

การออกแบบสร้างรถสามล้อไฟฟ้าด้วยมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน
โดยประยุกต์ใช้การอัดประจุแบตเตอรี่จากโซล่าเซลล์
Design of an Electric Tricycle with a Brushless DC Motor
Using Solar Cell Charging Application

ดุสิต อุทิศสุนทร* และ คมสันต์ บันลือหาญ

Dusit Uthitsunthorn* and Komsan Bunluehan

สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

Department of Electrical Engineering Technology, Faculty of Industrial,

Buriram Rajabhat University

E-mail: dusit.ut.@bru.ac.th

Received : August 14, 2024

Revised : November 12, 2024

Accepted : November 29, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบสร้างรถสามล้อไฟฟ้าด้วยมอเตอร์ไร้แปรงถ่านและศึกษาการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถสามล้อไฟฟ้า การออกแบบใช้มอเตอร์ไร้แปรงถ่านขนาด 24 โวลต์ 350 วัตต์ ควบคุมความเร็วรอบด้วยไอซี MC33035 ด้านบนมีแผงโซล่าเซลล์แบบโมโนคริสตัลไลน์ (Mono crystalline) ขนาด 250 วัตต์ แรงดัน 31.2 โวลต์ กระแส 8.02 แอมป์ จำนวน 2 แผงต่อขนานผ่านวงจรอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงานเข้าแบตเตอรี่ จากผลการทดลองพบว่าที่ระยะทาง 100 เมตร รับน้ำหนักสูงสุดที่ 100 กิโลกรัม มีความเร็ว 7.16 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ใช้เวลา 91.60 วินาที สามารถออกตัวเคลื่อนที่บนทางชันสูงสุดที่ระดับ 30 องศา ในสภาวะที่มีน้ำหนักบรรทุกสูงสุดไม่เกิน 100 กิโลกรัม ใช้เวลานานสูงสุดที่เวลา 3.48 วินาที จากนั้นทดสอบวงจรอัดประจุกระแสไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่ผ่านแผงเซลล์แสงอาทิตย์เต็ม ที่แรงดัน 24.90 โวลต์ ใช้เวลา 6 ชั่วโมงเมื่อแบตเตอรี่อัดประจุเต็มแล้วทดสอบการขับเคลื่อนต่อเนื่องรวมระยะทางทั้งสิ้น 4,000 เมตร แรงดันลดลงเหลือ 21.60 โวลต์ ใช้เวลา 29.20 นาที จึงหยุดการเคลื่อนที่

คำสำคัญ: มอเตอร์ไร้แปรงถ่าน วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน รถสามล้อไฟฟ้า

ABSTRACT

The objective of this research is to design and construct an electric tricycle powered by a 24-volt, 350-watt brushless motor, controlled by an MC33035 integrated circuit. The tricycle's energy is supplemented by two 250-watt, 31.2-volt, 8.02-amp mono-crystalline solar panels, which are connected in parallel to charge the battery through a dedicated charging circuit. Testing shows that the tricycle can transport up to 100 kilograms over a 100-meter distance, achieving a speed of 7.16 kilometers per hour in 91.6 minutes. It can initiate movement on slopes of up to 30 degrees while carrying the maximum load, taking 3.48 seconds to start. The battery reaches a full charge of 24.9 volts after 6 hours of solar charging. In continuous operation, the fully charged battery sustains a 4,000-meter journey, dropping to 21.6 volts in 29.2 minutes before stopping.

KeyWords: DC Brushless Motor, Brushless Motor Speed Control, Electric Tricycle

บทนำ

ในปัจจุบันทั่วโลกต้องพบปัญหาความเสี่ยงด้านการขาดแคลนพลังงานและราคาเชื้อเพลิงที่สูงขึ้น ทำให้ประเทศต้องวางแผนการต่าง ๆ ด้านพลังงานเพื่อป้องกันการขาดแคลนพลังงานในอนาคต และต้องดำเนินมาตรการประหยัดพลังงานควบคู่กันกับการใช้พลังงานทดแทน เนื่องจากวิกฤตการณ์ราคาน้ำมันแปรปรวนอย่างรวดเร็วและมีราคาแพง นอกจากนั้นการใช้เครื่องยนต์จากน้ำมันทำให้เกิดมลภาวะปล่อยไอเสียคาร์บอนไดออกไซด์ เกิดสภาวะโลกร้อนจากการเผาไหม้พลังงานเชื้อเพลิงสร้างมลภาวะทางอากาศ เพราะควันที่ออกมาจากท่อไอเสียปล่อยเข้าสู่ชั้นบรรยากาศ สร้างมลพิษเกิดสภาวะเรือนกระจกและการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศโลก ซึ่งส่งผลเสียโดยตรงต่อธรรมชาติและสุขภาพจากอุณหภูมิโลกที่สูงมากยิ่งขึ้นและน้ำมันกำลังจะหมดไปในอนาคต

จากปัญหาราคาน้ำมันเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลกระทบโดยตรงต่อผู้บริโภคที่เติมน้ำมันสำหรับรถยนต์ส่วนบุคคลและภาระต้นทุนค่าใช้จ่ายจากการขนส่งสินค้าต่าง ๆ รถที่ใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมันจะมีเสียงเครื่องยนต์ดังสร้างมลพิษทางเสียง ซึ่งในปัจจุบันนี้มีแนวความคิดการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำเนิดพลังงานกลในการขับเคลื่อนทดแทนเครื่องยนต์ โดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ทดแทนลดการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง ดังนั้นแบตเตอรี่จึงเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานที่สำคัญของการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า แต่ปัญหาสำหรับรถไฟฟ้าที่พบจากการเดินทางเมื่อแบตเตอรี่ใกล้หมดพลังงาน จะต้องมีการชาร์จ

แบตเตอรี่เข้าไปสะสมพลังงานใหม่ ซึ่งสถานีการชาร์จรถไฟฟ้าในปัจจุบันนั้นมีน้อย และข้อจำกัดการชาร์จรถไฟฟ้าที่บ้านเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายไฟฟ้าที่สูงขึ้น อีกทั้งเมื่อเกิดปัญหาไฟฟ้าติดขัดอันเนื่องมาจากไฟดับ หรือไฟตก จะส่งผลกระทบต่อการชาร์จทำให้ขาดแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มั่นคงไม่สามารถส่งกระแสไฟฟ้าเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ของรถไฟฟ้าได้ต่อเนื่อง

การวิจัยครั้งนี้จึงทำการออกแบบประยุกต์สร้างรถสามล้อไฟฟ้า โดยใช้พลังงานจากเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Cell) มาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าแล้วเก็บสะสมในแบตเตอรี่ (สุโรจน์ แสงสนิท, 2567) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาเกี่ยวกับการชาร์จแบตเตอรี่ อีกทั้งรถไฟฟ้าใช้มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในการขับเคลื่อนสามารถทำการควบคุมได้ง่าย มีความคล่องตัว ไม่มีมลพิษทางอากาศและเสียงรบกวน การบำรุงรักษาง่ายกว่าเมื่อเทียบกับการใช้เครื่องยนต์และทำการออกแบบวงจรประยุกต์ใช้เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Cell) ในการชาร์จแบตเตอรี่ รถสามล้อไฟฟ้าที่ออกแบบสามารถใช้กับไฟฟ้าในบ้านเรือนทั่วไปในการอัดประจุไฟฟ้าและจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ฝ่ายวิจัยนโยบาย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2560) ซึ่งใช้โครงสร้างและวัสดุอุปกรณ์ที่หาซื้อได้ภายในประเทศ

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อออกแบบสร้างรถสามล้อไฟฟ้าด้วยมอเตอร์ไร้แปรงถ่านโดยการประยุกต์ใช้การการอัดประจุแบตเตอรี่จากโซลาเซลล์
2. เพื่อศึกษาการทำงานของรถสามล้อไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

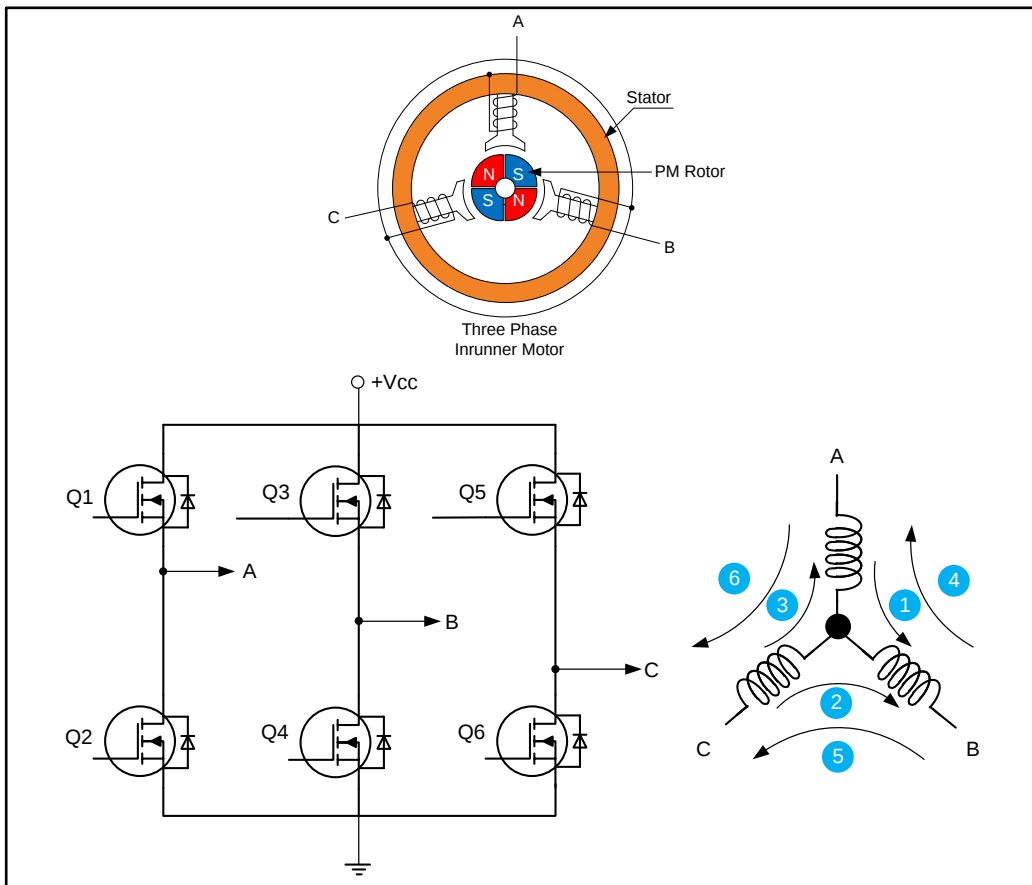
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง โดยจัดแบ่งเนื้อหาในด้านต่าง ๆ มีรายละเอียดดังนี้

1. มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC: BLDC) นำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อการขับเคลื่อนต้นกำลังแทนเครื่องยนต์ โครงสร้างของมอเตอร์ดังกล่าวประกอบ 1 มอเตอร์ชนิดนี้มีหลักทำงาน โดยอาศัยตัวควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดสเตเตอร์ ที่ทำหน้าที่เป็นชุดสร้างสนามแม่เหล็กลักษณะแบบเดียวกับการทำงานของซิงโครนัสมอเตอร์แบบใช้แม่เหล็กถาวร (Permanence Magnet Synchronous Motor: PMSM) โดยการเรียงกระแสเข้าไปยังขดลวดที่อยู่บนโรเตอร์เพื่อสร้างแม่เหล็กไฟฟ้า (Rambabu , 2007) ซึ่งการทำงานดังกล่าว จะให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่ความเร็วรอบเท่ากับสนามแม่เหล็กหมุน ที่ถูกสร้าง

มาจากป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าในส่วนของโรเตอร์ จากนั้นก็ทำให้เกิดการดูดและผลักกับขั้วแม่เหล็กที่อยู่ที่สเตเตอร์และทำให้เกิดการหมุนเคลื่อนที่รอบแกนหมุน การควบคุมสามารถทำได้โดยการปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวด และทำการปรับความถี่ของแหล่งจ่ายอาร์เมเจอร์ที่สเตเตอร์ โดยแปรผันตามความเร็วของตัวโรเตอร์ เป็นผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่เกิดจากอาร์เมเจอร์ มอเตอร์แบบ BLDC จึงเป็นรูปแบบหนึ่งของมอเตอร์แบบซิงโครนัส (Synchronous Motor) (Pillay and Krishnan, 1989) ดังนั้นหากให้เกิดการหมุนต่อเนื่อง จะต้องควบคุมสวิทช์สถานะการทำงานโดยใช้มอสเฟต (MOSFET) ต่อกันเป็นแบบบริดจ์จำนวน 6 ตัว เพื่อให้สามารถสับเปลี่ยนขั้วแหล่งจ่าย ทำการสับขั้วให้กระแสไหลในจังหวะที่เหมาะสมตามลำดับไป ดังภาพประกอบ 1 และเมื่อกระทำต่อเนื่องไปจนครบ 6 ขั้น จะเกิดการหมุน 1 รอบ ดังนั้นระหว่างขั้นต่าง ๆ นี้ ขั้ว A B และ C จะถูกสับเปลี่ยนขั้วไปมาระหว่างบวกและลบ (วันนาเดีย นาวะ, 2563)



ภาพประกอบ 1 โครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

หมายเหตุ จาก P. Pillay & R. Krishnan. (1989) . Modeling, Simulation and Analysis of a Permanent Magnet Brushless DC motor drive part II: The brushless DC motor drive. IEEE Transactions on Industry application, Vol.25

การควบคุมมอเตอร์ชนิดนี้จะใช้ตัวจับตำแหน่งของโรเตอร์ทำหน้าที่แปลงข้อมูล (Encoder) จากโรเตอร์จะต้องใช้ตัวจับตำแหน่งและความเร็วของโรเตอร์ (Rotor Position Sensor) เพื่อให้การปรับความถี่ที่ป้อนให้กับสเตเตอร์ลักษณะเหมือนวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส โดยการควบคุมแต่ละเฟสต่างกัน 120 องศา (David, 2021) ต้องจ่ายไฟที่สอดคล้องกันให้กับมอเตอร์ทำงานสลับกันแบบ 2 เฟส ดังภาพประกอบ 1 มอเตอร์มีขั้วลวด 3 เฟสคือ A B และ C การควบคุมมอเตอร์จะจ่ายไฟให้เฟส A และเฟส B ส่วนเฟส C จะไม่มีการจ่ายไฟ ต่อมาจะสลับการจ่ายไฟให้กับเฟส B และเฟส C ส่วนเฟส A จะไม่มีการจ่ายไฟ จากนั้นจะจ่ายไฟให้กับเฟส C และเฟส A ส่วนเฟส B จะไม่มีการจ่ายไฟ โดยจะสลับกันจนทำให้เกิดการหมุนของมอเตอร์ดังแสดงใน (Robinson, 2006 และ Mubeen, 2008)

2. การคำนวณหาขนาดของมอเตอร์

มอเตอร์กระแสตรงนำมาใช้งานหลากหลาย และมีกำลังสูงกว่าเมื่อเทียบกับมอเตอร์แบบแปร่งถ่าน มอเตอร์ชนิดนี้ไม่มีแรงเสียดทานจึงทำให้มีแรงหมุนมากแต่ความร้อนน้อยเนื่องจากไม่มีแปร่งถ่านเมื่อส่งกระแสไฟจึงไม่เกิดประกายไฟ อีกทั้งการใช้แม่เหล็กถาวรทำให้เกิดแรงบิดสูงในการจ่ายกระแสยังคงที่สม่ำเสมอ (Krause,1986) ซึ่งการหาขนาดกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์สามารถหาได้ดังสมการที่ (1)

$$P = T \times \frac{2\pi N}{60} \quad (1)$$

โดยที่ P = กำลังไฟฟ้ามีหน่วยเป็นวัตต์
T = แรงบิดมีหน่วยเป็นนิวตันเมตร
N = ความเร็วรอบมีหน่วยเป็นรอบต่อนาที

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (1) ในการหาค่าขนาดของแรงบิดนั้นหาได้จากสมการที่ (2)

$$T = F \times r \quad (2)$$

เมื่อ $F = ma$

ดังนั้น $T = ma \times r \quad (3)$

โดยที่ T = แรงบิดมีหน่วยเป็นนิวตันเมตร
 m = มวลมีหน่วยเป็นกิโลกรัม
 a = อัตราเร่งมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที
 r = รัศมีล้อรถมีหน่วยเป็นเมตร

งานวิจัยนี้กำหนดน้ำหนักสูงสุดที่ 100 กิโลกรัม กำหนดอัตราเร่งเท่ากับ 0.833 เมตรต่อวินาที รัศมีของล้อเท่ากับ 0.25 เมตร แทนค่าลงในสมการที่ (3) จะได้ค่าแรงบิดเท่ากับ 20.82 นิวตันเมตร กำหนดความเร็วรอบเท่ากับ 150 รอบต่อวินาที แทนค่าแรงบิดและความเร็วรอบลงในสมการที่ (1) จะได้มอเตอร์ขนาด 326.95 วัตต์

การหาขนาดกระแสของมอเตอร์หาได้จากสมการที่ (4)

$$I = \frac{P}{V \times \text{eff}} \quad (4)$$

เมื่อ I = กระแสมีหน่วยเป็นแอมป์
 P = กำลังไฟฟ้ามีหน่วยเป็นวัตต์
 V = แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีหน่วยเป็นโวลต์
 eff = ค่าประสิทธิภาพ

เลือกใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 โวลต์ กำหนดประสิทธิภาพเท่ากับ 0.85 ค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาด 326.95 วัตต์ แทนค่าลงในสมการที่ (4) จะได้ขนาดกระแสเท่ากับ 16.02 แอมป์ จากการค้นคว้าข้อมูลที่มีจำหน่ายโดยทั่วไปงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (BLDC) ขนาด 350 วัตต์ แรงดัน 24 โวลต์

วิธีดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการออกแบบสร้างและศึกษาการทำงานของรถสามล้อไฟฟ้าที่ใช้การอัดประจุจากพลังงานแสงอาทิตย์เปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้าแล้วเก็บพลังงานไว้ในแบตเตอรี่ เพื่อใช้ในการขับเคลื่อน มีโครงสร้างหลักแนวคิดสามารถดัดแปลงและนำไปใช้งานหลากหลาย มีรายละเอียดดังนี้

1. การออกแบบรถสามล้อไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Sketch Up

การออกแบบสร้างรถสามล้อไฟฟ้าใช้โครงสร้างที่มีความแข็งแรงน้ำหนักเบา เพื่อขับเคลื่อนชุดต้นกำลังด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า โดยทำการออกแบบโครงสร้างด้วยโปรแกรม Sketch Up ดังภาพประกอบ 2

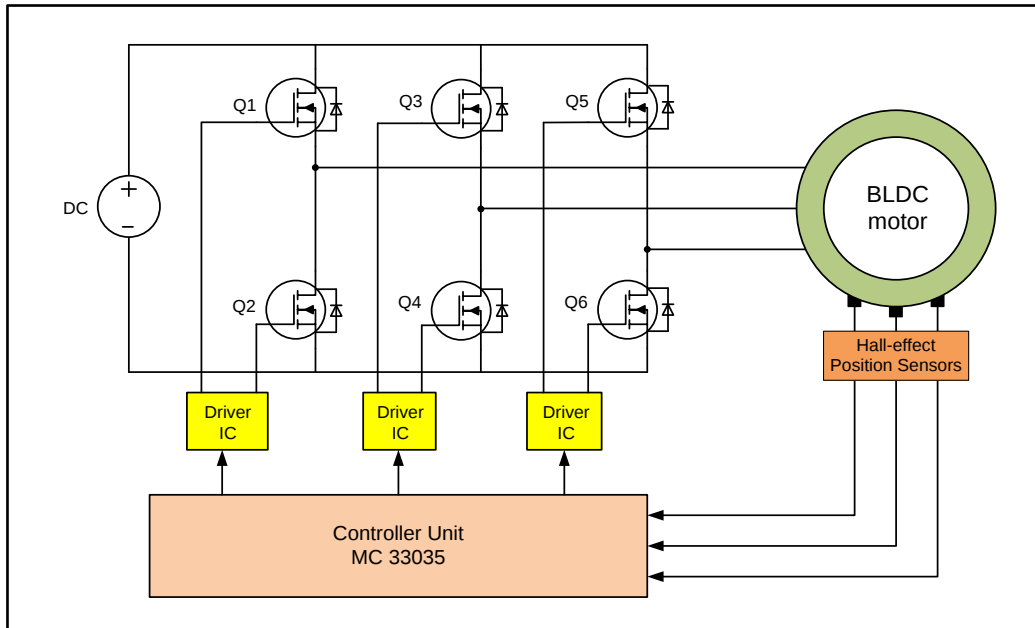


ภาพประกอบ 2 แบบจำลอง 3 มิติรูปทรงของรถสามล้อไฟฟ้าด้วยมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน

โครงสร้างรถสามล้อไฟฟ้าทำจากเหล็กที่มีความหนา 2.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร หมายเลข (1) ติดตั้งมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านขนาด 350 วัตต์ 24 โวลต์ หมายเลข (2) ทำการขับเคลื่อนล้อหลังด้วยแกนเพลาลูกปืนตึกตามีเส้นผ่านศูนย์กลางวงใน 2.5 เซนติเมตร หมายเลข (3) เมื่อเปิดสวิตช์และบิดคันเร่งไฟฟ้าจะส่งสัญญาณไฟฟ้าไปยังชุดควบคุมมอเตอร์ ประกอบด้วยวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ ไฟแสดงสถานะแบตเตอรี่ สวิตช์ตัดวงจร และวงจรการอัดประจุโซล่าเซลล์ หมายเลข (4) ผ่านชุดล้อหน้าและล้อหลังใช้ขนาดขอบ 17x1.40 นิ้ว หมายเลข (5) ทำให้รถเคลื่อนที่ส่งกำลังทางกลผ่านชุดโซสเตอร์ 428 สเตอร์ล้อย 45 ฟัน สเตอร์เพลลา 14 ฟัน หมายเลข (6) มีแผงโซล่าเซลล์อยู่โครงสร้างด้านบนขนาด P_{max} 250 วัตต์, V_{mp} 31.2 โวลต์, I_{mp} 8.02 แอมป์ หมายเลข (7) ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่แบบ Deep cycle ขนาด 12 โวลต์ 60 แอมแปร์-ชั่วโมง 2 ลูก ต่อแบบอนุกรมเป็นแรงดัน 24 โวลต์ หมายเลข (8) ใช้คอปป์ป้องกันการสั่นสะเทือนจากการขับเคลื่อน หมายเลข (9) คันเร่งไฟฟ้าติดตั้งอยู่มือจับด้านขวา หมายเลข (10) เมื่อแรงดันต่ำกว่าระดับจะทำการอัดประจุพลังงานแสงอาทิตย์มาเก็บไว้ที่แบตเตอรี่ การหยุดรถ จะทำการลดความเร็วและใช้เบรกมือ (Drum Break) ที่ล้อทั้งสองด้าน (วิรุณ โมณะตระกูล และคณะ, 2557)

2. การออกแบบและสร้างวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน

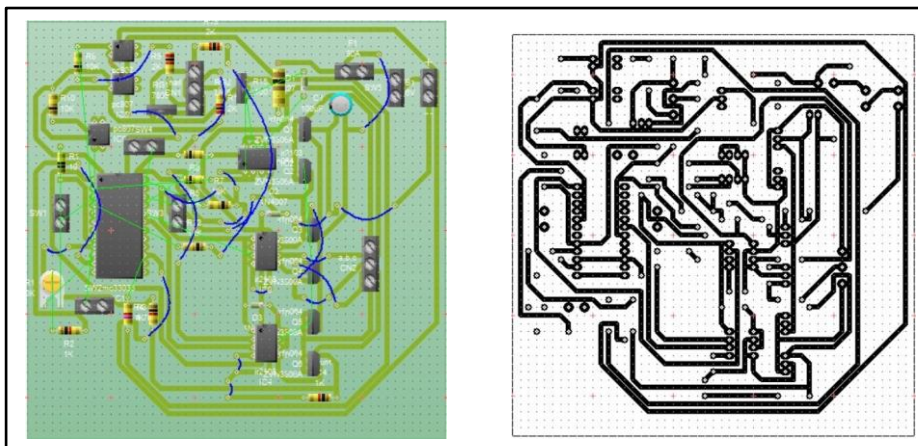
ผู้วิจัยทำการออกแบบวงจรควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน การทำงานขับเคลื่อนประกอบด้วย มอเตอร์ วงจรการควบคุม และคันเร่ง โดยใช้แบตเตอรี่แบบแห้ง (Deep cycle) วงจรการขับเคลื่อนรถสามล้อไฟฟ้าด้วยไอซี MC33035 ให้ทำงานตามเงื่อนไขทำโดย ฮอลล์เซ็นเซอร์ (Hall sensor) ในตัวมอเตอร์หน้าที่กำหนดตำแหน่งในการจ่ายสัญญาณให้ับขาเกตของ มอสเฟตที่ ดังภาพประกอบ 3 การต่อใช้งานตามเอกสารใน (ฐิติกร ปันดอกไม้ และคณะ, 2565)



ภาพประกอบ 3 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไร้แปรงถ่านด้วย IC เบอร์ MC33035

หมายเหตุ จาก ฐิติกร ปั่นดอกไม้ และคณะ (2565) *รถจักรยานไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน*. การประชุมวิชาการระดับชาติ สำหรับนักศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ครั้งที่ 2.

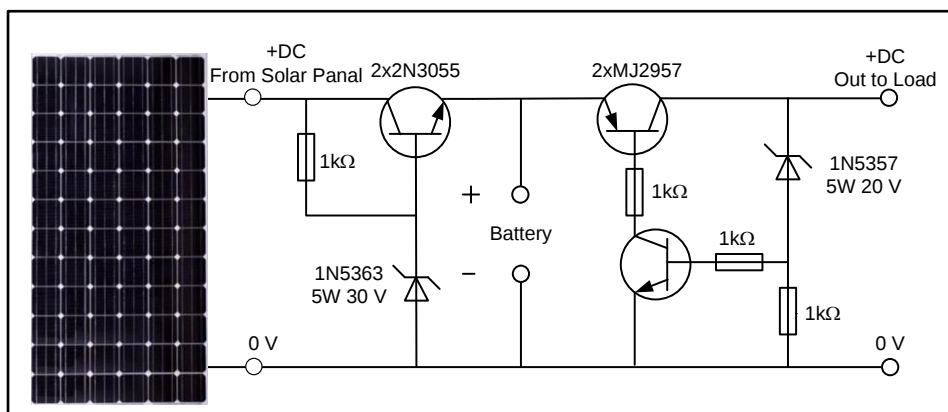
การออกแบบวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน ศึกษาหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ MC33035 (ON Semiconductor , 2024) ซึ่งเป็นวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ PWM ควบคุมความเร็วมอเตอร์เพื่อควบคุมการทำงานของวงจรกำลังที่ใช้มอเตอร์เฟส P064 ขนาดแรงดันได้สูงสุดถึง 60 โวลต์ 70 แอมป์ ดังภาพประกอบ 3 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรนำไปใช้ในการปรับระดับควบคุมความเร็วมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน จากนั้นทำการออกแบบลายวงจรพิมพ์ (PCB Board) ด้วยโปรแกรม Circuit Wizard ดังภาพประกอบ 4



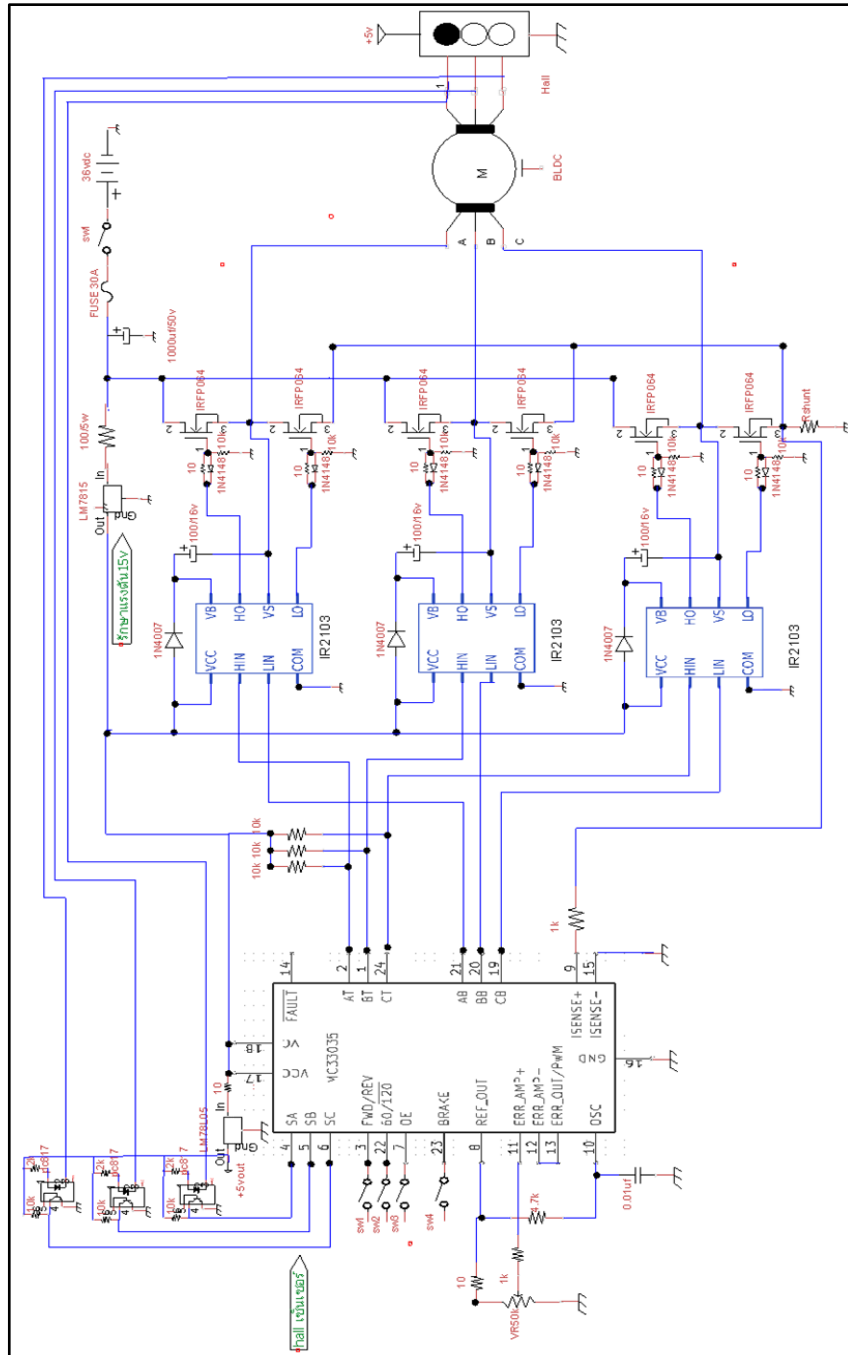
ภาพประกอบ 4 การออกแบบวงจรแผ่นปริ้น (PCB Board) ด้วยโปรแกรม Circuit Wizard

3. วงจรการอัดประจุพลังงานแสงอาทิตย์เข้าแบตเตอรี่

งานวิจัยนี้ออกแบบวงจรการประจุกระแสไฟฟ้าที่มาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าแบตเตอรี่ มีหน้าที่อัดประจุกระแสไฟเข้าเมื่อแรงดันแบตเตอรี่อยู่ในระดับต่ำ และทำการตัดการจ่ายกระแสไฟที่ไปอัดประจุยังแบตเตอรี่เมื่อแรงดันของแบตเตอรี่อยู่ในระดับที่สูง โดยใช้เซ็นเซอร์ไดโอดในการรักษาระดับแรงดัน (Homemade Circuit, 2024) ดังภาพประกอบ 5 เพื่อป้องกันการอัดประจุเกิน (Over Charging) ซึ่งจะทำให้แบตเตอรี่เกิดความเสียหายและเสื่อมสภาพก่อนอายุการใช้งาน



ภาพประกอบ 5 การออกแบบวงจรอัดประจุพลังงานแสงอาทิตย์



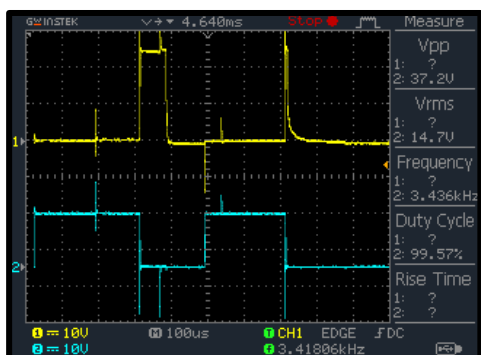
ภาพประกอบ 6 วงจรการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วย IC เบอร์ MC33035

ผลการดำเนินการวิจัย

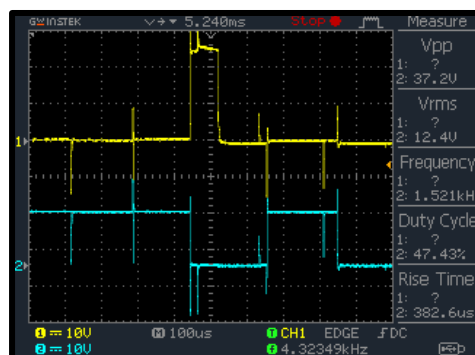
ส่วนนี้ทำการทดสอบการทำงานในการขับเคลื่อนประกอบด้วยการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักบรรทุกเพื่อหาค่าความเร็ว กระแส เวลา โดยใช้สถานที่ทดสอบภายในบริเวณสนามฟุตบอลมหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ระยะทาง 100 เมตร การอัดประจุแบตเตอรี่จากโซลาเซลล์ ตลอดจนระยะทางในการใช้งานต่อการอัดประจุ 1 ครั้ง เพื่อหาขอบเขตการทำงานของรถไฟฟ้า มีรายละเอียดดังนี้

1. ผลการทดสอบวัดรูปสัญญาณชุดขับเคลื่อนไดร์ฟ IRF 064N ที่ขา G

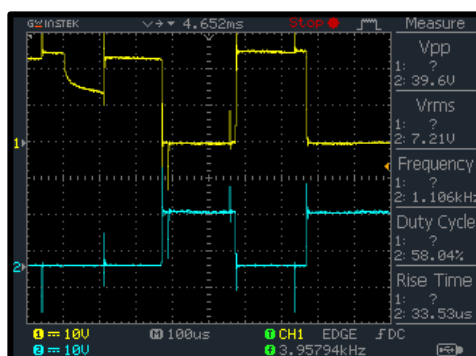
การทดสอบโดยจ่ายไฟเลี้ยงของวงจร 24 โวลต์ ตามที่ได้มีการออกแบบไว้ทำการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าวงจรป้อนสัญญาณพัลส์เข้ากับขาเกตของมอสเฟตวงจร IRF 064N ทั้งหมด 6 ตัว ดังภาพประกอบ 5 ซึ่งสามารถแสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรสร้างพัลส์ PWM วัดรูปสัญญาณชุดขับเคลื่อนไดร์ฟ IRF 064N ที่ขา G ตัวที่ 1 วัดคร่อมตัวที่ 2 ของเฟส A ขา G ตัวที่ 3 วัดคร่อมตัวที่ 4 ของเฟส B และ ขา G ตัวที่ 5 วัดคร่อมตัวที่ 6 ของเฟส C ทำการวัดโดยใช้ฮอสซิลโลสโคป CH1 และ CH2 ที่ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที ดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 7 มอสเฟตตัวที่ 1 และ 2 เฟส A



ภาพประกอบ 8 มอสเฟตตัวที่ 3 และ 4 เฟส B



ภาพประกอบ 9 มอสเฟตตัวที่ 5 และ 6 เฟส C

การวัดสัญญาณของแรงดันที่ได้จากขา G ของมอสเฟตตามภาพประกอบ 7 ถึงภาพประกอบ 9 ซึ่งจะดูลักษณะการทำงานในช่วงของการเปิด - ปิด การทำงานของมอสเฟตทั้ง 6 ตัว โดยมอสเฟตตัวที่ 1 จะทำงานก่อนแล้วตามด้วยมอสเฟตตัวที่ 2 , 3 , 4 , 5 และตัวที่ 6 ตามลำดับ

2. การทดสอบภาระของโหลดที่ความเร็วสูงสุด

ในส่วนนี้ทำการทดสอบการขับเคลื่อนรถสามล้อไฟฟ้าที่ระยะทาง 100 เมตร โดยใช้ น้ำหนักเป็นภาระโหลดซึ่งประกอบด้วย น้ำหนักคนขับ น้ำหนักของรถและน้ำหนักบรรทุกทุก ดังภาพประกอบ 10 รวมกันทั้งหมดเพื่อให้ได้พิกัดน้ำหนักดังตารางที่ 1 จากการทดสอบที่ความเร็วสูงสุด ภายในสนามกีฬามหาวิทยาลัยดังภาพประกอบ 13 จะพบว่าเมื่อมีภาระน้ำหนักมากขึ้นกระแส โหลดมีขนาดเพิ่มขึ้นในขณะที่ความเร็วลดลง โดยเมื่อโหลดมีภาระการรับน้ำหนักที่พิกัดสูงสุดขนาด 100 กิโลกรัม กระแสขณะออกตัวสูงเท่ากับ 40.12 แอมป์ จากนั้นจะลดลงสู่กระแสปกติ มีค่าเท่ากับ 17 แอมป์ ความเร็วลดลงเหลือ 7.16 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ใช้เวลา 91.60 วินาที และช่วงน้ำหนัก 60 กิโลกรัม กระแสขณะออกตัวสูงเท่ากับ 37.24 แอมป์ จากนั้นจะลดลงสู่กระแสปกติ มีค่าเท่ากับ 12 แอมป์ แต่มีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 8.15 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ใช้เวลา 44.16 วินาที



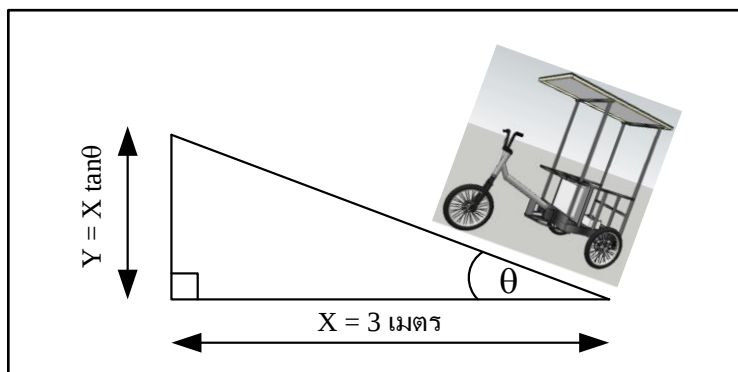
ภาพประกอบ 10 ผู้ทดสอบและน้ำหนักของผู้ทำการทดสอบการขับเคลื่อนรถสามล้อไฟฟ้า

ตารางที่ 1 การทดสอบทางไฟฟ้าในการรับน้ำหนักของการขับเคลื่อนมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน

น้ำหนัก (กิโลกรัม)	แรงดัน (โวลต์)	กระแส (แอมป์)		ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	เวลา (วินาที)
		ขณะออกตัว	ปกติมอเตอร์		
60	24	37.24	12	8.15	44.16
70	24	38.13	13	7.92	45.42
80	24	38.52	14	7.77	46.31
90	24	39.01	15	7.65	47.05
100	24	40.12	17	7.16	91.60

3. ผลทดสอบสมรรถนะการขึ้นทางชัน

การทดสอบนี้ทำการจำลองการขับขี่เมื่อต้องไต่ขึ้นทางลาดชันที่ต้องรับภาระน้ำหนักในสถานการณ์จริงโดยการกำหนดความชันขอบเขตการทดสอบประกอบด้วยความชัน 10 องศา 20 องศา และ 30 องศา ตามการออกแบบดังภาพประกอบ 11 โดยมีผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 2



ภาพประกอบ 11 ทดสอบประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนของรถสามล้อไฟฟ้า

ตารางที่ 2 การทดสอบสมรรถนะการขับขี่ขึ้นทางชัน

สภาวะการขับขี่น้ำหนักบรรทุก (กิโลกรัม)	เวลาของการทดสอบขับขี่ขึ้นทางชัน (วินาที)		
	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา
60	1.85	1.95	2.25
70	1.92	2.34	2.56
80	2.06	2.63	3.84
90	2.68	2.98	3.21
100	2.82	3.12	3.48

จากการทดสอบขึ้นทางชันที่น้ำหนักต่ำสุด 60 กิโลกรัม จนถึงน้ำหนักสูงสุดที่ 100 กิโลกรัม พบว่าที่ระดับความชัน 10 องศา สภาวะรถที่มีน้ำหนักบรรทุกต่ำสุดนั้นจะสามารถเคลื่อนที่ออกตัวใช้เวลา 1.85 วินาที สภาวะน้ำหนักสูงสุด ใช้เวลา 2.82 วินาที ที่ระดับความชัน 20 องศา น้ำหนักบรรทุกต่ำสุดนั้นจะสามารถเคลื่อนที่ออกตัวใช้เวลา 1.95 วินาที สภาวะน้ำหนักสูงสุด ใช้เวลา 3.12 วินาที ที่ระดับความชัน 30 องศา น้ำหนักบรรทุกต่ำสุดนั้นจะสามารถเคลื่อนที่ออกตัวใช้เวลา 2.25 วินาที สภาวะน้ำหนักสูงสุด ใช้เวลา 3.48 วินาที

4. การทดสอบการการอัดประจุพลังงานของโซลาร์เซลล์

ในส่วนนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการเก็บสะสมพลังงานจากแสงอาทิตย์เข้าแบตเตอรี่ที่ได้จากการผลิตไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์ โมโนคริสตัลไลน์ (Monocrystalline) ขนาดแผงโซลาร์เซลล์ กำลังไฟฟ้า (Pmax) 250 วัตต์ แรงดันสูงสุด (Vmax) 31.2 โวลต์ กระแสสูงสุด (Imax) 8.02 แอมป์ จำนวน 2 แผงต่อขนานกันและทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าด้วยแผงโซลาร์เซลล์แรงดันเริ่มต้นที่ 21.02 โวลต์ ดังตารางที่ 3 เมื่อวันที่ 20 กันยายน พ.ศ.2566



ภาพประกอบ 12 ทดสอบวัดค่าของแผงโซลาร์เซลล์โดยใช้แสงจากดวงอาทิตย์

จากตารางที่ 3 ผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าความส่องสว่าง ค่าแรงดัน ค่ากระแส และค่ากำลังไฟฟ้าจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ค่าการส่องสว่างของแสงมีค่ามากที่สุดที่เวลา 13.00 น. มีค่า 171,600 ลักซ์ แรงดันมีค่า 25.85 โวลต์, 1.88 แอมป์ และ 48.59 วัตต์ มากที่สุดและหลังจาก 14.00 น. ค่าการส่องสว่างของแสง ค่าแรงดัน ค่ากระแส และค่ากำลังไฟฟ้าจะค่อย ๆ ลดลงตามลำดับ จากนั้นนำกระแสที่ได้มาเข้าวงจรการอัดประจุแบตเตอรี่ ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4 จะเห็นว่าเมื่อเริ่มการอัดประจุที่เวลา 8.00 น. วัดค่าแรงดันได้ 21.62 โวลต์ เมื่อเวลานานขึ้นพบว่าแรงดันและกระแสแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นจนถึงเวลา 15.00 น. มีแรงดันคงที่ 24.90 โวลต์ เมื่อแรงดันแบตเตอรี่ใกล้จะเต็มกระแสการอัดประจุจะเริ่มน้อยลงจนทำการปลดวงจรการอัดประจุแบตเตอรี่

ตารางที่ 3 วัดค่าปริมาณไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์โดยใช้แสงจากดวงอาทิตย์

เวลา	ค่าการส่องสว่าง (ลักซ์)	แรงดัน (โวลต์)	กระแส (แอมป์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
8.00 น.	83,000	21.02	1.71	35.94
9.00 น.	88,000	21.61	1.75	37.81
10.00 น.	128,000	22.78	1.78	40.54
11.00 น.	133,000	23.63	1.81	42.77
12.00 น.	148,500	24.66	1.83	45.12
13.00 น.	171,600	25.85	1.88	48.59
14.00 น.	165,900	24.83	1.86	46.18
15.00 น.	152,300	24.16	1.85	44.69
16.00 น.	146,500	24.34	1.83	44.54
17.00 น.	132,100	23.32	1.79	41.74
18.00 น.	121,300	22.22	1.72	38.21

ตารางที่ 4 การทดสอบวงจรการอัดประจุของแบตเตอรี่ผ่านโซลาร์เซลล์

เริ่มการอัดประจุ เวลา	แรงดัน (โวลต์)	กระแส (แอมป์)	แรงดันจากแบตเตอรี่ (โวลต์)
เริ่มต้น	-	-	21.62
8.00 น.	24.22	2.13	21.89
9.00 น.	24.52	2.25	22.02
10.00 น.	25.73	2.38	22.35
11.00 น.	26.68	2.43	23.16
12.00 น.	27.63	2.62	23.37
13.00 น.	28.84	2.78	23.78
14.00 น.	27.86	2.71	23.81
15.00 น.	27.18	2.51	24.90
16.00 น.	27.26	2.03	24.90
17.00 น.	26.34	1.53	24.90
18.00 น.	25.23	1.22	24.90

5. การทดสอบการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ความเร็วสูงสุดในการการการอัดประจุพลังงาน

การทดสอบนี้เป็นการใช้งานของแบตเตอรี่ของรถสามล้อไฟฟ้าในการขับเคลื่อนที่ความเร็วสูงสุดน้ำหนัก 100 กิโลกรัม ดังภาพประกอบ 13 เพื่อหาค่าแรงดัน ระยะทาง เวลา และความเร็ว ในการใช้งานต่อการการอัดประจุไฟฟ้า 1 ครั้ง ตามตารางที่ 5



ภาพประกอบ 13 ทดสอบประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนของรถสามล้อไฟฟ้า

ตารางที่ 5 ทดสอบระยะทางกรณีที่มีการอัดประจุแบตเตอรี่เต็ม 100 % ที่แรงดัน 24.90 V

ระยะทาง (เมตร)	แรงดันแบตเตอรี่ (โวลต์)	กระแสไหล (แอมป์)	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาที)
เริ่มต้น	24.90	-	-	-	-
500	24.64	13.5	7.72	332.6	3.40
1000	24.51	13.0	7.68	318.6	7.20
1500	24.38	12.7	7.63	309.6	11.01
2000	24.25	13.2	7.59	320.1	14.40
2500	24.12	13.5	7.55	325.6	18.20
3000	23.99	12.9	7.45	309.5	22.03
3500	22.86	12.5	7.33	298.3	25.40
4000	21.60	12.0	7.25	284.4	29.20
ค่าเฉลี่ย		12.91	7.52	312.3	16.35

จากตารางที่ 5 ผลการทดสอบการใช้งานขับเคลื่อนรถสามล้อไฟฟ้าจากการอัดประจุพลังงาน แบตเตอรี่ 1 ครั้ง จะเห็นได้ว่าที่จุดเริ่มต้นค่าแรงดันมีค่า 24.90 โวลต์ เมื่อรถเคลื่อนที่จนหยุดนิ่ง ที่ระยะทาง 4,000 เมตร ทำให้แรงดันแบตเตอรี่ลดลงเหลือ 21.60 โวลต์ กระแสไหล 12 แอมป์ ความเร็ว 7.25 กิโลเมตรต่อชั่วโมง กำลังไฟฟ้าขนาด 284.4 วัตต์ ใช้เวลาทั้งสิ้น 29.20 นาที โดยมีความเร็วเฉลี่ย 7.52 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

สรุปและการอภิปรายผล

จากผลการศึกษาทดสอบรถสามล้อไฟฟ้าด้วยมอเตอร์ไร้แปรงถ่านในครั้งนี้ ใช้งบประมาณในการออกแบบสร้างเป็นจำนวนเงินทั้งสิ้น 12,500 บาท ผลการทดสอบที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ สามารถทำความเร็วสูงสุด 8.15 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ที่น้ำหนักโหลดที่ 60 กิโลกรัม และกระแสไฟฟ้าสูงสุดในขณะออกตัวมีค่าเท่ากับ 37.24 แอมป์ เมื่อขับเคลื่อนได้แล้วกระแสลดลงสู่สภาวะปกติมีค่าเท่ากับ 12 แอมป์ เมื่อเพิ่มชิ้นน้ำหนักโหลดจนถึงสูงสุดที่ 100 กิโลกรัม ความเร็วลดลงเหลือ 7.16 กิโลเมตรต่อชั่วโมง กระแสไฟฟ้าขณะออกตัวเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 40.12 แอมป์ กระแสปกติเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 17 แอมป์ จะพบว่าเมื่อน้ำหนักมากขึ้นกระแสออกตัวมากขึ้นแต่ความเร็วลดลงสอดคล้องกับผลวิจัยของ วิฑิตกร ปันดอกไม้ และคณะ (2565) จากนั้นทำการทดสอบสมรรถนะในการขึ้นทางชันตามที่ออกแบบ พบว่าสามารถออกตัวเคลื่อนที่บนทางชันสูงสุดที่ระดับ 30 องศา ในสภาวะที่มีน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ไม่เกิน 100 กิโลกรัม แต่เมื่อระดับความชันมากก็จะใช้เวลานานสูงสุดที่เวลา 3.48 วินาที โดยหากมีการบรรทุกน้ำหนักมากเกินความชันสูงอาจส่งผลต่อการขับเคลื่อนจากออกตัวไม่ได้ จึงแนะนำให้บรรทุกมากเกินค่าที่ออกแบบไว้ จากนั้นทดสอบวงจรอัดประจุแบตเตอรี่ผ่านโซล่าเซลล์เริ่มต้นที่ค่าแรงดัน 21.02 โวลต์ เมื่อเวลาผ่านไปกระแสและแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ สูงสุดที่เวลา 13.00 น. มีค่าการส่องสว่าง 171,600 ลักซ์ จ่ายกระแส 1.88 แอมป์ และลดลงมาจนกระทั่งเวลา 15.00 น. แบตเตอรี่จึงเต็มมีแรงดันคงที่ 24.90 โวลต์ ใช้เวลาทั้งสิ้น 6 ชั่วโมง เมื่อแบตเตอรี่เต็มแล้วทำการทดสอบการเคลื่อนที่ต่อเนื่องระยะทางเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แต่ความเร็วลดลงจนกระทั่งรถสามล้อไฟฟ้าหยุดการเคลื่อนที่ รวมระยะทางทั้งสิ้น 4,000 เมตร แรงดันลดลงเหลือ 21.60 โวลต์ ใช้เวลา 29.20 นาที ทั้งนี้จากการทดลองกระแสขณะออกตัวสูงประมาณ 2-4 เท่าของกระแสปกติ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักรวมจะมีผลกับกระแสที่ใช้และความเร็ว ซึ่งน้ำหนักรวมมากกระแสขณะสตาร์ทจะสูง ความเร็วสูงสุดจะลดลงสอดคล้องกับ นนทวรรณ กัญไชยตะ และคณะ (2548) เพราะฉะนั้นจึงต้องเลือกมอเตอร์ที่สามารถทนกระแสในช่วงเวลานี้ จากการทดสอบการชาร์จพลังงานจากแสงอาทิตย์จะพบว่าช่วงเวลาที่ดีที่สุดในการชาร์จประมาณ 11.00 - 15.00 น. เพราะว่าช่วงเวลานี้จะมีค่าการส่องสว่างที่เหมาะสมมากกว่าช่วงเวลาอื่น ๆ หากต้องการให้การชาร์จแบตเตอรี่ทำงานได้เร็วขึ้นจะต้องเปลี่ยน

ขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และปรับขนาดกระแสให้สูงขึ้น จากผลการออกแบบและศึกษาการทำงานดังกล่าวเป็นแนวทางในการพัฒนาในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

สำหรับการออกแบบงานวิจัยนี้มีข้อเสนอแนะแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงดังนี้

1. ต้นกำลังมอเตอร์ควรใช้มอเตอร์ที่มีกำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบสูงกว่านี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าด้วยมอเตอร์ไร้แปรงถ่านให้ความเร็วขับเคลื่อนสูงขึ้น
2. ด้านการขับเคลื่อนวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ควรเลือกมอเตอร์ที่สามารถทนต่อกระแสสูง ๆ ขณะออกตัวและวงจรป้องกันเพราะจะทำให้เกิดความเสียหาย ส่วนวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ควรมีการพัฒนาให้มีระบบการขับเคลื่อนถอยหลังได้
3. การทดสอบพลังงานแสงอาทิตย์ควรทดสอบในช่วงที่แสงเปลี่ยนแปลงตามความชื้นและอุณหภูมิช่วงฤดูกาลต่าง ๆ ใน 1 ปี เพื่อศึกษาแนวโน้มและพัฒนาระบบ
4. วงจรการชาร์จแบตเตอรี่ควรพัฒนางจรให้สามารถชาร์จกระแสสูงที่ใช้ระยะเวลาเร็วขึ้น และเลือกชนิดแบตเตอรี่แบบBMS สามารถป้องกันในการเก็บพลังงานและจ่ายได้แอมแปร์-ชั่วโมง (Ah) มากขึ้น
5. ควรใช้แผงโซลาร์เซลล์ที่มีขนาดกำลังวัตต์และกระแสมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- จิตติกร ปิ่นดอกไม้, ฤกษ์ ปิ่นงาม, ญัฐพล แดนประสาท, วีระพล พลีสัตย์, อธิธิพล เหลาพรม และรุ่งโรจน์ สงวนวัฒนา. (2565). รถจักรยานไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน. *การประชุมวิชาการระดับชาติ สำหรับนักศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ครั้งที่2* (น. 786-794). กำแพงเพชร: มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร
- นันทวรรณ กั้นไชยดี, แสงเพชร นาคจีน และ เจษฎากร ไชยมงคล. (2548). *การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน*. (ปริญญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต). พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- ฝ่ายวิจัยนโยบาย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. (2560). *อุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า* (รายงานการศึกษา). ปทุมธานี: ฝ่ายวิจัยนโยบาย สวทช.
- วันนาเดีย นาแว. (2563). *การพัฒนากระบวนการประมาณค่าแรงบิดสำหรับมอเตอร์ไร้แปรงถ่านด้วยเทคนิคไร้เซนเซอร์* (วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

- วิรุณ โมนะตระกูล, วสันต์ เขียรสุวรรณ และ ปรีตถกร เหมะรัตน์. (2557). การออกแบบรถสามล้อไฟฟ้า เอนกประสงค์ต้นแบบ. *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 MENETT* (น. 485-492). ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สุโรจน์ แสงสนิท. (2567). ยานยนต์ไฟฟ้าแห่งอนาคตเพื่อตอบรับการมุ่งสู่การเป็นศูนย์กลางยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศไทย. จาก <https://www.thailand-energy-academy.org>.
- David, T. (2021). *Introduction to Brushless DC Motors AN1164*, Diodes Incorporated. From <https://www.diodes.com>.
- Homemade Circuit. (2024). *9 Simple Solar Battery Charger Circuits*. From <https://www.homemade-circuit.com/hoe-to-make-solar-battery-charger>.
- Mubeen, M. (2008). *Brushless DC Motor Primer*. Motion Tech Trends.
- ON Semiconductor.(2024). *Brushless DC Motor Controller*. ON Semiconductor and are trademarks of Semiconductor Components Industries. From <https://www.onsemi.com>
- Krause, P. (1986). *Analysis of Electric Machinery*. McGraw-Hill.
- Pillay, P. & Krishnan, R. (1989). Modeling, Simulation and Analysis of a Permanent Magnet Brushless DC motor drive part II: The brushless DC motor drive. *IEEE Transactions on Industry application*, Vol.25, 274-279.
- Rambabu, S. (2007). *Modeling and Control of A Brushless DC Motor* (Master's thesis). Rourkela: National Institute of Technology.
- Robinson, S. (2006). *Drive and Control Electronics Enhance the Brushless Motor's Advantages*. Apex.

