การควบคุมเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ
สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
REGENERATIVE BRAKE CONTROL FOR A DC MOTOR

นายณรงค์ศักดิ์	บุญคำสว่าง	รหัส 45362746
นายอภิสิทธ์	สุวรรณศรี	รหัส 45363223
นายเอกพงษ์	ทะลายรัมย์	รหัส 45363280

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 5 เม.ย. 2553
เลขทะเบียน 14995545
เลขเรียกหนังสือ วร.
มหาวิทยาลัยนเรศวร
TK1241 .P7
2548

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2548

ใบรับรองโครงงานวิศวกรรม

หัวข้อโครงงาน	การควบคุมเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง		
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายณรงค์ศักดิ์	บุญคำสว่าง	รหัส 45362746
	นายอภิสิทธิ์	สุวรรณศรี	รหัส 45363223
	นายเอกพงษ์	ทะลายรัมย์	รหัส 45363280
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.สมยศ	เกียรติวนิชวิไล	
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า		
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์		
ปีการศึกษา	2548		

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะกรรมการสอบโครงงานวิศวกรรม

..... ประธานกรรมการ

(ดร. สมยศ เกียรติวนิชวิไล)

..... กรรมการ

(ดร. สุรเชษฐ์ กานต์ประชา)

..... กรรมการ

(อ. พนัส นัถฤทธิ์)

หัวข้อโครงงาน	การควบคุมการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายณรงค์ศักดิ์ บุญคำสว่าง รหัส 45362746
	นายอภิสิทธิ์ สุวรรณศรี รหัส 45363223
	นายเอกพงษ์ ทะลายรัมย์ รหัส 45363280
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2548

บทคัดย่อ

โครงงานนี้นำเสนอการควบคุมการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ โดยควบคุมให้มอเตอร์สามารถเบรกได้ตามต้องการและขณะที่มีการเบรกจะจ่ายคืนพลังงานกลับเข้าไปในแบตเตอรี่ ข้อดีของการเบรกโดยเทคนิคนี้คือ แบตเตอรี่จะสามารถใช้งานได้นานขึ้นและประหยัดพลังงาน

โครงงานนี้ได้ทดลองควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและใช้มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตซ์ในการควบคุมมอเตอร์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสร้างสัญญาณควบคุม ผลที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการควบคุมการไหลของกระแสกลับเข้าสู่แบตเตอรี่ ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาต่อในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงได้

Project Title	REGENERATIVE BRAKE CONTROL FOR A DC MOTOR		
Name	Mr. Narongsak	Boonkamsawang	ID 45362746
	Mr. Apisit	Suwanasri	ID 45363223
	Mr. Aekkapong	Thalairam	ID 45363280
Project Adviser	Dr. Somyot	Kaitwanidvilai	
Major	Electrical Engineering		
Department	Electrical and Computer Engineering		
Academic Year	2005		

ABSTRACT

This project presents the braking control system using regenerative brake technique. By this technique, control braking and regenerative energy to battery can be achieved. The advantages are energy saving and long life-time of battery.

The project is implemented on a DC motor. MOSFET is used as the switching device in power circuit and the control signal is generated by microcontroller. The experimental results show the effectiveness of regenerative current to the battery which can be further used in any general DC motor drive.

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีโดยได้รับความช่วยเหลือและให้คำแนะนำจาก ดร. สมยศ เกียรติวนิชวิไล ที่เป็นผู้เสนอหัวข้อและเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้ และขอขอบคุณ ดร. สุรเชษฐ์ กานต์ประชา และ อ. พนัส นัถฤทธิ์ ที่ให้ความกรุณาเป็นผู้ตรวจสอบปริญญานิพนธ์และคอยให้คำแนะนำในส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้ด้วย

ท้ายสุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ญาติพี่น้อง ที่คอยดูแล คอยเป็นกำลังใจและเป็นผู้สนับสนุนในด้านต่างๆมาโดยตลอดในการทำปริญญานิพนธ์นี้ และขอขอบคุณบุคคลต่างๆที่ไม่ได้กล่าวถึงรวมถึงแหล่งข้อมูลที่เอื้อต่อการทำปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

มหาวิทยาลัยนเรศวร

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองโครงงานวิจัย .....ก
บทคัดย่อภาษาไทย .....ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....ค
กิตติกรรมประกาศ .....ง
สารบัญ .....จ
สารบัญตาราง .....ช
สารบัญรูป .....ซ

บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน 1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 1
1.3 ขอบข่ายของโครงงาน 1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน 2
1.5 ตารางการปฏิบัติงาน 3
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 4
1.7 งบประมาณที่ใช้ 4

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการควบคุมมอเตอร์ 5
2.1 หลักการเบื้องต้นของมอเตอร์ 5
2.2 การเบรกมอเตอร์ 7
2.3 วงจรกำลังและอุปกรณ์กำลังที่ใช้ในการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ 11
2.4 การออกแบบวงจรขับเกตสำหรับมอสเฟตกำลัง 14
2.5 หลักการของโฟร์ควอดแรนต์ 16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง 26

3.1 รูปแบบของการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ในโครงงานนี้ 26

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในโครงงาน 27

3.3 การออกแบบการทดลอง 32

3.4 การบรรจุอุปกรณ์ลงกล่อง 34

บทที่ 4 ผลการทดลอง 35

4.1 ผลการทดลองการรีเจนเนอเรทีฟเบรก 35

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและวิจารณ์การทดลอง 45

5.1 สรุปผลการทดลอง 45

5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงแก้ไข 47

เอกสารอ้างอิง 48

ภาคผนวก 49

ภาคผนวก ก 50

ภาคผนวก ข 54

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 ตารางการปฏิบัติงาน 3

4.1 แสดงค่าดิวตี้ไซเคิล 37

4.2 ค่ากระแสไหลย้อนกลับสูงสุดที่ค่าดิวตี้ไซเคิลต่างๆของ M4 44

4.3 ค่าเวลาที่กระแสไหลย้อนกลับจนหมดกับค่าดิวตี้ไซเคิลต่างๆของ M4 45

4.4 การเปรียบเทียบค่าดิวตี้ไซเคิลของ M4 กับค่ากระแสไหลย้อนกลับสูงสุด
และเวลาที่กระแสไหลย้อนกลับจนหมด 46

5.1 การเปรียบเทียบค่าดิวตี้ไซเคิลของ M4 กับค่ากระแสไหลย้อนกลับสูงสุด
และเวลาที่กระแสไหลย้อนกลับจนหมด 48

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

รูป 2.1 D.C. Motor Circuit 6

รูป 2.2 การเบรกมอเตอร์ด้วยวิธีกลับขั้วไฟฟ้าของระบบไฟ
ที่ต่อเข้ากับขั้วอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ที่เรียกว่า วิธีปลั๊กกิง (Plugging) 8

รูป 2.3 การเบรกมอเตอร์ขนานด้วยวิธีเบรกแบบไดนามิค (Dynamic) 9

รูป 2.4 การเบรกมอเตอร์อนุกรมด้วยวิธี "ไดนามิค (Dynamic Breaking)" 10

รูป 2.5 ภาพตัดขวางแนวตั้งของมอสเฟตกำลังชนิดเอ็นพีเอ็น 12

รูป 2.6 สัญลักษณ์ของมอสเฟตกำลัง 12

รูป 2.7 คุณลักษณะของมอสเฟตกำลัง 13

รูป 2.8 พื้นที่ทำงานปลอดภัยของมอสเฟต 14

รูป 2.9 วงจร ขับเกตเบอร์ IR2110 ที่ใช้ในวงจรฮาร์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์..... 15

รูป 2.10 (ก) การแยกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างวงจรควบคุมและวงจรกำลังด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า
(ข) การแยกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างวงจรควบคุม
และวงจรกำลังด้วยการเชื่อมต่อทางแส..... 16

รูป 2.11 วงจร H-Bridge ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ 16

รูป 2.12 (ก) การทำงานของแต่ละควอดแรนต์
(ข) ลำดับการทำงานของอุปกรณ์ในแต่ละควอดแรนต์ 17

รูป 2.13 การทำงานของวงจรเมื่อ ให้ M_1 และ M_2 นำกระแส 18

รูป 2.14 การทำงานของวงจรเมื่อ ให้ M_1 หยุดนำกระแส และ M_2 นำกระแส.....18

รูป 2.15 การทำงานของอุปกรณ์ และค่า V_L, i_a, i_s ในควอดแรนต์ที่ 1 19

รูป 2.16 การทำงานของวงจรเมื่อ ให้ M_4 นำกระแส 20

รูป 2.17 การทำงานของวงจรเมื่อ ให้ M_4 หยุดนำกระแส 20

รูป 2.18 การทำงานอุปกรณ์ และค่า V_L, i_a, i_s ในควอดแรนต์ที่ 2 21

รูป 2.19 การทำงานของวงจรเมื่อ ให้ M_3 และ M_4 นำกระแส 22

รูป 2.20 การทำงานของวงจรเมื่อ ให้ M_3 หยุดนำกระแส และ M_4 นำกระแส 22

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูป 2.21 การทำงานของอุปกรณ์ และค่า V_L, i_g, i_s ในควอดแรนต์ที่ 3 23

รูป 2.22 การทำงานของวงจรเมื่อ ให้ M_2 นำกระแส 24

รูป 2.23 การทำงานของวงจรเมื่อ ให้ M_2 หยุดนำกระแส 24

รูป 2.24 การทำงานอุปกรณ์ และค่า V_L, i_g, i_s ในควอดแรนต์ที่ 4 25

รูป 3.1 ไดอะแกรมของการควบคุมมอเตอร์ 26

รูป 3.2 รูปวงจรที่ใช้จริง

(ก) วงจรภาคจ่ายไฟ

(ข) วงจรควบคุมมอเตอร์

(ค) วงจรขับ (Driver) 26-28

รูป 3.3 โปรแกรม Visual Basic ที่ใช้ควบคุมในโครงงาน 30

รูป 3.4 โฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ควบคุม 31

รูป 3.5 วงจรขับ (Driver) ลงอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว 32

รูป 3.6 วงจรควบคุมมอเตอร์ลงอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว 32

รูป 3.7 การต่ออุปกรณ์เพื่อใช้ทดลอง

(ก) การต่อมอเตอร์และแหล่งจ่ายไฟเข้ากับวงจรรวม

(ข) วงจรที่ต่อเสร็จแล้วพร้อมทำการทดลอง 33

รูป 3.8 การใช้สโคปอุปกรณ์วัดกราฟกระแสที่ได้จากการรีเจนเนอเรทีฟเบรก 33

รูป 3.9 การนำอุปกรณ์มาบรรจุลงกล่อง

(ก) ส่วนของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กับวงจรขับ

(ข) ส่วนวงจรควบคุมมอเตอร์ 34

รูป 3.10 อุปกรณ์ทั้งหมดที่บรรจุลงกล่องเรียบร้อยแล้ว 34

รูป 4.1 มุมทริกที่เริ่มให้มอเตอร์หมุนที่ค่าดิวตี้ไซเคิล 100% 36

รูป 4.2 การรีเจนเนอเรทีฟเบรกโดยให้ M4 มีค่าดิวตี้ไซเคิล 100% 36

รูป 4.3 การรีเจนเนอเรทีฟเบรกโดยให้ M4 มีค่าดิวตี้ไซเคิล 90% 37

รูป 4.4 การรีเจนเนอเรทีฟเบรกโดยให้ M4 มีค่าดิวตี้ไซเคิล 80% 37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูป 4.5 การรีเจนเนอเรทีฟเบรกโดยให้ M4 มีค่าดิวตี้ไซเคิล 70% 38

รูป 4.6 การรีเจนเนอเรทีฟเบรกโดยให้ M4 มีค่าดิวตี้ไซเคิล 60% 38

รูป 4.7 การรีเจนเนอเรทีฟเบรกโดยให้ M4 มีค่าดิวตี้ไซเคิล 50% 39

รูป 4.8 การรีเจนเนอเรทีฟเบรกโดยให้ M4 มีค่าดิวตี้ไซเคิล 40% 39

รูป 4.9 การรีเจนเนอเรทีฟเบรกโดยให้ M4 มีค่าดิวตี้ไซเคิล 30% 40

รูป 4.10 การรีเจนเนอเรทีฟเบรกโดยให้ M4 มีค่าดิวตี้ไซเคิล 20% 40

รูป 4.11 การรีเจนเนอเรทีฟเบรกโดยให้ M4 มีค่าดิวตี้ไซเคิล 10% 41

รูป 4.12 การเบรกแบบธรรมดา (ไม่มีการคืนพลังงาน) 41

รูป 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไหลย้อนกลับสูงสุด
กับค่าดิวตี้ไซเคิลของ M4 43

รูป 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่กระแสไหลย้อนกลับจนหมด
กับค่าดิวตี้ไซเคิลของ M4 44

รูป 5.1 การรีเจนเนอเรทีฟเบรกโดยให้ M4
มีค่าดิวตี้ไซเคิลต่างกับการเบรกแบบธรรมดา 45

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน

ในปัจจุบันพลังงานเชื้อเพลิงที่สำคัญที่ใช้ในประเทศเริ่มลดน้อยลงไปทุกที ซึ่งความต้องการในการใช้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในหลายประเทศได้มีการวิจัยคิดค้นเพื่อหาพลังงานอื่นๆมาทดแทนพลังงานน้ำมันเชื้อเพลิง อาทิเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม เป็นต้น ยานพาหนะที่ใช้พลังงานน้ำมันเชื้อเพลิงมากที่สุด ทางเลือกหนึ่งที่สามารถทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิง คือ การใช้รถไฟฟ้า ทางผู้เสนอโครงงานก็ได้เล็งเห็นว่าน่าจะมีการศึกษาพัฒนาให้รถไฟฟ้าได้มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานได้มากขึ้น

ในมหาวิทยาลัยนเรศวรได้มีการนำรถไฟฟ้ามาใช้เพื่อรับส่งนิสิตทั่วมหาวิทยาลัยมีนิสิตใช้บริการรถไฟฟ้าเป็นจำนวนมากและต้องจอดรับนิสิตบ่อยครั้งดังนั้นในการจอดแต่ละครั้งซึ่งมีการเบรกสามารถถ่ายคืนพลังงานไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ต่อไปได้จะทำให้สามารถลดการชาร์จแบตเตอรี่ลงและเป็นการประหยัดพลังงาน

ซึ่งโครงงาน "การควบคุมเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง" สามารถคืนพลังงานให้กับแบตเตอรี่เป็นผลทำให้แบตเตอรี่มีพลังงานเพิ่มขึ้นและสามารถใช้งานได้นานขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อศึกษาการทำงานรวมทั้งการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1.2.2 เพื่อนำหลักการของรีเจนเนอเรทีฟมาศึกษาและออกแบบรวมทั้งประยุกต์ใช้กับงานที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1.3 ขอบข่ายของโครงงาน

สามารถควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในทิศทางเดียวโดยให้มีการจ่ายพลังงานคืนกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟ (แบตเตอรี่) ขณะที่มีการเบรกมอเตอร์

1.4 ขั้นตอนของการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับหลักการของมอเตอร์และการควบคุมมอเตอร์

1.4.2 ค้นคว้าและศึกษาเกี่ยวกับโปรแกรมที่จะนำมาออกแบบการจำลองการควบคุมมอเตอร์

1.4.3 ออกแบบวงจรที่ใช้ควบคุมมอเตอร์ในส่วนของฮาร์ดแวร์

1.4.4 เขียนโปรแกรมในส่วนของการควบคุมมอเตอร์ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

1.4.5 ทดสอบการทำงาน

1.4.6 สรุปผลการทดลองและจัดทำรูปเล่มโครงงาน

1.5 ตารางปฏิบัติงาน

กิจกรรม	ปี2547		ปี2548									
	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.
1. ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับหลักการของมอเตอร์และการควบคุมมอเตอร์	⟷	⟷										
2. ค้นคว้าและศึกษาเกี่ยวกับโปรแกรมที่จะนำมาออกแบบการจำลองการควบคุมมอเตอร์			⟷	⟷								
3. ออกแบบวงจรที่ใช้ควบคุมมอเตอร์ในส่วนของฮาร์ดแวร์					⟷	⟷	⟷	⟷				
4. เขียนโปรแกรมในส่วนของการควบคุมมอเตอร์ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์								⟷	⟷	⟷		
5. ทดสอบการทำงาน										⟷	⟷	
6. สรุปผลการทดลองและจัดทำรูปเล่มโครงงาน											⟷	⟷

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถเข้าใจหลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงและนำไปสู่การประยุกต์ใช้ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมได้

1.6.2 สามารถใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงได้

1.6.3 สามารถนำโครงงานนี้ไปประยุกต์ใช้กับงานที่ใช้มอเตอร์กระแสตรงในชีวิตประจำวันได้

1.7 งบประมาณของโครงงาน

1.7.1 ค่าถ่ายเอกสารและค่าเข้าเล่มโครงงาน

1.7.2 ค่าแผ่นซีดี

1.7.3 ค่าหนังสือข้อมูลเกี่ยวกับมอเตอร์และ การควบคุม

1.7.4 ค่าหมึกพิมพ์

1.7.5 ค่าอุปกรณ์ในส่วนของการทำฮาร์ดแวร์

รวมเป็นเงิน 3, 000 บาท (สามพันบาทถ้วน)

มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการควบคุมมอเตอร์

มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้งานกันทั่วไปภายในอาคารบ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรม อาทิเช่น พัดลม เครื่องบด เครื่องปั่น เครื่องซักผ้า เครื่องไส เครื่องเจาะ เครื่องเจียระไน เครื่องเลื่อย ฯลฯ ดังนั้นการศึกษาและควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาทางระบบไฟฟ้ากำลังและอุตสาหกรรม

2.1 หลักการเบื้องต้นของมอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่แปลงผันพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล พลังงานที่ได้จะอยู่ในรูปการหมุนของโรเตอร์ซึ่งทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์และแรงบิดขณะที่มอเตอร์หมุนจะมีแรงดันที่อาร์เมเจอร์ที่มีทิศทางตรงข้ามกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์ ซึ่งเรียกว่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (Back EMF, E_g)

มอเตอร์ที่ใช้กันมีอยู่ 2 ชนิดคือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ อย่างไรก็ตามในโครงงานนี้จะออกแบบตัวควบคุมการเบรกของมอเตอร์กระแสตรงเท่านั้น

2.1.1 ข้อดีและข้อเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีข้อดี คือ

1. มีพิสัยในการควบคุมอัตราเร็วกว้าง
2. มีแรงบิดขณะสตาร์ทสูงมาก ซึ่งเหมาะกับงานบางประเภทอาทิเช่น ยกของ ฉุดลากและงานที่ต้องสตาร์ทบ่อยๆ ฯลฯ
3. วิธีการควบคุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงง่ายกว่า ไม่ซับซ้อน

อย่างไรก็ตามมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีข้อเสียหลายประการเช่นกัน คือ

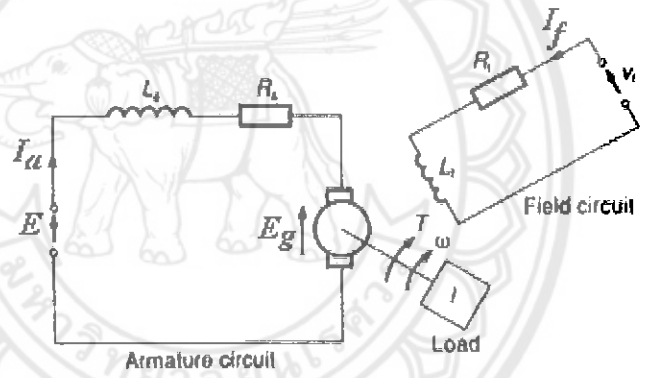
1. ต้องจัดหาแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไว้ใช้งานเป็นพิเศษ เนื่องจากไฟฟ้าปกติทั่วไปเป็นไฟกระแสสลับ
2. ในขนาดของพิกัดกำลังที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีขนาดใหญ่และราคาสูงกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ
3. ในการสตาร์ทมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาดใหญ่ต้องอาศัยวิธีการเพิ่มเติมที่ยุ่งยากกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ยกเว้นมอเตอร์ขนาดเล็กเท่านั้นที่ไม่ต้องการวิธีสตาร์ทเพิ่ม

4. ต้องการการซ่อมบำรุงรักษามากกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ เนื่องมาจากคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) มีการสึกหรอที่เกิดจากการอาร์คประกายไฟและการขัดสีระหว่างแปรงถ่านกับคอมมิวเตเตอร์

5. ระหว่างเซกเมนท์ (Segment) ของคอมมิวเตเตอร์มีแรงดันแตกต่างสูงสุดได้ประมาณ 20 โวลท์ จึงจะให้คอมมิวเตชั่นเป็นผลดี เพราะฉะนั้นจึงไม่สามารถสร้างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้มีขนาดแรงดันสูงกว่า 600 โวลท์ และมีขนาดพิกัดกำลังสูงมากๆได้

จากข้อดีข้อเสียที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าแม้มอเตอร์กระแสตรงจะมีข้อเสียมาก แต่ข้อดีของมอเตอร์กระแสตรงยังเป็นข้อที่มีความสำคัญ ดังนั้นจึงยังมีการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าในปัจจุบัน

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีหลายชนิด อาทิเช่น มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร (PM motor หรือ permanent magnet motor) ซึ่งปัจจุบันมีการประดิษฐ์แม่เหล็กที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กสูงและมีราคาถูกลง เช่น อัลนิโค – ห้า (Alnico V) และแม่เหล็กเซรามิก (ceramic magnet) เป็นต้น ซึ่งนิยมนำมาประดิษฐ์มอเตอร์ขนาดเล็กที่มีแรงม้าเป็นค่าเศษส่วน (fractional horse power) โดยนิยมนำไปใช้ในงานควบคุมต่างๆ เช่น นำไปใช้ในรถยนต์ เครื่องยกหรือเลื่อนที่นั่ง เป็นต้น



รูปที่ 2.1 D.C. Motor Circuit

[ที่มา http://www.sut.ac.th/e-texts/Eng/automatic/chapter215.htm]

มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรมีคุณลักษณะคล้ายกับของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนานโดยมีอัตราเร็วเกือบคงที่แต่มีค่าลดลงบ้างเล็กน้อยตามค่าภาระของโหลดหรือแรงหมุนของโหลดดังเส้นโค้งลักษณะสมบัติระหว่างอัตราเร็วกับแรงหมุนโหลด ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบขนานมีสูตรคำนวณหาค่าอัตราเร็วดังนี้ [ที่มา ควบคุมเครื่องกลไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง 2: หน้า 516]

$$\omega = \frac{E - I_a R_a}{K_\omega I_f} \tag{2.1}$$

เมื่อ ω เป็นค่าอัตราเร็ว (รอบ/นาที)

E แรงดันที่ขั้วฟ้าของมอเตอร์ (โวลท์)

R_a เป็นค่าความต้านทานในอาร์เมเจอร์ (โอห์ม)

I_f เป็นค่ากระแสไหลในวงจรฟิลด์ (แอมแปร์)

I_a เป็นค่ากระแสไหลในอาร์เมเจอร์ (แอมแปร์)

K_ω ค่าคงที่สัดส่วนของอัตราเร็ว (โวลท์ – นาที / แอมแปร์ - รอบ)

และสูตรหาค่าแรงหมุนที่เกิดขึ้นได้จาก (ที่มา ควบคุมเครื่องกลไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์ กำลัง 2 : หน้า 517)

$$T = K_t I_a \qquad (2.2)$$

เมื่อ T เป็นแรงดันที่เกิดขึ้น (นิวตัน – เมตร)

K_t เป็นค่าคงที่สัดส่วนของแรงหมุน (นิวตัน – เมตร / เมตร)

มอเตอร์อีกชนิดหนึ่ง คือ มอเตอร์แบบผสม (Compound) จะมีอัตราเร็วสูงขึ้นหรือช้าลงเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์แบบขนานขึ้นอยู่กับการต่อฟิลด์อนุกรม (series field) ให้สนามแม่เหล็กเข้าหักล้างกันหรือเสริมกับสนามของฟิลด์ขนาน (shunt field) ซึ่งเรียกว่ามอเตอร์ผสมแบบหักล้าง (differential compound motor) และมอเตอร์ผสมแบบสะสม (cumulative compound motor) ตามลำดับแต่อย่างไรก็ตามมอเตอร์ชนิดนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้

มอเตอร์แบบอนุกรมเป็นมอเตอร์ที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากสามารถปรับเปลี่ยนอัตราเร็วเป็นพิสัยกว้าง และมีแรงหมุนเกิดขึ้นตอนสตาร์ทสูงมาก โดยเราสามารถคำนวณหาค่าอัตราเร็วและแรงหมุนได้จากสมการ [ที่มา ควบคุมเครื่องกลไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง 2: หน้า 517]

$$\omega = \frac{E - I_a R_a}{K_\omega I^2_a} \qquad (2.3)$$

และ

$$T = K_t I^2_a \qquad (2.4)$$

จากสมการที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าค่าแรงบิดมีค่าสูง เนื่องจากขึ้นกับกำลังสองของกระแสไฟฟ้า

2.2 การเบรกมอเตอร์ (Breaking)

การชะลอความเร็วของมอเตอร์ให้หมุนช้าลงและหยุดหมุนด้วยความรวดเร็ว เกือบจะทันทีทันใดนั้นเรียกว่า การเบรกมอเตอร์ (Braking) การเบรกมอเตอร์มีหลายวิธีทั้งทางกลและทางไฟฟ้า อย่างไรก็ตามในโครงงานนี้จะนำเสนอเบรกทางไฟฟ้าซึ่งมีหลายประเภทได้แก่ แบบปลั๊กกิง (Plugging) แบบไดนามิค (Dynamic) และแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Braking) มีดังนี้

1. การเบรกแบบปลั๊กกิง (Plugging) เป็นการเบรกมอเตอร์ด้วยวิธีกลับขั้วไฟฟ้าของแรงดันอาร์เมเจอร์ เพื่อป้อนกำลังไฟฟ้าให้แก่อาร์เมเจอร์ในทางตรงกันข้าม กระแสมอเตอร์ขณะเบรก (Braking Current) จะได้ตามสมการต่อไปนี้ [ที่มา เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง 1 ตอน 2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง: หน้าที่ 195]

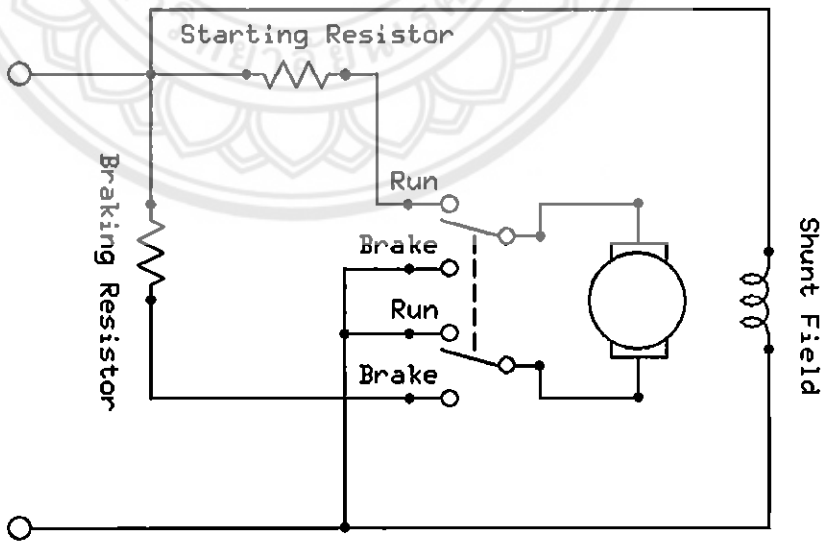
กระแสมอเตอร์ขณะหมุนขับโหลด : $I_a = (V_m - E_g) / R_a$ (2.5)

กระแสมอเตอร์ขณะเบรก : $I_a = -(V_m + E_g) / R_a$ (2.6)

จากสมการที่ 2.6 แสดงว่ามีการไหลของกระแสในทิศทางตรงข้ามกันกับกระแสขณะทำงาน ดังนั้นแรงบิดมอเตอร์(Breaking Torque) จะมีทิศทางตรงกันข้ามในลักษณะต่อต้านกับแรงบิดหมุนขับมอเตอร์ตามปกติ (Load Torque) การกลับขั้วอาร์เมเจอร์ขณะเบรกมอเตอร์นี้มีผลให้แรงดันเหนี่ยวนำกลับของมอเตอร์เกือบเท่ากับแรงดันอาร์เมเจอร์ และมีทิศทางเสริมกัน ดังนั้นแรงดันของวงจรอาร์เมเจอร์นี้เป็นผลรวมระหว่างแรงดันทั้งสอง ($V_a = V_m + E_g$)

เมื่อ V_a คือ แรงดันอาร์เมเจอร์

กระแสของมอเตอร์ขณะเบรกไม่ควรให้สูงจนเกินไป ต้องจำกัดให้อยู่ในพิกัดประมาณ 1.4 – 1.75 เท่า ของกระแสเต็มโหลด ซึ่งอาจทำโดยการต่อตัวต้านทานอนุกรมกับอาร์เมเจอร์ ซึ่งเรียกว่า "Breaking Resistor" เช่นเดียวกับตัวต้านทานเริ่มหมุน "Starting Resistor" ดังรูปที่ 2.2



รูป 2.2 การเบรกมอเตอร์ด้วยวิธีกลับขั้วไฟฟ้าของระบบไฟที่ต่อเข้ากับขั้วอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ที่เรียกว่า วิธีปลั๊กกิง (Plugging) [ที่มา เครื่องกลไฟฟ้า1 ตอน 2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง: หน้าที่ 194]

เส้นแรงแม่เหล็กในขดลวดสนามแม่เหล็กจะยังคงที่ในทิศทางเดิม ถึงแม้ว่าจะกลับขั้วไฟฟ้าของระบบที่ต่อเข้าอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์แล้วก็ตาม แรงบิดของมอเตอร์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสอาร์เมเจอร์ตามสมการที่ 2.2 และแรงบิดจะลดลงเมื่อความเร็วมอเตอร์ลดลงเนื่องจากแรงดันอาร์เมเจอร์ลดลงตาม ขณะเริ่มหมุนของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับกระแสเริ่มหมุน [ที่มา เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง 1 ตอน 2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง: หน้าที่ 196]

ขณะมอเตอร์เริ่มหมุน : $E_g = 0$ จะได้

$$I_{St} = - V_m / (R_a + R_{br}) \qquad (2.7)$$

เมื่อ

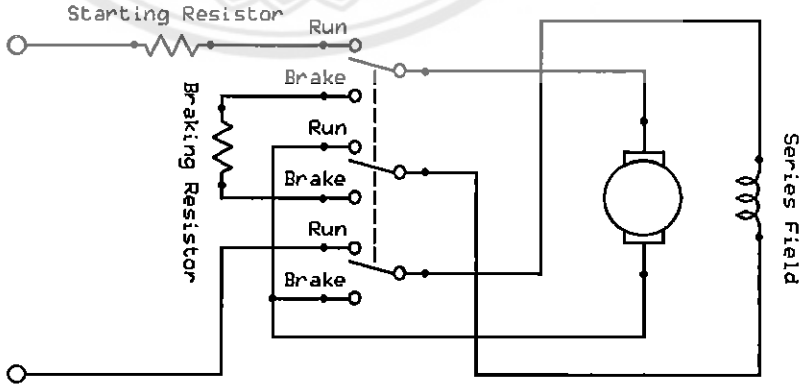
I_{St} = กระแสเริ่มหมุน (ขณะมอเตอร์หยุดอยู่กับที่พร้อมที่จะหมุน)

V_m = แรงดันอาร์เมเจอร์ขณะเบรก

R_a = ความต้านทานอาร์เมเจอร์

R_{br} = ความต้านทานของวงจรเบรก (Braking Resistor) ที่ต่ออนุกรมกับอาร์เมเจอร์ขณะเบรกมอเตอร์

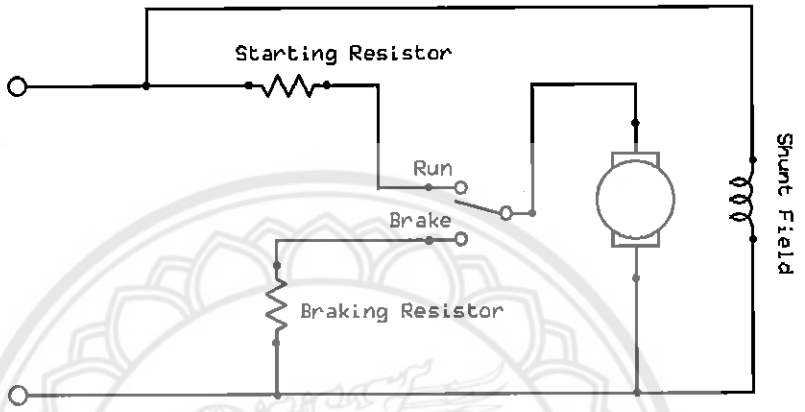
2. การเบรกแบบไดนามิค (Dynamic Braking) เป็นการเบรกมอเตอร์ด้วยการทำให้มอเตอร์เปลี่ยนสภาพการการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และส่งพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดจากอาร์เมเจอร์ไปยังตัวต้านทานของวงจรเบรก (Braking Resistor) กล่าวคือ ขณะเบรกมอเตอร์ให้ต่อตัวต้านทานค่าต่ำๆ อนุกรมกับอาร์เมเจอร์ และปล่อยให้มอเตอร์ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยส่งพลังงานทั้งหมดจากอาร์เมเจอร์ไปเป็นพลังงานสูญเสียใน Braking Resistor



รูป 2.3 การเบรกมอเตอร์ขนานด้วยวิธีเบรกแบบไดนามิค (Dynamic)[ที่มา เครื่องกลไฟฟ้า1 ตอน 2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง: หน้าที่ 196]

$$I_{br} = E / (R_a + R_{br}) \quad (2.8)$$

อย่างไรก็ตามการเบรกชนิดนี้ที่ความเร็วต่ำ กระแสเบรก (Braking Current) ไหลผ่านความต้านทานน้อยทำให้ประสิทธิ์การเบรกน้อย ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องติดตั้งเบรกทางกล (Mechanical Braking) เพื่อทำให้มอเตอร์หยุดนิ่งในขณะความเร็วต่ำด้วย จากรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงวงจรการเบรกมอเตอร์ขนานด้วยวิธี "ไดนามิค (Dynamic Braking)"



รูปที่ 2.4 การเบรกมอเตอร์อนุกรมด้วยวิธี "ไดนามิค (Dynamic Breaking)" [ที่มา เครื่องกลไฟฟ้า1 ตอน 2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง: หน้าที่ 197]

ในกรณีของมอเตอร์อนุกรม อาจเลือกใช้วิธีหนึ่งวิธีใดก็ได้ใน 2 วิธีต่อไปนี้ วิธีแรก อาจให้ขดลวดสนามแม่เหล็กชุดอนุกรมต่อกับระบบไฟอนุกรมกับตัวต้านทานที่ควบคุมกระแสให้อยู่ในพิกัดที่ต้องการ ซึ่งวิธีนี้ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าไปในตัวต้านทาน อีกวิธีหนึ่ง คือการต่อวงจรในลักษณะที่ให้กระแสอาร์เมเจอร์ไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็กชุดอนุกรม ในทิศทางเดียวกันกับกระแสอาร์เมเจอร์ขณะที่หมุนเป็นมอเตอร์ และขณะนี้ถึงแม้ว่าความต้านทานของขดลวดอนุกรมจะเป็นส่วนหนึ่งของความต้านทานในวงจรเบรก (Breaking Resistor) ไปแล้วก็ตาม ขดลวดอนุกรมนี้ก็ยังคงให้กำเนิดเส้นแรงแม่เหล็กในสนามแม่เหล็กอยู่ตามปกติ การเบรกมอเตอร์อนุกรมด้วยวิธีไดนามิคเบรก (Dynamic Braking) นี้แสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 2.4

กระแสอาร์เมเจอร์ขณะเบรกเป็นไปตามสมการที่ 2.9 [ที่มา เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง 1 ตอน 2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง: หน้าที่ 197]

$$I_{br} = E_g / (R_a + R_D + R_{br}) \quad (2.9)$$

3. การเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Braking) มีลักษณะการทำงานคล้ายกับการเบรกแบบไดนามิค เพียงแต่พลังงานจลน์ทั้งหมดของมอเตอร์จะถูกแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าป้อนกลับ

คืนให้แก่ระบบไฟของมอเตอร์ ดังนั้นระบบการเบรกแบบนี้จึงไม่มีความสูญเสียและไม่จำเป็นต้องมี Braking Resistor

Regenerative Braking นี้ ใช้สำหรับจำกัดความเร็วมอเตอร์มากกว่าที่จะหยุดมอเตอร์ จึงนิยมใช้ในมอเตอร์ที่หมุนขับเคลื่อนลากจูงในสถานที่ลาดชันหรือที่สูงๆในระยะไกลๆและกระแสมอเตอร์ขณะเบรกหาได้จากสมการที่ 2.10(ที่มา เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง 1 ตอน 2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง: หน้าที่ 198)

$$I_{br} = (E_{g2} - E_{g1}) / R_a \qquad (2.10)$$

เมื่อ E_{g2}= แรงดันเหนี่ยวนำกลับของมอเตอร์ก่อนที่จะเบรกด้วยการเพิ่มเส้นแรงแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก

E_{g1}= แรงดันเหนี่ยวนำกลับของมอเตอร์ภายหลังจากการเบรกด้วย "Regenerative Braking" โดยการเพิ่มเส้นแรงแม่เหล็กให้สูงขึ้นเรียบร้อยแล้ว

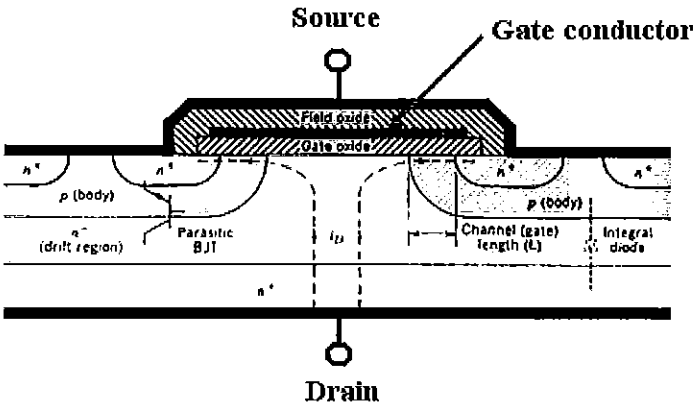
2.3 วงจรกำลังและอุปกรณ์กำลังที่ใช้ในการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ

อุปกรณ์กำลังที่สำคัญที่ใช้ในโครงงานนี้คือ มอสเฟตซึ่งควบคุมง่ายและใช้งานที่ความถี่สูงได้

2.3.1 มอสเฟตกำลัง (POWER MOSFET)

มอสเฟตกำลังเป็นอุปกรณ์ที่กำลังได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานเป็นสวิตซ์ในวงจรแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยวิธีสวิตซ์ วงจรอินเวอร์เตอร์และวงจรอื่นๆ ซึ่งมอสเฟตมีข้อดีในแง่ของความเร็วในการสวิตซ์สูง ง่ายในการใช้งาน

ภาพตัดขวางแนวตั้งของมอสเฟตแสดงอยู่ในรูปที่ 2.5 มอสเฟตจะมีขั้วอยู่ 3 ขั้วคือ เดรน (Drain) เกต (Gate) และซอร์ซ (Source) สัญลักษณ์ของมอสเฟตแสดงในรูปที่ 2.6 โดยรูป (ก) เป็นมอสเฟตชนิดเอ็นแชนเนล ส่วนรูป (ข) เป็นมอสเฟตชนิดพีแชนเนล



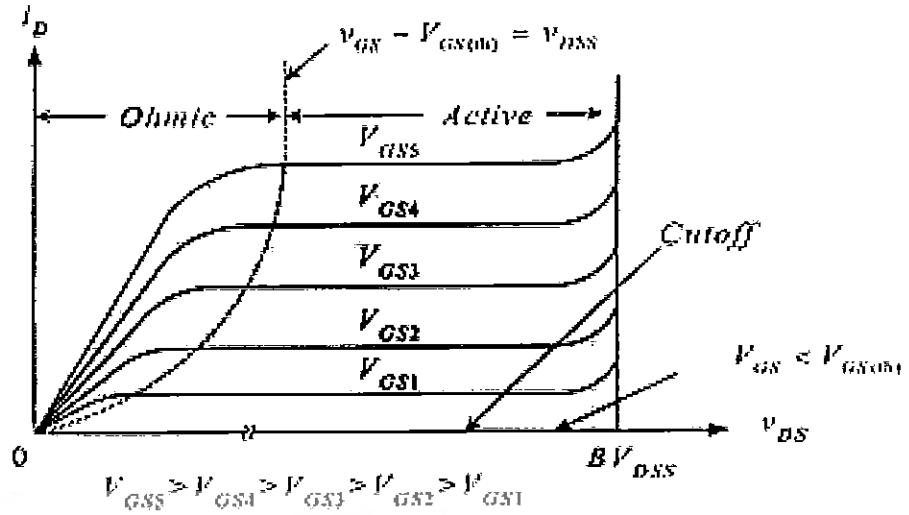
รูป 2.5 ภาพตัดขวางแนวตั้งของมอสเฟตกำลังชนิดเอ็นพีเอ็น [ที่มา อิเล็กทรอนิกส์กำลัง: หน้าที่ 328]

รูปที่ 2.6 สัญลักษณ์ของมอสเฟตกำลัง

(ก) เป็นมอสเฟตชนิดเอ็นแชนเนล

(ข) เป็นมอสเฟตชนิดพีแชนเนล

[ที่มา อิเล็กทรอนิกส์กำลัง: หน้าที่ 328]



รูป 2.7 คุณลักษณะของมอสเฟตกำลัง [ที่มา อิเล็กทรอนิกส์กำลัง: หน้าที่ 329]

คุณลักษณะของมอสเฟตกำลังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งประกอบด้วยย่านการทำงาน 3 ย่านดังรูปการประยุกต์ใช้งานมอสเฟตทำหน้าที่เป็นสวิตซ์ในวงจรแปลงผันกำลัง เมื่อมอสเฟตอยู่ในสภาวะหยุดนำกระแส จุดทำงานจะอยู่ในย่านหยุดนำกระแส (Cutt-off) โดยที่แรงดัน V_{GS} มีค่าน้อยกว่าแรงดันจุดเปลี่ยน (Threshold voltage, $V_{GS(th)}$) เมื่อต้องการสถานะนำกระแสต้องให้มอสเฟตทำงานในย่านความต้านทาน (Ohmic) มอสเฟตจะทำงานในย่านแอคทีฟนี้ก็ต่อเมื่อ

$$V_{GS} - V_{GS(th)} > V_{DS} > 0 \qquad (2.11)$$

โดยเส้นแบ่งระหว่างย่านไวงานและย่านความต้านทานกำหนดจากสมการ

$$V_{GS} - V_{GS(th)} = V_{DS} \qquad (2.12)$$

การทำงานแอคทีฟกระแส i_D จะไม่ขึ้นอยู่กับแรงดัน V_{DS} แต่จะขึ้นอยู่กับแรงดัน V_{DS} ซึ่งประมาณได้จากสมการ

$$i_D = K(V_{GS} - V_{GS(th)})^2 \qquad (2.13)$$

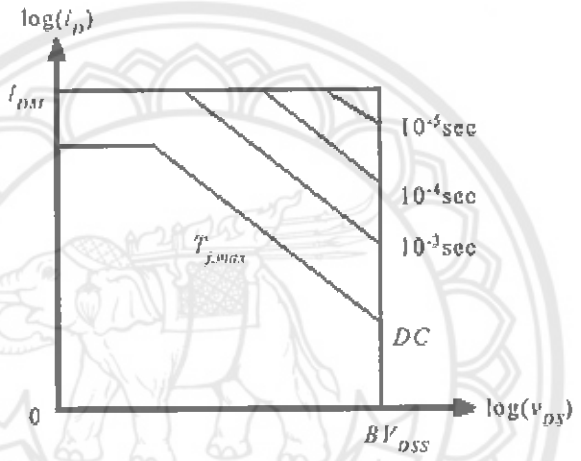
โดยที่ค่า K เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตของอุปกรณ์ ที่เส้นแบ่งระหว่างย่านไวงานและย่านความต้านทานจากสมการที่ 2.12 แทนค่าในสมการที่ 2.13 จะได้เป็น

$$i_D = KV^2_{DS} \qquad (2.14)$$

2.3.2 พื้นที่ทำงานปลอดภัยของมอสเฟตกำลัง

พื้นที่ทำงานปลอดภัยของมอสเฟตจะมีขีดจำกัดด้าน T_{jmax} พื้นที่ทำงานปลอดภัยจะจำกัดโดยกระแสเดรนสูงสุด I_{DM} กำลังสูญเสียและอุณหภูมิที่รอยต่อสูงสุด T_{jmax} และแรงดันทลาย BV_{DSS}

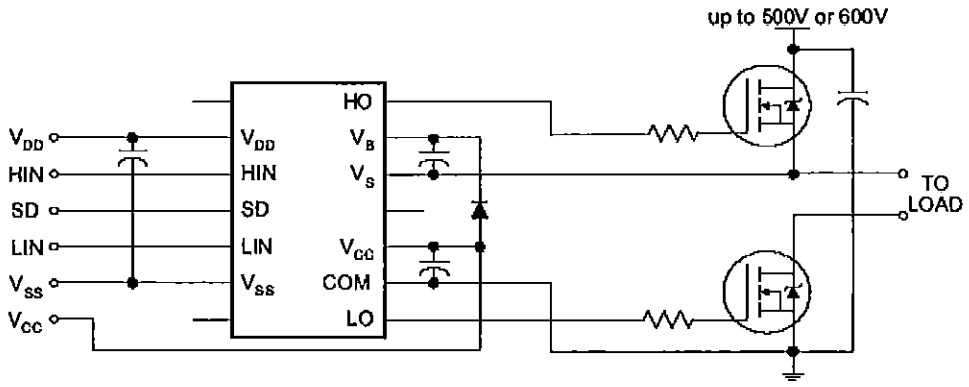
รูปที่ 2.8 แสดงพื้นที่ทำงานปลอดภัยของมอสเฟตที่ใช้งานเป็นสวิตซ์ซึ่งพื้นที่จะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม พื้นที่ทำงานเมื่อไบแอสไปหน้าและไบแอสย้อนกลับจะไม่แตกต่างกัน



รูป 2.8 พื้นที่ทำงานปลอดภัยของมอสเฟต [ที่มา อิเล็กทรอนิกส์กำลัง: หน้าที่ 335]

2.4 การออกแบบวงจรขับเกตสำหรับมอสเฟตกำลัง

มอสเฟตกำลังเป็นสวิตซ์ที่ควบคุมด้วยแรงดัน(voltage-controlled)ทำให้ง่ายต่อการควบคุมให้เริ่มนำกระแสหรือเริ่มหยุดนำกระแส ซึ่งจะเป็นข้อดีที่เหนือกว่ากรณีของทรานซิสเตอร์กำลัง มอสเฟตกำลังจะนำกระแสที่ต่อเมื่อแรงดันตกคร่อมขาเกตเทียบกับขาซอส(V_{GS})มีค่าสูงกว่าค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน(threshold voltage)และเมื่อระดับแรงดัน V_{GS} สูงกว่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน จะเป็นผลให้มอสเฟตกำลังเข้าสู่การทำงานในโหมดโอห์มมิก (ohmic region) ซึ่งโดยทั่วไป แรงดันV_{GS}เพื่อให้สวิตซ์เริ่มนำกระแสจะมีค่าอยู่ระหว่าง 10-20โวลต์ และเพื่อให้สวิตซ์ไม่นำกระแสสามารถกระทำได้โดยทำให้แรงดันV_{GS}มีค่าต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน และในขณะที่สวิตซ์นำกระแสและไม่นำกระแสกระแสที่ป้อนเข้าขาเกตจะมีค่าเท่ากับศูนย์ อย่างไรก็ตาม ความเร็วในการสวิตซ์ จะสามารถหาได้จากความเร็วในการเก็บและคายประจุของค่าตัวเก็บประจุแฝงด้านเข้าของมอสเฟตกำลัง (parasitic input capacitance) ซึ่งตัวเก็บประจุแฝงจะต้องทำการสะสมประจุเพื่อให้สวิตซ์นำกระแส และจะต้องทำการคายประจุเพื่อให้สวิตซ์ไม่นำกระแส

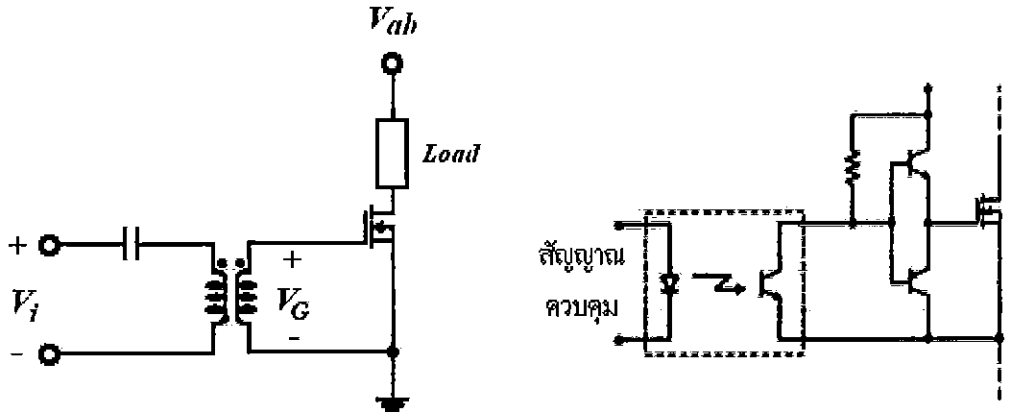


รูปที่ 2.9 วงจรขับเกตเบอร์ IR2110 ที่ใช้ในวงจรฮาร์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

[ที่มา http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir2110.pdf]

วงจรขับเกตของมอสเฟตจะมีอยู่ในรูปของไอซี (Integrated-Circuit: IC) ดังแสดงตัวอย่างไอซีเบอร์ IR2110 ซึ่งเป็นบริษัทของ International Rectifier ซึ่งเป็นไอซีที่ใช้สำหรับการออกแบบได้ทั้งวงจรขับเกตสำหรับสวิตซ์ด้านบัสบวก (hide-side switch) และบัสลบ (low-side switch) เช่น กรณีวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ จะใช้วงจรขับเกตด้านบัสบวก วงจรฮาร์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์จะใช้วงจรขับเกตทั้งด้านบัสบวกและบัสลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.9

การแยกจากกันทางไฟฟ้า (electrical isolation) ระหว่างมอสเฟตกับวงจรควบคุม (control circuit) โดยมากจะมีความจำเป็น เพราะระดับแรงดันที่แตกต่างกันอย่างมากระหว่างวงจรควบคุมกับวงจรกำลัง (power circuit) เช่น สำหรับมอสเฟตกำลังด้านบัสบวกของวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์หรือของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ เป็นต้น สำหรับวงจรที่ใช้ในการแยกจากกันทางไฟฟ้าโดยมากจะได้แก่แบบการเชื่อมต่อทางแม่เหล็ก (magnetically coupled) รูปที่ 2.10 (ก)แสดงวงจรควบคุมและวงจรกำลังที่แยกจากกันทางไฟฟ้าโดยอาศัยการเชื่อมต่อทางแม่เหล็กด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่กับหม้อแปลงไฟฟ้าจะใช้สำหรับป้องกันไฟฟ้ากระแสตรงหรือดีซีออฟเซต (dc offset) และการเชื่อมต่อทางแสง (optically coupled circuit) สำหรับตัวอย่างของการแยกจากกันทางไฟฟ้าโดยอาศัยการเชื่อมต่อทางแสงได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.10 (ข)

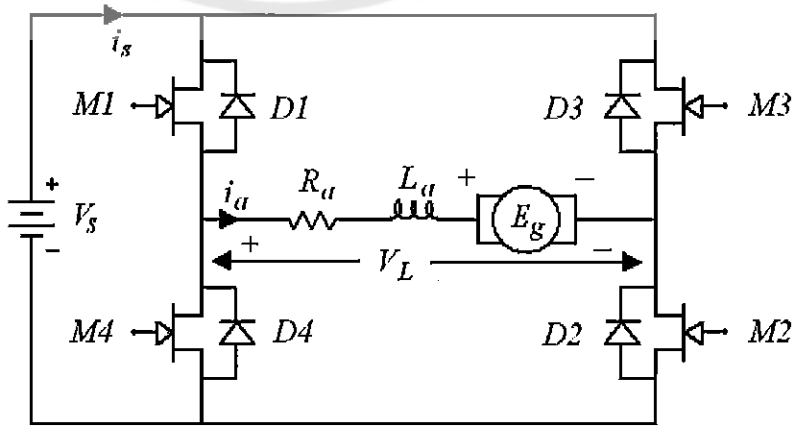


(ก) (ข)

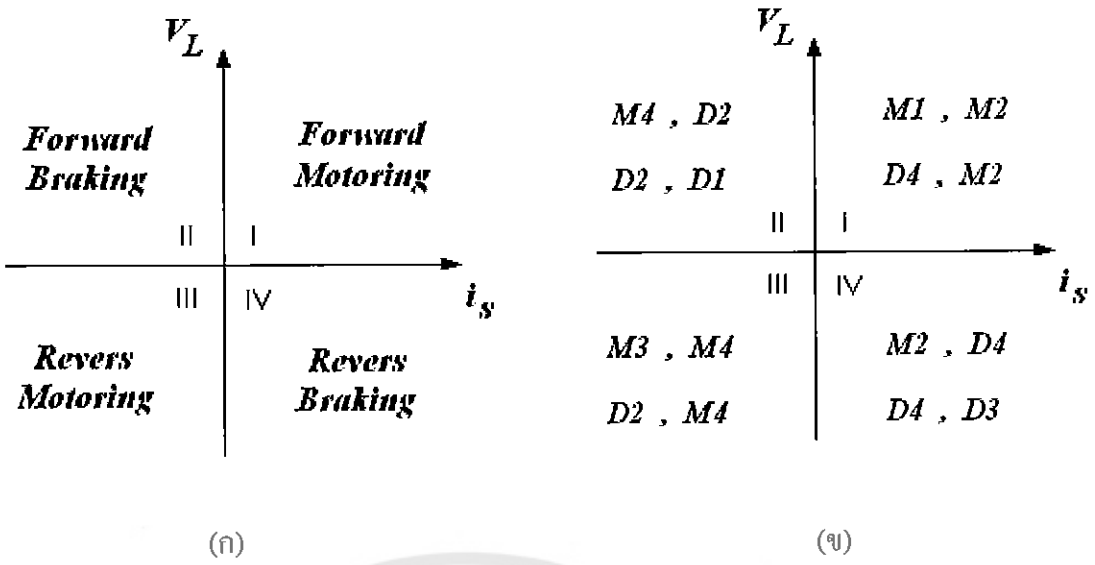
รูปที่ 2.10 (ก) การแยกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างวงจรควบคุมและวงจรกำลังด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า (ข) การแยกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างวงจรควบคุมและวงจรกำลังด้วยการเชื่อมต่อทางแสง

2.5 หลักการของ โฟร์ควอดแรนต์

หัวข้อนี้จะนำเสนอหลักการของโฟร์ ควอดแรนต์ ซึ่งการทำงานของวงจรที่ ใช้ในโครงงานรีเจนเนอเรทีฟเบรกนี้ คือ วงจร H-Bridge ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ได้ ดังรูปที่ 2.11 โดยกระแสแหล่งจ่าย (i_s) และแรงดันคร่อมโหลด (V_L) มีทิศทางได้ทั้งบวกและลบ ดังรูป2.12 (ก) โดยการทำงานแต่ละควอดแรนต์จะมีลำดับการทำงานของอุปกรณ์แตกต่างกันดังในรูปที่ 2.12 (ข)



รูปที่ 2.11 วงจร H-Bridge ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์



(ก) (ข)

รูปที่ 2.12 (ก) การทำงานของแต่ละควอดแรนต์
(ข) ลำดับการทำงานของอุปกรณ์ในแต่ละควอดแรนต์

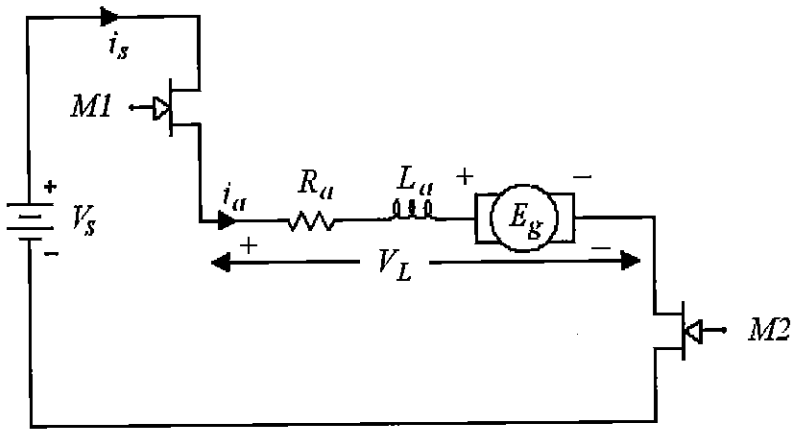
โดยสามารถแบ่งการทำงานของแต่ละควอดแรนต์ได้ดังนี้

ควอดแรนต์ที่ 1 Forward motoring

ค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับจะมีทิศทางเป็นบวก ทั้งนี้เนื่องมาจากมอเตอร์หมุนแบบเดินหน้า และค่ากระแสอาร์เมเจอร์ จะมีค่าเป็นบวก ทำให้แรงบิดและอัตราเร็วมีค่าเป็นบวก ในควอดแรนต์นี้มอเตอร์ออกแรงบิดตามเข็มนาฬิกา ทำให้มอเตอร์หมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกาด้วย ถ้าให้เครื่องหมายบวกแทนทิศทางตามเข็มนาฬิกา ก็จะได้ว่ามอเตอร์จะจ่ายกำลังสุทธิ $P = (+T)(+\omega) = T\omega$ ไปให้กับโหลดทางกล สภาวะนี้จึงเป็นสภาวะที่กำลังงานหรือพลังงานไหลผ่านมอเตอร์ไปยังโหลดทางกล

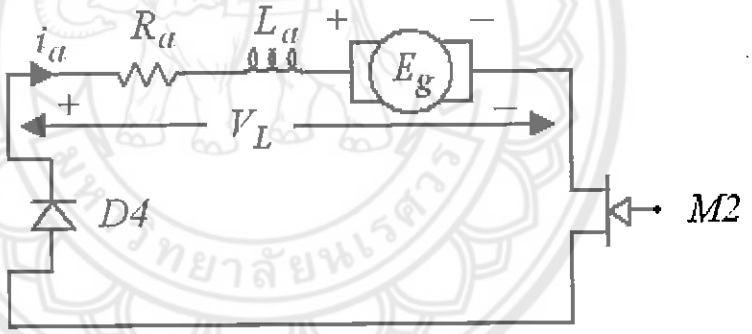
หลักการทำงานของวงจรในควอดแรนต์ที่ 1

ซึ่งจากวงจรรูปที่ 2.10 กำหนดให้ M_1 และ M_2 นำกระแสพร้อมกัน ค่าแรงดันคร่อมโหลดจะมีค่าเป็นบวก และมีขนาดเท่ากับแหล่งจ่ายแรงดัน กระแสจะไหลผ่าน M_1 และ M_2 ดังรูปที่ 2.13



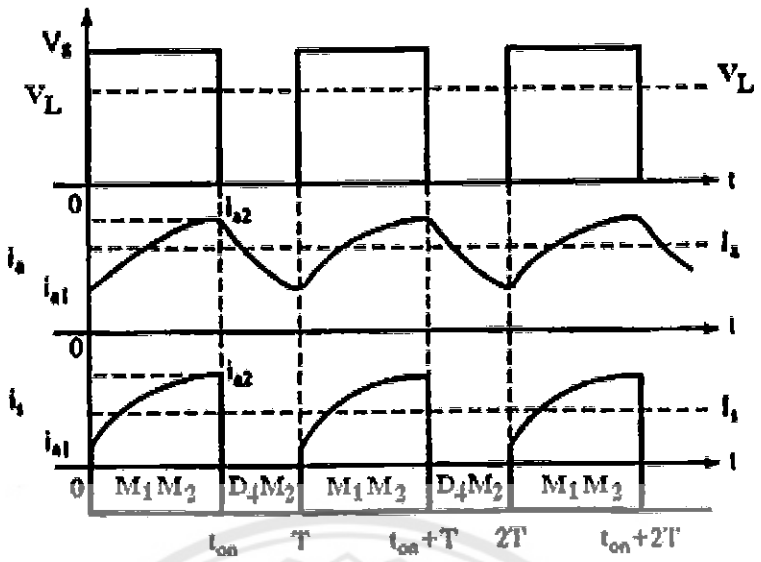
รูปที่2.13 การทำงานของวงจรเมื่อ ให้ M_1 และ M_2 นำกระแส

เมื่อให้ M_1 หยุดนำกระแส และให้M_2 นำกระแส กระแสจะไหลผ่าน M_2 และไดโอด D_4 เพื่อคายพลังงานในตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งทิศทางของกระแสที่ไหลยังคงเป็นทิศทางเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่2.14 การทำงานของวงจรเมื่อ ให้ M_1 หยุดนำกระแส และ M_2 นำกระแส

เมื่อให้ M_1 และ M_2 นำกระแสอีกครั้ง การไหลของกระแสจะเป็นดังรูปที่ 2.13 และเมื่อให้ M_1 หยุดนำกระแส และให้M_2 นำกระแสสลับกันไปเรื่อยๆ จะได้ค่าของแรงดันคร่อมโหลด กระแสอาร์เมเจอร์ และกระแสที่แหล่งจ่าย เป็นดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การทำงานของอุปกรณ์ และค่า V_L, i_a, i_s ในควอดแรนต์ที่ 1

[ที่มา ELECTRIC MOTOR DRIVE Modeling ,Analysys ,and Control : หน้าที่ 128]

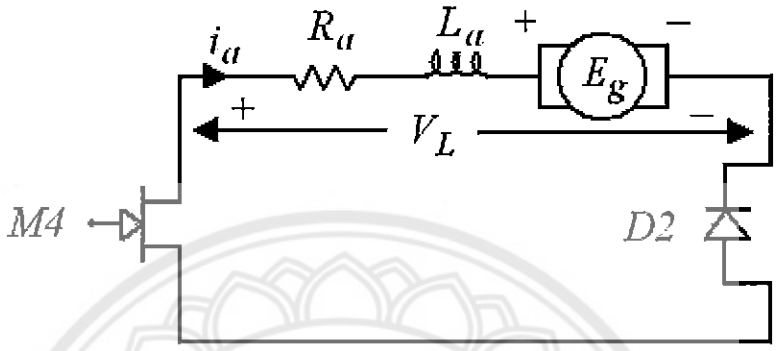
ควอดแรนต์ที่ 2 Forward Braking

แรงดันไฟฟ้าต้านกลับจะมีค่าเป็นบวก ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากมอเตอร์ยังคงหมุนแบบเดินหน้า แต่สำหรับแรงบิดจะกลายเป็นค่าลบและทิศทางของพลังงานจะไหลกลับ เนื่องจากกระแสอาร์เมเจอร์จะมีทิศทางตรงข้าม (มีค่าเป็นลบ) ในควอดแรนต์นี้ มอเตอร์ยังหมุนในทิศทางเดิมหรือหมุนตามเข็มนาฬิกาแต่มอเตอร์กลับออกแรงบิดในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางหมุน (จะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่มอเตอร์ยังหมุนในทิศทางเดิมด้วยความเฉื่อย แต่ให้กระแสมอเตอร์ไหลกลับทิศทางทำให้เกิดแรงบิดกลับทิศ) ในสภาวะนี้จึงเกิดการเบรกขึ้นเพราะมีแรงบิดมาต้านการหมุนไว้ ในกรณีนี้มอเตอร์จะรับกำลังสุทธิ $P=(-T)(+\omega)=-T\omega$ มาจากโหลดทางกลโดยเครื่องหมายลบเป็นการแสดงว่ากำลังงานไหลย้อนกลับ สภาวะนี้จึงเป็นสภาวะที่กำลังงานหรือพลังงานไหลจากโหลดทางกลกลับเข้าหามอเตอร์

และถ้าต่อมอเตอร์เข้ากับแหล่งจ่ายไฟและยอมให้กระแสในตัวมอเตอร์ไหลกลับทางได้ มอเตอร์ก็จะทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายพลังงานที่รับมาจากโหลดทางกลกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟ แต่ถ้าใช้วิธีเบรกทางกล เช่นนำผ้าเบรกไปหยุดการหมุนของโหลดทางกล พลังงานทั้งหมดก็จะสูญเสียไปในรูปของพลังงานความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานของโหลดทางกลกับผ้าเบรกนั้น

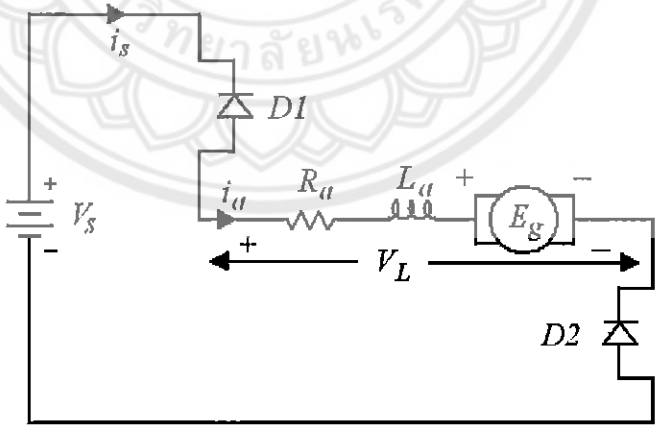
หลักการทำงานของวงจรในควอดแรนต์ที่ 2

การทำงานในควอดแรนต์ที่ 2 นี้จะทำงานต่อเนื่องจากการทำงานในควอดแรนต์ที่ 1 กระแสจะไหลออกจากแหล่งจ่ายมายังโหลด จากนั้นกำหนดให้ M_1 หยุดนำกระแสและ M_2 นำกระแส แล้วให้ M_4 นำกระแส ทำให้กระแสไหลผ่าน M_4 และไดโอด D_2 ทิศทางการไหลของกระแสจะมีทิศทางดังรูปที่ 2.16



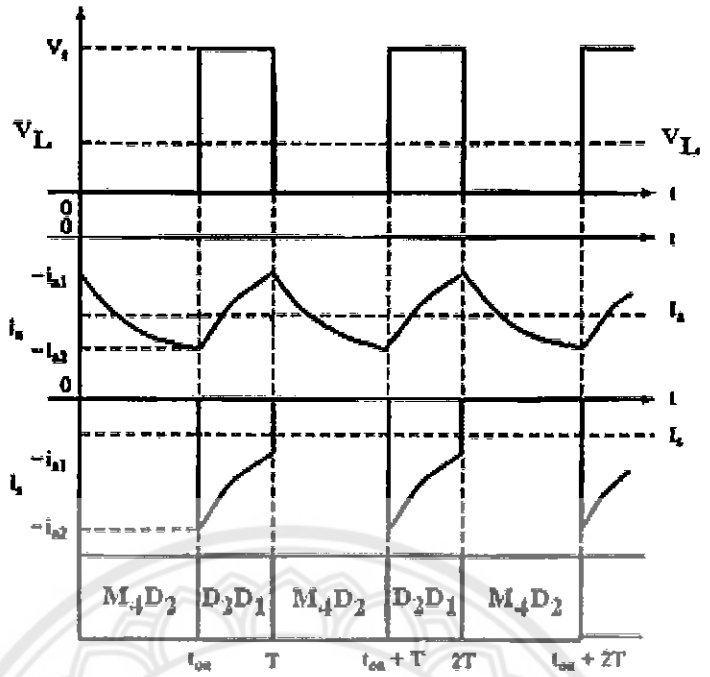
รูปที่ 2.16 การทำงานของวงจรเมื่อ ให้ M_4 นำกระแส

เมื่อกระแสในวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นค่าหนึ่ง ให้ M_4 หยุดนำกระแส กระแสจะไหลจากโหลดไปแหล่งจ่าย โดยไหลผ่านไดโอด D_2 และ D_1 ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การทำงานของวงจรเมื่อ ให้ M_4 หยุดนำกระแส

เมื่อให้ M_4 นำกระแสอีกครั้ง การไหลของกระแสจะเป็นดังรูปที่ 2.16 และเมื่อให้ M_4 หยุดนำกระแสสลับกันไปเรื่อยๆ จะได้ค่าของแรงดันคร่อมโหลด กระแสอาร์เมเจอร์ และกระแสที่แหล่งจ่าย เป็นดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การทำงานอุปกรณ์ และค่า V_L, i_a, i_s ในควอดแรนต์ที่ 2

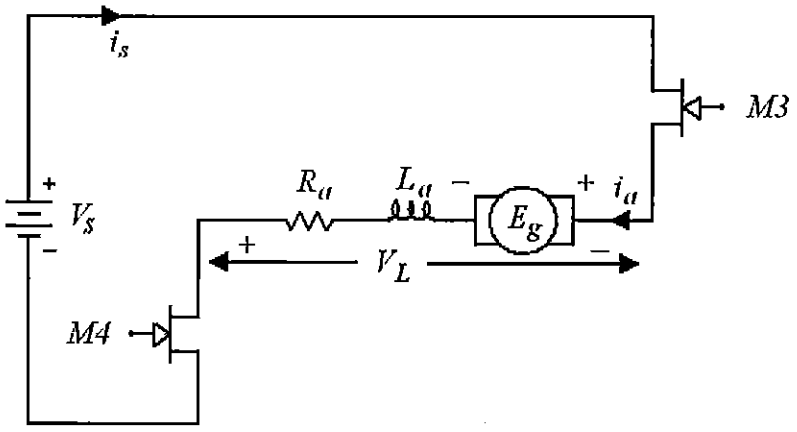
[ที่มา ELECTRIC MOTOR DRIVE Modeling ,Analysys ,and Control : หน้าที่ 132]

ควอดแรนต์ที่ 3 Reverse motoring

แรงดันไฟฟ้าต้านกลับจะมีทิศทางเป็นลบ ทั้งนี้เนื่องมาจากมอเตอร์หมุนกลับทิศทาง และแรงบิดมีค่าเป็นลบ ในสภาวะนี้พลังงานจะไหลจากแหล่งจ่ายไปมอเตอร์ ในควอดแรนต์นี้ มอเตอร์ออกแรงบิดในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ทำให้มอเตอร์หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ในสภาวะนี้มอเตอร์จะจ่ายกำลังสุทธิ $P=(-T)(-\omega)=T\omega$ ไปให้กับโหลดทางกล สภาวะนี้จึงเป็นสภาวะที่พลังงานไหลจากมอเตอร์ไปยังโหลดทางกลเช่นเดียวกับควอดแรนต์ที่ 1 แต่เป็นการหมุนไปในทิศทางตรงกันข้าม

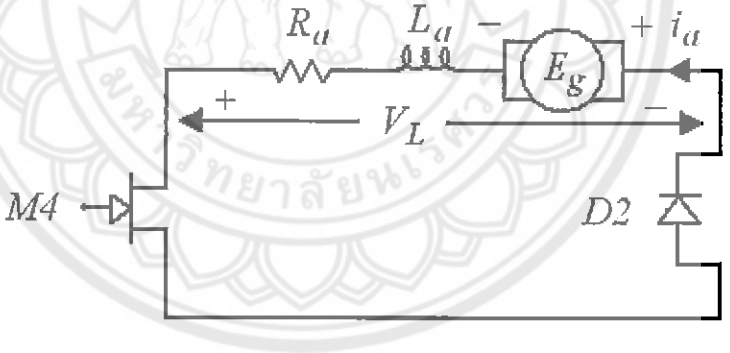
หลักการทำงานของวงจรในควอดแรนต์ที่ 3

ซึ่งจากวงจรรูปที่ 2.11 กำหนดให้ M_3 และ M_4 นำกระแส ค่าแรงดันคร่อมโหลดจะมีค่าเป็นลบ และมีขนาดเท่ากับแหล่งจ่ายแรงดัน เ กระแสจะไหลผ่าน M_3 และ M_4 ดังรูปที่ 2.19



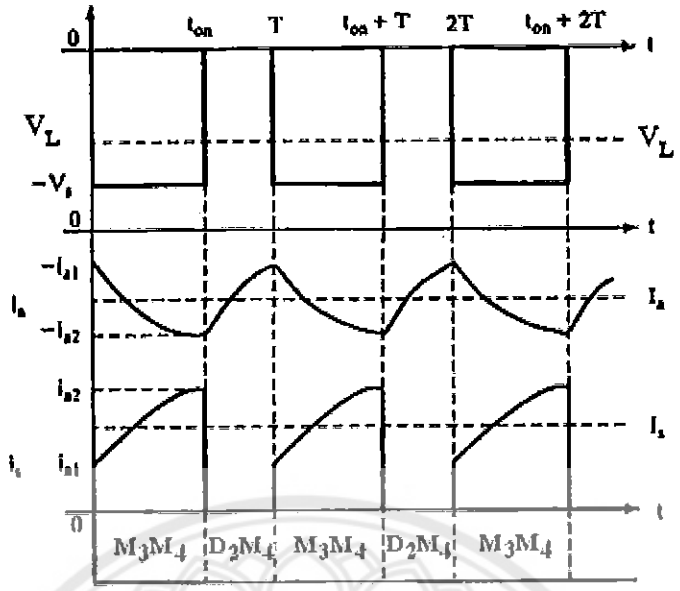
รูปที่2.19 การทำงานของวงจรเมื่อ ให้ M_3 และ M_4 นำกระแส

เมื่อให้ M_3 หยุดนำกระแส และให้M_4 นำกระแส กระแสจะไหลผ่าน M_4 และไดโอด D_2 เพื่อคายพลังงานในตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งทิศทางของกระแสที่ไหลยังคงเป็นทิศทางเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่2.20 การทำงานของวงจรเมื่อ ให้ M_3 หยุดนำกระแส และ M_4 นำกระแส

เมื่อให้ M_3 และ M_4 นำกระแสอีกครั้ง การไหลของกระแสจะเป็นดังรูปที่ 2.19 และเมื่อให้ M_3 หยุดนำกระแส และให้M_4 นำกระแสสลับกันไปเรื่อยๆ จะได้ค่าของแรงดันคร่อมโหลด กระแสอาร์เมเจอร์ และกระแสที่แหล่งจ่าย เป็นดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การทำงานของอุปกรณ์ และค่า V_L, i_a, i_s ในควอดแรนต์ที่ 3

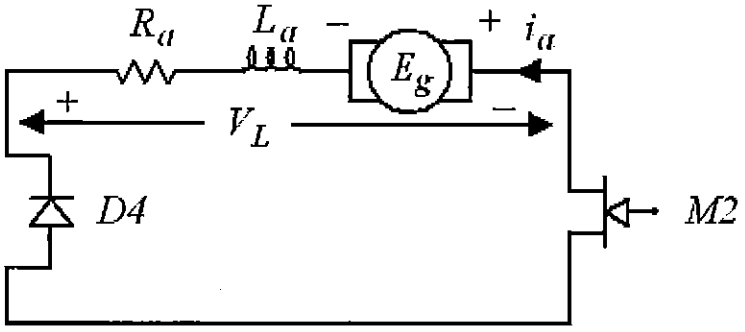
[ที่มา ELECTRIC MOTOR DRIVE Modeling ,Analysys ,and Control : หน้าที่ 131]

ควอดแรนต์ที่ 4 Reverse Braking

แรงดันไฟฟ้าต้านกลับจะเป็นลบ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากมอเตอร์ยังคงหมุนกลับทิศทาง และแรงบิดจะเป็นบวกเนื่องจากกระแสอาร์เมเจอร์จะมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสอาร์เมเจอร์ในควอดแรนต์ที่ 3 ทำให้พลังงานไหลจากมอเตอร์ไปยังแหล่งจ่าย ในควอดแรนต์นี้จะเป็นการเบรกของควอดแรนต์ที่ 3 กล่าวคือ มอเตอร์ยังหมุนไปในทิศทวนเข็มนาฬิกาเนื่องจากผลของความเฉื่อย แต่มอเตอร์ออกแรงบิดไปในทิศทางตรงกันข้ามกับการหมุนเพื่อหยุดการหมุนของมอเตอร์ ในสภาวะนี้มอเตอร์จะรับกำลังสุทธิ $P=(T)(-\omega)=-T\omega$ มาจากโหลดทางกล ซึ่งหากมอเตอร์ตัวนี้ถูกต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟและยอมให้กระแสในตัวมอเตอร์ไหลกลับทางได้พลังงานที่มอเตอร์รับกลับมาก็จะถูกส่งคืนไปยังแหล่งจ่าย แต่ถ้าใช้วิธีเบรกทางกล เช่น ผ้าเบรก พลังงานที่สะสมอยู่ในโหลดทางกลและมอเตอร์ก็จะสูญเสียไปในรูปของความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทาน เช่นเดียวกับกรณีของควอดแรนต์ที่ 2

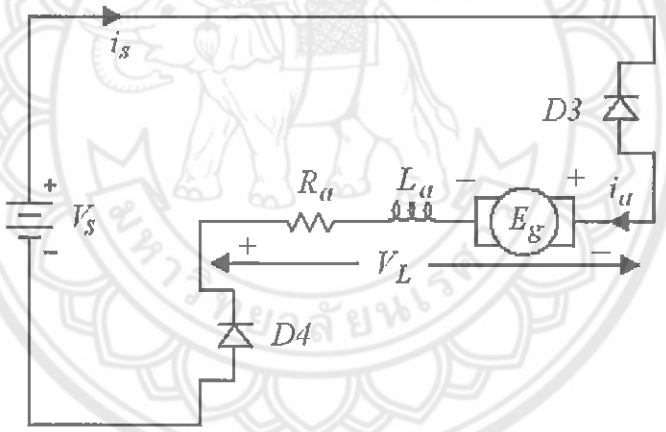
หลักการทำงานของวงจรในควอดแรนต์ที่ 4

การทำงานในควอดแรนต์ที่ 4 นี้จะทำงานต่อเนื่องจากการทำงานในควอดแรนต์ที่ 3 กระแสจะไหลออกจากแหล่งจ่ายมายังโหลด จากนั้นกำหนดให้ M_3 หยุดนำกระแสและ M_4 นำกระแส แล้วให้ M_2 นำกระแส ทำให้กระแสไหลผ่าน M_2 และไดโอด D_4 ทิศทางการไหลของกระแสจะมีทิศทางดังรูปที่ 2.22



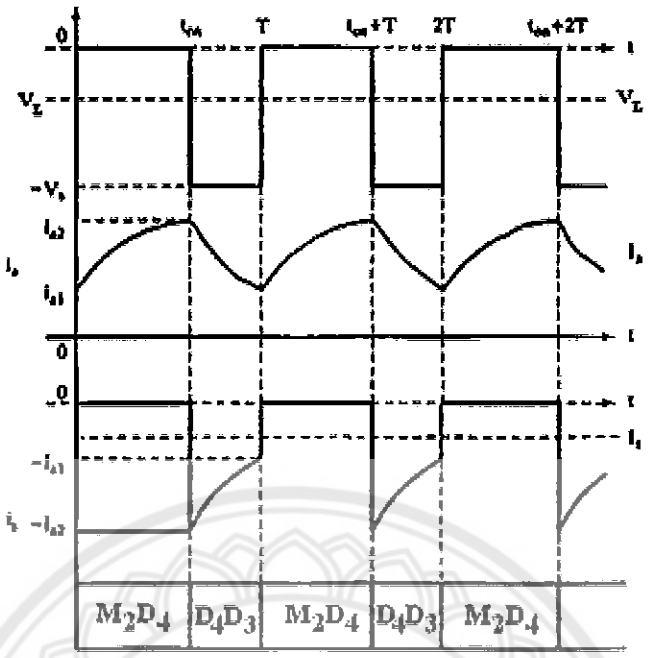
รูปที่ 2.22 การทำงานของวงจรเมื่อ ให้ M_2 นำกระแส

เมื่อกระแสในวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นค่าหนึ่ง ให้ M_2 หยุดนำกระแส กระแสจะไหลจากโหลดไปแหล่งจ่าย โดยไหลผ่านไดโอด D_3 และ D_4 ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การทำงานของวงจรเมื่อ ให้ M_2 หยุดนำกระแส

เมื่อให้ M_4 นำกระแสอีกครั้ง การไหลของกระแสจะเป็นดังรูปที่ 2.22 และเมื่อให้ M_4 หยุดนำกระแสสลับกันไปเรื่อยๆ จะได้ค่าของแรงดันคร่อมโหลด กระแสอาร์เมเจอร์ และกระแสที่แหล่งจ่าย เป็นดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 การทำงานอุปกรณ์ และค่า V_L, i_a, i_s ในควอดแรนต์ที่ 4

[ที่มา ELECTRIC MOTOR DRIVE Modeling, Analysys, and Control: หน้าที่ 129]

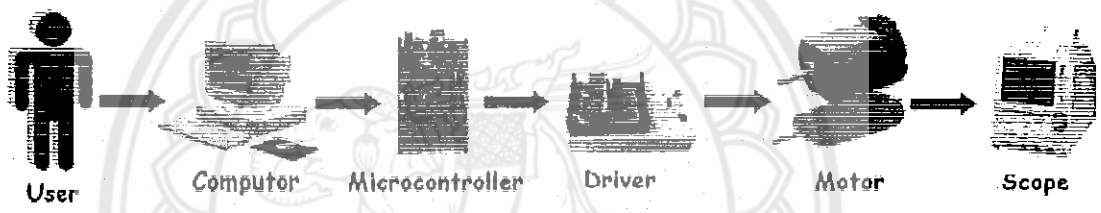
ในโครงงานนี้จะควบคุมการทำงานในควอดแรนต์ที่ 2 ซึ่งเป็นการควบคุมการเบรกของมอเตอร์แบบเดินหน้า ผลที่ได้จากการควบคุมในการทดลองรีเจนเนอเรทีฟเบรก จะกล่าวในบทที่ 4

บทที่ 3
การออกแบบการทดลอง

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงรายละเอียดและหลักการรวมถึงทฤษฎีต่างๆมาแล้ว ทางคณะผู้จัดทำจึงได้เริ่มการดำเนินงานการออกแบบโครงร่างของโครงงานและการเลือกใช้วัสดุต่างๆ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 รูปแบบของการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ในโครงงานนี้

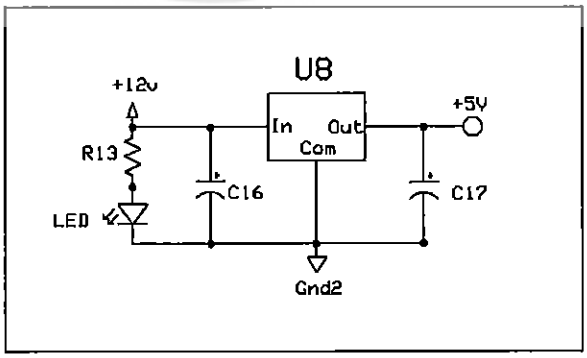
การควบคุมการทำงานของมอเตอร์ในโครงงานนี้สามารถอธิบายได้ ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งแสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของการควบคุมการทำงานของมอเตอร์



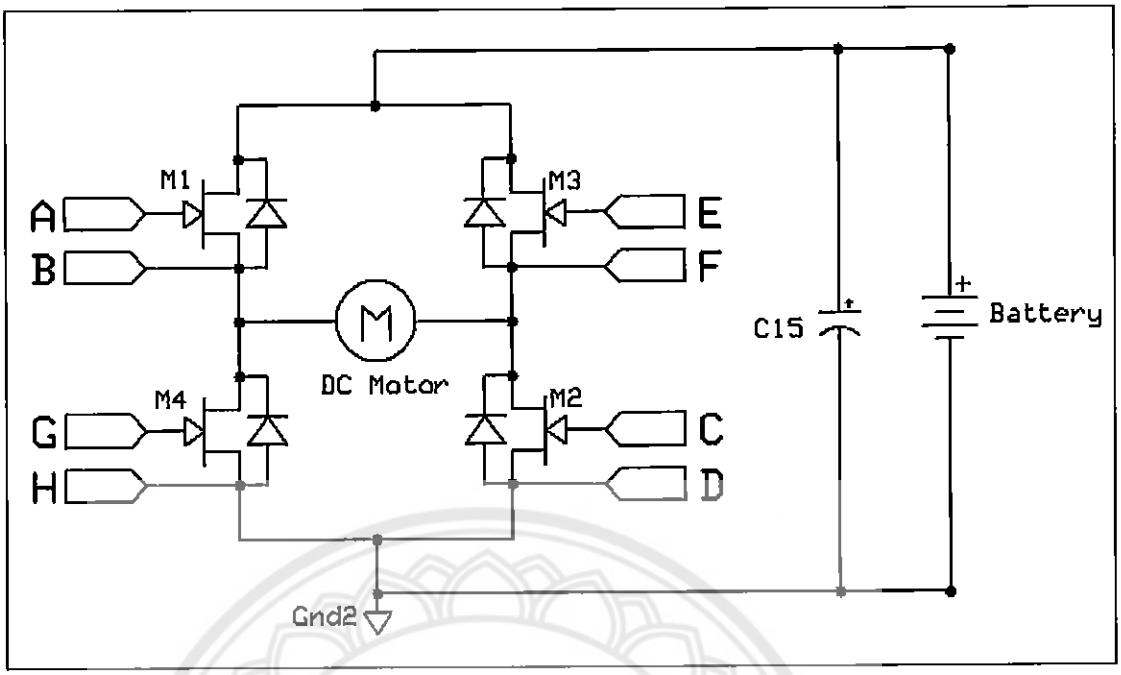
รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมของการควบคุมมอเตอร์

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในโครงงาน

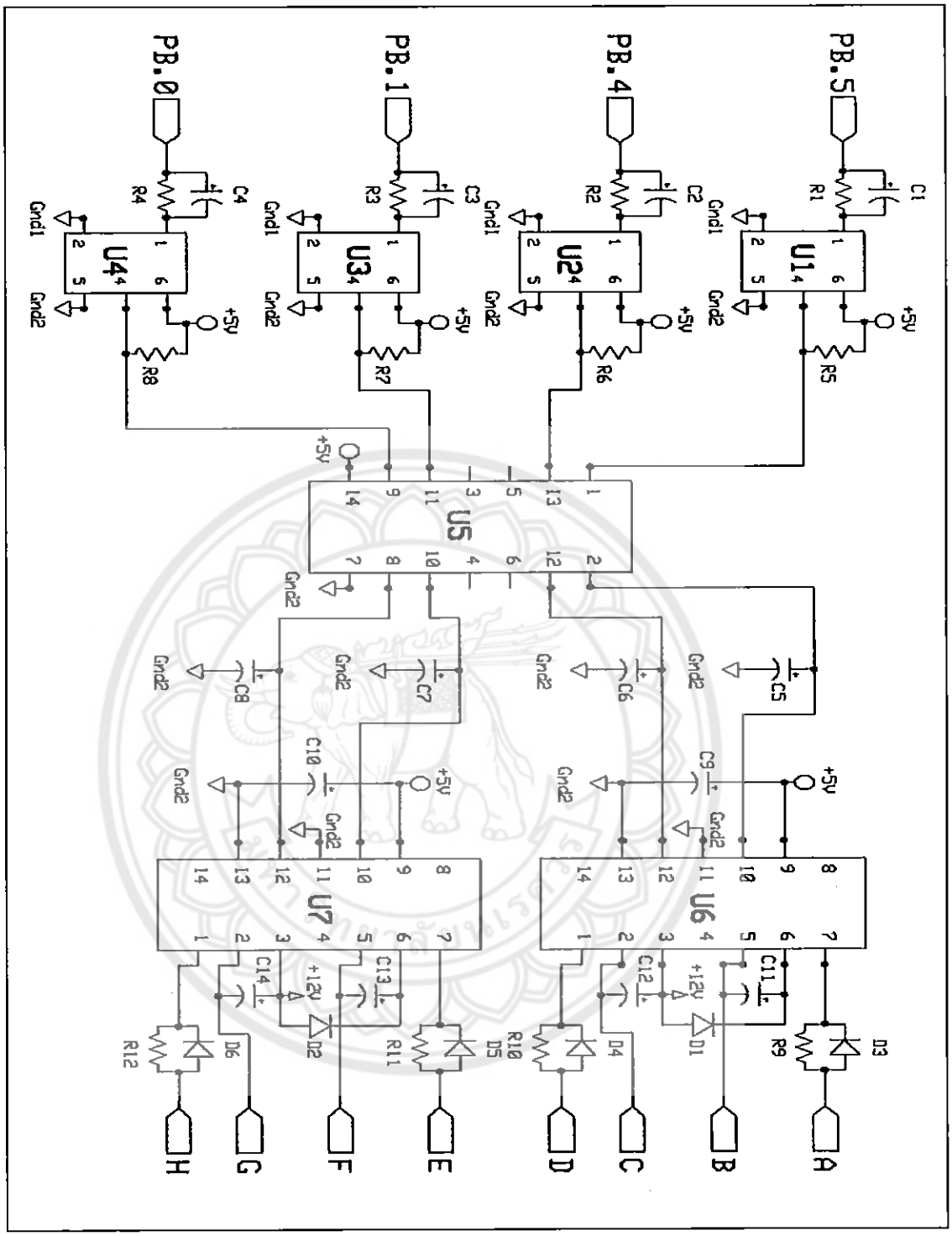
3.1. อุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดแวร์



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.2 รูปวงจรที่ใช้จริง

(ก) วงจรภาคจ่ายไฟ

(ข) วงจรควบคุมมอเตอร์

(ค) วงจรขับ (Driver)

โดยรายการอุปกรณ์ต่อไปนี้ใช้สำหรับวงจรรูปที่ 3.2

- ไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น CP-PIC16F877 V.1.0

- R1, R2, R3, R4	50 Ω 1/4W
R5, R6, R7, R8	270 Ω 1/4W
R9, R10, R11, R12	22 Ω 1/2W
R13	1k5 Ω 1/2W
C1, C2, C3, C4	1 uF 16V
C5, C6, C7, C8	0.1 uF 16V
C9, C10, C11, C12, C13, C14	0.47 uF 35V
C15	1000 uF 100V
C16	0.33 uF 35V
C17	0.1 uF 16V
D1, D2	1N4002
D3, D4, D5, D6	1N4148
LED	
U1, U2, U3, U4	H11L1
U5	74LS14
U6, U7	IR2110
U8	7805
M1, M2, M3, M4	IRFP-450

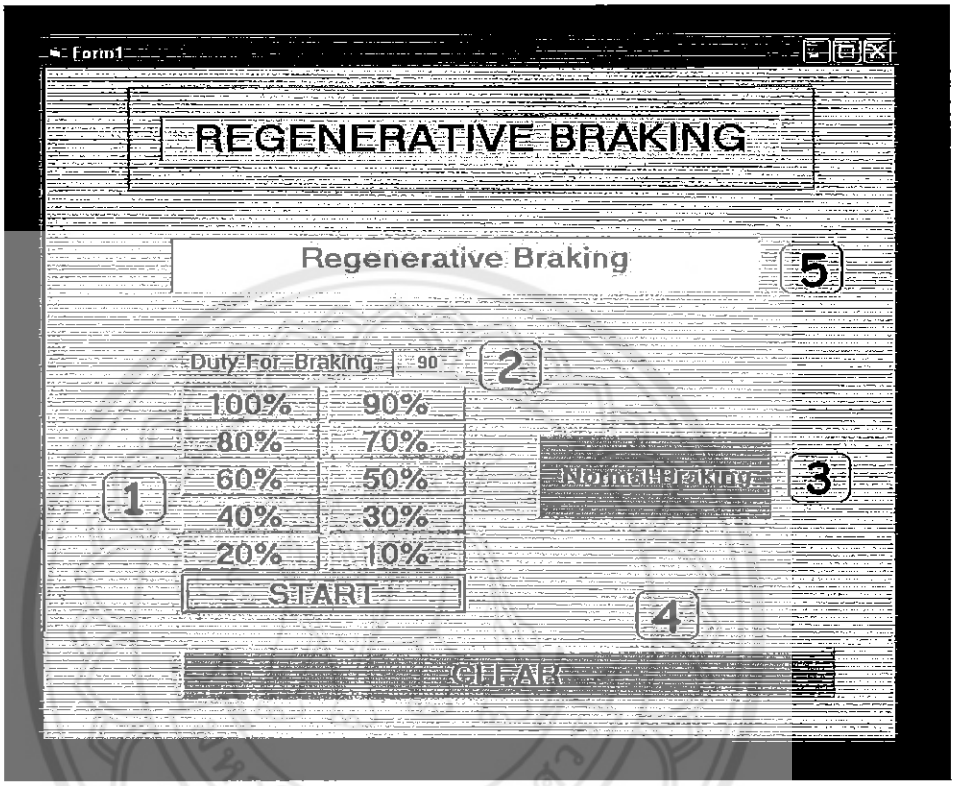
จากรูปที่ 3.2 (ก) เป็นวงจรภาคจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ต่างๆในวงจรที่ใช้ในโครงงานนี้ โดยจะใช้ไฟ 12 VDC และ 5 VDC เข้ามาเลี้ยงให้กับตัวอุปกรณ์ต่างๆในวงจร โดยจะมี U8 เป็น ไอซีรักษาแรงดันมีค่า 5 VDC

จากรูปที่ 3.2 (ข) เป็นวงจรควบคุมมอเตอร์โดยใช้มอสเฟต 4 ตัว (M1, M2, M3 และ M4) เป็นอุปกรณ์สวิตซ์หรือเรียกอีกอย่างว่า วงจร H-Bridge

จากรูปที่ 3.2 (ค) เป็นวงจรขับ (Driver) โดยรับสัญญาณเอาท์พุตจากไมโครคอนโทรเลอร์โดยใช้ U1, U2, U3 และ U4 ซึ่งเป็น OPTOCOUPLER ซึ่งสามารถแยกกราวด์ของไมโครคอนโทรลเลอร์กับกราวด์ของวงจรขับแต่ว่าสัญญาณเอาท์พุตของ U1 จะกลับเฟสจึงต้องใช้ U5 กลับเฟสสัญญาณอีกครั้งหนึ่ง โดย U6 และ U7 เป็นตัวขยายสัญญาณอินพุตที่ออกมาจาก U5 ให้สูงขึ้นเพื่อเพียงพอที่จะสามารถขับมอสเฟตให้ทำงานควบคุมมอเตอร์ได้

3.2.2 อุปกรณ์ทางด้านซอร์ฟแวร์

- โปรแกรม Microcode Studio Plus
- โปรแกรม Visual Basic 6
- โปรแกรม CP877WV3e ใช้ในการโหลดโปรแกรมลงใน PIC16F877



รูปที่ 3.3 โปรแกรม Visual Basic ที่ใช้ควบคุมในโครงงาน

การทำงานของไมโครคอนโทรเลอร์จะถูกควบคุมโดยโปรแกรม Visual Basic ดังรูปที่ 3.3 สามารถอธิบายการทำงานได้ดังต่อไปนี้

หมายเลข 1 เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมค่าดิวตี้ไซเคิลของการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ

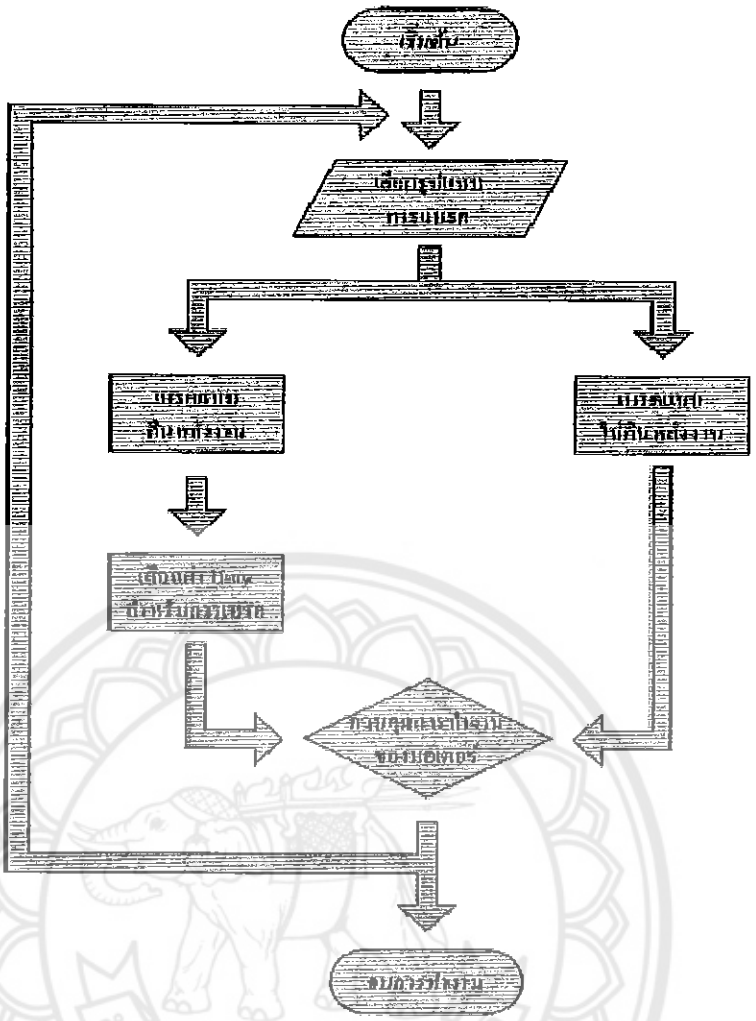
หมายเลข 2 เป็นส่วนที่แสดงค่าดิวตี้ไซเคิลที่ได้จากการเลือกของหมายเลข 1

หมายเลข 3 เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมการเบรกแบบธรรมดา (ไม่คืนพลังงาน)

หมายเลข 4 เป็นส่วนที่ใช้ในการเคลียร์โปรแกรมเพื่อพร้อมที่จะรับคำสั่งใหม่

หมายเลข 5 เป็นส่วนที่แสดงสถานะของการควบคุมโปรแกรม

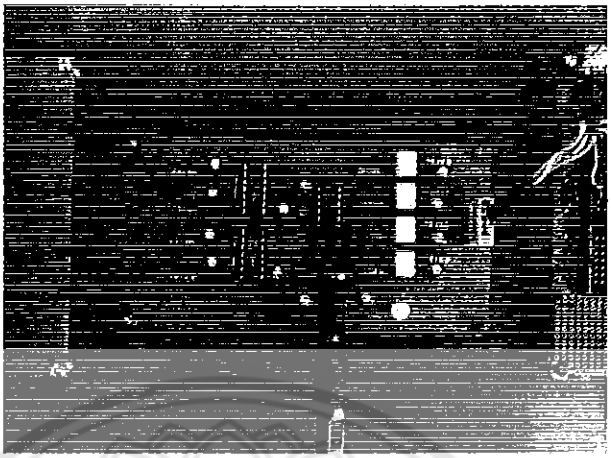
และจากรูปที่ 3.3 สามารถแสดงรูปแบบการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ได้ด้วยโฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ควบคุม ด้วยการเลือกรูปแบบของการเบรกก่อน ถ้าเลือกรูปแบบการเบรกแบบคืนพลังงานให้เลือกกำหนดค่าดิวตี้ไซเคิลของมอสเฟต M4 ที่ค่าต่างๆ แล้วทำการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ต่อไป ส่วนถ้าเลือกการเบรกแบบไม่คืนพลังงานให้เลือกรูปแบบการทำงานส่วนของการเบรกแบบธรรมดา (ไม่คืนพลังงาน)



รูปที่ 3.4 โฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ควบคุม

3.3 การออกแบบการทดลอง

3.3.1 วงจรขับ(Driver)

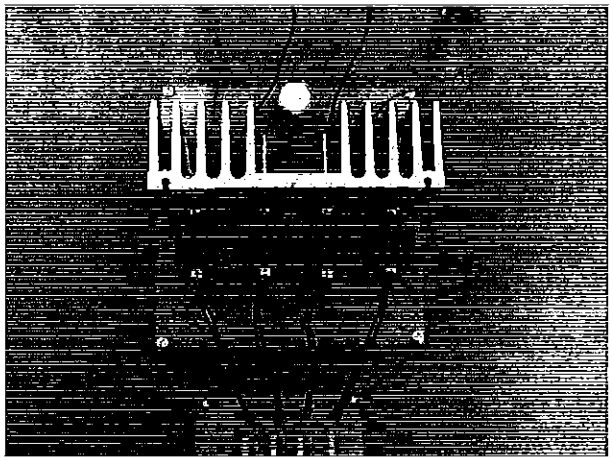


รูปที่ 3.5 วงจรขับ (Driver) ลงอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว

การต่อวงจรขับ(Driver) โดยต่อตามวงจรในรูปที่ 3.2 (ค) ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้แต่ละชนิดนั้นแสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.1.1 ซึ่งเป็นรายละเอียดอุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในโครงงานนี้ รูปที่ 3.5 เป็นวงจรขับที่ลงอุปกรณ์เสร็จเรียบร้อยแล้ว โดยที่ในวงจรขับจะมีวงจรภาคจ่ายไฟ รูปที่ 3.2 (ก) รวมอยู่ด้วย

3.3.2 วงจรควบคุมมอเตอร์

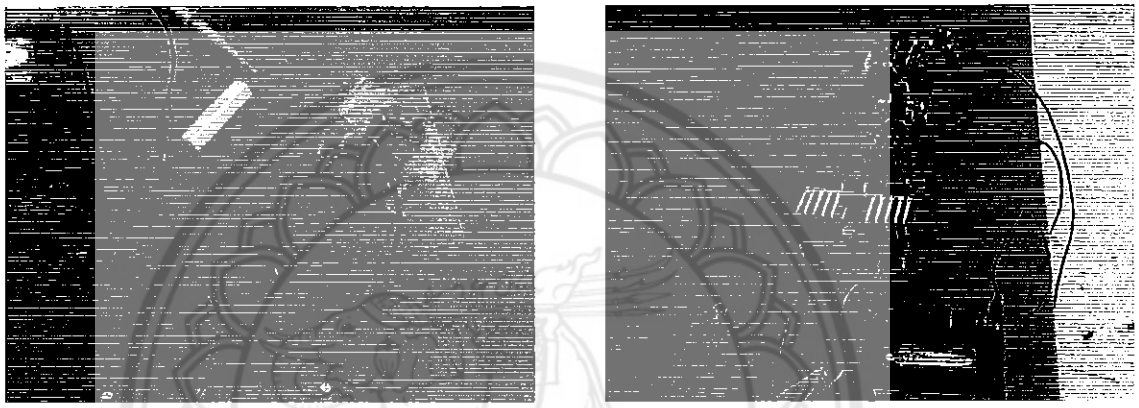
ต่อวงจรควบคุมมอเตอร์ตามรูปที่ 3.2 (ข) วงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์จะมีมอสเฟต (M1, M2, M3 และ M4) ที่คอยทำหน้าที่เป็นสวิตช์ซึ่งเรียกอีกอย่างว่า วงจร H-Bridge วงจรที่ต่อเสร็จแล้วจะได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรควบคุมมอเตอร์ลงอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว

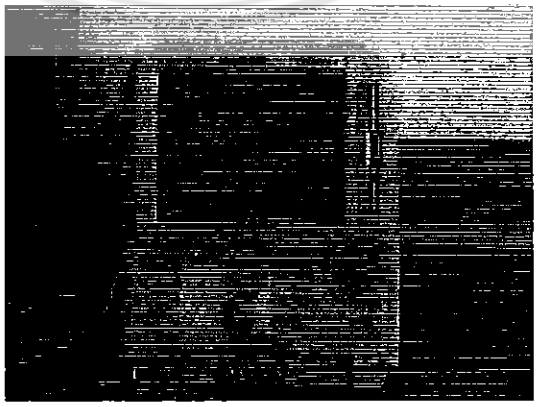
3.3.3 การทดลองรีเจนเนอเรทีฟเบรก

เมื่อต่อวงจรแต่ละส่วนการทำงานเสร็จเรียบร้อยแล้วนำวงจรทั้งหมดมาต่อรวมกัน ดังรูปที่ 3.7 (ข) โดยนำมอเตอร์และแหล่งจ่ายไฟมาต่อเข้ากับวงจรรวมดังรูปที่ 3.7 (ก) จ่ายไฟ 12 VDC ให้กับวงจรควบคุมมอเตอร์ และใช้ไฟ 5 VDC จ่ายให้กับวงจรขับและบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังรูปที่ 3.7 (ข) จากนั้นเริ่มทำการทดลองโดยป้อนโปรแกรมที่ใช้ควบคุมมอเตอร์เข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ โดยที่ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสร้างสัญญาณควบคุมให้วงจรขับทำงานและวงจรขับจะไปสั่งให้วงจรควบคุมมอเตอร์ทำงานตามโปรแกรมที่ป้อนเข้ามา แล้วบันทึกผลการทดลองโดยใช้สโคปวัดกราฟกระแสที่ได้จากการทดลองรีเจนเนอเรทีฟเบรก



(ก) (ข)

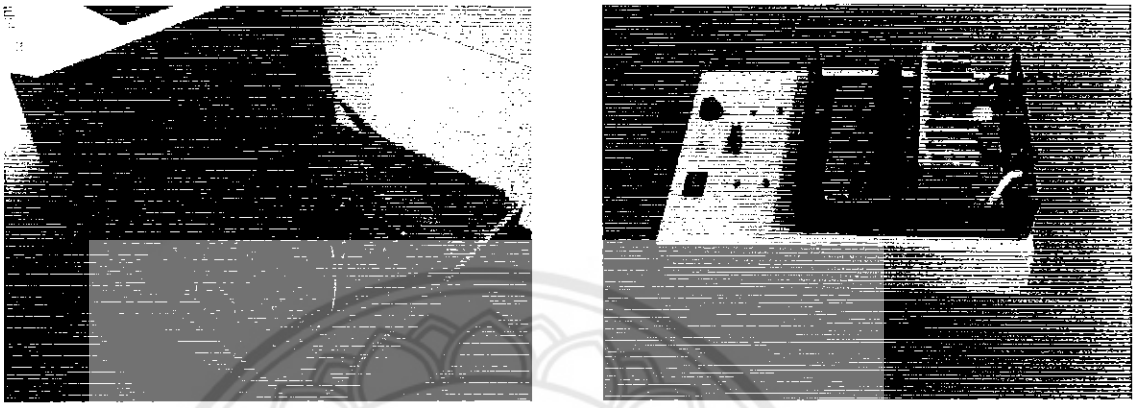
รูปที่ 3.7 การต่ออุปกรณ์เพื่อใช้ทดลอง
(ก) การต่อมอเตอร์และแหล่งจ่ายไฟเข้ากับวงจรรวม
(ข) วงจรที่ต่อเสร็จแล้วพร้อมทำการทดลอง



รูปที่ 3.8 การใช้สโคปวัดกราฟกระแสที่ได้จากการรีเจนเนอเรทีฟเบรก

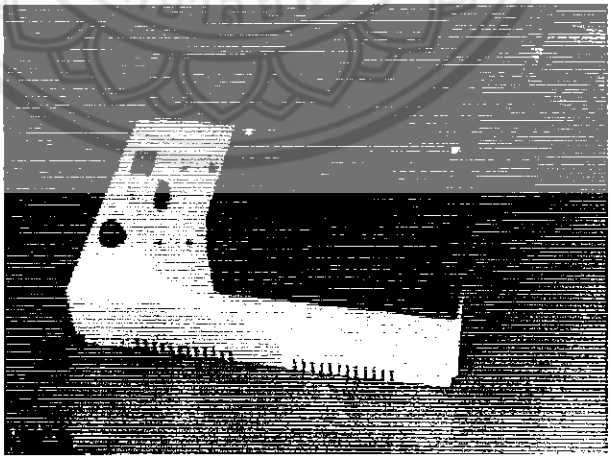
3.4 การบรรจุอุปกรณ์ลงกล่อง

นำวงจรทั้งหมดที่ต่อเรียบร้อยแล้วนั้นทั้งหมดมาบรรจุลงกล่องที่เตรียมไว้ จากนั้นเก็บรายละเอียดต่างๆให้เรียบร้อยดังรูปที่ 3.9 โดยแยกออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กับวงจรขับ ดังรูปที่ 3.9 (ก) และวงจรควบคุมมอเตอร์ดังรูปที่ 3.9 (ข)



(ก) (ข)

รูปที่ 3.9 การนำอุปกรณ์มาบรรจุลงกล่อง
(ก) บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กับวงจรขับ
(ข) วงจรควบคุมมอเตอร์



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ทั้งหมดที่บรรจุลงกล่องเรียบร้อยแล้ว

บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากบทที่ 3 ได้ทำการออกแบบวงจรเพื่อใช้ในการทดลองและการทดลองการรีเจนเนอเรทีฟเบรกไปแล้วนั้น ในบทนี้จะนำเสนอผลจากการทดลองการรีเจนเนอเรทีฟเบรกที่ได้

4.1 ผลการทดลองการรีเจนเนอเรทีฟเบรก

4.1.1 การตั้งค่าดิวตี้ไซเคิลและความถี่

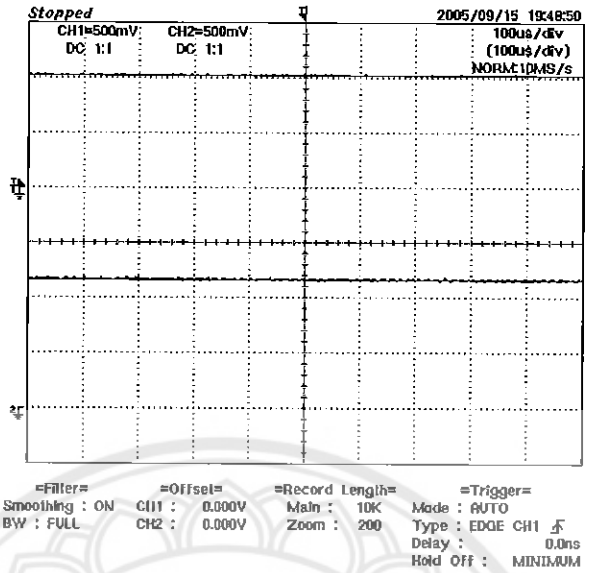
จากการทดลองรีเจนเนอเรทีฟเบรกจะขึ้นอยู่กับการตั้งค่าดิวตี้ไซเคิลซึ่งในการทดลองได้ทำการตั้งค่าดิวตี้ไซเคิลดังนี้

ตาราง 4.1 แสดงค่าดิวตี้ไซเคิล

ค่าดิวตี้ไซเคิล	ช่วงนำกระแส (us)	ช่วงหยุดนำกระแส (us)
100%	200	0
90%	180	20
80%	160	40
70%	140	60
60%	120	80
50%	100	100
40%	80	120
30%	60	140
20%	40	160
10%	20	180
0%	0	200

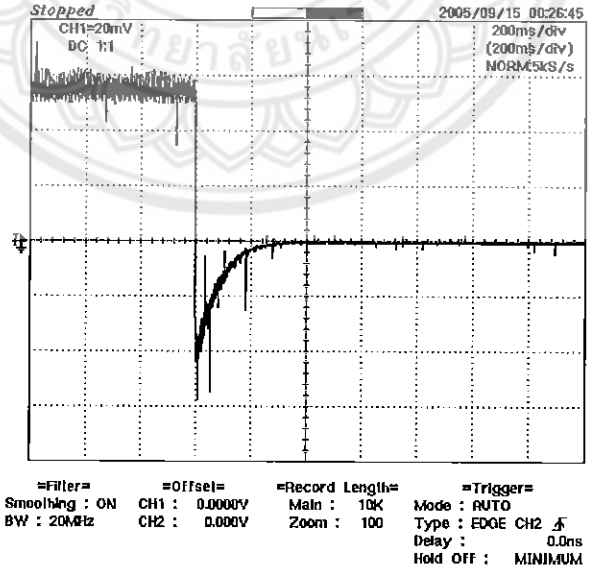
จากตารางเป็นค่าดิวตี้ไซเคิลที่ตั้งไว้ขณะที่มอเตอร์จะจะทำการรีเจนเนอเรทีฟเบรกซึ่งทั้งนี้จะต้องสัมพันธ์กับการควบคุมมอสเฟตแต่ละตัว ซึ่งแต่ละตัวจะมีช่วงเวลาของการนำกระแสหรือหยุดนำกระแสแตกต่างกัน

4.1.2 กราฟแสดงผลที่ได้จากการทดลอง

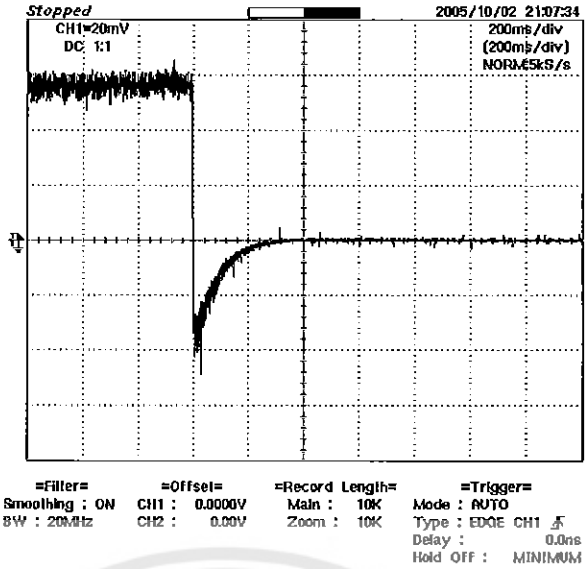


รูปที่ 4.1 มุมทริกที่เริ่มให้มอเตอร์หมุนที่ค่าดิวตี้ไซเคิล 100%

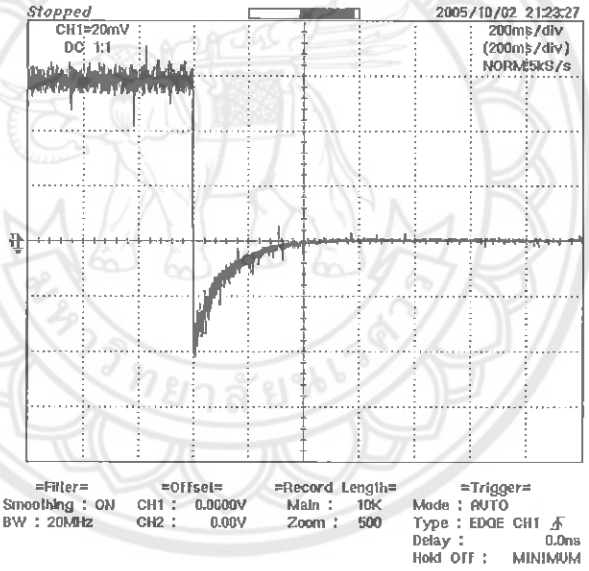
จากรูปที่ 4.1 แสดงมุมทริกของM1และM2 ขณะมอเตอร์ทำงานที่ค่าดิวตี้ไซเคิล 100% ซึ่งจะทริกให้ M1 และ M2 นำกระแสตลอดเพื่อให้กระแสนั้นไหลต่อเนื่อง



รูปที่ 4.2 การรีเจนเนอเรทีฟเบรกโดยให้ M4 มีค่าดิวตี้ไซเคิล 100%

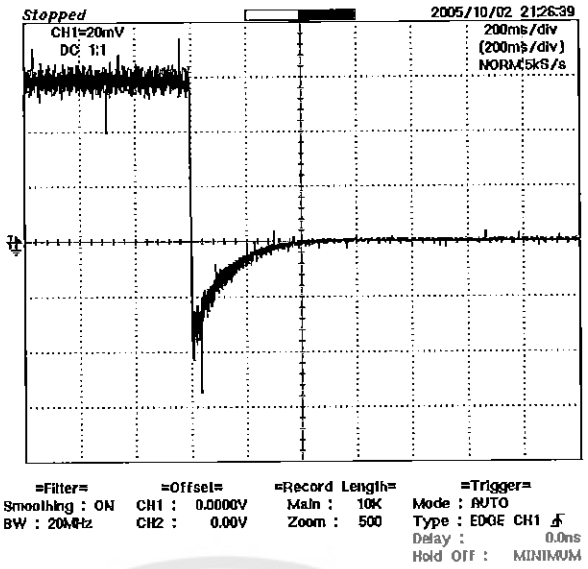


รูปที่ 4.3 การรีเจนเนอเรทีฟเบรกโดยให้ M4 มีค่าดิวตี้ไซเคิล 90%

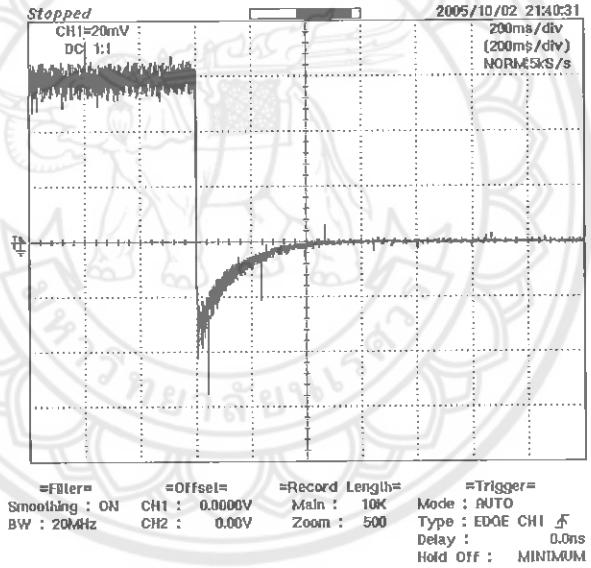


รูปที่ 4.4 การรีเจนเนอเรทีฟเบรกโดยให้ M4 มีค่าดิวตี้ไซเคิล 80%

จากรูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 เป็นกราฟแสดงกระแสไหลย้อนกลับจากการรีเจนเนอเรทีฟเบรก ซึ่งกระแสจะไหลจากโหลดกลับไปยังแหล่งจ่าย โดยผ่านไดโอด D1 และ D2 เมื่อให้มอสเฟตทุกตัวหยุดนำกระแส ซึ่งปริมาณกระแสที่ไหลย้อนกลับจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าดิวตี้ไซเคิลของ มอสเฟต M4 โดยในรูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 กำหนดค่าดิวตี้ไซเคิลของ มอสเฟต M4 100%, 90% และ 80% ตามลำดับ

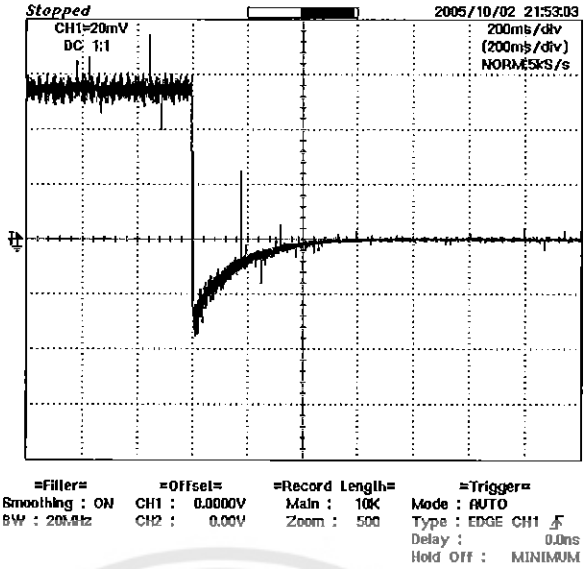


รูปที่ 4.5 การรีเจนเนอเรทีฟเบรกโดยให้ M4 มีค่าดิวตี้ไซเคิล 70%

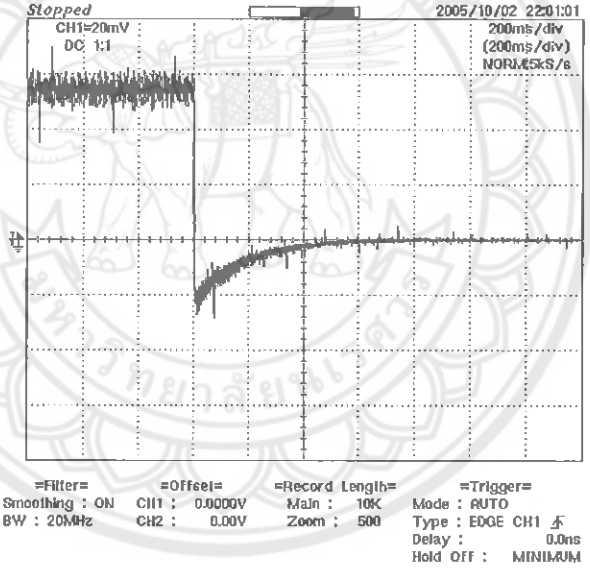


รูปที่ 4.6 การรีเจนเนอเรทีฟเบรกโดยให้ M4 มีค่าดิวตี้ไซเคิล 60%

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 เป็นกราฟแสดงกระแสไหลย้อนกลับจากการรีเจนเนอเรทีฟเบรกซึ่งกระแสจะไหลจากโหลดกลับไปยังแหล่งจ่าย โดยผ่านไดโอด D1 และ D2 เมื่อให้มอสเฟตทุกตัวหยุดนำกระแส ซึ่งปริมาณกระแสที่ไหลย้อนกลับจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าดิวตี้ไซเคิลของ มอสเฟต M4 โดยในรูปที่ 4.5 และ 4.6 กำหนดค่าดิวตี้ไซเคิลของ มอสเฟต M4 70% และ 60% ตามลำดับ

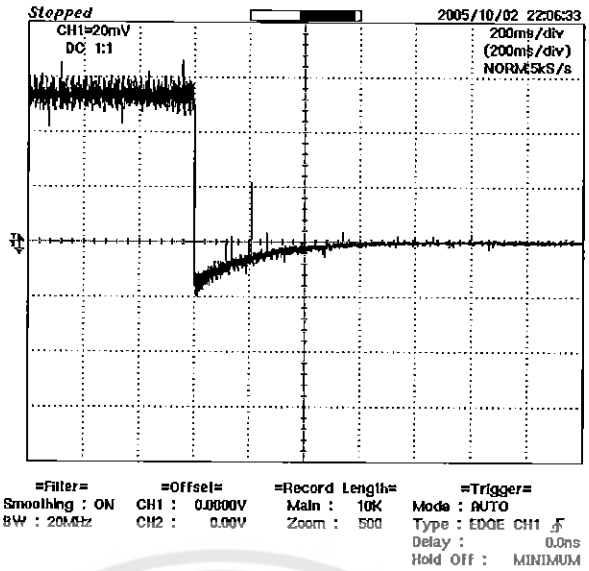


รูปที่ 4.7 การรีเจนเนอเรทีฟเบรกโดยให้ M4 มีค่าดิวตี้ไซเคิล 50%

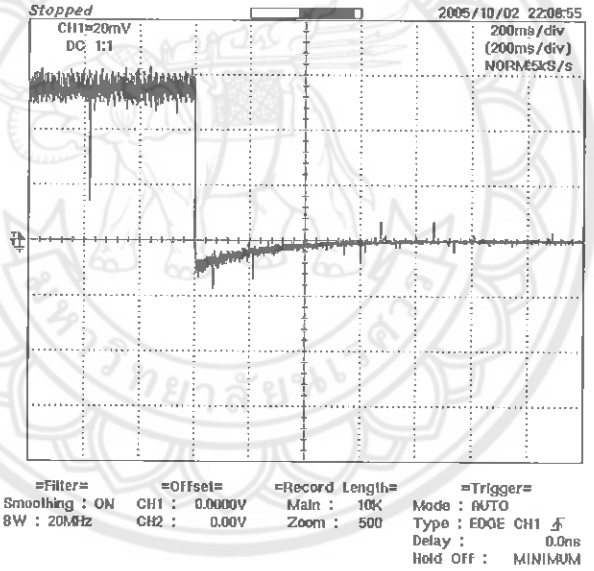


รูปที่ 4.8 การรีเจนเนอเรทีฟเบรกโดยให้ M4 มีค่าดิวตี้ไซเคิล 40%

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 เป็นกราฟแสดงกระแสไหลย้อนกลับจากการรีเจนเนอเรทีฟเบรกซึ่งกระแสจะไหลจากโหลดกลับไปยังแหล่งจ่าย โดยผ่านไดโอด D1 และ D2 เมื่อให้มอสเฟตทุกตัวหยุดนำกระแส ซึ่งปริมาณกระแสที่ไหลย้อนกลับจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าดิวตี้ไซเคิลของ มอสเฟต M4 โดยในรูปที่ 4.7 และ 4.8 กำหนดค่าดิวตี้ไซเคิลของ มอสเฟต M4 50% และ 40% ตามลำดับ

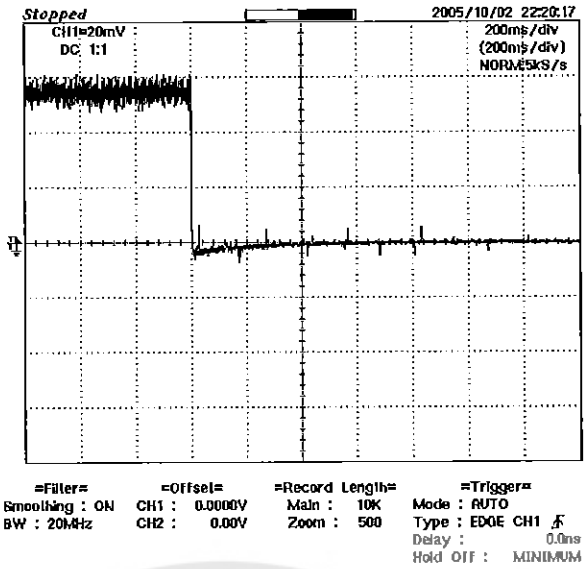


รูปที่ 4.9 การรีเจนเนอเรทีฟเบรกโดยให้ M4 มีค่าดิวตี้ไซเคิล 30%

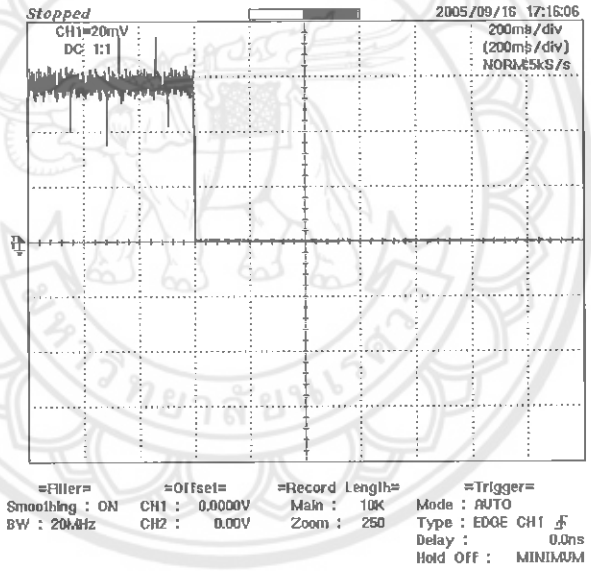


รูปที่ 4.10 การรีเจนเนอเรทีฟเบรกโดยให้ M4 มีค่าดิวตี้ไซเคิล 20%

จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 เป็นกราฟแสดงกระแสไหลย้อนกลับจากการรีเจนเนอเรทีฟเบรกซึ่งกระแสจะไหลจากโหลดกลับไปยังแหล่งจ่าย โดยผ่านไดโอด D1 และ D2 เมื่อให้มอสเฟตทุกตัวหยุดนำกระแส ซึ่งปริมาณกระแสที่ไหลย้อนกลับจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าดิวตี้ไซเคิลของ มอสเฟต M4 โดยในรูปที่ 4.9 และ 4.10 กำหนดค่าดิวตี้ไซเคิลของ มอสเฟต M4 30% และ 20% ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 การรีเจนเนอเรทีฟเบรกโดยให้ M4 มีค่าดิวตี้ไซเคิล 10%



รูปที่ 4.12 การเบรกแบบธรรมดา (ไม่มีการคืนพลังงาน)

จากรูปที่ 4.11 เป็นกราฟแสดงกระแสไหลย้อนกลับจากการรีเจนเนอเรทีฟเบรกซึ่งกระแสจะไหลจากโหลดกลับไปยังแหล่งจ่าย โดยผ่านไดโอด D1 และ D2 เมื่อให้มอสเฟตทุกตัวหยุดนำกระแส ซึ่งปริมาณกระแสที่ไหลย้อนกลับจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าดิวตี้ไซเคิลของ มอสเฟต M4 โดยในรูปกำหนดค่าดิวตี้ไซเคิลของ มอสเฟต M4 10%

ส่วนรูปที่ 4.12 เป็นการเบรกแบบธรรมดาซึ่งไม่มีการคืนพลังงานกลับเข้าไปยังแหล่งจ่าย

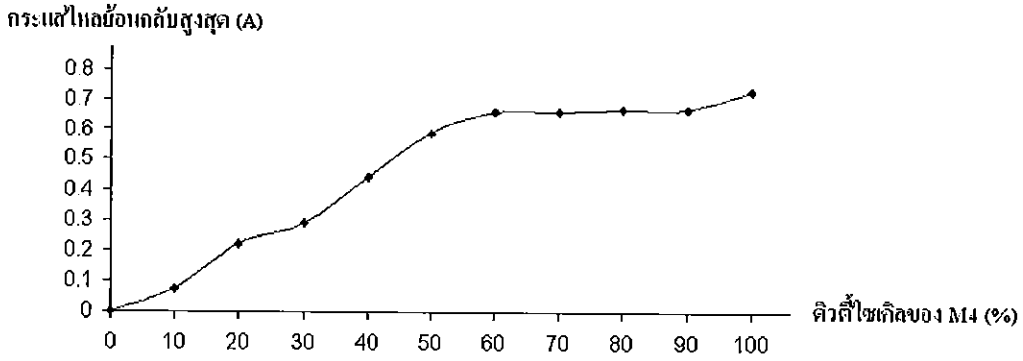
จากรูปข้างต้นเป็นรูปกราฟที่ได้จากการทดลองจริงที่เกิดจากการควบคุมให้มอสเฟตทำงานที่ความถี่ 5 kHz (ซึ่งมีคาบเวลา 200 ไมโครวินาที) จากการทดลองเป็นการเริ่มให้มอเตอร์ทำงานด้วยค่าดิวตี้ไซเคิล 100% ในรูปที่ 4.2 – 4.11 เป็นกราฟที่แสดงกระแสไหลย้อนกลับที่ได้จากการรีเจนเนอเรทีฟเบรกที่ค่าดิวตี้ไซเคิลต่างๆ ซึ่งเริ่มจากควบคุมให้ M1และM2 นำกระแส มอเตอร์ก็จะหมุน จากนั้นให้ M1 หยุดนำกระแสโดยที่ M2 ยังนำกระแสอยู่ กระแสก็จะไหลผ่าน M2 และD4 จากนั้นให้ M2 หยุดนำกระแส และให้M4 นำกระแส ชั่วขณะหนึ่ง กระแสก็จะไหลผ่าน M4 หลังจากนั้นให้ M4 หยุดนำกระแส กระแสก็จะไหลผ่าน D2 และD1 กลับเข้าแหล่งจ่าย หรืออาจเรียกได้ว่าเกิดการรีเจนเนอเรทีฟเบรก ส่วนในรูปที่ 4.12 เป็นการเบรกแบบธรรมดาจะเห็นว่าไม่มีกระแสไหลย้อนกลับ

จากการทดลองได้ทำการวัดค่ากระแสไหลย้อนกลับสูงสุดที่ค่าดิวตี้ไซเคิลต่างๆของ M4 ซึ่งสามารถวัดค่ากระแสไหลย้อนกลับสูงสุด ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่ากระแสไหลย้อนกลับสูงสุดที่ค่าดิวตี้ไซเคิลต่างๆของ M4

ค่าดิวตี้ไซเคิลของ M4 (%)	กระแสไหลย้อนกลับสูงสุด (A)
0	0
10	0.073
20	0.22
30	0.29
40	0.44
50	0.59
60	0.66
70	0.66
80	0.67
90	0.67
100	0.73

จากตารางที่ 4.2 สามารถนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไหลย้อนกลับสูงสุดกับค่าดิวตี้ไซเคิลที่ค่าต่างๆของ M4 ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไหลย้อนกลับสูงสุดกับค่าดิวตี้ไซเคิลของ M4

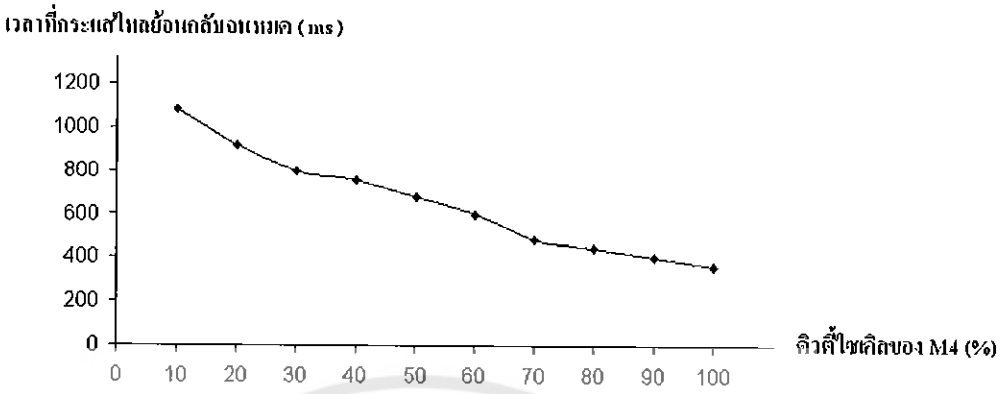
จากรูปที่ 4.13 จะได้ว่าเมื่อค่าดิวตี้ไซเคิลของ M4 มีค่ามาก กระแสไหลย้อนกลับสูงสุดจะมาก แต่ถ้าค่าดิวตี้ไซเคิลของ M4 มีค่าน้อย ค่ากระแสไหลย้อนกลับสูงสุดก็จะมีค่าน้อยตามไปด้วย

จากการทดลองได้ทำการวัดเวลาที่กระแสไหลย้อนกลับจนหมดที่ค่าดิวตี้ไซเคิลต่างๆของ M4 ซึ่งสามารถวัดค่าเวลาที่กระแสไหลย้อนกลับจนหมด ได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าเวลาที่กระแสไหลย้อนกลับจนหมดกับค่าดิวตี้ไซเคิลต่างๆของ M4

ค่าดิวตี้ไซเคิล ของ M4 (%)	เวลาที่กระแสไหลย้อนกลับจนหมด (ns)
10	1080
20	920
30	800
40	760
50	680
60	600
70	480
80	440
90	400
100	360

จากตารางที่ 4.3 สามารถนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาที่กระแสไหลย้อนกลับจนหมดกับค่าดิวตี้ไซเคิลที่ค่าต่างๆของ M4 ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่กระแสไหลย้อนกลับจนหมด กับค่าดิวตี้ไซเคิลต่างๆของ M4

จากรูปที่ 4.13 จะได้ว่าเมื่อค่าดิวตี้ไซเคิลของ M4 มีค่ามาก เวลาที่กระแสไหลย้อนกลับจนหมดจะใช้เวลาน้อย แต่ถ้าค่าดิวตี้ไซเคิลของ M4 มีค่าน้อย ค่าเวลาที่กระแสไหลย้อนกลับจนหมดก็จะใช้เวลานาน

จากรูปที่ 4.13 และ รูปที่ 4.14 สามารถนำมาจัดความสัมพันธ์ของค่าดิวตี้ไซเคิลของ M4 กระแสไหลย้อนกลับสูงสุด และ เวลาที่กระแสไหลย้อนกลับจนหมด ได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าดิวตี้ไซเคิลของ M4 กับค่ากระแสไหลย้อนกลับสูงสุด และเวลาที่กระแสไหลย้อนกลับจนหมด

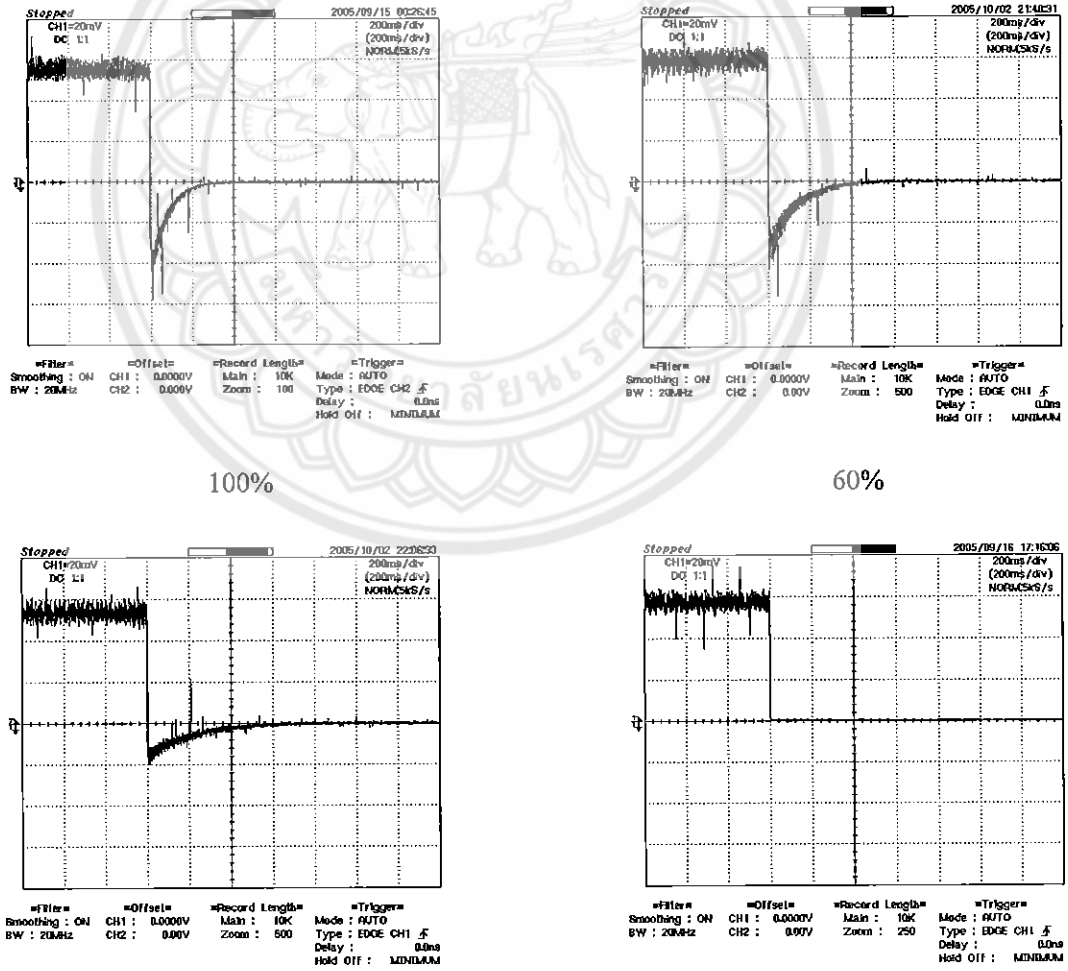
ค่าดิวตี้ไซเคิลของ M4	กระแสไหลย้อนกลับสูงสุด	เวลาที่กระแสไหลย้อนกลับจนหมด
มาก	มาก	น้อย
ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
น้อย	น้อย	มาก

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและวิจารณ์การทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. จากทดลอง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถควบคุมความเร็วรอบได้ 2 วิธี คือ การปรับแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ และการปรับค่าดิวตี้ไซเคิล

2. จากหลักการของรีเจนเนอเรทีฟเบรกจะพบว่าการควบคุมกระแสไหลย้อนกลับแหล่งจ่ายสามารถควบคุมได้โดยการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลของมอสเฟส M4 ซึ่งถ้าค่าดิวตี้ไซเคิลของ M4 มีค่ามากกระแสไหลย้อนกลับก็จะมีค่ามากและระยะเวลาที่กระแสไหลย้อนกลับก็จะน้อยทำให้สามารถทำการเบรกมอเตอร์ได้อย่างรวดเร็ว แต่ถ้าค่าดิวตี้ไซเคิลของมอสเฟส M4 มีค่าน้อยกระแสไหลย้อนกลับก็จะมีค่าน้อยและระยะเวลาที่กระแสไหลย้อนกลับก็จะมากทำให้สามารถทำการเบรกมอเตอร์ได้ช้า



รูปที่ 5.1 การรีเจนเนอเรทีฟเบรกโดยให้ M4 มีค่าดิวตี้ไซเคิลต่างๆกับการเบรกแบบธรรมดา

จากรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่า ถ้าตั้งค่าดิวตี้ไซเคิลที่ทริก M4 ให้มีค่ามาก ค่ากระแสไหลย้อนกลับสูงสุดจะมีค่ามาก แต่ระยะเวลาที่กระแสไหลกลับไปแหล่งจ่ายจนหมดจะใช้เวลาน้อย ในทางตรงกันข้ามถ้าตั้งค่าดิวตี้ไซเคิลที่ทริก M4 ให้มีค่าน้อย ค่ากระแสไหลย้อนกลับสูงสุดจะมีค่าน้อย แต่ระยะเวลาที่กระแสไหลกลับไปแหล่งจ่ายจนหมดจะใช้เวลามาก ส่วนเบรกแบบธรรมดาจะไม่มีกระแสไหลย้อนกลับไปยังแหล่งจ่าย ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบค่าดิวตี้ไซเคิลของ M4 กับค่ากระแสไหลย้อนกลับสูงสุดและเวลาที่กระแสไหลย้อนกลับจนหมด

ค่าดิวตี้ไซเคิลของ M4	กระแสไหลย้อนกลับสูงสุด	เวลาที่กระแสไหลย้อนกลับจนหมด
มาก	มาก	น้อย
ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
น้อย	น้อย	มาก

5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงแก้ไข

1. หลักการรีเจนเนอเรทีฟเบรกนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการควบคุมการเบรกมอเตอร์ได้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้น

2. จากผลของการเบรกวิธีนี้จะมีกระแสไหลย้อนกลับแหล่งจ่ายทำให้สามารถยืดอายุการใช้งานของแหล่งจ่ายให้ยาวนานขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การนำไปควบคุมการเบรกในรถไฟฟ้าที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ เมื่อมีการเบรกก็จะมีกระแสไหลย้อนกลับไปยังแบตเตอรี่ ทำให้แบตเตอรี่สามารถใช้งานได้นานกว่าเดิม

3. หากมีการนำไปใช้งานกับมอเตอร์กระแสตรงที่มีการเบรกบ่อยๆก็จะได้กระแสไหลกลับเข้าไปยังแหล่งจ่ายมากตามไปด้วย

4. โครงงานนี้ไม่สามารถควบคุมการเบรกมอเตอร์กระแสตรงที่มีพิกัดต่างจากที่ทำการทดลองได้ เนื่องจากมอเตอร์แต่ละพิกัดมีค่าพารามิเตอร์ต่างกัน เช่น ค่าแรงดัน ค่ากระแส และ ค่าความเร็วรอบ หรืออาจนำไปใช้ได้แต่อาจมีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควร

5. เนื่องจากมอเตอร์ที่ใช้ในทดลองในโครงงานมีขนาดเล็กทำให้ผลการทดลองที่ได้มีค่าไม่ชัดเจน

มหาวิทยาลัยนเรศวร

เอกสารอ้างอิง

[1] ผศ. ศุภชัย สุรินทร์วงศ์ . **เครื่องกลไฟฟ้า 1 ตอน 2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง** . พิมพ์ครั้งที่ 5 , กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น); 2541

[2] มงคล ทองสงคราม. **เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง** . พิมพ์ครั้งที่ 1 ,กรุงเทพฯ : รามาการพิมพ์; 2538

[3] รศ. ดร. วีระเชษฐ์ ขันเงิน . วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์ . **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง** . พิมพ์ครั้งที่ 1 , กรุงเทพฯ : วี.เจ. พริ้นติ้ง ; 2547

[4] สุระพล เธียรมนตรี. **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง** . สงขลา : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2545

[5] วิชัย ศังขจันทรานนท์. **ควบคุมเครื่องกลไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง 2** . พิมพ์ครั้งที่ 3 , กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น); 2535

[6] สุวิทย์ เจิมสวัสดิพงษ์. **Energy Conversion I**. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2533

[7] Muhammad H. Rashid, Power Electronic Circuits, Devices and Application, 2nd Edition, Prentice – Hall, 1993.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

โปรแกรมควบคุมการทำงานของมอเตอร์

โปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ที่ใช้ในโครงงานนี้

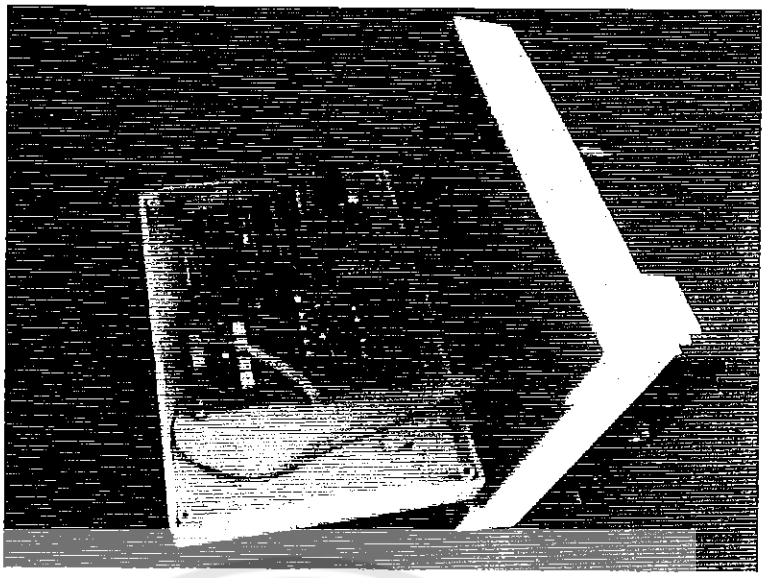
```
DEFINE OSC 4

IN VAR BYTE
i VAR BYTE
j VAR BYTE
dut VAR WORD
duty VAR WORD

INCLUDE "MODEDEFS.BAS"
TRISC = %00000000
PORTC = %00000000

CHECK:  SerIn2 PORTC.7, 84, [IN]
      Select Case IN
        Case "A"
        GoTo Start
        Case "B"
        GoTo Nor
        Case "C"
        GoTo Stp
        Case "D"
        GoTo DU

      End Select
      End

DU:     SerIn2 PORTC.7, 84, [dut]
         duty = dut*2
        GoTo CHECK

Start:  for i =1 to 255
```

```
for j =1 to 150
portb = %00110000
pauseus 200
portb = %00010000
pauseus 0
next j
next i

for i =1 to 9
portb = %00010000
pauseus 200
 next i

for i =1 to 255
for j =1 to 255
portb = %00000001
pauseus duty
portb = %00000000
pauseus 200-duty
next j
next i

portb = %00000000
pauseus 255

GoTo CHECK

Nor:  for i =1 to 255
      for j =1 to 150
      portb = %00110000
      pauseus 200
      portb = %00010000
      pauseus 0
```

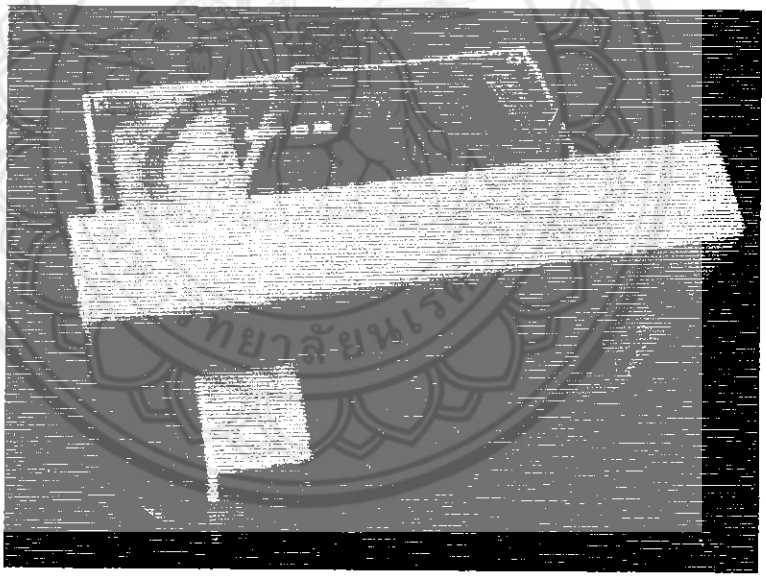
```
        next j
        next i

        for i =1 to 9
        portb = %00010000
        pauseus 200
        next i

        portb = %00000000
        pauseus 255

    GoTo CHECK

Stp:    GoTo CHECK

********** END OF PROGRAM **********
```

มหาวิทยาลัยนเรศวร

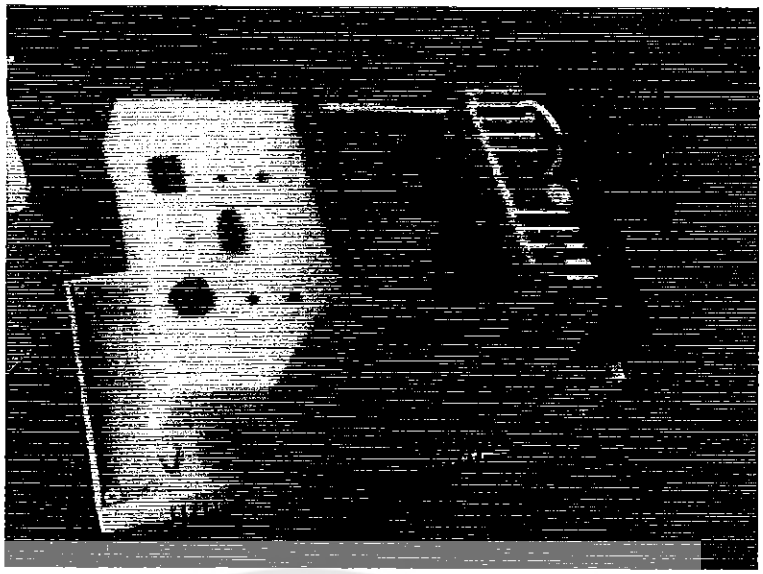
ภาคผนวก ข
วงจรขับมอเตอร์ที่ใช้งานจริง



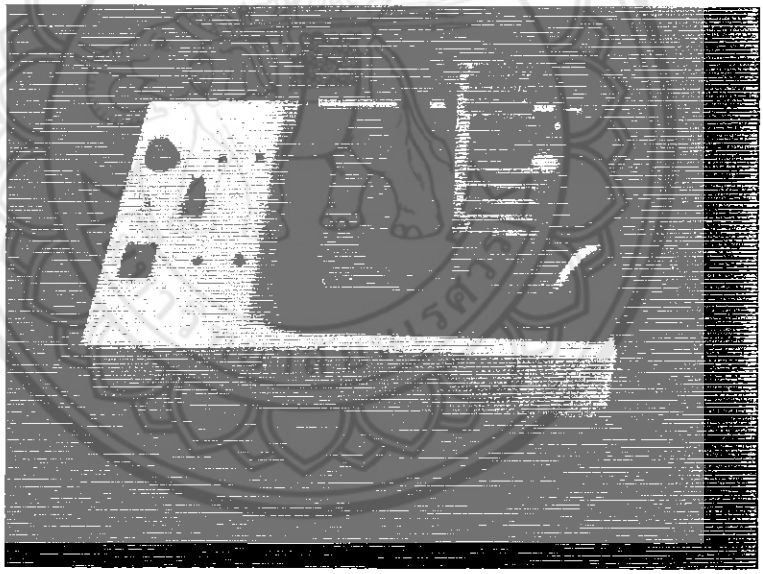
รูปที่ ผ1 วงจรขับและบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่บรรจุลงกล่องแล้ว



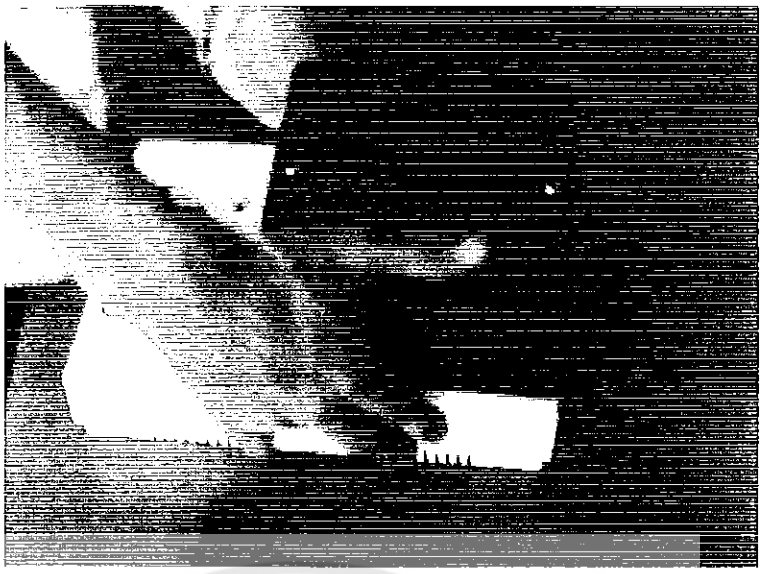
รูปที่ ผ2 วงจรรวมทั้งหมดที่บรรจุลงกล่องแล้ว



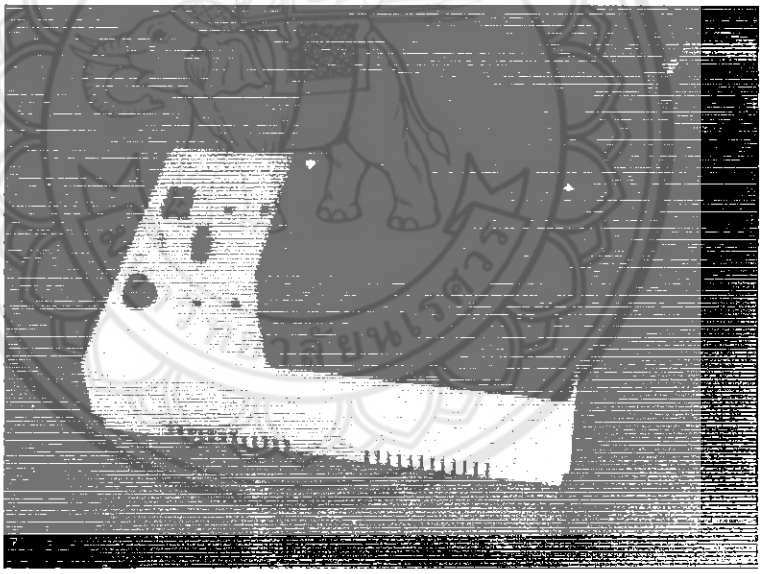
รูปที่ ผ3 การประกอบกล่องเมื่อลงอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว



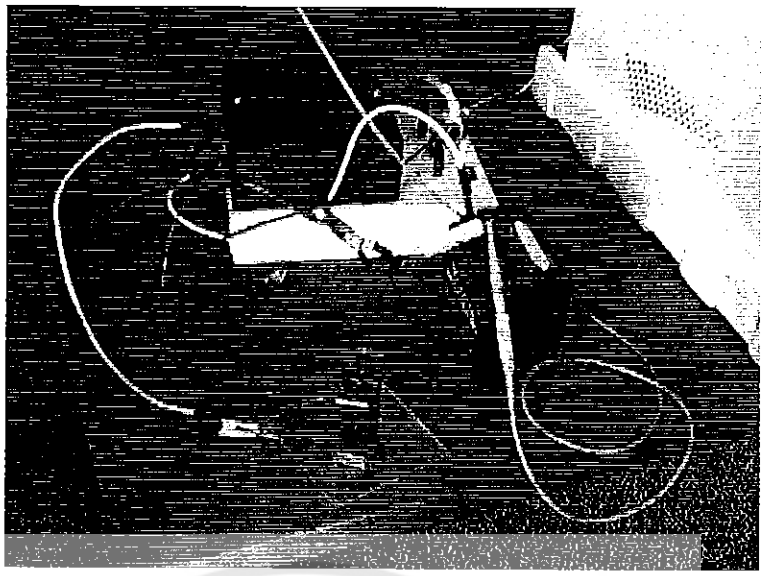
รูปที่ ผ4 การประกอบกล่องเมื่อลงอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว



รูปที่ ผ5 การประกอบกล่องเมื่อลงอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว



รูปที่ ผ6 กล่องที่ประกอบเสร็จเรียบร้อย



รูปที่ ผ7 การต่อวงจรเพื่อทำการทดลอง

รูปที่ ผ8 การใช้สโคปในการบันทึกผลการทดลอง

ประวัติผู้เขียนโครงงาน

ชื่อ นายณรงค์ศักดิ์ บุญคำสว่าง
ภูมิลำเนา 98 หมู่ 15 ต.งิ้วงาม อ.เมือง จ.อุตรดิตถ์
ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนอุตรดิตถ์
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

E-mail : lososities@hotmail.com

ชื่อ นายอภิสิทธิ์ สุวรรณศรี
ภูมิลำเนา 31/2 ม.11 ต.วังแดง อ.ตรอน จ.อุตรดิตถ์
ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนอุตรดิตถ์
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

E-mail : takanaki_2002@hotmail.com

ชื่อ นายเอกพงษ์ ทะลายรัมย์
ภูมิลำเนา 5 หมู่ 7 ต.หนองใหญ่ อ.สตึก จ.บุรีรัมย์
ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนรมย์บุรีพิทยาคม รัชมังคลาภิเษก
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

E-mail : pk_7954@hotmail.com