

การออกแบบการใช้พลังงานสำหรับรถไฟฟ้า

A DESIGN OF ENERGY CONSUMPTION
FOR ELECTRIC CAR

สีปภาส จารุวรรณชัย
SIPPAPAS JARUWANCHAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-950-8

การออกแบบการใช้พลังงานสำหรับรถไฟฟ้า

A DESIGN OF ENERGY CONSUMPTION
FOR ELECTRIC CAR



สิปปภาส จารุวรรณชัย
SIPPAPAS JARUWANCHAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2546

ISBN 974-324-950-8

ขหมู.....
ขทะเบียน **51098**
น,เดือน,ปี- **2 . 0 . 0 . 2547**

b.....
i.....

**A DESIGN OF ENERGY CONSUMPTION
FOR ELECTRIC CAR**

SIPPAPAS JARUWANCHAI

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2003

ISBN 947-324-950-8

COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบการใช้พลังงานสำหรับรถไฟฟ้า
A DESIGN OF ENERGY CONSUMPTION FOR ELECTRIC CAR

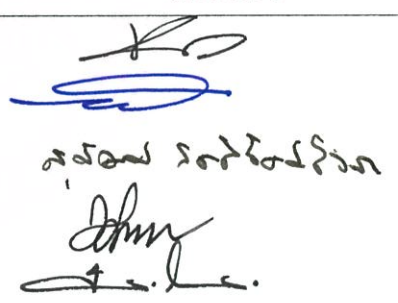
ชื่อนักศึกษา นายสิปปภาส จารุวรรณชัย

รหัสประจำตัว 41061177

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ชัยวุฒิ	ฉัตรอุทัย	
ผศ.พิชิต	ถ้ำทอง	
ดร.สุพัฒน์	กิตติรัตน์สังจา	
ผศ.ดร.วิจิตร	กิมเรศ	
รศ.ศิริวัฒน์	โทธิเวชกุล	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 28 ตุลาคม 2546 เวลา 14.00-16.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-401)


บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว
(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัฐบุรินทร์)

รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....๑๙.....เดือน.....ธันวาคม.....พ.ศ.๒๕๔๖

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบการใช้พลังงานสำหรับรถไฟฟ้าที่เหมาะสม
นักศึกษา	นายสิปปภาส จารุวรรณชัย
รหัสประจำตัว	41061177
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาถึงระบบการขับเคลื่อนและการใช้พลังงานที่สภาวะต่างๆ ในการใช้งานรถไฟฟ้าขนาด 15 ที่นั่ง โดยทำการสร้างต้นแบบการศึกษาด้วยการนำโครงสร้างรถยนต์ที่ใช้ในเชิงขนส่งนำมาดัดแปลงให้เปลี่ยนมาใช้ระบบขับเคลื่อนที่เป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส 6 ขั้ว ขนาด 22 กิโลวัตต์ มาเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อน โดยใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 65 แอมป์-ชม. และใช้อินเวอร์เตอร์ขนาด 30 กิโลวัตต์แบบแรงดันต่อความถี่เป็นชุดควบคุมการขับเคลื่อนและวิ่งด้วยความเร็ว 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมงต่อเนื่องกันอย่างน้อย 3 ชั่วโมง โดยทำการศึกษาถึงลักษณะการขับเคลื่อนในแบบต่างๆ ที่เหมาะสมกับการใช้งานรับส่งโดยสารที่สภาวะการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป และศึกษาการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ที่ใช้ในการขับเคลื่อนที่สภาวะต่างๆ ของการขับเคลื่อนที่เหมาะสมและทำการวิเคราะห์การใช้กำลังงานต่อน้ำหนักบรรทุกและระยะทาง เพื่อนำข้อมูลไปพัฒนาการออกแบบขนาดของแหล่งจ่ายพลังงาน, ต้นกำลังในการขับเคลื่อนและชุดควบคุม รวมถึงโครงสร้างรถที่เหมาะสมกับการใช้งานของรถไฟฟ้าให้ได้ประสิทธิภาพสูงขึ้น

Thesis Title	A DESIGN OF ENERGY CONSUMPTION FOR ELECTRIC CAR
Student	Mr.Sippapas Jaruwanchai
Student ID.	41061177
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2003
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Siriwat Potivejkul

ABSTRACT

This thesis is concerned a design and construction of a large electric car for 15 person transportation. The body of a vehicle driven by fuel or another energy source will be transform to be driven by electrical energy source. The proposed electric car is replaced to be driven by 3-phase 6 pole 22 kW induction motor using 30 kW inverter drive base on the V/f principle in order to control the driving speed. Maximum speed 30 km./hr. The driving tests of the electric car have been performed under various load conditions and surrounding in order to obtain it's over all efficiency. The experimental results will be useful in the future design power supply,motor, inverter and structure to achieve a higher efficiency electric car.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี โดยได้รับคำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยจากท่าน รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล ผศ.พิชิต ถ้ายอง รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย ผศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความสนับสนุนช่วยเหลือในด้านต่างๆและขอขอบคุณสมาคมศิษย์เก่าสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่สนับสนุนด้านงบประมาณจัดสร้าง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่สนับสนุนเรื่องสถานที่, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลให้ความอนุเคราะห์เครื่อง Chassis Dynamometer ใช้ทดสอบและอาจารย์พงษ์ศักดิ์ คำมูล ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการทดสอบด้วยเครื่องนี้, ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ให้ความสนับสนุนเครื่องมือวัดในการทดสอบและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกท่าน, บริษัทสยาม ซี-เอส แบตเตอรี่ จำกัดที่สนับสนุนแบตเตอรี่ที่ใช้ในโครงการจำนวน 100 ลูก, บริษัท สีโอเนิก จำกัด ที่สนับสนุนเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่จำนวน 1 เครื่อง และอู๋ วิออดีเทคโนโลยีจัดทำโครงสร้างตัวถัง และเงินทุนสนับสนุนในการจัดทำวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัย ขอขอบคุณคำแนะนำต่างๆจากคุณจักรวาล เศรษฐวิเศษ, คุณสุรชาติ แซ่ซ้อ, คุณรัชต มั่งมีชัยคุณ ไชยพร หล่อทองคำ, คุณวสันต์ อุทัยโสภณ, คุณทิวากร พึ่งสุข, คุณศรีสกุล งามบุญแถม, คุณสหัสเดช สุคนธาภิรมย์ ณ พัทลุง, คุณโจ หนองศรีดา, คุณฐานันต์ ซื่อตรง, คุณณัฐพงษ์ พุทธนันท์เทศ, คุณดุรงค์ฤทธิ์ ผณีทอง รวมถึงรุ่นพี่รุ่นน้องทุกท่านที่ได้ให้ความร่วมมือและสนับสนุนข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับใช้ในงานวิจัย ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาตรีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ที่ออกแบบรูปโครงสร้างรถและการจัดวางแบตเตอรี่และนักศึกษาปริญญาโทของชาว Staff2 และ PMC Group ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการจัดทำวิทยานิพนธ์

และสุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดาและมารดาพี่น้องและคนที่รู้จักที่ได้คอยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้านต่อการศึกษาและการทำวิจัยในระดับปริญญาตรีจนถึงระดับปริญญาโท

สิปปภาส จารุวรรณชัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญภาพ.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	4
1.4 ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	5
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	5
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 หลักการทางกลศาสตร์.....	6
2.3 ทฤษฎีเบื้องต้นของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ(Induction Motor)	10
2.4 วิธีการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	16
2.5 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....	22
2.6 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	23
2.7 หลักการและชนิดของเบตเตอรี่.....	29
2.8 สรุป.....	43
บทที่ 3 การออกแบบรถไฟฟ้าโดยสาร.....	44
3.1 บทนำ.....	44
3.2 แนวคิดในการออกแบบรถไฟฟ้านั้นแบบ.....	44
3.3 การออกแบบขนาดพิกัดของต้นกำลังและขนาดของเครื่องแปลงผันพลังงาน.....	45
3.4 การออกแบบเบตเตอรี่ระบบพลังงานหลัก.....	49
3.5 การออกแบบโครงสร้างและการติดตั้งอุปกรณ์.....	53

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6 สรุป.....	55
บทที่ 4 การทดสอบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพ.....	56
4.1 บทนำ.....	56
4.2 การทดสอบหาประสิทธิภาพของชุดขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์ ABB รุ่น ACS400.....	56
4.3 การทดสอบประสิทธิภาพของการขับเคลื่อนตัวรถ ไฟฟ้า.....	63
4.4 การทดสอบหาประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายพลังงาน.....	69
4.5 สรุป.....	70
บทที่ 5 สรุปผลและการวิเคราะห์.....	71
5.1 บทนำ.....	71
5.2 ประสิทธิภาพการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าด้วยเครื่อง Chassis Dynamometer.....	71
5.3 การวิเคราะห์ลักษณะและความเหมาะสมในการขับขี่.....	71
5.4 การวิเคราะห์การใช้พลังงานของรถไฟฟ้าที่เหมาะสม.....	72
5.5 ผลงานการนำไปใช้งานภาคสนาม.....	72
5.6 งานวิจัยที่พัฒนาต่อไปในอนาคต.....	77
5.7 สรุป.....	78
เอกสารอ้างอิง.....	79
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก. ข้อมูลของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	81
ภาคผนวก ข. ข้อมูลของชุดควบคุมการขับเคลื่อน.....	86
ภาคผนวก ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	93
ภาคผนวก ง. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	102
ประวัติผู้เขียน.....	105

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 เปรียบเทียบขนาดแบตเตอรี่ ชนิดตะกั่วกรด (rate 20 h).....	52
3.2 เปรียบเทียบเวลาในการใช้งานแบตเตอรี่ ที่สภาวะการใช้งานต่างๆกัน.....	53
4.1 ผลการทดสอบค่าพลังงานที่ป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์และออกจากอินเวอร์เตอร์.....	59
4.2 ผลการความเร็วรอบที่แกนเพลลาและล้อของรถไฟฟ้า.....	60
4.3 ผลการทดสอบการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าขณะมีภาระทางกล*.....	62
4.4 ผลของค่าพลังงานของแบตเตอรี่ที่ป้อนเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่10Hz	64
4.5 ผลของค่าพลังงานของแบตเตอรี่ที่ป้อนเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่20Hz	65
4.6 ผลของค่าพลังงานของแบตเตอรี่ที่ป้อนเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่30Hz	65
4.7 ผลของค่าพลังงานของแบตเตอรี่ที่ป้อนเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่40Hz	65
4.8 ผลของค่าพลังงานของแบตเตอรี่ที่ป้อนเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่50Hz	66
4.9 ผลความสามารถในการขึ้นทางชัน 7 องศา.....	75
4.4 ผลภาระสูงสุด.....	69

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 รถไฟฟ้าที่ใช้รับส่งคน.....	2
1.2 รถสามล้อไฟฟ้า.....	2
1.3 รถไฟฟ้าที่พัฒนาของ NECTEC	3
2.1 แรงที่กระทำต่อรถ.....	9
2.2 ลักษณะการวางขดลวดของมอเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้วแม่เหล็กอย่างง่าย.....	10
2.3 วงจรสมมูลย์ต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	12
2.4 วงจรสมมูลย์แบบใกล้เคียงของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	14
2.5 วงจรอย่างง่ายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	15
2.6 กราฟความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็ว ขณะแรงดันและความถี่คงที่.....	17
2.7 วงจรการควบคุมแรงดันด้านสเตเตอร์.....	19
2.8 กราฟแรงบิด – ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	19
2.9 กราฟความสัมพันธ์แรงบิดกับความเร็วรอบเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่.....	20
2.10 กราฟความสัมพันธ์แรงบิด ความเร็วรอบที่อัตราส่วน $\frac{V_s}{\omega_b}$ คงที่.....	20
2.11 การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน,แรงบิด,กระแสสเตเตอร์กับความถี่.....	21
2.12 แผนผังการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	22
2.13 บล็อกไดอะแกรมของระบบอินเวอร์เตอร์เพื่อการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	24
2.14 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส.....	25
2.15 แรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส.....	25
2.16 วงจรกำลังของพีดับลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์.....	26
2.17 วงจรจำกัดกระแสอินรัช.....	27
2.18 กระแสอินรัช.....	27
2.19 รูปคลื่นแรงดันพีดับลิวเอ็ม และสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์.....	28
2.20 แบตเตอรี่แบบตะกั่วกรด.....	30
2.21 แบตเตอรี่แบบ Ambient-Temperature Lithium	35
2.22 Flywheel	36
2.23 การทำงานของแบตเตอรี่.....	36
2.24 อัตราการคายประจุ (Discharge Rate) แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด.....	37

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.25 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานของสารละลายในแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด.....	38
3.1 ผังการทำงานของรถไฟฟ้า.....	44
3.2 แรงที่กระทำต่อรถ.....	45
3.3 เวกเตอร์ของแรงบนทางชัน.....	46
3.4 วงจรระบบพลังงานหลักของรถไฟฟ้า.....	49
3.6 การประมาณการดึงกระแสของมอเตอร์อย่างคร่าวๆ.....	50
3.7 กราฟ การดึงกระแส เมื่อคิดที่เต็มพิกัดของมอเตอร์.....	51
3.8 เวลาในการคายประจุ กับแรงดันต่อเซลล์ของแบตเตอรี่.....	52
3.9 ลักษณะการจัดวางมอเตอร์และแบตเตอรี่.....	53
3.10 ลักษณะติดตั้งแบตเตอรี่.....	53
3.11 ลักษณะติดตั้งมอเตอร์.....	54
3.12 ลักษณะติดตั้งอินเวอร์เตอร์.....	54
3.13 ด้านหน้ารถไฟฟ้า.....	55
3.14 ด้านหลังรถไฟฟ้า.....	55
4.1 วงจรกำลังของมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์.....	56
4.2 การทดสอบวัดพลังงานที่จ่ายให้กับมอเตอร์.....	57
4.3 สัญญาณแรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์ที่ความถี่ 10Hz.....	57
4.4 สัญญาณแรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์ที่ความถี่ 20Hz.....	58
4.5 สัญญาณแรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์ที่ความถี่ 30Hz.....	58
4.6 สัญญาณแรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์ที่ความถี่ 40Hz.....	58
4.7 สัญญาณแรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์ที่ความถี่ 50Hz.....	59
4.8 วงจรการทดสอบด้วยเครื่อง Chassis Dynamometer.....	61
4.9 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าที่วัดผลของรถไฟฟ้า.....	61
4.10 การทดสอบด้วยเครื่อง Chassis Dynamometer.....	61
4.11 การวางตำแหน่งล้อในการทดสอบด้วยเครื่อง Chassis Dynamometer.....	62
4.12 ภาคแสดงผลด้วยเครื่อง Chassis Dynamometer.....	62

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.13 เส้นทางการทดสอบรถไฟฟ้า.....	64
4.14 วงจรการวัดผลในการทดสอบการขับเคลื่อนบนพื้นถนน.....	64
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์กับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น เปรียบเทียบที่ค่าความถี่ต่างๆ.....	66
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์กับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น เปรียบเทียบที่ค่าความถี่ต่างๆ.....	67
4.17 ลักษณะการเริ่มออกตัวของรถในการทดสอบ.....	68
4.23 ค่าผลของแรงดันของแหล่งจ่ายในขณะที่ขับเคลื่อน	70
5.1 ใ้รับส่งประธานพิธีเปิด.....	74
5.2 ขณะอยู่บนถนนไปชมบรรยากาศภายในงาน	74
5.3 บรรยากาศภายในรถขณะเดินทาง	75
5.4 บรรยากาศภายในรถขณะเดินทาง.....	75
5.5 ประธานพิธีเปิดเดินลงจากรถเข้าชมงาน.....	75
5.6 ใ้รับเป็นรถนำขบวนนักวิ่ง.....	76
5.7 Staffผู้ขับขีรถนำขบวน ณ จุดปล่อยตัวนักวิ่ง.....	76
5.8 บรรยากาศการนำขบวนนักวิ่ง.....	77

บทที่ 1

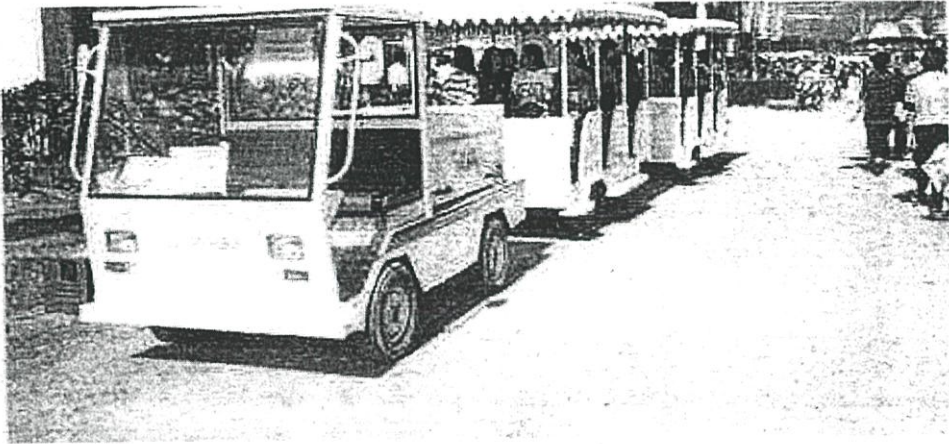
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สาเหตุและที่มาของปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์นี้ได้เริ่มมาจากปัญหาของการใช้พลังงานในรูปแบบอื่นมาขับเคลื่อนให้ยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่ง ซึ่งเป็นสาเหตุของมลภาวะต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อสังคมในบ้านเราไม่ว่าจะเป็นทางด้านฝุ่นควันและไอเสีย รวมไปถึงมลภาวะทางเสียงที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพสำหรับผู้ที่ดำรงชีวิตในสังคม จึงมีแนวคิดในการนำพลังงานไฟฟ้ามาขับเคลื่อนยานพาหนะแทนการใช้เชื้อเพลิงในรูปแบบอื่น เพื่อลดมลภาวะที่เกิดขึ้นจากเครื่องยนต์ โดยนำยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งด้านเชิงพาณิชย์นำมาดัดแปลงและออกแบบจัดสร้างรถไฟฟ้าขนาดใหญ่ต้นแบบเพื่อใช้ในการรับส่งผู้โดยสารในเขตชุมชน โดยในการนำเสนอการออกแบบและจัดสร้างรถไฟฟ้าต้นแบบสำหรับใช้รับส่งนักศึกษา อาจารย์และเจ้าหน้าที่ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เนื่องจากสถานะในปัจจุบันยานพาหนะทั่วไปส่วนใหญ่จะใช้เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงหรือก๊าซธรรมชาติ ผลที่ตามมาคือไอเสียจากการเผาไหม้จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมรวมทั้งเสียงดังประกอบกับอาณาบริเวณพื้นที่ใช้งานของสถาบันฯ ซึ่งเป็นพื้นที่ขนาดใหญ่ต้องใช้รถจักรยานยนต์รับจ้างเข้ามาสัญจรภายในเพื่อรับส่งนักศึกษารวมทั้งจากที่อาศัยอยู่ตามหอพักบริเวณรอบสถาบันฯ ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะทางเสียงและควัน รวมทั้งอันตรายจากความพลุกพล่าน อันไม่เหมาะสมกับสถานศึกษาที่ต้องการความเงียบสงบ ดังนั้นด้วยความร่วมมือกันระหว่างคณะวิศวกรรมศาสตร์และสมาคมศิษย์เก่าสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จึงได้จัดให้มีโครงการจัดสร้างรถไฟฟ้าต้นแบบสำหรับรับ-ส่งภายในสถาบันฯขึ้น เพื่อบรรเทาผลภาวะจากเสียงและควันอีกทั้งจำนวนรถจักรยานยนต์รับจ้าง เพื่อลดความพลุกพล่านลง โดยสร้างต้นแบบรถไฟฟ้าใช้ระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าเข้าไปแทนที่ระบบขับเคลื่อนเดิมซึ่งสามารถบรรทุกผู้โดยสารจำนวน 15 ที่นั่งขับเคลื่อนด้วยความเร็วเท่ากับ 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมงซึ่งมีความเร็วที่เหมาะสมกับการใช้งานภายในสถาบันฯและบริเวณใกล้เคียงโดยใช้ต้นกำลังเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส 6 ขั้ว ขนาด 22 กิโลวัตต์ และใช้เครื่องแปรผันพลังงาน(Inverter)ขนาด 30 กิโลวัตต์เป็นชุดควบคุมการขับเคลื่อน โดยใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นแบตเตอรี่ ขนาด 12 โวลต์ 65 Ah. จำนวน 48 ลูก โดยมีแนวคิดในการศึกษาการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ได้จากแบตเตอรี่เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดและนำข้อมูลที่ได้ออกมาวิเคราะห์เพื่อออกแบบรถไฟฟ้าสำหรับบรรทุกหรือโดยสารให้เหมาะสมกับพิกัดต่างๆของรถไฟฟ้าที่จะใช้งานในลักษณะนี้ต่อไปในอนาคต

1.1.1ความเป็นมาและงานวิจัยของรถไฟฟ้าในเมืองไทย

ความพยายามที่จะรวบรวมประวัติรถไฟฟ้าของเมืองไทย แต่ทำไม่ได้สักทีเพราะข้อมูลที่ให้ไว้ตามเวปไซด์อินเทอร์เน็ตนั้น ไม่ค่อยจะมีรายละเอียด รถไฟฟ้าของเมืองไทยที่ใช้รับภายในการรับส่งครั้งแรกก็เมื่องานเกษตรแฟร์ปี พ.ศ. 2536 ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์พบว่ามียอดไฟฟ้าออกมาวิ่งโฉบเฉี่ยวให้บริการแก่ผู้มาชมงานซึ่งรถดังกล่าวเป็นผลงานของใครไม่แน่ใจ ระหว่างคณะวิศวกรรมศาสตร์ หรือ NECTEC



รูปที่ 1.1 รถไฟฟ้าที่ใช้รับส่งคน

ในปีถัดมาหน่วยงานที่รับผิดชอบเรื่องสิ่งแวดล้อมคือ กองจัดการคุณภาพอากาศและเสียง กรมควบคุมมลพิษ ได้ร่วมมือกับบริษัทพลสิทธิ์ตุ๊กตุ๊กจำกัด และ USAID of USA และอีกหลายหน่วยงานเริ่มสร้างรถไฟฟ้าออกมาเพื่อใช้ในการทดสอบและพัฒนา เพื่อลดปัญหาอากาศเป็นพิษของกรุงเทพฯ โดยใช้อุปกรณ์จากต่างประเทศส่วนๆนอกจากนี้กองจัดการคุณภาพอากาศและเสียงยังมีโครงการวิจัยและพัฒนาารถโดยสารประจำทางต้นแบบที่ขับเคลื่อนด้วยกระแสไฟฟ้าอีกด้วย



รูปที่ 1.2 รถสามล้อไฟฟ้า



รูปที่ 1.3 รถไฟฟ้าที่พัฒนาของ NECTEC

ในบ้านเรามีหน่วยงานวิจัยและพัฒนารถไฟฟ้าขึ้นหลายหน่วยงาน ที่สำคัญที่สุดก็ต้องยกให้ NECTEC ครับ เพราะมีบุคลากรที่มีความรู้ความสามารถด้านนี้ และมีผลงานออกมามากมาย ผมเองเคยไปเยี่ยมชมและรบกวนขอข้อมูลมาหลายครั้ง NECTEC นั้นมีผลงานวิจัยและพัฒนารถไฟฟ้าออกมาหลายคัน ไม่ว่าจะเป็นรถเข็นคนพิการ รถตุ๊กตุ๊ก รถแวน รถเก๋งรวมไปถึงการค้นคว้าอุปกรณ์วงจรควบคุมที่สำคัญของรถไฟฟ้ามากมาย ถือว่าเป็นหน่วยงานวิจัยสนับสนุนอุตสาหกรรมการผลิตรถไฟฟ้าของบ้านเราที่สำคัญเลย นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยตามมหาวิทยาลัย และสถาบันต่างๆ อีกหลายที่สนใจที่จะทำการศึกษาและวิจัยเรื่องรถไฟฟ้ากันอย่างต่อเนื่อง

หลังจากที่ผู้ว่ากรุงเทพฯ คนใหม่ประกาศนโยบายที่จะลดสิ่งแวดล้อมของกรุงเทพมหานคร มีมาตรการหลายๆ อย่างออกมาควบคุมมลพิษ แต่ยังไม่เห็นนโยบายเรื่อง ZEV อย่างชัดเจนแต่มีโครงการหลายอย่างที่สนับสนุนการลดควันพิษจากเครื่องยนต์ ไม่ว่าจะเป็นรถไฟฟ้า หรือแม้กระทั่งเรือไฟฟ้าคลองแสนแสบ ส่วนความคืบหน้าของโครงการเรือไฟฟ้าหรือรถไฟฟ้าที่กรุงเทพฯ ให้การสนับสนุนนั้นเป็นไปอย่างไรผมไม่ได้ติดตามข่าวคราวอีกเลยครับ ดูเหมือนว่าจะเงียบหายไป ส่วนในแวดวงธุรกิจนั้น มี บริษัทพลสิทธิ์ตุ๊กตุ๊ก จำกัด ที่ผลิตรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าออกมาหลายคัน (ลักษณะคล้ายคันสีเหลืองข้างบน) และบริษัทรถไฟฟ้า (ประเทศไทย) จำกัด ที่ทำการผลิตรถไฟฟ้าออกมาหลายรูปแบบและมีการทำการตลาดกันบ้าง

1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายในการทำวิทยานิพนธ์นี้ จัดสร้างรถไฟฟ้าขนาดบรรทุก 15 ที่นั่ง ความเร็วสูงสุด 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็นความเร็วที่เหมาะสมในการใช้ภายในสถาบันฯ ต้องสามารถวิ่งได้ต่อเนื่องนาน 3 ชั่วโมง อัตราเร่ง 0.6 เมตรต่อวินาที เพื่อที่จะนำไปเป็นต้นแบบในการทดสอบและบันทึกข้อมูลการใช้พลังงานของความเหมาะสมในการใช้งานในการขนส่งมวลชนและบรรทุก รวมถึงประสิทธิภาพของการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า โครงสร้างของรถยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงน้ำมันเปลี่ยนเป็นระบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า โดยนำมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นต้นกำลังขนาด 22 กิโลวัตต์ 3 เฟส 6 ขั้ว มาขับเคลื่อนแทนเครื่องยนต์แบบเดิม ระบบควบคุมการขับเคลื่อนใช้เครื่องแปลงผันไฟฟ้าขนาด

30 กิโลวัตต์ โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อแรงดัน(V/f) ที่ป้อนให้กับมอเตอร์เพื่อเป็นการควบคุมความเร็วในการขับเคลื่อนให้เป็นที่ไปตามความต้องการของผู้ขับขี่ และทำการศึกษาลักษณะการนำไปใช้งานภายใต้เงื่อนไขของการขับเคลื่อนที่แตกต่างกันออกไปเพื่อทดสอบด้านการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าเช่นพลังงานต่อน้ำหนักบรรทุกและพลังงานต่อระยะทางรวมถึงหาประสิทธิภาพของรถไฟฟ้าต้นแบบที่ได้จัดสร้างขึ้น ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะนำไปวิเคราะห์ และออกแบบและปรับปรุงรถไฟฟ้าที่ใช้หลักการขับเคลื่อนในลักษณะเดียวกันเพื่อให้การใช้พลังงานของรถไฟฟ้าต้นแบบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุดเพื่อใช้เป็นข้อมูลการจัดสร้างรถไฟฟ้าสำหรับขนส่งหรือบรรทุกต่อไปในอนาคต

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สำหรับสมมติฐานของการศึกษาจะแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ คือ

- 1) ออกแบบและจัดสร้างรถต้นแบบที่ใช้ในการศึกษาและทดสอบถึงประสิทธิภาพการใช้งานเพื่อการขนส่งโดยทั่วไป โดยทำการศึกษาและออกแบบขั้นต้นถึงต้นกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนชนิดต่างๆ ข้อดีและข้อเสียความเหมาะสมในแง่การใช้งานและประสิทธิภาพ การเลือกและออกแบบอุปกรณ์ในการควบคุมระบบขับเคลื่อนศึกษาในหลักการที่ใช้ในการควบคุมและคุณสมบัติที่เหมาะสมในแง่ของการใช้งานการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า
- 2) การกำหนดแหล่งพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนเป็นในชนิดใดและประสิทธิภาพในการใช้งานซึ่งจะพิจารณาในแง่ของความเหมาะสมในการใช้พลังงานในการขับเคลื่อน
- 3) พิจารณาลักษณะการใช้งานของรถไฟฟ้าในการใช้กำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายพลังงานของรถไฟฟ้าว่าในการใช้งานนั้นกินกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เป็นลักษณะใดและเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานหรือไม่ และสามารถนำไปหาค่า Ah. ต่อระยะทางในการวิ่ง เพื่อนำข้อมูลในส่วนนี้ไปออกแบบพิกัดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมพลังงานต่อน้ำหนัก,ความเร็ว

1.4 ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการออกแบบรถไฟฟ้าในส่วนใหญ่นั้นจะต้องคำนึงถึงภาระในการขับเคลื่อนจะต้องใช้วิธีการคำนวณหาแรงต่างที่กระทำต่อการเคลื่อนที่ของรถนั้นคือหลักการทางกลศาสตร์และการคำนวณหาแรงในทางฟิสิกส์ เป็นวิธีและหลักการพื้นฐานในการหาแรงลัพธ์ต่างๆที่กระทำต่อการเคลื่อนที่ อีกส่วนหนึ่งคือหลักการของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดต่างๆและความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานสำหรับใช้เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดเช่นมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 1 เฟสและสามเฟสซึ่งจะนำเสนอหลักการของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสามเฟส เทคนิคการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบต่างๆ เช่นแบบแรงดันต่อความถี่แบบวงรอบเปิด (Open Loop V/F) การควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector

Control)และแบบไร้ตัวตรวจจับความเร็ว(Sensor Less Vector Control)เป็นต้นหลักการออกแบบการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าและการวิเคราะห์การใช้พลังงานอย่างเหมาะสมในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า

1.5 ขอบเขตการวิจัย

จุดมุ่งหมายในการทำวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษาถึงระบบการขับเคลื่อนและการใช้พลังงานที่สภาวะต่างๆในการใช้งานรถไฟฟ้า โดยทำการสร้างต้นแบบการศึกษาด้วยการนำโครงรถยนต์ที่ใช้ในเชิงขนส่งนำมาดัดแปลงให้เปลี่ยนมาใช้ระบบขับเคลื่อนที่เป็นระบบไฟฟ้าให้มีขนาดบรรทุก 15ที่นั่ง ความเร็วสูงสุด30 กิโลเมตรต่อชั่วโมงเป็นความเร็วที่เหมาะสมในการใช้ภายในสถาบันฯ ต้องสามารถวิ่งได้ต่อเนื่องนาน 3 ชั่วโมง อัตราเร่ง 0.6 เมตรต่อวินาที ซึ่งใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส 6 ขั้ว ขนาด 22 กิโลวัตต์ มาเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อน โดยใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลท์ 65Ah. จำนวน 48 ลูกนำมาต่ออนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันไฟตรง 576 โวลท์ และใช้อินเวอร์เตอร์ขนาด 30 กิโลวัตต์เป็นชุดควบคุมการขับเคลื่อนโดยทำการศึกษาถึงการขับเคลื่อนในแบบต่างๆที่เหมาะสมกับการใช้งานที่สภาวะการใช้งานที่ในการรับส่งโดยสาร และศึกษาการใช้พลังงานของรถจากแบตเตอรี่ที่ใช้ในการขับเคลื่อนที่สภาวะต่างๆของการขับเคลื่อน เพื่อนำข้อมูลไปพัฒนาการออกแบบขนาดของแบตเตอรี่,ขนาดพิกัดของมอเตอร์และโครงสร้างรถที่เหมาะสมกับการใช้งานของรถไฟฟ้าให้ได้ประสิทธิภาพสูงขึ้น

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

สำหรับขั้นตอนของการศึกษางานวิจัยมีดังนี้

- 1) ทำการศึกษาและงานที่เกี่ยวข้องและพัฒนาการต่างของรถไฟฟ้าภายในประเทศและในต่างประเทศ เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนาและออกแบบรถไฟฟ้าต้นแบบที่ใช้
- 2) ทำการศึกษาและออกแบบรถต้นแบบรวมถึงการจัดสร้างให้สำเร็จเพื่อใช้ในการศึกษาและเก็บผลข้อมูลที่จำเป็นต่างๆ
- 3) ทำการวิเคราะห์ถึงการออกแบบระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าโดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสเป็นตัวขับเคลื่อน ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสามเฟสเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อน
- 4) ทำการศึกษาผลของการใช้พลังงานในลักษณะของการขับเคลื่อนในแบบต่างๆของการขับเคลื่อนโดยปรับเปลี่ยนความถี่และหาจุดใช้งานที่เหมาะสมที่สภาวะต่างๆ
- 5) ทำการศึกษาผลของการใช้พลังงานในลักษณะของการขับเคลื่อนในแบบต่างๆของการขับเคลื่อนโดยมีเงื่อนไขภายใต้สภาวะการใช้งานในลักษณะต่างๆ

- 6) ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบให้เห็นถึงผลของการใช้งานของพลังงานของรถไฟฟ้าภายใต้สถานะการใช้งานแบบต่างๆเปรียบเทียบกับการออกแบบไว้
- 7) นำเสนอการขับเคลื่อนที่เหมาะสมต่อสถานะการใช้งานแบบต่างๆให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด
- 8) ทำการศึกษการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าในขณะที่ขับเคลื่อนภายใต้สถานะต่างๆ
- 9) ทำการวิเคราะห์ถึงการใช้พลังงานของระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าโดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสเป็นตัวขับเคลื่อน ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสามเฟสเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนซึ่งใช้กำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เปรียบเทียบกับระยะทางที่รถไฟฟ้าวิ่งได้และอัตราการใช้พลังงานต่อน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 บทนำ

ในการออกแบบและสร้างรถไฟฟ้าที่ใช้เพื่อการขนส่งหรือบรรทุกผู้โดยสาร ต้องการประสิทธิภาพของรถไฟฟ้าที่จัดสร้างขึ้นนั้นให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานสูงสุด โดยจะต้องอาศัยหลักการทางวิศวกรรมหลายด้านประกอบกันเพื่อออกแบบและสร้างรถไฟฟ้าเพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ดังนั้นในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงเทคนิคต่างๆที่ใช้ในการออกแบบรถไฟฟ้าเช่น หลักการทางกลศาสตร์มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเทคนิคการควบคุมความเร็วของมอเตอร์และแหล่งพลังงานชนิดต่างๆ จึงได้ทำการพัฒนาสร้างรถต้นแบบที่ใช้การศึกษาและวิเคราะห์การใช้งานและวิเคราะห์การใช้พลังงานของรถไฟฟ้าเพื่อที่จะนำข้อมูลไปใช้ในการออกหรือพัฒนาให้รถหรือการใช้งานให้มีขีดความสามารถสูงขึ้นและเหมาะสมกับการใช้งาน

2.2 หลักการทางกลศาสตร์

แรงต้านทานและกำลังที่ต้องการในการขับเคลื่อน ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับแรงต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของรถยนต์นั้นเป็นพื้นฐานสำคัญเนื่องจากเป็นตัวที่จะกำหนดขนาดของโมเมนต์ และกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อน และยิ่งไปกว่านั้นยังเป็นตัวกำหนดอัตราการใช้กำลังของรถอีกด้วย สำหรับการเขียนสมการหลักของการเคลื่อนที่นั้นต้องอาศัยการตัดวัตถุอิสระ ดังในรูป 2.1 โดยจะพิจารณาส่วนล้อและตัวรถว่าเป็นวัตถุอิสระ ในการพิจารณาแรงที่กระทำบนวัตถุนั้น แรงในแนวตั้งฉากกับพื้นของตัวรถบางตัวจะถูกละไว้ เพราะไม่มีความสำคัญต่อการพิจารณาขนาดของแรงต้านทานการเคลื่อนที่เมื่อพิจารณาวัตถุอิสระในรูป 2.1 จะกำหนดให้ตัวแปรของตัวรถบรรทุกมีเลขห้อยเป็น 1 และสำหรับตัวแปรของตัวรถพ่วงจะมีเลขห้อยเป็น 2 ซึ่งเมื่อไม่พิจารณาการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของตัวรถทั้งสองแล้ว จะได้สมการการเคลื่อนที่ของรูป 2.1 ดังสมการที่ 2.1

$$(m_1 + m_2)a = -\vec{F}_L - (G_1 + G_2)\sin\alpha + \sum_{j=1}^n X_j \quad (2.1)$$

โดยกำหนดให้

G_1, G_2 น้ำหนักของตัวรถ (N)

m_1, m_2 มวลของตัวรถ (kg)

α เป็นมุมเอียงของถนน (องศา)

$\sum_{j=1}^n X_j$ ผลรวมของแรงในแนวแกน X โดย j เป็นหมายเลขของเพลา (N)

\vec{F}_L แรงต้านทานจากอากาศ (N)

a ความเร่งเชิงเส้นของรถ (m/s^2)

จากรูป 2.1 ค. เมื่อพิจารณาที่เพลลา j จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.2

$$m_{Rj} \cdot a_{Rj} = -X_j + \bar{F}_{xj} - G_{Rj} \cdot \sin \alpha \quad (2.2)$$

สมการเคลื่อนที่เชิงมุมของล้อจะให้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.3)

$$J_{Rj} \cdot \varphi_{Rj} = M_{Rj} - \bar{F}_{xj} \cdot r_j - \bar{F}_{zj} \cdot e_i \quad (2.3)$$

เมื่อ	G_{Rj}	เป็นน้ำหนักของล้อทั้งหมดที่เพลลา j (N)
	m_{Rj}	มวลรวมของล้อทุกล้อที่เพลลา j (kg)
	J_{Rj}	ผลรวมของโมเมนต์ความเฉื่อยทั้งหมดของล้อที่เพลลา j (kgm^2)
	\bar{F}_{xj}	เป็นแรงรวมของแรงในแนวสัมผัสของแต่ละล้อ (N)
	\bar{F}_{zj}	เป็นแรงรวมในแนวตั้งของล้อทุกล้อ (N)
	M_{RjJ}	เป็นโมเมนต์ขับเคลื่อนของเพลลา j (N-m)
	φ_R	ความเร่งเชิงมุมของล้อ (rad/s^2)
	a	ความเร่งเชิงเส้นของรถ (m/s^2)
	e	ระยะเยื้องของภาระในแนวตั้งจากกับพื้นของล้อ (m)
	r	รัศมีสถิตของล้อ (m)

สำหรับการเคลื่อนที่เชิงเส้นจะได้ $a_{r,j} = a$ และเมื่อกำจัดเทอม X_j และ \bar{F}_{xj} ออกจากสมการ (2.1) ถึง (2.3) จะได้

$$\left(m_1 + m_2 + \sum_{j=1}^n m_{r,j} \right) a + \sum_{j=1}^n \frac{J_{Rj}}{r_j} \varphi_{Rj} = \sum_{j=1}^n \frac{M_{Rj}}{r_j} - \left(G_1 + G_2 + \sum_{j=1}^n \bar{F}_{zj} \frac{e_j}{r_j} \right) \quad (2.4)$$

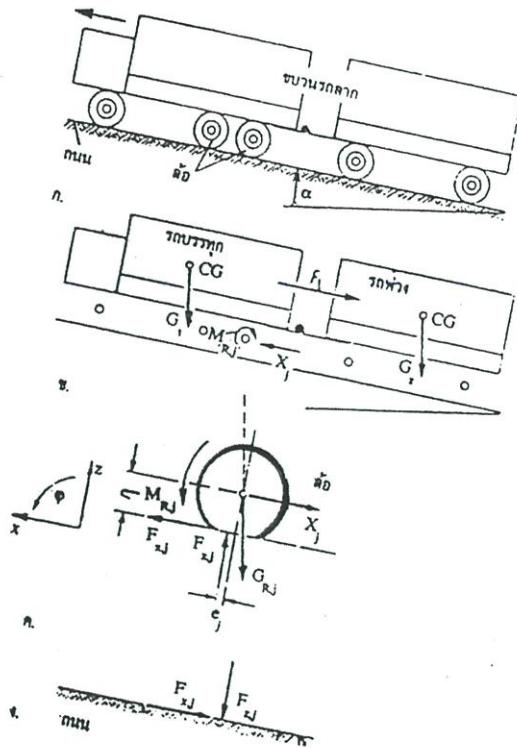
เมื่อให้มวลทั้งหมดเป็น m จะได้

$$\left(m_1 + m_2 + \sum_{j=1}^n m_{r,j} \right) = m$$

$$G_1 + G_2 + \sum_{j=1}^n G_{Rj} = G = mg$$

เมื่อแทนค่าความเร่งเชิงมุม φ ด้วยความเร่งเชิงเส้น a ในสมการที่ (2.4) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.5)

$$\sum_{j=1}^n \frac{M_{Rj}}{r_j R_j} = \left(m + \sum_{j=1}^n \frac{J_{Rj}}{r_j R_j} \right) a + G \sin \alpha + \bar{F}_L + \sum_{j=1}^n \frac{\bar{F}_{zj} e_j}{r_j R_j} \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.1 แรงที่กระทำต่อรถ

ก. ขบวนรถพุ่ง ข. แรงที่กระทำบนตัวรถ ค. แรงที่กระทำกับล้อ ง. แรงที่กระทำกับผิวถนน

จะเห็นได้ว่าเทอมขวาของสมการ (2.5) ประกอบด้วยพจน์ 4 พจน์ด้วยกันคือ

$$\text{แรงต้านจากการกลิ้งของล้อ (N)} \quad \vec{F}_R = \sum \vec{F}_{-j} \frac{e_j}{r_j}$$

$$\text{แรงต้านจากอากาศ (N)} \quad \vec{F}_L \cong 50$$

$$\text{แรงต้านเนื่องจากความชัน (N)} \quad \vec{F}_{st} = G \cdot \sin \alpha$$

$$\text{แรงต้านจากความเร่ง (N)} \quad \vec{F}_B = \left(m + \sum_{j=1}^n \frac{j_{Rj}}{r_j R_j} \right) a$$

เทอมซ้ายมือของสมการ (2.5) คือผลรวมของโมเมนต์ข้อับเคลื่อนทั้งหมด หาดด้วยรัศมีสถิตของล้อ r_j ซึ่งผลหารก็คือแรงจุดทั้งหมดนั่นเอง โดยแรงจุดจะต้องเอาชนะแรงต้านทานการเคลื่อนที่ทั้งหมด ดังแสดงไว้ในสมการ (2.6)

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_B + \vec{F}_R + \vec{F}_L + \vec{F}_{ST} \quad (2.6)$$

$\sum \vec{F}$ เป็นแรงที่ใช้ขับเคลื่อน (N)

\vec{F}_B เป็นแรงที่ใช้ในการเร่ง (N)

\vec{F}_R เป็นแรงต้านทานจากการกลิ้งของล้อ (N)

\vec{F}_L เป็นแรงต้านทานจากอากาศ (N)

\vec{F}_{ST} เป็นแรงต้านทานจากการไต่ความชัน (N)

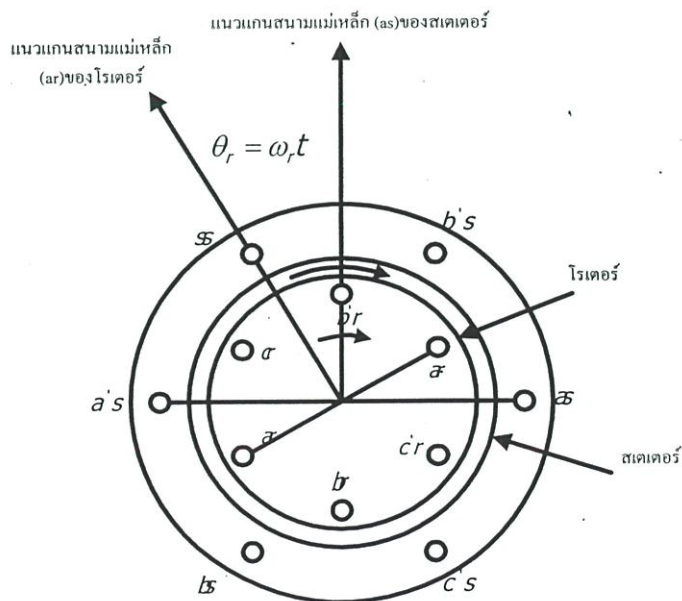
2.3 ทฤษฎีเบื้องต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor)

ในปัจจุบันมอเตอร์เหนี่ยวนำถูกนำมาใช้ในระบบปรับความเร็วรอบอย่างกว้างขวางและเพิ่มมากขึ้นในอุตสาหกรรม รูปที่ 2.2 แสดงมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส 2 ขั้วแม่เหล็กในอุดมคติ โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ส่วนอยู่กับที่(Stator) และส่วนหมุน(Rotor)

- ส่วนอยู่กับที่มีหน้าที่ยึดขดลวดอาร์มาเจอร์(Armature)ที่บรรจุอยู่ในสล๊อท
- โรเตอร์แบ่งออกเป็นสองแบบคือ

1. แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage rotor) แกนโรเตอร์ทำด้วยแผ่นเหล็กลามิเนตเซาะผิวด้านนอกให้เป็นร่อง โดยรอบเรียกว่า สล๊อท(Slot) ตรงกลางแผ่นจะเจาะรูสำหรับสอดเพลลา เมื่อนำแผ่นเหล็กนี้มาอัดเข้าด้วยกันจะได้เป็นแกนโรเตอร์ นำแกนโรเตอร์ไปวางในพิมพ์เพื่อฉีดอลูมิเนียมเหลวเข้าไปจะได้อลูมิเนียมอัดแน่นอยู่ในร่องสล๊อท และมีครีบยื่นออกไปสองข้างเพื่อใช้เป็นใบพัดระบายความร้อน

2. แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (Wound Rotor) โรเตอร์แบบนี้แตกต่างจากกรงกระรอกคือมีขดลวดทองแดงพันรอบโรเตอร์ ส่วนปลายของขดลวดนี้จะต่อกับสลีปริง(Slip ring)ซึ่งมีแปรงถ่านอยู่ มีข้อจำกัดคือ โรเตอร์ต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วที่เกิดจากสเตเตอร์



รูปที่ 2.2 ลักษณะการวางขดลวดของมอเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้วแม่เหล็กอย่างง่าย

2.3.1 หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำจะประกอบด้วยส่วนสเตเตอร์และส่วนโรเตอร์ เมื่อจ่ายไฟฟ้าให้ขดลวดบนสเตเตอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนตัดผ่านขดลวดบนโรเตอร์ส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำและแรงบิดที่ทำให้โรเตอร์หมุน โดยส่วนโรเตอร์จะทำหน้าที่รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟ โดยผ่านส่วนสเตเตอร์ โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กอยู่ในแอร์แกป (Air Gap) ซึ่งอยู่ระหว่างส่วนสเตเตอร์และโรเตอร์ สนามแม่เหล็กนี้จะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed) ตามสมการ

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (2.7)$$

โดยที่ N_s = ความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็ก (rpm)

f = ความถี่ที่จ่ายให้ขดลวดสเตเตอร์ (Hz)

P = จำนวนขั้วแม่เหล็กของขดลวดสเตเตอร์

โดยขณะที่โรเตอร์อยู่กับที่จะมีการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลในโรเตอร์ ซึ่งมีความถี่เดียวกันกับแหล่งจ่ายไฟ แต่ในขณะที่โรเตอร์มีความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็กจะไม่มีการเหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์ ดังนั้นจะไม่มีแรงบิด (Torque) เกิดขึ้นและขณะที่โรเตอร์มีความเร็ว N_r ใด ๆ ที่มีความแตกต่างจากความเร็ว N_s จะทำให้เกิดความเหนี่ยวนำขึ้นบนโรเตอร์และทำให้เกิดแรงบิด ความแตกต่างสัมพัทธ์ของความเร็วทั้ง 2 นี้เรียกว่า สลิป (Slip)

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (2.8)$$

$$= \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

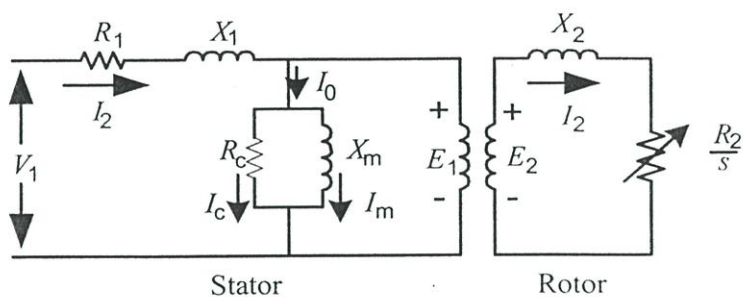
โดย ω_s คือ ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ (Stator Angular Frequency)

ω_r คือ ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ (Rotor Angular Frequency)

s คือ Slip

2.3.2 วงจรสมมูลย์

เนื่องจากว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำนี้อาศัยหลักการทำงานเช่นเดียวกับหม้อแปลง จะต่างกันก็ตรงที่มอเตอร์มีส่วนที่ 2 (Secondary) เคลื่อนที่หรือหมุนได้ ดังนั้นจึงเขียนวงจรสมมูลย์ได้เช่นเดียวกับหม้อแปลงธรรมดา ดังรูปซึ่งเป็นวงจรสมมูลย์ต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 2.3 เป็นวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

- X_m คือ ค่ารีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก
- X_1 คือ ค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลของขดลวดสเตเตอร์
- X_2 คือ ค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลของขดลวดโรเตอร์
- R_1 คือ ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์
- R_2 คือ ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์
- R_c คือ ค่าความต้านทานของแกนเหล็ก
- I_c คือ กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก
- I_m คือ กระแสไฟฟ้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ 2.3 กระแส I_0 ไหลในขดลวดสเตเตอร์เป็นกระแสส่วนที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) และ การสูญเสียในขดลวด (Copper loss) การเปลี่ยนแปลงมีค่าน้อยมากไม่ว่า โหลดของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงอย่างไรก็ตาม ดังนั้นถ้าย้ายวงจรขนานที่ I_0 ไหลผ่านมาไว้ที่ ต้นทางของวงจรสมมูลจะทำให้วิเคราะห์ทฤษฎีที่เกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำง่ายขึ้น โดยมีเหตุผลดังนี้คือ

1. การย้ายวงจรขนานที่กระแส I_0 ไหลผ่านนี้จะทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยเพราะ R_1 และ X_1 มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับ X_m แต่จะได้วงจรสมมูลที่พิจารณาง่าย
2. วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดจะไม่คิดค่า I_0 ซึ่งเป็นส่วนประกอบเล็ก ๆ เมื่อเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่พิกัด แต่ในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำทำเช่นนั้นไม่ได้ เพราะค่า I_0 มีค่าถึง 30-50% ของกระแสไฟฟ้าที่พิกัด ทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม X_m เป็นจำนวนมากจึงต้องคงค่า X_m ไว้ในวงจรสมมูล

วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถย้ายข้างรวมกันได้ ถ้าทราบค่าอัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ ในทำนองเดียวกันถ้าทราบค่าอัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของขดลวดที่สเตเตอร์กับโรเตอร์ (Turn ratio : a) ก็จะย้ายค่าในวงจรสมมูลย์ของขดลวดทั้งสองมารวมกันได้เช่นกัน

ในที่นี้ต้องการย้ายค่าของวงจรเทียบเคียงโรเตอร์มายังวงจรเทียบเคียงสเตเตอร์ซึ่งหาค่าต่าง ๆ ของวงจรสมมูลย์ได้ดังนี้คือ

$$E'_2 = aE_2 = E_1 \quad (2.9)$$

เมื่อ $E'_2 =$ แรงดันไฟฟ้าขณะโรเตอร์อยู่กับที่ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

$$I'_2 = \frac{I_2}{a} \quad (2.10)$$

เมื่อ $I'_2 =$ กระแสของโรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

$$R'_2 = a^2 R_2 \quad (2.11)$$

$$X'_2 = a^2 R_2 \quad (2.12)$$

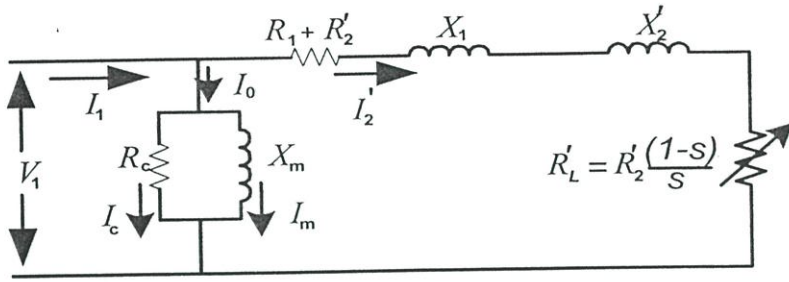
เมื่อ $R'_2 =$ ความต้านทานของโรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

$X'_2 =$ รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

จากรูปที่ 2.3 ค่าของ $\frac{R_2}{s}$ สามารถแยกแถมออกได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{R_2}{s} &= R_2 + \frac{R_2}{s} + R_2 \\ &= R_2 + R_2 \frac{(1-s)}{s} \end{aligned} \quad (2.13)$$

นำค่าที่ได้จากสมการ (2.9 – 2.13) มาเขียนวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะได้วงจรสมมูลย์ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลแบบใกล้เคียงของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 2.4 ส่วนโหลดความต้านทาน R'_L มีค่าเท่ากับ

$$R'_L = R'_2 \frac{(1-s)}{s} \quad (2.14)$$

2.3.3 การวิเคราะห์ห้วงจรสมมูล

กำลังขาเข้าของมอเตอร์ $P_{in} = 3V_1 I_1 \cos \theta \quad (2.15)$

กำลังสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ $P_{ls} = 3I_1^2 R_1 \quad (2.16)$

กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านช่องว่างอากาศ (air gap) $P_g = \frac{3I_2'^2 R'_2}{s} \quad (2.17)$

กำลังสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์ $P_r = 3I_2'^2 R'_2 \quad (2.18)$

กำลังไฟฟ้าขาออก $P_o = P_g - P_r$
 $= \frac{3I_2'^2 R'_2 (1-s)}{s} \quad (2.19)$

กำลังที่เพลา $P_{sh} = P_o - P_{fw} \quad (2.20)$

P_{fw} คือ กำลังที่สูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและกำลังลมต้าน

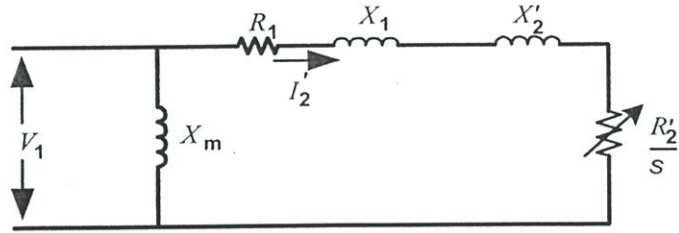
แรงบิดของมอเตอร์ $T_e = \frac{P_o}{\omega_r} = \frac{3I_2'^2 R'_2 (1-s)}{s(1-s)\omega_s} = \frac{3I_2'^2 R'_2}{s\omega_s} \quad (2.21)$

ซึ่ง $\omega_s = \frac{2\pi N_s}{60} = \frac{2\pi}{60} \left[\frac{120f}{P} \right] = \frac{4\pi f}{P} \quad (2.22)$

โดย P คือ จำนวนขั้วของมอเตอร์

แทนสมการ (2.21) ในสมการที่ (2.22) จะได้

$$\text{แรงบิดของมอเตอร์} \quad T_e = \frac{3I_2'^2 R_2' P}{4\pi f S} \quad (2.23)$$



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลอย่างง่ายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

วงจรสมมูลที่อยู่ในรูปที่ 2.4 สามารถทำให้ง่ายขึ้นดังในรูปที่ 2.5 ซึ่งกระแส I_2' สามารถหาได้ดังนี้

$$I_2' = \frac{V_s}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (2.24)$$

สามารถหาค่าสลิปที่แรงบิดสูงสุดจากสมการดิฟเฟอเรนเชียลได้

$$S_m = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (2.25)$$

เมื่อไม่คำนึงถึงผลของพารามิเตอร์ทางด้านสเตเตอร์คือ R_1 และ X_1 ซึ่งไม่มีผลต่อผลรวมของกำลังเอาต์พุตของมอเตอร์ จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$I_2' = \frac{V_s}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{S}\right)^2 + (X_2')^2}} = \frac{SV_s}{\sqrt{(R_2')^2 + S^2 X_2'^2}} \quad (2.26)$$

$$S_m = \frac{R_2'}{X_2'} \quad (2.27)$$

นำสมการที่ (2.26) และ (2.27) แทนในสมการ (2.24) จะได้แรงบิดสูงสุดดังสมการ

$$T_m = \frac{3PV_s^2}{8\pi f X_2'} \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } \omega &= 2\pi f \\ X_2' &= 2\pi f L_2 \end{aligned}$$

ทำการแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (2.28) จะได้

$$T_m = \frac{3P \left(\frac{V_s}{f} \right)^2}{16\pi^2 L_2} \quad (2.29)$$

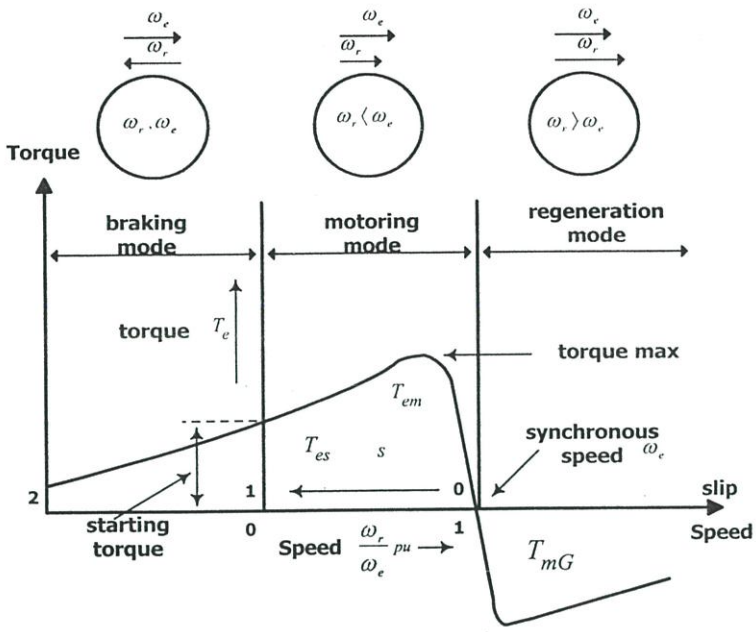
จะเห็นว่าแรงบิดสูงสุดมีค่าคงที่ที่ต่อเมื่อ (V_s/f) หรือ ϕ คงที่ เนื่องจากความสัมพันธ์จาก $E = k\phi f$ หรือ $E/f = k\phi$ นั้นเอง ทำให้ได้ว่าการควบคุมความเร็วโดยการให้แรงบิดคงที่สามารถทำได้โดยรักษาให้ E/f มีค่าคงที่นั่นเอง

2.4 วิธีการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

วิธีการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ เมื่อพิจารณาจากสมการความเร็วของมอเตอร์สมการ (2.30) ซึ่งมาจากสมการ (2.1) และ (2.2)

$$N_r = (1-S) \frac{(120f)}{p} \quad (2.30)$$

ดังนั้นการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ทำได้โดยการควบคุมความถี่ของแรงดันไฟฟ้า (f) สลิปของโรเตอร์ (S) และจำนวนขั้วของสเตเตอร์ (p) จากสมการ (2.23) เราสามารถนำมาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 2.5 โดยกำหนดให้แรงดันและความถี่คงที่ จากค่าของสลิปในช่วงต่าง ๆ ทำให้เราสามารถแบ่งการทำงานของมอเตอร์ได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงปกติคือช่วงที่ $0 < S < 1$. ช่วงเบรก (plugging mode) คือช่วงที่ $1 < S < 2$ และช่วงเครื่องกำเนิดเหนี่ยวนำ (regeneration mode) ถึงช่วงที่ $S < 0$ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็ว ขณะแรงดันและความถี่คงที่

จากรูปที่สามารถหาแรงบิดเริ่มแรง (starting torque) โดยแทน $S = 1$ ในสมการ (2.23) จะได้แรงบิดเริ่มสตาร์ท

$$T_{es} = \frac{3I_2'^2 R_2' P}{4\pi f} \quad (2.31)$$

ในช่วงปกติ (Motoring) มอเตอร์จะทำงานตามปกติ คือรับไฟฟ้า 3 เฟสมาสร้างสนามแม่เหล็กหมุนและทำให้โรเตอร์หมุนตาม สำหรับช่วงเบรก (Plugging) จะเกิดขึ้นได้ในตัวอย่าง เช่น การถ่วงลำดับเฟสของระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่จ่ายให้มอเตอร์แบบทันทีทันใด มีผลทำให้สนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์หมุนสวนกับการหมุนของโรเตอร์ ส่งผลให้เกิดการเบรกของโรเตอร์ แต่ผลที่ตามมาอีกอย่างหนึ่งก็คือ กระแสจะสูงมาก ๆ ทำให้มอเตอร์ร้อนจนเกิดความเสียหายได้ ส่วนในช่วงของการคืนพลังงาน (Regeneration) จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ เครื่องจักรกลอีกตัวหนึ่งมาหมุนโรเตอร์ในทิศทางเดิมที่หมุนอยู่ แต่เร่งความเร็วของโรเตอร์ไปจนเกินความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ ผลก็คือโรเตอร์จะมองว่าสนามแม่เหล็กที่หมุนตัดผ่านตัวมันถูกกลับทิศทางตามหลักการความเร็วสัมพันธ์ กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบน โรเตอร์จึงกลับทิศทางไปด้วย ส่งผลให้กระแสในสเตเตอร์กลับทิศทาง ทำให้กำลังเป็นลบ และมอเตอร์จะกลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยแปลงพลังงานกลจากเครื่องต้นกำลังที่นำมาหมุนตัวมันให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าไหลกลับเข้าระบบ (line) ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นในระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์อยู่เสมอ เพราะเมื่อใดก็

ตามที่เราลดความถี่ลงเพื่อปรับให้มอเตอร์หมุนช้า ด้วยผลของความเฉื่อยที่โหลดมีอยู่ จะทำให้โรเตอร์ หมุนเร็วกว่าสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามความถี่ที่เรากำหนด ปฏิกิริยาการคืนพลังงานสู่ระบบ (Regeneration) ก็เกิดขึ้นเมื่อนำสมการที่ (2.24) แทนในสมการ (2.29) จะได้แรงบิดสูงสุดของช่วงที่ทำงานเป็นมอเตอร์จะได้ตาม (Motoring break-down torque)

$$T_m = \frac{3P \left(\frac{V_s}{f} \right)^2}{16\pi^2 L_2} \quad (2.32)$$

และเมื่อความเร็วโรเตอร์ (N_r) มากกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ (N_s) ทำให้ค่าสลิปติดลบและเมื่อแทนในสมการที่ 2.29 จะได้แรงบิดสูงสุดของช่วงที่ทำงานเป็นเครื่องกำเนิด(regeneration breakdown torque)

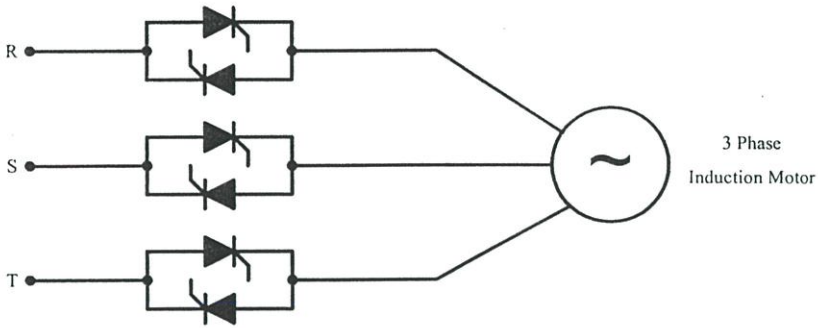
$$T_{mG} = \frac{3P \left(\frac{V_s}{f} \right)^2}{16\pi^2 L_2} \quad (2.36)$$

T_{mG} = แรงบิดสูงสุดของช่วงเป็นเครื่องกำเนิด

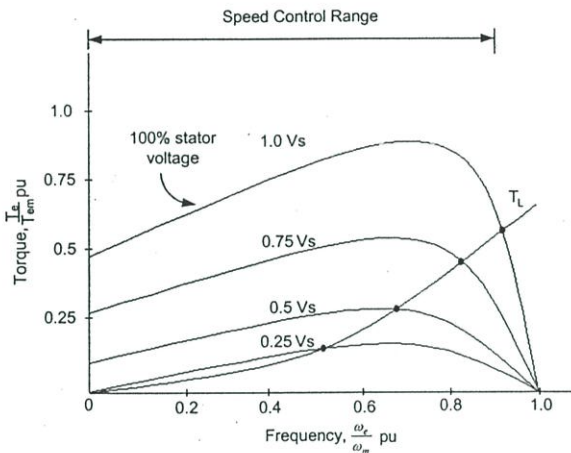
ดังนั้นในการควบคุมมอเตอร์ถ้ามีการควบคุมให้ความเร็วของโรเตอร์ N_r มีความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัสจะทำให้มอเตอร์กลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำป้อนพลังงานย้อนเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้าทำให้มีแรงบิดด้านกลับขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำลดความเร็วลง

2.4.1 การควบคุมแรงดันของสเตเตอร์

เมื่อทำการควบคุมแรงดันของสเตเตอร์การควบคุมเช่นนี้จะสามารถควบคุมความเร็วได้ใน ช่วงแคบ และไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องการแรงบิดเริ่มต้นสูง สำหรับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด - ความเร็ว ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากการควบคุมแรงดันสเตเตอร์นี้แสดงดังรูปที่ 2.6 ซึ่งแรงบิดจะเปลี่ยนตามแรงดันที่จ่ายให้ขดสเตเตอร์ของมอเตอร์ วงจรการควบคุมแรงดันทางด้าน สเตเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.7 วงจรการควบคุมแรงดันด้านสเตเตอร์

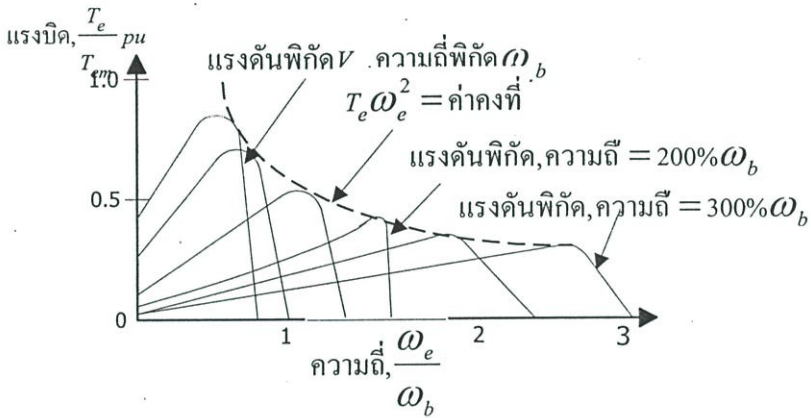


รูปที่ 2.8 กราฟแรงบิด - ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

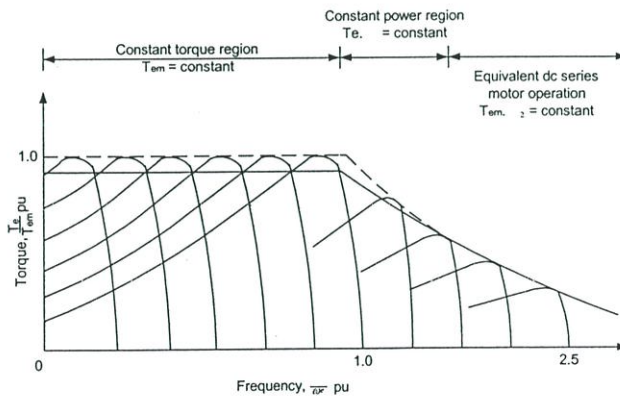
การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยการควบคุมแรงดันของสเตเตอร์จะใช้การควบคุมแบบควบคุมเฟส (Phase Control) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.6 เป็นวิธีที่ทำได้ง่าย และมีราคาถูกระบบจะมีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ของกำลังสูญเสียในโรเตอร์ของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามค่าของสลิป (s) นอกจากนี้แล้วการสูญเสียในสเตเตอร์จะเพิ่มขึ้นด้วยเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกระแสในสเตเตอร์ เมื่อสลิปเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์รวมทั้งแรงบิดจะลดลงมากโดยเฉพาะที่ความเร็วต่ำเพราะมีค่าสลิปสูง นอกจากนี้วิธียังทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์ขึ้นทั้งใน AC LINE และในตัวมอเตอร์เอง ทำให้มีการสูญเสียเพิ่มมากขึ้นและยังทำให้เพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power factor) ของระบบลดลงตามความเร็วของมอเตอร์ด้วย จากข้อเสียที่ได้กล่าวมาทำให้การใช้งานของระบบควบคุมความเร็วโดยใช้การควบคุมแรงดันทางด้านสเตเตอร์ถูกจำกัดอยู่เฉพาะในระบบที่มีขนาดเล็กและขนาดกลาง ซึ่งต้องการราคาถูกรมากกว่าประสิทธิภาพและเพาเวอร์แฟคเตอร์ โดยทั่วไปจะใช้กับโหลดที่ต้องการแรงบิดเริ่มต้นต่ำ เช่น พัดลมหรือปั๊ม ซึ่งจะมีแรงบิดเพิ่มตามความเร็วกำลังสองทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น

2.4.2 การควบคุมด้วยการเปลี่ยนแรงดันและความถี่ (Variable Voltage, Variable Frequency: VVVF)

เป็นเทคนิคที่รู้จักกันดีและเหมาะสมที่สุดสำหรับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งจะใช้อินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมแรงดันและความถี่ทางด้านเอาต์พุตให้เป็นไปตามที่ต้องการของหลักการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ผลของการเปลี่ยนแปลงความถี่ ถ้านำสมการ (2.25) มาเขียนกราฟโดยเปลี่ยนแปลงความถี่ให้มากกว่าความถี่พิกัดในขณะที่แรงดันคงที่ ผลที่ได้จะเป็นดังรูปที่ 2.8 ซึ่งจะเห็นว่าค่าแรงบิดสูงสุดจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการที่ความถี่เพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าแรงดันมากขึ้น มีผลทำให้กระแสลดลง เมื่อกระแสลดลงฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศ (air gap flux) ซึ่งเป็นผลผลิตโดยตรงของกระแสก็จะลดลงตาม แรงบิดของมอเตอร์ซึ่งเกิดจากแรงปฏิกิริยาของสนามแม่เหล็กก็จะลดลงด้วย



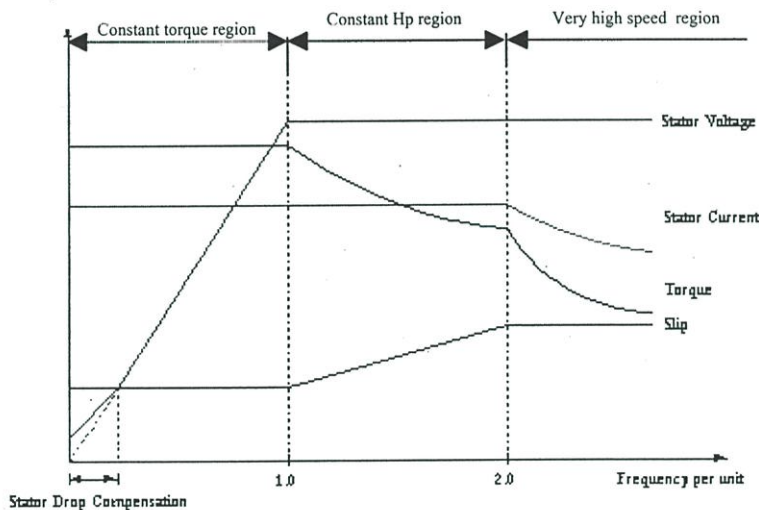
รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์แรงบิดกับความถี่รอบเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่



รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์แรงบิด ความถี่รอบที่อัตราส่วน $\frac{V_s}{\omega_b}$ คงที่

ในทางตรงกันข้ามถ้าลดความถี่ลงในขณะที่คงค่าแรงดันไว้ ผลก็คือความเร็วลดลง ซึ่งจะส่งผลให้กระแสมากขึ้น เป็นสาเหตุให้ฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศมากขึ้นเรื่อย ๆ และเกิดการ

อิ่มตัว (Saturate) ในที่สุด นอกจากนี้กระแสที่มากขึ้นจะทำให้มอเตอร์ร้อนกว่าปกติ ดังนั้นการปรับความถี่ในพื้นที่ของกราฟที่ต่ำกว่าความถี่พิกัดนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องลดค่าแรงดันลง เพื่อคงค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กไว้ไม่ให้มากเกินไป รูปที่ 2.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์แรงบิดความเร็วรอบ ซึ่งเป็นผลจากการคงค่า ให้คงที่ไว้ค่าแรงบิดสูงสุดซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2.25) จึงมีค่าคงที่ ยกเว้นที่บริเวณความถี่ต่ำๆ ซึ่งบริเวณนั้นแรงดันก็ต่ำด้วยเป็นผลทำให้สัดส่วนของแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานในขดลวดต่อแรงดันที่ป้อนมีค่าเด่นชัดขึ้น กระแสที่ควรจะคงที่จึงตกลง ซึ่งเป็นผลให้ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กลดลง และแรงบิดก็ลดลงในที่สุด เพื่อเป็นการแก้ปัญหาในย่านความถี่ต่ำ จึงมักจะเพิ่มแรงดันเข้าไป เพื่อให้มากกว่าแรงดันตกคร่อม (Voltage drop) ที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์ ซึ่งเรียกแรงดันในส่วนนี้ว่า “Boost Voltage” โดยทั่วไปแล้วเราจะเรียกระบบควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธีเปลี่ยนแปลงทั้งแรงดันและความถี่ว่า VVVF (Variable Voltage, Variable Frequency)



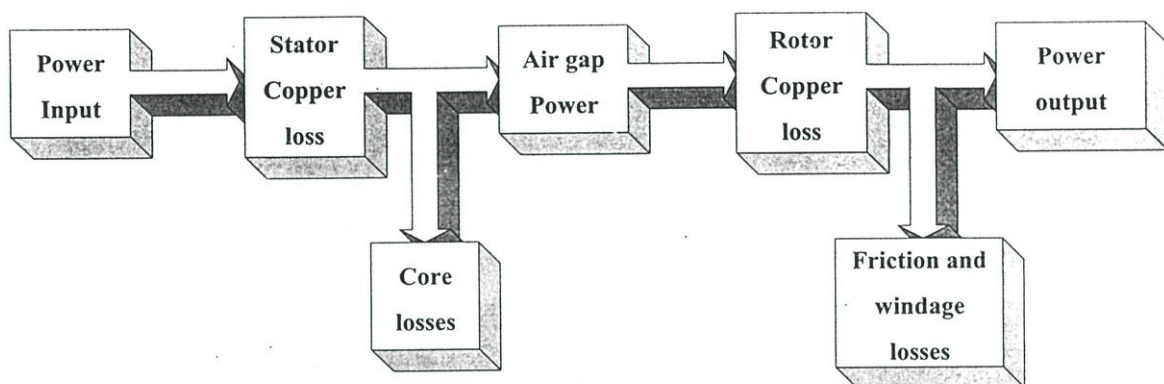
รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน,แรงบิด,กระแสเตเตอร์กับความถี่

ชนิดมอเตอร์ที่ใช้ต้องมีคุณสมบัติสลิปต่ำ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและความเร็ว มอเตอร์จะเปลี่ยนตามการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงโคจรนี้ของสนามแม่เหล็กในแอร์แกปที่อยู่ระหว่างส่วนสเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งการที่จะเปลี่ยนความเร็วเชิงโคจรนี้สามารถทำได้โดยการแปรเปลี่ยนความถี่ของอินเวอร์เตอร์ การเพิ่มความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการเปลี่ยนความถี่ของอินเวอร์เตอร์อย่างเดียวนั้นจะทำให้สนามแม่เหล็กในแอร์แกปของมอเตอร์ลดลงด้วย

2.5 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

การเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าให้เป็นกำลังกลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นจะเกิดขึ้นที่โรเตอร์ กำลังป้อนเข้าไม่ได้เกิดจากการป้อนไฟฟ้าให้กับโรเตอร์โดยตรง แต่เป็นการถ่ายทอดผ่านช่องว่างอากาศด้วยการเหนี่ยวนำ ไฟสลับที่ป้อนให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และความถี่ขึ้นที่โรเตอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ไฟฟ้าแบบสามเฟสและกำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ไฟฟ้าจ่ายแก่ภาระทางกลสามารถแสดงเป็นแผนผังดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แผนผังการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากแผนผังการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในรูปแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า (Input power) เข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ ดังนั้นจะมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (Stator copper loss) และการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) ในรูปความร้อน กำลังส่วนที่เหลือจะถูกส่งผ่านช่องว่างอากาศให้กับโรเตอร์ เรียกว่ากำลังไฟฟ้าในช่องว่างอากาศ (Power across air gap) เมื่อถ่ายเทกำลังไฟฟ้าให้กับโรเตอร์ส่วนหนึ่งจะเกิดกำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทาน (Rotor copper loss) ส่วนที่เหลือจะเป็นกำลังไฟฟ้าที่ส่งออกจากโรเตอร์ (Electromagnetic power) และยังมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียอีกส่วนหนึ่งซึ่งเป็นกำลังสูญเสียที่น้อยมากเมื่อเทียบกับกำลังสูญเสียจากส่วนต่างๆคือแรงเสียดทานและแรงต้านลมขณะมอเตอร์หมุน (Friction and windage loss) จากนั้นกำลังไฟฟ้าที่เหลือจะเป็นกำลังงานกลที่จะไปขับภาระทางกล (Output power)

การสูญเสียในแกนเหล็ก(core loss) เกิดขึ้นได้ที่สเตเตอร์และโรเตอร์แต่ในขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วใกล้ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed) การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผิวของโรเตอร์กับสนามแม่เหล็กหมุนมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนที่เกิดขึ้นในสเตเตอร์ ด้วยเหตุนี้การสูญเสียในแกนเหล็กทั้งหมดที่เกิดขึ้นจึงรวมไว้ด้วยกันในส่วนของสเตเตอร์

ในขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วเพิ่มขึ้น ทำให้การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านลมมากขึ้น แต่จะทำให้การสูญเสียในแกนลดลง จึงได้รวมการสูญเสียเหล่านี้เข้าด้วยกัน เรียกว่า Rotational and core losses และจะพิจารณาให้เป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่ด้วยความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลง

กำลังส่วนที่สูญเสียเนื่องจากความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ในสมการที่ 2.38 กำลังส่วนที่สูญเสียจากความต้านทานขดลวดโรเตอร์ในสมการที่ 2.39 และกำลังสูญเสียในส่วนของ Rotational and core loss เมื่อนำกำลังสูญเสียทั้งสามส่วนมารวมกันจะเป็นกำลังสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ (Power loss)

$$\text{Power loss} = \text{Power input} - \text{Power output} \quad (2.47)$$

ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ (η) นิยมคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (2.48)$$

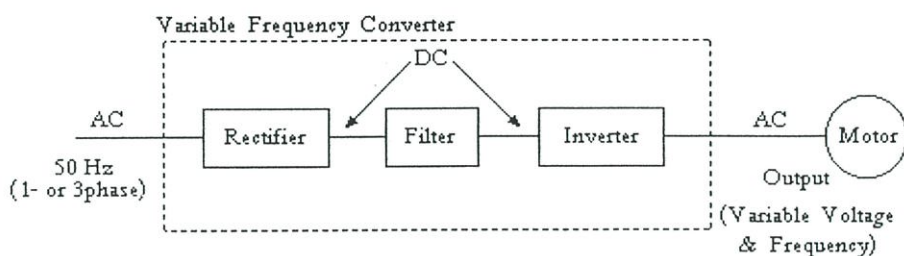
หรือ

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100 \quad (2.49)$$

2.6 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำจะต้องสามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ซึ่งจะทำหน้าที่เชื่อมโยงระหว่างระบบจ่ายไฟและมอเตอร์ ดังนั้นอินเวอร์เตอร์ที่ดีต้องมีคุณสมบัติพื้นฐานที่สอดคล้องกับความต้องการของมอเตอร์ดังต่อไปนี้

1. สามารถที่จะปรับความถี่ได้เป็นสัดส่วนกับความเร็วยุโรปที่ต้องการ
2. สามารถปรับแรงดันเอาท์พุทเพื่อรักษาอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ (V/f) ให้คงที่ตลอดช่วงแรงบิดคงที่ตามต้องการ
3. สามารถจ่ายกระแสได้ตามพิกัดที่ความถี่ใด ๆ ซึ่งอยู่ในช่วงแรงบิดคงที่ที่ต้องการ



รูปที่ 2.13 บล็อกไดอะแกรมของระบบอินเวอร์เตอร์เพื่อการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

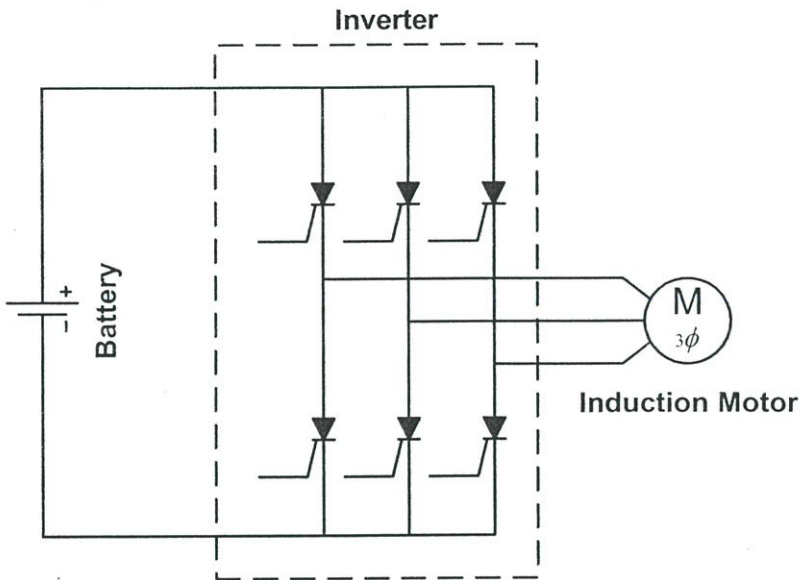
ในรูปที่ 2.13 แสดงหลักการพื้นฐานซึ่งแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับจะถูกเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วงจรเรียงกระแสแบบที่สามารถควบคุมแรงดันได้ หรือควบคุมไม่ได้ก็ได้ (Controlled Or Uncontrolled Rectifier) และอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถเปลี่ยนระดับแรงดันและความถี่ได้ โดยทั่วไประบบอินเวอร์เตอร์สามารถจำแนกออกตามชนิดของ อินเวอร์เตอร์ได้เป็น 2 ประเภท คือ

- 1 อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแส (Current-Source Inverter : CSI)
- 2 อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน (Voltage-Source Inverter: VSI)

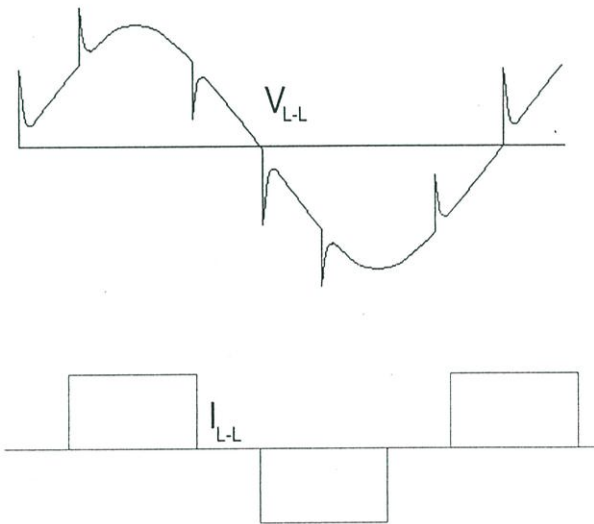
โดยอินเวอร์เตอร์ทั้งสองแบบนี้จะให้คุณสมบัติ และลักษณะของรูปคลื่นของกระแสและ แรงดันที่แตกต่างกัน และเหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกันออกไปด้วย

2.6.1 อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแส (Current-Source Inverter: CSI)

วงจรกำลังของแหล่งจ่ายกระแส (Current source) อินเวอร์เตอร์แสดงในรูปที่ 2.14 จะประกอบด้วยทรานซิสเตอร์เรกติไฟเออร์ที่สามารถควบคุมได้ โดยการควบคุมเฟสของเอซีไลน์ และยังมีอินดักเตอร์ขนาดใหญ่ต่ออนุกรมอยู่ แต่ไม่มีตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่ด้วยเพื่อสร้างแหล่งจ่ายกระแสให้กับอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นข้อแตกต่างของโครงสร้างทางวงจรจาก Voltage-source Inverter และในส่วนของอินเวอร์เตอร์จะมีทรานซิสเตอร์เพื่อทำหน้าที่ควบคุมกระแสที่สามารถเปลี่ยนความถี่ได้เพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์ รูปร่างของกระแสที่จ่ายออกทางด้านเอาต์พุต จะขึ้นอยู่กับแพทเทิร์น (Pattern) ของการควบคุมที่อินเวอร์เตอร์ ซึ่งอาจจะเป็น 6 สเต็ป หรือ พีคดับบลิวเอ็ม ก็ได้ แต่ลักษณะของแรงดันเอาต์พุตจะมีรูปร่างเข้าใกล้รูปไซน์ (ซึ่งเป็นข้อแตกต่างจากแบบจ่ายแรงดันในเรื่องของรูปคลื่น) นอกจากนี้ แรงดันทางด้านเอาต์พุตจะเกิดการสไปค์ เนื่องจากการคอมมิวเตตด้วย



รูปที่ 2.14 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส



รูปที่ 2.15 แรงดันและกระแสทางค้ำานเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส

ถึงแม้ว่า จะมีข้อดีมากมายดังที่ได้กล่าวมาแล้วสำหรับอินเวอร์เตอร์จ่ายกระแส (Current-Source Inverter) แต่ก็ยังมีข้อจำกัดอีกมากคือ ช่วงความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่สามารถปรับค่าได้ค่อนข้างต่ำและไม่สามารถทำงานได้ในสภาวะไร้โหลด ซึ่งต้องมีกระแสไหลค้อย่างน้อยที่สุดที่จะทำให้มีการคอมมิวเตทในอินเวอร์เตอร์ได้ และนอกจากนี้ขนาดของดีซีลิงค์อินดักแตนซ์ และตัวเก็บประจุของการคอมมิวเตทจะใหญ่ ทำให้อินเวอร์เตอร์แบบนี้ค่อนข้างมีราคาแพง การตอบสนองของไคร์ฟนี้ค่อนข้างช้า และมีแนวโน้มที่จะมีปัญหาของการมีเสถียรภาพที่โหลดต่ำ

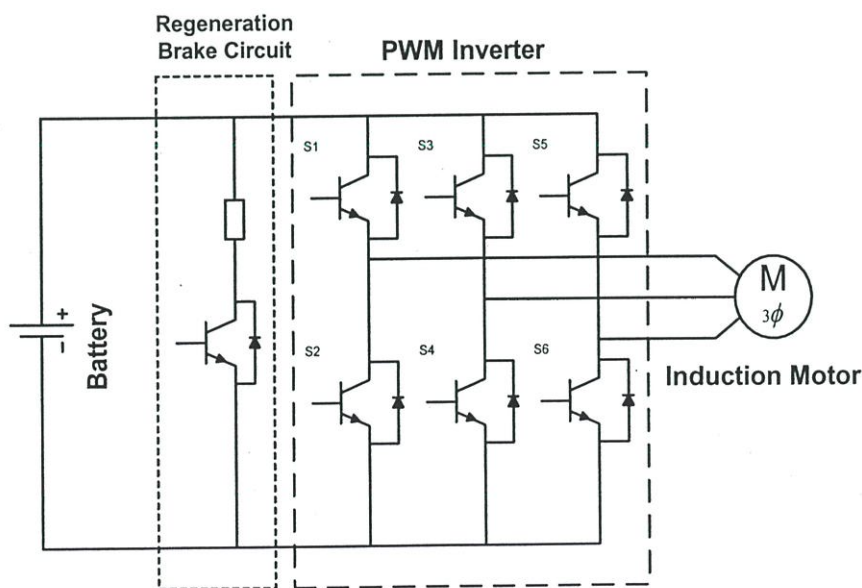
2.6.2 อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน (Voltage-Source Inverter: VSI)

โครงสร้างแรงดันสี่เหลี่ยมที่มีขนาดตัวเก็บประจุที่มีค่ามาก อาจกล่าวได้ว่าแรงดันอินพุตของอินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่ ทำให้แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์คงที่ไม่ขึ้นอยู่กับการโหลด และโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ 6-สแต็ปอินเวอร์เตอร์ และ ฟีดแบคฟีดแบคอินเวอร์เตอร์ ข้อดีของอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดันคือ สามารถควบคุมแรงดันและความถี่ได้ง่าย ปรับความถี่ได้ในย่านกว้าง ส่วนข้อเสีย มักมีปัญหาในเรื่องการลัดวงจรของอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งในกิ่งเดียวกันของอินเวอร์เตอร์ ในทางปฏิบัติใช้วงจรลอคเอาท์ที่มีการสร้างเดดไทม์ (Dead Time) เป็นส่วนช่วยในการป้องกัน

ในที่นี้จะขอกกล่าวเพียงชนิด ฟีดแบคฟีดแบคอินเวอร์เตอร์เท่านั้น ทั้งนี้เพราะในการศึกษาครั้งนี้เป็นการสร้างอินเวอร์เตอร์บนพื้นฐานของฟีดแบคฟีดแบค ซึ่งโดยทั่วไปจะไม่นิยมใช้อินเวอร์เตอร์ชนิด 6-สแต็ป เพราะมีข้อเสียมากกว่าชนิดฟีดแบคฟีดแบค

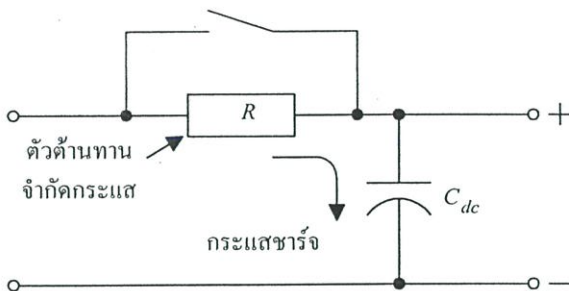
2.6.3 ฟีดแบคฟีดแบคอินเวอร์เตอร์ (PWM Inverter)

โครงสร้างของฟีดแบคฟีดแบคอินเวอร์เตอร์ ซึ่งโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ประกอบด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์ (Converter) โดยทั่วไปนิยมใช้ไดโอดเรกติไฟเออร์ซึ่งเป็นวงจรเปลี่ยนแรงดันกระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยง ป้อนให้กับฟีดแบคฟีดแบคอินเวอร์เตอร์และในส่วนคอนเวอร์เตอร์ยังต้องมีวงจรจำกัดกระแสอินรัช (In rush current suppression) จากรูปที่ 2.16 เมื่อเปิดสวิตช์

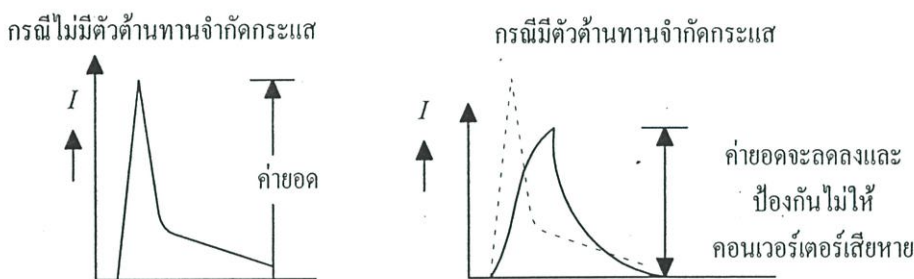


รูปที่ 2.16 วงจรกำลังของฟีดแบคฟีดแบคอินเวอร์เตอร์

ดังนั้นครั้งแรกจะต้องชาร์จประจุให้คาปาซิเตอร์จึงทำให้มีกระแสจำนวนมากไหลเข้ามาในวงจรดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการจำกัดกระแสอินรัชนี้ โดยใช้วงจรรูปที่ 2.17



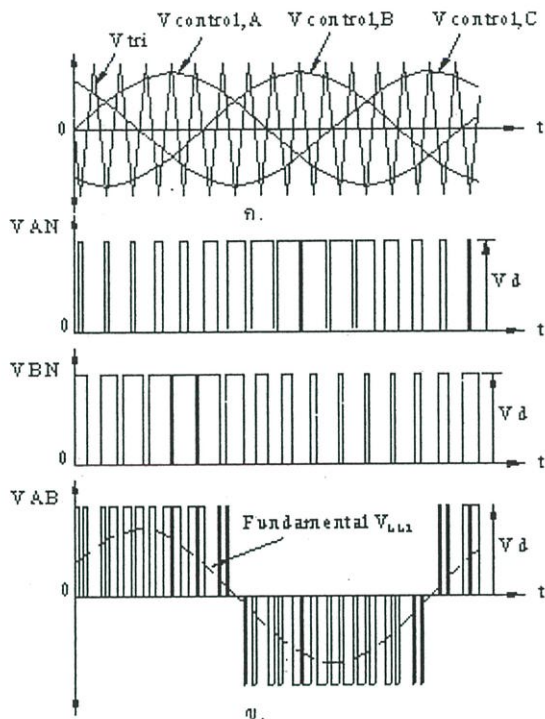
รูปที่ 2.17 วงจรจำกัดกระแสอินรัช



รูปที่ 2.18 กระแสอินรัช

เมื่อกระแสประจุคาปาซิเตอร์จนเต็มแล้วจึงใช้หน้าสัมผัสของรีเลย์ลัดวงจรตัวต้านทานจำกัดกระแส ในส่วนของพีดับบลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันนี้จะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมทั้งความถี่และแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ หลักการหนึ่งที่ใช้ในการกำเนิดสัญญาณควบคุมสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ก็คือจะใช้การเปรียบเทียบระหว่าง แรงดันควบคุมที่เป็นรูปคลื่น ไชน์ 3 เฟส (V control) ที่มีเฟสต่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้าและมีคุณสมบัติที่สามารถปรับแมกนิจูดให้แปรผันไปตามความถี่ได้ด้วย โดยจะนำสัญญาณควบคุมนี้ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม (Triangle waveform) ที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของการสวิตซ์ซึ่งดังที่แสดงในรูปที่ 2.19 จากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบไปควบคุมลำดับของการสับสวิตซ์อีกทีเมื่อพิจารณาแรงดันทางด้านเอทพุท อินเวอร์เตอร์ใช้พีดับบลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส คือการควบคุมแรงดันเอทพุทและความถี่ด้วยการคงที่แรงดันดีซี อินพุตการกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็มจะใช้รูปคลื่นสามเหลี่ยมเดียวกัน และเปรียบเทียบกับแรงดันควบคุมแบบไชน์ซึ่งมีมุมต่างเฟสกัน 120 องศาซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.19 เพื่อต้องการให้แรงดันเอทพุทของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสนั้นสมดุลย์ ในรูปที่ 2.19x แสดงให้เห็นถึงจำนวนขององค์ประกอบแรงดันดีซีเฉลี่ย และแรงดันเอทพุท V_{AN} และ V_{BN} ซึ่งได้จากการวัดเมื่ออ้างอิงกับด้านลบของแรงดันเชื่อมโยงดีซี และจะสังเกตเห็นว่าแรงดันเอทพุท

V_{AB} จะไม่มีองค์ประกอบของแรงดัน ดีซี เนื่องจากถูกหักลบกันหมดไป (ถ้าแรงดัน V_{AN} และ V_{BN} นั้นสมมูลย์) เนื่องจากแรงดัน V_{AB} นั้นเกิดจากแรงดัน $V_{AN} - V_{BN}$ ซึ่งจะเห็นว่าหลักการนี้เหมือนกับอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่ใช้เทคนิคการสวิตช์แบบ PWM.



รูปที่ 2.19 รูปคลื่นแรงดันพีดับบลิวเอ็ม และสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์

2.6.4 การทำงานของ PWM ในย่านดัชนีการมอดูเลตเชิงเส้น ($m_a \leq 1.0$)

ในย่านการมอดูเลตที่เป็นเชิงเส้น $m_a \leq 1.0$ องค์ประกอบของความถี่มูลฐานในแรงดันเอาต์พุตจะเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้น กับอัตราส่วนการมอดูเลต (m_a) จากรูปที่ 2.19ข. ค่าสูงสุดขององค์ประกอบความถี่มูลฐาน ในกึ่งหนึ่งของแรงดันมูลฐานคือ

$$\hat{V}_{AN1} = m_a \frac{V_d}{2} \quad (2.50)$$

ดังนั้นแรงดันไลน์ที่ความถี่มูลฐาน ซึ่งต่างเฟสกัน 120 องศา สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$V_{LL1} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \hat{V}_{AN1} \quad (2.51)$$

$$= \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a Vd$$

$$\approx 0.612 m_a Vd \quad (m_a \leq 1.0)$$

องค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ ของแรงดันไลน์ในลำดับต่างๆสามารถคำนวณได้ ซึ่งฮาร์มอนิกส์ บางตัว จะถูกกำจัดออกไปจากแรงดันไลน์ ซึ่งแรงดันฮาร์มอนิกส์อาร์เอ็มเอสก็สามารถคำนวณได้เช่นกัน

2.7 หลักการและชนิดของแบตเตอรี่

เซลล์ของแบตเตอรี่ประกอบด้วยแผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบ และสารละลายที่เป็นของเหลวหรือวุ้น ซึ่งเรียกว่า “อิเล็กโทรไลต์” เซลล์อาจมีช่องปิดหรือมีช่องให้สารระเหยได้ แผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบวางอยู่คู่กัน ในเซลล์แบตเตอรี่ลูกหนึ่งๆ อาจมีแผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบวางอยู่ หลายๆชุด วางขนานกันเป็นคู่ๆเพื่อให้ได้ขนาดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกมาสูงขึ้น ปริมาณขนาดกระแสไฟฟ้าที่ จากแบตเตอรี่จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ของแผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบ ระยะห่างระหว่างแผ่น ค่าความเข้มข้นของสารละลาย ความจุของแบตเตอรี่มักวัดเป็นแอมป์-ชั่วโมง (Amperehour ; Ah) การวัดความจุ โดยให้เวลาคงที่ แล้ววัดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกมาในช่วงเวลาดังกล่าว ถือว่ายังเป็นปัญหาที่ยิ่งใหญ่ของนักพัฒนารถไฟฟ้า ที่จะต้องเน้นที่จะพัฒนาแหล่งพลังงานไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพ ในการที่จะเพิ่ม สัดส่วนพลังงานไฟฟ้าต่อน้ำหนัก และลดต้นทุนการผลิตให้ได้ การพัฒนานี้จะเน้นไปที่การพัฒนาแบตเตอรี่และเป้าหมายต่อไปคือ fuel cell และ capacitor ที่จะสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าออกมาได้

2.7.1 ประเภทของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ที่นิยมใช้เป็นแหล่งพลังงานของรถไฟฟ้าในปัจจุบันก็คือ Lead-Acid Battery และ Nickel-Cadmium Battery แต่ก็ยังมีการพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดต่างๆอีกมากกว่า 10 ชนิดเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการเก็บประจุให้ดีกว่าแบตเตอรี่ที่ใช้กันอยู่ทั้งสองชนิด เรามาพิจารณาถึงคุณลักษณะของแบตเตอรี่ที่ต้องการในการนำมาใช้ในรถไฟฟ้า เน้นอนอย่างทีกล่าวไปแล้วคือ สัดส่วนพลังงานไฟฟ้าต่อน้ำหนักสูงๆ (High Specific Energy) และยังคงมีอื่นๆที่ต้องการอีกคือ

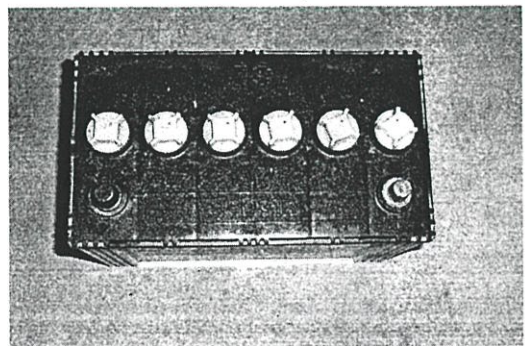
- รอบการใช้งานสูง (Long cycle life)
- ปลอดภัย
- ราคาถูก

- ดูแลรักษาง่าย
- สามารถนำมาใช้ใหม่ได้
- ไม่มีมลภาวะขณะใช้งาน
- มีความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าไฟฟ้าได้ดี (Small self discharge) สามารถอัดไฟฟ้ากลับได้อย่างรวดเร็ว

คราวนี้เราลองมาดูเทคโนโลยีของแบตเตอรี่แต่ละชนิดกันดีกว่าครับว่ามีลักษณะพิเศษอย่างไร

- Lead-Acid Battery

เป็นแบตเตอรี่ที่ได้รับความนิยมที่ใช้เป็นแหล่งพลังงานของรถไฟฟ้ามากในปัจจุบันเพราะมีราคาถูกกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่นๆ แต่ Lead-Acid Battery ที่ใช้เป็นแหล่งพลังงานของรถไฟฟ้าโดยทั่วไปเขาจะเรียกกันว่า Electric Vehicle Battery ได้ออกแบบมาเพื่อการใช้งานที่ไม่เหมือนกับที่ใช้กับรถยนต์ Automotive SLI (Starting-Lighting-Ignition) Lead-Acid Battery เพราะการนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับรถไฟฟ้าจำเป็นที่จะต้องมีการใช้งานสูง สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้ดีโดยทั่วไปแล้ว การทดสอบรอบการใช้งาน (cycle life) ของแบตเตอรี่จะถูกกำหนดโดยที่ Depth of Discharge (D.O.D.) 80% หรือความสามารถของแบตเตอรี่ที่จ่ายไฟฟ้าได้ 80% โดยนับจากจำนวนครั้งของการจ่ายไฟจนถึง D.O.D 80% และชาร์จไฟกลับจนเต็มนับเป็น 1 ครั้ง แต่ในทางปฏิบัติจริงเราไม่อาจจะทนรอให้ถึง D.O.D 80% เราก็ทำการชาร์จแบตเตอรี่แล้ว ซึ่งตรงนี้จะนับเป็น 1 cycle ไม่ได้แต่ก็ต้องนำมาพิจารณาถึงอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ด้วย



รูปที่ 2.20 แบตเตอรี่แบบตะกั่วกรด

จะเห็นว่า SLI Battery นั้นไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับรถไฟฟ้า เพราะมีการใช้งานต่ำประมาณ 120-150 รอบเท่านั้น และมี Self-discharge สูงคือ 1-5% ต่อเดือน ในขณะที่

Electric Vehicle Battery ต้องการรอบการใช้งานที่สูงๆ แต่ถึงกระนั้นก็ตาม Lead-Acid Battery ที่ ออกแบบมาใช้กับรถไฟฟ้าก็สามารถทำได้อย่างมากไม่เกิน 1000 รอบเท่านั้นเอง ส่วนปัญหาอื่นๆ ของ Lead-Acid Battery ก็คือปัญหาในเรื่องของการชาร์จเพราะยังต้องใช้ระยะเวลาในการชาร์จ ไฟให้เต็มแต่ละครั้ง ปัจจุบันที่เป็นอยู่คือต้องใช้เวลา 6-8 ชั่วโมงแม้กระนั้นก็ตามนักพัฒนารถไฟฟ้าก็ ยังให้การยอมรับได้อันเนื่อง มาจากความได้เปรียบในเรื่องราคารันเอง อย่างไรก็ตามนักวิจัย ด้านแบตเตอรี่ก็ยังคงพยายามค้นหาเทคโนโลยีใหม่ๆ มาพัฒนา Lead-Acid Battery พร้อมกันนี้ก็ยังคงเร่งพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดอื่นๆ ขึ้นมาที่มาทดแทนให้ได้

- Nickel-Cadmium Battery (Ni/Cd)

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง Nickel-Cadmium Battery กับ Lead-Acid Battery แล้วพบว่า Nickel-Cadmium Battery มี Specific Energy สูงกว่าประมาณ 30% และมีอายุการใช้งาน นานกว่าอยู่ถึง 2-3 เท่าโดยคิดจากรอบการใช้งาน แต่เมื่อมาพิจารณาถึงราคาแล้วพบว่ามีราคาสูงกว่า ถึง 5 เท่าด้วยกันเพราะวัตถุดิบที่ใช้มีราคาแพง อีกทั้งต้นทุนการนำนิเกิลมาใช้ใหม่ยังใช้ต้นทุนสูง ส่วนข้อดีที่ผู้ผลิตรถไฟฟ้านิยมใช้แบตเตอรี่ชนิดนี้ก็เพราะ สามารถชาร์จไฟได้อย่างรวดเร็ว (Quick Charge) โดยสามารถอัดไฟเข้าไป 40% โดยใช้เวลาเพียง 6 นาที เร็วกว่าเติมน้ำมันอีกใช้ใหม่ครับ แต่มีข้อแม้เหมือนกับครับคือ ต้องทำการชาร์จที่อุณหภูมิแบตเตอรี่ต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียสโดยทั่วไปจะชาร์จที่ 30 องศาเซลเซียส ดังนั้นลองนึกภาพดูนะครับขณะ Ni/Cd Battery ทำการจ่ายไฟฟ้า เพื่อขับเคลื่อนรถ ปฏิกิริยาเคมีในตัวแบตเตอรี่เองย่อมทำให้เซลล์แบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูง พอขับ เพลินๆ ไปจนพลังงานจะหมดและต้องการจะชาร์จเร็วแบบ 6 นาที ต้องใช้เวลารอให้อุณหภูมิลดลง มา การระบายความร้อนภายในเซลล์น่าจะต้องใช้เวลาพอสมควรนะครับ คราวนี้มารู้กันอีกสักนิด เกี่ยวกับลักษณะพิเศษการชาร์จของแบตเตอรี่ตระกูลนิเกิลทั้งหลาย ซึ่งอาจจะเป็นหรืออาจจะ เป็น ข้อดีหรือข้อเสียก็ได้คือ แบตเตอรี่ชนิดนี้มีความจำของตัวเอง (memory-effect) หรือจะเรียกว่า ความเคยชินก็ได้ คือการใช้งานปกติของเรานั้นสมมติว่าเราใช้งานไปกลับบ้าน-ที่ทำงาน ต้องใช้ พลังงานแค่ D.O.D 60% ขณะที่แบตเตอรี่ยังสามารถจ่ายไฟได้ถึง D.O.D 80% แต่เราไม่ชาร์จก็ไม่ได้ เพราะไม่พอใช้ทำงานพรุ่งนี้แน่ เราก็ทำการชาร์จแบบนี้เป็นประจำทุกวันแบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถ จดจำได้นะครับ พอวันวันเข้าเมื่อมันจะจ่ายไฟให้เราได้แค่ D.O.D 60% เท่านั้น แต่ทราบได้ที่ แบตเตอรี่ยังไม่เสื่อมเราสามารถล้างความจำมันใหม่ได้โดยทำการ over-charge ทุกวันๆ มันก็จะกลับมาจ่ายไฟได้มากเหมือนปกติ

รถไฟฟ้าในปัจจุบันนี้ใช้ Ni/Cd Battery เป็นอันดับสองรองจาก Lead-Acid Battery โดย ส่วนใหญ่จะเป็นรถใหม่ที่ผลิตจากโรงงาน ส่วนนักดัดแปลงรถไฟฟ้าทั้งหลายยังไม่ค่อยสนใจครับ เพราะต้องใช้เทคโนโลยีการชาร์จที่สูง อันตรายจากแบตเตอรี่ชนิดนี้ยังมีสูงมากและที่สำคัญราคาแพง

สูงแม้จะมีประสิทธิภาพมากก็ตาม เป้าหมายการพัฒนาของแบตเตอรี่ชนิดนั้นมุ่งไปที่เทคโนโลยีการนำ นิกเกิล และ แคดเมียม มาใช้ใหม่ สำหรับ นิกเกิล นั้นหลังจากแบตเตอรี่เสื่อมอายุแล้วขั้วทาง Nickel จะถูกเคลื่อนจนมีลักษณะเป็นอัลลอยด์ นำมาใช้ใหม่ได้ยาก ส่วนกรรมวิธีการนำแคดเมียมมาใช้ใหม่ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หากมีการใช้วัสดุโบราณและไม่กระทบสิ่งแวดล้อมราคาของแบตเตอรี่ก็จะถูกไปด้วย

- Nickel-Iron Battery (NiFe)

คงอาจจะเป็นเพราะแคดเมียมที่ประกอบใน NiCd Battery เป็นตัวที่อาจจะก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมก็ได้จึงมีการนำ Iron มาใช้ทดแทนก็เป็นได้และก็เป็นเช่นนั้นไม่ว่าจะเป็น specific energy หรือ cycle life ของ NiFe Battery เทียบเท่ากับ NiCd Battery แต่สาเหตุที่ทำให้ไม่นิยมแพร่หลายเหมือนกับ Ni/Cd Battery เพราะขณะทำการชาร์จจะมีน้ำเพิ่มขึ้นทำให้ ป้องกันการรั่วลำบาก และอีกประการหนึ่งที่มีผลอย่างสูงคือเรื่องของราคา เพราะเหล็กที่นำมาผลิตแบตเตอรี่ชนิดนี้ต้องอยู่ในรูปผงเท่านั้นถึงจะได้แบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพ ส่วนนิกเกิล นั้นแพงอยู่แล้ว การพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดนี้ นักวิจัยคงต้องคิดค้นวิธีกันน้ำรั่วออกมาให้ได้หรือวิธีการ ซิลแบตเตอรี่นั่นเอง

- Nickel-Zinc Battery (NiZn)

สังกะสีนั้นเป็นวัสดุที่ค่อนข้างจะถูกจึงมีการพัฒนานำมาใช้เป็นขั้ว อาโนด แทนแคดเมียมและเหล็ก แต่ยังคงอยู่ที่ว่า แบตเตอรี่ชนิดนี้ยังมีรอบการใช้งานที่ต่ำเนื่องจากขณะทำการจ่ายไฟนั้นสังกะสีสามารถละลายได้ในสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งไม่เหมือนกับแคดเมียม และเหล็ก คราวนี้พอชาร์จไฟกลับเข้าไปกลับไปมาหลายๆครั้งทำให้สังกะสีเปลี่ยนรูป ไปเมื่อขั้วแบตเสื่อมลง แบตเตอรี่ก็เสื่อมสภาพตามไปด้วยเท่าที่พบแบตเตอรี่ชนิดนี้มีรอบการใช้งานประมาณ 400 รอบยังถือว่าใกล้เคียงกับ Lead-Acid Battery มากนักวิจัยยังหาทางแก้ปัญหาที่ยังไม่ได้

- Nickel-Hydrogen Battery

เป็นแบตเตอรี่ตระกูลอัลคาไลน์น้องใหม่ล่าสุดซึ่งเดิมทีเคียวต้องการที่จะเอามาทดแทน Ni/Cd Battery ชนิดแท่งที่ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบพกพาและเริ่มใช้เป็นที่แพร่หลายตั้งแต่ปี ค.ศ.1990 ต่อมาจึงนำมาใช้กับรถไฟฟ้าเพราะมีขนาดกระทัดรัดอีกทั้งมี specific energy และรอบการใช้งานที่สูงกว่า Lead-Acid Battery มาก ลักษณะของแบตเตอรี่ชนิดนี้จะต่างกับ ตระกูลอัลคาไลน์ทั้งหลายที่กล่าวมา คือเป็นระบบ Gas Systems ตัวที่นิยมและกำลังมาแรงนั้นก็คือ Ni/MH Battery ลักษณะโครงสร้างหลักคือจะมีคาโทดเป็นก๊าซคือไฮโดรเจน ส่วนอาโนดจะเป็นนิกเกิล จะมีผนังหุ้มที่แข็งแรงเพื่อสำรองก๊าซไฮโดรเจนไว้ใช้ได้อีกด้วย ปัญหาเดิมๆที่นักวิจัยพบอยู่คือเรื่องราคาของนิกเกิลและปัญหาในเรื่องการควบคุมอุณหภูมิที่เกิดขณะทำการชาร์จไฟเพราะหากเป็นแบตเตอรี่

ขนาดใหญ่จะเกิดอุณหภูมิสูงมากทำให้ก๊าซไฮโดรเจนสำรองระเบิดได้ดังนั้นการปรับปรุงจะต้องศึกษาการรับแรงดันของผนังหุ้มแบตเตอรี่อีกด้วย

- Zinc-Bromine Battery

แบตเตอรี่ชนิดนี้มีระบบเหมือนกับพวก Nickel-Hydrogen Battery คือ Gas System แต่จริงแล้วจะใช้ คาร์บอนหรือไม้กัททาเนียมเป็นคาโทด และสังกะสีเป็นแอโนด แต่คุณสมบัติของ ที่ว่า เป็น Gas System เพราะสารที่ใช้ทำเป็นคาโทดมีคุณสมบัติดูดซับโบรไมน์ได้ จึงทำให้ที่คาโทดมีลักษณะคล้ายก๊าซโบรไมน์หุ้มอยู่ ซึ่งนักวิจัยบางคนเรียกว่า graphite-bromine complexแต่ก็ไม่ได้เป็นศัพท์ที่นิยมใช้กันเท่าไรนัก ปัญหาที่เกิดขึ้นก็คือปัญหาการชาร์จไฟกลับเพราะแบตเตอรี่ชนิดนี้จำเป็นที่จะต้องใช้ไฟให้หมดถึงจะทำกรชาร์จไฟกลับได้ แลยังมีรอบการใช้งานต่ำเพียงแค่ประมาณ 500 รอบเท่านั้นเองแม้จะมี specific energy สูงก็ตามแต่ข้อดีของมันก็คือปฏิกิริยาเคมีที่เกิดในเซลล์นั้นปล่อยความร้อนออกมาไม่มากแรงดันก๊าซโบรไมน์สูงจึงไม่สามารถใช้ผนังหุ้มแบตเตอรี่ที่ทำจากพลาสติกซึ่งลดต้นทุนการผลิตแบตเตอรี่ได้ดีทีเดียว แต่จะมีนักวิจัยคนใดกล้ายืนยันถึงความปลอดภัยหากเกิดอุบัติเหตุแล้วมีก๊าซโบรไมน์ซึ่งเป็นอันตรายอย่างร้ายกาจไหลออกมา

- Sodium-Sulfur Battery

สิ่งที่ทำให้แบตเตอรี่ชนิดนี้แตกต่างไปจากที่กล่าวข้างต้นทั้งหมดนั้นก็ถือเป็นแบตเตอรี่ที่ทำงานในสถานะที่เซลล์มีอุณหภูมิสูงหลักการของแบตเตอรี่ชนิดนี้จะประกอบไปด้วย โซเดียมและซัลเฟอร์ โดยที่โซเดียมจะทำหน้าที่เป็นคาโทดและถูกกั้นด้วย เซรามิก เบต้า-อลูมินา โดยมีซัลเฟอร์ห่อหุ้มด้วยกราฟไฟท์เพื่อทำให้ซัลเฟอร์มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าล้อมรอบเอาไว้ โดยจะมีโซเดียมโพลีซัลไฟด์ทำหน้าที่อิเล็กโทรไลต์เป็นตัวกลางนำไฟฟ้า แต่ทั้งโซเดียมและซัลเฟอร์จะแลกเปลี่ยนกันได้ก็ต้องละลายเป็นของเหลวเสียก่อนซึ่งใช้อุณหภูมิการละลายสูงถึง 350 °C เลยทีเดียว แต่วัตถุประสงค์ที่นำใช้ทำแบตเตอรี่ชนิดนี้มีราคาต่ำทั้งโซเดียมแล้วซัลเฟอร์ ดังนั้นนักวิจัยจะให้ความสนใจที่จะพัฒนาปรับปรุงให้ได้ก็คือ ปัญหาเรื่องการเก็บรักษาความร้อนให้คงสภาพพร้อมจะใช้งานอยู่เสมอ โดยที่ปัจจุบันใช้วิธีการชาร์จตลอด 24 ชั่วโมง และยังมีกระแสไฟฟ้ามาก หรือมีการใช้แหล่งพลังงานแหล่งอื่นมาให้ความร้อนแก่แบตเตอรี่แต่ยังใช้เวลานาน การใช้รถต้องมีความคล่องตัวสูง เกิดตัวเก็บความร้อนมีปัญหาคงจะต้องรออุณหภูมิให้ร้อนอีกหลายๆชั่วโมง คงจะไม่เหมาะสมอย่างแน่นอน

-Sodium-Nickel Chloride Battery

คงจะเป็นเพราะปัญหาของเจ้า Sodium-Sulfur Battery ในเรื่องของการรักษาความร้อนที่จำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาที่จำเป็นที่ทำให้ นักวิจัยพยายามที่จะคิดค้นวิจัยแบตเตอรี่ชนิดนี้ขึ้นมา โดยการทำให้การจ่ายไฟเกิดขึ้นขณะที่ขั้วทั้งสองยังเป็นของแข็งอยู่เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดอย่างช้าๆทำให้สามารถทำงานได้ช่วงอุณหภูมิที่กว้างขึ้น อาจจะจ่ายไปได้แม้มีอุณหภูมิ 270 °C แม้ว่าจะสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ง่ายขึ้นแต่ก็จะสูญเสีย specific energy ไปเพราะจะเกิดความต้านทานภายในเซลล์มาก อีกประการหนึ่งราคาของมันก็สูง ที่ยังไม่สามารถทำให้ถูกลงได้

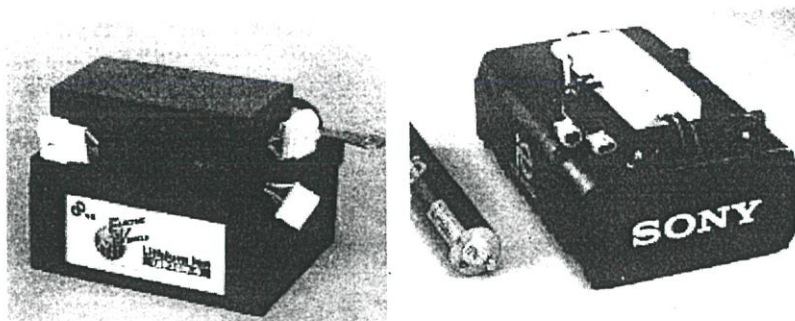
-Lithium Aluminium-Iron Sulphide Battery

แบตเตอรี่ชนิดนี้ยังเป็นแบตเตอรี่ที่ทำงานในสถานะที่เซลล์มีอุณหภูมิสูง และยังต้องการอุณหภูมิที่สูงกว่าตระกูลโซเดียมอีกด้วยคือต้องการประมาณ 400-465 °C แบตเตอรี่ชนิดนี้จะใช้ Iron Sulphide (FeS) เป็นขั้วคาโทด โดยที่ขั้วแอโนดจะเป็น Lithium Aluminium โดยแบตเตอรี่ชนิดนี้ออกแบบเป็นเซลล์ทรงกระบอกคล้ายกับ NiCd หรือ NiMH แต่ต้องทำการบรรจุอยู่ในภาชนะควบคุมความร้อน แบตเตอรี่ชนิดนี้มีการยืนยันไว้ไม่มี memory effect เหมือนกับพวกตระกูลนิกเกิล ทำให้การชาร์จเร็วตามสถานีปลายทางทำได้โดยไม่ผลต่อแบตเตอรี่ และได้มีการพัฒนาความปลอดภัยจากการรั่วไหลของความร้อนที่มีประสิทธิภาพ และมี specific energy สูงกว่า Lead-Acid Battery หลายเท่า โดยที่รอบการใช้งานจะอยู่ที่ 1000 รอบขึ้นไป ปัจจุบันนี้ได้มีผู้ผลิตรถยนต์ไฟฟ้าได้ใช้แบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นแหล่งพลังงานกันอย่างแพร่หลาย แต่อย่างไรก็ดีต้นทุนการผลิตของแบตเตอรี่ชนิดนี้ยังสูงอยู่มากในส่วนของชุดควบคุมอุณหภูมิและกรรมวิธีการผลิตเพราะต้องใช้ แอโนดที่มีความบริสุทธิ์สูงมากนั่นก็คือ Lithium Aluminium dioxide

- Ambient-Temperature Lithium Batteries

แบตเตอรี่ชนิดนี้จัดอยู่ในตระกูลอัลคาไลน์นี่เองใหม่ล่าสุดซึ่งเดิมทีเคยต้องการที่จะเป็นลิเทียมแบตเตอรี่ตระกูลหนึ่งแต่ไม่ได้ที่ใช้ การออกซิไดซ์ของโลหะผสมลิเทียมมาเป็นขั้วแอโนดแต่ใช้โลหะผสมลิเทียมโดยตรงและไม่จำเป็นต้องทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงมากอยู่ระหว่าง 65-120 °C เพราะสารอิเล็กโทรไลต์เป็นสารพวกโพลีเมอร์ หรือพวกสารละลายอินทรีย์ โดยที่คาโทดเลือกใช้ได้หลากหลายเช่น MnO₂, LiCoO₂, V₂O₅ เป็นต้นและเป็นวัสดุที่มีราคาไม่สูงนัก อีกทั้งการประสิทธิภาพการจ่ายพลังงานสูงและมีอายุการใช้งานที่นานแต่ปัญหาของแบตเตอรี่ที่พบก็คือเรื่องของความปลอดภัยหากมีการจ่ายไฟหรือชาร์จไฟเกิน จะเกิดอาการขยายตัวและ อาจมีประจุไฟฟ้าเกิดขึ้น และปัญหาอีกอย่างหนึ่งคือความต้านทานภายในสูงมาก ทำให้เสียค่าใช้จ่ายมากในการชาร์จไฟกลับ แต่

อย่างไรก็ดีได้มีการคาดการณ์ว่าแบตเตอรี่ชนิดนี้จะนำมาใช้ทดแทน Lead-Acid Battery ได้ดีที่สุด เพราะว่ามีต้นทุนในการผลิตต่ำ โดยคาดว่าจะแพงกว่าประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.21 แบตเตอรี่แบบ Ambient-Temperature Lithium

- Fuel Cell

Fuel Cell เป็นเซลล์ที่ใช้พลังงานของปฏิกิริยาเคมีของไฮโดรเจนกับออกซิเจนเพื่อเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า มีกระบวนการทางเคมีคล้ายๆกับแบตเตอรี่ทั่วไป โดยที่ไฮโดรเจนและออกซิเจนถูกทำให้แยกออกจากน้ำด้วยพลังงานภายนอกกล่าวง่ายๆคือใช้ก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนเป็นอาโนดและคาโทดตามลำดับ และมีอิเล็กโตรไลต์เป็นตัวกลางทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุอาจจะเป็นสารละลายของ KOH เป็นต้น ระบบของ Fuel Cell นี้ประกอบด้วยอุปกรณ์เสริมมากมายซึ่ง นอกจะจะเป็นตัวของเซลล์แล้วยังประกอบไปด้วย ถังเก็บไฮโดรเจนถังออกซิเจนแรงดันสูงที่ติดตั้งเครื่องสร้างแรงดันให้กับออกซิเจนเพราะว่าพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นแปรผันตรงกับแรงดันของก๊าซออกซิเจน ระบบระบายความร้อน ระบบควบคุมน้ำที่ให้เซลล์อิมตัวอยู่เสมอ และป้องกันไม่ให้น้ำที่เป็นผลจากปฏิกิริยาเคมีมาสะสมที่ขั้วคาโทด หากมีการเก็บก๊าซไฮโดรเจนในรูปของเมทานอล จำเป็นต้องติดตั้งเครื่องแยกเมทานอลให้เป็นออกซิเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์อีกด้วย ซึ่งแน่นอนอุปกรณ์ที่นำมาใช้ใน ระบบ Fuel Cell นั้นจำเป็นต้องใช้แหล่งพลังงานภายนอกมากระตุ้น นักวิจัยและพัฒนาจำเป็นต้องพัฒนาแหล่งพลังงานอื่นๆที่ไม่ใช่น้ำมัน ซึ่งมองไปการใช้ประโยชน์จาก Ultracapacitor และ Flywheel เพื่อนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานของ Fuel Cell

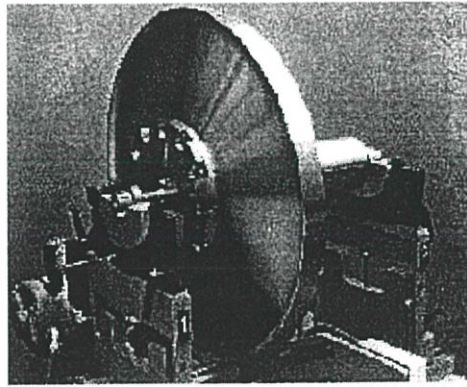
- Ultracapacitor

เป็นตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ที่สะสมประจุไฟฟ้าเอาไว้เพื่อนำมาใช้เป็นตัวจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบของ Fuel Cell ได้โดยหลักการแล้ว Ultracapacitor สามารถสะสมประจุไฟฟ้าและจ่ายไฟฟ้าได้สูงในช่วงเวลาที่จำกัดได้ ในปัจจุบันยังเก็บไฟฟ้าได้เพียง 5 Wh/kg ซึ่งยังถือว่าพอใช้ได้ในการที่

จะนำมาใช้กับระบบ Fuel Cell แต่เป้าหมายการพัฒนาความจุไฟฟ้าให้ได้อย่างน้อย 20 Wh/kg เพื่อนำมาใช้ในการเป็นแหล่งพลังงานให้กับรถไฟฟ้าโดยตรง โดยไม่เพียงแต่เป็นแหล่งพลังงานให้กับระบบ Fuel Cell เท่านั้น

- Flywheel

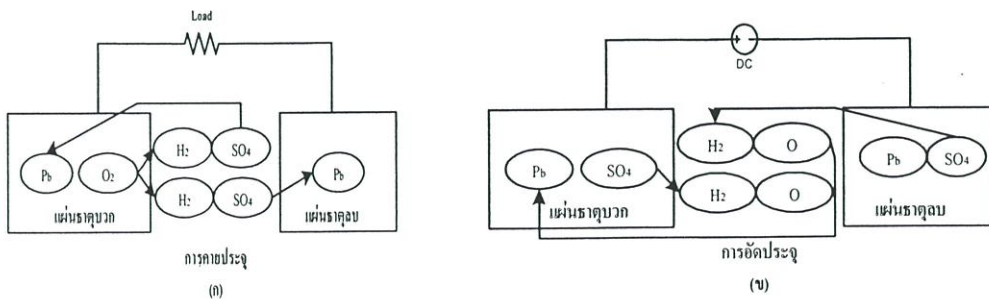
เป็นอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าชนิดหนึ่ง โดยใช้หลักการของ Generator ผสมกับหลักของโมเมนตัม การทำงานของ Flywheel นี้เริ่มจากการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาดเล็กไปหมุนล้อของ flywheel ที่อยู่บนเพลลาที่เป็นแม่เหล็กหลังจากที่ล้อหมุนได้เกิดโมเมนตัมที่พอเหมาะ โมเมนตัมที่เกิดขึ้นจะทำให้ความเร็วรอบของล้อจะหมุนด้วยความเร็วสูง สนามแม่เหล็กของเพลลา Flywheel จะไปตัดกับขดลวดที่อยู่บน Flywheel ทำให้มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น สิ่งที่ยังเป็น ปัญหาก็คือการรักษาโมเมนตัมของ Flywheel นั้นทำได้ยากเพราะต้องสร้างสภาวะแวดล้อมการหมุนให้อยู่ในสภาวะไร้อากาศแทนวิธีหนึ่งก็คือให้หมุนอยู่ใน Vacuum Sealed Box



Flywheel prototype

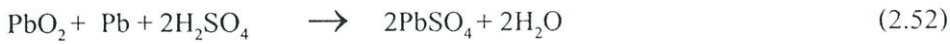
รูปที่ 2.22 Flywheel

2.7.2 การทำงานของแบตเตอรี่

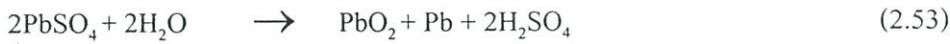


รูปที่ 2.23 การทำงานของแบตเตอรี่

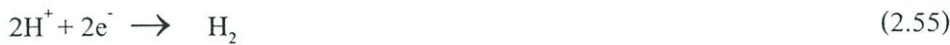
เมื่อแบตเตอรี่กำลังจ่ายไฟออก (Discharge) จะเกิดขบวนการปฏิกิริยาทางเคมีตามสมการนี้



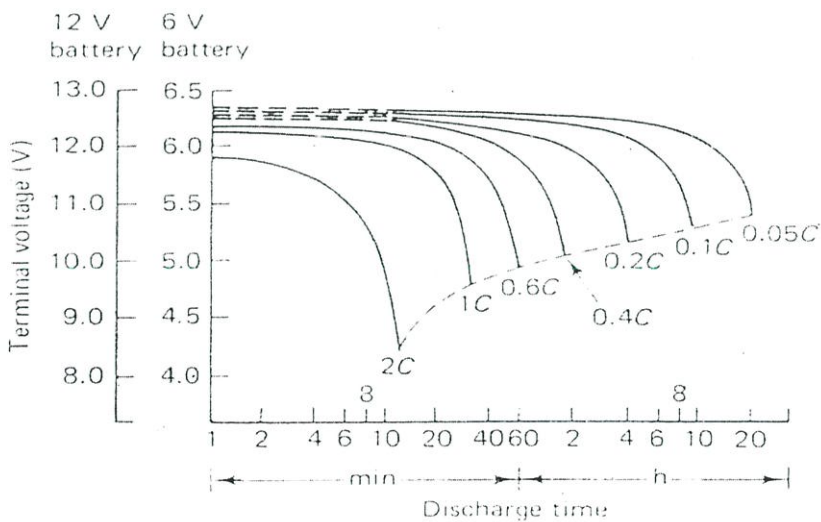
เมื่อประจุไฟให้กับแบตเตอรี่ (Charge) จะเกิดขบวนการปฏิกิริยาทางเคมีตามสมการนี้



และที่ขั้วบวกจะเกิดก๊าซ O_2 ที่ขั้วลบจะเกิดก๊าซ H_2 ตามสมการนี้



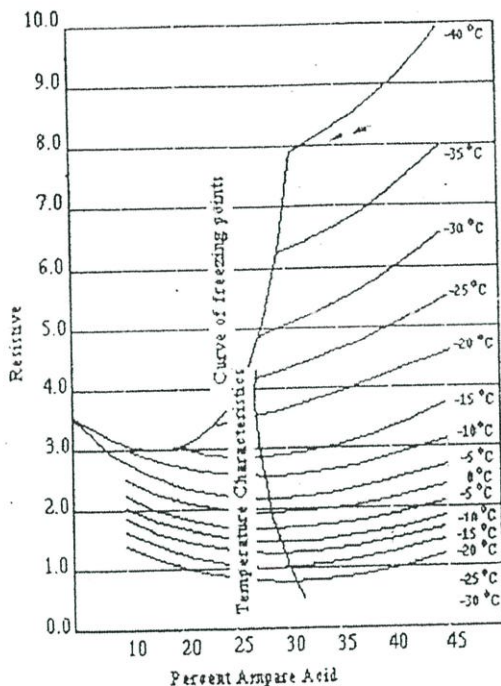
ตัวแปรที่มีผลต่อค่าความจุแบตเตอรี่ คืออัตราการคายประจุของแบตเตอรี่ โดยแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ถูกออกแบบให้ใช้งานในเวลา 20 ชั่วโมง หรือมีการคายประจุที่ 0.05 ของค่าความจุแบตเตอรี่ (C-rate) หากมีอัตราการคายประจุสูงจะทำให้ค่าความจุลดลง หรือไม่สามารถจ่ายพลังงานเท่ากับที่กำหนด ซึ่งเวลาในการใช้งานของแบตเตอรี่ หาได้โดยเทียบอัตราการคายประจุ (C-rate) แล้วนำไปเทียบกราฟอัตราการคายประจุ(Discharge Rate) ในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.24 อัตราการคายประจุ (Discharge Rate) แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

และอีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อการแบตเตอรี่คืออุณหภูมิ(Temperature Characteristics) อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิในขณะใช้งานถ้ามีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นก็จะมีผลต่อการทำงานและขนาดความจุของแบตเตอรี่มาก เนื่องจากอุณหภูมิมิผลต่อน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความต้านทานภายในของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ที่อุณหภูมิต่างๆ ในรูปที่ 2.26 เมื่อ

แบตเตอรี่ได้รับการประจุไฟฟ้าเต็มแล้ว ค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายในแบตเตอรี่จะมีค่าอยู่ประมาณ 1.280 และเมื่อแบตเตอรี่ถูกนำไปใช้งานหรือมีการคายประจุเกิดขึ้นจะทำให้ค่าของความถ่วงจำเพาะของสารละลายลดลง แต่ถ้าค่าลดต่ำกว่าจนมีค่าต่ำกว่าจุด freezing point curve ในรูปที่ 2.26 แสดงให้เห็นว่าควรจะนำแบตเตอรี่ไปประจุไฟใหม่อีกครั้ง



รูปที่ 2.25 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานของสารละลายในแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

2.7.3 หลักการประจุไฟฟ้าของเครื่องประจุแบตเตอรี่

เครื่องประจุแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง ซึ่งจะทำให้ระดับแรงดันสูงกว่าระดับแรงดันของแบตเตอรี่ในขณะที่มีการเก็บประจุ ในการประจุแบตเตอรี่จะให้ขั้วบวกของประจูดต่อเข้ากับขั้วบวกของแบตเตอรี่ โดยกระแสที่ทำการประจุจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของกระแสที่แบตเตอรี่จ่ายออกมา ซึ่งสามารถหาค่ากระแสได้จากสมการที่ 2.57

$$E = E_c + IR_l \quad (2.56)$$

$$\text{จะได้ } I = \frac{(E - E_c)}{R_l} \quad (2.57)$$

โดยที่ E แรงดันที่ทำการอัดประจุ

E_c แรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่

R_l ความต้านทานภายในแบตเตอรี่

I กระแสที่ใช้ในการประจุแบตเตอรี่

เมื่อแรงดันที่แบตเตอรี่ (E_c) มีค่าเท่าแรงดันประจุ จะไม่มีกระแสไหลในวงจร ถ้าแรงดันที่แบตเตอรี่ต่ำกว่าแรงดันประจุจะทำให้มีกระแสไหล เพื่อเข้าไปอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ แต่ถ้าแรงดันที่ แบตเตอรี่สูงกว่าแรงดันประจุจะทำให้กระแสถูกประจุย้อนกลับจากแบตเตอรี่ ค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ส่วนมากจะมีค่าน้อยซึ่งมีหน่วยเป็นโอห์ม โดยจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปในขณะที่มีการประจุ แบตเตอรี่ โดยจะมีผลต่อปริมาณกระแสที่ประจุว่ามากหรือน้อย ถ้ากระแสในการประจุมีค่ามากกว่าปริมาณที่แบตเตอรี่จะทนได้ อาจจะทำให้แบตเตอรี่ชำรุดได้ การจะลดปริมาณกระแสประจุแบตเตอรี่ให้ลดต่ำลงทำได้โดยเอาความต้านทานต่ออนุกรมเข้าไป เพื่อจำกัดปริมาณของกระแสที่ไหลได้ตามต้องการ ซึ่งสามารถหาค่าความต้านทานจำกัดกระแสได้จากสมการที่ 2.59

$$I = \frac{(E - E_0)}{R_S + R_I} \quad (2.58)$$

ดังนั้น

$$R_S = \frac{(E - E_0)}{I} - R_I \quad (2.59)$$

แบตเตอรี่แบบทุติยภูมิ อัตราการอัดประจุหรือคายประจุ จะขึ้นอยู่กับความจุของแบตเตอรี่ พิกัดของกระแสอัดประจุแบตเตอรี่บอกไว้เป็นชั่วโมง ฉะนั้นค่าของกระแสหาได้จากค่าความจุซึ่งมีหน่วยเป็นแอมแปร์-ชั่วโมง (Ah) หากด้วยจำนวนชั่วโมง ในทำนองเดียวกันถ้าเรารู้กระแส จำนวนชั่วโมงจะหาได้จากความจุ (Ah) หากด้วยกระแสจะได้จำนวนชั่วโมง แต่ทั้งนี้และทั้งนี้ค่าความสัมพันธ์ของกระแสและชั่วโมงจะไม่แปรผันตามกันตลอด โดยถ้าจ่ายกระแสในปริมาณมาก ค่าพิกัดแอมแปร์-ชั่วโมงของแบตเตอรี่ อาจมีค่าน้อยลงซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการจ่ายประจุของแบตเตอรี่ (Rate of discharge) สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการอัดประจุ นั่นคือ ค่ากำลังสูญเสียในแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.60

$$P = I^2 R_I \quad (2.60)$$

เมื่อ P กำลังสูญเสียในแบตเตอรี่

I กระแสในการประจุแบตเตอรี่

R_I ค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่าเมื่อค่ากระแสในการประจุมีค่าสูง จะทำให้มีค่าสูญเสียมากซึ่งจะมีผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นในแบตเตอรี่ ถ้ามีค่าสูงมากจะทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานน้อยลง

2.7.4 ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่

ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่มีอยู่ 2 ชนิดคือ

- ประสิทธิภาพจากแอมแปร์-ชั่วโมง (Ah Efficiency) ซึ่งค่านี้ทางบริษัทผู้ผลิตจะเป็นผู้กำหนดมาให้ โดยปกติมีค่าประมาณ 90% หาได้จาก

$$\begin{aligned} \% \text{ Ah Eff} &= \text{ประจุที่จ่ายออกมา} / \text{ประจุที่อัดเข้าไป} \\ &= 90 \% \end{aligned}$$

- ประสิทธิภาพ Watt-hour ซึ่งผู้ใช้จะต้องคำนึงถึง หาได้โดย

$$\% \text{ Watt-hour} = (\% \text{ Ah Eff}) (V_{\text{discharge}} / V_{\text{charge}})$$

โดย V_{charge} สำหรับเซลล์ตะกั่ว-กรดเท่ากับ 2.25 V/cell

2.7.5 ระดับแรงดันกระทบกระเทือนต่ออายุของแบตเตอรี่

การปรับระดับแรงดันในการอัดประจุแบตเตอรี่นับว่าเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก ถ้าหากการปรับระดับแรงดันในการอัดประจุไม่ถูกต้อง ในขณะที่มีการอัดประจุปกติประจำวันทุกวัน แบตเตอรี่จะ ได้รับแรงดันในการอัดประจุโดยตรงจากเครื่องอัดประจุตลอดเวลา จะทำให้แบตเตอรี่เกิดการเสียหายขึ้น 2 ลักษณะ

- อันเดอร์ชาร์จ (Under charge)

เป็นการใช้แรงดันในการอัดประจุแบตเตอรี่ในระดับ Float charge ต่ำกว่า 2.15 V/cell ถ้าหากใช้แรงดันในการอัดประจุระดับนี้ไปนานๆ จะทำให้เกิดการซัลเฟตเกาะจับที่แผ่นธาตุ ทั้งบวกและลบ หากทิ้งไว้นานวันปริมาณซัลเฟตนี้จะเพิ่มมากขึ้น จนเป็นสาเหตุให้ทำปฏิกิริยาเคมีระหว่าง แผ่นธาตุทั้งบวกและลบกับน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ ทั้งการอัดประจุและจ่ายประจุเป็นไปด้วยความยากลำบาก ซึ่งส่งผลทำให้ประจุ (Capacity) ของแบตเตอรี่ลดลงตามลำดับ ถ้าหากทิ้งไว้นานวันจะส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ดังนั้นหากพบว่าแบตเตอรี่เกิด Under charge ขึ้นจะต้องรีบแก้ไข การเกิด Under charge สังเกตได้ดังนี้

- มีการปรับระดับน้ำยาอิเล็กโทรไลต์น้อยครั้งที่สุด หรือไม่มีการเกิดน้ำกลั่นล้นตลอดเวลาที่แบตเตอรี่ใช้งานอยู่
- มีฟองอากาศผุดภายในเซลล์น้อยที่สุดหรือน้อยกว่าปกติ
- สีของแผ่นธาตุลบมีสีขาวเกาะจับ
- ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์ต่ำกว่า 1.18
- วัดแรงดันตกคร่อมในแต่ละเซลล์ต่ำกว่า 2.15 V
- ความร้อนในเซลล์แบตเตอรี่ต่ำกว่าปกติ

- การประจุเกิน (Over charge)

เป็นการใช้แรงดันในการประจุในระดับโพลท้อดประจุสูงกว่า 2.25 V/cell ซึ่งเป็นระดับแรงดันที่สูงกว่าปกติ ทำให้เกิดกระแสไหลในวงจรแบตเตอรี่สูง ทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างน้ำยาอิเล็กโทรไลต์กับแผ่นธาตุ เป็นไปอย่างรุนแรง และรวดเร็วกว่าปกติ ซึ่งทำให้แผ่นธาตุทั้งสองเกิดการสึกกร่อนอย่างรวดเร็ว

2.7.6 ระดับแรงดันที่ใช้ประจุ

- **Float Charge** คือการประจุแบตเตอรี่ด้วยระดับแรงดันแบบธรรมดาที่มีค่าไม่สูงอยู่ที่ค่าประมาณ 2.13 – 2.3 V/Cell ในภาวะปกติของการประจุจะใช้ระดับแรงดันนี้

- **Equalizing Charge** ในบางครั้งแบตเตอรี่ที่ใช้อยู่ไม่ถูกใช้งานหรือใช้งานน้อย ทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีเสื่อมลงจึงควรมีการกระตุ้นแบตเตอรี่บ้างประมาณ 72 ชั่วโมงต่อปี โดยระดับแรงดันที่ใช้ ประจุประมาณ 2.3 – 2.55 V/Cell

- ระดับแรงดันที่แบตเตอรี่คายประจุจนหมด (End of cell)

คือจุดต่ำสุดของแรงดันในการพิจารณาว่าแบตเตอรี่คายประจุจนหมดแล้ว มีค่าไม่แน่นอนประมาณ 1.5 – 1.8 V/Cell ถ้าหากปล่อยให้แบตเตอรี่คายประจุจนต่ำกว่า End of Cell แล้วจะทำให้แบตเตอรี่คายประจุไม่สามารถอัดประจุด้วยวิธีธรรมดาได้ ต้องประจุแบบรุนแรงเป็นจังหวะเปรียบเหมือนการปั๊มหัวใจเพื่อทำให้แบตเตอรี่ฟื้น

- ขนาดกระแสสูงสุดที่แบตเตอรี่ทนได้

ขนาดกระแสสูงสุดที่แบตเตอรี่ทนได้ปกติจะกำหนดมาให้ในคู่มือการใช้แบตเตอรี่นั้นๆ แต่สำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดทั่วไปมีค่าประมาณ 0.15 C-rate

2.7.7 วิธีการประจุแบตเตอรี่สามารถแบ่งได้เป็น 4 วิธี

- การประจุแบตเตอรี่แบบกระแสคงที่ (Constant current charging)

การประจุแบตเตอรี่แบบกระแสคงที่นับว่าเป็นการประจุที่มีประสิทธิภาพว่าการประจุแบบแรงดันคงที่ แต่การประจุแบตเตอรี่แบบกระแสคงที่นี้จะใช้ระยะเวลาในการประจุมากกว่าแบบแรงดันคงที่ ทั้งนี้เพราะการประจุแบบกระแสคงที่นี้ จะถูกจำกัดปริมาณการประจุของกระแสจากเครื่องประจุเข้าวงจรแบตเตอรี่เป็นจำนวนแอมแปร์ต่อชั่วโมง ดังนั้นแบตเตอรี่จะได้รับกระแสในการประจุเป็นไปตามที่กำหนด เมื่อเป็นเช่นนี้อาจเป็นที่สงสัยว่าทำไมไม่ตั้งให้กระแสในการประจุสูงขึ้น จะทำให้เวลาในการประจุน้อยลง แต่จะเกิดผลเสียเพิ่มขึ้นกับตัวแบตเตอรี่ คือ ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเซลล์แบตเตอรี่จะสูงขึ้นตามปริมาณของกระแสที่ทำการประจุ และในที่สุดแผ่นธาตุของแบตเตอรี่ที่เป็นวัสดุแอ็คทีฟ (Active material) ของเซลล์แบตเตอรี่จะเกิดการคดงอ แตกหรือเกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากความร้อนนี้ ถ้าเซลล์แบตเตอรี่เกิดความร้อนสูงกว่าปกติมากๆ หรือ

ความร้อนในเซลล์สูงกว่ากำหนดจะทำให้เซลล์แบตเตอรี่เกิดการระเบิดได้ การประจุแบตเตอรี่แบบกระแสคงที่มีข้อดีเกิดขึ้นกับแบตเตอรี่คือ จะทำให้เซลล์แบตเตอรี่ได้รับการประจุกระแสในสัดส่วนเท่าๆกันในทุกเซลล์ตลอดชีวิตของแบตเตอรี่ ซึ่งในการประจูดัวยกระแสคงที่นี้ทำให้การคำนวณหาค่าความจุของแบตเตอรี่ ง่ายและสะดวก เช่น ถ้านำแบตเตอรี่ที่มีความจุขนาด 34 แอมแปร์ซังโงม หากเราใช้เวลาในการประจุ 5 ชั่วโมงเต็ม เราจะต้องใช้กระแสในการประจุเท่ากับ 6.8 แอมแปร์ต่อชั่วโมง ดังนั้นค่าความประจุของแบตเตอรี่จะเท่ากับ $5 \times 6.8 = 34 \text{ Ah}$ ดังนั้นเราพอจะสรุปได้ว่าเหตุผลที่ทำให้การประจุแบตเตอรี่แบบกระแสคงที่ที่ใช้เวลานานหรือช้าด้วยเหตุผลดังนี้

- ขึ้นอยู่กับค่าความจุหรือขนาดของแบตเตอรี่ที่นำมาทำการประจุ
- ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่ทำการประจุ
- ขึ้นอยู่กับสภาพของแบตเตอรี่ก่อนที่จะนำมาประจุ

จากการประจุแบบกระแสคงที่ เราไม่ได้กล่าวถึงแรงดันที่อัดประจุแบตเตอรี่เลย อย่างไรก็ตามในขณะที่เราทำการอัดประจุแบตเตอรี่อยู่นั้น ระดับแรงดันที่เซลล์ของแบตเตอรี่จะเริ่มจาก 2.00 V/cell จนถึง 2.33 V/cell ดังนั้นการอัดประจุแบบกระแสคงที่ที่พอสรุปได้ดังนี้ คือ การประจุจะทำอย่างรวดเร็วไม่ได้ เพราะจะต้องถูกจำกัดปริมาณของกระแสในการประจุที่คงตัวตามข้อมูลของแบตเตอรี่ชนิดนั้นกำหนดมา และอีกประการหนึ่งจะต้องคำนึงถึงความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเซลล์จึงแบตเตอรี่ ตลอดจนค่าความประจุของแบตเตอรี่ด้วย

- การอัดประจุแบบแรงดันคงที่ (Constant voltage charging)

จากที่ได้ทราบมาแล้วว่าการประจุแบบคงที่ จะทำประจูดังรวดเร็วไม่ได้ ต่อไปนี้เราจะศึกษาถึงการประจุแบบแรงดันคงที่ ในการประจุแบบนี้จะใช้ระยะเวลาในการประจุน้อยกว่าการประจุแบบแรก หรือทำการประจุได้อย่างรวดเร็วกว่านั่นเอง ระยะเวลาในการประจูดังรวดเร็วเท่าไรนั้น ขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องอัดประจุว่าจ่ายกระแสออกมาถึงวงจรแบตเตอรี่ได้มากน้อยเพียงไร โดยทั่วไปเครื่องอัดประจุต้องจ่ายกระแสออกมาได้ 50% ของค่าความจุของแบตเตอรี่ที่จะนำมาทำการประจุ เช่น แบตเตอรี่ขนาด 100 แอมแปร์ต่อชั่วโมง จะใช้เวลาในการประจุเท่ากับ 2 ชั่วโมง การประจุแบตเตอรี่โดยระบบแรงดันคงที่ทำได้โดยการใช้เครื่องประจุหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นตัวกำเนิดแรงดันขึ้นมาแล้วป้อนเข้าแบตเตอรี่ แต่การกำเนิดแรงดันจากเครื่องประจุหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น อาจจะมีแรงดันที่ไม่คงที่อยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีความควบคุมแรงดันที่จะนำเข้าไปประจุแบตเตอรี่ให้คงที่อยู่ตลอดเวลาในการประจุ ซึ่งตัวนี้เราเรียกกันทั่วไปว่า วงจรแรงดันเร็กกูเลเตอร์ (Voltage regulator) ดังนั้นวงจรเร็กกูเลเตอร์นี้จะทำหน้าที่ให้แบตเตอรี่ได้รับการประจุที่ คงที่ และนับว่าเป็นวงจรที่สำคัญยิ่งสำหรับการประจุแบบแรงดันคงที่ และในทำนองเดียวกัน ถ้าหากวงจรเร็กกูเลเตอร์นี้เสียจะทำให้แบตเตอรี่ได้รับระดับแรงดันในการประจุที่ไม่ถูกต้องซึ่งจะทำให้ แบตเตอรี่ได้รับแรงดันในการประจุมากหรือน้อยเกินไป ซึ่ง

ระดับแรงดันทั้งสองที่กล่าวมานี้จะทำให้ แบตเตอรี่เกิดความเสียหายได้ ในการประจุโดยทั่วไป นั้น การตั้งวงจรเร็กกูเลเตอร์จะมีค่าแรงดันเท่าไรนั้น ให้ดูคู่มือของแบตเตอรี่นั้นๆเป็นหลัก ในกรณีที่ไม่มีคู่มือ ให้ใช้จำนวนแรงดันในการประจู่ต่อเซลล์คูณด้วยจำนวนเซลล์ของแบตเตอรี่ที่ทำการประจุ

- การประจุโดยวิธีการเปลี่ยนระดับกระแส (Tapered current charging)

เป็นวิธีการประจุแบตเตอรี่ที่ไม่ซับซ้อน วงจรการอัดประจุประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง วงจรเรียงกระแส และค่าความต้านทานที่เหมาะสมสำหรับจำกัดกระแส แต่วิธีนี้ไม่เหมาะสมในการอัดประจุแบตเตอรี่ตะกั่วกรดปิดผนึก เนื่องจากกระแสที่ใช้อัดประจุจะกระเพื่อมตามแรงดันไลน์ ซึ่งจะทำให้แรงดันแบตเตอรี่เปลี่ยนไปด้วย แต่สามารถลดผลอันนี้โดยการใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มีแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิสูงกว่าแรงดันแบตเตอรี่และเลือกค่าความต้านทานที่เหมาะสมให้กับกระแส การประจุชนิดนี้สามารถใช้แทนการประจุแบบกระแสคงที่ได้ ไม่เฉพาะอัดประจุแบตเตอรี่ หลายๆถูกในคราวเดียวกัน ยังสามารถใช้ในการประจุแบบทริกเกิล (Trickle charging) ได้ด้วย

- การประจุแบตเตอรี่โดยวิธีร่วม (Combination Charging Two – Step)

วิธีนี้เราอาจเรียกว่า two – step หรือ two – rate เกิดจากการรวม 2 วิธี คือ การประจุแบบกระแสคงที่กับการประจุแบบแรงดันคงที่ เข้าด้วยกัน โดยขั้นแรกจะใช้วิธีการอัดประจุเร็ว และขั้นที่ 2 จะอัดประจุด้วยกระแสต่ำ ๆ การสวิตช์จากขั้นแรกไปยังขั้นที่ 2 อาจทำได้หลายวิธี เช่น ตรวจสอบแรงดันที่แบตเตอรี่ หรือควบคุมเวลาในการอัดประจุ หรือตรวจสอบกระแสในการอัดประจุ เป็นต้น

2.8 สรุป

หลักการทำงานของมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์และหลักการและชนิดของแบตเตอรี่ จะต้องทำความเข้าใจในทฤษฎีและพฤติกรรมของอุปกรณ์แต่ละชนิด เพื่อที่จะเป็นพื้นฐานความรู้ในการที่จะนำไปพัฒนาและออกแบบรถไฟฟ้า ซึ่งในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและสมการที่เกี่ยวข้อง โดยทำการรวบรวมมาจากแหล่งอ้างอิงต่างๆที่มีมาตรฐานตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่ใช้ และเรียงลำดับเรื่องราวของเนื้อหาตามความเหมาะสมในอันที่จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจหรือนักวิจัยรุ่นหลังได้ทำการศึกษาต่อไป สำหรับรายละเอียดเฉพาะเรื่องจะกล่าวถึงในบทต่อไปโดยนำเสนอควบคู่ไปกับวิธีการและขั้นตอนของการวิเคราะห์

บทที่ 3

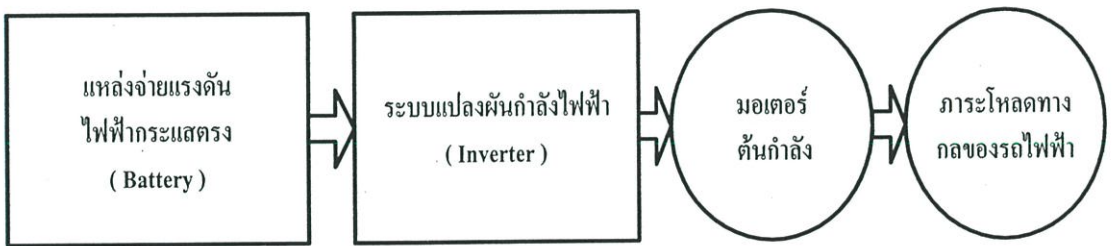
การออกแบบรถไฟฟ้าโดยสาร

3.1 บทนำ

การออกแบบรถไฟฟ้าใช้หลักการทางกลศาสตร์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเพราะเราจะต้องคำนึงถึงพลังงานกลที่ใช้ในการขับเคลื่อนตัวรถจากนั้นจึงนำไปสู่การหาขนาดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนรวมไปถึงระบบที่ใช้ควบคุมการขับเคลื่อนและแหล่งพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อน เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเพราะพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เป็นแหล่งพลังงานของตัวรถไฟฟ้ามีความสำคัญมากเพราะแหล่งกำลังงานนี้สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีจำกัด ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าเพื่อใช้ในการบอกถึงประสิทธิภาพของตัวรถในแง่การสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ต่อน้ำหนักบรรทุกหรือต่อระยะทางที่ได้เป็นต้น ดังนั้นในบทนี้จะบ่งชี้จะเป็นการกล่าวถึงการออกแบบต้นแบบที่ใช้ในการศึกษาและแนวทางการทดสอบหาประสิทธิภาพที่กล่าวมาข้างต้น

3.2 แนวคิดในการออกแบบรถไฟฟ้าต้นแบบ

รถไฟฟ้าที่จะกล่าวถึงในบทนี้จะใช้เทคนิคการขับเคลื่อนแบบไฟฟ้ากระแสสลับที่กล่าวมาแล้วในบทก่อนหน้านี้ โดยจะต้องทำการกำหนดข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการออกแบบและหลักการทำงานของรถไฟฟ้าทั้งหมดดังนั้นจากผังการทำงานรวมของรถไฟฟ้าในรูปที่ 3.1



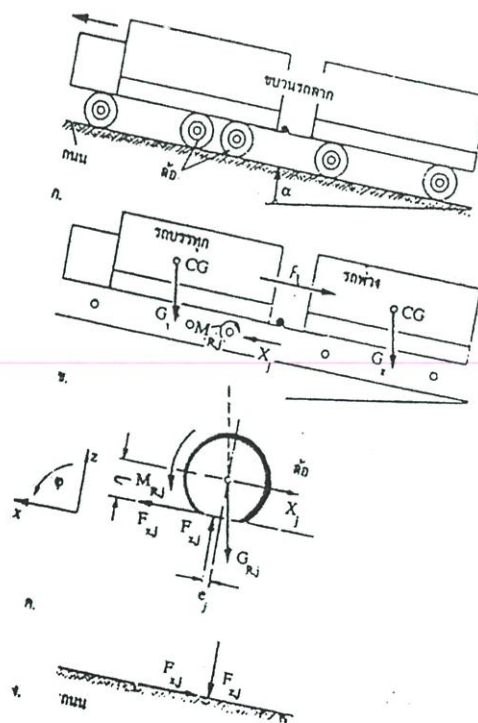
รูปที่ 3.1 ผังการทำงานของรถไฟฟ้า

จากผังการทำงานในรูปที่ 3.1 เนื่องภาระทางกลของรถไฟฟ้าคือน้ำหนักบรรทุกรวมกับน้ำหนักของตัวรถรวมถึงค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากพื้นถนนและแรงต้านอากาศเป็นต้น ดังนั้นการกำหนดข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบนั้นมีความสำคัญในการกำหนดพิกัดต่างๆของตัวรถรวมถึงประสิทธิภาพของรถไฟฟ้าที่สร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นต้นแบบในการทดสอบ ข้อกำหนดและเงื่อนไขเบื้องต้นใน

การออกแบบให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ในการใช้งานรับส่งนักศึกษาภายในสถาบันฯ จึงได้มีการสำรวจความคิดเห็นของกลุ่มผู้ใช้งานในสถาบันฯ [11] จึงกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ดังนี้

- น้ำหนักตัวรวมแบตเตอรี่ 2000 kg.
- น้ำหนักบรรทุกสูงสุด 1000 kg. (15 ที่นั่ง)
- อัตราเร่งสูงสุด 0.6 m/s^2
- ความเร็วสูงสุด 30 km/hr ที่ความถี่ 50Hz.
- ระดับการไต่ทางชันสูงสุด 7 องศา

3.3 การออกแบบขนาดพิกัดต้นกำลังและขนาดของเครื่องแปลงผันกำลังงาน



รูปที่ 3.2 แรงที่กระทำต่อรถ

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_B + \vec{F}_R + \vec{F}_L + \vec{F}_{ST} \quad (3.1)$$

$\sum \vec{F}$ เป็นแรงที่ใช้ขับเคลื่อน (N)

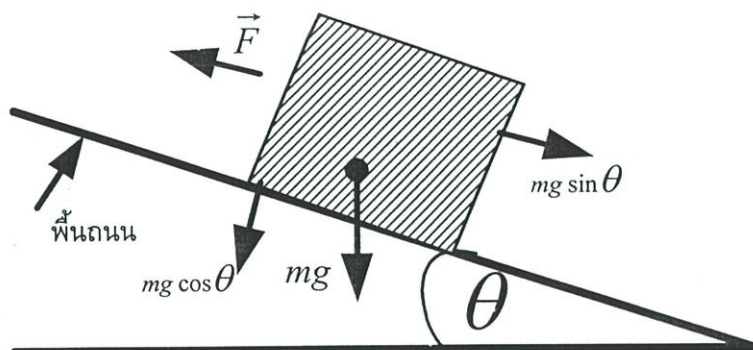
\vec{F}_B เป็นแรงที่ใช้ในการเร่ง (N)

\vec{F}_R เป็นแรงต้านทานจากการกลิ้งของล้อ (N)

\vec{F}_L เป็นแรงต้านทานจากอากาศ (N)

\vec{F}_{ST} เป็นแรงต้านจากการไต่ความชัน (N)

กำหนดให้	$g = 9.8 \text{ m/s}^2$	$a = 0.6 \text{ m/s}^2$	$\vec{F}_B \approx \frac{3}{2} ma$
	$\mu = 0.01$	รัศมีล้อรถ = 0.35 m	$\vec{F}_R = \mu mg \cos \theta$
	$\vec{F}_L \approx 50 \text{ N}$	$\vec{F}_{ST} = mg \sin \theta$	$v = 30 \text{ km/hr}$



รูปที่ 3.3 เวกเตอร์ของแรงบนทางชัน

ขณะออกตัวที่ทางเรียบ ($\theta = 0$) สามารถคำนวณหาแรงที่ใช้ขับเคลื่อนจากสมการที่ 3.1 ได้ดังนี้

$$\sum \vec{F} = 2,046 \quad \text{N}$$

จากแรงที่ใช้ขับเคลื่อนสามารถคำนวณหาแรงบิดในการออกตัวได้ดังนี้

$$T = |F| \cdot r$$

$$T = 716.1 \quad \text{N-m}$$

ขณะวิ่งขึ้นทางชัน 7 องศา ($\theta = 7$) ด้วยความเร็วคงที่ ($a = 0$) สามารถคำนวณหาแรงที่ใช้ขับเคลื่อนจากสมการที่ 3.1 ได้ดังนี้

$$\sum \vec{F} = 2,633.18 \quad \text{N}$$

และจะสามารถคำนวณหาแรงบิดในการวิ่งขึ้นทางชันได้ดังนี้

$$T = |F| \cdot r$$

$$T = 921.6 \quad \text{N-m}$$

คำนวณหาแรงบิดที่ต้องใช้จากมอเตอร์

เมื่อพิจารณาที่อัตราทดเฟืองท้าย 1:4.531

ดังนั้นจะต้องใช้แรงบิดจากมอเตอร์เมื่อออกตัวบนทางเรียบ

$$T = 716.1/4.531 \quad \text{N-m}$$

$$= 158.05 \quad \text{N-m}$$

ดังนั้นจะต้องใช้แรงบิดจากมอเตอร์เมื่อขึ้นทางชัน (7 องศา)

$$\begin{aligned} T &= 921.6/4.531 && \text{N-m} \\ &= 203.8 && \text{N-m} \end{aligned}$$

คำนวณกำลังที่ต้องใช้จากมอเตอร์เราพิจารณาที่แรงบิดสูงสุดที่ต้องการใช้งานมีค่าเท่ากับแรงบิดที่ใช้ออกตัวที่กรณีทางมีความลาดชันเท่ากับ 7 องศาซึ่งแรงบิดมีค่าเท่ากับ 204.8 N-m เมื่อพิจารณาที่ความเร็ว 30 km/hr จะสามารถคำนวณความเร็วรอบของล้อได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วของรถ (v)} &= \frac{30 \cdot 1000}{60 \cdot 60} && \text{m/s} \\ &= 8.3 && \text{m/s} \end{aligned}$$

ดังนั้นสามารถคำนวณหาความเร็วรอบของล้อได้สมการที่ 3.2

$$\begin{aligned} N &= \frac{v}{2\pi r} && \text{rps.} && (3.2) \\ &= 3.79 && \text{rps.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วของเพลามอเตอร์} &= \text{อัตราเฟืองทด} \cdot \text{ความเร็วล้อ} \cdot 60 \text{ rpm.} \\ &= 4.531 \cdot 3.79 \cdot 60 \\ &= 1079.28 && \text{rpm.} \end{aligned}$$

และสามารถนำไปหาค่าความเร็วเชิงมุม(ω)ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \omega &= N 2\pi \\ &= 3.79 \cdot 2\pi && \text{rad/s} \\ &= 23.8 && \text{rad/s} \end{aligned}$$

สามารถคำนวณกำลังของมอเตอร์ได้จากสมการ

$$P = T\omega$$

∴ จะต้องใช้กำลังจากมอเตอร์เมื่อออกตัวบนทางเรียบ

$$\begin{aligned} P &= 716.1 \times 23.8 && \text{watt} \\ &= 17,043.18/746 \\ &= 22.846 && \text{hp} \end{aligned}$$

∴ จะต้องใช้กำลังจากมอเตอร์เมื่อขึ้นทางชัน (7 องศา)

$$\begin{aligned} P &= 921.6 \times 23.8 && \text{watt} \\ &= 21,934.08 /746 \\ &= 29.04 && \text{hp} \end{aligned}$$

จากผลการคำนวณจึงสามารถเลือกขนาดของมอเตอร์ได้ดังนี้

- มีกำลังไม่น้อยกว่า 29.04 hp
- มีแรงบิดไม่น้อยกว่า 203.8 N-m
- ความเร็วรอบของมอเตอร์ 1079.28 rpm

- การเลือกมอเตอร์

ประเภทของมอเตอร์ในท้องตลาดในปัจจุบันนั้นมีมากมายหลายชนิด แต่สาเหตุที่เลือกใช้อินดักชันมอเตอร์เพราะ

1. น้ำหนักเบากว่าเมื่อเทียบกับมอเตอร์ชนิดอื่นในขนาดกำลังเดียวกัน
2. สามารถควบคุมได้ง่าย การเปลี่ยนแปลงความเร็วสามารถเปลี่ยนได้จากการควบคุมความถี่ และกลับทิศทางหมุนโดยการกลับเฟสไฟที่จ่ายเข้า 1 คู่
3. ให้แรงบิดที่สูงพอที่ใช้ขั้วภาระ
4. ราคาถูกเมื่อเทียบกับมอเตอร์ชนิดอื่นๆ ในขนาดกำลังเดียวกัน
5. ทนทาน เสียค่าบำรุงรักษาต่ำ เหมาะสมกับการใช้ในรถไฟฟ้า

การเลือกอินดักชันมอเตอร์นั้น จะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติ 3 ประการคือ ขนาดกำลังของมอเตอร์ ขนาดแรงบิด และจำนวนขั้วของมอเตอร์ ซึ่งจากการคำนวณหาค่าความเร็วรอบข้างต้นมีค่าเท่ากับ 1079.28 รอบต่อวินาทีที่ความถี่ 50 Hz. สามารถหาขนาดกำลัง และขนาดแรงบิดที่ต้องการในการขับโหลด ซึ่งจากข้อมูลทั้ง 2 สามารถนำมาหาจำนวนขั้วของมอเตอร์ได้ดังนี้

$$P = \frac{120f}{N}$$

$$= \frac{120 * 50}{1079.28} = 5.56 \cong 6 \text{ ขั้ว}$$

เมื่อพิจารณาการสูญเสียทางกล 85% จะทำให้ต้องใช้มอเตอร์ที่มีกำลังประมาณ 34 hp แต่ว่ามอเตอร์สามารถ Overload ได้ประมาณ 150% และการเคลื่อนที่ขึ้นทางชันมีไม่มากนักเมื่อใช้งานภายในสถาบัน จึงควรคำนึงถึงน้ำหนักของมอเตอร์เมื่อมีขนาดเพิ่มขึ้นมากกว่า

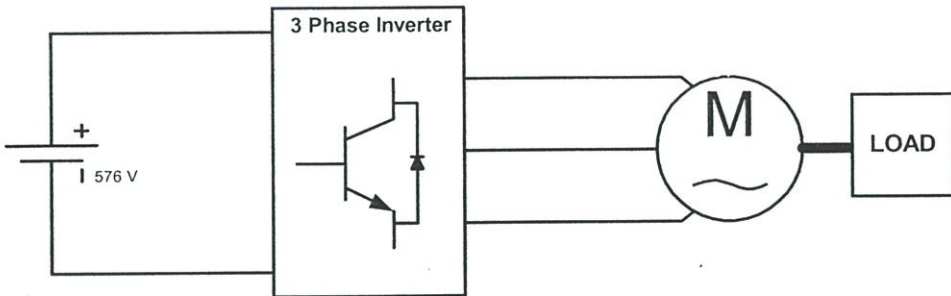
ดังนั้นจึงเลือกใช้มอเตอร์ขนาด 22 kW 30 Hp 6 Pole 50 Hz 215 N-m 975 rpm

- การเลือกขนาดของอินเวอร์เตอร์

การเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ควรจะมีขนาดกำลังมากกว่าขนาดกำลังของมอเตอร์ประมาณ 25% เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้นจึงควรเลือกอินเวอร์เตอร์ที่มีขนาดกำลังมากกว่า 27.5 kW การเลือกการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเลือกใช้พัลส์ชวิตช์มอดดูเลชัน อินเวอร์เตอร์ (Pulse Width Modulation <PWM>) ควบคุมความเร็วรอบแบบการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่อความถี่ (V/f) ยี่ห้อ ABB รุ่น ACS 400 ขนาด 30 kW ความถี่สวิทซ์เท่ากับ 8 kHz

3.4 การออกแบบแบตเตอรี่ระบบพลังงานหลัก

ระบบพลังงานหลักที่ใช้ในการขับเคลื่อน (Power system) สำหรับรถไฟฟ้าการออกแบบระบบพลังงานหลักนี้ จะมี 2 ส่วนใหญ่ๆคือ การออกแบบแบตเตอรี่ ที่ใช้เป็นแหล่งพลังงานขับเคลื่อนของรถ และการหาเครื่องประจุแบตเตอรี่ที่เหมาะสม ขนาดของสาย และอุปกรณ์ป้องกัน



รูปที่ 3.4 วงจรระบบพลังงานหลักของรถไฟฟ้า

ซึ่งอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนมีพิกัดของ มอเตอร์ต้นกำลัง และ อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ควบคุม เป็นดังนี้

- มอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับ 3 phase 380V 22 kW 30 Hp 6 pole 50 Hz 975 rpm และกระแสที่พิกัด 41 A
- อินเวอร์เตอร์ 3 phase ขนาด 30 kW แรงดันกระแสตรงที่ป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์(DC link) 580 V โดยผิดพลาดได้ $\pm 10\%$ (528 V – 645 V)

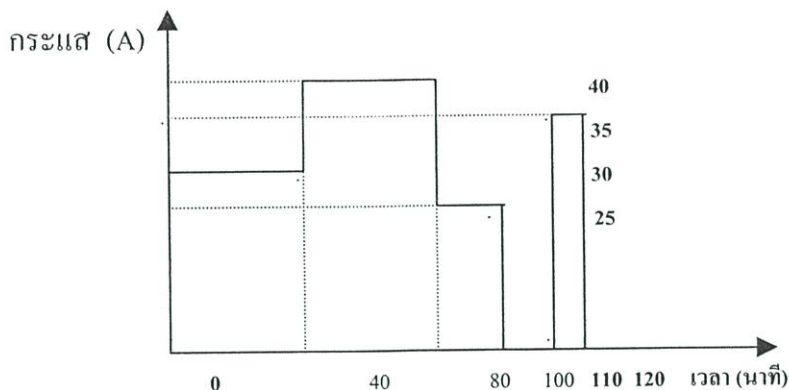
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด แรงดัน 12 V 65 Ahr. ใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับรถไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาโดยทำการต่ออนุกรมกันให้ ได้แรงดันเท่ากับ 586 V นั่นคือใช้จำนวนแบตเตอรี่ทั้งหมด

$$580 / 12 = 48.33 \text{ ลูก}$$

$$\text{ทำการเลือกใช้ที่ } 48 \text{ ลูก}$$

เมื่อกำหนดให้แบตเตอรี่แต่ละลูก มีแรงดันเท่ากับ 12 V จะได้แรงดันรวมเท่ากับ 576 V ซึ่งอยู่ในช่วงของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงที่อินเวอร์เตอร์กำหนด

ในการที่รถไฟฟ้าต้องวิ่งและหยุดรับส่งผู้โดยสารตลอดเวลา สามารถหาขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมจากกราฟในรูปที่ 3.6เป็น Load Pattern จำลองที่มีการเพิ่มขึ้นและลดลงของกระแสในเวลา 2 ชั่วโมงโดยประมาณ ซึ่งวิธีการประมาณค่าจะแบ่งออกเป็นสามช่วง ซึ่งเป็นการประมาณการดึงกระแสจากแบตเตอรี่และระยะเวลาใช้งานที่แตกต่างกันออกไปเพื่อนำไปหาขนาดความจุของแบตเตอรี่ที่ใช้งานของรถไฟฟ้าในระยะเวลา 120 นาที ซึ่งการจำลองการใช้งานของรถไฟฟ้าในขณะที่วิ่งในการคำนวณจึงกำหนดค่ากระแสและระยะเวลาที่ใช้งานเป็นสามช่วงดังนี้



รูปที่ 3.5 การประมาณการดึงกระแสของมอเตอร์อย่างคร่าวๆ

จากรูปที่ 3.6 ช่วงแรกกำหนดให้ $I_1 = 30A.$ $T_1 = 80 \text{ min.}$
 $I_2 = 41A.$ $T_2 = 40 \text{ min.}$
 ค่า L ที่ใช้จะใช้ค่า 0.8

จากข้อมูล I และ T นำไปเปิดหาค่า K จากกราฟคายประจุจะได้

$K_1 = 2.6$ จาก General Formula for Calculation of Capacity

$$C = \frac{1}{L[K_1 I_1 + K_2 (I_2 - I_1) + K_3 (I_3 - I_2) + \dots + K_n (I_n - I_{n-1})]} \quad (3.3)$$

เมื่อ C : ความจุของแบตเตอรี่ (A-H)

L maintenance factor ($L = 0.8$)

K ค่าคงที่ในการคายประจุ

I กระแส (A)

T เวลา (min)

$K_2 = 1.8$

แทนค่า

$$C_1 = 1/0.8 [(2.6 \times 30) + 1.8 (41 - 30)]$$

$$= 122.25 \text{ A-H} / 20 \text{ Hr}$$

จากรูปที่ 3.6 ช่วงสองกำหนดให้ $I_1 = 30A.$ $T_1 = 100 \text{ min.}$ $K_1 = 3.0$
 $I_2 = 41A.$ $T_2 = 60 \text{ min.}$ $K_2 = 2.2$
 $I_3 = 25A.$ $T_3 = 20 \text{ min.}$ $K_3 = 1.3$

แทนค่าในสมการที่ 3.3 ได้

$$C_2 = 1/0.8[(3 \times 30) + 2.2 (41 - 30) + 1.3(25 - 41)]$$

$$= 116.75 \text{ A-H/20 hr}$$

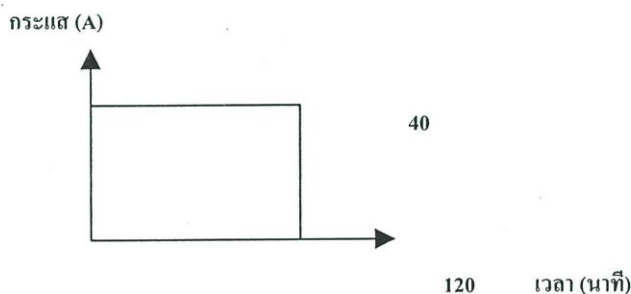
จากรูปที่ 3.6 ช่วงที่สามกำหนดให้ $I_1 = 30A$. $T_1 = 120 \text{ min.}$ $K_1 = 3.4$
 $I_2 = 41A$. $T_2 = 80 \text{ min.}$ $K_2 = 2.6$
 $I_3 = 25A$. $T_3 = 40 \text{ min.}$ $K_3 = 1.8$
 $I_4 = 0A$. $T_4 = 20 \text{ min.}$ $K_4 = 1.3$
 $I_5 = 35A$. $T_5 = 10 \text{ min.}$ $K_5 = 1.1$

แทนค่าในสมการที่ 3.3 ได้

$$C_3 = 1/0.8[(3.4 \times 30) + 2.6(41-30) + 1.8(25-41) + 1.3(0 - 25) + 1.1 (35-0)]$$

$$= 134.75 \text{ Ah/20 hr}$$

จากค่าทั้ง C_1 , C_2 , C_3 ที่คำนวณได้นั้นจะเห็นว่าจะต้องใช้แบตเตอรี่ที่มีความจุไม่น้อยกว่า 150 Ah/20 hr ซึ่งเป็นการประมาณการใช้งานจากรูปที่ 3.6 ดังนั้นจึงทำการคำนวณเปรียบเทียบเมื่อใช้งานที่พิกัดของมอเตอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมงได้ Load pattern ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 กราฟ การดึงกระแส เมื่อคิดที่เต็มพิกัดของมอเตอร์

$$I = 41A.$$

$$T = 120 \text{ min.}$$

$$K = 3.5$$

จาก สมการที่ 3.3 จะได้ $C = (KI/L)$

แทนค่า $= (3.5 \times 41) / 0.8$

$$= 180 \text{ A h / 20 hr}$$

จากค่า C ได้แบตเตอรี่ขนาด 180 Ah/20hr

การใช้วิธี General Formula for Calculation of Capacity เป็นการคิดหาขนาดความจุแบตเตอรี่ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของระบบมากที่สุด แต่ไม่เหมาะสมสำหรับนำมาติดตั้งบนรถไฟฟ้า เพราะ ระบบพลังงานหลักของรถไฟฟ้ามีอัตราการจ่ายกระแสไม่แน่นอน อีกทั้งข้อจำกัดทางด้านน้ำหนักบรรทุกเพราะขนาดที่คำนวณได้จะมีขนาดและน้ำหนักมากกว่าข้อกำหนดในการออก

แบบโครงสร้างรถ ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาขนาดความจุของแบตเตอรี่จากกราฟระยะเวลาที่แบตเตอรี่สามารถคายประจุ โดยเทียบอัตราการคายประจุเป็นค่า C-rate จากค่าของภาระ ดังนี้

มอเตอร์เหนี่ยวนำ พิกัด 22 kW ประสิทธิภาพ 90 %

อินเวอร์เตอร์ พิกัด 33 kW ประสิทธิภาพ 90 %

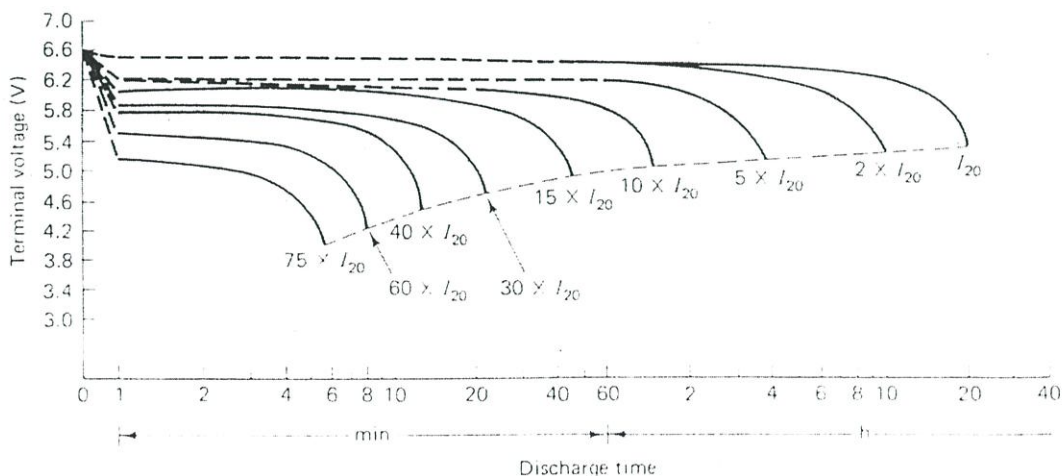
$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น พลังงานที่ต้องจ่ายให้กับระบบ} &= 22,000 / (0.9 \times 0.9) \\ &= 27,160 \qquad \qquad \qquad \text{W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้อัตราการคายประจุ} &= 27,160 / (380 \times 1.414) \\ &= 50.54 \qquad \qquad \qquad \text{A} \end{aligned}$$

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบขนาดแบตเตอรี่ ชนิดตะกั่วกรด (rate 20 h)

ความจุ (Ah)	ยาว (mm)	กว้าง (mm)	สูง (mm)	สูงถึงขั้ว (mm)	น้ำหนัก (kg)	น้ำหนักรวม (kg)	Wh รวม 48 Unit (w)
60	260	173	202	225	19.2	921.6	34,560
65	260	173	202	225	20.75	996	37,440
70	305	173	202	225	22.5	1056	40,320
100	305	173	202	225	30.0	1440	57,600

จากแบตเตอรี่ขนาดต่างๆ กัน เมื่อพิจารณาถึงสถานะของรถยนต์ที่จะมีการหยุดนิ่ง ออกตัววิ่งด้วยความเร่ง และสถานะคงที่ อาจจะมีปริมาณการคายประจุที่แตกต่างกันสามารถหาระยะเวลาในการใช้งานแบตเตอรี่ โดยทำการประมาณค่าปริมาณการดิ่งกระแสตั้งแต่ 50 - 100 เปอร์เซ็นต์ แล้วเทียบกับกราฟ อัตราการคายประจุ ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จากรูปที่ 3.5 ได้ เวลาที่สามารถวิ่งได้ เป็นดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.7 เวลาในการคายประจุ กับแรงดันต่อเซลล์ของแบตเตอรี่

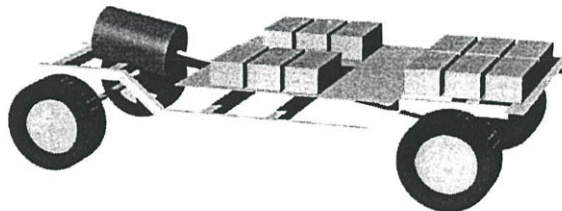
ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบเวลาในการใช้งานแบตเตอรี่ ที่สภาวะการใช้งานต่างๆกัน

พิกัดแบตเตอรี่ (Ah)	ปริมาณ Discharge การDischarge (A)	50 %	60 %	70 %	80 %	90%	100 %
60	ระยะเวลาใช้งาน(นาทื)	105	90	50	40	30	22
65	ระยะเวลาใช้งาน(นาทื)	120	100	75	50	40	35
70	ระยะเวลาใช้งาน(นาทื)	135	110	90	60	45	40
100	ระยะเวลาใช้งาน(นาทื)	180	160	140	105	90	60

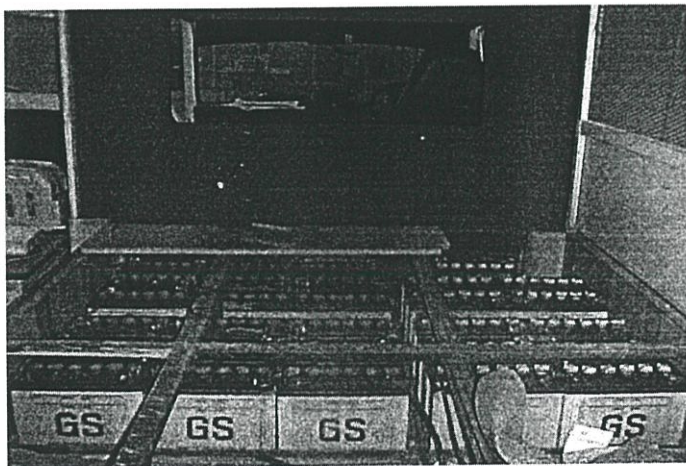
จากค่าในตารางที่ 3.2 ทำการเลือกแบตเตอรี่ขนาด 65 Ah มาเป็นใช้ในการทดลองเพราะเมื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมในด้านน้ำหนักรวมของแบตเตอรี่ ระยะเวลาที่รถสามารถวิ่งได้ อีกทั้งยังเป็นรถต้นแบบสำหรับการพัฒนาต่อไปในอนาคต

3.5 การออกแบบโครงสร้างและการติดตั้งอุปกรณ์

การออกแบบโครงสร้างและการจัดวางแบตเตอรี่เนื่องจากเป็น โครงสร้างรถเราจึงต้องนำมอเตอร์แทนที่เครื่องยนต์และนำแบตเตอรี่วางไว้ข้างบนดังแสดงในรูปที่3.9และ3.10



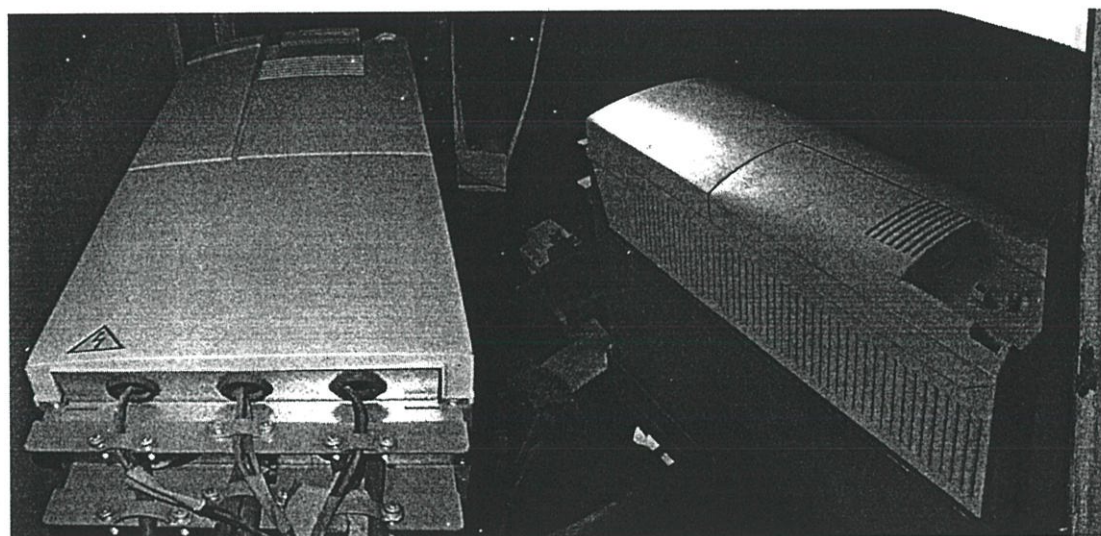
รูปที่ 3.8 ลักษณะการจัดวางมอเตอร์และแบตเตอรี่



รูปที่ 3.9 ลักษณะติดตั้งแบตเตอรี่



รูปที่ 3.10 ลักษณะติดตั้งมอเตอร์



รูปที่ 3.12 ลักษณะติดตั้งอินเวอร์เตอร์

ส่วนในรูปที่ 3.11 เป็นการแสดงลักษณะการติดตั้งมอเตอร์เข้ากับตัวรถซึ่งมีการต่อเพลลาของมอเตอร์เข้ากับระบบส่งกำลังของรถโดยตรงซึ่งไม่ผ่านเกียร์ทดรอบ และในรูปที่ 3.12 เป็นลักษณะการติดตั้งอินเวอร์เตอร์เข้าที่ตัวรถด้านภายในห้องโดยสาร และในรูปที่ 3.13 และ 3.14 เป็นภาพแสดงถึงโครงสร้างรถที่ประกอบกันอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 3.12 ด้านหน้ารถไฟฟ้า



รูปที่ 3.13 ด้านหลังรถไฟฟ้า

3.6 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอการออกแบบระบบต่างๆของรถไฟฟ้า นี้ใช้เป็นแนวทางการออกแบบรถไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นต้นแบบในการศึกษาและทดสอบหาประสิทธิภาพเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อพัฒนารถไฟฟ้าต่อไปในอนาคต เสนอหลักการในการคำนวณต้นกำลัง(Motor),ชุดควบคุม(Inverter)

บทที่ 4

การทดสอบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพ

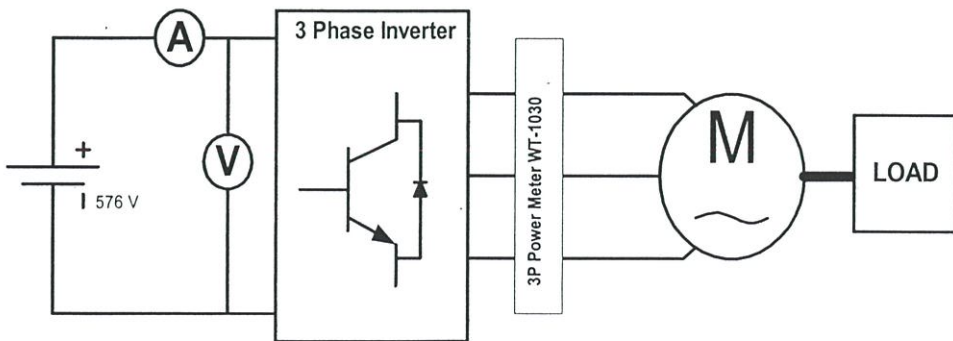
4.1 บทนำ

การออกแบบระบบไฟฟ้าใช้หลักการทางกลศาสตร์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเพราะเราจะต้องคำนึงถึงพลังงานกลที่ใช้ในการขับเคลื่อนตัวรถจากนั้นจึงนำไปสู่การหาขนาดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนรวมไปถึงระบบที่ใช้ควบคุมการขับเคลื่อนและแหล่งพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อน เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเพราะพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เป็นแหล่งพลังงานของตัวรถไฟฟ้ามีความสำคัญมากเพราะแหล่งกำลังงานนี้สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีจำกัด ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าเพื่อใช้ในการบอกถึงประสิทธิภาพของตัวรถในแง่การสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ต่อน้ำหนักบรรทุกหรือต่อระยะทางที่ได้เป็นต้น ดังนั้นในบทนี้จะบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการออกแบบต้นแบบที่ใช้ในการศึกษาและแนวทางการทดสอบหาประสิทธิภาพที่กล่าวมาข้างต้น

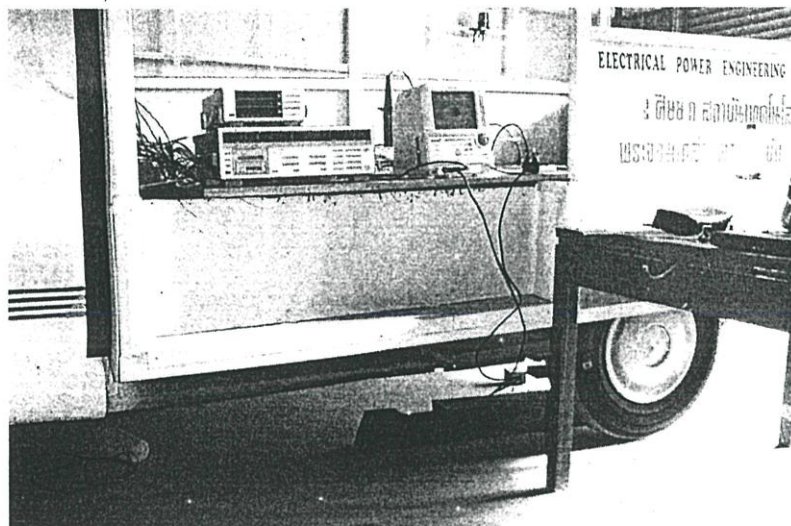
4.2 การทดสอบหาประสิทธิภาพของชุดขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์ ABB รุ่น ACS400

4.2.1. ในขณะที่มอเตอร์ไม่มีภาระทางกล

การทดสอบความสามารถในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์โดยปรับเปลี่ยนค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่มอเตอร์เพื่อปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เพื่อวัดค่าพลังงานไฟฟ้าขณะไม่มีภาระทางกลของรถไฟฟ้าและทดสอบระบบขับเคลื่อน โดยทดสอบกับมอเตอร์ต้นกำลังที่มีพิกัดเท่ากับ 22 kW 415 V Delta 50 Hz 6 Poles ,อินเวอร์เตอร์ ABB รุ่น ACS400ขนาด 30 kW,เครื่องมือวัดพลังงานไฟฟ้า Yokogawa WT-1030,WT-200,Digital Oscilloscope Yokogawa DL1530/DL และ Digital Tachometers Yokogawa 3631 ทำการทดสอบโดยยกตัวรถลอยขึ้นและวัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์และพลังงานไฟฟ้าขาออกจากอินเวอร์เตอร์ป้อนให้แก่มอเตอร์ตามวงจรในรูปที่4.1และลักษณะการต่อเครื่องมือวัดในรูปที่ 4.2

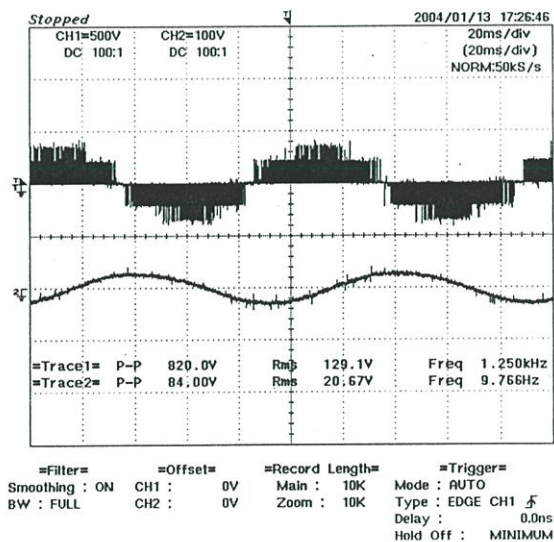


รูปที่ 4.1 วงจรกำลังของมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์

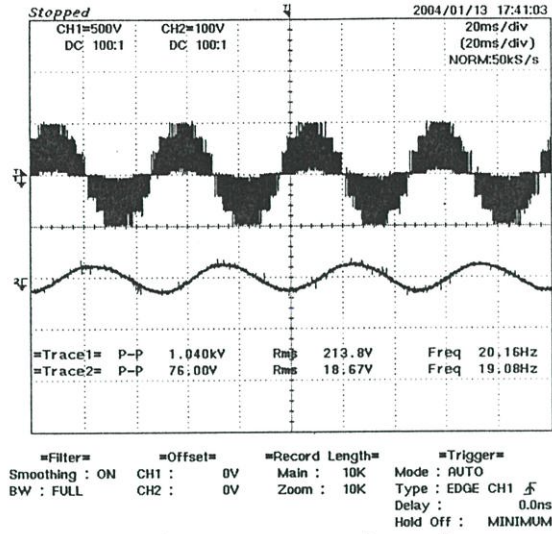


รูปที่ 4.2 การทดสอบวัดพลังงานที่จ่ายให้กับมอเตอร์

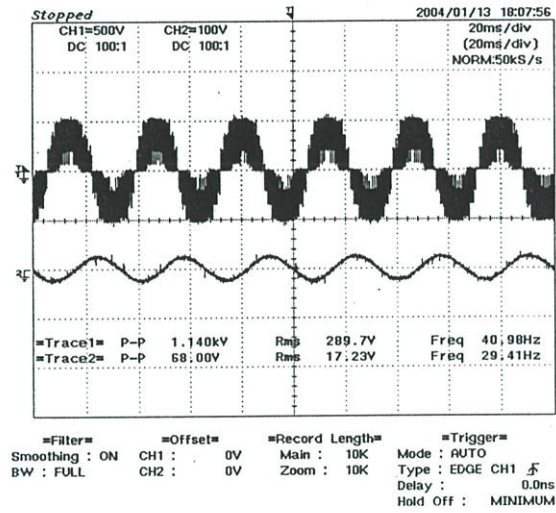
เมื่อต้องจรสำหรับทดสอบดังรูปที่ 4.1 แล้วทำการปรับค่าความถี่ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ครั้งละ 10 Hz. จนถึง 50 Hz. และทำการวัดรูปสัญญาณแรงดันและกระแสที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ว่ามี ลักษณะของรูปสัญญาณใกล้เคียงรูปไซน์เพราะจะเหมาะสมแก่การนำไปขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า เห็นยวนาซึ่งจากรูปสัญญาณกระแสและแรงดันในรูปที่ 4.3 จนถึงรูปที่ 4.7 จะสังเกตได้ว่าลักษณะ ของรูปกระแสที่ได้จะมีลักษณะใกล้เคียงรูปไซน์ ซึ่งจะมีค่า %THD น้อยมากจะไม่ส่งผลในแง่ของ ความร้อนที่เกิดขึ้นขณะใช้งานของมอเตอร์ในขณะขับภาระโหลด



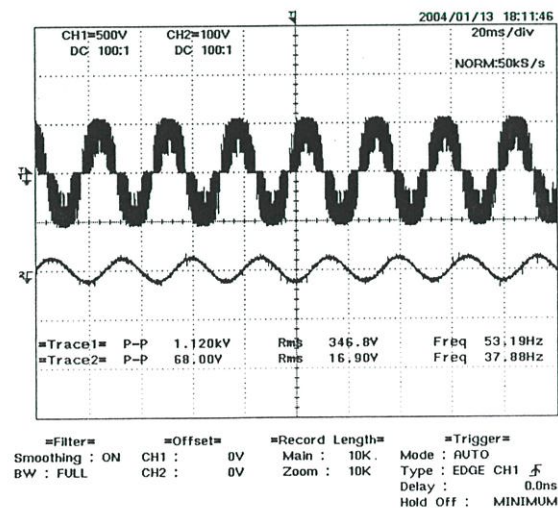
รูปที่ 4.3 สัญญาณแรงดันและกระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์ที่ความถี่ 10Hz



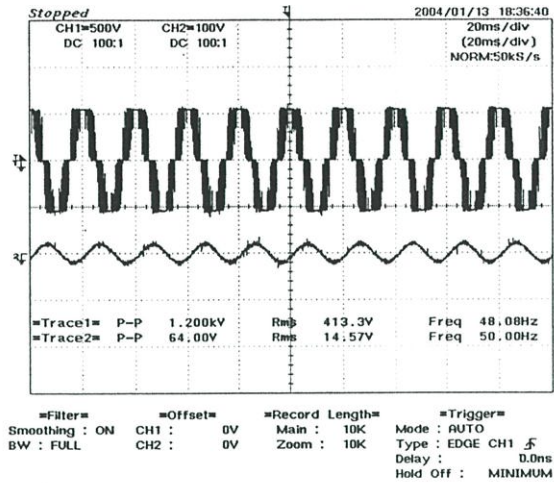
รูปที่ 4.4 สัญญาณแรงดันและกระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์ที่ความถี่ 20Hz



รูปที่ 4.5 สัญญาณแรงดันและกระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์ที่ความถี่ 30Hz



รูปที่ 4.6 สัญญาณแรงดันและกระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์ที่ความถี่ 40Hz



รูปที่ 4.7 สัญญาณแรงดันและกระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์ที่ความถี่ 50Hz

การทดลองข้างต้นเพื่อทดสอบหาค่าพลังงานในส่วนต่างๆของของรถไฟฟ้าในขณะที่ไม่ได้รับภาระของน้ำหนักของตัวรถหรือน้ำหนักบรรทุกเพื่อทดสอบคุณสมบัติของการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนในรถไฟฟ้าที่ได้จัดสร้างขึ้นซึ่งได้ผลการทดสอบตามตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 ตามลำดับ จากการทดสอบนั้นจะสังเกตได้ว่าในกรณีที่ทดสอบหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ขณะขับเคลื่อนที่ไม่น้ำหนักบรรทุก เพื่อเป็นการหาค่าประสิทธิภาพของชุดขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าในการทำงานภายใต้ไม่มีน้ำหนักโคคกลงที่ตัวล้อรถเลย โดยปรับย่านความถี่ที่ใช้งานและวัดค่าพลังงานที่พิกัดความถี่ต่างๆและวัดการพลังงานในส่วนไฟฟ้ากระแสตรงของชุดขับเคลื่อนและพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับขณะไม่มีน้ำหนักบรรทุก และในตารางที่ 4.2 จะเป็นการทดสอบหาค่าอัตราเฟืองทดของรถที่สร้างขึ้น ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1 ต่อ 2.425 ซึ่งต่างกับค่าที่ใช้ในการออกแบบซึ่งจะส่งผลโดยตรงในการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่าพลังงานที่ป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์และออกจากอินเวอร์เตอร์

ความถี่ (Hz)	DC Input			AC out						
	Vin (V)	Iin (A)	Po/p (kW)	Vrms (V)			Io/p (A)			Ptotal (kW)
				A	B	C	A	B	C	
10	551	1.56	0.859	91.01	90.87	90.64	19.73	19.17	20.3	0.707
20	548	2.12	1.128	173.21	173.29	173.95	17.84	17.17	17.96	0.931
30	540	2.561	1.285	255.25	255.3	255.97	16.82	16.52	17.43	1.085
40	540	2.793	1.425	314.7	314.5	314.2	16.54	16.24	3.178	1.223
50	543	3.131	1.622	387.6	387.1	387.3	13.807	13.582	14.49	1.423

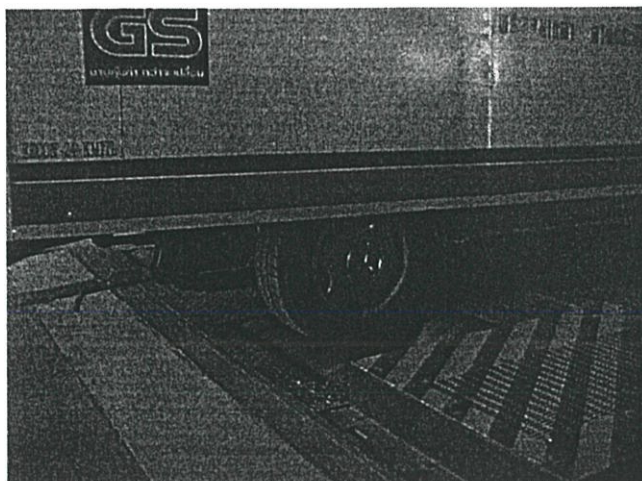
ตารางที่ 4.2 ผลการความเร็วรอบที่แกนเพลลาและล้อของรถไฟฟ้า

ความถี่ (Hz)	Nเพลลา (rpm)	Nล้อ (rpm)	อัตราเฟืองทด
10	198.8	81.9	2.427
20	398.2	164.6	2.419
30	598.7	246.8	2.426
40	787.5	325.6	2.419
50	998.6	410	2.436

สรุปผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ขณะไม่มีภาระทางกลเป็นการวัดผลเพื่อหาความสัมพันธ์ของความถี่ที่เพิ่มขึ้นและแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์รวมทั้งความเร็วรอบของเพลลาที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อปรับความถี่เพิ่มดังจะเห็นผลการทดสอบในตารางที่ 4.1 และลักษณะของรูปสัญญาณแรงดันและกระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความถี่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 10-50Hz ดังแสดงในรูปที่ 4.3-4.7 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่อความถี่ซึ่งเป็นผลทำให้สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้มีความเร็วรอบเป็นไปตามความต้องการได้ ซึ่งขณะทดสอบแบบมีภาระทางกลน้อยมากเพราะมีเฉพาะแค่ชุดเฟืองที่ขับเคลื่อนเท่านั้นซึ่งมีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงไม่นำมาคิดเป็นภาระทางกลของมอเตอร์ที่ทดสอบ

4.2.2 . ในขณะที่มอเตอร์มีภาระทางกล

การทดสอบความสามารถในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์ โดยปรับเปลี่ยนค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่มอเตอร์เพื่อปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เพื่อวัดค่าพลังงานไฟฟ้าขณะมีภาระทางกลของรถไฟฟ้าและทดสอบระบบขับเคลื่อน โดยทดสอบกับมอเตอร์ต้นกำลังที่มีพิกัดเท่ากับ 22 kW 415 V Delta 50 Hz 6 Poles ,อินเวอร์เตอร์ ABB รุ่น ACS400ขนาด 30 kW,เครื่องมือวัดพลังงานไฟฟ้า Yokogawa WT-1030,WT-200,Digital Oscilloscope Yokogawa DL1530/DL,เครื่อง Chassis Dynamometer และ Digital Tachometers Yokogawa 3631 ทำการทดสอบโดยนำรถขึ้นแทนทดสอบของเครื่อง Chassis Dynamometer และต่ออุปกรณ์การวัดตามรูปที่ 4.8 โดยกำหนดภาระทางกลดังนี้ น้ำหนักของรถเท่ากับ 2,300 กก.(เป็นน้ำหนักจริงที่วัดได้) แรงต้านลมเท่า 50 N,แรงต้านจากพื้นถนน 0.5kN และทำการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายเข้าอินเวอร์เตอร์(Pdc)และพลังงานที่จ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์ป้อนให้แก่มอเตอร์(Pin)และกำลังงานที่ได้จากล้อ(Pout)วัดจากเครื่อง Chassis Dynamometer เพื่อหาประสิทธิภาพที่ล้อในการขับเคลื่อนที่ความถี่ใช้งานต่างๆและคุณลักษณะการใช้พลังงานในการทำงานของอินเวอร์เตอร์ซึ่งผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.11 การวางตำแหน่งล้อในการทดสอบด้วยเครื่อง Chassis Dynamometer



รูปที่ 4.12 ภาคนแสดงผลด้วยเครื่อง Chassis Dynamometer

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าขณะมีภาระทางกล*

ความถี่ (Hz)	Pdc (kW)	Iin (A)	V (V)	Pin (kW)	Nล้อ (rpm)	Speed (km/hr)	Pout (kW)	%eff Motor	%eff System
10	1.92	19.8	90	1.6	198	6	0.9	56.25	46.87
20	2.67	20.2	171	2.2	398.4	9	1.2	54.55	44.94
30	3.55	17.9	252	3	598	14	1.7	56.67	47.88
40	5.13	17.8	333	4.4	798	19	2.3	52.27	44.83
50	6.72	17.7	415	5.9	997.6	24	3.2	54.24	47.61

*หมายเหตุ ภาระทางกล คือน้ำหนักของตัวรถไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากับ 2300 กก.และแรงเสียดทาน

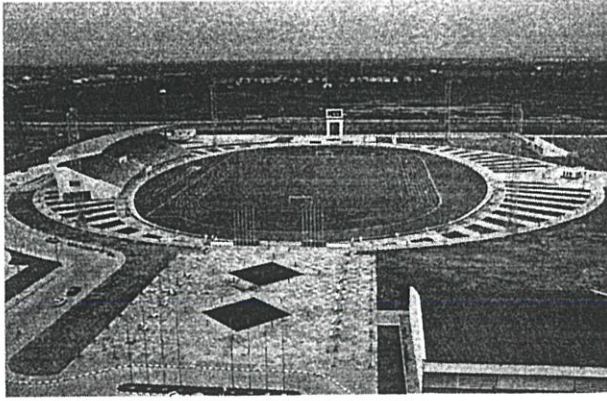
จากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 เป็นการทดสอบด้วยเครื่อง Chassis Dynamometer สามารถวัดกำลังงานที่และความเร็วที่ล้อรถได้ ซึ่งจากการทดสอบนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความถี่สูงขึ้นก็จะได้ความเร็วที่สูงขึ้นตามเป็นไปตามทฤษฎีเบื้องต้นของค่าความเร็วเชิง โครนัสของมอเตอร์ เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงและประสิทธิภาพในส่วนของพลังงานที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์และพลังงานกลที่ออกจากมอเตอร์ไปขับรถไฟฟ้า(%eff Motor)ที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 54.8 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพรวมของทั้งระบบตั้งแต่พลังงานที่ป้อนเข้าจากแบตเตอรี่จนได้พลังงานกลที่ล้อจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 46.42 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าประสิทธิภาพที่ได้จากตัวรถค่อนข้างต่ำ และความเร็วที่ได้ก็มีย่านน้อยกว่าที่ใช้ในการออกแบบ เป็นเพราะน้ำหนักที่ใช้ในการออกแบบนั้นมีค่าน้อยกว่าน้ำหนักจริงที่วัดได้อยู่ถึง 300 กก. และอัตราเฟืองทดที่ใช้จริงต่างกับค่าที่ใช้ในการออกแบบ ถึง 2.106 รอบจึงทำให้ความเร็วของรถลดลง

4.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนตัวรถไฟฟ้า

ในการทดสอบการขับเคลื่อนบนพื้นถนนของรถไฟฟ้าจะทำการทดสอบหาคุณลักษณะการใช้งานและประสิทธิภาพในการใช้งานรับส่งผู้โดยสาร โดยวัดค่าการใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานที่จ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์และมอเตอร์ที่เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนทดสอบการขับเคลื่อนบนพื้นถนนขณะไม่มีภาระเทียบกับการบรรทุกภาระที่พิกัดทดสอบการเริ่มเดินของมอเตอร์ของรูปแบบการเริ่มเดินเครื่องแบบต่างๆและหารูปแบบการเริ่มเดินมอเตอร์ที่เหมาะสมแก่การใช้งานในการรับส่งผู้โดยสาร โดยวิเคราะห์การใช้พลังงานต่อน้ำหนักบรรทุก, อัตราเร่งของรถไฟฟ้าพิกัดสูงสุดของรถไฟฟ้าที่สามารถทำได้, ระยะเวลาการใช้งานต่อการประจุพลังงานหนึ่งครั้งและการใช้งานในรับส่งเป็นระยะๆ เป็นต้น

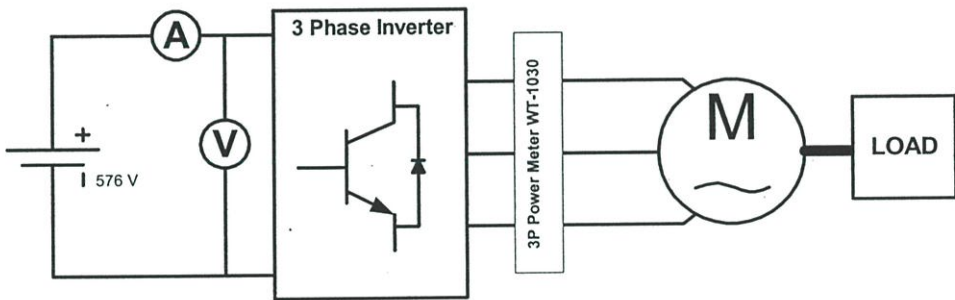
4.3.1 การทดสอบบนพื้นถนน

การทดสอบและใช้งานบนพื้นถนนนั้นเพื่อหาจุดที่เหมาะสมในการเริ่มเดินเครื่องและลักษณะการขับขี่ที่เหมาะสมกับการใช้งานรวมถึงการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าด้วย ซึ่งสภาพถนนส่วนใหญ่ภายในสถาบันฯเป็นถนนคอนกรีตดังนั้นจึงเลือกพื้นผิวถนนที่ใช้ในการทดสอบเป็นถนนคอนกรีตรอบศูนย์กีฬาของทางสถาบันฯดังแสดงในรูปที่ 4.13 ซึ่งมีระยะทางต่อรอบเท่ากับ 2.5ก.ม.



รูปที่ 4.13 เส้นทางทดสอบรถไฟฟ้า

ในการทดสอบเราให้ความดันลมยาง 65 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและต่อเครื่องวัดพลังงานที่ใช้ตามรูปวงจรที่ 4.14 ซึ่งจะเก็บค่าพลังงานอินพุตและเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ โดยทำการปรับเปลี่ยนความถี่ตั้ง 10Hz. และเพิ่มขึ้นครั้ง 10Hz. จนกระทั่งถึงพิกัดความถี่ที่เราใช้งานที่ความถี่ 50Hz. และทำการเปรียบเทียบการใช้กำลังงานเมื่อเปลี่ยนแปลงน้ำหนักบรรทุกจนถึงพิกัด



รูปที่ 4.14 วงจรการวัดผลในการทดสอบการขับเคลื่อนบนพื้นถนน

ตารางที่ 4.6 ผลของค่าพลังงานของแบตเตอรี่ที่ป้อนเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 10Hz.

น้ำหนักบรรทุก (kg)	ความถี่ (Hz)	Nเพลต (rpm)	I _{in} (A)	V _{in} (V)	P _{in} (dc) (kW)
no-load*	10	197	2.38	559	1.33
250+*	10	198	5.14	559	2.87
500+*	10	197	7.36	559	4.12
750+*	10	196	9.36	559	5.23
1000+*	10	195	12.34	559	6.90

ตารางที่ 4.7 ผลของค่าพลังงานของเบตเตอร์ที่ป้อนเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 20Hz.

น้ำหนักบรรทุก (kg)	ความถี่ (Hz)	Nเพลลา (rpm)	Iin (A)	Vin (V)	Pin (kW)
no-load*	20	396	4.30	559	2.40
250+*	20	396	6.73	559	3.76
500+*	20	398	9.89	559	5.53
750+*	20	395	11.60	559	6.49
1000+*	20	395	14.04	559	7.85

ตารางที่ 4.8 ผลของค่าพลังงานของเบตเตอร์ที่ป้อนเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 30Hz.

น้ำหนักบรรทุก (kg)	ความถี่ (Hz)	Nเพลลา (rpm)	Iin (A)	Vin (V)	Pin (kW)
no-load*	30	596	6.39	559	3.57
250+*	30	595	8.68	559	4.85
500+*	30	596	11.39	559	6.37
750+*	30	594	13.51	559	7.55
1000+*	30	594	15.98	559	8.93

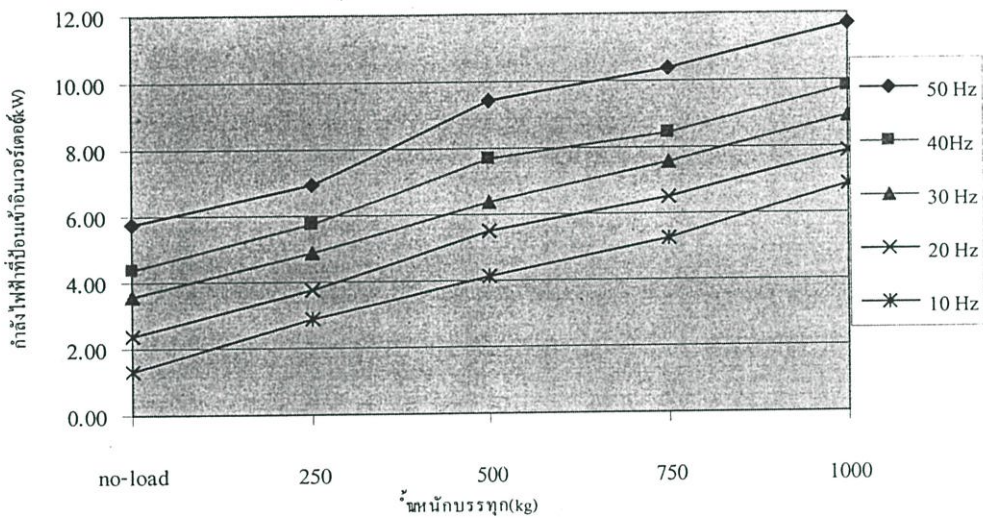
ตารางที่ 4.9 ผลของค่าพลังงานของเบตเตอร์ที่ป้อนเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 40Hz.

น้ำหนักบรรทุก (kg)	ความถี่ (Hz)	Nเพลลา (rpm)	Iin (A)	Vin (V)	Pin (kW)
no-load*	40	794	7.78	559	4.35
250+*	40	794	10.28	559	5.75
500+*	40	794	13.76	559	7.69
750+*	40	794	15.13	559	8.46
1000+*	40	794	17.58	559	9.83

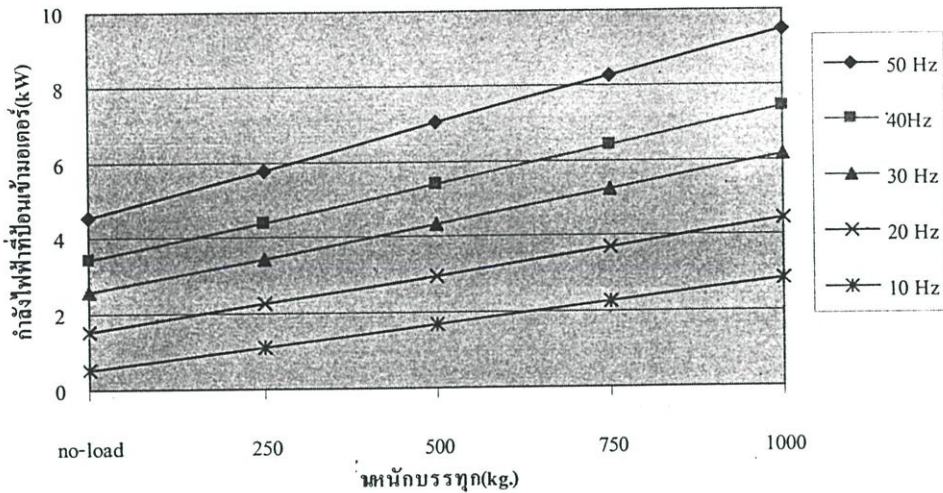
ตารางที่ 4.9 ผลของค่าพลังงานของแบตเตอรี่ที่ป้อนเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 50 Hz.

น้ำหนักบรรทุก (kg)	ความถี่ (Hz)	Nเพลลา (rpm)	lin (A)	Vin (V)	Pin (kW)
no-load*	50	994	9.62	559	5.76
250+*	50	991	12.40	559	6.93
500+*	50	989	16.93	559	9.46
750+*	50	987	18.50	559	10.34
1000+*	50	987	20.89	559	11.68

* หมายถึง น้ำหนักมีค่าเท่ากับ 2300 กก.



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์กับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบที่ค่าความถี่ต่างๆ



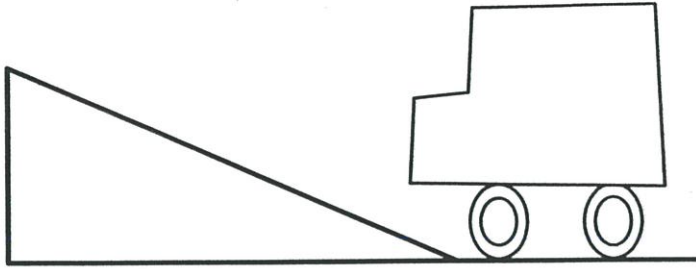
รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์กับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบที่ค่าความถี่ต่างๆ

จากผลการทดสอบนำค่ามาพล็อตกราฟหาค่าความสัมพันธ์ค่าพลังงานที่ใช้ในรูปที่ 4.15 เป็นพลังงานที่ป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์และรูปที่ 4.16 เป็นพลังงานขาออกจากอินเวอร์เตอร์ป้อนเข้ามอเตอร์ จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามขนาดของน้ำหนักที่บรรทุกและความถี่ที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ส่วนในการขับเคลื่อนและการวิ่งใช้งาน ในช่วงเริ่มออกวิ่งและการหยุดวิ่งของรถไฟฟ้า นั้นจะต้องอาศัยการตั้งค่าเวลาหน่วงในการเริ่มเดินเครื่องและหยุดการเดินเครื่องที่เหมาะสม นั่นคือค่า Acceler Time และ Deceler Time ให้มีค่ามากกว่า 10 วินาที เพื่อใช้ช่วงการทำงานในการขับเคลื่อนให้สัมพันธ์กับความเร็วของรถที่เปลี่ยนแปลง

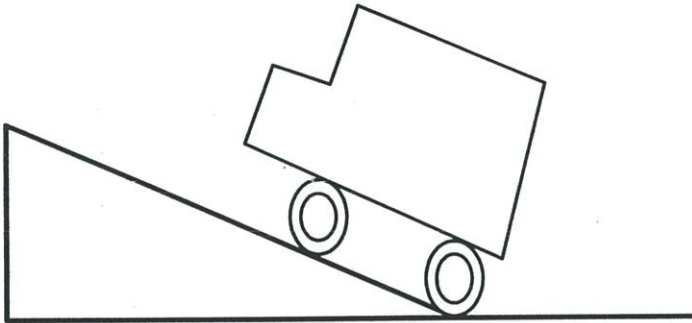
4.3.2 การทดสอบความสามารถในการขึ้นทางชัน

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของรถในการขับเคลื่อนในสภาวะไต่ทางชัน ซึ่งในการออกแบบได้กำหนดไว้ 7 องศาเนื่องถนนภายในสถาบันไม่มีทางลาดชันมากนักเราจึงทำการทดสอบสองกรณีแรกคือเริ่มเดินรถจากทางราบขึ้นทางชันและกรณีที่สองคือเริ่มเดินรถในขณะที่จอดอยู่บนทางชันตามลักษณะในรูปที่ 4.22 โดยมีการปรับเพิ่มน้ำหนักบรรทุกขึ้นไปจนกระทั่งสูงสุดตามที่ออกแบบและวัดผลจากการที่รถเริ่มเคลื่อนที่ โดยผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่ารถสามารถเดินรถขึ้นทางชันที่กำหนดไว้ได้ถ้าเป็นออกตัวในกรณีที่ 1 ซึ่งสามารถไต่ทางชันได้มากกว่า 10 องศาการทดสอบวิ่งใช้งานจริง ส่วนในการทดสอบการออกตัวกรณีที่ 2 ในช่วงแรกที่ไม่มียานน้ำหนักบรรทุกสามารถออกตัวบนทางชันได้และสามารถเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจนถึง 500 กก. ก็ยังสามารถออกตัวได้ เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกมากกว่า 500 กิโลกรัมแล้วจะไม่สามารถออกตัวได้จากจุดนั้น เพราะกระแสสูงเกินพิกัด 60 A. จึงทำให้ชุดอินเวอร์เตอร์ตัดการทำงาน

1. กรณีออกตัวจากทางราบแล้วขึ้นทางชัน 7 องศา



2. กรณีออกตัวจากทางชัน 7 องศา



รูปที่ 4.17 ลักษณะการเริ่มออกตัวของรถในการทดสอบ

ตารางที่ 4.4 ผลความสามารถในการขึ้นทางชัน 7 องศา

Load (กก.)	1.กรณีขึ้นทางชันจากพื้น			2. กรณีออกตัวบนทางชัน 7 องศา		
	Tmax(%)	Iac,max(A)	Pmax(kW)	Tmax(%)	Iac,max(A)	Pmax(kW)
น้ำหนักรถ	115.8	42	8.3	129	48	9.5
น้ำหนัก รถ+250	119	43	8.4	139	56	12.5
น้ำหนัก รถ+500	119	43	8.4	139	56	12.5
น้ำหนัก รถ+750	130	54	10	N/A	N/A	N/A
น้ำหนัก รถ+1000	134	55	11	N/A	N/A	N/A

หมายเหตุ N/A หมายถึง รถไม่สามารถขึ้นได้และถอยหลังลง

Load น้ำหนักในการบรรทุก

น้ำหนักรถ เท่ากับ 2300 กก.

Tmax(%) แรงบิดที่อ่านจากอินเวอร์เตอร์

4.3.3 การทดสอบความสามารถในการบรรทุกของรถไฟฟ้า

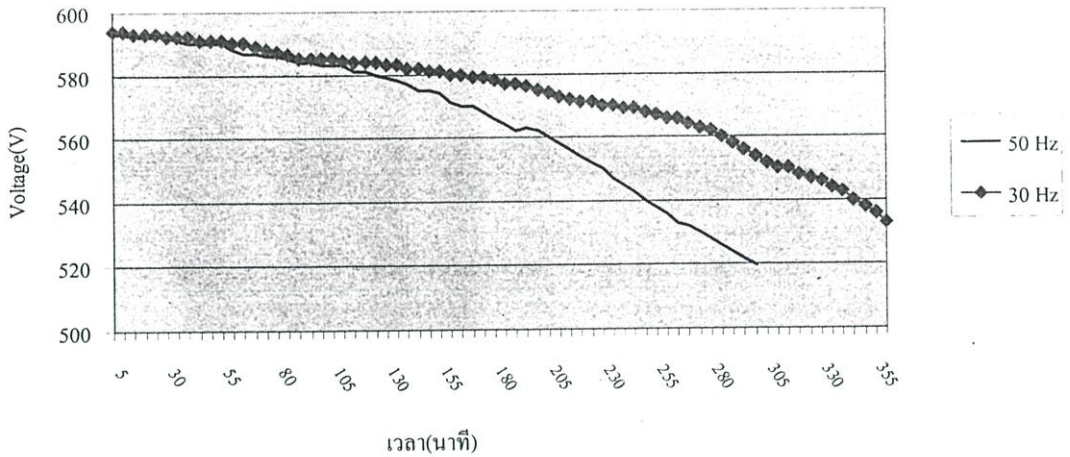
เพื่อหาน้ำหนักภาระสูงสุดที่รถไฟฟ้าจะบรรทุกได้โดยที่ไม่กระแสมเกินพิกัดของอุปกรณ์ โดยขับเคลื่อนที่ความถี่สูงสุด 50 Hz และทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกขึ้นไปจนวงจรป้องกันของอินเวอร์เตอร์จะทำงาน โดยพิกัดบรรทุกสูงสุดที่สามารถทำได้เท่ากับ 1540 กก.

ตารางที่ 4.5 ผลภาระสูงสุด

น้ำหนักสูงสุด(กิโลกรัม)	Iac,max(A)	Pmax(kW)
1540	58	25

4.4 การทดสอบหาประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายพลังงาน

การทดสอบเพื่อวิเคราะห์การใช้ พลังงานของแบตเตอรี่ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ขนาด 22kW โดยผ่านอินเวอร์เตอร์ขนาด 30 kW ซึ่งจากการทดลองในหัวข้อ 4.3:1 นั้นในการทดสอบการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าเพื่อหาประสิทธิภาพในแง่ของการวิ่งบนถนนและหาระยะทางการวิ่งรวมถึงการสิ้นเปลืองพลังงานในสภาวะการใช้งานปกติ โดยลักษณะการวิ่งบนพื้นถนนคอนกรีตเป็นทางราบเรียบระยะทาง 2.5 กม.ต่อรอบ การทดสอบการขับเคลื่อนขณะที่มีน้ำหนักบรรทุกตามพิกัดการออกแบบรวมถึงน้ำหนักคนขับเท่ากับ 1000 kg. ทดสอบวิ่งบนถนนคอนกรีต, ความดันลมยาง 65 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และย่านความถี่สูงสุดที่ใช้มีค่าเท่ากับ 30 Hz กับ 50 Hz และอุปกรณ์เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าใช้ FLUKE 41 กับ AC/DC Current Probe เป็นเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำการบันทึกผลแรงดันและกระแสไฟฟ้าทุกๆ 5 นาที ซึ่งผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 10 จะเห็นว่าเมื่อขับเคลื่อนต่อเนื่องต่อการอัดประจุหนึ่งครั้งจะสามารถวิ่งได้อย่างต่อเนื่องนานประมาณ 5 ชั่วโมงซึ่งจะสังเกตเห็นว่าระดับแรงดันของแบตเตอรี่ลดลงจนถึงประมาณ 530 โวลต์เป็นจุดที่ควรนำแบตเตอรี่ไปประจุไฟอีกครั้ง และสามารถวิ่งได้ระยะทางประมาณ 110 กิโลเมตร ซึ่งสามารถที่จะเพิ่มพิกัดน้ำหนักของการบรรทุกขึ้นอีกเนื่องจากกระแสของมอเตอร์ยังไม่ถึงพิกัดที่กำหนดไว้แต่ระยะทางที่ได้ก็จะลดลงด้วยตามสัดส่วนของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 18. ผลของแรงดันของแหล่งจ่ายในขณะขับเคลื่อน

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าเราควรที่จะวิเคราะห์ผลของกระแสที่แบตเตอรี่ต้องจ่ายให้ระบบในสถานะต่างๆ เพราะกระแสมีผลอย่างมากในการลดลงของความจุของแบตเตอรี่ ส่วนผลของแรงดันที่ได้ มานั้นมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน และอาจจะสรุปได้ว่าผลจากแรงดันไม่ค่อยที่จะมีความเสถียรเท่าไรนัก เนื่องจากเวลาทำการทดลองและทำการวัดผลมีหลายๆปัจจัยที่ส่งผลต่อระบบแรงดัน การจ่ายกระแสให้กับอินเวอร์เตอร์จะไม่คงที่เพราะแรงบิดของมอเตอร์ไม่คงที่ โดยขึ้นอยู่กับภาระของรถไฟฟ้าเพราะทางที่ใช้ทดสอบจะต้องเกิดการเลี้ยวบ้างในบางครั้ง โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 8.9 A คิดเป็นอัตราคายประจุ 0.14 C-rate และค่ากำลังงานเฉลี่ยที่จ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ประมาณ 5086.77 W คิดเป็น 23.12% ของพิกัดมอเตอร์ขนาด 22 kW

4.5 สรุป

จากผลที่การทดสอบในข้างต้นจะเห็นได้ว่าในการทดสอบประสิทธิภาพการใช้พลังงานของจะขึ้นกับภาระของน้ำหนักบรรทุกทุกและย่านความถี่ที่ใช้จนรวมถึงลักษณะการใช้งาน ซึ่งปกติในสถานะการใช้งานของรถไฟฟ้าเพื่อการรับส่งผู้โดยสารจะไม่ใช้วิ่งอย่างต่อเนื่องจะมีลักษณะการวิ่งแล้วหยุดการทำงานแล้ววิ่งต่อเป็นระยะๆดังนั้นการใช้พลังงานจะเป็นช่วงๆไม่สม่ำเสมอ

บทที่ 5

สรุปผลและการวิเคราะห์

5.1 บทนำ

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของรถไฟฟ้าต้นแบบที่ได้จัดสร้างขึ้นนั้นจากผลการทดลองในบทที่ 4 นั้นจะแยกออกเป็นส่วนๆ เพื่อบอกถึงประสิทธิภาพเทียบกับการออกแบบและความเหมาะสมกับการใช้งานเพื่อการรับส่งและสามารถนำข้อมูลที่ได้ออกไปเป็นแนวทางการออกแบบรถไฟฟ้าคันต่อไปเพื่อใช้ในการงานเพื่อการรับส่งให้มีประสิทธิภาพที่เหมาะสมกับการใช้งานและลักษณะงานที่ใช้รถเพื่อการบรรทุกขนส่ง ดังนั้นในบทนี้จะเป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของรถในแง่ของการใช้งานในแบบต่างและสรุปผลที่ได้ถึงความเหมาะสมกับการใช้งานที่แบบต่างๆ

5.2 ประสิทธิภาพของการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าด้วยเครื่อง Chassis Dynamometer

จากการทดสอบในบทที่ 4 ซึ่งเป็นการทดสอบแบ่งเป็นการทดสอบเป็นสองส่วนหลักๆ คือ ประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนและประสิทธิภาพใช้พลังงานของตัวรถ ซึ่งในส่วนนี้จะกล่าวถึงการขับเคลื่อนจากข้อกำหนดของรถไฟฟ้าในหัวข้อที่ 3.3 ที่กำหนดค่าเริ่มต้นของรถไฟฟ้าไว้เพื่อนำไปออกแบบรถและระบบขับเคลื่อนซึ่งผลการทดสอบในหัวข้อที่ 4.3 ที่เป็นการทดสอบด้วยเครื่อง Chassis Dynamometer เป็นการจำลองสภาวะการวิ่งของรถและวัดค่ากำลังงานที่ได้จากล้อออกมา ซึ่งได้กำหนดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่างที่กระทำต่อรถ ความเร็วของรถที่วัดได้ด้วยเครื่อง Chassis Dynamometer ซึ่งความเร็วที่สามารถทำได้สูงสุดที่ความถี่ 50 Hz เท่ากับ 24 กม./ชม. ซึ่งน้อยกว่าค่าที่ออกแบบเท่ากับ 6 กม./ชม. จากผลดังกล่าวที่ผิดพลาดไปเนื่องจากน้ำหนักรถที่ออกแบบมีค่าเท่ากับ 2 000 กก. แต่น้ำหนักจริงหลังประกอบเสร็จสมบูรณ์เท่ากับ 2300 กก. และอัตราเฟืองทดที่ออกแบบกับที่จัดสร้างจริงแตกต่างกันมากส่งผลทำให้ความเร็วรถไม่ถึงกับค่าที่ออกแบบไว้

5.3 การวิเคราะห์ลักษณะและความเหมาะสมในการขับขี่

ในแง่ของการขับเคลื่อนให้มีลักษณะคล้ายคลึงกับรถยนต์ประเภทอื่นที่ใช้เครื่องยนต์เป็นต้นกำลังนั้นทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากรถไฟฟ้าต้นแบบนั้นไม่ได้ใช้ระบบส่งกำลังผ่านเกียร์และ คลัทช์ แต่เป็นการส่งผ่านกำลังจากมอเตอร์โดยตรง จึงทำให้ช่วงการออกตัวและหยุดรถเกิดการกระตุกเล็กน้อยจึงต้องอาศัยการปรับตั้งค่า ACC และ DCC Time ช่วยควรจะต้องให้มีค่ามากกว่า 20 วินาที ส่วนการขับขี่ในเรื่องของอัตราเร่งและความเร็วจะมีค่าไม่สูงมากนักแต่ก็เพียงพอแก่ความต้องการใช้งานรับส่งนักศึกษาและเจ้าหน้าที่ภายในสถาบันฯ เพราะความเร็วที่เหมาะสมไม่

ควรเกิน 30 กม./ชม. และอัตราเร่งก็ไม่จำเป็นต้องมีค่ามากๆ ดังนั้นความเร็วที่รถทำได้ 24 กม./ชม. ถือว่าเป็นความเร็วที่เหมาะสม ส่วนลักษณะการออกตัวและการหยุดเนื่องจากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้มีโหมดการเริ่มเดินเครื่องแบบนิ่มนวลอยู่ 4 ลักษณะจะมีลักษณะการหยุดแตกต่างกันการเริ่มเดินเครื่องที่เหมาะสมในการขับขี่สำหรับทั้ง 4 แบบนั้นจากการทดสอบเห็นควรใช้แบบ ฟลายอิง+ ทอร์คบูท เพราะมีลักษณะการหยุดรถและการเริ่มเดินรถง่ายที่สุดและไม่ต้องรอให้ความเร็วรอบมอเตอร์เป็นศูนย์ก่อนแล้วจึงสามารถเดินเครื่องใหม่ได้อีกหนึ่งครั้ง

5.4 การวิเคราะห์การใช้พลังงานของรถไฟฟ้าที่เหมาะสม

5.4.1 การวิเคราะห์การสิ้นเปลืองพลังงานต่อน้ำหนักบรรทุก

การสิ้นเปลืองพลังงานในการขับขี่รถไฟฟ้านั้นก็คือพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายออกจากแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงก็คือแบตเตอรี่เปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ก็คือน้ำมันเชื้อเพลิงนั่นเอง ดังนั้นลักษณะของการสิ้นเปลืองพลังงานของรถก็จะขึ้นอยู่กับความเร็วที่ใช้, น้ำหนักที่บรรทุก, ลักษณะถนนที่วิ่งและลักษณะการขับขี่ ดังจากการทดสอบในหัวข้อที่ 4.4 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าตัวแปรข้างต้นที่กล่าวมาแล้วดังนั้นการสิ้นเปลืองพลังงานของรถไฟฟ้าจะเห็นจากผลกำลังไฟฟ้าอินพุตในรูปที่ 4.15 ถึง 4.16 และ จะเห็นว่าค่าพลังงานที่ใช้จะเพิ่มขึ้นตามขนาดน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นและเปลี่ยนแปลงตามค่าความถี่ใช้งาน จากผลการทดสอบสามารถนำไปหาค่าการใช้กำลังงานต่อน้ำหนักบรรทุกของรถไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 2.899 W/kg ที่ความถี่การใช้งานเท่ากับ 50 Hz และใช้งานในถนนคอนกรีตหรือถนนยางมะตอยที่เป็นทางเรียบ

5.4.2 การวิเคราะห์การใช้พลังงานต่อหนึ่งวงรอบการประจุแบตเตอรี่

ในการใช้งานโดยทั่วไปของรถไฟฟ้าจะต้องบอกถึงสมรรถนะของรถในเรื่องความเร็ว อัตราเร่งรวมถึงอัตราสิ้นเปลืองพลังงานซึ่งจากข้อมูลในหัวข้อที่ 4.4 ถ้าเงื่อนไขในการใช้งานรถปกติ น้ำหนักบรรทุกที่พิกัดและใช้งานจนพลังงานที่ความถี่พิกัดการใช้งานถ้าวิ่งที่ความเร็วเฉลี่ย 24 กม./ชม. จะได้ระยะทางเท่ากับ 110 กม. วิ่งได้นานต่อเนื่อง 4 ชั่วโมงครึ่ง จากผลการทดสอบในรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าถ้าลดความถี่ลงก็จะสามารถวิ่งได้นานขึ้นไปเนื่องจากที่ความถี่ต่ำกว่าจะสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่าจากผลการทดสอบก่อนหน้านี้แต่ละระยะทางที่ได้จะใกล้เคียงกันเนื่องจากความเร็วที่ได้ก็จะลดลงเช่นกัน

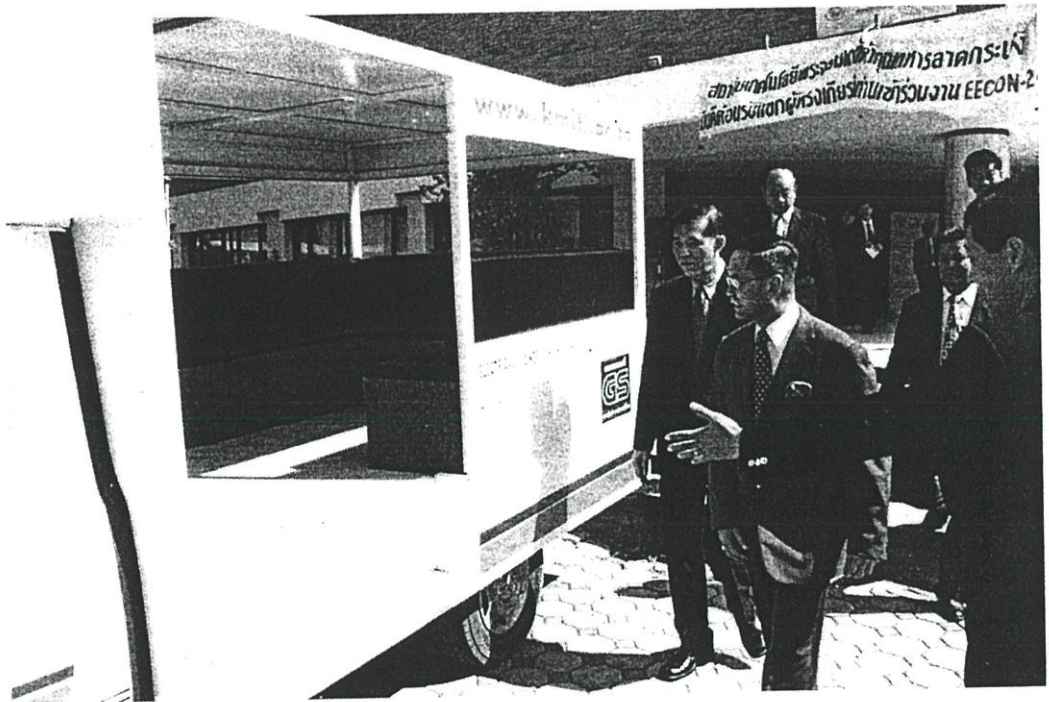
5.5 ผลงานการนำไปใช้งานภาคสนามของรถไฟฟ้า

การทดสอบทางคุณสมบัติและประสิทธิภาพของรถไฟฟ้าที่ได้ทำการทดสอบมาข้างต้นแล้วในส่วนต่อไปนี้จะกล่าวถึงการนำรถไปใช้งานในภาคสนามจริงเพื่อคู่ถึงความเหมาะสมและ

ความเป็นไปได้ในการใช้งานจริงในการขนส่งผู้โดยสารภายในสถาบันฯตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้
ดังนั้นจึงนำรถไปใช้ในงานพิธีที่สำคัญๆที่ทางสถาบันฯได้จัดขึ้น

5.4.1 งานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24

การใช้งานภาคสนามครั้งแรกเกิดขึ้นเมื่อ วันที่ 22-23 พฤศจิกายน 2544 ครั้งสถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังได้เป็นเจ้าภาพจัดการประชุมวิชาการทางวิศวกรรม
ไฟฟ้าครั้งที่ 24 ขึ้น ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในครั้งนั้นได้นำ
รถไฟฟ้าต้นแบบไปใช้รับส่งประธานในพิธี ดังแสดงบรรยากาศต่างในรูปที่ 5.1 ถึง 5.5



รูปที่ 5.1 ใช้รับส่งประธานพิธีเปิด



รูปที่ 5.2 ขณะอยู่บนถนนไปชมบรรยากาศภายในงาน



รูปที่ 5.3 บรรยากาศภายในรถขณะเดินทาง



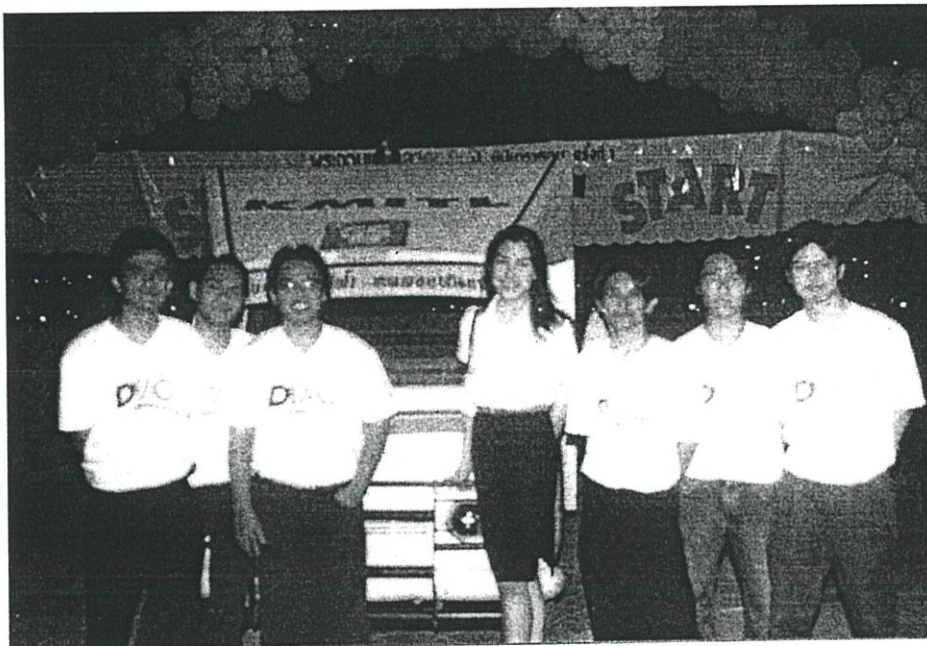
รูปที่ 5.4 บรรยากาศภายในรถขณะเดินทาง



รูปที่ 5.5 ประธานพิธีเปิดเดินลงจากรถเข้าชมงาน

5.4.2 พระจอมเกล้ามีนิมมารathon ครั้งที่ 1

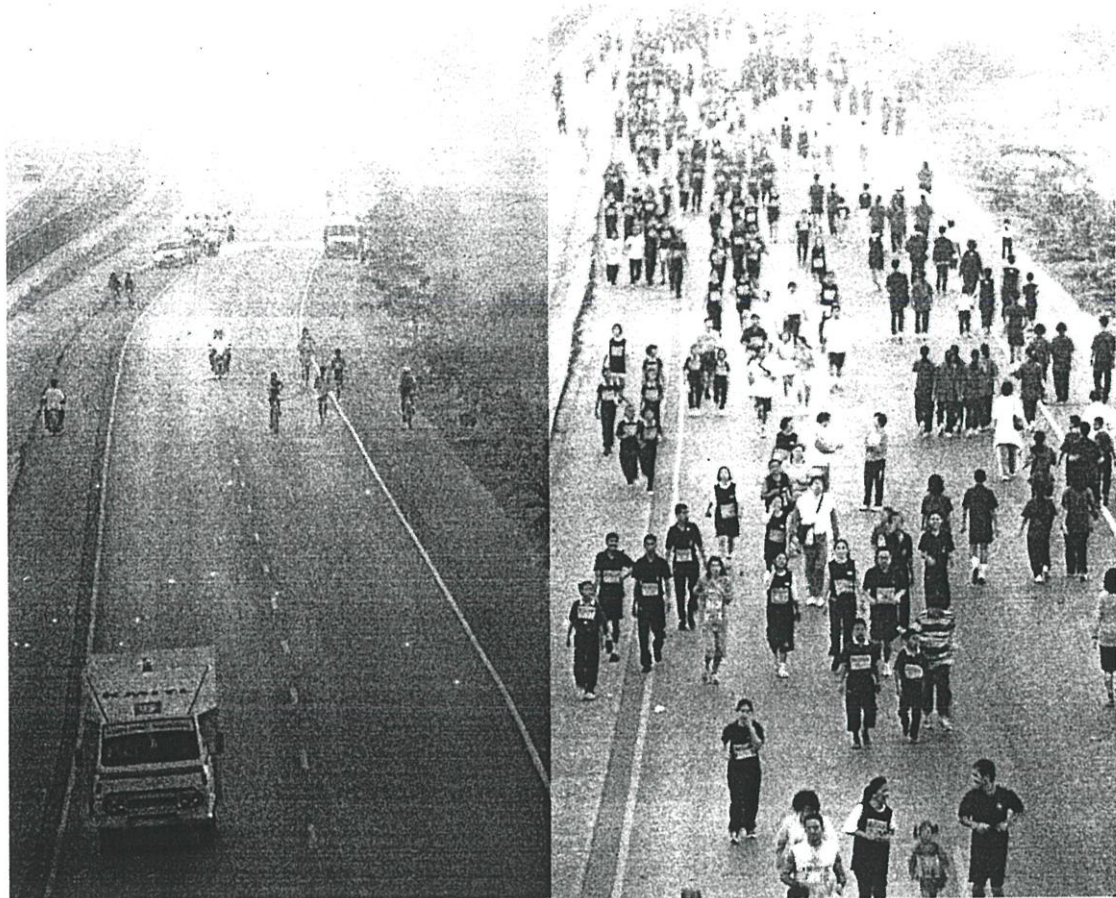
ในครั้งที่สองเป็นการใช้งานนำขบวนนักวิ่งมารathon ซึ่งเป็นการจัดงานพระจอมเกล้ามีนิมมารathon ครั้งที่ 1 ขึ้น ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในวันที่ 14 มกราคม 2545 ซึ่งสามารถนำไปใช้งานด้านต่างภายในงานได้มากมายอาทิการนำขบวนนักวิ่งที่แสดงในรูปที่ 5.6 ถึง 5.8 และนำไปใช้ชนสัมพันธ์ต่างๆที่ใช้ภายในงานได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 5.6 ใช้รับเป็นรถนำขบวนนักวิ่ง



รูปที่ 5.7 Staffผู้ขับจี่รถนำขบวน ณ จุดปล่อยตัวนักวิ่ง



รูปที่ 5.8 บรรยากาศการนำขบวนนักวิ่ง

5.6 แนวทางการวิจัยต่อไปในอนาคต

สำหรับแนวทางการพัฒนารถไฟฟ้าเพื่อการใช้งานรับส่งผู้โดยสารหรือเพื่อการขนส่งที่ละมากๆ นั้นจะต้องอาศัยความรู้หลายแขนงเข้ามาประกอบกันเพื่อความเหมาะสมต่อการใช้งานแต่ละประเภท ดังนั้นแนวทางการพัฒนานี้จะต้องเริ่มจากโครงสร้างที่เหมาะสมกับการใช้งานและควรจะต้องมีน้ำหนักเบาและคงทนแข็งแรงเช่นวัสดุไฟเบอร์กลาสเป็นต้น เพื่อที่จะให้ภาระต้นกำลังลดลงทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น อีกส่วนหนึ่งก็คือระบบควบคุมการขับเคลื่อน(Inverter) เป็นหัวใจในการควบคุมความเร็วของรถและแปลงพลังงานจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับที่สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ได้(V/f)ซึ่งเหมาะสมกับความต้องการใช้งานในสภาวะปัจจุบันแต่ยังมีข้อเสียคือในลักษณะช่วงเริ่มออกตัวที่ไม่ใช่ทางเรียบยังคงต้องการแรงบิดในตอนเริ่มหมุนสูงกว่าซึ่งมีการปรับค่า ACC Time มากกว่า 20 วินาทีก็ยังไม่สามารถออกตัวได้ ซึ่งอาจจะต้องพัฒนาไปสู่แบบ DTC (Direct Torque Control Inverter) แทนซึ่งสามารถให้แรงบิดเริ่มต้นได้สูงกว่า และปัญหาที่สำคัญที่สุดคือน้ำหนักของแบตเตอรี่ที่ใช้งานซึ่งควรจะเปลี่ยนชนิดเพื่อให้ น้ำหนักเบาขึ้นแต่ถ้าใช้แบบแห้งก็จะทำให้ราคาต้นทุนสูงขึ้นหลายเท่าตัวแต่ก็จะมีข้อดีในด้านการบำรุงรักษาและอายุการใช้งานที่สูงกว่าแบบตะกั่วกรด อีกหนทางหนึ่งในการลดขนาดของน้ำหนักของแบตเตอรี่ลงคือใช้วงจรยกระดับแรง

คันกระแสดรงให้สูงขึ้นเช่น พุช-พุดคอนเวอร์เตอร์ ก็จะสามารถลดน้ำหนักของแบตเตอรี่ลดลงได้
กว่าครึ่งหนึ่งของน้ำหนักในปัจจุบัน

5.7 สรุป

จากผลการทดสอบถึงประสิทธิภาพของรถไฟฟ้าคันแบบที่ได้จัดสร้างขึ้นนั้นจะเป็นการนำเสนอแนวทางการแก้ปัญหาในการวิเคราะห์การใช้พลังงานที่เหมาะสมในแง่ของการใช้งานจริงเพื่อการรับส่งอาจารย์ เจ้าหน้าที่และนักศึกษาภายในสถาบันฯ ซึ่งเป็นสถานศึกษาดังนั้นในเรื่องของมลภาวะทางเสียงและไอเสียก็จะไม่เกิดขึ้นให้ไปรบกวนการศึกษาของทางสถาบันฯ และย่านความเร็วที่ใช้งานเหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 20-30 กม/ชม. ระยะเวลาในการวิ่งควรจะอยู่ในช่วง 4-5 ชั่วโมงต่อการประจุแบตเตอรี่หนึ่งครั้งจะได้เวลามาทำการประจุไว้ใช้ใหม่ในรอบต่อไปครั้งละครึ่งวัน ส่วนเส้นทางการวิ่งต่างได้ร่วมมือกับทางคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และออกแบบเส้นทางการวิ่งคร่าวๆไว้และออกแบบโครงสร้างรถคันแบบไว้[11] ปัญหาที่สำคัญมากในการดูแลและใช้งานรถไฟฟ้าคือแบตเตอรี่ซึ่งจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแบตเตอรี่จำนวน 48 ลูกต่อหนึ่งปีประมาณ 50,000 บาทต่อครั้งและยังต้องมีค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงประจำเช่นเติมน้ำกลั่นเป็นต้น

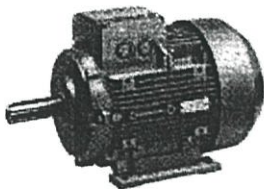
เอกสารอ้างอิง

- [1] Francesco Profumo,Zheng Zhang,Alberto Tenconi, “Axial Flux Machines Drives: a New Viable Solution for Electric Cars”, Longman Singapore Publishers(Pte) Ltd., Fifth Edition, 1996 p-p. 34-40.
- [2] B.K. BOSE, “Modern Power Electronics and AC Drives”, Prentice-Hall ,2001
- [3] N.Mohan,Tore M. Undeland, William P. Robbins, “Power Electronics: Converters, Application, and Design”,second edition, Jonh Wiley & Sons. Inc., 1995.
- [4] Carlos A. Martins,Adriano S. Carvalho, “Technological Trends in Induction Motor Electrical Drives” ,2001 IEEE Porto Power Tech Conference, PPT 2001,Porto, Portugal, September 10-13,2001
- [5] ABB “User’s Manual for type ACS-400 frequency converters from 2.2 to 37 kW.”
- [6] รศ.กฤษดา วิสวธีรานนท์ “Inverter หลักการทำงานและ เทคนิคการใช้งาน,พิมพ์ครั้งที่ 5 , ศูนย์หนังสือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2541.
- [7] <http://Silverstone.fortunecity.com/zagato/330/index.htm>
- [8] SETPHEN J. CHAPMAN, “Electric Machinery Fundamentals” ,second edition,New York, McGraw-Hill, Inc. 1981.
- [9] T R Crompton, “Battery Reference Book” ,International Editions,London, Butterworth & Co.(Publishers) Ltd.,1990
- [10] Dr. S. Jantarnag,Technical Marketing Staff of Gates Energy Products, “Rechargeable Batteries Applications Handbook”,USA.,Butterworth-Heinemann,1998
- [11] ข้อมูลแบบสำรวจความคิดเห็นของบุคคลภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเรื่องรถไฟฟ้าสวัสดิการ โดยสภาคณาจารย์ของสถาบันฯ,2544

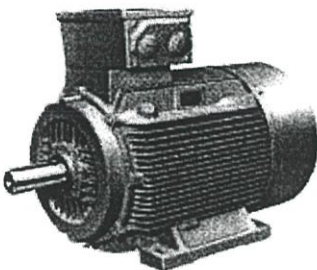
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

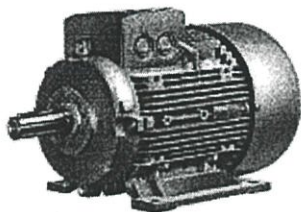
ข้อมูลของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

**1LA5, 1LA7****Motores estándar- diseño de pieza fundida liviana**

Tamaños de carcasa	56 a 225 M
Potencia salida	0.06 a 1000 KW
Clase F	utilización acorde a clase B
Apropiado para alimentación por convertidor	

**1LA6, 1LA8, 1LG8****Motores estándar- diseño de fundición gris**

Tamaños de carcasa	90S a 450
Potencia salida	0.35 a 1000 KW
Clase F	utilización acorde a clase B
Apropiado para alimentación por convertidor	

**1LA6, 1LA9****Motores economizadores de energía**

Tamaños de carcasa	56 a 315 L
Potencia salida	0.06 a 160 KW
Clase F	utilización acorde a clase B

Importante mejora en el rendimiento en comparación con el diseño básico.

13



ELECTROMATICA

MOTORES TRIFÁSICOS TRC

Tipo jaula de ardilla 1 LA

SIEMENS

Datos Técnicos
3000 rpm, 2 polos, 50 Hz

Potencia Salida KW	Tamaño Carcasa (Frame)	Nº pedido	Características de salida					
			velocidad RPM	rendimiento %	Factor de potencia	Corriente nominal (a 400V) A	Torque clase KL	Peso tipo constr. IM B 3 kg
0.09	56	1LA7 050-2AA..	2800	61	0.82	0.26	16	3
0.12		1LA7 053-2AA..	2800	63	0.81	0.34	16	3
0.18	63	1LA7 060-2AA..	2800	64	0.80	0.51	16	3.5
0.25		1LA7 063-2AA..	2820	65	0.82	0.68	16	4.0
0.37	71	1LA7 070-2AA..	2740	67	0.82	1.00	16	5.0
0.55		1LA7 073-2AA..	2800	71	0.82	1.36	16	6.6
0.75	80	1LA7 080-2AA..	2855	73	0.86	1.73	16	8.2
1.1		1LA7 083-2AA..	2845	77	0.87	2.40	16	9.9
1.5	90 S	1LA7 090-2AA..	2860	78	0.85	3.25	16	12.9
2.2	90 L	1LA7 096-2AA..	2880	81	0.85	4.60	16	15.7
3	100 L	1LA7 106-2AA..	2895	83.5	0.85	6.1	16	23
4	112 M	1LA7 113-2AA..	2900	83.5	0.88	7.7	16	30
5.5	132 S	1LA7 130-2AA..	2915	84.5	0.85	11.1	16	43
7.5		1LA7 131-2AA..	2915	86.0	0.86	14.7	16	53
11	160 M	1LA7 163-2AA..	2920	87.0	0.85	21.4	16	72
15	160 M	1LA7 164-2AA..	2925	88.5	0.87	28.2	16	85
18.5	160 L	1LA7 166-2AA..	2935	90.0	0.85	34.7	16	102
22	180 M	1LA5 183-2AA..	2940	91.7	0.88	39	16	115
30	200 L	1LA5 206-2AA..	2945	92.3	0.89	53	16	165
37		1LA5 207-2AA..	2945	92.8	0.89	65	16	188
45	225 M	1LA5 223-2AA..	2960	94.1	0.89	78	16	217
55	250 M	1LA6 253-2AB..	2965	93.7	0.91	93	13	415
75	280 S	1LA6 280-2AC..	2970	94.7	0.90	128	10	570
90	280 M	1LA6 283-2AC..	2970	95.1	0.91	156	10	610
110	315 S	1LA6 310-2AC..	2980	94.8	0.90	186	10	790
132	315 M	1LA6 313-2AC..	2980	95.1	0.90	225	10	850
160	315 L	1LA6 316-2AC..	2980	95.5	0.91	265	10	990
200	315 L	1LA6 317-2AC..	2980	95.9	0.92	325	10	1100
250	315	1LA8 315-2AC..	2979	96.2	0.90	415	10	1300
315		1LA8 317-2AC..	2979	96.6	0.91	520	10	1500
355	355	1LA8 353-2AC..	2980	96.6	0.90	590	10	1900
400		1LA8 355-2AC..	2980	96.7	0.91	660	10	2000
500		1LA8 357-2AC..	2982	97.1	0.91	820	10	2200
560	400	1LA8 403-2AC..	2985	97.1	0.91	910	10	2800
630		1LA8 405-2AC..	2985	97.1	0.91	1020	10	3000
710		1LA8 407-2AC..	2985	97.3	0.91	670	10	3200
800	450	1LA8 453-2AC..	2986	97.2	0.91	760	5	4000
900		1LA8 455-2AC..	2986	97.3	0.91	840	5	4200
1000		1LA8 457-2AC..	2986	97.4	0.93	920	5	4400

Sufijos para N° de pedido

Tipo motor	Penúltima posición: código voltaje								Última posición: código tipo de construcción					
	50 Hz								IM B 3					
	230V Δ	400V Δ	500V Y	500V Δ	690V Δ	460V Y	460V Δ	IM B 5	IM V 1 sin escudo	IM V 1 con escudo	IM B 14 flange pequeño	IM B 14 flange grande	IM B 36	
1LA7 050 a 1LA7 096	1	6	3	-	-	1	6	0	1	1	4	2	3	6
1LA 106 a 1LA 207	1	6	3	5	-	1	6	0	1	1	4	2	3	6
1LA 223 a 1LA 313	1	6	3	5	-	-	6	0	1	1	4	-	-	6
1LA6 316 y 1LA6 317	-	6	-	5	-	-	9 L2F	0	-	8	4	-	-	6
1LA8 315 a 1LA8 405	-	6	-	5	-	-	9 L2F	0	-	8	4	-	-	6
1LA8 407 a 1LA8457	-	-	-	5	0	-	bajo pedido	0	-	8	4	-	-	6

• Concepción: Manuel Rodríguez B43 • Fon: 56-41-793333 • Fax: 56-41-793330
 • Santiago: Santa Magdalena 75 Of. 307 • Fon: 56-2-3347049 • F/Fax: 56-2-3350587

13-3

• E-mail: ventas@electromatica.cl • WEB site: www.electromatica.cl

13

EQUIPO ELECTRICO



Datos Técnicos
1500 rpm, 4 polos, 50 Hz

Potencia Salida	Tamaño Carcasa (Frame)	N° pedido	Características de salida					Torque clase	Peso tipo constr. IM B 3
			velocidad RPM	rendimiento η %	Factor de potencia	Corriente nominal (a 400V) A			
0.06	56	1LA7 050-2AB..	1305	56	0.78	0.20	13	3.0	
0.09		1LA7 053-2AB..	1300	58	0.77	0.29	13	3.0	
0.12	63	1LA7 060-4AB..	1350	56	0.70	0.44	13	3.5	
0.18		1LA7 063-4AB..	1350	59	0.76	0.58	13	4.0	
0.25	71	1LA7 070-4AB..	1350	60	0.79	0.76	13	4.8	
0.37		1LA7 073-4AB..	1370	65	0.80	1.03	13	6.0	
0.55	80	1LA7 080-4AA..	1395	67	0.81	1.45	16	8.0	
0.75		1LA7 083-4AA..	1395	72	0.81	1.86	16	9.4	
1.1	90S	1LA7 090-4AA..	1410	73	0.83	2.65	16	12.3	
1.5	90L	1LA7 096-4AA..	1420	77	0.82	3.45	16	15.6	
2.2	100 L	1LA7 106-4AA..	1420	80	0.82	4.9	16	24	
3		1LA7 107-4AA..	1420	81.5	0.83	6.4	16	26	
4	112 M	1LA7 113-4AA..	1440	84.0	0.83	8.3	16	31	
5.5	132 S	1LA7 130-4AA..	1455	86.0	0.81	11.4	16	45	
7.5	132 M	1LA7 133-4AA..	1455	87.5	0.82	15.1	16	56	
11	160 M	1LA7 163-4AA..	1460	88.5	0.84	21.4	16	76	
15	160 L	1LA7 186-4AA..	1460	90.0	0.84	28.5	16	93	
18.5	180 M	1LA5 183-4AA..	1460	90.5	0.83	35	16	112	
22	180 L	1LA5 186-4AA..	1460	91.2	0.84	41	16	126	
30	200 L	1LA5 207-4AA..	1465	91.8	0.86	55	16	170	
37	225 S	1LA5 220-4AA..	1470	92.9	0.87	66	16	215	
45	225 M	1LA5 223-4AA..	1470	93.4	0.87	80	16	235	
55	250 M	1LA6 253-4AA..	1475	94.0	0.87	97	16	435	
75	280 S	1LA6 280-4AA..	1480	94.7	0.86	132	16	610	
90	280 M	1LA6 283-4AA..	1480	94.9	0.86	160	16	660	
110	315 S	1LA6 310-4AA..	1485	94.8	0.86	194	16	830	
132	315 M	1LA6 313-4AA..	1485	95.5	0.87	230	16	910	
160	315 L	1LA6 316-4AA..	1485	95.8	0.87	275	16	1060	
200	315 L	1LA6 317-4AA..	1488	96.2	0.87	345	16	1200	
250	315	1LA8 315-4AB..	1488	96.0	0.88	425	13	1300	
315		1LA8 317-4AB..	1488	96.3	0.88	540	13	1500	
355	355	1LA8 353-4AB..	1488	96.3	0.87	610	13	1900	
400		1LA8 355-4AB..	1488	96.4	0.87	690	13	2000	
500		1LA8 357-4AB..	1488	96.8	0.88	850	13	2200	
560	400	1LA8 403-4AB..	1492	96.8	0.88	950	13	2800	
630		1LA8 405-4AB..	1492	97.0	0.88	1060	13	3000	
710		1LA8 407-4AB..	1492	97.0	0.89	690	13	3200	
800	450	1LA8 453-4AC..	1492	97.0	0.88	780	10	4000	
900		1LA8 455-4AC..	1492	97.1	0.88	880	10	4200	
1000		1LA8 457-4AC..	1492	97.1	0.89	970	10	4400	

Sufijos para N° de pedido

Tipo motor	Penúltima posición: código voltaje						Última posición: código tipo de construcción							
	50 Hz		60 Hz		480V Δ		IM B 3		IM V 1		IM B 14		IM B 35	
	230V Δ	400V Δ	500V Y	500V Δ	690V Δ	460V Y	sin escudo	con escudo	sin escudo	con escudo	flange pequeño	flange grande	flange pequeño	flange grande
1LA7 050 a 1LA7 096	1	6	3	-	-	1	6	0	1	1	4	2	3	6
1LA 106 a 1LA 207	1	6	3	5	-	1	6	0	1	1	4	2	3	6
1LA 220 a 1LA 313	1	6	3	5	-	-	6	0	1	1	4	-	-	6
1LA6 316 y 1LA6 317	-	6	-	5	-	-	9 L2F	0	-	8	4	-	-	6
1LA8 315 a 1LA8 405	-	6	-	5	-	-	9 L2F	0	-	8	4	-	-	6
1LA8 407 a 1LA8457	-	-	-	5	0	-	bajo pedido	0	-	8	4	-	-	6



Datos Técnicos
1000 rpm, 6 polos, 50 Hz

Potencia Salida	Tamaño Carcasa (Frame)	N° pedido	velocidad RPM	Características de salida					Torque clase	Peso tipo constr. IM B 3
				rendimiento η %	Factor de potencia	Corriente nominal (a 400V) A				
0.09	63	1LA7 063-6AB..	850	45	0.66	0.44	13	4.1		
0.18	71	1LA7 070-6AA..	835	56	0.75	0.62	16	6.3		
0.25		1LA7 073-6AA..	830	61	0.76	0.78	16	6.3		
0.37	80	1LA7 080-6AA..	920	62	0.72	1.20	16	7.5		
0.55		1LA7 083-6AA..	910	67	0.74	1.60	16	9.4		
0.75	90 S	1LA7 090-6AA..	915	69	0.76	2.1	16	12.5		
1.1	90 L	1LA7 096-6AA..	915	72	0.77	2.9	16	15.7		
1.5	100 L	1LA7 106-6AA..	925	74	0.75	3.9	16	24		
2.2	112 M	1LA7 113-6AA..	940	78	0.78	5.2	16	27		
3	132 S	1LA7 130-6AA..	950	79	0.76	7.2	16	41		
4	132 M	1LA7 133-6AA..	950	80.5	0.76	9.4	16	46		
5.5	132 M	1LA7 134-6AA..	950	83	0.76	12.8	16	54		
7.5	160 M	1LA7 163-6AA..	960	86	0.74	17.0	16	76		
11	160 L	1LA7 166-6AA..	960	87.5	0.74	24.5	16	102		
15	180 L	1LA5 186-6AA..	970	89.5	0.77	31.5	16	126		
18.5	200 L	1LA5 206-6AA..	975	90.2	0.77	38.5	16	170		
22		1LA5 207-6AA..	975	90.8	0.77	45.5	16	190		
30	225 M	1LA5 223-6AA..	978	91.8	0.77	61	16	225		
37	250 M	1LA6 253-6AA..	980	92.4	0.86	68	16	410		
45	280 S	1LA6 280-6AA..	982	93.1	0.86	81	16	540		
55	280 M	1LA6 283-6AA..	982	93.6	0.86	99	16	580		
75	315 S	1LA6 310-6AA..	985	93.9	0.86	134	16	770		
90	315 M	1LA6 313-6AA..	985	94.2	0.86	160	16	830		
110	315 L	1LA6 316-6AA..	985	94.7	0.86	194	16	970		
132	315 L	1LA6 317-6AA..	986	95.0	0.86	235	16	1060		
160	315 L	1LA6 318-6AA..	986	95.1	0.86	280	16	1100		
200	315	1LA8 315-6AB..	989	95.7	0.87	345	13	1300		
250		1LA8 317-6AB..	989	95.9	0.87	430	13	1500		
315	355	1LA8 355-6AB..	993	96.2	0.87	540	13	2000		
400		1LA8 357-6AB..	993	96.5	0.87	690	13	2200		
450	400	1LA8 403-6AB..	992	96.5	0.86	780	13	2800		
500		1LA8 405-6AB..	992	96.5	0.87	860	13	3000		
560		1LA8 407-6AB..	992	96.7	0.87	960	13	3200		
630	450	1LA8 453-6AB..	993	96.8	0.86	1100	13	4000		
710		1LA8 455-6AB..	993	96.8	0.87	710	13	4200		
800		1LA8 457-6AB..	993	97.0	0.87	790	13	4500		

Sufijos para N° de pedido

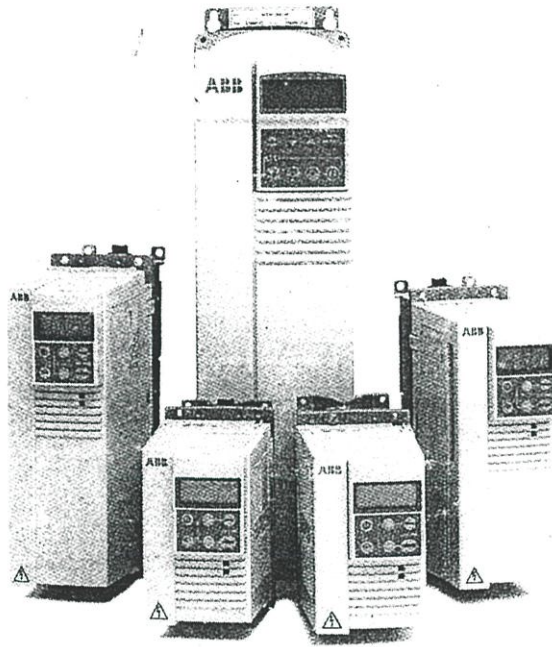
Tipo motor	Penúltima posición: código voltaje						Última posición: código tipo de construcción							
	50 Hz		500V Δ		80 Hz		IM B 3		IM V 1 con escudo		IM B 14 flange pequeño		IM B 35 flange grande	
1LA7 063 a 1LA7 096	1	6	3	-	-	1	6	0	1	1	4	2	3	6
1LA 106 a 1LA 207	1	6	3	5	-	1	6	0	1	1	4	2	3	6
1LA 223 a 1LA 313	1	6	3	5	-	-	6	0	1	1	4	-	-	6
1LA6 316 a 1LA6 318	-	6	-	5	-	-	9 L2F	0	-	8	4	-	-	6
1LA8 315 a 1LA8 453	-	6	-	5	-	-	9 L2F	0	-	8	4	-	-	6
1LA8 455 y 1LA8 457	-	-	-	5	0	-	bajo pedido	0	-	8	4	-	-	6

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลของชุดควบคุมการขับเคลื่อน

Comp-AC

User's Manual
for type ACS 400 frequency
converters from 2.2 to 37 kW



ABB

Reference Sections

A Environment for Storage, Transportation and Stationary Use

Table 1

ACS 400	Stationary Use	Storage and Transportation in the protective package
Installation Site Altitude	<ul style="list-style-type: none"> 0...1000 m if P_N and I₂ 100% 1000...2000 m if P_N and I₂ derated 1% every 100 m above 1000 m 	-
Ambient Temperature	<ul style="list-style-type: none"> 0...40 °C max. 50 °C if P_N and I₂ derated to 90% 	-40...+70 °C
Relative Humidity	< 95% (non-condensing)	
Contamination Levels (IEC 721-3-3)	<p>No conductive dust allowed.</p> <p>The ACS 400 should be installed in clean air according to IP classification. Cooling air must be clean, free from corrosive materials and electrically conductive dust.</p> <p>In UL installations the ACS 400 should be installed in clean and dry air, free from dripping water.</p>	
	<ul style="list-style-type: none"> chemical gases: Class 3C2 solid particles: Class 3S2 	<p>Storage</p> <ul style="list-style-type: none"> chemical gases: Class 1C2 solid particles: Class 1S3 <p>Transportation</p> <ul style="list-style-type: none"> chemical gases: Class 2C2 solid particles: Class 2S2
Atmospheric Pressure		
Sinusoidal Vibration (IEC-60068-2-6)	<ul style="list-style-type: none"> 2-9 Hz 0.3 mm 9-200 Hz 2 m/s² 	<p>Storage</p> <ul style="list-style-type: none"> 2-9 Hz 1.5 mm 9-200 Hz 5 m/s² <p>Transportation</p> <ul style="list-style-type: none"> 2-9 Hz 3.5 mm 9-200 Hz 10 m/s²
Shock (IEC 68-2-29)	not allowed	<ul style="list-style-type: none"> max. 100 m/s² (330 ft./s²), 11 ms
Free Fall	not allowed	<ul style="list-style-type: none"> 76 cm (30 in.), frame size R1 61 cm (24 in.), frame size R2 46 cm (18 in.), frame size R3 31 cm (12 in.), frame size R4

S Type Series and Technical Data

Table 11

400 V series											
3- Input U ₁ 380V - 480V ±10 % 48 - 63 Hz	ACS401-	004- 3-X	005- 3-X	006- 3-X	009- 3-X	011- 3-X	016- 3-X	020- 3-X	025- 3-X	030- 3-X	041- 3-X
Frame size		R1			R2		R3		R4		
Nominal ratings (See G)	Unit										
Nominal motor P _N Squared torque	kW	3.0	4.0	5.5	7.5	11	15	18.5	22	30	37
Input current I _{1NSQ}	A	6.2	8.3	11.1	14.8	21.5	29	35	41	56	68
Continuous output current I _{2NSQ}	A	6.6	8.8	11.6	15.3	23	30	38	44	59	72
Max. output current I _{2NSQmax} *	A	7.3	9.7	12.8	16.8	25.3	33	42	48	65	79
Nominal motor P _N Constant torque and power	kW	2.2	3.0	4.0	5.5	7.5	11	15	18.5	22	30
Input current I _{1N}	A	4.7	6.2	8.3	11.1	14.8	21.5	29	35	41	56
Continuous output current I _{2N} *	A	4.9	6.6	8.8	11.6	15.3	23	30	38	44	59
Max. output current I _{2Nmax}	A	7.4	9.9	13.2	17.4	23	34	45	57	66	88
Output voltage U ₂	V	0 - U ₁									
Switching frequency f _{SW}	kHz	4 (Standard) 8 (Low noise **)									
Protection limits	(See O)										
Overcurrent (peak)	A	20.3	27.5	37	48	64	76	99	125	145	195
Overvoltage: Trip limit	V DC	842 (corresponds to 624 VAC input)									
Undervoltage: Trip limit	V DC	333 (corresponds to 247 VAC input)									
Overtemperature	°C	95 (heat sink)									
Max. cable length f _{SW} = 4 kHz	m	100			200		200		200		
f _{SW} = 8 kHz	m	50			100		100		100		
Max. wire sizes and screw torque of connectors											
Power terminals ***	mm ²	10, AWG6 (stranded)/ Torque 1.3-1.5 Nm					16, AWG4 (stranded) / Torque 1.5-1.8 Nm		35, AWG2 (stranded) Torque 3.2-3.7 Nm		
Control terminals	mm ²	0.5 - 1.5 (AWG22...AWG16) / Torque 0.4 Nm									
Line fuse 3- **** ACS401-	A	10	10	16	16	25	35	50	50	63	80
Power losses (at nominal point)											
Power circuit	W	90	120	170	230	330	450	560	660	900	1100
Control circuit	W	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

* Power stages are designed for the continuous I_{2NSQ} current. These values are valid when the altitude is less than 1000 m ASL. See Q.

** Low noise setting only available with optional control panel. Derate P_N and I₂ to 80%.

B Dimensions (mm)

Units with IP 21/NEMA1 Enclosures

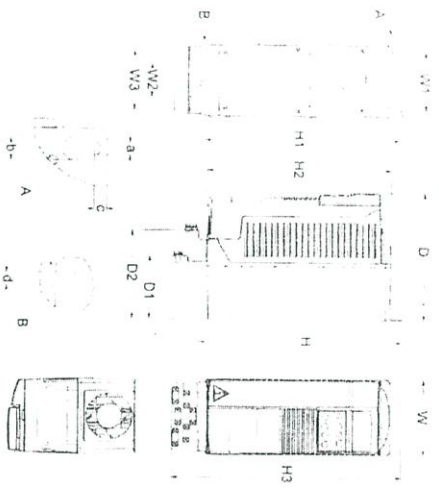


Figure 2 IP 21/NEMA1 enclosures

Table 2 Dimensions of units with IP 21/NEMA1 enclosures

Dimension Reference (mm)	Frame Size, IP 21/NEMA1			
	R1	R2	R3	R4
W	125	125	203	203
W1	98	98	160	160
W2			98	98
W3	98	98	160	160
H	330	430	545	636
H1	318	417	528	619
H2	300	400	500	600
H3	373	473	586	686
D	203	221	248	282
D1	105	117	144	177
D2	147	159	200	233
a	5.5	5.5	6.5	6.5
b	10	10	13	13
c	5.5	5.0	8.0	8.0
d	5.5	5.5	6.5	6.5
Mass (kg)	5.5	8.5	19.0	28.6

See paragraph S for frame size assignments for type codes

ACS 400 User's Manual

Units with IP 54/NEMA12 Enclosures

The IP 54 protection class has a different outer plastic cover compared to the IP 21. The IP 54 enclosure uses the same skeleton (inner plastic part) as the IP 21 enclosure, but an internal fan is added to improve the cooling of the unit. This kind of structure increases the dimensions compared to the IP 21 enclosure, but the loadability of the units with IP 54 enclosure is the same as that of the IP 21 units.

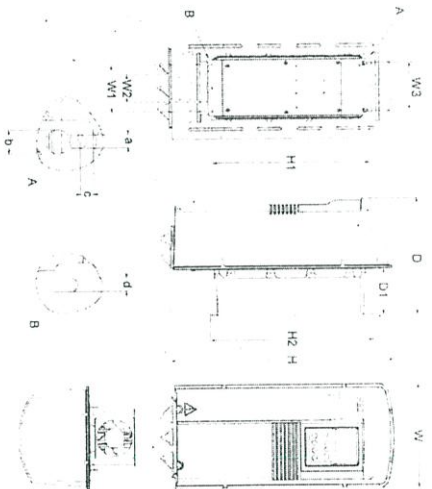


Figure 3 IP 54/NEMA12 enclosures

Table 3 Dimensions of units with IP 54/NEMA12 enclosures

Dimension Reference (mm)	Frame Size, IP 54/NEMA12			
	R1	R2	R3	R4
W	215	215	257	257
W1	98	98	160	160
W2			98	98
W3	98	98	160	160
H	453	551	642	742
H1	318	417	528	619
H2	330	430	545	636
D	240	253	280	312
D1	95	107	132	145
a	5.5	5.5	6.5	6.5
b	10	10	13	14
c	5.5	5.5	8.0	8.0
d	5.5	5.5	6.5	6.5
Mass (kg)	7.2	11.2	22.3	32.3

See paragraph S for frame size assignments for type codes.

ACS 400 User's Manual

Table 4 Cable connections.

Terminal	Description	Note
U1, V1, W1	3- power supply input	Do not use in 1- supply!
PE	Protective Earth	Follow local rules for cable cross-sections.
U2, V2, W2	Power output to motor	See R.
Uc+, Uc-	DC bus	For optional ACS-BRK braking unit.
⏚	Motor cable shield	

Follow local rules for cable type and cross-sections. Use screened motor cable.
Route the motor cable away from control wires and the power supply cable to avoid electromagnetic interference.

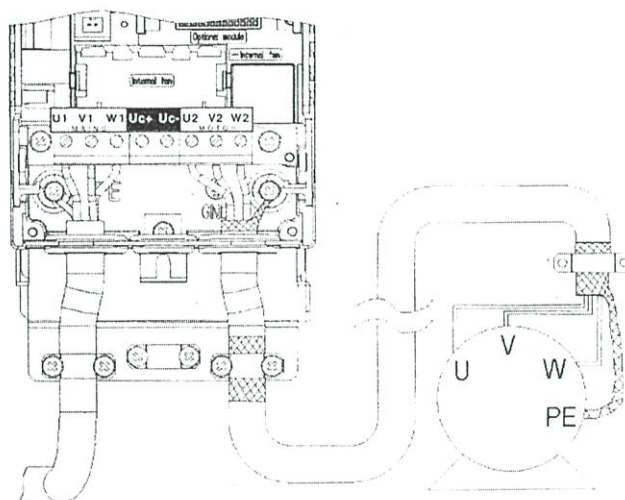


Figure 19 Motor cable connection for frame sizes R1 and R2 (IP 21 / NEMA1).

Note! See "ACS 400 EMC Instructions" on page 157.

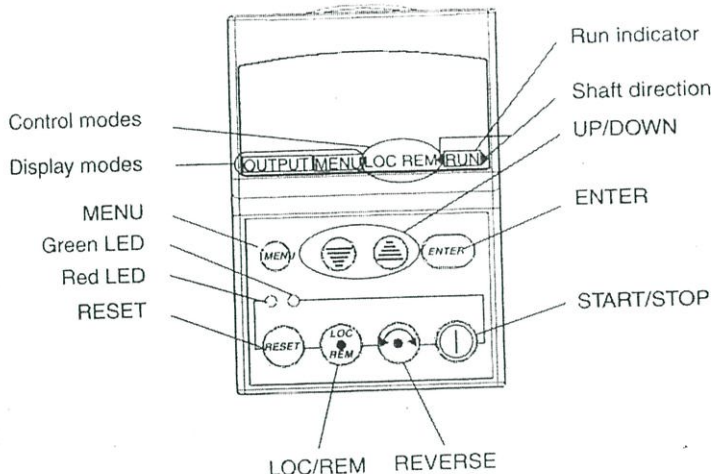


Note! The output contactor can be used only as a safety device. Do not close the contactor when the ACS 400 is running.

PROGRAMMING

ACS-PAN-A Control Panel

ACS-PAN-A is an alphanumeric control panel with LCD display and multiple languages. The control panel can be connected to and detached from the converter at any time. The panel can be used to copy parameters to other ACS 400 converters with the same software revision (parameter 3301).



Control Modes

The very first time the drive is powered up, it is controlled from the Control Terminal Block X1 (remote control, **REM**). The ACS 400 is controlled from the control panel when the drive is in local control (**LOC**).

Switch to local control (**LOC**) by pressing and holding the LOC/REM button until first LOCAL CONTROL or later LOCAL, KEEP RUN is displayed:

- If the button is released while LOCAL CONTROL is displayed, the panel frequency reference is set to the current external reference and the drive is stopped.
- When LOCAL, KEEP RUN is displayed, the current run/stop status and the frequency reference are copied from the user I/O.

Start and stop the drive by pressing the START/STOP button.

Change the shaft direction by pressing the REVERSE button (parameter 1003 must be set to REQUEST).

Switch back to remote control (**REM**) by pressing and holding the LOC/REM button until REMOTE CONTROL is displayed.

Shaft Direction

RUN >	<ul style="list-style-type: none"> • Drive is running and at setpoint • Shaft direction is forward (>) or reverse (<)
< RUN	
RUN > (or < RUN) Arrow head blinking rapidly	Drive is running but not at setpoint.
> (or <) Arrow head blinking slowly	Drive is stopped.

ภาคผนวก ค.
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 20 ฉบับที่ 3

กันยายน 2546

1.	วิจัยกำเนิดความถี่แบบเลื่อนเฟสโดยใช้เทคโนโลยีซิมอส	1
	มนตรี คำเงิน กอบชัย เดชหาญ สมพงษ์ อารีย์ สุรพล บุญจันทร์	
2.	วิจัยความต้านทานแบบบวมที่ควบคุมด้วยแรงดันโดยใช้มอเตอร์ชนิดเซอร์	6
	สมนึก ท้าวหาญ กอบชัย เดชหาญ อภิสิทธิ์ ชัยสาธิต	
3.	แอปพลิเคชันโปรแกรมโทรศัพท์และอินเตอร์เน็ตแบบโครงสร้างของสัญญาณ BAI บนโครงข่าย ISDN	12
	ทวีพร เล็กชะอุ่ม กอบชัย เดชหาญ	
4.	การวิเคราะห์ระบบเครือข่ายท้องถิ่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ	18
	สุพัตรา ทองเกษม กฤษณะพงศ์ พันธุ์ศรี กอบชัย เดชหาญ นภัทร สระเอี่ยม	
5.	การศึกษาศาลดทอนสัญญาณจากมุมอาคารในเส้นทางนอกระดับแนวสายตาของระบบโทรศัพท์พื้นฐานทุกพาสส่วนบุคคล (PCT)	24
	อำนาจ ยิ้มสวัสดิ์ ไกรสิน สงวัฒนา พิเชฐ นวงนวล	
6.	การจัดกลุ่มเอกสารโดยใช้ Self-Organizing Map แบบความเร็วสูง	30
	พรเทพ ไรจนวล เอื้อน ปิ่นเงิน	
7.	การศึกษาเชิงทดลองเครื่องผลิตไฟฟ้าจากตะกั่วเซลล์เชื้อเพลิง	36
	เจริญพร เสกสถิตถนกร อนุวัฒน์ สุวรรณทา	
8.	การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม PSS/e เพื่อหาวางแผนระยะสั้นในเขตนครหลวง	42
	เชาวฤทธิ์ ธรรมเพชร มณฑล สิริจันดาไกรฤกษ์	
9.	การตรวจประเมินระบบบำบัดน้ำเสียโดยใช้การแปลงสภาพและโครงสร้างประสาทเทียมชนิดจัดกลุ่มด้วยตนเอง	48
	อรุณพล เกษพิทักษกุล สุธี บรรจงจิตร รัตพงษ์ นิยมสัณย	
10.	การวิเคราะห์โพลีโพลในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีไลเนียร์เซมิคอนดิคตอร์แบบปรับปรุง	54
	สิทธิเดช วชิราศรีศิริกุล ศิลปชัย พงษ์ประเสริฐ มณฑล สิริจันดาไกรฤกษ์	
11.	การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ให้ความร้อน 1- เฟส ด้วยวิธีการปรับจำนวนเซลล์เต็มแบบจัดจตุรัส	60
	วิศักดิ์ ยี่รสสา วิริยะ พิเชฐจำเริญ	
12.	การวิเคราะห์การใช้พลังงานของรถไฟฟ้ามหานคร	66
	สิปปภาส จารวรรณชัย สิริวัฒน์ โพธิ์เวชกุล	
13.	การประเมินความสามารถของผู้รับเหมา: นมมของจากอุตสาหกรรมก่อสร้างในรัฐควีนแลนด์	72
	จักรพงษ์ พงษ์เท็ง	
14.	การศึกษาพฤติกรรมทางกลของเพาปริคอสถิติน้ำซึ่งทำจากเศษโพลีโพรพิลีน	78
	วิศักดิ์ หนูเจริญ มิ่ง โลกจันแสงทอง ชวลิต แสงสวัสดิ์	
15.	ผลกระทบของ residence time ของอนุภาคเคลือบความดันต่อกระบวนการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	84
	นิตินัย ปญญบุษยกุล จารวรรณชัย อนุวัฒน์	
16.	อิทธิพลของเงื่อนไขการทำงานต่อการเกิดรอยประสานและรอยร้าวในการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีด	90
	วิษณุสรรค์ โชคชัยวิวัฒน์ จารวรรณชัย อนุวัฒน์	
17.	คุณลักษณะของการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินในเตาเผาออร์เทคแบบสองชั้น	96
	กัญญา แก้วก่อเกียรติ นิยม ศรีศิริสิทธิกุล พงษ์เจต พรหมวงค์	
18.	สหสัมพันธ์ของท่อเขย่า	102
	เทอดไทย วัฒนธรรม ชัยมงคล ช้องเกียรติพันธ์	
19.	การศึกษาการไหลผ่านลิ้นหัวใจเทียมโดยเทคนิคการสังเกตการไหลจากเส้นควิน	108
	สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด วิษณุ คงเกียรติบุษย์ นิยม ศรีศิริสิทธิกุล พงษ์เจต พรหมวงค์	
20.	Periodic Performance of a Membrane Reactor for Methane Steam Reforming	114
	Duangkamol Na-Ranong Takao Ohmori Takuji Yamamoto Akira Endo Takaji Akiya and Masaru Nakuiwa	

การวิเคราะห์การใช้พลังงานของรถไฟฟ้า

An Analysis of Energy Consumption for Electric Car

ตีปภาต จารุวรรณชัย ศิริวิวัฒน์ โทธิเวชกุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์การใช้พลังงานของรถไฟฟ้าขนาดใหญ่เพื่อใช้ในการขนส่งผู้โดยสารจำนวน 15 ที่นั่ง ความเร็วสูงสุดเท่ากับ 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยนำโครงสร้างรถยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงน้ำมันเปลี่ยนเป็นระบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า โดยนำมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 22 กิโลวัตต์ 3 เฟส 6 ขั้วมาขับเคลื่อนแทนเครื่องยนต์แบบเดิม ระบบควบคุมการขับเคลื่อนใช้เครื่องแปลงผันไฟฟ้าขนาด 30 กิโลวัตต์แบบ PWM โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อแรงดัน ที่ป้อนให้กับมอเตอร์เพื่อเป็นการควบคุมความเร็วในการขับเคลื่อนให้เป็นไปตามความต้องการของผู้ขับขี่ และทำการศึกษาลักษณะการนำไปใช้งานภายใต้เงื่อนไขของการขับเคลื่อนที่แตกต่างกันออกไปเพื่อทดสอบด้านการใช้พลังงานคือนำหนักบรรทุกและหาประสิทธิภาพของรถไฟฟ้าคันแบบที่ได้จัดสร้างขึ้น ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะนำไปวิเคราะห์การใช้พลังงานของรถไฟฟ้า และสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบไปออกแบบรถไฟฟ้าที่ใช้หลักการขับเคลื่อนในลักษณะเดียวกันเพื่อให้การใช้พลังงานของรถไฟฟ้าคันแบบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุดต่อไป

Abstract

This paper purposes an analysis of energy consumption for electric car for 15 person transportation, maximum speed 30 km./hr. The body of a vehicle driven by fuel or another energy source will be transform to be driven by electrical energy source. The proposed electric car is replaced to be driven by 3-phase 6 pole 22 kW induction motor using 30 kW PWM inverter drive base on the V/f principle in order to control the driving speed. The driving tests of the electric car have been performed under various load conditions and surrounding in order to obtain it's over all efficiency. The experimental results will be useful in the future design to achieve a higher efficiency electric car.

1. บทนำ

ในบทความนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบจัดสร้างรถไฟฟ้าขนาดใหญ่คันแบบที่ใช้ในการรับส่งผู้โดยสารในเขตชุมชน โดยในบทความนี้จะเป็นการนำเสนอการออกแบบและจัดสร้างรถไฟฟ้า คันแบบสำหรับใช้งานภายในสถาบัน

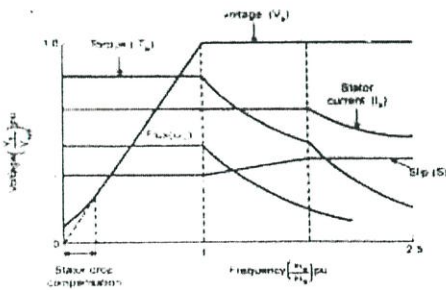
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เนื่องจากสถานะในปัจจุบันยานพาหนะทั่วไปส่วนใหญ่จะใช้เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงหรือก๊าซธรรมชาติ ผลที่ตามมาคือไอเสียจากการเผาไหม้จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมรวมทั้งเสียงดัง ประกอบกับอาณาบริเวณพื้นที่ใช้งานของสถาบันฯ ซึ่งมีพื้นที่

ที่ขนาดใหญ่ต้องใช้อุปกรณ์ขนถ่ายรับข้างเข้ามาตั้งอยู่ใน
 เพื่อรับส่งมักศึกษารวมทั้งเชิงกลที่อาศัยอยู่ตามหอพักบริเวณรอบ
 สถานีฯ ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะทางเสียงและควัน รวมทั้ง
 อันตรายจากความพุดกต่าง อันไม่เหมาะสมกับสถานศึกษาที่
 ต้องการความเงียบสงบ ดังนั้นด้วยความร่วมมือกันระหว่าง
 คณะวิศวกรรมศาสตร์และสมาคมศิษย์เก่าสถาบันเทคโนโลยี
 พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จึงได้จัดให้มีโครงการ
 จัดสร้างรถไฟใต้ดินแบบสำหรับรับ-ส่งภายในสถาบันฯขึ้น
 เพื่อบรรเทาผลกระทบจากเสียงและควันอีกทั้งจำนวนรถจักรยาน
 ยนต์รับจ้าง เพื่อลดความพุดกต่างลง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

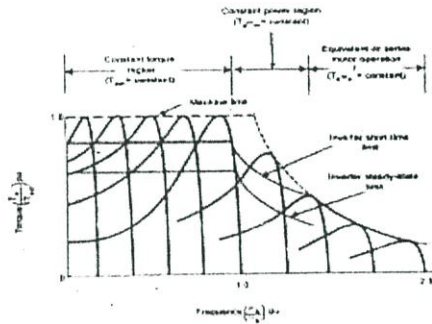
2.1 การควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้วยการเปลี่ยน V/f

เทคนิคนี้เป็นที่รู้จักกันดีและเป็นเทคนิคที่เหมาะสม
 เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่ง
 จะใช้อินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนเพื่อที่จะให้ได้แรงดันและความถี่
 ที่เอาต์พุตเป็นไปตามที่ต้องการของหลักการควบคุมความเร็ว
 รอบของมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 1 [1,2,4] ซึ่งมอเตอร์ที่ใช้จะ
 ต้องมีคุณสมบัติของสลิปที่ต่ำซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพ
 และความเร็วของมอเตอร์จะเปลี่ยนตามการเปลี่ยนแปลงความถี่
 ของอินเวอร์เตอร์ เมื่อต้องการเพิ่มความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า
 เหนี่ยวนำทำได้โดยการเพิ่มความถี่ของแรงดันขาออกของอิน
 เวอร์เตอร์ แต่การเพิ่มความถี่อย่างเดียวนี้อาจทำให้เส้นแรงแม่
 เหล็กในช่องอากาศ ϕ ของมอเตอร์ลดลง เนื่องจากการลดลง
 ของ magnetizing current อันเป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่ม
 ของ magnetizing reactance ซึ่งเมื่อ ϕ ลดลงจะทำให้แรงบิด
 สูงสุดของมอเตอร์ลดลง เพื่อที่จะรักษาเส้นแรงแม่เหล็กใน
 ช่องอากาศและแรงบิดสูงสุดให้คงที่



รูปที่ 1 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

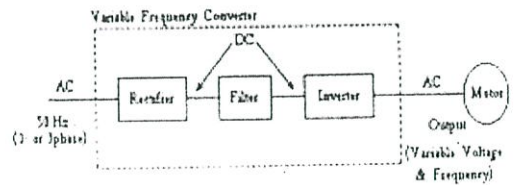
จำเป็นต้องเพิ่มแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ตามความถี่
 คือรักษาอัตราส่วนของแรงดันเอาต์พุต (V) ต่อความถี่ (f) หรือ
 V/f ให้คงที่ จะทำให้แรงบิดคงที่เช่นเดียวกับการควบคุมคิซึ
 มอเตอร์ การควบคุมให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีแรงบิดสูงสุด
 คงที่จะทำได้โดยยังความถี่ที่ต่ำกว่าความเร็วกำหนด (base
 speed) หรือความถี่ต่ำกว่า base speed (1 p.u.) ดังแสดงในรูป
 ที่ 2 [3,4]



รูปที่ 2 Speed-torque Curve ของมอเตอร์
 เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่

2.2 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำจะต้อง
 สามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ซึ่งจะทำหน้าที่เชื่อมโยง
 ระหว่างระบบจ่ายไฟและมอเตอร์ ดังนั้นอินเวอร์เตอร์ที่ดี
 ต้องมี คุณสมบัติพื้นฐานที่สอดคล้องกับความต้องการของ
 มอเตอร์ดังนี้ สามารถที่จะปรับความถี่ได้เป็นสัดส่วนกับ
 ความเร็วรอบที่ต้องการสามารถปรับแรงดันเอาต์พุตเพื่อรักษา
 อัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ (V/f) ให้คงที่ตลอดช่วงแรงบิดคง
 ที่ตามต้องการและสามารถจ่ายกระแสได้ตามพิกัดที่ความถี่
 ใดๆ ซึ่งอยู่ในช่วงแรงบิดคงที่ที่ต้องการ



รูปที่ 3. บล็อกไดอะแกรมของระบบอินเวอร์เตอร์เพื่อการขับ
 เคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในรูปที่ 3 แสดงหลักการพื้นฐานซึ่งแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับจะถูกเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยการใช้อุปกรณ์เรียงกระแสแบบที่สามารถควบคุมแรงดันได้ หรือควบคุมไม่ได้ก็ได้ (Controlled Or Uncontrolled Rectifier) และอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถเปลี่ยนระดับแรงดันและความถี่ได้ โดยทั่วไประบบอินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายแอกออกตามชนิดของ อินเวอร์เตอร์ได้เป็น 2 ประเภท คือ

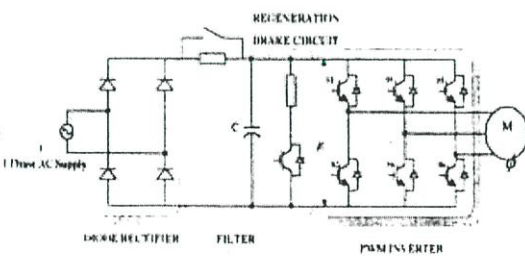
1 อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแส (Current-Source Inverter)

2 อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน (Voltage-Source Inverter)

โดยอินเวอร์เตอร์ทั้งสองแบบนี้จะให้คุณสมบัติ และลักษณะของรูปคลื่นของกระแสและ แรงดันที่แตกต่างกัน และเหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกันออกไปด้วย ในที่นี้จะขอกล่าวเพียงชนิด พัลส์บรอกลิ้งอินเวอร์เตอร์เท่านั้น ทั้งนี้เพราะในการศึกษาครั้งนี้เป็นการสร้างอินเวอร์เตอร์บนพื้นฐานของพัลส์บรอกลิ้ง ซึ่งโดยทั่วไปจะไม่นิยมใช้อินเวอร์เตอร์ชนิด 6-สแต็ป เพราะมีข้อเสียมากกว่าชนิดพัลส์บรอกลิ้ง

2.3 พัลส์บรอกลิ้งอินเวอร์เตอร์ (PWM Inverter)

โครงสร้างของพัลส์บรอกลิ้งอินเวอร์เตอร์ ซึ่งโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ประกอบด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์ (Converter) โดยทั่วไปนิยมใช้ไดโอดรีกติไฟเออร์ซึ่งเป็นวงจรเปลี่ยนแรงดันกระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมไขว่ ป้อนให้กับพัลส์บรอกลิ้งอินเวอร์เตอร์และในส่วนของคอนเวอร์เตอร์ยังต้องมีวงจรจำกัดกระแสอินรัช (In rush current suppression)



รูปที่ 4 วงจรกำลังของพัลส์บรอกลิ้งอินเวอร์เตอร์

ในส่วนของพัลส์บรอกลิ้งอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันนี้จะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมทั้งความถี่และแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ หลักการหนึ่งที่ใช้ในการกำเนิดสัญญาณควบคุม

สวิทซ์ของอินเวอร์เตอร์ก็คือจะใช้การเปรียบเทียบระหว่างแรงดันควบคุมที่เป็นรูปคลื่นไซน์ 3 เฟส ($V_{control}$) ที่มีเฟสต่างกัน 120° องศาทางไฟฟ้าและมีคุณสมบัติที่สามารถปรับแอมพลิจูดให้แปรผันไปตามความถี่ได้ด้วย โดยจะนำสัญญาณควบคุมนี้ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม (Triangle waveform) ที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของการสวิทซ์ซึ่งดังที่แสดงในรูปที่ 5 จากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบไปควบคุมลำดับของการสับสวิทซ์อีกทีเมื่อพิจารณาแรงดันทางด้านเอาต์พุท อินเวอร์เตอร์ใช้พัลส์บรอกลิ้งอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส คือ การควบคุมแรงดันเอาต์พุทและความถี่ด้วยการตั้งแรงดันคิซี อินพุตการกำเนิดสัญญาณพัลส์บรอกลิ้งจะใช้รูปคลื่นสามเหลี่ยมเดียวกัน และเปรียบเทียบกับแรงดันควบคุมแบบไซน์ซึ่งมีมุมต่างเฟสกัน 120 องศาซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5 เพื่อต้องการให้แรงดันเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสนั้นสมดุลย์ ในรูปที่ 5 ข แสดงให้เห็นถึงจำนวนขององค์ประกอบแรงดันคิซีเฉลี่ย และแรงดันเอาต์พุท V_{AN} และ V_{BN} ซึ่งได้จากการวัดเมื่ออ้างอิงกับด้านลบของแรงดันเชื่อมไขว่คิซี และจะสังเกตเห็นว่าแรงดันเอาต์พุท V_{AB} จะไม่มีองค์ประกอบของแรงดัน คิซี เนื่องจากถูกหักลบกันหมดคิซีไป(ได้แรงดัน V_{AN} และ V_{BN} นั้นสมดุลย์) เนื่องจากแรงดัน V_{AB} นั้นเกิดจากแรงดัน $V_{AN} - V_{BN}$ ซึ่งจะเห็นว่าหลักการนี้เหมือนกับอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่ใช้เทคนิคการสวิทซ์แบบ PWM

2.4 การทำงานของ PWM ในย่านดัชนีการมอดดูเลทเชิงเส้น ($m_a \le 1.0$)

ในย่านการมอดดูเลทที่เป็นเชิงเส้น $m_a \le 1.0$ องค์ประกอบของความถี่มูลฐานในแรงดันเอาต์พุทจะเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้น กับอัตราส่วนการมอดดูเลท (m_a) จากรูปที่ 5 ข ค่าสูงสุดขององค์ประกอบความถี่มูลฐาน ในกึ่งหนึ่งของแรงดันมูลฐานคือ

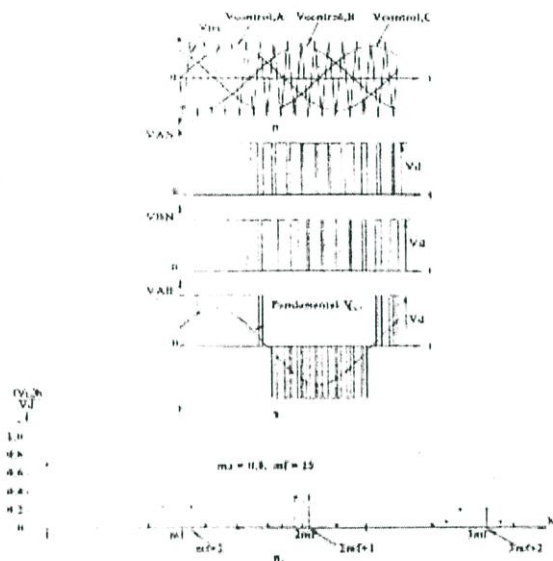
$$\hat{V}_{AN1} = m_a \frac{V_d}{2} \tag{1}$$

ดังนั้นแรงดันไลน์ที่ความถี่มูลฐาน ซึ่งต่างเฟสกัน 120 องศาสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$V_{LL1} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} V_{AN1} \tag{2}$$

$$= \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a V_d$$

$$\approx 0.612 m_a V_d \quad (m_a \leq 1.0)$$



รูปที่ 5. รูปคลื่นแรงดันฟีดแบ็ค/ลิฟต์เอ็ม และสเปกตรัมฮาร์โมนิก

3. การออกแบบต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบ

3.1 การออกแบบขนาดมอเตอร์

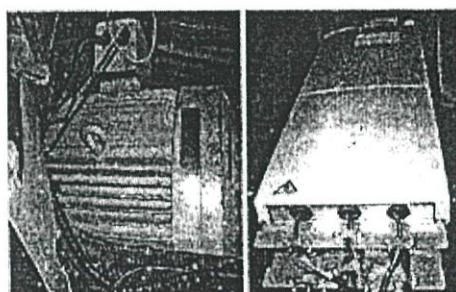
การกำหนดข้อมูลและเงื่อนไขของรถไฟฟ้าเพื่อนำไปเป็นตัวกำหนดขนาดของมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนและขนาดของอินเวอร์เตอร์ โดยกำหนดพิกัดข้อมูลต่างๆดังนี้

- น้ำหนักตัวรวมแบตเตอรี่ 2000 kg.
- น้ำหนักบรรทุกสูงสุด 1000 kg.
- อัตราเร่งสูงสุด 0.6 m/s²
- ความเร็วสูงสุด 30 km/hr ที่ความเร็ว 50Hz.
- ระดับการไต่ทางชันสูงสุด 7 องศา

ดังนั้นขนาดของมอเตอร์ที่ใช้ควรมีพิกัดกำลังไฟฟ้าไม่ต่ำกว่า 22 kW พิกัดของแรงบิดไม่ต่ำกว่า 204.8 N-m [4] จึงเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งตัวมีงาน 22 kW 30hp 380 V, 6 Pole, 50 Hz., 215 N-m

3.2 การออกแบบขนาดชุดควบคุมมอเตอร์

จากหัวข้อที่ 2.2 อินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งตัวน่าจะเป็นแบบ PWM ดังนั้นการกำหนดขนาดจะพิจารณาจากกระแสพิกัดของมอเตอร์ การใช้อินเวอร์เตอร์สร้างแรงดันที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์มักจะมีฮาร์โมนิกปนออกมาด้วยเนื่องจากสัญญาณไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ จะทำให้ขนาดของกระแสพิกัดของมอเตอร์มีขนาดสูงกว่าปกติ 10 เปอร์เซ็นต์ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิที่ตัวมอเตอร์สูงกว่าปกติ ดังนั้นขนาดของอินเวอร์เตอร์จะต้องมีกำลังมากกว่าขนาดกำลังของมอเตอร์ประมาณ 25% [3,4,6] จึงออกแบบใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM ควบคุมความเร็วรอบแบบการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่อความถี่ (V/f) ขนาดพิกัด 3Φ, 380V, 30 kW ความถี่สวิทซ์เท่ากับ 8 kHz ในรูปที่ 6, 7 แสดงการติดตั้งมอเตอร์, อินเวอร์เตอร์และรถไฟฟ้าต้นแบบที่เสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 6. การติดตั้งมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 7. รถไฟฟ้าต้นแบบ

3.3 การหาขนาดของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ใช้

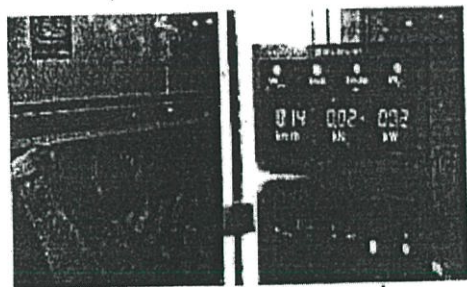
เนื่องจากข้อกำหนดของอินเวอร์เตอร์จะต้องแรงดันกระแสตรงขนาด 580 V ±10% [5] ดังนั้นจึงใช้แบตเตอรี่แบบตะกั่วกรดขนาด 12 V 65 Ahr. นำมาต่ออนุกรมกันทั้งหมด 48 ลูก เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 576 V

4. การทดสอบและวิเคราะห์ผล

ในการทดสอบคุณสมบัติและหาประสิทธิภาพของ รถไฟฟ้าที่ออกแบบและจัดสร้างขี้นนั้นจะทดสอบด้วยเครื่อง ทดสอบ Chassis Dynamometer ซึ่งการทดสอบดังกล่าวจะเป็น การทดสอบเพื่อหาความสามารถในการขับเคลื่อนและการใช้ พลังงานของรถไฟฟ้าที่ได้จัดสร้างขี้น ปัญหาและความเหมา ะสมจากการใช้งาน

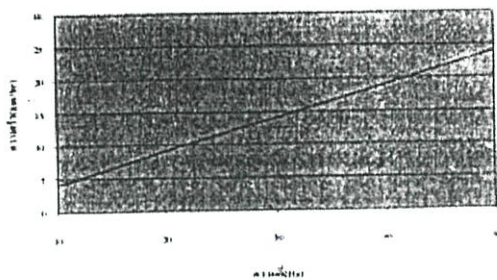
4.1 การทดสอบการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า

การทดสอบหาประสิทธิภาพของการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า เราจะใช้เครื่องทดสอบ Chassis Dynamometer วัดค่า ความเร็ว,แรงบิดและพิกัดกำลังงานที่ได้จากรถไฟฟ้าและ บันทึกราค่าพลังงานด้วยอุปกรณ์เครื่องมือวัดทาง ไฟฟ้า Yokogawa WT-1030 และWT-200 ซึ่งสามารถบันทึกค่ากำลัง ไฟฟ้าที่ใช้งาน โดยปรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นครั้งละ250 กิโลกรัมจนถึง1000กิโลกรัม ในการทดสอบการขับเคลื่อน รถไฟฟ้ากำหนดค่าของน้ำหนักรถ 2,300 kg(เป็นน้ำหนักจริงที่ ซึ่งได้)แรงต้านลม 50 N กำหนดค่าแรงเสียดทานถนนที่ใช้ งานเท่ากับ52N ความดันลมยางเท่ากับ 65 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และทดสอบความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่เท่ากับ 0-50 Hzและปรับ เปลี่ยนเพิ่มขึ้นครั้ง 10 Hz. รูปที่ 8แสดงการทดสอบด้วยเครื่อง Chassis Dynamometer และจุดแสดงผลการทดสอบ



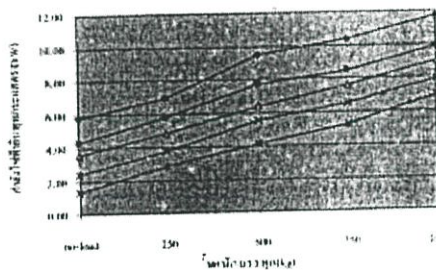
รูปที่ 8. การทดสอบรถไฟฟ้าด้วยเครื่อง Chassis Dynamometer

การทดสอบด้วยวิธีนี้จะเป็นการหา กำลังงานที่ได้จากรถไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนและความเร็วที่ได้ โดยทำการ เปลี่ยนแปลงน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นจนเป็นลำดับจนถึงสภาวะ ที่ที่ความเร็วของรถเริ่มลดลงซึ่งจะเป็นจุดที่บ่งบอกขีดประ สติภาพสูงสุดในการขับเคลื่อน ซึ่งสามารถแสดงเป็นกราฟ ความสัมพันธ์ได้โดยรูปที่ 9,10และ11.

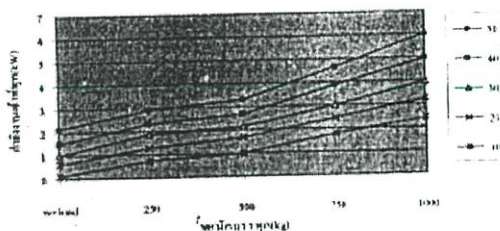


รูปที่ 9. ผลของความเร็วเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่

ในรูปที่ 9 เป็นผลการทดสอบที่สภาวะ ไม่มีน้ำหนักบรรทุกในแง่ของความเร็วในการขับเคลื่อนเมื่อเปลี่ยนความเร็วของอินเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้นก็จะทำให้ความเร็วของรถเพิ่มขึ้น ในรูปที่ 10 เป็นผลของกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์ ส่วนในรูปที่ 11 เป็นผลของกำลังงานเอาต์พุตจากเกียร์ถาถานผ่านเครื่อง Chassis Dynamometer โดยทำการทดสอบด้วยการ เพิ่มน้ำหนักบรรทุกขึ้นไปครั้งละ 250 กิโลกรัมจนถึงพิกัดน้ำหนักที่ออกแบบเท่ากับ 1000 กิโลกรัม



รูปที่ 10. กำลังงานอินพุตเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุก



รูปที่ 11. กำลังงานเอาต์พุตที่ลดลงเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุก

4.2 วิเคราะห์ผล(ประสิทธิภาพ)

ซึ่งจากผลการทดสอบข้างคั้น จากกราฟในรูปที่ 10 แสดงให้เห็นผลการทดสอบที่วัดความเร็วสูงสุดในแต่ละถ่าน

ความถี่ซึ่งถ้าความถี่เพิ่มก็เป็นผลทำให้ความเร็วเพิ่มเป็นไปตามความสัมพันธ์ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในส่วนของการออกแบบความเร็วไว้เท่ากับ 30 km/hr ที่ความถี่เท่ากับ 50 Hz จากผลการทดสอบในรูปแบบที่ 9 ให้ความเร็วเท่ากับ 24 km/hr ที่ความถี่ 50 Hz ซึ่งผิดพลาดจากการออกแบบไป 20% เนื่องจากอัตราส่วนในการทดสอบท้ายและความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ออกแบบเท่ากับ 1022.72 รอบต่ออนาที แต่ความเร็วของมอเตอร์ที่เลือกใช้เท่ากับ 1000 รอบต่ออนาทีและมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นอีก 1.5% ส่วนประสิทธิภาพการสิ้นเปลืองพลังงานของรถไฟฟ้าจะเห็นจากผลกำลังไฟฟ้าอินพุตในรูปแบบที่ 10 และผลของกำลังงานเอาต์พุตที่ได้ในรูปแบบที่ 11 ผลการทดสอบการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนตัวรถจากรูปที่ 10 จะเห็นว่าค่าพลังงานที่ใช้จะเพิ่มขึ้นตามขนาดน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นและเปลี่ยนแปลงตามค่าความถี่ใช้งาน จากผลการทดสอบสามารถนำไปหาค่าการใช้กำลังงานต่อน้ำหนักบรรทุกของรถไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 2.899 W/kg ที่ความถี่การใช้งานเท่ากับ 50 Hz และใช้งานในทางเรียบ

5. สรุป

จากผลการทดสอบรถไฟฟ้าข้างต้นที่ได้ทำการทดสอบผ่านแล้วพบว่า การทดสอบด้วยเครื่อง Chassis Dynamometer สามารถบอกถึงประสิทธิภาพของรถไฟฟ้าภายใต้การใช้งานที่จำลองขึ้นซึ่งมีความเร็วต่ำกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบเล็กน้อยแต่ในแง่ของอัตราเร่งมีผลอยู่ในช่วงที่ค่อนข้างดี การขับเคลื่อนสามารถวิ่งต่อเนื่องที่มีน้ำหนักบรรทุก 1000 kg. และการใช้งานของรถไฟฟ้าจะสามารถบรรทุกน้ำหนักได้ถึง 1500 kg เป็นน้ำหนักที่รถสามารถวิ่งได้โดยที่ไม่เกิดกระแสเกินที่มอเตอร์และอินเวอร์เตอร์ แต่ระยะเวลาที่รถสามารถวิ่งได้ก็จะลดลงขึ้นอยู่กับน้ำหนักที่บรรทุกเพราะการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณตามความศรัทธาแก่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่สนับสนุนด้านงบประมาณ, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่สนับสนุนเรื่องสถานที่, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลให้ความอนุเคราะห์เครื่อง Chassis Dynamometer ใช้ทดสอบห้อง

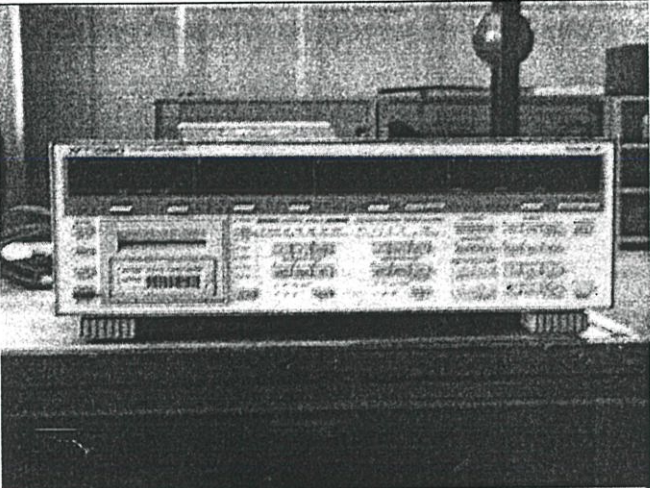
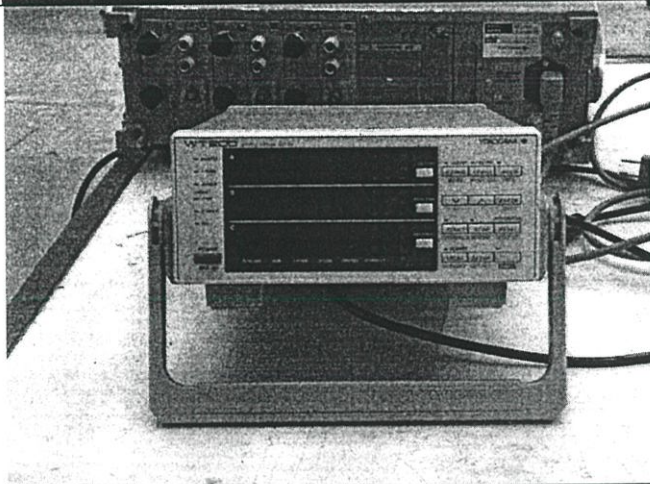
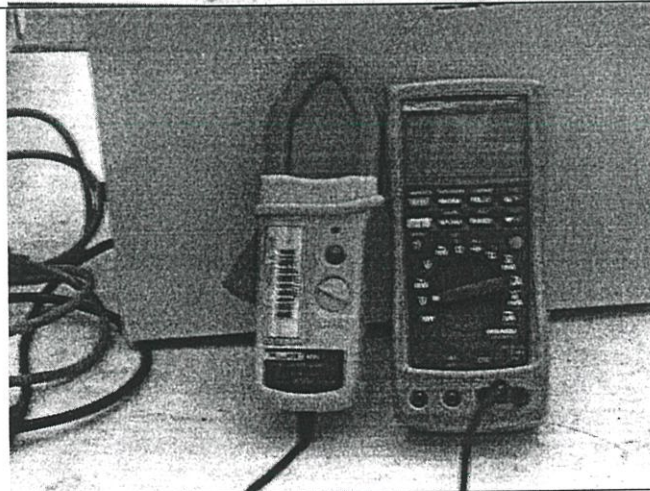
ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวัดผลทางไฟฟ้า บริษัทสยาม ซี-เอส แบริดเจอร์ จำกัด บริษัท ทีไอเอ็มที จำกัด และอยู่วิเออได้เทคโนโลยี รวมถึงผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง มา ณ โอกาสนี้ด้วย


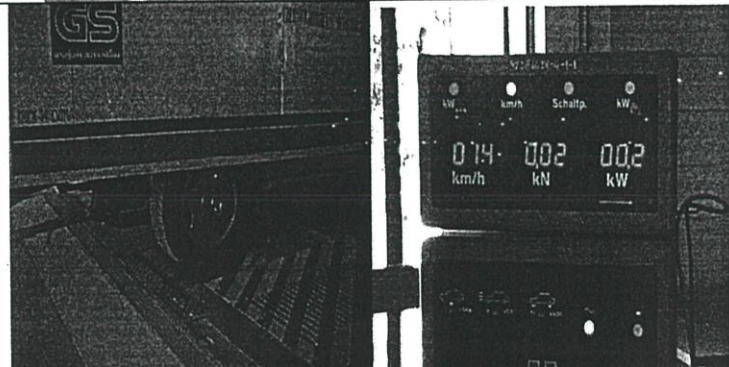
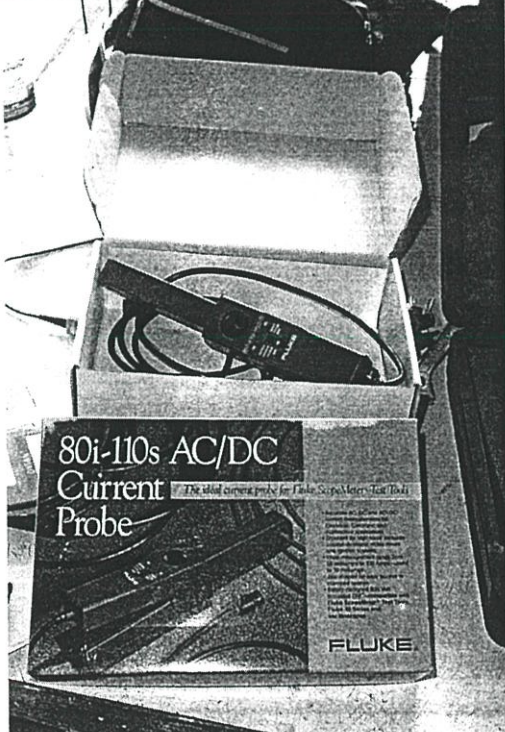
7. เอกสารอ้างอิง

- [1] F. Profumo, Z. Zhang, A. Tenconi, "Axial Flux Machines Drives: a New Viable Solution for Electric Cars," Longman Singapore Publishers (Pte) Ltd., Fifth Edition, 1996 p-p. 34-40.
- [2] B. K. Bose, "Modern Power Electronics and AC Drives," Prentice-Hall, 2001
- [3] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, "Power Electronics: Converters, Application, and Design," second edition, John Wiley & Sons Inc., 1995.
- [4] C. A. Martins, A. S. Carvalho, "Technological Trends in Induction Motor Electrical Drives," 2001 IEEE Porto Power Tech Conference, PPT 2001, Porto, Portugal, September 10-13, 2001.
- [5] ABB "User's Manual for type ACS-400 frequency converters from 2.2 to 37 kW."
- [6] ฤกษ์ดา วิสวธีรนนท์ "Inverter หลักการทำงานและเทคนิคการใช้งาน, พิมพ์ครั้งที่ 5, ศูนย์หนังสือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541."

ภาคผนวก ง.

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้วัดในวิทยานิพนธ์

ลำดับ ที่	รายการ	รายละเอียด
1		<p>3 ϕ Digital Power Meter Yokogawa WT-1310 20 A. 600V</p>
2		<p>1 ϕ Digital Power Meter Yokogawa WT-200 20 A. 600V</p>
3		<p>True rms Digital Multi-meter Fluke 89 & AC/DC Current Clamp</p>

4		<p>Digital Tachometer Yokogawa 3631 60-2000 rpm 60-20000 rpm</p>
5		<p>Chassis Dynamometer</p>
6		<p>AC/DC Current Probe Fluke 80i-110s 10-100 A</p>

ประวัติผู้เขียน



นายสิปปภาส จารุวรรณชัย

เกิดเมื่อวันที่ 29 กรกฎาคม พ.ศ. 2514

ภูมิลำเนา อำเภอบางปะกง จังหวัดฉะเชิงเทรา

ประวัติการศึกษา

สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาไฟฟ้ากำลัง
จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ในปีการศึกษา 2538

ประวัติการทำงาน

ปี พ.ศ. 2531 - ปี พ.ศ. 2533 เข้าทำงานในตำแหน่ง หัวหน้าแผนก Q.A.
บริษัท สิริไทยโกลด์สตาร์

ปี พ.ศ. 2538 - ปี พ.ศ. 2540 เข้าทำงานในตำแหน่ง วิศวกรสนาม
บริษัท โอเม็ก้าเพาเวอร์ จำกัด

ปี พ.ศ. 2538- ปี พ.ศ. 2540 เข้าทำงานในตำแหน่ง ผู้ช่วยอาจารย์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ปี พ.ศ. 2540 - ปัจจุบัน เข้าทำงานในตำแหน่ง อาจารย์ประจำ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร