

การออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก

กวีพจน์ วรเนตรสุทธิกุล^{1*}, อิศรี ศรีคุณ¹, พรหมพัชร์ ดาวัลต์²

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี

Email : kaweeppott@gmail.com^{1*}, isaree@hotmail.com¹, promphak.dawan@gmail.com²

Received: May 27, 2019

Revised: June 13, 2019

Accepted: June 18, 2019

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ซึ่งในปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านนั้นมีประสิทธิภาพที่สูง และเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า แต่ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านนั้นยังต้องได้รับการนำเข้าจากต่างประเทศเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งส่งผลให้มีราคาที่สูงและซ่อมแซมได้ยาก คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบและสร้างตัวชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านพิกัดขนาด 1 กิโลวัตต์ พิกัดแรงดันอินพุต ระหว่าง 12-50 Vdc และพิกัดกระแส 20 A อีกทั้งยังสามารถปรับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้า และหยุดการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านได้ พร้อมทั้งมีหน้าจอแสดงผลความเร็วรอบมอเตอร์ หลังจากทำการสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านเสร็จแล้ว ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของชุดควบคุมโดยการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านทำงานแบบมีภาระทางกล เริ่มทดสอบตั้งแต่น้ำหนักโหลด 0.5 กิโลกรัม เพิ่มน้ำหนักโหลดครั้งละ 0.5 กิโลกรัม ไปจนน้ำหนักโหลด 10 กิโลกรัม ทดสอบทั้งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านหมุนตามเข็มนาฬิกาและหมุนทวนเข็มนาฬิกาที่การทำงานเต็มพิกัดกำลัง ซึ่งผลจากการทดสอบ ได้ประสิทธิภาพของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่สร้างมีค่าโดยรวมเฉลี่ย 90.98 % ถือว่ามีค่าประสิทธิภาพใกล้เคียงกับชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านมีขายตามท้องตลาดแต่มีราคาที่ถูกลงและสามารถซ่อมแซมได้

คำสำคัญ : ชุดควบคุมมอเตอร์, มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน, ยานยนต์ไฟฟ้า

Design and Construction brushless DC Motor control for small electric vehicles

Kaweepoj Woranetsuttikul^{1*}, Isaree Srikun¹, Promphak Dawan²

¹Department of Electrical Technology, Faculty of Industrial Technology,
Phranakhon Rajabhat University

²Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Bangkokthonburi University

Email: kaweepott@gmail.com^{1*}, isaree@hotmail.com¹, promphak.dawan@gmail.com²

Received: May 27, 2019

Revised: June 13, 2019

Accepted: June 18, 2019

Abstract

This research article presents the design and construction of a brushless DC motor controller. At present, the brushless DC motor has high efficiency and is widely popular in the electric automotive industry but the brushless DC motor control unit must still be imported from most countries. The results in expensive and difficult repairs the research team therefore designed and built a brushless DC motor control unit with a rated power of 1 kW, rated input voltage between 12-50 Vdc and 20 A rated current. It can also adjust the rotation direction of the electric motor and stop. The operation of brushless DC motors with a motor speed display screen after the construction of the brushless DC motor control unit has been completed have tested the efficiency of the control unit by testing the brushless DC motor with mechanical load start testing from 0.5 kilograms load weight, 0.5 kilogram load to 10 kilograms of load, test both brushless DC motor, turn clockwise and counter-clockwise rotation at full power. The results from the test efficiency of the brushless DC motor control unit is 90.98%, which is considered to have the efficiency close to that of a brushless DC motor control unit, which is commercially available but has a lower price and can be repaired.

Keywords : Speed Control motor, Brushless dc motor, Vehicle Electric

บทนำ

ในปัจจุบันยานยนต์ไฟฟ้าได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีประสิทธิภาพที่สูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ข้อเสียคือมีราคาที่ยากต่อการเข้าถึงและอุปกรณ์ซ่อมแซมหายได้ยากมอเตอร์และชุดควบคุมมอเตอร์ถือเป็นหัวใจหลักของยานยนต์ไฟฟ้า และมอเตอร์ไฟฟ้าที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและมีประสิทธิภาพที่สูง คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (Brushless Direct Current Motor : BLDC Motor) เนื่องจากว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านนั้นมีประสิทธิภาพสูง มีแรงบิดที่ความเร็วรอบสูง แรงบิดต่อขนาดของมอเตอร์สูง และอายุการใช้งานยาวนานกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าแบบใช้แปรงถ่านและมอเตอร์ชนิดอื่น ๆ (เทวินทร์ นิลสาคร, 2557)

แต่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านก็มีข้อเสียที่ราคาแพง การควบคุมทำได้ยากและซับซ้อน ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านนั้นสามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด โดยชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ขายตามท้องตลาดจะเป็นชุดควบคุมที่ถูกผลิตมาจากโรงงานที่ต่างประเทศเป็นหลัก เมื่อผู้ใช้งานซื้อชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านไปแล้วเกิดชำรุดเสียหาย จะไม่สามารถซ่อมแซมแก้ไขได้เนื่องจากหาตัวแทนซ่อมแซมได้ยาก และราคาอาจสูงกว่าที่ควรจะเป็น ในประเทศไทยได้มีการวิจัยเกี่ยวกับยานยนต์ไฟฟ้าและชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านขึ้นตามความต้องการของกระทรวงพลังงานและการพัฒนาของประเทศ เช่น การออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยเทคนิคการสร้างสัญญาณอินพุตจากซีไรด์ ครอสซิง (กฤตภาส ผินสันเทียะ, 2558) และการจำลองด้วยโปรแกรม Math Lab (ประจัน พลังสันติกุล, 2551) แต่เนื่องจากปัญหาด้านความเชี่ยวชาญของบุคลากรเกี่ยวกับยานยนต์ไฟฟ้ายังต้องเรียนรู้

และมีประสบการณ์เพิ่มขึ้นอีกมาก จึงส่งผลให้งานวิจัยส่วนใหญ่สามารถทำได้ในห้องแล็บแต่ไม่สามารถนำมาใช้งานได้จริงและประสิทธิภาพยังต่ำกว่าท้องตลาด

จากปัญหาที่กล่าวมาทางคณะผู้วิจัยได้เห็นประโยชน์ในการสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน สำหรับใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่คณะผู้วิจัยสร้างขึ้นนั้น จะมีการดูแลรักษาและซ่อมแซมสามารถทำได้ง่าย และราคาค่าซ่อมแซมเมื่อชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านชำรุดเสียหายก็จะมีราคาที่ต่ำ สุดท้ายจะเป็นการหาประสิทธิภาพของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้นต่อไป

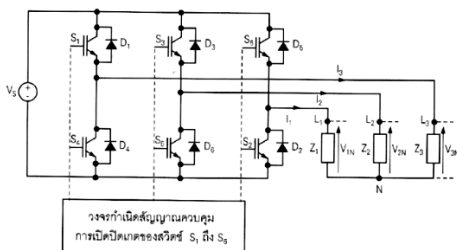
วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านโดยเน้นวัสดุภายในประเทศ
2. เพื่อพัฒนาชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านให้สามารถควบคุมได้สองทิศทาง
3. เพื่อหาประสิทธิภาพของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่พัฒนาขึ้น

ระเบียบวิธีวิจัย

1. รวบรวมข้อมูลและเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องอินเวอร์เตอร์(Inverter)
อินเวอร์เตอร์ (Inverter) คือ วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เครื่องผกผัน เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีค่าแรงดันคงที่หรือปรับค่าได้ หรือเพื่อให้ได้ความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับเอาต์พุตที่มีค่าคงที่หรือปรับค่าได้ โดยใช้หลักการปรับค่าแรงดันไฟตรงด้านอินพุต หรือใช้หลักการ

ควบคุมเทคนิคการสวิตช์ภายในตัวอินเวอร์เตอร์ เช่น ใช้เทคนิคแบบมอดูเลต ความกว้างพัลส์ (PWM) เป็นต้น หรืออาจใช้วิธีปรับค่าแรงดันไฟตรงด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ก็ได้เช่นกัน สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะใช้หลักการควบคุมอัตราส่วนของแรงดันเอาต์พุตและความถี่เอาต์พุตให้คงที่ (V/f Constant) เพื่อให้สามารถควบคุมแรงบิดได้คงที่ แต่สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานอื่น ๆ ที่ต้องการความถี่เอาต์พุตคงที่ ก็อาจใช้อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมการปิด-เปิด สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยวิธีที่ไม่ซับซ้อน เช่น วิธีมอดูเลตแบบ 180 องศา หรือแบบ 120 องศา เป็นต้น วีรเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธิระเศรษฐ์ (2557)



รูปที่ 1 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ต่อโหลดแบบสตาร์

Brushless DC motor (BLDC)

มอเตอร์ที่ใช้ตัวสับเปลี่ยนแบบอิเล็กทรอนิกส์ ปัญหาบางส่วนมอเตอร์ DC ที่ใช้แปรงถ่านจะถูกตัดทิ้งไปในมอเตอร์แบบ BLDC ซึ่งแทนที่ “สวิตช์หมุน” หรือตัวสับเปลี่ยนแบบกลไก ไปเป็นแบบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ภายนอก ที่จะ Synchronous กับตำแหน่งของโรเตอร์ มอเตอร์แบบ BLDC มักจะมีประสิทธิภาพประมาณ 85-90% และสูงได้ถึง 96.5% ในขณะที่มอเตอร์กระแสตรงที่ใช้ brush gear มักจะมีประสิทธิภาพเพียง 75 -80% เท่านั้น

รูปคลื่นสี่เหลี่ยมคางหมูของมอเตอร์แบบ BLDC ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (back-emf)

และบางส่วนมาจากขดลวด สเตเตอร์ และบางส่วนได้จากการจัดตำแหน่งแม่เหล็กถาวรของโรเตอร์ เซนเซอร์แบบ Hall Effect จะถูกติดตั้งอยู่บนขดลวดสเตเตอร์เพื่อการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ เพื่อให้วงจรควบคุมจ่ายกระแสให้ขดลวดขุดใดขุดหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งขุดเพื่อให้โรเตอร์หมุนตามความเร็วที่ต้องการ

มอเตอร์ DC ที่มีตัวสับเปลี่ยนแบบอิเล็กทรอนิกส์จะเป็นเหมือนมอเตอร์ DC ที่เอาเข้าในออกข้างนอก และในส่วนของ BLDC มอเตอร์ถูกใช้กันโดยทั่วไปในซึ่งการควบคุมความเร็วอย่างแม่นยำเป็นสิ่งที่จำเป็น อย่างเช่นในดิสก์ไดรฟ์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ หรือเครื่องบันทึกวีดีโอเทป, ไดรฟ์ภายใน CD, CD-ROM ฯลฯ และกลไกภายในผลิตภัณฑ์สำนักงาน เช่น พัดลม, เครื่องพิมพ์เลเซอร์ และเครื่องถ่ายเอกสาร ซึ่งมีข้อดีหลายอย่างมากกว่ามอเตอร์ธรรมดา เช่น เมื่อเทียบกับพัดลม มอเตอร์ AC ทั่วไป มอเตอร์แบบ BLDC มีขดลวดอยู่บนสเตเตอร์ที่ติดอยู่กับโครงสร้างของมอเตอร์ ทำให้การระบายอากาศทำได้จากภายนอก การทำงานในอากาศที่เย็นจึงทำให้มีประสิทธิภาพมากกว่า ตัวมอเตอร์สามารถทำเป็นโครงสร้างปิด ทำให้ไม่มีฝุ่นละอองผ่านเข้าไปได้ ทำให้สามารถควบคุมการทำงานได้แม่นยำตลอดอายุการใช้งาน เนื่องจากไม่มีตัวสับเปลี่ยนที่สึกหรอได้ อายุการใช้งานของมอเตอร์ BLDC จึงยาวนานกว่ามอเตอร์ที่ใช้แปรงและตัวสับเปลี่ยนอย่างมีนัยสำคัญ (ศิวัะ หงส์นภา, 2547)



รูปที่ 2 BLDC Motor

2. การออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

ส่วนประกอบของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยวงจรภายในชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านมีทั้งหมด 5 ส่วน ดังนี้

- 1) วงจรกำลัง
- 2) วงจรขับเคลื่อน
- 3) วงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์
- 4) วงจรไฟเลี้ยง
- 5) วงจรแสดงผลผ่านจอ LCD

นคร ภักดีชาติ, ณัฐพล วงศ์สุนทรชัย, กฤษฎา ใจเย็น และ ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล (2548)

จากอุปกรณ์ที่เลือกใช้งานในการออกแบบชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านจะมีคุณสมบัติด้านไฟฟ้าดังนี้

รับแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า = 12 – 50 Vdc

รับกระแสไฟฟ้าด้านเข้า = ≤ 20 A

รับกำลังไฟฟ้าด้านเข้า = ≤ 1 kW ที่ทำงานสมาร์ทเลิร์นนิ่ง (2543)

สำหรับชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านทางผู้วิจัยทำการออกแบบจะใช้งานแผ่น PCB ขนาดกว้าง 5 นิ้ว และยาว 7 นิ้ว โดยออกแบบลายวงจรผ่านโปรแกรม Altium Designer กฤตภาส ผินสันเทียะ, กวีพจน์ วรเนตรสุทธิกุล, กิตติศักดิ์ เส้นเศษ และ กนิษฐนันท์ มั่นพรรษา (2554)

การออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านประกอบด้วยดังต่อไปนี้

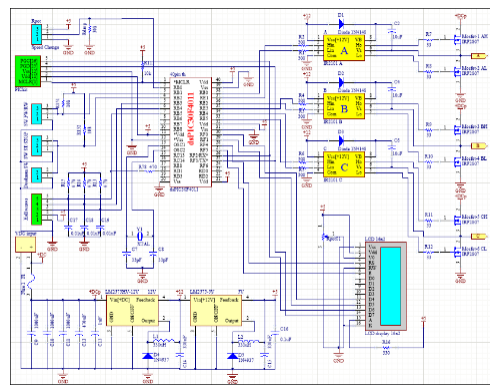
1) อุปกรณ์ส่งกำลังไฟฟ้าใช้ Mosfet เบอร์ IFR 2807 ชนิด N type พิกัดแรงดัน 75 Vdc, 82 A, 13 m Ω

2) อุปกรณ์ขับเคลื่อน ใช้ IR2101 เพื่อยกระดับแรงดันจาก 5 Vdc เป็น 12 Vdc

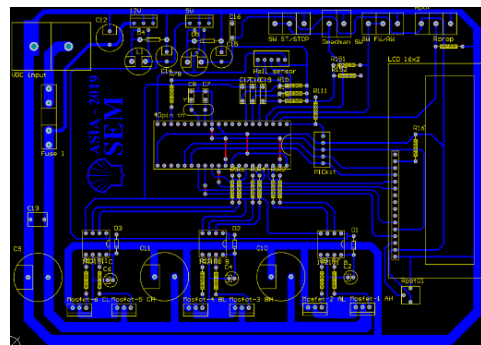
3) อุปกรณ์ควบคุมการทำงาน เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ 30F4011 ที่มีฟังก์ชันในการสร้างสัญญาณ PWM ในการควบคุมมอเตอร์ BLDC ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4) ระบบไฟเลี้ยงใช้ LM-2575-5V สำหรับเลี้ยงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และ LM-2575-12V สำหรับวงจรขับเคลื่อน

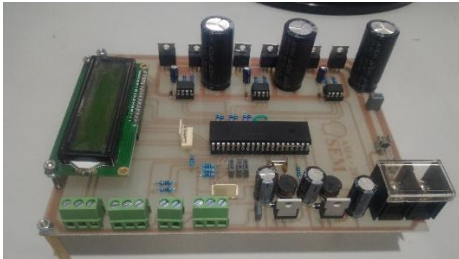
จากรายละเอียดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลัก ๆ ดังกล่าวได้นำเสนอในรูปที่ 3, 4 และ 5 ดังนี้



รูปที่ 3 BLDC Drive Circuit



รูปที่ 4 ลายวงจรสำหรับใส่ PCB



รูปที่ 5 Electric Drive

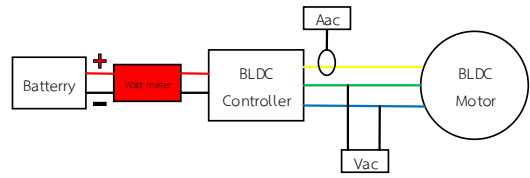
ผลการวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน และการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านมีดังนี้

1. Multimeter แบบดิจิตอล 2 ตัว สำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า
2. Watt meter แบบจอ LCD16x2 สำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายแบตเตอรี่
3. Digital Oscilloscope
4. Battery 36 โวลต์
5. แผ่นเหล็กบาร์เบล ขนาดน้ำหนัก 0.5 กิโลกรัม จำนวน 1 แผ่น และ 1 กิโลกรัม จำนวน 10 แผ่น

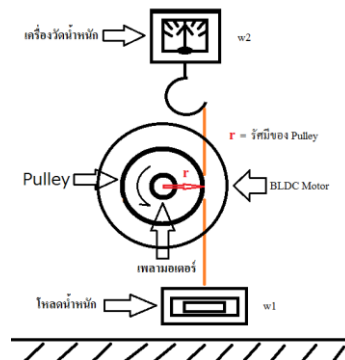
วิธีการทดสอบ

การทดสอบประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 36 โวลต์ (แบตเตอรี่) ต่อเข้ากับชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ซึ่งจะทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ต่อเครื่องมือวัดแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าทั้งด้านพลังงานไฟฟ้าเข้าชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน และด้านพลังงานไฟฟ้าออกจากชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านไปสู่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

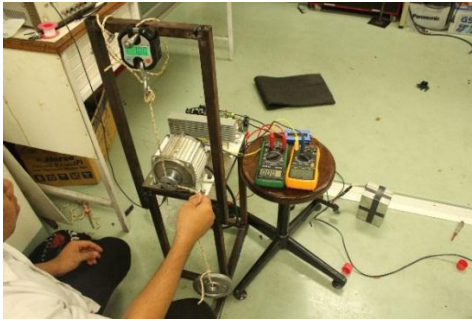


รูปที่ 6 แผนภาพการทดสอบ

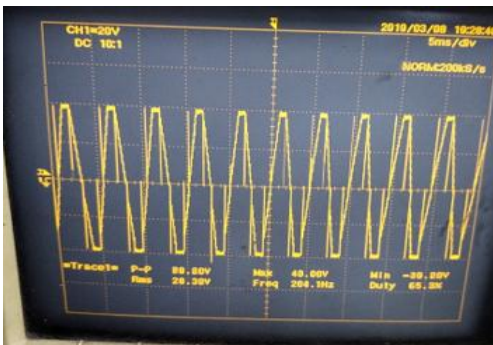
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบมีสภาวะทางกล ทดสอบโดยใช้เชือกพันรอบ Pulley (ลูกรอก) ที่ยึดอยู่กับเพลาของมอเตอร์ ปลายเชือกด้านบนผูกติดกับตาชั่งดิจิตอลแบบแขวนซึ่งเกี่ยวข้องไว้กับคานด้านบน ปลายเชือกถ่วงด้วยมวล และทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบสูงสุด จนเกิดแรงกระทำระหว่างมอเตอร์และเชือก ทำให้เกิดแรงฉุดดึงมวลขึ้นบนตีกค่า แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ค่าที่อ่านได้จากตาชั่งดิจิตอลแบบแขวน และความถี่ (สำหรับหาความเร็วรอบมอเตอร์) โดยเพิ่มขนาดของมวลทีละ 0.5 กิโลกรัม โดยเริ่มทดสอบจากน้ำหนักมวล 0.5 กิโลกรัม บันทึกข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัด ที่ขนาดของมวลต่าง ๆ



รูปที่ 7 รูปแบบการทดสอบ



รูปที่ 8 การทดสอบชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบมีสถานะทางกล



รูปที่ 9 สัญญาณรูปคลื่น L-L

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

จากการทดสอบชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงไร้แปรงถ่านและมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบมีสถานะทางกล ด้วยการทำการเพิ่มขนาดของมวลตั้งแต่ 0.5 กิโลกรัม จนถึง 10 กิโลกรัม โดยจะทำการเพิ่มขนาดของ มวลทีละ 0.5 กิโลกรัม

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$\tau = |W_1 - W_2| \times 9.81 \times r \quad \text{N-m}$$

$$\omega = \frac{2\pi N_r}{60} \quad \text{rad/s}$$

$$N_r = \frac{120 f}{P} \quad \text{rpm}$$

$$P_3 = \tau \omega \quad \text{W}$$

$$P_2 = \sqrt{3V_{L-L} I_2 \cos \theta} \quad \text{W}$$

$$P_1 = V_1 I_1 \quad \text{W}$$

$$\eta_c = \frac{P_2}{P_1} \times 100 \quad \%$$

$$\eta_M = \frac{P_3}{P_2} \times 100 \quad \%$$

เมื่อ

τ = แรงบิดที่เพลามอเตอร์(N-m)

W_1 = มวลของแผ่นน้ำหนัก(kg)

W_2 = มวลที่อ่านจากตาชั่งดิจิตอลแบบแขวน (kg)

r = รัศมีของ Pulley (m)

ω = ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

N_r = ความเร็วมอเตอร์ (rpm)

P = จำนวนแม่เหล็ก

f = ความถี่ (Hz)

V_1 = แรงดันไฟฟ้าด้านเข้าชุดควบคุมมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (V)

I_1 = กระแสไฟฟ้าด้านเข้าชุดควบคุมมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (A)

V_{L-L} = แรงดันไฟฟ้าด้านออกชุดควบคุม มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน วัดระหว่างไซน์กับไซน์(V)

I_2 = กระแสไฟฟ้าด้านออกจากชุดควบคุม มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน วัดจากเฟสที่มีค่ากึ่งกลางระหว่าง 3 เฟส (A)

P_1 = กำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย แบตเตอรี่ (W)

P_2 = กำลังไฟฟ้าจากชุดควบคุมมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (W)

P_3 = กำลังไฟฟ้าจากมอเตอร์กระแสตรง ไร้แปรงถ่าน (W)

η_c = ประสิทธิภาพของชุดควบคุมมอเตอร์
ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (%)

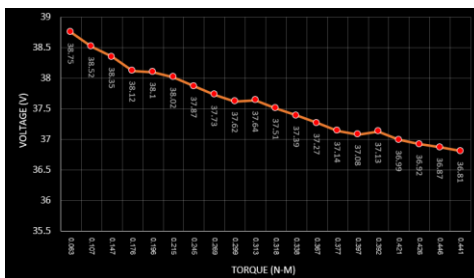
η_M = ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า
กระแสตรงไร้แปรงถ่าน(%)

โดย $P = 10$

$r = 0.01 \text{ m}$

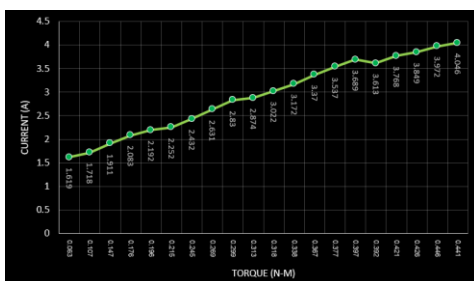
$\cos \theta = 0.87$

ผลการทดสอบชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า
กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบมีภาระทางกล แหล่งจ่าย
แบตเตอรี่ 36 โวลต์



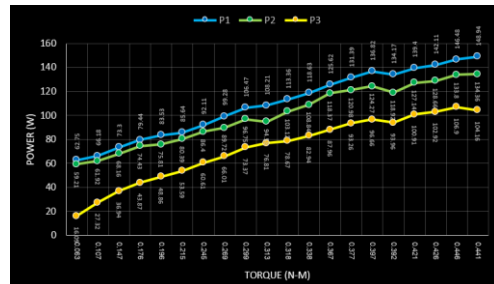
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่เพลามอเตอร์
(τ) กับแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า(V_1)

จากกราฟในรูปที่ 10 พบว่า เมื่อทำการ
เพิ่มโหลดมากขึ้น ทอร์กก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตาม
แต่แรงดันของแบตเตอรี่จะมีค่าต่ำลง เนื่องจาก
แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายที่มีความจำกัดในเรื่อง
ของพลังงานเมื่อจ่ายกระแสมากขึ้นแรงดัน
แบตเตอรี่ก็จะต่ำลง



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่เพลามอเตอร์
(τ) กับกระแสไฟฟ้าด้านเข้า (I_1)

จากกราฟในรูปที่ 11 พบว่า เมื่อทำการ
เพิ่มโหลดมากขึ้น ทอร์กก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตาม
และกระแสจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามโหลดที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่เพลามอเตอร์
(τ) กับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย (P_1)
กำลังไฟฟ้าจากชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า
กระแสตรงไร้แปรงถ่าน(P_2)และกำลัง ไฟฟ้าจาก
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (P_3)

จากกราฟในรูปที่ 12 พบว่า เมื่อทำการ
เพิ่มโหลดมากขึ้น ทอร์กก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตาม
กำลังไฟฟ้ามี่มีค่าเพิ่มขึ้นตาม โดย P_2 จะมี
ประสิทธิภาพโดยรวมอยู่ที่ 90.98 % ซึ่งจะมี
ประสิทธิภาพมากกว่า P_3 เนื่องจาก
ประสิทธิภาพที่มอเตอร์จะมีค่าน้อยกว่า
อินเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพที่
สูง



รูปที่ 13 ตัวแทนประเทศไทย ใน รายการ Shell
eco marathon Asia 2019 ณ Sepang F1 circuit
ประเทศ มาเลเซีย



รูปที่ 14 นำชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ได้ออกแบบและสร้างใช้งาน ใน รายการ Shell eco marathon Asia 2019 ณ Sepang F1 circuit ประเทศ มาเลเซีย



รูปที่ 15 Sepang F1 circuit ประเทศมาเลเซีย

สรุปและอภิปรายผล

จากการทดลองชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่สร้างขึ้น โดยการทดลองรับภาระทางกล ตั้งแต่ 0.5 กิโลกรัม จนถึง 10 กิโลกรัม พบว่า ประสิทธิภาพของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่สร้างเมื่อทำงานเต็มกำลัง ทำการทดลองแบบมีภาระทางกลทั้งมอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกาและหมุนทวนเข็มนาฬิกา มีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 90.98% และสามารถวัดประสิทธิภาพมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยมีประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 69.72% และสามารถนำชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านมาใช้ในการแข่งขันในรายการ Shell Eco-marathon Asia 2019 ได้เป็นอย่างดี และสามารถนำมาต่อยอดสู่ภาคอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าได้ในอนาคต สุดท้ายสรุปผลการทดลองเป็นไปตามข้อหัวดังต่อไปนี้

1. ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ออกแบบและสร้างขึ้นโดยใช้วัสดุภายในประเทศสามารถทดสอบการทำงานได้โดยการทดสอบแบบมีภาระทางกล และค่าใช้จ่ายในการจัดซื้ออุปกรณ์มีราคาที่ถูก

2. ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่พัฒนาขึ้นโดยเน้นวัสดุภายในประเทศสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย รวมถึงใช้ในการขับเคลื่อนยานพาหนะต้นแบบประหยัดพลังงานในการแข่งขันรายการ Shell Eco-marathon Asia 2019

3. ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพเฉลี่ยจากการทดสอบไม่ต่ำกว่า 90 %

จากการทดลองและสรุปผลการทดลองพบว่า ผลการทดลองมีความสอดคล้องกันกับวัตถุประสงค์ที่ได้ออกแบบและตั้งใจไว้ โดยชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน สามารถขับเคลื่อนได้ทั้งหมดตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา และยังสามารถรับภาระทางกลได้เป็นอย่างดีจากการเลือกใช้วัสดุที่มีภายในประเทศทำให้ราคาของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านมีราคาถูกและสามารถซ่อมแซมได้ง่าย ผลการวิจัยมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งในเรื่องของกำลังไฟฟ้า การควบคุมการทำงาน และการตอบสนองต่อตำแหน่งฮอลล์เซนเซอร์ แต่ผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริงและมีประสิทธิภาพที่สูง สุดท้ายประสิทธิภาพโดยรวมเฉลี่ยของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน มีประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 90.98% ซึ่งตรงตามวัตถุประสงค์ที่ได้ออกแบบและตั้งใจไว้

ข้อเสนอแนะ

1. ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้เป็นรุ่นที่มีการวางจำหน่ายมานานแล้ว ในปัจจุบันไม่มีไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นใหม่ที่มีประสิทธิภาพมากกว่าวางจำหน่ายแล้ว

2. ในการทดสอบมอเตอร์แบบมีภาระทางกลแต่ละครั้ง แรงกระทำระหว่างมอเตอร์และเชือกจะมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ทำให้ผลที่ได้อาจจะคลาดเคลื่อนไป

3. จากการใช้ Pulley (ลูกรอก) ที่มีขนาดรัศมี 1 เซนติเมตร (0.01 เมตร) ซึ่งถือว่าเล็กมาก ทำให้แรงบิดที่ได้มีค่าน้อย

4. เพื่อให้ได้ค่าการทดสอบที่แม่นยำที่สุด ต้องทำการลดความร้อนที่ตัว Pulley (ลูกรอก) และเชือกที่ใช้ทดสอบ ตรงส่วนเพลามอเตอร์เสมอ

References

Krittapas Phinsuntea Kaweepoj Woranetsuttikul
Gittisak Senset and Kanit Nuntmanpansa.
(2011). *Design of brushless DC hub motor control prototype*. Thesis Master of Engineering in Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

Krittapas Phinsuntea. (2015). *Design Technique of brushless DC motor control with Sensorless Back EMF Zero Crossing Detection*. Thesis Master of Engineering in Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

Nakhon Phakdeechart Nathaphon Wongsunthomchai
Gritsada Jaiyen and Chaiwat Limpomjitwtai.
(2005). *DsPIC Microcontroller Experiment Guide with C language program with MPLAB C 30*. Bangkok: Innovative Experiment Co.,Ltd.

Prajin Palungsuntikul. (2008). *Programming Control of microcontroller dsPIC30F with MPLAB C compiler*. Bangkok: Appsoftech Co.,Ltd.

Siwa Hongnapha. (2004). *Control and AC Drive Application*. Bangkok: Good View Collection Co.,Ltd

Smart Learning Team. (2000). *Advance PIC Microcontroller in C (1)*. Bangkok: Smart Learning.

Tawin Nilsakhon. (2014). *Efficiency improvement on brushless DC motor drive systems*. Thesis Master of Engineering in Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

Weerachet Khunngern and Wuttipol Tarateraset. (2014). *Power Electronics (3)*. Bangkok: v-j-printing-limited-partnership.