



รถไฟฟ้ามอเตอร์กระแสดตรง

DC ELECTRIC VEHICLE

โดย

นายฉัตรชัย	ลอยบัณดิษฐ	รหัส 36014088
นายปณิธาน	ศิริพัฒนานุกุล	รหัส 36014241
นายประสพสุข	ตรีสายลักษณ์	รหัส 36014249
นายปิยะพงศ์	วงศ์ป้อม	รหัส 36014267
นายปิยะศักดิ์	บุญปิ่น	รหัส 36014269
นายปวิราช	เหล่าอยู่คง	รหัส 36014270
นายพันธ์ธร	ภูพุกก์	รหัส 36014288

30.06.2539  
 วัน เดือน ปี.....  
 เลขทะเบียน.....038266  
 เลขเรียกหนังสือ.....T 942.46.0317

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ปีการศึกษา 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ 038266 นด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2539

รถไฟฟ้ามอเตอร์กระแสตรง  
DC ELECTRIC VEHICLE

โดย

นายฉัตรชัย	ลอยบัณดิษฐ	รหัส 36014088
นายปณิธาน	ศิริพัฒนานุกุล	รหัส 36014241
นายประสพสุข	ตรีสายลักษณ์	รหัส 36014249
นายปิยะพงศ์	วงศ์ป้อง	รหัส 36014267
นายปิยะศักดิ์	บุญปิ่น	รหัส 36014269
นายปวิราช	เหล่าอยู่คง	รหัส 36014270
นายพันธ์ธร	ภูทุ๊ก	รหัส 36014288

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ.ประภาส ไพรสุวรรณ

อ.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ 2539

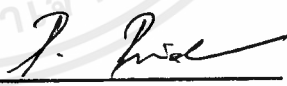
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

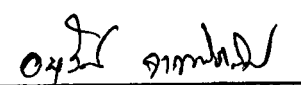
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง รถไฟฟ้ามอเตอร์กระแสดตรง

ผู้จัดทำ

1. นายฉัตรชัย ลอยบัณดิษฐ
2. นายปณิธาน ศิริพัฒนานุกุล
3. นายประสพสุข ตรีสายลักษณ์
4. นายปิยะพงศ์ วงศ์ป๋อง
5. นายปิยะศักดิ์ ปุญจุบัน
6. นายปวิราช เหล่าอยู่คง
7. นายพันธ์ธร ภูพุกก์

  
อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อ.ประภาส ไพรสุวรรณ)

  
อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อ.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รถไฟฟ้ามอเตอร์กระแสดรง

นายฉัตรชัย ลอยบัณดิษฐ

นายปณิธาน ศิริพัฒนานุกุล

นายประสพสุข ตรีสายลักษณ์

นายปิยะพงศ์ วงศ์ป๋อง

นายปิยะศักดิ์ บุญปิ่น

นายปวิราช เหล่าอยู่คง

นายพันธ์ธร ภูพุกก์

อ.ประกาย ไพรสุวรรณ

อ.อนวัชณ์ จางวนิชเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2539

### บทคัดย่อ

ปริญญาบัตรฉบับนี้ได้กล่าวถึงหลักการทำงานและการออกแบบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าโดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เป็นตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงตัวต้นกำลัง ซึ่งใช้วงจรถออปเปอร์เป็นอุปกรณ์ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ นอกจากนี้ยังใช้ LDR เป็นตัวปรับความต้านทานในวงจรแทนที่จะใช้ตัวความต้านทานแบบปรับค่าได้อย่างปกติ (ในส่วนของคันเร่ง) เพื่อลดการสูญเสียและความสึกหรอของหน้าสัมผัส นอกจากนี้ยังได้เพิ่มการทำงานของเครื่องยนต์ในการขับเคลื่อนเพรสเซอร์แอร์และไคซาร์จเพื่ออำนวยความสะดวกเหมือนรถยนต์ทั่วไป โครงการนี้เป็นการจัดทำรถต้นแบบเพื่อประโยชน์ในการนำไปใช้พัฒนาใช้งานให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อไปในอนาคต

# DC ELECTRIC VEHICLE

Mr.Chatchai Loybundit

Mr.Panithan Siripatthanukul

Mr.Prasopsuk Trisaiyaluk

Mr.Piyapong Wongpong

Mr.Piyasak Poonpun

Mr. Pirash Laoyukong

Mr.Panthorn Pupuk

Prapat Prisuwanna

Anuwat Jangwanichleod

Advisor; 1996

## ABSTRACT

This project present the principle of control system and design for the drive unit of DC Electric Vehicle. The driver unit is DC motor that supply from battery, and speed control by the chopper circuit. In chopper circuit use LDR instead of common very resistet for reduce losses and brake at the contact surface. And then this system add compressor air and discharge by machine drive them. This data will be referenced to the system for using in the future.

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 แนวความคิดในการออกแบบ ประโยชน์ที่ได้รับและความเป็นไปได้	2
2.1 แนวความคิดในการออกแบบ	2
2.2 ประโยชน์ที่จะได้รับ	3
บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการที่ใช้รองรับแนวความคิด	6
3.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง	6
3.2 วิธีการควบคุมความเร็ว	20
บทที่ 4 บล็อกไดอะแกรมของระบบและภาพร่างของรถไฟฟ้า	26
บทที่ 5 แบตเตอรี่	28
5.1 หลักการทำงานของแบตเตอรี่	28
5.2 ส่วนประกอบและโครงสร้างของแบตเตอรี่	28
5.3 ขนาดความจุของแบตเตอรี่	29
5.4 แรงดันของแบตเตอรี่	30
5.5 ความต้านทานภายในแบตเตอรี่	30
5.6 คุณสมบัติการอัดไฟ	30
5.7 คุณสมบัติในการจ่ายไฟ	31
5.8 ขั้นตอนในการอัดไฟเข้าแบตเตอรี่	32
5.9 ข้อควรระวังในการใช้งานและบำรุงรักษาแบตเตอรี่	32
บทที่ 6 วงจรชาร์จแบตเตอรี่และระบบแอร์ คอมเพรสเซอร์	34
6.1 วงจรชาร์จแบตเตอรี่	34
6.2 ระบบการทำความเย็นภายในรถ	48
บทที่ 7 วงจรควบคุมความเร็ว	52
7.1 วงจรเบื้องต้นของ step down converter	52
7.2 เทคนิคในการควบคุมวงจร chopper	53

7.3 เทคนิคในการควบคุม constant frequency TRC	52
7.4 การวิเคราะห์การนำกระแสอย่างต่อเนือง	55
7.5 ขอบเขตระหว่างการนำแบบต่อเนืองและไม่ต่อเนือง	56
7.6 การคำนวณ output current และ voltage เปรียบเทียบระหว่างโหมด	57
7.7 ระบบเดินหน้า-ถอยหลังของรถไฟฟ้า	59
บทที่8 การคำนวณหาพิกัดกำลังและการเลือกชนิดของมอเตอร์	63
8.1 การคำนวณหาพิกัดมอเตอร์	63
8.2 การเลือกมอเตอร์	63
8.3 การถอดชิ้นมอเตอร์	65
8.4 การพันขดลวดฟิวส์	65
8.5 การเชื่อมต่อระหว่างขดฟิวส์	71
บทที่9 การทดสอบและผลการทดลอง	73
บทที่10 สรุปและวิจารณ์โครงการ	78
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูป 2.1 block diagram ของรถไฟฟ้าโดยทั่วไป	2
รูป 3.1 แสดงวงจรสมมูล separately excited และ shunt dc motor	7
รูป 3.2 แสดงคุณสมบัติของ separately excited และ shunt dc motor	9
รูป 3.3 แสดงคุณสมบัติของ separately excited และ shunt dc motor เมื่อความ ต้านทานของขดลวดสนาม $R_f$ เปลี่ยนแปลง	9
รูป 3.4 แสดงคุณสมบัติของ separately excited และ dc motor เมื่อ $V_a$ เปลี่ยนแปลง	10
รูป 3.5 แสดงคุณสมบัติของ separately excited และ shunt dc motor เมื่อความ ต้านทาน $R_a$ เปลี่ยนแปลง	11
รูป 3.6 วงจรสมมูลของ serie dc motor	12
รูป 3.7 แสดงคุณสมบัติของ serie dc motor	13
รูป 3.8 แสดงวงจรสมมูลของ compound dc motor	14
รูป 3.9 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ serie commutatively compoud และ shunt dc motor	15
รูป 3:10 แสดงคุณสมบัติของ differentially compound dc motor	16
รูป 3.11 แสดงฟังก์ชันกำลังงานของ dc motor	19
รูป 3.12 แสดงคุณลักษณะของความเร็วรอบกับแรงบิดของโหลดเปรียบเทียบ กับมอเตอร์ชนิดต่างๆ	19
รูป 3.13 แสดงกราฟ speed-torque ของมอเตอร์แบบ separately และ serie	21
รูป 3.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง speed-torque ของมอเตอร์กระแสตรง ที่ควบคุมโดยใช้วิธี amature resistance control	24
รูป 6.1 ภาพตัดแสดงชิ้นส่วนประกอบชิ้นส่วนของ alternator	34
รูป 6.2 เปรียบเทียบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสไฟสลับ	35
รูป 6.3 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า	35
รูป 6.4 แสดงตำแหน่งต่างๆที่ขดลวด rotor หมุนครบหนึ่งรอบเกิดกระแส ไฟฟ้าคลื่นบวกและคลื่นลบ	36
รูป 6.5 วงจรการเรียงกระแสแบบ half wave	37
รูป 6.6 วงจรการเรียงกระแสแบบ full wave	38



รูป 6.7	ขดลวด 3 ขดผลิตกระแสไฟฟ้า 3 เฟส	39
รูป 6.8	กระแสไฟฟ้าออกมามากเกินความราบเรียบของกระแสไฟฟ้า	39
รูป 6.9	การต่อขดลวดแบบสตาร์ และการเข้ากับไดโอด	40
รูป 6.10	การต่อขดลวดแบบเดลต้าและต่อเข้ากับไดโอด	40
รูป 6.11	การเรียงกระแสของ alternator ขั้นที่ 1	41
รูป 6.11	การเรียงกระแสของ alternator ขั้นที่ 2	41
รูป 6.11	การเรียงกระแสของ alternator ขั้นที่ 3	42
รูป 6.11	การเรียงกระแสของ alternator ขั้นที่ 4	42
รูป 6.11	การเรียงกระแสของ alternator ขั้นที่ 5	43
รูป 6.11	การเรียงกระแสของ alternator ขั้นที่ 6	43
รูป 6.17	แสดงชิ้นส่วนประกอบของโรเตอร์	44
รูป 6.18	แสดงแปรงถ่านที่ต่อกับวงแหวนสลิปริง	45
รูป 6.19	โครงเหล็กก่อนและขดลวดตัวนำของสเตเตอร์	45
รูป 6.20	ชุดไดโอดบวกและลบแบบแยก	46
รูป 6.21	ชุดไดโอดบวกและลบแบบรวม	46
รูป 6.22	ชุดไดโอดบวกและลบแบบรวม(mitsubishi)	46
รูป 6.23	ชุดไดโอดบวกและลบแบบรวม(hitashi)	47
รูป 6.24	วัฏจักรทำความเย็น	47
รูป 6.25	การทำความเย็นด้านความดันสูง	47
รูป 6.26	การทำความเย็นด้านความดันต่ำ	49
รูป 7.1	แสดงวงจร step down และค่า output voltage	51
รูป 7.2	แสดงการทำงานแบบ pluse width control	53
รูป 7.3	แสดงการนำกระแสต่อเนื่องของวงจร	54
รูป 7.4	แสดงค่า output current เฉลี่ย	56
รูป 7.5	แสดงการนำกระแสไม่ต่อเนื่องของวงจร	57
รูป 7.6	แสดงคุณลักษณะของ step down chopper ทั้ง 2 โหมด	58
รูป 7.7	แสดงวงจรควบคุมกระแสที่ไหลผ่านคอยล์ของ magnetic contractor	59
รูป 7.8	แสดงการต่อ magnetic contractor เพื่อกลับขั้วแอมเจอร์	60
รูป 7.9	แสดงวงจรการกลับขั้วแอมเจอร์ โดยใช้สวิตช์ 3 ทาง	61
รูป 8.1	แสดงการต่อขดลวดพิวต์แบบขนานของ dc shunt motor	66

รูป8.2	แสดงการต่อขดลวดพิวส์แบบอนุกรมของ dc serie motor	66
รูป8.3	แสดงการต่อแบบอนุกรมกันของขดลวดพิวส์ในแต่ละขั้วโพล	67
รูป8.4	แสดงการต่อแบบขนานกันของขดลวดพิวส์ในแต่ละขั้วโพล	67
รูป8.5	แสดงมอเตอร์ที่ได้รับการต่อขดพิวส์ใหม่	68
รูป8.6	แสดงการพันแบบของขดลวดพิวส์	69
รูป8.7	แสดงหน้าตัดตามแนวขวางของมอเตอร์	70
รูป8.8	แสดงวงจรสมมูลของ cumulative compound dc generator	71
รูป8.9	แสดงวงจรสมมูลของมอเตอร์ชนิด differential compound	71
รูป8.10	แสดงวงจรสมมูลของ cumulative compound dc motor	72
รูป8.11	แสดงคุณสมบัติของ dc motor ชนิดต่างๆ	72
รูป9.1	แสดงการใส่โหลดน้ำหนักและการวัดแรงบิดของโหลด	74
รูป9.2	แสดงการต่อวงจรการทดสอบวงจรมอเตอร์	75
รูป9.3	แสดงการต่อ bridge 3 เฟส	75

# บทที่ 1

## บทนำ

ยานพาหนะเป็นสิ่งจำเป็นต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์เราทุกคน ดังนั้นการคิดค้นและการออกแบบยานพาหนะ เพื่อให้มีประสิทธิภาพและการประหยัดพลังงาน จึงถูกพัฒนามาแล้วหลายยุคหลายสมัยในที่นี่จะกล่าวถึงเฉพาะรถยนต์

ปัจจุบันประเทศของเราต้องสั่งซื้อน้ำมันเข้ามาในปริมาณมากเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมและในรถยนต์ ถ้าหากในอนาคตเมื่อน้ำมันขาดแคลนจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับรถยนต์ที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้รถยนต์ที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงจะเกิดควันพิษอันเนื่องมาจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์และอาจก่อให้เกิดมลภาวะทางเสียง ซึ่งเป็นผลเสียต่อสุขภาพร่างกายของคนเรา

ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้เกิดแนวความคิดที่จะสร้างรถยนต์ที่ไม่ต้องใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง เพื่อเป็นการประหยัดทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่จำกัดและรักษาสิ่งแวดล้อม จึงหันมาใช้ไฟฟ้าเป็นพลังงานทดแทน โดยใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนแทนเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง รถยนต์พลังงานไฟฟ้าจึงได้รับความสนใจและได้รับการวิจัยมาหลายปีแล้ว แต่ก็ยังมีประสิทธิภาพการใช้งานไม่เป็นที่น่าพอใจนักและมีข้อบกพร่องอีกมาก ไม่ว่าจะเป็นส่วนของมอเตอร์ แบตเตอรี่ที่ใช้เก็บพลังงาน และวงจรควบคุมความเร็วของรถยนต์ หากถึงเหล่านี้ได้รับการพัฒนาให้ดีขึ้นรถยนต์พลังงานไฟฟ้าจะได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายอย่างแน่นอน

ในโครงการนี้จึงได้ทำการคิดค้นเพื่อพัฒนารถยนต์พลังงานไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพการใช้งานที่ดีขึ้น โดยเฉพาะในส่วนของวงจรควบคุมจะใช้วงจรซีพียูซึ่งปกคิวงจรมีใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้แบบหน้าสัมผัสในการปรับความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งตัวต้านทานแบบนี้มีอายุการใช้งานน้อย อีกทั้งเกิดความสูญเสียทางไฟฟ้าที่หน้าสัมผัสมาก เราจึงหลีกเลี่ยงการใช้ตัวต้านทานแบบหน้าสัมผัส โดยเปลี่ยนมาใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้แบบใช้แสงแทนซึ่งอุปกรณ์ตัวนี้จะมีอายุการใช้งานยาวนานกว่าและไม่มีความสูญเสียทางไฟฟ้าอันเนื่องมาจากหน้าสัมผัส

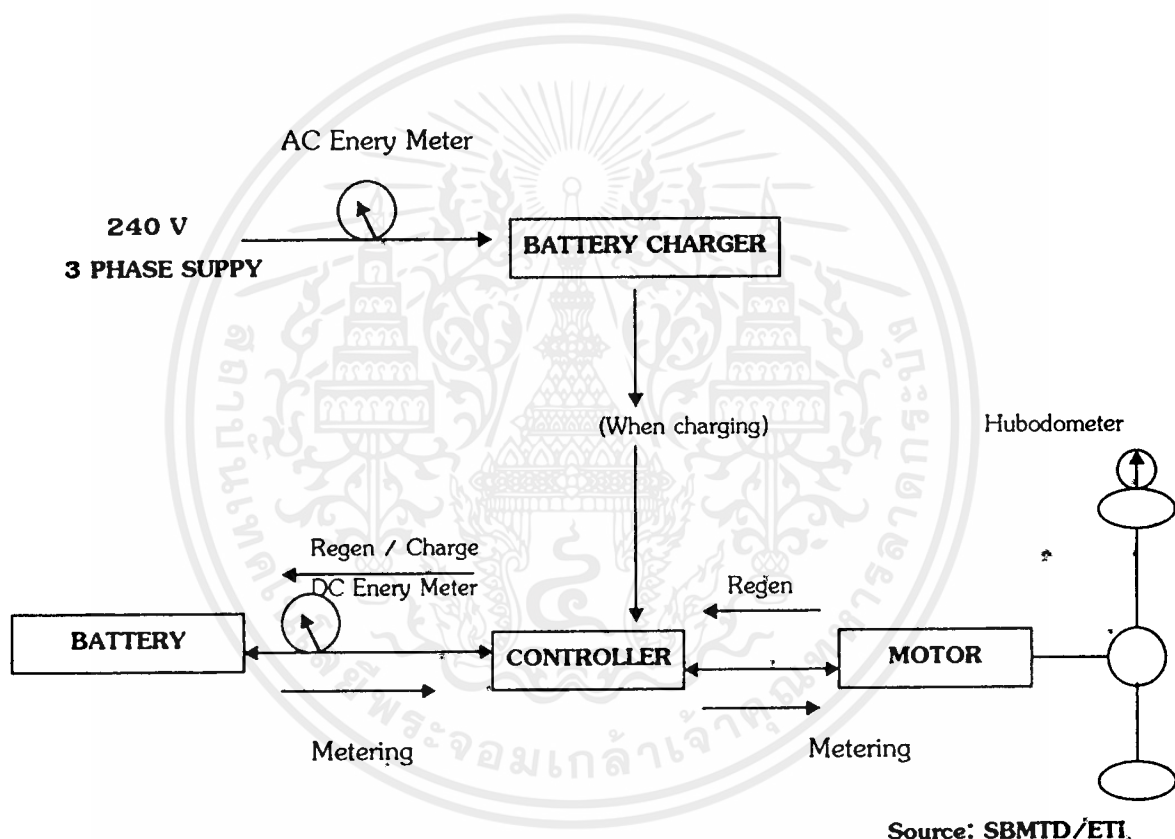
ในส่วนของมอเตอร์ เราจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพราะคุณสมบัติที่มีแรงบิดสูง และสามารถควบคุมแรงบิดได้ดี

## บทที่ 2

### แนวความคิดในการออกแบบ ประโยชน์ที่ได้รับ และ ความเป็นไปได้

#### 2.1 แนวความคิดในการออกแบบ

โครงการนี้เป็นโครงการที่ได้นำแนวความคิดและหลักของรถไฟฟ้าที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องอยู่แล้วมาปรับปรุงให้สามารถนำมาใช้งานจริงได้ โดยในโครงการนี้ได้ออกแบบรถไฟฟ้าเป็นระบบไฮบริดจ์ (Hybrid) ซึ่งจะ ได้กล่าวรายละเอียดในภายหลังต่อไป



รูป 2.1 Block Diagram ของรถไฟฟ้าโดยทั่วๆ ไป

หลักการทำงานของรถไฟฟ้า คือ ใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ เป็นตัวจ่ายพลังงานให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งจะเป็นตัวขับเคลื่อนกำลัง ซึ่งมีวงจรถ้อปเปอร์เป็นอุปกรณ์ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์

## 2.2 ประโยชน์ที่จะได้รับ

เนื่องจากในปัจจุบันปัญหามลพิษเป็นปัญหาของคนทั้งโลกโดยเฉพาะในเมืองใหญ่ๆ เช่น นิวยอร์ก คาลิฟอร์เนีย ลอนดอน ปารีส โตเกียว รวมทั้งกรุงเทพมหานครของเราเนื่องมาจากสถานะแวดล้อมถูกทำลาย และอากาศเป็นพิษ อีกทั้งแหล่งพลังงานสำคัญของมนุษย์คือน้ำมันไม่ใช่ว่าจะไม่มีวันหมดไป ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนารถไฟฟ้าออกมาให้ใช้งานได้จริงๆ เหมือนรถยนต์ทั่วไป มีระบบอำนวยความสะดวกเหมือนรถยนต์

## 2.3 ความเป็นไปได้

จากที่ได้มีการรวบรวมข้อมูลของรถไฟฟ้าซึ่งมีอยู่มกมายเนื่องมาจากมีการพัฒนารถไฟฟ้าโดยบริษัทผู้ผลิตรถทั่วโลกมาตลอดกว่า 20 ปี โดยได้มีการพัฒนาทั้งทางด้านแบตเตอรี่ ( ตัวแบตเตอรี่และระบบชาร์จไฟ ) และระบบการขับเคลื่อน ( ระบบมอเตอร์ไฟฟ้าทั้งแบบ DC และ AC ) ซึ่งดำเนินการอย่างจริงจังมาเมื่อ 10 ปีที่แล้วนี้เอง มีการวิจัยโดยความร่วมมือของสมาคมต่างๆ นักวิจัยและ บริษัทผู้ผลิตทั่วโลก ในที่นี้จะขอนำโครงการรถไฟฟ้าต่างๆ ที่ได้มีวิวัฒนาการของการออกแบบและใช้งานรวมทั้งผลการทดสอบนำไปประกอบการพิจารณาความเป็นไปได้ในการพัฒนารถไฟฟ้าให้เป็นแบบไฮบริด (Hybride)

Honda Civic ได้ทดลองรถไฟฟ้า 5 คัน ในสภาพจริงในถนน โดยมีอัตราเร่ง 0-60 กิโลเมตร ในเวลา 20 วินาที ในช่วงแรกของ 0-30 กิโลเมตรนั้นมีความแรงพอ ๆ กับรถที่ใช้เครื่องยนต์เบนซินความเร็วสูงสุด 80 ไมล์ต่อชั่วโมงรถวิ่งโดยมีอัตราเร่งและใช้เครื่องปรับอากาศ ไฟสัญญาณพลังงาน ถ้ามีบรรจุเต็มจะวิ่งได้ 40 ไมล์เท่านั้น ซึ่ง Honda คิดว่ารถไฟฟ้าฮอนด้ายังไม่พร้อมที่จะนำมาใช้งานจริงได้ ยังต้องมีการพัฒนาต่อไปอีกโดยเฉพาะระบบเบรคล้อค ซึ่งต้องรับกับน้ำหนักแบตเตอรี่ที่เพิ่มขึ้นมาถ้าชาร์จด้วยไฟ 220 โวลต์ จะใช้เวลา 8 ชั่วโมงแต่ถ้าใช้ไฟ 110 โวลต์ ต้องชาร์จถึง 16 ชั่วโมง จึงจะเต็ม

Peugeot 106 และ Citroen AX Sedans ในประเทศฝรั่งเศสที่เมือง La Rochelle (ธันวาคม พ.ศ. 2536) ได้มีการทดสอบรถไฟฟ้าเปอร์โยต์ 106 และซีตรอง AX ซีดาน 50คัน สามารถขับได้ระยะทาง 50 ไมล์ โดยไม่ต้องชาร์จไฟเลย และขณะนี้กำลังพัฒนาใหม่ และจะทำการทดลองต่อไปอีก 150 คัน มีการนำมาใช้งานจริงทางเมือง La Rochelle ซึ่งเป็นเมืองเก่าประวัติศาสตร์ มีป้อมปราการท่าเรือ วัตถุประสงค์สร้างที่เป็นหินเบา (Soft Stone) หากมีมลภาวะทางอากาศจะทำให้เกิดความเสียหายขึ้นได้ จึงมีนโยบายในการที่จะนำรถไฟฟ้ามาใช้โดยคักชาวเมือง La Rochell เพื่อทดสอบรถไฟฟ้า หากเป็นไปได้อีกก็จะสามารถอนุรักษ์ความงดงามของเมืองท่องเที่ยวอันสำคัญนี้ไว้ และการทดสอบรถไฟฟ้าจำนวนมากถือเป็นการทดสอบที่ใหญ่ที่สุด ซึ่งจะ

ได้ใช้เป็นต้นแบบในการทดสอบรถไฟฟ้าทั่วประเทศฝรั่งเศส ซึ่งกำหนดว่า จะทดสอบไปอีก 21 เมืองในปี พ.ศ.2537 การใช้รถไฟฟ้าในประเทศฝรั่งเศสนี้เหมาะสมกับทางเศรษฐศาสตร์และการเมืองอย่างยิ่ง เพราะรัฐบาลมีการส่งเสริมอย่างจริงจัง การเก็บภาษีพลังงานก็เอื้ออำนวยให้ใช้รถไฟฟ้า ถ้าวิ่ง 60 ไมล์ ใช้รถไฟฟ้าเสีย \$1.6 ถ้าใช้น้ำมันเสีย \$6 ค่าประกันภัยรถไฟฟ้าก็ถูกกว่า การทดสอบรถไฟฟ้าได้รับเงินอุดหนุนจากรัฐบาล องค์การไฟฟ้าแห่งรัฐและบริษัท เเปอร์โยต์ให้เช่ารถ \$200 ต่อเดือนค่าเช่าแบตเตอรี่ \$120 ต่อเดือน และบริการซ่อมฟรี 24 ชั่วโมงโดยจะมีรถให้เช่าทั้งหมด 300 คันใน 2 ปีข้างหน้า

BMI (Bus Manufacturing USA, Inc.) เป็นบริษัทผู้ผลิตรถยนต์โดยสารไฟฟ้าทั้งหมดเล็กและขนาดใหญ่ โดยมีการพัฒนาร่วมกับนักวิจัยและผู้ออกแบบ มีการพัฒนาตัวถังให้มาเพื่อเหมาะสมในการใช้เป็นรถไฟฟ้าโดยใช้ Light Eight Steel Monocoque Chassis and Body มีทั้งความคงทนและเหมาะกับการใช้งานด้วย

รถที่ได้สร้างเพื่อการทดสอบมีของ Denver Mail เป็นรถไฟฟ้าใช้ Lead-Acid Battery และ DC Propulsion System และยังได้สร้างรถ Pick Up ระบบเดียวกันเพื่อทดสอบใน Pala Alto ในคาลิฟอร์เนีย โดย System Control Technology Inc. และก็ได้สร้างรถไฟฟ้าให้แก่ Santa Barbara MIT ด้วย

พาหนะอื่นสำหรับขนส่งมวลชนบางอย่างก็สามารถใช้แบตเตอรี่แบบนี้ได้ เช่น รถมินิ บัส Cobus ใช้แบตเตอรี่ 3 ตัว วิ่งได้มากกว่า 100 กิโลเมตร แบะสามารถชาร์จไฟระหว่างการจอดรถชั่วคราวที่ทำได้ด้วย

Ford Ecostar Van บริษัท Ford Motor แห่งสหรัฐอเมริกาได้ผลิตรถยนต์ไฟฟ้า ชื่อ Ecostar Van No-Sulfur ใช้แบตเตอรี่ขายในอเมริกาและแคนาดาโดยมีการเก็บข้อมูลมาหลายปีเมื่อเดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2537 ลูก้ารถไฟฟ้าได้ขับรถครบ 100,000 ไมล์แล้วปัญหาใหญ่คือการอัดแบตเตอรี่นาน โดยอัดไฟเต็มต้องใช้เวลา 6 ชั่วโมง ถ้าใช้ไฟ 220 โวลต์ แต่จะใช้เวลา 20 ชั่วโมง หากใช้ไฟ 120 โวลต์ ในปลายปี พ.ศ. 2537 จะมีการขายรถไฟฟ้าอีก 60 คัน ในอเมริกาเหนือและแคนาดา และอีก 18 คันจะส่งไปขายยังอังกฤษ สเปน และ เยอรมันนี้ ปัจจุบันลูก้าจะใช้รถเฉลี่ยประมาณสัปดาห์ละ 500-600 ไมล์

Ford ได้ออกแบบให้รถใช้กุญแจเปิดเปิดเพื่อเอาใจลูกค้า ตามความเคยชินในการใช้รถ ความจริงรถไฟฟ้าไม่ต้องมีกุญแจ เมื่อเท้าเหยียบคันเร่งรถก็จะเริ่มวิ่งได้ทันที รถจะเงียบมากไม่มีเสียงเลย ความรู้สึกในเรื่องของกำลังของรถก็จะดีมาก เพราะมี Torque เต็มที่ขณะความเร็ว 0 rpm ไม่จำเป็นต้องให้รถวิ่งได้ 30 หรือ 40 ไมล์ต่อชั่วโมง ก่อนเหมือนรถทั่วไปความเร็วสูงสุดของ Ecostar คือ 70 ไมล์ต่อชั่วโมง และสามารถเร่งจาก 0-50 ไมล์ต่อชั่วโมงได้ในเวลา 12 วินาที

Chrysler Minivan ไครสเลอร์ เป็นผู้นำรายแรกในธุรกิจขายรถไฟฟ้า ปี พ.ศ. 2536 แต่ ยอดขายตกจากปี พ.ศ.2536 ขายได้ 48 คัน ลดลงมาเหลือ 6 คัน ในปี พ.ศ. 2537 ทั้งนี้เพราะ Minivan คือ Dodge Caravan และ Plymouth Voyager มีราคาแพงคันละ \$120,000 ในปี พ.ศ.2536 แต่ขณะนี้ สามารถจะลดราคาตกลงมาได้อีก \$20,000 ตกคันละ \$100,000 และกำลังมีโครงการพ.ศ. 2539 NS Minivan เพื่อพัฒนารถไฟฟ้าต่อไป ให้สามารถรับกับข้อกำหนดมลพิษจากยานยนต์ของรัฐชาติ ฟอรัมเนีย ในปี พ.ศ. 2541 ตัวรถไฟฟ้าเองไม่มีปัญหา ส่วนใหญ่จะเป็นปัญหาของแบตเตอรี่ที่ยังต้องการพัฒนาให้มีความคงทน เก็บประจุได้ดี ชาร์จไฟได้เร็ว และน้ำหนักเบา ซึ่งปัญหาเหล่านี้เป็น ปัญหาสำคัญของการสร้างรถไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องจากขีดความสามารถของแบตเตอรี่ในปัจจุบัน ทำให้ การที่จะสร้างรถไฟฟ้าให้วิ่งได้ระยะทางไกลๆ ได้นั้นต้องใช้จำนวนแบตเตอรี่หลายตัว ซึ่งต้องมีการปรับปรุงรูปร่างโครงสร้างของรถไฟฟ้า สำหรับการจัดวางแบตเตอรี่ รวมทั้งในด้านของ น้ำหนักของรถไฟฟ้าด้วย คงต้องดูกันต่อไปในอนาคตว่าจะสามารถพัฒนาแบตเตอรี่และตัวถังรถ ได้มากแค่ไหน เพราะเป็นหัวใจหลักในการที่จะพัฒนารถไฟฟ้า ให้มีประสิทธิภาพไม่ด้อยไปกว่า ยานพาหนะที่ใช้เครื่องยนต์ และสิ่งที่ควรระมัดระวังเสมอคือถึงแม้ปัจจุบันยังไม่สามารถพัฒนา พาหนะที่ใช้ไฟฟ้าให้ดีได้ถึงขีดสุด แต่จุดประสงค์หลักของการพัฒนาคือด้านสิ่งแวดล้อมและ พลังงาน

## บทที่ 3

### ทฤษฎีและหลักการที่ใช้รองรับแนวความคิด

หลักการทำงาน ๆ ที่ใช้คือ ใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เป็นตัวขับเคลื่อนกำลังซึ่งก็คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยสามารถแยกพิจารณาแต่ละส่วนออกมาได้ดังนี้

1. แบตเตอรี่ จะเป็นส่วนจ่ายพลังงาน ซึ่งในปัจจุบันมีแบตเตอรี่ที่นิยมใช้กันอยู่ 3 ชนิดคือ Lead-Acid (ตะกั่ว-กรด), Ni-Cd (นิเกิล-แคดเมียม) และ Na-S (โซเดียมซัลเฟอร์) นอกจากนี้แบตเตอรี่ 3 แบบที่ว่าแล้วยังมีแบตเตอรี่ที่กำลังพัฒนาอยู่อีกหลายแบบคือ Zn-Cl (สังกะสี-คลอไรด์) และ Li-Fes (ลิเทียม-เหล็กซัลไฟด์) เป็นต้น

2. มอเตอร์ขับเคลื่อน เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนซึ่งมีใช้อยู่ 2 ชนิด คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC-motor) และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC-motor) โดยจะถูกควบคุมจากกล่องควบคุมที่มีความละเอียดอ่อน คือ สามารถที่จะปรับปริมาณของกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เข้าสู่ มอเตอร์ให้มีสมรรถนะและประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้กล่องควบคุมยังควบคุมปรับการอัดประจุเข้าในแบตเตอรี่ ป้องกันการ Overcharge และป้องกันไม่ให้เกิดการระเบิดของแบตเตอรี่ด้วย

3. ตัวถัง ตัวถังที่ใช้ นั้นควรมีน้ำหนักเบาเพื่อให้สามารถขับเคลื่อนได้รวดเร็วยิ่งขึ้น มีสมรรถนะดี ประสิทธิภาพสูง ไม่ดึงกำลังมาจากแบตเตอรี่ ทำให้แบตเตอรี่สามารถให้กำลังไปได้ไกลมากขึ้น โดยวัสดุที่จะนำมาทำตัวถังนอกจากเบาแล้วต้องมีความแข็งแรงด้วย มีความปลอดภัย เวลาชนต้องไม่เกิดอันตรายกับผู้ขับขี่หรือคนนั่ง ในแง่ของการผลิตวัสดุทำตัวถังควรเป็นวัสดุที่ผลิตง่ายไม่ยุ่งยาก และไม่ทำให้สิ่งแวดล้อมเสียและ ประการสุดท้ายคือควรบำรุงรักษาง่ายอีกด้วย

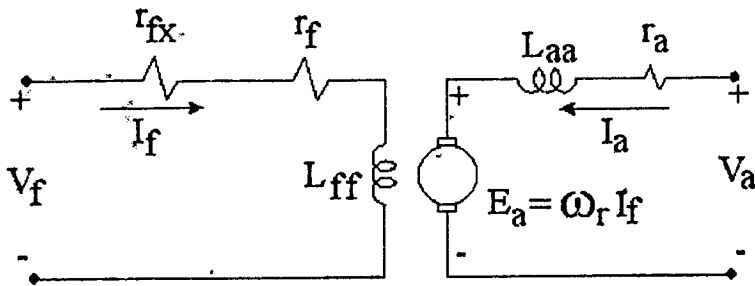
#### 3.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง (DCMC) เป็นอุปกรณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างหนึ่ง ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นพลังงานกลซึ่ง รับพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งภายนอก แรงดันและกระแสตรงที่ขั้ว  $i/p$  ของมอเตอร์ จะถูกเปลี่ยนให้เป็นแรงดันและกระแสสลับโดย commutator เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้มักจะถูกเรียกว่า dc commutator machine โครงสร้างของ DCMC ลักษณะซับซ้อนพอสมควร แต่มีหลักการทำงานที่ง่าย

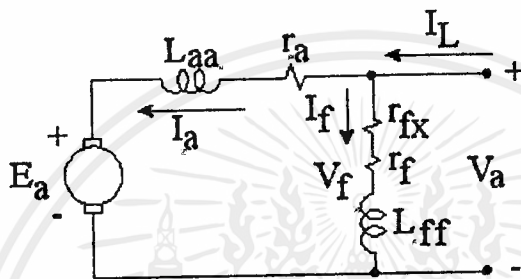
#### Separately excited และ shunt DCMO

มีลักษณะการต่อขดลวด และวงจรสมมูล ดังรูป 3.1





ก. separately excite dc motor



ข. shunt dc motor

รูป 3.1 แสดงวงจรสมมูล separately excited และ shunt DCMO

ใน steady state และเมื่อแรงดัน  $V_a$  ,  $V_f$  ที่ต่อกับมอเตอร์มีค่าคงที่ มอเตอร์ทั้ง 2 แบบ จะมีคุณสมบัติในทางปฏิบัติเหมือนกัน

ในการวิเคราะห์ ขณะที่มอเตอร์อยู่ใน steady-state ต่อไปนี้ จะกล่าวถึงเฉพาะ shunt DCMO ซึ่งก็หมายความว่ารวมถึง separately excited DCMO ด้วยเช่นกัน

ใน steady-state; สมการที่อธิบาย DCMO ดังต่อไปนี้

$$V_a = E_a + r_a I_a \quad 3.1$$

$$V_f = R_f I_f \quad 3.2$$

$$I_L = I_a \text{ (separately excite DCMO)} \quad 3.3$$

$$I_L = I_a + I_f \text{ (shunt DCMO)} \quad 3.4$$

โดยที่  $R_f = r_{fx} + r_f$

เมื่อ  $E =$  แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวดอาแมเจอร์ ,  $V$

$I_a$  = กระแสอาเมเจอร์ , A

$I_f$  = กระแสที่ขดสร้างสนามแม่เหล็ก , A

$V_f$  = แรงดันตกคร่อมขดสร้างสนามแม่เหล็ก , V

$V_a$  = แรงดันที่ Terminal, V

$r_a$  = ความต้านทานของขดลวดอาเมเจอร์ ,  $\Omega$

$R_f$  = ความต้านทานของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก

และจาก

$$E_a = K_a \phi \omega_m \quad 3.5$$

$$\tau = K_a \phi I_a \quad 3.6$$

$\omega_m$  = ความเร็วของอาเมเจอร์ , rad / sec

$\tau$  = แรงบิดที่สร้างโดยมอเตอร์ , N - m

$K_a$  = ค่าคงที่

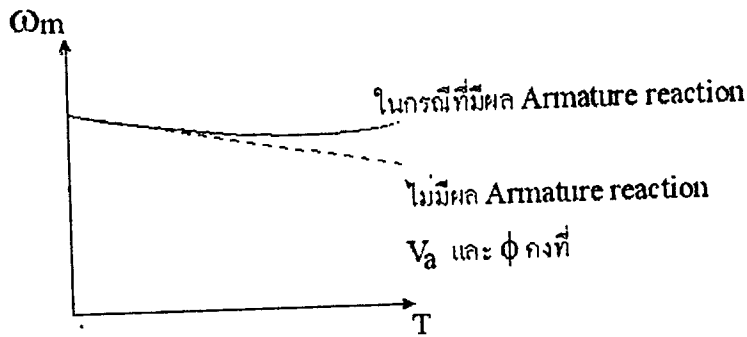
$\phi$  = flux per pole , Webers

ซึ่ง  $\tau$  คือ แรงบิดที่เกิดจากกระแสไหลในขดลวดอาเมเจอร์ ซึ่งอยู่ในสนามแม่เหล็ก (เรียกว่า induced torque)

จากสมการข้างต้น จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด,  $\tau$  กับความเร็วรอบ ,  $\omega_m$  ดังนี้

$$\omega_m = V_a / K_a \phi - r_a / (K_a \phi)^2 \cdot \tau \quad 3.7$$

ซึ่งเป็นสมการเส้นตรง มีความชัน (slope) เป็น ลบ ในกรณีที่  $V_a$  คงที่ จะได้ลักษณะ ความสัมพันธ์ของ  $\tau$  และ  $\omega_m$  ดังรูป 3.2



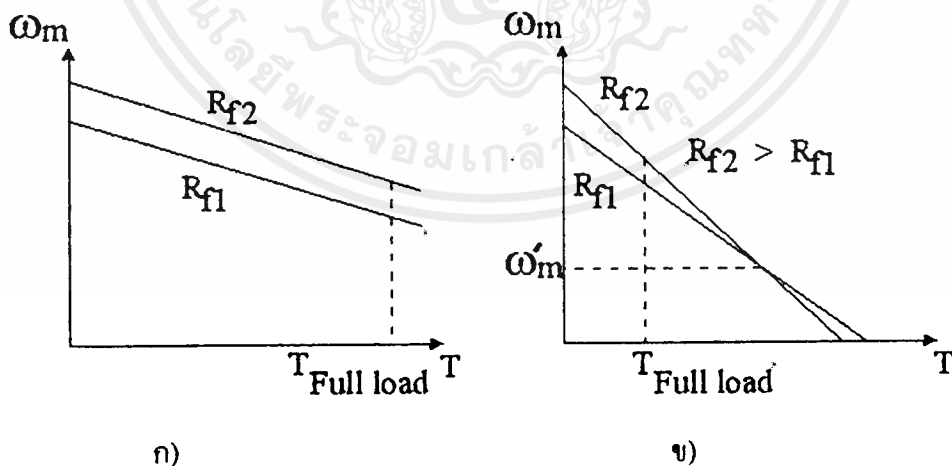
รูป 3.2 แสดงคุณสมบัติ ของ separately excited และ shunt DCMO

armature reaction ทำให้เกิดฟลักซ์หักล้างกับฟลักซ์ที่เกิดจากขดลวดสนามของ DCMO เป็นผลให้ผลรวมฟลักซ์,  $\phi$  ในช่องอากาศลดลง จากสมการ 3.7 เมื่อฟลักซ์ลดลง จะทำให้ความเร็วรอบ  $\omega_m$  สูงขึ้น

การควบคุมความเร็วรอบ  $\omega_m$  ทำได้โดยการพิจารณาจากสมการ 3.7 ดังนี้

1. ควบคุมฟลักซ์  $\phi$  โดยการปรับค่า
2. ควบคุมแรงดัน  $V_a$  หรือ
3. ปรับค่า  $r_a$  โดยการต่อความต้านทานที่ปรับค่าได้นุกรมกับวงจรรอาร์เมเจอร์

ผลจากการควบคุมความเร็วรอบ  $\omega_m$  ด้วยการปรับค่า  $r_{ix}$  แสดงได้ดังรูป 3.3

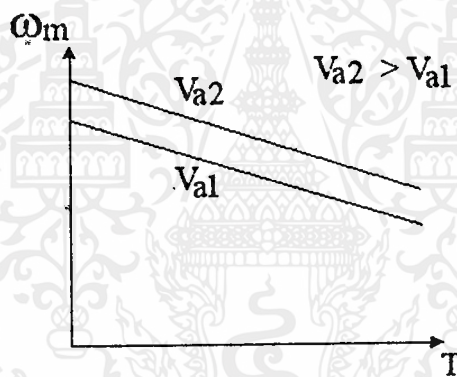


รูป 3.3 แสดงคุณสมบัติของ separately excite และ shunt DCMO เมื่อความต้านทานของขดลวดสนาม  $R_f$  เปลี่ยนแปลง

จากรูป 3.3 ข) แสดงให้เห็นผลที่ไม่เป็นไปตามสมการ 3.7 นั่นคือที่ความเร็วรอบต่ำกว่า  $\omega_m$  การปรับให้ มีค่าเพิ่มขึ้น ( ซึ่งเป็นการลดฟลักซ์  $\phi$  ในสมการ 3.7 จะทำให้ความเร็วรอบ  $\omega_m$  ลดลง ที่เป็นเช่นนี้ เพราะที่ความเร็วรอบต่ำกว่า  $\omega_m$  นั้น กระแสอาร์เมเจอร์  $I_a$  ที่เพิ่มขึ้น ไม่มากพอที่จะชดเชยผลการลดลงของฟลักซ์  $\phi$  ดังนั้น  $\tau$  จะลดลง ( ตามสมการ  $\tau = K_a \phi I_a N m$  เป็นเหตุให้ความเร็วรอบ  $\omega_m$  ลดลง

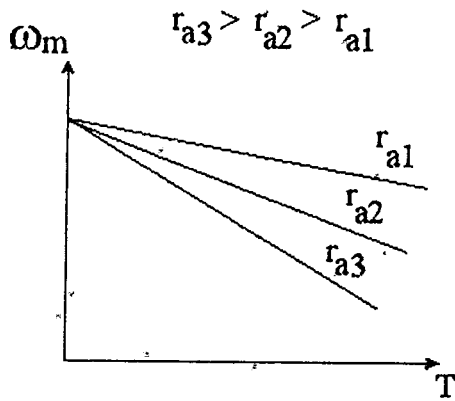
ดังนั้น การควบคุมความเร็วรอบ  $\omega_m$  โดยวิธีปรับค่า  $R_f$  นี้ จึงไม่เหมาะใช้กับ DCMO ในระบบควบคุมซึ่งต้องทำงานที่ความเร็วต่ำ

ผลจากการควบคุมความเร็ว  $\omega_m$  สำหรับ separately excited DCMO โดยการปรับค่าแรงดันในวงจรรีอาร์เมเจอร์,  $V_a$  โดยที่แรงดันในวงจรถดลวดสนาม  $V_f$  คงที่แสดงได้ดังรูป 3.4



รูป 3.4 แสดงคุณสมบัติของ separately excited DCMO เมื่อแรงดัน  $V_a$  เปลี่ยนแปลง

ในกรณีของ shunt DCMO จะทำการปรับค่าแรงดันเฉพาะในวงจรรีอาร์เมเจอร์ โดยที่แรงดันในวงจรถดลวดสนามคงที่ ทำได้โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมแรงดันต่อเข้ากับวงจรรีอาร์เมเจอร์ ผลจากการควบคุมความเร็วรอบ  $\omega_m$  โดยการปรับค่าความต้านทาน  $r_a$  แสดงดังรูป 3.5



รูป 3.5 แสดงคุณสมบัติของ separately excited และ shunt DCMO เมื่อความต้านทาน  $r_a$  เปลี่ยนแปลง

วิธีการนี้ทำให้เกิดการสูญเสียในความต้านทาน ในวงจรรอาร์เมเจอร์เพิ่มมากขึ้นจึงใช้วิธีนี้กันไม่มาก ข้อที่ควรพิจารณาในการปรับความเร็วรอบ  $\omega_m$  มีดังนี้

1. ในการปรับความเร็วรอบ  $\omega_m$  ให้ต่ำกว่าความเร็วพิกัด โดยรับความต้านทาน  $r_{fx}$  เพื่อให้กระแสในขดลวดสนาม  $I_f$  (และฟลักซ์  $\phi$ ) สูงขึ้น อาจทำให้ขดลวดสนามเสียหายได้
2. ในการปรับความเร็วรอบ  $\omega_m$  ให้สูงเกินความเร็วพิกัด โดยเพิ่มแรงดันในวงจรรอาร์เมเจอร์,  $V_a$  เกินค่าพิกัด อาจจะทำให้ขดลวดอาร์เมเจอร์เสียหายได้

ดังนั้นวิธีการควบคุม  $\omega_m$  โดยการปรับค่า  $r_{fx}$  จะใช้ได้ดีเมื่อต้องการให้ความเร็วรอบสูงกว่าความเร็วพิกัด และการปรับค่าแรงดัน  $V_a$  จะใช้ได้ดี เมื่อต้องการให้ความเร็วรอบต่ำกว่าความเร็วพิกัด

เมื่อใช้ทั้ง 2 วิธีประกอบกัน จะทำให้สามารถปรับความเร็วรอบของ separately excited และ shunt DCMO ได้ช่วงกว้างมาก

เมื่อพิจารณาสมการ 3.7 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเร็วรอบ  $\omega_m$  จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากเมื่อฟลักซ์  $\phi$  ลดลงอย่างมาก ซึ่งจะเกิดขึ้นในกรณี เช่น  $r_{fx}$  มากเกินหรือวงจรถดลวดสนามขาด (open cct.) ทำให้กระแส  $I_f \rightarrow 0$  และฟลักซ์  $\phi$  จะลดลงเหลือเพียงฟลักซ์ตกค้าง,  $\phi_{res}$

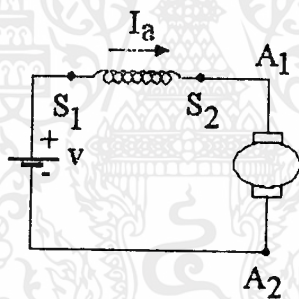
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิด armature reaction ในขณะที่โหลดเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ฟลักซ์  $\phi$  ลดลง และ ความเร็วรอบ  $\omega_m$  จะสูงขึ้นอย่างมาก และทำให้แรงบิด (และ โหลด) เพิ่มขึ้นเป็นผลต่อเนื่อง ให้เกิด armature reaction และฟลักซ์  $\phi$  ลดลงต่อ เนื่องซึ่งเรียกเงื่อนไขเช่นนี้ว่า run away

ดังนั้น จึงแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการใช้ field loss relay ซึ่งจะตัดวงจรมอเตอร์ออกจากระบบ ส่งไฟฟ้าและโดยการออกแบบให้มี compensating winding หรือ มีขดลวดอนุกรมกับวงจร อาร์เมเจอร์เพื่อสร้าง mmf หักล้างกับ mmf ที่เกิดจาก armature reaction ในขณะที่โหลดเพิ่ม, shunt DCMO ที่มีขดลวดอนุกรมเช่นนี้เรียกว่า stabilized shunt DCMO

### Series dc motor

เป็น DCMO ซึ่งมีขดลวดสนาม จำนวนรอบต่ำ ขนาดใหญ่ ต่ออนุกรมกับวงจรอาร์เมเจอร์ มีลักษณะการต่อขดลวด และวงจรสมมูล ดังรูป 3.6



รูป 3.6 วงจรสมมูลของ series dc motor

สมการที่ใช้อธิบาย series DCMO ใน steady-state ดังนี้

$$V_a = E_a + (r_a + r_{fs})I_a \quad 3.8$$

$$I_L = I_{fs} = I_a$$

$$\tau = K_a \phi I_a$$

แต่  $\phi = C I_{fs} = C I_a \quad 3.9$

โดยที่ C :ค่าคงที่จากการออกแบบ

ดังนั้น  $\tau = K_a C I_a^2 \quad 3.10$

สมการ 3.10 แสดงให้เห็น series DCMO ให้แรงบิด /amp สูงกว่า DCMO แบบอื่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

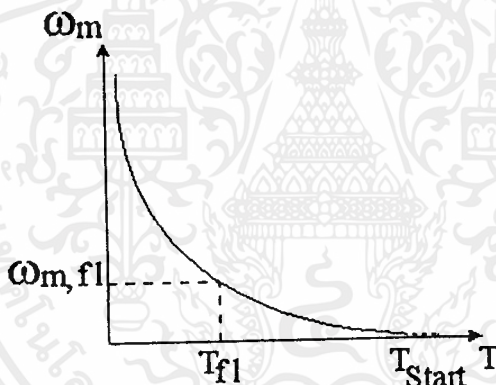
ดังนั้น จึงเหมาะกับการใช้งานที่ต้องการแรงบิดสูง เช่น สตาร์ทเครื่องยนต์, ขับเคลื่อนลิฟท์, ขับเคลื่อนรถไฟ

การวิเคราะห์ DCMO ด้วยสมการเชิงเส้น จะทำได้โดยที่ต้องสมมติให้ magnetization curve มีลักษณะเชิงเส้น หรือ วิเคราะห์เฉพาะในช่วงที่ยังไม่เกิดการอิ่มของแม่เหล็ก ส่วนการวิเคราะห์ในขณะที่เกิดการอิ่มตัวของแม่เหล็ก จะทำได้โดยวิธีการกราฟ

จากสมการข้างต้น จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ  $\omega_m$  และ  $\tau$  ดังนี้

$$\omega = (V_a / \sqrt{K_a C}) \cdot (1/\sqrt{\tau}) - (r_{fs} + r_a) / K_a C \quad 3.11$$

มีลักษณะดังรูป 3.7



รูป 3.7 แสดงคุณสมบัติของ series dc motor

จากสมการ 3.11 ในกรณีที่  $\tau \rightarrow 0$ , จะทำให้  $\omega_m \rightarrow \infty$  และมอเตอร์จะเสียหาย

ในทางปฏิบัติ  $\tau \neq 0$  เนื่องจากมีการสูญเสียในมอเตอร์ เช่น การสูญเสียทางกล, การสูญเสียในแกนและ stray loss; และ series DCMO จะต้องค่อกับโหลดโดยตรงเสมอ ทุกขณะเวลา

การควบคุมความเร็วรอบ  $\omega_m$  ของ series DCMO, ทำได้โดยการพิจารณาสมการ ดังนี้

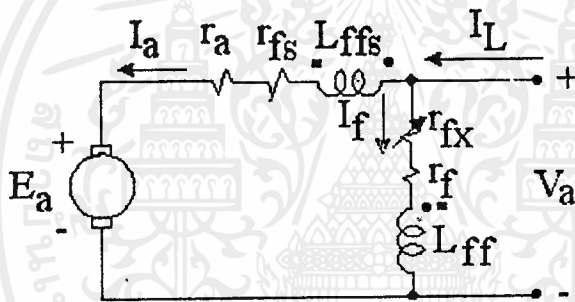
1.ปรับค่าแรงดัน  $V_a$

2. โดยการต่อความต้านทานภายนอกเข้ากับวงจรรอาร์เมเจอร์ ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียในความต้านทาน ในปัจจุบันจึงไม่ใช้วิธีการเช่นนี้หรือจะใช้ก็เฉพาะช่วงเวลาสั้น ๆ ในขณะที่เริ่มให้มอเตอร์หมุน

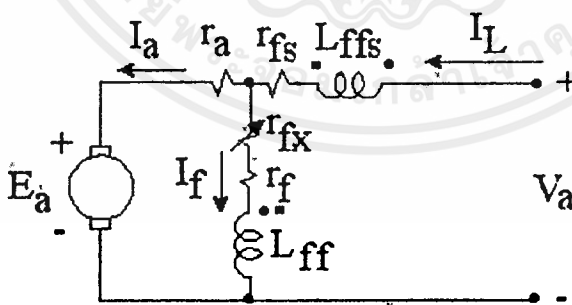
### Compounded dc motor

เป็นการนำข้อดีของมอเตอร์แบบ Shunt และ แบบ Serie มาประยุกต์ใช้ร่วมกัน โดยข้อดีของมอเตอร์แบบ Shunt คือ ให้ความเร็วรอบที่คงที่แม้ โหลดจะเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย แต่ให้ความเร็วรอบจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ส่วนข้อดีของมอเตอร์แบบ Serie คือ จะให้แรงบิดในการออกตัวได้ดีกว่าแบบอื่น ๆ

เป็น DCMO ที่มีขดลวดสนาม 2 ชุด มีลักษณะการต่อและวงจรมูลย์ ดังรูป 3.8



ก) แบบ long shunt



ข) แบบ short shunt

- เครื่องหมาย  หมายถึง การต่อขดลวดสนามแบบ cumulative compounded  
 หมายถึง การต่อขดลวดสนามแบบ differentially compounded

### รูป 3.8 แสดงวงจรสมมูลของ compound dc motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สมการที่ใช้อธิบาย compounded DCMO ในสภาวะ steady- state ดังนี้

$$V_a = E_a + (r_a + r_{fs})I_a = R_f I_f \quad 3.12$$

$$I_L = I_a + I_f \quad 3.13$$

$$I_a = I_{fs} \quad 3.14$$

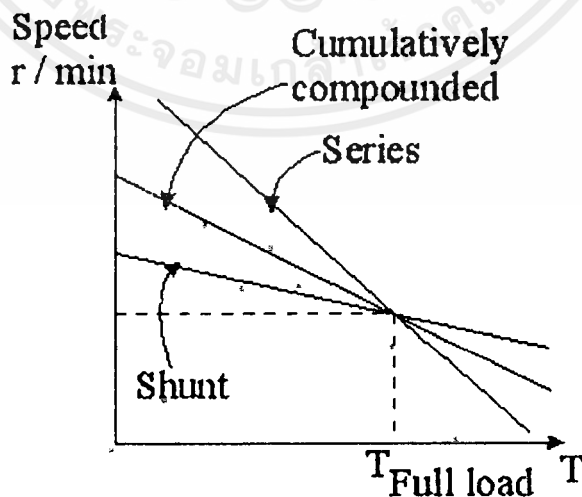
$$F_t = F_{sh} \pm F_{se} - F_{ar} \quad 3.15$$

$$I'_f = I_f \pm (N_{fs}/N_f) \cdot I_a - F_{ar}/N_f \quad 3.16$$

เครื่องหมาย +, - หน้าเทอมที่ 2 ในสมการ 3.15 และ 3.16 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการต่อขดลวดสนามแบบ cumulatively (differentially) compounded

ดังนั้น ในกรณีที่ compounded DCMO เปลี่ยนการทำงานเป็น compounded DCGE กระแสอาร์เมเจอร์  $I_a$  (และ  $I_{fs}$ ) จะกลับทิศทางไหล แต่กระแสใน shunt field winding, ไม่เปลี่ยนทิศทาง จึงทำให้ cumulatively(differentially)compounded DCMO เปลี่ยนไปเป็น differentially (cumulatively) compounded DCGE

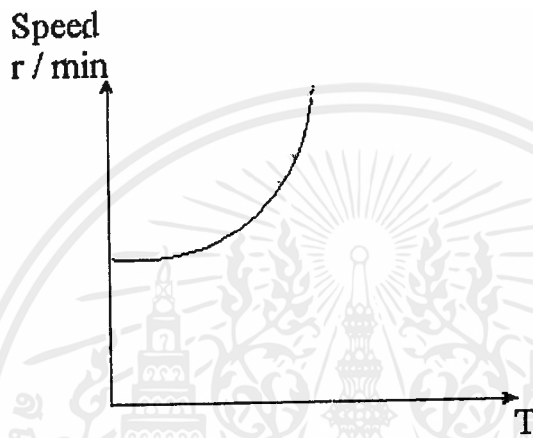
เนื่องจากฟลักซ์  $\phi_t$  ใน compounded DCMO เกิดจากกระแสในวงจรรอาร์เมเจอร์, (แปรผันตามโหลด) และจากกระแสใน shunt field winding (ซึ่งคงที่ ในกรณีที่  $V_a$  คงที่) ดังนั้น compounded DCMO จึงมีคุณสมบัติอยู่ระหว่าง series DCMO กับ shunt DCMO ดังแสดงในรูป 3.9



รูป 3.9 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ series, cumulatively compound, และ shunt DCMO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

differentially compounded DCMO มีขดลวดสนาม 2 ชุด คือ series และ shunt field winding ซึ่งต่อกลับข้ามกัน ทำให้เกิด mmf หักล้างกัน ดังนั้นเมื่อโหลดเพิ่ม ( $I_a$  เพิ่ม) ทำให้ฟลักซ์รวม  $\Phi_t$  ลดลงและความเร็วรอบสูงขึ้น,  $E_a$  และ  $I_a$  เพิ่มขึ้น เป็นผลต่อเนื่อง และอาจจะทำให้เกิดการ run away เห็นได้ว่าการทำงานของ differentially compounded DCMO ไม่มีเสถียรภาพ (instability) ดังรูป 3.10



รูป 3.10 แสดงคุณสมบัติของ differentially compounded DC motor

โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในขณะเริ่มหมุน ซึ่งกระแสอาร์เมเจอร์, มีค่ามาก mmf ที่เกิดจาก series field winding มีค่ามากกว่าและอาจจะทำให้ฟลักซ์รวม  $\Phi_t$  และขั้วของมอเตอร์กลับทิศทางทำให้มอเตอร์หยุด หรือหมุนกลับทางอย่างช้า ๆ เป็นเหตุให้กระแส โหลดมากและนานจนทำให้ขดลวดเสียหาย

ด้วยเหตุนี้ ในขณะเริ่มหมุนนั้น จึงต้องลัดวงจร series field winding ก่อนเนื่องจากปัญหาดังกล่าวตามปกติจึงไม่ใช้ differentially compounded DCMO ในการทำงานแต่จำเป็นที่ต้องทำความเข้าใจกับปัญหาเกี่ยวกับเสถียรภาพดังกล่าว เพราะอาจจะเกิดขึ้นกับ cumulatively compounded DCGE ได้ ถ้ากำลัง (power) ที่ผ่าน cumulatively compounded DCGE กลับทิศทางการไหล (flow) ซึ่งจะเป็นผลให้เปลี่ยนเป็น differentially compounded DCMO

วิธีการควบคุมความเร็วรอบ  $\omega_m$  ของ cumulatively compounded DCMO ทำได้เช่นเดียวกับกรณีของ shunt DCMO ดังนี้

### 1.ปรับความต้านทาน $r_{fx}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.ปรับแรงดัน  $V_a$

3.ปรับความต้านทานในวงจรรีเมเจอร์  $r_a$

ในโครงการนี้ได้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิด Cumulative Compound โดยต่อในส่วนของ Field Serie และ Field Shunt ให้มีทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็กที่เสริมกันแบบ Long Shunt

### คุณสมบัติของมอเตอร์ดีซีแบบคอมปาวด์

มอเตอร์ดีซีซึ่งอาศัยการทำงานร่วมของขดลวด Serie (ให้ทอร์กขณะเริ่มเดินเครื่องสูง) และขดลวดแบบ Shunt (ให้ความเร็วรอบเกือบคงที่) ในอัตราส่วนที่เหมาะสม คือ มอเตอร์แบบ Comulative Compound มอเตอร์ชนิดนี้จะให้กระแสจำนวนมากไหลผ่านขดลวด Serie ในช่วงเริ่มเดินเครื่องจึงให้คุณสมบัติในช่วงของมอเตอร์ดีซีแบบ Serie เมื่อมอเตอร์เดินเครื่องที่ความเร็วรอบสูงขึ้นเรื่อย ๆ กระแส  $I_a$  ซึ่งไหลผ่านขดลวด Serie จะน้อยลงเรื่อย ๆ ทำให้คุณสมบัติของขดลวด Serie ที่แสดงออกลดน้อยลง ในช่วงการทำงานนี้จะแสดงคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับมอเตอร์ดีซีแบบ Shunt กล่าวคือให้ความเร็วรอบที่เกือบคงที่

### **Comulative Compound Motor**

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในโครงการนี้ใช้เป็นตัวต้นกำลังแทนเครื่องยนต์ เป็น DC compound motor ขนาดและลักษณะด้านกำลังดังนี้

#### **คุณลักษณะด้านกำลัง**

- กำลังวัตต์ที่พิกัด 7.2 กิโลวัตต์
- กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่โหลดปกติ 150 แอมป์
- แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่โหลดปกติ 48 โวลต์
- กระแสไฟฟ้าช่วง peak load 150 แอมป์
- แรงดันไฟฟ้าช่วง peak load 48 โวลต์
- แรงม้าที่พิกัด 9.6 แรงม้า

#### **ขนาดดังนี้**

- ความยาว 450 มิลลิเมตร
- เส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัด 230 มิลลิเมตร
- น้ำหนัก 8 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กำลังงาน (power) และการสูญเสีย

ประสิทธิภาพของ DC motor,  $\eta$  ..... กำหนดได้ดังนี้

$$\eta = P_{out}/P_{in} \times 100 \% \quad 3.18$$

$$\text{หรือ} \quad \eta = (P_{in} - P_{loss})/P_{in} \times 100 \% \quad 3.19$$

การสูญเสียที่เกิดขึ้น ใน DC motor มีดังนี้

1. การสูญเสียเนื่องจากความต้านทาน ( $I^2R$  - loss)
2. การสูญเสียที่แปรงถ่าน (brush loss)
3. การสูญเสียในแกน (core loss)
4. การสูญเสียทางกล (mechanical loss)
5. การสูญเสียเบ็ดเตล็ด (stray load loss)

การสูญเสียเนื่องจากความต้านทานเกิดขึ้นในขดลวดสนาม และขดลวดอาร์เมเจอร์ ซึ่ง

การสูญเสียในขดลวดอาร์เมเจอร์,  $P_a = I_a^2 R_a$

การสูญเสียในขดลวดสนาม,  $P_f = I_f^2 R_f$

โดยคำนวณจากค่าความต้านทานในอุณหภูมิทำงานปกติ

การสูญเสียที่แปรงถ่าน,  $P_b = V_b I_b$

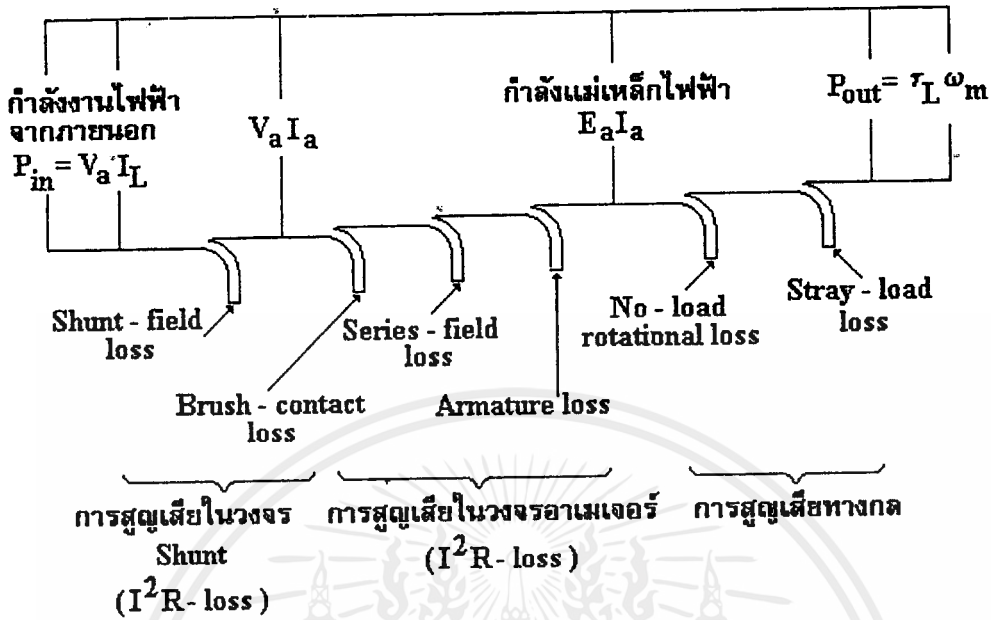
โดยที่  $V_b$  : แรงดันที่แปรงถ่าน (brush voltage drop) ซึ่งมีค่าคงที่ และโดยทั่วไปประมาณ 2 V

การสูญเสียในแกนเนื่องจาก hysteresis และกระแสไหลวน, เป็นเช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า

การสูญเสียทางกล เกิดจากแรงเสียดทาน (friction) และแรงต้านของอากาศต่อการหมุน (windage) มีค่าแปรผันตาม (ความเร็วรอบ)<sup>3</sup>

การสูญเสียเบ็ดเตล็ด ซึ่งไม่อยู่ในการสูญเสีย 4 ประเภทข้างต้น โดยปกติจะมีค่าประมาณ 1% ของโหลดพิกัด

จากที่อธิบายข้างต้น สามารถเขียนผังแสดงกำลังงานของ DC motor ได้ดังรูป 3.11

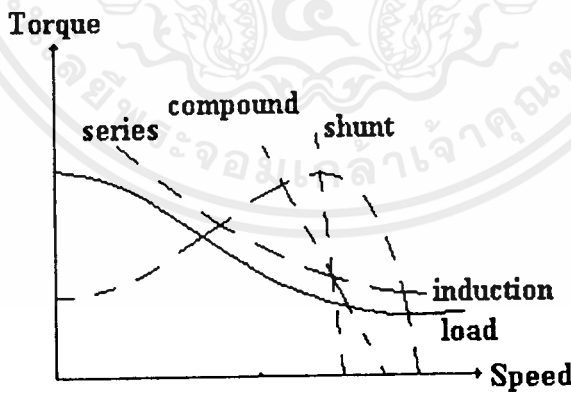


รูปที่ 3.11 แสดงผังกำลังงาน ของ DC motor

### 3.2 พิจารณามอเตอร์

การเลือกใช้มอเตอร์ เราจะพิจารณาถึงเหตุผล 4 ประการ ดังนี้ คือ

1. คุณลักษณะของความเร็วรอบและแรงบิดของโหลด คุณลักษณะนี้ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ natural speed-torque characteristic ของมอเตอร์ชนิดต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงคุณลักษณะของความเร็วรอบกับแรงบิดของโหลดเปรียบเทียบกับของมอเตอร์ชนิดต่างๆ

ตามรูปแล้ว มอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรมมีคุณลักษณะของความเร็วกับแรงบิดเหมาะสมกับโหลดมากที่สุด ทั้งนี้ทั้งนั้นการหาซื้อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดังนั้นให้ได้ตามที่ต้องการทำได้ลำบากทางกลุ่มจึงได้จัดซื้อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดังกล่าวมาดัดแปลงบางชิ้นส่วนให้ได้มอเตอร์ที่ตรงตามต้องการ

แบบ Compound และได้นำมาดัดแปลงเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิด Compound นำมาต่อแบบ Long Shunt และต่อขดลวด Field Series และขดลวด Field Shunt ให้เสริมกัน (Cumulative Compound) ซึ่งรายละเอียดของตัวมอเตอร์ทางด้านทฤษฎีได้กล่าวไว้ในหัวข้อข้างต้นแล้ว ทั้งนี้ทั้งนี้มิได้หมายความว่ามอเตอร์ชนิดอื่น ๆ จะนำมาใช้ขับเคลื่อนรถไฟฟ้าไม่ได้ เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ มีขนาดกะทัดรัด และมีกำลังมากกว่า เมื่อมีการใช้งานอย่างต่อเนื่องและน้ำหนักที่เท่ากัน แต่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีแรงบิดขณะเริ่มต้นต่ำจำเป็นที่จะต้องอาศัยเกียร์ทดเข้าช่วย ซึ่งจะทำให้ข้อดีที่ว่าความกะทัดรัดนั้นหมดไป

การที่มอเตอร์มีคุณลักษณะของความเร็วและแรงบิดเหมาะสมกับโหลดนั้นทำให้ง่ายและสะดวกต่อการสร้าง และออกแบบ

2. ลักษณะการทำงานของโหลดของรถไฟฟ้า มีลักษณะการใช้งานที่เป็นจุดเด่นมาก ๆ คือ ออกตัวบ่อย และการออกตัวในแต่ละครั้งนั้นต้องใช้แรงบิดที่สูงมาก ๆ มอเตอร์ที่สามารถรองรับจุดเด่นนี้ได้ คือ มอเตอร์กระแสตรง

3. ระบบควบคุมความเร็ว เราต้องการสร้างรถไฟฟ้าที่มีระบบควบคุมความเร็วที่ง่ายที่สุด แต่สามารถใช้งานได้ดี รถไฟฟ้าของเรามีแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเป็นแบตเตอรี่ ซึ่งจ่ายไฟกระแสตรง ดังนั้น การเลือกใช้มอเตอร์กระแสตรง จะง่ายในการสร้างระบบควบคุมความเร็วมากกว่าการใช้มอเตอร์กระแสสลับ

สำหรับในโครงการนี้จะขอเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบคอมปาวด์เป็นมอเตอร์ต้นกำลังเนื่องจากเหตุผลทั้ง 3 ข้อ

### 3.2 วิธีการควบคุมความเร็ว

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์กระแสตรงตามสาการที่ (3.7) แสดงว่าเราสามารถควบคุมความเร็วได้ 3 วิธี ดังนี้คือ

1. การควบคุมแรงดันอาเมเจอร์ ( Armature Voltage Control )
2. การควบคุมฟลักซ์สนาม ( Field Flux Control )
3. การควบคุมความต้านทานอาเมเจอร์ ( Armature Resistance Control )

#### 3.2.1 Armature Voltage Control

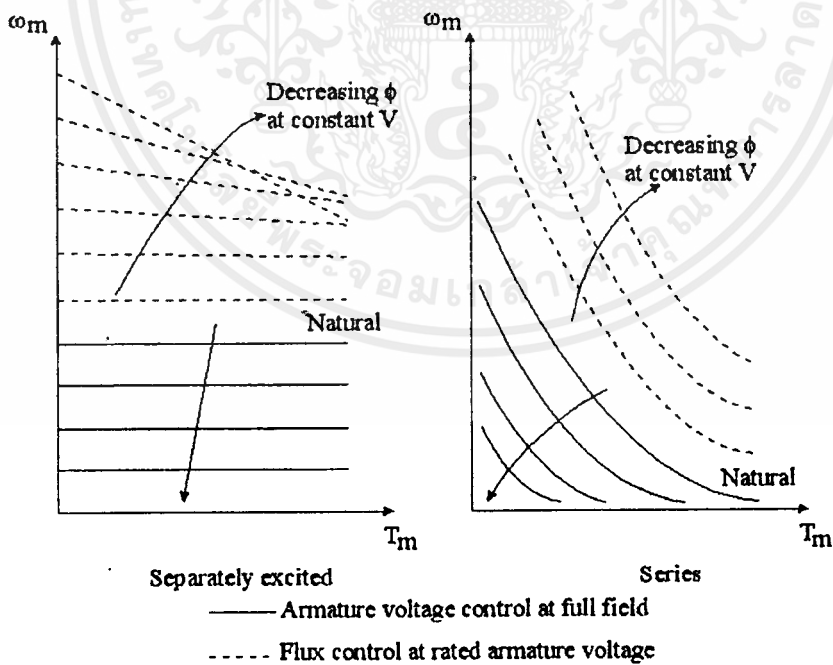
ถ้าแรงดันอาเมเจอร์ของ separated excited หรือ series dc motor ที่กำลังวิ่งอยู่ที่สภาวะคงที่ ถูกลดลงเป็นปริมาณน้อย ๆ ตามรูปที่ 3.1 (ก) กระแสอาเมเจอร์จะลดลงเป็นผลให้แรงบิดของมอเตอร์ลดลงด้วย ในขณะที่แรงบิดของมอเตอร์น้อยกว่าแรงบิดที่โหลดต้องการมอเตอร์จะเกิดความหน่วง เป็นสาเหตุให้ความเร็วและ back emf ลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งแรงบิดของ

มอเตอร์เท่ากับแรงบิดที่โหลดต้องการ ถ้าแรงดันอาเมเจอร์ของ separately excited motor ถูกลด เป็นปริมาณมาก ๆ ซึ่งอาจน้อยกว่า back emf จุดนี้ทำให้กระแสอาร์เมเจอร์จะไหลกลับทาง ในขณะที่มอเตอร์กำลังทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator) สร้างแรงบิดที่ตรงข้าม (negative torque) จนกระทั่งความเร็วของมอเตอร์ตกลงถึงค่าที่ทำให้ back emf เสมอภาคกับแรงดันอาร์เมเจอร์ ส่วนในกรณีของ series motor เมื่อแรงดันอาร์เมเจอร์ ถูกลดลงเป็นปริมาณมากๆ มันจะไม่ทำงานเป็น generator แต่ที่เกิดความหน่วงเพราะว่าแรงบิดของมอเตอร์ต่ำกว่าแรงบิดที่โหลดต้องการ

ในทางกลับกัน ถ้าแรงดันอาเมเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรงที่กำลังวิ่งอยู่ ณ สถานะคงที่ ถูกเพิ่มขึ้นด้วย มอเตอร์จะเกิดอัตราเร่งทำให้ความเร็วของมอเตอร์ และ back emf เพิ่มขึ้น จนกระทั่งไปสู่จุดสมดุลใหม่ คือ แรงบิดของมอเตอร์เท่ากับแรงบิดที่โหลดต้องการ ที่ความเร็วที่สูงกว่าเดิม

ขณะที่เพิ่มความเร็ว แรงดันอาเมเจอร์ควรจะเปลี่ยนทีละน้อยๆ เพราะการเปลี่ยนแรงดันอาเมเจอร์ทีละมากๆ นั้น เป็นสาเหตุให้กระแสไหลผ่านอาเมเจอร์เป็นปริมาณมาก ซึ่งจุดนี้อาจจะทำให้ความเสียหายให้กับคอมมิวเตเตอร์หรือลดอายุการใช้งานของมอเตอร์ลงได้

steady - state speed - torque characteristic ของ separately และ series DC motor ที่แรงดันอาเมเจอร์ต่างๆ ดัน แสดงดังรูป 3.13 (ก) และ (ข)



(ก)

(ข)

รูป 3.13 แสดงกราฟ speed-torque ของมอเตอร์แบบ separately และ series

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยวิธีการลดแรงดันอาเมเจอร์ มอเตอร์สามารถทำงานที่ความเร็ว-แรงบิดใดๆ ก็ได้ระหว่าง the nature speed-torque curve และแกนของแรงบิดในกราฟในกรณีของ separately excited motor การปรับแรงดันอาเมเจอร์จะเป็นการปรับความเร็วที่สภาวะไร้โหลด และ speed-torque characteristic จะไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการปรับความเร็ว อีกทั้งมันยังเหมาะสมกับการควบคุมชนิด constant torque drive เพราะกระแสอาเมเจอร์สามารถปรับถึงสูงสุดตลอดการปรับความเร็ว เป็นผลให้เราสามารถปรับแรงบิดจากต่ำสุดถึงสูงสุดได้ตลอดการปรับความเร็วเช่นเดียวกัน นั่นแสดงว่ามอเตอร์จะให้แรงบิดได้เท่าเทียมกับโหลดเสมอ ไม่ว่าความเร็วไหนก็ตาม

การปรับ DC Voltage สามารถใช้ semiconductor converters คือ

1. Controlled rectifier (หรือ AC to DC converter)
2. Chopper (DC to DC converter)

### 3.2.2 Field Flux Control

ถ้า field ของ separately excited หรือ series motor ที่กำลังวิ่งอยู่ ณ ความเร็วหนึ่งอ่อนตัวลง จะทำให้ induced emf ลดลง และเนื่องจากความต้านทานอาเมเจอร์มีค่าต่ำทำให้กระแสเพิ่มขึ้นเป็นปริมาณมากกว่าการลดลงของ field flux เป็นผลทำให้แรงบิดของมอเตอร์เพิ่มขึ้นเป็นปริมาณมากด้วย ซึ่งจะมากกว่าแรงบิดที่โหลดต้องการ ทำให้มอเตอร์เร่งความเร็วและ back emf เพิ่มขึ้น จนกระทั่งมอเตอร์จะมาถึงจุดสมดุลที่ความเร็วใหม่ที่สูงกว่าเดิม ที่ค่าแรงบิดของมอเตอร์เท่ากับแรงบิดที่โหลดต้องการอีกครั้ง การที่ field ของ separately excited motor เพิ่มขึ้น induced emf จะเพิ่มขึ้นและเป็นธรรมดาที่จะเกินแรงดันที่จ่าย เป็นเหตุให้กระแสอาเมเจอร์ไหลกลับทาง นั่นคือ มอเตอร์จะทำงานในลักษณะที่เป็น generator และป้อนพลังงานกลับสู่ระบบของแหล่งจ่าย พลังงานนี้ได้มาจากพลังงานจลน์ของเครื่องจักรและโหลด เนื่องจากความเร็วลดลงอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งมอเตอร์เข้ามาสู่จุดสมดุลที่ความเร็วใหม่ ซึ่งน้อยกว่าเก่า ที่ซึ่งแรงบิดของมอเตอร์เท่ากับแรงบิดที่โหลดต้องการ ในกรณีของ series motor การเพิ่ม field จะทำให้กระแสอาเมเจอร์ลดลงอย่างมาก (แต่ไม่กลับทิศ) เพราะว่าแรงบิดของมอเตอร์ต่ำกว่าแรงบิดที่โหลดต้องการ มอเตอร์จึงเกิดความหน่วง ความเร็วจะลดลง จนกระทั่งแรงบิดของมอเตอร์เท่ากับแรงบิดที่โหลดต้องการ

Steady-state speed-torque characteristic ของ separately excited และ series motor ที่ลด flux แสดงดังรูปที่ 3.13 (ก) และ 3.13 (ข) (เส้นประ) จากสมการที่ 3.5 ความเร็วนั้นเป็น



ฟังก์ชันกำลังสองของ flux ดังนั้นเราจึงลด flux มากเท่าใด ความชันของ speed-torque curve จะยิ่งเพิ่มขึ้น

ในกรณีของ shunt motor ความเร็วจะต่ำที่สุดเมื่อ full field โดยไม่มีความต้านทานภายนอกมาต่ออยู่ที่วงจร field ในกรณีของ separate excited motor ความเร็วต่ำสุดจะถูกจำกัด โดยความร้อนของ field coils และการอิ่มตัวของวงจรแม่เหล็ก เพราะว่าที่ full excitation นั้น รูปแบบของเครื่องจักรปกติจะทำงานที่จุดอิ่มตัวของวงจรแม่เหล็ก ดังนั้นความเร็วสามารถปรับให้ลดลงกว่า natural speed torque characteristic เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ความเร็วสูงสุดถูกจำกัดโดยความไม่มีเสถียรภาพของมอเตอร์ ที่เกิดจากผลกระทบของการสูญเสียรูปของสนามแม่เหล็กในปฏิกิริยา armature reaction ภายใต้การอ่อนตัวของ field และโครงสร้างทางกลศาสตร์ของมอเตอร์ ปกติแล้วมอเตอร์กระแสตรงได้รับการออกแบบให้สามารถเร่งความเร็วได้ถึง 1.5 ถึง 2 เท่าของความเร็วที่พิกัดไว้

Field control ของ shunt และ separately excited motor ใช้ในการควบคุมชนิดของ constant power control เพราะว่าความสามารถในการจ่ายกำลังสูงสุดเกือบจะคงที่ ตลอดการปรับความเร็ว สมมติ  $I_{a\max}$  คือกระแสที่ยอมให้อาเมเจอร์สูงสุด ซึ่งจะไม่เปลี่ยนแปลงในขณะที่สนามอ่อนตัวลง ณ กระแสอาเมเจอร์  $I_{a\max}$  Back emf ; E จะยังคงคงที่ทุกๆ ความเร็ว เพราะว่าแรงดันระหว่างขั้วก็ยังคงคงที่ V อยู่ ดังนั้นมอเตอร์สามารถที่จะจ่ายกำลัง  $E I_{a\max}$  คงที่ ตลอดช่วงความเร็ว และแรงบิดสูงสุดที่จะให้ได้จะแปรผกผันกับความเร็ว

สมมติว่า  $I_{a\max}$  ไม่เปลี่ยนแปลงตามการลดลงของ flux ซึ่ง main flux ที่ลดลงจะมีผลให้เกิดปฏิกิริยาอาเมเจอร์มากกว่า ดังนั้นกระแสสูงสุดที่มอเตอร์จะรับได้ โดยไม่มีการสปาร์คที่คอมมิวเตเตอร์จะลดลง เป็นการลดกำลังที่มอเตอร์สามารถจ่ายได้สูงสุดที่ความเร็วสูง

ใน separately excited motor เราสามารถควบคุม flux โดยการปรับแรงดันตกคร่อมสนาม อาจจะใช้ controlled rectifier หรือ chopper ขึ้นกับแหล่งจ่ายหลักว่าเป็น AC หรือ DC เครื่องจักรขนาดเล็กที่ใช้ Shunt motor เราสามารถปรับ flux โดยการแทรกตัวต้านทานปรับค่าได้ในวงจรสนาม สำหรับใน series motor นั้น เราควบคุม flux โดยต่อ diverter resistance คร่อม field winding ซึ่งใน series motor บางชนิด จะมี tap บน field winding มอเตอร์จำพวกนี้ เราสามารถควบคุมโดยการเปลี่ยนจำนวนรอบขง field winding ได้

#### การเชื่อม Armature Voltage กับ Field Flux Control

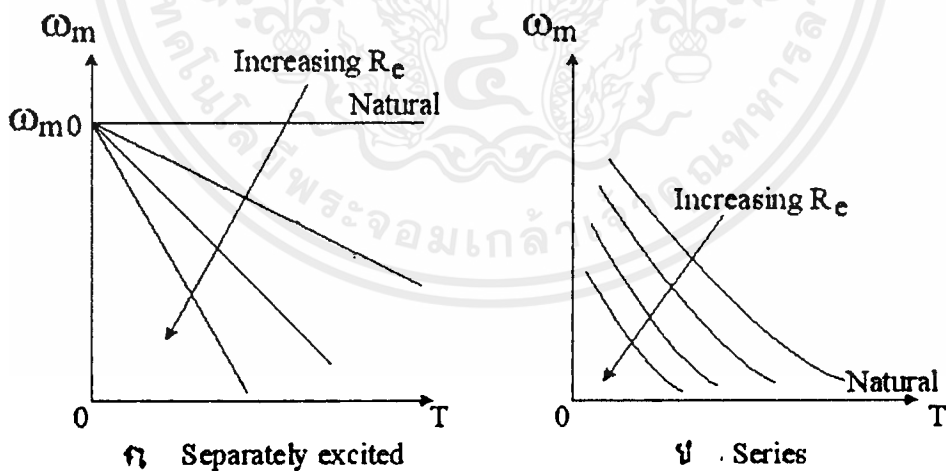
ในระบบขับเคลื่อนที่ต้องการการควบคุมความเร็วในช่วงกว้างมากๆ เราอาจใช้การควบคุม armature voltage control ร่วมกับ field flux control การควบคุมแบบ armature

voltage control จะให้ข้อดีในการรักษาแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถจ่ายได้ทุกๆ ความเร็ว และการควบคุมแบบ field flux control จะใช้ควบคุมความเร็วที่สูงกว่า ซึ่งไม่สามารถใช้ armature control ได้

ดังนั้นในระบบขับเคลื่อนซึ่งเรานิยามให้ base speed คือความเร็วที่มอเตอร์วิ่งอยู่บน natural speed-torque characteristic เราจะใช้ armature voltage control ที่ความเร็วจากที่หยุดนิ่งถึง base speed (field ถูกรักษาให้คงที่ที่ค่าที่พิกัด) ความเร็วที่สูงกว่าพิกัดเราไม่สามารถใช้ armature control ได้ เพราะว่าเราเพิ่ม armature voltage มากกว่าพิกัดไม่ได้ ดังนั้นความเร็วที่สูงกว่า base speed เราจะใช้ field control ในช่วงนี้มอเตอร์จะจ่ายแรงบิดได้ลดลง เมื่อความเร็วยิ่งมากขึ้น ตัวอย่างระบบขับเคลื่อนชนิดนี้ ได้แก่ rolling mill,coiler drives เป็นต้น ดังนั้น พิกัดของแรงบิดและกำลัง จะมี 2 ลักษณะ ตามระบบควบคุม โดยพิกัดของกระแสแอมแปร์ ถูกสมมติให้คงที่ตลอดช่วงความเร็ว

### 3.2.3 Armature Resistance Control

speed-torque characteristic ของ separately excited (หรือ shunt) และ series motor เมื่อปรับค่าความต้านทานภายนอก  $R_e$  ที่ต่ออนุกรมกับอาร์เมเจอร์แสดงดังรูปที่ 3.14(ก) และ 3.14(ข)



รูป 3.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง speed-torque ของมอเตอร์กระแสตรงที่ควบคุมโดยใช้วิธี armature resistance control

ข้อเสียที่สำคัญของการควบคุมความเร็วด้วยวิธีนี้คือ มีประสิทธิภาพต่ำมากๆ ตัวอย่างเช่น เมื่อโหลดเป็นชนิด constant torque power input จะคงที่ โดยมีกำลังส่วนหนึ่งจ่ายให้กับ

โหลดและอีกส่วนหนึ่งสูญเสียที่  $R_c$  เราจะเห็นว่ากำลังที่จ่ายให้กับโหลดจะต้องลดลงตามความเร็วที่ลดลง ดังนั้นประสิทธิภาพของมอเตอร์จะแปรผันตามความเร็ว โดยอาจจะเทียบกับเปอร์เซ็นต์ของความเร็วพิกัดก็ได้ เช่น ที่ 10 % ของความเร็วพิกัด มอเตอร์จะมีประสิทธิภาพ 10 % ของที่พิกัด

รูปที่ 3.14(ก) แสดงถึง armature resistance control จะเปลี่ยนลักษณะของ speed-torque characteristic ของ separately excited (หรือ shunt) motor จากที่ว่าความเร็วเกือบคงที่ตลอดช่วงของแรงบิด ไปเป็นคุณสมบัติการปรับความเร็วได้ เพราะเหตุนี้ และเพราะมีประสิทธิภาพต่ำ วิธีนี้จึงไม่ค่อยได้ใช้กับ separately excited motor ยกเว้น สำหรับการปรับความเร็วที่ต้องการในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งประสิทธิภาพทั้งหมดของระบบลดลงไม่มากนัก เนื่องจากวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและราคาต่ำ เพื่อความสะดวกและประหยัด จึงอาจเห็นวิธีนี้ใช้ใน series motor ขับเคลื่อนแบบ intermittent duty

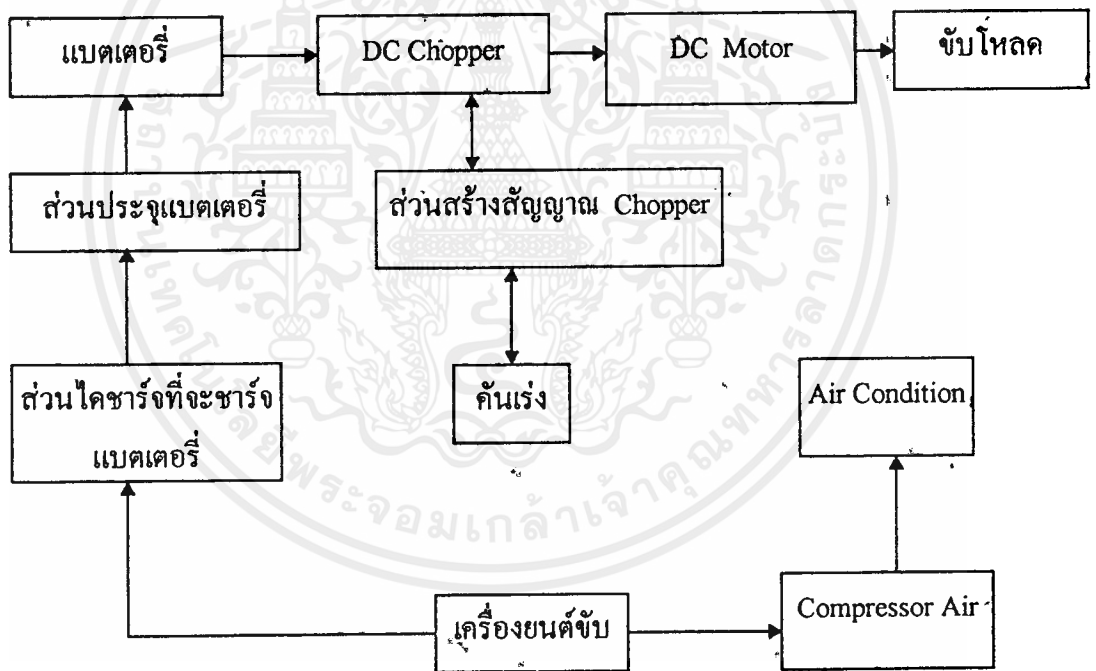
## บทที่ 4

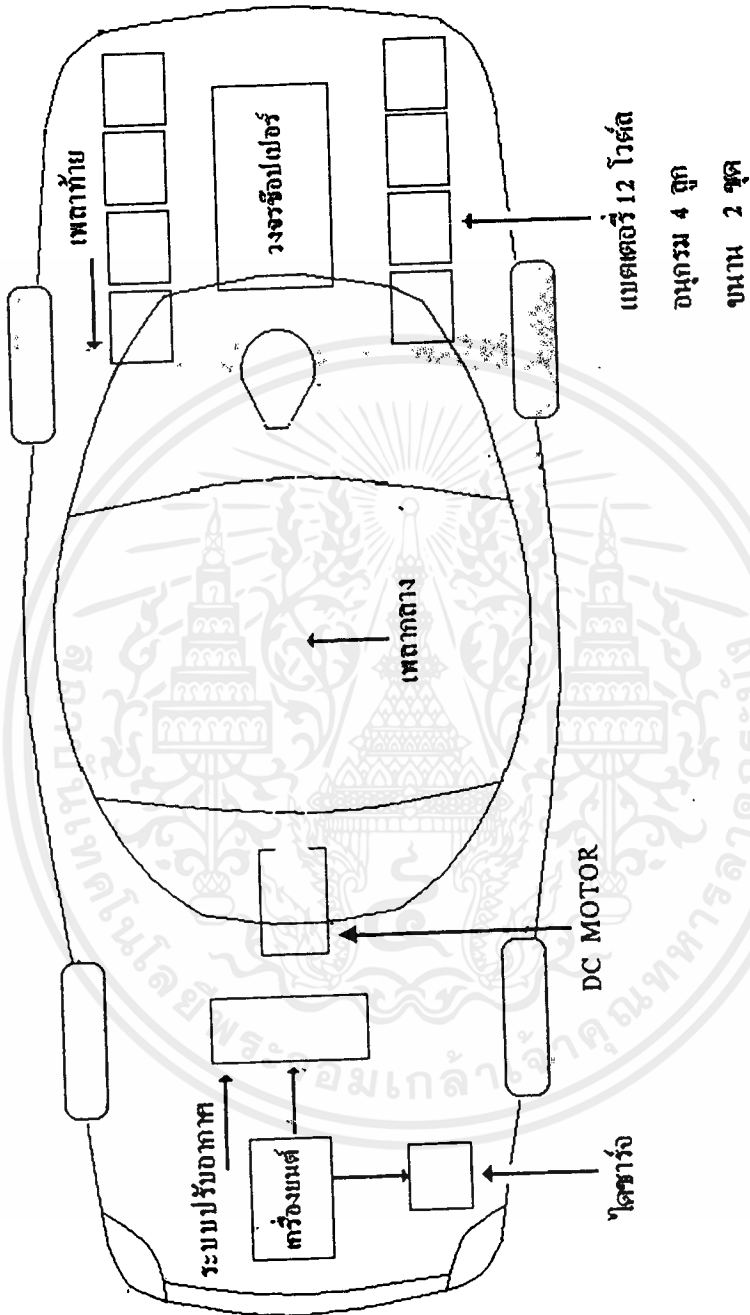
### Block diagram ของระบบและภาพร่างของรถไฟฟ้า

#### 4.1 Block diagram คร่าวๆ ของระบบขับเคลื่อน



#### 4.2 Block diagram ของระบบรถไฟฟ้าแบบไฮบริดจ์





รูปที่ 4.1 แสดงภาพร่างของรถไฟฟ้ามอเตอร์กระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ถือว่าเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอีกส่วนในรถไฟฟ้า เนื่องจากแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ นอกจากนี้แบตเตอรี่ยังเป็นตัวบ่งบอกความสามารถและประสิทธิภาพการทำงานของรถไฟฟ้าอีกด้วย เพราะฉะนั้นการพัฒนาระบบของรถไฟฟ้า จึงขึ้นอยู่กับการพัฒนาแบตเตอรี่เป็นส่วนใหญ่

#### 5.1 หลักการทำงานของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ประกอบด้วย หนึ่งเซลล์ หรือ หลายๆเซลล์ต่อกัน ในแต่ละเซลล์จะมีแผ่นธาตุอยู่ 2 แผ่น คือแผ่นบวก และแผ่นลบ และจะแช่อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เมื่อแบตเตอรี่ดีชาร์จ ionic ประกอบทางเคมีของทั้งสามส่วนนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อชาร์จสถานะต่างๆจะกลับมาเหมือนเดิม ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ที่ใช้มากที่สุดคือ ชนิดตะกั่ว-กรด เพราะจะทำให้ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจสูงสุด

แรงดันที่ขั้วเซลล์จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการชาร์จ และจะตกลงเมื่อถูกดีชาร์จ แรงดันของแบตเตอรี่หาได้จากผลคูณของแรงดันต่อเซลล์และจำนวนเซลล์ที่ต่อกัน การต่อเซลล์มีอยู่ด้วยกัน 3 แบบคือ

1. การต่อแบบอนุกรม
2. การต่อแบบขนาน
3. การต่อแบบอนุกรมขนาน

ความจุของแบตเตอรี่ของเซลล์ประมาณว่าขึ้นอยู่กับ พื้นที่ของแผ่นธาตุ อัตราการดีชาร์จซึ่งถูกกำหนดโดยแอมแปร์-ชั่วโมง ที่อุณหภูมิมาตรฐาน 25 องศาเซลเซียส ความจุของเซลล์จะลดลงเมื่ออัตราการดีชาร์จสูงขึ้น

#### 5.2 ส่วนประกอบและโครงสร้างของแบตเตอรี่ ชนิดตะกั่ว - กรด

ส่วนประกอบที่สำคัญของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ประกอบด้วย

1. แผ่นธาตุบวก (Position Plate) เป็นแผ่นอิเล็กโทรดที่มีศักย์ค่า จะมีจำนวนแผ่นมากกว่าจำนวนแผ่นในเซลล์บวกอยู่หนึ่งแผ่นในแต่ละเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.แผ่นธาตุลบ (Negative Plate) เป็นแผ่นอิเล็กโทรดที่มีศักย์ต่ำ จะมีจำนวนแผ่นมากกว่าจำนวนแผ่นในเซลล์บวกอยู่หนึ่งแผ่นในแต่ละเซลล์

3.อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เป็นสารละลายที่แตกตัวเป็นไอออนบวกและไอออนลบ ทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้า

4.น้ำกรดกำมะถันชนิดเจือจาง (Sulfuric acid dil) ต้องมีความบริสุทธิ์มากกว่าปกติ คือมีส่วนผสมของแร่ธาตุต่างๆ น้อยที่สุด

5.แผ่นกั้น (Separator) ใส่ระหว่างแผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบ ป้องกันแผ่นธาตุทั้ง 2 ชนิดติดกัน

6.แผ่นใยแก้ว (strap) ทำหน้าที่เป็นฉนวนสัมผัสกับแผ่นธาตุบวก ป้องกันการหลุดร่วงของวัสดุไวปฏิกิริยา

7.เปลือกหม้อ (Container) เป็นภาชนะสำหรับส่วนประกอบแบบต่างๆ แบ่งออกตามวัสดุ ได้เป็น 4 ชนิด ได้แก่ พลาสติก ยาง แก้ว และ ไม้บุแผ่นตะกั่ว

8.ฝาหม้อ (Cover) ทำหน้าที่ป้องกันอิเล็กโทรไลต์กระเด็นออกจากเซลล์ภายในออกสู่ภายนอกของเปลือกหม้อ

9.จุดที่ใช้ปิดช่องในฝาหม้อเบดเดอรี (Pluy) ทำไว้เพื่อการเติมอิเล็กโทรไลต์

10.ระบบอุปกรณ์ป้องกันแก๊ส (Vent Plug)

### 5.3 ขนาดความจุของเบดเดอรี (Capacity)

ขนาดความจุของเบดเดอรีจะกำหนดเป็นค่าแอมแปร์ - ชั่วโมง (Ampere-Hour) หรือ Ah ซึ่ง Ah นี้หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่เบดเดอรีสามารถจ่ายออกมาได้ ภายใต้อุณหภูมิที่กำหนด ด้วยค่ากระแส และแรงดันสุดท้ายที่กำหนด

จากการกำหนดของ มอก. ฉบับที่ 9 ว่าด้วยเรื่องเบดเดอรีชนิดตะกั่ว-กรด ขนาดความจุของเบดเดอรี ให้ระบุอัตราการจ่ายไฟต่อ 20 ชั่วโมงเป็นมาตรฐาน

ความจุที่อัตรา 20 ชั่วโมงหรือ C20 คือ ขนาดความจุที่ได้จากการจ่ายไฟ (Discharge) เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ซึ่งจะเป็นค่าความจุที่ระบุไว้ที่ตัวเบดเดอรี

ขนาดความจุของการจ่ายไฟ (Discharge Capacity) หรือ C สามารถหาได้จากสมการ

$$C = \int I(t) dt$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $t$  คือ Discharge Time คือ เวลาตั้งแต่เริ่มจ่ายไฟจนถึงระดับแรงดันสุดท้ายที่กำหนด ( $t$ ) คือ กระแสที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่ โดยทั่วไปถือว่าคงที่เท่ากับ  $I$  ดังนั้น

$$C = It$$

จุดสิ้นสุดการใช้งานของแบตเตอรี่จะถูกกำหนดด้วยแรงดันสุดท้ายสำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ระดับแรงดันสุดท้ายจะประมาณ 1.8-1.9 โวลต์ต่อเซลล์

ความจุของแบตเตอรี่จะสูงขึ้นถ้า Discharge ต่ำกว่าพิกัด ในทางกลับกัน ความจุแบตเตอรี่จะลดลง ถ้าการ Discharge สูงกว่าพิกัด

#### 5.4 แรงดันแบตเตอรี่

แรงดันแบตเตอรี่เป็นค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วของแบตเตอรี่ ค่าแรงดันที่ไฟฟ้าที่ชั่วขณะไร้โหลด ( แบตเตอรี่ปิดวงจร ) จะเป็นฟังก์ชันของการเกิดประจุของแบตเตอรี่ แต่ขณะไร้โหลด ( แบตเตอรี่ปิดวงจร ) จะเป็นฟังก์ชันของการเกิดประจุของแบตเตอรี่ แต่ขณะที่มีโหลด แรงดันที่ขั้วจะเป็นฟังก์ชันของกระแสโหลด การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันของแบตเตอรี่ จะมีผลต่อการควบคุมความเร็วของรถไฟฟ้าเป็นอย่างมาก

#### 5.5 ความต้านทานภายในแบตเตอรี่

ค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดัน ไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ขณะมีโหลด รวมทั้งมีผลต่อความจุของแบตเตอรี่ด้วย ค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ เช่น ปรากฏการณ์ทางเคมีที่เกิดขึ้นภายในของแบตเตอรี่ในขณะที่เกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้า เช่น ปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน ซึ่งจะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าใกล้ ๆ ผิวของแผ่นขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่เกิดการไหลของไอออนระหว่างแผ่นขั้วอิเล็กโทรด มีค่าลดลง ดังนั้นปรากฏการณ์นี้จึงเปรียบเสมือนค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่นั่นเอง

#### 5.6 คุณสมบัติการอัดไฟ

ในการอัดไฟเข้าแบตเตอรี่นั้น สิ่งที่ต้องคำนึงถึงมากที่สุดคือ ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนเป็นก๊าซไวไฟ ดังนั้น จึงต้องมีระบบระบายที่เกิดขึ้นให้ดี การอัดไฟที่ใช้กระแสวิ่งสูง ก็จะทำให้เกิดความร้อนขึ้น เป็นผลทำให้เกิดก๊าซมากขึ้นด้วย ความร้อนที่เกิดขึ้นในช่วงระหว่างการอัดไฟไม่ควรเกิน 55 องศาเซลเซียส



วิธีการอัดไฟ มีด้วยกัน 4 วิธี คือ

1.การอัดไฟด้วยกระแสคงที่ (Charging With Constant Current)

2.การอัดไฟด้วยกระแสเป็นช่วงๆ ( Charging With Intermittent Constant Current

3.การอัดไฟด้วยแรงดันคงที่และจำกัดกระแส (Charging With Constant Voltage and Current Limitation)

4.การอัดไฟด้วยกระแสไม่คงที่ (Charging With Tapered Current)

การอัดไฟด้วยกระแสคงที่ จะใช้เวลาในการอัดไฟนาน (มากกว่า 12 ชั่วโมง) ส่วนการอัดไฟที่ต้องการเวลาในการอัดสั้น (Fast Charge) โดยทั่วไปมักใช้วิธี IE Characteristic มากกว่า W Characteristic

### 5.7 คุณสมบัติในการจ่ายไฟ

ขณะที่ใช้กำลังงานมากขึ้น พลังงานที่สะสมไว้ในแบตเตอรี่จะค่อยๆ ลดลง ในขณะที่มีการใช้กำลังงานมากขึ้น ซึ่งการที่พลังงานในแบตเตอรี่ ลดลงนี้มีสาเหตุมาจาก

1.พลังงานลดลงเนื่องจาก การลดลงของประจุในแบตเตอรี่ตามขนาดของกระแสที่จ่ายออกไป

2.พลังงานลดลงเนื่องจาก ระดับแรงดันที่ขั้วลดลง

จากสาเหตุทั้งสองนี้ ทำให้เกิดความสัมพันธ์ของประจุของแบตเตอรี่ กระแสที่จ่ายออกไป และเวลาที่ใช้ซึ่งเรียกว่า สมการของ Peukert ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้ คือ

$$I^n \cdot t = C$$

เมื่อ N และ t เป็นค่าคงที่

I คือ กระแสที่จ่ายออกไปมีค่าคงที่ มีหน่วยเป็นแอมแปร์

ค่า N และ C นั้นหาได้จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบที่กระแสคงที่

$$I_1^n \cdot t_1 = C$$

$$I_2^n \cdot t_2 = C$$

$$n \log I_1 = \log C - \log t_1$$

$$n \log I_2 = \log C - \log t_2$$

$$n = \frac{\log t_2 - \log t_1}{(\log I_1 - \log I_2)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $n = 1.0$  สำหรับกระแสต่ำมาก ๆ  
 $n = 2.0$  สำหรับกระแสสูงมาก ๆ

### 5.8 ขั้นตอนในการอัดไฟเข้าแบตเตอรี่

การอัดไฟแบบกระแสคงที่ ( Constant Current Charging )

1. ทำความสะอาดสิ่งที่สกปรก หรือ สิ่งที่แปลกปลอมอื่น ๆ ที่จับอยู่บนแบตเตอรี่ โดยเฉพาะที่ขั้วแบตเตอรี่
2. เปิดฝาจุกเติมน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ออก เพื่อให้ก๊าซที่เกิดขึ้นในขณะอัดไฟระบายออกไปได้โดยง่าย
3. ตรวจสอบระดับน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ จะต้องอยู่เหนือแผ่นตะกั่ว 10 - 15 มม. ถ้าขาดให้เติมน้ำกลั่นบริสุทธิ์
4. ต่อขั้วเครื่องบรรจุกับขั้วของแบตเตอรี่ให้ถูกต้อง โดยต่อขั้วบวก (+) ของเครื่องประจุเข้ากับ ขั้วบวก (+) ของแบตเตอรี่ และขั้วลบ (-) ของเครื่องประจุเข้ากับขั้วลบ (-) ของแบตเตอรี่
5. ทำการอัดไฟด้วยกระแสประมาณ 1/10 ของขนาดความจุ แบตเตอรี่
6. ในขณะที่ทำการอัดไฟ ต้องคอยระวัง อย่าให้อุณหภูมิของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์สูงเกินกว่า 40 องศาเซลเซียส ถ้าเกินให้ลดกระแสในการอัดไฟให้ต่ำลง หรือ หยุดการอัดไฟจนกว่าอุณหภูมิของน้ำยาจะต่ำลง
7. อย่าให้เกิดประกายไฟ หรือ นำเปลวไฟมาเข้าใกล้แบตเตอรี่ ในขณะที่ทำการอัดไฟ เพราะจะมีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้น แผ่กระจายในขณะที่ทำการอัดไฟ
8. การอัดไฟจะเสร็จสิ้น เมื่อค่าความถ่วงจำเพาะ ของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์สูงกว่าที่กำหนด คุณนำออกทิ้งบางส่วน แล้วเติมน้ำกลั่น ในทางตรงกันข้าม ถ้าค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าค่าที่กำหนด ให้คุณนำทิ้งแล้วเติมน้ำกรดกำมะถันเจือจาง

### 5.9 ข้อควรระวังในการใช้งานและการบำรุงรักษาแบตเตอรี่

1. อย่าทำการอัดไฟเข้าแบตเตอรี่ด้วยกระแสไฟที่มากเกินไป เพราะจะทำให้เกิดความร้อนสูงในแบตเตอรี่ เป็นเหตุให้น้ำยาอิเล็กโทรไลต์กลายเป็นไอและเกิดก๊าซไฮโดรเจนมาก เกิดปฏิกิริยา

เคมีอย่างรุนแรง เป็นเหตุให้แผ่นตะรั่วเกิดการบิดตัว สารที่เคลือบไว้จะหลุดร่วงและเปลือกแบตเตอรี่จะเกิดความเสียหาย

2.อย่าปล่อยให้แบตเตอรี่ปล่อยไฟออกมามากเกินไป การปล่อยให้แบตเตอรี่ปล่อยไฟออกมาจนหมด จะทำให้เกิดเกลือกำมะถัน (ตะกั่วซัลเฟต) ไปจับที่แผ่นตะกั่วการที่มีเกลือกำมะถันไปจับที่แผ่นตะกั่วมาก ๆ จะทำให้ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลดลงและการแก้ไขให้กลับสู่สภาพเดิมทำได้ยาก

3.รักษาขั้วแบตเตอรี่ให้สะอาด และแน่นอยู่เสมอ หากมีเกลือกำมะถันไปจับอยู่ที่ขั้ว ให้ใช้น้ำร้อนล้างทำความสะอาด และควรเคลือบขั้วแบตเตอรี่ไว้ด้วยจารบีซิลิโคน หรือ วาสลิน เพื่อป้องกันการสึกกร่อน

4.ทำการตรวจสอบค่าความถ่วงจำเพาะตามระยะเวลา (1 หรือ 2 สัปดาห์ต่อครั้ง ) และรักษาให้ระดับของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์อยู่เหนือแผ่นตะกั่ว 10 -15 มม. เสมอ หากทิ้งให้แผ่นตะกั่วแห้งเป็นเวลานาน จะทำให้ประสิทธิภาพของแผ่นตะกั่วเสื่อมลง ขนาดความจุของแบตเตอรี่จะลดลงด้วย หากเครื่องเติมน้ำยาต่ำเกินไปให้เติมน้ำกลั่น

5.อย่าปล่อยให้แบตเตอรี่จ่ายไฟด้วยกระแสไฟจำนวนมากๆ เป็นเวลานานๆติดต่อกัน ควรหยุดทิ้งช่วงระยะเวลาประมาณ 30 วินาที เพื่อให้แบตเตอรี่มีเวลาดิ้นสภาพ

6.เมื่อไม่ได้ใช้แบตเตอรี่เป็นเวลานานๆ ให้ปลดขั้วแบตเตอรี่ออก และนำแบตเตอรี่ไปอัดไฟให้เต็มทุกๆ 2 สัปดาห์ เพื่อป้องกันไม่ให้แบตเตอรี่เกิดการเสื่อมสภาพ

7.แบตเตอรี่ใหม่ที่ยังไม่มีการเติมน้ำยาอิเล็กโทรไลต์มาแล้ว เมื่อทำการอัดไฟให้เติมน้ำยาอิเล็กโทรไลต์แล้วทิ้งไว้ประมาณ 8 ชั่วโมง เพื่อให้แผ่นตะกั่วอบน้ำยาจนอิ่มตัว แล้วจึงทำการจ่ายไฟเข้าด้วยกระแสไฟฟ้าประมาณ 3-5 แอมแปร์ ( หรือขนาด 1/10 ของขนาดความจุ ) เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 8 ชั่วโมง

### 5.10 พิจารณาออกแบบแหล่งพลังงาน

เนื่องจากในส่วนของระบบขับเคลื่อนใช้ motor เพราะฉะนั้นในการพิจารณา Battery ต้องสัมพันธ์กับข้างต้นสำหรับโครงการนี้จะใช้

## บทที่ 6

### วงจรชาร์จแบตเตอรี่และระบบแอร์คอมเพรสเซอร์

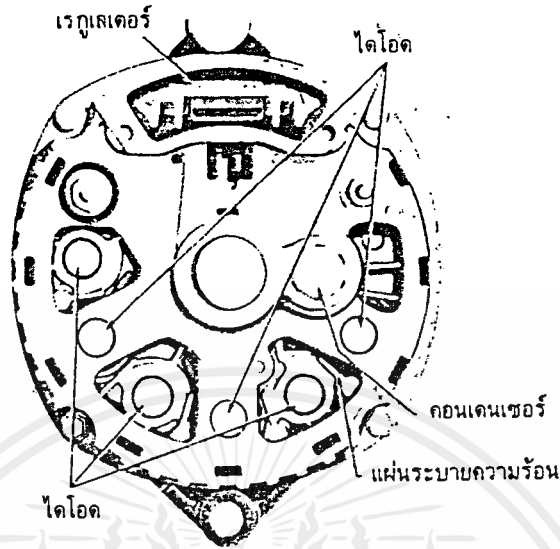
#### 6.1 วงจรชาร์จแบตเตอรี่ (Charger)

ระบบไฟชาร์จ AC แบตเตอรี่ในรถยนต์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่สำคัญมาก แบตเตอรี่จะจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังวงจรถาร์ต วงจรไฟหน้า วงจรไฟเลี้ยว ฯลฯ ซึ่งเมื่อแบตเตอรี่มีประจุไฟฟ้าลดลงก็ต้องมีประจุไฟฟ้าเข้าไปใหม่ให้เต็ม

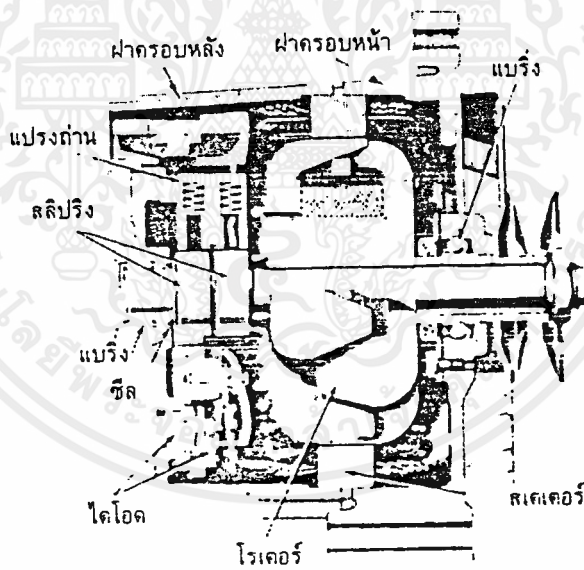
ระบบไฟชาร์จก็ได้ถูกออกแบบนำมาใช้กับ รถยนต์เพื่อทำการชาร์จแบตเตอรี่ให้มีประจุไฟฟ้าเต็มอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้แบตเตอรี่จ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ทันทีเมื่อเราต้องการ ระบบไฟชาร์จในรถยนต์ทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่และวงจรไฟฟ้าต่าง ๆ ในรถยนต์ ขณะเดียวกันก็ต้องมีการควบคุมการชาร์จให้อยู่ในค่าที่กำหนดเพื่อไม่ให้เกิดการชาร์จมากเกินไปซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายกับระบบไฟชาร์จและอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ในรถยนต์ได้

ระบบไฟชาร์จในรถยนต์มีการใช้อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้า 2 ชนิดได้แก่ เจเนอเรเตอร์และอัลเทอร์เนเตอร์

เจเนอเรเตอร์เป็นอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะตัวคือ มันจะผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากก็ต่อเมื่อความเร็วรอบสูง แต่ในปัจจุบันรถยนต์ในท้องถนนมีจำนวนมากทำให้รถติด เครื่องยนต์ไม่สามารถทำความเร็วรอบสูงได้ตลอดเวลา และรถยนต์ก็มีการเพิ่มอุปกรณ์ไฟฟ้าอำนวยความสะดวกมากขึ้น เจเนอเรเตอร์จึงผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมาไม่เพียงพอกับความต้องการของรถยนต์ ปัจจุบันจึงใช้อัลเทอร์เนเตอร์เป็นอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าในรถยนต์ อัลเทอร์เนเตอร์คืออุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแต่ถูกแปลงเป็นกระแสตรงโดยไดโอดก่อนประจุเข้าแบตเตอรี่และจ่ายไปยังวงจรไฟฟ้าต่าง ๆ ในรถยนต์ คุณสมบัติของอัลเทอร์เนเตอร์คือ มันสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้จำนวนมากขณะมีความเร็วรอบต่ำ ( ประมาณ 750 รอบต่อนาที ) ทำให้มีพลังงานไฟฟ้าเพียงพอความต้องการของรถยนต์ทั้งที่ความเร็วรอบต่ำและความเร็วรอบสูง รูปที่ 6.1 แสดงภาพชิ้นส่วนประกอบของอัลเทอร์เนเตอร์



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.1 ภาพตัดแสดงชิ้นส่วนประกอบชิ้นส่วนของอัลเทอร์เนเตอร์

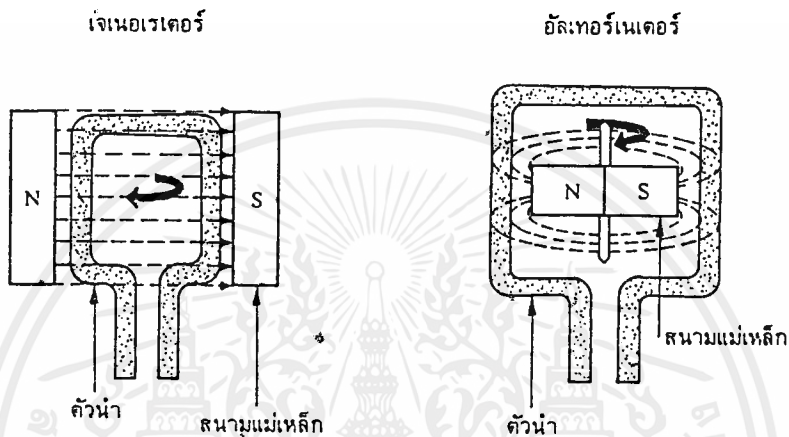
### 6.1.1 หลักการการเกิดไฟฟ้า

เมื่อให้ขอลวดตัวนำหมุนตัดสนามแม่เหล็กหรือให้สนามแม่เหล็กหมุนตัดขอลวดก็จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าขึ้นภายในขอลวดนั้น ซึ่งการที่ขอลวดหมุนตัดกับสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

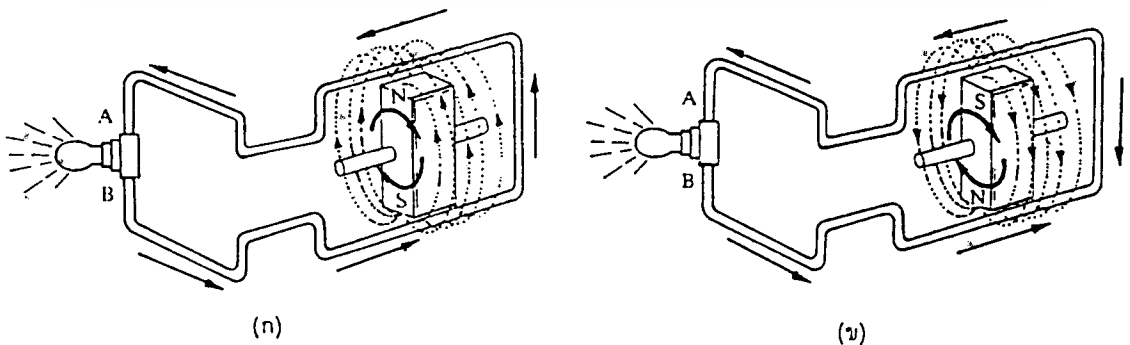
คือเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ( DC current ) และสนามแม่เหล็กหมุนตัดขดลวดคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ( AC Current ),

อัลเทอเนเตอร์จะประกอบไปด้วยขดลวดฟิลด์คอยล์หรือขดลวดสเตเตอร์ เมื่อตัวโรเตอร์หมุนตัดขดลวดสเตเตอร์ครบ 1 รอบจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดทั้งคลื่นบวกและคลื่นลบ กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเรียกว่า ไฟฟ้ากระแสสลับดังรูปที่ 6.2



รูป 6.2 เปรียบเทียบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตรงและกระแสไฟสลับ

เมื่อสนามแม่เหล็กหรือขดลวดโรเตอร์หมุนอยู่ภายในขดลวดตัวนำหรือขดลวดสเตเตอร์ จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดโรเตอร์ตัดผ่านขดลวดสเตเตอร์ทำให้เกิดแรงเคลื่อนต่อกระแสไฟฟ้าในขดลวดสเตเตอร์ซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำ ทำให้กระแสไหลออกมาสู่วงจรภายนอกของอัลเทอเนเตอร์ดังรูปที่ 6.3 (ก) แสดงถึงการไหลของกระแสไฟสลับที่เกิดขึ้นในวงจรเมื่อขั้วเหนือ (N) หมุนตัดขดลวดตัวนำทางด้านบนของขั้วใต้ (S) ตัดขดลวดตัวนำทางด้านล่าง จะทำให้กระแสไหลจาก B ไป A

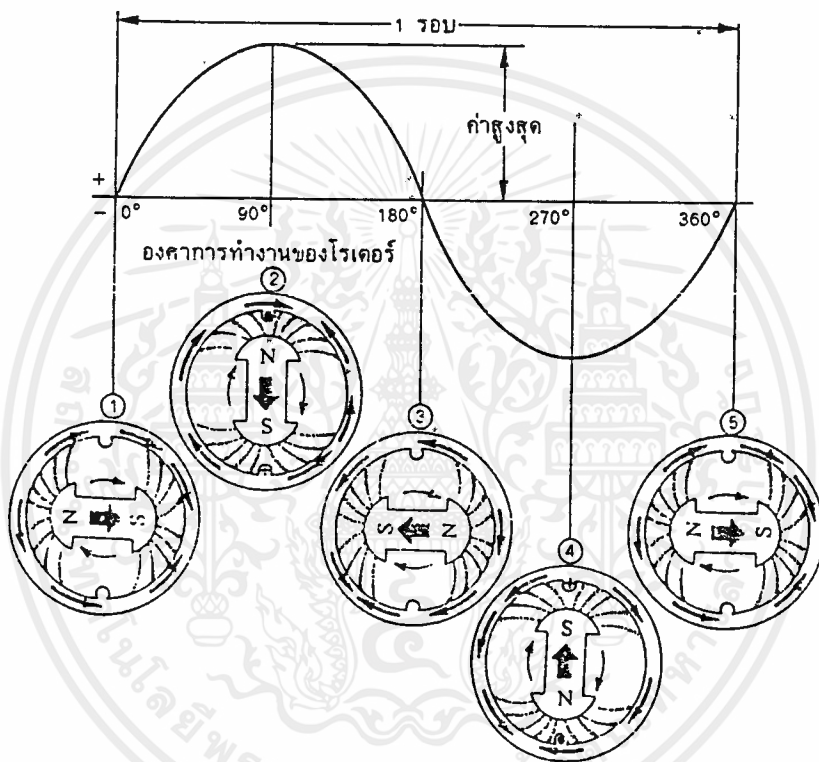


รูป 6.3 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อขดลวดโรเตอร์เคลื่อนตัวสลับตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กโดยขั้วเหนือ (N) อยู่ในตำแหน่งของขั้วใต้ (S) และขั้วใต้ (S) มาอยู่ในตำแหน่งของขั้วเหนือ (N) จะทำให้กระแสไหลจาก A ไป B ดังรูปที่ 6.3 (ข)

เมื่อโรเตอร์เคลื่อนที่ไป 1 รอบทำมุม 360 องศา หรือ 1 วัฏจักร จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าทั้งคลื่นและคลื่นลบ ดังรูปที่ 6.4



รูป 6.4 แสดงตำแหน่งต่าง ๆ ที่ขดลวดโรเตอร์หมุนครบ 1 รอบ เกิดกระแสไฟฟ้าคลื่นบวก และคลื่นลบ

ตำแหน่งที่ 1 ขดลวดโรเตอร์หมุนทำมุมในระดับแนวตั้งฉากกับขดลวดตัวนำทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นไม่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้ากับขดลวดตัวนำได้ ในช่วงนี้จะไม่มีการเกิดกระแสไฟฟ้า

ตำแหน่งที่ 1-2 ขดลวดโรเตอร์จะหมุนไปจนทำมุม 90 องศา ตรงกับขดลวดตัวนำพอดี ความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กจะมีมากจนทำให้ขดลวดตัวนำได้รับการนำ เกิดมีกระแสไฟฟ้าคลื่นบวกมากที่สุด ( กระแสไฟฟ้าจะออกจากขดลวดทางด้านล่างกลับเข้าขดลวดทางด้านบน )

ตำแหน่งที่ 2-3 ขดลวดโรเตอร์จะหมุนไปจนทำมุม 180 องศา ความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กจะมีน้อยมาก ทำให้ขดลวดตัวนำไม่มีการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าหรือมีค่าเท่ากับ 0 เช่นเดียวกับตำแหน่งที่ 1, ในช่วงนี้ทิศทางการไหลของกระแสจะเริ่มการเปลี่ยนแปลงจากคลื่นบวกเป็นคลื่นลบ

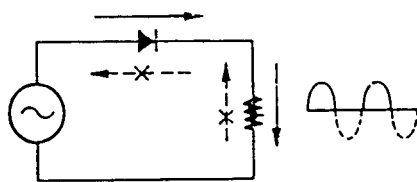
ตำแหน่งที่ 3-4 ขดลวดโรเตอร์จะหมุนไปจนทำมุม 270 องศา ตรงกับขดลวดตัวนำ ความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กมีมากจนทำให้ขดลวดตัวนำได้รับการเหนี่ยวนำมากที่สุด เกิดกระแสสูงสุด เช่นเดียวกับตำแหน่งที่ 2 แต่ขั้วแม่เหล็กกลับทิศทางทำให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าคลื่นลบ ( กระแสไฟฟ้าจะออกจากขดลวดทางด้านบนกลับเข้าขดลวดทางด้านล่าง )

ตำแหน่งที่ 4-5 ขดลวดโรเตอร์จะหมุนไปจนทำมุม 360 องศาพอดี จะมีการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดตัวนำน้อยจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 0 เช่นเดียวกับตำแหน่งที่ 1 และเมื่อหมุนต่อไปก็จะกลับมาเริ่มต้นที่ตำแหน่งที่ 1 ใหม่วนเวียนเช่นนี้ตลอดไป

จำนวนคลื่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในทุก ๆ วัฏจักรต่อวินาที เรียกว่า ความถี่ ( Frequency ) เมื่อขดลวดโรเตอร์หมุนไปด้วยความเร็ว 60 รอบใน 1 วินาที เราจะอ่านค่าของกระแสไฟฟ้านี้ได้ 60 รอบต่อวินาที

### 6.1.2 การเรียงกระแสของอัลเทอร์เนเตอร์

อัลเทอร์เนเตอร์ที่มีขดลวดสเตเตอร์เพียงชุดเดียวที่ใช้ไดโอดบวกเพียงตัวเดียวเป็นตัวเรียงกระแสเมื่อเกิดกระแสไฟฟ้าคลื่นบวกทางด้านบน กระแสไฟฟ้าคลื่นบวกสามารถผ่านไดโอดไปได้ แต่เมื่อคลื่นบวกออกจากอัลเทอร์เนเตอร์ทางด้านล่าง กระแสไฟฟ้าคลื่นบวกไม่สามารถผ่านไดโอดไปได้ จากกราฟเมื่อคลื่นทางไฟฟ้าจะเห็นได้ว่าการขาดตอนของกระแสไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ออกจากอัลเทอร์เนเตอร์ไม่เรียบ ซึ่งเป็นการแปลงกระแสแบบฮาล์ฟเวฟ ( Half Wave ) หรือครึ่งคลื่น ดังรูปที่ 6.5

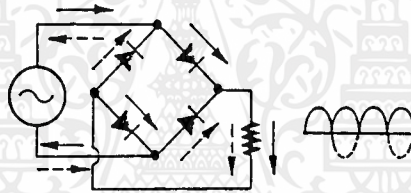


รูป 6.5 วงจรการเรียงกระแสแบบฮาล์ฟเวฟ ( ครึ่งคลื่น )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



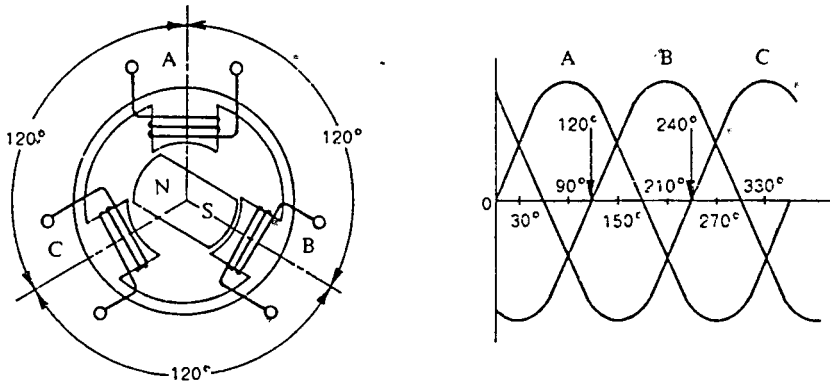
และเมื่อเรานำไดโอดบวก 2 ตัวและไดโอดลบ 2 ตัว มาต่อเข้ากับอัลเทอร์เนเตอร์ที่มีขดลวดสเตเตอร์เพียงหนึ่งขด เมื่ออัลเทอร์เนเตอร์มีกระแสไฟฟ้าเคลื่อนบวกรอกทางด้านบน คลื่นบวกสามารถผ่านไดโอดบวกเข้าอัลเทอร์เนเตอร์ทางด้านล่างได้ครบวงจร และเมื่อกระแสไฟฟ้าเคลื่อนบวกรอกทางด้านล่างก็สามารถไหลผ่านไดโอดบวกกลับเข้าอัลเทอร์เนเตอร์ทางด้านบนได้ เมื่อดูกราฟคลื่นทางไฟฟ้าจะเห็นได้ว่าไม่เกิดการขาดตอนของกระแสไฟฟ้า ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ออกจากอัลเทอร์เนเตอร์เกิดความราบเรียบไม่ขาดตอน เป็นการแปลงกระแสแบบฟูลเวฟ ( Full Wave ) หรือเต็มคลื่น ดังรูปที่ 6.6 ไดโอดที่ต่อกันในวงจรแบบนี้เรียกว่า การต่อไดโอดแบบบริดจ์



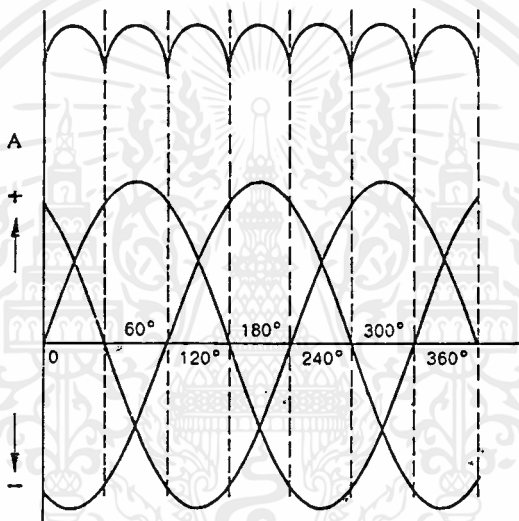
รูป 6.6 วงจรการเรียงการแสแบบฟูลเวฟ ( เต็มคลื่น )

### 6.1.3 อัลเทอร์เนเตอร์แบบ 3 เฟส

ในการใช้งานจริงอัลเทอร์เนเตอร์ที่ใช้ขดลวดสเตเตอร์เพียงขดเดียวไม่สามารถที่จะจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เพียงพอต่อความต้องการ จึงมีการเพิ่มขดลวดสเตเตอร์เป็น 3 ขดลวด ขดลวดทั้งสามขดจะวางห่างกันเป็นมุม 120 องศา ซึ่งกันและกัน รูปที่ 6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขดลวดทั้ง 3 และแม่เหล็ก กระแสไฟฟ้าสลับที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า กระแสไฟสลับ 3 เฟส จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ออกจากขดลวดทั้ง 3 ซ้อนกันมาก จึงทำให้เกิดความราบเรียบของกระแสไฟฟ้าดังรูปที่ 6.8



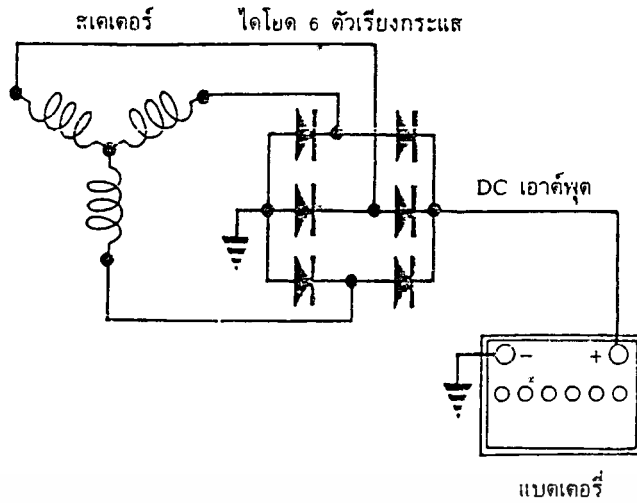
รูป 6.7 ขดลวด 3 ขด ผลิตกระแสไฟฟ้า 3 เฟส



รูป 6.8 กระแสไฟฟ้าออกมาทำให้เกิดความราบเรียบของกระแสไฟฟ้า

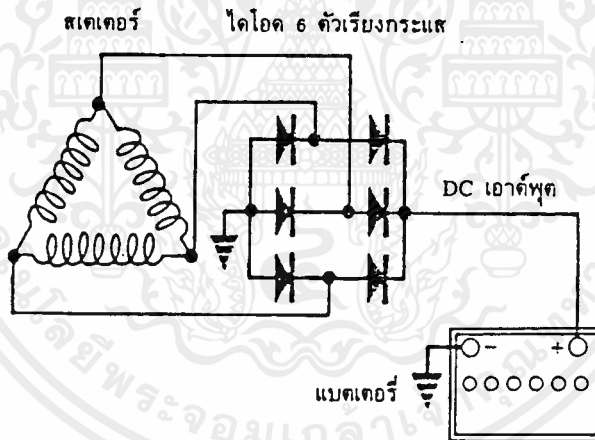
การต่อขดลวดทั้ง 3 ขด เข้าด้วยกันในอัลเทอร์เนเตอร์มีด้วยกัน 2 แบบ คือ

1. การต่อแบบ Y หรือสตาร์ ( Y or Star junction ) การต่อขดลวด 3 เฟสแบบนี้ในอัลเทอร์เนเตอร์เป็นแบบที่นิยมใช้กันมาก คดขดลวดทั้ง 3 ขดปลายด้านหนึ่งจะต่อรวมกัน จุดต่อนี้เรียกว่า จุดต่อร่วม ( neutral juncton ) หรือขั้ว N ดังรูปที่ 6.9



รูป 6.9 การต่อขดลวดแบบสตาร์ และต่อเข้ากับไดโอด

2.การต่อแบบเดลต้า ( Delta junction ) การต่อแบบนี้จะ ไม่มีจุดต่อร่วม ( Neutral junction ) แบบ Y ส่วนการทำงานและกรบารุงรักษาจะเหมือนการต่อแบบ Y ดังรูปที่ 6.10

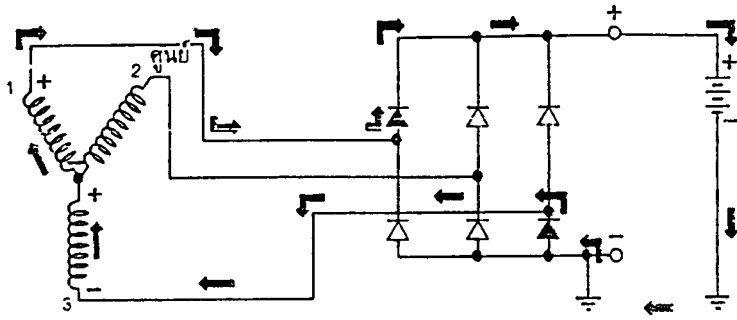


รูป 6.10 การต่อขดลวดแบบเดลต้าและต่อเข้ากับไดโอด

#### 6.1.4 การทำงานของอัลเทอร์เนเตอร์

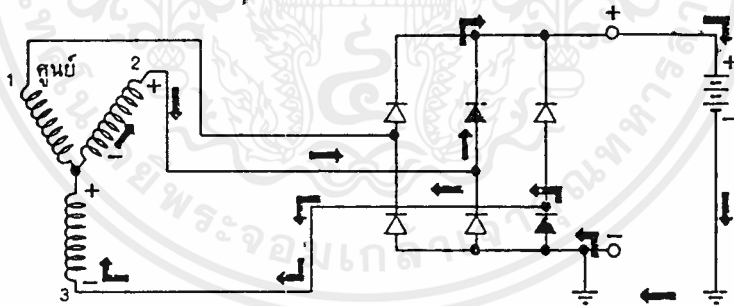
ในช่วงแรกนี้กระแสไฟฟ้าเคลื่อนบวก (+) จะไหลออกจากขดลวดสเตเตอร์เฟสที่ 1 ผ่านไดโอดบวกไปยังขั้วบวกขั้วบวกหรือขั้ว B ของอัลเทอร์เนเตอร์ กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าประจุแบตเตอรี่หรือภาระ จากนั้นก็จะไหลลงดินครบวงจร และกระแสไฟฟ้าเคลื่อนลบ (-) ก็จะไปผ่านไดโอดลบผ่านขดลวดตัวนำเฟสที่ 3 ของสเตเตอร์และจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นลบ โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะไม่ไหลผ่านขดลวดตัวนำเฟสอื่น ๆ อันเนื่องมาจากคุณสมบัติของไดโอดที่ไม่ยอมให้กระแสไหลย้อนกลับ ได้ดังรูปที่ 6.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 6.11 การเรียงกระแสของอัลเทอร์เนเตอร์ขั้นที่ 1

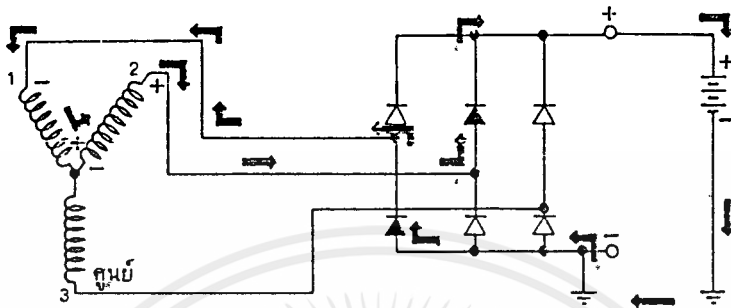
การทำงานในช่วงที่ 2 ขดลวดตัวนำเฟสที่ 1 ของขดลวดสเตเตอร์จะมีค่ากระแสไฟฟ้าเป็น 0 ขดลวดตัวนำเฟสที่ 2 จะมีค่ากระแสไฟฟ้าเป็นบวก และขดลวดตัวนำเฟสที่ 3 จะมีค่ากระแสไฟฟ้าเป็นลบ กระแสไฟฟ้าจะไหลจากจุดต่อรวม N ผ่านขดลวดตัวนำเฟสที่ 2 ของสเตเตอร์ซึ่งกระแสไฟฟ้าจะเป็นคลื่นบวกไหลผ่านไปยังไดโอดบวก กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านขั้วบวกของอัลเทอร์เนเตอร์เข้าประจุแบตเตอรี่หรือภาระ และกระแสไฟฟ้าจะไหลลงดินครบวงจรที่โครงเรืออัลเทอร์เนเตอร์ และกระแสไฟฟ้าคลื่นลบก็จะไหลผ่านไดโอดลบที่ต่อไปยังขดลวดตัวนำเฟสที่ 3 ที่มีค่าของกระแสไฟฟ้าเป็นลบครบวงจรดังรูปที่ 6.12



รูป 6.12 การเรียงกระแสของอัลเทอร์เนเตอร์ขั้นที่ 2

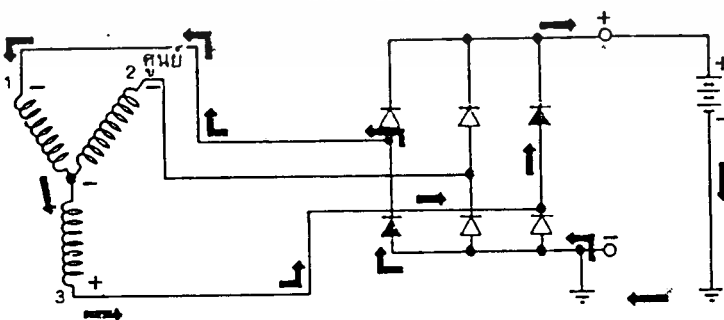
การทำงานในช่วงที่ 3 ขดลวดตัวนำเฟสที่ 3 ของสเตเตอร์จะมีค่าของกระแสไฟฟ้าเป็น 0 ของขดลวดตัวนำเฟสที่ 2 ของสเตเตอร์จะมีค่าของกระแสไฟฟ้าเป็นคลื่นบวก และขดลวดตัวนำเฟสที่ 1 ของสเตเตอร์ก็จะมีค่ากระแสไฟฟ้าเป็นลบ กระแสไฟฟ้าจากจุดต่อรวม N ของขดลวดสเตเตอร์เฟสที่ 2 ของสเตเตอร์ผ่านไดโอดบวก ไปยังขั้วบวกหรือขั้ว B ของอัลเทอร์เนเตอร์เข้าประจุแบตเตอรี่หรือภาระ จากนั้นก็จะไหลลงดินครบวงจรที่ขั้วลบของแบตเตอรี่และที่โครงของ

อัลเทอร์เนเตอร์ และกระแสไฟฟ้าคลื่นลบก็จะไหลผ่านไดโอดกลับไปยังขดลวดตัวนำเฟสที่ 1 ของสเตเตอร์ครบวงจรดังรูปที่ 6.13



รูป 6.13 การเรียงกระแสของอัลเทอร์เนเตอร์ขั้นที่ 3

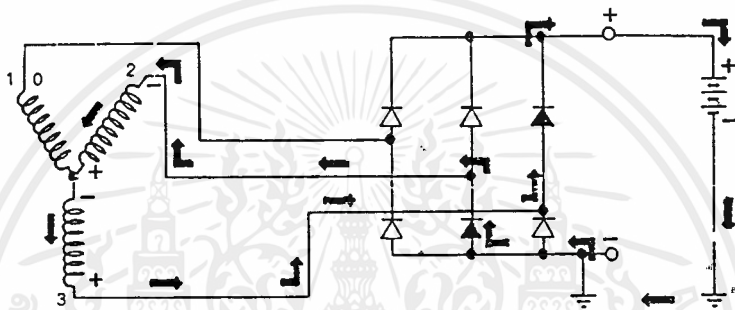
การทำงานในช่วงที่ 4 ขดลวดตัวนำเฟสที่ 2 ของสเตเตอร์จะมีค่ากระแสไฟฟ้าเป็น 0 ขดลวดตัวนำเฟสที่ 3 ของสเตเตอร์จะมีค่ากระแสไฟฟ้าคลื่นบวก และขดลวดตัวนำเฟสที่ 1 ของสเตเตอร์จะมีค่ากระแสไฟฟ้าเป็นคลื่นลบ กระแสไฟฟ้าจะไหลจากจุดต่อร่วม N ของขดลวดตัวนำเฟสที่ 3 ผ่านไปยังไดโอดบวกและไหลผ่านขั้วบวกหรือขั้ว B เข้าประจุแบตเตอรี่หรือภาระ กระแสไฟฟ้าจะไหลลงดินครบวงจรที่ขั้วลบของแบตเตอรี่และตัวเครื่องเรือนของอัลเทอร์เนเตอร์ กระแสไฟฟ้าคลื่นลบจะไหลจากดินผ่านไดโอดกลับไปยังจุดต่อร่วม N โดยผ่านไปยังขดลวดตัวนำเฟสที่ 1 ของสเตเตอร์ที่มีค่ากระแสไฟฟ้าเป็นลบครบวงจรดังรูปที่ 6.14



รูป 6.14 การเรียงกระแสของอัลเทอร์เนเตอร์ขั้นที่ 4

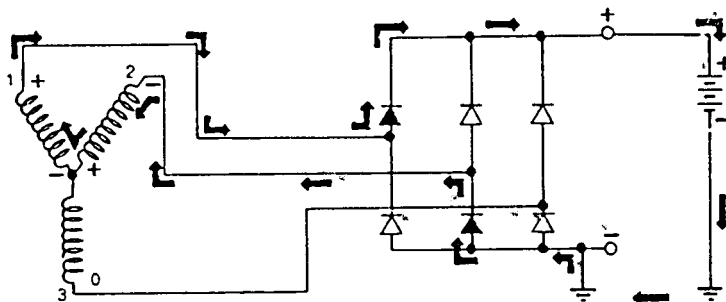
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานในช่วงที่ 5 ขดลวดตัวนำเฟสที่ 1 ของสเตเตอร์จะมีค่ากระแสไฟฟ้าเป็น 0 ขดลวดตัวนำเฟสที่ 3 จะมีค่ากระแสไฟฟ้าเป็นบวก ขดลวดตัวนำเฟสที่ 2 จะมีค่ากระแสไฟฟ้าเป็นลบ กระแสไฟฟ้าจะไหลจากจุดต่อรวม N ของขดลวดตัวนำเฟสที่ 3 ของสเตเตอร์ผ่าน ไบยังไดโอดบวก ไหลผ่านขั้วบวกหรือขั้ว N ของอัลเทอร์เนเตอร์เข้าประจุแบตเตอรี่หรือภาระลงดิน และกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านไดโอดลบผ่านขดลวดตัวนำเฟสที่ 2 ของสเตเตอร์ไปยังจุดต่อรวม N ครบวงจรดังรูปที่ 6.15



รูป 6.15 การเรียงกระแสของอัลเทอร์เนเตอร์ขั้นที่ 5

การทำงานในช่วงที่ 6 ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการแปลงกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสไฟฟ้าตรงโดยไดโอด 6 ตัวขดลวดตัวนำเฟสที่ 3 ของสเตเตอร์จะมีค่ากระแสไฟฟ้าเป็น 0 ขดลวดตัวนำเฟสที่ 1 จะมีค่ากระแสไฟฟ้าเป็นบวก กระแสไฟฟ้าจะไหลจากจุดต่อรวม N ของขดลวดตัวนำเฟสที่ 1 ของสเตเตอร์ไหลผ่านไดโอดบวกไปยังขั้วบวกหรือขั้ว B ของอัลเทอร์เนเตอร์กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านไปยังแบตเตอรี่หรือภาระลงดินครบวงจร และกระแสไฟฟ้าที่ล้นลงจะไหลผ่านไดโอดลบไปยังขดลวดตัวนำเฟสที่ 2 ของอัลเทอร์เนเตอร์และไปสิ้นสุดที่จุดต่อรวม N ดังรูปที่ 6.16



รูป 6.16 การเรียงกระแสของอัลเทอร์เนเตอร์ขั้นที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากขั้นตอนการแปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสไฟฟ้าตรงทั้ง 6 ขั้นตอนของไดโอดบวกและไดโอดลบแสดงให้เห็นถึงการทำงานของขดลวดตัวนำสเตเตอร์และไดโอด ซึ่งเป็นการแปลงกระแสไฟฟ้าแบบฟูลเวฟ ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ออกจากอัลเทอร์เนเตอร์มีความราบเรียบมาก กระแสไฟฟ้าจึงเพียงพอกับการใช้งานในรถยนต์

### 6.1.5 โครงสร้างของอัลเทอร์เนเตอร์

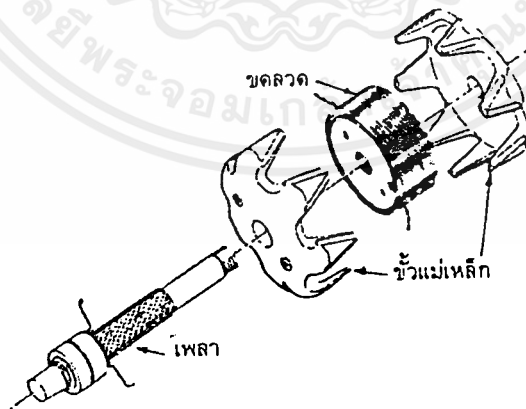
อัลเทอร์เนเตอร์จะประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญคือ

#### 1. ขดลวดโรเตอร์

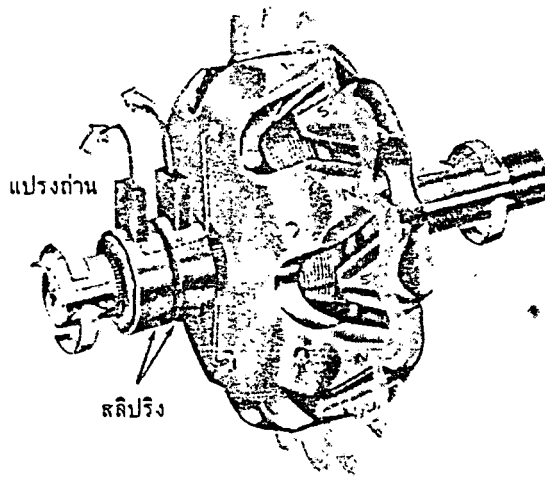
ขดลวดโรเตอร์ (Rotor) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการสร้างสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีส่วนประกอบอยู่ด้วยกัน 3 ส่วนคือ

1. ขดลวดไฟฟ้า ซึ่งจะพันสวมอยู่ในแกนเพลลาโรเตอร์ ขดลวดนี้จะได้รับกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ทำให้อ่อนเป็นแม่เหล็ก
2. ขั้วแม่เหล็ก ขั้วเหนือและขั้วใต้จะทำด้วยเหล็กอ่อนซึ่งทำเป็นก้านจำนวน 6 ถึง 8 ก้าน จำนวน 2 ส่วนประกอบขดลวดเข้าด้วยกัน โดยปลายสายของขดลวดทั้งสองจะต่อเข้าที่วงแหวนสลลปริง
3. วงแหวนสลลปริง จะทำหน้าที่รับกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ โดยการส่งผ่านทางแปรงถ่านเพื่อให้เหล็กอ่อน 6 ถึง 8 คู่เกิดเป็นสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 6.17 และรูปที่ 6.18 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของขดลวดโรเตอร์



รูป 6.17 แสดงชิ้นส่วนประกอบของโรเตอร์



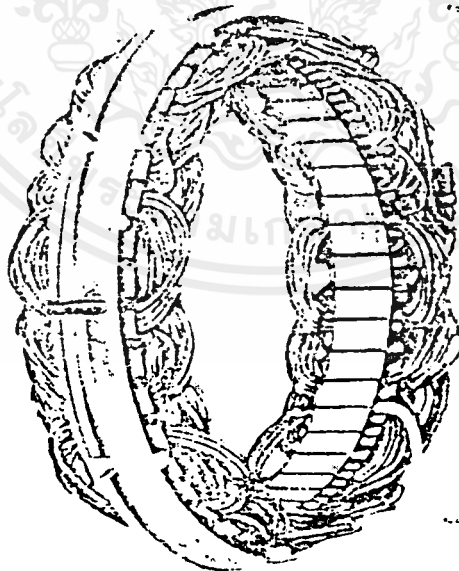
รูป 6.18 แสดงแปรงถ่านที่ต่อกับวงแหวนสลีปรัง

## 2. ขดลวดสเตเตอร์

ขดลวดสเตเตอร์ ( Stator ) มีหน้าที่ในการผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาโดยเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กของขดโรเตอร์ การที่ผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้มากนั้นจะต้องประกอบด้วย

1. ความเร็วรอบของขดลวดโรเตอร์ที่หมุนตัดขดลวดสเตเตอร์
2. ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ขดลวดโรเตอร์
3. จำนวนรอบและขนาดของขดลวดที่พันอยู่ในสเตเตอร์

สเตเตอร์จะประกอบด้วย โครงเหล็กอ่อนและขดลวดตัวนำจำนวน 3 ขด ดังรูปที่ 6.19

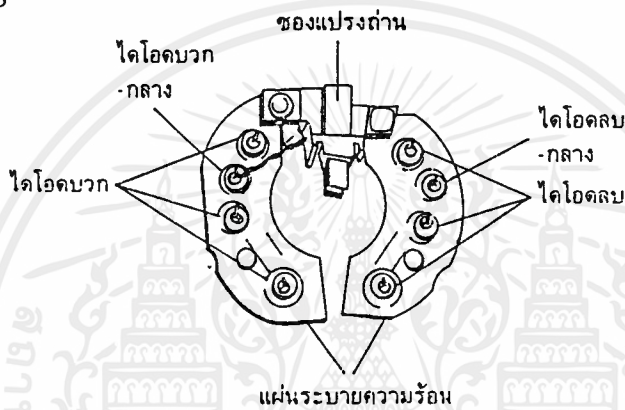


รูป 6.19 โครงเหล็กอ่อนและขดลวดตัวนำของสเตเตอร์



### 3. ไดโอด

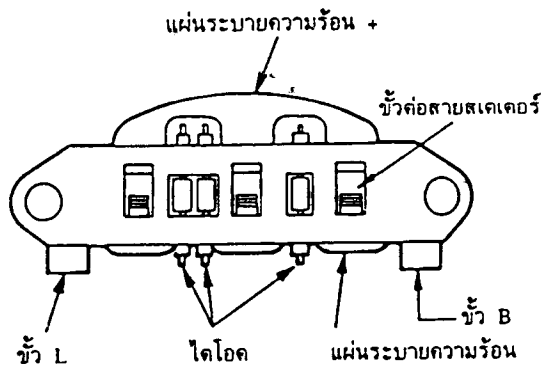
ไดโอด ( Diode ) คืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้แปลงกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสไฟฟ้าตรง ชุดไดโอดบวกจะมี 3 ตัวและชุดไดโอดลบก็จะมี 3 ตัวเช่นกัน แต่อัลเทอร์เนเตอร์บางแบบก็มีไดโอดบวก 4 ตัวและไดโอดลบ 4 ตัว กระแสไฟฟ้าจะได้จากทางไดโอดบวกเพราะฉะนั้นชุดไดโอดบวกจะต้องไม่ถูกกับโครงของอัลเทอร์เนเตอร์ขณะที่ไดโอดทำงานจะเกิดความร้อน โครงของไดโอดจะได้รับการระบายความร้อนเพื่อป้องกันไม่ให้ไดโอดเกิดความร้อนสูงเกินไปจนไดโอดเสีย ชุดไดโอดจะมีการออกแบบมาใช้งานด้วยกันหลายแบบแต่จุดประสงค์ในการใช้งานก็เหมือนกันดังรูปที่ 6.20 ถึงรูปที่ 6.23



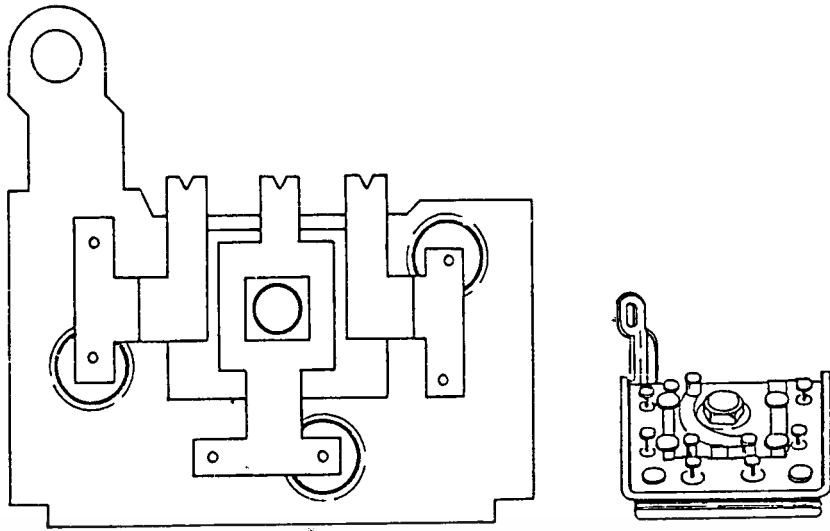
รูป 6.20 ชุด ไดโอดบวกและลบแบบแยก



รูป 6.21 ชุด ไดโอดบวกและลบแบบรวม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูป 6.22 ชุด ไดโอดบวกและลบแบบรวม ( มิตซูบิชิ ) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

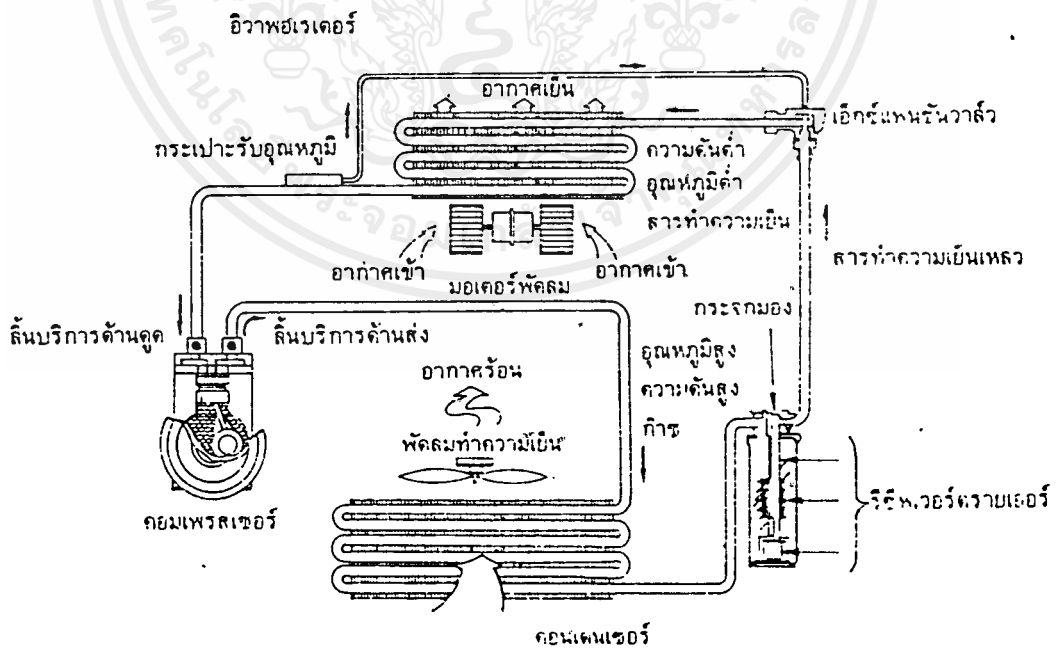


รูป 6.23 ชุดไดโอดบวกและลบแบบรวม ( ฮิตาชิ )

## 6.2 ระบบการทำความเย็นภายในรถ

หลักพื้นฐานในการทำงานของวัฏจักรการทำความเย็น

หลักพื้นฐานการทำงานของวัฏจักรการทำความเย็นมีระบบหลักที่แน่นอน แต่อาจจะเพิ่มขยายส่วนประกอบเพื่อความเหมาะสมและเพื่อประสิทธิภาพ จนดูเหมือนว่าจะแตกต่างกันบ้าง แต่ที่จริงแล้ววัฏจักรการทำความเย็นคือ การถ่ายเทรับเอาความร้อนจากสถานที่ที่ต้องการการกำจัดความร้อนนั้นเพื่อให้อุณหภูมิของสถานที่นั้นอยู่ในระดับที่ต้องการ และความร้อนทั้งหมดไปถ่ายเททิ้งภายนอก ดังรูปที่ 6.24



รูป 6.24 วัฏจักรการทำความเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

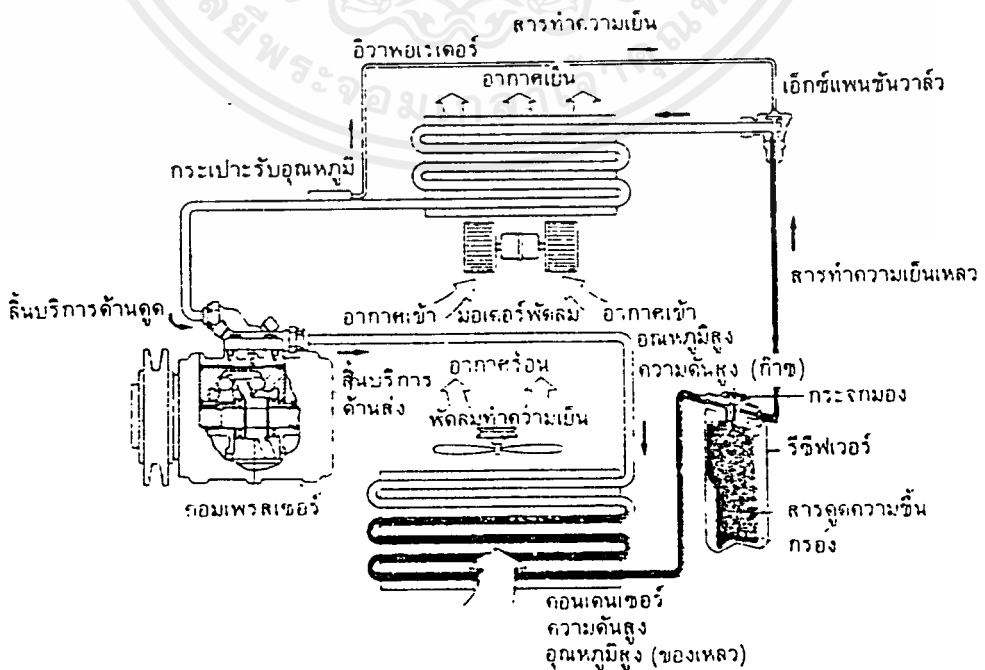
วัฏจักรการทำความเย็นในเครื่องปรับอากาศรถยนต์ เป็นระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ ( Vapor Compression System ) ซึ่งวัฏจักรการทำงานทวนเข็มนาฬิกา โดยที่คอมเพรสเซอร์ ( Compressor ) จะทำงานโดยดูดสารทำความเย็น ( Refrigerant ) เข้าทางด้านดูด ( Suction ) และคอมเพรสเซอร์จะอัดสารทำความเย็นให้มีความร้อนสูง และความดันสูงออกทางด้านออกไปที่คอนเดนเซอร์ ( Condenser ) เพื่อระบายความร้อนออก สารทำความเย็นจะกลายเป็นของเหลวที่มีความดันสูง แต่ยังไม่ร้อนอยู่ไหลไปยังรีซีฟเวอร์ดรายเออร์ ( Receiver/Dryer ) เพื่อกรองความชื้นและสิ่งสกปรกในระบบทำความร้อนจากนั้นสารทำความเย็นเหลวจะไหลไปยังเอ็กซ์แพนชันวาล์ว ( Expansion Valuv ) แล้วฉีดเป็นฝอยละเอียดลงเข้าไปในคอมเพรสเซอร์เริ่มต้นการทำงานเป็นวัฏจักรเหมือนเดิมต่อไป

สารทำความเย็นที่ฉีดเป็นฝอยละเอียดลงจะดูดความร้อนจากภายในห้องเพื่อให้ตัวมันเองกลายเป็นไอเหลือก๊าซที่ความร้อนเพิ่มขึ้น จากการดูดความร้อนแฝงให้กลายเป็นไอนี้จะทำให้อุณหภูมิภายในห้องรอบ ๆ ลดลง หลังจากนั้นสารทำความเย็นที่กลายเป็นไอนี้ก็จะถูกดูดจากอีวาพอเรเตอร์ เข้าไปในคอมเพรสเซอร์เริ่มต้นการทำงานเป็นวัฏจักรเหมือนเดิมต่อไป

จากระบบการทำงานของเครื่องปรับอากาศรถยนต์ สามารถแบ่งระบบการทำงานออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

**ด้านความดันสูง**

ในรูปที่ 6.25 แสดงที่ระบบการทำงานของเครื่องปรับอากาศรถยนต์ จากวัฏจักรการทำความเย็น สารทำความเย็นจะไหลผ่านอุปกรณ์ความดันสูงในระบบทำความเย็นดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูป 6.25 วัฏจักรการทำความเย็นด้านความดันสูง**  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

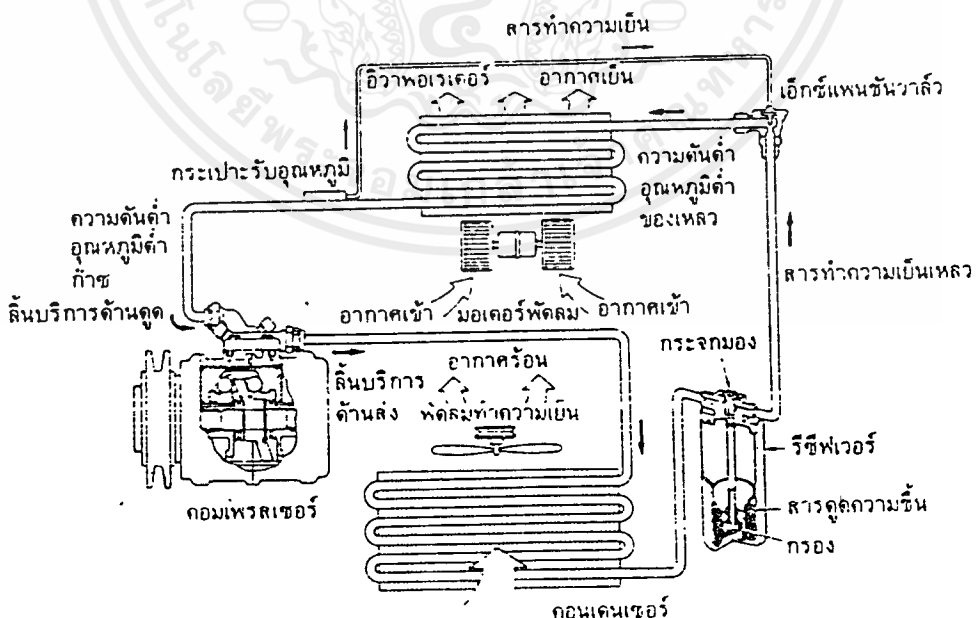
1. อัดสารทำความเย็นเป็นไอ สารทำความเย็นที่เป็นก๊าซหรือไอ สภาพความดันต่ำจะถูกคอมเพรสเซอร์ดูดเข้ามาทางด้านดูด

สารทำความเย็นที่เป็นก๊าซจะถูกคอมเพรสเซอร์อัดให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 70 องศาเซลเซียส ( 158 องศาฟาเรนไฮต์ ) และมีความดันสูงขึ้นประมาณ 15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ( 213 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, 1471 กิโลปาสคาล ) ก๊าซที่ถูกอัดนี้จะส่งออกไปยังคอมเดนเซอร์

2. การระบายความร้อน สารทำความเย็นที่เป็นก๊าซที่มีความร้อนและความดันสูง เมื่อถูกอัดก็จะไหลเข้ามาที่คอนเดนเซอร์จะถูกทำให้เย็นลง หรือถูกระบายความร้อนออกที่คอนเดนเซอร์ ขณะนี้ความร้อนแฝงของการควบแน่นจะถูกดึงออกมา โดยอากาศระบายความร้อนผ่านครีบกอนเดนเซอร์ทำให้ก๊าซกลายเป็นของเหลว และมีอุณหภูมิที่จุดนี้ประมาณ 62 องศาเซลเซียส ( 114 องศาฟาเรนไฮต์ )

3. กรองความชื้นและสิ่งสกปรกออก สารทำความเย็นที่เป็นของเหลวไหลเข้าไปในรีซีฟเวอร์ดรายเออร์ ซึ่งจะดูดกรองความชื้นและสิ่งสกปรกออกแล้วจะไหลต่อไปยังเอ็กซ์แพนชันวาล์ว

ด้านความดันต่ำ จากรูปที่ 6.26 แสดงสารทำความเย็นที่ไหลผ่านด้านความดันต่ำ



รูป 6.26 วัฏจักรการทำความเย็นด้านความดันต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารทำความเย็นที่เป็นของเหลวแรงดันสูงจะไหลเข้าไปในเอกซ์เพนชันวาล์วและฉีดออกมาเป็นฝอยละเอียดเข้าไปในอีวาพอเรเตอร์ จะทำให้เกิดการขยายตัวทันทีทันใดซึ่งจะเปลี่ยนเป็นของเหลวที่มีความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำ จากนั้นก็จะระเหยกลายเป็นไอดูดกลืนเอาความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอจากอากาศบริเวณรอบ ๆ โดยฝ่ายครีบของอีวาพอเรเตอร์ คังนั้นจะทำให้อากาศที่ไหลหมุนเวียนผ่านเข้าไปในอีวาพอเรเตอร์เย็นลงด้วย เป็นการทำความเย็นให้กับรถยนต์ หลังจากนั้นสารทำความเย็นจะเปลี่ยนสถานะเป็นไอหรือก๊าซที่มีอุณหภูมิต่ำและความดันต่ำ ก๊าซนี้ก็จะถูกคอมเพรสเซอร์ดูดไปทำงานตามวัฏจักรการทำความเย็นต่อไป

สารทำความเย็นที่ทางออกของอีวาพอเรเตอร์ มีอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียส ( 37 องศาฟาเรนไฮต์ ) และมีความดัน 2.1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ( 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, 206 กิโลปาสกาล )



## บทที่ 7

### วงจรควบคุมความเร็ว

#### Step down (Buck) Converter

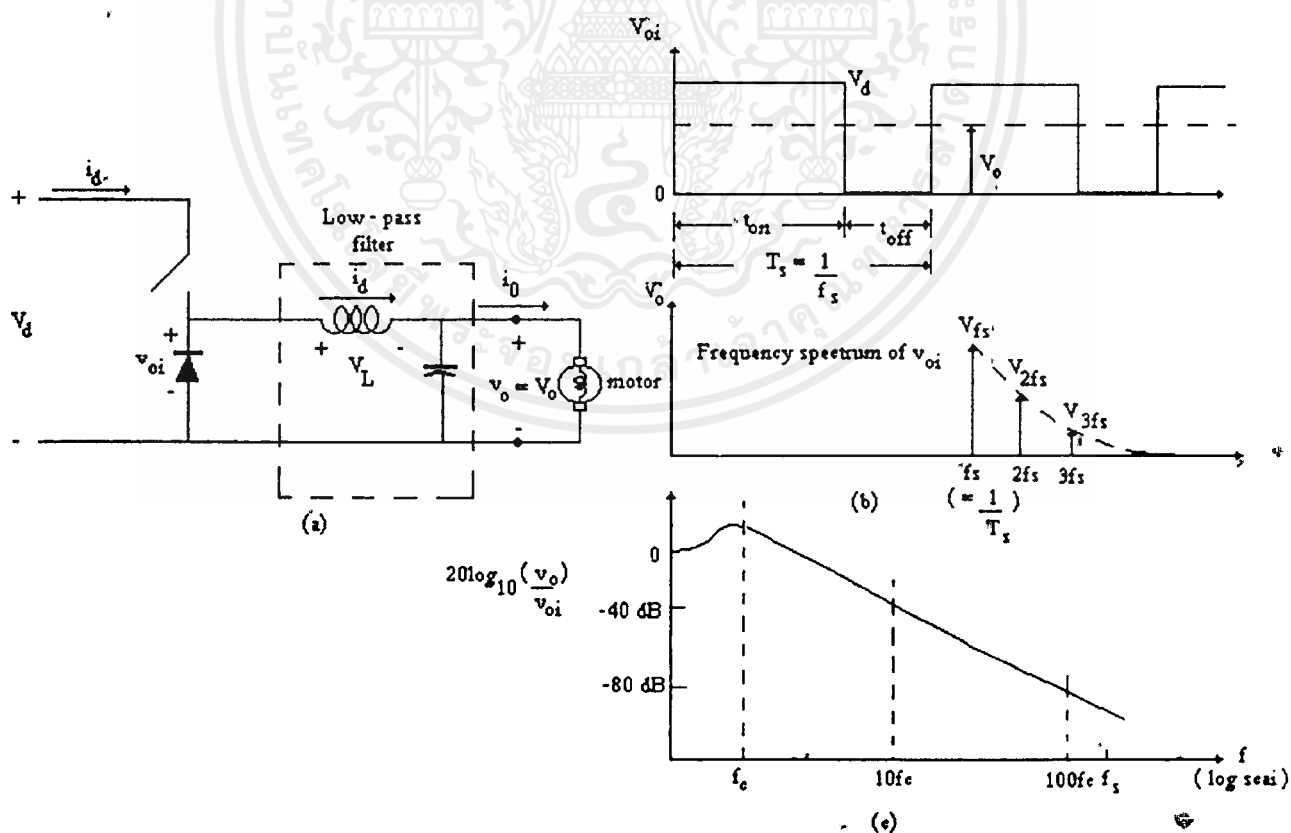
##### 7.1 วงจรเบื้องต้นของ step down (buck) converter

stepdown chopper จะให้ average output ที่ต่ำกว่า dc output voltage  $V_d$  การประยุกต์ใช้หลัก ๆ ก็คือ ใช้ในการ regulate dc power supply และใช้ในการควบคุมความเร็วของ motor

ตามรูปที่ 7.1 จะเป็น step down chopper กับ load motor ค่า Output voltage ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับ การสับสวิตช์ เราสามารถคำนวณ Output voltage เฉลี่ยในรูปของ switch duty ratio ดังนี้

$$\begin{aligned} V_o &= (1/T_s) \cdot \int V_o(t) dt = (1/T_s) \cdot (\int V_d dt + \int 0 dt) \\ &= (t_{on}/T_s) \cdot V_s = D \cdot V_s \end{aligned}$$

โดยที่  $D = \text{Duty ratio}$



รูปที่ 7.1 แสดงวงจร step down และ ค่า output voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7.2 เทคนิคในการควบคุม Chopper มี 2 วิธี

1. **Time Ratio Control ( TRC )** วิธี TRC รู้จักในชื่อของ Pluse width modulation control ซึ่งเทคนิคการควบคุมแบบ TRC ยังแบ่งได้เป็น 2 ชนิดย่อย ๆ คือ

ก ) Constant frequency TRC : คาบการทำงาน  $T_s$  คงที่ แต่จะปรับช่วง on ของ switch เพื่อควบคุม duty ratio D

ข ) Variable frequency TRC : จะปรับ duty ratio D โดย

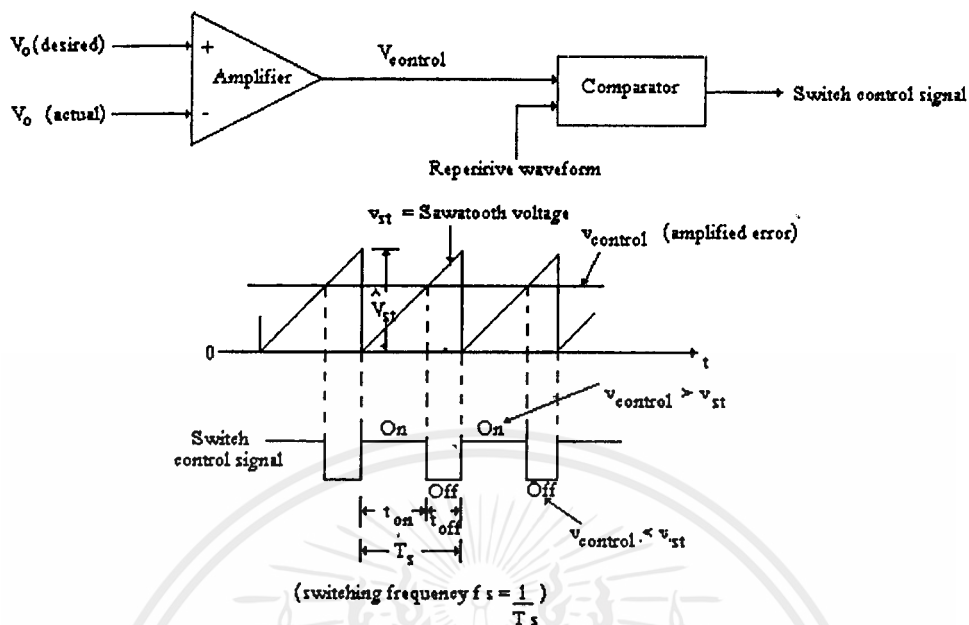
1. ให้  $T_{on}$  คงที่ ปรับ  $T_s$
2. ปรับทั้ง  $T_{on}$  และ  $T_s$

ในการควบคุมแบบ variable frequency โดยให้  $T_{on}$  คงที่ นั้นจะได้ output voltage คงที่ frequency การทำงานของ chopper ใน mode chooper ที่ความถี่ต่ำมาก ๆ จึงไม่ดี นอกจากนั้นการทำงานของ chopper ใน mode variable frequency ยังทำให้ออกแบบ input filter ยากอีกด้วย เพราะฉะนั้น variable frequency control จึงไม่เป็นที่นิยม

2. **Curent Limit Control ( CLC )** วิธี CLC เรียกอีกอย่างว่า point by point control เราจะควบคุม duty ratio โดยควบคุม load current ให้อยู่ระหว่างค่า min กับ max ที่เรากำหนดเมื่อ load current ขึ้นไปถึงค่า max switch จะ off และ on อีกที เมื่อ load current ลงมาสู่ค่า min

## 7.3 เทคนิคการควบคุมแบบ Constant frequency TRC

ในโครงการนี้ใช้การควบคุมแบบ Constant frequency TRC ซึ่งมีหลักการอย่างสังเขปดังนี้



รูปที่ 7.2 แสดงการทำงานแบบ Pulse width control

จากรูปที่ 7.2 ในการทำงานแบบ Pulse width control นั้น สัญญาณการควบคุม switch ซึ่งจะควบคุมการ on , off นั้น ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุม  $V_{control}$  กับ waveform รูปฟันเลื่อย\* ซึ่ง  $V_{control}$  ได้จากการขยายค่าแตกต่างระหว่าง  $V_o$  ( actual ) กับ  $V_o$  (ที่ต้องการ ) ความถี่ของคลื่นรูปฟันเลื่อยจะเป็นตัวกำหนดความถี่ของการ switching ซึ่งในการควบคุมแบบ Pulse width ความถี่การ switching จะคงที่ และมักมีค่าตั้งแต่ 1 KHz ถึง 100 KHz ความสัมพันธ์ในการทำงานคือ

เมื่อ  $V_{control} > V_{st}$  switch control signal จะ high ทำให้ switch on

เมื่อ  $V_{control} < V_{st}$  switch control signal จะ low ทำให้ switch off

ซึ่งเราจะได้ duty ratio ดังนี้

$$D = (t_{on} / T_s) = (V_{control} / V_{ts})$$

โดยที่  $V_{ts}$  = peak value ของคลื่นฟันเลื่อย

ฉะนั้นจะเห็นได้ว่าการปรับค่า  $T_{on} / T_s$  ก็สามารถควบคุม  $V_o$  ได้ จากรูปที่ 7.1 เราต่อ diode เข้าไปเพื่อให้เป็นทางไหลของ load current ในช่วงที่ switch off และ load current ไหลเองจากพลังงานสะสมใน L ซึ่งเราเรียก diode นี้ว่า freewheel diode ส่วน L และ C นั้นเป็น low pass filter มีประโยชน์คือ ขจัด ripple เนื่องจาก harmonic ลำดับสูง ๆ ออก ซึ่ง  $V_{on}$  ซึ่งเป็น input ของ low pass

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

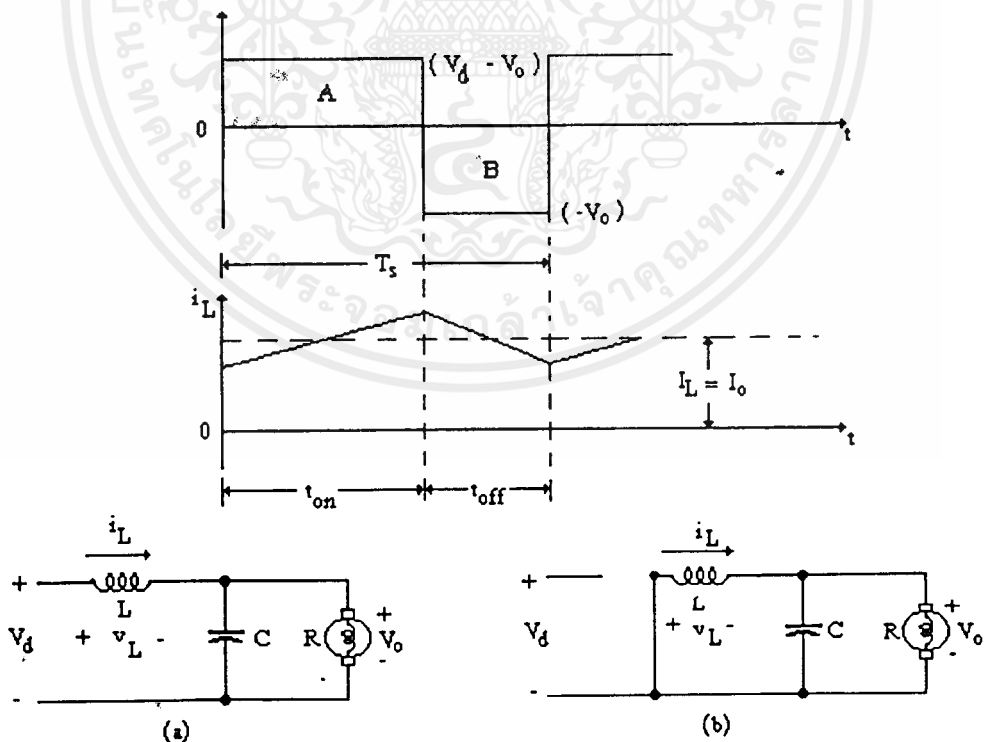


filter ค่า corner frequency  $f_c$  ของ filter จะต้องต่ำกว่า  $f_s$  มาก ๆ เพื่อที่จะกำจัด switch frequency ripple ใน output voltage

ในการวิเคราะห์ทาง steady state ถือว่าตัว C ใน low pass filter มีค่ามากพอที่จะทำให้  $V_o(t) = V_o$  และกระแสเฉลี่ยของ inductor จะเท่ากับ output current เฉลี่ย  $I_o$  โดยที่กระแส capacitor เฉลี่ยในช่วง steady state เป็นศูนย์

#### 7.4 การวิเคราะห์การนำกระแสอย่างต่อเนื่อง

รูปที่ 7.3 แสดงถึง waveform สำหรับกรณีช่วงเวลานาที่ต่อเนื่อง โดยที่ inductor current ไหลต่อเนื่อง ( $i_L(t) > 0$ ) เมื่อ switch on : ในช่วง  $t_{on}$  inductor current จะไหลผ่านสวิตช์ และ diode ได้รับ reverse biased ซึ่งทำให้  $V_L = V_d - V_o$  ซึ่ง  $V_L$  คือ voltage คร่อม inductor รูป 7.3a  $V_L$  นี้จะทำให้เกิดการเพิ่มของกระแส inductor  $i_L$  อย่าง linear เมื่อ switch off :  $i_L$  ยังคงไหลต่อเนื่องจากพลังงานสะสมใน L คราวนี้กระแสจะไหลผ่าน diode และขณะนี้  $V_L = -V_o$  ในรูป 7.3b



รูปที่ 7.3 แสดงการนำกระแสต่อเนื่องของวงจร

เนื่องจาก voltage เฉลี่ยคร่อม L ในช่วงคาบเวลาทำงานเป็นศูนย์ เพราะฉะนั้น

$$\int V_L dt = \int V_L dt + \int V_L dt = 0$$

จากรูปที่ 5 สมการข้างบนอธิบายว่า พ.ท.  $A = B$  เพราะฉะนั้น

$$(V_d - V_o) T_{on} = V_o (T_s - T_{on})$$

หรือเขียนอีกรูป

$$V_o / V_d = t_{on} / T_s = D = \text{duty ratio} \quad 7.1$$

ดังนั้น ใน mode การทำงานอย่างต่อเนื่อง output voltage จะแปรอย่าง linear ตาม duty ratio

เราสามารถ derive ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 7.1 ได้อีกแบบโดยเฉลี่ยค่า  $V_{on}$  ในรูป 7.1b และใช้หลักว่า voltage เฉลี่ยคร่อม inductor ในสภาวะ steady state เป็นศูนย์

$$(V_d \cdot T_{on} + 0 \cdot t_{off}) / T_s = V_o$$

หรือ

$$V_o / V_d = t_{on} / T_s = D$$

โดยที่ไม่คิด power loss ใดๆ ที่เกี่ยวกับวงจร Input power  $P_d$  จะเท่ากับ Output power  $P_o$

$$P_d = P_o$$

ดังนั้น

$$V_d I_d = V_o I_o$$

$$I_o / I_d = V_d / V_o = D \quad 7.2$$

ดังนั้น ใน mode การทำงานต่อเนื่องนี้ Step down converter จะทำงาน เหมือน DC transformer โดยที่สามารถควบคุม turn ratio ได้ในย่าน 0 ถึง 1 โดยการควบคุม duty ratio ของ switch

เรายังพบอีกว่าถึงแม้ input current เฉลี่ย  $I_d$  จะเป็นไปตามความสัมพันธ์ของ transformer แต่ waveform ของ input current จะกระโดดจากค่า peak ลงสู่ศูนย์ ทุกครั้งที่ switch off ดังนั้นการใส่ filter ที่เหมาะสมทางด้าน input จะช่วยกำจัดผลจาก current harmonic

## 7.5 ขอบเขตระหว่างการนำแบบต่อเนื่องกับไม่ต่อเนื่อง

ในส่วนนี้ เราจะหาสมการเพื่อแสดงถึงความเกี่ยวข้องกันของ parameter ต่าง ๆ ใน mode

การนำของ inductor current ( ต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่อง ) รูปที่ 7.4 แสดงถึง waveform  $V_L ; i_L$  ของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

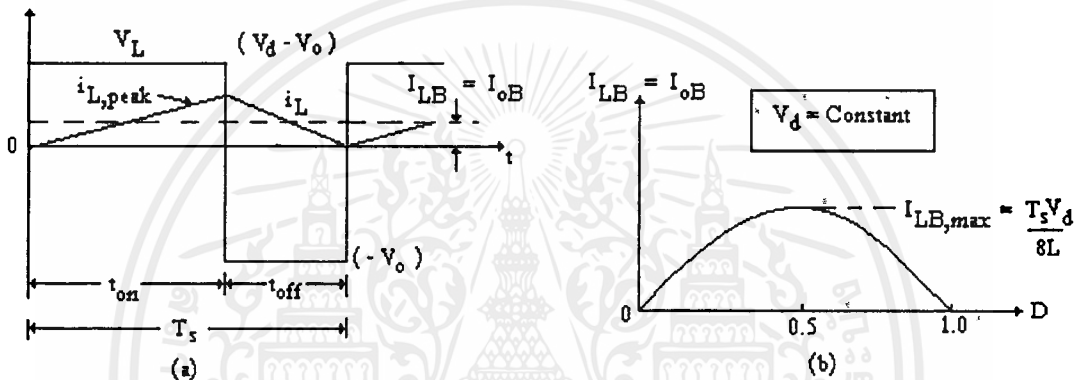
การทำงานที่ขอบของการนำกระแสต่อเนื่องกับไม่ต่อเนื่องขอบเขตระหว่าง mode ต่อเนื่องกับไม่ต่อเนื่อง คือ  $i_L$  จะเป็น 0 ที่จุดจบของ off period

ที่ขอบเขตนี้ ถ้าเราให้ subscript B แทนขอบเขต ค่า inductor current เฉลี่ยคือ

$$I_{LB} = 1/2 i_{L,peak} = (t_{on}/2L)(V_d - V_o) = DT_s/2(V_d - V_o) = I_{OB} \quad 7.3$$

ดังนั้น ถ้า output current เฉลี่ย ( หรือ inductor current เฉลี่ย ) มีค่าน้อยกว่า  $I_{OB}$  ตามสมการ

ที่ 7.3  $i_L$  จะไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 7.4 แสดงค่า-output current เฉลี่ย

7.6 การคำนวณ output current และ voltage เปรียบเทียบกันระหว่าง mode การนำกระแสต่อเนื่องกับไม่ต่อเนื่อง

#### 7.6.1 mode กระแสต่อเนื่อง

จาก  $V_o = DV_d$  ค่า inductor current เฉลี่ย ตามสมการที่ 7.3 คือ

$$I_{LB} = T_s V_d / 2L \cdot D(1 - D) \quad 7.4$$

โดยใช้สมการนี้ เราพบว่า รูปที่ 7.4b แสดงถึงการ plot  $I_{LB}$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ  $D$  โดยให้  $V_d$  และ parameter อื่นคงที่ จะเห็นว่า output current ที่ต้องการสำหรับ mode การนำต่อเนื่องจะถึงค่าสูงสุดที่  $D = 0.5$

$$I_{BL,Max} = T_s V_d / 8L \quad 7.5$$

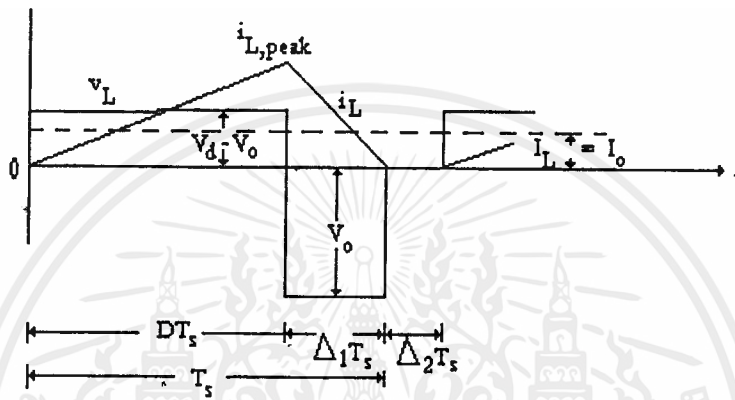
จากสมการที่ 7.4 และ 7.5

$$I_{LB} = 4 I_{BL,max} \cdot D(1 - D) \quad 7.6$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 7.6.2 mode กระแสไม่ต่อเนื่อง

เราจะหา  $V_0/V_d$  ใน mode ไม่ต่อเนื่องดังรูป 7.4a โดยกำหนดค่า  $T_s$ ,  $L$ ,  $V_d$  และ  $D$  ค่าหนึ่ง ถ้า parameter ต่าง ๆ ถูกกำหนดให้คงที่ และ output load power ลดลง ( โดย load resistance เพิ่มขึ้น ) ดังนั้น inductor current เหลือจะลดลง ดังในรูปที่ 7.5 จะทำให้  $V_0$  เพิ่มขึ้นและเป็นผลให้ inductor current ไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 7.5 แสดงการนำกระแสไม่ต่อเนื่องของวงจร

ในระหว่างช่วง  $\Delta_2 T_s$  ซึ่ง inductor current เป็นศูนย์ power ที่จ่ายให้ load motor ถูกจ่ายโดย filter capacitor  $C$  เพียงอย่างเดียว ค่า inductor voltage  $V_L$  ระหว่างช่วงนี้จะเป็นศูนย์

$$(V_d - V_0)DT_s + (-V_0)\Delta_1 T_s = 0 \quad 7.7$$

$$V_0/V_d = D/(D + \Delta_1) \quad 7.8$$

โดยที่  $D + \Delta_1 < 1$

$$\text{จากสมการ 5} \quad i_{L,peak} = V_0 \Delta_L T_s \quad 7.9$$

$$I_o = I_{L,peak} \cdot (D + \Delta_1)/2 \quad 7.10$$

$$= V_0 T_s / 2L \cdot (D + \Delta_1) \Delta_1 \quad 7.11$$

$$= V_d T_s / 2L \cdot D \Delta_L \quad (\text{โดยใช้สมการ 7.8}) \quad 7.12$$

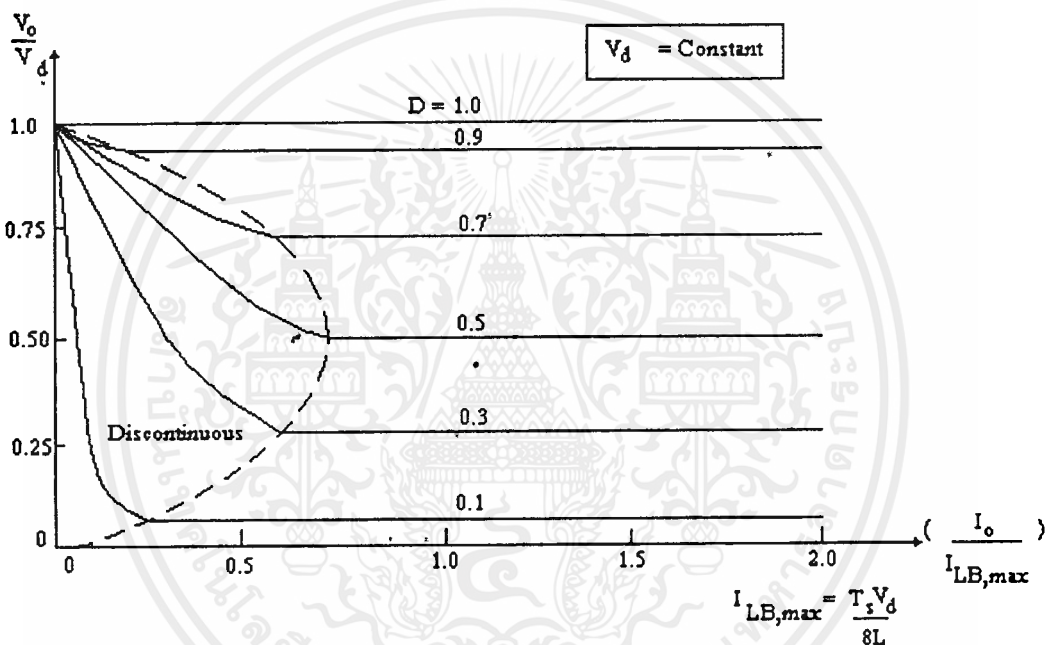
$$= 4I_{LB,max} D \Delta_1 \quad (\text{โดยใช้สมการ 7.5}) \quad 7.13$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } \Delta_L = I_0 / (4I_{LB,max} D) \quad 7.14$$

จากสมการ 7.8 และ 7.14

$$V_0 / V_d = D^2 / [D^2 + 1/4(I_0 / I_{LS,max})] \quad 7.15$$

รูปที่ 7.6 แสดงคุณลักษณะของ Step down chopper ทั้ง 2 mode โดยที่  $V_d$  คงที่ ค่า  $(V_0 / V_d)$  ถูก plot เป็น function ของ  $I_0 / I_{LB,max}$  โดย plot ที่ค่า  $D$  หลายค่าโดยใช้สมการ 7.1 และ 7.15 ขอบเขตระหว่าง mode ต่อเนื่องกับไม่ต่อเนื่อง แสดงโดย curve เส้นประซึ่งลากสัมพันธ์การ 7.1 และ 7.6



รูปที่ 7.6 แสดงคุณลักษณะของ Step down chopper ทั้ง 2 mode

### 7.7 ระบบเดินหน้า - ถอยหลังของรถไฟฟ้

ระบบเดินหน้า-ถอยหลัง นับว่าเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งของรถไฟฟ้ เพราะการเคลื่อนที่ที่สมบูรณ์นั้น ต้องเคลื่อนที่ได้ทั้งไปข้างหน้า และถอยหลัง ซึ่งหลักการการทำงานทำได้โดยการกลับขั้วอาเมเจอร์ของมอเตอร์เท่านั้น มอเตอร์ก็จะกลับทิศการหมุนทันที เนื่องจากกระแสไหลผ่านขดอาเมเจอร์มีค่าสูง ฉะนั้นสวิทช์ที่ใช้ในการตัดต่อขั้วอาเมเจอร์ จึงต้องทนกระแสได้สูงซึ่งเป็นการยากที่จะหา สวิทช์ที่ทนกระแสได้สูงเช่นนี้ จึงได้ดัดแปลงเอาแมกนิติกคอนแทกเตอร์ มาใช้แทน โดยจะควบคุมผ่านสวิทช์ตัวเล็กอีกทีหนึ่ง

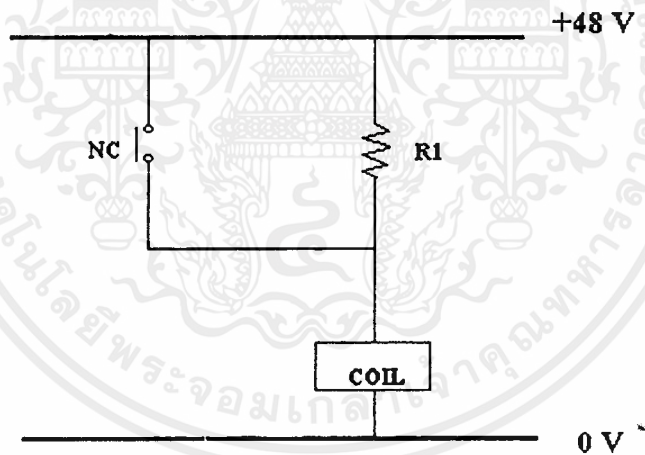
ปกติแล้วแมกนิติกคอนแทกเตอร์จะควบคุมกระแสที่ผ่านคอยล์ โดยใช้ไฟสลับแต่ในที่นี้เราจะนำมาใช้กับไฟตรง 48 V เพื่อให้เหมาะสมกับแหล่งจ่ายไฟที่ได้จากแบตเตอรี่ของรถไฟฟ้า ฉะนั้นจึงต้องมีการตัดแปลงแมกนิติกคอนแทกเตอร์เพื่อให้ได้ลักษณะตามต้องการ

เราจึงได้ ทำการตัดแปลง โดยการเปลี่ยนแปลงขดลวดทองแดงที่ใช้คือ #26 จะทนกระแสได้ประมาณ 800 mA

การคำนวณ

เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านคอยล์ ขณะเปิด และปิดหน้าสัมผัส มีค่าไม่เท่ากัน โดยขณะที่หน้าสัมผัสเปิดอยู่นั้นกระแสที่ไหลผ่านคอยล์ จะต้องมีค่าสูง ๆ เพื่อสร้าง อำนาจแม่เหล็กในการดึงให้หน้าสัมผัสปิดลง และเมื่อหน้าสัมผัสปิดลงแล้ว เราก็ไม่จำเป็นต้องให้กระแสไหลผ่านขดลวดคอยล์มีค่าสูง เพราะเกิดการสูญเสียโดยเปล่าประโยชน์และอาจทำให้ขดลวดไหม้ได้ ถ้าค่ากระแสเกินพิกัดที่ขดลวดจะทนได้ ซึ่งลักษณะของวงจรที่ใช้ควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดคอยล์ แสดงดังรูปที่ 7.7

ค่าความต้านทานของขดลวดคอยล์ ที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 7 โอห์ม



รูปที่ 7.7 แสดงวงจรควบคุมกระแสที่ไหลผ่านคอยล์ของแมกนิติกคอนแทกเตอร์

จากวงจรในรูปที่ 7.7 จะเห็นว่าเราจะใช้คอนแทกช่วย ( Auxiliary contact ) แบบปกติปิด ( normally closed ) เพื่อให้กระแสไหลผ่านคอยล์มีค่าสูงขณะที่แมกนิติกคอนแทกเตอร์เริ่มทำงานเพื่อดึงหน้าสัมผัสให้ปิดลง หลังจากที่คอนแทกช่วยทำงานแล้วค่ากระแสที่ไหลผ่านคอยล์ทั้งหมดจะถูกควบคุมโดย R1

จะได้ค่ากระแสผ่านคอยล์ขณะเริ่มทำงาน =  $48 / 7 = 6.86$  แอมป์

พิจารณาค่า R1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้กระแสไหลผ่านคอยล์หลังจากคอนแทกช่วยทำงานแล้ว มีค่าเท่ากับ 300 mA

$$\text{จะได้} \quad 48 = (R_1 + 7) 300 \cdot 10^{-3}$$

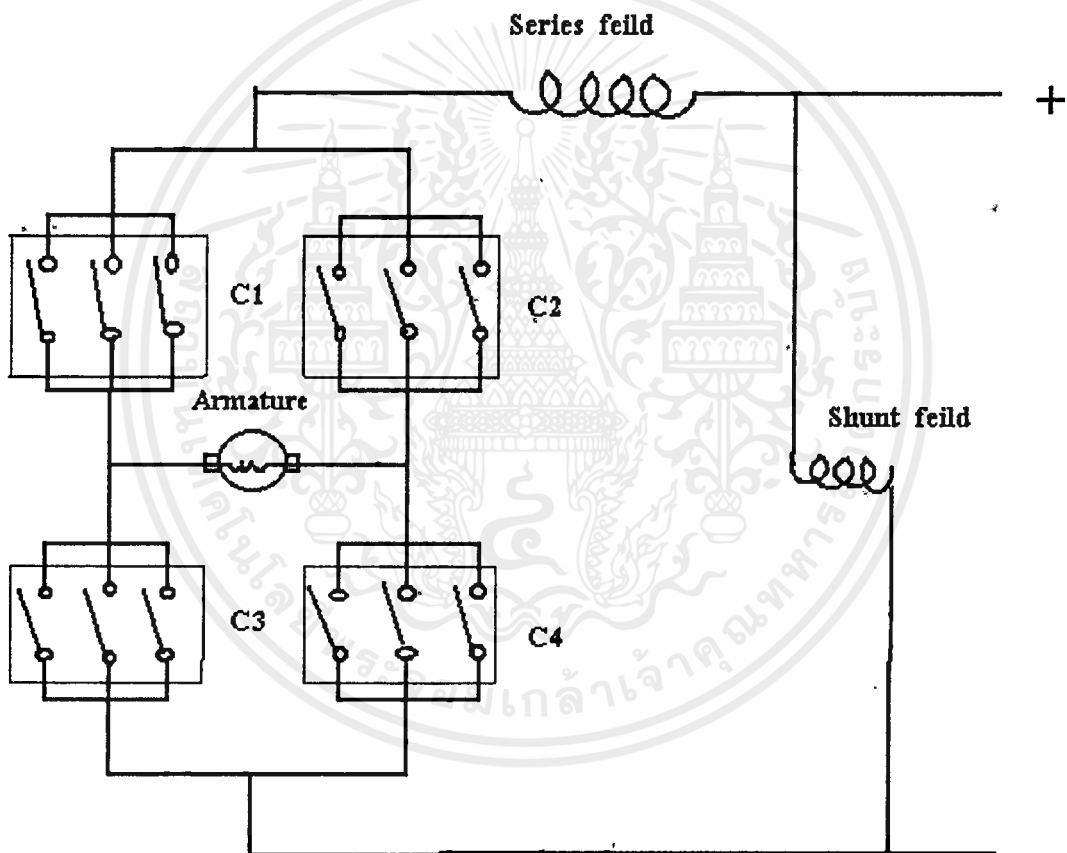
$$R_1 = 153 \text{ โอห์ม}$$

$$\text{watt} = (48 - 7(300 \cdot 10^{-3}))^2 / 153 = 13.77 \text{ วัตต์}$$

เลือกใช้ตัวความต้านทาน 160 โอห์ม 15 วัตต์

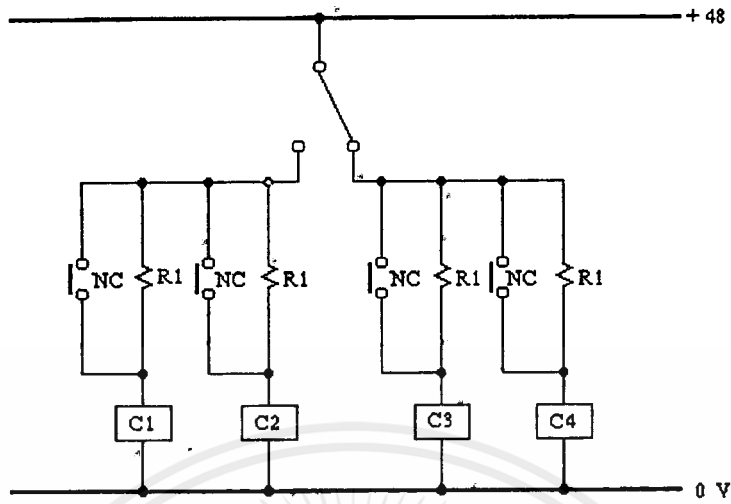
$$\text{จะได้กระแสที่ไหลผ่านคอยล์} = 48 / 160 = 287 \text{ mA}$$

เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านขดลวดอามเมเจอร์มีค่าสูง จึงใช้แมกนีติกคอนแทกเตอร์ 1 ตัว แทนหน้าสัมผัส 1 อัน ซึ่งวงจรการกลับขั้วอามเมเจอร์ แสดงดังรูปที่ 7.8



รูปที่ 7.8 แสดงการต่อแมกนีติก คอนแทกเตอร์ เพื่อกลับขั้วอามเมเจอร์

จากรูปที่ 7.8 จะเห็นว่า การกลับขั้วอามเมเจอร์จะต้องให้แมกนีติก คอนแทกเตอร์ทำงานของ คอนแทกเตอร์ แต่ละอันจะควบคุมผ่านสวิทช์ 3 ทาง ดังแสดงในรูปที่ 7.9



รูปที่ 7.9 แสดงวงจรการกลับขั้วอามเจอร์ โดยใช้สวิทช์ 3 ทาง



## บทที่ 8

### การคำนวณหาพิกัดกำลังและการเลือกชนิดของมอเตอร์

#### 8.1 การคำนวณหาขนาดพิกัดมอเตอร์ของส่วนขับเคลื่อน

จากการพิจารณาขอบเขตการใช้งานของโครงการรถไฟฟ้านี้ ทำให้ได้ข้อมูลนำมาคำนวณหาขนาดพิกัดของมอเตอร์ขับเคลื่อนดังนี้คือ

$$W = \text{น้ำหนักของรถ (kg)} = 650 \text{ kg (น้ำหนักบรรทุก + ตัวรถ)}$$

$$V = \text{อัตราค่าการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว (m/s)}$$

ในที่นี้ คิดที่อัตราเร็ว 60 km/hr (16.6 m/s)

$$\mu = \text{สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน } 0.05$$

$$\eta = \text{ประสิทธิภาพของมอเตอร์ } 80 \%$$

$$P_m = \text{ค่าขนาดกำลังของมอเตอร์}$$

จากสูตรคำนวณหาขนาดของโหลดได้

$$P_m = \frac{\mu W V}{102} \times \frac{100}{\eta} \text{ kw}$$

$$P_m = \frac{0.05 * 650 * 16.6}{102} \times \frac{100}{80} \text{ kw}$$

$$P_m = 6.615 \text{ kw หรือ } 8.86 \text{ hp}$$

คิดระบบส่งกำลังของตัวมอเตอร์กับระบบเพลลาโดยการต่อตรง (Direct Coupling) 95 % เพราะฉะนั้นจะได้ขนาดของกำลังที่โหลดต้องการในอัตราความเร็ว 60 km/hr

$$P = \frac{P_m}{\eta}$$

$$= \frac{8.86}{0.95}$$

$$= 9.3 \text{ hp (ควรเลือกใช้มอเตอร์พิกัดกำลังมากกว่า 9.3 แรงม้า)}$$

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่าแรงม้าที่จะใช้ในการขับโหลดครมมีค่าประมาณ 9.3 แรงม้า ซึ่งถือว่าเหมาะสมหากพิจารณาพร้อมกับน้ำหนักรถ แต่เนื่องจากรถไฟฟ้ามินิหนักเบากว่ารถที่ใช้เครื่องยนต์ และจากการพิจารณาโครงการรถไฟฟ้ายกที่เคยทำมา พบว่ากำลังของมอเตอร์ที่ใช้กันประมาณไม่เกิน 10 แรงม้า

### พิจารณาพิคขนาดกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในโครงการนี้

พิคตัวมอเตอร์

48 โวลต์ 150 แอมป์ 2000 rpm

จากสูตร

$$\begin{aligned} P &= VI \quad \text{Watt} \\ &= 48 \cdot 150 \\ &= 7200 \text{ Watt หรือ } 9.65 \text{ hp} \end{aligned}$$

ซึ่งจะเห็นว่ามอเตอร์ที่เลือกใช้มีพิคมากกว่า 9.3 แรงม้าที่หาได้จากการคำนวณทางด้านโหลด

### 8.2 การเลือกมอเตอร์

จากการศึกษาขนาดพิคของมอเตอร์กระแสตรง ที่จะใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้ามินิ ในหัวข้อ 8.1 ที่ผ่านมามีทำให้ทราบได้ว่าจะต้องใช้มอเตอร์พิคกำลังเท่าไร จึงจะสามารถขับเคลื่อนตัวรถไฟฟ้าได้ และเนื่องจากปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่พิคสูง ๆ ไม่ค่อยนิยมใช้กันมากนักจึงหาซื้อได้ยากและมีราคาแพงมาก ดังนั้นในโครงการนี้ จึงได้จัดหาซื้อโคชารจกระแสตรงมาดัดแปลงให้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และตัวโคชารจที่ซื้อมานั้นไม่ตรงตามพิคที่เราต้องการ เราจึงต้องนำมาพันขด Field ใหม่ และชนิดการต่อของขดฟิวส์ได้ทำการต่อใหม่เพื่อให้ได้พิคและใช้งานได้ตามที่ต้องการ

จากที่ได้ศึกษา ถ้าเปลี่ยนขนาดของขดลวดฟิวส์อนุกรมกับขดลวดอาเมเจอร์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าเดิม ก็จะเป็นการเพิ่มค่าแรงดันสูงขึ้นได้ (แต่เดิมต่อแบบ Shunt field) ซึ่งโคชารจที่หามาได้ยังมีพิคแรงดันไม่สูงพอดังนั้นเราจึงต้องทำการพันขดลวดฟิวส์ใหม่ ให้ได้ค่าแรงดันสูงมากขึ้นเพื่อจะได้พิคกำลังมากขึ้นตามที่เรารต้องการ

### 8.3 การถอดชิ้นส่วนมอเตอร์ (ไคซาร์จ)

เราได้ทำการถอดชิ้นส่วนไคซาร์จออก เพื่อจะศึกษาคุณลักษณะการต่อเชื่อมของขดลวดฟิวส์ว่ามีลักษณะการต่อแบบไหนและทำการพันขดลวดฟิวส์ใหม่ เพื่อจะทำการตัดแปลงให้ได้พิกัดกำลังมากขึ้น ตามที่ได้คำนวณไว้

จากการถอดชิ้นส่วนของไคซาร์จ พบว่าไคซาร์จมีจำนวน โพลเท่ากับ 6 โพล มีการต่อระหว่างขดลวดฟิวส์กับขดลวดอาเมเจอร์เป็นแบบขนาน ( Shunt ) และการต่อขดฟิวส์ระหว่างขั้วโพลมีการต่อแบบอนุกรม ( Series ) ดังรูปที่ 8.1 และขนาดเส้นลวดของขดฟิวส์เดิมเป็นลวดเบอร์ SWG19 ซึ่งมีขนาดพื้นที่หน้าตัดประมาณ  $1 \text{ mm}^2$  แต่ลวดของขดฟิวส์มีจำนวนรอบที่พันเท่ากับ 100 รอบ เพราะฉะนั้นหน้าตัดของขดฟิวส์ 1 ก้อน เท่ากับ  $1 \times 100 = 100$  ตารางมิลลิเมตร

### 8.4 การพันขดฟิวส์

มีตอนการออกชิ้นแบบการพันขดฟิวส์ดังนี้

#### 8.4.1 การพิจารณาก่อนถอดขดลวดออกจากมอเตอร์

ในการถอดมอเตอร์ เพื่อการตัดแปลงหรือซ่อมแซมแต่ละครั้งก่อนอื่นเราต้องเตรียมหาข้อมูลขดลวดไว้ก่อนแล้วจึงทำการถอดมอเตอร์ และพันขดลวดขึ้นเองใหม่และนำมาต่อในวงจรของมอเตอร์ใหม่ ถ้าทำการถอดขดฟิวส์ออกโดยไม่ได้พิจารณา เราจะต้องออกแบบขดลวดเองใหม่ทั้งหมด

#### 8.4.2 พิจารณา Name Plate ของตัวมอเตอร์

มีการพิจารณาดังนี้

##### ก.) รายละเอียดของวัสดุฉนวน

ในการแบ่งวัสดุฉนวนของขดลวด และขดลวดปัจจุบันแบ่งเป็น

ฉนวนชั้น A ได้แก่ฉนวนประเภท เทปผ้าฝ้าย ไฟเบอร์ กระดาษ ฉนวนประเภทนี้ทนอุณหภูมิได้ 105 องศาเซลเซียส

ฉนวนชั้น E ได้แก่ฉนวนประเภท โพลีเอสเตอร์ เรซิน ประเภทนี้ทนอุณหภูมิได้ 120 องศาเซลเซียส

ฉนวนชั้น B ได้แก่ฉนวนประเภท อีพอกซี แผ่นไมก้า แผ่นใยแก้ว ฉนวนประเภทนี้ทนอุณหภูมิได้ 130 องศาเซลเซียส

ฉนวนชั้น F ได้แก่ฉนวนประเภท ใยแก้วอาบวานิช แอสเบสต้อส ฉนวนประเภทนี้ทนอุณหภูมิได้ 155 องศาเซลเซียส

**ข.) จำนวนขั้วแม่เหล็ก**

จำนวนขั้วแม่เหล็กประกอบด้วยขั้วเหนือ ขั้วใต้ หนึ่งขั้วคู่ขั้วเหนือ และขั้วใต้ เรียกว่า สองขั้วเป็นต้น

**ค.) พิกัดกำลัง ( Rate output )**

คือกำลังสูงสุดที่มอเตอร์สามารถทำงานได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหาย

**ง.) พิกัดโวลต์เตจ ( Rate voltage )**

ค่าศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ที่ทำให้พิกัดกำลังของมอเตอร์ได้ตรงตามต้องการ

**จ.) กระแส**

เป็นค่าโดยประมาณของกระแสขณะ โหลดเต็มที่

**ฉ.) ความเร็วรอบ**

เป็นค่าโดยประมาณ จำนวนรอบต่อนาที ( rpm ) ของมอเตอร์ที่พิกัด

**ช.) สัญลักษณ์บอกรุ่นของมอเตอร์**

สัญลักษณ์บอกรุ่นขึ้นกับบริษัทที่ผลิต

**ซ.) ชื่อของบริษัทผู้สร้าง**

**8.4.3 ขั้นตอนการถอดมอเตอร์**

**ก.) การถอดฝาครอบด้านตรงข้ามเพลลาขับ**

ถอดน็อตตรึงฝาครอบออกให้หมด แล้วสอดไขควงค้ำยาวเข้าตามร่องที่พองแฉะได้ และแฉะฝาออกโดยจกกับบ่าตัวมอเตอร์ แล้วถอดประคองฝาโดยใช้สองมือช่วย ถ้ามอเตอร์เป็นชนิดไม่มีร่องให้แฉะเปิด ให้ใช้สติกคอกตรงรอยต่อระหว่างตัวมอเตอร์กับฝาครอบเบาๆ โดยรอบ

**ข.) การถอดแผ่นบังลม**

ควรรใช้มือถอดแผ่นบังลมออก

**ค.) การถอดฝาครอบด้านเพลลาขับ**

ถอดน็อตยึดฝาครอบออกอีก วิธีถอดทำเหมือนข้อ (ก) คลายฝาครอบค่อยๆถอด โรเตอร์ติดออกมาพร้อมฝาครอบ และแผ่นบังลม ในกรณีนี้ควรระมัดระวังอย่าให้โรเตอร์ขูดขถวคด้านสเตเตอร์ให้เสียหายได้

**ง.) ถอดโรเตอร์ออกจากฝาครอบ**

วางโรเตอร์ตั้งเอาด้านฝาครอบลง แล้วค่อยหมุนฝาครอบไปโดยรอบและใช้ค้อนหัวสี่

เหลี่ยมเคาะรอบฝาครอบ เพื่อให้โรเตอร์ขยับตัวหลุดออกจากฝาครอบ

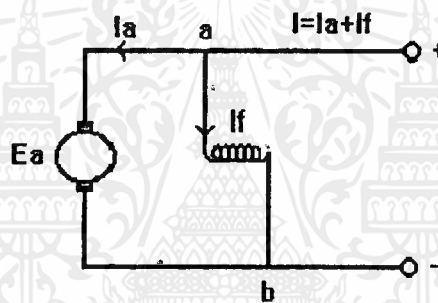
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### จ.) การถอด และเก็บรักษารองลื่นลูกปืน

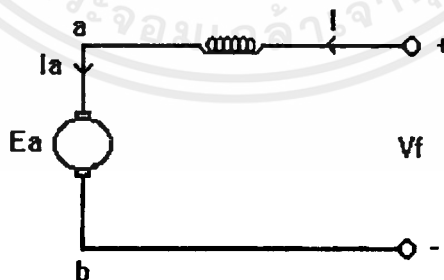
ในกรณีที่จำเป็นต้องถอดรองลื่นลูกปืนออกจากโรเตอร์ให้ชโลมน้ำมัน หรือทาจารบี แล้วห่อด้วยเศษผ้าสะอาดเพื่อป้องกันการเสียหาย และฝุ่นละออง

ในกรณีที่ต้องการถอดรองลื่นลูกปืนออกจากโรเตอร์ให้ใช้ตัวคูเคียร์หรือตัวคูรองลื่น ถ้าติดแน่นไม่สามารถดึงออกได้ ให้อุ่นด้วยน้ำมัน และดึงออกเมื่อถอดรองลื่นออกแล้วต้องเปลี่ยนรองลื่นใหม่ ไม่ควรใช้รองลื่นตัวเดิมอีกครั้ง

### 8.4.4 ทำการศึกษาว่าจะทำอย่างไรเพื่อให้ได้พิกัดแรงดันของมอเตอร์เพิ่มขึ้น



รูปที่ 8.1 แสดงการต่อระหว่างขดลวดฟิวส์กับขดอามเมเจอร์แบบขนานของ DC Shunt Motor



รูปที่ 8.2 แสดงการต่อระหว่างขดลวดฟิวส์กับขดอามเมเจอร์แบบอนุกรมของ DC Series Motor

$$\text{จากรูปที่ 8.1} \quad V_t = V_f = E_a \quad (8.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

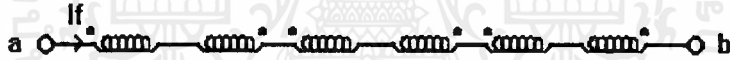
$$I = I_a + I_f \quad (8.2)$$

จากรูปที่ 8.2  $V_t = V_f + E_a \quad (8.3)$

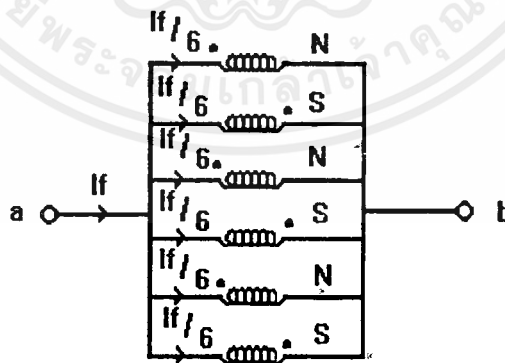
$$I = I_a = I_f \quad (8.4)$$

จากสมการ (8.1) เมื่อเทียบกับสมการ (8.3) จะเห็นว่าแรงดันที่ปลายขั้ว ( $V_t$ ) ของสมการที่ (8.3) มีค่ามากกว่าแรงดัน  $V_f$  ของสมการที่ (1) และจากการศึกษาไคซาร์จของเดิม (ไคซาร์จที่จะนำมาใช้เป็นมอเตอร์ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า) จะเห็นได้ว่าไคซาร์จของเดิมจะต่อแบบขนานซึ่งเหมือนกับรูปที่ 8.1 เพราะฉะนั้นเราจะทำการถอดไคซาร์จออกแล้วทำการต่อใหม่ให้เป็นแบบอนุกรม ตามรูปที่ 8.2 ก็สามารทำให้พิักัดแรงดันมากขึ้นจากของเดิม

เมื่อศึกษาขดลวดฟิวส์เดิม ซึ่งใช้ขดลวด SWG19 และการต่อระหว่างขดลวดฟิวส์เดิมเป็นแบบอนุกรมดังรูปที่ 8.3



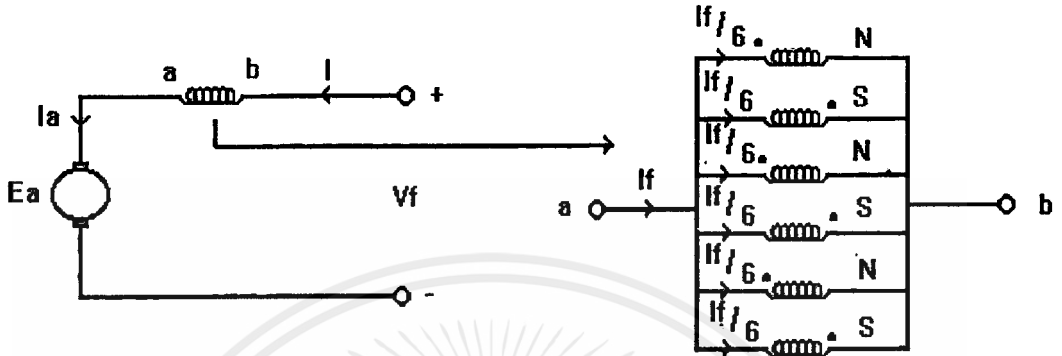
รูปที่ 8.3 แสดงการต่อแบบอนุกรมกันของขดลวดฟิวส์ในแต่ละขั้ว โพล



รูปที่ 8.4 แสดงการต่อแบบขนานกันของขดลวดฟิวส์ในแต่ละขั้ว โพล

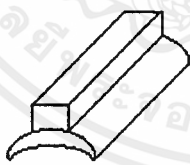
เมื่อทำการต่อมอเตอร์แบบอนุกรม ขดลวดฟิวส์ต้องมีขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อหนึ่งเส้นลวดมีขนาดใหญ่กว่าของเดิม เพื่อจะได้รับกระแสมากขึ้นกว่าของเดิม (ซึ่ง  $I = I_a = I_f$ ) จึงเลือกใช้ลวดเบอร์ SWG16 ซึ่งมีขนาดพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดประมาณ 2.2 ตารางมิลลิเมตร แล้วมีการต่อ

ระหว่างขดฟิวส์เป็นแบบขนานด้วย เพื่อจะช่วยเฉลี่ยรับกระแสที่น้อยลง ดังรูปที่ 8.4 เมื่อเทียบกับการต่อแบบอนุกรมในรูปที่ 8.2 จะได้ลักษณะการต่อขดฟิวส์ในมอเตอร์ใหม่ ดังรูปที่ 8.5

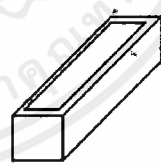


รูปที่ 8.5 แสดงมอเตอร์ที่ได้รับการต่อขดฟิวส์ใหม่ตามที่เรากำลังต้องการ

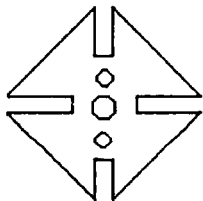
8.4.5 ทำการพันขดฟิวส์ โดยใช้ไม้อัดมาทำเป็นแบบดังรูปที่ 8.6 ให้มีขนาดเท่ากับขนาดขดฟิวส์ของเดิมและสามารถสอดแกนโพลเข้าไปได้ และให้หลวมเล็กน้อยเพื่อไว้สำหรับการพันผ้าที่ขดฟิวส์ ในการพันขดลวดบนแบบนี้ควรระวังอย่าให้ฉนวนของสายไฟโดนขูดเนื่องจากการพัน ก่อนพันควรลบมุมของแกน ไม้และทาด้วยเทียน ไขอีกชั้นหนึ่งเพื่อจะสามารถถอดแกน ไม้ อัดออกได้ง่าย และขดลวดไม่มีรอยขูด



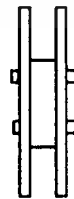
แกนโพล



แกนไม้อัดสำหรับทำแบบขดฟิวส์



รูปสมบรูณ์ของแบบขดลวดที่ต้องการ



แผ่นปะกับ

รูปที่ 8.6 แสดงการพันแบบขดลวดฟิวส์

8.4.6 เมื่อใช้ลวดเบอร์ SWG16 พื้นที่หน้าตัดต่อหนึ่งเส้นลวดประมาณ 2.2 ตารางมิลลิเมตร ใช้ทำขดฟิวส์ ดังนั้นถ้าเราใช้ขดลวดเบอร์นี้จะต้องพันขดลวดให้มีจำนวนรอบเท่ากับ

$$\frac{\text{พื้นที่หน้าตัดหนึ่งก้อนฟิวส์}}{\text{พื้นที่หน้าตัดหนึ่งเส้นลวด}} = \frac{100 \text{ ตารางมิลลิเมตร}}{2 \text{ ตารางมิลลิเมตร}} = 50 \text{ รอบ}$$

เส้นลวดเบอร์ SWG16 ทนกระแสได้ประมาณ 4 แอมแปร์ เมื่อทำขดฟิวส์ใหม่นี้มาต่อแบบขนานจะต้องได้พิกัดกระแสเท่ากับหรือมากกว่าพิกัดกระแสโคชาร์จเคิม ( 50 แอมแปร์ ) เมื่อเรากำหนดจะได้

$$\begin{aligned} \text{กระแสที่พิกัด} &= (\text{พื้นที่หน้าตัดหนึ่งเส้นลวด} \times \text{จำนวน โพล}) \times \text{กระแสที่ไหล} \\ \text{ผ่านในหนึ่งเส้นลวด} &= (2.2 \times 6) \times 4 \\ &= 13.2 \times 4 \\ &= 13 \times 4 \\ &= 52 > 50 \text{ A} \end{aligned}$$

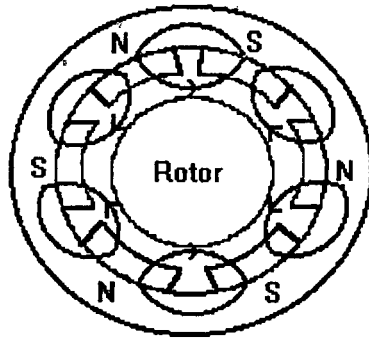
8.4.7 ทำการพันขดฟิวส์บนแบบที่ทำไว้ โดยให้มีจำนวนรอบคือ 50 รอบและทำการพันขดฟิวส์ทั้งหมด 6 ขด ( มี 6 โพล )

8.4.8 พันผ้าบนขดฟิวส์ทุกขด เพื่อใช้เป็นฉนวนและกันน้ำยาอัดฉนวน โคนขูด การพันผ้าควรพันให้แน่นเพื่อที่จะให้ก้อนขดลวดมีขนาดเท่าเดิมและไม่ให้เส้นลวดขยับซึ่งอาจเกิดการจัดตีทำให้ฉนวนถลอกและเกิดการลัดวงจรในก้อนขดลวด แล้วทำการชุบวานิช เพื่อเป็นฉนวนอีกชั้นหนึ่ง

## 8.5 การเชื่อมต่อระหว่างขดฟิวส์

ทำการต่อเชื่อมระหว่างขดฟิวส์แบบขนานดังรูปที่ 8.4 และทำการประกอบขดฟิวส์เข้ากับแกนโพลให้แน่นเหมือนกับแกน โพลทุกประการ ซึ่งแกน โรเตอร์กับหน้าโพลของทุก โพลจะ ได้มีช่องอากาศที่สม่ำเสมอดังรูปที่ 8.7 จากนั้นทำการต่อมอเตอร์แบบ DC Series Motor ดังรูปที่ 8.5





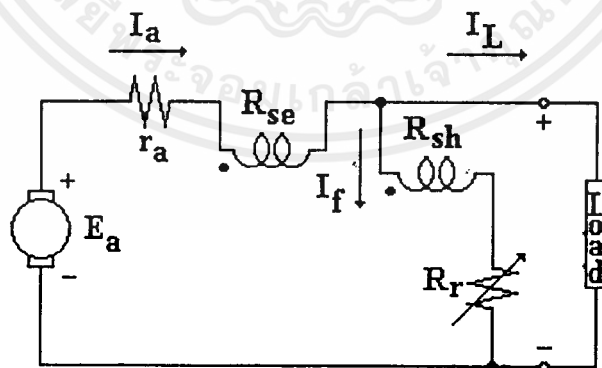
รูปที่ 8.7 แสดงหน้าตัดตามแนวขวางของมอเตอร์

### 8.6 การประกอบมอเตอร์

การประกอบมอเตอร์เป็นส่วนที่สำคัญจะต้องทำด้วยความระมัดระวังและต้องประกอบให้เหมือนของเดิมทุกประการ โดยเฉพาะในการติดลบลูกปืนกับแกนโรเตอร์จะต้องไม่เบี้ยว หากเบี้ยวโรเตอร์จะหมุนหรือหมุนแบบแกว่ง จากนั้นทำการทดสอบการหมุนโดยให้โรเตอร์หมุนอย่างอิสระไม่ฝืด และเพื่อไม่ให้มีการสูญเสียกำลังทางด้านกลศาสตร์ (Mechanics Loss)

เนื่องจากโครงงานนี้เป็นโครงงานที่ทำต่อเนื่องถึง 3 ทอม ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงส่วนของมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมาโดยตลอด เพื่อให้ได้พิกัดที่เหมาะสมกับโหลด จึงได้มีการเปลี่ยนมอเตอร์ใหม่ให้มีพิกัดกำลังมากขึ้น ซึ่งจะทำให้รูดไฟฟ้าวิ่งด้วยอัตราเร็วที่สูงขึ้นกว่าเดิม

มอเตอร์ตัวใหม่นี้ ได้มีการคัดแปลงมาจากไดซาร์จกระแสตรงที่เป็นชนิด cumulatively compound dc generator ขนาดพิกัด 150A 28.5V และวงจรสมมูลดังแสดงดังรูปที่ 8.8

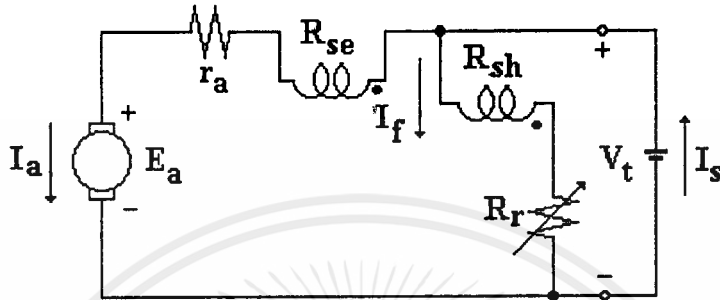


รูปที่ 8.8 แสดงวงจรสมมูลของ cumulatively compound dc generator

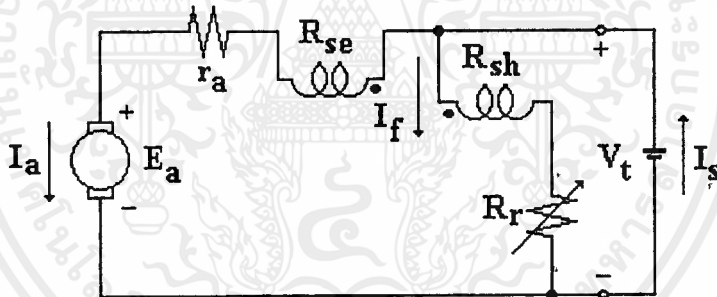
หากนำไดซาร์จตัวนี้ไปใช้เป็นมอเตอร์ จะกลายเป็นมอเตอร์ชนิด differentially compound dc motor ซึ่งจะมีขดลวดสนาม 2 ชุดคือ ขด. series และ shunt field winding ซึ่งต่อกลับข้ามกันทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

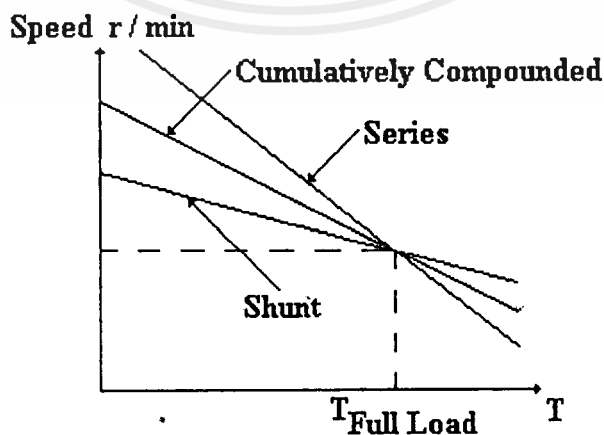
เกิด mmf หักล้างกันดังรูป ดังนั้นเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น ( $I_a$ ) ทำให้ฟลักซ์รวมลดลง และความเร็วรอบสูงขึ้น  $E_a$  เพิ่มขึ้น เป็นผลต่อเนื่องและอาจจะทำให้มอเตอร์เกิดการ run way ขึ้นได้ซึ่งจะเห็นได้ว่าการทำงานของ differential compound dc motor ซึ่งไม่มีเสถียรภาพ ดังรูปที่ 8.9



รูปที่ 8.9 แสดงวงจรสมมูลของมอเตอร์ชนิด differential compound dc motor ดังนั้นจึงทำการเปลี่ยนเป็นมอเตอร์ชนิด commulative compound dc motor โดยการกลับขั้วของขด shunt field เพื่อให้เกิด mmf ที่เสริมกัน ดังรูปที่ 8.10



รูปที่ 8.10 แสดงวงจรสมมูลของ commulatively compound dc motor



รูปที่ 8.11 แสดงคุณสมบัติของ dc motor ชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 9

### การทดสอบ และผลการทดสอบ

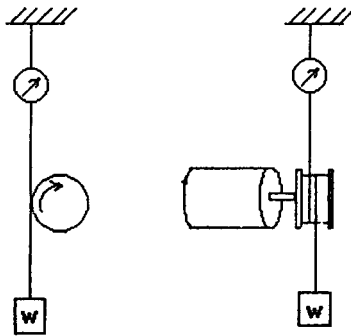
หลังจากที่พ้นขีดลวดฟิวส์ของมอเตอร์ใหม่แล้ว และแก้ไขจนมอเตอร์สามารถหมุนได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปจะทำการทดลองเพื่อหาแรงบิด กำลังจ่ายออกและประสิทธิภาพของมอเตอร์ของที่พันใหม่ ว่าดีกว่าขณะที่ยังไม่พันแคโทลและมีกำลังเพียงพอนในการขับโหลดหรือไม่ ก่อนที่จะนำไปประกอบเข้ากับตัวรถในการใช้งานจริง

ก่อนจะทำการทดลองจะต้องเตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้พร้อมสำหรับทดสอบมอเตอร์ จะต้องเตรียมมอเตอร์ให้เหมาะกับตัวของมอเตอร์ที่จะใช้ทดสอบ และต้องทำแทนสำหรับยึดตัวมอเตอร์ให้พร้อมในการทดสอบด้วย เพื่อมิให้เกิดอันตรายแก่ผู้ทดสอบ ได้ ซึ่งอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการทดสอบมีดังนี้ คือ

- |                              |           |         |
|------------------------------|-----------|---------|
| 1. วาริแอก 3 เฟส             | 15 แอมป์  | 1 ตัว   |
| 2. โวลต์มิเตอร์กระแสสลับ     | 100 โวลต์ | 1 ตัว   |
| 3. แอมป์มิเตอร์กระแสตรง      | 200 แอมป์ | 1 ตัว   |
| 4. โวลต์มิเตอร์กระแสตรง      | 100 โวลต์ | 1 ตัว   |
| 5. บริดจ์ 3 เฟส              |           | 1 ตัว   |
| 6. หม้อแปลง step douwn 3 เฟส |           | 1 ตัว   |
| 7. สายไฟ                     |           | 15 เส้น |

#### วิธีการทดลอง

เป็นการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ โดยการทำให้เกิดความฝืดที่มู่เล่ซึ่งตัวมู่เล่มีการระบายความร้อนโดยใช้น้ำใส่ไว้ภายใน ความฝืดระหว่างเชือกกับมู่เล่จะเป็นแรงบิดของภาระ ที่สามารถวัดค่าได้ดังแสดงตามรูปที่ 9.1 พร้อมทั้งมีเครื่องวัดปริมาณทางไฟฟ้าที่ป้อน โดยวัดศักดาไฟฟ้าป้อนเข้า (Vi/p) กระแสไฟฟ้าป้อนเข้า (Ii/p)



รูปที่ 9.1 แสดงการใส่และการวัดแรงบิดของภาระ

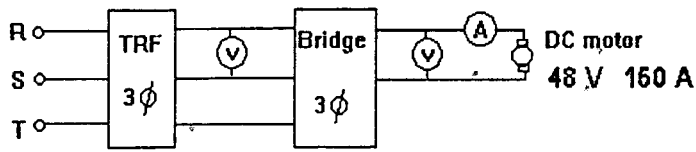
ขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงยังไม่หมุนตรงซึ่งจะอ่านค่ามวลของลูกน้ำหนักได้เท่ากับ  $W_1$  และเมื่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงหมุนด้วยความเร็วเท่ากับ  $N$  รอบต่อนาที ค่าข้างอ่านน้ำหนักได้น้อยลงเป็น  $W_2$  โดยที่แรงที่เกิดจากความฝืดระหว่างเชือกกับผิวของมู่เล่จะเป็นแรงที่ช่วยคึงลูกน้ำหนัก

ในการใส่ภาระทางกลแบบนี้จะกำหนดทิศทางทางการหมุนในลักษณะที่ทำให้เกิดในการคึงลูกน้ำหนักขึ้นทำให้ค่าข้างอ่านได้น้อยลง ถ้ารัศมีจากจุดศูนย์กลางของมู่เล่มาถึงจุดศูนย์กลางของเชือกเท่ากับ  $R$  เมตร จะสามารถคำนวณหาค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{แรงบิดที่ขับภาระ } (\tau_L) &= 9.81.(W_1 - W_2).R \\
 \text{กำลังส่งออกจากมอเตอร์ } (P_o/p) &= \tau_L.\omega \\
 &= 9.81.(W_1 - W_2).\frac{R.2\pi N}{60} \\
 &= R.N.(W_1 - W_2) \\
 \text{กำลังป้อนเข้า } (P_i/p) &= V_i/p . I_i/p \\
 \text{ประสิทธิภาพของมอเตอร์ } (\eta) &= P_o/p / P_i/p
 \end{aligned}$$

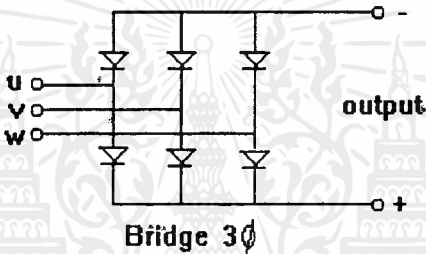
### ขั้นตอนการทดลอง

#### 1. ตัวอย่างการทดลองตามรูปที่ 9.2



รูปที่ 9.2 แสดงการต่อวงจรการทดสอบมอเตอร์

หมายเหตุ สถานีที่ใช้หม้อแปลง 3 เฟส เพราะวาริแอกมีกระแสจ่ายออกสูงสุดเพียง 15 แอมแปร์ แต่พิกัดของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบต้องการถึง 150 แอมแปร์ เพราะฉะนั้นจึงนำหม้อแปลง 3 เฟส มาใช้ โดยที่จะจ่ายผ่านบริดจ์ 3 เฟสร่วมกันจ่ายจะได้กระแสสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 9.3



รูปที่ 9.3 แสดงการต่อบริดจ์ 3 เฟส

2. ใส่ค้อนน้ำหนักเริ่มต้น 2 กิโลกรัม แล้วค่อยปรับวาริแอกเพิ่มค่าความต่างศักย์และกระแส
3. ใส่ค้อนน้ำหนักเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ พร้อมทั้งค่อย ๆ ปรับวาริแอกจะกระทั่งวัดค่าทางด้านจ่ายได้ 36 โวลต์, 100 แอมป์ ให้วัดค่า ความเร็ว,  $W_1$ ,  $W_2$
4. เพิ่มค้อนน้ำหนักขึ้นเรื่อย ๆ พร้อมทั้งค่อย ๆ ปรับวาริแอกจนกระทั่งวัดค่าทางด้านจ่าย 36 โวลต์, 150 แอมป์ ( ช่วงขณะเกินพิกัดชั่วขณะ ) และอ่านค่า ความเร็ว,  $W_1$ ,  $W_2$
5. คำนวณค่ากำลังจ่ายออกได้ดังนี้

$$P = R.N.(W_1 - W_2)$$

เมื่อ  $R$  = รัศมีของมู่เล่ , เมตร

$N$  = ความเร็วของมอเตอร์ , รอบต่อนาที

$W_1$  = น้ำหนักของค้อนน้ำหนัก , กิโลกรัม

$W_2$  = ค่าที่วัดได้จากตาชั่ง , กิโลกรัม

6. คำนวณค่าแรงบิดได้ดังนี้

$$\tau = 9.81.(W_1 - W_2).R$$

7. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 2 - 6 ใหม่อีกครั้ง แต่เปลี่ยนพิกัดเป็นที่ 48 โวลต์ , 100 แอมป์ และ 48 โวลต์ , 150แอมป์ ตามลำดับ

### ตารางบันทึกผลการทดลอง

Vt (V)	I (A)	W <sub>1</sub> (kg)	W <sub>2</sub> (kg)	speed (rpm)	Pi/p (w)	Po/p (w)	hp	ประสิทธิภาพ
36	100	*	*	*	3600	*	*	*
36	150	*	*	*	5400	*	*	*
48	100	*	*	*	4800	*	*	*
48	150	*	*	*	7200	*	*	*

วิธีทดลองวิธีนี้เป็นวิธีที่เหมาะสมในการหาค่ากำลังงานที่ได้ออกมา และ ประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยทั่วไป แต่เนื่องจากอุปกรณ์ภายใน work shop มีขนาดเล็กเกินไป ไม่เพียงพอในการทดสอบมอเตอร์ที่มีพิกัดใหญ่ขนาดถึง 9.6 Hp ได้ จึงไม่สามารถทดสอบหาประสิทธิภาพของมอเตอร์เหมือนดังเช่นที่เคยทดสอบกับมอเตอร์พิกัด 4 Hp ได้

ดังนั้นจึงข้ามขั้นตอนการทดสอบไปและนำมอเตอร์มาประกอบเข้ากับตัวรถเลย โดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าประสิทธิภาพที่ได้จากทดลองจะมีค่าน้อยกว่าจากการคำนวณเล็กน้อยและสามารถขับโหลดได้จริง เมื่อทดลองใช้มอเตอร์ขั้วจริงได้ผลการทดลองดังนี้

จากการทดลองขั้วจริง โดยใช้แบตเตอรี่ 4 ลูกอนุกรมกัน ( 48 โวลต์ ) และขนานกัน 2 ชุด ได้ผลดังนี้

### ขณะสตาร์ท

กระแสขณะสตาร์ทมากกว่า 150 แอมป์ เป็นเวลา 10 วินาที แล้วจึง

ลดลง

ที่ความเร็วเฉลี่ย 30 km/hr

กระแสเฉลี่ย

70 แอมป์

แรงดันเฉลี่ย

36 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ที่ความเร็วสูงสุด 55 km/hr**

กระแส	120 แอมป์
แรงดัน	48 โวลต์

ซึ่งจะพบว่ามอเตอร์สามารถขับโหลดได้จริงตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้

ระยะเวลาในการวิ่งจนแบตเตอรี่หมดที่ความเร็วเฉลี่ย 30 km/hr ประมาณ 45 นาที หากใช้ความเร็วมากกว่าหรือน้อยกว่านี้เวลาที่รถวิ่งได้ก็จะสั้นลงหรือยาวนานกว่านี้ตามลักษณะการใช้งาน

**ผลการทดสอบส่วนไคซาร์จและคอมเพรสเซอร์แอร์**

ความเร็วรอบใช้งานของเครื่องยนต์เอนกประสงค์	750 rpm
แรงดันที่ออกจากไคซาร์จ	54 โวลต์
กระแสที่จ่ายให้แบตเตอรี่	1-10 แอมป์

(ขึ้นอยู่กับพลังงานของแบตเตอรี่ขณะนั้น คือ แบตเตอรี่ใกล้หมดกระแสชาร์จจะสูงแต่ไม่เกินขีดจำกัดของไคซาร์จคือ 10 แอมป์)

ส่วนคอมเพรสเซอร์แอร์สามารถทำความเย็นในห้องโดยสารได้ในระดับที่น่าพอใจ

ระยะเวลาในการวิ่งจนแบตเตอรี่หมดที่ความเร็วเฉลี่ย 30 km/hr เมื่อเพิ่มส่วนไคซาร์จจ่ายพลังงานกินแบตเตอรี่ จะยาวนานขึ้น สามารถวิ่งได้นานประมาณ 1 ชั่วโมง 30 นาที หากใช้ความเร็วมากกว่าหรือน้อยกว่านี้เวลาที่รถวิ่งได้ก็จะสั้นลงหรือยาวนานกว่านี้ตามลักษณะการใช้งาน

## บทที่ 10

### สรุปและวิจารณ์โครงการ

#### 10.1 สรุปผลโครงการ

ในการใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ cumulative compound ( long shunt ) ที่ขนาดพิกัด 48 โวลต์ 150 แอมป์ นำมาเป็นมอเตอร์ขับเคลื่อนตัวรถโดยผ่านส่วนของวงจรควบคุม chopper แบบ Step Down โดยมีแหล่งจ่ายไฟคือแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 4 ลูก นำมาต่อกันแบบอนุกรมกัน ปรากฏว่ามอเตอร์สามารถขับเคลื่อนและมีการออกตัวที่ค่อนข้างจะน่าพอใจ มอเตอร์สามารถขับเคลื่อนได้ความเร็วเป็นที่น่าพอใจ จากผลของการทดลองพบว่าพิกัดและค่ากำลังที่จ่ายออกมาของมอเตอร์ที่ใช้ในงานจริงจะทำให้ได้ความเร็วจริงที่ทดสอบมีค่าน้อยกว่าจากค่าที่ได้จากการคำนวณเล็กน้อยเนื่องจากค่าความสูญเสียในส่วนต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นส่วนของตัวมอเตอร์เอง ส่วนของวงจรควบคุม ส่วนของระบบขับเคลื่อนและระบบส่งกำลัง (เพลาและล้อ) ในส่วนของเครื่องยนต์เล็กที่ใช้ในการขับเคลื่อนตัวรถและคอมเพรสเซอร์แอร์ ผลปรากฏว่าแอร์ในตัวรถให้ความเย็นเป็นที่น่าพอใจ ส่วนการทำงานของตัวไคซาร์จเมื่อเครื่องยนต์ทำงาน ปรากฏว่ามันสามารถที่จะประจุไฟเข้าแบตเตอรี่ได้ทำให้ตัวรถไฟฟ้าสามารถวิ่งระยะทางได้ไกลและนานมากยิ่งขึ้นกว่าการที่จะใช้แบตเตอรี่ไปในการขับเคลื่อนโดยไม่มีไคซาร์จเลย

#### 10.2 วิจารณ์โครงการ

โครงการนี้ที่ทำขึ้นมามีส่วนประกอบใหญ่ ๆ อยู่ ส่วน คือ

1. ส่วนของตัวถังรถซึ่งใช้ไฟเบอร์กลาสเป็นตัวถัง

ส่วนของตัวถังรถที่เป็นไฟเบอร์กลาสทำจากเรซิน ตัวถังรถยังออกมาจะมีรูปร่างที่ยังไม่น่าพอใจเท่าไร มีบางส่วนที่ยังต้องแก้ไขอยู่บ้าง โดยเฉพาะในส่วนของประตูเปิดและกระโปรงหลังรถ

2. ส่วนที่ใช้ตัวมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน ในส่วนนี้ไม่ค่อยจะมีปัญหาเท่าไร มีปัญหาบ้างในส่วนของแกนเพลลาของตัวมอเตอร์ที่จะต้องไปทำมาใหม่โดยการเชื่อม เพราะของเดิมหัก

3. ส่วนของวงจรควบคุม มีปัญหาในการทดลองคือ ตัว power diode มักจะพังบ่อย ๆ

4. ส่วนของตัวเครื่องยนต์ที่ใช้ขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์แอร์ และ ไคซาร์จ การวางตำแหน่งใน

ส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์ยังไม่ถูกต้องมากนัก ต้องมีการปรับปรุงแก้ไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5. เครื่องยนต์ที่ใช้ขับเคลื่อนเพรสเซอร์แอร์และไคซาร์จ ขณะทำงานมีเสียงดังมากเกินไป  
รบกวนถึงห้องโดยสารข้างใน

6. ส่วนของระบบการควบคุมการเดินหน้า-ถอยหลัง ใช้ตัวสวิทช์คัทเอาท์ 3 เฟส เป็น  
ตัวควบคุมการเดินหน้า-ถอยหลังซึ่งประสิทธิภาพยังไม่ดีเท่าที่ควร และทนกระแสได้น้อย จึง  
ควรปรับปรุงโดยใช้อุปกรณ์ชนิดอื่นเช่น แม่คเนติกคอนแทคเตอร์ แทน

7. ส่วนของระบบชิลกันน้ำของตัวรถยังไม่ดีเท่าที่ควร ยังต้องปรับปรุงแก้ไข



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลทางเทคนิคของ DC ELECTRIC VEHICLE

### ข้อมูลจำเพาะทั่วไป

รายการ	รายละเอียด
<b>ขนาดและมิติ</b>	
ความยาวทั้งหมด (mm.)	3800
ความกว้างทั้งหมด (mm.)	1500
ความสูงทั้งหมด (mm.)	1250
ระยะฐานล้อ (mm.)	1300
ระยะห่างล้อหน้า / หลัง (mm.)	2200
น้ำหนักรถ(kgs.)	550 ( 650 kgs รวมผู้นั่ง 2 คน )

### ระบบส่งกำลังและระบบกันสะเทือน

ขับเคลื่อน	ล้อหลัง
ตัวถัง	ไฟเบอร์กลาส
กันสะเทือนหน้า	ใช้กับคอยล์สปริง
หลัง	ใช้กับแหนบ
พวงมาลัย	แรคแอนคี่ที่เนียน
ระบบเบรค	ครัมเบรค 4 ล้อ
ล้อและยาง	ไฮโกฮามา 175/50 R 13

## รายละเอียดเครื่องยนต์

รุ่น	FG 150 D
แบบเครื่องยนต์	4 จังหวะวาล์วข้าง
ความกว้างกระบอกสูบ x ระยะชัก	64 มม. x 47 มม.
ปริมาตรกระบอกสูบ	151 ซีซี
อัตราส่วนกำลังอัด	6.4 : 1
แรงม้าสูงสุด	3.8 แรงม้า / 4000 รอบ / นาที
แรงม้าสม่ำเสมอ	2.8 แรงม้า / 3600 รอบ / นาที
แรงบิดสูงสุดใช้งานเพลาค้อเหวี่ยง	0.9 กก.ม. / 2800 รอบ / นาที
การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง	315 กรัม / แรงม้า / ชั่วโมง
ความจุน้ำมันเบนซินที่ใช้	3.01 ลิตร
น้ำมันเชื้อเพลิง	น้ำมันเบนซิน
ความจุน้ำมันเครื่องสูงสุด	500 ซีซี
ความจุน้ำมันเครื่องต่ำสุด	250 ซีซี
น้ำมันหล่อลื่น	SAE 30 หรือ 10W-30 10W40
ระบบจุดระเบิด	25° ก่อนศูนย์ตายบน (ตายตัว)
มาตรฐานหัวเทียน	14 MM NGK BP 4 HS, ND W14 FD-L
รอบเดินเบา	1600 รอบ / นาที
รอบสูงสุด	4000 รอบ / นาที
น้ำหนักเครื่องยนต์	13.7 กก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

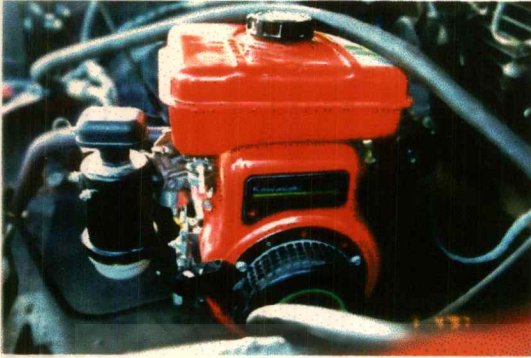
**ระบบแหล่งจ่ายพลังงานและส่วนวงจรควบคุม**

ส่วนประกอบใน ของตัวรถ	รายละเอียด	จำนวน
แหล่งจ่ายพลังงาน	HITACHI SEALED LEAD - ACID BATTERY Hp24 - 12 (12 M24) 12 V 24 Ah	8
ส่วนขับเคลื่อนตัวรถ	Dc Motor ( Compound Dc Motor ) พิกัด 60 โวลต์ 150 แอมป์	1
วงจร Control และ Protection	วงจร Step Down Converter ( Buck ) 150 A 48 V	
ส่วนของระบบการ ทำความเย็น	คอมเพรสเซอร์แอร์, ท่อคีนน้ำยา ท่อทักน้ำยาแอร์, อีวาพอเรเตอร์, ฟัดลม คอนเดนเซอร์, ตู้แอร์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



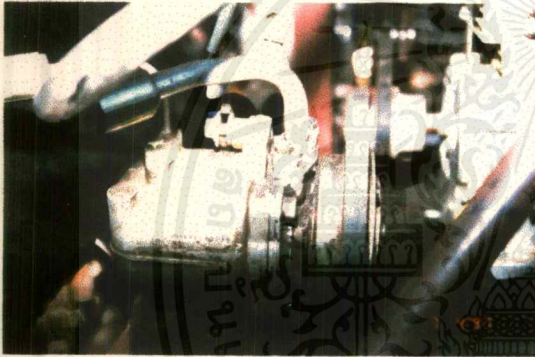
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



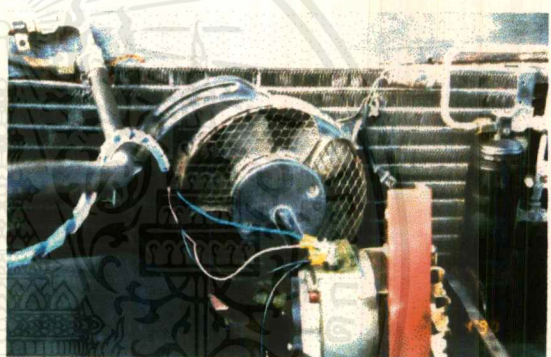
รูปที่ ช-1 เครื่องยนต์เอนกประสงค์ 3.8 Hp



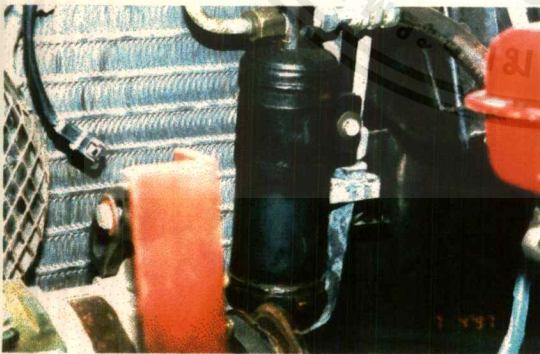
รูปที่ ช-2 ไคชาร์จ 60 โวลต์



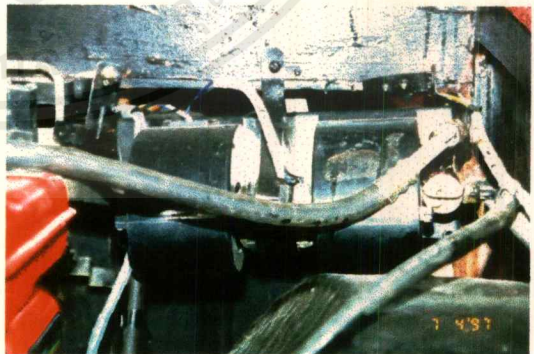
รูปที่ ช-3 คอมเพรสเซอร์แอร์



รูปที่ ช-4 รั้งผึ้งและพัดลมระบายอากาศ



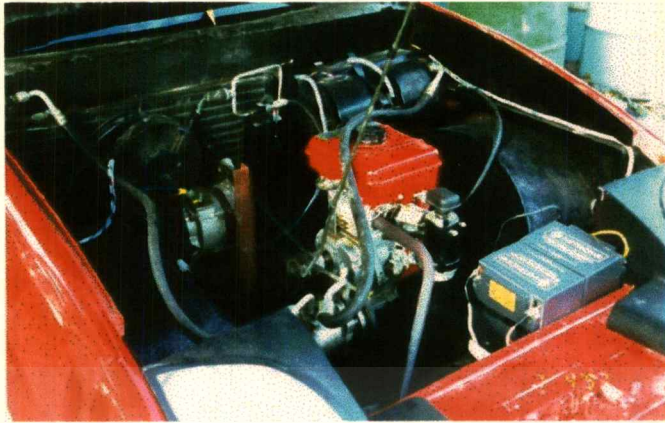
รูปที่ ช-5 รีชีฟเวอร์ครายเออร์



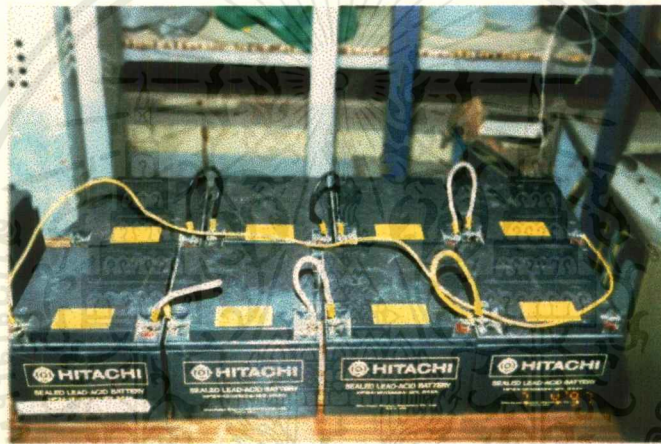
รูปที่ ช-6 ตู้แอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

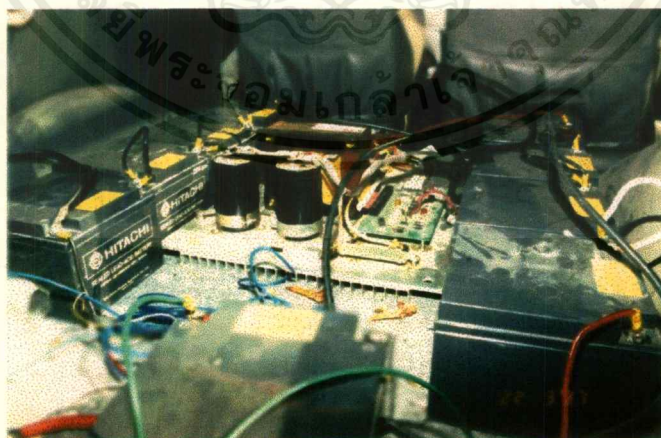




รูปที่ ช-7 ตำแหน่งของเครื่องยนต์, ไคชาร์จ, คอมเพรสเซอร์แอร์

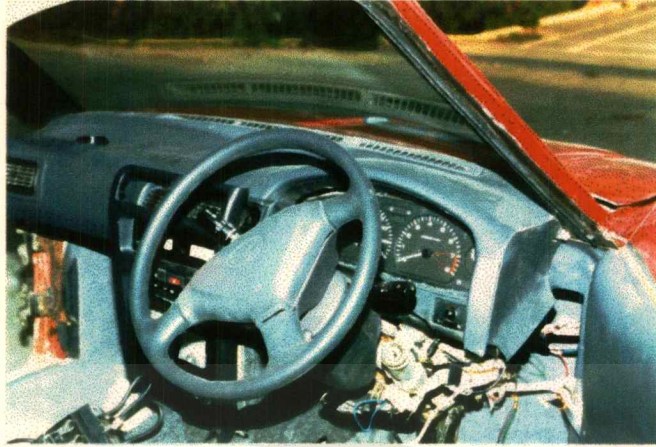


รูปที่ ช-8 แบตเตอรี่ที่ใช้- อนุกรม 4 ลูกขนานกัน 2 ชุด



รูปที่ ช-9 ตำแหน่ง แบตเตอรี่และวงจรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ซ-10 คอนโซลหน้าและพวงมาลัย



รูปที่ ซ-11 บรรยากาศในห้องโดยสาร 2 ที่นั่ง



รูปที่ ซ-12 ล้อแม็กและยาง 175/50 R13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ช-13 รูปด้านข้างอันโฉบเฉี่ยวของ DC.E.VHC



รูปที่ ช-14 อีกมุมหนึ่งของ DC.E.VHC



รูปที่ ช-15 รูปด้านข้างเต็มๆของ DC.E.VHC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำโครงการนี้ได้รับคำแนะนำและสนับสนุนจากหลายฝ่ายจนโครงการนี้สำเร็จ  
ลุล่วงไปได้ด้วยดีซึ่งต้องขอขอบพระคุณอย่างสูง ณ ที่นี้ซึ่งได้แก่

1. อาจารย์ประภาส ไพรสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาให้คำแนะนำที่ดี ๆ มากมาย พร้อมทั้ง  
สนับสนุนงบประมาณการทำโครงการนี้อย่างมาก เป็นที่ปรึกษายามมีปัญหาช่วยทำให้ปัญหาทุก  
อย่างแก้ไขลงไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณอย่างสูง ณ ที่นี้
2. อาจารย์อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาให้คำแนะนำที่ดี ๆ หลายประการ
3. เขียวท้อ ที่ช่วยทางด้านเครื่องกลอย่างมาก เช่น ติดตั้งมอเตอร์เข้าแกนเพลลา ติดตั้งพวงมา  
ลัย ฯลฯ ซึ่งสามารถช่วยทำงานบางอย่างที่เกินแรงและความสามารถของนักศึกษาได้อย่างดี
4. พี่มณฑา พนักงานระจําภาคเครื่องกล ที่ให้คำแนะนำที่ดี และช่วยเหลืองานตั้งแต่แรกเริ่ม
5. พี่ตัวเล็ก พี่เอ ที่ใจดีให้เบิกอุปกรณ์ ให้คำแนะนำการใช้อุปกรณ์พร้อมทั้งจัดหาอุปกรณ์  
บางอย่างให้
6. พี่บอมบ์และทีมงาน (คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์) ที่เป็นผู้ทำตัวโครงการรถดั่งที่เห็นปัจจุบัน
7. สปอนเซอร์ต่างๆที่ให้การสนับสนุนผลิตภัณฑ์ ได้แก่
  - บริษัทแซนด์แอนด์ซอຍจำกัด สนับสนุนเรซินและส่วนผสม
  - บริษัทพระบราเธอร์จำกัด สนับสนุนคนทำโครงการ
  - บริษัทเอสโซ่ (ประเทศไทย) จำกัด สนับสนุนเงินทำโครงการ
  - บริษัทสยามไฟเบอร์กลาส จำกัด สนับสนุนผลิตภัณฑ์ใยแก้ว
  - บริษัทเอทานอลเรซิน จำกัด สนับสนุนเรซินและส่วนผสม

นอกจากนี้ยังมีบุคคลอีกหลายๆฝ่ายที่ให้คำแนะนำที่ดี และให้การสนับสนุนด้านอื่นๆ จึง  
ขอขอบคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

## เอกสารอ้างอิง

1. พิชิต ถ้ายอง, "เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1", คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2537
2. โกวิท มาศรัตน์, "เครื่องจักรกลไฟฟ้า", ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ วิทยาลัย ยมหานคร, 2535
3. บุญธรรม ภัทรจารุกุล, ประธานพงษ์ หาเรือนชีพ, "ทฤษฎีและปฏิบัติไฟฟ้ารถยนต์"
4. สวัสดิ์ บุญเดือน, "หลักการทํางาน การบริการ และการตรวจซ่อม มอเตอร์ปรับอากาศ" (AUTOMOTIVE AIR CONDITIONING)
5. สมศักดิ์ สุโมตยกุล, "เครื่องปรับอากาศรถยนต์"
6. ปราโมทย์ วิเชียรปัญญา, นิตินทร สุวรรณศาสตร์ "ปริญญาานิพนธ์ เรื่อง dc chopper " 2536
7. Chapman, S.J.: Electric Machinery Fundamental, Mc Graw-Hill Book Company, New York 1991