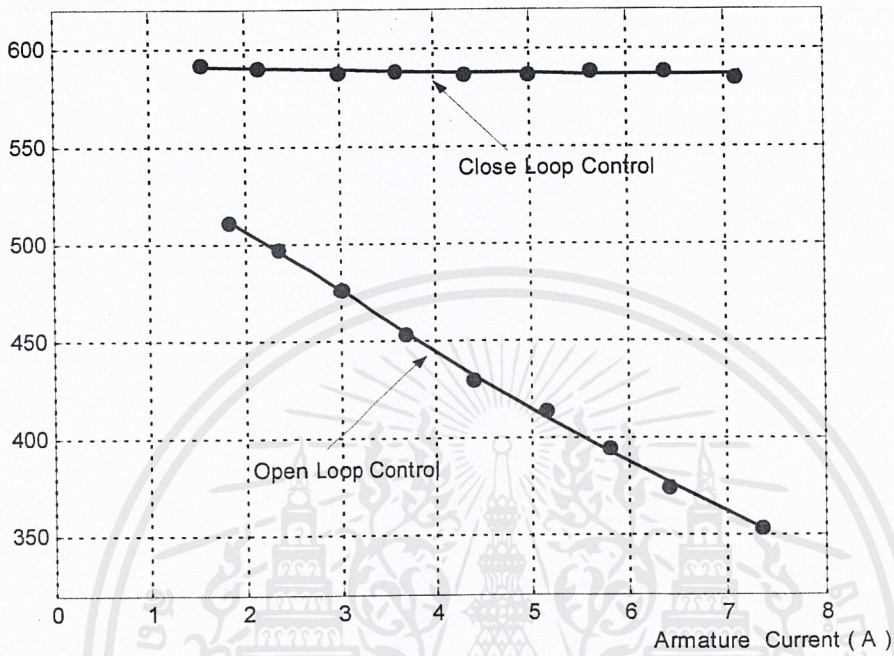


รูปที่ 8.41 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสอาร์เมเจอร์
ขณะขับโหลดค่าต่างๆแบบลูปปิด ที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที

8.7 ทำการเปรียบเทียบการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบรูปเปิดกับรูปปิดที่โหลดค่าต่างๆ

8.7.1 การเปรียบเทียบที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที

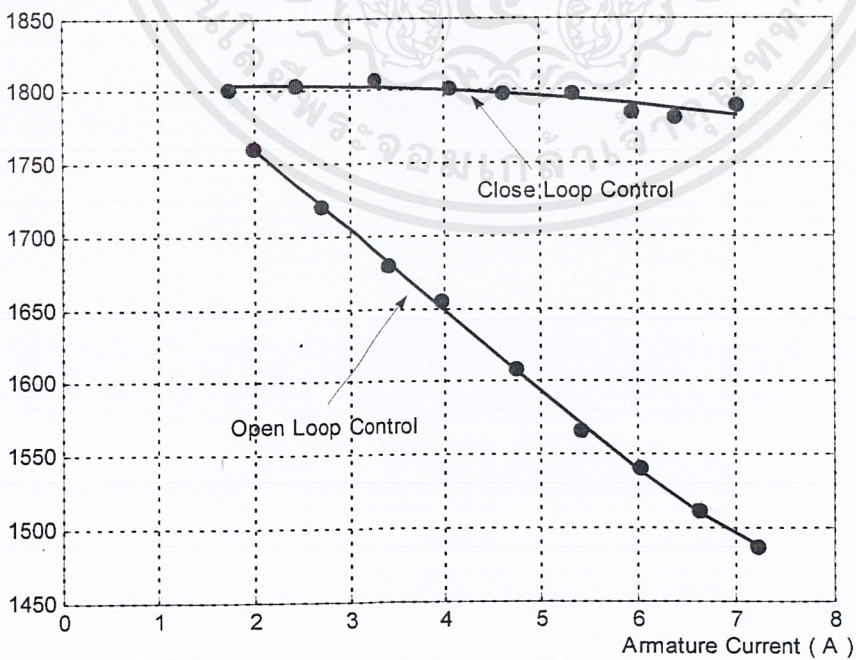
Speed (rpm)



รูปที่ 8.42 การเปรียบเทียบการขับ โหลดแบบรูปเปิดกับแบบรูปปิด ที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที

8.7.2 การเปรียบเทียบที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที

Speed (rpm)



รูปที่ 8.43 การเปรียบเทียบการขับ โหลดแบบรูปเปิดกับแบบรูปปิด

8.8 สรุปผลการทดลอง

1) จากการที่ทดลองใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนแบบลูปเปิดที่ระดับความเร็วรอบต่างๆ จะพบว่าเมื่อเพิ่มโหลดที่มีขนาดมากขึ้น จะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลงไปเรื่อยๆ ตามค่าโหลดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการลดลงของความเร็วจะเป็นลักษณะเชิงเส้น

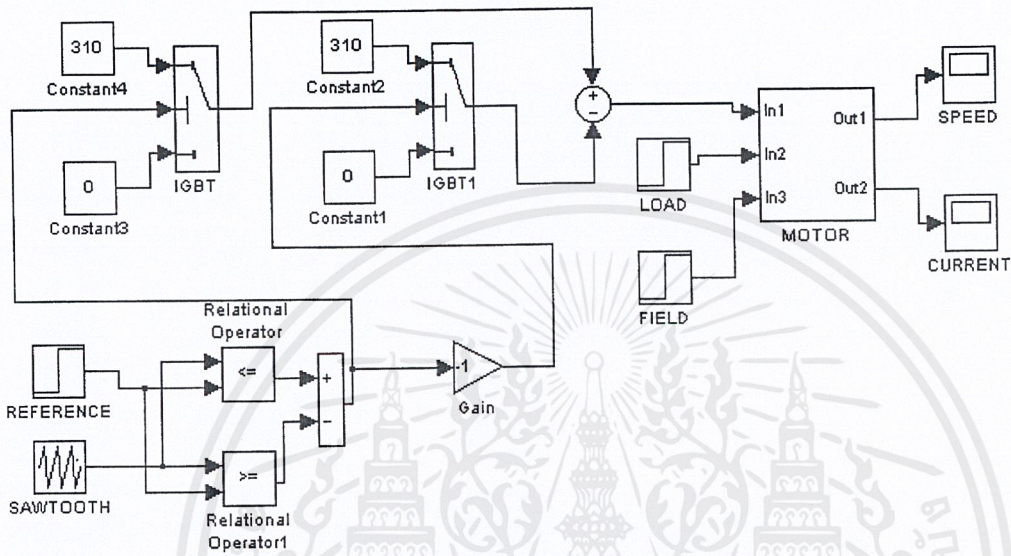
2) จากการทดลองใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนแบบลูปปิดที่ระดับความเร็วรอบต่างๆ จะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มโหลดให้มีขนาดมากขึ้น ความเร็วรอบของมอเตอร์จะลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อมองภาพรวมแล้ว ถือว่าความเร็วค่อนข้างคงที่ เนื่องจากมีชุดพีไอคอนโทรลทำหน้าที่ควบคุมให้มีการป้อนกลับเพื่อชดเชยสัญญาณแรงดัน เมื่อความเร็วลดลงจากการเพิ่มโหลด และจากการวัดสัญญาณป้อนกลับจะเห็นได้ว่าในขณะที่ใส่โหลดเข้าไป สัญญาณป้อนกลับจะมีค่าลดลงชั่วคราว และกลับขึ้นมาอยู่ที่ค่าปกติอย่างรวดเร็ว แสดงว่าชุดพีไอคอนโทรลนั้นสามารถตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้อย่างรวดเร็ว

3) ในการทดสอบการเบรกของมอเตอร์ จะเห็นได้ว่าในขณะที่เบรกแรงดันที่ป้อนให้กับชุดคอนเวอร์เตอร์มีค่าสูงเกินกว่าที่ตั้งไว้ วงจรไดนามิกเบรกจะทำการตรวจแล้วสั่งให้สวิตช์โอจีบีทีทำการช้อปแรงดันที่เกินนั้น ออกไปให้กับความต้านทานภายนอกอย่างรวดเร็วทำให้พลังงานที่เกินมานั้นสูญหายไป แรงดันก็จะกลับสู่สภาพปกติ ซึ่งการทดลองนั้นการที่จะสามารถเห็นค่าสัญญาณการเบรกได้นั้น จะต้องสั่งให้มอเตอร์เบรกอย่างทันที แต่ในการทดสอบไม่ควรใช้ค่าแรงดันที่สูงเกินไป เพราะอาจจะทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์สวิตซ์ซิ่งและตัวมอเตอร์ได้

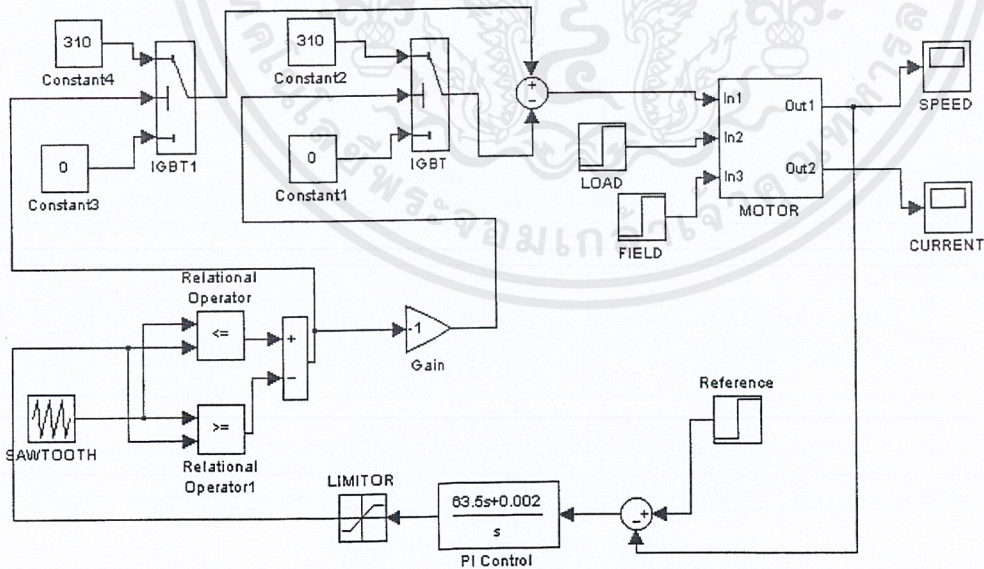
4) จากการวัดค่าสัญญาณกระแสเอาท์พุทจะเห็นได้ว่าที่ความเร็วรอบสูง จะมีค่ารีปเปิลของกระแสเพิ่มขึ้น ซึ่งการแก้สามารถทำได้โดยการใส่คาปาซิเตอร์เพื่อกรองสัญญาณไว้ตรงเอาท์พุท หรือทำการปรับค่าความถี่สวิตซ์ซิ่งให้สูงขึ้น แต่อาจจะมีผลทำให้เกิดค่าความสูญเสียในการสวิตซ์ซิ่งเพิ่มขึ้นได้

8.9 การจำลองระบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB

ทำการจำลองระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยฟังก์ชัน Simulink บนโปรแกรม MATLAB ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 6 ซึ่งภาพการทดลองแสดงไว้ดังนี้



รูปที่ 8.44 ระบบจำลองของระบบลูเปิด



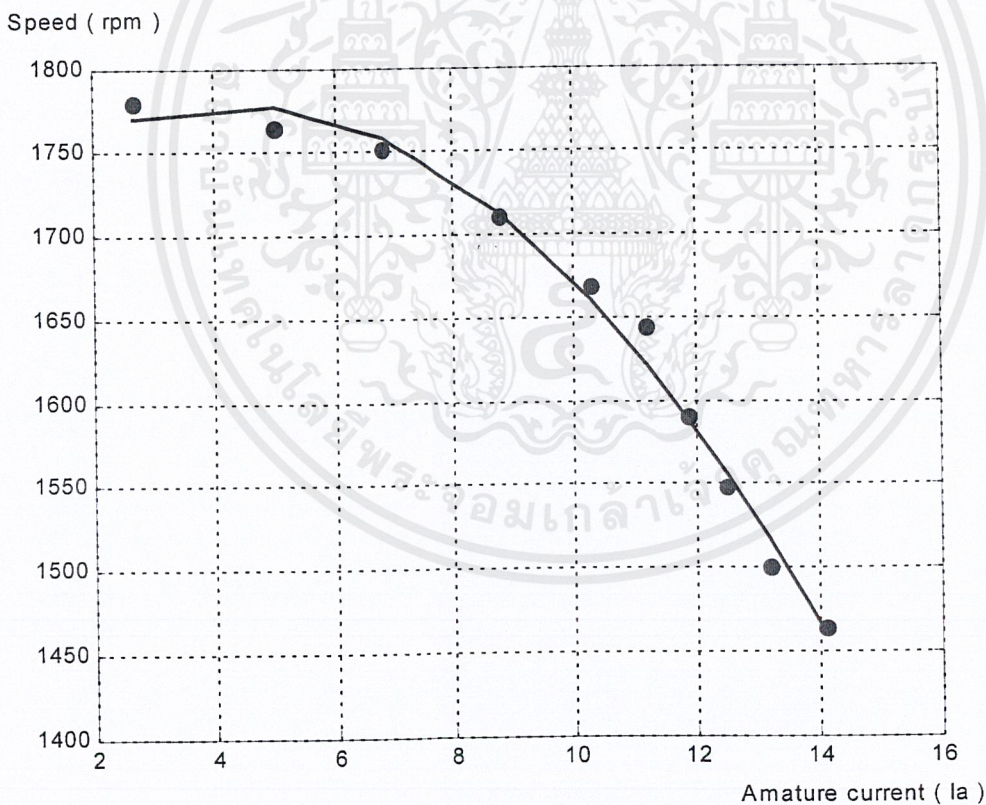
รูปที่ 8.45 ระบบจำลองของระบบลูปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.9.1 เมื่อทำการวิเคราะห์การควบคุมมอเตอร์แบบดูปเปิดการเปลี่ยนแปลงของความเร็วมอเตอร์ตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของโหลด ถ้าสภาวะยังไม่มีโหลด มอเตอร์มีความเร็ว 1800 รอบต่อนาที กระแส 0.9 แอมแปร์ แรงดันคล่อมขดลวดฟิลด์ 180 โวลต์

LOAD	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Wr(rpm)	1780	1764	1752	1710	1668	1644	1590	1548	1500
Ia (A)	2.7	5.0	6.8	8.8	10.3	11.2	11.9	12.5	13.2

ตารางที่ 8.15 ค่าความเร็วรอบและกระแสเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

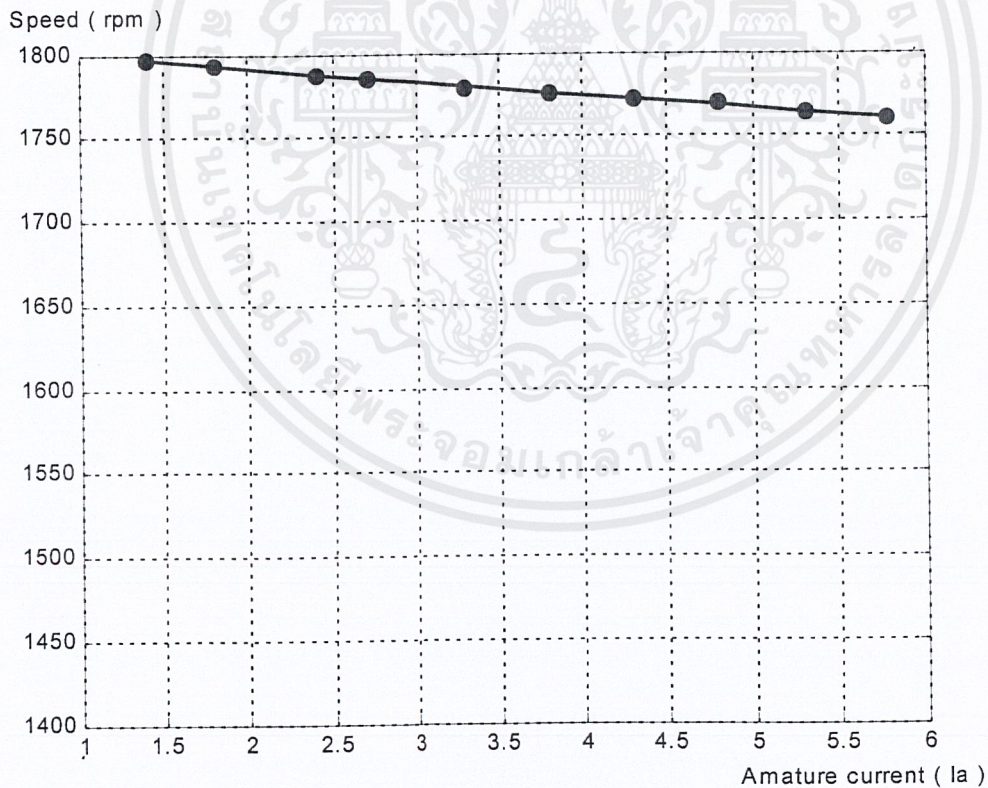


รูปที่ 8.46 ความสัมพันธ์ความเร็วรอบกับกระแสฟิลด์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง โหลด

8.9.2 เมื่อทำการวิเคราะห์การควบคุมมอเตอร์แบบรูปปิดการเปลี่ยนแปลงของความเร็วมอเตอร์ตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของโหลด ถ้าสภาวะยังไม่มีโหลด มอเตอร์มีความเร็ว 1800 รอบต่อนาที กระแส 0.82 แอมแปร์ แรงดันคล่อมขดลวดฟีดส์ 180 โวลต์

LOAD	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Wr(rpm)	1797	1794	1788	1785	1779	1776	1773	1770	1764
Ia (A)	1.4	1.8	2.4	2.7	3.3	3.8	4.3	4.8	5.3

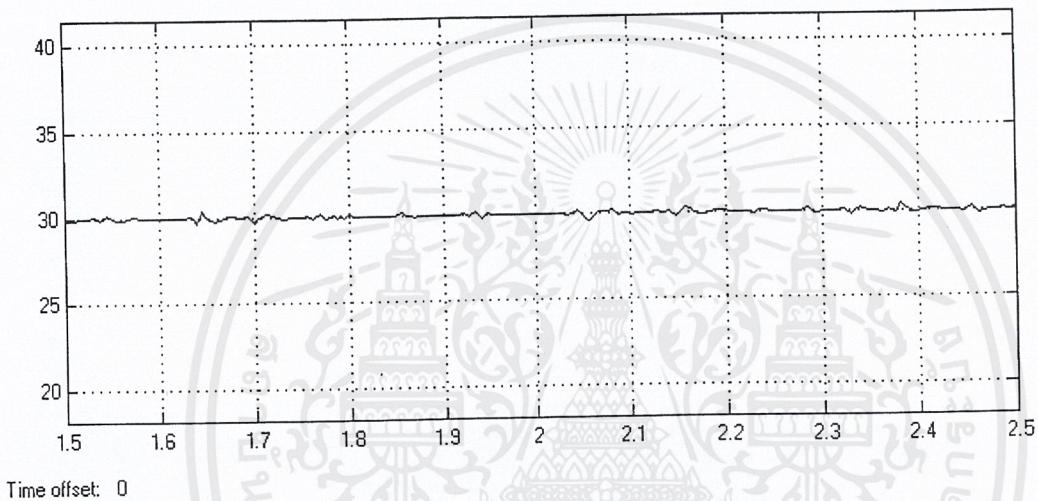
ตารางที่ 8.16 ค่าความเร็วรอบและกระแสเมื่อ โหลดมีการเปลี่ยนแปลง



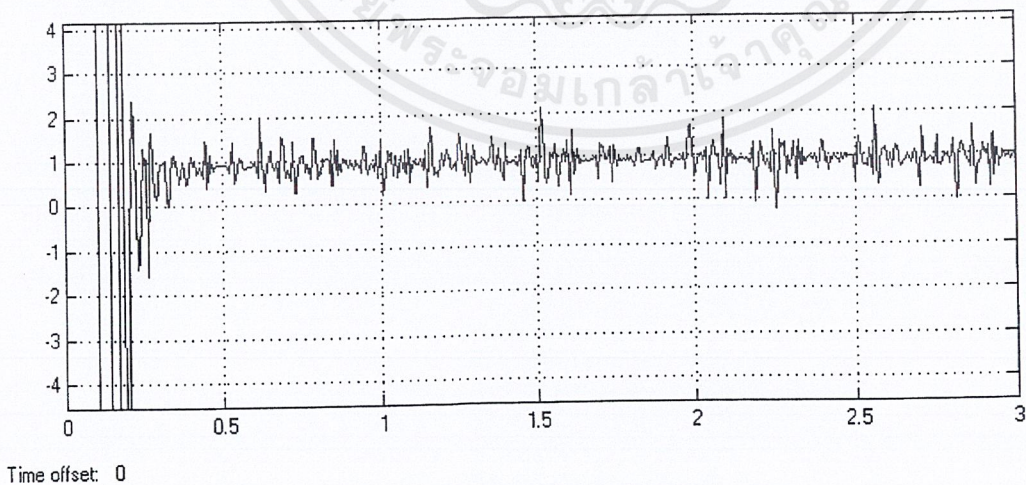
รูปที่ 8.47 ความสัมพันธ์ความเร็วรอบกับกระแสฟีดส์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง โหลด

8.9.3 พิจารณาลักษณะของสัญญาณของค่าความเร็วของมอเตอร์และค่ากระแสของขดลวดอานเมเจอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดขณะขับโหลดแบบลูปเปิด (open-loop System)

- 1) ขณะที่ยังไม่มีโหลด ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วและค่ากระแสของขดลวดอานเมเจอร์จะเป็นดังรูป

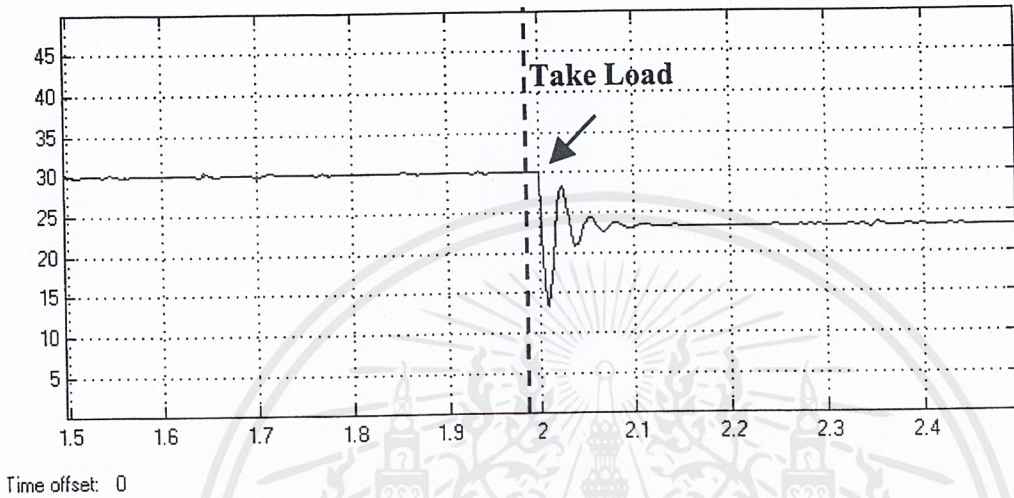


รูปที่ 8.48 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วรอบ

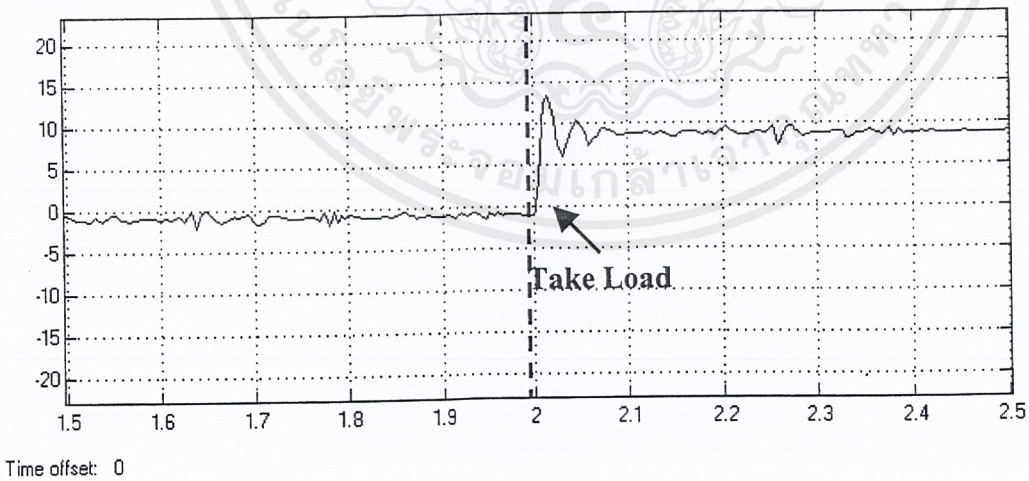


รูปที่ 8.49 การเปลี่ยนแปลงของค่าของกระแส

2) ขณะที่ใส่โหลด ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงค่าของความเร็วและกระแสของขดลวดอาเมเจอร์ จะเป็นดังรูป

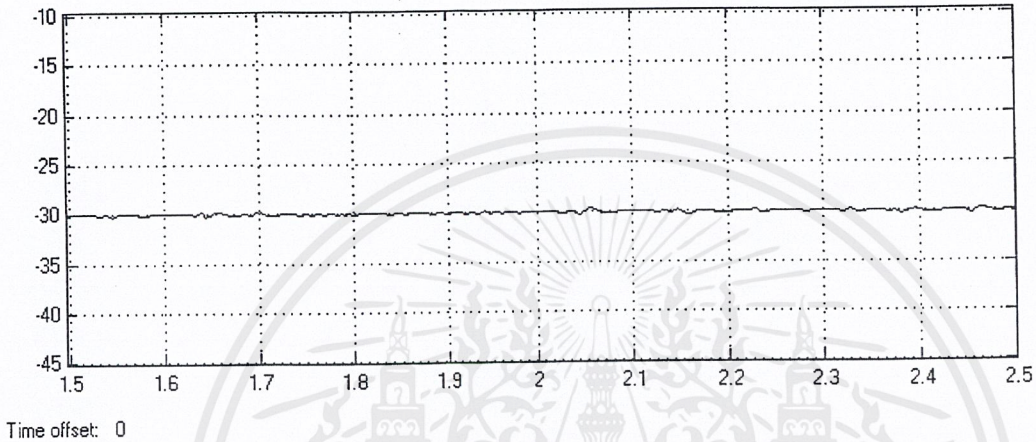


รูปที่ 8.50 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วรอบ

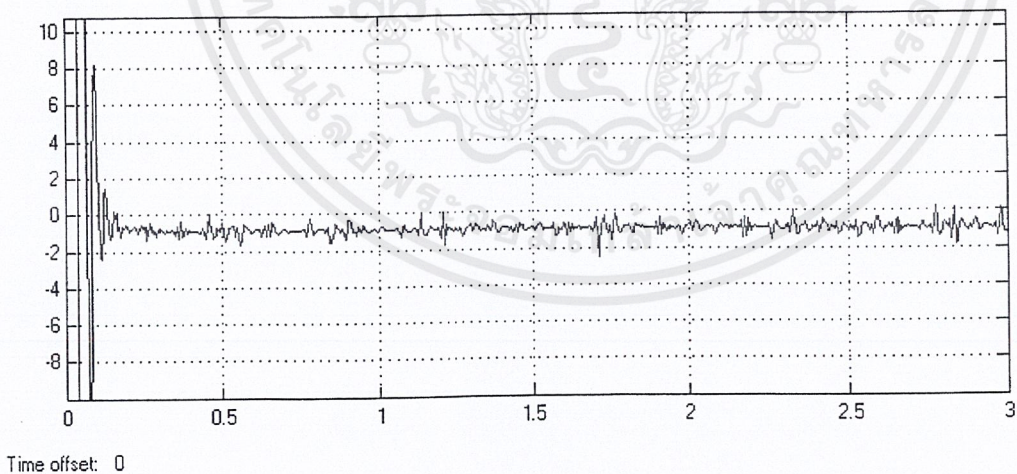


รูปที่ 8.51 การเปลี่ยนแปลงของค่าของกระแส

3) เมื่อเปลี่ยนการหมุน ไปยังรีเวิร์ดขณะที่ยังไม่มีโหลด ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วและ
กระแสของขดลวดอาเมเจอร์จะเป็นดังรูป

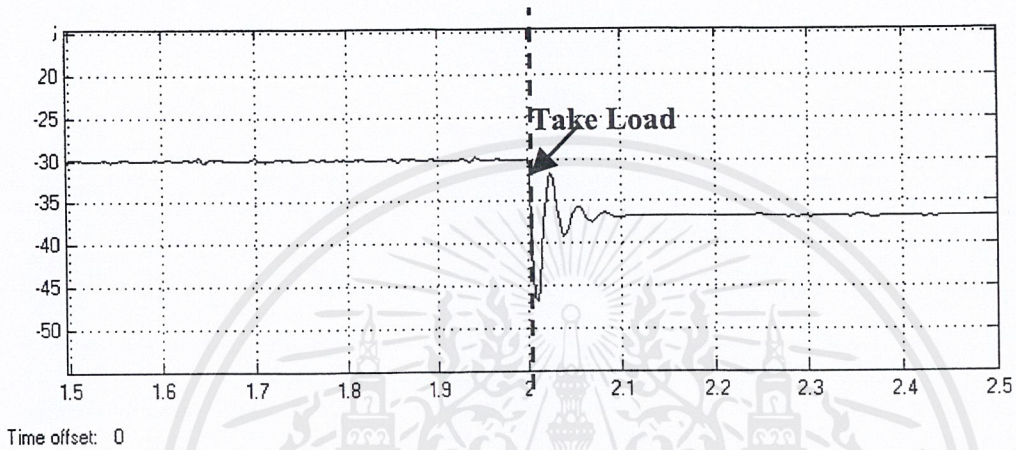


รูปที่ 8.52 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วรอบ

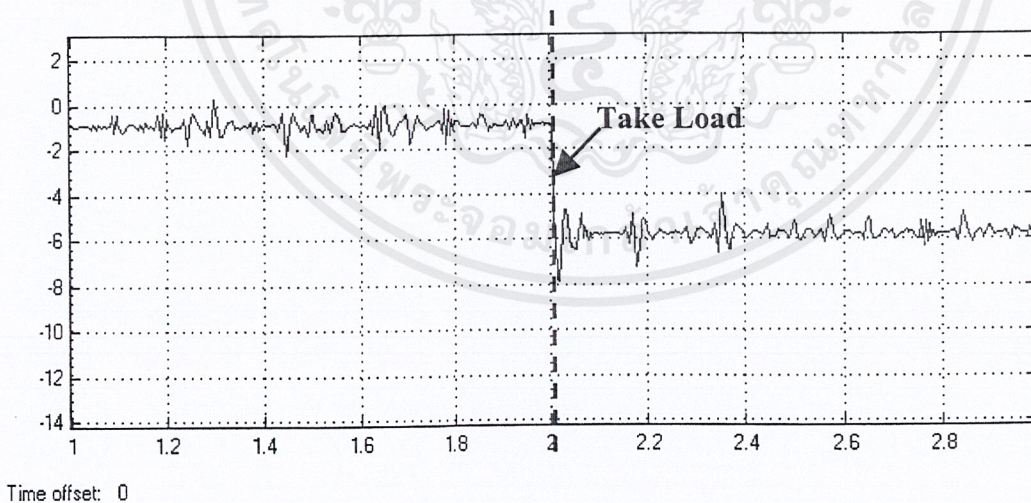


รูปที่ 8.53 การเปลี่ยนแปลงของค่าของกระแส

3) เมื่อเปลี่ยนการหมุนไปยังรีเวิร์ดขณะที่มีโหลดลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วและกระแสของขดลวดอาเมเจอร์จะเป็นดังรูป



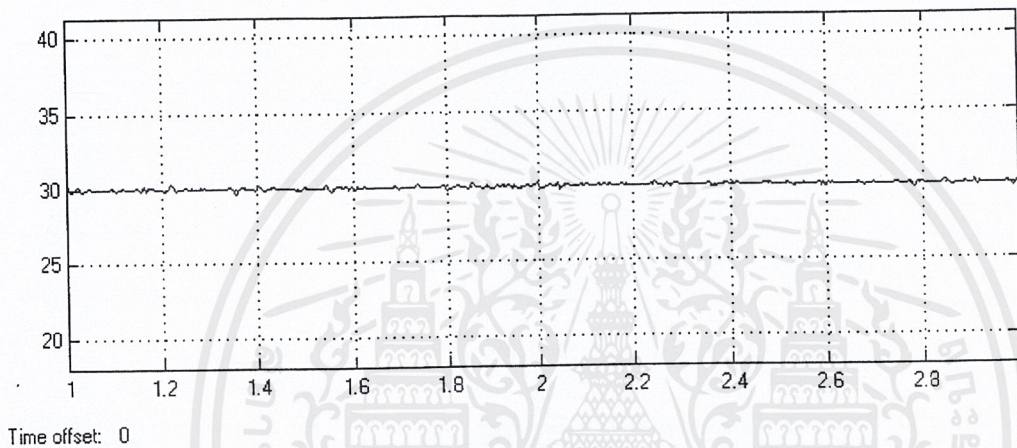
รูปที่ 8.54 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วรอบ



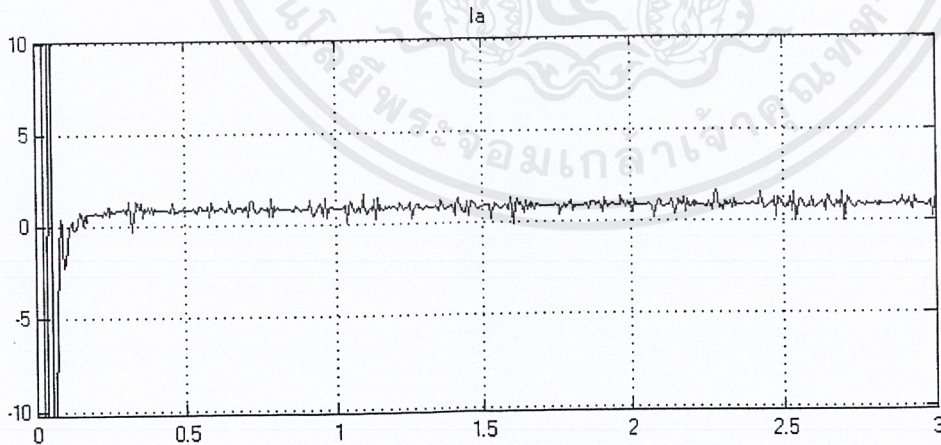
รูปที่ 8.55 การเปลี่ยนแปลงของค่าของกระแส

8.9.4 การวิเคราะห์หาค่าความเร็วและกระแสของขดลวดอามเจอร์ของมอเตอร์ เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของโหลดขณะขับโหลดแบบลูปปิด (Closed-loop system)

- 1) ขณะที่ยังไม่มีโหลด ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วและกระแสของขดลวดอามเจอร์จะเป็น ดังรูป

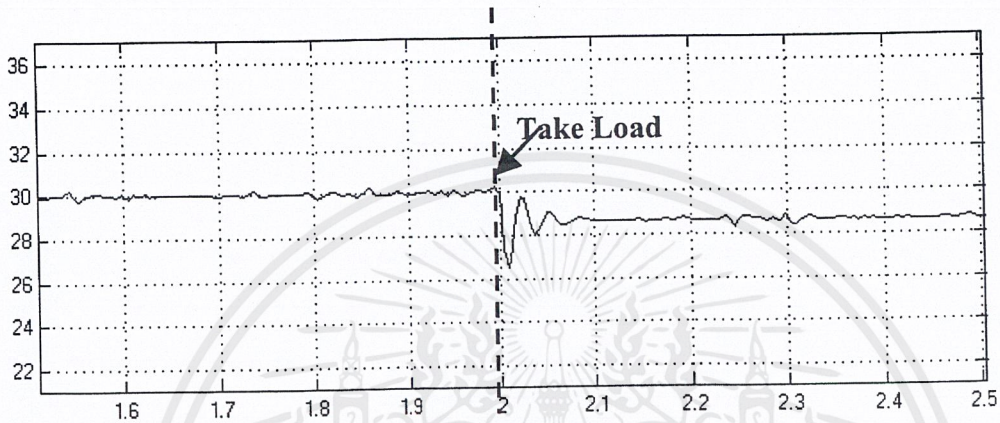


รูปที่ 8.56 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วรอบ

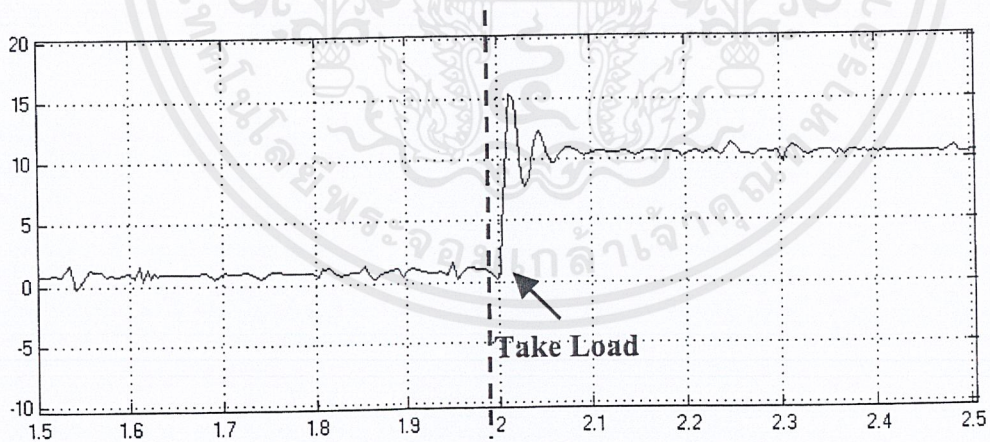


รูปที่ 8.57 การเปลี่ยนแปลงของค่าของกระแส

- 2) ขณะที่มีโหลด ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วและกระแสของขดลวดอาเมเจอร์
จะเป็น ดังรูป

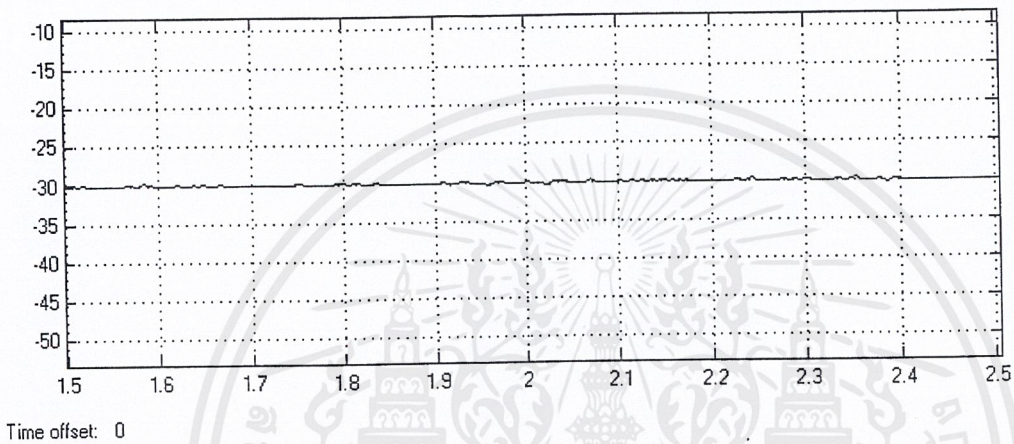


รูปที่ 8.58 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วรอบ

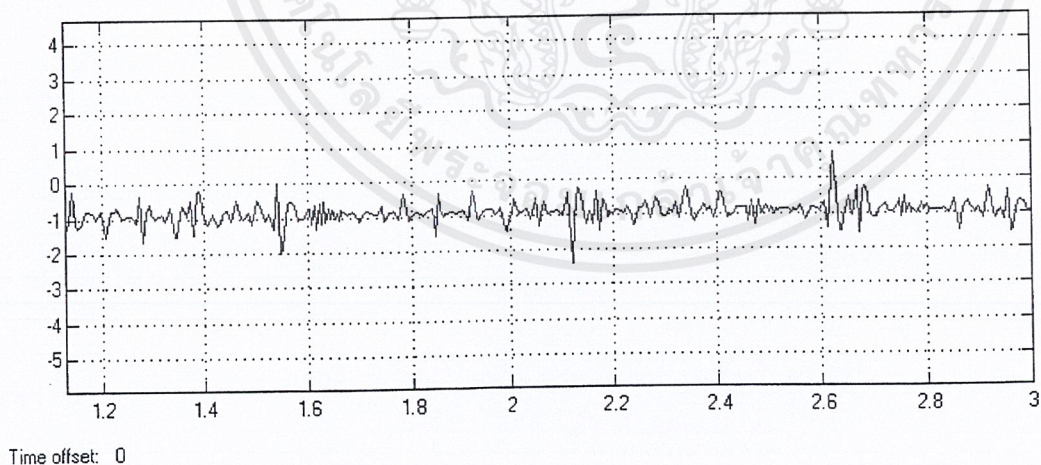


รูปที่ 8.59 การเปลี่ยนแปลงของค่าของกระแส

- 3) เมื่อเปลี่ยนสภาพการหมุนไปยังรีเวิร์คขณะที่ยังไม่มีโหลด ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วและกระแสของขดลวดคอปเปอร์ จะเป็นดังรูป

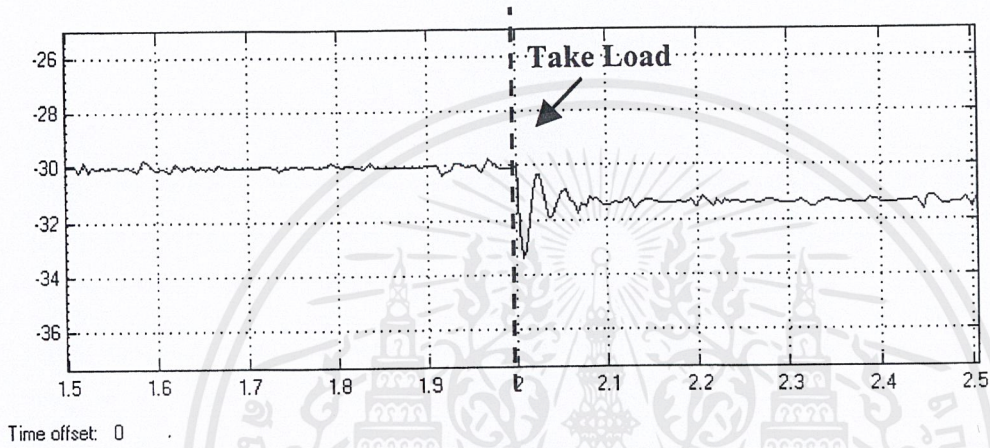


รูปที่ 8.60 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วรอบ

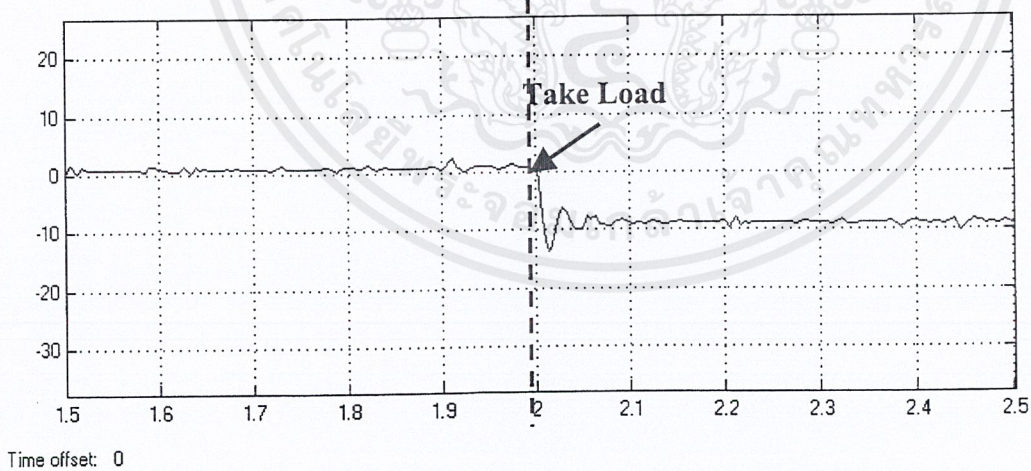


รูปที่ 8.61 การเปลี่ยนแปลงของค่าของกระแส

- 4) เมื่อเปลี่ยนสภาพการหมุนไปยังรีเวิร์ดขณะที่มีโหลด ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงค่าของความเร็วและกระแสของขดลวดอาเมเจอร์ จะเป็นดังรูป



รูปที่ 8.62 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วรอบ



รูปที่ 8.63 การเปลี่ยนแปลงของค่ากระแส

8.10 สรุปผลการทดลองของวิเคราะห์การจำลองระบบบนโปรแกรมMATLAB

- 1) การเปลี่ยนแปลงค่าความเร็ว และกระแสของขดลวดอาเมเจอร์ของการควบคุมแบบลูปปิดมอเตอร์ จะสามารถคงค่าความเร็วและกระแสของขดลวดอาเมเจอร์ได้ดีกว่าการควบคุมแบบลูปเปิด
- 2) การควบคุมแบบปิดค่าของการเกิดโอเวอร์ชูต (Overshoot) ของค่ากระแสและความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ดีกว่าการควบคุมแบบลูปเปิด
- 3) การวิเคราะห์แบบ Simulink จะช่วยให้สามารถคำนวณค่าตัวแปร K_p , K_i เพื่อนำไปใช้กับวงจรควบคุมแบบ PI ในส่วนของวงจรจริงได้

8.10.1 ข้อเด่นของลักษณะการวิเคราะห์ระบบด้วย Simulink

- 1) สามารถจำลอง ทดสอบ และวิเคราะห์ การทำงานของระบบพลศาสตร์ในเชิงของเวลาได้
- 2) สามารถจำลองระบบได้ทั้งระบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ระบบเวลาต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องได้
- 3) สามารถจำลองระบบที่มีขนาดใหญ่ และซับซ้อน ให้สามารถวิเคราะห์ระบบได้ง่ายขึ้น
- 4) มีเครื่องมือ (tool box) ให้เลือกใช้งานได้หลายประเภท เช่น Power System, Power Electronics, Machines neural network เป็นต้น
- 5) มีการใช้งานที่ค่อนข้างง่าย ไม่ยุ่งยากซับซ้อนมากนัก

8.10.2 ข้อด้อยของลักษณะการวิเคราะห์ระบบด้วย Simulink

- 1) การวิเคราะห์ระบบด้วย Simulink จะเป็นการคำนวณในเชิงคณิตศาสตร์ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นค่าที่ได้จากการประมาณ ซึ่งมีผลให้ค่าที่ได้แตกต่างจากวงจรจริงไปด้วย
- 2) โมเดลหรือการจำลองของตัวมอเตอร์ค่อนข้างจะผิดเพี้ยนไปจากมอเตอร์ของจริงค่าพารามิเตอร์ (Parameters) ของมอเตอร์จริงบางค่า เช่น ค่าความต้านทานของขดลวดฟิวส์ของมอเตอร์จริงไม่สามารถที่จะนำไปใช้เป็นพารามิเตอร์ (Parameters) ของโมเดลมอเตอร์ที่จะทำการวิเคราะห์ผลแบบ Simulink ซึ่งจะเปลี่ยนไปใช้ค่าที่เหมาะสมแทน

8.10.3 แนวทางการปรับปรุง

- 1) ควรจะมีการปรับปรุงโมเดลของมอเตอร์ขึ้นมาใหม่ให้ใกล้เคียงกับมอเตอร์ของจริงมากที่สุด
- 2) การจำลองระบบด้วย Simulink ยังไม่สามารถจำลองระบบได้เหมือนจริงมากนัก น่าจะมีการปรับปรุงหรือหาโปรแกรมอื่นที่จะสามารถวิเคราะห์ระบบได้ดีกว่านี้

บทที่ 9

สรุปและวิจารณ์

จากการทดลองขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4 ควอดแรนต์ และทำการจำลองการทดสอบมอเตอร์สามารถสรุปแนวทางการทำงาน, ปัญหาที่พบและแนวทางการพัฒนาได้ดังนี้

9.1 สรุปผลโครงการ

- 1) ในการพัฒนาการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้สัญญาณพีคดับลิเวียม แบบยูนิโพลาร์นั้น สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการตอบสนองของลูปปิดได้ดี ในทุกระดับความเร็วที่ทำการทดลอง เนื่องจากวงจร F/V และ PI- Control ที่ใช้สามารถตอบสนองได้ในช่วงที่กว้าง
- 2) ในการศึกษาการจำลองการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้โปรแกรม Matlab ทำให้สามารถเข้าใจในพฤติกรรมการทำงานของมอเตอร์ได้ และสามารถที่จะนำข้อมูลไปช่วยในออกแบบวงจรการทดลองจริงได้
- 3) การออกแบบวงจรของโครงการ สามารถทำการลดขนาดของวงจรทั้งหมดให้เล็กลงมีความซับซ้อนน้อยและสามารถเคลื่อนที่และใช้งานได้สะดวก

9.2 ปัญหาที่พบในโครงการ

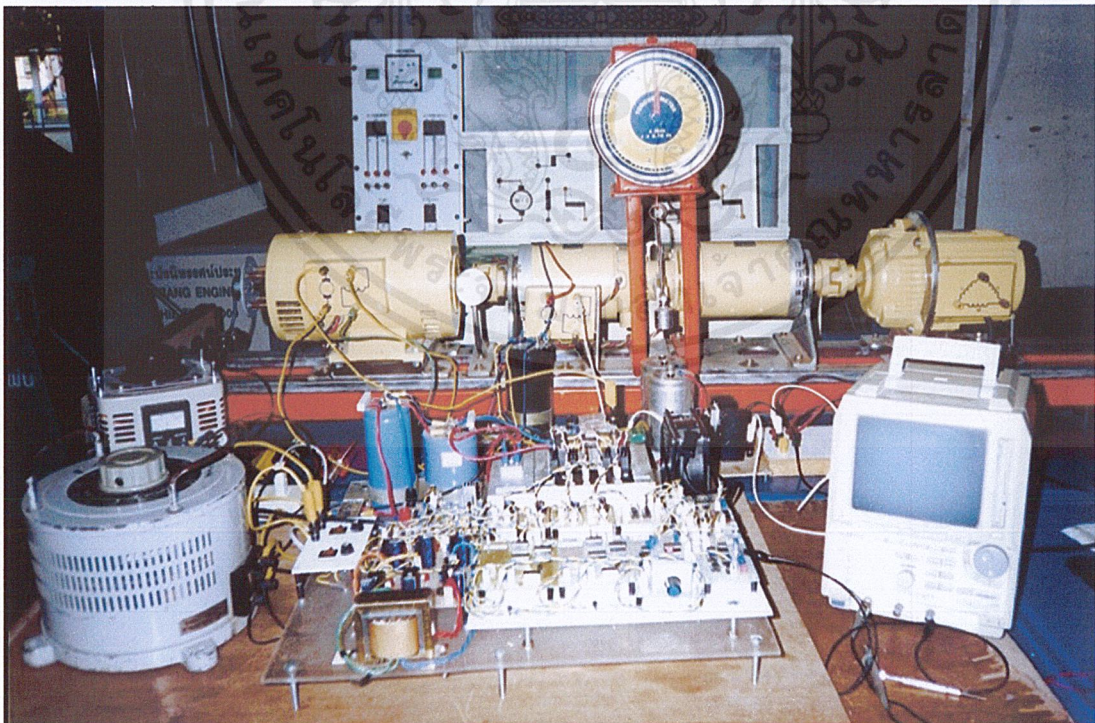
- 1) ในการใช้งานอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง ไอจีบีที จะต้องมีความระมัดระวังในเรื่องของกระแสที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อทำการขับโหลดค่าสูงๆ เพราะอาจจะเกิดการกระชากของกระแสทำให้ไอจีบีทีเสียหายได้ จึงควรที่จะเพิ่มวงจรสแน็บเบอร์หรือวงจรป้องกันอื่น เพื่อช่วยให้ไอจีบีทีปลอดภัยมากขึ้น เพราะราคานั้นค่อนข้างแพง
- 2) ในการควบคุมมอเตอร์แบบลูปปิด ไม่สามารถที่จะเปลี่ยนการหมุนจากฟอร์เวิร์ดมาเป็นรีเวิร์สได้อย่างทันที ซึ่งจะต้องทำการหยุดมอเตอร์ก่อนแล้วกดสวิตซ์เปลี่ยนการหมุนเป็นแบบรีเวิร์ส
- 3) มอเตอร์ที่ใช้ในโครงการสภาพไม่ดีมีเสียงดังเนื่องจากการทำการทดลองกันหลายกลุ่มทำให้ถูกใช้งานอย่างหนัก ซึ่งเป็นผลให้มอเตอร์เสื่อมสภาพเร็ว
- 4) ห้องที่ทำการทดลองมีสภาพที่คับแคบและมีการทดลองกันหลายกลุ่ม ซึ่งในบางครั้งการใช้อุปกรณ์ร่วมกันบ่อยๆ ทำให้อุปกรณ์เสียหาย และอาจจะมีผลของสัญญาณรบกวนได้

9.3 แนวทางการพัฒนา

- 1) พัฒนาการควบคุมป้อนกลับโดย ใช้ดูป้อนกลับ 2 แบบ คือ ดูปความเร็วและดูปกระแสนี้จะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของการตอบสนองได้ดีขึ้น
- 2) พัฒนาการควบคุมการหมุนในรูปปิดจากทิสฟอว์เวิร์ดเป็นรีเวิร์ส โดยการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ไม่ต้องทำการหยุดก่อนเปลี่ยนทิศทาง
- 3) ปรับปรุงระบบให้เป็นแบบดิจิทัล ซึ่งทำให้การควบคุมมีความหลากหลายและมีวงจรมีเสถียรภาพที่ดี
- 4) ควรจะมีการพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองระบบเพื่อที่จะทำให้ได้ผลของการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับวงจรจริงมากกว่านี้
- 5) นำแนวคิดที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ชนิดอื่นๆนอกจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



ชิ้นงานของโครงการนี้



ชิ้นงานเมื่ออยู่ในสภาวะพร้อมขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

IGBT MODULE (N series)

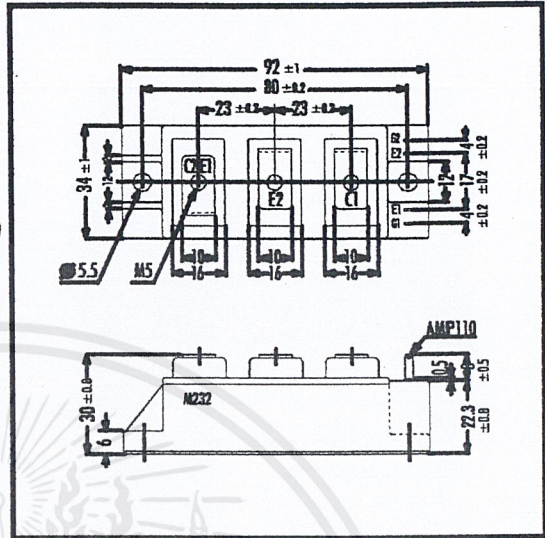
Outline Drawing

Features

- Square RBSOA
- Low Saturation Voltage
- Less Total Power Dissipation
- Improved FWD Characteristic
- Minimized Internal Stray Inductance
- Overcurrent Limiting Function (~3 Times Rated Current)

Applications

- High Power Switching
- A.C. Motor Controls
- D.C. Motor Controls
- Uninterruptible Power Supply



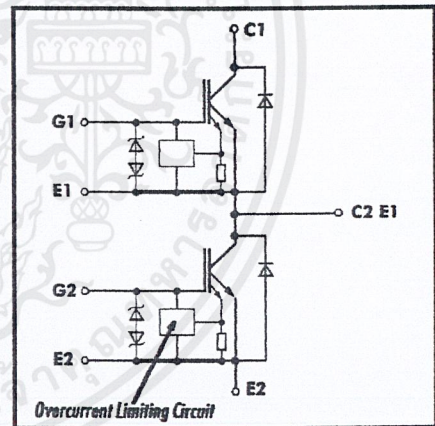
Maximum Ratings and Characteristics

Equivalent Circuit

Absolute Maximum Ratings (T_c=25°C)

Items	Symbols	Ratings	Units
Collector-Emitter Voltage	V _{GES}	600	V
Gate -Emitter Voltage	V _{GES}	± 20	V
Collector Current	Continuous	I _C	50
	1ms	I _{C PULSE}	100
	Continuous	-I _C	50
	1ms	-I _{C PULSE}	100
Max. Power Dissipation	P _C	250	W
Operating Temperature	T _J	+150	°C
Storage Temperature	T _{stg}	-40 ~ +125	°C
Isolation Voltage	V _{is}	2500	V
Screw Torque	Mounting *1	3.5	Nm
	Terminals *2	3.5	

Note: *1:Recommendable Value; 2.5 ~ 3.5 Nm (M5)



Electrical Characteristics (at T_J=25°C)

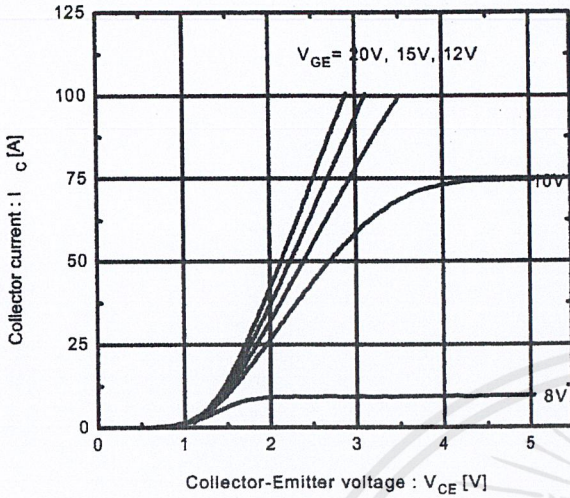
Items	Symbols	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Zero Gate Voltage Collector Current	I _{CES}	V _{GE} =0V V _{CE} =600V			1.0	mA
Gate-Emitter Leakage Current	I _{GES}	V _{CE} =0V V _{GE} =± 20V			15	µA
Gate-Emitter Threshold Voltage	V _{GE(th)}	V _{GE} =20V I _C =50mA	4.5		7.5	V
Collector-Emitter Saturation Voltage	V _{CE(sat)}	V _{GE} =15V I _C =50A			2.8	V
Input capacitance	C _{ies}	V _{GE} =0V		3300		pF
Output capacitance	C _{oes}	V _{CE} =10V		730		
Reverse Transfer capacitance	C _{res}	f=1MHz		330		
Turn-on Time	t _{ON}	V _{CC} =300V		0.6	1.2	µs
	t _r	I _C =50A		0.2	0.6	
	t _{OFF}	V _{GE} =± 15V		0.6	1.0	
Turn-off Time	t _t	R _G =51Ω		0.2	0.35	µs
	t _f					
Diode Forward On-Voltage	V _F	I _F =50A V _{GE} =0V			3.0	V
Reverse Recovery Time	t _{rr}	I _F =50A			300	ns

Thermal Characteristics

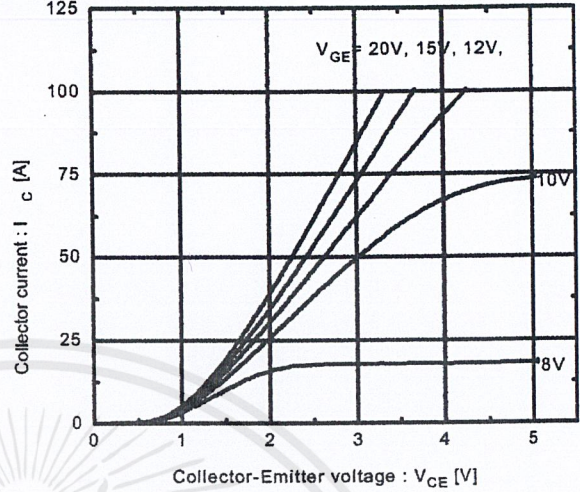
Items	Symbols	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Thermal Resistance	R _{th(j-c)}	IGBT			0.50	°C/W
	R _{th(j-e)}	Diode			1.33	
	R _{th(c-n)}	With Thermal Compound		0.05		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

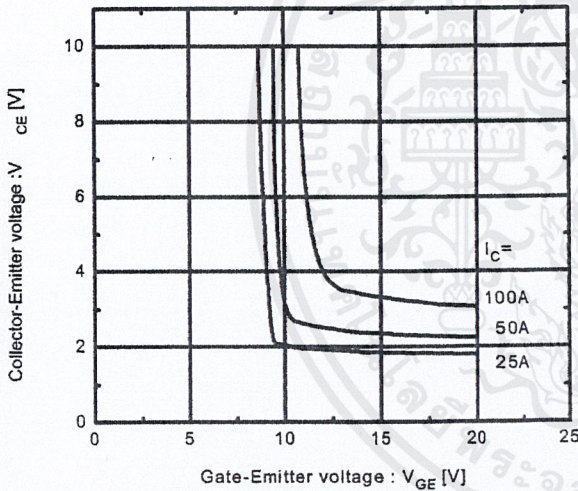
Collector current vs. Collector-Emitter voltage
 $T_j=25^\circ\text{C}$



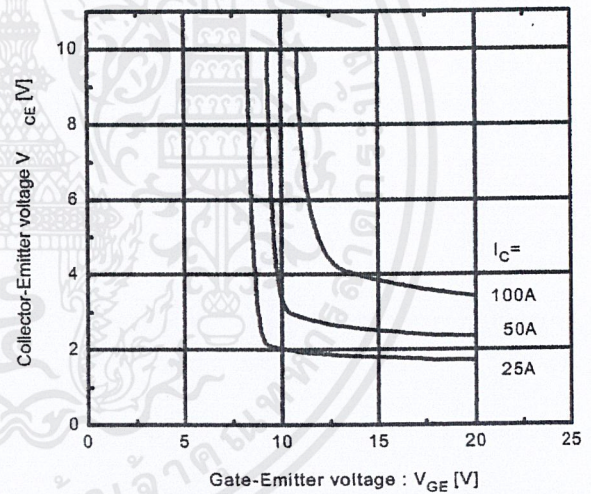
Collector current vs. Collector-Emitter voltage
 $T_j=125^\circ\text{C}$



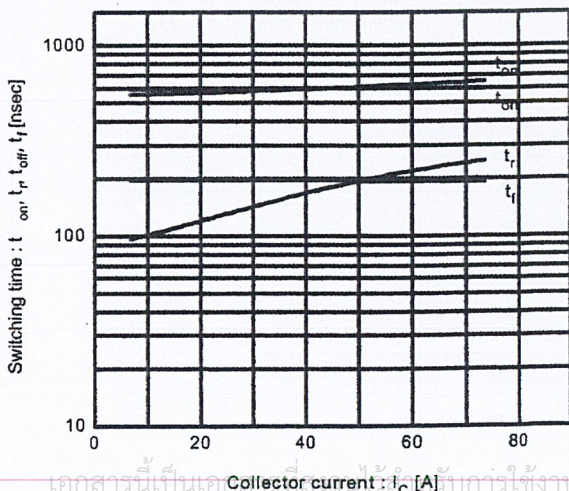
Collector-Emitter vs. Gate-Emitter voltage
 $T_j=25^\circ\text{C}$



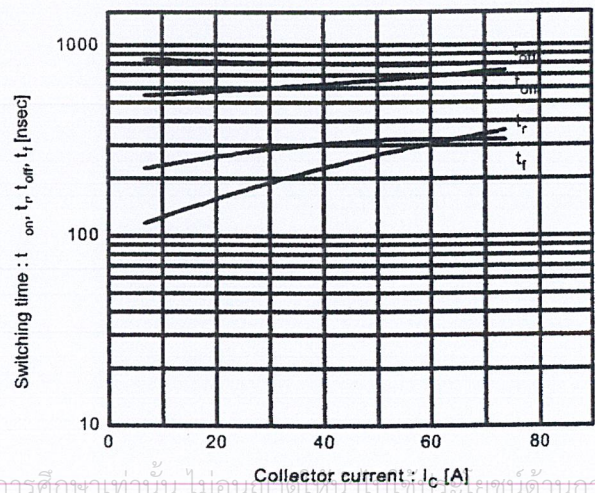
Collector-Emitter vs. Gate-Emitter voltage
 $T_j=125^\circ\text{C}$



Switching time vs. Collector current
 $V_{CC}=300\text{V}, R_G=51\Omega, V_{GE}=\pm 15\text{V}, T_j=25^\circ\text{C}$

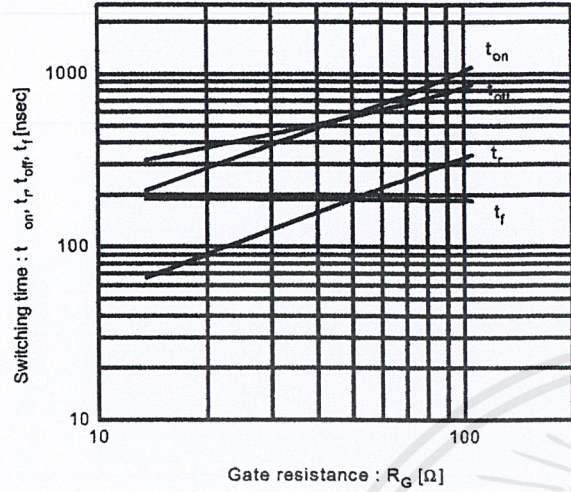


Switching time vs. Collector current
 $V_{CC}=300\text{V}, R_G=51\Omega, V_{GE}=\pm 15\text{V}, T_j=125^\circ\text{C}$



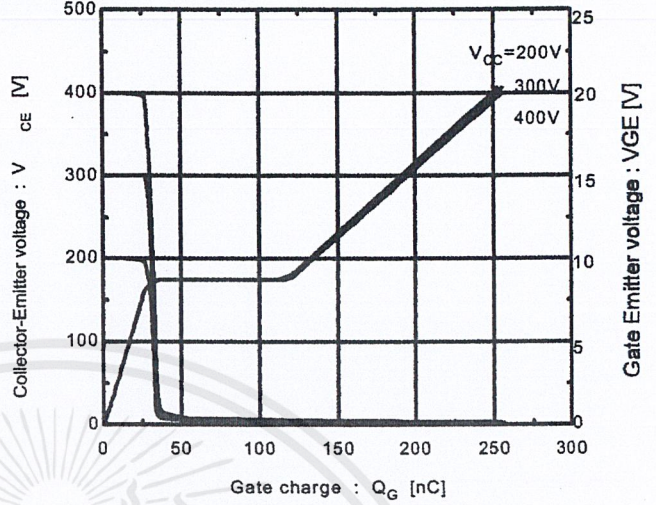
Switching time vs. R_G

$V_{CC}=300V, I_C=50A, V_{GE}=\pm 15V, T_j=25^\circ C$



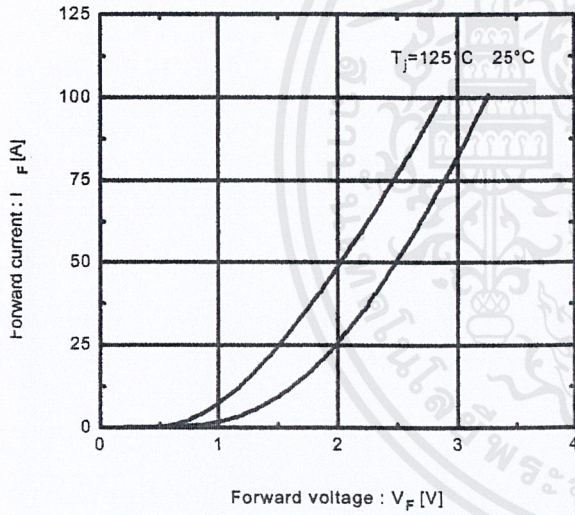
Dynamic input characteristics

$T_j=25^\circ C$



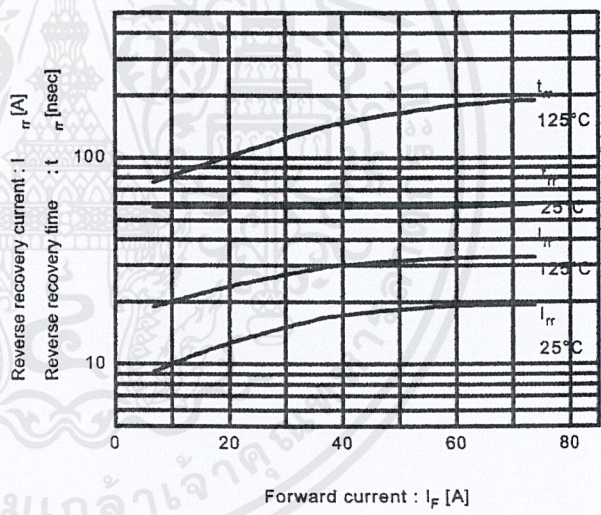
Forward current vs. Forward voltage

$V_{GE}=0V$

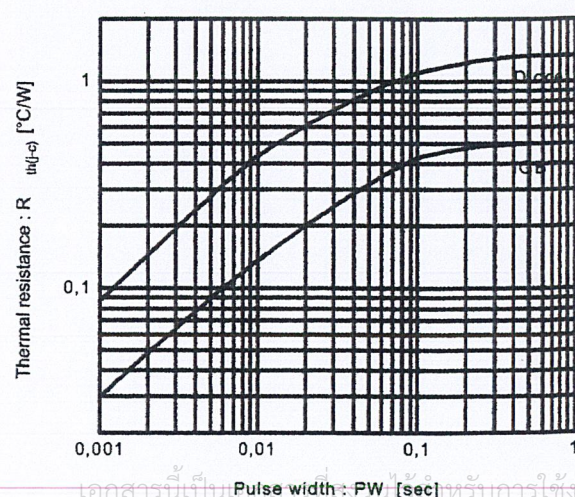


Reverse recovery characteristics

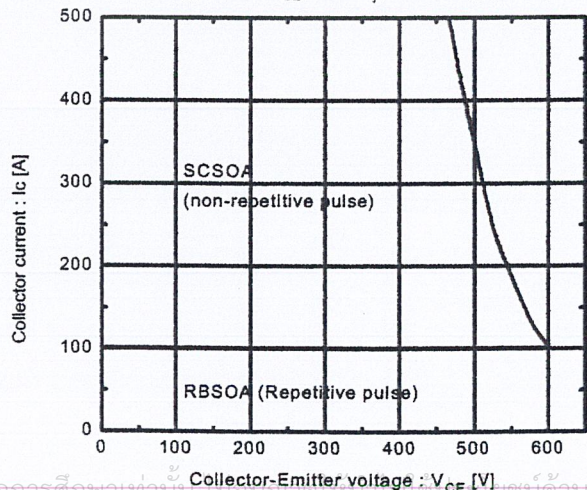
t_{rr}, I_{rr} vs. I_F



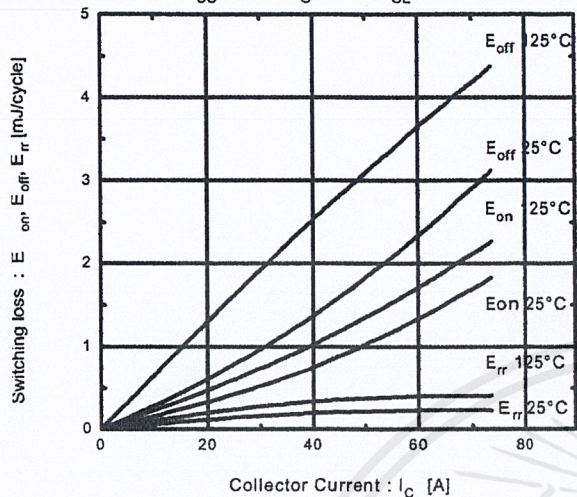
Transient thermal resistance



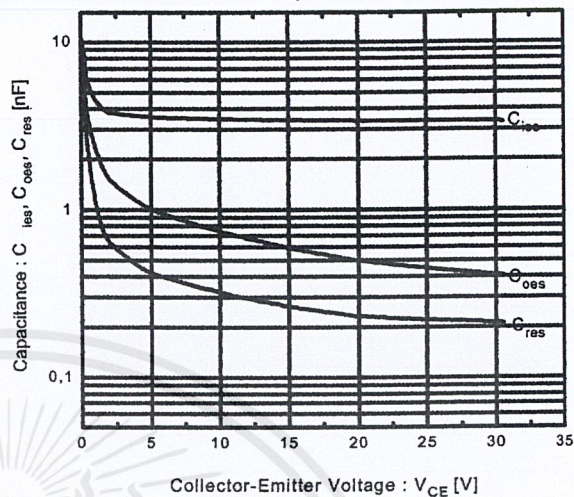
Reversed biased safe operating area
 $+V_{GE}=15V, -V_{GE}\leq 15V, T_j\leq 125^\circ C, R_G\geq 51\Omega$



Switching loss vs. Collector current
 $V_{CC}=300V, R_G=51\Omega, V_{GE}=\pm 15V$



Capacitance vs. Collector-Emitter voltage
 $T_j=25^\circ C$



Fuji Semiconductor, Inc. - P.O. Box 702708 - Dallas, TX - (972) 733-1700 - www.fujisemiconductor.com

Fuji Electric GmbH

Lyoner Straße 26

D-60528 Frankfurt/M

Tel.: 069 - 66 90 29 - 0

Fax.: 069 - 66 90 29 - 56

Fuji Electric (UK) Ltd.

Commonwealth House
2 Chalkhill Road Hammersmith

London W6 8DW, UK

Tel.: 0181 - 233 11 30

Fax.: 0181 - 233 11 60

DATA SHEET

For a complete data sheet, please also download:

- The IC04 LOCMOS HE4000B Logic Family Specifications HEF, HEC
- The IC04 LOCMOS HE4000B Logic Package Outlines/Information HEF, HEC

HEF4557B

LSI

1-to-64 bit variable length shift register

Product specification
File under Integrated Circuits, IC04

January 1995

1-to-64 bit variable length shift register

HEF4557B LSI

DESCRIPTION

The HEF4557B is a static clocked serial shift register whose length may be programmed to be any number of bits between 1 and 64. The number of bits selected is equal to the sum of the subscripts of the enabled length control inputs ($L_1, L_2, L_4, L_8, L_{16}$ and L_{32}) plus one. Serial data may be selected from the D_A or D_B data inputs with the A/\bar{B} select input. This feature is useful for recirculation

purposes. Information on D_A or D_B is shifted into the first register position and all the data in the register is shifted one position to the right on the LOW to HIGH transition of CP_0 while \bar{CP}_1 is LOW or on the HIGH to LOW transition of \bar{CP}_1 while CP_0 is HIGH. A HIGH on master reset (MR) resets the register and forces O to LOW and \bar{O} to HIGH, independent of the other inputs.

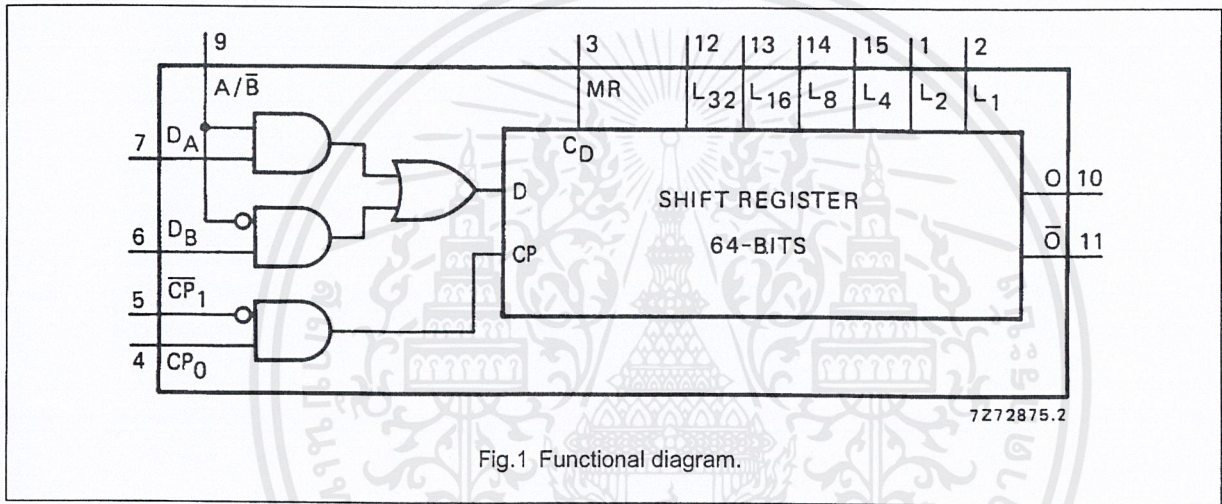


Fig.1 Functional diagram.

PINNING

- D_A, D_B data inputs
- A/\bar{B} select data input
- CP_0 clock input
- \bar{CP}_1 clock enable input
- MR asynchronous master reset
- L_1 to L_{32} bit-length control inputs
- O, \bar{O} buffered outputs

- HEF4557BP(N): 16-lead DIL; plastic (SOT38-1)
- HEF4557BD(F): 16-lead DIL; ceramic (cerdip) (SOT74)
- HEF4557BT(D): 16-lead SO; plastic (SOT109-1)
- (): Package Designator North America

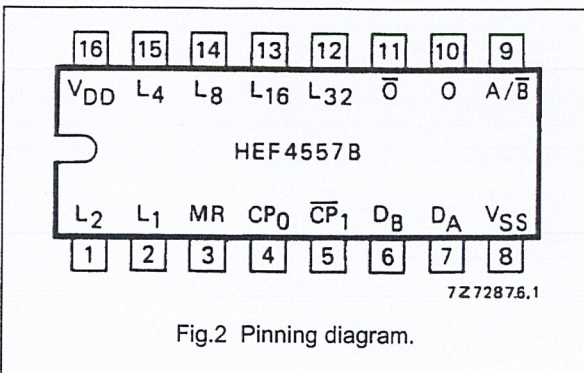


Fig.2 Pinning diagram.

FAMILY DATA, I_{DD} LIMITS category LSI

See Family Specifications

1-to-64 bit variable length shift register

HEF4557B
LSI

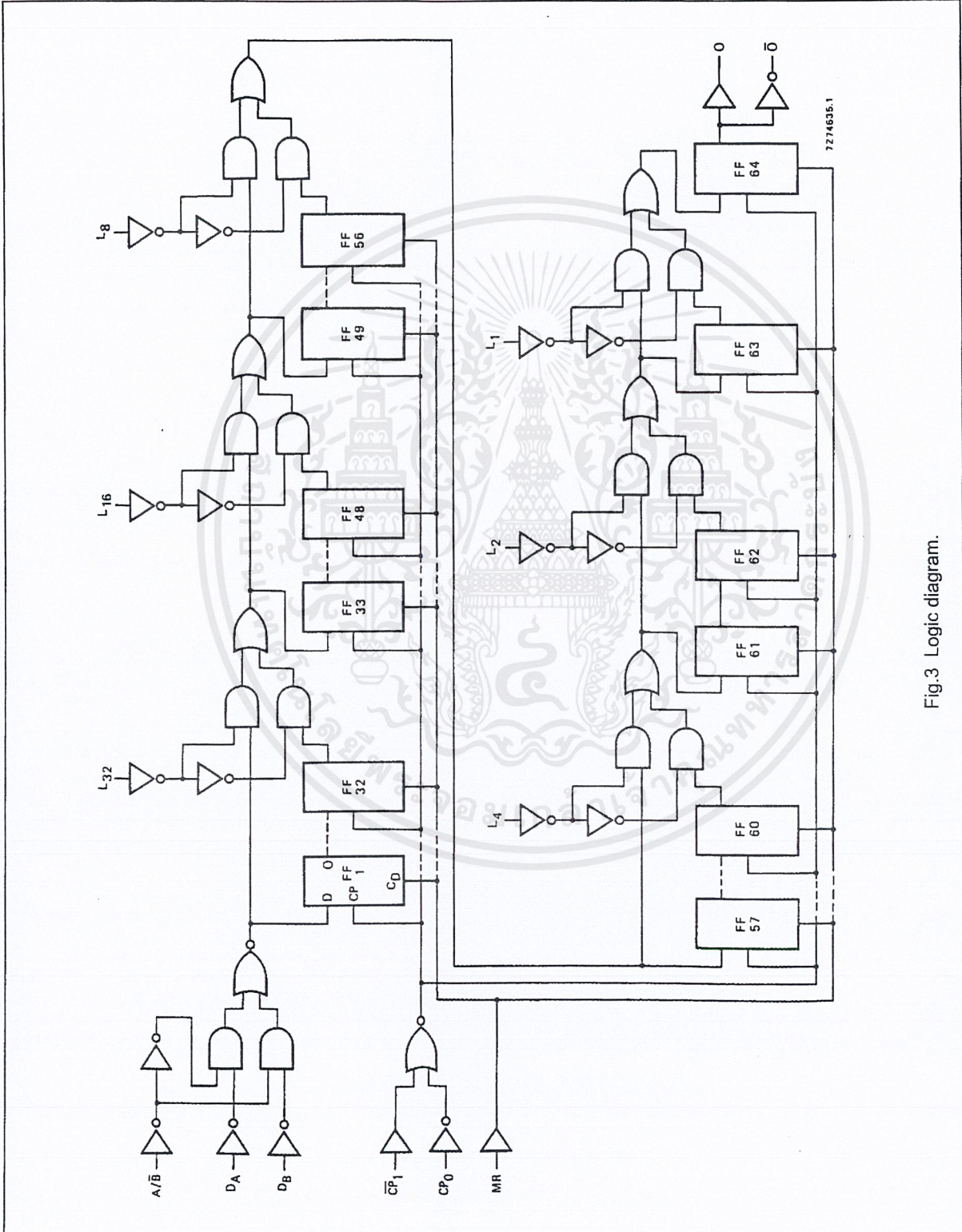


Fig.3 Logic diagram.

1-to-64 bit variable length shift register

HEF4557B
LSI

FUNCTION TABLE

INPUTS						OUTPUT
MR	A/B	D _A	D _B	CP _O	CP ₁	O ⁽¹⁾
L	L	D ₁	D ₂	↗	L	D ₂
L	H	D ₁	D ₂	↗	L	D ₁
L	L	D ₁	D ₂	H	↘	D ₂
L	H	D ₁	D ₂	H	↘	D ₁
H	X	X	X	X	X	L

Notes

1. The moment D_n appears at O depends on the bit-length shown in the table below.
2. H = HIGH state (the more positive voltage)
3. L = LOW state (the less positive voltage)
4. X = state is immaterial
5. ↗ = positive-going transition
6. ↘ = negative-going transition
7. D_n = either HIGH or LOW

BIT-LENGTH SELECT FUNCTION TABLE

L ₃₂	L ₁₆	L ₈	L ₄	L ₂	L ₁	REGISTER LENGTH
L	L	L	L	L	L	1-bit
L	L	L	L	L	H	2-bits
L	L	L	L	H	L	3-bits
L	L	L	L	H	H	4-bits
L	L	L	H	L	L	5-bits
L	L	L	H	L	H	6-bits
L	L	L	H	H	L	7-bits
L	L	L	H	H	H	8-bits
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
L	H	H	H	H	H	32-bits
H	L	L	L	L	L	33-bits
H	L	L	L	L	H	34-bits
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
H	H	H	H	L	L	61-bits
H	H	H	H	L	H	62-bits
H	H	H	H	H	L	63-bits
H	H	H	H	H	H	64-bits

AC CHARACTERISTICS

V_{SS} = 0 V; T_{amb} = 25 °C; input transition times ≤ 20 ns

	V _{DD} V	TYPICAL FORMULA FOR P (μW)	
Dynamic power dissipation per package (P)	5 10 15	3 500 f _i + ∑ (f _o C _L) × V _{DD} ² 15 000 f _i + ∑ (f _o C _L) × V _{DD} ² 37 000 f _i + ∑ (f _o C _L) × V _{DD} ²	where f _i = input freq. (MHz) f _o = output freq. (MHz) C _L = load capacitance (pF) ∑ (f _o C _L) = sum of outputs V _{DD} = supply voltage (V)

1-to-64 bit variable length shift register

HEF4557B
LSI

AC CHARACTERISTICS

 $V_{SS} = 0\text{ V}$; $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$; $C_L = 50\text{ pF}$; input transition times $\leq 20\text{ ns}$

	V_{DD} V	SYMBOL	TYP.	MAX.		TYPICAL EXTRAPOLATION FORMULA	
Propagation delays $CP_0, \overline{CP}_1 \rightarrow O, \overline{O}$ HIGH to LOW	5	t_{PHL}	240	480	ns	$213\text{ ns} + (0,55\text{ ns/pF}) C_L$	
	10		90	180	ns	$79\text{ ns} + (0,23\text{ ns/pF}) C_L$	
	15		65	130	ns	$57\text{ ns} + (0,16\text{ ns/pF}) C_L$	
	LOW to HIGH	5	t_{PLH}	240	480	ns	$213\text{ ns} + (0,55\text{ ns/pF}) C_L$
		10		90	180	ns	$79\text{ ns} + (0,23\text{ ns/pF}) C_L$
		15		65	130	ns	$57\text{ ns} + (0,16\text{ ns/pF}) C_L$
	MR \rightarrow O HIGH to LOW	5	t_{PHL}	170	340	ns	$143\text{ ns} + (0,55\text{ ns/pF}) C_L$
		10		80	160	ns	$69\text{ ns} + (0,23\text{ ns/pF}) C_L$
		15		60	120	ns	$52\text{ ns} + (0,16\text{ ns/pF}) C_L$
MR \rightarrow \overline{O} LOW to HIGH	5	t_{PLH}	140	280	ns	$113\text{ ns} + (0,55\text{ ns/pF}) C_L$	
	10		70	140	ns	$59\text{ ns} + (0,23\text{ ns/pF}) C_L$	
	15		55	110	ns	$47\text{ ns} + (0,16\text{ ns/pF}) C_L$	
Output transition times HIGH to LOW	5	t_{THL}	60	120	ns	$10\text{ ns} + (1,0\text{ ns/pF}) C_L$	
	10		30	60	ns	$9\text{ ns} + (0,42\text{ ns/pF}) C_L$	
	15		20	40	ns	$6\text{ ns} + (0,28\text{ ns/pF}) C_L$	
	LOW to HIGH	5	t_{TLH}	60	120	ns	$10\text{ ns} + (1,0\text{ ns/pF}) C_L$
		10		30	60	ns	$9\text{ ns} + (0,42\text{ ns/pF}) C_L$
		15		20	40	ns	$6\text{ ns} + (0,28\text{ ns/pF}) C_L$

Interpolation table (see note next page)

LENGTH CONTROL INPUTS						MINIMUM NUMBER OF BITS SELECTED	SET-UP, HOLD, RECOVERY TIMES
L_1	L_2	L_4	L_8	L_{16}	L_{32}		
L	L	L	L	L	L	1	specified
H	L	L	L	L	L	2	
X	H	L	L	L	L	3	
X	X	H	L	L	L	5	six equal steps
X	X	X	H	L	L	9	
X	X	X	X	H	L	17	
X	X	X	X	X	H	33	specified

Notes

- H = HIGH state (the more positive voltage)
- L = LOW state (the less positive voltage)
- X = state is immaterial

1-to-64 bit variable length shift register

HEF4557B
LSI

AC CHARACTERISTICS

 $V_{SS} = 0\text{ V}$; $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$; $C_L = 50\text{ pF}$; input transition times $\leq 20\text{ ns}$; see also waveforms Fig.4

	V_{DD} V	SYMBOL	MIN.	TYP.	
Minimum clock pulse width; LOW for CP_0 or HIGH for \overline{CP}_1	5	t_{WCPL}	180	90 ns	
	10	or	60	30 ns	
	15	t_{WCPH}	40	20 ns	
Minimum reset pulse width; HIGH	5	t_{WMRH}	150	75 ns	
	10		70	35 ns	
	15		50	25 ns	
Set-up times $D_A, D_B, A/\overline{B} \rightarrow CP_0, \overline{CP}_1$ L_1 to $L_{32} = \text{LOW}$ $L_{32} = \text{HIGH}$	5	t_{su}	360	180 ns	see note
	10		140	70 ns	
	15		90	45 ns	
	5	t_{su}	40	-20 ns	
	10		35	-10 ns	
	15		30	-5 ns	
Hold times $D_A, D_B, A/\overline{B} \rightarrow CP_0, \overline{CP}_1$ L_1 to $L_{32} = \text{LOW}$ $L_{32} = \text{HIGH}$	5	t_{hold}	-40	-110 ns	
	10		-10	-45 ns	
	15		0	-30 ns	
	5	t_{hold}	90	30 ns	
	10		60	20 ns	
	15		50	15 ns	
Recovery times for MR L_1 to $L_{32} = \text{LOW}$ $L_{32} = \text{HIGH}$	5	t_{RMR}	500	250 ns	
	10		250	125 ns	
	15		150	75 ns	
	5	t_{RMR}	110	50 ns	
	10		70	30 ns	
	15		60	25 ns	
Minimum clock pulse frequency	5	f_{max}	2,5	5 MHz	
	10		7	14 MHz	
	15		10	20 MHz	

Note

- The set-up, hold and recovery times vary with the minimum number of bits selected. For other values as specified one may interpolate as shown in the table (see previous page).

1-to-64 bit variable length shift register

HEF4557B
LSI

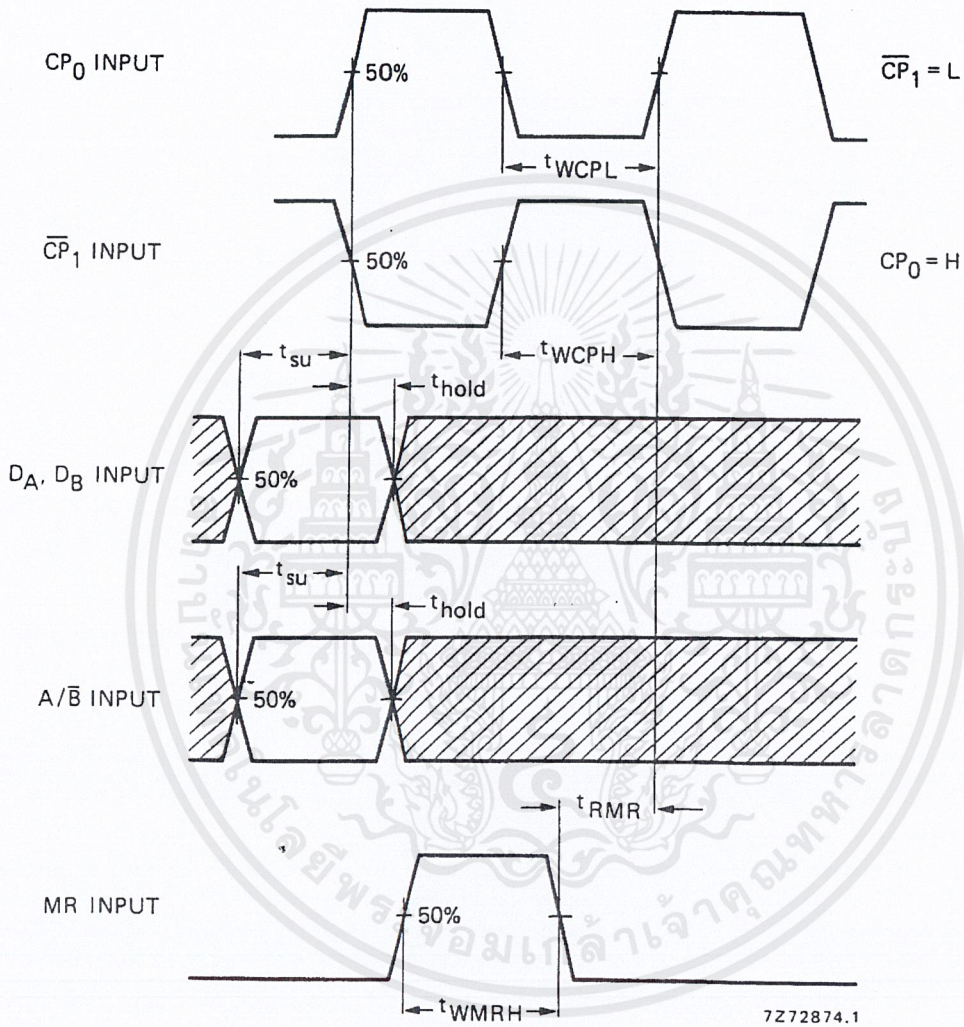


Fig.4 Waveforms showing recovery time for MR and minimum CP₀, \overline{CP}_1 and MR pulse widths, set-up and hold times for D_A, D_B and A/ \overline{B} to CP₀ and \overline{CP}_1 . Set-up and hold times are shown as positive values but may be specified as negative values.

LM2907/LM2917 Frequency to Voltage Converter

General Description

The LM2907, LM2917 series are monolithic frequency to voltage converters with a high gain op amp/comparator designed to operate a relay, lamp, or other load when the input frequency reaches or exceeds a selected rate. The tachometer uses a charge pump technique and offers frequency doubling for low ripple, full input protection in two versions (LM2907-8, LM2917-8) and its output swings to ground for a zero frequency input.

The op amp/comparator is fully compatible with the tachometer and has a floating transistor as its output. This feature allows either a ground or supply referred load of up to 50 mA. The collector may be taken above V_{CC} up to a maximum V_{CE} of 28V.

The two basic configurations offered include an 8-pin device with a *ground referenced tachometer* input and an internal connection between the tachometer output and the op amp non-inverting input. This version is well suited for single speed or frequency switching or fully buffered frequency to voltage conversion applications.

The more versatile configurations provide differential tachometer input and uncommitted op amp inputs. With this version the tachometer input may be floated and the op amp becomes suitable for active filter conditioning of the tachometer output.

Both of these configurations are available with an active shunt regulator connected across the power leads. The regulator clamps the supply such that stable frequency to voltage and frequency to current operations are possible with any supply voltage and a suitable resistor.

Advantages

- Output swings to ground for zero frequency input

- Easy to use; $V_{OUT} = f_{IN} \times V_{CC} \times R1 \times C1$
- Only one RC network provides frequency doubling
- Zener regulator on chip allows accurate and stable frequency to voltage or current conversion (LM2917)

Features

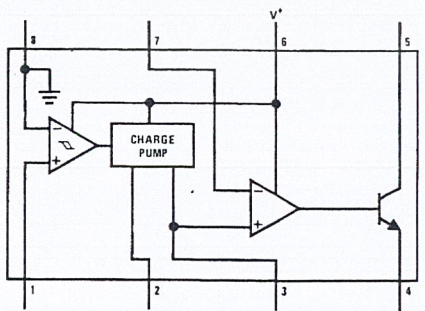
- Ground referenced tachometer input interfaces directly with variable reluctance magnetic pickups
- Op amp/comparator has floating transistor output
- 50 mA sink or source to operate relays, solenoids, meters, or LEDs
- Frequency doubling for low ripple
- Tachometer has built-in hysteresis with either differential input or ground referenced input
- Built-in zener on LM2917
- $\pm 0.3\%$ linearity typical
- Ground referenced tachometer is fully protected from damage due to swings above V_{CC} and below ground

Applications

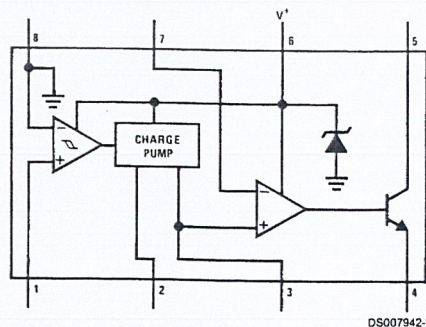
- Over/under speed sensing
- Frequency to voltage conversion (tachometer)
- Speedometers
- Breaker point dwell meters
- Hand-held tachometer
- Speed governors
- Cruise control
- Automotive door lock control
- Clutch control
- Horn control
- Touch or sound switches

LM2907/LM2917 Frequency to Voltage Converter

Block and Connection Diagrams Dual-In-Line and Small Outline Packages, Top Views

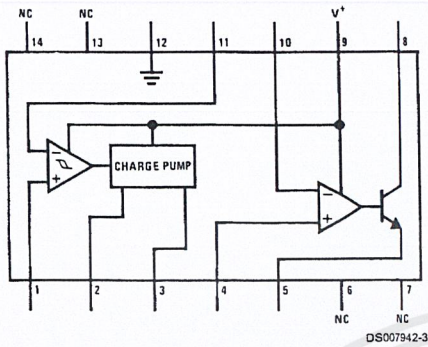


Order Number LM2907M-8 or LM2907N-8
See NS Package Number M08A or N08E

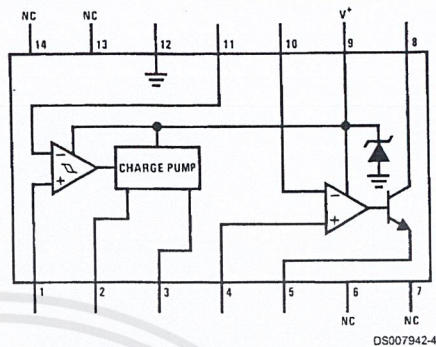


Order Number LM2917M-8 or LM2917N-8
See NS Package Number M08A or N08E

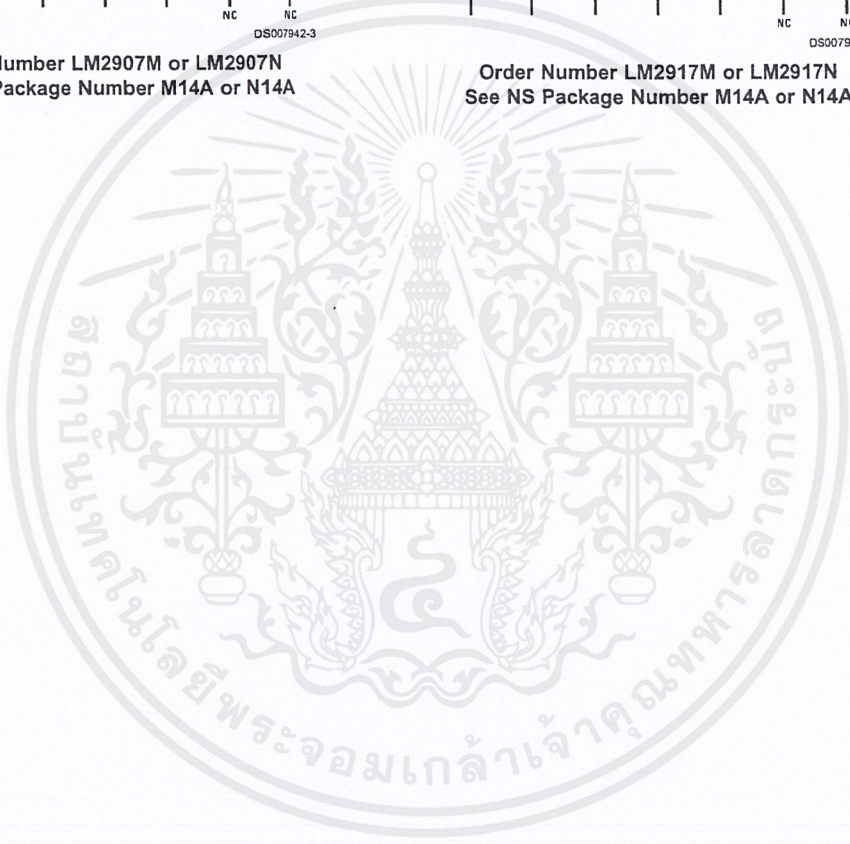
Block and Connection Diagrams Dual-In-Line and Small Outline Packages, Top Views (Continued)



Order Number LM2907M or LM2907N
See NS Package Number M14A or N14A



Order Number LM2917M or LM2917N
See NS Package Number M14A or N14A



Absolute Maximum Ratings (Note 1)

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

Supply Voltage	28V
Supply Current (Zener Options)	25 mA
Collector Voltage	28V
Differential Input Voltage	
Tachometer	28V
Op Amp/Comparator	28V
Input Voltage Range	
Tachometer	
LM2907-8, LM2917-8	±28V
LM2907, LM2917	0.0V to +28V
Op Amp/Comparator	0.0V to +28V

Power Dissipation

LM2907-8, LM2917-8	1200 mW
LM2907-14, LM2917-14	1580 mW
See (Note 1)	

Operating Temperature Range	-40°C to +85°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C

Soldering Information

Dual-In-Line Package	
Soldering (10 seconds)	260°C
Small Outline Package	
Vapor Phase (60 seconds)	215°C
Infrared (15 seconds)	220°C

See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.

Electrical Characteristics

$V_{CC} = 12 V_{DC}$, $T_A = 25^\circ C$, see test circuit

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
TACHOMETER						
	Input Thresholds	$V_{IN} = 250 \text{ mVp-p} @ 1 \text{ kHz (Note 2)}$	±10	±25	±40	mV
	Hysteresis	$V_{IN} = 250 \text{ mVp-p} @ 1 \text{ kHz (Note 2)}$		30		mV
	Offset Voltage	$V_{IN} = 250 \text{ mVp-p} @ 1 \text{ kHz (Note 2)}$				
	LM2907/LM2917			3.5	10	mV
	LM2907-8/LM2917-8			5	15	mV
	Input Bias Current	$V_{IN} = \pm 50 \text{ mV}_{DC}$		0.1	1	µA
V_{OH}	Pin 2	$V_{IN} = +125 \text{ mV}_{DC} \text{ (Note 3)}$		8.3		V
V_{OL}	Pin 2	$V_{IN} = -125 \text{ mV}_{DC} \text{ (Note 3)}$		2.3		V
I_2, I_3	Output Current	$V_2 = V_3 = 6.0V \text{ (Note 4)}$	140	180	240	µA
I_3	Leakage Current	$I_2 = 0, V_3 = 0$			0.1	µA
K	Gain Constant	(Note 3)	0.9	1.0	1.1	
	Linearity	$f_{IN} = 1 \text{ kHz, 5 kHz, 10 kHz (Note 5)}$	-1.0	0.3	+1.0	%
OP/AMP COMPARATOR						
V_{OS}		$V_{IN} = 6.0V$		3	10	mV
I_{BIAS}		$V_{IN} = 6.0V$		50	500	nA
	Input Common-Mode Voltage		0		$V_{CC} - 1.5V$	V
	Voltage Gain			200		V/mV
	Output Sink Current	$V_C = 1.0$	40	50		mA
	Output Source Current	$V_E = V_{CC} - 2.0$		10		mA
	Saturation Voltage	$I_{SINK} = 5 \text{ mA}$		0.1	0.5	V
		$I_{SINK} = 20 \text{ mA}$			1.0	V
		$I_{SINK} = 50 \text{ mA}$		1.0	1.5	V
ZENER REGULATOR						
	Regulator Voltage	$R_{DROP} = 470\Omega$		7.56		V
	Series Resistance			10.5	15	Ω
	Temperature Stability			+1		mV/°C
	TOTAL SUPPLY CURRENT			3.8	6	mA

Note 1: For operation in ambient temperatures above 25°C, the device must be derated based on a 150°C maximum junction temperature and a thermal resistance of 101°C/W junction to ambient for LM2907-8 and LM2917-8, and 79°C/W junction to ambient for LM2907-14 and LM2917-14.

Note 2: Hysteresis is the sum $+V_{TH} - (-V_{TH})$, offset voltage is their difference. See test circuit.

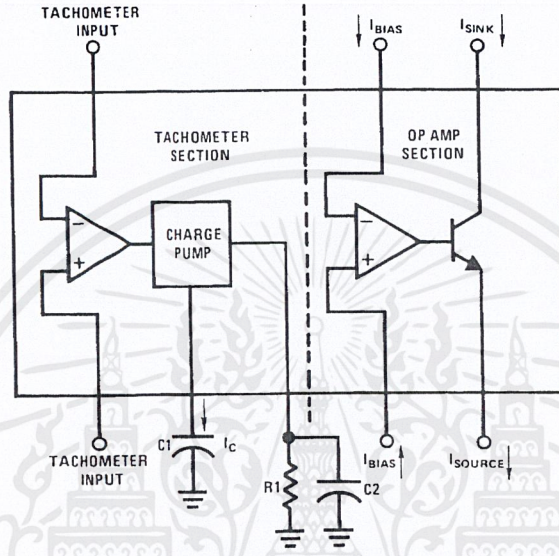
Note 3: V_{OH} is equal to $\frac{3}{4} \times V_{CC} - 1 V_{BE}$, V_{OL} is equal to $\frac{3}{4} \times V_{CC} - 1 V_{BE}$ therefore $V_{OH} - V_{OL} = V_{CC}/2$. The difference, $V_{OH} - V_{OL}$, and the mirror gain, I_2/I_3 , are the two factors that cause the tachometer gain constant to vary from 1.0.

Note 4: Be sure when choosing the time constant $R1 \times C1$ that $R1$ is such that the maximum anticipated output voltage at pin 3 can be reached with $I_3 \times R1$. The maximum value for $R1$ is limited by the output resistance of pin 3 which is greater than 10 MΩ typically.

Electrical Characteristics (Continued)

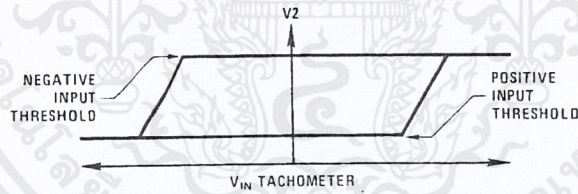
Note 5: Nonlinearity is defined as the deviation of V_{OUT} (@ pin 3) for $f_{IN} = 5$ kHz from a straight line defined by the V_{OUT} @ 1 kHz and V_{OUT} @ 10 kHz. $C1 = 1000$ pF, $R1 = 68k$ and $C2 = 0.22$ mFd.

Test Circuit and Waveform



DS007942-6

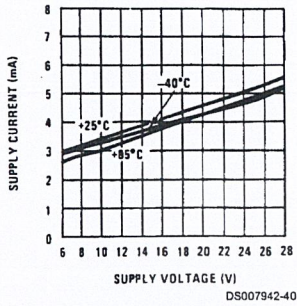
Tachometer Input Threshold Measurement



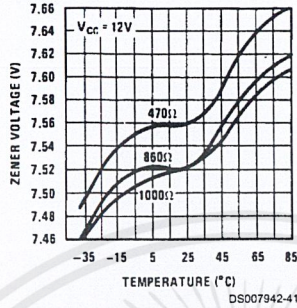
DS007942-7

Typical Performance Characteristics

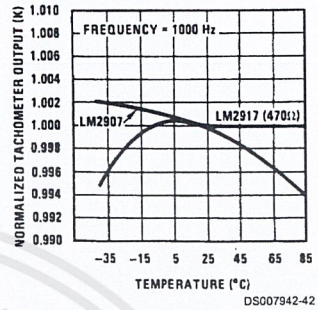
Total Supply Current



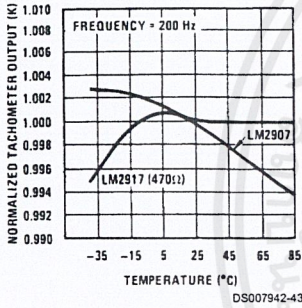
Zener Voltage vs Temperature



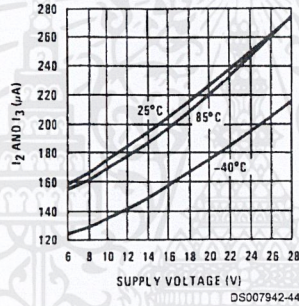
Normalized Tachometer Output vs Temperature



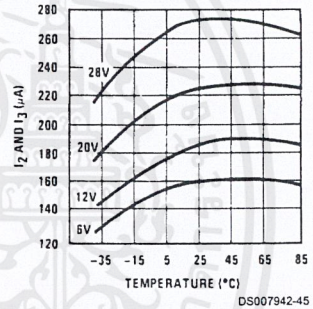
Normalized Tachometer Output vs Temperature



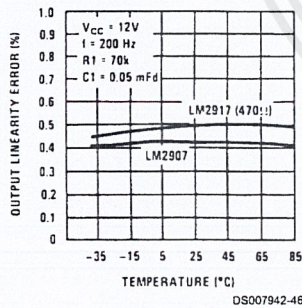
Tachometer Currents I₂ and I₃ vs Supply Voltage



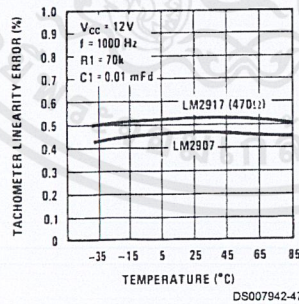
Tachometer Currents I₂ and I₃ vs Temperature



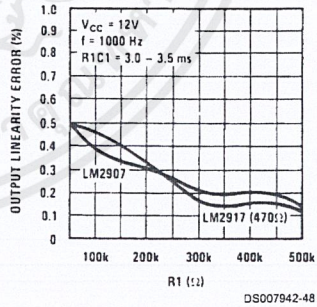
Tachometer Linearity vs Temperature



Tachometer Linearity vs Temperature

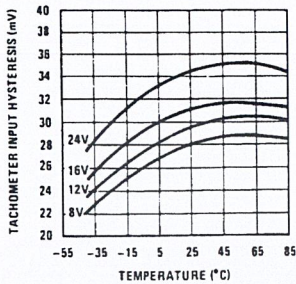


Tachometer Linearity vs R1

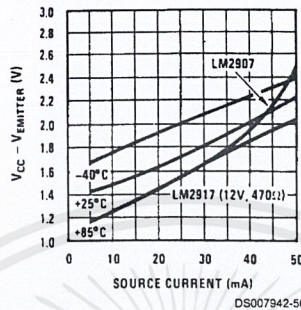


Typical Performance Characteristics (Continued)

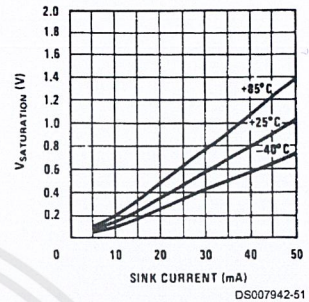
Tachometer Input Hysteresis vs Temperature



Op Amp Output Transistor Characteristics



Op Amp Output Transistor Characteristics



Applications Information

The LM2907 series of tachometer circuits is designed for minimum external part count applications and maximum versatility. In order to fully exploit its features and advantages let's examine its theory of operation. The first stage of operation is a differential amplifier driving a positive feedback flip-flop circuit. The input threshold voltage is the amount of differential input voltage at which the output of this stage changes state. Two options (LM2907-8, LM2917-8) have one input internally grounded so that an input signal must swing above and below ground and exceed the input thresholds to produce an output. This is offered specifically for magnetic variable reluctance pickups which typically provide a single-ended ac output. This single input is also fully protected against voltage swings to $\pm 28V$, which are easily attained with these types of pickups.

The differential input options (LM2907, LM2917) give the user the option of setting his own input switching level and still have the hysteresis around that level for excellent noise rejection in any application. Of course in order to allow the inputs to attain common-mode voltages above ground, input protection is removed and neither input should be taken outside the limits of the supply voltage being used. It is very important that an input not go below ground without some resistance in its lead to limit the current that will then flow in the epi-substrate diode.

Following the input stage is the charge pump where the input frequency is converted to a dc voltage. To do this requires one timing capacitor, one output resistor, and an integrating or filter capacitor. When the input stage changes state (due to a suitable zero crossing or differential voltage on the input) the timing capacitor is either charged or discharged linearly between two voltages whose difference is $V_{CC}/2$. Then in one half cycle of the input frequency or a time equal to $1/2 f_{IN}$ the change in charge on the timing capacitor is equal to $V_{CC}/2 \times C1$. The average amount of current pumped into or out of the capacitor then is:

$$\frac{\Delta Q}{T} = i_{c(AVG)} = C1 \times \frac{V_{CC}}{2} \times (2f_{IN}) = V_{CC} \times f_{IN} \times C1$$

The output circuit mirrors this current very accurately into the load resistor $R1$, connected to ground, such that if the pulses of current are integrated with a filter capacitor, then $V_O = i_c \times R1$, and the total conversion equation becomes:

$$V_O = V_{CC} \times f_{IN} \times C1 \times R1 \times K$$

Where K is the gain constant—typically 1.0.

The size of $C2$ is dependent only on the amount of ripple voltage allowable and the required response time.

CHOOSING $R1$ AND $C1$

There are some limitations on the choice of $R1$ and $C1$ which should be considered for optimum performance. The timing capacitor also provides internal compensation for the charge pump and should be kept larger than 500 pF for very accurate operation. Smaller values can cause an error current on $R1$, especially at low temperatures. Several considerations must be met when choosing $R1$. The output current at pin 3 is internally fixed and therefore $V_O/R1$ must be less than or equal to this value. If $R1$ is too large, it can become a significant fraction of the output impedance at pin 3 which degrades linearity. Also output ripple voltage must be considered and the size of $C2$ is affected by $R1$. An expression that describes the ripple content on pin 3 for a single $R1C2$ combination is:

$$V_{RIPPLE} = \frac{V_{CC}}{2} \times \frac{C1}{C2} \times \left(1 - \frac{V_{CC} \times f_{IN} \times C1}{I_2}\right) \text{pk-pk}$$

It appears $R1$ can be chosen independent of ripple, however response time, or the time it takes V_{OUT} to stabilize at a new voltage increases as the size of $C2$ increases, so a compromise between ripple, response time, and linearity must be chosen carefully.

As a final consideration, the maximum attainable input frequency is determined by V_{CC} , $C1$ and I_2 :

$$f_{MAX} = \frac{I_2}{C1 \times V_{CC}}$$

USING ZENER REGULATED OPTIONS (LM2917)

For those applications where an output voltage or current must be obtained independent of supply voltage variations, the LM2917 is offered. The most important consideration in choosing a dropping resistor from the unregulated supply to the device is that the tachometer and op amp circuitry alone require about 3 mA at the voltage level provided by the zener. At low supply voltages there must be some current flowing in the resistor above the 3 mA circuit current to operate the regulator. As an example, if the raw supply varies from 9V to 16V, a resistance of 470 Ω will minimize the zener voltage variation to 160 mV. If the resistance goes under 400 Ω or over 600 Ω the zener variation quickly rises above 200 mV for the same input variation.



Order this document by LF347/D

LF347, B LF351 LF353

JFET Input Operational Amplifiers

These low cost JFET input operational amplifiers combine two state-of-the-art analog technologies on a single monolithic integrated circuit. Each internally compensated operational amplifier has well matched high voltage JFET input devices for low input offset voltage. The JFET technology provides wide bandwidths and fast slew rates with low input bias currents, input offset currents, and supply currents.

These devices are available in single, dual and quad operational amplifiers which are pin-compatible with the industry standard MC1741, MC1458, and the MC3403/LM324 bipolar devices.

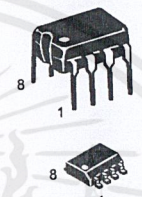
- Input Offset Voltage of 5.0 mV Max (LF347B)
- Low Input Bias Current: 50 pA
- Low Input Noise Voltage: $16 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Wide Gain Bandwidth: 4.0 MHz
- High Slew Rate: $13\text{V}/\mu\text{s}$
- Low Supply Current: 1.8 mA per Amplifier
- High Input Impedance: $10^{12} \Omega$
- High Common Mode and Supply Voltage Rejection Ratios: 100 dB

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage	V _{CC}	+18	V
	V _{EE}	-18	V
Differential Input Voltage	V _{ID}	±30	V
Input Voltage Range (Note 1)	V _{IDR}	±15	V
Output Short Circuit Duration (Note 2)	t _{SC}	Continuous	
Power Dissipation at T _A = +25°C	P _D	900	mW
	1/θ _{JA}	10	mW/°C
Operating Ambient Temperature Range	T _A	0 to +70	°C
Operating Junction Temperature Range	T _J	115	°C
Storage Temperature Range	T _{stg}	-65 to	°C
		+150	

- NOTES: 1. Unless otherwise specified, the absolute maximum negative input voltage is limited to the negative power supply.
2. Any amplifier output can be shorted to ground indefinitely. However, if more than one amplifier output is shorted simultaneously, maximum junction temperature rating may be exceeded.

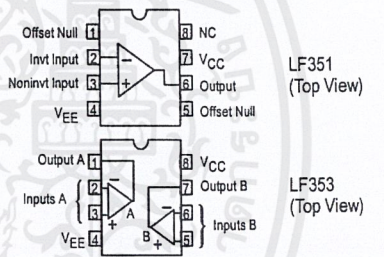
FAMILY OF JFET OPERATIONAL AMPLIFIERS



**N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 626**

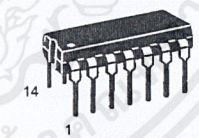
**D SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 751
(SO-8)**

PIN CONNECTIONS



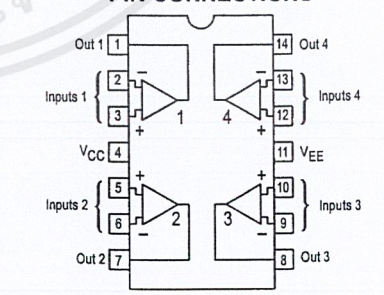
Offset Null 1, Invt Input 2, Noninvt Input 3, V_{EE} 4, Output 5, Offset Null 6, NC 8, V_{CC} 7, LF351 (Top View)

Output A 1, Inputs A 2, V_{EE} 4, V_{CC} 7, Output B 8, Inputs B 5, LF353 (Top View)



**N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 646**

PIN CONNECTIONS



Out 1 1, Inputs 1 2, 3, V_{CC} 4, Inputs 2 5, 6, Out 2 7, Out 4 14, Inputs 4 13, 12, V_{EE} 11, Inputs 3 10, 9, Out 3 8, (Top View)

ORDERING INFORMATION

Device	Function	Operating Temperature Range	Package
LF351D LF351N	Single Single	T _A = 0° to +70°C	SO-8 Plastic DIP
LF353D LF353N	Dual Dual		SO-8 Plastic DIP
LF347BN LF347N	Quad Quad		Plastic DIP Plastic DIP

LF347, B LF351 LF353

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = +15 V$, $V_{EE} = -15 V$, $T_A = 25^\circ C$, unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	LF347B			LF347, LF351, LF353			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage ($R_S \leq 10 k$, $V_{CM} = 0$) $T_A = +25^\circ C$ $0^\circ C \leq T_A \leq +70^\circ C$	V_{IO}	–	1.0	5.0	–	5.0	10	mV
		–	–	8.0	–	–	13	
Avg. Temperature Coefficient of Input Offset Voltage $R_S \leq 10 k$, $0^\circ C \leq T_A \leq +70^\circ C$	$\Delta V_{IO}/\Delta T$	–	10	–	–	10	–	$\mu V/^\circ C$
Input Offset Current ($V_{CM} = 0$, Note 3) $T_A = +25^\circ C$ $0^\circ C \leq T_A \leq +70^\circ C$	I_{IO}	–	25	100	–	25	100	pA
		–	–	4.0	–	–	4.0	nA
Input Bias Current ($V_{CM} = 0$, Note 3) $T_A = +25^\circ C$ $0^\circ C \leq T_A \leq +70^\circ C$	I_{IB}	–	50	200	–	50	200	pA
		–	–	8.0	–	–	8.0	nA
Input Resistance	r_i	–	10^{12}	–	–	10^{12}	–	Ω
Common Mode Input Voltage Range	V_{ICR}	± 11	+15 –12	–	± 11	+15 –12	–	V
Large-Signal Voltage Gain ($V_O = \pm 10 V$, $R_L = 2.0 k$) $T_A = +25^\circ C$ $0^\circ C \leq T_A \leq +70^\circ C$	A_{VOL}	50 25	100 –	– –	25 15	100 –	– –	V/mV
Output Voltage Swing ($R_L = 10 k$)	V_O	± 12	± 14	–	± 12	± 14	–	V
Common Mode Rejection ($R_S \leq 10 k$)	CMR	80	100	–	70	100	–	dB
Supply Voltage Rejection ($R_S \leq 10 k$)	PSRR	80	100	–	70	100	–	dB
Supply Current LF347 LF351 LF353	I_D	– – –	7.2 – –	11 – –	– – –	7.2 1.8 3.6	11 3.4 6.5	mA
Short Circuit Current	I_{SC}	–	25	–	–	25	–	mA
Slew Rate ($A_V = +1$)	SR	–	13	–	–	13	–	V/ μs
Gain-Bandwidth Product	BWp	–	4.0	–	–	4.0	–	MHz
Equivalent Input Noise Voltage ($R_S = 100 \Omega$, $f = 1000 Hz$)	e_n	–	24	–	–	24	–	nV/\sqrt{Hz}
Equivalent Input Noise Current ($f = 1000 Hz$)	i_n	–	0.01	–	–	0.01	–	pA/\sqrt{Hz}
Channel Separation (LF347, LF353) $1.0 Hz \leq f \leq 20 kHz$ (Input Referred)	–	–	–120	–	–	–120	–	dB

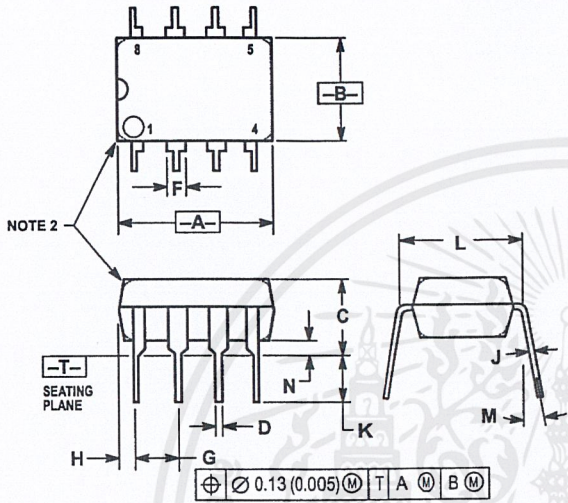
For Typical Characteristic Performance Curves, refer to MC34001, 34002, 34004 data sheet.

NOTE: 3. Input bias currents of JFET input op amps approximately double for every $10^\circ C$ rise in junction temperature. To maintain junction temperatures as close to ambient as is possible, pulse techniques are utilized during test.

LF347, B LF351 LF353

OUTLINE DIMENSIONS

N SUFFIX
 PLASTIC PACKAGE
 CASE 626-05
 ISSUE K

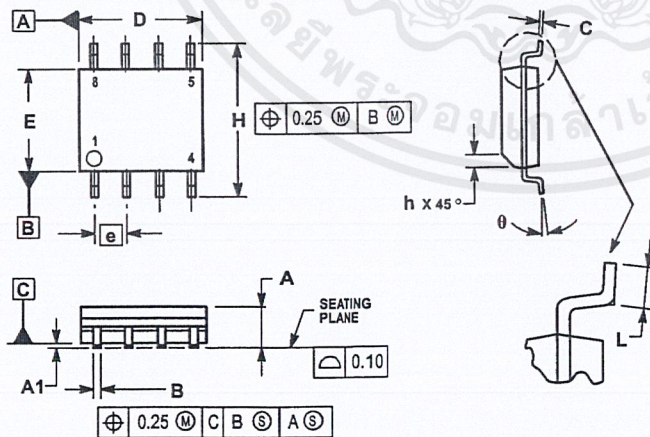


NOTES:

1. DIMENSION L TO CENTER OF LEAD WHEN FORMED PARALLEL.
2. PACKAGE CONTOUR OPTIONAL (ROUND OR SQUARE CORNERS).
3. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	9.40	10.16	0.370	0.400
B	6.10	6.60	0.240	0.260
C	3.94	4.45	0.155	0.175
D	0.38	0.51	0.015	0.020
F	1.02	1.78	0.040	0.070
G	2.54 BSC		0.100 BSC	
H	0.76	1.27	0.030	0.050
J	0.20	0.30	0.008	0.012
K	2.92	3.43	0.115	0.135
L	7.62 BSC		0.300 BSC	
M	10°		10°	
N	0.76	1.01	0.030	0.040

D SUFFIX
 PLASTIC PACKAGE
 CASE 751-05
 (SO-8)
 ISSUE R



NOTES:

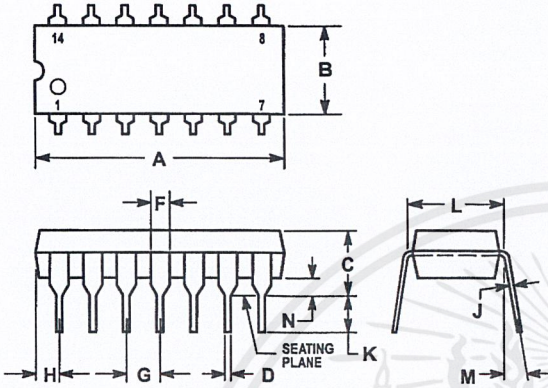
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ASME Y14.5M, 1994.
2. DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.
3. DIMENSION D AND E DO NOT INCLUDE MOLD PROTRUSION.
4. MAXIMUM MOLD PROTRUSION 0.15 PER SIDE.
5. DIMENSION B DOES NOT INCLUDE MOLD PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR PROTRUSION SHALL BE 0.127 TOTAL IN EXCESS OF THE B DIMENSION AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.

DIM	MILLIMETERS	
	MIN	MAX
A	1.35	1.75
A1	0.10	0.25
B	0.35	0.49
C	0.18	0.25
D	4.80	5.00
E	3.80	4.00
e	1.27 BSC	
H	5.80	6.20
h	0.25	0.50
L	0.40	1.25
θ	0° - 7°	

LF347, B LF351 LF353

OUTLINE DIMENSIONS


N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 646-06
ISSUE L



NOTES:

- LEADS WITHIN 0.13 (0.005) RADIUS OF TRUE POSITION AT SEATING PLANE AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.
- DIMENSION L TO CENTER OF LEADS WHEN FORMED PARALLEL.
- DIMENSION B DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH.
- ROUNDED CORNERS OPTIONAL.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.715	0.770	18.16	19.56
B	0.240	0.260	6.10	6.60
C	0.145	0.185	3.69	4.69
D	0.015	0.021	0.38	0.53
F	0.040	0.070	1.02	1.78
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
H	0.052	0.095	1.32	2.41
J	0.008	0.015	0.20	0.38
K	0.115	0.135	2.92	3.43
L	0.300 BSC		7.62 BSC	
M	0°	10°	0°	10°
N	0.015	0.039	0.39	1.01

Motorola reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Motorola makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Motorola assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in Motorola data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. Motorola does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Motorola products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Motorola product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Motorola products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Motorola and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Motorola was negligent regarding the design or manufacture of the part. Motorola and  are registered trademarks of Motorola, Inc. Motorola, Inc. is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

How to reach us:

USA/EUROPE/Locations Not Listed: Motorola Literature Distribution;
P.O. Box 20912; Phoenix, Arizona 85036. 1-800-441-2447 or 602-303-5454

MFAX: RMFAX0@email.sps.mot.com - TOUCHTONE 602-244-6609
INTERNET: http://Design-NET.com

JAPAN: Nippon Motorola Ltd.; Tatsumi-SPD-JLDC, 6F Seibu-Butsuryu-Center,
3-14-2 Tatsumi Koto-Ku, Tokyo 135, Japan. 03-81-3521-8315

ASIA/PACIFIC: Motorola Semiconductors H.K. Ltd.; 8B Tai Ping Industrial Park,
51 Ting Kok Road, Tai Po, N.T., Hong Kong. 852-26629298



MOTOROLA

LF347/D



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำมาใช้เพื่อการพาณิชย์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.0 Absolute Maximum Ratings for the LM311 (Note 12)

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

Total Supply Voltage (V_{B4})	36V
Output to Negative Supply Voltage (V_{74})	40V
Ground to Negative Supply Voltage (V_{14})	30V
Differential Input Voltage	$\pm 30V$
Input Voltage (Note 13)	$\pm 15V$
Power Dissipation (Note 14)	500 mW
ESD Rating (Note 19)	300V
Output Short Circuit Duration	10 sec

Operating Temperature Range	0° to 70°C
Storage Temperature Range	-65°C to 150°C
Lead Temperature (soldering, 10 sec)	260°C
Voltage at Strobe Pin	$V^+ - 5V$

Soldering Information	
Dual-In-Line Package	
Soldering (10 seconds)	260°C
Small Outline Package	
Vapor Phase (60 seconds)	215°C
Infrared (15 seconds)	220°C

See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.

Electrical Characteristics (Note 15)

for the LM311

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
Input Offset Voltage (Note 16)	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $R_S \leq 50k$		2.0	7.5	mV
Input Offset Current (Note 16)	$T_A = 25^\circ\text{C}$		6.0	50	nA
Input Bias Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		100	250	nA
Voltage Gain	$T_A = 25^\circ\text{C}$	40	200		V/mV
Response Time (Note 17)	$T_A = 25^\circ\text{C}$		200		ns
Saturation Voltage	$V_{IN} \leq -10$ mV, $I_{OUT} = 50$ mA $T_A = 25^\circ\text{C}$		0.75	1.5	V
Strobe ON Current (Note 18)	$T_A = 25^\circ\text{C}$		2.0	5.0	mA
Output Leakage Current	$V_{IN} \geq 10$ mV, $V_{OUT} = 35V$ $T_A = 25^\circ\text{C}$, $I_{STROBE} = 3$ mA $V^- = \text{Pin } 1 = -5V$		0.2	50	nA
Input Offset Voltage (Note 16)	$R_S \leq 50k$			10	mV
Input Offset Current (Note 16)				70	nA
Input Bias Current				300	nA
Input Voltage Range		-14.5	13.8, -14.7	13.0	V
Saturation Voltage	$V^+ \geq 4.5V$, $V^- = 0$ $V_{IN} \leq -10$ mV, $I_{OUT} \leq 8$ mA		0.23	0.4	V
Positive Supply Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		5.1	7.5	mA
Negative Supply Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		4.1	5.0	mA

Note 12: "Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is functional, but do not guarantee specific performance limits."

Note 13: This rating applies for $\pm 15V$ supplies. The positive input voltage limit is 30V above the negative supply. The negative input voltage limit is equal to the negative supply voltage or 30V below the positive supply, whichever is less.

Note 14: The maximum junction temperature of the LM311 is 110°C. For operating at elevated temperature, devices in the H08 package must be derated based on a thermal resistance of 165°C/W, junction to ambient, or 20°C/W, junction to case. The thermal resistance of the dual-in-line package is 100°C/W, junction to ambient.

Note 15: These specifications apply for $V_S = \pm 15V$ and Pin 1 at ground, and $0^\circ\text{C} < T_A < +70^\circ\text{C}$, unless otherwise specified. The offset voltage, offset current and bias current specifications apply for any supply voltage from a single 5V supply up to $\pm 15V$ supplies.

Note 16: The offset voltages and offset currents given are the maximum values required to drive the output within a volt of either supply with 1 mA load. Thus, these parameters define an error band and take into account the worst-case effects of voltage gain and R_S .

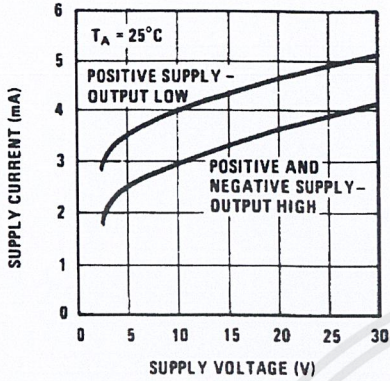
Note 17: The response time specified (see definitions) is for a 100 mV input step with 5 mV overdrive.

Note 18: This specification gives the range of current which must be drawn from the strobe pin to ensure the output is properly disabled. Do not short the strobe pin to ground; it should be current driven at 3 to 5 mA.

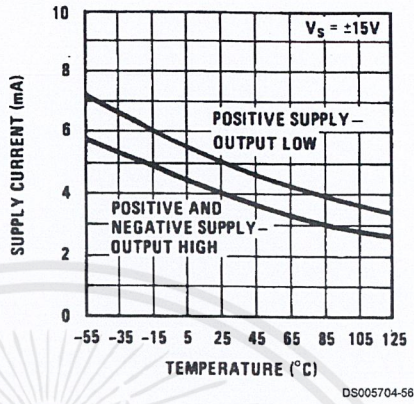
Note 19: Human body model, 1.5 k Ω in series with 100 pF.

6.0 LM111/LM211 Typical Performance Characteristics (Continued)

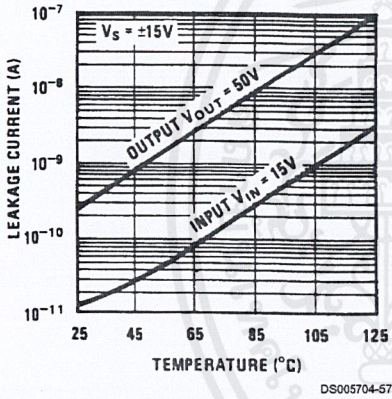
Supply Current



Supply Current

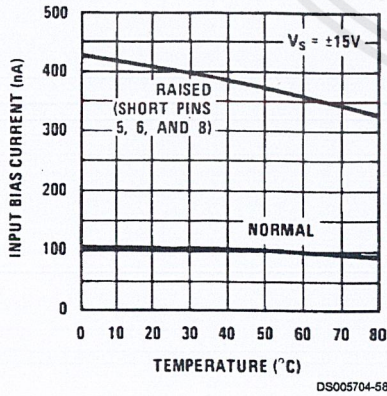


Leakage Currents

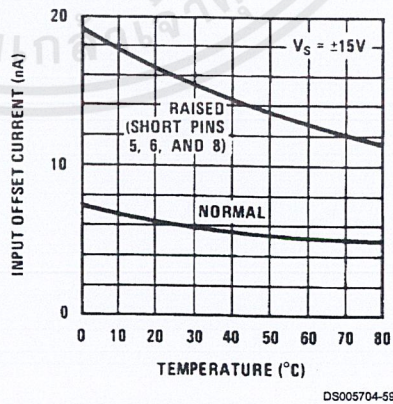


7.0 LM311 Typical Performance Characteristics

Input Bias Current

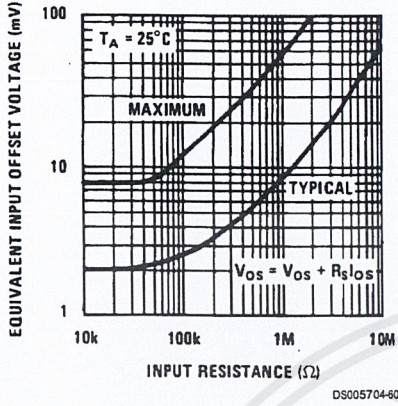


Input Offset Current

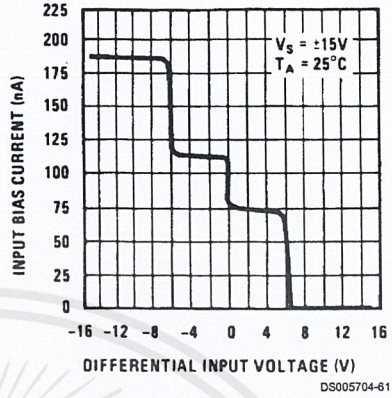


7.0 LM311 Typical Performance Characteristics (Continued)

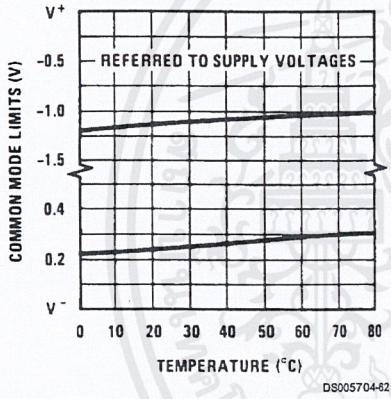
Offset Error



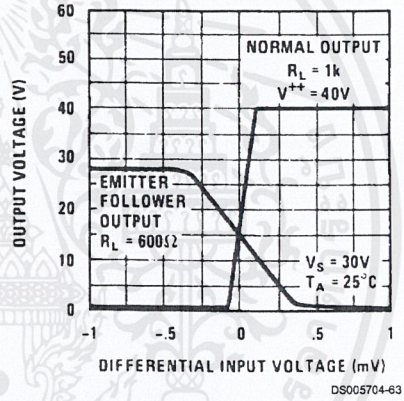
Input Characteristics



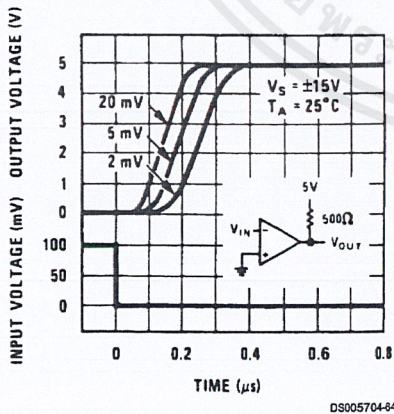
Common Mode Limits



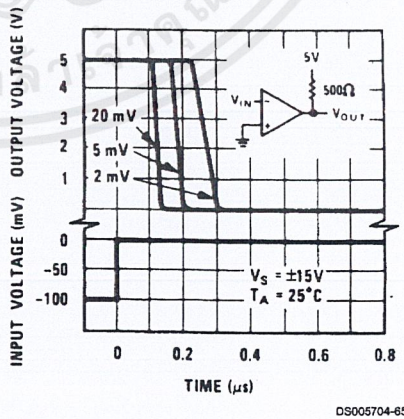
Transfer Function



Response Time for Various Input Overdrives

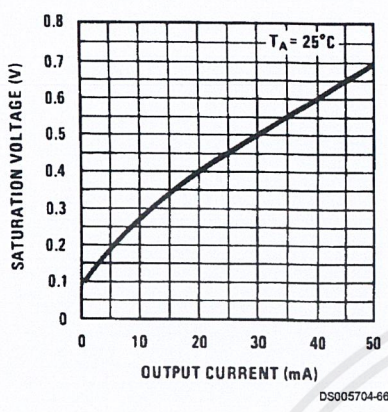


Response Time for Various Input Overdrives

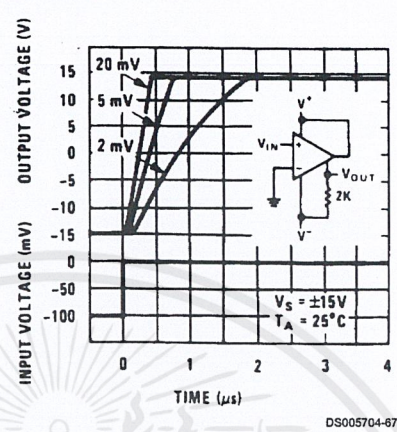


7.0 LM311 Typical Performance Characteristics (Continued)

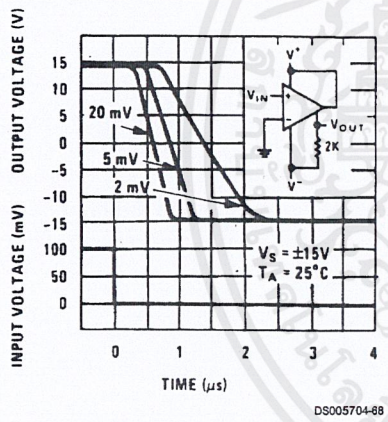
Output Saturation Voltage



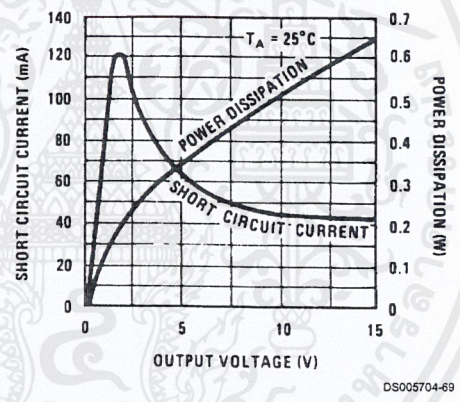
Response Time for Various Input Overdrives



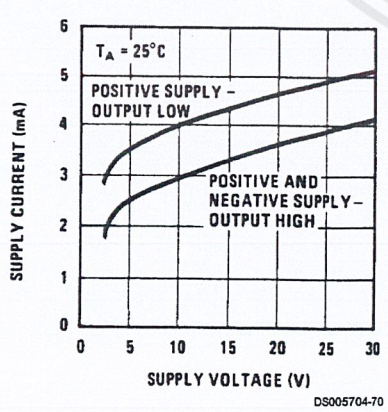
Response Time for Various Input Overdrives



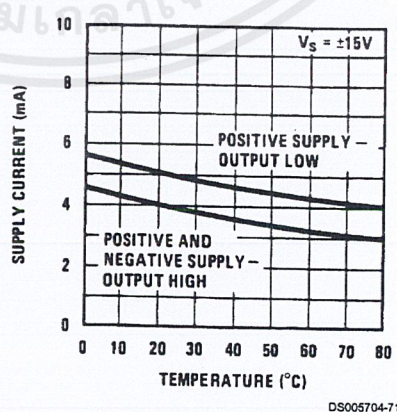
Output Limiting Characteristics



Supply Current



Supply Current



กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี นอกจากคณะผู้จัดทำแล้วยังได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลต่างๆดังต่อไปนี้

- คุณพ่อคุณแม่ ของพวกเราที่ให้ทุกๆสิ่งทุกอย่างอย่างด้วยดีตลอดมา
- ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเพื่อเครื่องมืออุปกรณ์และความรู้ต่างๆตลอดจนที่พักพิงอาศัยแก่คณะผู้จัดทำ
- รศ.ดร.วิริยะ พิเชษฐจำริญ และ ดร.วิจิตร กิณเรศ ที่ให้ความดูแลห่วงใยตลอดจนคำแนะนำอันเป็นประโยชน์
- อ.สุรินทร์ คำฝอย ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยคิดตามผลงาน ให้ห้องทำงาน ความช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์เครื่องมือเครื่องไม้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์
- ขอบคุณอาจารย์ท่านอื่นๆที่ให้ความช่วยเหลือและถ่ายทอดความรู้อันเป็นประโยชน์
- พี่ตัง ที่ให้แนวทางการทำงาน คอยคิดตามผลงาน ดูแลเอาใจใส่ ให้ยืมอุปกรณ์เครื่องมือเครื่องไม้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์
- พี่ติ ที่คอยดูแลเอาใจใส่ ให้ความสนิทสนมและเลี้ยงหัวเราะให้ยืมอุปกรณ์เครื่องมือเครื่องไม้(ไม่คืน)ต่างๆอันเป็นประโยชน์(แต่เรื่องน้องเหมียวผมช่วยพี่ติไม่ได้จริงๆ.....ขอโทษด้วยคร้าบบ จากเบียร์)
- พี่โก้ พี่ทัด พี่เอ็ด พี่หน่อง และพี่ๆห้องปริญญาโทตึก L ที่ให้คำแนะนำปรึกษาในเรื่องต่างๆตลอดจนอุปกรณ์เครื่องมือเครื่องไม้ต่างๆ ขอบคุณมากครับ
- ขอบคุณพวกพี่ๆเพื่อนๆที่ให้ความช่วยเหลือในสรรพสิ่งต่างๆทั้งที่จำเป็นและไม่จำเป็น

นอกจากที่กล่าวมาแล้วยังมีบุคคลท่านอื่นอีกหลายท่านที่ทางคณะผู้จัดทำไม่ได้กล่าวถึงไว้ในที่นี้ ทางคณะผู้จัดทำขอขอบคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย ขอบพระคุณมากครับ.....

เอกสารอ้างอิง

1. N.Mohan,T.M.Undeland,W.P.Robbins, “ Power Electronics : DC Motor Drives”, John Wiley & Sons,1995.
2. Muhammad H. Rashid, “Power Electronics”, Prentice-Hall, Inc., USA, 1998
3. พิชิต ถ้ำของ, “เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
4. วิริยะ พิเชฐจำเริญ , “ เอกสารประกอบการเรียนวิชา เพาเวอร์ อิเล็กทรอนิกส์” , ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
5. มงคล ทองสงคราม, “เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง” , บริษัท รามการพิมพ์ จำกัด 2538
6. ไชยชาญ หินเกิด, “เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง(Direct Current Machines)”, ส.ส.ท.(สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น), 2543
7. พีรศักดิ์ วรสุนทร โรสธ, “เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 (วงจรแม่เหล็กและเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง)”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตพระนครเหนือ
8. “รวมบทความ ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ”, บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่นจำกัด(มหาชน), 2538