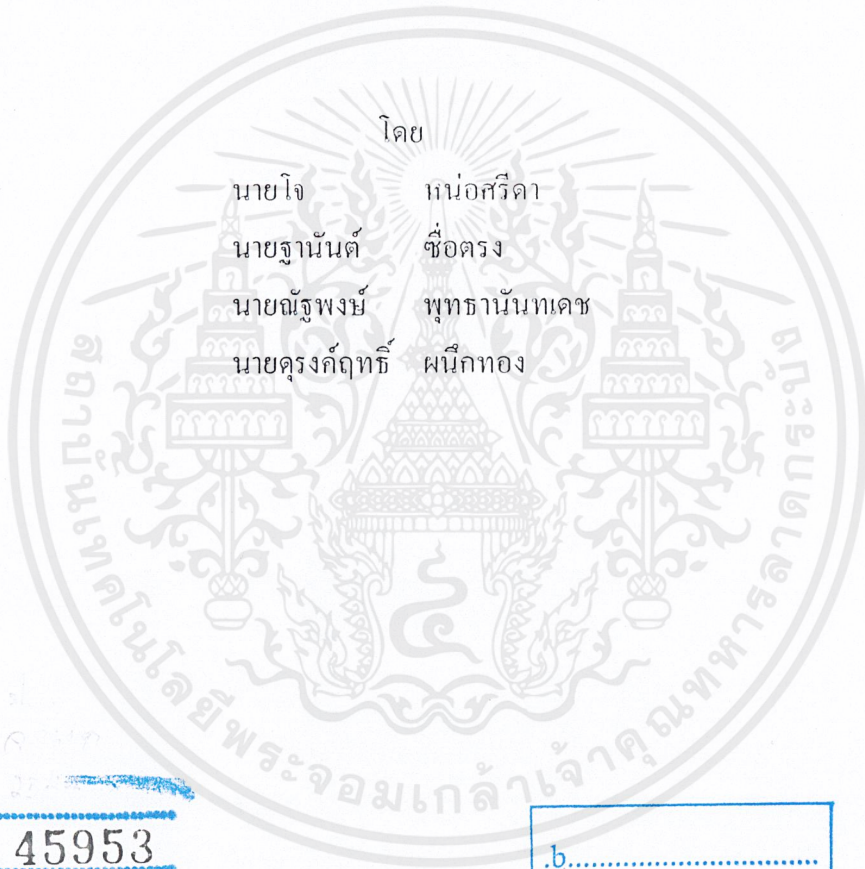


การศึกษาการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า

A Study of Drive for Electric Vehicle



เลขหม.....
เลขทะเบียน..... 45953
วัน, เดือน, ปี 2 6 ก.พ. 2546

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

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2544

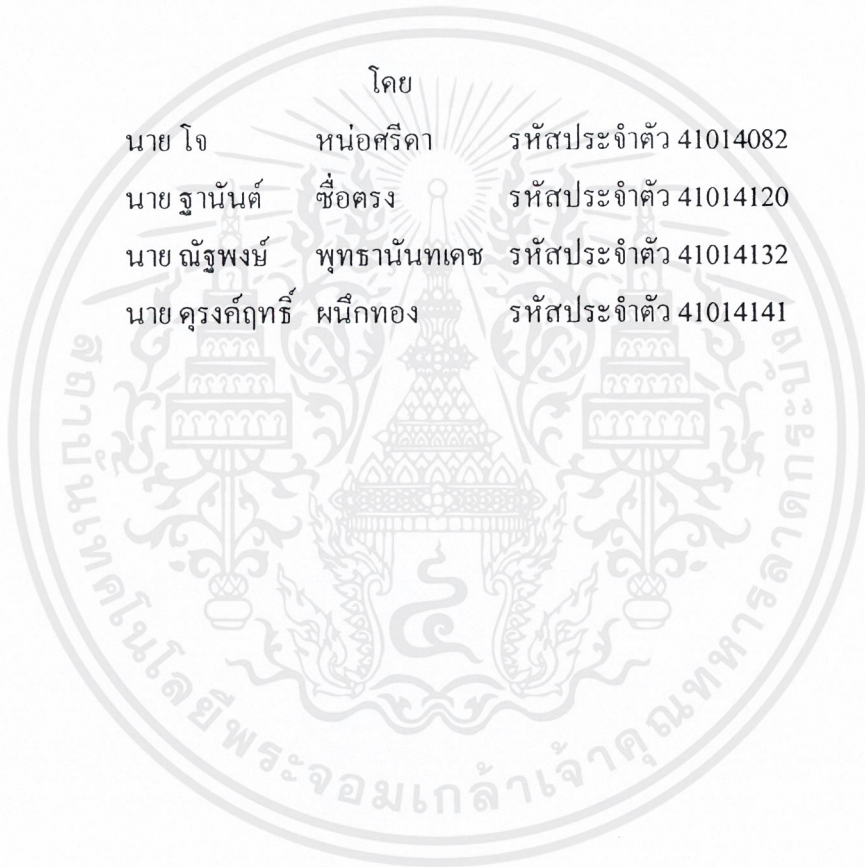
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2544

การศึกษาการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า
A Study of Drive for Electric Vehicle

โดย

นาย โจ	หน่อศรีดา	รหัสประจำตัว 41014082
นาย ฐานันต์	ชื้อตรง	รหัสประจำตัว 41014120
นาย ณัฐพงษ์	พุทธานันท์เดช	รหัสประจำตัว 41014132
นาย คุรงค์ฤทธิ์	ผนิกทอง	รหัสประจำตัว 41014141



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล
อ. สุวงษ์ โสมพงษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ปริญญาบัตรปีการศึกษา 2544

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

- 
1. นายโจ หน่อศรีดา
 2. นายจูนันต์ ชื้อตรง
 3. นายณัฐพงษ์ พุทธานันทเดช
 4. นายคุรงค์ฤทธิ์ ผนึกทอง



(รศ. ศิริวัฒน์ โพรวิเขตกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ. สุวงษ์ โสมพงษ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า

นายโจ	หน่อศรีดา
นายฐานันต์	ช่อตรง
นายณัฐพงษ์	พุทธานันท์เดช
นายศุภรงค์ฤทธิ์	ศนิกทอง

รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
 อ.สุวงษ์ โสมพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
 ปี 2544

บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอการออกแบบรถไฟฟ้าต้นแบบเพื่อรับส่งนักศึกษาภายในสถาบัน โดยจะนำรถยนต์ขนาดกลางมาพัฒนาให้มาเป็นรถที่ใช้พลังงานไฟฟ้าแทนการใช้น้ำมันเพื่อลดมลภาวะทางอากาศ ซึ่งการตัดแปลงจะนำเอาเครื่องยนต์และตัวถังบางส่วนออกแล้วทำการออกแบบและคำนวณหาขนาดของมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์เพื่อนำมาเป็นระบบขับเคลื่อนของรถแทนเครื่องยนต์เดิม จากการคำนวณได้เลือกใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกรงกระรอกขนาด 22 kW 415 V 50 Hz 975 rpm 6 pole 215 N-m และอินเวอร์เตอร์ขนาด 30 kW โดยใช้แหล่งจ่ายพลังงานจากแบตเตอรี่ขนาด 12 V จำนวน 48 ลูก ผลจากการทดลองปรากฏว่าที่พิกัดของมอเตอร์สามารถวิ่งด้วยความเร็ว 24 km/hr ด้วยความเร่งประมาณ 0.7 m/s^2 บรรทุกน้ำหนักสูงสุดได้ประมาณ 1540 kg ความชัน 7 องศา และที่ความเร็วพิกัดสามารถขับได้ระยะทางประมาณ 120 กิโลเมตร ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับรถคำนวณจะพบว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากคำนวณเล็กน้อยซึ่งอาจมีผลมาจากการสูญเสียทางกลและความผิดพลาดจากเครื่องมือวัด

A Study of Drive for Electric Vehicle

Mr. Joe	Norsrida
Mr. Thanan	Suetrong
Mr. Natapong	Puttanantadech
Mr. Durongrit	Phanuttong

Assoc. Prof. Srirawat Potivejkul	Advisor
Suwong Sompong	Advisor

Year 2001

Abstract

This paper presents the electric vehicle design. A normal vehicle to the electric vehicle for reducing air pollution develops the vehicle. From the calculations, we chose 3 phase squirrel-cage induction motor 22 kW 415 V 50 Hz 975 rpm 6 pole 215 N-m and 30 kW PWM inverter. 48 battery is chosen for supplying the system. From the experiment at rated motor, we found that the vehicle can run at 24 km/hr, 0.7 m/s^2 acceleration, 7° maximum slope and distance 120 km. The vehicle can carry maximum load at 1540 kg. When compared with the calculation, the experiments have errors because mechanical loss and equipment errors.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญ	III
สารบัญภาพ	V
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎีทางกลศาสตร์	3
2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ	6
2.3 การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ	10
บทที่ 3 การคำนวณและออกแบบ	14
3.1 การคำนวณ เลือกพิกัดมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์	14
3.2 วงจรการต่อและการใช้งาน	20
3.3 การแสดงชิ้นงาน	24
บทที่ 4 ผลการทดลอง	26
4.1 การทดสอบความสามารถในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ด้วยอินเวอร์เตอร์โดยใช้ความต้านทานปรับค่าได้ปรับความเร็วและทดสอบ ระบบขับเคลื่อน	26
4.2 การทดสอบรูปแบบการขับเคลื่อนมอเตอร์ของอินเวอร์เตอร์ ABB รุ่น ACS400	28
4.3 การทดสอบการขับเคลื่อนบนพื้นถนน	31
4.4 การทดสอบความสามารถในการขึ้นทางชัน	33
4.5 การทดสอบการปรับค่าอัตราเวลาในการเร่ง	35
4.6 การทดสอบความสามารถในการบรรทุกของรถไฟฟ้า	37
4.7 การทดสอบความสามารถในการออกตัวของรถไฟฟ้า	38
4.8 การทดสอบการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่ความเร็วสูงกว่าความเร็วพิกัดมอเตอร์	39

	หน้า
บทที่ 5 สรุป	40
5.1 วิเคราะห์และสรุปผลการดำเนินงาน	40
5.2 ปัญหา	42
5.3 แนวทางการพัฒนา	42
ภาคผนวก	43
กิตติกรรมประกาศ	66
เอกสารอ้างอิง	67



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แรงที่กระทำต่อรถ	4
รูปที่ 2.2 ลักษณะแรงบิดของมอเตอร์ในสภาวะความเร็วต่างๆ	
โดยเป็นการขับมอเตอร์โดยใช้แหล่งจ่าย 3 เฟสจ่ายโดยตรงให้มอเตอร์	7
รูปที่ 2.3 ย่านการทำงานของเครื่องจักรอินดักชัน	
ในสภาวะการทำงานเป็น Motor และ Generator	8
รูปที่ 2.4 ลักษณะของแรงบิดของภาระในกรณีต่างๆ	8
รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน , แรงบิด , กระแสเสตเตอร์กับความถี่	10
รูปที่ 2.6 Speed-torque Curve ของมอเตอร์เมื่อใช้วิธีควบคุมแรงดัน	
และความถี่ที่เสตเตอร์	11
รูปที่ 2.7 วงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ PWM	12
รูปที่ 2.8 ลูกคลื่นการทำงานของอินเวอร์เตอร์	13
รูปที่ 3.1 Block Diagram การทำงานของรถไฟฟ้า	14
รูปที่ 3.2 เวกเตอร์ของแรงบนทางชั้น	15
รูปที่ 3.3 ลักษณะแรงบิดของมอเตอร์ในช่วงความเร็วต่างๆ	17
รูปที่ 3.4 กราฟแรงบิดของภาระโดยแทนที่ความถี่ (Hz)	
แทนที่แทนแรงบิด (T-m)	18
รูปที่ 3.5 กราฟแรงบิดของมอเตอร์เมื่อผ่านเฟืองท้ายแล้ว โดยแทนที่แสดงความถี่ (Hz)	
แทนที่แสดงแรงบิด (T-m)	18
รูปที่ 3.6 กราฟความสัมพันธ์แรงบิดที่ความถี่ต่างๆของมอเตอร์และภาระ	
โดยแทนที่แสดงความถี่ (Hz) แทนที่แสดงแรงบิด (T-m)	19
รูปที่ 3.7 การต่อวงจรหลักของอินเวอร์เตอร์	20
รูปที่ 3.8 การต่อวงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์	20
รูปที่ 3.9 แหล่งจ่ายไฟวงจรย่อยภายในรถ	21
รูปที่ 3.10 ระบบไฟส่องทาง	21
รูปที่ 3.11 ระบบห้ามล้อ	22
รูปที่ 3.12 ระบบวงจรหมุนกลับทาง	23
รูปที่ 3.13 ระบบไฟเดี่ยว	23
รูปที่ 3.14 มอเตอร์ที่ใช้ในโครงการ	24
รูปที่ 3.15 อินเวอร์เตอร์	24

	หน้า
รูปที่ 3.16 รถไฟฟ้า(ด้านข้าง)	25
รูปที่ 3.17 รถไฟฟ้า(ด้านเฉียง)	25
รูปที่ 4.1 วงจรกำลังของมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์	26
รูปที่ 4.2 วงจรควบคุมที่อินเวอร์เตอร์	27
รูปที่ 4.3 กราฟกระแสที่ใช้งานในรูปแบบต่างๆของอินเวอร์เตอร์	30
รูปที่ 4.4 กราฟแรงดันที่ใช้งานในรูปแบบต่างๆของอินเวอร์เตอร์	30



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบและน้ำหนัก ของโหลดของรถไฟฟ้า	14
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์	27
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบรูปแบบการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า	29
ตารางที่ 4.3 ผลการใช้งานบนถนน	32
ตารางที่ 4.4 ผลความสามารถในการขึ้นทางชัน 7 องศา	34
ตารางที่ 4.5 ผลการปรับค่าเวลาในการเร่ง	35
ตารางที่ 4.5 ผลการปรับค่าเวลาในการเร่ง (ต่อ)	36
ตารางที่ 4.6 ผลการปรับค่าเวลาในการเร่งเสริม	36
ตารางที่ 4.7 ผลภาระสูงสุด	37
ตารางที่ 4.8 ผลความเร่งขณะมีภาระและไม่มีภาระ	38
ตารางที่ 4.9 การคำนวณความเร่งขณะมีและไม่มีภาระ	38
ตารางที่ 4.10 ผลที่ความถี่สูงกว่าพิกัด	39
ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบการคำนวณกับการปฏิบัติจริง	41

บทที่ 1

บทนำ

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันนี้ทางสถาบันได้มีการสร้างรถไฟฟ้าขึ้นมามากมายไม่ว่าจะเป็นรถไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรง หรือรถไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสสลับ แต่ถึงกระนั้นก็ตามรถไฟฟ้าที่ทำมานั้นก็ยังมีข้อดีอย่างมากมาย เช่นการบรรทุกภาระที่ได้น้อย ระบบส่งจ่ายพลังงานที่ไม่ค่อยมีเสถียรภาพมีความทนทานต่ำ การซ่อมบำรุงที่ยากและซับซ้อน ใช้เวลานานในการซ่อมบำรุง

ดังนั้นจึงมีการจัดทำโครงการรถไฟฟ้าขึ้นจัดสร้างรถไฟฟ้าต้นแบบที่สามารถแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นกับรถไฟฟ้าในอดีตที่ผ่านมา โดยเฉพาะปัญหาทางด้านการรับภาระ ความมีเสถียรภาพและ การบำรุงรักษาที่ง่าย และหลังจากสร้างเสร็จก็จะนำไปเป็นตัวต้นแบบในการผลิตรถคันต่อไปเพื่อใช้รับส่งนักศึกษาภายในสถาบัน

ในการออกแบบสร้างรถไฟฟ้าขึ้นสิ่งสำคัญที่จะต้องศึกษาคือ จะทำอย่างไรที่จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลในการขับเคลื่อนแบบประสิทธิภาพสูง และควบคุมความเร็วอย่างไร จุดประสงค์การทำโครงการ

1. ออกแบบรถไฟฟ้าให้สะดวกและเหมาะสมต่อการบำรุงรักษาและการใช้งาน
2. ศึกษาการประยุกต์ใช้พลังงานไฟฟ้ากับพลังงานกล
3. เก็บรวบรวมข้อมูลในการใช้งานเพื่อการพัฒนาในอนาคต
4. วิเคราะห์ปัญหาและแนวทางแก้ไข

ขอบเขตของโครงการ

โครงการนี้เป็นการสร้างรถไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและอินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์ ระบบขับเคลื่อนจะต่อมอเตอร์เข้าโดยตรงกับเพลา หลังจากนั้นจะนำมาขับทดสอบเพื่อศึกษาเกี่ยวกับระบบการขับเคลื่อนของรถ การควบคุมความเร็วของรถ สมรรถนะของรถ การออกตัว อัตราเร่งความเร็ว ความสามารถในการขึ้นทางชัน การบรรทุกภาระสูงสุด โดยมุ่งหวังเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนารถไฟฟ้าให้ใช้งานได้เหมือนรถยนต์ทั่วไปในอนาคต

ประโยชน์ที่จะได้รับ

1. ใช้เป็นรถต้นแบบในการผลิตรถไฟฟ้าสำหรับขนส่งขนาดกลางเชิงอุตสาหกรรม
2. ใช้ในการรับส่งนักศึกษาภายในสถาบัน
3. ช่วยลดมลภาวะทางอากาศ
4. ช่วยในการศึกษารูปแบบการทำรถไฟฟ้า

เนื้อหาของปริญญานิพนธ์

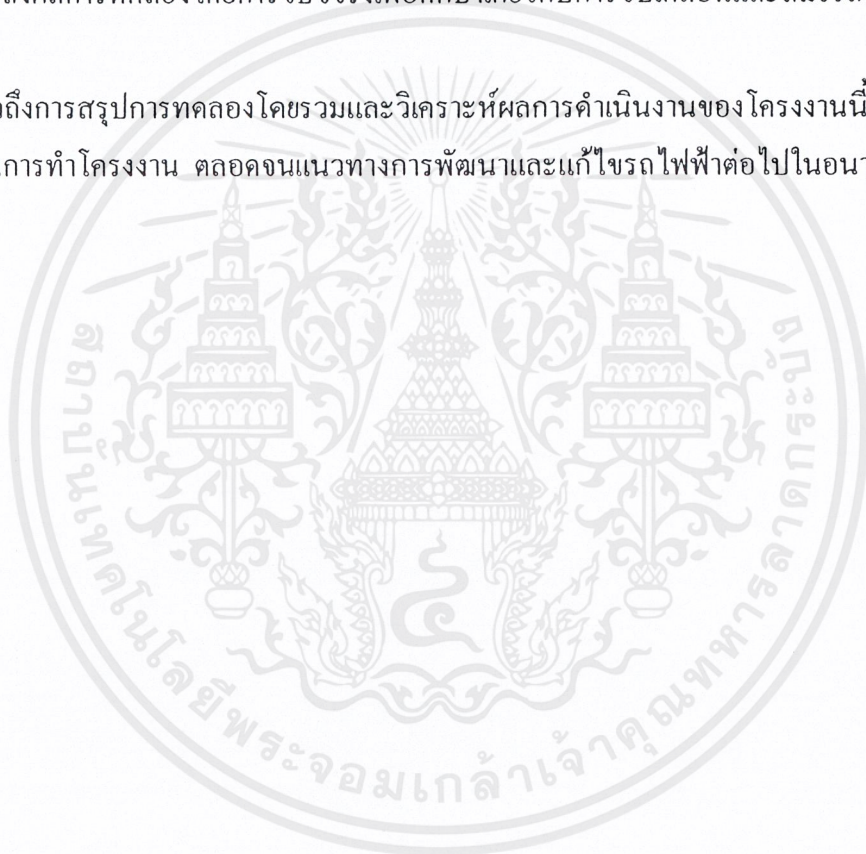
รายละเอียดเนื้อหาต่างๆของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เช่น ทฤษฎีทางกลศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของรถยนต์ ทฤษฎีของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทฤษฎีเบื้องต้นของพัลส์วิคมีอคดูเลชัน อินเวอร์เตอร์ และการควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักในการคำนวณและออกแบบขดไฟฟ้า ทั้งในด้านการเลือกชนิดของมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์ ขนาดของมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์ รวมทั้งรูปแบบโครงสร้างรถ วงจรหลักและวงจรควบคุมทั้งในขดไฟฟ้า

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองโดยการจับจิ้งจิงเพื่อศึกษาเกี่ยวกับการขับเคลื่อนและสมรรถนะของรถไฟฟ้า

บทที่ 5 กล่าวถึงการสรุปการทดลองโดยรวมและวิเคราะห์ผลการดำเนินงานของโครงการนี้ อีกทั้งปัญหาที่พบในการทำโครงการ ตลอดจนแนวทางการพัฒนาและแก้ไขขดไฟฟ้าต่อไปในอนาคต



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีทางกลศาสตร์

แรงต้านทานและกำลังที่ต้องการในการขับเคลื่อน

ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับแรงต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของรถยนต์นั้นเป็นพื้นฐานสำคัญ เนื่องจากเป็นตัวที่จะกำหนดขนาดของโมเมนต์ และกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อน และยิ่งไปกว่านั้นยังเป็นตัวกำหนดอัตราการใช้กำลังของรถอีกด้วย

สมการหลักในการขับเคลื่อนและแรงจล

สำหรับการเขียนสมการหลักของการเคลื่อนที่นั้นต้องอาศัยการตัดวัตถุอิสระ ดังในรูป 2.1 โดยจะพิจารณาส่วนล้อและตัวรถว่าเป็นวัตถุอิสระ ในการพิจารณาแรงที่กระทำบนวัตถุนั้น แรงในแนวตั้งฉากกับพื้นของตัวรถบางตัวจะถูกละไว้ เพราะไม่มีความสำคัญต่อการพิจารณาขนาดของแรงต้านทานการเคลื่อนที่

เมื่อพิจารณาวัตถุอิสระในรูป 2.1 จะกำหนดให้ตัวแปรของตัวรถบรรทุกมีเลขห้อยเป็น 1 และสำหรับตัวแปรของตัวรถพ่วงจะมีเลขห้อยเป็น 2 ซึ่งเมื่อไม่พิจารณาการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของตัวรถทั้งสองแล้ว จะได้สมการการเคลื่อนที่ของรูป 2.1 ดังสมการที่ (2.1)

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

เมื่อ 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 เป็นหมายเลขของเพล (N)

F_L แรงต้านทานจากอากาศ (N)

a ความเร่งเชิงเส้นของรถ (m/s^2)

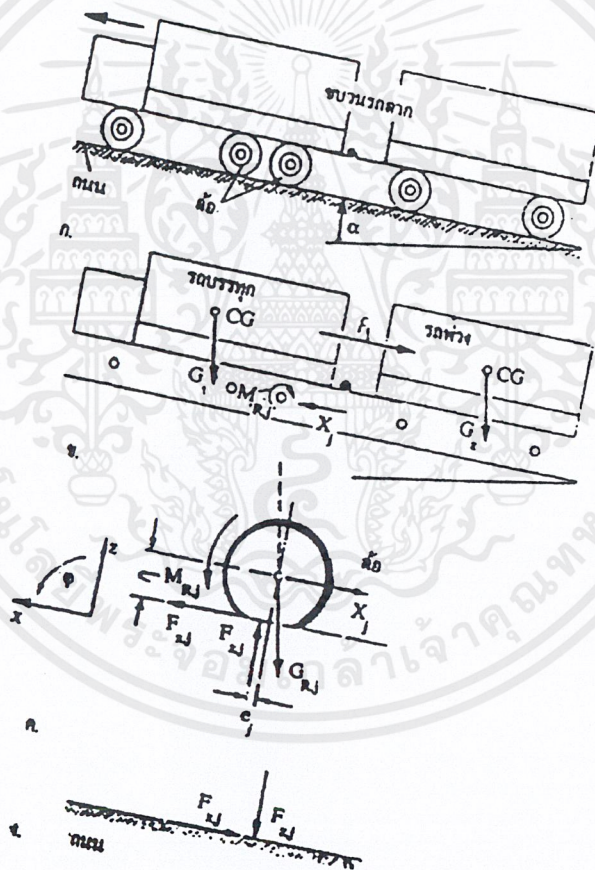
จากรูป 2.1 ค. เมื่อพิจารณาที่เพล j จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.2)

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

สมการเคลื่อนที่เชิงมุมของล้อจะให้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.3)

$$J_{Rj} \cdot \ddot{\phi}_{Rj} = M_{Rj} - F_{xj} \cdot r_j - F_{zj} \cdot e_j \quad (2.3)$$

เมื่อ	$G_{R,j}$	เป็นน้ำหนักของล้อทั้งหมดที่เพลาจ (N)
	$m_{R,j}$	มวลรวมของล้อทุกล้อที่เพลาจ (kg)
	$J_{R,j}$	ผลรวมของ โมเมนต์ความเฉื่อยทั้งหมดของล้อที่เพลาจ (kgm^2)
	$F_{x,j}$	เป็นแรงรวมของแรงในแนวสัมผัสของแต่ละล้อ (N)
	$F_{z,j}$	เป็นแรงรวมในแนวตั้งของล้อทุกล้อ (N)
	$M_{R,j}$	เป็น โมเมนต์ขับของเพลาจ (N-m)
	$\ddot{\varphi}_R$	ความเร่งเชิงมุมของล้อ (rad/s^2)
	a	ความเร่งเชิงเส้นของรถ (m/s^2)
	c	ระยะเอียงของภาระในแนวตั้งฉากกับพื้นของล้อ (m)
	r	รัศมีสถิตของล้อ (m)



รูปที่ 2.1 แรงที่กระทำต่อรถ

ก. ขบวนรถพ่วง

ข. แรงและ โมเมนต์ที่กระทำบนตัวรถ

ค. แรงและ โมเมนต์ที่กระทำกับล้อ

ง. แรงที่กระทำกับผิวถนน

สำหรับการเคลื่อนที่เชิงเส้นจะได้ $a_{xj} = a$ และเมื่อกำจัดเทอม X_j และ F_{xj} ออกจาก

สมการ (2.1) ถึง (2.3) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(m_1 + m_2 + \sum_{j=1}^n m_{Rj})a + \sum_{j=1}^n \frac{J_{Rj}}{r_j} \ddot{\varphi}_{Rj} = \sum_{j=1}^n \frac{M_{Rj}}{r_j} - (G_1 + G_2 + \sum_{j=1}^n G_{Rj}) \sin \alpha - F_L - \sum_{j=1}^n F_{zj} \frac{e_j}{r_j} \quad (2.4)$$

เมื่อให้มวลทั้งหมดเป็น m จะได้

$$m_1 + m_2 + \sum_{j=1}^n m_{Rj} = m$$

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

เมื่อแทนค่าความเร่งเชิงมุม $\ddot{\varphi}_R$ ด้วยความเร่งเชิงเส้น a ในสมการที่ (2.4) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.5)

$$\sum_{j=1}^n \frac{M_{Rj}}{r_j R_j} = (m + \sum_{j=1}^n \frac{J_{Rj}}{r_j R_j}) a + G \sin \alpha + F_L + \sum_{j=1}^n \frac{F_{zj} e_j}{r_j R_j} \quad (2.5)$$

จะเห็นว่าเทอมขวาของสมการ (2.5) ประกอบด้วยพจน์ 4 พจน์ด้วยกันคือ

แรงต้านจากการกลิ้งของล้อ (N) $F_R = \sum F_{zj} \frac{e_j}{r_j}$

แรงต้านจากอากาศ (N) $F_L \cong 50$

แรงต้านเนื่องจากความชัน (N) $F_{St} = G \cdot \sin \alpha$

แรงต้านจากความเร่ง (N) $F_B = \left(m + \sum_{j=1}^n \frac{J_{Rj}}{r_j R_j} \right) a$

เทอมซ้ายมือของสมการ (2.5) คือผลรวมของโมเมนต์ขับเคลื่อนทั้งหมด หาคด้วยรัศมีสถิตของล้อ r_j ซึ่งผลหารก็คือแรงจุดทั้งหมดนั่นเอง โดยแรงจุดจะต้องเอาชนะแรงต้านทานการเคลื่อนที่ทั้งหมด ดังแสดงไว้ในสมการ (2.6)

$$\sum F = F_B + F_R + F_L + F_{St} \quad (2.6)$$

2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) ในปัจจุบันนี้มีหลายชนิดเช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 1 เฟส มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ชนิดกรงกระรอก มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ชนิดดาวโรเตอร์ และในแต่ละแบบก็มีข้อดีและข้อเสียต่างกัน เช่น ประสิทธิภาพที่ต่างกัน แรงบิดต่างกัน น้ำหนักที่ต่างกัน

แต่ทั้งนี้แล้วหลักการการทำงานของมอเตอร์แต่ละแบบนี้มีลักษณะการทำงานและวงจรรภายในที่คล้ายกัน แต่ต่างกันไปในขั้นตอนการนำไปใช้งานเท่านั้น

หลักการการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

เมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้า 3 เฟสเข้าไปในขดลวดอาร์เมเจอร์ที่ฝังสเตเตอร์ของมอเตอร์ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน เมื่อฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กหมุนเคลื่อนตัวไปตัดตัวนำที่ฝังอยู่ในตัวโรเตอร์ การตัดวงจรกันของแท่งตัวนำในโรเตอร์ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าขึ้นมาเสมือนเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าและมีกระแสไหล และจากกระบวนการนี้ทำให้เกิดแรง ส่งผลให้ตัวโรเตอร์หมุน และทิศทางการหมุนเป็นไปตามสนามแม่เหล็กหมุน

สนามแม่เหล็กหมุนนั้นจะหมุนด้วยความเร็ว ซิงโครนัส (N_s) ซึ่งหาได้จาก

$$N_s = 120 f / P \quad (2.7)$$

เมื่อ

N_s ความเร็วซิงโครนัส (rpm)

f ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ (Hz)

P จำนวนขั้วของมอเตอร์ (pole)

ค่าความเร็วของโรเตอร์ (N_r) จะแปรผันตามค่าสลิป ของมอเตอร์ (s) โดยจะเท่ากับ

$$N_r = (1 - s)N_s \quad (2.8)$$

เมื่อ

N_r ความเร็วโรเตอร์ (rpm)

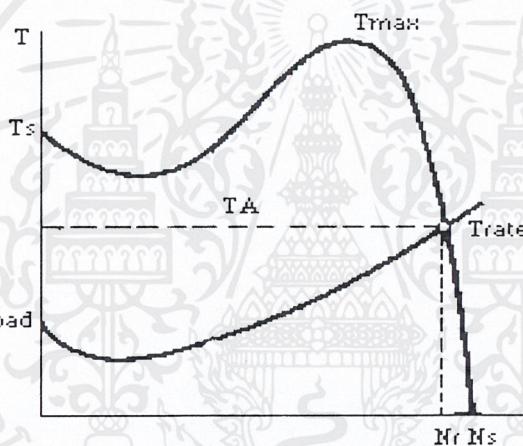
s สลิป

โดยค่าสลิปจะแปรผันตามค่าภาระเพราะฉะนั้นเมื่อ ภาระเพิ่มก็จะทำให้มอเตอร์มีความเร็วรอบตกลงจากความเร็วพิกัดได้

คุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสนั้นมีดังนี้

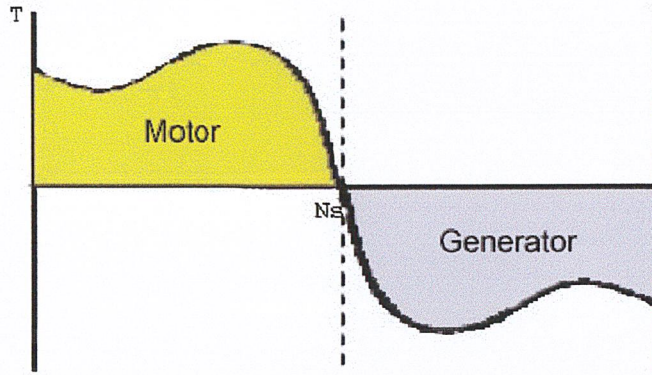
1. แรงบิดที่เกิดขึ้น (Developed Torque) เป็นศูนย์ที่ความเร็วซิงโครนัส
2. มีแรงบิดสูงสุด (Maximum Torque : T_{max}) เป็น 2-3 เท่าของแรงบิดพิกัดที่จ่ายภาระเต็มที่
3. มีแรงบิดเริ่มต้นหมุน (Starting Torque) มากกว่าที่แรงบิดที่พิกัดเล็กน้อยประมาณ 1.5 เท่า ดังนั้นมอเตอร์จึงเริ่มหมุนได้ทันที โดยแรงบิดที่ใช้ขับภาระนั้นต้องไม่มากกว่าแรงบิดที่พิกัด
4. การสลับสายคู่ใดคู่หนึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กหมุนกลับทิศทาง ทำให้มอเตอร์หมุนกลับทิศทาง แต่ก่อนจะหมุนกลับทิศทางนั้นมอเตอร์จะหยุดอยู่กับที่อย่างรวดเร็ว ซึ่งเราเรียกว่า plugging ซึ่งนำไปสู่การควบคุมมอเตอร์แบบหนึ่ง

กราฟแรงบิดของอินดัคชั่นมอเตอร์



รูปที่ 2.2 ลักษณะแรงบิดของมอเตอร์ในสภาวะความเร็วต่างๆ โดยเป็นการขับมอเตอร์โดยใช้แหล่งจ่าย 3 เฟสจ่ายโดยตรงให้มอเตอร์

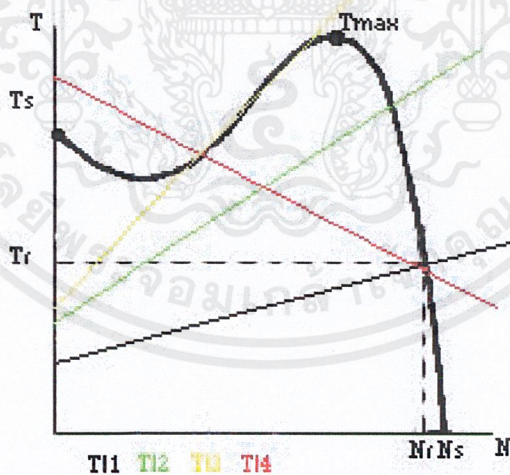
โดย	T_s	แรงบิดสตาร์ทของมอเตอร์ (N-m)
	T_{max}	แรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ (N-m)
	T_{rate}	ค่าแรงบิดพิกัดของมอเตอร์ (N-m)
	T_A	ค่าแรงบิดที่เหลือจากการขับภาระ เป็นแรงบิดที่ใช้เร่งความเร็ว (N-m)
	N_s	ความเร็วซิงโครนัส (rpm)
	N_r	ความเร็วโรเตอร์(ความเร็วตาม nameplate)ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามค่าสลิป (rpm)



รูปที่ 2.3 ย่านการทำงานของเครื่องจักรอินดัคชั่นในสภาวะการทำงานเป็น

Motor และ Generator

จากรูปที่ 2.3 แสดงถึงสภาวะการทำงานของเครื่องจักรอินดัคชั่น โดยจะทำงานเป็นมอเตอร์อินดัคชั่นได้เมื่อความเร็วโรเตอร์ (N_r) น้อยกว่าความเร็วซิงโครนัส (N_s) และจะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดเมื่อความเร็วโรเตอร์มากกว่าความเร็วซิงโครนัส การเลือกใช้มอเตอร์โดยการคำนึงถึงแรงบิดของภาระ



รูปที่ 2.4 ลักษณะแรงบิดของภาระในกรณีต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการตัดสินใจว่าจะเลือกอินคัทชั่นมอเตอร์นั้นนอกจากจะต้องคำนึงถึงขนาดของมอเตอร์แล้ว ยังจะต้องคำนึงถึงลักษณะและปริมาณแรงบิดของโหลดที่ต้องการใช้ขับเมื่อเทียบกับขนาดแรงบิดของมอเตอร์ด้วยโดย

1. ขนาดของแรงบิดเริ่มของภาระต้องไม่มากกว่าขนาดแรงบิดเริ่มต้นของมอเตอร์ ถ้าหากแรงบิดเริ่มต้นของภาระมากกว่า จะทำให้มอเตอร์ไม่สามารถหมุนเริ่มได้ด้วยตัวเอง
2. ปริมาณแรงบิดของภาระที่ต้องใช้สูงสุดต้องไม่เกินค่าแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ หากมากกว่าจะทำให้มอเตอร์หยุดหมุน คือเกิดสภาวะปริมาณภาระเกินนั่นเอง
3. ปริมาณแรงบิดที่ใช้ขับภาระหากมากกว่าแรงบิดพิกัด ก็จะทำให้ความเร็วมอเตอร์ลดลงจากความเร็วพิกัด
4. ค่าพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงบิดที่ใช้ขับภาระ กับ แรงบิดของมอเตอร์ จะเป็นแรงบิดที่เหลือที่ใช้เร่งความเร็วโดยหากมีเหลือมากก็จะทำให้มีความเร่งสูง

จากรูปที่ 2.4 จะแสดงตัวอย่างของการเลือกมอเตอร์ โดยใช้ลักษณะของแรงบิดของภาระต่างชนิดกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่า ภาระชนิด T11 และ T12 สามารถเลือกใช้กับมอเตอร์นี้ได้ แต่ T11 จะมีความเร่งมากกว่า T12 ส่วน T13 และ T14 จะไม่สามารถใช้ได้เพราะจะเกิดสภาวะภาระเกิน โดย T13 จะหมุนในช่วงแรกและจะหยุดหมุนเนื่องจากเกิดสภาวะภาระเกิน ส่วนภาระ T14 จะไม่หมุน

2.3 การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ

วิธีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำนี้ เมื่อพิจารณาสมการความเร็วรอบมอเตอร์ในสมการที่ 2.7 และ 2.8 จะได้ว่า

$$N_r = (1 - s)120 f / P \quad (2.9)$$

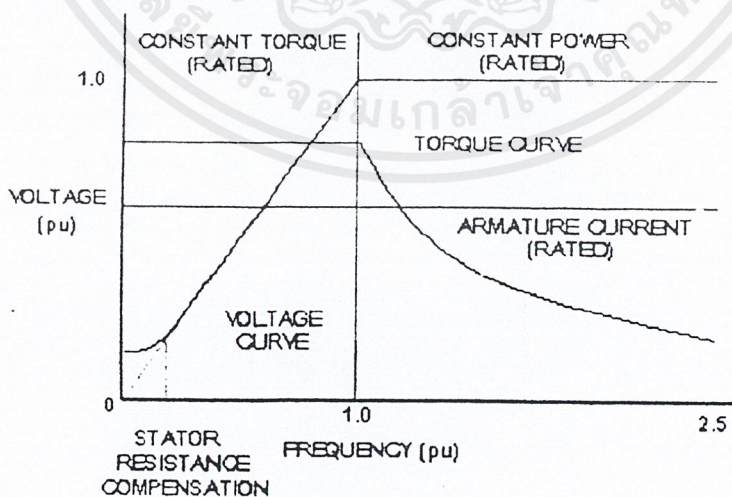
ดังนั้นจากสมการที่ 2.9 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์สามารถทำได้โดย

1. การเปลี่ยนสลลิปของโรเตอร์ (Slip; S) นิยมใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดพันโรเตอร์พันขดลวด (Wound Type Rotor) ปรับสลลิปโดยการปรับค่าความต้านทานของโรเตอร์ แต่การปรับเปลี่ยนค่าสลลิปจะทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ต่ำลง

2. การเปลี่ยนจำนวนขั้วของมอเตอร์ (Pole; P) วิธีนี้มีข้อจำกัดคือช่วงการเปลี่ยนความเร็วรอบแคบและไม่ต่อเนื่อง และใช้ได้กับอินดักชันมอเตอร์ที่ออกแบบไว้พิเศษเท่านั้น

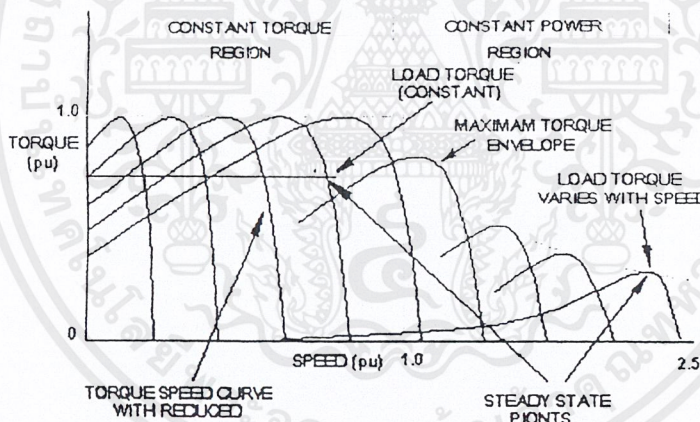
3. การเปลี่ยนความถี่ (Frequency; f) เป็นการควบคุมที่เหมาะสมที่สุด ควบคุมความถี่โดยการใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ซึ่งจะส่งผลให้การควบคุมมีความต่อเนื่อง ประสิทธิภาพของมอเตอร์สูง ในที่นี้จึงจะขอกล่าวเฉพาะการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยการเปลี่ยนแปลงความถี่เท่านั้นซึ่งเทคนิคที่นิยมใช้กันคือ การควบคุมด้วยการเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ การควบคุมด้วยการเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่

เทคนิคนี้เป็นที่รู้จักกันดีและเป็นเทคนิคที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งจะใช้อินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนเพื่อที่จะให้ได้แรงดันและความถี่ที่เอ้าท์พุทเป็นไปตามที่ ต้องการของหลักการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ แสดงในรูป 2.5



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน , แรงบิด , กระแสเดเตเตอร์กับความถี่

ชนิดของมอเตอร์ที่ใช้จะต้องมีคุณสมบัติสลิป ค่าซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและความเร็วมอเตอร์จะเปลี่ยนตามการเปลี่ยนความเร็วเชิงโคโรนัสของสนามแม่เหล็กในช่องอากาศอยู่ระหว่างส่วนสเตเตอร์และโรเตอร์ การที่จะเปลี่ยนความเร็วเชิงโคโรนัสได้นี้สามารถทำได้โดยการแปรเปลี่ยนความถี่ของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งลักษณะการควบคุมความถี่นั้นจะคล้ายกับการควบคุมคิซีมอเตอร์ กล่าวคือ เมื่อต้องการเพิ่มความเร็วของอินคักซ์มอเตอร์ทำได้โดยการเพิ่มความถี่ของแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ แต่การเพิ่มความถี่อย่างเดียวจะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศ Φ_m ของมอเตอร์ลดลง เนื่องจากการลดลงของ magnetizing current อันเป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่มของ magnetizing reactance ซึ่งเมื่อ Φ_m ลดลงจะทำให้แรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ลดลง เพื่อที่จะรักษาเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศและแรงบิดสูงสุดให้คงที่ จำเป็นต้องเพิ่มแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ตามความถี่ คือรักษาอัตราส่วนของแรงดันเอาท์พุท (V) ต่อความถี่ (f) หรือ V/f ให้คงที่ จะทำให้แรงบิดคงที่เช่นเดียวกับการควบคุมคิซีมอเตอร์ ที่ควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์ และรักษาสนามแม่เหล็กให้คงที่ ทำให้อินคักซ์มอเตอร์มีลักษณะเป็นการขับเคลื่อนที่ให้แรงบิดคงที่ การควบคุมให้อินคักซ์มอเตอร์มีแรงบิดสูงสุดคงที่จะทำได้ในย่านความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วกำหนด (base speed) หรือความถี่ต่ำกว่า base speed (1 p.u.) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 Speed-torque Curve ของมอเตอร์เมื่อใช้วิธีควบคุมแรงดันและความถี่

ในย่านความถี่ต่ำ ๆ การรักษาให้ V/f คงที่จะไม่เป็นการเพียงพอ ที่จะทำให้แรงบิดสูงสุดมีค่าคงที่ ทั้งนี้เพราะที่ความถี่ต่ำ ๆ magnetizing current ไม่ได้ขึ้นอยู่กับ magnetizing reactance เพียงอย่างเดียว เนื่องจากความต้านทานของสเตเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกับ magnetizing reactance ดังนั้น จะต้องเพิ่มแรงดันที่ต้องจ่ายให้กับสเตเตอร์ของอินคักซ์มอเตอร์ เพื่อชดเชยแรงดันตกคร่อมความต้านทานของสเตเตอร์ ทำให้การเปลี่ยนแปลงแรงดันกับความถี่เป็นไปตามเส้นทึบของกราฟรูปที่ 2.6 แทนการเปลี่ยนแปลงตามเส้นประซึ่งเป็นกราฟ V/f มีค่าคงที่

ส่วนในย่านความเร็วสูงกว่า base speed ไม่สามารถรักษาแรงบิดให้คงที่ได้ เนื่องจากจะทำให้มอเตอร์เกิดสภาวะภาระเกิน ซึ่งจะทำให้มอเตอร์เสียหายได้ ดังนั้นจึงรักษาแรงดันให้คงที่ กำหนดซึ่งจะทำให้แรงบิดสูงสุดลดลง เนื่องจากการลดลงของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศของ อินดักชั่นมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.6 การควบคุมความเร็วในย่านนี้กำลังด้านเอาต์พุตสูงสุดของ อินดักชั่นมอเตอร์จะมีค่าคงที่เช่นเดียวกับดีซีมอเตอร์ ด้วยการลดความเข้มของสนามแม่เหล็ก เรียกว่าเป็นการทำงานช่วง constant power region หรือ field-weakening region ดังในรูปที่ 2.6 ซึ่งเป็นกราฟแรงบิด-ความเร็ว ของอินดักชั่นมอเตอร์

หลักการของอินเวอร์เตอร์

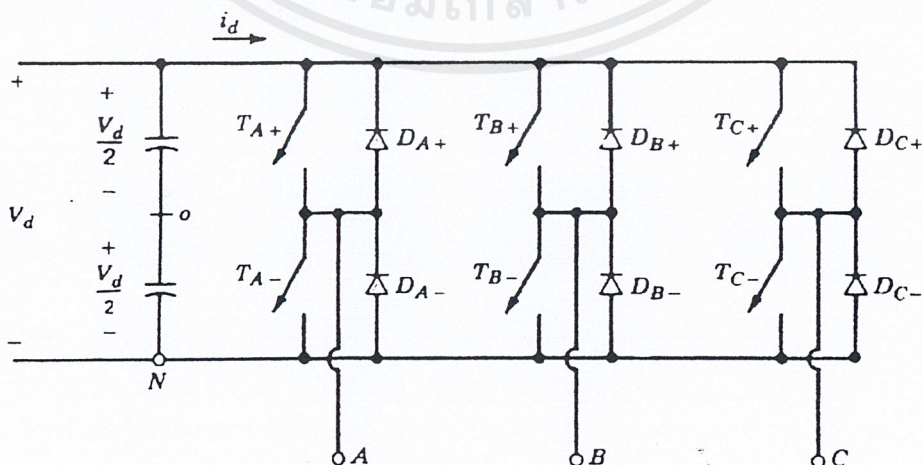
ประเภทของหลักการอินเวอร์เตอร์ แบ่งได้ 2 ประเภท คือ

1. อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว
2. อินเวอร์เตอร์สามเฟส

นอกจากนี้การอินเวอร์เตอร์ยังแบ่งออกตามลักษณะ โครงสร้างและการนำมาใช้งานได้ 2 ประเภท คือ

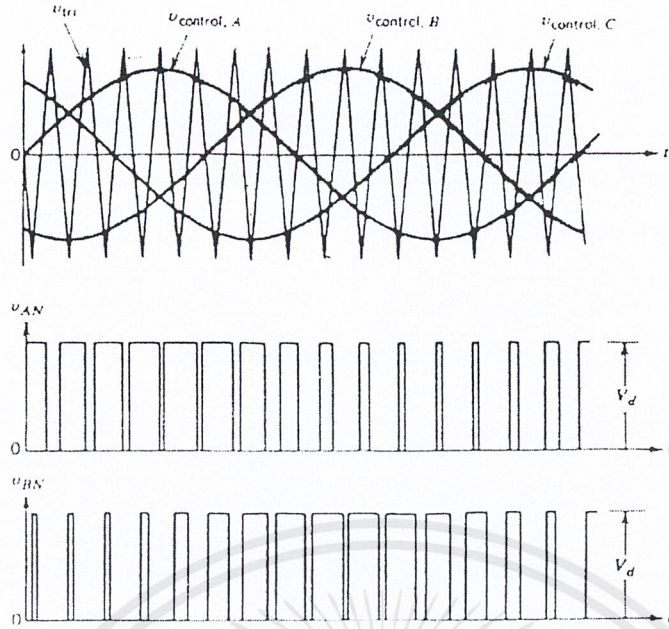
1. อินเวอร์เตอร์แบบป้อนกระแส (Current Source Inverter ; CSI)
2. อินเวอร์เตอร์แบบป้อนแรงดัน (Voltage Source Inverter ; VSI) ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มคือ
 - 2.1 อินเวอร์เตอร์แบบการมอดูเลตความกว้างของพัลส์ (Pulse Width Modulation <PWM> Inverter)
 - 2.2 อินเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนซ์
 - 2.3 อินเวอร์เตอร์แบบ McMurray
 - 2.4 อินเวอร์เตอร์แบบ McMurray-Bedford

สำหรับในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะหลักการอินเวอร์เตอร์ที่นิยมกันอย่างแพร่หลายคือแบบการมอดูเลตความกว้างของพัลส์ (PWM Inverter)



รูปที่ 2.7 วงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



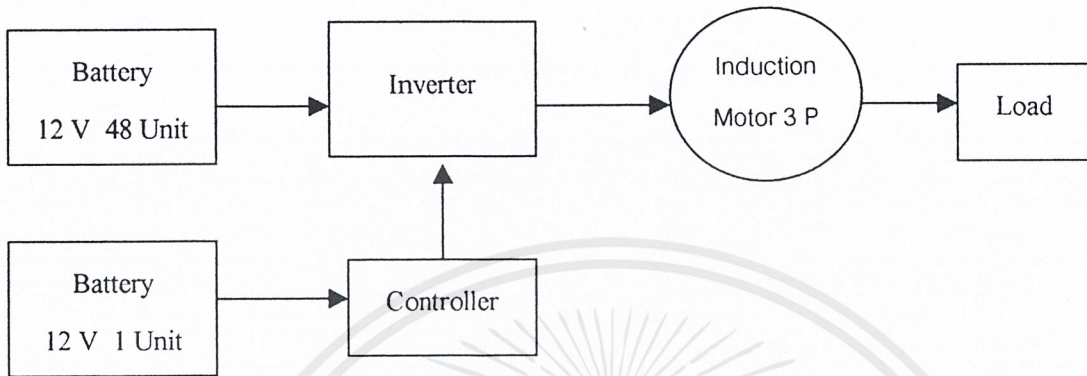
รูปที่ 2.8 ลูกคลื่นการทำงานของอินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของตัวขับเคลื่อนที่ใช้ PWM-VSI โดย PWM-VSI สามารถปรับขนาดของแรงดันและกำลังด้านออกได้ ปกติแล้ววิธีการหนึ่งที่ใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมอุปกรณ์ที่ใช้เป็นสวิตช์ของอุปกรณ์ คือ การนำแรงดันสามเฟสซึ่งมีลักษณะเป็นไซน์ (เป็นแรงดันควบคุม Control Voltage ซึ่งมีความถี่เท่ากับความถี่ด้านเอาต์พุตและมีสัดส่วนพอดีกับขนาดของแรงดันด้านเอาต์พุต) ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่การสวิตช์ที่เลือกไว้ (ขึ้นอยู่กับ Specification ของอุปกรณ์) ดังแสดงในรูป 2.8

บทที่ 3

การออกแบบ

3.1 การคำนวณ เลือกฟักัดมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.1 Block Diagram การทำงานของรถไฟฟ้า

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบและน้ำหนักของรถไฟฟ้า

รายละเอียด	น้ำหนัก(kg)
โครงรถ	200
แบตเตอรี่	850
มอเตอร์	200
อุปกรณ์ควบคุม	20
อุปกรณ์เสริม	30
น้ำหนักผู้โดยสาร	700
รวม	2,000

จากสมการ (2.5)

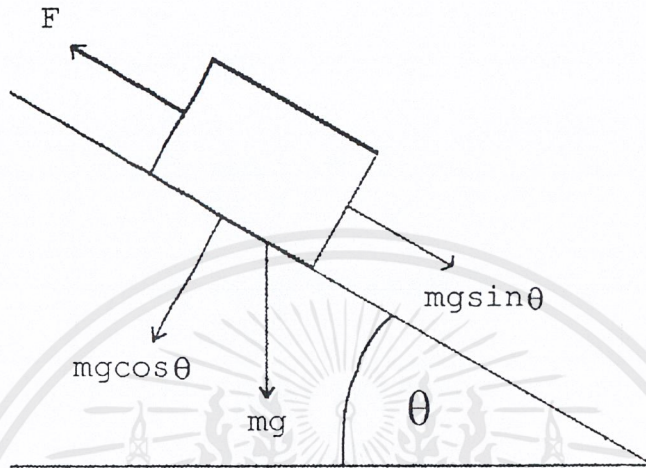
$$\sum F = F_B + F_R + F_L + F_{ST}$$

โดย $\sum F$ เป็นแรงที่ใช้ขับเคลื่อน (N)
 F_B เป็นแรงที่ใช้ในการเร่ง (N)
 F_R เป็นแรงต้านทานจากการกลิ้งของล้อ (N)
 F_L เป็นแรงต้านทานจากอากาศ (N)
 F_{ST} เป็นแรงต้านจากการไต่ความชัน (N)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้

g	$= 9.8 \text{ m/s}^2$	a	$= 0.6 \text{ m/s}^2$	$F_B \approx \frac{3}{2} ma$
μ	$= 0.01$	รัศมีล้อรถ	$= 0.35 \text{ m}$	
F_R	$= \mu mg \cos \theta$	F_L	$\approx 50 \text{ N}$	$F_{ST} = mg \sin \theta$
v	$= 30 \text{ km/hr}$			



รูปที่ 3.2 เวกเตอร์ของแรงบนทางชัน

ขณะออกตัวที่ทางเรียบ ($\theta = 0$) สามารถคำนวณหาแรงที่ใช้ขับเคลื่อนได้ดังนี้

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

จากแรงที่ใช้ขับเคลื่อนสามารถคำนวณหาแรงบิดในการออกตัวได้ดังนี้

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

ขณะวิ่งขึ้นทางชัน 7 องศา ($\theta = 7$) ด้วยความเร็วคงที่ ($a = 0$) สามารถคำนวณหาแรงที่ใช้ขับเคลื่อนได้ดังนี้

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

และจะสามารถคำนวณหาแรงบิดในการวิ่งขึ้นทางชันได้ดังนี้

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

คำนวณหาแรงบิดที่ต้องใช้จากมอเตอร์

เมื่อพิจารณาที่อัตราทดเฟืองท้าย 1:4.5

∴ จะต้องใช้แรงบิดจากมอเตอร์เมื่อออกตัวบนทางเรียบ

$$T = 716.1/4.5 \text{ N-m}$$

$$= 159.13 \text{ N-m}$$

∴ จะต้องใช้แรงบิดจากมอเตอร์เมื่อขึ้นทางชัน (7 องศา)

$$T = 921.6/4.5 \text{ N-m}$$

$$= 204.8 \text{ N-m}$$

คำนวณหาค่าลึงที่ต้องใช้จากมอเตอร์

เมื่อพิจารณาที่ความเร็ว 30 km/hr จะสามารถคำนวณความเร็วรอบของล้อ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\omega &= (30 \cdot 1000) / (3600 \cdot r) \quad \text{rad/s} \\ &= 23.8 \quad \text{rad/s}\end{aligned}$$

จากความเร็ว 30 km/hr สามารถคำนวณหาความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}N &= 4.5 \cdot (30 \cdot 1000) / (60 \cdot 2\pi r) \quad \text{rpm} \\ &= 1022.72 \quad \text{rpm}\end{aligned}$$

สามารถคำนวณหาค่าลึงของมอเตอร์ได้จากสมการ

$$P = T\omega$$

∴ จะต้องใช้กำลังจากมอเตอร์เมื่อออกตัวบนทางเรียบ

$$\begin{aligned}P &= 716.1 \cdot 23.8 \quad \text{watt} \\ &= 17,043.18 \quad \text{watt} \\ &= 22.846 \quad \text{hp}\end{aligned}$$

∴ จะต้องใช้กำลังจากมอเตอร์เมื่อขึ้นทางชัน (7 องศา)

$$\begin{aligned}P &= 921.6 \cdot 23.8 \quad \text{watt} \\ &= 21,934.08 \quad \text{watt} \\ &= 29.04 \quad \text{hp}\end{aligned}$$

จากผลการคำนวณจึงสามารถเลือกขนาดของมอเตอร์ได้ดังนี้

- มีกำลังไม่น้อยกว่า 29.04 hp
- มีแรงบิดไม่น้อยกว่า 204.8 N-m
- ความเร็วรอบของมอเตอร์ 1022.72 rpm

การเลือกมอเตอร์

ประเภทของมอเตอร์ในท้องตลาดในปัจจุบันนั้นมีมากมายหลายชนิด แต่สาเหตุที่เลือกใช้อินดักชันมอเตอร์เพราะ

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

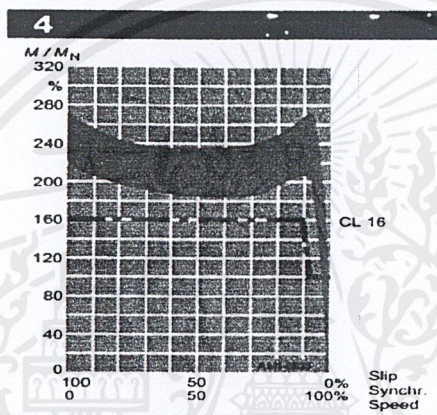
การเลือกอินดักชันมอเตอร์นั้น จะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติ 3 ประการคือ ขนาดกำลังของมอเตอร์ ขนาดแรงบิด และจำนวนขั้วของมอเตอร์ ซึ่งจากการคำนวณข้างต้นนั้นสามารถหาขนาดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลัง และขนาดแรงบิดที่ต้องการในการขับโหลด ซึ่งจากข้อมูลทั้ง 2 สามารถนำมาหาจำนวนชั่วโมงของมอเตอร์ได้

จากหนังสือคู่มือมอเตอร์ของบริษัท SIEMENS สามารถทำการเลือกจำนวนชั่วโมงของอินดักชั่นมอเตอร์ได้

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

∴ จึงเลือกใช้มอเตอร์ขนาด 22 kW 30 Hp 6 Pole 50 Hz 215 N-m 975 rpm ซึ่งมีลักษณะของกราฟแรงบิดเป็นตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะแรงบิดของมอเตอร์ในช่วงความเร็วต่างๆ

การคำนวณค่าความถี่สูงสุดที่มอเตอร์สามารถทำงานได้

ในการหาความเร็วสูงสุดของรถนั้นเราสามารถหาได้โดยการนำกราฟแรงบิดของภาระที่แปรผันตามความเร็ว มาวาดเปรียบเทียบกับกราฟแรงบิดของมอเตอร์ที่จ่ายพลังงานโดยอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจุดตัดของกราฟทั้ง 2 นั้นคือจุดที่แรงบิดของภาระเท่ากับแรงบิดของมอเตอร์และค่าที่จุดนั้นเป็นความถี่สูงสุดที่สามารถใช้ได้

เราสามารถทำการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของภาระกับความเร็วของรถได้ตามสมการที่ 3.1

$$T = F \times R \tag{3.1}$$

$$F = (0.0314 v^2) + (0.01 \times m \times g) \tag{3.2}$$

โดย F แรงต้านขณะความเร็วคงที่บนทางราบ (N)

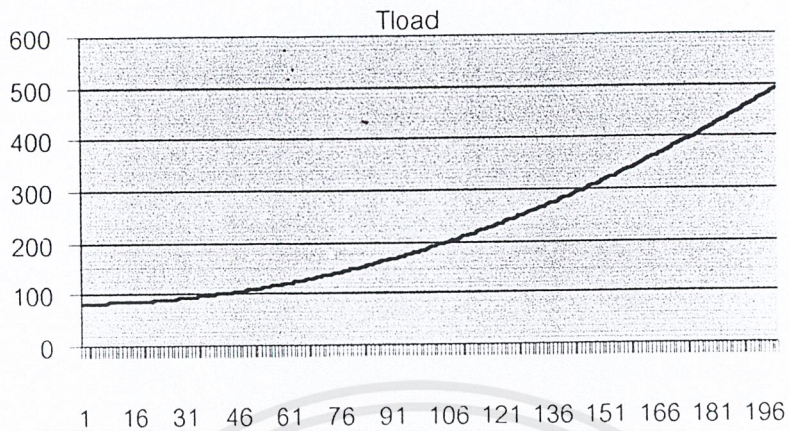
R รัศมีล้อ (0.35 เมตร)

v ความเร็วรถ (km)

m มวลของรถ (kg)

กำหนดให้ $g = 9.81$

ซึ่งจากสมการที่ 3.1 สามารถวาดกราฟได้ดังรูปที่ 3.4

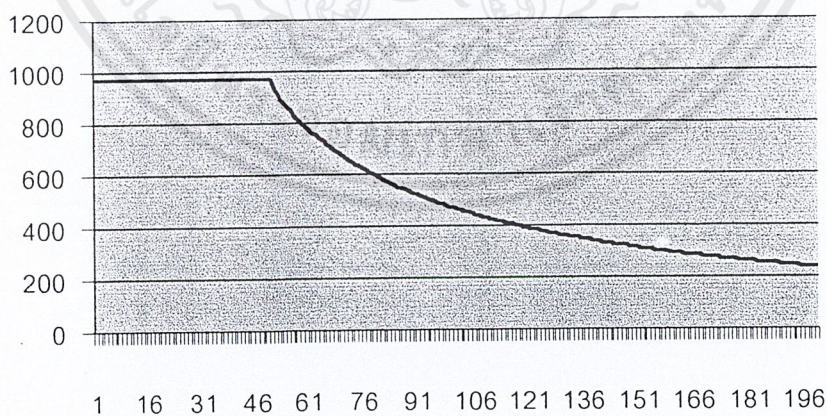


รูปที่ 3.4 กราฟแรงบิดของภาระโดยแกนนอนแทนความถี่ (Hz) แกนตั้งแทนแรงบิด (T-m) และสามารถทำการวาดกราฟแรงบิดของมอเตอร์ได้โดยใช้สมการที่ 3.3

$$P = T\omega \quad (3.3)$$

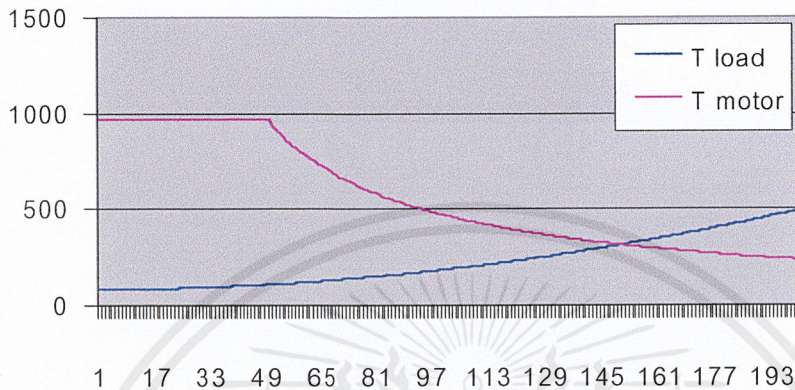
โดย P = กำลังของมอเตอร์ (W) T = แรงบิดของมอเตอร์ (N-m)
 ω = ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

ในการวาดนั้น จะกำหนดให้ในช่วงความถี่ 0-50 Hz นั้นแรงบิดของมอเตอร์จะคงที่ที่ขนาดพิสัย (Torque Constant Region) หลังจากนั้นจะกำหนดให้กำหนดให้กำลังคงที่ และแรงบิดของมอเตอร์จะแปรผันตามสมการที่ 3.2 ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 กราฟแรงบิดของมอเตอร์เมื่อผ่านเฟืองท้ายแล้ว โดยแกนนอนแสดงความถี่ (Hz) แกนตั้งแสดงแรงบิด (N-m)

ซึ่งจากกราฟรูปที่ 3.4 และ 3.5 เราจะทำการวาดกราฟทั้ง 2 เปรียบเทียบกันซึ่งจะแสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 กราฟความสัมพันธ์แรงบิดที่ความถี่ต่างๆของมอเตอร์และภาระ โดยแกน
นอนแสดง ความถี่ (Hz) แกนตั้งแสดงแรงบิด(N-m)

จากกราฟรูปที่ 3.6 จุดตัดกันของกราฟอยู่ที่ 150 Hz แสดงว่ามอเตอร์สามารถใช้งานได้
ความถี่สูงสุดที่ 150 Hz

คำนวณหาขนาดของอินเวอร์เตอร์

การเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ควรมีขนาดกำลังมากกว่าขนาดกำลังของมอเตอร์ประมาณ 25%
เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น

∴ จึงควรเลือกอินเวอร์เตอร์ที่มีขนาดกำลังมากกว่า 27.5 kW

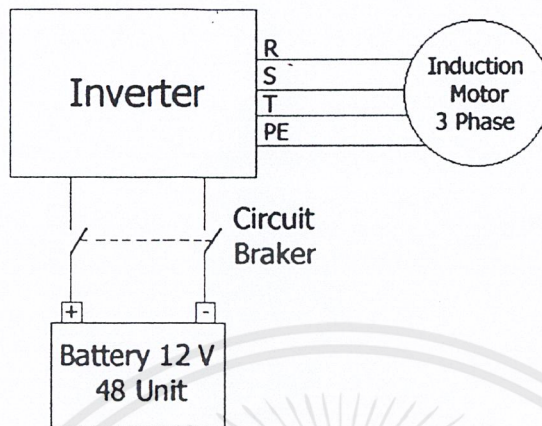
การเลือกการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ

สำหรับโครงการการศึกษาการขับเคลื่อนรถไฟฟ้านี้ เลือกใช้พัลส์วิดมีอดคูเลชัน อินเวอร์
เตอร์ (Pulse Width Modulation<PWM>)ควบคุมความเร็วรอบแบบการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่อ
ความถี่ (V/f) ยี่ห้อ ABB รุ่น ACS 400 ขนาด 30 kW ความถี่สวิทซ์เท่ากับ 8 kHz

เหตุผลที่เลือกอินเวอร์เตอร์ เพราะเหมาะสมทางด้านราคาและการใช้งาน คือ ไม่ต้องการ
การควบคุมที่แม่นยำมากนัก ให้แรงบิดสูงที่ความเร็วต่ำ มีฟังก์ชันการป้องกันพอเพียง

3.2 วงจรการต่อและการใช้งาน

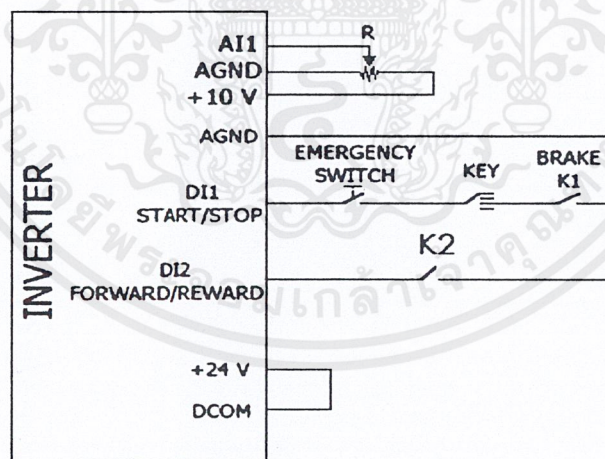
1. การต่อวงจรหลักของอินเวอร์เตอร์ (Main Circuit)



รูปที่ 3.7 การต่อวงจรหลักของอินเวอร์เตอร์

- R, S, T Inverter OutPut Terminal
 +, - DC Power Input Terminal
 PE Grounding Terminal

2. การต่อวงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์ (Control Circuit)

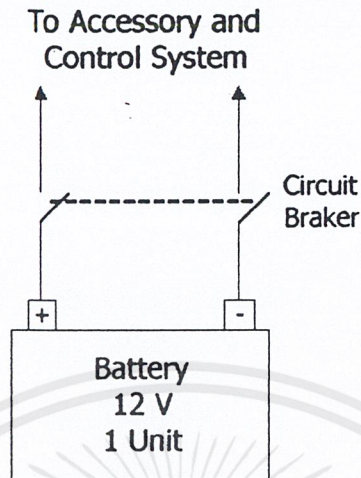


รูปที่ 3.8 การต่อวงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์

- AI1, AGND, +10V ชุดควบคุมความถี่ของอินเวอร์เตอร์
 D11 ชุดควบคุมการเริ่มและการหยุดทำงานของอินเวอร์เตอร์
 D12 ชุดควบคุมการเดินหน้าและถอยหลัง
 +24V, DCOM ชุดควบคุมให้ D11, D12 ทำงาน

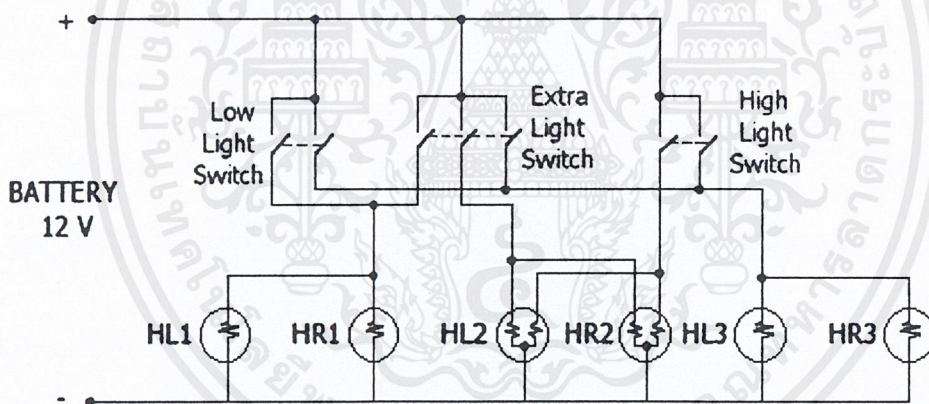
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แหล่งจ่ายไฟวงจรย่อยภายในรถ



รูปที่ 3.9 แหล่งจ่ายไฟวงจรย่อยภายในรถ

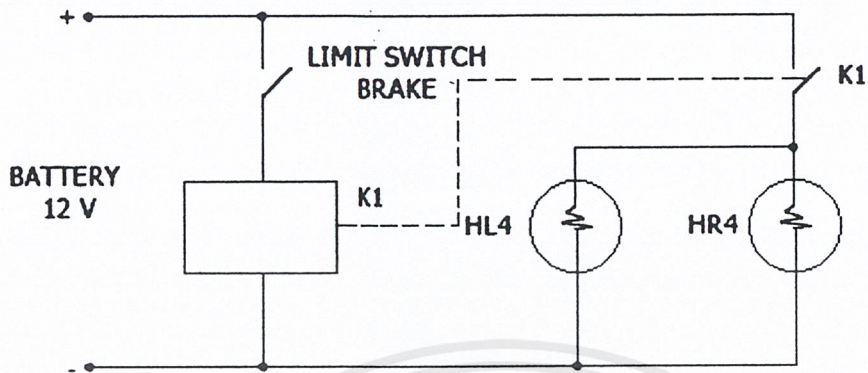
4. ระบบไฟส่องทาง



รูปที่ 3.10 ระบบไฟส่องทาง

HL1, Hr1	หลอดไฟส่องทาง 80 W ด้านหน้าซ้ายกับขวา
HL2, HR2	หลอดไฟส่องทาง 100/80 W ด้านหน้าซ้ายกับขวา
HL3, HR3	ไฟท้าย 5 W ด้านหลังซ้ายกับขวา

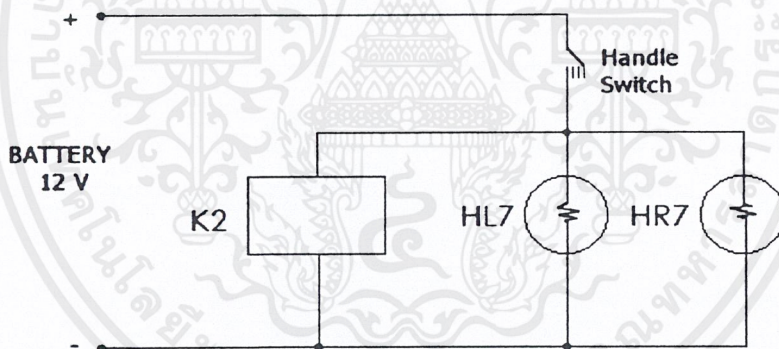
5. ระบบห้ามล้อ



รูปที่ 3.11 ระบบห้ามล้อ

- K1 รีเลย์ตัดวงจรของอินเวอร์เตอร์
HL4, HR4 ไฟเบรก 5 W ด้านหลังซ้ายกับขวา

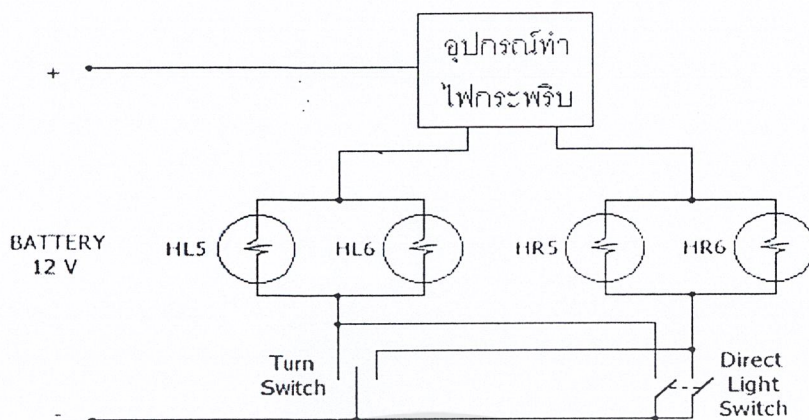
6. ระบบวงจรการหมุนกลับทาง



รูปที่ 3.12 ระบบวงจรการหมุนกลับทาง

- K2 รีเลย์ตัดต่อการหมุนกลับทาง
HL7, HR7 ไฟถอย 5 W ด้านหลังซ้ายกับขวา

7. ระบบไฟเลี้ยง



รูปที่ 3.13 ระบบไฟเลี้ยง

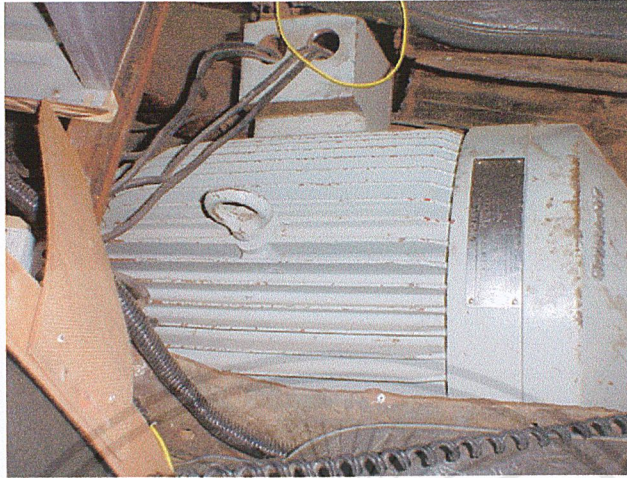
HL5, HR5 ไฟเลี้ยง 5 W ด้านหน้าซ้ายกับขวา
 HL6, HR6 ไฟเลี้ยง 5 W ด้านหลังซ้ายกับขวา

สรุปสมรรถนะรถที่ได้จากการคำนวณ

ระยะทางสูงสุด	88	กิโลเมตร
ความเร่ง	0.6	เมตร/วินาที ²
ความเร็วสูงสุด	88	กิโลเมตร/ชั่วโมง
เวลาที่ขับต่อแบตเตอรี่ 1 ชุด	1	ชั่วโมง
ความชันที่สามารถขึ้นได้	7	องศา

3.3 การแสดงชิ้นงาน

1. รูปมอเตอร์



รูปที่ 3.14 มอเตอร์ที่ใช้ในโรงงาน

2. รูปอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.15 อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. รูปแบบรถไฟฟ้า



รูปที่ 3.16 รถไฟฟ้า(ด้านข้าง)



รูปที่ 3.17 รถไฟฟ้า(ด้านหน้าซ้าย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การทดสอบความสามารถในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์โดยใช้ความต้านทานปรับค่าได้ปรับความเร็วและทดสอบระบบขับเคลื่อน

จุดประสงค์การทดลอง

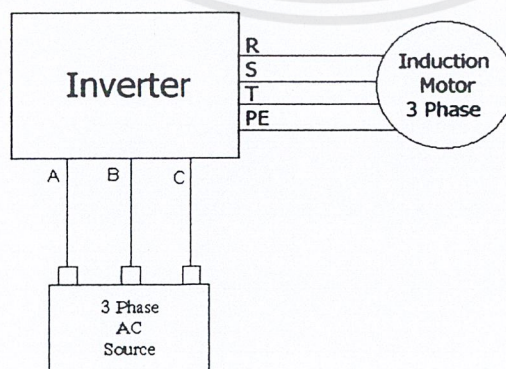
1. เพื่อทดสอบความสามารถในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์
2. เพื่อทดสอบสภาพของระบบขับเคลื่อน

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

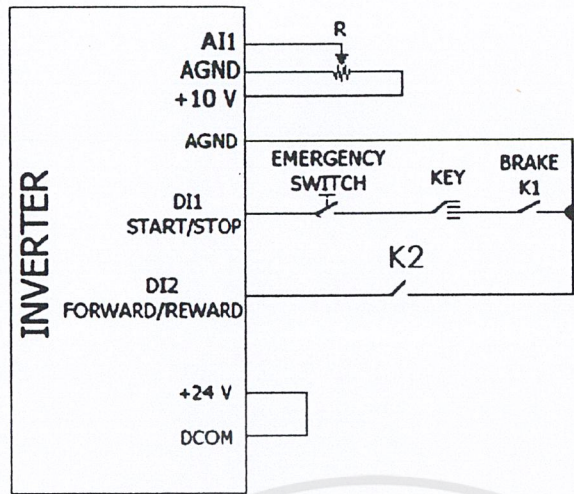
1. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 22 kW 415 V Delta 50 Hz 6 Poles
2. อินเวอร์เตอร์ ABB รุ่น ACS400
3. โครจรถ
4. แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ 3 phase 380 V
5. ความต้านทานปรับค่าได้ $5 \text{ k}\Omega \frac{1}{4} \text{ Watt}$
6. เครื่องมือวัดชนิด Fluke i410 จำนวน 1 ตัว
7. เครื่องมือวัดชนิด Fluke 41B จำนวน 1 ตัว

ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อมอเตอร์เข้ากับเพลาแล้วยกตัวรถลอยขึ้น
2. ต่อวงจรดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2
3. ปรับความต้านทานปรับค่าได้เพื่อเพิ่มความถี่จาก 10 Hz – 60 Hz ครั้งละ 10 Hz
4. บันทึกค่าแรงดัน กระแส และเปอร์เซ็นต์ THD



รูปที่ 4.1 วงจรกำลังของมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.2 วงจรควบคุมที่อินเวอร์เตอร์

ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์

f(Hz)	V(Volt)	I(A)	N(rpm)	THD(%)
10	90.8	17.5	198	14.5
20	171.5	17.8	398	5.4
30	252.8	16.3	598	5.0
40	334	15.8	799	4.6
50	386	13.5	996	2.8
60	386	11.2	1196	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบรูปแบบการขับเคลื่อนมอเตอร์ของอินเวอร์เตอร์ ABB รุ่น ACS400

จุดประสงค์การทดลอง

1. ทดสอบวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ของอินเวอร์เตอร์
2. ทดสอบลักษณะทั่วไปของการทำงานของอินเวอร์เตอร์
3. เปรียบเทียบรูปแบบการควบคุมมอเตอร์ของอินเวอร์เตอร์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- | | |
|---------------------------------|-----------------|
| 1. เครื่อง Chassis Dynamometer | จำนวน 1 เครื่อง |
| 2. เครื่องมือวัดชนิด Fluke i410 | จำนวน 1 ตัว |
| 3. เครื่องมือวัดชนิด Fluke 41B | จำนวน 1 ตัว |

ค่าคงที่ที่ตั้งที่เครื่อง Chassis Dynamometer

1. น้ำหนักรถ 2,300 kg
2. แรงต้านลม 50 N

ขั้นตอนการทดลอง

1. ตั้งรูปแบบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในการเริ่มเดินมอเตอร์เป็นแบบ Ramp
2. ตั้งค่าความถี่ที่ใช้งานที่ 10 Hz
3. ทำการเดินมอเตอร์จากความถี่เป็นศูนย์จนถึงค่าความถี่ที่ตั้งไว้
4. บันทึกค่าแรงดันที่มอเตอร์, กระแสสูงสุดที่จ่ายให้กับมอเตอร์, เปอร์เซนต์แรงบิดสูงสุดที่ได้, กำลังที่ใช้สูงสุด, ความเร็วรอบมอเตอร์, ความเร็วของรถ, กำลังที่ได้ที่ล้อ
5. ตั้งค่าความถี่ที่ 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 แล้วดำเนินการตั้งข้อ 3. และ 4. ตามลำดับ
6. ตั้งรูปแบบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในการเริ่มเดินมอเตอร์เป็นแบบ Torque Boost, Flying, Flying+Torque Boost แล้วดำเนินการตั้งข้อ 3., 4. และ 5. ตามลำดับ

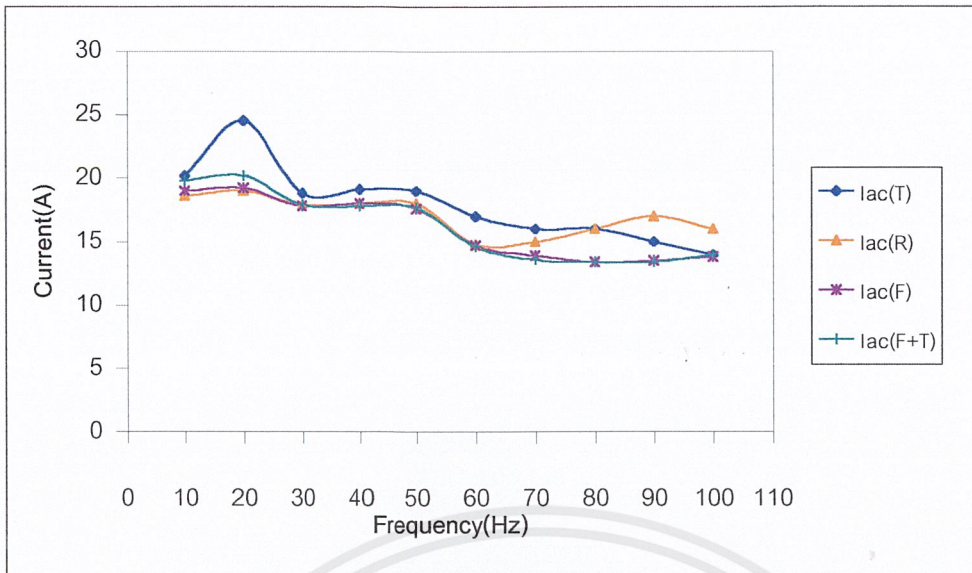
ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบรูปแบบการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า

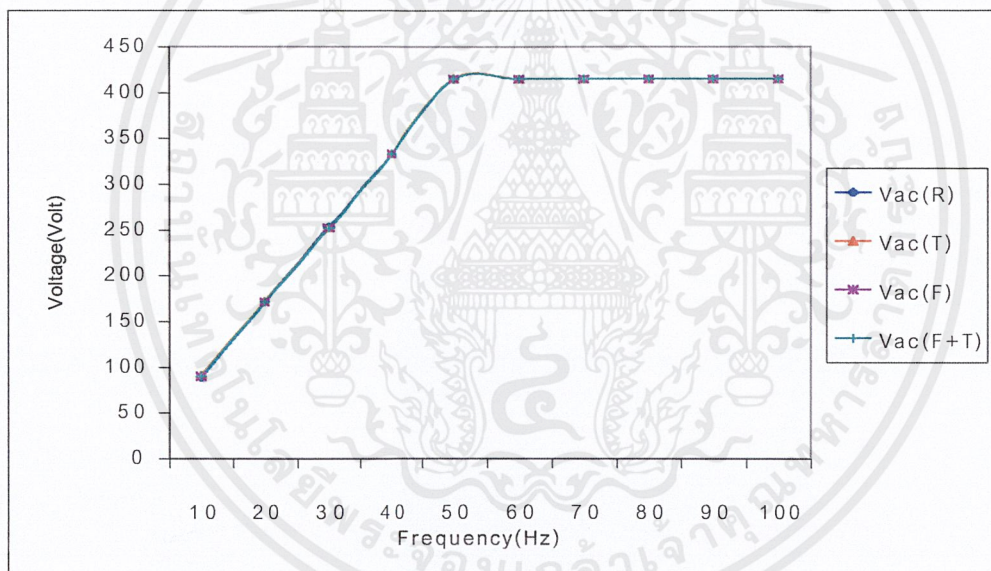
Mode	f (Hz)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Ramp	Torque(%)	26	26	30	30	36	36	37	40	40	41
	Iac(A)	18.6	19	17.9	18	18	14.8	15	16	17	16
	Vac(V)	90	171	252	333	415	415	415	415	415	415
	Pin(kW)	0.7	1.1	1.8	2.3	3	3.4	4	4.8	5.5	6.3
	N(rpm)	198.5	398.3	547.7	798	948.6	1197	1396	1595	1792	1990
	Speed(km/hr)	4	9	14	19	24	29	34	39	44	49
	Pout(kW)	0.6	1.5	3	4.4	5.9	7.5	8.9	10.4	11.2	13.4
Torque Boost	Torque(%)	21	26	30	33	29	40	39	42	42	42
	Iac(A)	20.2	24.5	18.8	19.1	19	17	16	16	15	14
	Vac(V)	90	171	252	333	415.2	415	415	415	415	415
	Pin(kW)	0.6	1.5	2.3	3.1	3.6	4.1	4.6	5.4	5.8	6.4
	N(rpm)	198.3	398	597	798	997	1196	1396	1594	1792	1992
	Speed(km/hr)	4	9	14	19	24	29	34	39	44	49
	Pout(kW)	0.5	1.1	1.8	2.6	3.6	6.5	8.8	10.5	11.9	12.8
Flying	Torque(%)	26	30	34	36	38	42	40	41	40	41
	Iac(A)	19	19.2	17.8	18	17.6	14.7	13.9	13.4	13.5	13.8
	Vac(V)	90	171	252	333	415	415	415	415	415	415
	Pin(kW)	0.6	1.3	2	2.8	3.6	4	4.6	5.1	5.6	6.3
	N(rpm)	198	398.1	597.5	798	997.4	1195	1395	1594	1790	1990
	Speed(km/hr)	4	9	14	19	24	29	34	39	44	49
	Pout(kW)	0.6	1.6	2.4	4.8	5.8	7.5	8.9	10.4	11.8	13.3
Flying + Torque Boost	Torque(%)	29	25	31	34	36	36	38	38	40	41
	Iac(A)	19.8	20.2	17.9	17.8	17.7	14.6	13.6	13.4	13.4	14
	Vac(V)	90	171	252	333	415	415	415	415	415	415
	Pin(kW)	0.7	1.1	1.5	2.3	3	3.4	3.9	4.6	5.3	6.1
	N(rpm)	198	398.4	598	798	997.6	1196	1395	1594	1792	1992
	Speed(km/hr)	4	9	14	19	24	29	34	39	44	49
	Pout(kW)	0.4	1.6	3	4.4	5.9	7.6	9	10.5	12	12.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังประชาชนที่นอกเหนือจากนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟกระแสที่ใช้งานในรูปแบบต่างๆของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.4 กราฟแรงดันที่ใช้งานในรูปแบบต่างๆของอินเวอร์เตอร์

ข้อสังเกต จากการทดลองสังเกตได้ว่าในรูปแบบการทำงานแบบ Flying และ Flying+Torque Boost จะมีเสียงดังที่มอเตอร์จำนวน 2 ครั้ง ก่อนที่จะสามารถเดินมอเตอร์ได้ แต่ในระบบการทำงานแบบ Ramp กับ Torque Boost จะไม่มีเสียงและสามารถออกทำการเดินมอเตอร์ได้ทันที

4.3 การทดสอบการขับเคลื่อนบนพื้นถนน

จุดประสงค์การทดลอง

1. ทดสอบการขับเคลื่อนบนพื้นถนนของมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์
2. ทดสอบการขับเคลื่อนบนพื้นถนนขณะไม่มีภาระเทียบกับการบรรทุกภาระที่พิกัด
3. ทดสอบการเริ่มเดินของมอเตอร์ของรูปแบบการควบคุมต่างๆ
4. ทดสอบและหารูปแบบการเริ่มเดินมอเตอร์ที่เหมาะสม

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องมือวัดชนิด Fluke i410 จำนวน 1 ตัว
2. เครื่องมือวัดชนิด Fluke 41B จำนวน 1 ตัว

ขั้นตอนการทดลอง

1. ตั้งรูปแบบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในการเริ่มเดินมอเตอร์เป็นแบบ Ramp
2. ตั้งค่าความถี่ที่ใช้งานที่ 30 Hz
3. ทำการเดินมอเตอร์จากความถี่เป็นศูนย์จนถึงค่าความถี่ที่ตั้งไว้
4. บันทึกค่ากระแสสูงสุดและขณะสภาวะคงที่ที่ถ่ายให้กับมอเตอร์, เปอร์เซนต์แรงบิดสูงสุดและขณะสภาวะคงที่, กำลังที่ใช้สูงสุดและขณะสภาวะคงที่ และเวลาที่ใช้ในการเร่ง
5. ทดสอบลักษณะการเริ่มเดินมอเตอร์จากสภาวะหยุดนิ่ง, สภาวะไม่หยุดนิ่ง และสภาวะการหมุนงมอเตอร์
6. ตั้งค่าความถี่ที่ 50 Hz แล้วดำเนินการตั้งข้อ 3., 4. และ 5. ตามลำดับ
7. ตั้งรูปแบบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในการเริ่มเดินมอเตอร์เป็นแบบ Torque Boost, Flying, Flying+Torque Boost แล้วดำเนินการตั้งข้อ 3. ถึงข้อ 6. ตามลำดับ
8. เพิ่มภาระ 700 kg แล้วดำเนินการตามข้อ 1. ถึงข้อ 7. ตามลำดับ

ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.3 ผลการใช้งานบนถนน

Load	Mode	f(Hz)	Acc Time (Sec)	%Torque(%)		AC Current(A)		P(kW)	
				max	steady	I _{max}	I _{steady}	max	steady
No Load	Ramp	30	6	80	13	51	18	8	2
		50	9	106	16	52	18	19	3.8
	Torque	30	6.5	89	14	55	17.4	8.5	2.1
		50	9.26	110	15	61	18	19	3
	Flying	30	7.03	85	12	47	18	9	1.8
		50	9.6	108	15	54	19	19	3.4
	Flying+ Torque Boost	30	5.8	87	13	50	18	9.2	1.9
		50	9.1	109	16	55	18	20	3.7
Full Load	Ramp	30	7.53	100	14	54	18	9	2.2
		50	9.5	127	17	56	18	20	4
	Torque	30	7.8	95	16	51	18	10	2.5
		50	10.5	128	19	56	19	19	4.3
	Flying	30	7.47	98	14	51	19	10	2
		50	11.01	110	19	55	20	20	4.2
	Flying+ Torque Boost	30	7	114	15	53	18	9.6	2.2
		50	10.87	123	19	64	18	20.2	4.2

ข้อสังเกต ในรูปแบบ Flying และ Flying+Torque Boost เมื่อวงจรการ เริ่ม-หยุด ของอินเวอร์เตอร์ เปิดวงจรอยู่แล้วมีการปิดวงจรเพื่อจะเริ่มเดินมอเตอร์ จะมีเสียงดังที่มอเตอร์จำนวน 1-2 ครั้ง ก่อนที่จะสามารถเดินมอเตอร์ต่อได้ แต่ในรูปแบบการทำงานแบบ Ramp กับ Torque Boost เมื่อวงจรการ เริ่ม-หยุด ของอินเวอร์เตอร์เปิดวงจรขณะรถเคลื่อนที่และมีการปิดวงจรเพื่อจะเริ่มเดินมอเตอร์อีกครั้งในขณะที่รถมีการเคลื่อนที่ จะมีการหน่วงจนกระทั่งรถเกือบหยุด แล้วจึงสามารถเดินมอเตอร์ต่อไปได้ ข้อสังเกตอีกอย่างที่สำคัญคือเมื่อมีการปล่อยคันเร่งแต่ละครั้งจะเกิดการหน่วงมอเตอร์ขึ้น

4.4 การทดสอบความสามารถในการขึ้นทางชัน

จุดประสงค์ในการทดลอง

1. ทดสอบการขึ้นทางชันและการออกตัวบนทางชัน
2. ทดสอบรูปแบบการทำงานที่เหมาะสมสำหรับทางชัน
3. ทดสอบความชันสูงสุดที่สามารถขึ้นได้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- | | |
|---------------------------------|-------------|
| 1. เครื่องมือวัดชนิด Fluke i410 | จำนวน 1 ตัว |
| 2. เครื่องมือวัดชนิด Fluke 41B | จำนวน 1 ตัว |

ค่าคงที่ที่ทำการทดลองทางชัน

1. ทางชันที่ค่าความชัน 7 องศา

ขั้นตอนการทดลอง

1. ตั้งรูปแบบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในการเริ่มเดินมอเตอร์เป็นแบบ Ramp
2. ตั้งค่าความถี่ที่ใช้งานที่ 50 Hz
3. ทำการเดินมอเตอร์จากความถี่เป็นศูนย์จากเชิงทางชัน
4. บันทึกค่ากระแสสูงสุดที่จ่ายให้กับมอเตอร์, เปอร์เซนต์แรงบิดสูงสุด และกำลังที่ใช้สูงสุด
5. ตั้งรูปแบบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในการเริ่มเดินมอเตอร์เป็นแบบ Torque Boost, Flying, Flying+Torque Boost แล้วดำเนินการคั่งข้อ 3. และ 4. ตามลำดับ
6. ทดสอบการออกตัวบนทางชันหากกรณีที่ออกตัวไม่ได้ และบันทึกค่าตามข้อ 4.
7. เพิ่มภาระ 450 kg แล้วดำเนินการตามข้อ 1. ถึง 5. ตามลำดับ
8. ทดสอบการออกตัวบนทางชันหากกรณีที่ออกตัวไม่ได้ และบันทึกค่าตามข้อ 4.
9. เพิ่มภาระอีก 250 kg รวมภาระเป็น 700 kg แล้วดำเนินการตามข้อ 1. ถึง 5. ตามลำดับ
10. ขั้วรถไฟฟ้าขึ้นทางชันต่างๆ เพื่อหาความชันสูงสุดที่รถไฟฟ้าสามารถขึ้นได้

ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.4 ผลความสามารถในการขึ้นทางชัน 7 องศา

Load	Mode	กรณีขึ้นทางชันจากพื้น			กรณีออกตัวบนทางชันแล้วไม่สามารถขึ้นได้		
		Tmax(%)	Iac,max(A)	Pmax(kW)	Tmax(%)	Iac,max(A)	Pmax(kW)
No Load	R	115.8	44	6.5	-	-	-
	T	119	42	8.3	-	-	-
	F	119	45	9.8	-	-	-
	F+T	119	43	8.4	-	-	-
450 kg	R	119	46	9.8	147	55	2.9
	T	119	42	8.3	-	-	-
	F	115.8	44	6.5	139.7	57.3	2.8
	F+T	119	43	8.4	139	56	2.9
Full Load	R	130	55	9.5	*	*	*
	T	135	54	11	*	*	*
	F	134	54	9.6	*	*	*
	F+T	134	55	10	*	*	*

- หมายเหตุ
- หมายถึง รถสามารถขึ้นทางชันได้
 - * หมายถึง รถไม่สามารถขึ้นได้และถอยหลังลง
 - R Ramp
 - T Torque Boost
 - F Flying
 - F+T Flying+Torque Boost

ข้อสังเกต ที่สภาวะไม่บรรทุกน้ำหนัก ทุกระบบสามารถออกตัวบนทางชันได้ ที่สภาวะบรรทุกน้ำหนัก 450 kg มีเพียงรูปแบบ Torque Boost เท่านั้นที่สามารถออกตัวบนทางชันได้ แต่ระบบอื่นทำได้เพียงค้างตัวบนทางชัน และกรณีที่บรรทุกน้ำหนัก 700 kg ทุกระบบไม่สามารถออกตัวหรือค้างตัวบนทางชันได้

4.5 การทดสอบการปรับค่าอัตราเวลาในการเร่ง

จุดประสงค์ในการทดลอง

1. ทดสอบความสัมพันธ์ของการปรับอัตราเวลาในการเร่งของอินเวอร์เตอร์ที่มีต่อการขับมอเตอร์
2. ทดสอบหาค่าเร่งที่เหมาะสมในการตั้งค่า เพื่อนำมาเลือกใช้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องมือวัดชนิด Fluke i410 จำนวน 1 ตัว
2. เครื่องมือวัดชนิด Fluke 41B จำนวน 1 ตัว

ขั้นตอนการทดลอง

1. ตั้งรูปแบบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในการเริ่มเดินมอเตอร์เป็นแบบ Ramp
2. ตั้งค่าความถี่ที่ใช้งานที่ 50 Hz
3. ทำการเดินมอเตอร์จากความถี่เป็นศูนย์จนถึงสภาวะความเร็วคงที่
4. บันทึกค่าเวลาที่ใช้ในการเร่งจากสภาวะหยุดนิ่งจนถึงสภาวะความเร็วคงที่, เปอร์เซ็นต์แรงบิดสูงสุด และกำลังที่ใช้สูงสุด
5. ตั้งรูปแบบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในการเริ่มเดินมอเตอร์เป็นแบบ Torque Boost, Flying, Flying+Torque Boost แล้วดำเนินการตั้งข้อ 3. และ 4. ตามลำดับ

ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.5 ผลการปรับค่าเวลาในการเร่ง

Mode	f(Hz)	Acc Set(Sec)	Acc Time(Sec)	Tmax(%)	Pmax(kW)
Ramp	50	2	8.5	120	20
		4	9.36	95	18
		6	9.03	108	18
		8	9.41	96	16
		10	11.03	80	13
Torque Boost	50	2	8.08	125	20
		4	9.2	92	19
		6	8.28	109	19
		8	9.78	98	16
		10	12.17	81	14

ตารางที่ 4.5(ต่อ)

Mode	f (Hz)	Acc Set(Sec)	Acc Time(Sec)	Tmax(%)	Pmax(kW)
Flying	50	2	7.6	122	20
		4	9.84	98	18
		6	8.68	102	18
		8	10.15	92	16
		10	12.91	78	13
Flying+ Torque Boost	50	2	7.65	118	21
		4	9.55	97	16
		6	9.42	105	19
		8	9.72	88	15
		10	11.68	76	14

เนื่องจากผลการทดลองมีข้อสังเกตที่การตั้งเวลา 6 วินาที มีการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์แรงบิด จึงทำการเพิ่มการทดลองที่เวลา 4.5, 5 และ 7 วินาที ที่รูปแบบ Ramp ขึ้น

ตารางที่ 4.6 ผลการปรับค่าเวลาในการเร่งเสริม

Mode	f (Hz)	Acc Set(Sec)	Acc Time(Sec)	Tmax (%)
Ramp	50	4.5	9.77	104
		5	8.49	114
		7	9.77	104

ข้อสังเกต ในกรณีที่ตั้งค่าเวลาที่ใช้ในการเร่ง 2, 4 และ 6 วินาที จะเกิดจังหวะของการเร่งขึ้น โดยกรณี 2 วินาที จะมีจังหวะของการเร่งสูงสุด ประมาณ 9-10 ครั้งต่อการเร่งจากสถานะหยุดนิ่งจนถึงสถานะความเร็วคงที่ กรณี 4 วินาที จะมีจังหวะการเร่งประมาณ 7-8 ครั้ง และกรณี 6 วินาที จะมีจังหวะการเร่งประมาณ 3-4 ครั้ง ส่วนกรณีที่ตั้งค่าเวลาที่ใช้ในการเร่งมากกว่า 6 วินาที จะมีจังหวะของการเร่งเพียงครั้งเดียว

4.6 การทดสอบความสามารถในการบรรทุกของรถไฟฟ้า

จุดประสงค์การทดลอง

1. เพื่อกำหนดน้ำหนักภาระสูงสุดที่รถไฟฟ้าจะบรรทุกได้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. รถไฟฟ้า
2. กระสอบทราย
3. นักศึกษา 20 คน

ขั้นตอนการทดลอง

1. บรรทุกกระสอบทราย 700 กก. กับนักศึกษา 8 คน
2. ขับรถในรูปแบบการควบคุมแบบ Flying + Torque Boost
3. สังเกตว่ารถสามารถเคลื่อนที่ไปได้หรือไม่ รวมทั้งปฏิกิริยาต่างๆ ของรถไฟฟ้า
4. เพิ่มนักศึกษาขึ้นไปบนรถอีกทีละ 2 คน
5. สังเกตเหมือนข้อ 3 จนกระทั่งรถไม่สามารถเคลื่อนที่ไปได้ หรือเกิดปฏิกิริยาที่ไม่ดี แล้วบันทึกน้ำหนักภาระสูงสุด การใช้กระแสและพลังงานสูงสุด

ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.7 ผลภาระสูงสุด

น้ำหนักสูงสุด(กิโลกรัม)	Iac,max(A)	Pmax(kW)
1540	55	25

4.7 การทดสอบความสามารถในการออกตัวของรถไฟฟ้า

จุดประสงค์การทดลอง

1. เพื่อศึกษาความสามารถในการออกตัวของรถไฟฟ้า

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. รถไฟฟ้า
2. นาฬิกาจับเวลา

ขั้นตอนการทดลอง

1. ขับรถไฟฟ้าในรูปแบบการควบคุมแบบ Ramp ที่ความถี่ 50 Hz (ความเร็ว 24 km/hr) ขณะบรรทุกน้ำหนัก 700 kg
2. จับเวลาตั้งแต่รถออกตัวจนกระทั่งรถมีความเร็วสูงสุด
3. ทำแบบเดียวกันในรูปแบบการควบคุมมอเตอร์แบบ Torque Boost, Flying และ Flying+Torque Boost

ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.8 ผลความเร่งขณะมีภาระและไม่มีภาระ

Mode		Ramp	Torque Boost	Flying	Flying+Torque Boost
Time (Sec)	No load	9	9.26	9.64	9.1
	Full load	9.5	10.5	11.10	10.87

ตารางที่ 4.9 การคำนวณความเร่งขณะมีและไม่มีภาระ

Mode	Accelerate			
	No load		Full load	
	m/s ²	Time from 0 to 100 km/hr (Sec)	m/s ²	Time from 0 to 100 km/hr (Sec)
Ramp	0.74	37.50	0.70	39.58
Torque Boost	0.72	38.58	0.63	43.75
Flying	0.69	40.17	0.60	46.25
Flying+Torque Boost	0.73	37.92	0.61	45.29

4.8 การทดสอบการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่ความเร็วสูงกว่าความเร็วพิกัดมอเตอร์

จุดประสงค์การทดลอง

1. เพื่อศึกษาการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่ความเร็วสูงกว่าความเร็วพิกัดมอเตอร์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. รถไฟฟ้า
2. กระจสอบทราย 700 kg

ขั้นตอนการทดลอง

1. ขับรถในรูปแบบการควบคุมแบบ Flying+Torque Boost โดยบรรทุกน้ำหนัก 700 kg
2. ปรับความถี่ 60 Hz
3. บันทึกค่า กระแสและพลังงานในขณะสูงสุดกับสภาวะคงตัว
4. ทำเหมือนข้อ 3. ที่ความถี่ 80 100 และ 150 Hz

ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.10 ผลที่ความถี่สูงกว่าพิกัด

$f(\text{Hz})$	$I_{\text{max}}(\text{A})$	$I_{\text{steady}}(\text{A})$	$P_{\text{max}}(\text{kW})$	$P_{\text{steady}}(\text{kW})$
60	60	25	20	9.6
80	66	38	25	10
100	71	49	27	20
150	82	65	33	22

บทที่ 5

สรุป

5.1 วิเคราะห์ และสรุปผลการดำเนินงาน

จากการดำเนินงานที่ผ่านเราได้ทำการออกแบบระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า โดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิดกรงกระรอก ซึ่งมีข้อเสียคือ แรงบิดต่ำทำให้มีปัญหาในการวิ่งบนทางชันที่ความชันมากๆ ระบบควบคุมมอเตอร์ใช้อินเวอร์เตอร์มาช่วยในการปรับความเร็วของมอเตอร์ โดยมีเบตเตอร์เป็นต้นกำลัง การปรับความเร็วจะทำได้โดยการควบคุมค่าความต้านทานที่ต่อเข้ากับ Analog Input ของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งตัวต้านทานนี้จะต่ออยู่กับคันเร่งของรถ

จากผลการทดสอบมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์สรุปได้ว่าสามารถใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ แต่ที่ความถี่ต่ำจะมีผลของฮาร์มอนิกสูงมาก ระบบขับเคลื่อนทำงานปกติสามารถทำให้ลื่นไหลที่ความเร็วต่างๆ โดยปรับความต้านทานของตัวต้านทานปรับค่าได้

จากผลการทดลองที่เครื่อง Chassis Dynamometer สรุปได้ว่า รูปแบบการควบคุมอินเวอร์เตอร์หลังจากการเดินมอเตอร์ได้ระยะหนึ่งค่าต่างๆมีค่าใกล้เคียงกันมากดูได้จากตารางที่ 4.2 รูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นการควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่ แต่มีส่วนต่างในขณะเริ่มเดินมอเตอร์คือรูปแบบของ Flying และ Flying+Torque Boost จะมีเสียงดังที่มอเตอร์ 2 ครั้ง ก่อนที่จะสามารถเดินมอเตอร์ได้ ส่วนรูปแบบของ Ramp และ Torque Boost จะไม่มีเสียงและเดินมอเตอร์ได้ทันที

จากผลการทดลองการบนถนนตารางที่ 4.3 เมื่อเทียบกับตารางที่ 4.2 จะวิเคราะห์ได้ว่าการใช้งานบนถนนจะต้องการแรงบิดสูงกว่าการทดลองที่เครื่อง Chassis Dynamometer แต่เมื่อเข้าสู่สภาวะความเร็วคงที่จะใช้กระแสใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบกรณีไม่มีภาระกับกรณีมีภาระที่พิกัดสามารถวิเคราะห์ได้ว่ากระแสที่ใช้ที่ความเร็วคงที่มีค่าใกล้เคียงกัน แต่แรงบิดที่ได้และกำลังที่ใช้มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบการเริ่มเดินมอเตอร์ของอินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมจากการทดลองและการสังเกตพบว่ารูปแบบ Flying+Torque Boost มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากไม่ต้องทำการหยุดรถก่อนทำการเริ่มเดินมอเตอร์และใช้เวลาในการเร่งความเร็ว(อัตราเร่ง)น้อยกว่ารูปแบบวิธี Flying

จากผลการทดลองการขึ้นทางชันสรุปได้ว่าระบบที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นทางชัน ได้แก่ รูปแบบ Torque Boost เนื่องจากที่สภาวะบรรทุกน้ำหนัก 450 kg สามารถออกตัวบนทางชันได้ แต่ระบบอื่นทำได้แค่เพียงค้ำตัวบนทางชันเท่านั้น และจากการทดลองที่ความชันต่างๆ รถไฟฟ้าสามารถขับเคลื่อนขึ้นความชันได้ถ้าเริ่มขับเคลื่อนขึ้นจากจุดเริ่มต้นความชัน

จากผลการทดลองปรับอัตราเร่งที่อินเวอร์เตอร์สรุปได้ว่าการตั้งค่าเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วจะมากกว่า 6 วินาที เพื่อให้เกิดความนุ่มนวลในการขับ เนื่องจากถ้าเกิดจังหวะการเร่งแล้วจะทำให้เกิดการกระชากของรถได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองเมื่อเพิ่มน้ำหนักไปจนกระทั่ง 1540 kg (กระสอบทราย 700 kg กับนักศึกษา 12 คน) รถยังสามารถเคลื่อนที่ไปได้ แต่อัตราการใช้พลังงาน กระแส สูงเกินกว่ากระแสและพลังงานพิกัด ซึ่งถ้าขั้วรถไฟฟ้าเป็นระยะเวลาหนึ่ง มอเตอร์จะร้อนซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อมอเตอร์ได้ และอีกปัญหาหนึ่งที่พบ คือ ครอบล้อจะเคลื่อนลงมาต่ำชิดกับตัวล้อมากจึงเกิดความยากลำบากในการขับขี่โดยเฉพาะขณะเลี้ยว ดังนั้นน้ำหนักภาระที่บรรทุกบนรถไฟฟ้าไม่ควรเกิน 1540 kg

จากการทดลองที่ความถี่สูงกว่าความถี่พิกัด (50 Hz) โดยเฉพาะที่ความถี่สูงกว่ามาก ๆ พบว่าอัตราการใช้พลังงานและกระแสจะสูง ซึ่งส่งผลให้มอเตอร์ร้อนเมื่อใช้ไประยะเวลาหนึ่ง โดยที่ความถี่ 150 Hz เมื่อขับรถไปได้ประมาณ 1 นาที อินเวอร์เตอร์จะตัดเนื่องจากความร้อนของมอเตอร์สูงผิดปกติ อีกสิ่งหนึ่งที่พบเมื่อขับรถที่ความถี่สูงคือ รถไฟฟ้าจะมีอาการสั่นเนื่องจากมอเตอร์สั่นซึ่งอาจเกิดอันตรายต่อระบบทางกลได้

จากการคำนวณและผลการทดลองนำมาเปรียบเทียบเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบการคำนวณกับการปฏิบัติจริง

ลำดับ	รายการ	ค่าจากการคำนวณ	ค่าจากการทดลอง	หมายเหตุ
1	ความเร็วสูงสุดที่ขับได้	88 km/h	74 km/h	ภาระ 700 kg
2	ขีดจำกัดความถี่ที่ใช้งานได้	150 Hz	150 Hz	
3	ความชันที่สามารถขึ้น	7 องศา	7 องศา	
4	น้ำหนักภาระที่บรรทุกได้สูงสุด	3,758 kg	1,540 kg	ความถี่ 50 Hz
5	ความเร่งสูงสุด	0.6 m/s ²	0.74 m/s ²	ไม่มีภาระ

จากตารางสามารถสรุปได้ว่าความเร็วสูงสุดที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าสูงกว่าค่าที่ทำการทดลอง เนื่องจากเกิดการสูญเสียพลังงานในการส่งผ่าน และอัตราทดของเฟืองท้ายในการคำนวณใช้ 1:4.5 แต่ในการทดลองจะใช้เฟืองท้ายที่ติดมากับตัวรถซึ่งมีอัตราทด 1:5 ส่วนน้ำหนักภาระที่บรรทุกได้สูงสุดและความเร่งสูงสุดมีค่ามากกว่าการคำนวณ เนื่องจากเฟืองท้ายที่ใช้ในการทดลองมีอัตราทดมากกว่าการคำนวณจึงทำให้แรงบิดที่ได้ที่ล้อมีค่ามากขึ้น

จากการทดลองสามารถสรุปโดยรวมได้ว่ารูปแบบที่เหมาะสมในการใช้งานบนทางเรียบคือ Flying รูปแบบที่เหมาะสมในการใช้งานบนทางชัน คือ Torque Boost ความเร็วสูงสุดประมาณ 74 km/hr ที่ความถี่ 150 Hz ความสามารถในการบรรทุกน้ำหนัก 1,540 kg ความสามารถในการขึ้นทางชัน 7 องศา อัตราเร่งสูงสุด 0.74 m/s²

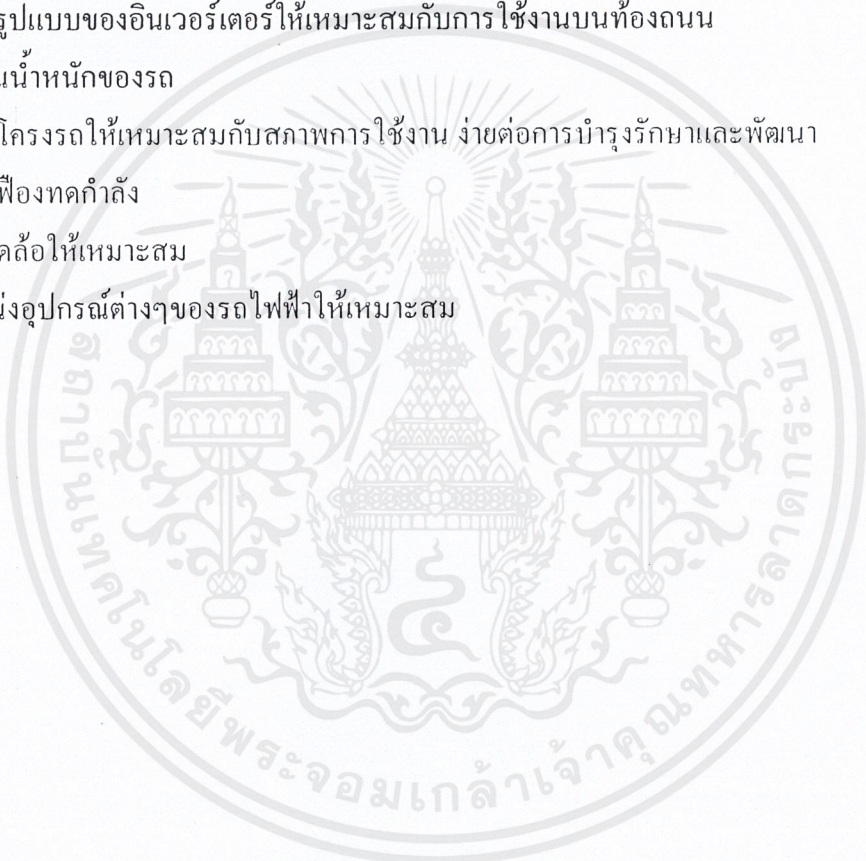
คาดหวังว่าในอนาคตจะสามารถนำไปใช้งานได้เป็นอย่างดีในการรับส่งนักศึกษาภายในสถานศึกษา ใช้กันอย่างแพร่หลาย มีระบบการจัดเก็บพลังงานที่ดีขึ้น และสามารถนำไปผลิตในเชิงอุตสาหกรรม เพื่อลดปัญหาหมอกควันทางอากาศ และปริมาณการใช้น้ำมัน

5.2 ปัญหา

1. ระบบเฟืองยังไม่สมบูรณ์
2. ระบบห้ามล้อยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ
3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดยังไม่เหมาะสมกับการวัดขณะใช้งาน
4. เครื่องมือและอุปกรณ์ไม่เพียงพอ และหาไม่ได้
5. ขาดทุนทรัพย์
6. มีปัญหาในการประจุพลังงานให้กับแบตเตอรี่จำนวนมาก

5.3 แนวทางการพัฒนา

1. ออกแบบรูปแบบของอินเวอร์เตอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งานบนท้องถนน
2. ลดปริมาณน้ำหนักของรถ
3. ออกแบบโครงรถให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน ง่ายต่อการบำรุงรักษาและพัฒนา
4. คิดตั้งชุดเฟืองทดกำลัง
5. เลือกขนาดล้อให้เหมาะสม
6. จัดตำแหน่งอุปกรณ์ต่างๆของรถไฟฟ้าให้เหมาะสม





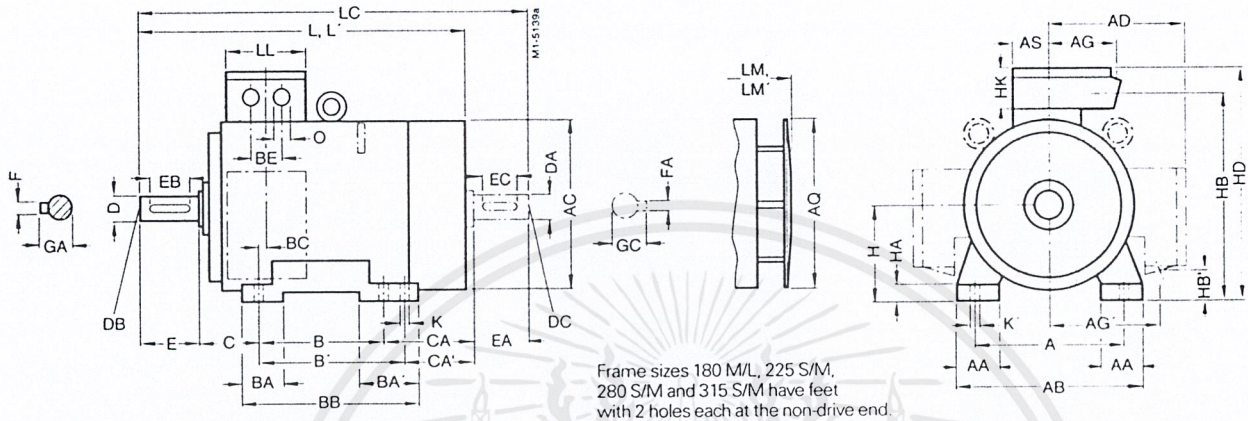
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Squirrel-Cage Motors

Dimensions

Type of construction IM B 3

1LA6, 1MA6 · Frame sizes 180 M to 315 L



Frame size	Type	No. of poles	EC DIN	A a	AA a1	AB a2	AC g	AD d	AG f	AG y	AG j	AS z	B a	B b	BA m	BA m1	BB b	BC x1	BE x2	C w1	CA v2	CA v1	HA D	HA D1
180 M	183	2 4		279	65	344	375	275	140	235	340	80	241*	279	70	108	319	35	75	121	259	-	180	26
180 L	186	4 to 8		279	65	344	375	275	140	235	340	80	241	279*	70	108	319	35	75	121	-	221	180	26
200 L	206	2 6		318	80	398	415	310	155	250	380	100	305	-	85	85	355	42	85	133	239	-	200	34
	207	2 4 to 8		318	80	398	415	310	155	250	380	100	305	-	85	85	355	42	85	133	239	-	200	34
225 S	220	4 and 8		356	80	436	470	335	155	275	425	100	286*	311	85	110	361	25	90	149	269	-	225	34
225 M	223	2 4 to 8		356	80	436	470	335	155	275	425	100	286	311*	85	110	361	25	90	149	-	244	225	34
250 M	253	2 4 to 8		406	100	506	520	430	200	345	470	120	349	-	100	100	409	39	105	168	283	-	250	42
280 S	280	2 4 to 8		457	100	557	575	455	200	370	525	120	368*	419	100	151	479	30	105	190	317	-	280	42
280 M	283	2 4 to 8		457	100	557	575	455	200	370	525	120	368	419*	100	151	479	30	105	190	-	266	280	42
315 S	310	2 4 to 8		508	120	628	645	515	250	430	590	135	406*	457	125	171	527	32	90	216	358	-	315	52
315 M	313	2 4 to 8		508	120	628	645	515	250	430	590	135	406	457*	125	171	527	32	90	216	-	307	315	52
315 L	316	2		508	120	628	645	515	250	430	590	135	508	-	120	120	578	32	90	216	396	-	315	52
	317	4 to 8																						
	318	6 and 8																						

- The dimensions of the 4- to 8-pole basic design are also applicable to the pole-changing design of type 1LA motors (6 terminals).
- Dimensions for 9-terminal boxes on request.

- * This dimension is assigned to the specified frame size in DIN EN 50 347.
- 1) Measured across the bolt heads.
 - 2) Design with low-noise fan.
 - 3) A second shaft extension and/or pulse generator mounting is not available for low-noise design.

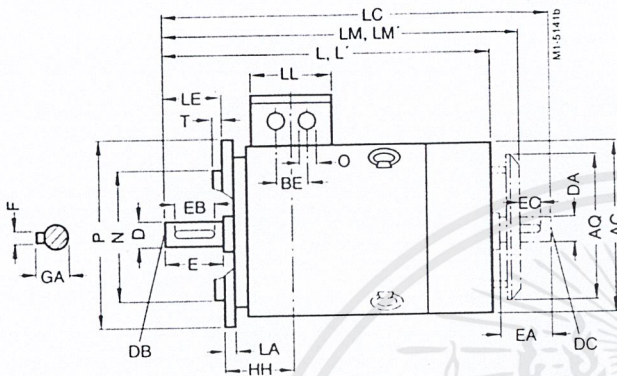
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ในรายการนี้ทุกสิ่งทุกอย่างที่มีให้ดูเป็นเพียงแนวทางและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปใช้

Squirrel-Cage Motors

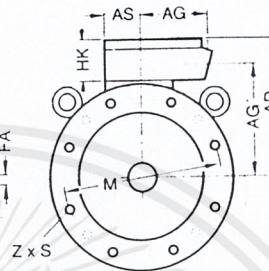
Dimensions

Types of construction IM B 5 and IM V 1

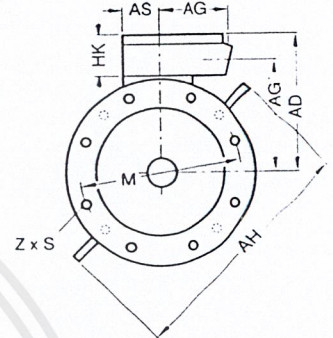
1LA6, 1MA6 · Frame sizes 180 M to 315 L



Type of construction IM B 5
(up to frame size 315 M only)



Type of construction IM V 1



The motors are supplied with two fitted eyebolts conforming to IM B 5.
One of them can be repositioned to conform to IM V 1 or IM V 3.
Care must be taken to avoid perpendicular stress.

Z = Number of fixing holes

Frame	Type	EC	Range	AC	AD	AH	AG	AG	AQ	AS	BE	EH	HK	L	LM	LA	LC	LE	LI
1LA6	IMAG	DIN	size	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
180 M	...183	2	A 350	375	275	470	140	235	340	80	75	156	86	720	770	13	841	110	164
	...	4																	
180 L	...186	4 to 8		375	275	470	140	235	340	80	75	156	86	720	770	13	841	110	164
200 L	...206	2	A 400	415	310	530	155	255	380	100	85	175	104	775	825	15	897	110	197
	...	6																	
	...207	2		415	310	530	155	255	380	100	85	175	104	775	825	15	897	110	197
	...	4 to 8																	
225 S	...220	4 and 8	A 450	470	335	580	155	275	425	100	90	174	104	835	855	16	954	140	197
225 M	...223	2		470	335	580	155	275	425	100	90	174	104	805	855	16	924	110	197
	...	4 to 8												835	855	16	954	140	197
250 M	...253	2	A 550	520	430	645	200	345	470	120	105	207	155	930	1010	18	1050	140	234
	...	4 to 8															1080		
280 S	...280	2	A 550	575	455	700	200	370	525	120	105	220	155	1005	1080	18	1155	140	234
	...	4 to 8																	
280 M	...283	2		575	455	700	200	370	525	120	105	220	155	1005	1080	18	1155	140	234
	...	4 to 8																	
315 S	...310	2	A 660	645	515	805	250	430	590	135	90	248	180	1110	1185	22	1260	140	266
	...	4 to 8												1140	1185	22	1290	170	266
315 M	...313	2		645	515	805	250	430	590	135	90	248	180	1110	1185	22	1260	140	266
	...	4 to 8												1140	1185	22	1290	170	266
315 L	...316	2		645	515	805	250	430	590	135	90	248	180	1250	1325	22	1400	140	266
	...317	4 to 8												1280	1325	22	1430	170	266
	...318	6 and 8												1280	1325	22	1430	170	266

- The dimensions of the 4- to 8-pole basic design are also applicable to the pole-changing design of type 1LA motors (6 terminals).
- Dimensions for 9-terminal boxes on request.

- 1) Measured across the bolt heads.
- 2) Design with low-noise fan.
- 3) A second shaft extension and/or pulse generator mounting is not available for low-noise design.

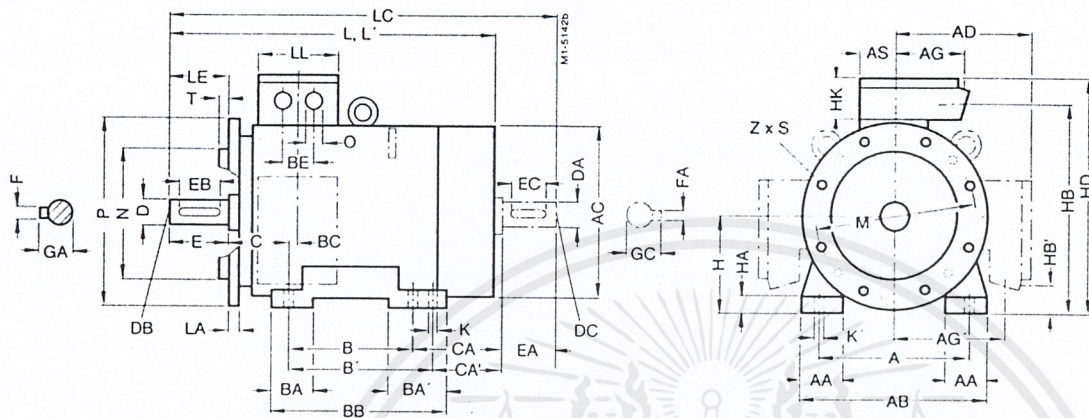
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีโอกาสไปใช้

Squirrel-Cage Motors

Dimensions

Type of construction IM B 35

1LA6, 1MA6 · Frame sizes 180 M to 315 L



Frame sizes 180 M/L, 225 S/M, 280 S/M and 315 S/M have feet with 2 holes each at the non-drive end.

Z = Number of fixing holes

Formotor	Dimension symbols to																									
Frame size	Type 1LA6 1MA6	No. of poles	IEC Frame size	IEC Frame size	A	AA	AB	AD ¹⁾	AD	AG	AG	AS	B	B ²⁾	BA	BA	BB	BC	BE	C	CA	CA	H	HA	HB	HB ³⁾
180 M	....183	2	A 350		279	65	344	375	275	140	235	80	241*	279	70	108	319	35	75	121	259	221	180	26	415	40
180 L	....186	4 to 8			279	65	344	375	275	140	235	80	241	279*	70	108	319	35	75	121	-	-	180	26	415	40
200 L	....206	2	A 400		318	80	398	415	310	155	250	100	305	-	85	85	355	42	85	133	239	-	200	34	450	45
	....207	2			318	80	398	415	310	155	250	100	305	-	85	85	355	42	85	133	239		200	34	450	45
225 S	....220	4 and 8	A 450		356	80	436	470	335	155	275	100	286*	311	85	110	361	25	90	149	269	-	225	34	500	70
225 M	....223	2			356	80	436	470	335	155	275	100	286	311*	85	110	361	25	90	149	-	244	225	34	500	70
250 M	....253	2	A 550		406	100	506	520	430	200	345	120	349	-	100	100	409	39	105	168	283	-	250	42	585	50
280 S	....280	2	A 550		457	100	557	575	455	200	370	120	368*	419	100	151	479	30	105	190	317	-	280	42	640	80
280 M	....283	2			457	100	557	575	455	200	370	120	368	419*	100	151	479	30	105	190	-	266	280	42	640	80
315 S	....310	2	A 660		508	120	628	645	515	250	430	135	406*	457	125	171	527	32	90	216	358	-	315	52	710	65
315 M	....313	2			508	120	628	645	515	250	430	135	406	457*	125	171	527	32	90	216	-	307	315	52	710	65
315 L	....316	2			508	120	628	645	515	250	430	135	508	-	120	120	578	32	90	216	396	-	315	52	710	65
	....317	4 to 8																								
	....318	6 and 8																								

■ The dimensions of the 4- to 8-pole basic design are also applicable to the pole-changing design of type 1LA6 motors (6 terminals).

■ Dimensions for 9-terminal boxes on request.

* This dimension is assigned to the specified frame size in DIN EN 50 347.

- 1) Measured across the bolt heads.
- 2) Design with low-noise fan.
- 3) A second shaft extension and/or pulse generator mounting is not available for low-noise design.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่รวมกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Squirrel-Cage Motors

Basic design · Cast-iron enclosure

Degree of protection IP55, temperature class F, 6-pole, 50 Hz

Selection and ordering data

Rated output	Frame size	Order No. For Order No. suffixes for voltage and type of constr. see table below	Performance at rated output					Lo.-rotor torque	Lo.-rotor current	Breakdown torque	Torque class	Characteristic acc. to pages 2/10 to 2/13	Moment of inertia J	Weight
			Rated speed	Efficiency η	Power factor p.f.	Rated current at 400 V	Rated torque								Type of constr. IM B 3
kW			rpm	%		A	Nm				CL	kg m ²	approx. kg	
1000 rpm, 6-pole, 50 Hz														
0.75	90 S	1LG8 090-6AD ..	890	68.3	0.75	2.2	8	1.6	3.1	1.9	7	15	0.0025	20
1.1	90 L	1LG8 096-6AB ..	910	69.8	0.72	3.2	12	2.0	3.5	2.3	13	12	0.0036	22
1.5	100 L	1LG8 106-6AB ..	940	76.4	0.70	4.3	15	2.2	4.1	2.5	13	12	0.0086	35
2.2	112 M	1LG8 113-6AD ..	945	80	0.75	5.5	22	1.8	4.5	2.0	7	15	0.014	38
3	132 S	1LG8 130-6AA ..	960	85.3	0.80	6.5	30	2.6	5.8	2.6	16	9	0.03	59
4	132 M	1LG8 133-6AB ..	955	85	0.80	8.8	40	2.2	5.5	2.6	13	12	0.03	67
5.5	132 M	1LG8 134-6AA ..	955	85	0.80	11.8	55	2.5	6.0	2.6	16	9	0.04	72
7.5	160 M	1LG8 163-6AA ..	965	87.9	0.82	15.3	74	2.5	6.5	2.8	16	9	0.10	108
11	160 L	1LG8 166-6AB ..	965	89	0.82	22.5	109	2.3	6.5	2.6	13	12	0.13	130
15	180 L	1LA6 186-6AA ..	970	89	0.83	29.5	148	2.6	5.7	2.4	16	4	0.2	180
18.5	200 L	1LA6 206-6AA ..	975	90.2	0.83	35.5	181	2.6	5.7	2.3	16	4	0.29	240
22		1LA6 207-6AA ..	975	90.8	0.83	42.5	215	2.5	5.7	2.3	16	4	0.33	255
30	225 M	1LA6 223-6AA ..	978	92.0	0.84	56	293	2.6	5.7	2.2	16	4	0.57	305
37	250 M	1LA6 253-6AA ..	980	92.4	0.84	69	361	2.6	6.0	2.1	16	4	0.89	410
45	280 S	1LA6 280-6AA ..	982	93.0	0.86	81	438	2.4	6.0	2.3	16	4	1.3	540
55	280 M	1LA6 283-6AA ..	984	93.0	0.86	99	534	2.5	6.2	2.4	16	4	1.5	580
75	315 S	1LA6 310-6AA ..	988	93.8	0.85	136	725	2.4	6.2	2.5	16	4	2.4	770
90	315 M	1LA6 313-6AA ..	988	94.2	0.85	162	870	2.4	6.2	2.5	16	4	2.9	830
110	315 L	1LA6 316-6AA ..	988	94.7	0.85	198	1060	2.6	6.6	2.5	16	4	3.5	970
132	315 L	1LA6 317-6AA ..	986	94.7	0.86	235	1280	2.3	6.6	2.2	16	4	4.3	1060
160	315 L	1LA6 318-6AA ..	988	95.0	0.87	280	1550	2.4	6.6	2.3	16	4	4.9	1100
200	315	1LA8 315-6AB ..	989	95.7	0.87	345	1930	2.0	6.3	2.5	13	19	6.0	1300
250		1LA8 317-6AB ..	989	95.9	0.87	430	2410	2.0	6.3	2.5	13	19	7.3	1500
315	355	1LA8 355-6AB ..	993	96.2	0.87	540	3030	2.2	6.5	2.8	13	19	13	2000
400		1LA8 357-6AB ..	993	96.5	0.87	690	3850	2.2	6.5	2.8	13	19	16	2200
450	400	1LA8 403-6AB ..	992	96.5	0.86	780	4330	2.2	6.5	2.8	13	19	21	2800
500		1LA8 405-6AB ..	992	96.5	0.87	860	4810	2.3	6.5	2.8	13	19	24	3000
560		1LA8 407-6AB ..	992	96.7	0.87	960	5390	2.3	6.5	2.8	13	19	27	3200
630	450	1LA8 453-6AB ..	993	96.8	0.86	1100	6060	2.0	6.5	2.6	13	20	35	4000
710		1LA8 455-6AB ..	993	96.8	0.87	710 \blacklozenge	6830	2.0	6.5	2.5	13	20	39	4200
800		1LA8 457-6AB ..	993	97.0	0.87	790 \blacklozenge	7690	2.0	6.5	2.5	13	20	44	4500

\blacklozenge Rated current at 690 V.

Order No. suffixes

Motor type	Penultimate position: Voltage code						Last position: Type of construction code							
	50 Hz			60 Hz			IM B 3 (extra charge)							
	230 V Δ / 400 VY	400 V Δ / 690 VY	500 VY	500 V Δ	690 V Δ	460 VY	460 V Δ	IM B 5	IM V 1 without canopy	IM V 1 with canopy	IM B 14 with standard flange	IM B 14 with custom flange	IM B 35	
1LG8 090 to 1LG8 096	1	6	3	-	-	1	6	0	1	1	4	2	3	6
1LG8 106 to 1LG8 166	1	6	3	5	-	1	6	0	1	1	4	2	3	6
1LA6 186 to 1LA6 207	1	6	3	5	-	1	6	0	1	1	4	-	-	6
1LA6 223 to 1LA6 313	1	6	3	5	-	-	6	0	1	1	4	-	-	6
1LA6 316 to 1LA6 318	-	6	-	5	-	-	9 L2F	0	-	8	4	-	-	6
1LA8 315 to 1LA8 453	-	6	-	5	-	-	9 L2F	0	-	8	4	-	-	6
1LA8 455 and 1LA8 457	-	-	-	5	0	-	on request	0	-	8	4	-	-	6

Voltage code "9" for other voltages and/or frequencies.



Order numbers must be specified in this case (see page 2/5).

Please refer to pages 2/22 and 2/23 for types of construction.

K Control Terminals

Main I/O terminal X1

Table 6

X1	Identification	Description														
1	SCR	Terminal for signal cable screen. (Connected internally to frame earth.)														
2	AI 1	Analogue input channel 1, programmable. Default: 0 - 10 V ($R_i = 200 \text{ k}\Omega$) (J1:AI1 open) \Leftrightarrow 0 - 50 Hz frequency reference 0 - 20 mA ($R_i = 500 \Omega$) (J1:AI1 closed) \Leftrightarrow 0 - 50 Hz frequency reference Resolution 0.1 % accuracy ± 1 %.														
3	AGND	Analogue input circuit common. (Connected internally to frame earth through 1 M Ω)														
4	10 V	10 V/10 mA reference voltage output for analogue input potentiometer, accuracy ± 2 %.														
5	AI 2	Analogue input channel 2, programmable. Default: 0 - 20 mA ($R_i = 500 \Omega$) (J1:AI2 closed) 0 - 10 V ($R_i = 200 \text{ k}\Omega$) (J1:AI2 open) Resolution 0.1 % accuracy ± 1 %.														
6	AGND	Analogue input circuit common. (Connected internally to frame earth through 1 M Ω)														
7	AO1	Analogue output, programmable. Default: 0 - 20 mA (load < 500 Ω) \Leftrightarrow 0 - 50 Hz output frequency. Accuracy: ± 3 % typically.														
8	AGND	Common for DI return signals. (Connected internally to frame earth through 1 M Ω)														
9	24 V	Auxiliary voltage output 24 V DC +20 %, -10 % / 250 mA (reference to AGND). Short circuit protected.														
10	DCOM1	Digital input common 1 for DI1, DI2 and DI3. To activate a digital input, there must be $\geq +10$ V (or ≤ -10 V) between that input and DCOM1. The 24 V may be provided by the ACS 400 (X1:9) as in the connection examples (see L) or by an external 12 - 24 V source of either polarity.														
DI Configuration		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Factory (0)</th> <th>Factory (1)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11 DI 1</td> <td>Start. Activate to start. Motor will ramp up to frequency reference. Disconnect to stop. Motor will coast to stop.</td> </tr> <tr> <td>12 DI 2</td> <td>Reverse. Activate to reverse rotation direction.</td> </tr> <tr> <td>13 DI 3</td> <td>Jog. Activate to set output frequency to jogging frequency (default: 5 Hz).</td> </tr> <tr> <td>14 DI 4</td> <td>Must be deactivated for Factory 0).</td> </tr> <tr> <td>15 DI 5</td> <td>Ramp pair selection (ACC1/DEC1 or ACC2/DEC2).</td> </tr> <tr> <td>16 DCOM2</td> <td>DCOM2 digital input common 2 for DI4, DI5</td> </tr> </tbody> </table>	Factory (0)	Factory (1)	11 DI 1	Start. Activate to start. Motor will ramp up to frequency reference. Disconnect to stop. Motor will coast to stop.	12 DI 2	Reverse. Activate to reverse rotation direction.	13 DI 3	Jog. Activate to set output frequency to jogging frequency (default: 5 Hz).	14 DI 4	Must be deactivated for Factory 0).	15 DI 5	Ramp pair selection (ACC1/DEC1 or ACC2/DEC2).	16 DCOM2	DCOM2 digital input common 2 for DI4, DI5
Factory (0)	Factory (1)															
11 DI 1	Start. Activate to start. Motor will ramp up to frequency reference. Disconnect to stop. Motor will coast to stop.															
12 DI 2	Reverse. Activate to reverse rotation direction.															
13 DI 3	Jog. Activate to set output frequency to jogging frequency (default: 5 Hz).															
14 DI 4	Must be deactivated for Factory 0).															
15 DI 5	Ramp pair selection (ACC1/DEC1 or ACC2/DEC2).															
16 DCOM2	DCOM2 digital input common 2 for DI4, DI5															
17 RO1C		Relay output 1, programmable (default operation: fault \Rightarrow 17 connected to 18). 12 - 250 V AC / 30 V DC, 10 mA - 2 A														
18 RO1A																
19 RO1B																
20 RO2C		Relay output 2, programmable (default operation: running \Rightarrow 20 connected to 22) 12 - 250 V AC / 30 V DC, 10 mA - 2 A														
21 RO2A																
22 RO2B																

Digital input impedance 1.5 k Ω

Use multi-strand 0.5-1.5 mm² wire.

Note! DI 4 is read only when powered-up (Factory macro 0 and 1).

Note! For fail safe reasons the fault relay signals a "fault", when the ACS 400 is powered down.

P Protection Features

The ACS 400 has a number of protective features:

- Overcurrent
- Overvoltage
- Undervoltage
- Overtemperature
- Output earth fault
- Output short circuit
- Input phase loss (3-)
- I/O terminal short circuit protection
- Motor overload protection (see Q)
- Output overload protection (see R)
- Stall protection
- Underload

The ACS 400 has the following LED alarm and fault indicators:

- For location of LEDs, see section E or if ACS-PAN-A control panel is connected, see the instructions on page 29.

Table 8

Red LED: off Green LED: blinking	
ABNORMAL CONDITION	
POSSIBLE CAUSES: <ul style="list-style-type: none"> • Acceleration or deceleration ramp is too fast in relation to load torque requirement • A short voltage interruption 	ABNORMAL CONDITION: <ul style="list-style-type: none"> • ACS 400 cannot fully follow control commands. • Blinking lasts 5 seconds.

Table 9

Red LED: on Green LED: on	
FAULT	
POSSIBLE CAUSES: <ul style="list-style-type: none"> • Transient overcurrent • Over-/undervoltage • Overtemperature • Motor overload (see section Q) 	ACTION: <ul style="list-style-type: none"> • Give a stop signal to reset fault. • Give a start signal to restart the drive.
CHECK: <ul style="list-style-type: none"> • the supply line for disturbances. • the drive for mechanical problems that might cause overcurrent. • that the heat sink is clean. 	NOTE: <ul style="list-style-type: none"> • If the drive fails to start, check that the input voltage is within the tolerance range.

Table 10

Red LED: blinking Green LED: on	
FAULT	
POSSIBLE CAUSE: <ul style="list-style-type: none"> • Output earth fault • Short circuit • DC bus ripple too large 	ACTION: <ul style="list-style-type: none"> • Turn the power off. • Wait for the LEDs to turn off. • Turn the power back on.
CHECK: <ul style="list-style-type: none"> • the insulation in the motor circuit. • Fuses and main phase. 	Caution! This action may start the drive.

Note! Whenever the ACS 400 detects a fault condition, the fault relay activates. The motor stops and the ACS 400 will wait to be reset. If the fault still persists and no external cause has been identified, contact your ACS 400 supplier.

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	9.3	11.1	14.6	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

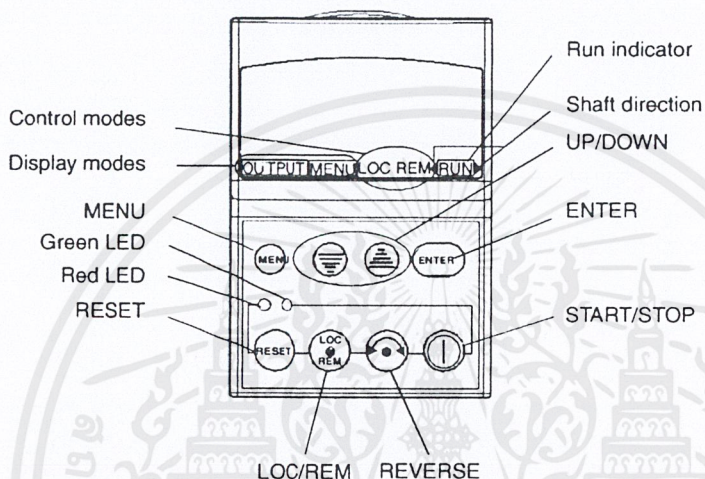
* Power stages are designed for the continuous I_{2NSQ} current. These values are valid when the altitude is less than 1000 m ASL. See Q.

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

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

Application Macro Factory (0)

This macro is intended for applications where there is NO control panel available. It provides a general purpose 2-wire I/O configuration.

The value of parameter 9902 is 0 (FACTORY). DI4 is not connected.



Input signals

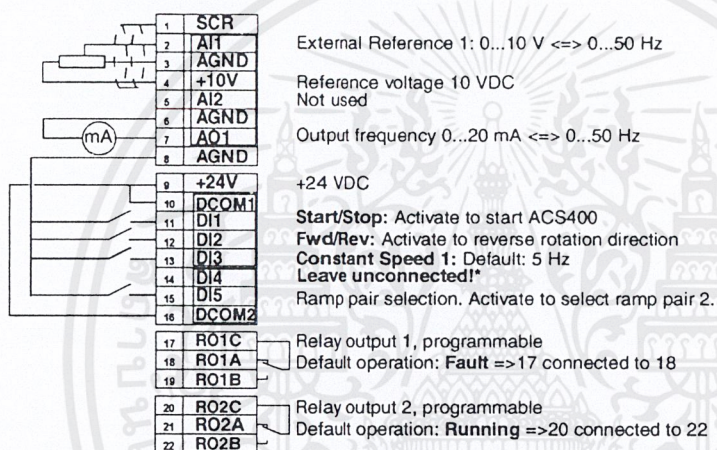
- Start, stop and direction (DI1,2)
- Analogue reference (AI1)
- Constant speed 1 (DI3)
- Ramp pair 1/2 selection (DI5)

Output signals

- An. output AO: Frequency
- Relay output 1: Fault
- Relay output 2: Running

DIP switch

- AI1:  0 - 10 V
AI2:  0(4) - 20 mA



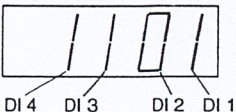
***Note!** DI 4 is used to configure ACS 400. It is read only once when power is connected. All parameters marked with * are determined by the DI4 input.

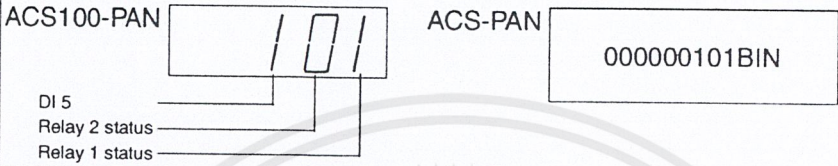
Factory (0) parameter values:

* 1001 EXT 1 COMMANDS	2 (DI1,2)	1503 AO CONTENT MAX	50.0 Hz
1002 EXT 2 COMMANDS	0 (NOT SEL)	1601 RUN ENABLE	0 (NOT SEL)
1003 DIRECTION	3 (REQUEST)	1604 FAULT RESET SEL	6 (START/STOP)
1102 EXT1/EXT2 SEL	6 (EXT1)	2008 MAXIMUM FREQ	50 Hz
1103 EXT REF1 SELECT	1 (AI1)	2105 PREMAGN SEL	0 (NOT SEL)
1105 EXT REF1 MAX	50 Hz	2201 ACC/DEC 1/2 SEL	5 (DI5)
1106 EXT REF2 SELECT	0 (KEYPAD)	4001 PID GAIN	1.0
* 1201 CONST SPEED SEL	3 (DI3)	4002 PID INTEG TIME	60 s
1401 RELAY OUTPUT 1	3 (FAULT (-1))	4101 PID GAIN	1.0
1402 RELAY OUTPUT 2	2 (RUN)	4102 PID INTEG TIME	60 s

Group 01: Operating Data

This group contains drive operating data, including actual signals and fault memories. Actual Signal values are measured or calculated by the drive and they cannot be set by the user. Fault memories can be cleared by the user from the control panel.

Code	Description
0102	SPEED Displays the calculated speed of the motor (rpm).
0103	OUTPUT FREQ Displays the frequency (Hz) applied to the motor. (Also shown in OUTPUT display.)
0104	CURRENT Displays the motor current, as measured by the ACS 400. (Also shown in OUTPUT display.)
0105	TORQUE Output torque. Calculated value of torque on motor shaft in % of motor nominal torque.
0106	POWER Displays the measured motor power in kW. Note! ACS100-PAN will not display the unit ("kW").
0107	DC BUS VOLTAGE Displays the DC bus voltage, as measured by the ACS 400. The voltage is displayed in Volts DC.
0109	OUTPUT VOLTAGE Displays the voltage applied to the motor.
0110	ACS 400 TEMP Displays the temperature of the ACS 400 heatsink in Centigrade.
0111	EXTERNAL REF 1 The value of external reference 1 in Hz.
0112	EXTERNAL REF 2 The value of external reference 2 in %.
0113	CTRL LOCATION Displays the active control location. Alternatives are: 0 = LOCAL 1 = EXT1 2 = EXT2 See "Appendix A", starting page 149, for description of different control locations.
0114	RUN TIME (R) Shows the total running time of the ACS 400 in hours (h). Can be reset by pressing UP and DOWN buttons simultaneously when in parameter set mode.
0115	kWh COUNTER (R) Shows the counted kilowatt hours of the ACS 400 in operation. Can be reset by pressing UP and DOWN buttons simultaneously when in parameter set mode.
0116	APPL BLK OUTPUT The reference value in per cent received from the application block. The value is from PID control or PFC control, depending on the selected macro. Otherwise the value is from 0112 EXT REF 2.
0117	DI1-DI4 STATUS Status of the four digital inputs. Status is displayed as a binary number. If the input is activated, the display will indicate 1. If the input is deactivated, the display will be 0. <div style="display: flex; align-items: center; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>ACS100-PAN</p>  <p>DI 4 DI 3 DI 2 DI 1</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>ACS-PAN</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">000001101BIN</div> </div> </div>

Code	Description
0118	AI1 Relative value of analogue input 1 displayed in %.
0119	AI2 Relative value of analogue input 2 displayed in %.
0121	DI5 & RELAYS Status of digital input 5 and relay outputs. 1 indicates that the relay is energised and 0 indicates that the relay is de-energised. 
0122	AO Value of analogue output signal in milliamperes.
0124	ACTUAL VALUE 1 PID/PFC controller actual value 1 (ACT1), displayed in per cent.
0125	ACTUAL VALUE 2 PID/PFC controller actual value 2 (ACT2), displayed in per cent.
0126	CONTROL DEV Displays the difference between the reference value and the actual value of the PID/PFC controller.
0127	PID ACT VALUE Feedback signal (actual value) for PID/PFC controller.
0128	LAST FAULT Last recorded fault (0=no fault). See "Diagnostics", starting page 143. Can be cleared with the control panel by pressing UP and DOWN buttons simultaneously when in parameter set mode.
0129	PREVIOUS FAULT Previous recorded fault. See "Diagnostics", starting page 143. Can be cleared with the control panel by pressing UP and DOWN buttons simultaneously when in parameter set mode.
0130	OLDEST FAULT Oldest recorded fault. See "Diagnostics", starting page 143. Can be cleared with the control panel by pressing UP and DOWN buttons simultaneously when in parameter set mode.
0131	SER LINK DATA 1 Free data location that can be written from serial link.
0132	SER LINK DATA 2 Free data location that can be written from serial link.
0133	SER LINK DATA 3 Free data location that can be written from serial link.
0134	PROCESS VAR 1 Process variable 1, as selected by the parameters in group 34.
0135	PROCESS VAR 2 Process variable 2, as selected by the parameters in group 34.
0136	RUN TIME Shows the total running time of ACS 400 in thousands of hours (kh).
0137	MWh COUNTER Counts the megawatt hours of ACS 400 in operation.

Group 20: Limits

Code	Description
2003	<p>MAX CURRENT Maximum output current. The maximum output current that the ACS 400 will supply to the motor.</p>
2005	<p>OVERVOLT CTRL DC overvoltage controller enable.</p> <p>Fast braking of a high inertia load causes the DC bus voltage to rise to the overvoltage control limit. To prevent the DC voltage from exceeding the trip limit, the overvoltage controller automatically decreases the braking torque by increasing output frequency.</p> <p>Caution! If a braking chopper and a braking resistor are connected to the ACS 400, this parameter value must be set to 0 to ensure proper operation of the chopper.</p> <p>0 = DISABLE 1 = ENABLE</p>
2006	<p>UNDERVOLT CTRL DC undervoltage controller enable.</p> <p>If the DC bus voltage drops due to loss of input power, the undervoltage controller will decrease the motor speed in order to keep the DC bus voltage above the lower limit. By decreasing the output frequency, the inertia of the load will cause regeneration back into the ACS 400, thus keeping the DC bus charged, and preventing an undervoltage trip. This will increase power loss ride-through on systems with a high inertia, such as a centrifuge or a fan.</p> <p>0 = DISABLE 1 = ENABLE (TIME) Enable with 500 ms time limit for operation. 2 = ENABLE Enable without time limit for operation.</p>
2007	<p>MINIMUM FREQ Operating range minimum output frequency.</p> <p>Note! Keep MINIMUM FREQ ≤ MAXIMUM FREQ.</p>
2008	<p>MAXIMUM FREQ Operating range maximum output frequency.</p>

Group 21: Start/Stop

ACS 400 supports several start and stop modes, including flying start and torque boosting at start. DC current can be injected either before the start command (premagnetising) or automatically right after the start command (starting with DC hold).

DC hold can be used when stopping the drive with ramp. If drive is stopping by coasting, DC brake can be used.

Note! Too long a DC injection time or premagn max time causes the motor to heat up.

Code	Description
2101	START FUNCTION Conditions during motor acceleration. 1 = RAMP Ramp acceleration as set. 2 = FLYING Flying start. Use this setting if the motor is already rotating and the drive will start smoothly at the current frequency. The drive will automatically search the correct output frequency. 3 = TORQUE BOOST Automatic torque boost might be necessary in drives with high starting torque. Torque boost is only applied at start. Boosting is stopped when output frequency exceeds 20 Hz or when output frequency is equal to reference. See also parameter 2103 TORQ BOOST CURR. 4 = FLY + BOOST Activates both the flying start and torque boost. Note! If torque boost is used the switching frequency is always 4 kHz. In this case parameter 2605 LOW NOISE is ignored.
2102	STOP FUNCTION Conditions during motor deceleration. 1 = COAST Motor coasts to stop. 2 = RAMP Ramp deceleration as defined by the active deceleration time 2203 DECELER TIME 1 or 2205 DECELER TIME 2.
2103	TORQ BOOST CURR Maximum supplied current during torque boost. See also parameter 2101 START FUNCTION.
2104	STOP DC INJ TIME DC injection time after modulation has stopped. If 2102 STOP FUNCTION is 1 (COAST), ACS 400 uses DC braking. If 2102 STOP FUNCTION is 2 (RAMP), ACS 400 uses DC hold after ramp.
2105	PREMAGN SEL Options 1- 5 select source for premagnetising command. Option 6 selects start with DC hold. 0 = NOT SEL Premagnetising not used. 1...5 = DI1...DI5 Premagnetising command is received through a digital input. 6 = CONST Constant premagnetising time after start command. Time is defined by parameter 2106 PREMAGN MAX TIME.
2106	PREMAGN MAX TIME Maximum premagnetising time.

Code	Description
2107	<p>START INHIBIT Start inhibit control. Start inhibit means that a pending start command is ignored when:</p> <ul style="list-style-type: none"> • fault is reset, or • Run Enable activates while start command is active, or • mode change from local to remote takes place, or • mode change from remote to local takes place, or • when switching from EXT1 to EXT2 takes place, or • when switching from EXT2 to EXT1 takes place <p>0 = OFF Start inhibit control disabled. Drive will start after fault is reset, Run Enable is activated or mode is changed while there is a pending start command.</p> <p>1 = ON Start inhibit control enabled. Drive will not start after fault is reset, Run Enable is activated or mode is changed. In order to start the drive again, give start command anew.</p>



Group 22: Accel/Decel

Two acceleration/deceleration ramp pairs can be used. If both ramp pairs are used, selection can be made between these in run time through a digital input. The S curve of the ramps is adjustable.

Code	Description
2201	ACC/DEC 1/2 SEL Selects the source for the ramp pair selection signal. 0 = NOT SEL The first ramp pair is used (ACCELER TIME 1/DECELER TIME 1). 1..5 = DI1...DI5 Ramp pair selection is done through a digital input (DI1 to DI5). Digital input deactivated = Ramp pair 1 (ACCELER TIME 1/DECELER TIME 1) is used. Digital input activated = Ramp pair 2 (ACCELER TIME 2/DECELER TIME 2) is used.
2202	ACCELER TIME 1 Ramp 1: time from zero to maximum frequency (0 - MAXIMUM FREQ).
2203	DECELER TIME 1 Ramp 1: time from maximum frequency to zero (MAXIMUM FREQ - 0).
2204	ACCELER TIME 2 Ramp 2: time from zero to maximum frequency (0 - MAXIMUM FREQ).
2205	DECELER TIME 2 Ramp 2: time from maximum frequency to zero (MAXIMUM FREQ - 0).
2206	RAMP SHAPE Acceleration/deceleration ramp shape selection 0 = LINEAR 1 = FAST S CURVE 2 = MEDIUM S CRV 3 = SLOW S CURVE

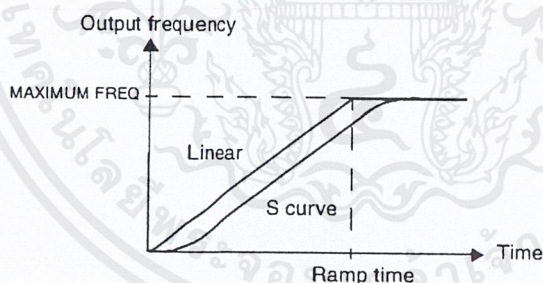


Figure 42 Definition of acceleration/deceleration ramp time.

Group 30: Fault Functions

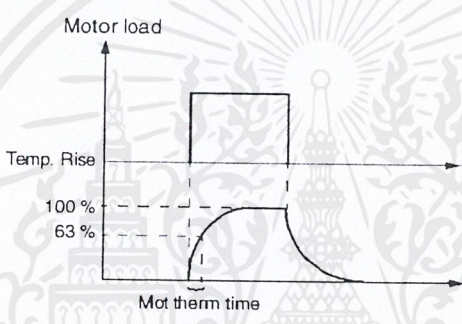
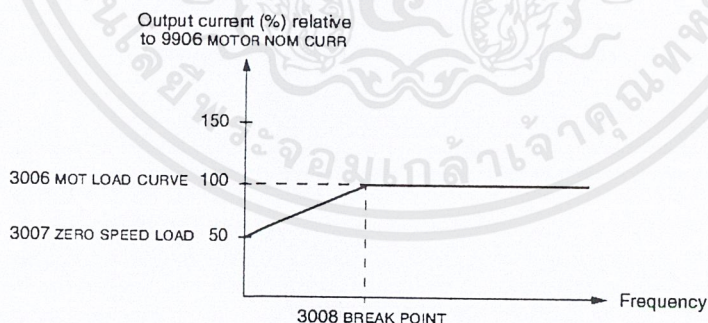
ACS 400 can be configured to respond as desired to certain abnormal external conditions: analogue input fault, external fault signal and panel loss.


In these cases, the drive can either continue operation at current speed or at a set constant speed while showing an alarm, ignore the condition, or trip on a fault and stop.

Motor thermal protection parameters 3004 - 3008 provide a means of adjusting the motor load curve. For example, limiting the load near zero speed might be necessary if the motor does not have a cooling fan.

Stall protection (parameters 3009 - 3012) includes parameters for stall frequency, stall time and current.

Code	Description
3001	<p>AI<MIN FUNCTION Operation in case of AI signal drops below fault limit 3022 AI1 FLT LIMIT or 3023 AI2 FLT LIMIT.</p> <p>0 = NOT SEL No operation.</p> <p>1 = FAULT A fault indication is displayed and the ACS 400 coasts to stop.</p> <p>2 = CONST SP 7 A warning indication is displayed and the speed is set according to parameter 1208 CONST SPEED7.</p> <p>3 = LAST SPEED A warning indication is displayed and the speed is set to the level the ACS 400 was last operating at. This value is determined by the average speed over the last 10 seconds.</p> <p>Caution: If you select CONST SPEED 7 or LAST SPEED, make sure that it is safe to continue operation in case analogue input signal is lost.</p>
3002	<p>PANEL LOSS Operation in case of control panel loss fault.</p> <p>1 = FAULT A fault indication is displayed and the ACS 400 coasts to stop.</p> <p>2 = CONST SP 7 A warning indication is displayed and the speed is set according to parameter 1208 CONST SPEED7.</p> <p>3 = LAST SPEED A warning indication is displayed and the speed is set to the level the ACS 400 was last operating at. This value is determined by the average speed over the last 10 seconds.</p> <p>Caution: If you select CONST SPEED 7 or LAST SPEED, make sure that it is safe to continue operation in case panel is lost.</p>
3003	<p>EXTERNAL FAULT External fault input selection.</p> <p>0 = NOT SEL External fault signal is not used.</p> <p>1..5 = DI1...DI5 This selection defines the digital input used for an external fault signal. If an external fault occurs, i.e. digital input is deactivated, the ACS 400 is stopped and the motor coasts to stop and fault indication is displayed.</p>

Code	Description
3004	<p>MOT THERM PROT Motor overtemperature function. This parameter defines the operation of the motor thermal protection function which protects the motor from overheating.</p> <p>0 = NOT SEL 1 = FAULT Displays a warning indication at the warning level (97.5 % of the nominal value). Displays a fault indication when the motor temperature reaches the 100 % level. The ACS 400 coasts to stop.</p> <p>2 = WARNING A warning indication is displayed when the motor temperature reaches the warning level (95 % of the nominal value).</p>
3005	<p>MOT THERM TIME Time for 63 % temperature rise. This is the time within which the motor temperature reaches 63 % of the final temperature rise. Figure 45 shows motor thermal time definition.</p>  <p>Figure 45 Motor thermal time.</p>
3006	<p>MOT LOAD CURVE Motor current maximum limit. MOTOR LOAD CURVE sets the maximum allowable operating load of the motor. When set to 100 %, the maximum allowable load is equal to the value of Start-up Data parameter 9906 MOTOR NOM CURRENT. The load curve level should be adjusted if the ambient temperature differs from the nominal value.</p>  <p>Figure 46 Motor load curve.</p>
3007	<p>ZERO SPEED LOAD This parameter defines the maximum allowable current at zero speed relative to 9906 MOTOR NOM CURR. Refer to Figure 46.</p>

Code	Description
3008	BREAK POINT Break point of motor load curve. Refer to Figure 46 for an example of a motor load curve. See Figure 48.
3009	STALL FUNCTION This parameter defines the operation of the stall protection. The protection is activated if the output current becomes too high compared to output frequency, refer to Figure 47. 0 = NOT SEL Stall protection is not used. 1 = FAULT When the protection is activated the ACS 400 coasts to stop. Fault indication is displayed. 2 = WARNING A warning indication is displayed. The indication disappears in half the time set by parameter 3012 STALL TIME. 
	Figure 47 Motor stall protection.
3010	STALL CURRENT Current limit for stall protection. Refer to Figure 47.
3011	STALL FREQ HI This parameter sets the frequency value for the stall function. Refer to Figure 47.
3012	STALL TIME This parameter sets the time value for the stall function.
3013	UNDERLOAD FUNCTION Removal of motor load may indicate a process malfunction. The protection is activated if: <ul style="list-style-type: none"> • The motor torque drops below the load curve selected by parameter 3015 UNDERLOAD CURVE. • This condition has lasted longer than the time set by parameter 3014 UNDERLOAD TIME. • Output frequency is higher than 10 % of the nominal frequency of the motor and higher than 5 Hz. 0 = NOT SEL Underload protection is not used. 1 = FAULT When the protection is activated the ACS 400 coasts to stop. Fault indication is displayed. 2 = WARNING A warning indication is displayed.
3014	UNDERLOAD TIME Time limit for underload protection.
3015	UNDERLOAD CURVE This parameter provides five selectable curves shown in Figure 49. If the load drops below the set curve for longer than the time set by parameter 3014, the underload protection is activated. Curves 1...3 reach maximum at the motor rated frequency set by parameter 9907 MOTOR NOM FREQ.

Code	Description
3022	AI1 FLT LIMIT Fault level for analogue input 1 supervision. See parameter 3001 AI<MIN FUNCTION.
3023	AI2 FLT LIMIT Fault level for analogue input 2 supervision. See parameter 3001 AI<MIN FUNCTION.

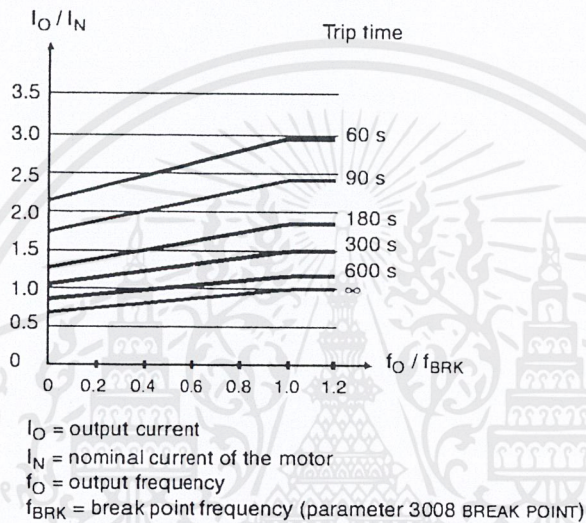


Figure 48 Thermal protection trip times when parameters 3005 MOT THERM TIME, 3006 MOT LOAD CURVE and 3007 ZERO SPEED LOAD have default values.

Table 35 Faults.

Fault Code	Display	Description
1	OVERCURRENT	Output current is excessive. <ul style="list-style-type: none"> Motor load may be too high Acceleration time may be too short (parameters 2201 ACCELER TIME 1 and 2203 ACCELER TIME 2). Motor or motor cable is faulty or connected wrong.
2	DC OVERVOLTAGE	Intermediate circuit DC voltage is excessive. <ul style="list-style-type: none"> Check mains for static or transient overvoltages Deceleration time may be too short (parameters 2202 DECELER TIME 1 and 2204 DECELER TIME 2) Brake chopper (if present) may be underdimensioned
3	ACS400 OVERTEMP	ACS 400 heat sink temperature is excessive. Temperature trip limit is 95 °C. <ul style="list-style-type: none"> Check air flow and fan operation. Check motor power against unit power.
4 **	SHORT CIRCUIT	Fault current. Possible reasons for this fault are: <ul style="list-style-type: none"> There is a short-circuit in the motor cable(s) or motor Supply disturbances
5	OUTPUT OVERLOAD	Inverter overload condition. The ACS 400 output current exceeds the ratings given on page 25 of this manual.
6	DC UNDERVOLTAGE	Intermediate circuit DC voltage is not sufficient. <ul style="list-style-type: none"> Mains phase may be missing Fuse may be blown
7	ANALOGUE INPUT 1	Analogue input 1 loss. Analogue input value is less than MINIMUM AI1 (3022). See also parameter 3001 AI<MIN FUNCTION.
8	ANALOGUE INPUT 2	Analogue input 2 loss. Analogue input value is less than MINIMUM AI2 (3023). See also parameter 3001 AI<MIN FUNCTION.
9	MOTOR OVERTEMP	Motor overtemperature condition as estimated by the ACS 400. Refer to parameters 3004 – 3008.
10	PANEL LOSS	Panel communication loss. Control panel is disconnected when the drive is receiving start, stop and direction commands from the panel. <ul style="list-style-type: none"> - Drive is in local control mode (LOC is shown in the control panel display), or - Drive is in remote control mode (REM is shown) and is parameterised to accept start/stop, direction or reference from the panel. Refer to parameters in groups 10 COMMAND INPUTS and 11 REFERENCE SELECT. See also parameter 3002 PANEL LOSS.
11	PARAMETERING	Parameter values are inconsistent: <ul style="list-style-type: none"> MINIMUM AI1 > MAXIMUM AI1 (parameters 1301, 1302) MINIMUM AI2 > MAXIMUM AI2 (parameters 1304, 1305) MINIMUM FREQ > MAXIMUM FREQ (parameters 2007, 2008) PFC block tries to use IO extension module (NDIO) but the DDCS link is not parameterised properly
12	MOTOR STALL	Motor stall. This may be caused by excessive load or insufficient motor power. Refer to parameters 3009 – 3012.
13	SERIAL COMM LOSS	Serial communication through Standard Modbus Channel is lost. <ul style="list-style-type: none"> Check connections between external control system and the ACS 400. Refer to parameters 5003 COMM FAULT TIME and 5004 COMM FAULT FUNC.
14	EXTERNAL FAULT SIGNAL	External fault is active. See parameter 3003 EXTERNAL FAULT.
15 **	OUTPUT EARTH FAULT	Earth fault. The load on the incoming mains system is out of balance. <ul style="list-style-type: none"> There may be a fault in the motor or motor cable. Motor cable may be too long.

16 **	DC BUS RIPPLE	<ul style="list-style-type: none"> • Ripple voltages on the DC bus are too large. • Mains phase may be missing • Fuse may be blown
17	UNDERLOAD	Motor load is too low. Check for a problem in the driven equipment. Refer to parameters 3013 – 3015.
18		Reserved
19	DDCS LINK	Problem with DDCS link. <ul style="list-style-type: none"> • Check the DDCS option module and the optic fibres. • Check the status of the fieldbus adapter. Refer to appropriate fieldbus adapter manual. • Check connections between external control system and fieldbus adapter. • Alternatively, check the status of the IO extension modules (NDIO), required by PFC block. Refer also to "DDCS Option Module Manual" and parameters 5004 – 5007.
20 *	AI OUT OF RANGE	Analogue input out of range. Check AI level.
21 - 26 **	HARDWARE ERROR	Hardware error. Contact supplier.
Full display blinking (ACS100-PAN) "COMM LOSS" (ACS-PAN)		Serial link failure. Bad connection between the control panel and the ACS 400.

Note! These faults (**) are indicated by a red blinking LED and are reset by turning the power off for a while.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ดีก็เพราะได้รับความช่วยเหลือที่ดีจากบุคคล หน่วยงาน และบริษัท จึงขอขอบคุณผู้ช่วยเหลือที่มีรายนามดังต่อไปนี้

รศ. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ข้อคิดในการทำโครงการ

อ. สุวงษ์ ไสมพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำปรึกษาและสนับสนุนทางด้านมอเตอร์
สมาคมศิษย์เก่า และคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนทางด้านทุนทรัพย์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนทางด้านสถานที่ และอุปกรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สนับสนุนทางด้านอุปกรณ์การทดลอง

ผศ.พิชิต ถ้ายอง ผู้ให้คำปรึกษาทางด้านมอเตอร์ และอินเวอร์เตอร์

อ. ดุสิต สุขสวัสดิ์ ผู้ให้คำปรึกษาและสนับสนุนทางการควบคุมและปรับความเร็ว

อ. พงษ์ศักดิ์ คำมูล ผู้ให้คำปรึกษาและสนับสนุนทางการทดสอบสมรรถนะรถ

อ. เขาว์ ชมภูอิน ไหว ผู้ให้คำปรึกษาและแนะนำเกี่ยวกับรถไฟฟ้า

ดร.จารุวัตร เจริญสุข ผู้ให้คำปรึกษาทางการคำนวณทางกลศาสตร์

ขอขอบคุณพี่วัชระ พี่เล็ก พี่เสบ ผู้ให้คำปรึกษาและสนับสนุนทางด้านในทุกๆด้าน โดยเฉพาะเงินทุนสำรอง ขอขอบคุณน้องๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ

บิดา มารดา และผู้ปกครอง ที่ให้กำเนิด เลี้ยงดู ให้การช่วยเหลือทางด้านทุนทรัพย์ในการศึกษา และการทำการทดลอง

คุณครูผู้ที่เคยประสิทธิ์ประสาทวิชาทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ช่วยพัฒนาทางด้านความรู้ เพื่อเป็นพื้นฐานในการทำโครงการนี้

ขอขอบคุณบริษัท SIEMENS , CPT Thailand , LEONIC, GS Battery , ภูเก็ต V-Autotech และด้านเก็บของที่ให้การสนับสนุนทางด้านข้อมูล สถานที่และอุปกรณ์

เพื่อนๆทุกคนที่มีส่วนในปริญญาบัตรใบนี้ของพวกเรา ขอขอบคุณโต๊ะปิงปองหน้าภาคที่เป็นที่รองรับอารมณ์

ขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่มีได้เอ่ยนามมา ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารอ้างอิง

- [1] ฉัตรชัย หงษ์อุเทน, “กลศาสตร์ยานยนต์ I”, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2539.
- [2] เผด็จ แสนเกษม, สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตพระนครเหนือ, “กลศาสตร์ยานยนต์”, บริษัทเอชเอ็นกรุ๊ป จำกัด, กรุงเทพฯ, 2539.
- [3] M.G. SAY, “Alternating Current Machines”, Longman Singapore Publishers(Pte) Ltd., Fifth Edition, 1986.
- [4] รศ.ดร. พีรศักดิ์ วรสุนทรโรสถ, “เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [5] พิชิต ล้ายอง, “Electrical Machine 1”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [6] “การปรับปรุงรถไฟฟ้ากระแสตรง”, ปรินูญานิพนธ์ปีการศึกษา 2538, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [7] เผด็จ แสนเกษม, “กลศาสตร์ยานยนต์”, เอช. เอ็น. กรุ๊ป จำกัด, กรุงเทพฯ, 2539
- [8] “รถไฟฟ้ากระแสตรง”, ปรินูญานิพนธ์ปีการศึกษา 2543, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [9] “ระบบประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่แบบสวิตซ์โหมด”, ปรินูญานิพนธ์ปีการศึกษา 2541, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง