

ระบบขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่สำหรับมอเตอร์กระแสตรง
ชนิดวงจรถนอมแยกส่วนที่ใช้พลังงานอย่างเหมาะสมที่สุด

นาย ศักดิ์ระวี ระวีกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-533-067-1

**BATTERY DRIVEN DC SEPARATELY- EXCITED MOTOR
WITH ENERGY OPTIMIZATION**

Mr. Sakrawee Raweekul

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2001
ISBN 974-533-067-1**

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ระบบขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่สำหรับมอเตอร์กระแสตรงชนิดวงจรมอเตอร์แยกส่วนที่ใช้พลังงาน
อย่างเหมาะสมที่สุด

BATTERY DRIVEN DC SEPARATELY-EXCITED MOTOR WITH ENERGY
OPTIMIZATION

สภามหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

(รองศาสตราจารย์ น.ท. ดร.สรวิชัย สุจิตจร)

ประธานกรรมการ/กรรมการ

.....

(รองศาสตราจารย์ น.อ. ดร.สมโภชน์ ผิวเหลือง)

กรรมการ

.....

(อาจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

กรรมการ

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

.....

(รองศาสตราจารย์ น.อ. ดร.วราภรณ์ จำพิศ)

คณบดี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศักดิ์ระวี ระวีกุล : ระบบขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่สำหรับมอเตอร์กระแสตรงชนิดวงจรมอเตอร์แยกส่วนที่ใช้พลังงานอย่างเหมาะสมที่สุด

(BATTERY DRIVEN DC SEPARATELY -EXCITED MOTOR WITH ENERGY OPTIMIZATION) อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ. ดร. สราวุฒิ สุจิตจร, 106 หน้า
ISBN 974-533-067-1

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้ดำเนินการพัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดวงจรมอเตอร์แยกส่วนให้มีแหล่งกำเนิดเป็นแบตเตอรี่ตะกั่วกรดในลักษณะของเทคโนโลยีที่เหมาะสมใช้วัสดุอุปกรณ์ที่บำรุงรักษาง่าย แบตเตอรี่ที่ใช้เป็นแบบเดียวกับที่ใช้ในรถยนต์ ในงานนี้ได้ใช้เป็นแหล่งกำเนิดให้กับมอเตอร์ขนาดกำลังไฟฟ้า 1 kW แรงดันพิกัด 220 Vdc มีป้อนน้ำเป็นภาระต่อฟองอยู่ โดยผ่านชุดแปลงผันแรงดันและการป้อนกลับเพื่อให้ได้แรงดันพิกัดตามต้องการเพื่อรักษาอัตราเร็วให้คงที่ นอกจากนั้นการควบคุมมอเตอร์ให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในขณะขับภาระเป็นสิ่งสำคัญในการวิจัยนี้ จึงได้ประยุกต์เทคนิคลดการสูญเสียในมอเตอร์ให้เหลือน้อยที่สุดขณะมอเตอร์ขับภาระ เพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ให้สามารถจ่ายพลังงานได้ยาวนานขึ้น

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

SAKRAWEE RAWEEKUL : BATTERY DRIVEN DC SEPARATELY- EXCITED
MOTOR WITH ENERGY OPTIMIZATION THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF
SARAWUT SUJITJORN, Ph.D. 106 PP. ISBN 974-533-067-1

BATTERY /DC SEPARATELY -EXCITED MOTOR/ ENERGY OPTIMIZATION

This thesis presents the development of a DC separately-excited motor drive with lead-acid battery sources. It aims to achieve an appropriate technology system using commonly found and easy-to-maintain components. Batteries which are the same kind normally used in a car supply power to a motor (1 kW , 220 Vdc ratings) coupled with a pump. The developed drive uses a converter with feedback control to maintain a constant speed of the motor. In addition, this project has been designed to drive the motor at maximum efficiency by using a power loss minimization technique. This approach can efficiently prolong the life cycle of batteries.

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการเสร็จสิ้นตามวัตถุประสงค์ล่วงหน้าด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่างๆที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ในทุกๆด้าน ที่เกิดประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์นี้เป็นอย่างดี ซึ่งผู้วิจัยคงมีอาจจะเลยที่จะกล่าวถึง บุคคล กลุ่มบุคคล และคณะ ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุทธ์ สุจิตจร หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และสละเวลาตรวจสอบการเขียนวิทยานิพนธ์ทำให้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น อันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

รองศาสตราจารย์ ไพบุลย์ ไชยนิล และอาจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำด้านวิชาการ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

รองศาสตราจารย์ น.อ. ดร.สมโภชน์ ผิวเหลือง หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศ ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาเป็นกรรมการสอบ เพื่อประโยชน์และความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์นี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เดชา พวงดาวเรือง เพื่อนๆ และน้องๆ บัณฑิตศึกษา รวมทั้งเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ทั้งด้านวิชาการ กำลังใจ และเครื่องมือ ในการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด

อาจารย์ สิงห์ทอง ปลั่งพงษ์พันธ์ และคณาจารย์ ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น รวมทั้งคณะผู้บริหารสถาบัน ที่ให้คำแนะนำ เสนอแนะ และสนับสนุน ตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษาและวิจัย

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และดูแลส่งเสริมทางการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

ศักดิ์ระวี ระวีกุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ(ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	5
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น.....	5
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	6
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	6
2 แนวคิดการออกแบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดวงจรถูกแยกส่วน	
 จ่ายกำลังด้วยแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด.....	8
2.1 บทนำ.....	8
2.2 แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด.....	8
2.2.1 โครงสร้างและส่วนประกอบ.....	8
2.2.2 ลักษณะสมบัติและแบบจำลองคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่.....	9
2.3 หลักการเปลี่ยนระดับพลังงานของแบตเตอรี่.....	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดวงจรถนอมแยกส่วน.....	17
2.5	หลักการขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงชนิดวงจรถนอมแยกส่วนอย่างเหมาะสมในงานวิจัยนี้.....	20
2.5.1	วงจรถับไฟฟ้า.....	21
2.6	อุปกรณ์จำกัดกระแสของแบตเตอรี่.....	22
2.7	แนวทางการออกแบบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนแรงดันของแบตเตอรี่.....	22
2.8	แนวทางการออกแบบอุปกรณ์ควบคุมความเร็วมอเตอร์.....	25
2.9	สรุป.....	26
3	การออกแบบและทดสอบระบบขับเคลื่อน.....	27
3.1	บทนำ.....	27
3.2	อุปกรณ์คุมค่ากระแส.....	27
3.3	วงจรถับมอเตอร์.....	29
3.4	อุปกรณ์แปลงผันแรงดัน.....	34
3.5	อุปกรณ์ควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์.....	41
3.5.1	อุปกรณ์รักษาและจำกัดแรงดัน.....	42
3.5.2	อุปกรณ์เปรียบเทียบ.....	43
3.5.3	อุปกรณ์ขยายสัญญาณและวงจรถดเซช.....	43
3.5.4	วงจรถับไฟฟ้า.....	45
3.5.5	การทดสอบระบบขับเคลื่อน.....	45
3.6	สรุป.....	46
4	การลดความสูญเสียของมอเตอร์.....	50
4.1	บทนำ.....	50
4.2	แนวทางการลดความสูญเสียของมอเตอร์ในการขับภาระ.....	50
4.3	การหาแบบจำลองควบคุมความสูญเสีย.....	53

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4	การหาค่า k ของสมการแบบจำลองควบคุมความสูญเสีย.....	58
4.5	อุปกรณ์ควบคุมแรงดันและกระแสวงจรสนาม.....	60
4.6	การทดสอบระบบโดยรวมเปรียบเทียบกับผลการจำลอง.....	63
4.7	สรุป.....	66
5	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	67
5.1	สรุป.....	67
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	68
เอกสารอ้างอิง.....		69
ภาคผนวก.....		71
ภาคผนวก ก.	ฟังก์ชันความสูญเสีย.....	71
ภาคผนวก ข.	สมการแสดงสถานะความสูญเสียต่ำสุด.....	76
ภาคผนวก ค.	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ป้อน.....	80
ภาคผนวก ง.	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบโดยรวม.....	83
ภาคผนวก จ.	บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา.....	87
ภาคผนวก ฉ.	รายละเอียดทางเทคนิคของอุปกรณ์คุมค่ากระแสและจับมอสเฟต.....	98
ประวัติผู้เขียน.....		106

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานวงจรรีเลย์.....	58
4.2 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยการลดกระแสวงจรถูกทดสอบ.....	59

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1	การจ่ายกระแสเทียบกับเวลาของแบตเตอรี่ ที่ภาระ 20A.....1
1.2	การจ่ายกระแสของแบตเตอรี่ เมื่อภาระมีความต้องการกระแสแตกต่างกันเทียบกับเวลา.....2
1.3	การนำแบตเตอรี่มาขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง ชนิดวงจรสนามแยกส่วนและชุดควบคุมความเร็วและแรงบิด โดยการปรับวงจรอาร์เมเจอร์ และวงจรสนามที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นโดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้.....4
2.1	แผนภาพบล็อกกระบบควบคุมมอเตอร์ที่มีแหล่งจ่ายพลังงานเป็นแบตเตอรี่.....8
2.2	ส่วนประกอบแบตเตอรี่ขนาด 12V 65Ah ชนิด ตะกั่ว-กรด.....9
2.3	การทำปฏิกิริยาของเซลล์แบตเตอรี่(Nelson and Bolin,1995).....10
2.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ใช้ในการอัดประจุกับเปอร์เซ็นต์ความจุแบตเตอรี่.....11
2.5	ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่เทียบกับแรงดัน.....11
2.6	วงจรสมมูลเทวินินของแบตเตอรี่.....12
2.7	ผลการทดสอบแบตเตอรี่เทียบกับเวลา.....12
2.8	การถดถอยของพลังงานแบตเตอรี่(Rynkiewicz,1999).....13
2.9	การต่อแบตเตอรี่ในงานวิจัยให้ได้แรงดัน 48 V.....14
2.10	องค์ประกอบของระบบแปลงพลังงานแบตเตอรี่ให้เหมาะต่อการขับเคลื่อนมอเตอร์.....14
2.11	วงจรอินเวอร์เตอร์.....15
2.12	จังหวะการทำงานของมอสเฟต Q_1 และ Q_215
2.13	สัญญาณรูปคลื่นแรงดันป้อนภูมิของหม้อแปลง.....16
2.14	หม้อแปลงแกนวงแหวน.....16
2.15	(ก) วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น.....16

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
(ข) ภาพสัญญาณแรงดันที่ได้.....	16
2.16 วงจรกรองสัญญาณแบบผ่านต่ำ.....	17
2.17 ส่วนประกอบภายในของมอเตอร์ไฟฟ้า.....	17
2.18 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดวงจรถนอมแยกส่วน.....	18
2.19 ตำแหน่งของอุปกรณ์ภายในของมอเตอร์ชนิดวงจรถนอมแยกส่วน.....	18
2.20 (ก) เส้นโค้งลักษณะสมบัติอัตราเร็วของมอเตอร์กระแสตรงชนิดวงจรถนอมแยกส่วน....	18
(ข) เส้นโค้งลักษณะสมบัติแรงบิดของมอเตอร์กระแสตรงชนิดวงจรถนอมแยกส่วน....	19
2.21 ความสัมพันธ์ i_a กับ T	20
2.22 แผนภาพแสดงการควบคุมด้านวงจรถนอมและวงจรรีเมเจอร์ด้วยคอนเวอร์เตอร์.....	20
2.23 (ก) แสดงการใช้วงจรสับไฟฟ้าเพื่อปรับเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง ปรับค่าได้.....	21
(ข) รูปคลื่นแรงดันในการสับไฟฟ้า.....	21
2.24 วงจรจำกัดกระแสแบบคาร์ลิงตัน.....	22
2.25 รูปคลื่นการสับไฟฟ้าผ่านเข้าสู่หม้อแปลงเพื่อเปลี่ยนระดับแรงดัน.....	23
2.26 วงจรสับไฟฟ้าแบบ 2 ชุดสลับกันทำงาน.....	23
2.27 การใช้ตัวเก็บประจุต่อขนาน เพื่อให้สัญญาณมีความต่อเนื่อง.....	24
2.28 แผนภาพแสดงแนวคิดการควบคุมวงจรสับไฟฟ้าแบบป้อนกลับ.....	25
3.1 อุปกรณ์คุมค่ากระแส.....	28
3.2 แผนภูมิวงจรขนวนอินเวอร์เตอร์.....	29
3.3 วงจรกำเนิดสัญญาณมัลติไวเบรเตอร์.....	30
3.4 วงจรนับ.....	31
3.5 วงจรหารความถี่.....	32
3.6 วงจรขยายแบบกลับขั้วสัญญาณ.....	32

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.7	สัญญาณที่ได้จากวงจรขับมอสเฟต.....33
3.8	วงจรแปลงผันแรงดันกระแสตรงให้เป็นกระแสสลับด้วยมอสเฟต.....35
3.9	สัญญาณแรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลง.....38
3.10	วงจรกรองสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับและวงจรสมมูลของตัวเก็บประจุ.....38
3.11	วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นปรับเรียบสัญญาณด้วย C_c40
3.12	สัญญาณที่ได้จากการปรับเรียบสัญญาณด้วย C_c41
3.13	อุปกรณ์ควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์.....41
3.14	รูปสัญญาณเอาต์พุตที่เป็นอัตราเร็วจากการทดสอบ.....45
3.15	สัญญาณที่ได้จากการสับไฟฟ้าของชอปเปอร์.....46
3.16	แผนภาพวงจรระบบขับเคลื่อน.....48
3.17	แผนภาพวงจรระบบขับเคลื่อนพร้อมอุปกรณ์ประกอบ.....49
4.1	การควบคุม แบบสองทางเลือก คือ LMC และ SC.....50
4.2	วิธีการ LMC ที่ใช้ตัวกรอง $G_{opt}(s)$51
4.3	เปรียบเทียบระหว่างกำลังเฉลี่ยที่ใช้ในการขับภาระ กับกระแสที่ใช้ในการกระตุ้น ขดสนาม ที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที ของมอเตอร์ขนาด 1 กิโลวัตต์52
4.4	ผลการทดสอบปรับค่ากระแสสนาม เปรียบเทียบ กับ P_{in}60
4.5	วงจรควบคุมแรงดันและกระแสวงจรถูกสนาม.....60
4.6	ผลการทดสอบแบบขั้นบันไดของมอเตอร์เปรียบเทียบกับผลการจำลองผลตอบสนอง ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....63
4.7	เส้นทางเดินราคาของแบบจำลองมอเตอร์ฟลันต์.....63
4.8	การทดสอบระบบโดยรวม.....65
4.9	ผลการทดสอบระบบโดยรวมเปรียบเทียบกับผลการจำลองผล.....65
4.10	เส้นทางเดินราคาของระบบโดยรวม.....66

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ค.1	ผลการทดสอบมอเตอร์ปั๊มเทียบกับการจำลองผลด้วยแบบจำลอง.....	81
ง.1	การจำลองผลตอบสนองแบบขั้นบันได.....	84
ง.2	แผนภาพบล็อกของมอเตอร์ปั๊มในงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	85
ง.3	ผลตอบสนองการจำลองผลระบบโดยรวม.....	86
ง.4	แผนภาพบล็อกระบบ โดยรวมที่ใช้ในการจำลองผล.....	86

คำอธิบายสัญลักษณ์

B	คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (T)
C	คือ ความจุของตัวเก็บประจุ (μF)
G	คือ อัตราขยาย
I	คือ กระแสที่ไหลในแบตเตอรี่ขณะดิสชาร์จ (A)
N	คือ ความเร็วของมอเตอร์ (rpm)
L	คือ ความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก (H)
P	คือ จำนวนคู่ขั้ว
T	คือ คาบเวลา (ms)
V	คือ ปริมาตรโรเตอร์ (m^3)
A_c	คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนทอโรยด์ (cm^2)
C_b	คือ ความจุของแบตเตอรี่ (Ah)
G_{opt} (s)	คือ ตัวกรองสัญญาณแบบผ่านต่ำ
I_p	คือ ค่ากระแสสูงสุด(A)
I_{ZD1}	คือ กระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอด (A)
K_T	คือ ค่าคงที่ของแรงบิด
N_p	คือ จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ (รอบ)
N_s	คือ จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ (รอบ)
P_{Fe}	คือ กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (W)
P_l	คือ ความสูญเสียทั้งหมด (W)
P_m	คือ ความสูญเสียทางกล (W)
P_{max}	คือ ค่ากำลังสูงสุด (W)
P_R	คือ กำลังสูญเสียในความต้านทาน (W)
P_S	คือ ความสูญเสียปลั๊กย่อย (W)
$P_{[1/50]}$	คือ ความสูญเสียต่อหนึ่งหน่วยมวล เมื่อความเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก 1T และความถี่ 50 Hz
R_a	คือ ความต้านทานขดลวดวงจรรอาร์เมเจอร์ (Ω)

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

R_f	คือ ความต้านทานขดลวดวงจรสนาม (Ω)
R_{rst}	คือ ความต้านทานปรับค่าได้ (Ω)
T_C	คือ ค่าคงตัวทางเวลา (ms)
V_0	คือ แรงดันเริ่มต้นของแบตเตอรี่ (V)
V_a	คือ แรงดันวงจรอาร์เมเจอร์ (V)
V_{BE}	คือ แรงดันที่ตกคร่อม ขา B และ ขา E ของทรานซิสเตอร์ (V)
V_b	คือ แรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ขณะคายประจุ (V)
V_f	คือ แรงดันวงจรสนาม (V)
V_1	คือ ค่าแรงดันขอดที่ออกจากหม้อแปลง (V)
V_{out}	คือ แรงดันเอาต์พุต (V)
V_{R_1}	คือ แรงดันตกคร่อมความต้านทาน R_1 (V)
V_r	คือ ระดับแรงดันกระชาก (V)
V_S	คือ แรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลงทางด้านทุติยภูมิ (V)
V_t	คือ แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ (V)
V_{ZD1}	คือ แรงดันตกคร่อมซีเนอร์ไดโอด (V)
Z_1, Z_2	คือ อิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ชดเชย (Ω)
k	คือ ค่าคงที่ของสมการควบคุมความสูญเสีย
m	คือ มวลแกนเหล็กโรเตอร์ (kg.)
n	คือ ค่าเอกซ์โพเนนเชียลของ Peukert (โดยปกติขณะดิสชาร์จ จะให้มีค่าระหว่าง 1.05 ถึง 2)
r	คือ รัศมีโรเตอร์ (m)
t	คือ เวลาที่ใช้ในการดิสชาร์จแบตเตอรี่ (h)
dI	คือ ค่ากระแสเฉลี่ย (A)
h_{FE}	คือ อัตราขยายของทรานซิสเตอร์
i_a	คือ กระแสวงจรรอาร์เมเจอร์ (A)
i_f	คือ กระแสวงจรรสนาม (A)
k_2	คือ ค่าคงที่ความต้านทานประสิทธิผล (Ω)
k_3	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในสมการของ Peukert

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

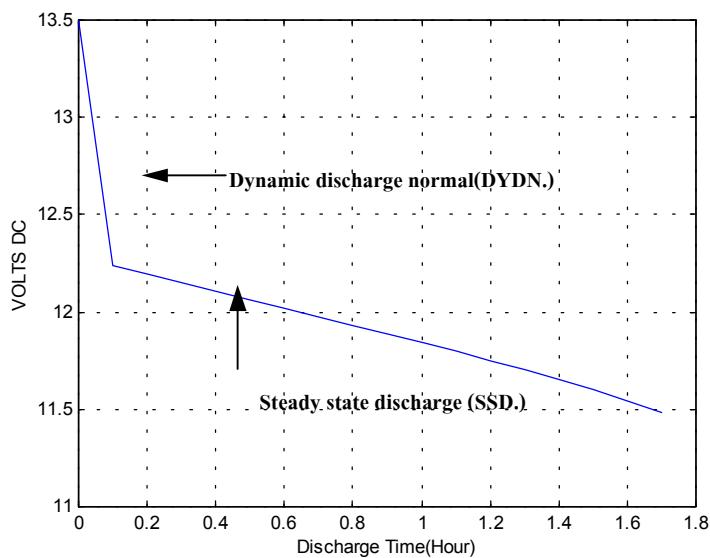
k_4	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำให้แรงดันตกกระทันหันเมื่อแบตเตอรี่ดิสชาร์จใกล้หมด
k_φ	คือ ค่าคงที่เส้นแรงแม่เหล็ก
t_{on}	คือ ช่วงเวลานำกระแส (ms)
t_{off}	คือ ช่วงเวลาหยุดนำกระแส (ms)
$t_{on(min)}$	คือ ช่วงเวลาที่มอเตอร์เริ่มนำกระแสจนถึงช่วงกระแสสูงสุด (ms)
ω	คือ อัตราเร็วเชิงมุม (rad/s)
α	คือ ค่าคงที่สนามแม่เหล็กวงจรสนาม
δ	คือ พื้นที่ผิวขั้วสเตเตอร์ (m^2)
λ	คือ พื้นที่ผิวส่วนข้างของโรเตอร์ (m^2)
ℓ	คือ ความยาวของโรเตอร์ (m)
σ_f	คือ สัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน
σ_h	คือ สัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์รีซิส
φ	คือ เส้นแรงแม่เหล็ก (Wb)
τ	คือ แรงบิด (N.m)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะใช้งานง่าย ทนทาน และดูแลรักษาง่าย แต่การใช้งานมักต้องการแหล่งจ่ายพลังงานที่ค่อนข้างคงที่และเสถียร แต่ในภูมิภาคที่ห่างไกลไม่มีระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้า จำเป็นต้องหาพลังงานรูปแบบอื่นมาทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ การใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ยังคงต้องการแบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์แหล่งจ่ายสำรองในระบบที่มีความน่าเชื่อถือ ที่ช่วยให้ระบบพลังงานแสงอาทิตย์มีโอกาสล้มเหลวต่ำ

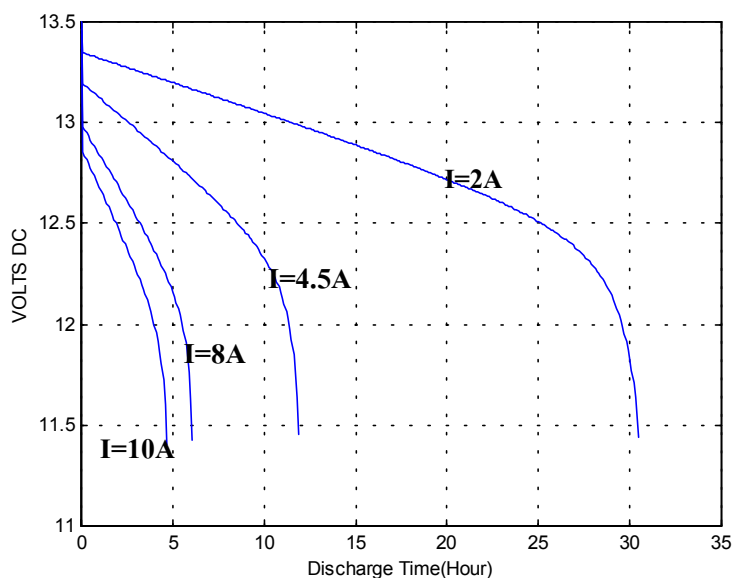


ภาพที่ 1.1 การจ่ายกระแสเทียบกับเวลาของแบตเตอรี่ ที่กระแส 20A

การใช้งานระบบพลังงานแสงอาทิตย์จ่ายป้อนพลังงานไฟฟ้าให้แก่มอเตอร์ มีบางโอกาสที่มอเตอร์จะต่อตรงเข้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แต่ในบางช่วงเวลา พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนแก่มอเตอร์ได้มาจากแบตเตอรี่ส่วนๆ เพราะแสงอาทิตย์ไม่มีความเข้มเพียงพอหรือเป็นช่วงเวลากลางคืน งานวิจัยและพัฒนาของวิทยานิพนธ์นี้ จึงให้ความสนใจไปที่การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงขนาด 1 kW ด้วยแบตเตอรี่ว่าจะทำอย่างไรได้บ้างเพื่อให้การใช้พลังงานเป็นไปอย่างเหมาะสมที่สุด โดย

มุ่งประเด็นไปที่ความพยายามลดการสูญเสียในมอเตอร์ พยายามยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ด้วยเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นอย่างเหมาะสมกับสังคมชนบทไทย โดยพิจารณาถึงข้อเท็จจริงด้านลักษณะสมบัติที่สมจริงของแบตเตอรี่และมอเตอร์ ภาพที่ 1.1 แสดงลักษณะสมบัติของแบตเตอรี่ เมื่อเริ่มจ่ายกระแสให้แก่ภาระ (Protogeropoulos, Marshall, and Brinkworth, 1994) จะมีการลดลงของแรงดันอย่างรวดเร็วในช่วงแรก อันเนื่องมาจากความสูญเสียภายในของแบตเตอรี่จนเข้าสู่สภาวะคงตัว (Salameh, Cahacca, and Lynch, 1992) แล้วแรงดันจึงค่อยๆ ลดลงตามการดิ่งกระแสปกติของภาระ หากภาระมีความต้องการกระแสสูง ระยะเวลาในการจ่ายพลังงานของแบตเตอรี่ จะสั้นลงตามความสัมพันธ์ดังนี้ (Rynkiewicz, 1999)

$$V_{(b)} = V_0 - (K_2 \times I) - (K_3 \times \frac{I^n}{C}) \times t - (\frac{K_4}{C \times I^n} t) \quad (1-1)$$



ภาพที่ 1.2 การจ่ายกระแสของแบตเตอรี่ เมื่อภาระมีความต้องการกระแสแตกต่างกันเทียบกับเวลา

จากภาพที่ 1.2 จะเห็นว่าเมื่อมีการจ่ายภาระที่ระดับกระแสคงที่ต่าง ๆ กัน แบตเตอรี่จะมีความสามารถจ่ายกระแสได้ในระยะเวลาที่ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับว่าภาระดึงกระแสมากหรือน้อย ในกราฟช่วงเวลาที่ใกล้ศูนย์จะมีการตกลงของแรงดันอย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากการสูญเสียภายในของแบตเตอรี่ และภาระที่ต่ออยู่ดึงกระแสอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นกราฟจะมีความชันที่น้อยกว่าค่านั้นแรงดันจะค่อยๆ ลดลงตามระดับของพลังงานที่คงเหลือในแบตเตอรี่ และความชันของเส้นกราฟจะมากขึ้น

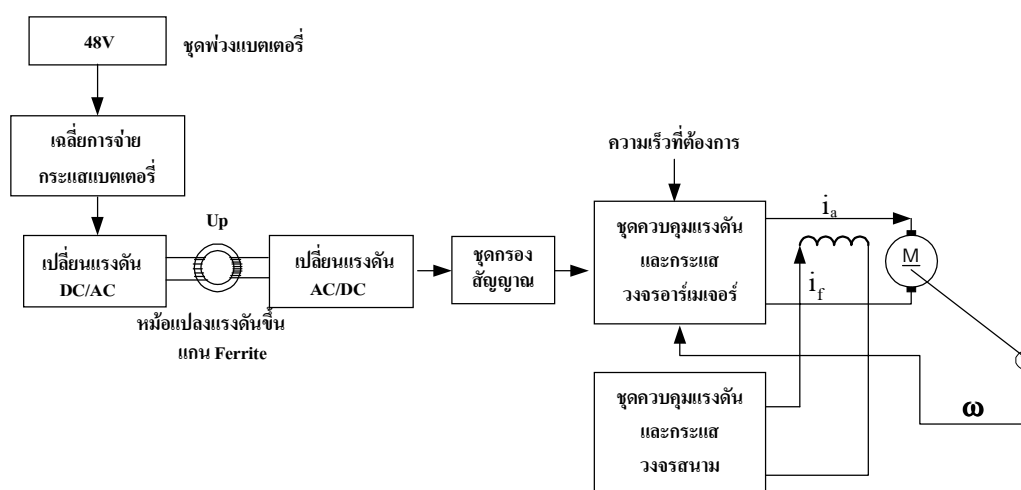
จนเกือบเท่าช่วงที่เริ่มจ่ายภาระ ดังนั้นจึงต้องเลือกช่วงการใช้งานของแบตเตอรี่ในระยะก่อนที่กราฟลักษณะสมบัติจะเกิดการโค้งงอคล้ายการหักมุม

เมื่อต้องการขนาดของแรงดันที่สามารถจ่ายภาระได้ จำเป็นต้องนำแบตเตอรี่ต่อพ่วงกัน 4 ลูก ให้ได้แรงดัน 48 Vdc (กำหนดขึ้นโดยสอดคล้องกับการออกแบบในระยะต่อไปของระบบ) ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ เมื่อแบตเตอรี่ลูกใดลูกหนึ่ง มีกำลังที่จะจ่ายพลังงานได้น้อยกว่าชุดอื่น จะทำให้เกิดการดึงกระแสที่ไม่เท่ากัน (Nelson, and Bolin, 1995) และกลายเป็นภาระของระบบ ดังนั้นจึงต้องมี การเฉลี่ยหรือจำกัดการจ่ายกระแส โดยอาศัยลักษณะสมบัติวงจรคุมค่ากระแส (current regulator) มาจำกัดการจ่ายกระแสของแบตเตอรี่แต่ละชุด ให้มีความใกล้เคียงกันและจะเป็นอุปกรณ์หนึ่ง ที่พัฒนาขึ้น

มอเตอร์ที่ใช้ในการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เป็นแบบกระแสตรงชนิดวงจรถนอมแยกส่วน การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ จะอาศัยการควบคุมแรงดันของแหล่งจ่ายให้คงที่ทั้งทางด้านวงจรอาร์มเจอร์และวงจรถนอม แต่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่าย จากลักษณะสมบัติของแบตเตอรี่ที่มีแรงดันถดถอยลงเรื่อย ๆ ตามสถานะการจ่ายกระแสดังแสดงในภาพที่ 1.2 ด้วยเหตุผลและปัญหานี้การขับเคลื่อนมอเตอร์ให้มีความเร็วตามต้องการ จะต้องพิจารณาควบคุมให้เหมาะสมกับช่วงการเปลี่ยนแปลงแรงดัน การควบคุมความเร็วของมอเตอร์อาจทำได้โดยการควบคุมแรงดันที่อาร์มเจอร์และกระแสที่ขดสนาม การควบคุมมีสองลักษณะ (Avitan, and Skormin, 1990) ซึ่งประกอบไปด้วยการควบคุมกระแสที่วงจรถนอมให้คงที่แล้วทำการปรับแรงดันที่วงจรรอาร์มเจอร์ และการควบคุมที่ให้แรงดันทางอาร์มเจอร์คงที่และปรับกระแสวงจรถนอม แต่จากการศึกษาโดย (Yao, and Ramshaw, 1995) พบว่า กรณีแหล่งจ่ายที่เป็นแบตเตอรี่จะมีแรงดันลดลงตามลำดับ จึงต้องควบคุมทั้งด้านอาร์มเจอร์และวงจรถนอม โดยการควบคุมนั้นจะต้องอาศัยการควบคุมแบบผลตอบสนองทันทีทันใด (real-time) เทคโนโลยีการควบคุมสามารถใช้แบบแอนะล็อกหรือดิจิทัลก็ได้ แต่การวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เน้นไปในการใช้อุปกรณ์ที่มีความคงทนเหมาะสมต่อการใช้ในพื้นที่เขตร้อนชื้น จึงเลือกแนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีแอนะล็อกที่อาจใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ หรืออื่นๆที่เหมาะสม

แรงดันที่ได้จากอุปกรณ์แปลงผันแรงดันจะมีระดับที่สูงกว่าพิคคของมอเตอร์และจะค่อยๆ ถดถอยลงตามลักษณะสมบัติของแบตเตอรี่ ดังนั้นจึงต้องมีอุปกรณ์ที่ให้การคุมค่าแรงดันที่จ่ายให้แก่ วงจรรอาร์มเจอร์ในระดับที่ทำให้การขับภาระเกิดความสูญเสียต่ำ และต้องควบคุมกระแสที่วงจรถนอมให้สอดคล้องกับการควบคุมกระแสที่วงจรรอาร์มเจอร์ จึงต้องหาความสัมพันธ์ของการปรับแรงดันและกระแสในวงจรทั้งสอง โดยใช้ตัวควบคุมแยกควบคุมทั้งสองด้านให้สอดคล้องกับการลดกำลังสูญเสียให้เหลือน้อยที่สุด (loss minimization) และการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ตาม

ต้องการ โครงสร้างของระบบที่พัฒนาขึ้นแสดงไว้ในภาพที่ 1.3 จะใช้การวัดความเร็วของมอเตอร์ มาเป็นสัญญาณป้อนกลับ เพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ต้องการเข้าสู่ชุดควบคุมที่มีลักษณะการควบคุมเป็นแบบแอนะล็อก พิจารณาภาพที่ 1.3 จะเห็นว่าระบบที่ต้องการพัฒนาขึ้นนี้มีองค์ประกอบ



ภาพที่ 1.3 แผนภาพแทนระบบที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นของงานวิทยานิพนธ์นี้

หลายส่วนด้วยกันกล่าวคือแหล่งจ่ายเป็นชุดพ่วงแบตเตอรี่ แบตเตอรี่เป็นชนิดตะกั่วกรดที่มีใช้กันอยู่ทั่วไปในรถยนต์ปัจจุบัน เป็นอุปกรณ์ที่หาง่ายราคาถูก แบตเตอรี่แต่ละลูกมีการเก็บประจุไม่เท่ากันอันเนื่องมาจากลักษณะสมบัติของแบตเตอรี่ เมื่อนำมาต่อพ่วงกันเป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้แก่ภาระ จึงต้องมีอุปกรณ์เฉลี่ยกระแสหรือเฉลี่ยประจุของแบตเตอรี่กระจายการดึงกระแสในแบตเตอรี่แต่ละลูกให้มีระดับใกล้เคียงกัน แบตเตอรี่ในการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้จำนวน 4 ลูกต่ออนุกรมเพื่อสร้างแรงดัน 48 Vdc ดังนั้นจะต้องมีชุดแปลงผันแรงดันขึ้นเพื่อให้ได้ขนาดแรงดันที่มอเตอร์ต้องการ โดยใช้หม้อแปลงชนิดที่เป็นแกนเหล็กความสูญเสียต่ำหรือแกนเฟอร์ไรท์ (ferrite) เป็นอุปกรณ์แปลงแรงดันขึ้น สัญญาณที่ได้ออกมาจากชุดแปลงผันแรงดันจะไม่เรียบจึงต้องใช้วงจรกรองสัญญาณในการปรับเรียบก่อนป้อนให้กับชุดควบคุมมอเตอร์

ชุดควบคุมแรงดันและกระแสอาร์เมเจอร์ ใช้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ชุดควบคุมแรงดันและกระแสวงจรถสนามจะทำงานสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของอาร์เมเจอร์ เพื่อรักษาระดับความเร็วและแรงบิดให้ได้ตามที่ต้องการ โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็ก ด้วยการปรับกระแสสนาม

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อพัฒนาระบบขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดวงจรถนอมแยกส่วน ที่เหมาะสมต่อการใช้งานในประเทศไทย และมีวัตถุประสงค์ย่อยในการพัฒนาเทคโนโลยีดังต่อไปนี้

1. พัฒนาอุปกรณ์เฉลี่ยกระแสแบตเตอรี่ โดยใช้วงจรจำกัดกระแส
2. พัฒนาอุปกรณ์แปลงผันแรงดันจากแบตเตอรี่เพื่อจ่ายให้กับชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยใช้ตัวแปลงผันแรงดัน เปลี่ยนแรงดันกระแสตรงเป็นแรงดันกระแสสลับ จ่ายให้กับหม้อแปลงแรงดันขึ้น ที่มีแกนทำด้วยวัสดุเฟอร์ไรท์แล้วแปลงแรงดันกลับเป็นกระแสตรงจ่ายให้มอเตอร์
3. พัฒนาอุปกรณ์ปรับแรงดันอาร์มเจอร์และกระแสสนาม เพื่อควบคุมสมรรถนะมอเตอร์
4. ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอหรือที่มีลักษณะสมบัติคล้ายคลึงกัน ควบคุมแรงดันอาร์มเจอร์และกระแสวงจรถนอม เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

การออกแบบและการพัฒนาระบบขับเคลื่อน ที่จะขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงชนิดวงจรถนอมแยกส่วนขนาด 1 กิโลวัตต์ อาศัยเทคโนโลยีที่คงทนต่อสภาวะอากาศ ฝุ่นละอองและความชื้นได้ดี และเหมาะกับการนำไปใช้ในพื้นที่ห่างไกล เช่นในพื้นที่ชนบทของประเทศไทย

ข้อตกลงย่อยเบื้องต้นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

1. แบตเตอรี่ขนาด 12 Vdc ที่ใช้ในระบบขับเคลื่อน เป็นชนิดที่มีใช้ทั่วไปในรถยนต์และหาซื้อได้ง่าย
2. มอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อน เป็นแบบกระแสตรงชนิดวงจรถนอมแยกส่วนขนาด 1 กิโลวัตต์ แรงดันพิกัด 220 โวลต์
3. การควบคุมมอเตอร์จะใช้หลักการผสมผสาน ทั้งการควบคุมอาร์มเจอร์และความเข้มสนาม
4. ภาระที่มอเตอร์ขับเคลื่อนจะเป็นปั้มน้ำชนิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางน้ำออกด้านบน

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. เทคโนโลยีที่ใช้ในการขับเคลื่อนจะได้รับการพัฒนาขึ้น ให้ใช้กับสภาพภูมิประเทศที่ห่างไกล มีความทนทาน ต้องการการบำรุงรักษาต่ำ ทนต่อสภาวะอากาศที่ร้อนได้และราคาไม่สูง และพิจารณาว่าแบตเตอรี่จ่ายแรงดันในสภาวะคงตัว

2. อุปกรณ์ในงานวิจัยนี้จะได้รับการพัฒนาขึ้นจากแนวทางและผลการวิจัยที่เคยปรากฏมาก่อนแล้วให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสม
3. การวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาความสูญเสียที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ หากความสัมพันธ์ในการควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ ให้สอดคล้องกับการลดกำลังสูญเสียให้เหลือน้อยที่สุดโดยใช้ตัวควบคุมที่มีลักษณะการควบคุมแบบแอนะล็อก แยกควบคุมแรงดันอาร์มาเจอร์และกระแสวงจรสนาม
4. การพัฒนาทางวิศวกรรมจะนำป้อนนำชนิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ซึ่งมีลักษณะสมบัติแรงบิดคงที่เมื่ออัตราเร็วคงที่ มาต่อร่วมกับมอเตอร์เป็นการขับเคลื่อนของระบบ ในการนำไปประยุกต์ใช้งานตามวัตถุประสงค์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ดำเนินการวิเคราะห์การขับเคลื่อนมอเตอร์ ใช้เบดเตอร์ขับโดยตรง นำผลมาเปรียบเทียบกับวิเคราะห์การขับเคลื่อน ที่ได้รับการปรับปรุงและควบคุมความสูญเสียของมอเตอร์อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันแหล่งจ่าย
2. ทดสอบมอเตอร์ด้วยวิธีทดสอบแบบขั้นบันไดชั่วคราว (step transient test) เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์
3. ออกแบบสร้างอุปกรณ์และทดสอบในลักษณะที่เป็นระบบอย่างสมบูรณ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ระบบต้นแบบของการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดวงจรสนามแยกส่วนด้วยเบดเตอร์ตะกั่วกรด ที่เหมาะสมต่อการใช้งานในประเทศไทยและพื้นที่ชนบท
2. ระบบขับเคลื่อนที่พัฒนาขึ้น สามารถนำไปใช้เป็นส่วนหนึ่งของการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ได้
3. สามารถนำเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในบริเวณที่ห่างไกล สภาพภูมิประเทศทุรกันดาร

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท และ 6 ภาคผนวก

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความสำคัญของปัญหาวัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้นขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงานและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำ

เนื้อหาพอสั่งเขปที่เป็นองค์ประกอบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงแนวคิดของการออกแบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิด วงจรสนามแยกส่วนที่มีแหล่งจ่ายกำลังเป็นแบตเตอรี่ตะกั่วกรด โดยจะกล่าวถึงลักษณะสมบัติต่างๆ ของแบตเตอรี่ตะกั่วกรด หลักการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และแนวคิดการออกแบบ อุปกรณ์ควบคุมการขับเคลื่อน เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ในการขับ ภาระตามต้องการ

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบและทดสอบระบบขับเคลื่อน รวมทั้งอธิบายการทำงานพร้อม ทั้งแสดงผลการทดสอบระบบขับเคลื่อน

บทที่ 4 กล่าวถึงการลดความสูญเสียของมอเตอร์ในการขับภาระด้วยวิธีแบบจำลองควบคุม ความสูญเสีย รวมทั้งอธิบายการหาค่าองค์ประกอบของแบบจำลองควบคุมความสูญเสีย เพื่อนำมา ควบคุมการจ่ายพลังงานให้แก่จอร์เมเจอร์และวงจรถูกทำให้เกิดความสูญเสียต่ำที่สุด พร้อมทั้ง กล่าวถึงการออกแบบอุปกรณ์ควบคุมแรงดันและกระแสวงจรถูก และการทดสอบระบบ

บทที่ 5 เป็นการสรุปและให้ข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก. ฟังก์ชันความสูญเสีย

ภาคผนวก ข. สมการแสดงสถานะความสูญเสียต่ำสุด

ภาคผนวก ค. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์บีเอ็ม

ภาคผนวก ง. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบโดยรวม

ภาคผนวก จ. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

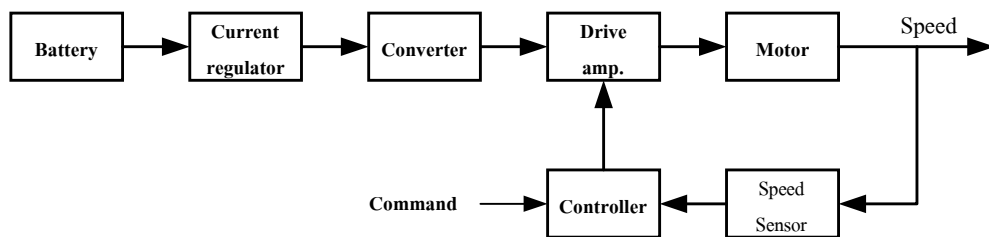
ภาคผนวก ฉ. รายละเอียดทางเทคนิคของอุปกรณ์คุมค่ากระแสและขับมอสเฟต

บทที่ 2

แนวคิดการออกแบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงชนิด วงจรสนามแยกส่วนจ่ายกำลังด้วยแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

2.1 บทนำ

ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงชนิดวงจรสนามแยกส่วน ใช้พลังงานขับเคลื่อนจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด โดยแปลงผันพลังงานจากแบตเตอรี่ที่ให้แรงดัน 48 Vdc เป็น 220 Vdc ตามพิกัดของมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ มีส่วนประกอบที่สำคัญ ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ประกอบด้วย ชุดแบตเตอรี่ขนาด 48 Vdc อุปกรณ์จำกัดกระแส (current regulator) อุปกรณ์แปลงผันแรงดัน (converter) ตัวขับ (drive amplifier) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เช่น เซอร์โวมอเตอร์ความเร็ว (speed sensor) และ ตัวควบคุม (controller)



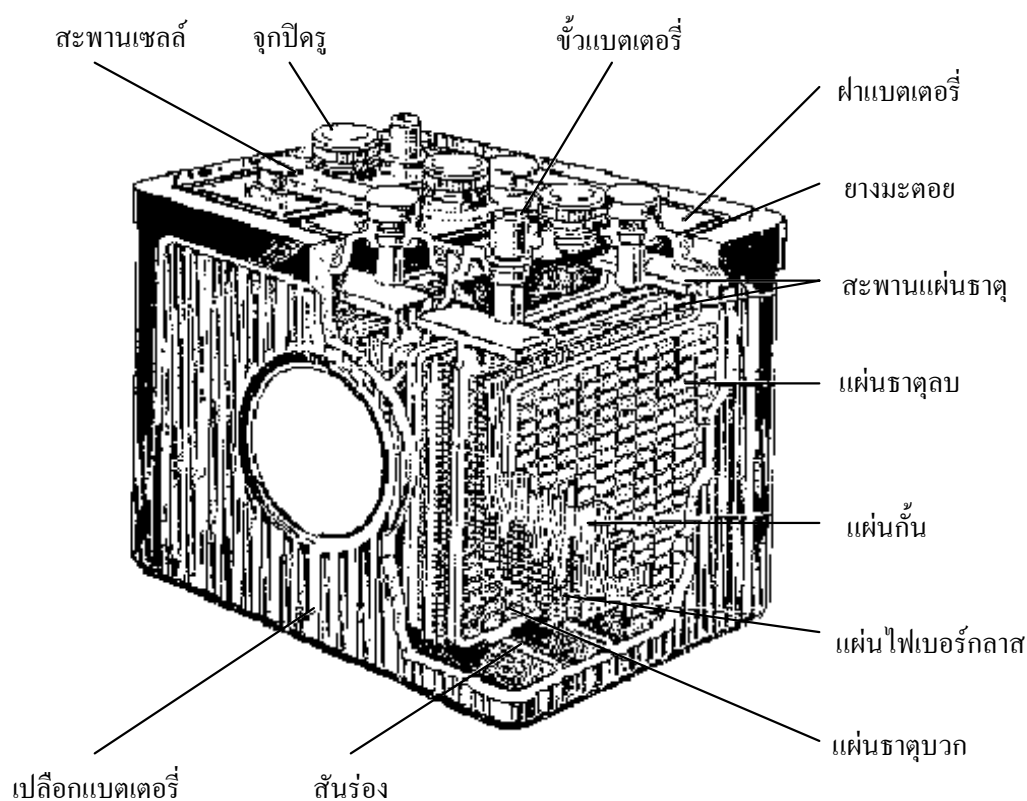
ภาพที่ 2.1 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมมอเตอร์ที่มีแหล่งจ่ายพลังงานเป็นแบตเตอรี่

อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนแรงดันจะเปลี่ยนแรงดันของแบตเตอรี่ 48 Vdc ให้เป็น 220 Vdc เพื่อจ่ายให้มอเตอร์ ตัวควบคุมจะทำหน้าที่สร้างสัญญาณบังคับอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนแรงดัน เพื่อให้มอเตอร์ตอบสนองตามสัญญาณอ้างอิง โดยเซ็นเซอร์วัดความเร็วจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณที่วัดได้จากความเร็วเป็นเอาต์พุตของมอเตอร์มายังตัวควบคุม ซึ่งภายในอุปกรณ์ควบคุมนั้นจะมีส่วนของการเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้รับเข้ามา กับสัญญาณที่ปรับตั้งไว้เพื่อตรวจสอบผลการตอบสนองให้ เป็นไปตามที่ต้องการ โดยอุปกรณ์ทั้งหมดจะเป็นแบบแอนะล็อกซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวถึงแนวคิดการออกแบบอุปกรณ์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นในบทนี้

2.2 แบตเตอรี่ตะกั่วกรด

2.2.1 โครงสร้างและส่วนประกอบ

แบตเตอรี่ตะกั่วกรดมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 2.2 ประกอบด้วย น้ำกรด แผ่นธาตุบวก และแผ่นธาตุลบ แผ่นธาตุทำมาจากผงตะกั่วบริสุทธิ์อัดแน่นในแผ่นตะแกรงตะกั่ว จึงเรียกว่า แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (lead – acid battery) ภายในแบตเตอรี่แยกออกเป็นช่องหลายๆช่องเรียกว่า เซลล์ โดยแต่ละเซลล์ให้แรงดัน 2 Vdc แบตเตอรี่ที่ใช้มีจำนวน 6 เซลล์ 12 Vdc ความจุ 6 Ah แต่ละเซลล์มีชุดแผ่นธาตุแช่อยู่ในกรดกำมะถัน (SO_4) เจือจาง ชุดแผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบจะวางเรียงสลับกัน คั่นเอาไว้ด้วยแผ่นกั้นและแผ่นไฟเบอร์กลาส การรวมกลุ่มของแผ่นธาตุ



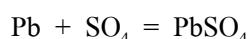
ภาพที่ 2.2 ส่วนประกอบแบตเตอรี่ขนาด 12V 65Ah ชนิด ตะกั่ว-กรด

ด้วยวิธีนี้ทำให้ได้พื้นที่สัมผัสน้ำกรดมากขึ้น สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้มาก ทำให้แบตเตอรี่มีความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นนั่นเอง น้ำกรดในแบตเตอรี่คือสารละลายของกรดกำมะถันเจือจางกับน้ำกลั่น มีค่าความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสประมาณ 1.260 หรือ 1.280 จะมีน้ำกลั่น 65 เปอร์เซ็นต์ และกรดกำมะถัน 35 เปอร์เซ็นต์

2.2.2 ลักษณะสมบัติและแบบจำลองคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ (Nelson and Bolin,1995)

การจ่ายพลังงานของแบตเตอรี่อาศัยการทำปฏิกิริยาภายใน ระหว่างแผ่นธาตุกับน้ำกรด เพราะวัตถุทั้งสองไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งมีตะกั่วเปอร์ออกไซด์เป็นรูปของตะกั่ว 1 อะตอม และออกซิเจน 2 อะตอม กรดกำมะถันมีไฮโดรเจน 2 อะตอม กำมะถัน 1 อะตอม และออกซิเจนอีก 4 อะตอม เขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้

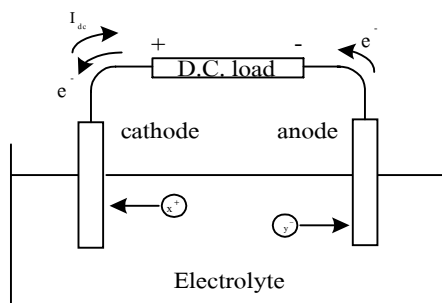
ปฏิกิริยาที่แผ่นธาตุลบ



ปฏิกิริยาที่แผ่นธาตุบวก



จากสมการเคมีทั้งสองจะเห็นว่าแผ่นธาตุบวกจะกลายเป็นตะกั่วซัลเฟต แผ่นธาตุลบก็จะกลายเป็นตะกั่วซัลเฟตเช่นเดียวกัน หลังการทำปฏิกิริยาน้ำกรดจะค่อย ๆ เจือจางลง เพราะโมเลกุลของกรดกำมะถันแยกออกเป็น H_2 และ SO_4 นั่นคือ SO_4 ส่วนหนึ่งไปรวมกับ Pb ในแผ่นบวก โดยไปแทนที่ O_2 ปฏิกิริยานี้ทำให้ O_2 จำนวน 2 อะตอม เป็นอิสระจากแผ่นธาตุบวกรวมกับ H_2 ที่เกิดจาก SO_4 รวมกับแผ่นธาตุบวก O_2 และ H_2 รวมกันเป็นน้ำ (H_2O) และ SO_4 อีกส่วนจะไปรวม

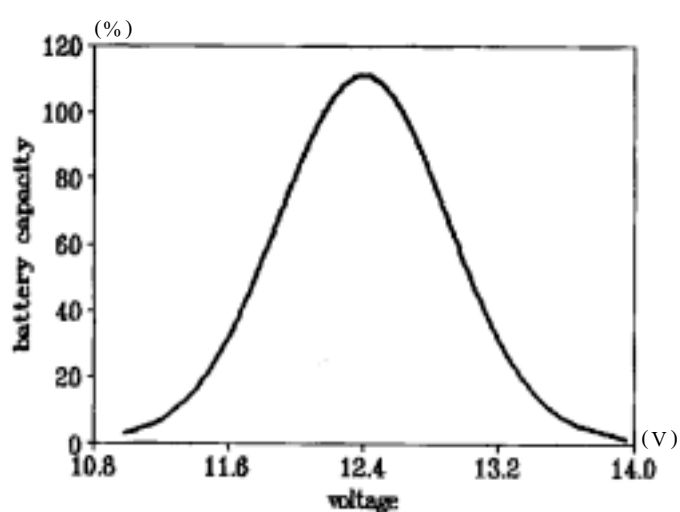


I_{dc} = standard Current Flow e^- = Electron
 x^+ = Positive Ion y^- = Negative Ion

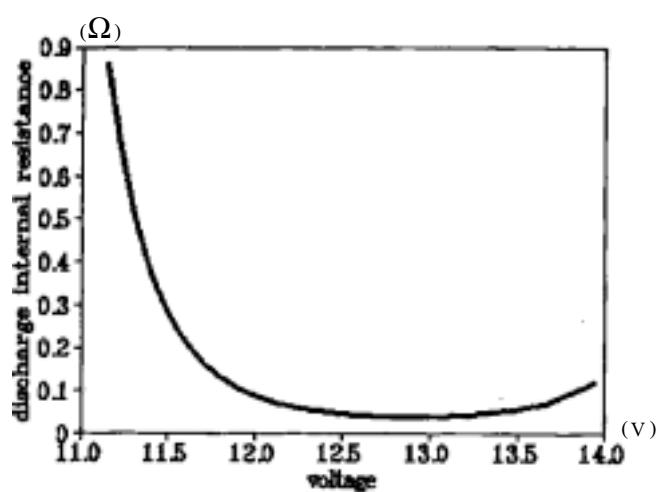
ภาพที่ 2.3 การทำปฏิกิริยาของเซลล์แบตเตอรี่ (Nelson and Bolin,1995)

กับ Pb ในแผ่นธาตุลบ ส่วน H_2 ที่เหลือจะไปรวมกับ O_2 เมื่อมีการต่อภาระที่ขั้วแคโทดและขั้วแอโนดของแบตเตอรี่ดังแสดงในภาพที่ 2.3 จะทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดผ่านภาระไปครบวงจรที่ขั้วแคโทด นอกจากนั้นปฏิกิริยานี้ยังเกิดขึ้นตลอดเวลาด้วยปริมาณน้อยๆทั้งที่ไม่ได้ต่อภาระ เนื่องจากแบตเตอรี่มีความต้านทานภายในตัวเอง หากเกิดการคายประจุไฟฟ้าภายใน

แบตเตอรี่จันทรมด จะทำให้แผ่นธาตุกลายเป็นตะกั่วซัลเฟต น้ำกรดจะเหลือแต่เพียงน้ำ และไม่เกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีอีกต่อไป แบตเตอรี่ขนาด 12 Vdc มีความจุของการเก็บพลังงานเมื่อเทียบกับแรงดันที่ใช้อัดประจุให้แก่แบตเตอรี่ เมื่อทำการอัดประจุให้แก่แบตเตอรี่ ต้องกระทำที่แรงดันเหมาะสมจึงจะได้ค่าความจุพลังงานสูงสุด กล่าวคือแรงดันที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีแบบย้อนกลับมีประสิทธิภาพ ทำให้แบตเตอรี่สามารถกักเก็บพลังงานได้มากที่สุด จะมีค่าประมาณ 12.4 V ดังแสดงในภาพที่ 2.4 (Nelson and Bolin,1995) ที่แรงดันดังกล่าวจะได้ค่าความจุของแบตเตอรี่สูงสุด

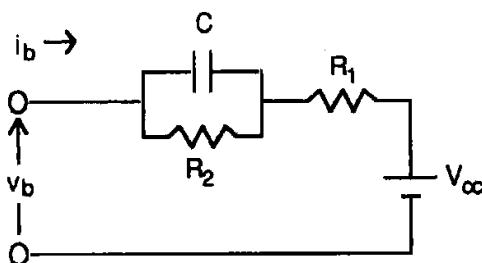


ภาพที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ใช้ในการอัดประจุกับเปอร์เซ็นต์ความจุแบตเตอรี่

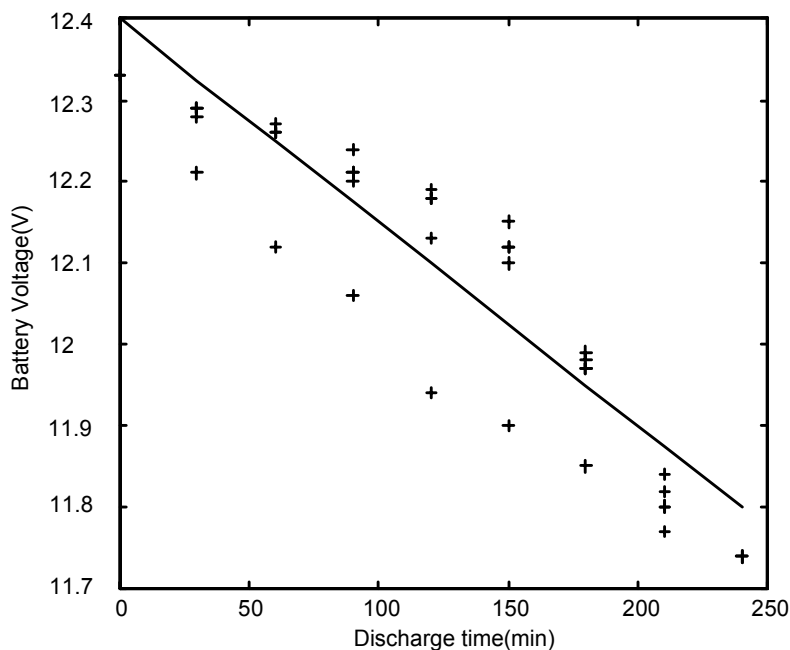


ภาพที่ 2.5 ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่เทียบกับแรงดัน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่มีความสำคัญในการออกแบบ ใช้คาดการณ์ผลที่อาจเกิดขึ้นในการใช้งานอุปกรณ์อื่นๆ ร่วมกับแบตเตอรี่แบบตะกั่วกรด แบตเตอรี่มีการถดถอยของพลังงานที่เก็บสะสมอยู่ภายใน เมื่อแรงดันของแบตเตอรี่มีระดับลดลงจากค่าพิกัดทำให้ความต้านทานภายในแบตเตอรี่สูงขึ้นเรื่อย ๆ ดังจะเห็นได้จากภาพที่ 2.5 จุดที่ความต้านทานของแบตเตอรี่ขณะใช้งานเกิดขึ้นเมื่อแรงดันขั้วแบตเตอรี่เป็น 12.7 Vdc ดังนั้นจุดที่เหมาะสมในการใช้งานแบตเตอรี่จะอยู่ในช่วง 12.7 Vdc ถึง 11.5 Vdc (Salameh , Casacca , and Lynchi,1992) ความสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่มาจากความต้านทานภายในอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี แทนด้วยวงจรสมมูลเทวินินของแบตเตอรี่ (Rynkiewicz,1999) ในภาพที่ 2.6 ซึ่งจะประกอบด้วยความต้านทานภายใน R_1 และแรงดันเกินภายใน (over voltage) แทนด้วย C และ R_2 ขนานกัน

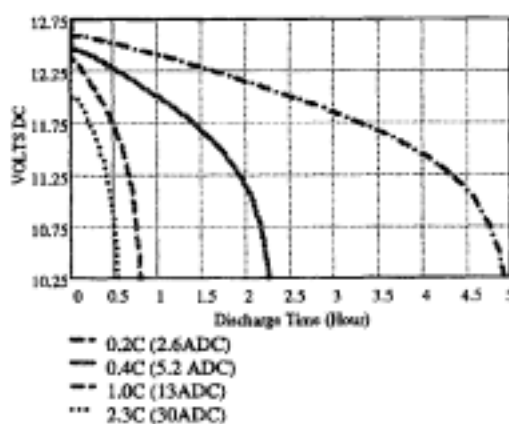


ภาพที่ 2.6 วงจรสมมูลเทวินินของแบตเตอรี่



ภาพที่ 2.7 ผลการทดสอบแบตเตอรี่เทียบกับเวลา

ในสภาพการใช้งานจริงแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่จะลดลงอยู่ตลอดเวลาเพราะความสูญเสียภายใน จากการทดสอบแบตเตอรี่ ได้นำข้อมูลมาแสดงผลด้วยสัญลักษณ์ + ในภาพที่ 2.7 เป็นการยืนยันว่าเมื่อใช้งานแบตเตอรี่ไปเป็นเวลานานแรงดันจะถดถอยลงตามลำดับ เมื่อใช้วิธีการหาพหุนามแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ได้ผลลัพธ์เป็นความสัมพันธ์แบบเส้นตรง $y = mx + c$ ค่า c คือค่าเริ่มต้น c มีค่าเท่ากับ 12.4 Vdc ความชัน (m) มีค่าเท่ากับ - 0.0025 ดังนั้นสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในลักษณะที่เป็นเชิงเส้นของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่ใช้ทดลองงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ คือ $y = -0.0025x + 12.4$ เมื่อ y คือ แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่มีหน่วยโวลต์และ x คือ เวลาที่ใช้งานแบตเตอรี่มีหน่วยเป็นนาทิต



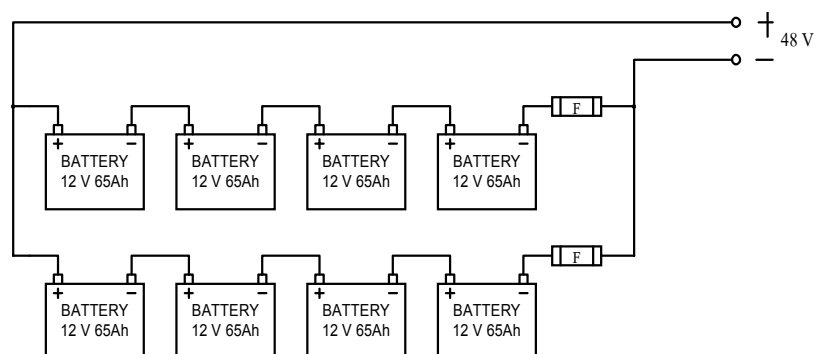
ภาพที่ 2.8 การถดถอยของพลังงานแบตเตอรี่ (Rynkiewicz,1999)

เมื่อแบตเตอรี่มีการจ่ายภาระที่มีขนาดแตกต่างกันจะเห็นการถดถอยของแรงดัน จากภาพที่ 2.8 อาจสังเกตเห็นว่า ระดับแรงดัน 11.5 Vdc ลงมาจะมีการลดลงของแรงดันอย่างรวดเร็วมาก สอดคล้องกับภาพที่ 2.5 กล่าวคือ เมื่อแรงดันของแบตเตอรี่ลดลงมาถึง 11.5 Vdc ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ก็จะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ระดับพลังงานของแบตเตอรี่ลดลง เมื่อแรงดันลดลงกระแสน้ำที่จ่ายให้ภาระจึงสูงขึ้น กลายเป็นความสูญเสียที่เพิ่มสูงขึ้น ความสูญเสียในรูปของความร้อนจะสามารถสังเกตได้ชัดเจน กล่าวคือแบตเตอรี่จะร้อนรอบ ๆ ตัวถึง หากปล่อยให้จ่ายพลังงานต่อไปอายุการใช้งานของแบตเตอรี่จะสั้นลง จึงต้องให้ระบบหยุดทำงานและนำแบตเตอรี่ไปทำการประจุพลังงานใหม่

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดมีลักษณะสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Salameh et al,1992) แต่ในงานวิจัยนี้ ได้กำหนดช่วงการทำงานของแบตเตอรี่ไว้ในช่วงที่เป็นเชิงเส้นเท่านั้น เพื่อลดปัญหาในการควบคุมการทำงานและยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ให้สามารถใช้งานได้ยาวนานขึ้น

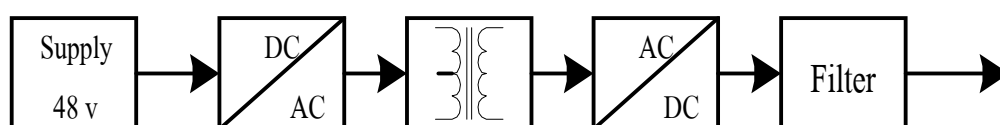
2.3 หลักการปรับเปลี่ยนระดับพลังงานของแบตเตอรี่

เมื่อแหล่งจ่ายพลังงานที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้มาจากแบตเตอรี่ที่มีแรงดันรวมกัน 48 Vdc ที่ได้จาก การนำแบตเตอรี่ขนาด 12 Vdc 65 Ah จำนวน 4 ลูกต่ออนุกรมเข้าด้วยกัน และต่อขนานอีก 1 ชุด ดังภาพที่ 2.9 เมื่อภาระของแบตเตอรี่คือ มอเตอร์ที่มีขนาดพิกัด 220 Vdc 800 W จึงต้องมีการ



ภาพที่ 2.9 การต่อแบตเตอรี่ในงานวิจัยให้ได้แรงดัน 48 V

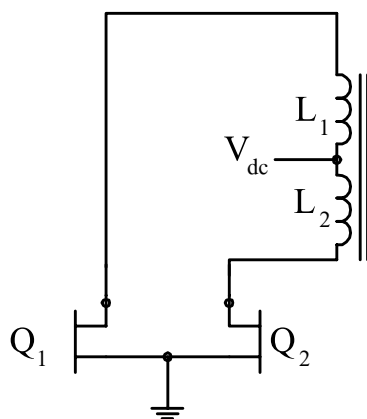
ยกระดับแรงดันของแบตเตอรี่ให้สามารถขับมอเตอร์ได้ อุปกรณ์ยกระดับแรงดันที่จะต้องพัฒนาขึ้น มีองค์ประกอบดังแสดงในภาพที่ 2.10 องค์ประกอบต่าง ๆ นั้นได้แก่ แหล่งจ่ายแรงดันเป็นแบตเตอรี่ อุปกรณ์เปลี่ยนแรงดันกระแสตรงเป็นกระแสสลับ หม้อแปลงแรงดันขึ้นด้วยอัตราส่วน 1:6 อุปกรณ์เปลี่ยนแรงดันกระแสสลับเป็นกระแสตรง และ ตัวกรองสัญญาณ เพื่อให้เกิดการสร้างสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำขึ้นในหม้อแปลงไม่ให้สนามแม่เหล็กอ้อมตัว จึงต้องแปลงรูปพลังงานจากแบตเตอรี่ 48Vdc เป็นกระแสสลับก่อน นำไปเข้าหม้อแปลงฯแรงดันขึ้น โดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ (inverters) ดังแสดงในภาพที่ 2.11 เป็นอุปกรณ์เปลี่ยนแรงดันอินพุตกระแสตรงเป็นแรงดันเอาต์พุต



ภาพที่ 2.10 องค์ประกอบของระบบแปลงพลังงานแบตเตอรี่ให้เหมาะต่อการขับมอเตอร์

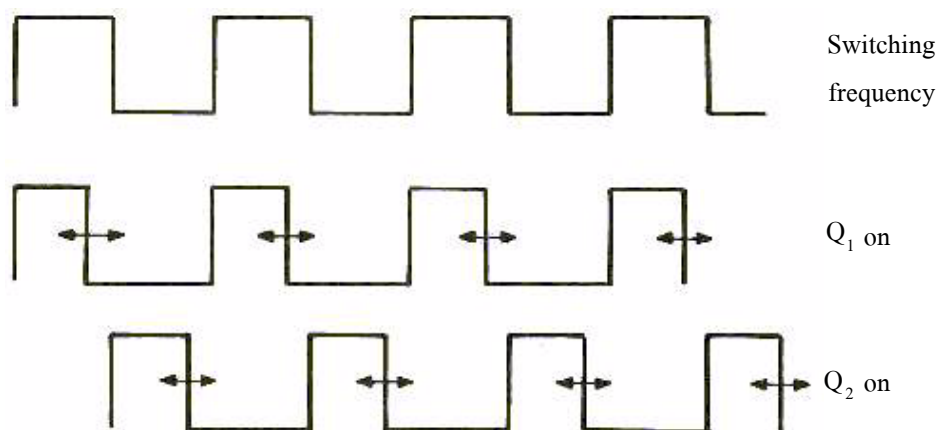
กระแสสลับ มีขนาดและความถี่ตามต้องการรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในอุดมคติจะเป็นรูปคลื่นไซน์ แต่ในทางปฏิบัติรูปคลื่นเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มักประกอบด้วยสัญญาณที่ผ่านเข้ามาและฮาร์มอนิกส์จึงไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ การลดฮาร์มอนิกส์จะอาศัยวงจรกรองสัญญาณที่

ที่เหมาะสมกับขนาดและวงจรรินเวอร์เตอร์ที่ใช้ วงจรรินเวอร์เตอร์ดังภาพที่ 2.11 (Pressman,1999) มี Q_1 และ Q_2 ทำหน้าที่เหมือนสวิตช์ปิดเปิดไฟฟ้าทำงานสลับกันนั่นคือ เมื่อ Q_1 เปิดเวลา $t = 0$



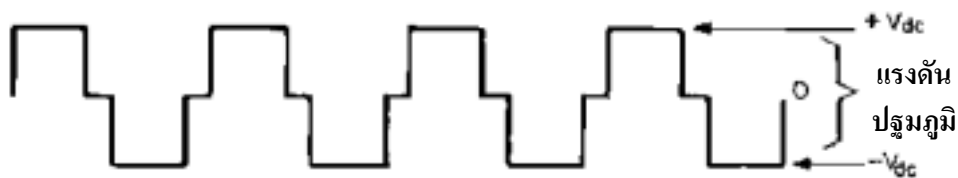
ภาพที่ 2.11 วงจรรินเวอร์เตอร์

และปิดที่ เวลา $t = T/2$ ทำให้แรงดันตกคร่อมหม้อแปลง ที่ขดปฐมภูมิ (L_1) มีค่าเท่ากับ V_{dc} ดังที่แสดงในภาพ และเมื่อ Q_2 เปิดที่เวลา $t = T/2$ และปิดที่เวลา $t = T_0$ ทำให้แรงดัน V_{dc} ตกคร่อมขดลวด L_2 ดังแสดงรูปคลื่นช่วงการทำงานของสวิตช์ในภาพที่ 2.12 เาต์พุตที่เป็นสัญญาณกระแสสลับจากการทำงานของสวิตช์ จึงถูกส่งผ่านหม้อแปลงเพื่อยกแรงดันขึ้นเป็น 300 V โดยประมาณ แรงดันทางปฐมภูมิของหม้อแปลงเกิดจากการรวมของสัญญาณแรงดันที่ได้จาก L_1 และ L_2 มีรูปคลื่นของแรงดันปฐมภูมิดังภาพที่ 2.13

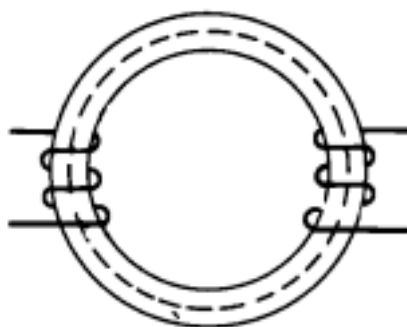


ภาพที่ 2.12 จังหวะการทำงานของมอสเฟต Q_1 และ Q_2

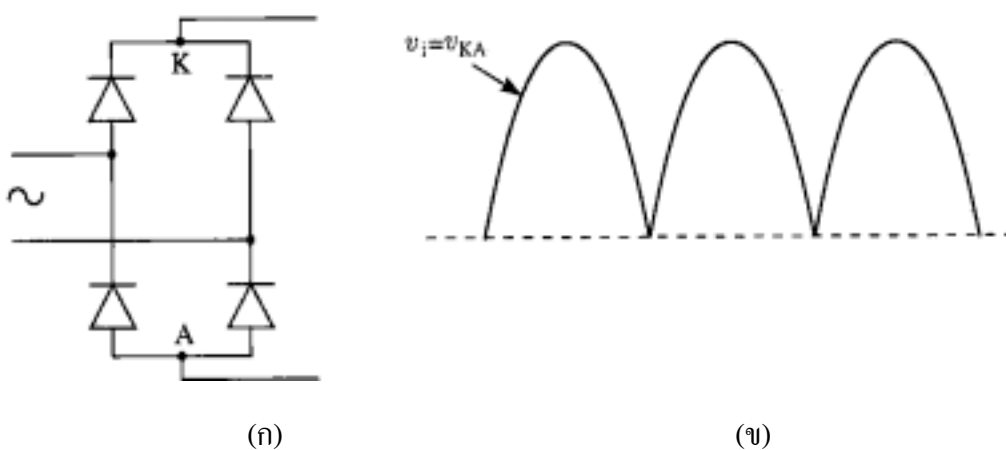
หม้อแปลงที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นแบบความสูญเสียต่ำมีลักษณะที่เป็นวงแหวน ทำด้วยสารแม่เหล็กเฟอร์ไรท์ (ferrites) เรียกแกนแบบนี้ว่าแกนวงแหวนหรือแกนทอรอยด์ (toroid) ดังแสดงในภาพที่ 2.14 หม้อแปลงที่ใช้นี้จะต้องทนกระแสได้สูง หลังจากผ่านหม้อแปลงเพิ่มขนาดแรงดันแล้ว ไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จะถูกเปลี่ยนเป็นกระแสตรงด้วยวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นซึ่งมี



ภาพที่ 2.13 สัญญาณรูปคลื่นแรงดันปฐมภูมิของหม้อแปลง



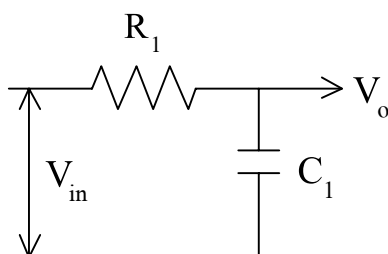
ภาพที่ 2.14 หม้อแปลงแกนวงแหวน



ภาพที่ 2.15 (ก) วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

(ข) สัญญาณแรงดันเอาต์พุต

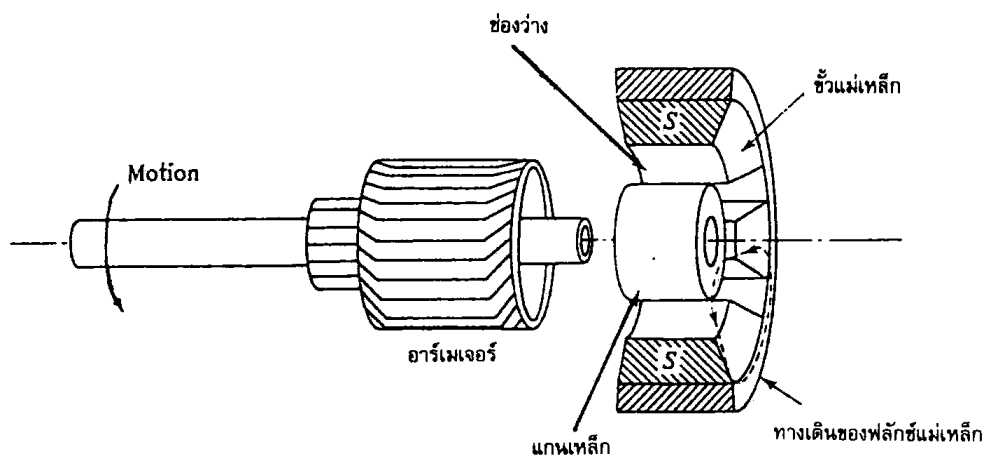
แผนภาพวงจรและรูปคลื่นเอาต์พุตในอุดมคติ ดังที่แสดงในภาพที่ 2.15 สัญญาณเอาต์พุตจะได้รับการปรับเรียบด้วยวงจรกรองสัญญาณแบบผ่านต่ำดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 วงจรกรองสัญญาณแบบผ่านต่ำ

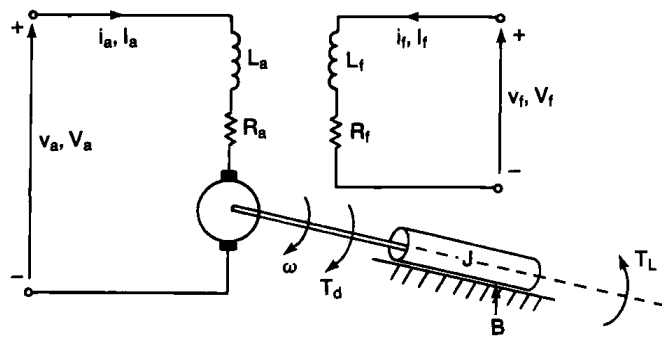
2.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดวงจรมอเตอร์แยกส่วน

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีส่วนประกอบดังภาพที่ 2.17 และมีวงจรสมมูลดังที่แสดงในภาพที่ 2.18 มอเตอร์ที่กล่าวถึงนี้เป็นชนิดวงจรมอเตอร์แยกส่วน เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป มีแผนภาพเชิงโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.19 มอเตอร์ชนิดนี้มีคุณสมบัติเหมาะสมในการควบคุม

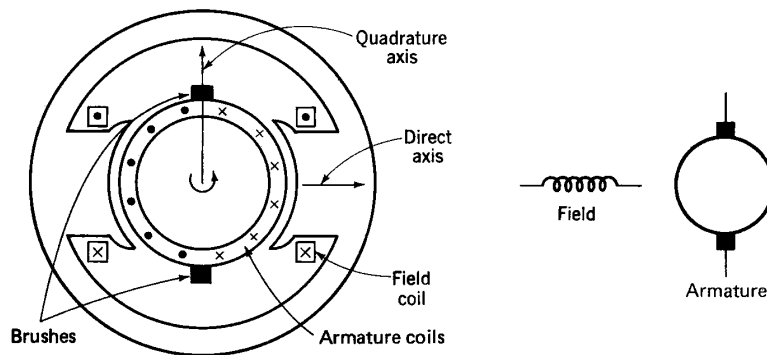


ภาพที่ 2.17 ส่วนประกอบภายในของมอเตอร์ไฟฟ้า

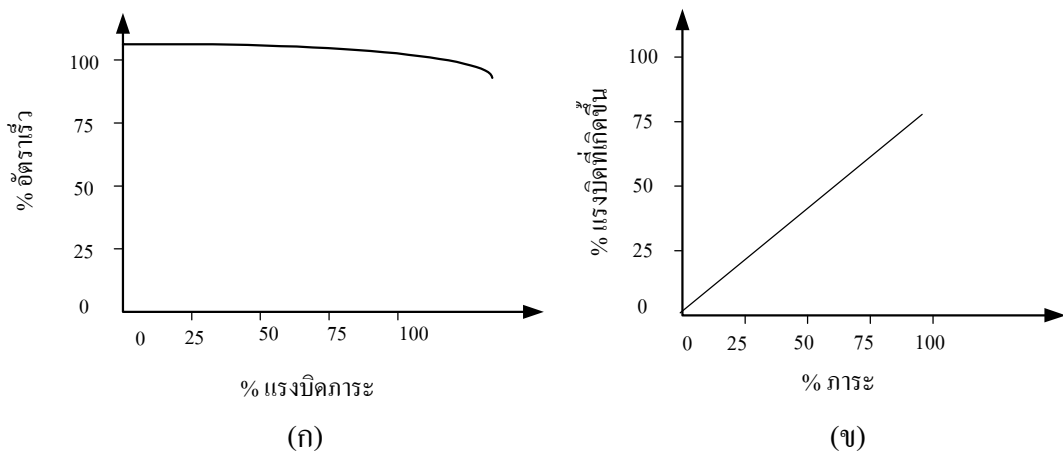
ความเร็วในการขับเคลื่อน แรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่องสูงเหมาะกับงานยกของ นุดลากและขับเคลื่อน เครื่องสูงเหมาะกับงานยกของ นุดลากและขับเคลื่อน มีอัตราเร็วเกือบคงที่ ลดลงบ้างตามค่าของภาระดังแสดงในภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.18 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดวงจรสวมแยกส่วน



ภาพที่ 2.19 ตำแหน่งของอุปกรณ์ภายในของมอเตอร์ชนิดวงจรสวมแยกส่วน



ภาพที่ 2.20 (ก) เส้นโค้งลักษณะสมบัติอัตราเร็วของมอเตอร์กระแสตรงชนิดวงจรสวมแยกส่วน
 (ข) เส้นโค้งลักษณะสมบัติแรงบิดของมอเตอร์กระแสตรงชนิดวงจรสวมแยกส่วน

จากสมการแรงบิดของมอเตอร์

$$T = K\phi i_a \quad (2-1)$$

แต่ค่าของ ϕ แปรตามค่าของ i_f

$$\phi = k_f i_f$$

ซึ่ง

$$i_f = \frac{V_f}{R_f}$$

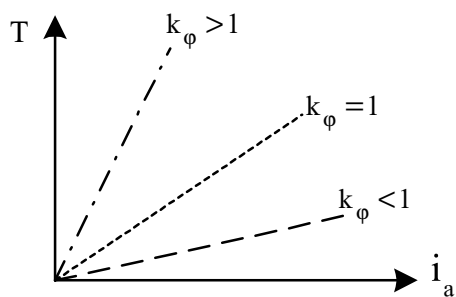
เมื่อค่าของ i_f คงที่ทำให้ค่าของ ϕ (flux) คงที่ด้วย

ให้

$$K\phi = k_\phi$$

ฉะนั้น

$$T = k_\phi i_a \quad (2-2)$$



ภาพที่ 2.21 ความสัมพันธ์ i_a กับ T

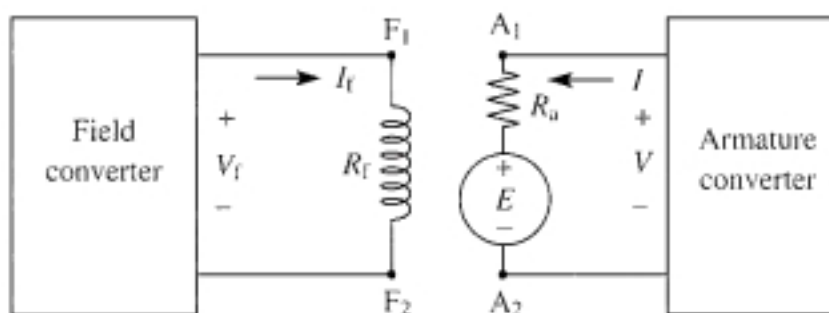
จากสมการ (2-2) ทำให้ทราบว่ากระแสที่อาร์เมเจอร์มีผลต่อแรงบิดที่เกิดขึ้น เมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสอาร์เมเจอร์โดย k_ϕ จะเป็นความชันของกราฟที่ค่าต่างๆแสดงได้ด้วยภาพที่ 2.21 เมื่อพิจารณา ความเร็วของมอเตอร์ จากสมการความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงจะได้

$$N = \frac{V_t}{K\phi} - \frac{i_a R_a}{K\phi} \quad (2-3)$$

จากสมการ (2-3) R_a มีขนาดน้อยมากจึงทำให้พจน์ $\frac{R_a}{K\phi}$ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์มาก จึงอาจกล่าวได้ว่า

$$N \cong \frac{V_t}{K\phi} \quad \text{หรือ} \quad V_t = K\phi N \quad (2-4)$$

2.5 หลักการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดวงจรมอเตอร์แยกส่วนอย่างเหมาะสม



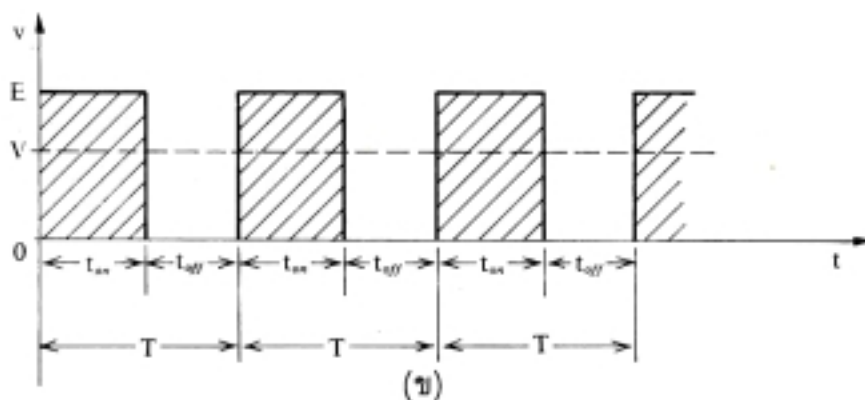
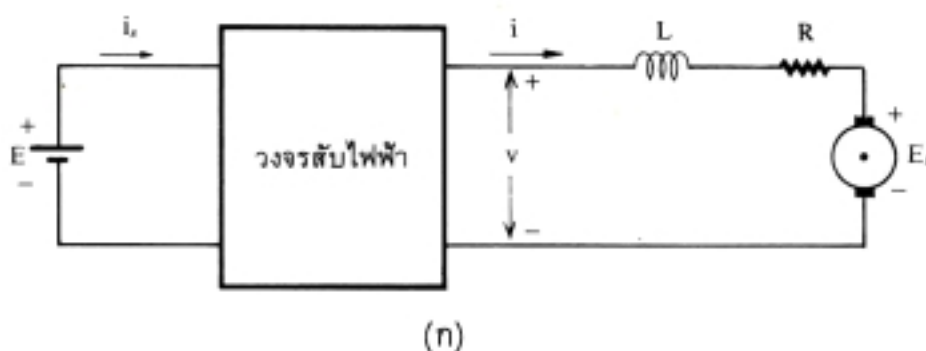
ภาพที่ 2.22 การควบคุมด้านวงจรมอเตอร์และวงจรรีเมเจอร์ด้วยคอนเวอร์เตอร์

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงชนิดวงจรมอเตอร์แยกส่วนโดยทั่วไปสามารถทำได้โดย ควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับวงจรรีเมเจอร์ ควบคุมกระแสป้อนเข้าวงจรมอเตอร์ หรือผสมผสานทั้งสองวิธีการ แหล่งจ่ายพลังงานในงานวิจัยนี้มีลักษณะถดถอยของพลังงานลงเรื่อยๆ จะส่งผลกระทบต่อความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เพื่อให้มีการปรับคุมแหล่งจ่ายพลังงานทั้งทางด้านอาร์เมเจอร์และวงจรมอเตอร์เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายมีค่าสูงกว่าระดับแรงดันอ้างอิง วงจรมอเตอร์จะปรับแรงดันให้ใกล้เคียงหรือเท่ากับระดับที่ตั้งไว้ โดยจะมีขอบเขตของการปรับ

เปลี่ยนแรงดันที่ได้จากการทดสอบ เพื่อให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานในย่านที่เหมาะสม คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นวงจรสับไฟฟ้ากระแสตรง (dc chopper) เนื่องจากแหล่งจ่ายแรงดันเป็นกระแสตรง นอกจากนั้นยังมีการคุมค่ากระแสวงจรสับ เพื่อจัดให้มีการสูญเสียทางกำลังไฟฟ้าน้อยที่สุดในมอเตอร์

2.5.1 วงจรสับไฟฟ้า

แรงดันที่ได้จากแบตเตอรี่จะมีลักษณะสมบัติที่ไม่คงที่ กล่าวคือเมื่อมีการจ่ายพลังงานจะมีการถดถอยของแรงดันของแบตเตอรี่ลงเรื่อย ๆ ตามภาระและระยะเวลาที่จ่ายพลังงานออกไป วงจรสับไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่สามารถรักษาระดับแรงดันได้ โดยอาศัยหลักการสับแรงดันไฟฟ้าออกเป็นช่วงสั้น ๆ ระยะเวลา t_{ON} และ t_{OFF} ดังแสดงในภาพที่ 2.23 เมื่อต้องการเพิ่ม

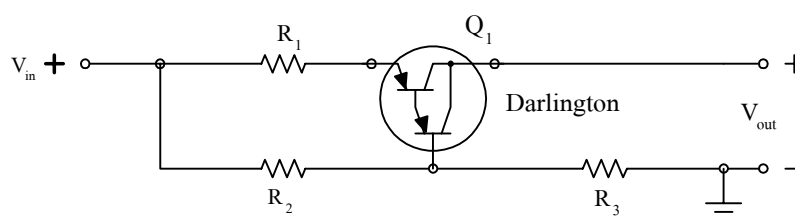


ภาพที่ 2.23 (ก) การใช้วงจรสับไฟฟ้าเพื่อปรับเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงปรับค่าได้
(ข) รูปคลื่นแรงดันในการสับไฟฟ้า

ระดับแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์สูงขึ้น ระยะเวลา t_{ON} จะกว้างจนถึงระดับแรงดันอ้างอิง วงจรสับไฟฟ้าจะมีอุปกรณ์เปรียบเทียบแรงดันอินพุตและเอาต์พุต เพื่อตรวจสอบสถานะการทำงานของวงจร ให้ได้ระดับแรงดันที่ต้องการในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งจะได้กล่าวถึงแนวคิดการออกแบบในหัวข้อต่อไป

2.6 แนวคิดการออกแบบอุปกรณ์จำกัดกระแสของแบตเตอรี่

เมื่อนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมเข้าด้วยกัน 4 ลูก เพื่อให้ได้แรงดัน 48 Vdc โดยมีความจุเท่ากับ 1 ลูกเท่านั้นคือ 65 Ah เพื่อเพิ่มระยะเวลาการจ่ายกระแสให้ยาวนานขึ้นจึงนำแบตเตอรี่ 4 ลูก ต่ออนุกรมกันมาขนานเข้าด้วยกัน 2 ชุด แบตเตอรี่ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นและแต่ละลูกก็ไม่ได้มีพลังงานสะสมเท่ากันอย่างสมบูรณ์แบบ แบตเตอรี่ที่มีพลังงานสะสมต่ำกว่าจะกลายเป็นภาระอยู่ช่วงเวลาหนึ่ง เมื่อต่อร่วมกับแบตเตอรี่ที่มีพลังงานสะสมสูงกว่า จนกระทั่งแบตเตอรี่ที่มีพลังงานมากกว่าจะปรับสภาพตัวเองให้มีความสามารถจ่ายพลังงานได้ใกล้เคียงกับลูกที่มีพลังงานน้อยกว่า ดังนั้นจึงต้องมีอุปกรณ์ที่จำกัดหรือควบคุมให้มีการจ่ายพลังงานที่เท่า ๆ กันโดยไม่ให้แบตเตอรี่ลูกใดลูกหนึ่งกลายเป็นภาระแก่กันซึ่งสามารถใช้หลักการของการแบ่งกระแส ดังแสดงในภาพที่ 2.24 กระแสที่ไหลผ่าน R_1 คือกระแสที่ต้องการควบคุมไม่ให้เกินขนาด เมื่อนำอัตราขยายของทรานซิสเตอร์ Q_1 มาหารจะได้กระแสที่จะใช้ในการไบแอส Q_1 เพื่อที่จะควบคุมไม่ให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 นำกระแสเกินที่ได้ตั้งไว้ โดยใช้สัดส่วนของความต้านทาน R_2 และ R_3 เป็นตัวควบคุมกระแสไบแอสให้กับวงจร

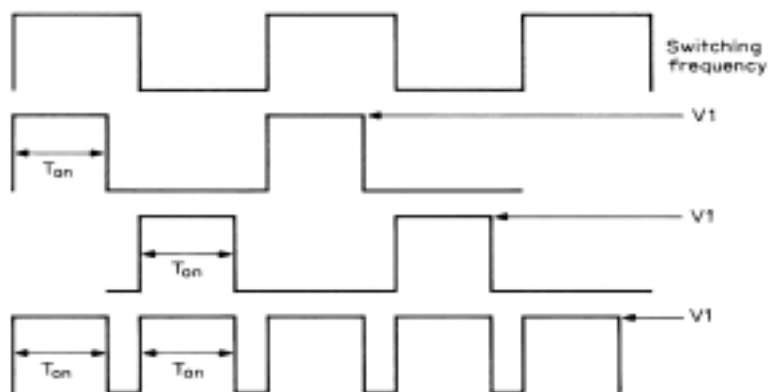


ภาพที่ 2.24 วงจรจำกัดกระแสแบบดาร์ลิงตัน

2.7 แนวคิดการออกแบบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนระดับพลังงานแบตเตอรี่

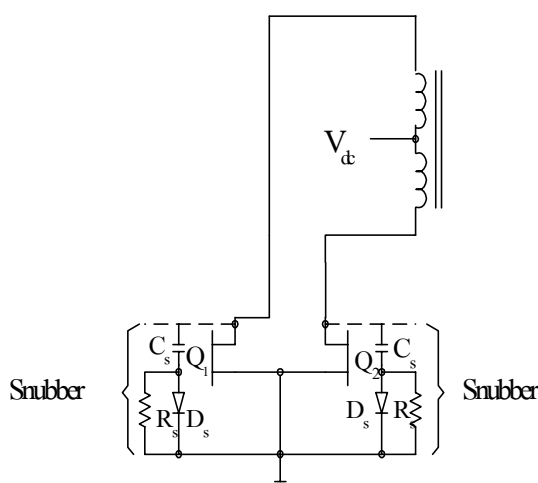
จากหัวข้อที่ 2.5 ในการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงชนิดวงจรมอเตอร์แยกส่วนในงานวิจัยนี้จะต้องปรับระดับแรงดันของแบตเตอรี่ที่ป้อนมอเตอร์ให้มีค่า 220 Vdc ตามพิกัดของมอเตอร์ การปรับเปลี่ยนระดับแรงดันแบตเตอรี่จาก 48 Vdc ไปเป็น 220 Vdc เริ่มจากการออกแบบวงจรที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ โดยอาศัยการสับไฟฟ้าที่ความถี่ตามที่ต้องการ ในงานวิจัยนี้จะ

ทำให้เกิดความถี่ที่ 50Hz และการสับจะแบ่งออกเป็นสองชุดไม่ให้สับตรงกันดังแสดงในภาพที่ 2.25 เพราะหม้อแปลงที่ใช้ในการเปลี่ยนระดับแรงดันเป็นแบบสองขดลวด สัญญาณที่ได้จากวงจร



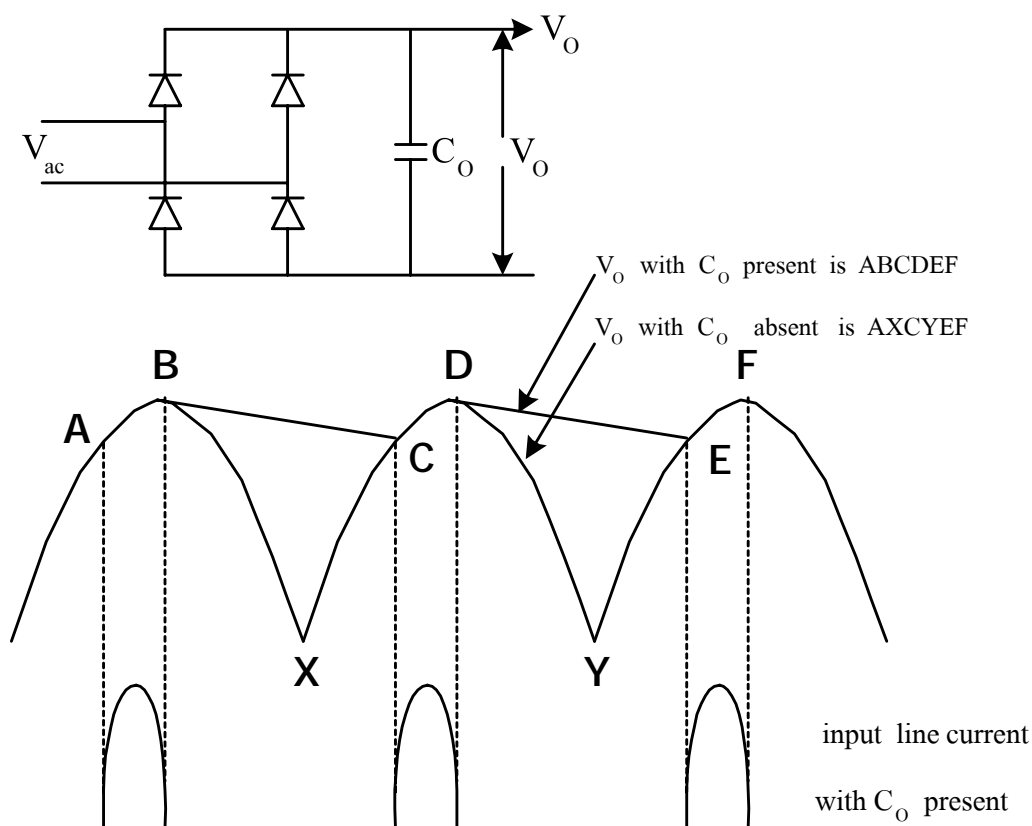
ภาพที่ 2.25 รูปคลื่นการสับไฟฟ้าผ่านเข้าสู่หม้อแปลงเพื่อเปลี่ยนระดับแรงดัน

กำเนิดสัญญาณ จะนำไปควบคุมมอสเฟตที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์แยกเป็นสองชุดดังแสดงในภาพที่ 2.26 วงจรจุดเกทที่ใช้ในภาพจะมีการจุดเกทสวิตช์ที่ต่างกันเพื่อไม่ให้ Q_1 และ Q_2 ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์สับไฟฟ้าทำงานพร้อมกัน เพราะหากทั้งสองชุดทำงานพร้อมกันจะทำให้สนามแม่เหล็กมีทิศทางหักล้างกัน ซึ่งจะทำให้ความต้านทานของขดลวดหม้อแปลงลดลงอย่างมาก ก่อให้เกิดการลัดวงจรของแรงดัน V_{dc} ที่ป้อนให้แก่หม้อแปลงลงดิน เกิดกระแสพุ่งสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และทำให้ Q_1



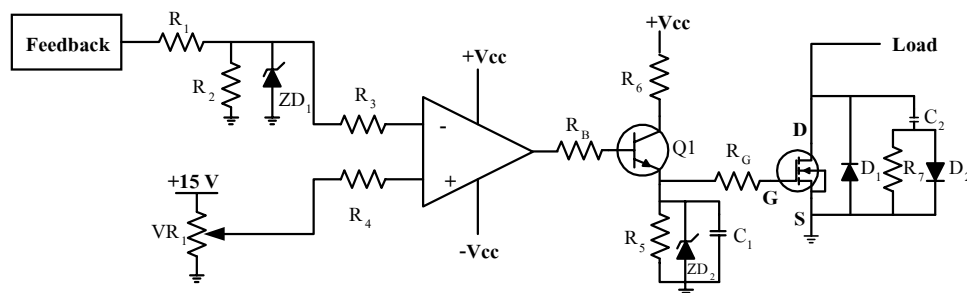
ภาพที่ 2.26 วงจรสับไฟฟ้าแบบ 2 ชุดสลับกันทำงาน

และ Q_2 พังเสียหาย เมื่อเกิดการเหนี่ยวนำจากหม้อแปลงทางด้านขดลวดปฐมภูมิ 2 ชุดสลับกันและมีทางเดินสนามแม่เหล็กตรงข้ามกัน จะได้สัญญาณกระแสสลับออกมาทางด้านทุติยภูมิ หม้อแปลงที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีอัตราส่วนการพันขดลวด 1:6 เมื่อป้อนแรงดัน 48 Vdc จะได้แรงดัน 288 Vdc โดยประมาณออกมา เพื่อลดความสูญเสียที่จะเกิดขึ้นในหม้อแปลง จึงใช้แกนเฟอร์ไรท์มีรูปร่างเป็นวงแหวนเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm. พันด้วยขดลวดทางด้านปฐมภูมิ 100 รอบ ทางด้านทุติยภูมิ 600 รอบ จ่ายกำลังสูงสุด 800 W แรงดันที่ได้จะมีสัญญาณรบกวนผสมมาด้วย แต่พลังงานที่ต้องการในการขับเคลื่อนมอเตอร์จะเป็นกระแสตรง จึงต้องนำแรงดันมาผ่านวงจรเรียงกระแสดังในภาพที่ 2.27 ซึ่งเป็นวงจรไดโอดบริดจ์ และทำการปรับเรียบสัญญาณให้มีความสม่ำเสมอด้วยการต่อขนานตัวเก็บประจุที่ขั้วเอาต์พุต แล้วจึงกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการใช้วงจรกรองแบบผ่านต่ำสร้างด้วย L และ C



ภาพที่ 2.27 การใช้ตัวเก็บประจุต่อขนานเพื่อทำให้สัญญาณมีความต่อเนื่อง

2.8 แนวคิดการออกแบบอุปกรณ์ควบคุมความเร็วของมอเตอร์



ภาพที่ 2.28 แนวคิดการควบคุมวงจรสับไฟฟ้าแบบป้อนกลับ

การควบคุมความเร็วดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะอาศัยการสับไฟฟ้าเพื่อให้เกิดแรงดันเฉลี่ยตามที่ต้องการจ่ายแก่มอเตอร์ ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ดังแสดงในภาพที่ 2.28 สัญญาณป้อนกลับ (feedback ในภาพ) ได้มาจากตัวตรวจวัดความเร็ว มีความต้านทาน R_1 และ R_2 ต่ออยู่เพื่อลดขนาดแรงดันของสัญญาณป้อนกลับไม่ให้เกินแรงดันอ้างอิงสูงสุด R_3 และ R_4 ใช้เป็นตัวจำกัดกระแสอินพุตให้แก่อปแอมป์ (Berlin,1980) ซึ่งเป็นตัวเปรียบเทียบสัญญาณ R_B ใช้เป็นตัวจำกัดกระแสไบแอสให้แก่ Q_1 ที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งการขับเคลื่อนมอเตอร์นี้ อาศัยหลักการเดียวกับ IGBT (Yuvarajan,1990) โดยมี R_G ช่วยจำกัดกระแสในการขับเคลื่อน R_5 C_1 และ ZD_2 จะช่วยรักษาแรงดันไบแอสให้คงที่ไม่เกินพิกัดของมอเตอร์นั้นๆ และที่สำคัญจะต้องมีวงจรป้องกันแรงดันชั่วครู่ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของภาระที่ขา D และขา S ประกอบด้วย C_2 R_7 และ D_2 ในช่วงเวลาหยุดนำกระแสของสวิตช์เมื่อจับภาระที่เป็นลักษณะความเหนียวหนา กระแสจะยังคงไหลผ่าน D_1 มายังภาระอย่างต่อเนื่อง วงจรสับไฟฟ้าเป็นชนิดลดค่าลง เนื่องจากแรงดันเริ่มต้นของแบตเตอรี่จะมีค่าสูง จึงต้องควบคุมแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ในระดับที่ไม่เกินพิกัดการควบคุมจะทำการปรับเปลี่ยนแบบต่อเนื่องและทันทีทันใด เมื่อได้รับผลตอบสนองจากสัญญาณป้อนกลับ ระบบก็จะทำการปรับเพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตตามแรงดันอ้างอิง แต่ระบบอาจจะปรากฏการหน่วงเวลาข้างหรือการแกว่งก่อนจะเข้าสู่สภาวะคงตัว สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ตัวควบคุมที่เป็นแบบพีไอหรือแบบมูตาม ซึ่งมีลักษณะสมบัติการควบคุมที่ให้ความรวดเร็วและแม่นยำ นำมาต่อระหว่างสัญญาณที่ออกมาจากอปแอมป์และมอเตอร์ เพื่อปรับปรุงสัญญาณการจุดชนวนของสวิตช์มอเตอร์ให้ตอบสนองสัญญาณควบคุมรวดเร็วและแม่นยำยิ่งขึ้น

2.9 สรุป

ระบบขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดด้วยการแปลงผันแรงดันจาก 48 Vdc เป็น 220 Vdc แหล่งจ่ายพลังงานที่ใช้ได้นั้นได้มาจากการนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมจำนวน 4 ลูกให้ได้ขนาดแรงดันเริ่มต้นตามต้องการ แล้วผ่านเข้าสู่อุปกรณ์สับไฟฟ้าไปยังหม้อแปลงฯผันให้มีแรงดันสูงขึ้นเพื่อจ่ายให้แก่มอเตอร์ตามพิกัด หากลดจำนวนแบตเตอรี่ลงหม้อแปลงจะต้องมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นและทนกระแสได้สูงขึ้นตามอัตราส่วนขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ รวมถึงอุปกรณ์สับไฟฟ้าก็จำเป็นต้องมีขนาดพิกัดทนกระแสและแรงดันสูงขึ้นตามไปด้วย อาจส่งผลให้ต้องใช้งบประมาณเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิม อุปกรณ์ที่มีในท้องตลาดมีขนาดและพิกัดที่ไม่สูงนัก ดังนั้นการเลือกขนาดแรงดันที่จะแปลงผันในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงสิ่งที่ได้กล่าวไปแล้ว

บทที่ 3

การออกแบบและทดสอบระบบขับเคลื่อน

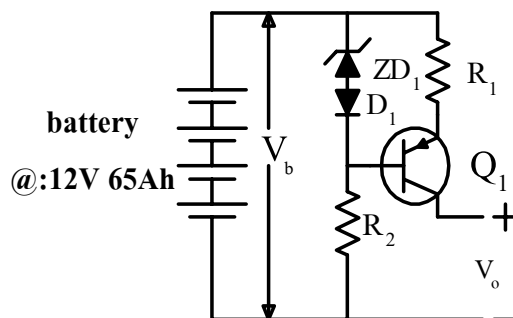
3.1 บทนำ

ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดวงจรถูกแยกส่วนด้วยแบตเตอรี่ในงานวิจัยนี้ ต้องทำการปรับเปลี่ยนแรงดันจากแบตเตอรี่ที่มีขนาดพิกัดการจ่ายแรงดันอยู่ที่ 48 Vdc เนื่องจากการนำแบตเตอรี่ขนาด 12 Vdc 65 Ah จำนวน 4 ลูก ต่ออนุกรมเข้าด้วยกัน แต่มอเตอร์มีความต้องการแรงดันตามพิกัดที่ 220 Vdc ให้กำลังสูงสุด 800 W ซึ่งการยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นประมาณ 5 เท่า ในงานวิจัยนี้ หม้อแปลงจะเป็นตัวแปลงผันขนาดของแรงดัน โดยใช้สวิตช์สับไฟฟ้า ปรับเปลี่ยนแรงดันทางด้านปฐมภูมิ จากกระแสตรงเป็นกระแสสลับ จ่ายให้กับหม้อแปลงแรงดัน แล้วจึงปรับเปลี่ยนแรงดันให้กลับมาเป็นกระแสตรงอีกครั้งก่อนจ่ายให้กับมอเตอร์ การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เป็นแบบวงปิด ใช้สัญญาณป้อนกลับจากตัวตรวจจับความเร็ว โดยมีวงจรสับไฟฟ้าทำหน้าที่ขับมอเตอร์อีกต่อหนึ่ง การควบคุมมอเตอร์เป็นแบบควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์ ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบและทดสอบอุปกรณ์ในส่วนต่างๆที่ใช้ ได้แก่ อุปกรณ์คุมค่ากระแส , วงจรขับเกท , อุปกรณ์แปลงผันแรงดัน , อุปกรณ์ควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์

3.2 อุปกรณ์คุมค่ากระแส

แบตเตอรี่ที่ใช้มีความสามารถในการจ่ายกระแสอยู่ที่ 65 Ah แต่หากต้องการเพิ่มระยะเวลาของการจ่ายกระแสจะต้องขนานแบตเตอรี่เข้าด้วยกัน แต่จากที่ได้กล่าวมาแล้วในเรื่องลักษณะสมบัติของแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ตัวที่มีพลังงานมากกว่าจะถ่ายเทพลังงานไปยังแบตเตอรี่ที่มีพลังงานน้อยกว่า เพื่อป้องกันสภาวะดังกล่าวจึงต้องควบคุมการจ่ายกระแสของแบตเตอรี่แต่ละชุดให้ใกล้เคียงกัน เป็นการยืดอายุใช้งานและระยะเวลาการจ่ายพลังงานของแบตเตอรี่ให้ยาวนานขึ้น โดยใช้การคุมค่ากระแสที่อาศัยลักษณะสมบัติของซีเนอร์ไดโอดและไดโอด มาควบคุมการไบแอสให้แก่ทรานซิสเตอร์ดังแสดงในภาพที่ 3.1 ไดโอด D_1 ต่ออยู่กับขาเบสของทรานซิสเตอร์ ทำหน้าที่ชดเชยอุณหภูมิให้ V_{BE} ของทรานซิสเตอร์ Q_1 คงที่ แรงดันที่ตกคร่อม R_1 จะถูกจำกัดด้วยแรงดันของซีเนอร์ไดโอด (ZD_1) และ แรงดันที่ตกคร่อม R_2 จะจำกัดกระแสที่จ่ายให้แก่ ซีเนอร์ไดโอด (ZD_1)

วงจรที่ออกแบบขึ้นนี้ จะควบคุมค่ากระแสที่จ่ายออกมาจากแบตเตอรี่ 2 ชุดที่นำมาขนานกันไม่ให้เกินชุดละ 15A ทรานซิสเตอร์ Q_1 ใช้ MJ4502 (รายละเอียดทางเทคนิคของอุปกรณ์แสดงไว้ในภาคผนวก ฉ) ซึ่งมีค่า h_{fe} ต่ำสุดที่ 200 กระแสเบสเท่ากับ $15\mu A$ สามารถทนกระแสต่อเนื่อง (I_c) ได้



ภาพที่ 3.1 อุปกรณ์คุมค่ากระแส

30A ส่วน D_1 ได้ใช้ไดโอด 1N4148 ซึ่งมีลักษณะสมบัติแรงดันไบแอสกลับขั้วเท่ากับ V_{BE} ของ Q_1 ประมาณ 0.6 Vdc ซีเนอร์ไดโอด ZD_1 จะเลือกใช้ขนาดแรงดันที่ไม่สูงนัก ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ขนาด 1.5 Vdc ซึ่งอาจคำนวณ R_1 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{V_{ZD1}}{I_c} & (3-1) \\ &= \frac{1.5V}{15A} = 0.1\Omega \end{aligned}$$

ความต้านทาน R_2 จะเป็นตัวจ่ายกระแสไบแอสให้แก่ซีเนอร์ไดโอด ZD_1 โดยที่กระแสไบแอสของซีเนอร์ไดโอดจะขึ้นอยู่กับแต่ละชนิดของซีเนอร์ไดโอด ในงานวิจัยนี้กระแสไบแอสของ ZD_1 ประมาณ 9 mA ซึ่งอาจคำนวณ R_2 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{V_b - (V_{ZD1} + V_{BE})}{I_{ZD1}} & (3-2) \\ &= \frac{48 - (1.5 + 0.6)}{0.009} \\ &\approx 5\text{ k}\Omega \end{aligned}$$

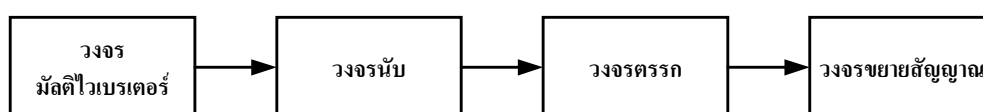
เมื่อทดสอบจะเกิดความผิดพลาดขึ้นในส่วนของอุปกรณ์ เนื่องจากกระแสที่จ่ายออกมาจากแบตเตอรี่มีค่าสูงมาก ๆ ความต้านทาน R_1 และทรานซิสเตอร์ Q_1 คู่มค่ากระแส 15A จะเกิดความร้อนที่ตัวอุปกรณ์ R_1 จึงต้องทนกำลังวัตต์ได้สูง หากำลังที่ตกคร่อมความต้านทาน R_1 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V_{R_1} &= R_1 \times I_c = 0.1 \Omega \times 15A = 1.5V \\ P_{R_1} &= 1.5V \times 15A \\ &= 22.5W \end{aligned}$$

นั่นคือ R_1 จะต้องทนกำลังวัตต์ได้ถึง 22.5 W เป็นอย่างน้อยแต่อุปกรณ์ที่มีขายโดยทั่วไปจะมีขนาด 10 W เท่านั้น จึงต้องนำความต้านทานมาขนานกัน และ Q_1 จะมีลักษณะตัวถังเป็นโลหะควรติดอุปกรณ์ระบายความร้อนและทาซิลิโคนที่ผิวสัมผัส เพื่อลดอุณหภูมิไม่ให้เกิดความเสียหายต่อตัวอุปกรณ์ขณะจ่ายกระแสสูง ๆ

3.3 วงจรขับมอเตอร์

วงจรขับเกทสำหรับอุปกรณ์สับไฟฟ้าทางด้านการควบคุมของหม้อแปลง อาจใช้เทคโนโลยีแอนาล็อกหรือไมโครโปรเซสเซอร์ แต่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในสภาพภูมิอากาศที่มีฝุ่นและความชื้น เทคโนโลยีแบบแอนาล็อกจึงถูกนำมาใช้เช่น วงจรมัลติไวเบรเตอร์นำมาสร้างสัญญาณพัลส์ขึ้น เพื่อกระตุ้นให้วงจรนับหนึ่งถึงสิบหกสร้างพัลส์ห้สสิบหกแบบเป็นจังหวะวนซ้ำเดิมป้อนเข้าวงจรตรรก ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมและขยายพัลส์เข้าขับเกทมอเตอร์ดังแสดงแผนภูมิในภาพที่ 3.2 วงจรมัลติไวเบรเตอร์เป็นวงจรสวิตช์แบบหนึ่ง ซึ่งสามารถผลิตพัลส์ความถี่



ภาพที่ 3.2 องค์ประกอบของวงจรขับเกทมอเตอร์

ออกมาได้โดยใช้ไอซี 555 ดังภาพที่ 3.3 กำหนดพัลส์ที่มีขนาด 400Hz ออกที่ขา 3 แต่ช่วงการทำงาน t_{on} และ t_{off} ของรูปคลื่นในการวิจัยนี้ต้องการให้ออกมาเท่า ๆ กัน ซึ่งอาจคำนวณได้ดังนี้

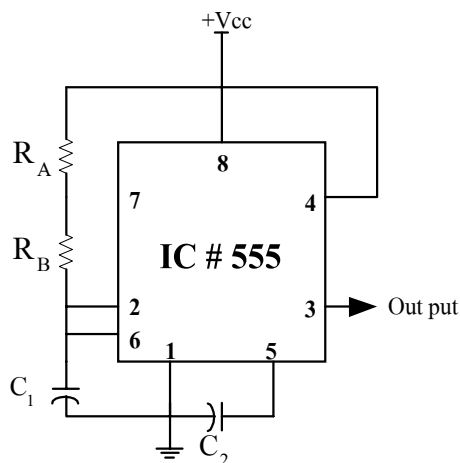
$$\begin{aligned} t_{on} &= 0.7 \cdot (R_A + R_B) \cdot C \\ t_{off} &= 0.7 \cdot R_B \cdot C \end{aligned} \quad (3-3)$$

เมื่อกำหนดให้

$$\begin{aligned} T &= t_{on} + t_{off} & (3-4) \\ &= 0.7 \cdot (R_A + R_B) \cdot C + 0.7 \cdot R_B \cdot C \\ &= 0.7 \cdot (R_A + 2R_B) \cdot C \end{aligned}$$

คำนวณหาความถี่ (f) จาก

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{T} \\ &= \frac{1.43}{(R_A + 2R_B) \cdot C} \end{aligned} \quad (3-5)$$

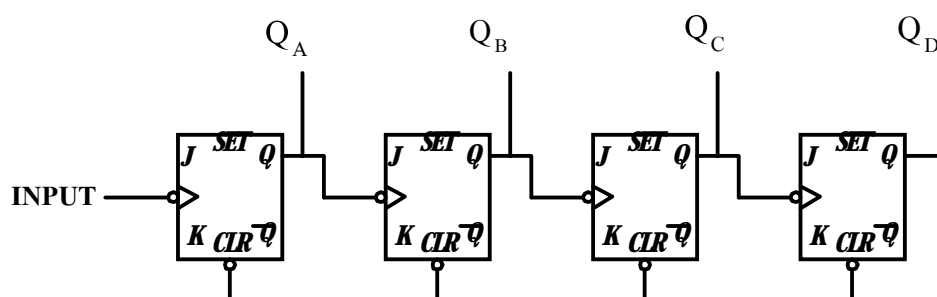


ภาพที่ 3.3 วงจรกำเนิดสัญญาณมัลติไวเบรเตอร์

แต่ต้องการความถี่ที่ 400 Hz เลือก R_B เท่ากับ 10 k Ω เลือกค่าคาปาซิเตอร์ 0.1 μ F คำนวณหาค่า R_A จากสมการที่ (3-5)

$$\begin{aligned} R_A &= \frac{1.43}{C \cdot f} - 2R_B \\ &= \frac{1.43}{0.1 \times 10^{-6} \times 400} - 2 \times 10 \times 10^3 \\ &= 0.03575 \times 10^6 - 20 \times 10^3 \\ &= 15.75 \text{ k}\Omega \text{ เลือกค่าประมาณ } 16 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

ความถี่ที่ได้จากขา 3 ของ ไอซี 555 นั้นจะมีช่วง t_{on} , t_{off} ที่ไม่สม่ำเสมอไม่เหมาะในการนำไปใช้ในการขับเกทมอสเฟตโดยตรง จึงต้องกำเนิดพัลส์ที่ 400 Hz ขึ้นมา และใช้วงจรหารความถี่มาเฉลี่ยให้ช่วง t_{on} , t_{off} เท่า ๆ กัน และในขณะเดียวกันก็ทำให้ความถี่ลดลงโดยใช้ ไอซี 7493 เป็นวงจรรนับหนึ่งถึง 16 ประกอบด้วยฟลิป-ฟล็อปสี่ตัวสร้างสัญญาณเอาต์พุตออกมาเป็นพัลส์ Q_A , Q_B , Q_C , Q_D วงจรนี้แสดงไว้ในภาพที่ 3.4 สัญญาณที่ได้ออกมาจาก ไอซี 7493 จะผ่านเข้าไอซี 7427

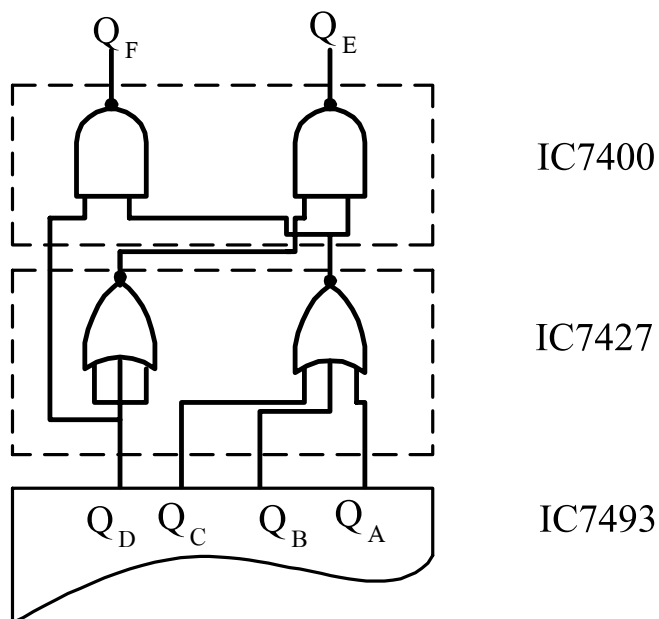


ภาพที่ 3.4 วงจรรนับ

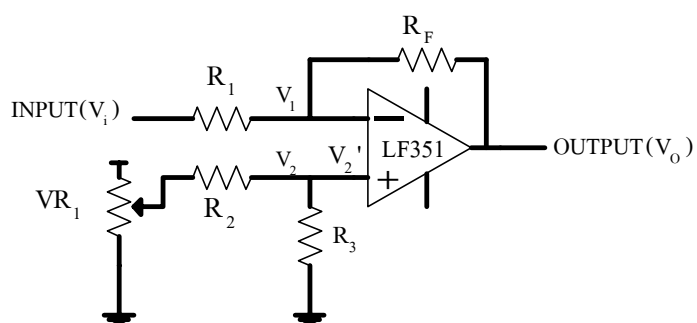
เพื่อหาร 8 ให้เหลือความถี่ 50 Hz หลังจากนั้นทำการแยกสัญญาณออกเป็นสองชุดที่กลับเฟสกัน ดังแสดงในภาพที่ 3.5 กล่าวคือเมื่อไอซี 555 กำเนิดสัญญาณความถี่ 400 Hz ผ่านเข้าไอซี 7493 นับสัญญาณความถี่ทุกๆ 16 ลูกคลื่น เข้าไอซี 7427 จะได้ลูกคลื่นออกมา 2 ลูกคลื่น ความถี่จะลดลง 8 เท่าเป็น 50 Hz ผ่านเข้าสู่ไอซี 7400 แยกสัญญาณออกเป็นสองสัญญาณที่มีเฟสตรงกันข้าม 180 องศา สัญญาณที่ได้ออกมาจะมีขนาดแรงดันที่ต่ำมากไม่เหมาะที่จะนำไปขับมอสเฟตโดยตรง จะต้องทำการขยายสัญญาณไบแอสให้แก่มอสเฟต โดยใช้วงจรขยายแบบกลับขั้วสัญญาณดังแสดงในภาพที่ 3.6 ในการออกแบบจะต้องพิจารณาทั้งแบบกลับสัญญาณและไม่กลับสัญญาณ แล้วนำมา

$$V_2' = \left[\frac{R_3}{R_2 + R_3} \right] V_2 \quad (3-6)$$

เปรียบเทียบสัญญาณกับระดับอ้างอิง โดยใช้ไอซี LF351 ตามรูปลักษณะวงจรดังภาพที่ 3.6 อาจเขียนแสดง V_2' ได้ดังสมการ (3-6)



ภาพที่ 3.5 วงจรหารความถี่



ภาพที่ 3.6 วงจรขยายแบบกลับขั้วสัญญาณ

แรงดันเอาต์พุตแบบไม่กลับเฟส

$$\begin{aligned}
 V_{\text{OUT}} &= \left[1 + \frac{R_F}{R_1} \right] V_2' \\
 &= \left[1 + \frac{R_F}{R_1} \right] \left[\frac{R_3}{R_2 + R_3} \right] V_2
 \end{aligned} \tag{3-7}$$

และในส่วนของเอาต์พุตแบบกลับเฟสจะได้

$$V_{\text{OUT}} = - \left[\frac{R_F}{R_1} \right] V_1 \quad (3-8)$$

เมื่อรวมเอาต์พุตทั้งสองจะได้

$$V_{\text{OUT}} = \left[1 + \frac{R_F}{R_1} \right] \left[\frac{R_3}{R_2 + R_3} \right] V_2 - \left[\frac{R_F}{R_1} \right] V_1 \quad (3-9)$$

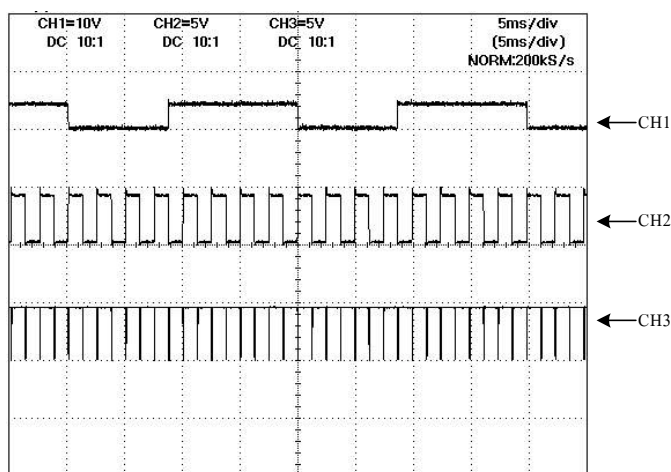
เมื่อต้องการเกณฑ์การขยาย (G) 10 เท่า ดังนั้นเลือก R_1 เท่ากับ $100 \text{ k}\Omega$

$$R_F = GR_1 \quad (3-10)$$

$$= 10 \times 100 \text{ k}\Omega = 1 \text{ M}\Omega$$

$$R_3 \approx R_F = 1 \text{ M}\Omega$$

$$R_2 \approx R_1 = 100 \text{ k}\Omega$$



ภาพที่ 3.7 สัญญาณที่ได้จากวงจรข้ามเฟส

แทนค่าในสมการที่ 3-9

$$\begin{aligned} V_{\text{OUT}} &= \left[1 + \frac{1\text{M}}{100\text{k}} \right] \left[\frac{1\text{M}}{100\text{k} + 1\text{M}} \right] 15 - \left[\frac{1\text{M}}{100\text{k}} \right] 10 \\ &= 150 - 135 = 15\text{V} \end{aligned}$$

แรงดันที่ได้จากการขยายโดยวงจร จะมีระดับสูงสุดที่ 15 V เท่ากับระดับของแรงดันอ้างอิง กราฟล่างสุด (CH3) ในภาพที่ 3.7 เป็นสัญญาณที่ออกจากขา 3 ของวงจรมัลติไวเบรเตอร์ หลังจากนั้นจะส่งสัญญาณเข้าที่ไอซี 7427 ความถี่จะลดลงดังแสดงในกราฟเส้นกลาง (CH2) และกราฟเส้นบนสุดคือสัญญาณที่ได้จากไอซี 7400 ความถี่เท่ากับ 50Hz ตามที่ต้องการเพื่อนำไปขับเกทของมอสเฟท

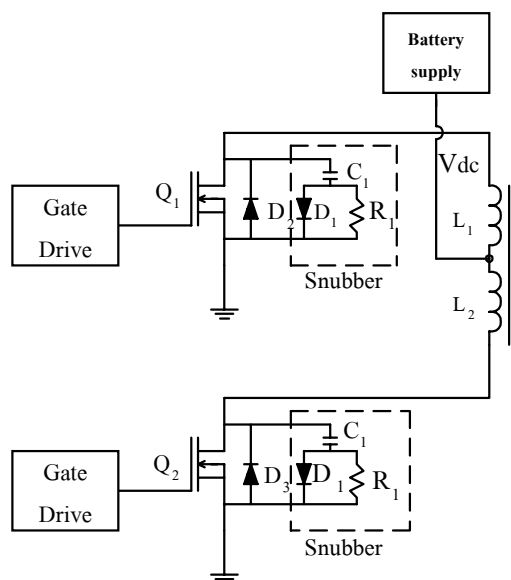
3.4 อุปกรณ์แปลงผันแรงดัน

เนื่องจากต้องป้อนแรงดัน 220 Vdc แก่มอเตอร์ขณะที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้ 48 Vdc โดยประมาณ การแปลงผันพลังงานจึงใช้การแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับก่อน แล้วจึงป้อนไฟฟ้ากระแสสลับแก่มอเตอร์แปลงแบบยกค่าขึ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ใช้วงจรรินเวอร์เตอร์ที่มีมอสเฟทเป็นอุปกรณ์สวิตช์กำลังและใช้หม้อแปลงแบบทอรอยด์ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงกล่าวถึงวงจรรินเวอร์เตอร์และหม้อแปลงไปตามลำดับ สำหรับวงจรรินเวอร์เตอร์มอสเฟทที่ใช้ต้องสามารถทนแรงดันทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่มีขนาด 48Vrms โดยประมาณได้ และเมื่อคิดค่าเพื่อที่ 2.5 เท่า มอสเฟทต้องทนแรงดันได้มากกว่า 120 Vrms และกระแส 40 A จึงเลือกใช้มอสเฟทกำลังเบอร์ IRFP460 LC ซึ่งทนแรงดันได้ถึง 500 Vrms กระแสชั่วขณะ 80 A แรงดันขาเกททนได้ $\pm 30\text{Vdc}$ (ดังมีรายละเอียดทางเทคนิคของอุปกรณ์แสดงไว้ในภาคผนวก ก) มอสเฟทจะทำหน้าที่เป็นสวิตช์ แปลงผันแรงดันกระแสตรงให้เป็นกระแสสลับก่อนเข้าสู่หม้อแปลง ดังมีแผนภาพวงจรดังรูปที่ 3.8 โดยแบ่งออกเป็น 2 ชุดแยกกันสืบตามสัญญาณกระตุ้นที่ได้จากวงจรขับเกท แต่เนื่องจากการสับไฟฟ้าของมอสเฟทในช่วงปิดกั้นกระแสนั้น จะทำให้เกิดแรงดันเพิ่มขึ้นสูงมากๆ เกินพิกัดที่มอสเฟทจะสามารถทนได้ จึงต้องระบายแรงดันออกจากอุปกรณ์สับไฟฟ้าโดยเร็วเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหาย โดยใช้วงจรที่ประกอบด้วย ความต้านทาน ตัวเก็บประจุ และไดโอด ดังที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 3.8 คำนวณขนาดของอุปกรณ์โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังที่ปรากฏใน (Pressman,1999) ได้ดังต่อไปนี้

เมื่อ I_p ในสมการ (3-11) คือกระแสสูงสุด และคำนวณได้จากสมการ (3-12) ซึ่งกำลังสูงสุดที่ระบบจะสามารถขับภาระได้ (P_{max}) ในงานวิจัยนี้คือ 800 W แรงดันป้อน Vdc มีค่าเท่ากับ

$$C_i = \frac{(I_p / 2)t_f}{2V_{dc}} \quad (3-11)$$

48 Vdc ช่วงเวลาจากเริ่มหยุดนำกระแสจนถึง t_{off} ของมอสเฟตตามพิกัดในตาราง (แสดงไว้ในภาคผนวก ฉ) มีค่าเท่ากับ 43 ns



ภาพที่ 3.8 วงจรแปลงผันแรงดันกระแสตรงให้เป็นกระแสสลับด้วยมอสเฟต

$$\begin{aligned} I_p &= \frac{3.13 P_{max}}{V_{dc}} \quad (3-12) \\ &= \frac{3.13 \times 800}{48} \\ &\approx 52 \text{ A} \end{aligned}$$

นำค่า I_p แทนลงในสมการที่ (3-11)

$$C_1 = \frac{(52/2) 43 \times 10^{-9}}{2 \times 50}$$

$$\approx 0.01 \mu\text{F}$$

และสามารถคำนวณค่าความต้านทาน R_1 ได้จากช่วงเวลา $t_{\text{on (min)}}$

$$t_{\text{on (min)}} = 3 R_1 C_1$$

$$R_1 = \frac{t_{\text{on (min)}}}{3 C_1} \quad (3-13)$$

$t_{\text{on (min)}}$ คือ ช่วงเวลาเมื่อสวิตช์เริ่มนำกระแสจนถึงช่วงกระแสสูงสุด คาบเวลาของรอบการทำงาน 50 Hz มีค่าเท่ากับ 20 ms ช่วงเวลานำกระแสจะอยู่ที่ 10 ms หากค่า R_1 โดยแทนค่าในสมการ (3-13)

$$R_1 = \frac{10 \text{ ms}}{3 \times 0.01 \mu\text{F}}$$

$$\approx 300 \text{ k}\Omega$$

เลือกใช้ความต้านทาน $R_1 = 300 \text{ k}\Omega$ เมื่อเกิดการปิดกั้นกระแสของ Q_1 D_1 จะรับกระแสย้อนกลับในทันทีผ่านเข้าสู่ C_1 และเมื่อ Q_1 นำกระแสอีกครั้ง C_1 ก็จะคายประจุผ่าน Q_1 และ R_1 และเมื่อ Q_1 ปิดกั้นกระแสในครั้งถัดมา D_1 เมื่อรับกระแสให้ผ่านตัวมันในครั้งแรกจะต้องปรับสภาพโดยเร็วให้พร้อมรับกระแสครั้งต่อไป ดังนั้นการเลือกใช้อิโอด D_1 นั้นจะต้องเป็นแบบฟื้นคืนตัวได้รวดเร็ว (fast recovery) ทนกระแสและแรงดันได้สูง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้เบอร์ 1N5401 ในการขจัดระดับแรงดันกระแสกลับ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้หม้อแปลงแบบพุก-พุกกล่าวคือหม้อแปลงจะมีขดลวดทางด้านปฐมภูมิสองขดที่พันกลับทิศทางการพันกัน ส่วนขดลวดทางด้านทุติยภูมิจะมีเพียงขดเดียว แกนหม้อแปลงที่ใช้เป็นแบบทอรอยด์ ซึ่งหม้อแปลงประเภทนี้มีความสูญเสียในแกนเหล็กต่ำกว่าแกนเหล็กโดยทั่วไป เอมิตต์พุดที่ต้องการจากหม้อแปลงคือ 220 Vrms , 800 W จำนวนรอบของขดปฐมภูมิ (N_p) คำนวณได้จากสมการ (3-14) (Pressman,1999) เมื่อ A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กทอรอยด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (A_c) มีขนาด 23 cm^2

$$N_p = \frac{(V_{\text{dc}} - 1)(0.8 T/2) \times 10^8}{A_c \text{ dB}} \quad (3-14)$$

แรงดันอินพุตต่ำสุดตามพิกัด 48 Vdc แรงดันตกคร่อม Q_1 โดยประมาณคือ 1V คาบเวลา (T) 20 ms และ ค่าการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กที่แกนหม้อแปลง (dB) สำหรับแกนทอรอยด์จะมีค่าสูงสุด ประมาณ 1600 G (gauss) (Pressman,1999) แทนค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ลงในสมการ (3-14) จะได้

$$N_p = \frac{(48-1) \left(0.8 \times \frac{20 \times 10^{-3}}{2} \right) \times 10^8}{23 \times 1600}$$

$$= 102 \text{ รอบ}$$

จำนวนรอบของขดทุติยภูมิอาจคำนวณได้ดังนี้

$$\frac{V_s}{(V_{dc} - 1)} = \frac{N_s}{N_p} \quad (3-15)$$

เมื่อ V_s คือ แรงดันกระแสตรงที่ออกจากหม้อแปลง มีค่าประมาณ $220V \times 1.414 = 311 V$ คำนวณหา N_s โดย

$$N_s = \frac{V_s}{(V_{dc} - 1)} N_p$$

$$= \frac{311}{(48-1)} \times 102$$

$$= 674 \text{ รอบ}$$

ขนาดของลวดทองแดงที่ใช้พันหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิ (N_p) คำนวณจากค่ากระแส rms ซึ่ง

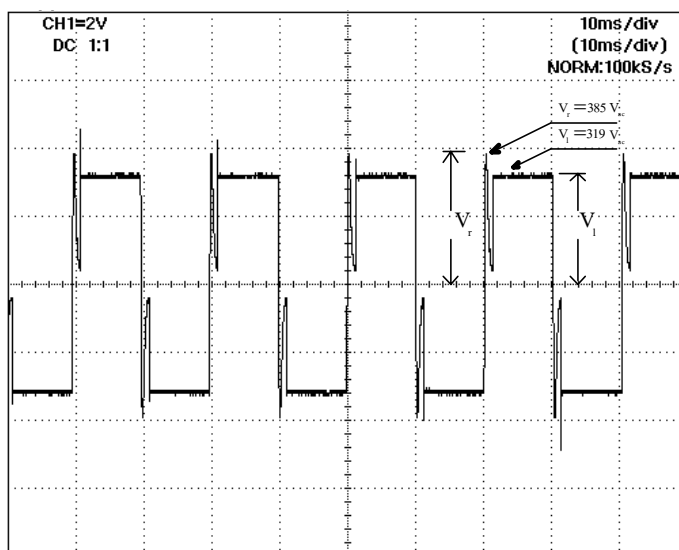
$$I_{rms} = I_p \sqrt{t_{on} / T} \quad (3-16)$$

ให้ช่วงเวลา t_{on} ของวงจรสับไฟฟ้าประมาณ 8.5 ms และคาบเวลา $T = 20$ ms แทนค่าได้ดังนี้

$$I_{rms} = 52 \times \sqrt{8.5/20}$$

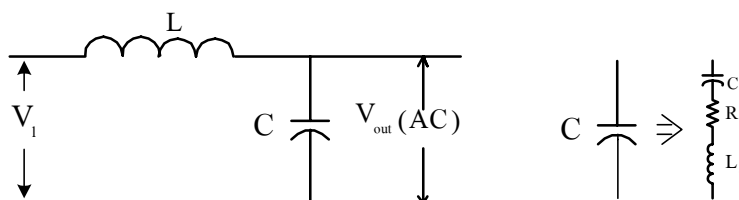
$$= 33.89 \text{ A} \approx 34 \text{ A}$$

จะเลือกใช้เส้นลวดทองแดงอาบน้ำยาสำหรับพันหม้อแปลงเบอร์ 16 AWG จะสามารถทนความหนาแน่นของกระแสได้ $240 \text{ mm}^2 / \text{A}$



ภาพที่ 3.9 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลง

เมื่อทดสอบวงจรแปลงผันแรงดันจะได้รูปคลื่นสัญญาณดังแสดงไว้ในภาพที่ 3.9 ซึ่งเป็นรูปคลื่นสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลง จะสังเกตเห็นว่าในช่วง t_{on} และ t_{off} เกิดแรงดันกระชาก V_r จากการทำงานปิดเปิด ของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่สมบูรณ์ แรงดันดังกล่าวนี้อาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าแรงดันรั่ว (leakage voltage) ที่เกิดขึ้นกับตัวอุปกรณ์สวิตซ์ขณะทำงาน ซึ่งอาจทำให้



ภาพที่ 3.10 วงจรกรองสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับและวงจรสมมูลของตัวเก็บประจุ

อุปกรณ์แปลงผันแรงดันผันเสียหาได้ จึงต้องกรองสัญญาณดังกล่าวโดยใช้วงจรกรองสัญญาณแบบ LC ดังแสดงในภาพที่ 3.10 ซึ่งค่า L สามารถคำนวณได้จากสมการ (3-17)

$$dI = 2I_{dc} = \frac{(V_1 - V_o)t_{on}}{L} \quad (3-17)$$

แต่ $V_{out} = V_1(2t_{on}/T)$ เมื่อ

$$t_{on} = \frac{V_{out} T}{2V_1}$$

แต่ t_{on} ของขดลวดทุกขดขุมมีจะประมาณ $0.8T/2$

ดังนั้น

$$t_{on} = \frac{0.8T}{2} = \frac{V_{out} T}{2V_1} \quad \text{หรือ} \quad V_1 = 1.25V_{out}$$

$$V_{out} = \frac{V_1}{1.25} = \frac{319}{1.25} = 255.2 \text{ Vac}$$

และ

$$dI = \frac{(1.25V_{out} - V_{out})(0.8T/2)}{L} = 2I_{dc} \quad \text{และ} \quad L = \frac{0.05V_{out} T}{I_{dc}}$$

โดยที่ I_{dc} เป็นช่วงกระแสเอาต์พุตปกติที่ขับเคลื่อนมอเตอร์ ที่ 220 Vdc 800 W มีค่าประมาณ 3.636 A

ดังนั้น

$$L = \frac{0.05 \times 255.2 \text{ Vac} \times 20 \text{ ms}}{3.636 \text{ A}} \approx 0.07 \text{ H}$$

คำนวณหาค่าตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุต โดยอาศัยแบบจำลองของตัวเก็บประจุที่เป็น RLC อนุกรมดังในภาพที่ 3.10 ซึ่งตัวเก็บประจุมีส่วนประกอบเป็น R_0 , C_0 และ L_0 แต่ในทางปฏิบัติ L_0 มีค่าน้อยมาก สำหรับตัวเก็บประจุชนิดอลูมิเนียมอิเล็กโทรไลติก ผลคูณ $R_0 C_0$ ประมาณ 65×10^{-6} (Pressman, 1999) ดังนั้น

$$C_o = 65 \times 10^{-6} / R_o$$

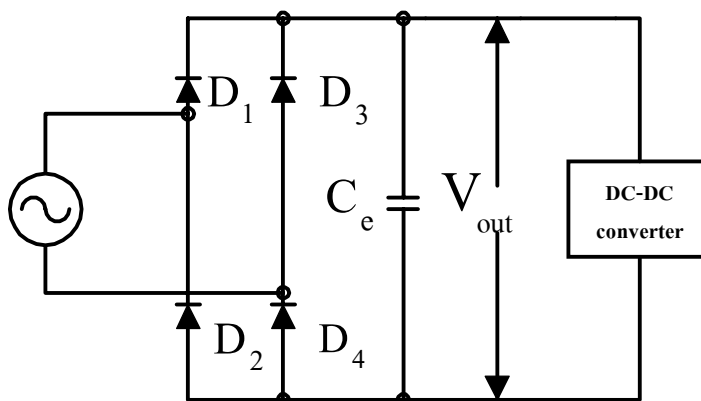
$$\text{แต่ } V_r = R_o dI$$

$$C_o = \frac{(65 \times 10^{-6})(dI)}{V_r} \quad (3-18)$$

V_r ที่ได้จากแรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลงมีค่าประมาณ 385 Vac (ดูภาพที่ 3.9) เมื่อนำมาแทนลงในสมการ (3-18)

$$\begin{aligned} C_o &= \frac{65 \times 10^{-6} (2 \times 3.636)}{385} \\ &= 1.23 \mu\text{F} \end{aligned}$$

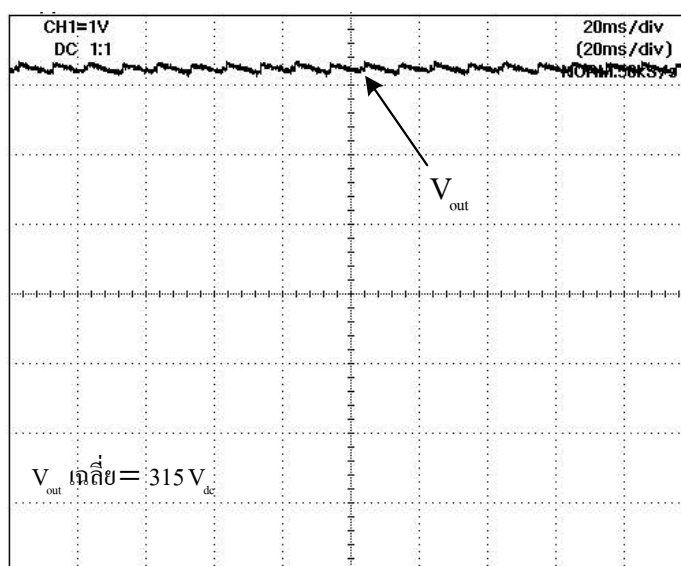
แรงดันที่ได้จะนำมาเปลี่ยนให้เป็นกระแสตรงด้วยวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น วงจรดังกล่าวจะต้องใช้ไดโอดที่สามารถทนพิกัดกระแสได้สูงถึง 20 A เป็นอย่างน้อย แรงดันที่ได้จากวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นนั้นจะมีลักษณะที่เป็นระลอกคลื่นของสัญญาณ เมื่อเทียบกับแรงดันกระแสตรง (V_{dc}) จะต้องใช้ตัวเก็บประจุ (C_c) มาปรับเรียบสัญญาณดังแสดงวงจรไว้ในภาพที่ 3.11 การออกแบบวงจรกรองสัญญาณด้วยคาปาซิเตอร์จะคำนึงถึงกำลังเอาต์พุตหากไม่เกิน 1 kW จะใช้ C ประมาณ $1.5 \mu\text{F/W}$ (Billing, 1999) ซึ่งในการวิจัยนี้กำลังสูงสุดที่ใช้งานคือ 800 W จึงสามารถเลือกใช้การประมาณดังกล่าวได้



ภาพที่ 3.11 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นปรับเรียบสัญญาณด้วย C_c

ซึ่งจะได้ค่าความจุของตัวเก็บประจุ C_c ตามการคำนวณคือ

$$800 \times 1.5 = 1200 \mu\text{F}$$

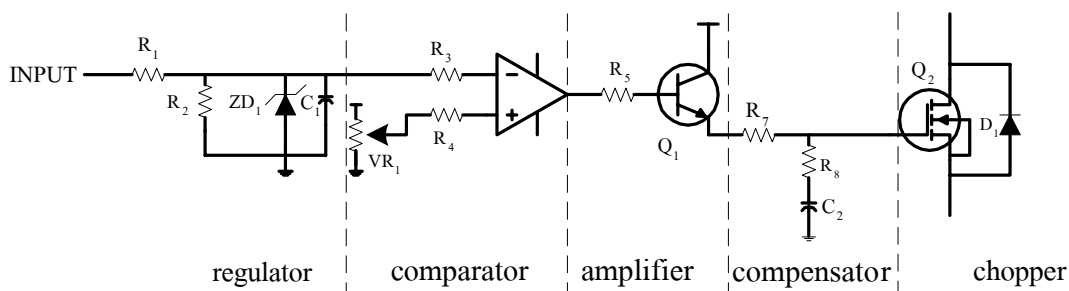


ภาพที่ 3.12 แสดงสัญญาณที่ได้จากการปรับเรียบสัญญาณด้วย C_c

เมื่อทดสอบป้อนสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลง ที่ผ่านวงจรกรองสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแล้วเข้าสู่วงจรเรียงกระแสดังภาพที่ 3.11 วัดสัญญาณ V_{out} ที่ได้ออกมาด้วยออสซิลโลสโคปผ่านไอโซเลเตอร์เพื่อแยกกราวด์ของวงจรออกจากกันและตัวคูณขยายย่านการวัด 100 เท่า สัญญาณที่ได้ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3.12 ระดับแรงดันเฉลี่ยประมาณ 315 Vdc ใช้เป็นแหล่งจ่ายสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์

3.5 อุปกรณ์ควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าในกรณีนี้ ใช้เทคนิคการควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์ที่ความเข้มสนามคงที่ องค์ประกอบของอุปกรณ์ควบคุมอาจแสดงได้ดังภาพที่ 3.13 ซึ่งประกอบด้วย 5 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ อุปกรณ์คุมค่าแรงดัน (regulator) , อุปกรณ์เปรียบเทียบสัญญาณ (comparator) , อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (amplifier) , ตัวชดเชย (compensator) และวงจรสับไฟฟ้าหรือชอปเปอร์ (chopper)



ภาพที่ 3.13 อุปกรณ์ควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์

3.5.1 อุปกรณ์รักษาและจำกัดแรงดัน

แรงดันที่ได้จากทาโคเจนเนอร์เรเตอร์มีขนาด 20 V ที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที และแรงดันอ้างอิงมีค่าสูงสุดในการควบคุมที่ 15 V ดังนั้นแรงดันที่ได้จากทาโคเจนเนอร์เรเตอร์จึงต้องไม่เกิน 15 V เช่นกัน โดยใช้วงจรจำกัดแรงดันให้มีขนาดผ่านได้สูงสุดเพียง 15 V ซึ่งความเร็วสูงสุดตามพิกัดมอเตอร์จะอยู่ที่ 3000 รอบต่อนาที แรงดันที่ได้ออกมาจะมีค่า

$$(3000\text{rpm} \times 20 \text{ V}) / 1000 \text{ rpm} = 60 \text{ V}$$

จะได้ อัตราการลดทอนแรงดัน

$$15 \text{ V} / 60 \text{ V} = 0.25$$

ฉะนั้น เมื่อพิจารณาส่วนที่เป็นวงจรจำกัดกระแส อาจเขียนแสดงความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\frac{\text{แรงดันเอาต์พุต}}{\text{แรงดันอินพุต}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{4}$$

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{4}$$

$$4R_2 = R_1 + R_2$$

$$R_1 = 4R_2 - R_2$$

$$R_1 = 3R_2$$

เลือกความต้านทาน $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ ในวงจรที่ 3.13 ส่วนที่เป็นวงจรจำกัดแรงดัน จะได้ความต้านทาน R_2 เท่ากับ $300 \text{ k}\Omega$

3.5.2 อุปกรณ์เปรียบเทียบสัญญาณ

อุปกรณ์เปรียบเทียบสัญญาณดังวงจรในภาพที่ 3.13 จะเป็นส่วนนำสัญญาณที่ได้จากวงจรจำกัดแรงดันมาตรวจสอบหรือเปรียบเทียบกับแรงดันที่ต้องการ โดยใช้ความต้านทานปรับค่าได้ (VR_1) เป็นตัวปรับแรงดันโดยมีขั้วการปรับตั้งแต่ 0 V จนถึงค่าสูงสุดที่ 15 V เพื่อปรับค่าแรงดันในการขับเคลื่อนของมอเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวขอปเปอร์ในวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ สัญญาณทั้งสองจะเข้ามาเปรียบเทียบกันที่ออปแอมป์ LF351 ค่าที่ได้คือความผิดพลาดของการควบคุม ซึ่งจะนำไปปรับกระบวนการควบคุมในการวนซ้ำครั้งต่อไป

3.5.3 อุปกรณ์ขยายสัญญาณ และวงจรชดเชย

สัญญาณค่าความผิดพลาดที่ได้ออกมาจากวงจรเปรียบเทียบในหัวข้อที่ 3.5.2 นั้น จะมีระดับแรงดันที่น้อยมากไม่สามารถนำไปขับวงจรสับไฟฟ้าหรือวงจรขอปเปอร์ได้ เนื่องจากแรงดันที่จะสามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์นั้น อยู่ในช่วง 4 V ถึง 30 V เท่านั้น สัญญาณที่ได้ออกมาจากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ มีค่าที่ต่ำกว่าที่ผู้ผลิตได้กำหนดไว้จะไม่สามารถควบคุมการสับไฟฟ้าได้ การขยายสัญญาณในขั้นตอนนี้ได้ใช้ทรานซิสเตอร์ ที่มีอัตราการทนกระแสและแรงดันไม่สูงเนื่องจากเป็นส่วนวงจรควบคุม แต่ต้องคำนึงถึงพิกัดต่างๆที่ขาเบสของมอเตอร์ จึงเลือกใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN R_5 ที่ต่อระหว่างวงจรเปรียบเทียบและขาเบสของทรานซิสเตอร์จะช่วยจำกัดการจ่ายกระแสให้แก่ทรานซิสเตอร์ไม่ให้เกินพิกัดจะทนได้ที่ 0.15 mA คำนวณค่า R_5 จากขนาดของแรงดันที่ออกจากออปแอมป์สูงสุดที่ 15 Vdc ได้ดังสมการ

$$\frac{15\text{V}}{0.15\text{mA}} = 100 \text{ k}\Omega$$

ความต้านทาน R_7 , R_8 และ C_2 เป็นองค์ประกอบของอุปกรณ์ชดเชยแบบล้าหลังชนิดวงจรไฟฟ้า ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวชดเชยเหมือนฟิโ ใช้สำหรับปรับปรุงคุณสมบัติการตอบสนองสุดท้ายและลดความคลาดเคลื่อนในการควบคุมการขับเคลื่อน โดยไม่ทำให้คุณลักษณะการตอบสนองชั่วขณะของระบบควบคุมเปลี่ยน กำหนดให้อุปกรณ์ชดเชยมีค่าอิมพีแดนซ์ Z_1 และ Z_2 อาจแสดงได้ดังนี้

$$Z_1 = R_7 \text{ และ } Z_2 = R_8 + \frac{1}{C_2 s}$$

และฟังก์ชันถ่ายโอนของอุปกรณ์ซดเซยในภาพ 3.13 อาจแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณออก $E_o(s)$ และ สัญญาณเข้า $E_i(s)$ ได้ดังนี้

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (3-19)$$

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{R_2 C_2 s + 1}{(R_1 + R_2) C_2 s + 1} \quad (3-20)$$

แทน $T = R_2 C_2$ และ $\beta = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$ โดย $\beta > 1$

อัตราขยาย β ให้มีค่า 10 และกำหนดให้ความต้านทาน $R_2 = 1 \text{ M}\Omega$ อาจคำนวณหาค่า R_1 ได้ดังนี้

$$\beta = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (3-21)$$

$$R_1 = R_2 (\beta - 1)$$

$$R_1 = 1 \text{ M}\Omega \times (10 - 1) = 9 \text{ M}\Omega$$

และจาก

$$T_c = R_2 C_2 \quad (3-22)$$

โดยค่า T_c คือ ค่าคงตัวทางเวลา ซึ่งในช่วงเริ่มออกตัวของการขับเคลื่อนที่ต้องการควบคุมให้อยู่ภายใน 3 s อาจคำนวณหาค่า C_2 ในสมการ (3-22) ได้ดังนี้

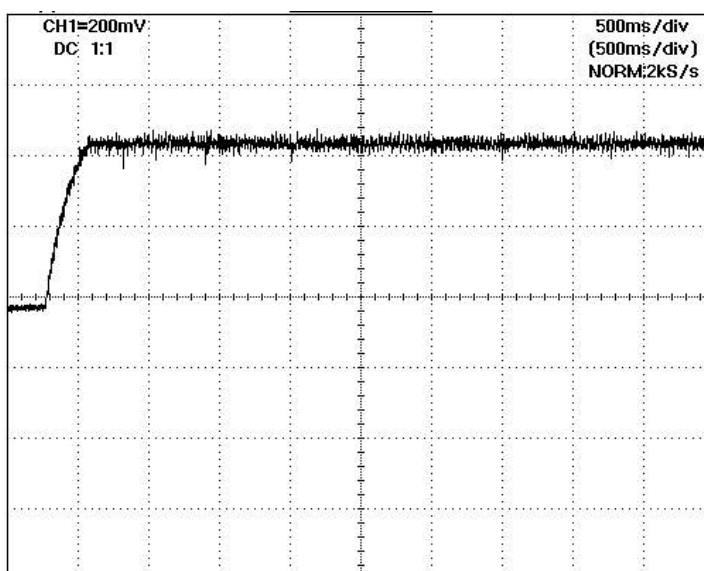
$$\begin{aligned} C_2 &\approx 3 \text{ S} / 1 \text{ M}\Omega \\ &\approx 3 \mu\text{F} \end{aligned}$$

3.5.4 วงจรสับไฟฟ้า

ชอปเปอร์หรือวงจรสับไฟฟ้าที่ใช้เป็นองค์ประกอบของวงจรในภาพที่ 3.13 ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้หม้อสเฟท เนื่องจากควบคุมการทำงานที่ขาเกตด้วยสัญญาณแรงดันซึ่งสะดวกและแม่นยำกว่าการควบคุมด้วยกระแส ขนาดพิกัดทางไฟฟ้าจะต้องสามารถทนกำลังได้สูงกว่าพิกัดของมอเตอร์ประมาณ 2.5 ถึง 3 เท่าโดยประมาณ จะได้รับสัญญาณขับเคลื่อนจากอุปกรณ์ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งแรงดันในการขับเคลื่อนนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามการควบคุมของระบบ ซึ่งเป็นแบบวงปิด เพื่อรักษาสถานะการควบคุมให้เป็นไปตามที่กำหนด ดังนั้นหม้อสเฟทจะต้องตอบสนองต่อสัญญาณการขับเคลื่อนได้รวดเร็วและแม่นยำเพื่อลดความผิดพลาด และไม่ให้เกิดการประวิงเวลาในการสับไฟฟ้าที่ยาวนาน ในงานวิจัยนี้ใช้หม้อสเฟทที่มีขนาดทนแรงดันได้ 500 V และ ทนกระแสได้ 20 A และมีอุปกรณ์ป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับหม้อสเฟท โดยมี D_1 เป็นไดโอดทนกำลังทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้หม้อสเฟทได้รับแรงดันด้านกลับจากการปิดกั้นกระแสของหม้อสเฟทขณะทำงาน

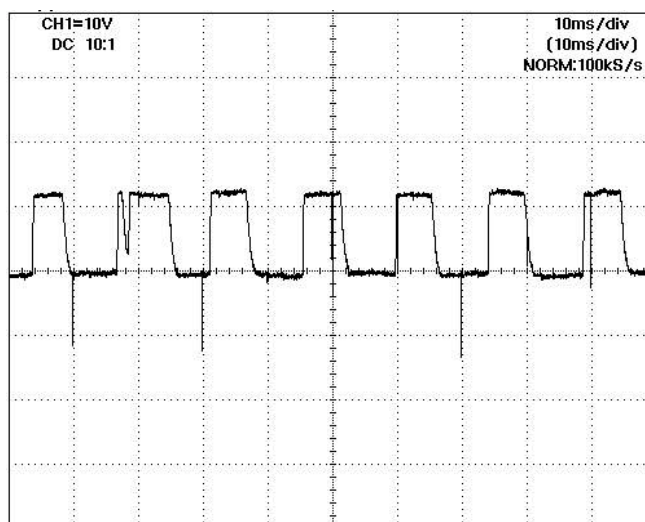
3.5.5 การทดสอบระบบขับเคลื่อน

การทดสอบระบบขับเคลื่อน อาจทำได้โดยทดสอบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิด วงจรสนามแยกส่วนที่มีขนาด 220 Vdc 800 W ซึ่งมีปั๊มน้ำชนิดแรงเหวี่ยง (centrifugal pump) ต่อ



ภาพที่ 3.14 สัญญาณเอาต์พุตที่เป็นอัตราเร็วจากการทดสอบ

อยู่กับเพลลาของมอเตอร์ ป้อนชนิดดังกล่าวมีลักษณะสมบัติ แรงบิดและความเร็วคงที่ กล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ เป็นภาระที่คงที่ไม่มีเปลี่ยนแปลงนั่นเอง ดังนั้นการควบคุมให้มอเตอร์ขับภาระตามพิกัดที่ต้องการ จึงสามารถทำได้โดยควบคุมที่แรงดันอาร์เมเจอร์และควบคุมความเข้มสนามให้คงที่ การทดสอบจะกระทำเพื่อควบคุมความเร็วที่ 2250 rpm. โดยใช้ทาโคเจนเนอร์เรเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณความเร็วรอบ สัญญาณที่ได้ออกมาเป็นแรงดันมีอัตราส่วน 1000 rpm. ต่อ 20 V เมื่อนำออสซิลอโคปที่มีตัวคูณขยายย่านการวัด x100 วัดสัญญาณจะได้ดังที่แสดงในภาพที่ 3.14 ช่วงเวลาจากหยุดนิ่งจนเข้าสู่สภาวะคงตัวของการขับเคลื่อนประมาณ 400 ms. และแรงดันในช่วงคงตัวอยู่ที่ 45 Vdc นั้นหมายถึงความเร็วในการขับภาระที่ทำได้ 2250 rpm. และเมื่อวัดสัญญาณสับไฟฟ้าของชอปเปอร์ เพื่อรักษาระดับความเร็วดังกล่าว ได้รูปคลื่นดังแสดงในภาพที่ 3.15

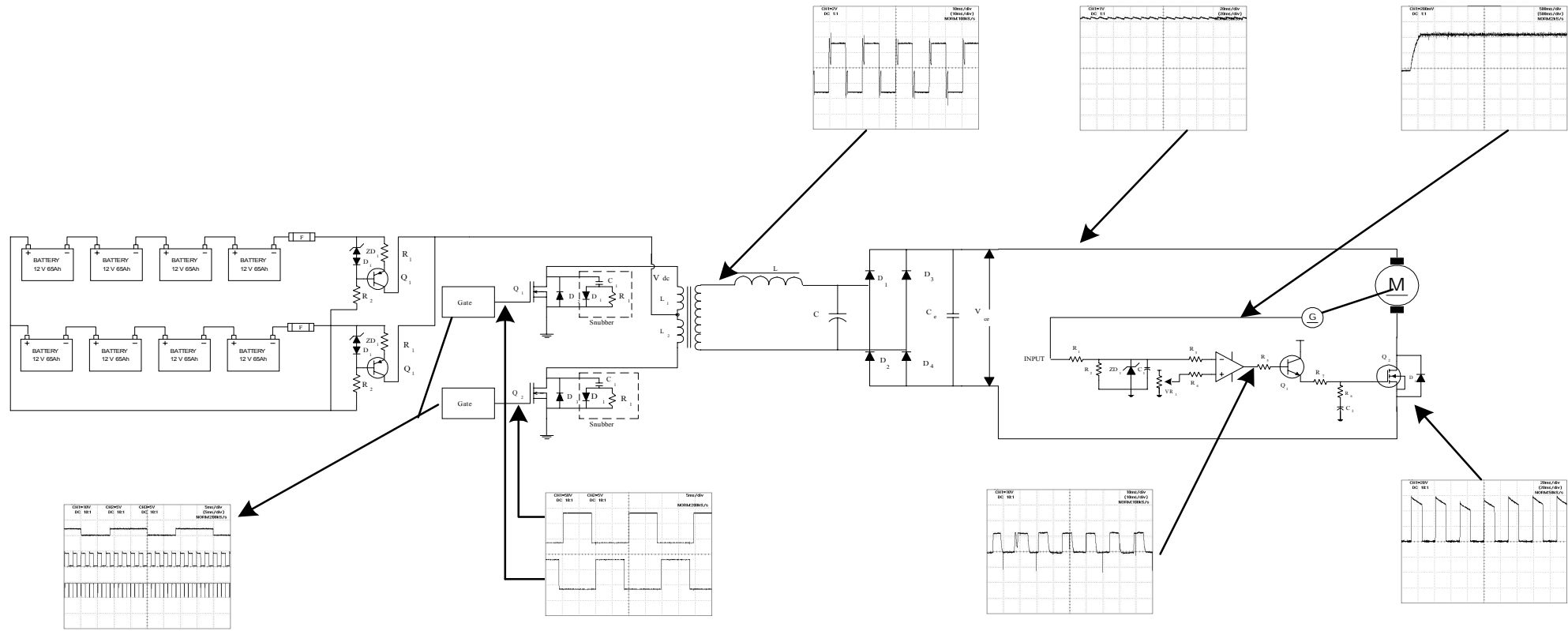


ภาพที่ 3.15 สัญญาณที่ได้จากการสับไฟฟ้าของชอปเปอร์

3.9 สรุป

การออกแบบและทดสอบระบบขับเคลื่อนดังที่ได้อธิบายผ่านมา ให้รายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์คุมค่ากระแส วงจรขับมอสเฟต อุปกรณ์แปลงผันแรงดันและอุปกรณ์ควบคุมการขับเคลื่อน อื่นๆ อุปกรณ์ต่างๆ ที่ได้ออกแบบและทำการทดสอบจะต้องนำมาทำงานให้เกิดความสัมพันธ์กันอย่างต่อเนื่อง กล่าวคือ แบตเตอรี่ที่พร้อมใช้งานมีแรงดันต่อลูก วัดได้ที่ขั้วอยู่ระหว่าง 12 Vdc ถึง 12.8 Vdc โดยประมาณ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางกายภาพของแบตเตอรี่จากผู้ผลิตนำมาต่ออนุกรมให้ได้แรงดันไม่น้อยกว่า 48 Vdc พลังงานที่ได้นำไปจ่ายให้กับอุปกรณ์แปลงผันแรงดันเพื่อเปลี่ยนจากไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับ โดยใช้วงจรที่มีมอสเฟตเป็นอุปกรณ์สับไฟฟ้า ให้เกิดไฟ

กระแสสลับตามความถี่ที่ได้รับจากวงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์ นำไฟกระแสสลับนี้ไปจ่ายให้แก่หม้อแปลงแบบพหุ-พหุที่มีอัตราส่วนขดลวดปฐมภูมิต่อทุติยภูมิเป็น 1:6 หม้อแปลงเป็นแบบทอรอยด์ใช้แกนเฟอร์ไรท์ความสูญเสียในแกนเหล็กต่ำ เพื่อยกระดับแรงดันขึ้นให้สามารถจ่ายพลังงานสูงสุดได้ 1 kW โดยประมาณ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอุปกรณ์สับไฟฟ้าด้วย แต่มอเตอร์ที่ใช้ในการวิจัยมีพิกัดที่ 220 Vdc 800 W ดังนั้นจึงต้องแปลงผันแรงดันจากกระแสสลับเป็นกระแสตรงอีกครั้ง เพื่อให้สามารถจ่ายภาระตามพิกัดได้ โดยผ่านแรงดันที่ได้จากหม้อแปลงเข้าวงจรกรองสัญญาณเพื่อป้องกันการกระชากของแรงดันที่อาจทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง และใช้วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นเรียงกระแส โดยใช้ไดโอดที่สามารถทนแรงดันและกระแสได้ 600 V 35 A ตามลำดับ ทำการปรับเรียบสัญญาณที่ได้จากวงจรเรียงกระแสด้วยคาปาซิเตอร์ขนาด 1200 μ F เพื่อให้ได้คุณภาพสัญญาณกระแสตรงที่ดีขึ้น แรงดันที่ได้จากการแปลงผันแรงดันดังกล่าวจะจ่ายให้มอเตอร์ มอเตอร์ขับภาระโดยผ่านอุปกรณ์ควบคุมการขับเคลื่อนเพื่อรักษาความเร็วและแรงบิดตามที่ต้องการ ซึ่งมีสัญญาณป้อนกลับจากตัวตรวจวัดความเร็ว เข้ามาเปรียบเทียบกับระดับความเร็วที่ต้องการสัญญาณที่ได้ จะนำไปสร้างสัญญาณขับเคลื่อนมอเตอร์ของวงจรชอปเปอร์ให้สับไฟฟ้าควบคุมระดับแรงดันที่จ่ายให้วงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ ภาพที่ 3.16 แสดงความสัมพันธ์ของชุดอุปกรณ์ต่างๆของระบบขับเคลื่อนที่ได้พัฒนาขึ้น



ภาพที่ 3.16 แผนภาพวงจรระบบขับเคลื่อน

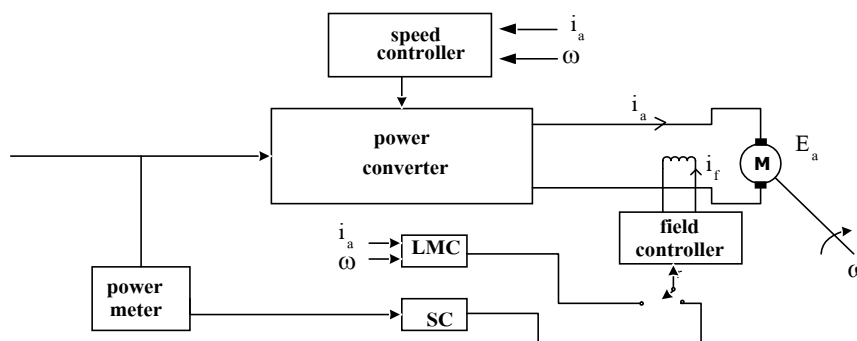
บทที่ 4 การลดความสูญเสียของมอเตอร์

4.1 บทนำ

การขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เกิดความสูญเสียน้อยที่สุดนั้น เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งในสถานะที่พลังงานมีอยู่จำกัด ดังเช่นในการวิจัยนี้ พลังงานที่จ่ายให้มอเตอร์ได้มาจากแบตเตอรี่ ซึ่งลักษณะสมบัติมีการถดถอยของพลังงานที่ประจวบอยู่ภายใน ส่งผลต่อสมรรถนะของระบบขับเคลื่อน และอาจทำให้ความสูญเสียในมอเตอร์เพิ่มมากขึ้นกว่าที่ควรจะเป็น ดังนั้นการควบคุมพลังงานทั้งวงจรสนามและวงจรรอาร์เมเจอร์ จึงเป็นแนวทางหนึ่งในหลายๆแนวทางที่จะลดความสูญเสียที่เกิดขึ้น และอาจส่งผลให้แบตเตอรี่จ่ายพลังงานได้ยาวนานขึ้น บทนี้จึงได้อธิบายถึงแนวคิดการลดความสูญเสียของมอเตอร์ ที่ได้มีการวิจัยมาก่อนแล้วและการหาแบบจำลองควบคุมความสูญเสีย ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งที่จะกำหนดความเหมาะสมของพลังงานที่จ่ายให้มอเตอร์ รวมทั้งได้กล่าวถึงการทดสอบระบบโดยรวมเปรียบเทียบกับผลการจำลองผล

4.2 แนวคิดการลดความสูญเสียของมอเตอร์ในการขับภาระ

Margaris, Goutas, Doutas, Doulgeri, and Paschali (1991) ได้นำเสนอวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงอย่างเหมาะสม เพื่อให้เกิดความสูญเสียน้อยที่สุด โดยใช้เทคนิคแบบแอนาล็อกหรือ ดิจิตอล ในการควบคุมความสูญเสียที่จะเกิดขึ้น เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก ไม่ซับซ้อนและสะดวกต่อการนำไปใช้ในการขับเคลื่อนกระแสตรง



ภาพที่ 4.1 การควบคุม แบบสองทางเลือก คือ LMC และ SC

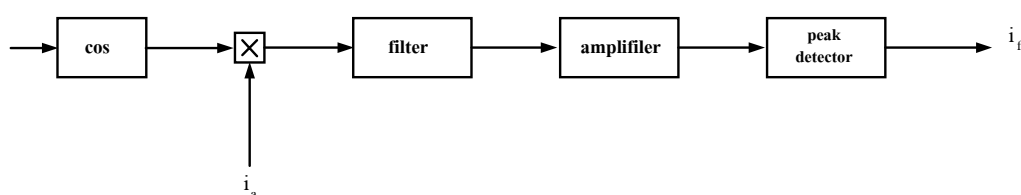
การกระตุ้นสนามที่มากเกินไปจะก่อให้เกิดความสูญเสียในสนามแม่เหล็กมากขึ้นตามกระแสที่ใช้ในการกระตุ้น ซึ่งการปรับการกระตุ้นนี้ไม่ทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลงได้มีแนวทางการควบคุมสองแบบด้วยกันดังแสดงในภาพที่ 4.1 ซึ่งเป็นแผนภาพบล็อกของการควบคุมมอเตอร์ด้วยตัวควบคุมการจ่ายพลังงานขดลวดวงจรสนาม ที่อาจใช้ตัวควบคุมที่อยู่บนพื้นฐานของแบบจำลองตัวควบคุมความสูญเสีย (loss model controller : LMC) เป็นแนวทางแรก หรืออาจเลือกใช้ ตัวควบคุมแบบค้นหา (search controller:SC)

LMC ใช้การวัดความเร็ว (ω) และกระแสอาร์เมเจอร์ (i_a) เพื่อกำหนดแบบจำลองความสูญเสีย แล้วนำไปหาค่าการกระตุ้นสนามที่เหมาะสม ส่วนวิธี SC นั้นจะวัดกำลังงานที่จ่ายเข้ามาให้แก่อุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์และหาค่าที่เหมาะสมเพื่อควบคุมการกระตุ้นสนามแม่เหล็กขดลวดวงจรสนาม แต่วิธีการนี้เป็นที่นิยมน้อยมาก เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดพลังงานมีราคาแพง

LMC มีสองวิธีการแยกย่อยออกไป วิธีการแรกใช้การคำนวณโดยตรงในการกำหนดเงื่อนไขการลดความสูญเสีย วิธีการที่สองใช้ตารางเปรียบเทียบค่าและค่าที่เหมาะสมจากตารางในการกระตุ้นสนามแม่เหล็กให้เหมาะสมกับค่าฟังก์ชันของการทำงานสัมพันธ์กับภาระ

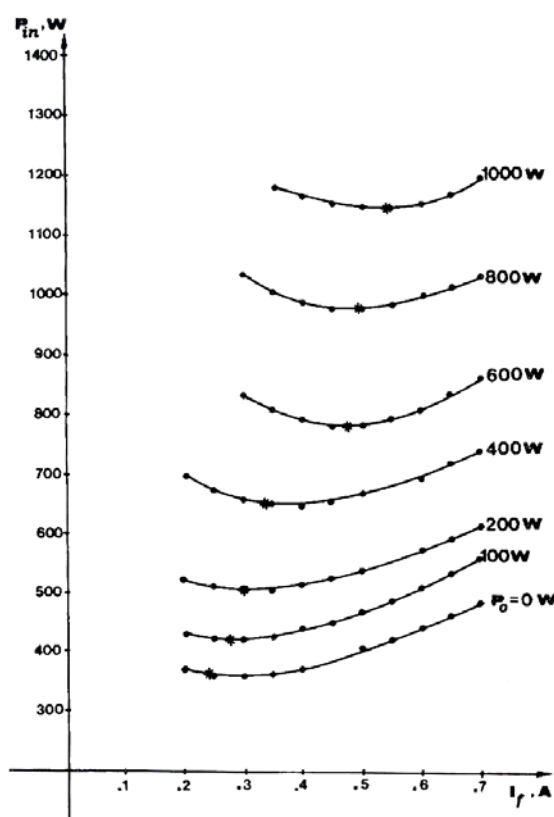
ในวิธีการคำนวณโดยตรงนั้น จะต้องทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความสูญเสียแล้วจึงทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแบบจำลอง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะได้มาจากการวิเคราะห์สภาวะการเกิดความสูญเสียในแต่ละส่วนของมอเตอร์ แล้วทำการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ต่างๆด้วยกระแสที่ใช้ในการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก เพื่อหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนกระแสจอร์อาร์เมเจอร์อย่างเหมาะสม สมการ (4-1) ตามวิธี LMC เป็นสมการของตัวกรองสัญญาณมีฟังก์ชันถ่ายโอนที่ประกอบด้วยฟังก์ชันของความสูญเสียปลีกย่อย และความสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์อาจนำมาควบคุมการกระตุ้นกระแสในระดับที่เหมาะสม ตามที่กำหนดไว้จากการคำนวณออกแบบการควบคุม

$$G_{opt}(s) = \frac{T_s s + 1}{T_{Fe} s + 1} \quad (4-1)$$



ภาพที่ 4.2 วิธีการ LMC ที่ใช้ตัวกรอง $G_{opt}(s)$

ในเชิงโครงสร้าง วิธีการ LMC ประกอบด้วย ส่วนขยาย (amplifier), ตัวกรอง (filter), และ ตัวตรวจวัดค่ายอด (peak detector) (ดูภาพที่ 4.2) ส่วนสัญญาณอินพุตอาจมีความถี่เท่ากับความเร็วของมอเตอร์ นำสัญญาณของกระแสอาร์เมเจอร์เข้ามาเปรียบเทียบ ผลที่ได้ออกมาจากตัวตรวจวัดค่ายอด คือค่าการกระตุ้นที่เหมาะสมสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงพลังงานวงจรอาร์เมเจอร์ตามที่ได้ตั้งค่าเพื่อทำการควบคุม ภาพที่ 4.3 แสดงผลที่ได้จากการควบคุมความสูญเสีย (Margaris et al., 1991) ด้วยการปรับเปลี่ยนกระแสกระตุ้นที่ขดสนามให้ได้สัดส่วนที่เหมาะสม กับการเปลี่ยนแปลงแรงดันวงจรอาร์เมเจอร์ เมื่อภาระของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงขนาด เส้นกราฟจะมีลักษณะแอ่นลงแล้ว



ภาพที่ 4.3 เปรียบเทียบระหว่างกำลังเฉลี่ยที่ใช้ในการขับภาระ กับกระแสที่ใช้ในการกระตุ้นวงจรสนามที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที ของมอเตอร์ขนาด 1 กิโลวัตต์

ค่อยๆมีค่าสูงขึ้นอีกเมื่อเปลี่ยนระดับกระแสกระตุ้น จุดที่เส้นกราฟมีค่าต่ำที่สุดนั้นหมายถึงมอเตอร์ทำงานด้วยความสูญเสียน้อยที่สุด กล่าวอีกนัยหนึ่งคือการกระตุ้นวงจรสนามมีค่าเหมาะสมที่สุด สัมพันธ์กับการใช้พลังงานของวงจรอาร์เมเจอร์ให้ขับภาระได้อย่างประหยัด โดยชุดอุปกรณ์จะ

ตรวจวัดสัญญาณต่างๆนำเข้ามาประมวลผลที่อุปกรณ์ LMC เพื่อปรับขนาดกระแสกระตุ้นที่เหมาะสมกับภาระนั้นๆทำให้เกิดความสูญเสียในระบบน้อยที่สุดและประสิทธิภาพจึงสูงขึ้น

Kusko, and Galler(1983) ได้ทำการศึกษาและวิจัยแนวคิดนี้มาก่อนแล้วเช่นกัน ซึ่งเป็นการควบคุมทั้งทางด้านวงจรรีเลย์และวงจรมอเตอร์ ด้วยการหาความสัมพันธ์ของการปรับพลังงานอย่างเหมาะสม เกิดความสูญเสียน้อยที่สุดและได้มีผู้นำมาพัฒนาและอ้างถึงอยู่บ่อยครั้ง ในบทความที่กล่าวมาแล้วนี้ก็เช่นกัน จึงเป็นที่น่าสนใจนำแนวคิดนี้มาวิจัยและพัฒนาต่อ

4.3 แบบจำลองควบคุมความสูญเสีย[Margaris,Goutas,Doutas,Doulgeri, and Paschali ,1991]

การหาแบบจำลองควบคุมความสูญเสียนั้น ต้องพิจารณาสมการความสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดวงจรมอเตอร์แยกส่วน ซึ่งประกอบด้วยความสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลเข้าสู่ขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ อาจแสดงได้ด้วยสมการดังนี้

$$P_{cu} = R_a i_a^2 + R_f i_f^2 \quad (4-2)$$

สมการความสูญเสียในแกนเหล็กเกิดจากกระแสไหลวนและความสูญเสียจากฮิสเตอร์รีซิสเป็นดังนี้

$$P_{Fe} = m\sigma_f \left(\frac{f}{100}\right)^2 \left(\frac{B}{1}\right)^2 + m\sigma_h \left(\frac{f}{100}\right) \left(\frac{B}{1}\right)^2 \quad (4-3)$$

ในสมการที่ (4-3) เป็นการยากที่จะทำการทดสอบหาลักษณะสมบัติของความสูญเสียดังกล่าว ซึ่งมักเกิดขึ้นพร้อมกัน กล่าวคือเมื่อทำการทดสอบหาความสูญเสียจะได้ออกมาเป็นทอมเดียวดังนี้

$$P_{Fe} = mP_{[1/50]} \left(\frac{f}{50}\right)^x \left(\frac{B}{1}\right)^2 \quad (4-4)$$

เมื่อ $P_{[1/50]}$ หมายถึง ความสูญเสียต่อหนึ่งหน่วยมวล เมื่อความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก 1T และความถี่สนามแม่เหล็ก 50 Hz ค่าของ x เป็นจำนวนเต็มอาจมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 2 ส่วนความถี่สนามแม่เหล็ก f จะสัมพันธ์กับอัตราเร็วเชิงมุม (ω) ดังแสดงในสมการดังนี้

$$f = \frac{P\omega}{2\pi} \quad (4-5)$$

ความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก B สัมพันธ์กับเส้นแรงแม่เหล็ก φ จากสมการ

$$B = \frac{\varphi}{\delta} = \frac{\varphi}{2\lambda\pi r\ell} \quad (4-6)$$

มวลแกนเหล็กของโรเตอร์ (m) หาได้จากปริมาตรและความหนาแน่นของเหล็กที่เป็นองค์ประกอบของโรเตอร์ อาจแสดงได้ด้วยสมการดังนี้

$$m = k_v dV = k_v d\pi r^2 \ell \quad (4-7)$$

เมื่อ k_v คือ ปริมาตรของโรเตอร์ส่วนที่วัสดุทำด้วยเหล็ก (iron)

แทนค่าสมการ (4-5)-(4-7) ในสมการที่ (4-2) และ (4-3) ตามลำดับจะได้

$$P_{Fe} = c_r \omega^2 \varphi^2 + c_h \omega \varphi^2 \quad (4-8)$$

และ

$$P_{Fe} = c_{Fe} \omega^x \varphi^2 \quad (4-9)$$

เมื่อ $c_{Fe} \omega^x = c_r \omega^2 + c_h \omega$

กำหนดให้

$$c_r = kd\sigma_r \frac{p^2}{16 \times 10^4 \pi^3 \lambda^2 \ell} \quad (4-10)$$

$$c_h = kd\sigma_h \frac{p}{8 \times 10^2 \pi^2 \lambda^2 \ell} \quad (4-11)$$

และ

$$c_{Fe} = \frac{kd}{4\pi\lambda^2\ell} \left(\frac{P}{100\pi} \right) \times P_{[1/50]} \quad (4-12)$$

จากสมการที่กล่าวมาข้างต้นความสูญเสียในแกนเหล็ก จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆของโรเตอร์ รวมทั้งจำนวนของคู่ขั้ว และความยาวของโรเตอร์ ส่วนความสูญเสียปลั๊กย่อยที่เกิดขึ้นในส่วนของขดลวดและแกนเหล็กของมอเตอร์แสดงด้วยสมการ (P_s)

$$P_s = c_s i_a^2 \omega^2 \quad (4-13)$$

ซึ่งอาจมีค่าประมาณ 0.5 % ถึง 1% ของความสูญเสียทั้งหมด
ความสูญเสียทางกล เป็นความสูญเสียในฟังก์ชันของความเร็ว (ω) แสดงด้วยสมการ (P_m)

$$P_m = f(\omega) \quad (4-14)$$

ความสูญเสียทั้งหมด P_l จะอยู่ในฟังก์ชันความสูญเสียของแกนเหล็ก

$$P_l = R_a i_a^2 + R_f i_f^2 + c_{Fe} \omega^x + c_s \omega^2 i_a^2 + f(\omega) \quad (4-15a)$$

หรือ

$$P_l = R_a i_a^2 + R_f i_f^2 + (c_f \omega^x + c_h \omega^2) + c_s \omega^2 i_a^2 + f(\omega) \quad (4-15b)$$

โดยจะพิจารณาในสถานะคงตัว กล่าวคือมอเตอร์จะทำงานที่ความเร็วและแรงบิดคงที่ ดังนั้นสถานะที่ทำให้เกิดความสูญเสียต่ำสุด อาจแสดงได้ด้วยสมการดังนี้

$$\left. \frac{\partial P_l}{\partial i_f} \right|_{T_m, \omega} = 0 \quad (4-16)$$

ลักษณะสมบัติของการเกิดสนามแม่เหล็กของมอเตอร์และแบบจำลองความสูญเสียที่สมมุติขึ้น จะเป็นส่วนที่นำมาพิจารณาในแบบจำลองตัวควบคุมความสูญเสียด้วย หรืออีกนัยหนึ่งความสูญเสียในการขับภาระอาจลดลงได้น้อยที่สุดเมื่อการกระตุ้นลดลงอย่างเหมาะสม ซึ่งสนามแม่เหล็กจะแปรผันตามกระแสกระตุ้นมีลักษณะสมบัติเป็นเชิงเส้นแสดงไว้ในสมการที่ (4-17)

$$\varphi = \alpha i_f \quad (4-17)$$

จากสมการที่ (4-15) – (4-17) อาจได้ฟังก์ชันสถานะความสูญเสียสำหรับการขับภาระ ที่อัตราเร็ว และแรงบิดคงที่แสดงได้ดังนี้ (รายละเอียดให้ไว้ในผนวก ก.)

$$(R_a + c_s \omega^2) i_a^2 = (R_f + c_{Fe} \omega^2) i_f^2 \quad (4-18a)$$

และ

$$(R_a + c_s \omega^2) i_a^2 = (R_f + (c_f \omega^2 + c_h \omega)) i_f^2 \quad (4-18b)$$

ในสมการที่ (4-18) แสดงสถานะความสูญเสียที่ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของกระแสอาร์เมเจอร์และกระแสกระตุ้น ซึ่งจะเป็นสถานะความสูญเสียต่ำสุด ค่าตัวแปร x ในสมการ (4-18a) อาจเป็นจำนวนเต็มมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 (Magaris et al., 1991) แทนในสมการ 4-18 หาค่ากระแสกระตุ้นได้ดังนี้

$$i_f = i_a k \sqrt{\frac{T_s^2 \omega^2 + 1}{T_{Fe}^2 \omega^2 + 1}} \quad (4-19)$$

เมื่อ

$$k = \sqrt{\frac{R_a}{R_f}}$$

$$T_{Fe} = \alpha \sqrt{\frac{c_{Fe}}{R_f}}$$

$$T_s = \sqrt{\frac{c_s}{R_a}}$$

สมการที่ (4-19) (แสดงรายละเอียดให้ไว้ในผนวก ข.) เป็นส่วนที่จะใช้หาค่าการกระตุ้นตามวิธี LMC เมื่อพิจารณาทางด้านขวาของสมการจะเห็นว่าฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับหนึ่งอยู่ ดังแสดงไว้ในสมการที่ (4-20)

$$G_{\text{opt}}(s) = \frac{T_s + 1}{T_{Fe} s + 1} \quad (4-20)$$

$G_{\text{opt}}(s)$ คือ ตัวกรองแบบผ่านต่ำ สมการ (4-18b) อาจแยกความสูญเสียของแกนเหล็กออกเป็นความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (c_f) และความสูญเสียฮิสเทอรีซิส (c_h) นำมาหาค่า i_f

$$i_f = i_a \sqrt{\frac{c_s \omega^2 + R_a}{\alpha^2 (c_f + c_h / \omega) \omega^2 + R_f}} \quad (4-21)$$

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนตัวกรองสัญญาณตามวิธี LMC แสดงได้ดังนี้

$$G_{\text{app}}(s) = \frac{T_s + 1}{T(\omega)s + 1} \quad (4-22)$$

กำหนดให้

$$T_s = \sqrt{c_s / R_a}$$

$$T(\omega) = \alpha \sqrt{(c_f + c_h / \omega) / R_f}$$

จากตัวกรองสัญญาณดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น อาจได้สมการแบบจำลองตัวควบคุมความสูญเสียในฟังก์ชันของ T_{Fe} และ $T(\varepsilon)$ แสดงไว้ดังนี้

$$i_f = i_a k \left| \frac{T_s + 1}{T_{Fe} s + 1} \right| \quad (4-23a)$$

$$i_f = i_a k \left| \frac{T_s + 1}{T(\omega)s + 1} \right| \quad (4-23b)$$

4.4 ค่า k ของสมการแบบจำลองควบคุมความสูญเสีย

วิธี LMC ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมาไม่สามารถจะใช้ได้กับมอเตอร์ทุกขนาด เพราะมอเตอร์ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ความสูญเสียน้อยอยู่แล้วรวมทั้งมอเตอร์ที่มีกำลังม้าต่ำจนถึงปานกลาง ความสูญเสียปลีกย่อยจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความสูญเสียในส่วนอื่น จึงไม่นำ T_s จากสมการที่ (4-23) มาพิจารณา สมการแบบจำลองควบคุมความสูญเสียจึงประกอบไปด้วย กระแสจอร์สนาม กระแสจอร์อาร์เมเจอร์ ค่า k และฟังก์ชันถ่ายโอนตัวกรองแบบผ่านต่ำ อาจแสดงได้ดังนี้

$$i_f = i_a k \left| \frac{1}{T_{Fe} s + 1} \right| \quad (4-29)$$

ซึ่งมอเตอร์ที่มีกำลังม้าต่ำมากๆ มวลของแกนเหล็กของโรเตอร์จะน้อยมากเช่นกัน ดังนั้นความสูญเสียในแกนเหล็กจะมีผลน้อยเมื่อเทียบกับความสูญเสียในขดลวด อาจได้สมการเพื่อหาค่ากระแสกระตุ้นที่เหมาะสมต่อการขับเคลื่อนแสดงได้ดังนี้

$$i_f = k i_a \quad (4-30)$$

ค่า k อาจหาได้จากการทดสอบล่อกรโเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยที่มีขนาด 800 W โดยทดสอบ 3 ครั้งที่แรงดันต่างๆ ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ได้ความต้านทาน R_a เนื่องจากการ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานวงจอร์อาร์เมเจอร์

ลำดับที่	แรงดัน (V)	กระแส (V)	ความต้านทาน(Ω)
1	5	0.8	6.25
2	10	1.5	6.66
3	15	2.3	6.52

ทดสอบเป็น 6.47 Ω และทดสอบหาความต้านทาน R_f โดยปฏิบัติการวัดความต้านทานโดยตรง ที่วงจอร์สนามของมอเตอร์จะมีค่า 210 Ω เมื่อได้ความต้านทานทั้งขดลวดวงจอร์อาร์เมเจอร์และวงจอร์สนาม นำมาหาอัตราส่วนการปรับกระแส (k) ตามสมการ (4-19)

$$\begin{aligned}
 k &= \sqrt{R_a / R_f} \\
 &= \sqrt{6.47/210} \\
 &\approx 0.18
 \end{aligned}$$

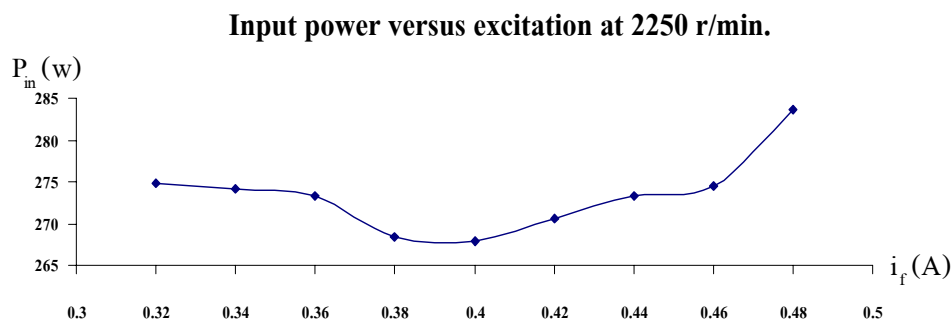
ค่า k ที่ได้จากการคำนวณดังกล่าวจะเป็นอัตราส่วนของการปรับกระแสกระตุ้นที่สัมพันธ์กับกระแสอาร์มเจอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ในการวิจัยตามวิธี LMC เมื่อนำมอเตอร์มาทำการทดสอบที่ระดับความเร็ว 2250 rpm คงที่และปรับเปลี่ยนกระแสกระตุ้นค่าต่างๆ โดยค่อยๆทำการปรับจากค่าพิกัดสูงสุดจนถึงต่ำสุดที่มอเตอร์ยังคงขับเคลื่อนได้ ผลการทดสอบอาจแสดงได้ด้วยตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยการลดกระแสวงจรมอเตอร์

V_b (V)	i_r (A)	V_T (V)	V_a (V)	I_a (A)	V_f (V)	I_f (A)	V_{TG} (V)	N(rpm)	P_{in} (W)
49.3	13.5	49.3	191.7	1.48	203.4	0.48	45	2250	283.7
47	13.5	47	187.9	1.46	196.8	0.46	45	2250	274.3
47	13.8	47	184.7	1.48	189.9	0.44	45	2250	273.3
46.8	14	46.8	180.4	1.50	181.6	0.42	45	2250	270.6
46.8	14.2	46.8	176.2	1.52	171.8	0.40	45	2250	267.8
46.5	14.6	46.5	172.0	1.56	163.4	0.38	45	2250	268.3
46.5	15	46.5	166.7	1.64	155.0	0.36	45	2250	273.3
46.5	15.6	46.5	161.3	1.70	144.8	0.34	45	2250	274.2
45	15	45	157	1.75	142.7	0.32	45	2250	274.7

เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P_{in} และ i_r จะได้เส้นกราฟที่มีลักษณะแอ่นกลาง ตำแหน่งที่เส้นกราฟต่ำสุดในภาพที่ 4.4 นั้นคือสถานะที่มอเตอร์ขับภาระ เกิดสถานะความสูญเสียต่ำสุด (loss minimization condition) ซึ่งตามวิธีการ LMC ณ จุดนี้กระแสกระตุ้นวงจรมอเตอร์จะมีค่า 0.4 A และ กระแสวงจรมอเตอร์มีค่า 1.52 A อาจนำมาคำนวณหาค่า k ตามสมการที่ (4-30) ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากสมการที่ (4-19) ได้โดย $k = 0.4 / 1.52 = 0.26$ แต่ผลที่ได้จากการคำนวณและทดสอบระบบมีความแตกต่างกัน ซึ่งอาจเกิดความผิดพลาดจากเครื่องมือวัด สถานะการทดสอบและอุณหภูมิ ในขณะที่ปฏิบัติที่มีผลต่อการทำงานของมอเตอร์ อนึ่ง เมื่อทดสอบได้ค่ากระแส

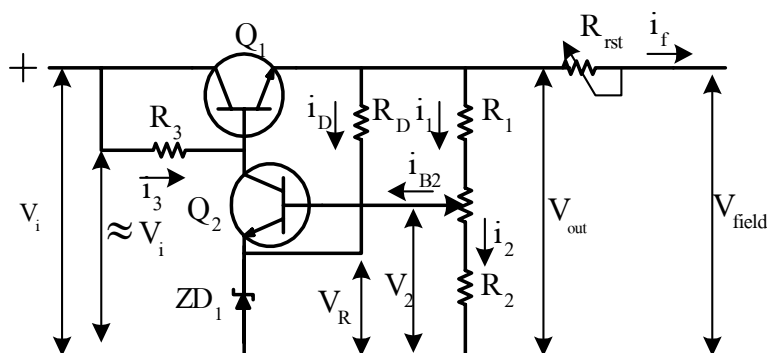
กระตุ้นที่เหมาะสมในการขับภาระของมอเตอร์แล้ว อาจใช้อุปกรณ์ควบคุมแรงดันและกระแส วงจรสนามรักษาระดับการกระตุ้นดังกล่าว เพื่อให้ระบบทำงานในจุดที่เกิดความสูญเสียน้อยที่สุด



ภาพที่ 4.4 ผลการทดสอบปรับค่ากระแสสนาม เปรียบเทียบกับ P_{in}

4.5 อุปกรณ์ควบคุมแรงดันและกระแสวงจรมอเตอร์

จากแนวคิดเกี่ยวกับการลดความสูญเสียของมอเตอร์ในการขับเคลื่อนภาระ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น ตามวิธี LMC จะต้องควบคุมกระแสที่จ่ายให้แก่จอร์อาร์เมเจอร์สัมพันธ์กับกระแสที่ให้แก่วงจรสนาม เพื่อให้เกิดการใช้พลังงานในการขับภาระได้อย่างเหมาะสม การควบคุมดังกล่าวใช้วงจรดังภาพที่ 4.5 ซึ่งแสดงวงจรควบคุมแรงดันและกระแสวงจรมอเตอร์ แบบคงค่าแรงดันอนุกรม



ภาพที่ 4.5 วงจรควบคุมแรงดันและกระแสวงจรมอเตอร์

(series voltage regulator) หากแรงดันอินพุตเพิ่มขึ้นเกินระดับที่วงจรทางด้านเอาต์พุตต้องการ แรงดัน V_2 จะเปรียบเทียบกับแรงดัน V_R ซึ่งความแตกต่างของแรงดัน ($V_2 - V_R$) คืออัตราขยายของ Q_2 ถ้าแรงดันอินพุตเพิ่มขึ้นเนื่องจากแหล่งจ่ายแรงดันเอาต์พุต (V_{out}) จะเพิ่มขึ้น แต่ไม่เกินค่าที่กำหนดและ Q_2 ยังคงทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงของกระแสผ่าน R_3 กล่าวคือแรงดันทั้งหมดทาง

ด้านเอาต์พุตจะตกคร่อม R_3 ส่วนแรงดันที่ขาเบสและอีมีเตอร์มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงดันที่ R_3 ส่วนแรงดันเอาต์พุต V_{out} ที่ได้จะมีค่าเกือบคงที่ อาจจะมีควมผิดพลาดบ้างเล็กน้อย อันเนื่องมาจากอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบวงจรในส่วนต่างๆ จากภาพที่ 4.5 แรงดันเอาต์พุต V_{out} อาจคำนวณได้ดังนี้

$$V_{out} = (V_R + V_{BE2}) + (1 + \frac{R_1}{R_2}) \quad (4-31)$$

จากการทดสอบ โดยการปรับกระแสวงจรมตามดังตารางที่ 4.1 จนถึงค่าต่ำสุดที่วงจรมไม่สามารถจะทำให้เกิดความเข้มนามแม่เหล็กเพียงพอที่จะขับภาระได้ ซึ่งจากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ค่ากระแสกระตุ้นต่ำสุดอยู่ที่ 0.3 A ช่วงที่ทำให้ระบบสูญเสียต่ำสุดค่าของกระแสและแรงดันจะอยู่ที่ ประมาณ 171.8 V 0.4 A ดังนั้นการออกแบบวงจรจะต้องจำกัดแรงดันเอาต์พุตไม่ให้เกินพิกัดของมอเตอร์ที่ 220 Vdc ก่อนที่จะควบคุมกระแสและแรงดันตามค่าที่ต้องการ โดยคำนวณแรงดันตกคร่อมซีเนอร์ไดโอด (V_R) ให้มีค่าครึ่งหนึ่งของแรงดันเอาต์พุตดังแสดง

$$\begin{aligned} V_R &\approx \frac{220}{2} \\ &\approx 110 \text{ V} \end{aligned}$$

กำหนดให้ $i_{c2} \approx i_{E2} \approx 10 \text{ mA}$ เป็นกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ Q_2 อาจเลือกใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3584 มีค่า $h_{FE} = 35.9$ ทนแรงดันและกระแสได้ 300 V 3A ตามลำดับกระแสที่ไหลผ่าน R_D ในวงจรกำหนดให้ $i_D \approx i_1 \approx 5 \text{ mA}$ โดยประมาณ

$$R_D = \frac{V_{out} - V_R}{i_D} = \frac{220 - 110}{5 \text{ mA}} = 22 \text{ k}\Omega$$

$$i_{E2} = \frac{i_{c2}}{h_{FE2}} = \frac{10 \text{ mA}}{39.5} = 0.253 \text{ mA} = 253 \mu\text{A}$$

แรงดันระหว่างขาเบสและขาอีมีเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ประมาณ 0.6 V

$$\begin{aligned} V_2 &= V_{BE2} + V_R \\ &= 0.6 + 110 = 110.6 \text{ V} \end{aligned}$$

$$R_1 = \frac{V_{\text{out}} - V_2}{i_1} = \frac{220 - 110.6}{5 \times 10^{-3}} = 21.88 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{V_2}{i_1} = \frac{110.6}{5 \text{ mA}} = 22.120 \text{ k}\Omega$$

จากการทดสอบได้ค่ากระแส i_f ที่กระตุ้นวงจรสนามให้เกิดความสูญเสียต่ำสุดที่ 0.4 A (400 mA)

$$i_{E1} = \frac{i_f + i_1 + i_D}{h_{FE1}} = \frac{400 + 5 + 5}{39.5} = 10.379 \text{ mA}$$

$$i_{R3} = i_{E1} + i_{C2} = 10.379 \text{ mA} + 10 \text{ mA} = 22.379 \text{ mA}$$

$$R_3 = \frac{V_i - (V_{BE1} + V_{\text{out}})}{i_{R3}} = \frac{300 - (0.6 + 220)}{22.379 \text{ mA}} = 3.547 \text{ k}\Omega$$

และแรงดันต้องการควบคุมเพื่อจ่ายให้วงจรสนามที่กระแส 0.4 A มีค่า 171.8 V แรงดันเอาต์พุตมีค่า 220 V แรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน R_{rst} ในวงจรคำนวณได้จาก

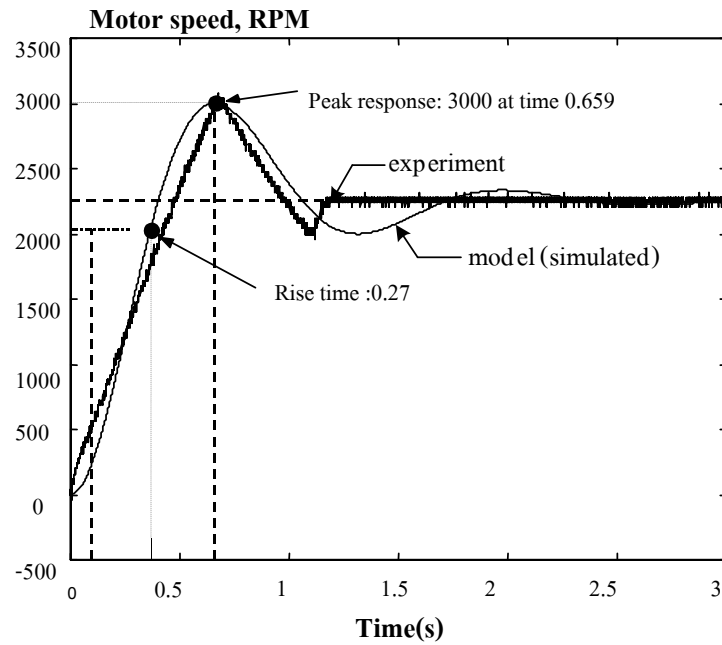
$$R_{rst} = \frac{220 - 171.8}{0.4} = 120.5 \Omega$$

กำลังวัตต์ที่ความต้านทานจะต้องทนได้ P_R คำนวณจาก

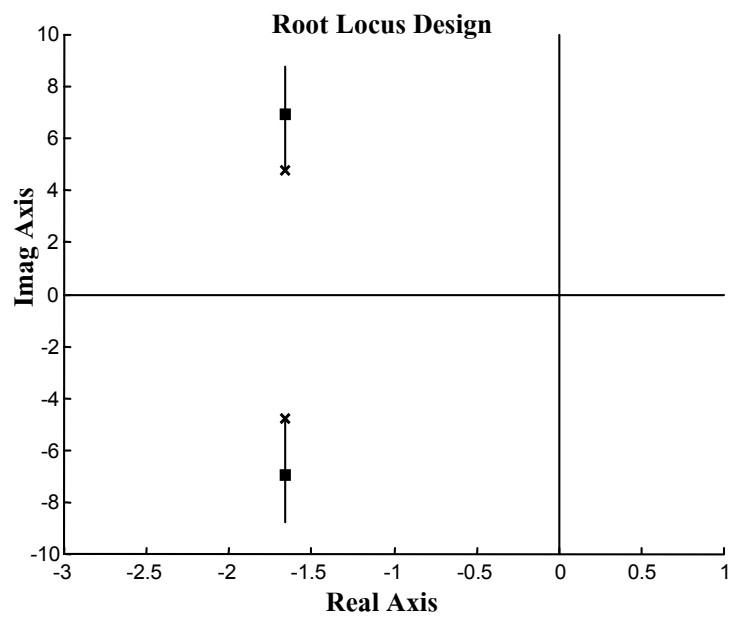
$$P_R = 0.4 \times (220 - 171.8) = 19.28 \text{ W}$$

ความต้านทานที่จะใช้ในการควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับวงจรสนามจะต้องทนกำลังวัตต์ได้ไม่น้อยกว่า 19.28 W จึงจะไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อวงจร

4.6 การทดสอบระบบโดยรวมเปรียบเทียบกับผลการจำลองผล



ภาพที่ 4.6 ผลการทดสอบแบบขั้นบันไดของมอเตอร์ เปรียบเทียบกับการจำลองผลตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



ภาพที่ 4.7 เส้นทางเดินรากของแบบจำลองมอเตอร์พลาตันต์

ในหัวข้อนี้จักได้กล่าวถึงการทดสอบระบบโดยรวมเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยจำลองผลการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในการหาค่าพารามิเตอร์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ อาจหาได้โดยทดสอบแบบขั้นบันได (step test) นำผลการตอบสนองของมอเตอร์มาพิจารณาหาค่าแบบจำลองดังกล่าว ในภาพที่ 4.6 แสดงผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อทดสอบแบบขั้นบันไดเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลอง และในภาพที่ 4.7 แสดงเส้นทางเดินรอกของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ โดยเส้นกราฟที่มีขนาดหนากว่าในภาพที่ 4.6 คือกราฟที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีค่าพุ่งเกิน (overshoot) 3000 รอบต่อนาที ที่เวลา 0.659 วินาที นับจากหยุดนิ่ง และมีช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) 1.28 วินาที โดยประมาณที่ความเร็วรอบ 2250 รอบต่อนาที ส่วนการจำลองผลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะมีค่าต่างๆใกล้เคียงกันแตกต่างกันอยู่บ้างในส่วนของช่วงเวลาเข้าที่ แบบจำลองที่ได้มีลักษณะสมบัติเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสอง (แสดงรายละเอียดไว้ในผนวก ค.) อาจแสดงได้ดังนี้

$$G_p(s) = \frac{114.76}{s^2 + 3.33s + 25.5} \quad (4-32)$$

จะเห็นได้ว่าระบบมีค่าพุ่งเกินที่สูงประกอบกับช่วงเวลาก่อนเข้าที่ที่ยาวนาน อาจก่อให้เกิดความสูญเสียในการขับเคลื่อนได้ จึงต้องปรับปรุงระบบควบคุมให้มีลักษณะสมบัติการตอบสนองชั่วขณะที่ดีขึ้น โดยการชดเชยระบบควบคุมด้วยอุปกรณ์ชดเชยแบบเฟสล่าช้า (phase lag compensator) ดังได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 โดยมีสมการฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$G_c(s) = \frac{(s+0.3)}{(s+0.03)} \quad (4-33)$$

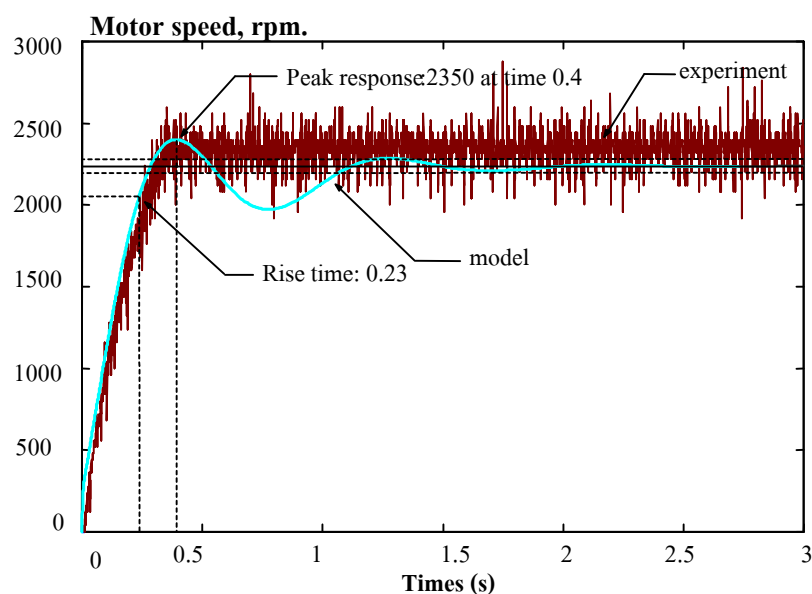
แต่ด้วยลักษณะสมบัติของวงจรสับไฟฟ้และวงจรกรองสัญญาณ ที่มีตัวเก็บประจุประกอบอยู่ด้วย ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบควบคุม ให้ระบบมีการตอบสนองชั่วขณะที่ดีขึ้น ดังนั้นอาจใช้วิธีทูลโกล์ส (root-locus method) เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่อาจแทนลักษณะสมบัติดังกล่าวทั้งหมด แสดงได้ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอน $G_{ch}(s)$

$$G_{ch}(s) = 1.5386 * \frac{s^3 + 38.3s^2 + 368.1s + 1369.7}{s^2 + 294.85s + 91.3074} \quad (4-34)$$

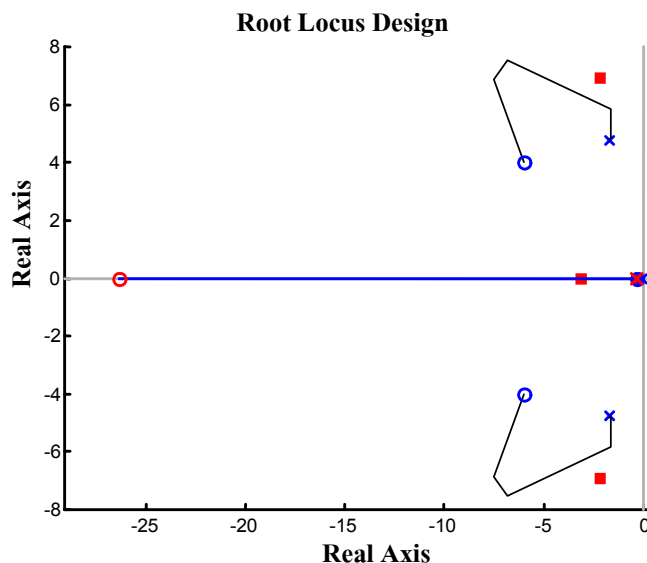
เมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ที่ได้จำลองผลร่วมกับฟังก์ชันถ่ายโอนของอุปกรณ์ชดเชย และวงจรประกอบต่างๆดังกล่าว เปรียบเทียบผลกับการทดสอบระบบโดยรวมที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังแสดงในภาพที่ 4.8 ผลตอบสนองของระบบโดยรวมที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.9 อนึ่ง เส้นทางเดินรอกของระบบโดยรวมจะเป็นดังแสดงในภาพที่ 4.10 โดยเส้นทางรอกจะผ่านจุดที่ได้ออกแบบไว้เพื่อให้ระบบมีผลการตอบสนองชั่วขณะดีขึ้นกว่าที่เป็น จากภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.8 การทดสอบระบบโดยรวม



ภาพที่ 4.9 ผลการทดสอบระบบโดยรวมเปรียบเทียบกับผลการจำลองผล



ภาพที่ 4.10 เส้นทางเดินรากของระบบโดยรวม

จะเห็นได้ว่าการจำลองผลที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์และผลการทดสอบเครื่องมือนำวิจัยที่ได้พัฒนาขึ้น ตามการออกแบบมีค่าแตกต่างกันอยู่บ้าง อาจเป็นผลจากความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการผลิตของผู้ผลิตอุปกรณ์ที่ใช้ภายในวงจรต่างๆ จึงทำให้ผลที่ได้คลาดเคลื่อนจากที่ได้ออกแบบไว้

4.7 สรุป

การลดความสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดวงจรถนอมแยกส่วน ตามวิธี LMC ซึ่งการวิจัยนี้ได้นำมาประยุกต์ในการขับมอเตอร์ด้วยเบตเตอร์ตะกั่วกรด ให้เกิดการสูญเสียในมอเตอร์ขณะเดินเครื่องน้อยที่สุด ซึ่งสมการแบบจำลองควบคุมความสูญเสียจำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ที่เป็นองค์ประกอบของสมการ อาจได้จากการทดสอบ หรือข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์ที่ใช้ในการขับภาระ ยังต้องพิจารณาถึงขนาดของมอเตอร์ที่ใช้ด้วย กล่าวคือ หากมอเตอร์มีขนาดใหญ่ อาจต้องใช้สมการแบบจำลองความสูญเสีย ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนตัวกรองแบบผ่านต่ำดังแสดงในสมการที่ (4-29) แต่หากมีขนาดแรงม้าต่ำก็อาจใช้สมการแบบจำลองควบคุมความสูญเสียตามสมการที่ (4-30) ได้ เมื่อทดสอบโดยใช้อุปกรณ์ควบคุมแรงดันและกระแสวงจรถนอมควบคุมการกระตุ้นความเข้มสนามแม่เหล็ก พบว่ามอเตอร์มีความสูญเสียน้อยที่สุดในช่วงกระแสวงจรถนอมมีค่า 0.4 A ซึ่งจะเหมาะสมสัมพันธ์กับกระแสที่จ่ายให้กับวงจรอาร์เมเจอร์เมื่อขับภาระที่ 1.52 A อนึ่งในการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ภาระที่ใช้นั้นมีลักษณะสมบัติทั้งความเร็วและแรงบิดคงที่ จึงอาจกำหนดค่าการควบคุมไว้ในตำแหน่งที่เหมาะสมนี้ได้ เพื่อลดกำลังสูญเสียในการขับเคลื่อนให้เหลือต่ำสุด

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นการพัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงชนิดวงจรถนอมแยกส่วนด้วยเบตเตอร์ มีการประยุกต์แนวคิดแบบจำลองความสูญเสีย (Margaris, Goutas, Doulgeri, and Paschali, 1991) เพื่อพัฒนาตัวควบคุมความสูญเสียภายใต้สภาวะถดถอยของพลังงาน อันเนื่องมาจากลักษณะสมบัติของเบตเตอร์ ผลการทดสอบระบบโดยรวมสามารถที่จะจัดการให้การสูญเสียในมอเตอร์มีค่าต่ำสุด ซึ่งได้พัฒนาเทคโนโลยีการขับเคลื่อนแบบแอนาล็อก เพื่อให้คงทนต่อสภาวะภูมิอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลง เช่น ความชื้น ความร้อน ฝุ่น และให้มีราคาถูกตามวัตถุประสงค์ของการพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสม การดำเนินงานใช้การปรับกระแสกระตุ้นวงจรถนอมให้เหมาะสมกับกระแสที่จ่ายให้วงจรรีอาร์เมเจอร์ ผลที่ได้จะเกิดสภาวะสมดุลใหม่ทำให้มอเตอร์ขับเคลื่อนภายใต้สภาวะที่มีความสูญเสียน้อยที่สุดซึ่งระบบที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถตอบสนองต่อสัญญาณป้อนกลับได้อย่างรวดเร็ว เพื่อรักษาสถานะการทำงานให้คงที่เมื่อแหล่งจ่ายมีการเปลี่ยนแปลง

5.2 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้บรรลุวัตถุประสงค์ตามที่ได้ตั้งไว้ทุกประการ มีผลการวิจัยและพัฒนาทางวิศวกรรม ดังต่อไปนี้ เมื่อทดสอบปรับกระแสกระตุ้นเพื่อทำให้ความเข้มสนามแม่เหล็กค่อยๆ ลดลง แต่จะต้องไม่ปรับให้ลดลงจนส่งผลกระทบต่อความเร็วและแรงบิดในสภาวะการทำงานปกติของมอเตอร์ขับเคลื่อน ผลการทดสอบอาจแสดงได้ด้วยภาพที่ 4.4 ในบทที่ 4 พบว่าความต้องการพลังงานในการขับเคลื่อนภาระนั้นๆ ของมอเตอร์ ลดต่ำลงมากที่สุดเมื่อปรับกระแสกระตุ้นมาที่ 0.4 A กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ การควบคุมกระแสกระตุ้นเพื่อให้เกิดความเข้มสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมสำหรับการขับเคลื่อน อาจก่อให้เกิดความสูญเสียของพลังงานน้อยกว่าระบบที่ไม่มีการควบคุมการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก

อนึ่งอุปกรณ์แปลงผันแรงดันที่ได้พัฒนาขึ้นให้เหมาะสมกับระบบขับเคลื่อนนั้นอาจจ่ายพลังงานได้ถึง 1000 W หากอุปกรณ์สับสัญญาณไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงมีความ

สามารถตามพิกัดเพียงพอต่อการทำงานได้ดังกล่าว แต่ในการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ภาระของระบบมีความต้องการพลังงานในการขับสูงสุดเพียง 800 W เท่านั้น ดังนั้นอุปกรณ์ดังกล่าวจึงอาจใช้พิกัดที่เหมาะสมต่อภาระเฉพาะงานวิจัยนี้เพื่อไม่ให้เกิดความสิ้นเปลือง จากกราฟผลทดสอบระบบโดยรวมในบทที่ 4 แสดงถึงสมรรถนะการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมที่สามารถทำงานได้เป็นอย่างดี กล่าวคือมอเตอร์เมื่อเริ่มออกตัวพร้อมขับภาระที่ต่ออยู่ตลอดเวลา จะไม่เกิดการกระชากกระแสเกินระดับปกติของการขับเคลื่อนไปมากนัก และมีเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวรวดเร็วขึ้น และที่สำคัญเมื่อแหล่งจ่ายพลังงานเป็นแบตเตอรี่ การถดถอยของพลังงานอาจลดลงอย่างรวดเร็วเป็นผลให้ระบบทำงานได้ระยะเวลาที่สั้นลง เมื่อระบบได้รับการพัฒนาขึ้นตามแนวทางการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สามารถช่วยลดการสูญเสียพลังงานในมอเตอร์ ช่วยยืดระยะเวลาการทำงานของระบบให้ยาวนานขึ้นได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการสร้างและทดสอบระบบจ่ายพลังงานสามารถที่จะนำไปใช้ได้ในพื้นที่ที่ห่างไกลระบบจำหน่าย หรือในที่ที่ไม่ได้ใช้งานเป็นการถาวร ไม่เหมาะที่จะเดินระบบจำหน่ายเข้าไป เนื่องจากความไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน อีกทั้งระบบยังคงทนต่อสภาพที่มีฝุ่นและความชื้นได้ แตกต่างกับระบบอื่น เช่น ไมโครโปรเซสเซอร์ ไมโครคอมพิวเตอร์ เป็นต้น แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ การเริ่มออกตัวของมอเตอร์ที่ต่อภาระอยู่ตลอดเวลาจะต้องออกแบบและสร้างชุดจ่ายพลังงานที่มีขนาดใหญ่ อุปกรณ์ที่ใช้ต้องทนแรงดันและกระแสได้สูง ซึ่งจะมีราคาแพง แต่หากพัฒนาการเริ่มหมุนของมอเตอร์โดยการตัดภาระออกก่อนแล้วจึงต่อภาระเข้าเมื่อมอเตอร์หมุนที่ความเร็วพิกัด รวมทั้งการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยละเอียดเพื่อหาค่าคงที่ของการปรับกระแสกระตุ้นให้เหมาะสมกับกระแสวงจรสนาม เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นดังกล่าว โดยใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมราคาไม่สูงนัก อนึ่ง ในงานวิจัยนี้แหล่งจ่ายพลังงานที่เป็นแบตเตอรี่มีการถดถอยของพลังงานอยู่ตลอดเวลา ในการขับเคลื่อนจึงต้องใช้แบตเตอรี่จำนวนหลายลูก เพื่อให้ได้แรงดันและระยะเวลาการจ่ายกระแสที่ยาวนาน เทคโนโลยีในการประจุพลังงานให้แก่แบตเตอรี่อย่างรวดเร็ว ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อแผ่นธาตุและวัฏจักรทางเคมีของแบตเตอรี่จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอีกประการหนึ่ง กล่าวอีกนัยหนึ่งคืออายุการใช้งานและปริมาณความจุพลังงานของแบตเตอรี่จะลดน้อยลง หากได้รับการประจุพลังงานโดยไม่ถูกต้อง ดังนั้นเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการประจุพลังงานให้แก่แบตเตอรี่จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการพัฒนา

- Angelo, D. C., Bossio, G., and Garcia, G., and Paschali A. (1991). Loss minimization in dc motor drives. *IEEE Trans. Industrial Electronics.* : 701 - 703
- Avitan, I., and Skomin, V.(1990). Mathematical modeling and computer simulation of separately excited dc motor with independent armature/field control. *IEEE Transaction on Industrial Electronics.* 37(6) : 483- 489
- Berlin, H. M.(1980). Design of op-amp circuits with experiments. (3rd ed.). United States of America : Howard
- Billing K. H.(1999). Switchmode power supply handbook. (2nd ed.). United States of America : McGraw-Hill.
- Brogan, W. L.(1991). Modern Control Theory. London: Prentice-Hall.
- Drof, R. C., and Bishop, R.H. (1998). Modern Control System. New York: Addison-Wesley.
- Kassakian, J. G., and Naunin, D. H.(1990). Design of control systems for dc drives. Germany : Heerenam
- Kim, S. W., and Park, J. S.(1992) Optimal design methodology of point to point servo system for minimization of energy consumption. *Proc. Instn. Mech. Engrs.* 206 : 35-43
- Kusko, A., and Galler D.(1983). Control means for minimization of losses in ac and dc motor drives. *IEEE Trans. Industry Applications.* 19(4) : 561 - 570
- Margaris, N., Goutas T., Doulgeri Z., and Paschali A.(1991). Loss minimization in dc drives. *IEEE Trans. Industrial Electronics.* 38(5) : 328- 336
- Nelson, P. J., and Bolin, D. W.(1995). Basics and advances in battery systems. *IEEE Transactions on Industry Applications.* 31(2) : 419 - 428
- Ogata, K.(1990). Modern Control Engineering. London: Prentice-Hall.
- Protogeropoulos, C., Marshall, R. H., and Brinkworth, B. J.(1994). Battery state of voltage modelling and algorithm describing dynamic conditions for long-term storage simulation in a renewable system *Solar Energy.* 53(6) : 517-527.
- Pressman, I. A.(1999). Switching power supply desing. (2nd ed.). United States of America : McGraw-Hill.
- Rynkiewicz, R.(1999). Discharge and charge modeling of lead acid batteries. *IEEE Transactions On Industrial Electronics.* : 707-710.

- Salameh, M Z., Casacca, M A., and Lynch, W. A.(1992). A mathematical model for lead-acid Battery. IEEE Transactions On Energy Conversion. 7(1) : 93-98
- Yao, Y., and Ramshaw, R. S.(1995). Optimized dc motor output in a photovoltaic system Can. J. Elect. & Comp. Eng. 20(2) : 79-84
- Yuvarajan, S.(1990). Switching characteristics of an IGBT. IEEE Transactions On Industrial Electronics. : 1589-1593

ภาคผนวก ก.

ฟังก์ชันความสูญเสีย

ฟังก์ชันความสูญเสีย

ฟังก์ชันความสูญเสียในส่วนต่างๆของมอเตอร์กระแสตรงอาจหาได้ดังต่อไปนี้

- ฟังก์ชันความสูญเสียในขดลวด (P_{cu})

$$P_{cu} = R_a i_a^2 + R_f i_f^2 \quad (1)$$

-ฟังก์ชันความสูญเสียในแกนเหล็ก (P_{Fe})

$$P_{Fe} = m\sigma_f \left(\frac{f}{100} \right)^2 \left(\frac{B}{1} \right)^2 + m\sigma_h \left(\frac{f}{100} \right) \left(\frac{B}{1} \right)^2 \quad (2)$$

ความสูญเสียทั้งสองส่วนมักเกิดขึ้นพร้อมกันอาจได้ออกมาเป็นเทอมเดียวดังนี้

$$P_{Fe} = mP_{[1/50]} \left(\frac{f}{50} \right)^x \left(\frac{B}{1} \right)^2 \quad (3)$$

เมื่อ $P_{[1/50]}$ หมายถึง ความสูญเสียต่อหนึ่งหน่วยมวล ที่ความถี่ 50 Hz และ x จะเป็นจำนวนเต็มอาจมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2

$$f = \frac{P\omega}{2\pi}$$

สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ B สัมพันธ์กับเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ ด้วยสมการดังแสดงนี้

$$B = \frac{\phi}{2\lambda\pi r l}$$

ส่วนมวลแกนเหล็กของโรเตอร์ (m) หาได้จาก

$$m = kdV = kd\pi r^2 l$$

เมื่อ V หมายถึงปริมาตรของโรเตอร์ส่วนที่เป็นเหล็ก(m^3)และ l คือความยาวของโรเตอร์(m) นำ f , B และ m แทนค่าลงในสมการที่ (2) และ (3) จึงทำให้สามารถเขียนสมการที่ (2) ขึ้นใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} P_{Fe} &= kd\pi r^2 l \sigma_f \left(\frac{p\omega}{2\pi 100} \right)^2 \left(\frac{\phi}{2\lambda\pi r l} \right)^2 + kd\pi r^2 l \sigma_h \left(\frac{p\omega}{2\pi 100} \right)^2 \left(\frac{\phi}{2\lambda\pi r l} \right)^2 \\ &= kd\pi r^2 l \sigma_f \frac{p^2 \omega^2}{4\pi^2 10^4} \frac{\phi^2}{4\lambda^2 \pi^2 r^2 l^2} + kd\pi r^2 l \sigma_h \frac{p\omega}{2\pi 100} \frac{\phi^2}{4\lambda^2 \pi^2 r^2 l^2} \\ &= kd\sigma_f \frac{p^2 \omega^2 \phi^2}{16 \times 10^4 \pi^3 \lambda^2 l} + kd\sigma_h \frac{p\omega \phi^2}{8 \times 10^2 \pi^2 \lambda^2 l} \end{aligned}$$

อาจเขียนสมการ (4) ในรูปย่อได้ว่า

$$\begin{aligned} P_{Fe} &= c_f \omega^2 \phi^2 + c_h \omega \phi^2 \\ &= (c_f \omega^2 + c_h \omega) \phi^2 \\ P_{Fe} &= C_{Fe} \omega^x \phi^2 \end{aligned}$$

เมื่อ

$$c_f = kd\sigma_f \frac{p^2}{16 \times 10^4 \pi^3 \lambda^2 l}$$

$$c_h = kd\sigma_h \frac{p}{8 \times 10^2 \pi^2 \lambda^2 l}$$

และ

$$C_{Fe} = \frac{kd}{4\pi\lambda^2 l} \left(\frac{P}{100\pi} \right)^x \times P_{[1/50]}$$

ส่วนความสูญเสียปฏิกิริยา (P_s) ที่เกิดขึ้นในขดลวดและแกนเหล็กของมอเตอร์ อาจได้แบบจำลองคณิตศาสตร์เป็นดังนี้

$$P_s = c_s i_a^2 \omega^2$$

จะมีค่าประมาณ 0.5 % ถึง 1% ของความสูญเสียทั้งหมด

ความสูญเสียทางกล (P_m) เป็นความสูญเสียในฟังก์ชันของความเร็ว (ω)

$$P_m = f(\omega)$$

อาจได้ความสูญเสียทั้งหมด (P_l) อยู่ในฟังก์ชันความสูญเสียของแกนเหล็ก

$$P_l = R_a i_a^2 + R_f i_f^2 + C_{Fe} \omega^x \phi^2 + C_s \omega^2 i_a^2 + f(\omega) \quad (4)$$

หรือ

$$P_l = R_a i_a^2 + R_f i_f^2 + (C_f \omega^2 + C_h \omega) \phi^2 + C_s \omega^2 i_a^2 + f(\omega) \quad (5)$$

เมื่อพิจารณาในสถานะที่คงตัว สภาวะความสูญเสียต่ำสุดหาได้จากสมการดังนี้

$$\left. \frac{\partial P_l}{\partial i_f} \right|_{T_m, \omega} = 0 \quad (6)$$

สนามแม่เหล็กจะแปรผันตามกระแสกระตุ้นมีลักษณะสมบัติเป็นเชิงเส้นดังสมการ

$$\phi = \alpha i_f$$

จากสมการที่ (9) อาจได้ฟังก์ชันสภาวะความสูญเสียต่ำสุดที่อัตราเร็วและแรงบิดคงที่ แสดงได้ดังนี้

$$\left. \frac{\partial P_1}{\partial i_f} \right|_{T_m, \omega} = \frac{\partial}{\partial i_f} (I_a^2 R_a + I_a^2 C_s \omega^2) + \frac{\partial}{\partial i_f} (i_a^2 R_f + i_a^2 C_{Fe} \alpha^2 \omega^x) = 0$$

$$(R_a + C_s \omega^2) i_a^2 = (R_f + C_{Fe} \omega^x) i_f^2 \quad (7)$$

เมื่อ $C_{Fe} \omega^x = C_f \omega^2 + C_h \omega$

แทนสมการ (5) เขียนใหม่เป็น

$$(R_a + C_s \omega^2) i_a^2 = (R_f + (C_f \omega^2 + C_h \omega)) i_f^2 \quad (8)$$

ภาคผนวก ข.

สมการแสดงสถานะความสูญเสียต่ำสุด

สมการแสดงสถานะความสูญเสียต่ำสุด

แบบจำลองควบคุมความสูญเสียอาจพิจารณาได้จากฟังก์ชันสถานะความสูญเสียต่ำสุด ดังแสดงในภาคผนวก ก. เมื่อให้ x เป็นจำนวนเต็มมีค่าอยู่ในช่วง 1 ถึง 2 แสดงด้วยสมการดังนี้

$$(R_a + C_s \omega^2) i_a^2 = (R_f + C_{Fe} \omega^2) i_f^2$$

นำมาหาสมการแบบจำลองควบคุมความสูญเสียได้ดังนี้

$$i_f^2 = i_a^2 \frac{(R_a + C_s \omega^2)}{(R_f + \alpha^2 C_{Fe} \omega^2)}$$

$$= i_a^2 \frac{\left(1 + \frac{C_s \omega^2}{R_a}\right)}{\left(1 + \frac{\alpha^2 C_{Fe} \omega^2}{R_f}\right)} \cdot \frac{R_a}{R_f}$$

$$i_f = i_a \sqrt{\frac{R_a \left(1 + \frac{C_s \omega^2}{R_a}\right)}{R_f \left(1 + \frac{\alpha^2 C_{Fe} \omega^2}{R_f}\right)}}$$

$$= i_a \sqrt{\frac{R_a}{R_f}} \sqrt{\frac{\left(\frac{C_s \omega^2}{R_a} + 1\right)}{\left(\frac{\alpha^2 C_{Fe} \omega^2}{R_f} + 1\right)}}$$

กำหนดให้

$$k = \sqrt{\frac{R_a}{R_f}}$$

$$T_{Fe} = \alpha \sqrt{\frac{C_{Fe}}{R_f}}$$

$$T_s = \sqrt{\frac{C_s}{R_a}}$$

อาจได้สมการแบบจำลองควบคุมความสูญเสียในฟังก์ชันของแกนเหล็กได้ดังนี้

$$i_f = i_a k \sqrt{\frac{T_s^2 \omega^2 + 1}{T_{Fe}^2 \omega^2 + 1}}$$

เมื่อแยกฟังก์ชันความสูญเสียของแกนเหล็กออกเป็น ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (C_f) และความสูญเสียฮิสเตอรีซิส (C_h) สมการอาจเป็นได้ดังนี้

$$i_f = i_a \sqrt{\frac{C_s \omega^2 + R_a}{\alpha^2 (C_f + C_h / \omega) \omega^2 + R_f}}$$

$$= i_a \frac{\sqrt{\frac{C_s}{R_a} \omega^2 + 1}}{\alpha \sqrt{\frac{(C_f + C_h / \omega) \omega^2 + 1}{R_f}}}$$

$$i_f = i_a \sqrt{\frac{T_s^2 \omega^2 + 1}{T^2(\omega) \omega^2 + 1}}$$

เมื่อ

$$T_s = \sqrt{C_s / R_a}$$

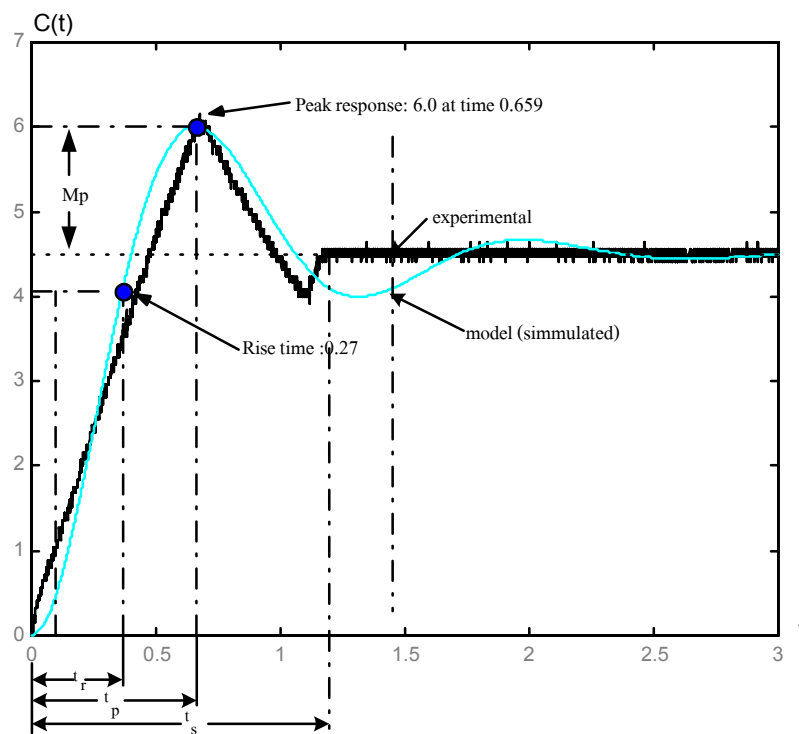
$$T(\omega) = \alpha \sqrt{(C_f + C_h / \omega) / R_f}$$

ภาคผนวก ค.

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ปั๊ม

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ปัด

การทดสอบมอเตอร์ปัดแบบกระตุ้นด้วยสัญญาณขั้นบันไดที่มีความเร็ว 2250 รอบต่อนาที ในการทดสอบใช้ทาโคเจนมีอัตราส่วน 20 โวลต์ต่อ 1000 รอบต่อนาที ออสซิลโลสโคปปรับให้มีขนาดคูณ 10 เท่า ผลการทดสอบที่ได้แสดงด้วยภาพที่ ค.1 (กราฟเส้นที่หนากว่า) ดังนี้



ภาพที่ ค.1 ผลการทดสอบมอเตอร์ปัดเทียบกับการจำลองผลด้วยแบบจำลอง

ภาพแสดงผลการทดสอบแบบขั้นบันไดเทียบกับการจำลองผลด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ จากภาพผลการทดสอบมอเตอร์ปัด อาจนำมาคำนวณหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ฟังก์ชันถ่ายโอน อันดับสองได้ดังนี้(Ogata,1997)

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

อาจสังเกตได้จากกราฟตอบสนองว่า Maximum percent overshoot (P.O) มีค่า 33.3 % ซึ่งอาจใช้ค่า P.O. นี้ คำนวณค่า ζ จากสูตร $P.O. = 100e^{-(\zeta/\sqrt{1-\zeta^2})\pi}$ ได้ค่า $\zeta = 0.3736$ และ จากสมการ $t_s = \frac{4}{\zeta\omega_n}$ เมื่อ $t_s = 1.3$ วินาที ทำให้ทราบว่า $\omega_n = 8.2358$ rad/sec เมื่อได้ค่าลักษณะสมบัติต่างๆของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองแล้ว นำมาแทนค่าได้ดังนี้

จากสมการ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

แทนค่าที่ต่างๆ จะได้

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{67.82}{s^2 + 6.15s + 67.82}$$

นำค่าที่ได้มาปรับแต่งเพื่อลดความคลาดเคลื่อนให้ผลการคำนวณ มีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริง ฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวมีค่าเป็น

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{25.5}{s^2 + 3.33s + 25.5}$$

และเพื่อให้ช่วงเข้าที่มีขนาด 4.5 เท่ากับการทดสอบจริง จึงต้องคูณด้วย 4.5 เท่า ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้ อาจแสดงได้ดังนี้

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{114.76}{s^2 + 3.33s + 25.5}$$

เส้นกราฟที่บางกว่าเล็กน้อยในภาพคือผลการจำลองฟังก์ชันถ่ายโอนที่ปรับแต่งแล้วเปรียบเทียบกับผลทดสอบจริง

ภาคผนวก ง.

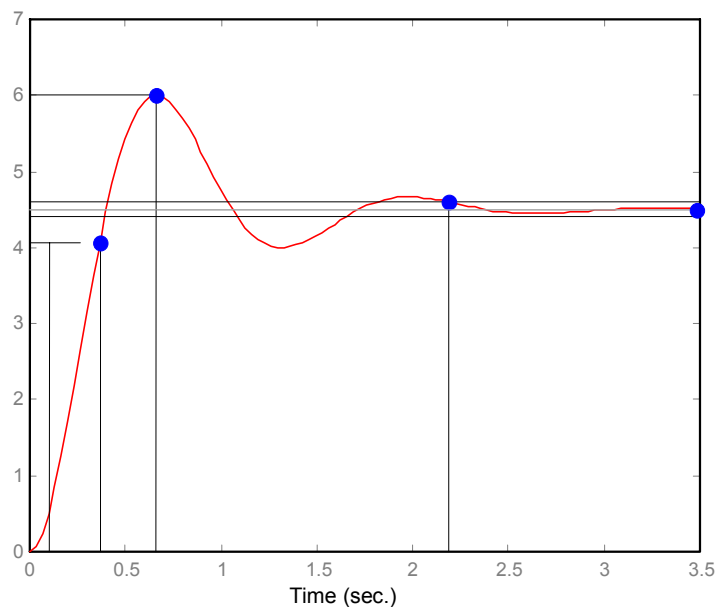
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบโดยรวม

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบโดยรวม

จากผลการทดสอบพลาเน็ตของระบบดังที่ได้กล่าวไปแล้วในผนวก ค. ได้แบบจำลองคณิตศาสตร์ของ พลาเน็ต หรือมอเตอร์บี้มที่ใช้ในการวิจัยเป็นดังนี้

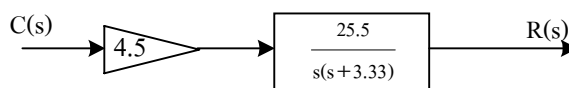
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{114.76}{s^2 + 3.33s + 25.5}$$

เมื่อนำมาเขียนกราฟผลการตอบสนองแบบขั้นบันไดจะได้อ้างแสดงในภาพที่ ง.1



ภาพที่ ง.1 การจำลองผลตอบสนองแบบขั้นบันได

จากการจำลองผลและทดสอบพลาเน็ตจะเห็นว่าพลาเน็ตนั้นมี ค่าตอบสนองสูงสุด 3000 รอบต่อนาที $[6 \times 10 \times (1000/20)]$ ที่เวลา 0.659 วินาที กล่าวคือเมื่อมอเตอร์บี้มเริ่มขับเคลื่อนจะทำให้เกิดค่าพุ่งเกินมีค่าสูง ส่งผลให้เกิดการสั่น (oscillation)



ภาพที่ ง.2 แผนภาพบล็อกของมอเตอร์ปั๊มในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับดังแสดงในภาพ มีฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการคือ

$$G_p = \frac{25.5}{s(s+3.33)}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุม คือ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = 4.5 * \frac{25.5}{s^2 + 3.33s + 25.5}$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = 4.5 * \frac{25.5}{(-1.665 + j4.7673)(-1.665 - j4.7673)}$$

โพลของระบบควบคุมเดิม คือ

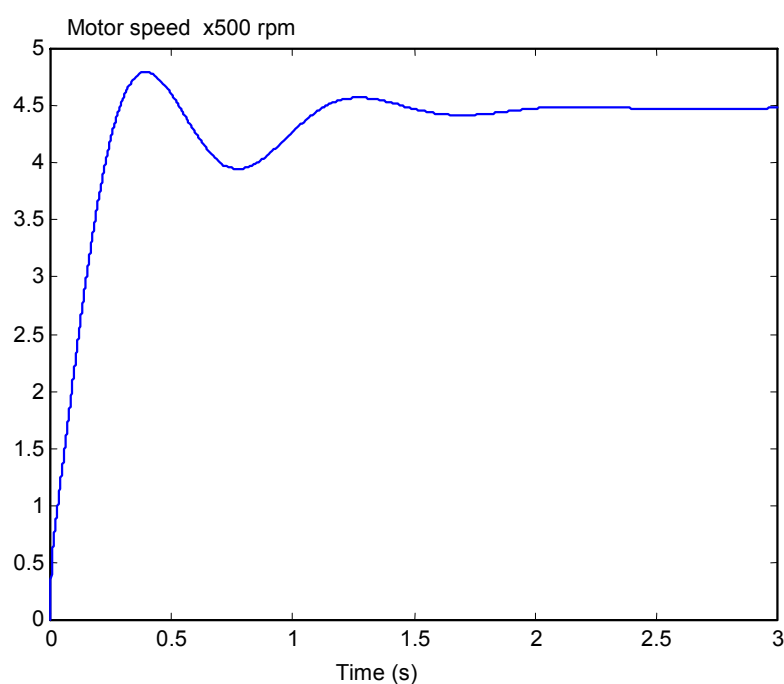
$$s = -1.665 + j4.7673 \text{ และ } -1.665 - j4.7673$$

คุณสมบัติของระบบควบคุมเดิม คือ อัตราความหน่วง ζ มีค่า 0.3736 ความถี่ธรรมชาติในการแกว่งของระบบควบคุม ω_n มีค่า 5.049 เรเดียน/วินาที ในการปรับปรุงคุณสมบัติของระบบโพลของระบบควบคุมที่ต้องการให้เส้นทางเดินรากผ่านคือ $s = -5.8 + j6.5$ และ $s = -5.8 - j6.5$ โดยใช้วิธีรูทโลโก้สออกแบบตัวชดเชยแบบเฟสล้ำหลัง ด้วยวิธีดำเนินการออกแบบที่ปรากฏใน (Ogata,1997) ซึ่งผลที่ได้ คือสมการแสดงดังนี้

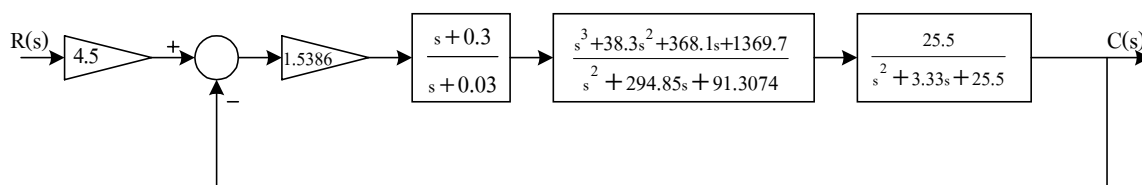
$$G_c(s) = \frac{(s+0.3)}{(s+0.03)}$$

แต่ผลของอุปกรณ์ที่เป็นองค์ประกอบในวงจร สลับไฟฟ้าและวงจรถอดสัญญาณ ทำให้ผลการตอบสนองของระบบโดยรวมเป็นดังในภาพที่ ๓.3 ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนของอุปกรณ์ดังกล่าว ได้รวมไว้ในรูปของ สมการ $G_{ch}(s)$

$$G_{ch}(s) = 1.5386 * \frac{s^3 + 38.3s^2 + 368.1s + 1369.7}{s^2 + 294.85s + 91.3074}$$



ภาพที่ ๓.3 ภาพแสดงผลตอบสนองการจำลองผลระบบโดยรวม



ภาพที่ ๓.4 แผนภาพบล็อกระบบโดยรวมที่ใช้ในการจำลองผล

ภาคผนวก จ.

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

1)“ การขับมอเตอร์ขนาด 800 W 220 V ที่ 2250 rpm ด้วยแบตเตอรี่ตะกั่วกรด” ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการโลกพลังงาน(ตามหนังสือตอบรับเลขที่ ทม 0601(28)/5/121 ลงวันที่ 28 กันยายน 2544 จากสถานจัดการและอนุรักษ์พลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่)

บทความ

ศักดิ์ระวี ธีระวิกุล และสรวิภา สุธิดจรัส
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.บดสราษสีมา



การขับมอเตอร์ขนาด 800 W, 220V ที่ 2500 rpm ด้วยแบตเตอรี่ตะกั่วกรด

บทนำ

ประเทศไทยและประเทศที่กำลังพัฒนาทั้งหลาย มีพื้นที่ชนบทห่างไกลความเจริญที่ไฟฟ้ายังเข้าไม่ถึงอยู่เป็นจำนวนมาก พื้นที่เหล่านั้นมักเป็นถิ่นกันดาร มีสภาพอากาศร้อนชื้น เต็มไปด้วยฝุ่นละออง การพัฒนาทางเกษตรกรรม กสิกรรม การสาธารณสุขในพื้นที่เหล่านั้นและอาจรวมถึงการพัฒนาให้เป็นแหล่งท่องเที่ยว มีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องใช้ไฟฟ้าเพื่อป้อนเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ให้ใช้งานได้ ตัวอย่างเช่น ปั๊มน้ำมอเตอร์ของเครื่องสีข้าว ไฟฟ้าแสงสว่าง และเครื่องมือสื่อสาร เป็นต้น แหล่งพลังงานทางเลือกอาจมาจากแสงอาทิตย์ พลังน้ำมวลชีวภาพหรือแบตเตอรี่ เป็นอาทิ แต่การใช้แหล่งพลังงานทางเลือกมักหลีกเลี่ยงไม่พื้นที่ที่ต้องใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานสำรอง หรือแม้แต่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานหลัก ดังนั้น เทคโนโลยีที่เหมาะสมต่อการใช้งานแบตเตอรี่ในถิ่นกันดารจึงเป็นสิ่งจำเป็น

บทความนี้ นำเสนอรายละเอียดการพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสม เพื่อใช้งานในชนบทห่างไกลเมื่อต้องการพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ไปจ่ายอุปกรณ์ไฟฟ้า

ต่างๆ อุปกรณ์ที่เป็นภาระของแบตเตอรี่ในงานวิจัยพัฒนานี้ เป็นมอเตอร์กระแสตรงพิกัด 800 W เดินที่อัตราเร็ว 2500 รอบต่อนาที (rpm) ต่อควบกับปั๊มหอยโข่งเพื่อให้สูบน้ำด้วยอัตราคงที่ตลอดเวลาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่ต้องใช้งานร่วมกับแบตเตอรี่ มุ่งเน้นไปที่การทำได้ง่ายภายในประเทศ มีความทนทาน บำรุงรักษาง่ายและราคาถูก โครงสร้างของระบบได้รับการอธิบายในหัวข้อถัดไป และองค์ประกอบต่างๆ ในระบบรวมถึงผลการทดสอบ ได้รับการกล่าวถึงตามลำดับในบทความนี้

โครงสร้างของระบบ

ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงชนิดวงจรสนามแยกส่วนใช้พลังงานขับเคลื่อนจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด (lead acid) โดยแปลงผันพลังงานจากแบตเตอรี่ที่มีขนาดแรงดัน 48 Vdc เป็น 220 Vdc มีส่วนประกอบที่สำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วยชุดแบตเตอรี่ขนาด 48 Vdc อุปกรณ์จำกัดกระแส (current regulator) อุปกรณ์คอนเวอร์เตอร์ (converter) ตัวขับมอเตอร์ (drive amplifier) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เซนเซอร์วัดความเร็ว (speed sensor) และตัวควบคุม (controller)

อุปกรณ์คอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่ป้อนเปลี่ยนแรงดัน จะเปลี่ยนแรงดันของแบตเตอรี่ 48 Vdc ให้เป็น 220 Vdc เพื่อจ่ายให้มอเตอร์ โดยจ่ายผ่านวงจรขับโหม่งทำหน้าที่ เป็นวงจรรับมอเตอร์ตัวควบคุมจะทำหน้าที่สร้างสัญญาณ บังคับตัวขับ เพื่อให้มอเตอร์ตอบสนองตามสัญญาณอ้างอิง โดยเซนเซอร์วัดความเร็วจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณที่วัดได้ จากความเร็วเป็นฮertzของมอเตอร์ไปยังตัวควบคุม เพื่อ รักษาความเร็วให้คงที่ที่ 2500 rpm ซึ่งมอเตอร์จะกินกระแส สูงถึง 4.5 A

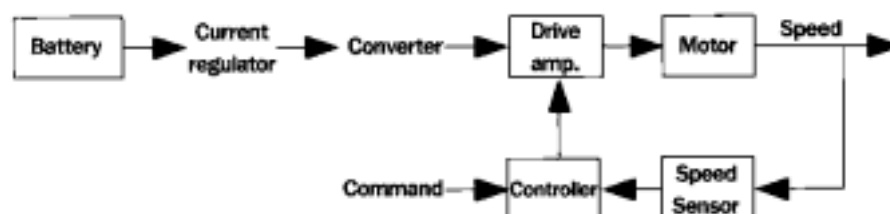
ลักษณะสมบัติของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ที่มีใช้โดยทั่วไป เป็นแบบตะกั่วกรด ภายในประกอบด้วยแผ่นธาตุทำมาจากโลหะกับวัสดุอื่นอัด แน่นในแผ่นตะกั่วกรดตะกั่ว แยกออกเป็นหลายๆ ช่องเรียกว่า เซลล์ แต่ละเซลล์มีขนาดแรงดัน 2 Vdc การเก็บพลังงาน ด้วยแบตเตอรี่โดยการประจุไฟตามกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Nelson and Book, 1998). เมื่อนำแบตเตอรี่มาจ่าย พลังงานให้ภาระ ปฏิกริยาเคมีจะค่อยๆ เกิดย้อนกลับจน แบตเตอรี่ไม่สามารถจ่ายพลังงานได้และเกิดความร้อนขึ้น ที่ตัวถังแบตเตอรี่เอง เมื่อทำการทดสอบแบตเตอรี่ขนาด 12 Vdc ความจุ 65 Ah โดยมีการประจุพลังงานให้มี ระดับแรงดันที่ 12.4 Vdc (หมายเหตุ ในทางปฏิบัติ สามารถอัดประจุแบตเตอรี่มีแรงดัน 13.8-14.0 Vdc ได้)

รับภาระที่มีขนาด 4A ทำการทดสอบเป็นเวลา 250 นาที ระดับแรงดันมีการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 2 จะ สามารถเห็นได้ว่า แรงดันแบตเตอรี่ลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่ง ถึงระดับ 11.8 Vdc แรงดันจะตกลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้น จึงควรยุติการจ่ายพลังงาน เพื่อป้องกันสภาวะเกิดแก๊ส และการเสียหายอย่างถาวรในแบตเตอรี่ (Solomeh, Casacca, and Lynch, 1992) เมื่อใช้วิธีการลดถอย จึงเสถียรกับผลการทดสอบ พบว่า มีความสัมพันธ์แบบ เส้นตรง $V_b = -0.0025t + 12.4$ V. ซึ่ง V_b คือแรงดัน ของแบตเตอรี่ และเมื่อนำแบตเตอรี่หลายลูกมาใช้งาน ร่วมกัน มีความจำเป็นที่จะต้องกำกับให้แบตเตอรี่แต่ละ ลูกคายประจุในระดับเท่าเทียมกัน เพื่อให้แบตเตอรี่มีอายุ ใช้งานยาวนาน ดังนั้น อุปกรณ์จำกัดกระแสของแบตเตอรี่ จึงเป็นสิ่งจำเป็น

อุปกรณ์จำกัดกระแส

แบตเตอรี่แต่ละลูกมีลักษณะสมบัติที่ไม่ได้เหมือนกันในทุกประการ และยังไม่เป็นเชิงเส้นอีกด้วยเมื่อนำแบตเตอรี่ มาต่อร่วมกัน ลูกที่มีพลังงานมากกว่าจะจ่ายพลังงาน ให้แก่ลูกที่ต่ำกว่า จึงเสมือนว่า แบตเตอรี่พยายามจะปรับ การจ่ายพลังงานให้มีระดับที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งไม่เป็นผลดี ต่อตัวแบตเตอรี่ ในกรณีเช่นนี้จึงจำเป็นต้องใช้ (current regulator) จึงมีบทบาทที่สำคัญต่อการรักษาสภาพการ

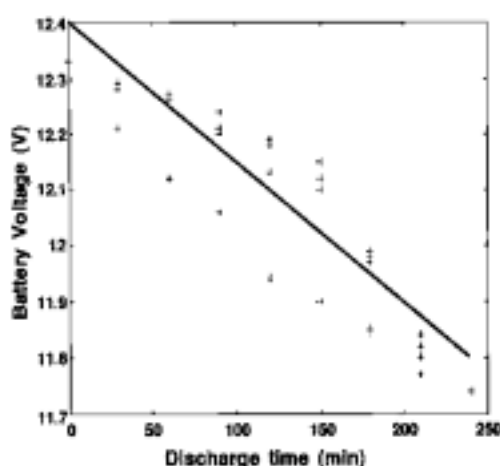


รูปที่ 1 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมมอเตอร์ที่มีแหล่งจ่ายพลังงานเป็นแบตเตอรี่

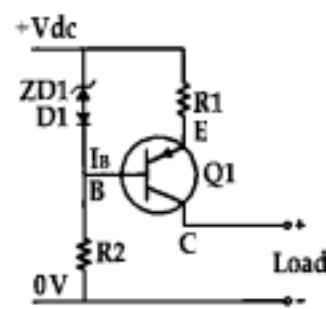
ใช้งานของแบตเตอรี่ ด้วยการกำกับให้แบตเตอรี่แต่ละลูกจ่ายกระแสต่างๆ กัน รูปที่ 3 แสดงการนำแบตเตอรี่ต่อกับภาระโดยผ่านวงจรจำกัดกระแส ซึ่งจะควบคุมไม่ให้แบตเตอรี่ที่ขุดใหญ่ขุดหนึ่งจ่ายพลังงานมากเกินไปที่กำหนดวงจรจำกัดกระแสมีรูปลักษณะ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4 การจะให้วงจรดังกล่าว รับกระแสได้สูงมากขนาดไหน ก็ขึ้นอยู่กับทางเลือกอัตราพิสัยของทรานซิสเตอร์และอุปกรณ์ประกอบอย่างเหมาะสม ในวงจรรูปที่ 4 มีไดโอด D1 ต่ออยู่กับขาเบสของทรานซิสเตอร์ เพื่อทำหน้าที่ขจัดแรงดันเพื่อไม่ให้ V_{be} ของทรานซิสเตอร์ Q1 คงที่ แรงดันที่ตกคร่อม R1 จะถูกกำหนดโดยแรงดันของซีเนอร์ไดโอด (ZD1) และแรงดันที่ตกคร่อม R2 ช่วยในการไบอัสแก่ซีเนอร์ไดโอด

(ZD1) ปัญหาที่อาจพบได้ประการหนึ่งคือ จุดหมุ่ของ ZD1 ขณะทำงานส่งผลกระทบต่อกระแสไบอัส ของ Q1 กล่าวคือ หาก ZD1 มีจุดหมุ่สูงจะทำให้ มีขนาดลดลง เป็นผลให้ Q1 ไม่น่ากระแสแก้ไขได้โดยเลือกใช้ทรานซิสเตอร์ที่มีค่า h_{fe} สูงๆ เพราะเมื่อทรานซิสเตอร์มีค่า h_{fe} สูง จะทำให้กระแสเบสลดลงเมื่อเทียบกับกระแสไบอัสของซีเนอร์ไดโอด

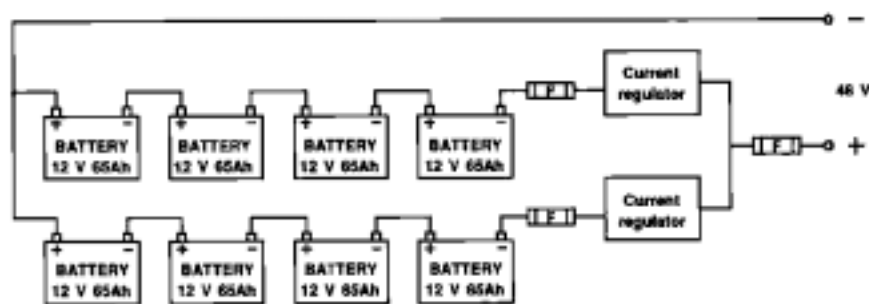
พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแบตเตอรี่เป็นชนิดกระแสตรงที่มีแรงดันเฉลี่ย 48 Vdc เมื่อต้องจ่าย 220 Vdc แก่มอเตอร์ การเพิ่มขนาดแรงดันที่เหมาะสมต่อการใช้งาน ในภูมิภาคอากาศร้อนชื้นและกับดาวจึงควรใช้เทคโนโลยีที่มีความทนทานในแบบของอินเวอร์เตอร์และหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งได้บรรยายไว้ในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 2 แสดงระดับแรงดันแบตเตอรี่ในการทดสอบรับภาระเทียบกับเวลา



รูปที่ 4 วงจรคุมค่ากระแส

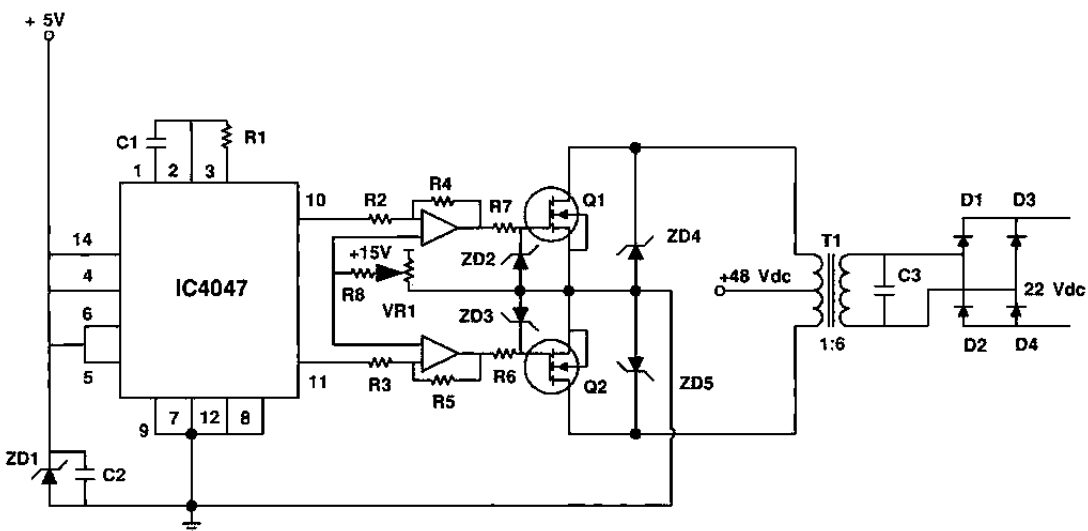


รูปที่ 3 แสดงตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสของแบตเตอรี่

อุปกรณ์คอนเวอร์เตอร์

พิจารณารูปที่ 5 เมื่อจ่ายแรงดันให้กับวงจร IC4047 ซึ่งมีลักษณะการต่อเป็นวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ จึงเริ่มทำงาน เพราะขา 14 ได้รับแรงดันไปเลี้ยง เป็นผลให้ IC4047 เริ่มผลิตความถี่ค่า 50 Hz ออกมาทางขา 10 (ขา Q) กับขา 11 (ขา Q̄) ซึ่งเป็นขาเอาต์พุตของ IC4047 สัญญาณที่ขาทั้งสองจะมีสถานะตรงกันข้ามเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 6 ค่าความถี่ที่ผลิตออกมาสามารถทำการปรับได้โดยเปลี่ยนค่า R1 และ C1 เอาต์พุตที่ออกจากขา IC4047 จะป้อนให้ออปแอมป์ ซึ่งต้องวงจรเป็นแบบขยายสัญญาณให้มีระดับที่สูงขึ้น จากนั้นจึงส่งต่อไปที่ขาเกทของ มอสเฟต IRFP460LC Q1 และ Q2 ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ความเร็วสูงขยายกำลังขึ้นครั้งสุดท้าย ก่อนส่งไปที่หม้อแปลง T1 มีอัตราส่วนการแปลง 1:6 หม้อแปลงที่ใช้ควรเป็นแบบทอรอยด์ที่มีการสูญเสียต่ำ สำหรับ ZD4 และ ZD5 ทำหน้าที่ป้องกันแรงดันย้อนกลับหม้อแปลง ซึ่งแรงดันนี้จะมีค่าสูงชั่วขณะอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์

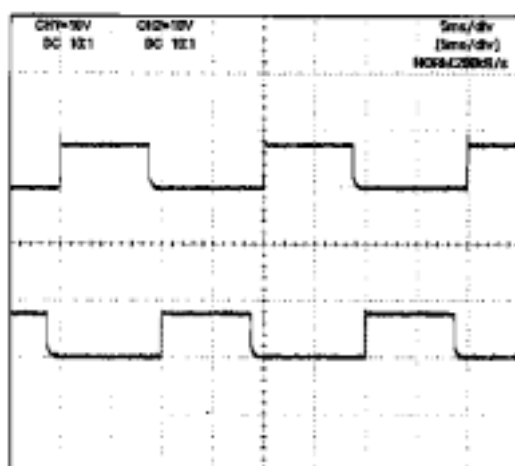
ต่างๆ ได้ หม้อแปลง T1 ที่ใช้จะเป็นแบบเซ็นเตอร์แทป เพราะแรงดันที่ป้อนจะมีสองชุด T1 จะทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟสลับ ± 48 Vdc ที่มีวงรอบการทำงาน (duty cycle) 50% ที่ได้จาก Q1 และ Q2 ไปเป็น 220 Vac ซึ่งแรงดันขนาดนี้ สามารถใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับโดยทั่วไปได้ C3 จะทำหน้าที่กรองสัญญาณความถี่สูงที่ออกมาจากหม้อแปลง ไม่ให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ที่ต่อทางด้านเอาต์พุต แรงดันกระแสสลับที่ออกจากหม้อแปลง จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟตรงด้วยเรกติฟายเออร์แบบบริดจ์เต็มคลื่น (D1 ถึง D4) ไดโอดที่ใช้จะต้องทนแรงดันและกระแสได้สูงๆ ซึ่งให้อเอาต์พุตดังที่แสดงในรูปที่ 7 อย่างไรก็ตาม พิกัดการจ่ายกำลังสูงสุดนั้นขึ้นอยู่กับหม้อแปลง T1 สำหรับ Q1 และ Q2 จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องระบายความร้อนอย่างดี ซึ่งในพื้นที่กันดารที่กล่าวถึงควรระบายความร้อนด้วยแผ่นระบายความร้อนขนาดใหญ่และอาจต้องใช้พัดลมความเร็วรอบสูงหลายตัวช่วยเป่าระบายความร้อนด้วย



รูปที่ 5 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์

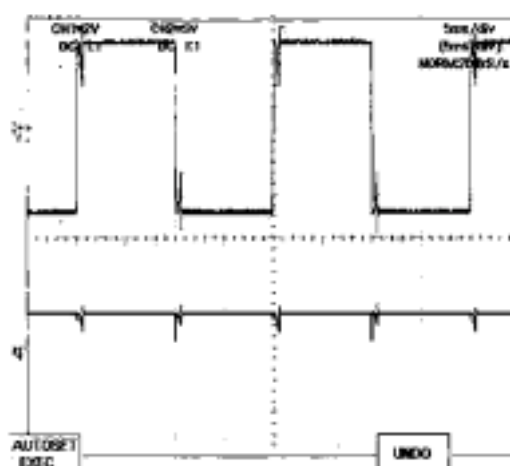
วงจรสับไฟฟ้า

เนื่องจากแรงดันจากแบตเตอรี่จะลดลงตลอดเวลา จึงจำเป็นต้องหาหนทางรักษาระดับแรงดัน 220 Vdc ที่จะป้อนแก่มอเตอร์ให้คงค่าไว้ได้ นอกจากนี้วงจรที่ใช้ประโยชน์ควรที่จะสามารถเริ่มต้นเครื่องมอเตอร์อย่างนุ่มนวลได้ ให้การป้องกันการกระชากกระแสของมอเตอร์ เป็นการยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ให้ยาวนาน วงจรสับไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ทำให้การทำงานตามต้องการสามารถรักษาระดับแรงดันได้โดยอาศัยหลักการสับแรงดันไฟฟ้าออกเป็นช่วงสี่เหลี่ยมมีระยะเวลา t_{on} และ t_{off} เมื่อต้องการเพิ่มระดับแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์สูงขึ้น ระยะเวลา t_{on} จะกว้างจนถึงระดับแรงดันอ้างอิง ในรูปที่ 8 (ก) แสดงการใช้วงจรสับไฟฟ้า เพื่อปรับเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงปรับค่าได้ และในรูปที่ 8 (ข) แสดงรูปคลื่นการสับแรงดันออกเป็นช่วงสี่เหลี่ยม วงจรสับไฟฟ้ามีอุปกรณ์เปรียบเทียบแรงดันอินพุตและเอาต์พุต เพื่อตรวจสอบสถานะการทำงานของวงจรให้ได้ระดับแรงดันที่



รูปที่ 6 แสดงสัญญาณที่ออกจากขา 10 และ 11

ต้องการ ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 9 สัญญาณป้อนกลับที่ได้รับจากเซนเซอร์วัดความเร็วจะมีความต้านทาน R1 และ R2 ต่ออยู่เพื่อลดขนาดแรงดันของสัญญาณป้อนกลับไม่ให้เกินแรงดันอ้างอิงสูงสุด R3 และ R4 จะเป็นตัวควบคุมกระแสอินพุตให้แก่ ออปแอมป์ U_2 จะเป็นตัวควบคุมกระแสไบอัสให้แก่ Q1 เพื่อทำการขยายสัญญาณการสุทธบนวมอสเฟตซึ่งอาศัยหลักการเดียวกับ IGBT (Yuvrajon, 1990) และ U_2 ให้การควบคุมกระแสไบอัส ส่วน R5 C1 และ ZD2 ช่วยรักษาแรงดันไบอัสให้คงที่ไม่เกินพิกัดของมอสเฟตนั้น ๆ และที่สำคัญจะต้องมีวงจรป้องกันแรงดันชั่วครู่ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของภาระที่ขา D และขา S ประกอบด้วย C4 R6 และ D2 ในช่วงเวลาหยุดนำกระแสของลวดิชเมื่อับภาระที่มีสมบัติเป็นความเหนียวน้ำหนัก เช่น มอเตอร์ กระแสจะยังคงไหลผ่าน D1 มายังภาระอย่างต่อเนื่อง วงจรสับไฟฟ้าแบบนี้จะเป็นวงจรสับไฟฟ้าแบบลดค่าลง เนื่องจากแรงดันเริ่มต้นของแบตเตอรี่จะมีค่าสูง จึงต้องควบคุมแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ในระดับที่ไม่เกินพิกัด

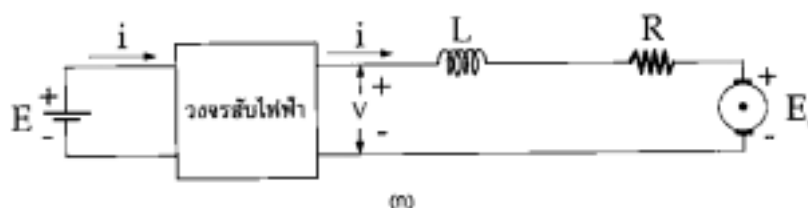


รูปที่ 7 กราฟสี่เหลี่ยมด้านบนเป็นสัญญาณที่ออกจากมอเตอร์ซึ่งมีระดับแรงดัน 288 V และเมื่อผ่านวงจรเรกติฟายเออร์ จะได้รูปคลื่นด้านล่างที่มีขนาดแรงดัน 288 Vdc

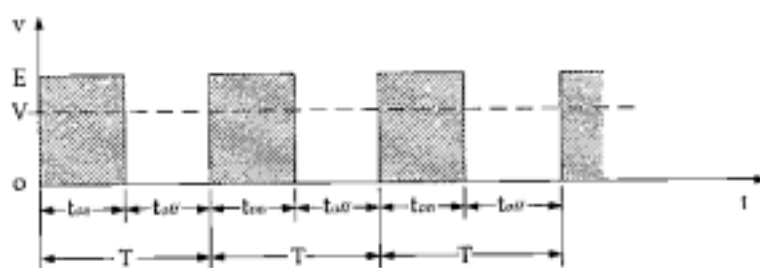
หลักการควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้วย วงจรสับไฟฟ้าและผลการทดลองการควบคุม

การควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้วยวงจรสับไฟฟ้า อาจแทนได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 10 ระบบรวมประกอบด้วยตัวควบคุมการสับไฟฟ้าของวงจรสับไฟฟ้าแบบลดค่าลง ที่ใช้แบบลดค่าลงเพราะคอนเวอเตอร์ให้แรงดัน 288 V บิอนเข้าวงจรสับไฟฟ้า และยังประกอบด้วยมอเตอร์กระแสตรงชนิดวงจรถนอมแยกส่วน เช่นเซอร์โวลิตอัตราเร็ว อัตราเร็วของมอเตอร์ต้องคงที่ที่ 2500 rpm ซึ่งสามารถ คงค่าไว้ได้ด้วยการป้อนกลับด้วยเซนเซอร์วัดอัตราเร็ว ซึ่ง

ให้แรงดันเอาต์พุต 50 Vdc สมัยกับอัตราเร็ว 2500 rpm เมื่อทำการทดลองด้วยการปรับแรงดันวงจรถนอมให้คงที่ ที่ พิกัดมีเบตเตอร์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานผ่านคอนเวอเตอร์ ในการทดลองนี้ให้ควบคุมความเร็วที่ 2500 rpm รูปที่ 11 แสดงสัญญาณไบอัสแกมมอลเฟท ทำการสับไฟฟ้าควบคุม ความเร็วของมอเตอร์ให้คงที่ แรงดันเริ่มต้นขณะทำการ ทดลองโธนวงจรถนอมเจอร์เป็น 240 Vdc ความถี่ในการสับ ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันที่ป้อนให้กับวงจรถนอมดังแสดง ในรูปที่ 12 ถึง 14 เมื่อระดับของแรงดันลดลงจนถึง 188 V ซึ่งเป็นแรงดันที่ต่ำมากๆ จนวงจรสับไฟฟ้าไม่สามารถจะ รักษาระดับการควบคุมไว้ได้

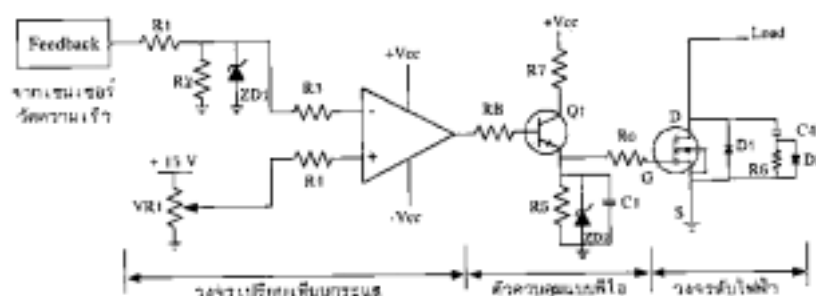


(a)

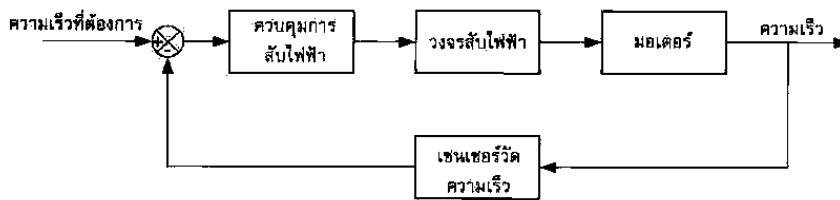


(b)

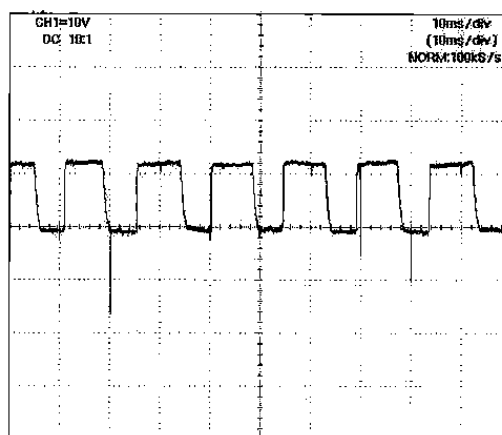
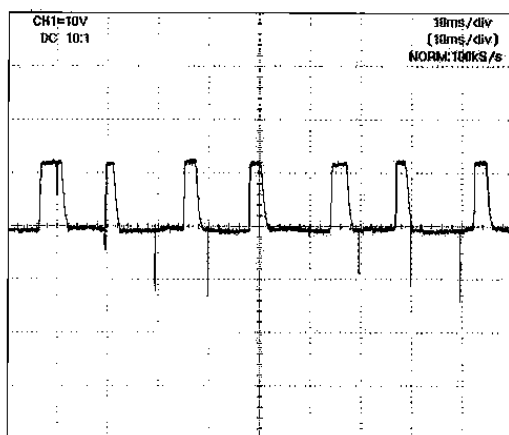
รูปที่ 8 รูปคลื่นแสดงการทำงานของวงจรสับไฟฟ้า



รูปที่ 9 วงจรควบคุมการสับไฟฟ้าแบบป้อนกลับและวงจรสับไฟฟ้า

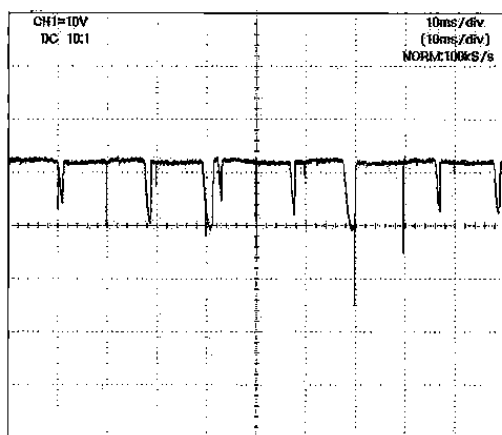
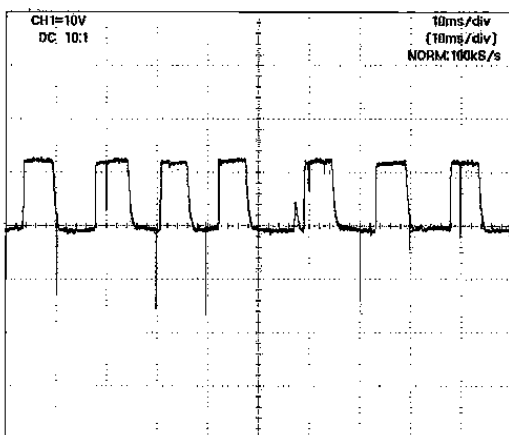


รูปที่ 10 แผนภาพบล็อกการควบคุมความเร็วมอเตอร์



รูปที่ 11 สัญญาณจุดขนานมอสเฟตช่วงพัลส์สี่เหลี่ยมเป็นช่วงที่มอสเฟตนำกระแสแรงดันเฉลี่ยเอาต์พุตรักษาไว้ที่ 220 Vdc ขณะที่อินพุตของวงจรสับไฟฟ้าเป็น 240 Vdc

รูปที่ 13 สัญญาณจุดขนานทำนองเดียวกับรูปที่11 เว้นแต่กรณีนี้เป็นการป้อนอินพุตเท่ากับ 220 Vdc

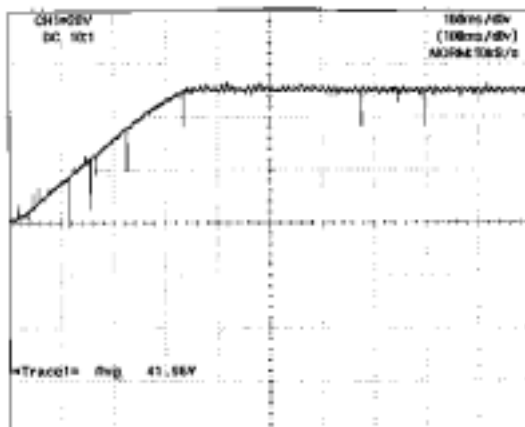


รูปที่12 สัญญาณจุดขนานทำนองเดียวกับรูปที่11 เว้นแต่กรณีนี้เป็นการป้อนอินพุตเท่ากับ 235 Vdc

รูปที่ 14 สัญญาณจุดขนานทำนองเดียวกับรูปที่11 เว้นแต่กรณีนี้เป็นการป้อนอินพุตเท่ากับ 200 Vdc



รูปที่ 15 ระบบที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 16 สัญญาณป้อนกลับที่ได้จากเซนเซอร์วัดความเร็วจากช่วงเริ่มเดินเครื่องจนถึงภาวะคงตัวที่ระดับอัตรา 2500 rpm

สรุป

จากการทดสอบกับระบบที่แสดงในรูปที่ 15 ทำให้ทราบถึงขอบเขตในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ชนิดวงจรถนอมแยกส่วนด้วยวงจรรับไฟฟ้า โดยมีแบตเตอรี่ตะกั่วกรดเป็นแหล่งพลังงานวงจรสามารถทำงานได้ผลดีตามวัตถุประสงค์ กล่าวคือสามารถรักษาความเร็วรอบที่ 2500 rpm ของภาระให้คงที่ได้ แต่จะต้องหยุดการขับเคลื่อนภาระทันทีที่ก่อนที่แรงดันแบตเตอรี่ จะลดระดับจน

มอเตอร์เครื่องสี่ขั้วขนาดเล็กแบบเคลื่อนที่ ที่ต้องใช้ความเร็วรอบที่เหมาะสม จึงจะได้ขั้วที่ไม่หักคุณภาพดี วิธีการที่น่าเสนอมีข้อดีคือ การปรับเปลี่ยนสัญญาณการควบคุมเกิดขึ้นแบบต่อเนื่องทันทีทันใด เมื่อได้รับผลตอบสนองจากสัญญาณป้อนกลับรูปที่ 16 แสดงอัตราเร็วของมอเตอร์ภายใต้การควบคุม มอเตอร์ใช้เวลาเริ่มเดินเครื่อง 350 มิลลิวินาที จึงให้อัตราความเร็วรอบคงตัวที่ 2500 rpm เทคนิคที่น่าเสนอช่วยลดความสูญเสียและความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับแบตเตอรี่ และผลผลิต เมื่อแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงแบบชั่วขณะ อีกทั้งอุปกรณ์ยังคงทนต่อสภาพภูมิอากาศและฝุ่นละอองได้ดี อุปกรณ์ทั้งหมดสามารถหาได้ภายในประเทศ การบำรุงรักษาสามารถทำได้โดยง่ายและไม่ต้องการการดูแลรักษา มากมายนัก

เอกสารอ้างอิง

1. Nelson, P. J., and Bolh, D. W.(1996).Basics and advances in battery systems. IEEE Transactions. On Industry Applications, 31(2) :419 - 428.
2. Preeman, J.A.(1999). Switching Power Supply Design. (2nd ed). United States of America : McGraw-Hill .
3. Salameh, M.Z., Casaccio, M.A., and Lynch, W.A. (1992).A mathematical model for lead-acid Battery. IEEE Transactions On Energy Conversion, 7(1):93-98.
4. Yuvrajjan, S.(1990). Switching Characteristics of An IGBT. IEEE Transactions On Industrial Electronics. : 1589 - 1593



**“ใช้ไฟฟ้าอย่างประหยัด
จะช่วยรัฐพัฒนาประเทศ”**

ที่ ทม 0501(28)/5/ 11 1



สถานจัดการและอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
239 ถ.หัวหมาก ต.สุเทพ
อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

28 กันยายน 2544

เรื่อง ขอบขออนุญาต

เรียน คุณศักดิ์ศรี รมวิบูล

ด้วย สถานจัดการและอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้จัดทำวารสาร "โลกพลังงาน" ขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่สาระความรู้ ข้อมูล ข่าวสารที่มีประโยชน์ในด้านพลังงาน ให้นักศึกษาประกอบการเฝ้าระวังและโรงงาน ตลอดจนผู้ที่สนใจทั่วไป ความโดยละเอียดหาทราบแล้ว

ในกรณี สถานฯ ขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างสูง ที่ท่านได้กรุณาเขียนบทความ เรื่อง "การขโมยแอมป์ขนาด 800 W, 220 V ที่ 2500 rpm ด้วยแบตเตอรี่ตะกั่วกรด" ลงในวารสาร "โลกพลังงาน" ของสถานฯ ฉบับที่ 13 ประจำเดือนตุลาคม - ธันวาคม 2544 บัดนี้ ทางสถานฯ ได้จัดพิมพ์บทความดังกล่าวเพื่อใช้ในการเผยแพร่เป็นที่เรียบร้อยแล้ว และพร้อมกันนี้ทางสถานฯ ได้ขออนุญาตวารสารฉบับดังกล่าวแก่ท่านจำนวน 1 ฉบับ เพื่อให้ประโยชน์ต่อไป หากบทความดังกล่าวมีข้อผิดพลาดแต่ประการใด ทางสถานฯ ต้องขออภัยมา ณ ที่นี้ และยืนยันว่าเป็นอย่างยิ่งที่จะรีบคำพิชิตจากท่าน

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะคงจะได้รับความสะดวกและประโยชน์จากท่านอีกในอนาคตต่อไป

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ชัชวาล ตั้งศุภกิจศิริ)
ผู้อำนวยการสถานจัดการและอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ฝ่ายวางแผนและพิธีการ

โทรศัพท์ (053) 942007-9

โทรสาร (053) 892375

ภาคผนวก จ.

รายละเอียดทางเทคนิคของอุปกรณ์คุมค่ากระแสและจับมอสเฟต

รายละเอียดทางเทคนิคของอุปกรณ์คุ้มครองค่ากระแสและขั้วมอสเฟต.

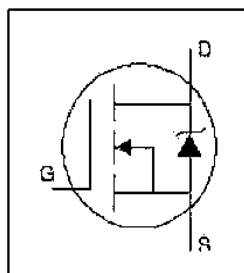
International
IR Rectifier

PD - 9.1232

IRFP460LC

HEXFET® Power MOSFET

- Ultra Low Gate Charge
- Reduced Gate Drive Requirement
- Enhanced 30V V_{GS} Rating
- Reduced C_{iss} , C_{oss} , C_{rss}
- Isolated Central Mounting Hole
- Dynamic dv/dt Rated
- Repetitive Avalanche Rated



$$V_{DSS} = 500V$$

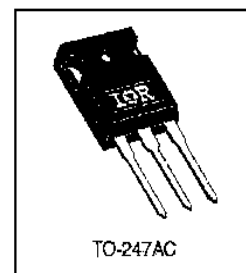
$$R_{DS(on)} = 0.27\Omega$$

$$I_D = 20A$$

Description

This new series of Low Charge HEXFET Power MOSFETs achieve significantly lower gate charge over conventional MOSFETs. Utilizing advanced Hexfet technology the device improvements allow for reduced gate drive requirements, faster switching speeds and increased total system savings. These device improvements combined with the proven ruggedness and reliability of HEXFETs offer the designer a new standard in power transistors for switching applications.

The TO-247 package is preferred for commercial-industrial applications where higher power levels preclude the use of TO-220 devices. The TO-247 is similar but superior to the earlier TO-218 package because of its isolated mounting hole.



Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	20	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	12	
I_{DM}	Pulsed Drain Current $\text{\textcircled{Q}}$	80	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	280	W
	Linear Derating Factor	2.2	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 30	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy $\text{\textcircled{Q}}$	960	mJ
I_{AR}	Avalanche Current $\text{\textcircled{Q}}$	20	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy $\text{\textcircled{Q}}$	28	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt $\text{\textcircled{Q}}$	3.5	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to + 150	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw.	10 lb•in (1.1N•m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	—	0.45	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	—	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	—	—	

IRFP460LC

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	500	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.59	—	$V/^\circ\text{C}$	Reference to 25°C , $I_D = 1mA$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.27	Ω	$V_{GS} = 10V, I_D = 12A$ ⓐ
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	12	—	—	S	$V_{DS} = 50V, I_D = 12A$
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS} = 500V, V_{GS} = 0V$
		—	—	250	μA	$V_{DS} = 400V, V_{GS} = 0V, T_J = 125^\circ\text{C}$
I_{DSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{DS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100	nA	$V_{DS} = -20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	120	nC	$I_D = 20A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	32	nC	$V_{DS} = 400V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	49	nC	$V_{GS} = 10V$, See Fig. 8 and 13 ⓑ
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	18	—	ns	$V_{DD} = 250V$ $I_D = 20A$ $R_G = 4.3\Omega$ $R_D = 12\Omega$, See Fig. 10 ⓑ
t_r	Rise Time	—	77	—		
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	40	—		
t_f	Fall Time	—	43	—		
L_D	Internal Drain Inductance	—	5.0	—	nH	Between lead, 8mm (0.25in.) from package and center of die contact
L_S	Internal Source Inductance	—	13	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	3600	—	pF	$V_{DS} = 0V$ $V_{GS} = 25V$ $f = 1.0MHz$, See Fig. 5
C_{oss}	Output Capacitance	—	440	—		
C_{res}	Reverse Transfer Capacitance	—	39	—		

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	20	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ⓐ	—	—	80		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.8	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 20A, V_{GS} = 0V$ ⓑ
t_r	Reverse Recovery Time	—	570	860	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 20A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	6.6	9.9	μC	$dI/dt = 100A/\mu s$ ⓑ
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S + L_D$)				

Notes:

ⓐ Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)

ⓑ $I_{SD} \leq 20A, dI/dt \leq 100A/\mu s, V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}, T_J \leq 150^\circ\text{C}$

ⓐ $V_{DD} = 25V$, starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 4.3mH$, $R_G = 25\Omega$, $I_{DS} = 20A$. (See Figure 12)

ⓑ Pulse width $\leq 300\mu s$; duty cycle $\leq 2\%$.



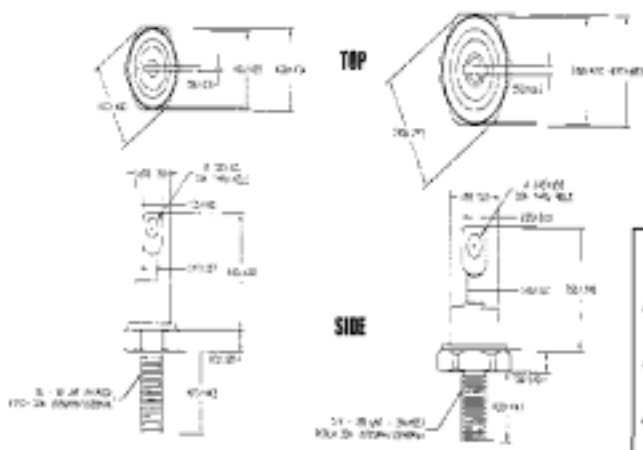
POWER RECTIFIERS
6 AMP TO 70 AMP STANDARD,
FAST, ULTRA-FAST RECOVERY

12251 TOWNE LAKE DRIVE, FORT MYERS, FLORIDA, 33913 • TEL: (941) 768-6800 • FAX: (941) 768-6868

DO-4

DO-5

GLASS PASSIVATED DO-4 AND DO-5 RECTIFIERS



100-1000 VOLTS

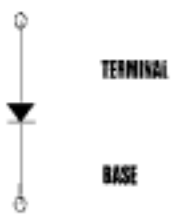
6 AMPS TO 70 AMPS

- DO-4 AND DO-5 DEVICE SPECIFICATIONS**
- Hermetically sealed glass to metal packaging
 - For military and industrial use
 - Standard Polarity cathode to base
 - Copper terminals provide secure connections and excellent conductivity.
 - Operating and storage temperature -65°C to +150°C

A1 Dimensions in Inches

A2 Dimensions in Inches

ELECTRICAL SCHEMATIC



POWER RECTIFIER CUSTOM ORDERING SPECIFIER

CONTACT FACTORY FOR ELECTRICAL SPECIFICATIONS ON CUSTOM PARTS.

S

PACKAGE TYPE DO-4 OR DO-5	RECTIFIER DIE	PEAK INVERSE VOLTAGE	MAXIMUM TIME OF REVERSE RECOVERY BLANK INDICATES 1000NS	
------------------------------	---------------	----------------------	--	--

AVAILABLE SIZES	
CODE	DIE SIZE
8	.100" SQ
18	.115" SQ
20	.125" SQ
25	.185" SQ
40	.227" SQ
70	.280" SQ

◆ BLANK- INDICATES STANDARD POLARITY CATHODE TO BASE
 ◆ R- INDICATES REVERSE POLARITY ANODE TO BASE



SUSSEX
SEMICONDUCTOR, INC.

POWER RECTIFIERS
6 AMP TO 70 AMP STANDARD,
FAST, ULTRA-FAST RECOVERY

12251 TOWNE LAKE DRIVE, FORT MYERS, FLORIDA, 33913 • TEL: (941) 768-6800 • FAX: (941) 768-6868

TABLE 15A - FAST AND ULTRA FAST RECOVERY POWER RECTIFIER DIE ELECTRICAL SPECIFICATIONS (NOTE 1)

JEDEC PART NUMBER (NOTE 2)	SUSSEX PART NUMBER	MAX. AVERAGE FORWARD RECTIFIED OUTPUT CURRENT $T_J=25^\circ\text{C}$ AMPS	MAX. INSTANTANEOUS FORWARD VOLTAGE		MAX. LEAKAGE CURRENT (I _s) @ V _{sc}		PEAK FORWARD SURGE CURRENT (NOTE 3) AMPS	PEAK INVERSE VOLTAGE (PIV) VOLTS	MAX. RMS INPUT VOLTAGE VOLTS	TIME OF RECOVERY (T _{rr}) (NOTE 4) μsec
			FORWARD VOLTAGE TEST CURRENT (I _F) AMPS	PEAK FORWARD VOLTAGE (V _{FM}) VOLTS	V _{sc} VOLTS	I _s μA				
1N2879	DD4-58-90-200	8.0	8.0	1.400	80	10	150	50	38	200
1N2880	DD4-58-200-200	8.0	8.0	1.400	100	10	150	100	70	200
1N2881	DD4-58-200-300	8.0	8.0	1.400	200	10	150	200	140	300
1N2881A	DD4-58-200-300	8.0	8.0	0.900	200	10	150	300	140	300
1N2882	DD4-58-300-200	8.0	8.0	1.500	300	10	150	300	210	200
1N2883	DD4-58-400-200	8.0	8.0	1.400	400	10	150	400	200	200
1N2883A	DD4-58-400-300	8.0	8.0	0.900	400	10	150	400	200	300
N/A	DD4-58-600-200	8.0	8.0	1.500	600	10	150	600	420	200
1N2889	DD4-518-50-200	12.0	12.0	1.400	80	10	250	80	38	200
1N2890	DD4-518-100-200	12.0	12.0	1.400	100	10	100	100	75	200
1N2891	DD4-518-200-200	12.0	12.0	1.400	200	10	250	200	140	200
1N2892	DD4-518-300-200	12.0	12.0	1.400	300	10	250	300	210	200
1N2893	DD4-518-400-200	12.0	12.0	1.400	400	10	250	400	260	200
N/A	DD4-518-500-200	12.0	12.0	1.500	500	10	250	500	420	200
N/A	DD4-518-600-200	12.0	12.0	1.600	600	10	240	600	550	200
N/A	DD4-518-1000-300	12.0	12.0	1.600	1000	10	240	1000	700	300
N/A	DD4-518-200-35	12.0	12.0	0.975	200	10	250	200	140	35
N/A	DD4-518-400-60	12.0	12.0	0.975	400	10	250	400	280	60
N/A	DD4-518-600-60	12.0	12.0	1.000	600	10	250	600	400	60
N/A	DD4-518-800-50	12.0	12.0	1.000	800	10	240	800	500	50
N/A	DD4-518-1000-20	12.0	12.0	2.000	1000	10	240	1000	700	50
1N3903	DD8-620-100-200	20.0	20.0	1.400	100	20	400	100	75	200
1N3903	DD8-620-200-200	20.0	20.0	1.400	200	20	400	200	140	200
1N3903	DD8-620-300-200	20.0	20.0	1.400	300	20	400	300	210	200
N/A	DD8-620-400-200	20.0	20.0	1.400	400	20	400	400	280	200
N/A	DD8-620-500-50	25.0	25.0	1.000	500	20	400	500	420	50
N/A	DD8-620-600-75	25.0	25.0	1.000	600	20	400	600	360	75
N/A	DD8-620-1200-75	25.0	25.0	2.000	1000	25	400	1000	700	75
N/A	DD8-640-200-50	40.0	40.0	1.000	200	20	500	200	140	50
N/A	DD8-640-300-50	40.0	40.0	1.000	300	20	500	300	210	50
N/A	DD8-640-1000-50	40.0	40.0	2.000	1000	25	600	1000	700	50
N/A	DD8-670-50-80	70.0	70.0	1.000	50	20	750	200	140	80
N/A	DD8-670-100-80	70.0	70.0	1.000	100	20	750	400	280	80
N/A	DD8-670-200-80	70.0	70.0	1.000	200	20	750	600	420	80
N/A	DD8-670-300	70.0	70.0	1.000	300	20	750	800	500	80

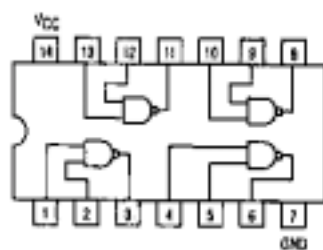
NOTES

NOTE 1: ELECTRICAL CHARACTERISTICS MEASURED AT A JUNCTION TEMPERATURE STARTED WITH THE SAME PERFORMANCE WITH THE SAME PERFORMANCE.
 NOTE 2: JEDEC PART NUMBERS REFER TO PACKAGED DEVICES. THE DISS INDICATED BY THESE NUMBERS, IF PROPERLY PACKAGED, WILL OPERATE WITH THE SAME PERFORMANCE.
 NOTE 3: PEAK FORWARD SURGE CURRENT MEASURED FROM A SINGLE SIN-WAVE BEING SUPERIMPOSED ON A RATED LOAD (JEDEC METHOD).

LS TTL Logic

QUAD 2-INPUT NAND GATE

SN54/74LS00

QUAD 2-INPUT NAND GATE
LOW POWER SCHOTTKYJ SUFFIX
CERAMIC
CASE 832-08N SUFFIX
PLASTIC
CASE 948-06D SUFFIX
SOIC
CASE 751A-02

ORDERING INFORMATION

SN54LSXXJ Ceramic
SN74LSXXN Plastic
SN74LSXXD SOIC

GUARANTEED OPERATING RANGES

Symbol	Parameter		Min	Typ	Max	Unit
V _{CC}	Supply Voltage	54	4.5	5.0	5.5	V
		74	4.75	5.0	5.25	
T _A	Operating Ambient Temperature Range	54	-55	25	125	°C
		74	0	25	70	
I _{OH}	Output Current — High	54, 74			-0.4	mA
I _{OL}	Output Current — Low	54			4.0	mA
		74			8.0	

LS TTL Logic

DECADE COUNTER; DIVIDE-BY-TWELVE COUNTER; 4-BIT BINARY COUNTER

The SN54/74LS90, SN54/74LS92 and SN54/74LS93 are high-speed 4-bit ripple type counters partitioned into two sections. Each counter has a divide-by-two section and either a divide-by-five (LS90), divide-by-six (LS92) or divide-by-eight (LS93) section which are triggered by a HIGH-to-LOW transition on the clock inputs. Each section can be used separately or tied together (\overline{CP} to \overline{CP}) to form BCD, bi-quinary, modulo-12, or modulo-16 counters. All of the counters have a 2-input gated Master Reset (Clear), and the LS90 also has a 2-input gated Master Set (Preset B).

- Low Power Consumption . . . Typically 46 mW
- High Count Rates . . . Typically 42 MHz
- Choice of Counting Modes . . . BCD, Bi-Quinary, Divide-by-Twelve, Binary
- Input Clamp Diodes Limit High Speed Termination Effects

PIN NAMES

		LOADING (Note a)	
		HIGH	LOW
\overline{CP}_0	Clock (Active LOW going edge) Input to +2 Section	0.5 U.L.	1.5 U.L.
\overline{CP}_1	Clock (Active LOW going edge) Input to +5 Section (LS90), +6 Section (LS92)	0.5 U.L.	2.0 U.L.
\overline{CP}_2	Clock (Active LOW going edge) Input to +8 Section (LS93)	0.5 U.L.	1.0 U.L.
$\overline{MR}_1, \overline{MR}_2$	Master Reset (Clear) Inputs	0.5 U.L.	0.25 U.L.
$\overline{MS}_1, \overline{MS}_2$	Master Set (Preset B, LS90) Inputs	0.5 U.L.	0.25 U.L.
Q_0	Output from +2 Section (Notes b, c)	10 U.L.	5 (2.5) U.L.
Q_1, Q_2, Q_3	Output from +5 (LS90), +6 (LS92), +8 (LS93) Sections (Note b)	10 U.L.	5 (2.5) U.L.

NOTES:

- a. 1 TTL Unit Load (U.L.) = 40 μ A HIGH/1.6 mA LOW.
 b. The Output LOW drive factor is 2.5 U.L. for Military (54) and 5 U.L. for commercial (74) Temperature Ranges.
 c. The Q_0 Outputs are guaranteed to drive the full fan-out plus the \overline{CP}_1 input of the device.
 d. To insure proper operation the rise (t_r) and fall time (t_f) of the clock must be less than 100 ns.

**SN54/74LS90
SN54/74LS92
SN54/74LS93**

**DECADE COUNTER;
DIVIDE-BY-TWELVE COUNTER;
4-BIT BINARY COUNTER**
LOW POWER SCHOTTKY



J SUFFIX
CERAMIC
CASE 632-06



N SUFFIX
PLASTIC
CASE 646-06

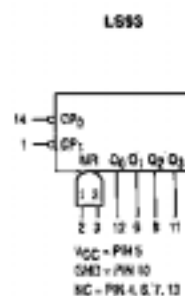
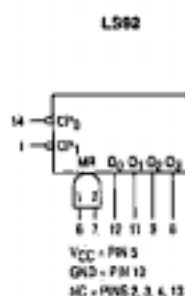
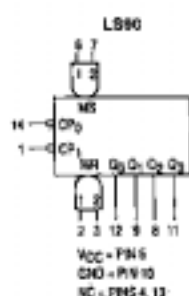


D SUFFIX
SOIC
CASE 751A-02

ORDERING INFORMATION

SN54LSXXJ Ceramic
SN74LSXXN Plastic
SN74LSXXD SOIC

LOGIC SYMBOL



5427 / 7427 Triple 3-Input Positive-NOR Gate

	Schottky TTL				High-Speed TTL				Low-Power Schottky TTL				Standard TTL				Low-Power TTL				
	Device Type	Package			Device Type	Package			Device Type	Package			Device Type	Package			Device Type	Package			
		C	P	M	Q		C	P	M	Q		C	P	M	Q		C	P	M	Q	
TTL																					
FAIRCHILD																					
MOTOROLA																					
M.S.C.																					
PHILIPS																					
SIENETICS																					
SIEMENS																					
FUJITSU																					
HITACHI																					
MITSUBISHI																					
NCC																					
TOSHIBA																					

Electrical Characteristics 5427/7427
absolute maximum ratings over operating free-air temperature range

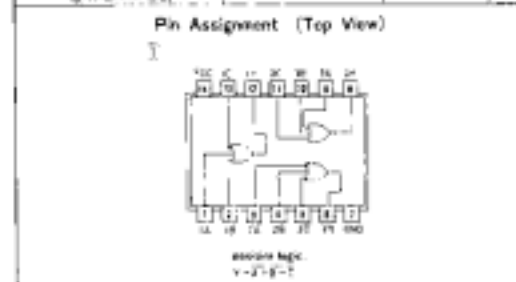
Supply voltage, V _{CC}	7.0	Operating power	500mW	1000	1000
Input voltage	0 to 7.0	Storage power	500mW	1000	1000
Output voltage	0 to 7.0	Maximum junction temp.	175	175	175

recommended operating conditions

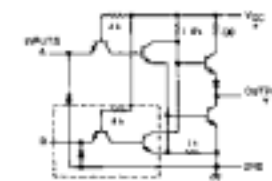
	5427/7427	5427/7427	5427/7427	5427/7427	5427/7427
Supply voltage, V _{CC}	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Input voltage, V _I	0 to 5.0	0 to 5.0	0 to 5.0	0 to 5.0	0 to 5.0
Output voltage, V _O	0 to 5.0	0 to 5.0	0 to 5.0	0 to 5.0	0 to 5.0
Storage temperature, T _s	-55 to 125	-55 to 125	-55 to 125	-55 to 125	-55 to 125

electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	MIN	TYP‡	MAX	UNIT
V _{CC}	Maximum rated voltage		7		V
V _I	Maximum rated voltage		0.8		V
V _O	Maximum rated voltage	V _{CC} - 0.5		0	V
V _{OH}	Minimum output voltage	V _{CC} - 0.5	2.7	2.5	V
V _{OL}	Maximum output voltage	V _{CC} - 0.5	0.5	0.4	V
I _{CC}	Input current at V _{CC} = 5.0V, V _I = 0V		8.1		mA
I _{OH}	Output current at V _{CC} = 5.0V, V _O = 2.7V		35		mA
I _{OL}	Output current at V _{CC} = 5.0V, V _O = 0.4V		35		mA
t _{PLH}	Propagation delay time (low-to-high) at V _{CC} = 5.0V, V _I = 0V, V _O = 2.7V		2.0	4.0	nS
t _{PLL}	Propagation delay time (low-to-low) at V _{CC} = 5.0V, V _I = 0V, V _O = 0.4V		2.0	4.0	nS
t _{PHL}	Propagation delay time (high-to-low) at V _{CC} = 5.0V, V _I = 0V, V _O = 0.4V		2.0	4.0	nS
t _{PHL}	Propagation delay time (high-to-high) at V _{CC} = 5.0V, V _I = 0V, V _O = 2.7V		2.0	4.0	nS
f _M	Maximum operating frequency at V _{CC} = 5.0V, V _I = 0V, V _O = 2.7V		15		MHz

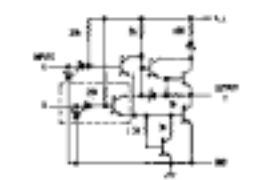


Schematics (each gate)



The portion of the schematic within the dashed line is repeated in the C input of the 5427.

27 CIRCUIT



The portion of the schematic within the dashed line is repeated for the C input of the 5427.

5427 CIRCUIT

Resistor values shown are nominal and in ohms.

† For conditions shown to MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.
‡ Typical values at V_{CC} = 5.0V, T_a = 25°C.
Values may differ from those shown for other V_{CC} values.

ประวัติผู้เขียน

นายศักดิ์ระวี ระวีกุล เกิดเมื่อวันที่ 17 มิถุนายน พ.ศ. 2515 สำเร็จปริญญาตรีในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า-ไฟฟ้ากำลัง จากศูนย์กลางการเรียนการสอนระดับปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล เมื่อ พ.ศ. 2538 เคยสอนวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในขณะที่ศึกษาระดับปริญญาโท มีผลงานวิชาการที่ได้รับตีพิมพ์เผยแพร่ 1 บทความ ดังที่ได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก จ. ปัจจุบันรับราชการในตำแหน่งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น