# การควบคุมความเร็วของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟในรถไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้มอเตอร์ดุมล้อ

นายธวัชชัย ชลยาวิลาศ
นายธนากร ใจยา

โครงงานเสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
พฤษภาคม พ.ศ. 2560

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

# Velocity Control of Regenerative Braking System in Small Electric Vehicles with In-Wheel Motor

Tawutchai Chonyawilat

Thanakorn Jaiya

An Engineering Project Submitted in Partial Fulfillment

Of the Requirements for the Bachelor of Engineering Degree

In Mechanical Engineering

December 2017

Copyright 2017 by University of Phayao

โครงงานทางวิศวกรรมเครื่องกล

เรื่อง

การควบคุมความเร็วของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟในรถไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้มอเตอร์ดุมล้อ

ของ

นายธวัชชัย ชลยาวิลาศ

นายธนากร ใจยา

ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยพะเยา

ประธานกรรมการ

(ดร.วิชญ์พล ฟักแก้ว)

กรรมการ

(ผศ.ดร.ปุริมพัฒน์ สัทธรรมนุวงศ์)

กรรมการ

(ดร.สุธรรม อรุญ)

21 พฤษภาคม 2561

# กิตติกรรมประกาศ

โครงงานวิศวกรรมฉบับนี้ ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน ดร.วิชญ์พล ฟักแก้ว ที่ได้ให้ความกรุณา อุทิศเวลาให้คำปรึกษา แนะนำเพื่อปรับปรุงแก้ไขตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ รวมถึงเอาใจใส่และให้กำลังใจในการทำงานวิจัยตลอดมาขอขอบพระคุณ คณะกรรมการที่กรุณาให้แนวคิดและคำแนะนำเสนอความคิดเห็นในส่วนที่ขาดหายและเกินขอบเขตในการทำโครงงานครั้งนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ประโยชน์ของการศึกษาโครงงานข้าพเจ้าขอมอบให้แด่มีพระคุณในการอบรมสั่งสอนข้าพเจ้าทุกท่าน

นายธวัชชัย ชลยาวิลาศ

นายธนากร ใจยา

| | |
|---|---|
| **ชื่อเรื่อง** | การควบคุมความเร็วของระบบรีเจนเนอเรทีฟเบรกในรถไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้มอเตอร์ดุล้อ |
| **ผู้ดำเนินงาน** | นายธวัชชัย ชลยาวิลาศ<br>นายธนากร ใจยา |
| **อาจารย์ที่ปรึกษา** | ดร.วิชญ์พล ฟักแก้ว |
| **ประเภทสารนิพนธ์** | โครงงานทางวิศวกรรม วศ.บ. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล<br>มหาวิทยาลัยพะเยา 2560 |
| **คำสำคัญ** | รถไฟฟ้า,มอเตอร์ดุมล้อ,ระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟ |


## บทคัดย่อ

มอเตอร์ดุมล้อสามารถใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากลักษณะเด่นดังกล่าวโครงการนี้จึงได้พัฒนาระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟ สำหรับรถไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้มอเตอร์ดุมล้อ ซึ่งระบบเบรกประกอบด้วย ตัวเรียงกระแสสามเฟสและตัวยกระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถจำกัดแรงดันและกระแสได้ พลังงานที่ได้จากการเบรกจะถูกนำไปชาร์จแบตเตอรี่สมรรถนะของระบบเบรกถูกทดสอบโดยใช้ระบบกับเก็บพลังงานด้วยล้อตุนกำลังซึ่งใช้แทนรถที่กำลังเคลื่อนที่ ผลการทดสอบพบว่า ความเร็วของรถสามารถควบคุมโดยการจำกัดกระแสที่ที่ชาร์จแบตเตอรี่ ระบบเบรกสามารถใช้งานได้ดีในช่วงที่มอเตอร์มีความเร็วรอบ 180 – 830 rpm ประสิทธิภาพของเบรกเมื่อไม่พิจารณาผลของความเสียดทานเท่ากับ 76% ประสิทธิภาพของการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่เมื่อกระแสที่ชาร์จแบตเตอรี่เท่ากับ 1.8 A เท่ากับ 30% และมีแนวโน้มลดลงเมื่อกระแสที่ชาร์จแบตเตอรี่ลดลง

**Project Title** Velocity Control of Regenerative Braking System in Small Electric Vehicles with In-Wheel Motor

**Author** Mr. Thawutchai Chonyawilat
Mr. Thanakorn Jaiya

**Degree** Bachelor of Engineering (Mechanical Engineering), University of Phayao, 2017

**Advisor** Dr. Wichaphon Fakkaew

**Keywords** Regenerative Break, Hub motor, Electric Vehicles

## ABSTRACT

The reverse function of in-wheel motors of electric vehicle are generators. With this feature, this project was developed a regenerative braking system for a small electric vehicles with in-wheel motor. The system consists of 3-phase rectifier circuit and DC to DC boost converter with voltage and current limiting circuit. The recovery energy from the braking system is delivered to charge battery.The performance of the braking system were evaluated using flywheel energy storage system which was represent the kinetic energy of moving car. The results show that the angular velocity of flywheel can be controlled by limiting charging current to the battery. The braking system work well when the speed are between 180 – 830 rpm. The efficiency without considering friction is 76% and the recovery energy efficiency at charging curring of 1.8 A is 30% and tend to decrease when charging current is decreased.

# สารบัญ

**หน้า**


กิตติกรรมประกาศ ........ ก

บทคัดย่อ ........ ข

ABSTRACT ........ ค

สารบัญ ........ ง

สารบัญตาราง ........ ช

สารบัญรูปภาพ ........ ซ

สารบัญสัญลักษณ์ ........ ญ

บทที่ 1 ........ 1

บทนำ ........ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ ........ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ ........ 3

1.3 สมมติฐานของโครงงาน ........ 3

1.4 ขอบเขตของโครงการ ........ 3

บทที่ 2 ........ 5

การสำรวจวรรณกรรม ........ 5

บทที่ 3 ........ 11

ความรู้พื้นฐานและทฤษฎี ........ 11

3.1 มอเตอร์ดุมล้อ ........ 13

3.2 วงจรเรียงกระแสแบบ 3 เฟส (3-phase rectifier) ........ 15

3.3 วงจรเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC to DC boost converter) ........ 15

บทที่ 4 ........ 17

วิธีดำเนินการวิจัย ........ 17

4.1 ออกแบบและสร้างชุดควบคุมความเร็วของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟ ........ 17

4.1.1 ข้อกำหนดในการออกแบบ ........ 17

4.1.2 แนวคิดในการออกแบบ ........ 18

4.1.3 ผลการออกแบบ ........ 18

4.2 การออกแบบแท่นทดสอบ ........ 20

4.2.1. ข้อกำหนดในการออกแบบ ........ 20

4.2.2. แนวคิดในการออกแบบ ........ 20

4.2.3. รายการคำนวณและผลการออกแบบผลการออกแบบ ........ 21

4.3 การทดสอบสมรรถนะของเบรกรีเจนเนอเรทีฟกรณีขับรถลงเขา ........ 25

4.4 การทดสอบประสิทธิภาพการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ (Energy Recovery) ........ 26

บทที่ 5 ........ 28

ผลการทดสอบสมรรถนะ ........ 28

5.1 ข้อจำกัดในการใช้งานเบรกรีเจนเนอเรทีฟ ........ 28

5.2 การทดสอบสมรรถนะของเบรกรีเจนเนอเรทีฟกรณีขับรถลงเขา ........ 29

5.3 การทดสอบประสิทธิภาพการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ ........ 32

บทที่ 6 ..... 36

บทสรุป ..... 36

6.1 สรุปผลการทดสอบ ..... 36

6.2 ปัญหาและอุปสรรค ..... 37

6.2 ข้อเสนอแนะ ..... 37

เอกสารอ้างอิง ..... 38

ภาคผนวก ..... 38

ประวัติผู้ทำวิจัย ..... 59

# สารบัญตาราง

**หน้า**

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลของล้อเซกเวย์ ....................21
ตารางที่ 4.2 คุณลักษณะเฉพาะของแท่นทดสอบ ....................24

# สารบัญรูปภาพ

**หน้า**


รูปที่ 1.1 ส่วนประกอบของ Brushless Hub Motor [2] ....2
รูปที่ 2.1 ทดสอบระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟ ....5
รูปที่ 2.2 การกักเก็บพลังงานโดยใช้ล้อตุนกำลัง.... 6
รูปที่ 2.3 ทดสอบการเกิดแรงบิดที่ล้อ ....6
รูปที่ 2.4 วงจรโหมดรวมมอเตอร์ ....7
รูปที่ 2.5 การใช้เบรกรีเจนเนอเรทีฟควบคุมแอพพลิเคชั่น.... 7
รูปที่ 2.6 การตรวจวัดและการควบคุมกระแส.... 8
รูปที่ 2.7 การคบคุมสมรรถนะในการเบรกล้อหน้าและล้อหลัง.... 9
รูปที่ 2.8 การทดลองมอเตอร์ดุมล้อ.... 9
รูปที่ 2.9 ระบบควบคุมเสถียรภาพการกระจายแรงบิด ....10
รูปที่ 3.1 แรงกระทำกับรถยนต์ที่กำลังเคลื่อนที่ ....11
รูปที่ 3.2 การกักเก็บพลังงานแบบล้อช่วยแรง ....12
รูปที่ 3.3 การส่งกำลังโดยใช้ความเสียดทาน ....13
รูปที่ 3.4 Brushless dc motor ....14
รูปที่ 3.5 วงจร Brushless dc motor ....14
รูปที่ 3.6 วงจรเรียงกระแสแบบ 3 เฟส ....15
รูปที่ 3.7 วงจรเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.... 16
รูปที่ 4.1 ล้อเซกเวย์ ....17
รูปที่ 4.2 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ....17
รูปที่ 4.3 แนวคิดในการออกแบบวงจร ....18
รูปที่ 4.4 3-Phase Rectifier ....18
รูปที่ 4.5 Boost Converter.... 19
รูปที่ 4.6 ระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟ ....19
รูปที่ 4.7 แนวคิดในการออกแบบแท่นทดสอบ ....20

# สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.8 การวัดค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของตัวโรเตอร์ ........................................................................22
รูปที่ 4.9 แท่นทดสอบ ........................................................................................................................23
รูปที่ 4.10 วงจรตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์ ...........................................................................................24
รูปที่ 4.11 รถไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้มอเตอร์ดุมล้อ....................................................................................... 24
รูปที่ 4.12 การทดสอบสมรรถนะของเบรกรีเจนเนอเรทีฟกรณีขับรถลงเขา.................................... 26
รูปที่ 4.13 การทดสอบประสิทธิภาพการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ (Energy Recovery) ................27
รูปที่ 5.1 ผลการทดลองประสิทธิภาพของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟ ...............................................31
รูปที่ 5.2 การลดลงของพลังงานจลน์เมื่อดึงกระแสไปชาร์จแบตเตอรี่ที่ 0.2 – 1.8 A .......................32
รูปที่ 5.3 พลังงานที่เบรกรีเจนเนอเรทีฟชาร์จให้แบตเตอรี่ที่ กระแส 0.2 – 1.8 A ..........................33
รูปที่ 5.4 ประสิทธิภาพของเบรกในช่วงกระแส 0.2 – 1.8 A ..............................................................33
รูปที่ 5.5 ผลของพลังงานจลน์เริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพในการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่...........35

# สารบัญสัญลักษณ์

| สัญลักษณ์ | | หน่วย |
|---|---|---|
| $\dot{W}_E$ | กำลังของเครื่องยนต์ | J |
| $\dot{W}_B$ | กำลังที่สูญเสียที่ระบบเบรก | J |
| $\dot{W}_{loss}$ | กำลังสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในระบบส่งกำลัง | J |
| $\dot{W}_D$ | กำลังสูญเสียจากแรงต้านอากาศ | J |
| $g$ | ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก | $m/s^2$ |
| $I$ | โมเมนต์ความเฉื่อย | $kg/m^2$ |
| $\omega$ | อัตตราเร็วเชิงมุม | $rad/s$ |
| $\dot{W}_{in}$ | กำลังที่จ่ายให้ระบบเท่ากับ | J |
| $\dot{W}_{out}$ | พลังงานออกจากระบบ | J |
| $\dot{W}_L$ | การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน | J |
| $\mu_s$ | สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต | |
| $P_{max}$ | กำลังสูงสุด | $Watt$ |

# สารบัญสัญลักษณ์ (ต่อ)

| สัญลักษณ์ | | หน่วย |
|---|---|---|
| $T$ | แรงบิด | $N.m$ |
| $V$olt | แรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่ | $V$ |
| $I$ | กระแส | $A$ |
| $\eta_1$ | ประสิทธิภาพของเบรก | |
| $T_f$ | แรงแรงบิดเนื่องจากความเสียดทานในมอเตอร์ | $N.m$ |

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

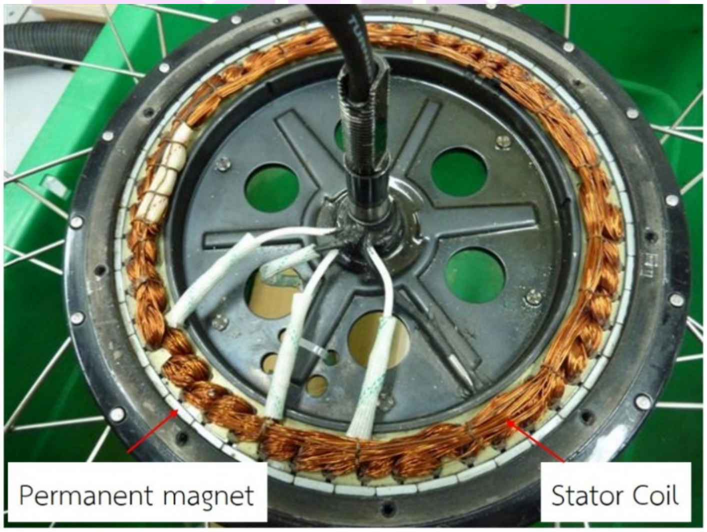
ในปัจจุบันเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศที่สำคัญในเมืองและมีส่วนทำให้เกิดปรากฏการณ์โลกร้อน เกิดฝนกรด หมอกปนควัน กลิ่น รวมทั้งปัญหาระบบทางเดินหายใจและสุขภาพของมนุษย์ ดังนั้นในอนาคตรถไฟฟ้ามีแนวโน้มที่จะถูกนำมาใช้แทนรถที่ใช้เครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน เพราะรถไฟฟ้ามีประสิทธิภาพที่สูงกว่าและไม่ปล่อยมลพิษทางอากาศ นิสิตสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลมหาวิทยาลัยพะเยาจึงมีแนวคิดที่จะทำโครงการประดิษฐ์รถไฟฟ้าสำหรับใช้ภูมิประเทศแบบภูเขา โดยแบ่งเป็นโครงการย่อยสี่โครงการ ได้แก่ ระบบช่วงล่าง ระบบบังคับเลี้ยว ระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟ และระบบกักเก็บพลังงานแบบล้อช่วยแรง สำหรับโครงงานนี้จะมุ่งศึกษาการควบคุมความเร็วของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟในรถไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้มอเตอร์ดุมล้อ

ในอนาคตอันใกล้รถไฟฟ้ามีแนวโน้มจะถูกนำมาใช้ทดแทนรถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในเนื่องจากประสิทธิภาพที่สูงกว่าและไม่ปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ พื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นภูมิประเทศแบบภูเขา ถนนบางช่วงมีความลาดชันเป็นระยะทางยาวหลายกิโลเมตร ในช่วงขาขึ้นรถยนต์ต้องใช้กำลังมากในการขึ้นเขา ในช่วงขาลงพลังงานศักย์โน้มของรถจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ เมื่อคนขับเหยียบเบรก หรือใช้เกียร์ต่ำ พลังจลน์บางส่วนต้องมีการดึงออกจากระบบในรูปของงานเนื่องจากแรงเสียดทานที่ล้อหรืองานเนื่องจากการอัดตัวของอากาศในเครื่องยนต์และระบายทิ้งในรูปของความร้อน สำหรับรถไฟฟ้าที่ถูกใช้งานในภูมิประเทศแบบภูเขาหากไม่มีระบบสะสมพลังงานในช่วงที่ลงเนิน อาจจะทำให้ระยะทางในการเดินทางต่อหนึ่งรอบการประจุไฟฟ้าสั้นลงมากเมื่อเทียบกับการวิ่งทางราบ วิธีการหนึ่งที่สามารถดึงพลังงานจลน์ขณะลงเขามาเก็บในไว้ในรูปพลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานจลน์ของการหมุนคือการใช้ระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Braking System)

เบรกรีเจนเนอเรทีฟจะทำหน้าที่ดึงพลังงานจลน์ของรถมาเก็บไว้ที่ตัวสะสมพลังงานในช่วงระยะเวลาหนึ่งและจะเปลี่ยนกลับเป็นพลังงานจลน์อีกครั้งเมื่อต้องการให้รถยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง เบรกรีเจนเนอเรทีฟถือว่าเป็นเทคโนโลยีที่เกิดใหม่ในวงการอุตสาหกรรมรถยนต์และมี

แนวโน้มจะถูกนำมาใช้มากขึ้นในรถไฟฟ้าเนื่องจากมีการพิสูจน์แล้วว่าสามารถลดการสูญเสียพลังงานในขณะการเบรกและทำให้ประสิทธิภาพของรถยนต์สูงขึ้น

มอเตอร์ดุมล้อ (In–wheel motor) นิยมนำมาใช้เป็นล้อจักรยานยนต์ไฟฟ้า และมีแนวโน้มที่จะถูกใช้ในรถไฟฟ้ามากขึ้น เนื่องจากสามารถลดการสูญเสียในระบบส่งกำลังและสามารถดัดแปลงชุดควบคุมมอเตอร์ให้สามารถทำหน้าที่เป็นเบรกรีเจนเนอเรทีฟ ได้โครงสร้างภายในจะประกอบด้วยชุดขดลดที่ติดอยู่กับดุมล้อที่ไม่มีการเคลื่อนเมื่อเทียบกับตัวรถ มีแม่เหล็กถาวรติดอยู่กับล้อโดยรอบโดยวางขั้วเหนือสลับขั้วใต้สลับกันไปตามเส้นรอบวง ดังรูปที่ 1.1 เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ขดลวดเป็นห้วง ๆ จะทำให้แม่เหล็กถาวรหมุนโดยรอบชุดขดลวด




รูปที่ 1.1 ส่วนประกอบของ Brushless Hub Motor [2]

จากโครงสร้างดังกล่าวฮับมอเตอร์สามารถใช้เป็นเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าได้ ขณะที่รถกำลังเคลื่อนที่ แม่เหล็กถาวรของมอเตอร์จะเคลื่อนที่รอบ ๆ ขดลวด การเคลื่อนที่ของแม่เหล็กถาวรจะทำให้สนามแม่เหล็กที่กระทำกับขดลวดเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในขดลวด กระแสไฟฟ้าที่ได้สามารถนำไปสะสมไว้ที่ตัวเก็บประจุหรือนำไปชาร์ตแบตเตอร์รี่ได้ ทั้งนี้แรงบิดที่ต้านการหมุนของล้อจะแปรผันตามกับปริมาณกระแสที่ใช้ชาร์ตแบตเตอรี่สำหรับยานไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ดุมล้อ 4  ตัวที่ทำงานเป็นอิสระแยกจากกัน ขณะที่ไม่มีการจ่ายกระแสให้มอเตอร์และยานยนต์กำลังเคลื่อนที่ด้วยพลังงานจลน์ที่สะสมไว้มอเตอร์จะยังคงหมุนและจะเกิด

แรงบิดต้านที่ล้อเนื่องจากการเกิดกระแสวน (Eddy current) บนแกนของตัวสเตเตอร์ ดังนั้นจึงไม่นิยมใช้ระบบเบรกเจนเนอเรทีฟในจักรยานไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวมีความจำเป็นสำหรับรถไฟฟ้าที่ทำงานในภูมิประเทศที่เป็นเนินเขา

ผู้วิจัยและทีมวิจัยมีแนวคิดที่จะสร้างต้นแบบรถไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้มอเตอร์ดุมล้อ 4 ตัวเป็นระบบขับเคลื่อนเพื่อใช้ในภูมิประเทศที่เป็นเนินเขา ในส่วนของงานวิจัยนี้จะออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ดุมล้อให้สามารถทำหน้าที่เป็นระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟได้ และจะมีการออกแบบและสร้างแท่นทดสอบจำลองการขับขี่โดยใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบล้อตุนกำลัง (Flywheel energy storage) สำหรับประเมินสมรรถนะของการควบคุมความเร็วของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟในรถไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้มอเตอร์ดุมล้อด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อออกแบบและสร้างชุดควบคุมความเร็วของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟสำหรับรถไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้มอเตอร์ดุมล้อ
2. เพื่อออกแบบและสร้างแท่นทดสอบจำลองการขับขี่สำหรับประเมินสมรรถนะของการควบคุมความเร็วของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟในรถไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้มอเตอร์ดุมล้อ
3. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นพลังงานไฟฟ้า และทดสอบสมรรถนะของชุดควบคุมความเร็วของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟ

## 1.3 สมมติฐานของโครงงาน

ความเร็วรถยนต์สัมพันธ์กับแรงเบรกที่ล้อ แรงเบรกที่ล้อสัมพันธ์กับกระแสที่ไหลในระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟดังนั้นความเร็วรถยนต์สามารถควบคุมโดยการจำกัดกระแสที่ไหลในระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟ

## 1.4 ขอบเขตของโครงการ

- ในการวิจัยนี้จะถือว่ารถไฟฟ้าใช้มอเตอร์ดุมล้อเป็นต้นกำลัง สามารถทำความเร็วสูงสุด 20 km/h

- แท่นทดสอบสำหรับการจำลองการขับขี่มีลักษณะเป็นระบบกักเก็บพลังงานแบบล้อตุนกำลัง (Flywheel energy storage) สามารถสร้างพลังงานจลน์สูงสุดได้เทียบเท่ากับพลังงานจลน์ของหนึ่งในสี่ของรถยนต์มวล 240 ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 50 km/h (5800J)
- ระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟสามารถสร้างแรงบิดได้สูงสุดได้เทียบเท่าแรงกระทำในแนวขนานกับถนนของรถมวล 240 ที่อยู่บนถนนที่มีความลาดชัน 10% (ความลาดชันสูงสุดตามมาตรฐานและลักษณะของทางหลวง งานทางและเขตทางหลวง)

# บทที่ 2

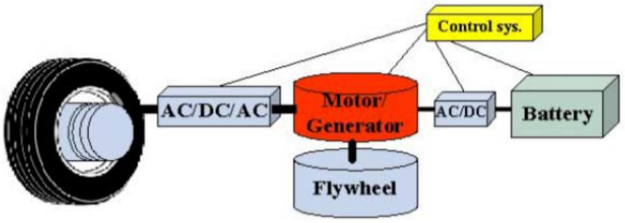
## การสำรวจวรรณกรรม

Nian et.al. (2014) ได้สร้างระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟ ที่ปรับให้เข้ากับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน การควบคุมแบบ PID ถูกใช้เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์ และระบบฟัซซี่ลอจิกถูกใช้ควบคุมการกระจายแรงเบรก การทดสอบสมรรถนะใช้การจำลองสภาพเพื่อตรวจสอบสถานะภาพประจุและการจ่ายไฟของแบตเตอร์รี่ แรงเบรกและกระแสที่ไหลในระบบ การทดสอบการใช้งานจริงทำได้โดยต่อเพลาของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟเข้ากับเพลามอเตอร์ที่ทำหน้าที่จำลองสภาพการขับขี่โดยตรง ระบบดังกล่าวสามารถเพิ่มระยะทางในการขับขี่ และสามารถนำไปใช้ได้จริง ดังรูปที่ 2.1

รูปที่ 2.1 ทดสอบระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟ

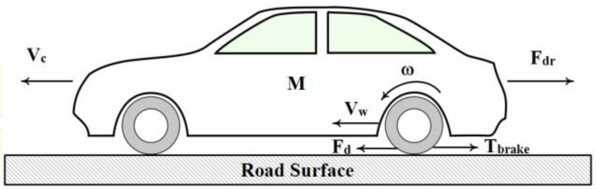
Itani et.al. (2016) ได้นำเสนอ การจัดการการสะสมพลังงานในระบบกักเก็บพลังงานร่วมแบตเตอรี่-ล้อช่วยแรง ในระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟ ที่ความเร็วต่ำ ชุดตัวต้านทานสำหรับการกำจัดพลังงานเหลือใช้ ถูกใช้เพื่อป้องกันกระแสเกินและศักย์ไฟฟ้าเกิน ระบบควบคุมแรงบิดสูงสุด โดยการจำกัดกระแสและความต่างศักย์ ถูกใช้เพื่อจำกัดความเร็ว ที่ความเร็วสูง สมรรถนะของระบบดังกล่าวถูกประเมินโดยใช้การจำลองสภาพ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ระบบดังกล่าวสามารถทำงานได้ดีโดยทั่วไปมอเตอร์ไร้แปรงถ่านจะมีชุดขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก 3 ชุด ขณะทำงานจะมีขดลวด 2 ชุดถูกกระตุ้นสลับกันไปเพื่อให้มอเตอร์หมุน โดยจะมีขดลวดอีก 1 ที่ไม่ได้ใช้งานซึ่งสามารถใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟได้

**Janpan et.al. (2011)** จึงได้เสนอการควบคุมมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่านให้สามารถทำหน้าที่มอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟในเวลาเดียวกัน การทดสอบสมรรถนะใช้การจำลองสภาพ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า 75% ของแรงดันที่ใช้ป้อนให้ระบบสามารถนำกลับมาประจุตัวสะสมพลังงานแบบตัวเก็บประจุได้ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวไม่ได้พิจารณาแรงบิดต้านที่กระทำกับมอเตอร์ ดังรูปที่ 2.2



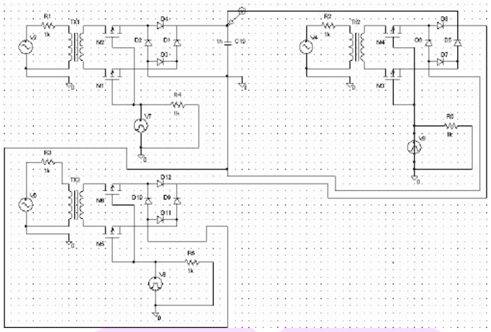

รูปที่ 2.2 การกักเก็บพลังงานโดยใช้ล้อตุนกำลัง

**Tousi et.al. (2016)** ได้นำเสนอกลยุทธ์การควบคุมแรงเบรกเพื่อป้องกันล้อล็อคตายในระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟทำงานร่วมกับระบบเบรกไฮดรอลิคในรถไฟฟ้า โดยการปรับสัดส่วนแรงที่ได้จากเบรกไฮดรอลิคและเบรกรีเจนเนอเรทีพให้พอเหมาะ สมรรถนะของระบบดังกล่าวถูกประเมินโดยการจำลองสภาพ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า สมรรถนะของระบบเบรกเป็นไปตามคุณลักษณะเฉพาะของการเบรกที่เหมาะสมในหลาย ๆ เงื่อนไขการขับขี่ ดังรูปที่ 2.3



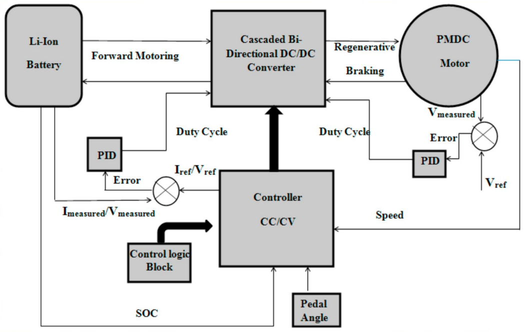

รูปที่ 2.3 ทดสอบการเกิดแรงบิดที่ล้อ

(Aneke and Wang, 2016) หรือต่อล้อรถกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Serpi et.al., 2014 และ Mao and Zhu, 2016) แล้วจึงแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานรูปแบบอื่น ๆ ในระบบการขับเคลื่อนตรง 4 ล้อในช่วงที่มีการลดความเร็วมอเตอร์สามารถส่งผ่านพลังงานจลน์ไปยังตัวเก็บพลังงานโดยการเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ทันที ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรโหมดรวมมอเตอร์

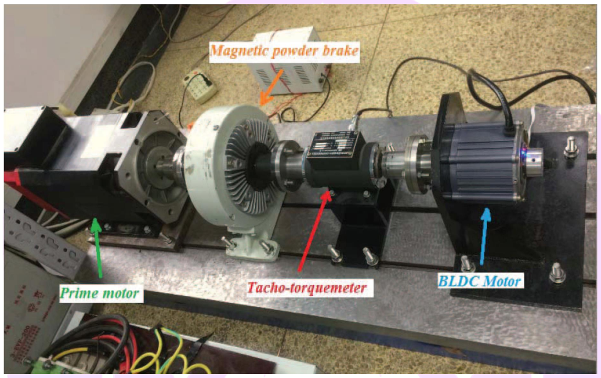
**Mehta and Hemamalini (2017)** ได้นำเสนอกลยุทธ์การควบคุมกระแสและความต่างศักย์ในระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟในยานยนต์สองล้อเพื่อให้ดึงพลังงานมาชาร์ตแบตเตอรี่ให้มากที่สุดในช่วงการเบรก และได้นำเสนอเทคนิคการควบคุมแบบฟัซซี่ในการคำนวณกระแสที่ชาร์จเข้าสู่แบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังได้นำวงจรเพิ่ม-ลดแรงดันอัตโนมัติกระแสตรงแบบสองทิศทาง (bi-directional DC/DC buck-boost converter) มาใช้ในระบบเพื่อให้สามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้อย่างต่อเนื่องถึงแม้ความต่างศักย์ไฟฟ้าของกระแสไหลย้อนจะต่ำกว่าศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่ก็ตาม การประเมินสมรรถนะของระบบใช้การจำลองสภาพ ผลการศึกษาพบว่าระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิผล ดังรูปที่ 2.5




รูปที่ 2.5 การใช้เบรกรีเจนเนอเรทีฟควบคุมแอพพลิเคชั่น

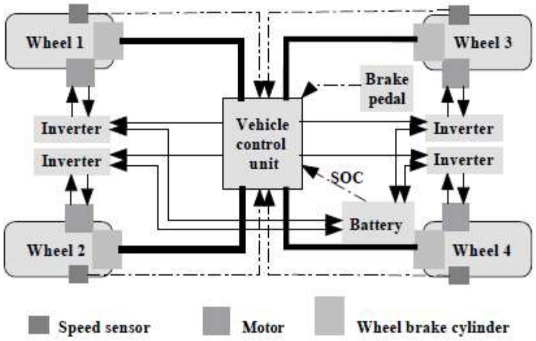
**Xu Jiaqun and Cui Haotian (2015)** ได้นำเสนอวิธีการใหม่ที่มีความเรียบง่ายและประหยัดสำหรับการควบคุมเบรกรีเจนเนอเรทีฟในช่วงขับเคลื่อนตัวขับมอเตอร์จะทำงานตามฟังก์ชันปกติ แต่เมื่อมีการเบรกตัวขับมอเตอร์จะทำหน้าปิด-เปิดชุด PWM เพื่อให้กระแสที่เกิดขึ้นใน

มอเตอร์ไหลกลับไปชาร์จแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการตรวจวัดและการควบคุมกระแส เพื่อให้ผู้ขับขี่รู้สึกสบายและเพิ่มประสิทธิภาพในการชาร์จแบตเตอรี่ การทดสอบการใช้งานจริงทำได้โดยต่อเพลาของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟเข้ากับเพลามอเตอร์ที่ทำหน้าที่จองลองสภาพการขับขี่โดยตรง ระบบดังกล่าวสามารถเพิ่มระยะทางในการขับขี่ และสามารถนำไปใช้ได้จริง ดังรูปที่ 2.6



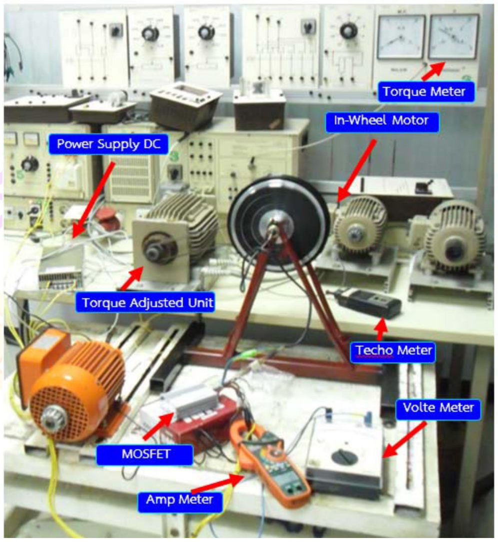

รูปที่ 2.6 การตรวจวัดและการควบคุมกระแส

Wei Xu et.al. (2016) ได้พัฒนาแบบจำลองและนำเสนอกลยุทธ์การควบคุมเบรกรีเจนเนอเรทีฟสำหรับรถไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์ดุมล้อที่กำลังเคลื่อนที่ในแนวตรงเพื่อให้การเบรกมีความปลอดภัยและสามารถนำพลังงานกลับมาใช้ได้มากที่สุด สำหรับการคบคุมสมรรถนะในการเบรกสัดส่วนแรงเบรกที่กระทำกับล้อหน้าและล้อหลังจะอ้างอิงกับภาระโหลดที่ล้อ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างล้อกับพื้นถนนมากที่สุด สำหรับการนำพลังงานกลับมาใช้ให้มากที่สุด ตัวควบคุมถูกออกแบบโดยอ้างอิงจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นเพื่อจำลองการทำงานร่วมกันของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟกับระบบเบรกไฮดรอลิคโดยที่จะกระจายแรงในระบบเบรกทั้งสองให้เหมาะสมแก่การนำพลังงานกลับมาใช้ ประสิทธิผลของระบบดังกล่าวถูกยืนยันจากผลการศึกษาจากการจำลองสภาพ ดังรูปที่ 2.7



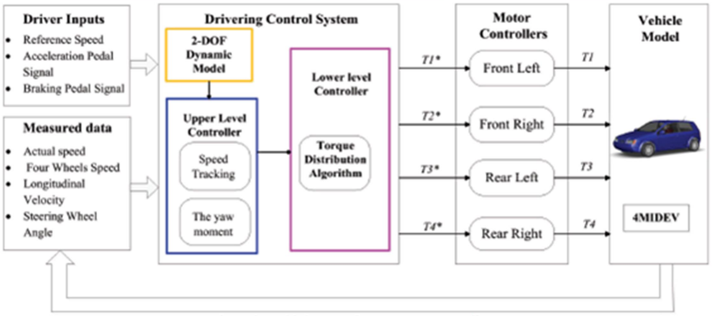

รูปที่ 2.7 การคบคุมสมรรถนะในการเบรกล้อหน้าและล้อหลัง

**Chanpeng and Hachanont (2014)** ได้การออกแบบมอเตอร์ดุมล้อสำหรับใช้กับรถไฟฟ้า ขนาด 350 วัตต์ เมื่อนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยสมมุติว่ารถรับภาระโหลด 70 กิโลกรัม วิ่งด้วยความเร็ว 20 km/h พบว่ามอเตอร์มีประสิทธิภาพสูงถึง 82.56% ที่แรงบิด 2.5 N.m และสร้างแรงบิดสูงสุดได้ถึง 6.25 N.m ที่กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์ 348.76 วัตต์โดยทั่วไปมอเตอร์ไร้แปรงถ่านจะมีชุดขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก 3 ชุด ขณะทำงานจะมีขดลวด 2 ชุดถูกกระตุ้นสลับกันไปเพื่อให้มอเตอร์หมุน โดยจะมีขดลวดอีก 1 ที่ไม่ได้ใช้งานซึ่งสามารถใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟได้ ดังรูปที่ 2.8




รูปที่ 2.8 การทดลองมอเตอร์ดุมล้อ

Cao et.al. (2017) ได้ทดลองใช้ระบบควบคุมเสถียรภาพการกระจายแรงบิดที่เหมาะสมสำหรับรถขับเคลื่อนสี่ล้อในรถยนต์ไฟฟ้าโดยได้ทดลองโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าสี่ล้อขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าอิสระโดยใช้แรงบิดฉุดและเบรกโดยควบคุมมอเตอร์ตามคำสั่งสัญญาณชุดควบคุมยานพาหนะ (VCU ผ่าน CAN บัสและ VCU จะสามารถประมวลผลไดร์ฟเวอร์ได้ แล้วต่อสัญญาณ input ให้กับมุมเลี้ยวพวงมาลัย, สัญญาณเหยียบเร่ง, และแจกจ่ายแรงบิดฉุดกับแรงจากการเบรกสำหรับตัวควบคุมมอเตอร์ทั้ง 4 ตัวบน รถไฟฟ้า4ล้อนั้น จะเลือกรถยนต์ แบบ hatchback Class B ซึ่งได้ผลตามคาดคือรักษาความเร็วได้ดีและควบคุมแรงบิดให้คงที่ได้ในระยะที่ยาว ซึ่งระบบดังกล่าวจะได้การควบคุมการกระจายแรงบิดที่มีเสถียรภาพและรักษาความเร็วได้ดี ดังรูปที่ 2.9




รูปที่ 2.9 ระบบควบคุมเสถียรภาพการกระจายแรงบิด

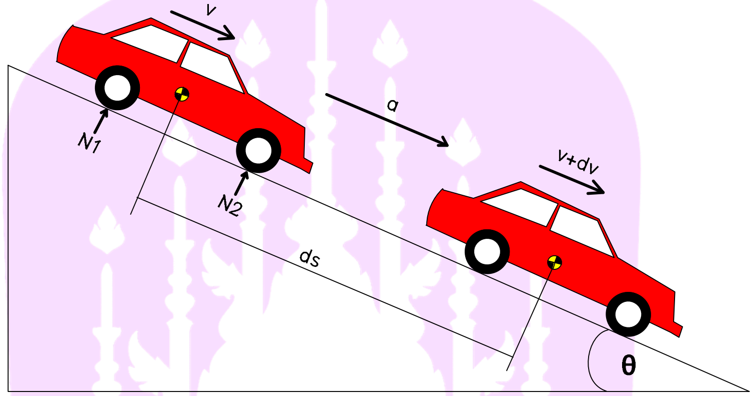
ยานยนต์ไฟฟ้าเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถประยุกต์ใช้กับภาคการขนส่งทางถนนและมีแนวโน้มที่จะขยายตัวในอนาคตอันใกล้ ยานยนต์ไฟฟ้ามีข้อได้เปรียบของประสิทธิภาพในการใช้พลังงานและการปลดปล่อยสารมลพิษ [1] เนื่องจากแนวคิดพื้นฐานของยานยนต์ไฟฟ้าคือ การใช้พลังงานไฟฟ้าจากพลังงานสะอาดมาขับเคลื่อนยานยนต์

จากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง การประเมินสมรรถนะ นิยมใช้การจำลองสภาพเนื่องจากประหยัดค่าใช้จ่าย แต่อาจจะไม่สอดคล้องกับสภาวะการขับขี่จริง การทดสอบสมรรถนะในห้องปฏิบัติการมักจะนิยมต่อระบบเบรกรีเจนเนอเรทีพเข้ากับมอเตอร์อีกตัวโดยตรงซึ่งต้องอาศัยการเขียนโปรแกรมที่ซับซ้อน เพื่อลดความซับซ้อนของการควบคุมมอเตอร์โครงงานนี้จึงได้สร้างแท่นทดสอบสมรรถนะสำหรับจำลองสภาพการขับขี่โดยให้แท่นทดสอบมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเทียบเท่ากับรถที่ต้องการทดสอบสมรรถนะของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟ

# บทที่ 3

# ความรู้พื้นฐานและทฤษฎี

## แรงกระทำกับรถยนต์ที่กำลังเคลื่อนที่




รูปที่ 3.1 แรงกระทำกับรถยนต์ที่กำลังเคลื่อนที่

ขณะที่รถยนต์เคลื่อนที่ลงเขาแรงที่กระทำกับรถยนต์แสดงได้ดังรูปที่ 3.1 จากกฎของนิวตัน $\Sigma F = ma$ และความสัมพันธ์ $vdv = ads$ จะได้ว่า

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}mv^2\right) = \Sigma F \frac{ds}{dt} \quad (3.1)$$

เมื่อ $F$ คือแรงต่าง ๆ ที่กระทำกับรถ $m$ คือมวลของรถ $v$ คือความเร็วรถ $a$ คือความเร่งของรถ $s$ คือระยะทางตามทิศการเคลื่อนที่ของรถและ $t$ คือเวลา สมการ (3.1) อาจเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\dot{T} = \Sigma \dot{W} \quad (3.2)$$

เมื่อ $T = mv^2/2$ คือพลังงานจลน์ของรถ และ $\dot{W}$ คือกำลังที่ให้กับรถ นั่นคือการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของรถจะเท่ากับกำลังสุทธิที่ให้กับรถ สมการ (3.2) อาจเขียนใหม่ได้ดังนี้

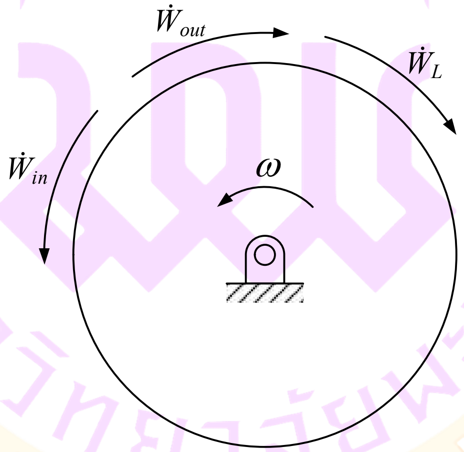
$$\dot{T} = \dot{W}_E - \dot{W}_B - \dot{W}_{loss} - \dot{W}_D + mgv\sin\theta \quad (3.3)$$

เมื่อ $\dot{W}_E$ คือกำลังของเครื่องยนต์ $\dot{W}_B$ คือกำลังที่สูญเสียที่ระบบเบรก $\dot{W}_{loss}$ คือกำลังสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในระบบส่งกำลัง $\dot{W}_D$ คือกำลังสูญเสียจากแรงต้านอากาศ $g$ คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก และ $\theta$ คือความเอียงของถนน ซึ่งกำหนดให้มีค่าเป็นบวกเมื่อรถเคลื่อนที่ลงเขากำหนดให้มีค่าเป็นลบเมื่อรถเคลื่อนที่ขึ้นเขา

**ระบบกักเก็บพลังงานแบบล้อช่วยแรง**

สำหรับวัตถุเกร็งที่มีโมเมนต์ความเฉื่อยรอบจุดศูนย์กลางมวลเท่ากับ $I$ กำลังหมุนรอบแกนที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวลด้วยความเร็วเชิงมุม $\omega$ พลังงานจลน์ของระบบจะเท่ากับ $T_F = \frac{1}{2}I\omega^2$ ถ้ากำลังที่จ่ายให้ระบบเท่ากับ $\dot{W}_{in}$ การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทานเท่ากับ $\dot{W}_L$ และระบบถูกดึงพลังงานออกจากระบบเท่ากับ $\dot{W}_{out}$ การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของรถจะเท่ากับ

$$\dot{T}_F = \dot{W}_{in} - \dot{W}_{out} - \dot{W}_L \tag{3.4}$$



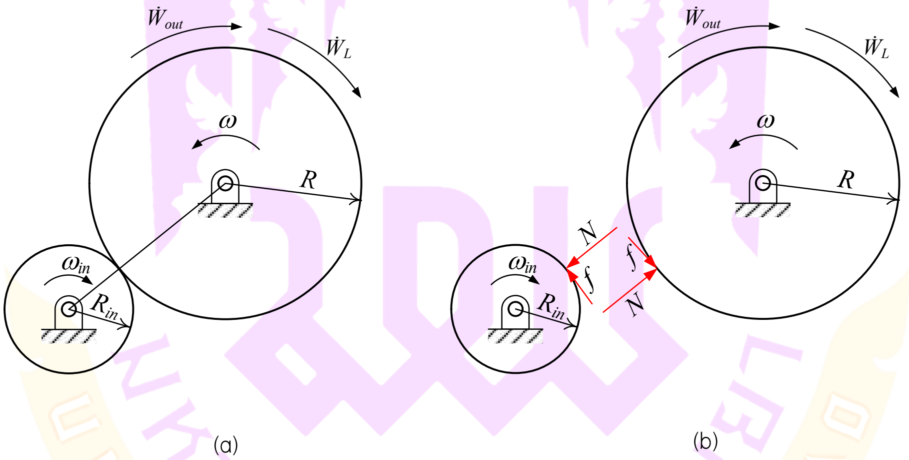

รูปที่ 3.2 การกักเก็บพลังงานแบบล้อช่วยแรง

**การส่งกำลังโดยใช้ความเสียดทาน**

พิจารณาจากกลมรัศมี $R$ กับ $R_{in}$ สัมผัสกันดังรูปที่ 3.3 แรงตั้งฉากที่เกิดขึ้นตรงผิวสัมผัสเท่ากับ $N$ แรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสเท่ากับ $f$ ประสิทธิภาพในการส่งกำลังโดยใช้ความเสียดทานจะมีประสิทธิภาพสูงสุดถ้าไม่เกิดการไถลระหว่างผิวสัมผัส นั้นคือ $f < \mu_s N$ เมื่อ $\mu_s$ คือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต ดังนั้นกำลังสูงสุดที่สามารถส่งผ่านระหว่างผิวสัมผัสจะเท่ากับ

$$P_{max} = \mu_s N R_{in} \omega_{in} = \mu_s N R \omega \qquad (3.4)$$

จากสมการเราสามารถทำให้เกิดการส่งกำลังได้สูงสุดโดยการเลือกใช้คู่วัสดุที่มีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตสูง หรือทำให้เกิดแรงกดระหว่างผิวสัมผัสสูง ๆ แต่ในทางปฏิบัติการเพิ่มแรงกดระหว่างผิวสัมผัสจะทำให้แบริ่งรับภาระหนักและเกิดความเสียดทานในข้อต่อมาก ดังนั้นการเพิ่มแรงกดระหว่างผิวสัมผัสจึงไม่เป็นที่นิยม

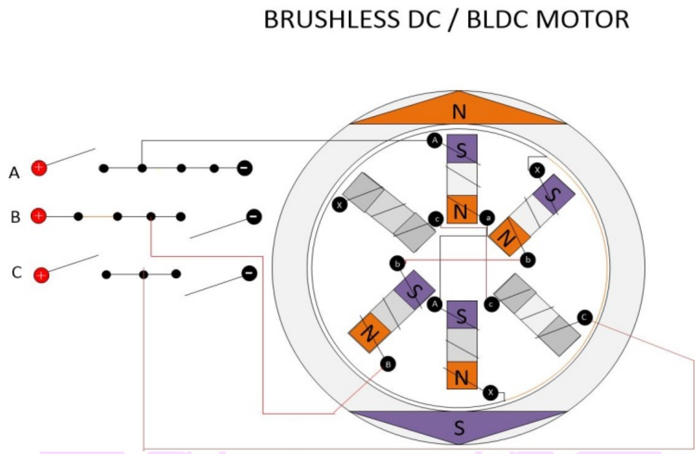



รูปที่ 3.3 การส่งกำลังโดยใช้ความเสียดทาน

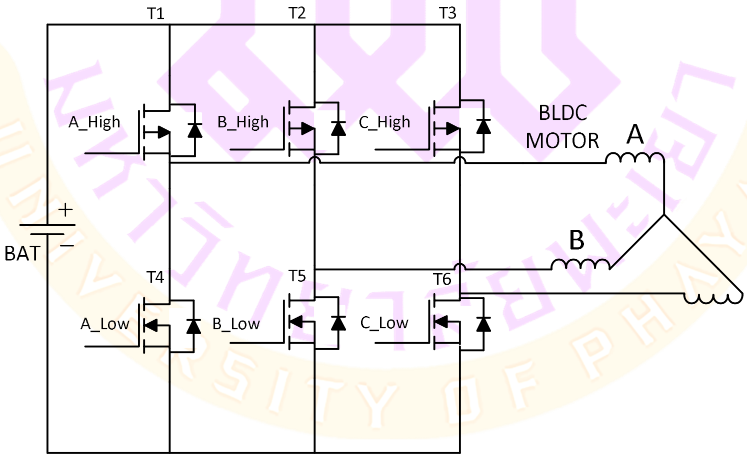
**3.1 มอเตอร์ดุมล้อ**

มอเตอร์ดุมล้อ เป็นมอเตอร์ที่ไร้แปรงถ่าน โดยอาศัยแรงดูดและแรงผลัก ระหว่างขั้วแม่เหล็กเมื่อกระแสไหลผ่านขดลวดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก โดยมอเตอร์ดุมล้อจะการทำงานครั้งละสองเฟส ผลลัพธ์ที่ได้จะทำให้เกิดแรงบิดสูง โดยจะมีตัวฮอลล์เซนเซอร์ (Hall sensor) ซึ่งใช้วัดความเข้มสนามแม่เหล็ก ติดไว้ที่สเตเตอร์ (stator) เพื่อตรวจจับตำแหน่งสำหรับใช้ควบคุม

ความเร็วของมอเตอร์ ดังภาพที่ 3.4 ตัวอย่างวงจรขับมอเตอร์แสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งประกอบด้วย MOSFET จำนวน 6 ควบคุมการปิดเปิดโดยใช้ลอจิกเกต ควบคุมความเร็วโดยใช้หลักการของ พัลส์วิดโมดูเลชัน (Pulse Width Modulation) ในปัจจุบันตัวขับมอเตอร์ดุมล้อสามารถหาซื้อได้ตามร้านค้าออนไลน์ในราคาที่ไม่แพงและสามารถใช้งานได้ดี



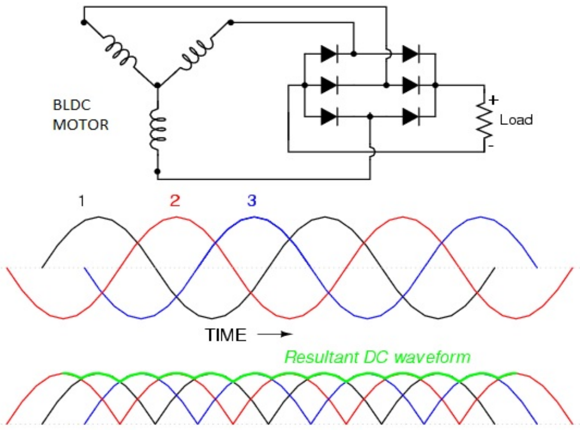

รูปที่ 3.4 Brushless dc motor




รูปที่ 3.5 วงจร Brushless dc motor

### 3.2 วงจรเรียงกระแสแบบ 3 เฟส (3-phase rectifier)

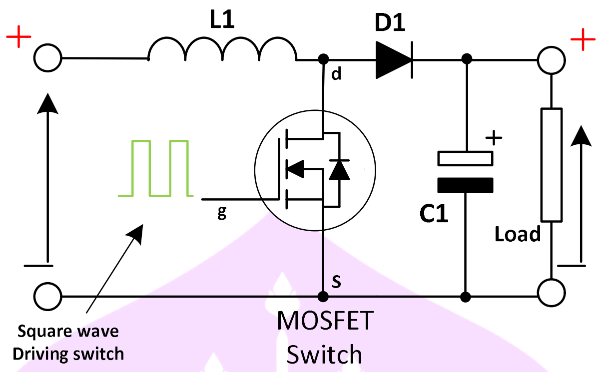
มอเตอร์ดุมล้อสามารถทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ขณะที่ตัวโรเตอร์กำลังหมุนด้วยความเร็วค่าหนึ่งจะเกิดความต่างศักย์ที่ขดลวด กระแสไฟฟ้าที่ได้จากรีเจนเนอเรทีฟเบรกจะเป็นกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ก่อนนำไปประจุเก็บไว้ในแบตเตอรี่ จำเป็นต้องมีการเรียนกระแสให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงก่อน วงจรเรียงกระแสแบบ 3 เฟสประกอบด้วย ไดโอด 6 ตัว ต่อกันดังภาพที่วงจรสำเร็จรูปของวงเรียงกระแสแบบ 3 เฟสที่ราคาไม่แพงแต่ใช้งานได้ดีสามารถหาซื้อได้ทั่วไปตามร้านค้าออนไลน์




ภาพที่ 3.6 วงจรเรียงกระแสแบบ 3 เฟส

### 3.3 วงจรเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC to DC boost converter)

วงจรเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะทำหน้าที่แปลงศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงให้สูงขึ้น โดยที่ศักย์ไฟฟ้าขาออกจะสูงกว่าศักย์ไฟฟ้าขาเข้ามักใช้ยกระดับศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซล่าเซลล์ให้สูงพอที่จะประจุไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่ได้ สำหรับในที่นี้จะนำไปใช้ยกระดับความต่างศักย์ที่ได้จากเบรกรีเจนเนอเรทีฟให้เพียงพอต่อการประจุกระแสไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่ ดังรูปที่ 3.7




รูปที่ 3.7 วงจรเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

**วงจรรักษาระดับแรงดัน** (Voltage Regulator Circuit)

เมื่อแรงดันอินพุตมีการเปลี่ยนแปลง วงจรสามารถคงค่าแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ วงจรรักษาระดับแรงดันซึ่งมีการทำงาน 2 ลักษณะคือ การรักษาระดับแรงดันขณะที่แรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลง (Line regulation) และการรักษาระดับแรงดันขณะที่โหลดเปลี่ยนแปลง (Load regulation)

**วงจรจำกัดกระแส** (Current Limiter)

วงจรจำกัดกระแสใช้ในกรณีที่ต้องการจำกัดไม่ให้วงจรใช้กระแสมากเกินไป นิยมใช้ในวงจรชาร์จถ่าน หรือแบตเตอรี่ เพื่อให้การชาร์จเป็นไปอย่างมีประสิทธิ์ภาพและยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

# บทที่ 4

# วิธีดำเนินการวิจัย

## 4.1 ออกแบบและสร้างชุดควบคุมความเร็วของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟ

### 4.1.1 ข้อกำหนดในการออกแบบ

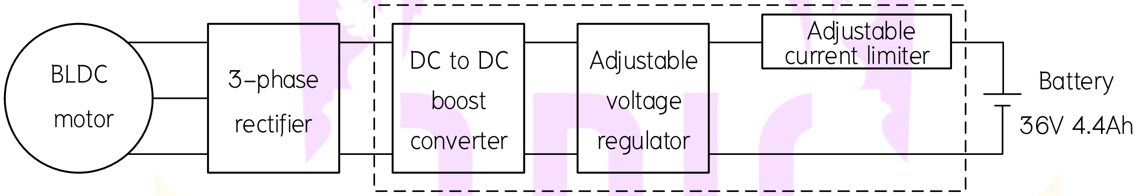
โครงงานนี้ใช้มอเตอร์ดุมล้อแบบไร้แปรงถ่าน ขนาด 350 วัตต์ ใช้กับแหล่งจ่าย 36 V ความเร็วรอบขณะไม่มีโหลด 800 rpm เส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 นิ้ว ดังรูปที่ 4.1 ทำหน้าที่เป็นเบรกรีเจนเนอเรทีฟ กระแสไฟฟ้าที่ได้จะนำไปชาร์จให้กับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน 36V 4.4Ah ดังภาพที่ 4.2 ในขณะชาร์จต้องการแรงดัน 42V กระแสไม่เกิน 2A

รูปที่ 4.1 มอเตอร์ดุมล้อ

รูปที่ 4.2 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

### 4.1.2 แนวคิดในการออกแบบ

ส่วนประกอบของวงจรไฟฟ้าในระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟแสดงในรูปที่ 4.3 กระแสไฟฟ้าที่ได้จากฮับมอเตอร์จะเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ แต่การชาร์จแบตเตอรี่ต้องใช้ไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ตัวเรียงกระแสแบบ 3 เฟสในการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากตัวเรียงกระแสแบบ 3 เฟส ไม่สูงพอที่จะชาร์จเข้าแบตเตอรี่ ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อยกระดับแรงดันให้สูงพอที่จะชาร์จแบตเตอรี่ การชาร์จแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนต้องเป็นโหมด กระแสคงที่และแรงดันคงที่ แต่จากหลักการทำงานของมอเตอร์ กระแสไฟฟ้าย้อนกลับ (back electromotive force) จะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของมอเตอร์ เมื่อทำการเบรกความเร็วของมอเตอร์ย่อมลดลง ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากตัวเพิ่มแรงดันเปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบของมอเตอร์ซึ่งไม่เหมาะต่อการชาร์จแบตเตอรี่ ดังนั้นจึงต้องมีตัวรักษาแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ เพื่อรักษาแรงดันของการชาร์จแบตเตอรี่ เนื่องจากแรงบิดต้าน (Resistant torque) จะแปรผันกับกระแสที่ชาร์จให้กับแบตเตอรี่ ดังนั้นจึงต้องมีตัวจำกัดกระแส เพื่อให้สามารถความคุมแรงเบรกได้



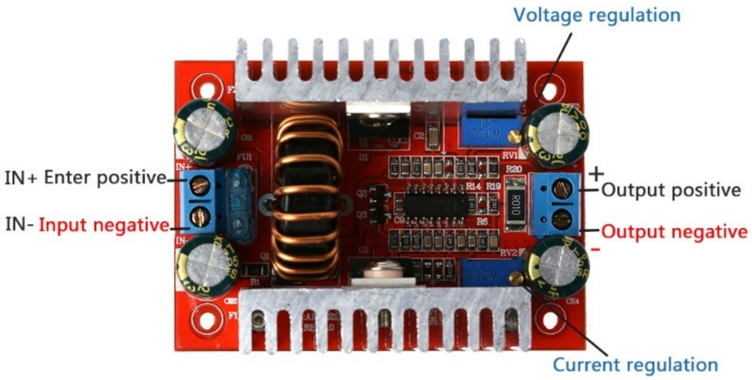

รูปที่ 4.3 แนวคิดในการออกแบบวงจร

### 4.1.3 ผลการออกแบบ

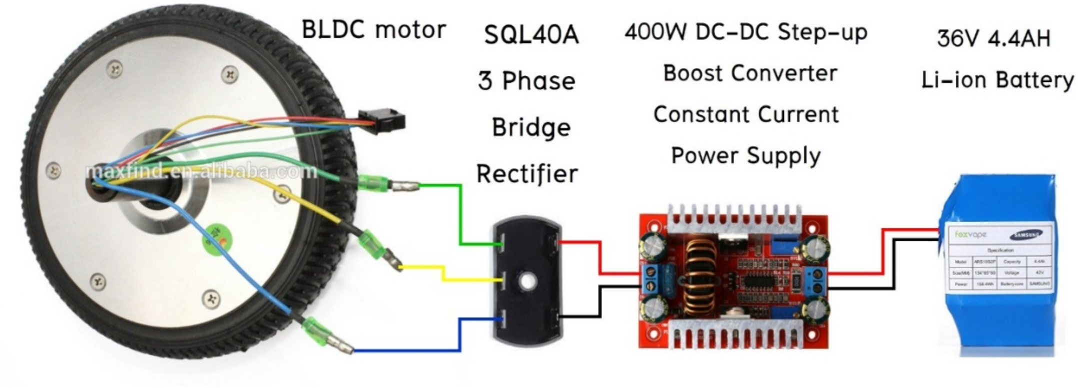
ตัวเรียงกระแสแบบ 3 เฟส ใช้ Bridge Rectifier เบอร์ SQL40A ดังรูปที่ 4.4 สามารถทนแรงดันได้สูงสุด 1000 V และทนกระแสได้สูงสุด 40 A

รูปที่ 4.4 3-Phase Rectifier

ภาพที่ 4.5 แสดงแผงวงจรแหล่งจ่ายชนิด 400 W DC / DC Converters จากผู้ผลิต OOTDTY สามารถทำงานที่แรงดันขาเข้า 8.5 – 50 V สามารถยกระดับแรงดันให้มีแรงดันเอาต์พุต 10 – 60 V ขึ้นอยู่กับการปรับตั้งค่าสามารถจ่ายกระแสคงที่ได้ 0.2 – 12 A ขึ้นอยู่กับการปรับตั้งค่า ดังนั้นแผงวงจรนี้สามารถทำหน้าที่เป็นตัวยกระดับแรงดัน เป็นตัวรักษาแรงดันแบบปรับค่าได้ และเป็นตัวจำกัดกระแสได้ การต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อสร้างระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟแสดงใน ภาพที่ 4.6




รูปที่ 4.5 Boost Converter




รูปที่ 4.6 ระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟ

### 4.2 การออกแบบแท่นทดสอบ

ในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟในห้องปฏิบัติการ เราจำเป็นต้องสร้างแท่นทดสอบที่สามารถจำลองสภาพการขับขี่ในสภาวะต่าง ๆ ได้

#### 4.2.1. ข้อกำหนดในการออกแบบ

1. แท่นทดสอบสามารถจำลองสภาพการขับขี่บนทางราบและลงเขาความชันไม่เกิน 10% (ประมาณ $6^{\circ}$)

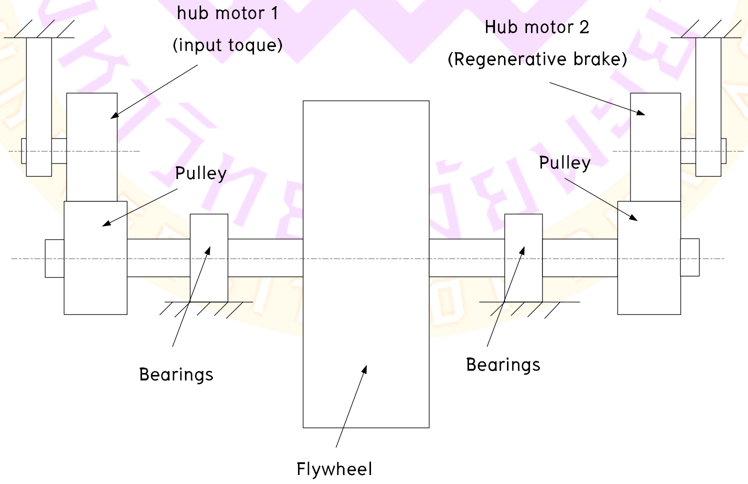
2. แท่นทดสอบต้องสามารถเก็บพลังงานจลน์ได้เทียบเท่ากับ 1 ใน 4 ของพลังงานจลน์สูงสุดของรถ รวมผู้โดยสาร (มวลรวมประมาณ 240 kg) ที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 50 km/h

3. แท่นทดสอบกักเก็บพลังงานจลน์โดยใช้ล้อตุนกำลัง

4. แท่นทดสอบสามารถวัดความเร็วรอบของล้อรถและล้อตุนกำลังได้ และสามารถวัดแรงบิดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ได้

#### 4.2.2. แนวคิดในการออกแบบ

แท่นทดสอบมีลักษณะเป็นล้อช่วยแรงสวมอยู่บนเพลากลมตัน โดยมีตัวรองรับเป็นแบริ่งสองตัว ปลายเพลาทั้งสองด้านสวมกับพูลเลย์ตัวเล็กต่อกับมอเตอร์ดุมล้อโดยใช้การสัมผัสซึ่งมอเตอร์ดุมล้อตัวแรกจะเป็นตัวจ่ายไฟและมอเตอร์ดุมล้อตัวที่สองจะเป็นเบรกรีเจนเนอเรทีฟ




รูปที่ 4.7 แนวคิดในการออกแบบแท่นทดสอบ

**4.2.3. รายการคำนวณและผลการออกแบบผลการออกแบบ**

1. มอเตอร์ที่ใช้เป็นต้นกำลังให้กับแท่นทดสอบจะใช้มอเตอร์ที่มีอยู่แล้วซึ่งม คุณลักษณะดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลของล้อเซกเวย์

| | | | |
|---|---|---|---|
| Type of Motor | Brushless DC motor | Rated Voltage | 36 V |
| Model | JQ-1002 | No Load Current | 0.9 A |
| Wheel Size | 6 inch | Max torque | 18 N.m |
| Rated Speed | 620±10 rpm | Weight | 2.8 kg |
| Rated Power | 350 W | Rated Efficiency | ≥ 80 % |

2. การหาขนาดโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อตุนกำลัง

ล้อตุนกำลังต้องสามารถสะสมพลังงานจลน์ได้เทียบเท่ากับหนึ่งในสี่ของพลังงานจลน์สูงสุดของรถ นั่นคือ

$$\frac{1}{2}I\omega_{max}^2 = \frac{1}{4}\left(\frac{1}{2}mv_{max}^2\right)$$

สมมุติพูลเลย์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้วดังนั้นความเร็วเชิงมุมสูงสุดล้อของล้อตุนกำลังเท่ากับ $\frac{6}{4} \times 620 = 930 \text{ rpm}$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{1}{2}I\left(930 \times \frac{2\pi}{60}\right)^2 = \frac{1}{4}\left(\frac{1}{2}(240)\left(50 \times \frac{1000}{3600}\right)^2\right)$$

$$I = 1.2 \text{ kg.m}^2$$

การวัดค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของตัวโรเตอร์อาศัยหลักการต่อไปนี้ หลังจากมอเตอร์ถูกถ่วงสมดุลแล้ว เมื่อนำมวล $m$ มาติดห่างจากแกนเพลาเป็นระยะ $R$ ดังภาพที่ 4.8 เมื่อหมุนโรเตอร์ไปจากตำแหน่งสมดุลเล็กน้อยด้วยมุม $\theta$ จะทำให้โรเตอร์แกว่งด้วยคาบการแกว่ง $T$ สมการการเคลื่อนของระบบคือ

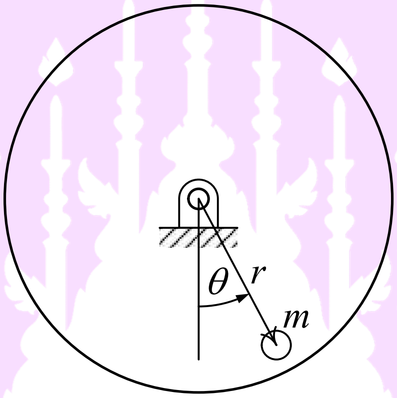
$$(I + mr^2)\ddot{\theta} + mgr\theta = 0$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{mgr}{I + mr^2}}$$

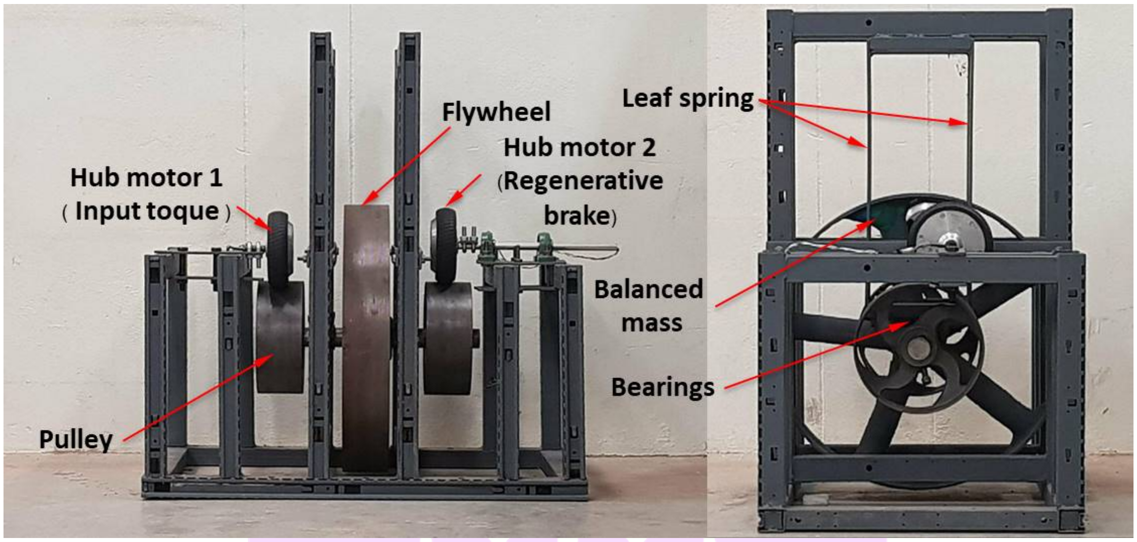
ดังนั้น

$$I = \frac{mgrT^2}{4\pi^2} - mr^2$$




รูปที่ 4.8 การวัดค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของตัวโรเตอร์

การสร้างชุดทดสอบจะใช้วัสดุอุปกรณ์ที่หาซื้อได้ตามท้องตลาด ไม่มีการสั่งทำขึ้นมาใหม่ ล้อตุนกำลังใช้พูลเลย์ของโรงสีข้าวเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 นิ้ว พูลเลย์ที่แตะกับล้อใช้พูลเลย์เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว เมื่อสวมพูลเลย์ทั้ง 3 ตัวเข้ากับเพลาตันขนาด 2 นิ้ว ตามตำแหน่งที่ได้ออกแบบไว้ แล้ววัดค่าโมเมนต์ความเฉื่อยตามวิธีที่กล่าวไป โรเตอร์จะมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเท่ากับ 0.97 kg.m$^2$ เมื่อทดลองนำมอเตอร์มาแตะกับกับพูลเลย์ตัวเล็กพบว่าเกิดการไถลระหว่างล้อกับผิวพูลเลย์ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากแรงเสียดทานที่ต้องใช้หมุนโรเตอร์มีค่าสูงเนื่องจากใช้พูลเลย์รัศมีน้อยเกินไป รวมถึงพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างล้อกับพูลเลย์มีค่าค่อนข้างน้อย ดังนั้นจึงใช้พูเลย์เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้วมาสวมแทน ซึ่งปรากฏว่าระบบสามารถทำงานได้ดีรูปที่ 4.9 แสดงแท่นทดสอบที่สร้างขึ้นจริง

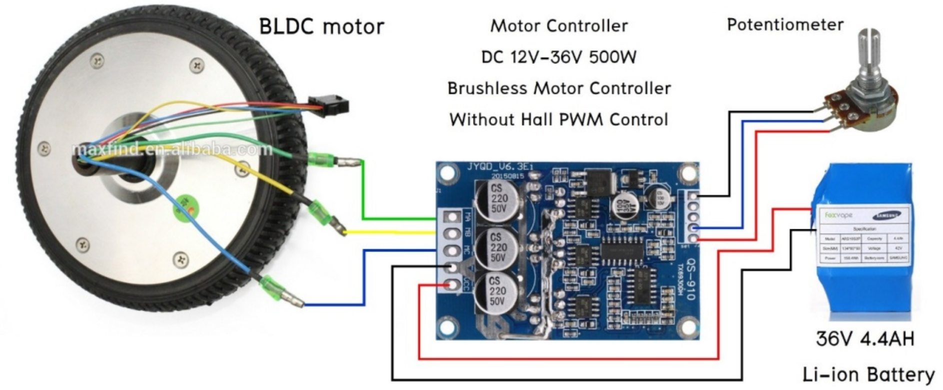



รูปที่ 4.9 แท่นทดสอบ

ตัวโรเตอร์จะประกอบด้วย พูลเลย์เส้นผ่านศูนย์กลาง 24 นิ้ว สวมอยู่ตรงกึ่งกลางเพลามีพูลเลย์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้วสวมอยู่ตรงปลายเพลา โรเตอร์จะวางอยู่บนฐานที่มีความยืดหยุ่นเพื่อให้สามารถถ่วงสมดุลของโรเตอร์ได้ซึ่งประกอบด้วยชุด แบริ่งที่ถูกแขวนโดยใช้แผ่นเหล็กบางยาวซึ่งทำหน้าที่เป็นสปริง (leaf spring) การติดตั้งด้วยการแขวนจะช่วยหลีกเลี่ยงการโก่งเดาะ (buckling) ของสปริง ล้อของมอเตอร์จะแตะกับพูลเลย์ มอเตอร์ตัวแรกทำหน้าที่เป็นต้นกำลัง มอเตอร์ตัวที่สองทำหน้าที่เป็นรีเจนเนอเรทีฟเบรก

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์แสดงในรูปที่ 4.10 ตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์เป็วงจรสำเร็จรูปที่ขายตามร้านค้าออนไลน์ ทำงานบนหลักการของ Pulse Width Modulation โดยรับคำสั่งจากตัวต้านทานปรับค่าได้ (potentiometer) ใช้แหล่งจ่ายไปจากแบตเตอรีลิเธียมไอออน 36 V

ผลการออกแบบแสดงในตารางที่ 4.2 ค่าพลังงานจลน์สูงสุดที่ระบบสามารถสะสมได้ของการสร้างครั้งที่สองจะต่ำกว่าค่าที่ออกแบบค่อนข้างมากแต่ผู้ทำโครงงานจะไม่พยายามเพิ่มค่าการสะสมพลังงานจลน์สูงสุดเนื่องจาก รถไฟฟ้าที่สร้างจริงมีลักษณะดังภาพ ซึ่งมวลของรถรวมน้ำหนักผู้โดยสารหนึ่งคนมีค่าประมาณ 160 kg ขณะที่มอเตอร์ล้อรถหมุนด้วยความเร็วสูงสุดจะเทียบเท่าความเร็วของรถเพียง 18 km/h ดังนั้นหนึ่งในสี่ของพลังงงานจลน์สูงสุดเท่ากับ 500 J ดังนั้นแท่นทดสอบสามารถสะสมพลังงานจลน์ได้มากเพียงพอที่จะจำลองการเบรกของรถไฟฟ้าที่สร้างขึ้น




รูปที่ 4.10 วงจรตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์

คุณลักษณะเฉพาะของแท่นทดสอบแสดงในตารางที่ 4.2

| รายการ | การออกแบบ | สร้างจริงครั้งแรก | สร้างจริงครั้งที่ 2 |
|---|---|---|---|
| เส้นผ่านศูนย์กลางล้อตุนกำลัง (นิ้ว) | – | 24 | 24 |
| เส้นผ่านศูนย์กลางพูลเลย์ส่งกำลัง(นิ้ว) | 4 | 4 | 10 |
| ความเร็วรอบสูงสุด (rpm) | 930 | 930 | 418 |
| โมเมนต์ความเฉื่อย ($kg.m^2$) | 1.2 | 0.97 | 1.74 |
| พลังงานจลน์ (J) | 5800 | 4600 | 1660 |

*ค่าคาดหวังกรณีที่ไม่เกิดการไถลระหว่างล้อกับพูลเลย์ส่งกำลัง

รูปที่ 4.11 รถไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้มอเตอร์ดุมล้อ

### 4.3 การทดสอบสมรรถนะของเบรกรีเจนเนอเรทีฟกรณีขับรถลงเขา

เมื่อขับรถไฟฟ้าลงเขา แบตเตอรี่จะไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ กำลังจากแรงโน้มถ่วงที่กระทำกับรถ ($mg \sin\theta \times v$) ส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปกับแรงต้านอากาศแรงเสียดทานกลิ้งที่ล้อ และแรงเสียดทานในตัวมอเตอร์ กำลังส่วนที่เหลือจะเท่ากับกำลังที่เบรกดึงออกจากระบบในรูปพลังงานไฟฟ้า จุดประสงค์ของการเบรกในช่วงลงเขาคือการรักษาความเร็วของรถให้คงที่ในระดับที่ผู้ขับขี่พอใจ ดังนั้นความเฉื่อยจะไม่มีผลกระทบในช่วงที่ความเร็วคงที่ ดังนั้นในการทดสอบสมรรถนะจะใช้มอเตอร์ส่งกำลังกันโดยตรงไม่ผ่านตัวล้อตุนกำลัง

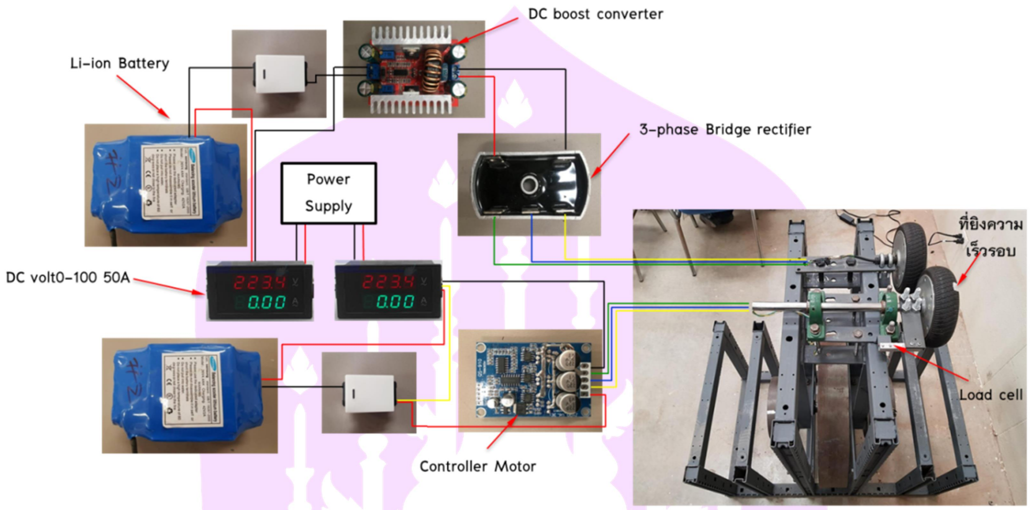
**จุดประสงค์ของการทดลอง**

1. เพื่อวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟ
2. เพื่อระบุขีดจำกัดของการใช้งานเบรกรีเจนเนอเรทีฟ

**วิธีการทดลอง**

1. จัดอุปกรณ์การทดลองดังภาพที่ 4.12 หมุนความต้านทานปรับค่าได้ของตัวควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าของ DC boost converter ไปที่ตำแหน่ง 0
2. จ่ายกระแสไฟฟ้าให้มอเตอร์จนมีความเร็วสูงสุด
3. หมุนความต้านทานปรับค่าได้ของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของ DC boost converter ให้ได้ 42 V ซึ่งเป็นแรงดันที่สามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้
4. หมุนความต้านทานปรับค่าได้ของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าของ DC boost converter ไปที่ 1.8 A ซึ่งเป็นค่าต่ำกว่ากระแสชาร์จสูงสุดที่ไม่ทำให้แบตเตอรี่เสียหาย
5. วัดค่าความเร็วรอบของมอเตอร์โดยใช้ตัววัดความเร็วรอบ (Tachometer) ค่าแรงบิดแรงดันที่และกระแสไฟฟ้าที่ชาร์จเข้าแบตเตอรี่
6. ปรับลดความเร็วมอเตอร์ลงครั้งละประมาณ 20 rpm บันทึกค่าตามข้อ 5. หยุดการทดลองเมื่อ DC boost converter ไม่ทำงาน
7. ทำซ้ำข้อ 2. – 6. โดยกำหนดให้กระแสที่ชาร์จแบตเตอรี่เท่ากับ 1.6 1.4 1.2 … 0.2A

8. ประสิทธิภาพของเบรกรีเจเนอเรทีฟหาได้จาก $\eta_1 = \frac{IV}{T\omega}$




รูปที่ 4.12 การทดสอบสมรรถนะของเบรกรีเจนเนอเรทีฟกรณีขับรถลงเขา

## 4.4 การทดสอบประสิทธิภาพการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ (Energy Recovery)

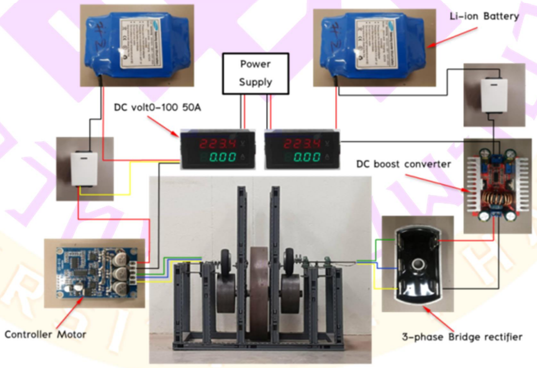
การขับขี่ในเมืองมักจะมีการเบรกอยู่บ่อยครั้ง การเบรกในลักษณะนี้มีจุดประสงค์เพื่อลดพลังงานจลน์ของรถ ซึ่งเป็นปริมาณที่ขึ้นกับความเฉื่อยของระบบ ดังนั้นจึงต้องต่อล้อตุนกำลังเข้ากับเบรกรีเจนเนอเรทีฟ สำหรับระบบเบรกแบบปกติการลดพลังงานจลน์สามารถทำได้โดยดึงพลังงานออกจากระบบในรูปของงานเนื่องจากแรงเสียดทานที่ชุดเบรกและระบายทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมในรูปของความร้อน แต่ในที่นี้จะดึงพลังงานออกจากระบบในรูปพลังงานไฟฟ้าแล้วเก็บไว้ในแบตเตอรี่

**จุดประสงค์ของการทดลอง**

1. เพื่อวัดประสิทธิภาพการในการนำพลังงานจลน์มาใช้ใหม่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า
2. เพื่อระบุขีดจำกัดของการใช้งานเบรกรีเจนเนอเรทีฟในการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่

**วิธีการทดลอง**

1. จัดอุปกรณ์การทดลองดังภาพที่ 4.13 หมุนความต้านทานปรับค่าได้ของตัวควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าของ DC boost converter ไปที่ตำแหน่ง 0
2. จ่ายกระแสไฟฟ้าให้มอเตอร์จนมีความเร็วสูงสุด
3. หมุนความต้านทานปรับค่าได้ของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของ DC boost converter ให้ได้ 42 V ซึ่งเป็นแรงดันที่สามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้
4. หมุนความต้านทานปรับค่าได้ของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าของ DC boost converter ไปที่ 1.8 A ซึ่งเป็นค่าต่ำกว่ากระแสชาร์จสูงสุดที่ไม่ทำให้แบตเตอรี่เสียหาย จากนั้นตัดกระแสไฟที่ชาร์จให้แบตเตอรี่รอจนโรเตอร์หมุนที่ความเร็วสูงสุด
5. ตัดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ชุดความคุมความเร็วมอเตอร์พร้องทั้งเปิดให้กระแสไหลไปชาร์จแบตเตอรี่
6. ตลอดการทดลองบันทึกวีดิโอการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ แรงดันและกระแสที่ชาร์จให้กับแบตเตอรี่ จนกระทั่งระบบหยุดนิ่ง
7. ทำซ้ำข้อ 2. – 6. โดยกำหนดให้กระแสที่ชาร์จแบตเตอรี่เท่ากับ 1.6 1.4 1.2 ... 0.2 A
8. ประสิทธิภาพของการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่หาได้จาก $\eta_2 = \frac{\int_{t_0}^{t_f} IV dt}{\frac{1}{2} I\omega^2}$




รูปที่ 4.13 การทดสอบประสิทธิภาพการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ (Energy Recovery)

# บทที่ 5

# ผลการทดสอบสมรรถนะ

## 5.1 ข้อจำกัดในการใช้งานเบรกรีเจนเนอเรทีฟ

ระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟที่สร้างขึ้นมีส่วนประกอบ คือ วงจรเรียงกระแส 3 เฟส วงจรเพิ่มแรงดันกระแสตรง และแบตเตอรี่ จากคุณสมบัติของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ศักย์ไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF) จะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของมอเตอร์ ส่วนแรงเบรกของมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดมอเตอร์ ข้อจำกัดในการใช้งานระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟจึงขึ้นอยู่กับความสามารถในการทนแรงดันสูงสุดและทนกระแสสูงสุด

จากการออกแบบวงจรเรียงกระแสสามารถทนแรงดันได้สูงสุด 1000 V และทนกระแสได้สูงสุด 40 A วงจรยกระดับแรงดันสามารถทำงานที่แรงดันขาเข้า 8.5 V – 50 V ทนกระแสได้สูงสุด 12 A และแบตเตอรี่ ใช้แรงดันในการชาร์จเท่ากับ 42 V ใช้กระแสชาร์จได้สูงสุด 2A จากข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่นำมาต่อกันเป็นระบบเบรกจะได้ข้อจำกัดทางไฟฟ้าของระบบเบรกดังนี้

1) แรงดันใช้งาน 8.5 V – 50 V
2) กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ระบบทนได้ 2A

จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าวงจรยกระดับแรงดันเริ่มทำงานเมื่อมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 180 rpm ล้อมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว เทียบเป็นความเร็วรถ 5 km/h ซึ่งให้แรงดันไฟฟ้าหลังออกจากตัวเรียงกระแส 8.5 V และเมื่อให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 600 rpm จะให้แรงดันไฟฟ้าหลังออกจากตัวเรียงกระแสเท่ากับ 36 V ดังนั้น ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ได้หลังออกจากตัวเรียงกระแสเท่ากับ 50 V มอเตอร์จะมีความเร็วรอบ 830 rpm ล้อมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว เทียบเป็นความเร็วรถ 24 km/h นั้นคือ ถ้ารถมีความเร็วต่ำกว่า 4 km/h ต้องใช้เบรกระบบอื่นทำงาน ถ้าความเร็วรถมากกว่า 24 km/h จะต้องมีเบรกระบบอื่นทำงานร่วมด้วยเพื่อป้องกันการเสียหายของวงจรยกระดับแรงดัน จะเห็นว่าการใช้งานเบรกรีเจนเนอเรทีฟต้องมีระบบเบรกแบบอื่นร่วมด้วยเสมอ เช่น การใช้ระบบเบรกทางกล การลัดวงจรมอเตอร์โดยการนำสายไฟทั้ง 3 เส้นของมอเตอร์มาต่อเข้าด้วยกัน ซึ่งรายละเอียดจะไม่ขอกล่าวในที่นี้

สำหรับแรงเบรกสูงสุดนั้นจะเป็นไปตามสมการ $T = \frac{IV}{\eta\omega}$ เนื่องจากประสิทธิภาพของระบบเบรก (ดูจากผลการทดลองในหัวข้อ 5.2) เท่ากับ 76% ดังนั้นที่ความเร็ว 4 km/h แรงเบรกสูงสุดเท่ากับ 7 N.m และที่ความเร็ว 24 km/h แรงเบรกสูงสุดเท่ากับ 1.3 N.m แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถเพิ่มกระแสสูงสุดได้โดยการเพิ่มจำนวนแบตเตอรี่ เช่นถ้าใช้แบตเตอรี่ 2 ตัวต่อขนานกันแรงเบรกสูงสุดจะเท่ากับ 17 N.m มีความเร็ว 4 km และเท่ากับ 2.6 N.m ที่ความเร็ว 24 km/h ทั้งนี้ถ้ามีการเพิ่มจำนวนแบตเตอรี่ให้มากพอ กระแสที่ไหลได้สูงสุดจะเท่ากับ 12 A ซึ่งเป็นปริมาณที่ตัวยกระดับแรงดันสามารถทนได้ ซึ่งจะเทียบเท่าแรงเบรก 7.6 N.m ที่ 24 km/h และเท่ากับ 42.2 N.m ที่ความเร็ว 4 km/h

ข้อจำกัดอีกอย่างหนึ่งของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟคือ เมื่อแบตเตอรี่เต็ม ระบบจะไม่ทำงาน

### 5.2 การทดสอบสมรรถนะของเบรกรีเจนเนอเรทีฟกรณีขับรถลงเขา

จากวิธีการทดลองที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.3 คุณลักษณะของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟที่ได้สร้างขึ้นแสดงในรูปที่ 4.6 ความเร็วสูงสุดที่มอเตอร์ขับทำได้เท่ากับ 62 rad/s ความเร็วต่ำสุดที่สามารถทดสอบได้ขึ้นกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยให้ไหลเข้าไปชาร์จแบตเตอรี่ เนื่องจาก เมื่อปรับลดความเร็วรอบของมอเตอร์จนถึงระดับต่ำกว่าค่าหนึ่ง จะเกิดเสียงดังเนื่องจากตัวควบคุมมอเตอร์ไม่สามารถควบคุมความเร็วมอเตอร์ในช่วงความเร็วรอบต่ำแต่มีแรงบิดต้านสูง ๆ เนื่องจากจะเกิดการไถลในมอเตอร์ กล่าวคือตัวโรเตอร์หมุนไม่ทันความเร็วของสนามแม่เหล็ก นั้นคือช่วงความเร็วที่สามารถทดลองได้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวควบคุมมอเตอร์ขับ สำหรับกรณีที่กระแสชาร์จแบตเตอรี่เท่ากับ 1.8 A มีการสังเกตเห็นเศษผงยางระหว่างการทดลองแสดงมีการไถลระหว่างผิวยางของล้อทั้งสอง ดังนั้นแนวโน้มของกราฟจึงแตกต่างจากข้อมูลชุดอื่น

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบเบรก จะใช้หลักการของสมดุลพลังงาน จากหลักการของสมดุลพลังงานจะได้สมการคุณลักษณะของรีเจนเนอเรทีฟเบรกดังนี้

$$T = \frac{IV}{\eta_1 \omega} + T_f \tag{5.1}$$

เมื่อ $T$ แรงบิดต้าน (Brake torque) $V$ คือความต่างศักย์ของแบตเตอรี่ที่ใช้เป็นตัวเก็บพลังงาน $I$ คือกระแสที่อนุญาตให้ไหลเข้าไปชาร์จในแบตเตอรี่ $\omega$ คือความเร็วเชิงมุมของการกลิ้ง $\eta_1$ คือประสิทธิภาพของเบรกเมื่อไม่คิดผลของความเสียดทาน (พิจารณาเฉพาะการสูญเสียพลังงานเนื่องจากความต้านทานในวงจรไฟฟ้า) $T_f$ คือแรงแรงบิดเนื่องจากความเสียดทานในมอเตอร์โดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักที่กดลงบนแกนของมอเตอร์ ผลการทดลองสามารถเขียนในรูปสมการเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \vdots \\ T_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1V_1\omega_1 & 1 \\ I_2V_2\omega_2 & 1 \\ I_3V_3\omega_3 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ I_NV_N\omega_N & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/\eta_1 \\ T_f \end{bmatrix}$$

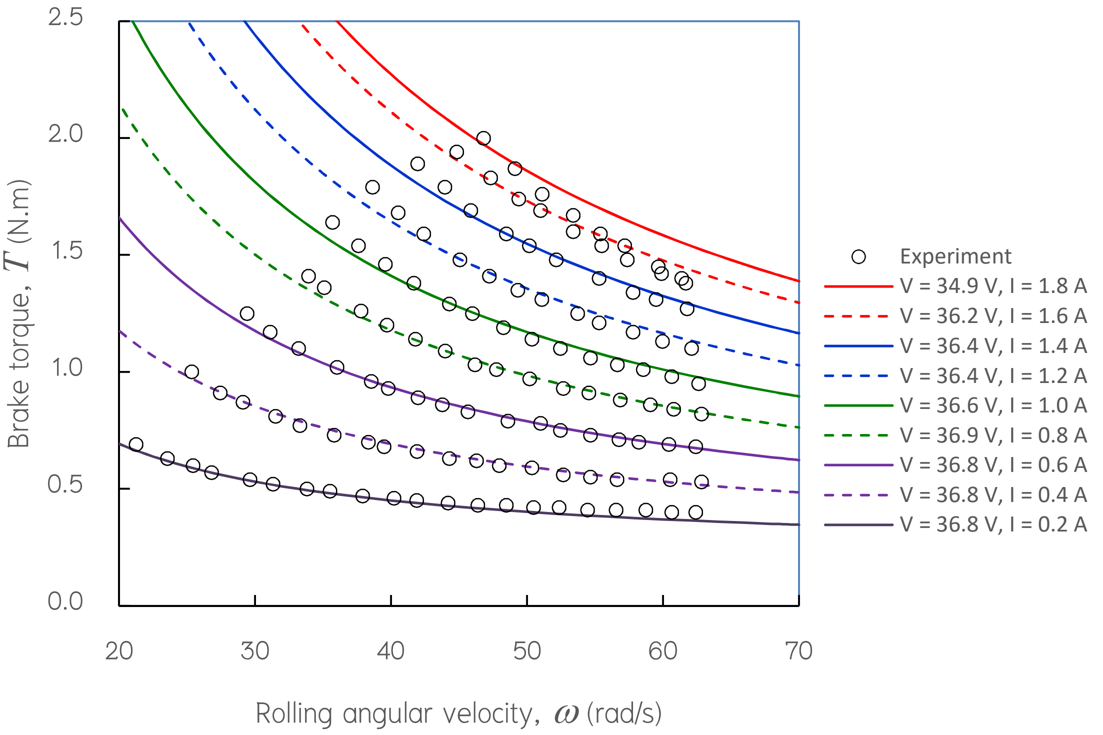
กำหนด

$$B = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \vdots \\ T_N \end{bmatrix}, \qquad A = \begin{bmatrix} I_1V_1\omega_1 & 1 \\ I_2V_2\omega_2 & 1 \\ I_3V_3\omega_3 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ I_NV_N\omega_N & 1 \end{bmatrix}$$

ประสิทธิภาพของเบรกกรณีไม่คิดผลของความเสียดทาน $\eta_1$ และแรงบิดเนื่องจากความเสียดทานในมอเตอร์ $T_f$ สามารถหาได้จากสมการ

$$\begin{bmatrix} 1/\eta_1 \\ T_f \end{bmatrix} = (A^TA)^{-1}A^TB$$

วิธีการนี้รู้จักกันในชื่อ วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least squares method) โดยการใช้วิธีการที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะได้ว่าประสิทธิภาพของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟกรณีไม่คิดผลของความเสียดทานเท่ากับ 76% ($\eta_1 = 0.76$) แรงบิดเนื่องจากความเสียดทานในมอเตอร์เท่ากับ 0.21 N.m ในการทดลองซ้ำพบว่าประสิทธิภาพของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟกรณีไม่คิดผลของความเสียดทานจะใกล้เคียง 76% แต่ค่าแรงบิดเนื่องจากความเสียดทานของมอเตอร์อาจวัดค่าได้แตกต่างกันขึ้นอยู่กับแรงกดระหว่างล้อทั้งสอง




รูปที่ 5.1 ผลการทดลองประสิทธิภาพของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟ

การแปลผลการทดลองอาจใช้กรณีศึกษาต่อไปนี้เพื่อให้เห็นภาพการประยุกต์ใช้งาน สมมุติขับรถมวล 160 kg มาตามทางราบด้วยความเร็ว 15 km/h จากนั้นต้องขับลงเนินที่มีความชัน $5^{\circ}$ ด้วยความเร็วเท่าเดิม ขณะนี้แบตเตอรี่มีความต่างศักย์ 36 V สำหรับภาระการเบรกของ 1 ล้อแรงที่กระทำเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก (1/4)(160)(9.81) sin ($5^{\circ}$) = 34 N สมมุติแรงต้านเนื่องจากแรงเสียดทานกลิ้งและแรงต้านอากาศรวมกันเท่ากับ 7 N ถ้าล้อรัศมี 3 นิ้ว เทียบเท่าแรงบิดที่กระทำกับล้อ (34 – 7)*0.0762 = 2.05 N.m ถ้าน้ำหนักที่กดล้อทำให้เกิดแรงเสียดทานในมอเตอร์ 0.208 N.m ความเร็ว 15 km/h เทียบเท่าความเร็วเชิงมุมของการกลิ้ง 55 rad/s จากสมการ (5.1)

$$2.05 = \frac{36I}{0.76(55)} + 0.208$$
$$I = 2.14\ A$$

นั่นคือต้องกำหนดให้กระแสที่ชาร์จแบตเตอรี่เท่ากับ 2.14 A

โดยทั่วไปกระแสที่ชาร์จแบตเตอรี่มากเกินไปจะทำให้แบตเตอรี่ร้อนและอาจระเบิดได้ ดังนั้นแบตเตอรี่แต่ละรุ่นจะมีการกำหนดกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ชาร์จได้ไว้ด้วย สมมุติกระแสสูงสุดที่ชาร์จ

แบตเตอรี่ได้เท่ากับ 2 A ซึ่งน้อยกว่าปริมาณที่ต้องการชาร์จ ในกรณีนี้จะต้องมีระบบเบรกเชิงกลเพื่อกำจัดพลังงานส่วนเกินทิ้งไป

### 5.3 การทดสอบประสิทธิภาพการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ กรณีที่มีการเหยียบเบรกเพื่อชะลอความเร็วหรือหยุดรถในช่วงสั้น ๆ ของการขับบนทางราบ การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของแท่นทดสอบ กรณีที่มีการปล่อยให้กระแสไหลชาร์จแบตเตอรี่ ในช่วง 0.2 – 1.8 A แรงดันแบตเตอรี่ 33 – 34 V แสดงในรูปที่ 5.2 โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลเฉลยที่ได้จากสมการของของการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์

$$E_2 - E_1 = \int_{\theta_1}^{\theta_2} T d\theta$$

เมื่อ $E_2 = \frac{1}{2} I \omega_2^2$ และ $E_1 = \frac{1}{2} I \omega_1^2$ แทนค่า $T = -IV/\eta_2 \omega$ และ $d\theta = \omega dt$ จะได้สมการต่อไปนี้

| | | |
|---|---|---|
| | $$E_2 - E_1 = -\int_{t_1}^{t_2} \frac{IV}{\eta_2} dt$$ | (5.2) |

ในที่นี้ $\eta_2$ คือ ประสิทธิ์ภาพโดยรวมของระบบ (รวมการสูญเสียจากความต้านทานในวงจรและความเสียดทานทั้งหมดของระบบ)

สำหรับ $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ มีค่าน้อย ๆ จะได้ว่า

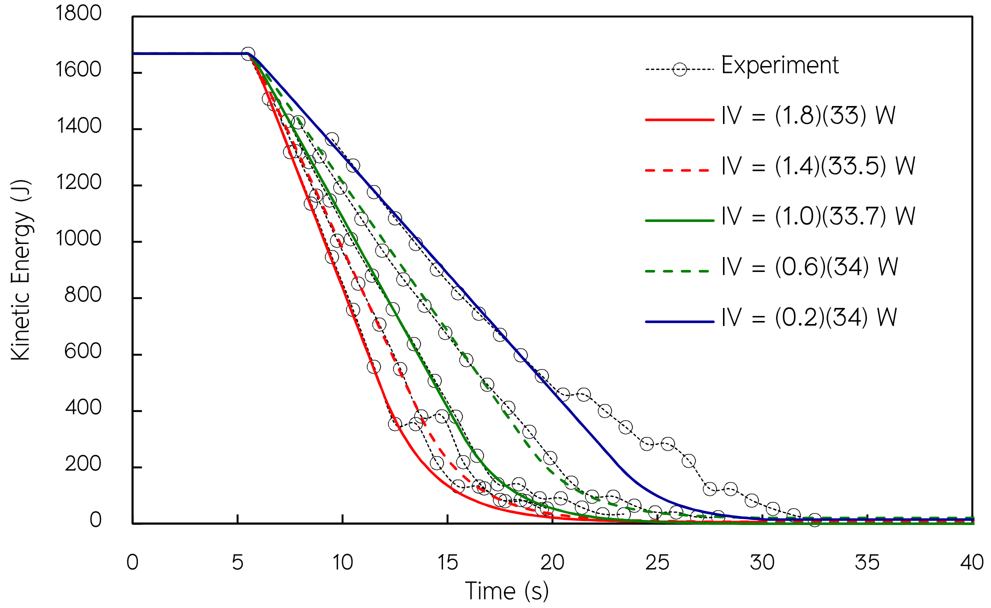
| | | |
|---|---|---|
| | $$E_{k+1} \approx E_k - \frac{\Delta t}{\eta_2} I_k V_k$$ | (5.3) |

เมื่อ $Y_k = Y(t_k)$

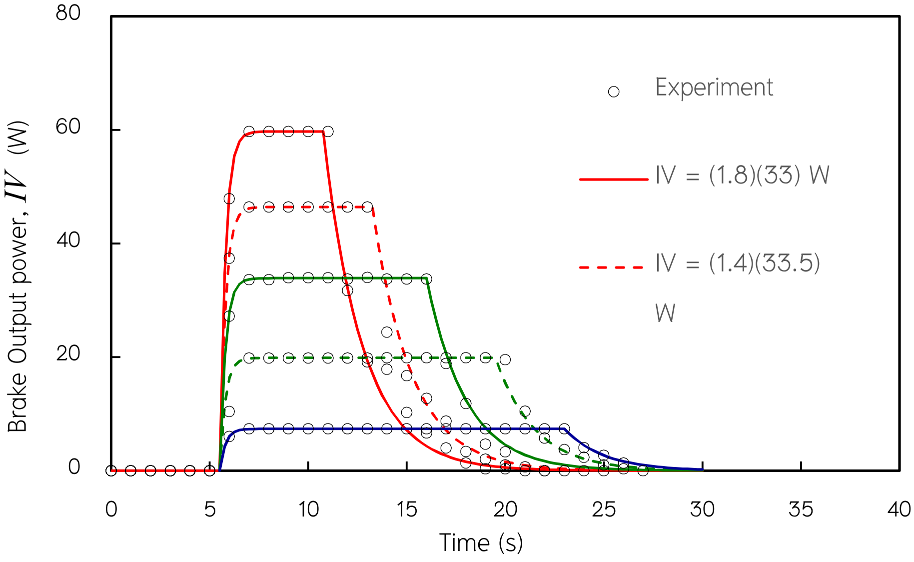
การหาค่า $\eta_2$ สามารถทำได้โดยเลือก $\eta_2$ ที่ทำให้ผลเฉลยของสมการ (5.3) ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด

ประสิทธิภาพของระบบอาจหาได้โดยตรงจากการทดลองดังนี้

| | | |
|---|---|---|
| | $$\eta_2 = \frac{\text{Recovery energy (Area under } IV - t \text{ plot)}}{\text{Initial kinetic energy}} = \frac{\int_{t_0}^{t_f} IV dt}{\frac{1}{2} I \omega_0^2}$$ | (5.4) |




รูปที่ 5.2 การลดลงของพลังงานจลน์เมื่อดึงกระแสไปชาร์จแบตเตอรี่ที่ 0.2 – 1.8 A เปรียบเทียบข้อมูลจากการทดลองกับค่าที่ประมาณได้จากสมการพลังงาน



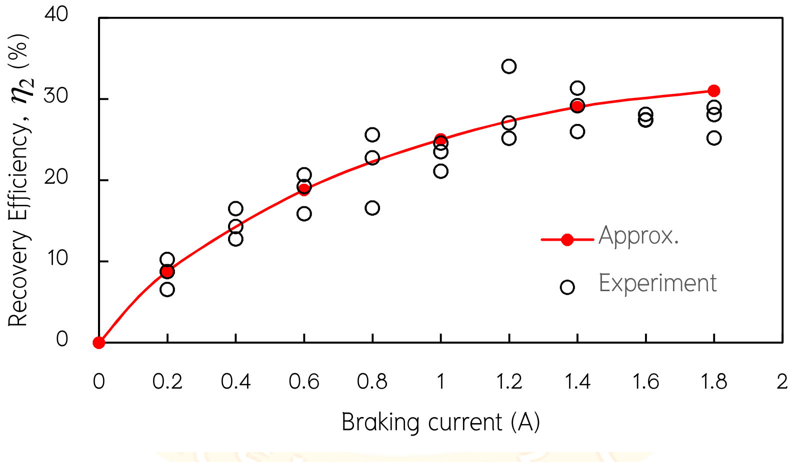

รูปที่ 5.3 พลังงานที่เบรกรีเจนเนอเรทีฟชาร์จให้แบตเตอรี่ที่ กระแส 0.2 – 1.8 A เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลอง

รูปที่ 5.3 แสดงกำลังไฟฟ้าที่เบรกรีเจนเนอเรทีฟชาร์จให้แบตเตอรี่ที่ กระแส 0.2 – 1.8 A การตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเบรก กรณีที่มอเตอร์มีความเร็วเชิงมุมเริ่มต้นมากว่า 150 rpm สามารถแสดงด้วยสมการ

$$P = \begin{cases} I_{max}V_{max}\left(1 - e^{-3.5(t-t_0)}\right), & t_0 \le t \le t_e \\ I_{max}V_{max}e^{-0.5(t-t_e)}, & t \ge t_e \end{cases} \quad (5.5)$$

เมื่อ $t_0$ คือ เวลาเริ่มต้นการเบรก และ $t_e$ คือเวลาที่ความเร็วลดลงมาเหลือ 180 rpm

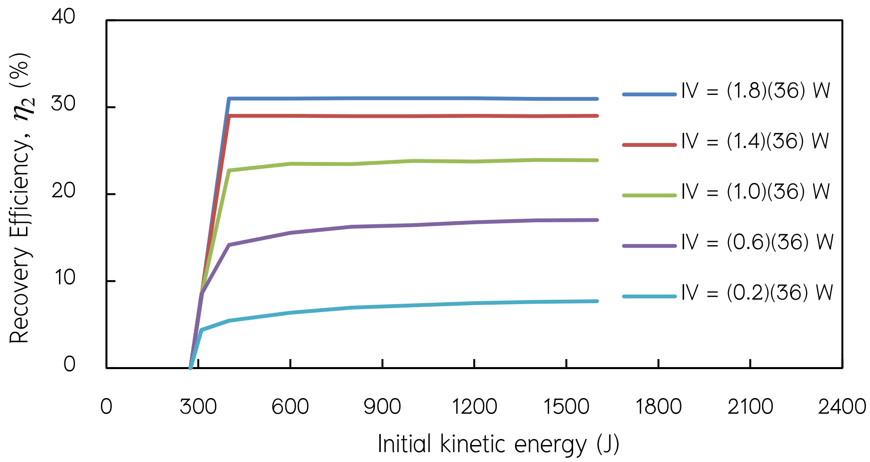
ประสิทธิภาพในการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่เมื่อวิเคราะห์จากสมการ (5.3) เปรียบเทียบกับสมการ (5.4) แสดงในรูป 5.4 การวิเคราะห์ทั้งสองวิธีให้ผลที่ใกล้เคียงกัน เมื่อให้กระแสไหลชาร์จแบตเตอรี่น้อยลง ประสิทธิภาพในการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่จะมีแนวโน้มที่ลดลง ในแง่มุมของการขับขี่ กระแสที่ชาร์จแบตเตอรี่ที่มีค่าสูงหมายถึง เกิดจากการหยุดรถอย่างรวดเร็วซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายในการขับขี่ ดังนั้นในการใช้งานจริงต้องคำนึงถึงความปลอดภัยในการขับขี่เป็นหลักซึ่งอาจจะไม่ใช่เงื่อนไขที่ทำให้ประสิทธิภาพในการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ดีที่สุด




รูปที่ 5.4 ประสิทธิภาพของเบรกในช่วงกระแส 0.2 – 1.8 A

เนื่องจากตัวยกระดับแรงดันสามารถทำงานได้ดีในช่วงความเร็วรอบมากว่า 180 rpm ดังนั้นพลังงานจลน์เริ่มต้นของระบบจึงส่งผลต่อประสิทธิภาพในการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟ เนื่องจากขณะที่มอเตอร์ขับต่อเข้ากับแท่นทดสอบมอเตอร์จะไม่สามารถทำงาน

ที่ความเร็วรอบที่ต่ำมาก ๆ ได้ ดังนั้นการศึกษาผลของพลังงานงานจลน์เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการดึงพลังงานกลับมาใช้ใหม่ จะศึกษาโดยใช้การจำลองสภาพ (simulation) โดยใช้ความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลอง คือ สมการ (5.3) และ สมการ (5.5) ผลการจำลองสภาพแสดงในรูปที่ 5.5 พลังงานจลน์เริ่มต้นส่งผลต่อประสิทธิภาพในการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ของเบรกรีเจนเนอเรทีฟเพียงเล็กน้อย ในช่วงที่มอเตอร์มีความเร็วมากกว่า 180 rpm นั่นคือในทางปฏิบัติความเร็วก่อนการหยุดรถไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ของเบรกรีเจนเนอเรทีฟ




รูปที่ 5.5 ผลของพลังงานจลน์เริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพในการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ของเบรกรีเจนเนอเรทีฟในช่วงกระแส 0.2 – 1.8 A

# บทที่ 6

# บทสรุป

## 6.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ

6.1.1 ภาคเหนือส่วนใหญ่จะภูมิประเทศแบบภูเขา ถนนจะมีความลาดชันเป็นระยะทางที่ยาวหลายกิโลเมตร เราจึงได้มีแนวติดในออกแบบและสร้างแท่นทดสอบเพื่อจำลองการขับขี่สำหรับประเมินสมรรถนะของการควบคุมความเร็วของระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟในรถไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้มอเตอร์ดุมล้อและทดสอบประสิทธิภาพของเบรกรีเจนเนอเรทีฟในขณะลงเขา

6.1.2 ผลการออกแบบระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟ ระบบจะประกอบด้วยตัวเรียงกระแสแบบ 3 เฟส ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสสลับ 3 เฟสจากมอเตอร์ดุมล้อเป็นกระแสตรง และมีตัวเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อยกระดับแรงดันให้สูงพอที่จะชาร์จแบตเตอรี่ โดยจะทำการควบคุมความเร็วจากตัวสปีดคอนโทรลซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมกระแส

6.1.3 ในการออกแบบแท่นทดสอบได้นำพูลเลย์ขนาด 24 นิ้ว เป็นล้อช่วยแรงสวมอยู่บนเพลากลมตัน โดยมีตัวรองรับเป็นแบริ่งสองตัว ปลายเพลาทั้งสองด้านสวมกับพูลเลย์ตัวเล็กขนาด 10 นิ้ว ต่อกับมอเตอร์ดุมล้อขนาด 6.5 นิ้ว โดยใช้การสัมผัส ซึ่งมอเตอร์ดุมล้อตัวแรกจะเป็นตัวจ่ายไฟและมอเตอร์ดุมล้อตัวที่สองจะเป็นเบรกรีเจนเนอเรทีฟแท่นทดสอบที่สามารถจำลองสภาพการขับขี่ในสภาวะต่าง ๆ ได้

6.1.4 จากการออกแบบวงจรเรียกระแสสามารถทนแรงดันได้สูงสุด 1000 V และทนกระแสได้สูงสุด 40 A วงจรยกระดับแรงดันสามารถทำงานที่แรงดันขาเข้า 8.5 V – 50 V ทนกระแสได้สูงสุด 12 A และแบตเตอรี่ ใช้แรงดันในการชาร์จเท่ากับ 42 V ใช้กระแสชาร์จได้สูงสุด 2A

6.1.5 สมรรถนะของระบบเบรกถูกทดสอบโดยใช้ระบบกับเก็บพลังงานด้วยล้อตุนกำลังซึ่งใช้แทนรถที่กำลังเคลื่อนที่ ผลการทดสอบพบว่า ความเร็วของรถสามารถควบคุมโดยการจำกัดกระแสที่ที่ชาร์จแบตเตอรี่ ระบบเบรกสามารถใช้งานได้ดีในช่วงที่มอเตอร์มีความเร็วรอบ 180 – 830 rpm ประสิทธิภาพของเบรกเมื่อไม่พิจารณาผลของความเสียดทานเท่ากับ 76% ประสิทธิภาพของการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่เมื่อกระแสที่ชาร์จแบตเตอรี่เท่ากับ 1.8 A เท่ากับ 30% และมีแนวโน้มลดลงเมื่อกระแสที่ชาร์จแบตเตอรี่ลดลง

6.1.6 จากการทดลองสรุปได้ว่าประสิทธิภาพของเบรกรีเจนเนอเรทีฟในช่วงกระแส 0.2 – 1.8A เมื่อกระแสไหลชาร์จแบตเตอรี่ลดลง ประสิทธิภาพในการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่จะมีแนวโน้มที่ลดลง

## 6.2 ปัญหาและอุปสรรค

ในการทำโครงการ เราเจอปัญหาอุปสรรค์อะไรบ้าง หลัก ๆ มี 2 ประเด็น

- มอเตอร์ดุมล้อ ที่ให้ความเร็วรอบได้จำกัด ทำให้แท่นทดสอบทำความเร็วสูงสุดไม่ได้ตามที่คาด
- เกิดการไถลที่ผิวสัมผัสระหว่างล้อกับพูลเลย์

## 6.3 ข้อเสนอแนะ

ระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟที่สร้างขึ้นยังมีวงจรที่แยกส่วนกับวงจรขับมอเตอร์ ในการประยุกต์ใช้งานจริงเราจำเป็นจะต้องรวมวงจรขับมอเตอร์กับวงจรของระบบรีเจนเนอเรทีฟเข้าด้วยกัน

# เอกสารอ้างอิง


1. Chanpeng, W,.Hachanont, P., "Design of Efficient In-Wheel Motor for Electric Vehicles", Energy Procedia, volume 56, 2014, pages 525 – 531.
2. Aneke, M., Wang. M. "Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review", Applied Energy, Volume 179, 2016, Pages 350–377.
3. A. Serpi, F. Deiana, G. Gatto and I. Marongiu, "Performance analysis of PMSM for High-Speed Flywheel Energy Storage Systems in Electric and Hybrid Electric Vehicles," *2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, Florence, 2014, pp. 1-8.
4. C. Mao and C. Zhu, "Vibration Control for Active Magnetic Bearing Rotor System of High-Speed Flywheel Energy Storage System in a Wide Range of Speed," *2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Hangzhou, 2016, pp. 1-6.
5. I.Janpan, R. Chaisricharoen, P. Boonyanant," Control of the Brushless DC Motor in Combine Mode" Procedia Engineering 32 ,2012,pages 279 – 285
6. S. M. Reza Tousi, S. Omid Golpayegani, Ehsan Sharifian," Anti-Lock Regenerative Braking Torque Control Strategy for Electric Vehicle"Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering Bu-Ali Sina University Hamedan, Iran,IEEE,2016
7. Shaofeng Xie, Jinbo Feng, Gangyi Zhang," Study on simulation traction load with regenerative braking", Energy Procedia 14 ,2012,pages 1299 – 1304
8. [2] Eric Hicks. (March 21, 2012). 10 Point Hub Motor Break Down. Retrieved February 27, 2017
9. E Gowthamana,V.Vinodhinib ,Mir Yasser Hussainc ,S K Dhinakarand,T.Sabarinathane," Speed Control of Permanent Magnet Brushless DC Motor Using Hybrid Fuzzy Proportional plus Integral plus Derivative Controller", Energy Procedia 117, 2017,pages 1101–1108
10. Xiaohong Nian, Fei Peng, and Hang Zhang," Regenerative Braking System of Electric Vehicle Driven by Brushless DC Motor", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 61, NO. 10, OCTOBER 2014

# ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยพะเยา UNIVERSITY OF PHAYAO

# ภาคผนวก

## ตารางการทดลอง

### การทดลองระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่

กำหนดให้กระแสไฟฟ้า I = 1.8

| เวลา | rpm | | rad/s | V Volt | I Ampere | P | พ.ท. ใต้กราฟ | P (watt) | พลังงานจลน์ | พลังงานที่ได้ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 418 | 100.0 | 43.8 | 42.2 | 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 1 | 418 | 100.0 | 43.8 | 42.2 | 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 2 | 418 | 100.0 | 43.8 | 42.2 | 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 3 | 418 | 100.0 | 43.8 | 42.2 | 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 4 | 418 | 100.0 | 43.8 | 42.2 | 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 5 | 418 | 100.0 | 43.8 | 42.2 | 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1670.8 | 0.275 |
| 6 | 396.2 | 94.8 | 41.5 | 42.2 | 1.3 | 54.9 | 27.4 | 27.4 | 1501.1 | |
| 7 | 372 | 89.0 | 39.0 | 42.2 | 1.6 | 67.5 | 61.2 | 88.6 | 1323.3 | |
| 8 | 347.6 | 83.2 | 36.4 | 33.2 | 1.6 | 53.1 | 60.3 | 148.9 | 1155.4 | |
| 9 | 320.4 | 76.7 | 33.6 | 33.2 | 1.6 | 53.1 | 53.1 | 202.1 | 981.6 | |
| 10 | 292 | 69.9 | 30.6 | 33.3 | 1.6 | 53.3 | 53.2 | 255.3 | 815.3 | |
| 11 | 261 | 62.4 | 27.3 | 33.3 | 1.6 | 53.3 | 53.3 | 308.5 | 651.4 | |
| 12 | 224.3 | 53.7 | 23.5 | 33.4 | 1.6 | 53.4 | 53.4 | 361.9 | 481.1 | |
| 13 | 178 | 42.6 | 18.6 | 33.4 | 0.94 | 31.4 | 42.4 | 404.3 | 302.9 | |
| 14 | 136.3 | 32.6 | 14.3 | 32.8 | 0.46 | 15.1 | 23.2 | 427.6 | 177.6 | |
| 15 | 136.3 | 32.6 | 14.3 | 32.8 | 0.34 | 11.2 | 13.1 | 440.7 | 177.6 | |
| 16 | 107.6 | 25.7 | 11.3 | 32.5 | 0.23 | 7.5 | 9.3 | 450.0 | 110.7 | |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 17 | 107.6 | 25.7 | 11.3 | 32.5 | 0.09 | 2.9 | 5.2 | 455.2 | 110.7 | |
| 18 | 85.9 | 20.6 | 9.0 | 32.4 | 0.05 | 1.6 | 2.3 | 457.5 | 70.5 | |
| 19 | 69.2 | 16.6 | 7.2 | 32.4 | 0.02 | 0.6 | 1.1 | 458.6 | 45.8 | |
| 20 | 69.2 | 16.6 | 7.2 | 32.4 | 0 | 0.0 | 0.3 | 458.9 | 45.8 | |
| 21 | 53.4 | 12.8 | 5.6 | 32.4 | 0 | 0.0 | 0.0 | 458.9 | 27.3 | |
| 22 | 31.5 | 7.5 | 3.3 | 32.4 | 0 | 0.0 | 0.0 | 458.9 | 9.5 | |

กำหนดให้กระแสไฟฟ้า I = 1.6

| เวลา | rpm | | rad/s | V Volt | I Ampere | P | พ.ท. ใต้กราฟ | P (watt) | พลังงานจลน์ | พลังงานที่ได้ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 418.0 | 100.0 | 43.8 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 1 | 418.0 | 100.0 | 43.8 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 2 | 418.0 | 100.0 | 43.8 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 3 | 418.0 | 100.0 | 43.8 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 4 | 418.0 | 100.0 | 43.8 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 5 | 418.0 | 100.0 | 43.8 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1670.8 | 0.275 |
| 6 | 396.2 | 94.8 | 41.5 | 42.2 | 1.3 | 54.9 | 27.4 | 27.4 | 1501.1 | |
| 7 | 372.0 | 89.0 | 39.0 | 42.2 | 1.6 | 67.5 | 61.2 | 88.6 | 1323.3 | |
| 8 | 347.6 | 83.2 | 36.4 | 33.2 | 1.6 | 53.1 | 60.3 | 148.9 | 1155.4 | |
| 9 | 320.4 | 76.7 | 33.6 | 33.2 | 1.6 | 53.1 | 53.1 | 202.1 | 981.7 | |
| 10 | 292.0 | 69.9 | 30.6 | 33.3 | 1.6 | 53.3 | 53.2 | 255.3 | 815.3 | |
| 11 | 261.0 | 62.4 | 27.3 | 33.3 | 1.6 | 53.3 | 53.3 | 308.5 | 651.4 | |
| 12 | 224.3 | 53.7 | 23.5 | 33.4 | 1.6 | 53.4 | 53.4 | 361.9 | 481.1 | |
| 13 | 178.0 | 42.6 | 18.6 | 33.4 | 0.9 | 31.4 | 42.4 | 404.3 | 303.0 | |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 14 | 136.3 | 32.6 | 14.3 | 32.8 | 0.5 | 15.1 | 23.2 | 427.6 | 177.7 | |
| 15 | 136.3 | 32.6 | 14.3 | 32.8 | 0.3 | 11.2 | 13.1 | 440.7 | 177.7 | |
| 16 | 107.6 | 25.7 | 11.3 | 32.5 | 0.2 | 7.5 | 9.3 | 450.0 | 110.7 | |
| 17 | 107.6 | 25.7 | 11.3 | 32.5 | 0.1 | 2.9 | 5.2 | 455.2 | 110.7 | |
| 18 | 85.9 | 20.6 | 9.0 | 32.4 | 0.1 | 1.6 | 2.3 | 457.5 | 70.6 | |
| 19 | 69.2 | 16.6 | 7.2 | 32.4 | 0.0 | 0.6 | 1.1 | 458.6 | 45.8 | |
| 20 | 69.2 | 16.6 | 7.2 | 32.4 | 0.0 | 0.0 | 0.3 | 458.9 | 45.8 | |
| 21 | 53.4 | 12.8 | 5.6 | 32.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 458.9 | 27.3 | |
| 22 | 31.5 | 7.5 | 3.3 | 32.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 458.9 | 9.5 | |

กำหนดให้กระแสไฟฟ้า I = 1.4

| เวลา | rpm | | rad/s | V Volt | I Ampere | P | พ.ท. ใต้กราฟ | P (watt) | พลังงานจลน์ | พลังงานที่ได้ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 416.1 | 100.0 | 43.6 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 1 | 416.1 | 100.0 | 43.6 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 2 | 416.1 | 100.0 | 43.6 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 3 | 416.1 | 100.0 | 43.6 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 4 | 416.1 | 100.0 | 43.6 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 5 | 416.1 | 100.0 | 43.6 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1655.7 | 0.266 |
| 6 | 394.6 | 94.8 | 41.3 | 42.2 | 1.1 | 47.3 | 23.6 | 23.6 | 1489.0 | |
| 7 | 371.9 | 89.4 | 38.9 | 33.4 | 1.4 | 46.4 | 46.8 | 70.5 | 1322.6 | |
| 8 | 349.0 | 83.9 | 36.5 | 33.4 | 1.4 | 46.4 | 46.4 | 116.9 | 1164.7 | |
| 9 | 324.1 | 77.9 | 33.9 | 33.4 | 1.4 | 46.4 | 46.4 | 163.3 | 1004.5 | |
| 10 | 298.5 | 71.7 | 31.3 | 33.4 | 1.4 | 46.4 | 46.4 | 209.8 | 852.0 | |
| 11 | 271.9 | 65.3 | 28.5 | 33.5 | 1.4 | 46.6 | 46.5 | 256.3 | 707.0 | |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 12 | 239.6 | 57.6 | 25.1 | 33.5 | 1.4 | 46.6 | 46.6 | 302.8 | 549.0 | |
| 13 | 199.6 | 48.0 | 20.9 | 33.5 | 1.4 | 46.6 | 46.6 | 349.4 | 381.0 | |
| 14 | 199.6 | 48.0 | 20.9 | 33.5 | 0.7 | 24.5 | 35.5 | 384.9 | 381.0 | |
| 15 | 151.1 | 36.3 | 15.8 | 33.0 | 0.5 | 16.5 | 20.5 | 405.4 | 218.3 | |
| 16 | 114.5 | 27.5 | 12.0 | 33.0 | 0.4 | 12.5 | 14.5 | 419.9 | 125.4 | |
| 17 | 91.4 | 22.0 | 9.6 | 33.0 | 0.3 | 8.6 | 10.6 | 430.4 | 79.9 | |
| 18 | 91.4 | 22.0 | 9.6 | 32.8 | 0.1 | 3.3 | 5.9 | 436.4 | 79.9 | |
| 19 | 74.6 | 17.9 | 7.8 | 32.8 | 0.1 | 2.0 | 2.6 | 439.0 | 53.2 | |
| 20 | 59.9 | 14.4 | 6.3 | 32.7 | 0.0 | 1.0 | 1.5 | 440.5 | 34.3 | |
| 21 | 40.7 | 9.8 | 4.3 | 32.7 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 441.0 | 15.8 | |
| 22 | 40.7 | 9.8 | 4.3 | 32.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 441.0 | 15.8 | |

กำหนดให้กระแสไฟฟ้า I = 1.2

| เวลา | rpm | | rad/s | V Volt | I Ampere | P | พ.ท. ใต้ กราฟ | P (watt) | พลัง งาน จลน์ | พลังงาน ที่ได้ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 415.1 | 100.0 | 43.5 | 42.2 | 0 | 0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 1 | 415.1 | 100.0 | 43.5 | 42.2 | 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 2 | 415.1 | 100.0 | 43.5 | 42.2 | 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 3 | 415.1 | 100.0 | 43.5 | 42.2 | 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 4 | 415.1 | 100.0 | 43.5 | 42.2 | 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 5 | 415.1 | 100.0 | 43.5 | 42.2 | 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1647.7 | 0.276 |
| 6 | 391.3 | 94.3 | 41.0 | 42.2 | 0.97 | 40.9 | 20.5 | 20.5 | 1464.2 | |
| 7 | 369.9 | 89.1 | 38.7 | 33.6 | 1.19 | 40.0 | 40.5 | 60.9 | 1308.4 | |
| 8 | 348.5 | 84.0 | 36.5 | 33.6 | 1.2 | 40.3 | 40.2 | 101.1 | 1161.4 | |
| 9 | 302.4 | 72.8 | 31.7 | 33.6 | 1.2 | 40.3 | 40.3 | 141.4 | 874.5 | |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 278.7 | 67.1 | 29.2 | 33.6 | 1.2 | 40.3 | 40.3 | 181.7 | 742.8 | |
| 11 | 251.6 | 60.6 | 26.3 | 33.6 | 1.2 | 40.3 | 40.3 | 222.0 | 605.3 | |
| 12 | 222.2 | 53.5 | 23.3 | 33.7 | 1.2 | 40.4 | 40.4 | 262.4 | 472.1 | |
| 13 | 185.7 | 44.7 | 19.4 | 33.7 | 1.2 | 40.4 | 40.4 | 302.9 | 329.8 | |
| 14 | 144.1 | 34.7 | 15.1 | 33.7 | 1.19 | 40.1 | 40.3 | 343.1 | 198.6 | |
| 15 | 113.8 | 27.4 | 11.9 | 33.7 | 1.18 | 39.8 | 39.9 | 383.1 | 123.8 | |
| 16 | 91.2 | 22.0 | 9.6 | 33.7 | 0.64 | 21.6 | 30.7 | 413.7 | 79.5 | |
| 17 | 91.2 | 22.0 | 9.6 | 33.2 | 0.42 | 13.9 | 17.8 | 431.5 | 79.5 | |
| 18 | 74.8 | 18.0 | 7.8 | 33.2 | 0.19 | 6.3 | 10.1 | 441.6 | 53.5 | |
| 19 | 74.8 | 18.0 | 7.8 | 33.2 | 0.12 | 4.0 | 5.1 | 446.8 | 53.5 | |
| 20 | 60.1 | 14.5 | 6.3 | 33.1 | 0.08 | 2.6 | 3.3 | 450.1 | 34.5 | |
| 21 | 60.1 | 14.5 | 6.3 | 33.1 | 0.04 | 1.3 | 2.0 | 452.1 | 34.5 | |
| 22 | 41.5 | 10.0 | 4.3 | 33 | 0.01 | 0.3 | 0.8 | 452.9 | 16.5 | |
| 23 | 41.5 | 10.0 | 4.3 | 33 | 0.01 | 0.3 | 0.3 | 453.2 | 16.5 | |
| 24 | 41.5 | 10.0 | 4.3 | 33 | 0.01 | 0.3 | 0.3 | 453.5 | 16.5 | |
| 25 | 41.5 | 10.0 | 4.3 | 33 | 0.01 | 0.3 | 0.3 | 453.9 | 16.5 | |
| 26 | 41.5 | 10.0 | 4.3 | 33 | 0.01 | 0.3 | 0.3 | 454.2 | 16.5 | |
| 27 | 41.5 | 10.0 | 4.3 | 33 | 0 | 0.0 | 0.2 | 454.4 | 16.5 | |
| 28 | 41.5 | 10.0 | 4.3 | 33 | 0 | 0.0 | 0.0 | 454.4 | 16.5 | |

กำหนดให้กระแสไฟฟ้า I = 1

| เวลา | rpm | | rad/s | V Volt | I Ampere | P | พ.ท. ใต้กราฟ | P (watt) | พลังงานจลน์ | พลังงานที่ได้ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 414.7 | 100.0 | 43.4 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 1 | 414.7 | 100.0 | 43.4 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 414.7 | 100.0 | 43.4 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 3 | 414.7 | 100.0 | 43.4 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 4 | 414.7 | 100.0 | 43.4 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 5 | 414.7 | 100.0 | 43.4 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1644.5 | 0.252 |
| 6 | 386.8 | 93.3 | 40.5 | 39 | 0.8 | 31.6 | 15.8 | 15.8 | 1430.7 | |
| 7 | 366.5 | 88.4 | 38.4 | 39 | 1.0 | 39.0 | 35.3 | 51.1 | 1284.5 | |
| 8 | 346.5 | 83.6 | 36.3 | 33.6 | 1.0 | 33.6 | 36.3 | 87.4 | 1148.1 | |
| 9 | 325 | 78.4 | 34. | 33.6 | 1.0 | 33.9 | 33.8 | 121.2 | 1010.0 | |
| 10 | 303.5 | 73.2 | 31.8 | 33.6 | 1.0 | 33.9 | 33.9 | 155.1 | 880.8 | |
| 11 | 282.1 | 68.0 | 29.5 | 33.6 | 1.0 | 33.9 | 33.9 | 189.0 | 761.0 | |
| 12 | 258.2 | 62.3 | 27 | 33.7 | 1.0 | 33.7 | 33.8 | 222.8 | 637.5 | |
| 13 | 230.2 | 55.5 | 24.1 | 33.7 | 1.0 | 34.0 | 33.9 | 256.7 | 506.7 | |
| 14 | 199.2 | 48.0 | 20.9 | 33.7 | 1.0 | 33.7 | 33.9 | 290.6 | 379.4 | |
| 15 | 158.8 | 38.3 | 16.6 | 33.7 | 1.0 | 33.7 | 33.7 | 324.3 | 241.1 | |
| 16 | 121 | 29.2 | 12.7 | 33.7 | 1.0 | 33.7 | 33.7 | 358.0 | 140.0 | |
| 17 | 121 | 29.2 | 12.7 | 33.7 | 0.6 | 18.9 | 26.3 | 384.3 | 140.0 | |
| 18 | 97.1 | 23.4 | 10.2 | 33.7 | 0.4 | 11.8 | 15.3 | 399.6 | 90.2 | |
| 19 | 97.1 | 23.4 | 10.2 | 33.3 | 0.1 | 4.7 | 8.2 | 407.8 | 90.2 | |
| 20 | 77 | 18.6 | 8.1 | 33.2 | 0.1 | 3.3 | 4.0 | 411.8 | 56.7 | |
| 21 | 59 | 14.2 | 6.2 | 33.2 | 0.0 | 0.7 | 2.0 | 413.8 | 33.3 | |
| 22 | 59 | 14.2 | 6.12 | 33.1 | 0.0 | 0.0 | 0.3 | 414.1 | 33.3 | |
| 23 | 40 | 9.6 | 4.2 | 33.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 414.1 | 15.3 | |
| 24 | 40 | 9.6 | 4.2 | 33.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 414.1 | 15.3 | |

กำหนดให้กระแสไฟฟ้า I = 0.8

| เวลา | rpm | | rad/s | V Volt | I Ampere | P | พ.ท.ใต้กราฟ | P (watt) | พลังงานจลน์ | พลังงานที่ได้ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 412.8 | 100.0 | 43.2 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 1 | 412.8 | 100.0 | 43.2 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 2 | 412.8 | 100.0 | 43.2 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 3 | 412.8 | 100.0 | 43.2 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 4 | 412.8 | 100.0 | 43.2 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 5 | 412.8 | 100.0 | 43.2 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1629.5 | 0.231 |
| 6 | 401.7 | 97.3 | 42.1 | 42.2 | 0.6 | 27.0 | 13.5 | 13.5 | 1543.0 | |
| 7 | 382.3 | 92.6 | 40.0 | 33.6 | 0.8 | 26.5 | 26.8 | 40.3 | 1397.6 | |
| 8 | 363.4 | 88.0 | 38.1 | 33.6 | 0.8 | 26.5 | 26.5 | 66.8 | 1262.8 | |
| 9 | 344.8 | 83.5 | 36.1 | 33.6 | 0.8 | 26.5 | 26.5 | 93.4 | 1136.9 | |
| 10 | 325.1 | 78.8 | 34.0 | 33.6 | 0.8 | 26.5 | 26.5 | 119.9 | 1010.7 | |
| 11 | 303.9 | 73.6 | 31.8 | 33.7 | 0.8 | 26.6 | 26.6 | 146.5 | 883.2 | |
| 12 | 282.8 | 68.5 | 29.6 | 33.7 | 0.8 | 26.6 | 26.6 | 173.1 | 764.8 | |
| 13 | 261.6 | 63.4 | 27.4 | 33.7 | 0.8 | 26.6 | 26.6 | 199.7 | 654.4 | |
| 14 | 237.8 | 57.6 | 24.9 | 33.7 | 0.8 | 26.6 | 26.6 | 226.4 | 540.8 | |
| 15 | 213.1 | 51.6 | 22.3 | 33.7 | 0.8 | 26.6 | 26.6 | 253.0 | 434.3 | |
| 16 | 186.3 | 45.1 | 19.5 | 33.7 | 0.8 | 26.6 | 26.6 | 279.6 | 331.9 | |
| 17 | 149.1 | 36.1 | 15.6 | 33.7 | 0.8 | 26.6 | 26.6 | 306.2 | 212.6 | |
| 18 | 114.1 | 27.6 | 11.9 | 33.7 | 0.8 | 26.6 | 26.6 | 332.9 | 124.5 | |
| 19 | 91.8 | 22.2 | 9.6 | 33.7 | 0.4 | 14.8 | 20.7 | 353.6 | 80.6 | |
| 20 | 91.8 | 22.2 | 9.6 | 33.7 | 0.3 | 8.8 | 11.8 | 365.4 | 80.6 | |
| 21 | 75.5 | 18.3 | 7.9 | 33.4 | 0.1 | 3.7 | 6.2 | 371.6 | 54.5 | |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 22 | 61 | 14.8 | 6.4 | 33.4 | 0.1 | 2.3 | 3.0 | 374.6 | 35.6 | |
| 23 | 61 | 14.8 | 6.4 | 33.3 | 0.0 | 1.0 | 1.7 | 376.3 | 35.6 | |
| 24 | 42.6 | 10.3 | 4.5 | 33.3 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 376.8 | 17.4 | |
| 25 | 42.6 | 10.3 | 4.5 | 33.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 376.8 | 17.4 | |
| 26 | 42.6 | 10.3 | 4.5 | 33.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 376.8 | 17.4 | |

กำหนดให้กระแสไฟฟ้า I = 0.6

| เวลา | rpm | | rad/s | V Volt | I Ampere | P | พ.ท. ใต้กราฟ | P (watt) | พลังงานจลน์ | พลังงานที่ได้ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 411.9 | 100.0 | 43.1 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 1 | 411.9 | 100.0 | 43.1 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 2 | 411.9 | 100.0 | 43.1 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 3 | 411.9 | 100.0 | 43.1 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 4 | 411.9 | 100.0 | 43.1 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 5 | 411.9 | 100.0 | 43.1 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1622.4 | 0.194 |
| 6 | 406.5 | 98.7 | 42.6 | 42.2 | 0.3 | 13.1 | 6.5 | 6.5 | 1580.1 | |
| 7 | 389.3 | 94.5 | 40.8 | 33.6 | 0.6 | 19.8 | 16.5 | 23.0 | 1449.2 | |
| 8 | 372.3 | 90.4 | 39.0 | 33.6 | 0.6 | 19.8 | 19.8 | 42.8 | 1325.4 | |
| 9 | 355.8 | 86.4 | 37.3 | 33.6 | 0.6 | 19.8 | 19.8 | 62.6 | 1210.6 | |
| 10 | 338.6 | 82.2 | 35.5 | 33.6 | 0.6 | 19.8 | 19.8 | 82.5 | 1096.3 | |
| 11 | 320.4 | 77.8 | 33.6 | 33.6 | 0.6 | 19.8 | 19.8 | 102.3 | 981.7 | |
| 12 | 265.4 | 64.4 | 27.8 | 33.6 | 0.6 | 19.8 | 19.8 | 122.1 | 673.6 | |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 13 | 267 | 64.8 | 28.0 | 33.6 | 0.6 | 19.8 | 19.8 | 141.9 | 681.7 | |
| 14 | 246.8 | 59.9 | 25.8 | 33.7 | 0.6 | 19.9 | 19.9 | 161.8 | 582.5 | |
| 15 | 226.9 | 55.1 | 23.8 | 33.7 | 0.6 | 19.9 | 19.9 | 181.7 | 492.3 | |
| 16 | 206.8 | 50.2 | 21.7 | 33.7 | 0.6 | 19.9 | 19.9 | 201.6 | 409.0 | |
| 17 | 183.6 | 44.6 | 19.2 | 33.7 | 0.6 | 19.9 | 19.9 | 221.4 | 322.3 | |
| 18 | 154.2 | 37.4 | 16.1 | 33.7 | 0.6 | 19.9 | 19.9 | 241.3 | 227.4 | |
| 19 | 120.8 | 29.3 | 12.7 | 33.7 | 0.6 | 19.9 | 19.9 | 261.2 | 139.5 | |
| 20 | 97.5 | 23.7 | 10.2 | 33.7 | 0.6 | 19.5 | 19.7 | 280.9 | 90.9 | |
| 21 | 97.5 | 23.7 | 10.2 | 33.7 | 0.3 | 10.4 | 15.0 | 295.9 | 90.9 | |
| 22 | 77.7 | 18.9 | 8.1 | 33.7 | 0.2 | 5.7 | 8.1 | 304.0 | 57.7 | |
| 23 | 77.7 | 18.9 | 8.1 | 33.4 | 0.1 | 3.7 | 4.7 | 308.7 | 57.7 | |
| 24 | 59.9 | 14.5 | 6.3 | 33.4 | 0.1 | 2.3 | 3.0 | 311.7 | 34.3 | |
| 25 | 59.9 | 14.5 | 6.3 | 33.3 | 0.0 | 1.0 | 1.7 | 313.4 | 34.3 | |
| 26 | 41.3 | 10.0 | 4.3 | 33.3 | 0.0 | 0.3 | 0.7 | 314.0 | 16.3 | |
| 27 | 41.3 | 10.0 | 4.3 | 33.3 | 0.0 | 0.3 | 0.3 | 314.4 | 16.3 | |
| 28 | 41.3 | 10.0 | 4.3 | 33.3 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 314.5 | 16.3 | |
| 29 | 41.3 | 10.0 | 4.3 | 33.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 314.5 | 16.3 | |

กำหนดให้กระแสไฟฟ้า I = 0.4

| เวลา | rpm | | rad/s | V Volt | I Ampere | P | พ.ท.ใต้กราฟ | P (watt) | พลังงานจลน์ | พลังงานที่ได้ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 409.6 | 100.0 | 42.9 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 1 | 409.6 | 100.0 | 42.9 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 2 | 409.6 | 100.0 | 42.9 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 3 | 409.6 | 100.0 | 42.9 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 409.6 | 100.0 | 42.9 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 5 | 409.6 | 100.0 | 42.9 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1604.3 | 0.143 |
| 6 | 396.4 | 96.8 | 41.5 | 33.6 | 0.1 | 4.7 | 2.4 | 2.4 | 1502.6 | |
| 7 | 365.9 | 89.3 | 38.3 | 33.6 | 0.4 | 13.8 | 9.2 | 11.6 | 1280.3 | |
| 8 | 350.3 | 85.5 | 36.7 | 33.6 | 0.4 | 13.8 | 13.8 | 25.4 | 1173.4 | |
| 9 | 334.1 | 81.6 | 35.0 | 33.6 | 0.4 | 13.8 | 13.8 | 39.1 | 1067.4 | |
| 10 | 317.1 | 77.4 | 33.2 | 33.6 | 0.4 | 13.8 | 13.8 | 52.9 | 961.5 | |
| 11 | 300.8 | 73.4 | 31.5 | 33.6 | 0.4 | 13.8 | 13.8 | 66.7 | 865.2 | |
| 12 | 285.1 | 69.6 | 29.9 | 33.6 | 0.4 | 13.8 | 13.8 | 80.5 | 777.3 | |
| 13 | 260.5 | 63.6 | 27.3 | 33.6 | 0.4 | 13.8 | 13.8 | 94.2 | 648.9 | |
| 14 | 250.8 | 61.2 | 26.3 | 33.6 | 0.4 | 13.8 | 13.8 | 108.0 | 601.5 | |
| 15 | 231.4 | 56.5 | 24.2 | 33.6 | 0.4 | 13.8 | 13.8 | 121.8 | 512.0 | |
| 16 | 212.4 | 51.9 | 22.2 | 33.6 | 0.4 | 13.8 | 13.8 | 135.6 | 431.4 | |
| 17 | 193.4 | 47.2 | 20.3 | 33.6 | 0.4 | 13.8 | 13.8 | 149.4 | 357.7 | |
| 18 | 171.7 | 41.9 | 18.0 | 33.6 | 0.4 | 13.8 | 13.8 | 163.1 | 281.9 | |
| 19 | 149.2 | 36.4 | 15.6 | 33.6 | 0.4 | 13.8 | 13.8 | 176.9 | 212.9 | |
| 20 | 124.3 | 30.3 | 13.0 | 33.6 | 0.4 | 13.8 | 13.8 | 190.7 | 147.7 | |
| 21 | 100.3 | 24.5 | 10.5 | 33.6 | 0.4 | 13.8 | 13.8 | 204.5 | 96.2 | |
| 22 | 80.3 | 19.6 | 8.4 | 33.6 | 0.3 | 11.4 | 12.6 | 217.1 | 61.7 | |
| 23 | 62.9 | 15.4 | 6.6 | 33.6 | 0.1 | 3.7 | 7.6 | 224.6 | 37.8 | |
| 24 | 62.9 | 15.4 | 6.6 | 33.5 | 0.1 | 2.3 | 3.0 | 227.6 | 37.8 | |
| 25 | 45.2 | 11.0 | 4.7 | 33.5 | 0.0 | 1.0 | 1.7 | 229.3 | 19.5 | |
| 26 | 45.2 | 11.0 | 4.7 | 33.4 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 229.8 | 19.5 | |
| 27 | 45.2 | 11.0 | 4.7 | 33.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 229.8 | 19.5 | |
| 28 | 45.2 | 11.0 | 4.7 | 33.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 229.8 | 19.5 | |

กำหนดให้กระแสไฟฟ้า I = 0.2

| เวลา | rpm | | rad/s | V Volt | I Ampere | P | พ.ท.ใต้กราฟ | P (watt) | พลังงานจลน์ | พลังงานที่ได้ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 407.8 | 100.0 | 42.7 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 1 | 407.8 | 100.0 | 42.7 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 2 | 407.8 | 100.0 | 42.7 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 3 | 407.8 | 100.0 | 42.7 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 4 | 407.8 | 100.0 | 42.7 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | |
| 5 | 407.8 | 100.0 | 42.7 | 42.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1590.3 | 0.088 |
| 6 | 398.7 | 97.8 | 41.8 | 33.5 | 0.2 | 6.0 | 3.0 | 3.0 | 1520.1 | |
| 7 | 383.2 | 94.0 | 40.1 | 33.5 | 0.2 | 7.4 | 6.7 | 9.7 | 1404.2 | |
| 8 | 368.2 | 90.3 | 38.6 | 33.5 | 0.2 | 7.4 | 7.4 | 17.1 | 1296.4 | |
| 9 | 354.1 | 86.8 | 37.1 | 33.5 | 0.2 | 7.4 | 7.4 | 24.5 | 1199.0 | |
| 10 | 324.3 | 79.5 | 34.0 | 33.5 | 0.2 | 7.4 | 7.4 | 31.8 | 1005.7 | |
| 11 | 324.3 | 79.5 | 34.0 | 33.5 | 0.2 | 7.4 | 7.4 | 39.2 | 1005.7 | |
| 12 | 293.4 | 71.9 | 30.7 | 33.5 | 0.2 | 7.4 | 7.4 | 46.6 | 823.2 | |
| 13 | 279.2 | 68.5 | 29.2 | 33.5 | 0.2 | 7.4 | 7.4 | 53.9 | 745.4 | |
| 14 | 279.2 | 68.5 | 29.2 | 33.5 | 0.2 | 7.4 | 7.4 | 61.3 | 745.4 | |
| 15 | 264.2 | 64.8 | 27.7 | 33.5 | 0.2 | 7.4 | 7.4 | 68.7 | 667.5 | |
| 16 | 248.3 | 60.9 | 26.0 | 33.5 | 0.2 | 7.4 | 7.4 | 76.0 | 589.6 | |
| 17 | 231.5 | 56.8 | 24.2 | 33.5 | 0.2 | 7.4 | 7.4 | 83.4 | 512.5 | |
| 18 | 215.3 | 52.8 | 22.5 | 33.5 | 0.2 | 7.4 | 7.4 | 90.8 | 443.3 | |
| 19 | 199.8 | 49.0 | 20.9 | 33.5 | 0.2 | 7.4 | 7.4 | 98.2 | 381.7 | |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 182.9 | 44.9 | 19.2 | 33.5 | 0.2 | 7.4 | 7.4 | 105.5 | 319.9 | |
| 21 | 164.1 | 40.2 | 17.2 | 33.5 | 0.2 | 7.4 | 7.4 | 112.9 | 257.5 | |
| 22 | 145.5 | 35.7 | 15.2 | 33.5 | 0.2 | 7.4 | 7.4 | 120.3 | 202.4 | |
| 23 | 126.6 | 31.0 | 13.3 | 33.5 | 0.2 | 7.4 | 7.4 | 127.6 | 153.3 | |
| 24 | 126.6 | 31.0 | 13.3 | 33.5 | 0.1 | 4.0 | 5.7 | 133.3 | 153.3 | |
| 25 | 104.4 | 25.6 | 10.9 | 33.5 | 0.1 | 2.7 | 3.4 | 136.7 | 104.2 | |
| 26 | 84 | 20.6 | 8.8 | 33.4 | 0.0 | 1.3 | 2.0 | 138.7 | 67.5 | |
| 27 | 67.1 | 16.5 | 7.0 | 33.4 | 0.0 | 0.0 | 0.7 | 139.4 | 43.1 | |
| 28 | 67.1 | 16.5 | 7.0 | 33.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 139.4 | 43.1 | |
| 29 | 50.6 | 12.4 | 5.3 | 33.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 139.4 | 24.5 | |

**ผลการทดลองระบบรีเจนเนอเรทีฟในกรณีลงเขา**

กำหนดให้กระแสไฟฟ้า I = 1.8 และปรับความเร็วรอบลงครั้งละประมาณ 20 rpm

| V (Volt) | I (Ampere) | T (N.m) | rpm | rad/s |
|---|---|---|---|---|
| 33.3 | 1.8 | 1.4 | 586 | 61.37 |
| 33.9 | 1.8 | 1.45 | 569.6 | 59.65 |
| 34.5 | 1.8 | 1.54 | 546 | 57.18 |
| 35 | 1.8 | 1.59 | 529 | 55.40 |
| 35.3 | 1.8 | 1.67 | 510 | 53.41 |
| 35.5 | 1.8 | 1760 | 488 | 51.10 |
| 35.7 | 1.8 | 1.87 | 469 | 49.11 |
| 35.9 | 1.8 | 2 | 447 | 46.81 |

กำหนดให้กระแสไฟฟ้า I = 1.6 และปรับความเร็วรอบลงครั้งละประมาณ 20 rpm

| V (Volt) | I (Ampere) | T (N.m) | rpm | rad/s |
|---|---|---|---|---|
| 35.5 | 1.6 | 1.38 | 589 | 61.68 |
| 35.8 | 1.6 | 1.42 | 572 | 59.90 |
| 36 | 1.6 | 1.48 | 547.8 | 57.37 |
| 36.1 | 1.6 | 1.54 | 530 | 55.50 |
| 36.3 | 1.6 | 1.6 | 510 | 53.41 |
| 36.5 | 1.6 | 1.69 | 487 | 51.00 |
| 36.5 | 1.6 | 1.74 | 471.7 | 49.40 |
| 36.6 | 1.6 | 1.83 | 452 | 47.33 |
| 36.6 | 1.6 | 1.94 | 428 | 44.82 |

กำหนดให้กระแสไฟฟ้า I = 1.4 และปรับความเร็วรอบลงครั้งละประมาณ 20 rpm

| V (Volt) | I (Ampere) | T (N.m) | rpm | rad/s |
|---|---|---|---|---|
| 36.1 | 1.4 | 1.27 | 590 | 61.78 |
| 36.2 | 1.4 | 1.31 | 568 | 59.48 |
| 36.3 | 1.4 | 1.34 | 552 | 57.81 |
| 36.3 | 1.4 | 1.4 | 528 | 55.29 |
| 36.3 | 1.4 | 1.48 | 498 | 52.15 |
| 36.4 | 1.4 | 1.54 | 479 | 50.16 |
| 36.4 | 1.4 | 1.59 | 463 | 48.49 |
| 36.5 | 1.4 | 1.69 | 438 | 45.87 |
| 36.5 | 1.4 | 1.79 | 419.8 | 43.96 |
| 36.5 | 1.4 | 1.89 | 400.7 | 41.96 |

กำหนดให้กระแสไฟฟ้า I = 1.2 และปรับความเร็วรอบลงครั้งละประมาณ 20 rpm

| V (Volt) | I (Ampere) | T (N.m) | rpm | rad/s |
|---|---|---|---|---|
| 36.2 | 1.2 | 1.1 | 593 | 62.10 |
| 36.3 | 1.2 | 1.13 | 572.5 | 59.95 |
| 36.3 | 1.2 | 1.17 | 552 | 57.81 |
| 36.4 | 1.2 | 1.21 | 528 | 55.29 |
| 36.4 | 1.2 | 1.25 | 513.1 | 53.73 |
| 36.5 | 1.2 | 1.31 | 487.8 | 51.08 |
| 36.5 | 1.2 | 1.35 | 471 | 49.32 |
| 36.5 | 1.2 | 1.41 | 451 | 47.23 |
| 36.5 | 1.2 | 1.48 | 430.4 | 45.07 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 36.5 | 1.2 | 1.59 | 405 | 42.41 |
| 36.6 | 1.2 | 1.68 | 387 | 40.53 |
| 36.6 | 1.2 | 1.79 | 369 | 38.64 |

กำหนดให้กระแสไฟฟ้า I = 1 และปรับความเร็วรอบลงครั้งละประมาณ 20 rpm

| V (Volt) | I (Ampere) | T (N.m) | rpm | rad/s |
|---|---|---|---|---|
| 36.3 | 1 | 0.95 | 598 | 62.62 |
| 36.4 | 1 | 0.98 | 579 | 60.63 |
| 36.5 | 1 | 1.01 | 559 | 58.54 |
| 36.5 | 1 | 1.03 | 541 | 56.65 |
| 36.6 | 1 | 1.06 | 522 | 54.66 |
| 36.6 | 1 | 1.1 | 500.9 | 52.45 |
| 36.6 | 1 | 1.14 | 481 | 50.37 |
| 36.6 | 1 | 1.19 | 461 | 48.28 |
| 36.7 | 1 | 1.25 | 439 | 45.97 |
| 36.7 | 1 | 1.29 | 423 | 44.30 |
| 36.7 | 1 | 1.38 | 398 | 41.68 |
| 36.7 | 1 | 1.46 | 378 | 39.58 |
| 36.7 | 1 | 1.54 | 359 | 37.59 |
| 36.8 | 1 | 1.64 | 341 | 35.71 |

กำหนดให้กระแสไฟฟ้า I = 0.8 และปรับความเร็วรอบลงครั้งละประมาณ 20 rpm

| V (Volt) | I (Ampere) | T (N.m) | rpm | rad/s |
|---|---|---|---|---|
| 36.7 | 0.8 | 0.82 | 600 | 62.83 |
| 36.8 | 0.8 | 0.84 | 580.5 | 60.79 |
| 36.8 | 0.8 | 0.86 | 564 | 59.06 |
| 36.8 | 0.8 | 0.88 | 543 | 56.86 |
| 36.8 | 0.8 | 0.91 | 521 | 54.56 |
| 36.9 | 0.8 | 0.93 | 503 | 52.67 |
| 36.9 | 0.8 | 0.97 | 479.4 | 50.20 |
| 36.9 | 0.8 | 1.01 | 456 | 47.75 |
| 36.9 | 0.8 | 1.03 | 441 | 46.18 |
| 36.9 | 0.8 | 1.09 | 420 | 43.98 |
| 36.9 | 0.8 | 1.14 | 399 | 41.78 |
| 37 | 0.8 | 1.2 | 379 | 39.69 |
| 37 | 0.8 | 1.26 | 361 | 37.80 |
| 37 | 0.8 | 1.36 | 335 | 35.08 |
| 37 | 0.8 | 1.41 | 324 | 33.93 |

กำหนดให้กระแสไฟฟ้า I = 0.6 และปรับความเร็วรอบลงครั้งละประมาณ 20 rpm

| V (Volt) | I (Ampere) | T (N.m) | rpm | rad/s |
|---|---|---|---|---|
| 36.7 | 0.6 | 0.68 | 596 | 62.41 |
| 36.7 | 0.6 | 0.69 | 577 | 60.42 |
| 36.8 | 0.6 | 0.7 | 556 | 58.22 |
| 36.8 | 0.6 | 0.71 | 542 | 56.76 |
| 36.8 | 0.6 | 0.73 | 522 | 54.66 |
| 36.8 | 0.6 | 0.75 | 501 | 52.46 |
| 36.8 | 0.6 | 0.78 | 487 | 51.00 |
| 36.8 | 0.6 | 0.79 | 464 | 48.59 |
| 36.9 | 0.6 | 0.83 | 436 | 45.66 |
| 36.9 | 0.6 | 0.86 | 417.9 | 43.76 |
| 36.9 | 0.6 | 0.89 | 401 | 41.99 |
| 36.9 | 0.6 | 0.93 | 380 | 39.79 |
| 36.9 | 0.6 | 0.96 | 368 | 38.54 |
| 36.9 | 0.6 | 1.02 | 344 | 36.02 |
| 36.9 | 0.6 | 1.1 | 317 | 33.20 |
| 36.9 | 0.6 | 1.17 | 297 | 31.10 |
| 36.9 | 0.6 | 1.25 | 281 | 29.43 |

มหาวิทยาลัยพะเยา UNIVERSITY OF PHAYAO

กำหนดให้กระแสไฟฟ้า I = 0.4 และปรับความเร็วรอบลงครั้งละประมาณ 20 rpm

| V (Volt) | I (Ampere) | T (N.m) | rpm | rad/s |
|---|---|---|---|---|
| 36.8 | 0.4 | 0.53 | 600 | 62.83 |
| 36.8 | 0.4 | 0.54 | 578 | 60.53 |
| 36.8 | 0.4 | 0.54 | 540.7 | 56.62 |
| 36.8 | 0.4 | 0.55 | 522 | 54.66 |
| 36.8 | 0.4 | 0.56 | 503 | 52.67 |
| 36.8 | 0.4 | 0.57 | 461 | 48.28 |
| 36.8 | 0.4 | 0.59 | 481 | 50.37 |
| 36.8 | 0.4 | 0.6 | 458 | 47.96 |
| 36.8 | 0.4 | 0.62 | 442 | 46.29 |
| 36.8 | 0.4 | 0.63 | 423 | 44.30 |
| 36.8 | 0.4 | 0.66 | 400.3 | 41.92 |
| 36.9 | 0.4 | 0.68 | 377 | 39.48 |
| 36.9 | 0.4 | 0.7 | 366 | 38.33 |
| 36.9 | 0.4 | 0.73 | 342 | 35.81 |
| 36.9 | 0.4 | 0.77 | 318 | 33.30 |
| 36.9 | 0.4 | 0.81 | 301 | 31.52 |
| 36.9 | 0.4 | 0.87 | 278 | 29.11 |
| 36.9 | 0.4 | 0.91 | 262 | 27.44 |
| 36.9 | 0.4 | 1 | 242 | 25.34 |

กำหนดให้กระแสไฟฟ้า I = 0.2 และปรับความเร็วรอบลงครั้งละประมาณ 20 rpm

| V (Volt) | I (Ampere) | T (N.m) | rpm | rad/s |
|---|---|---|---|---|
| 36.8 | 0.2 | 0.4 | 596 | 62.41 |
| 36.8 | 0.2 | 0.4 | 579 | 60.63 |
| 36.8 | 0.2 | 0.41 | 561 | 58.75 |
| 36.8 | 0.2 | 0.41 | 540 | 56.55 |
| 36.8 | 0.2 | 0.41 | 520 | 54.45 |
| 36.8 | 0.2 | 0.42 | 500 | 52.36 |
| 36.8 | 0.2 | 0.42 | 482 | 50.47 |
| 36.8 | 0.2 | 0.43 | 463 | 48.49 |
| 36.8 | 0.2 | 0.43 | 443 | 46.39 |
| 36.8 | 0.2 | 0.44 | 422 | 44.19 |
| 36.8 | 0.2 | 0.45 | 400 | 41.89 |
| 36.8 | 0.2 | 0.46 | 384 | 40.21 |
| 36.8 | 0.2 | 0.47 | 362 | 37.91 |
| 36.8 | 0.2 | 0.49 | 339 | 35.50 |
| 36.8 | 0.2 | 0.5 | 323 | 33.82 |
| 36.8 | 0.2 | 0.52 | 299 | 31.31 |
| 36.8 | 0.2 | 0.54 | 283 | 29.64 |
| 36.8 | 0.2 | 0.57 | 256 | 26.81 |
| 36.8 | 0.2 | 0.6 | 243 | 25.45 |
| 36.8 | 0.2 | 0.63 | 225 | 23.56 |
| 36.8 | 0.2 | 0.69 | 203 | 21.26 |

# ประวัติผู้ทำวิจัย


| | |
|---|---|
| **ชื่อ – นามสกุล** | นายธวัชชัย ชลยาวิลาศ |
| **วันเดือนปีเกิด** | 3 ธันวาคม 2538 |
| **ที่อยู่** | บ้านเลขที่12 หมู่ 14 ตำบลแม่เจดีย์ อำเภอเวียงป่าเป้า จังหวัดเชียงราย 57260 |
| **การติดต่อ** | หมายเลขโทรศัพท์ 064 106 3666<br>อีเมลล์ mormosme@hotmail.com |


**ประวัติการศึกษา**

| | |
|---|---|
| พ.ศ. 2561 | วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล<br>คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา<br>อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา |
| พ.ศ. 2557 | มัธยมศึกษาตอนปลาย<br>โรงเรียนแม่เจดีย์วิทยาคม |
| พ.ศ. 2555 | มัธยมศึกษาตอนต้น<br>โรงเรียนแม่เจดีย์วิทยาคม |

# ประวัติผู้ทำวิจัย


| | |
|---|---|
| **ชื่อ – นามสกุล** | นายธนากร ใจยา |
| **วันเดือนปีเกิด** | 8 พฤษภาคม 2539 |
| **ที่อยู่** | บ้านเลขที่ 34 หมู่ 9 ต.แม่เจดีย์ใหม่ อำเภอเวียงป่าเป้า จังหวัดเชียงราย 57260 |
| **การติดต่อ** | หมายเลขโทรศัพท์ 088 260 4892<br>อีเมลล์ newzar009@hotmail.com |


**ประวัติการศึกษา**

| | |
|---|---|
| พ.ศ. 2561 | วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล<br>คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา<br>อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา |
| พ.ศ. 2557 | มัธยมศึกษาตอนปลาย<br>โรงเรียนแม่เจดีย์วิทยาคม |
| พ.ศ. 2555 | มัธยมศึกษาตอนต้น<br>โรงเรียนแม่เจดีย์วิทยาคม |

UNIVERSITY OF PHAYAO มหาวิทยาลัยพะเยา