



## การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับจักรยานสามล้อไฟฟ้า

### Brushless DC Motor Controlled with Microcontroller for Electric Tricycle

เฉลิมพล เรืองพัฒนาวิวัฒน์\* และยุทธนา กันทะพะเยา

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
7/1 ถนนพหลโยธิน 1 ต.สวนใหญ่ อ.เมือง จ. นนทบุรี

\*ผู้รับผิดชอบบทความ: chalermpol.r@rmutsb.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้แนะนำเสนอการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์โดยนำไปใช้กับจักรยานสามล้อไฟฟ้า เนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านไม่ต้องบำรุงรักษาเมื่อเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิม ระบบควบคุมที่นำเสนอใช้หลักการแบบสี่เหลี่ยมคางหมู ซึ่งข้อมูลตำแหน่งสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์มาจากตัวตรวจจับฮอลล์ที่มีมุมต่างกัน 120 องศา โดยการหมุน 1 รอบ ใช้การอ้างอิง 6 ขั้น เพื่อยืนยันระบบการควบคุมที่นำเสนอ ได้ทดสอบควบคุมความเร็วของจักรยานสามล้อไฟฟ้าบรรทุกน้ำหนัก 80 กิโลกรัม

**คำสำคัญ** มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน จักรยานสามล้อไฟฟ้า ตัวตรวจจับฮอลล์

#### Abstract

This paper presents a brushless DC motor controlled. The microcontroller is used to control the system operation apply to an electric tricycle. Since, a brushless DC motor is a maintenance free which it is compared to a classical DC motor. A trapezoid method apply to the control system is proposed. The rotor magnet position information, it is performed by a hall sensor with a difference of  $120^\circ$ , and 1 cycle there are 6 step reference. To confirm the proposed control system, it is tested to control speed of the electric tricycle at a 80 kg laden.

**Keywords:** brushless DC motor, electrical tricycle, hall sensor

#### 1. บทนำ

ในปัจจุบันมอเตอร์ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับระบบขนส่งหรือการเดินทางอย่างแพร่หลาย เช่น รถไฟฟ้า รถยนต์ และรถจักรยานไฟฟ้า เป็นต้น เนื่องจากต้องการลดการใช้น้ำมันซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการสร้างปัญหาจากด้านสิ่งแวดล้อมถึงราคาที่มีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จึงทำให้รถที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเริ่มเป็นที่นิยมมากขึ้น [1] แต่การใช้รถไฟฟ้าในระบบขับเคลื่อนหลักคือมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งแบบดั้งเดิมนั้น จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (direct current motor) โดยทั่วไปมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีอาร์เมเจอร์เป็นตัวหมุน (rotor) และสนามแม่เหล็กเป็นตัวอยู่กับที่ (stator) ซึ่งจะอาศัยแปรงถ่านและซีคอมมิวเตเตอร์ ทำหน้าที่เป็นขบวนการคอมมิวเตชันทางกล (commutation mechanical) มอเตอร์แบบนี้จะมีข้อเสียเนื่องจากการเสียดสีทำให้เกิดความร้อน การสึกหรอ และการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interference) [1-2] แต่ปัจจุบันนิยมนำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (brushless dc motor) ซึ่งอาร์เมเจอร์จะเป็นตัวอยู่กับที่ และสนามแม่เหล็กจะเป็นตัวหมุนและใช้ตัวตรวจจับ (sensor) เพื่อตรวจจับตำแหน่งสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์และใช้อินเวอร์เตอร์

สำหรับขบวนการคอมมิวเตชันทางระบบอิเล็กทรอนิกส์ (commutation electronically) การตรวจจับตำแหน่งของตัวหมุนตลอดเวลาใช้ตัวตรวจจับฮอลล์ (hall sensor) สามตัว โดยติดตั้งไว้บริเวณใกล้กับตัวหมุน ซึ่งตัวตรวจจับฮอลล์จะอาศัยหลักการตรวจจับสนามแม่เหล็กจากตัวหมุนที่มาปะทะกับตัวตรวจจับฮอลล์ตลอดเวลา

โดยลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านมีข้อดีคือ ไม่จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาแปรงถ่าน (maintenance free) และซีคอมมิวเตเตอร์ และยังมีข้อดีกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิม ในเรื่องของคุณสมบัติแรงบิดกับความเร็ว มีการตอบสนองทางพลวัตเร็ว และประสิทธิภาพการทำงานสูง ดังนั้นในบทความนี้จึงเลือกนำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน มาประยุกต์ใช้กับจักรยานสามล้อไฟฟ้า โดยมีการติดตั้งมอเตอร์แทนดุมล้อหน้าเดิมของจักรยานสามล้อเพื่อจะได้ติดตั้งง่าย และมีค้ำแรงสำหรับควบคุมความเร็วของจักรยานไฟฟ้า

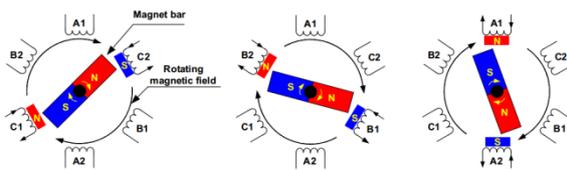


## 2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

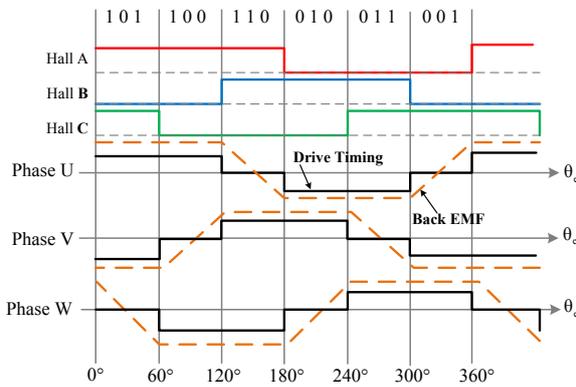
ในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านจะมี ส่วนของสายไฟที่ใช้ในการควบคุม 5 เส้น โดยแบ่งออกเป็น 2 เส้นสำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และส่วนที่เหลืออีก 3 เส้นเป็นสายสัญญาณจากตัวตรวจจับฮอลล์ และสายไฟในส่วน ของตัวมอเตอร์อีก 3 เส้น ซึ่งจะมีการทำงานดังต่อไปนี้

### 2.1 การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

การทำงานของมอเตอร์จะอาศัยพื้นฐานของแรงดูด (attraction) และแรงผลัก (repulsion) ระหว่างขั้วแม่เหล็กที่ อาศัยหลักการเดียวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งโรตอร์ที่มี ตัวหมุนเป็นแม่เหล็กถาวรตั้งรูปที่ 1 โดยมีขั้นตอนการเริ่มหมุน เมื่อกระแสไหลผ่านขดลวดชุดที่หนึ่งของขดลวดชุดที่สเตเตอร์ ทั้งสาม และสร้างขั้วแม่เหล็กนั้นเป็นแรงดูดให้สนามแม่เหล็ก ครอบรอบของขั้วที่ต่างกัน โรตอร์จะเคลื่อนที่ไปถ้ากระแสเลื่อน ไปที่ขดลวดชุดที่ติดกัน เกิดลำดับการเปลี่ยนแปลงแต่ละชุด ขดลวดทำให้โรตอร์ติดตามการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็ก หมุน [3]



รูปที่ 1 การเคลื่อนที่ของมอเตอร์



รูปที่ 2 แผนภาพการคอมมิวเตชัน

โดยการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรง ถ่านจะอาศัยการทำงานครึ่งละสองเฟส ผลลัพธ์คือจะทำให้ เกิดแรงบิดมาก ด้วยเหตุที่เฟสที่สามหยุดทำงานซึ่งเป็นข้อดี ของระบบขับเคลื่อนทางกลที่ต้องการแรงบิดมาก สำหรับการ ควบคุมการทำงานแบบสองเฟสจะใช้หลักการนำพลังงาน ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นให้สอดคล้องกับตำแหน่งของตัวโรตอร์ โดยใช้ ตัวตรวจจับสัญญาณด้วยตัวตรวจจับฮอลล์ทั้งสามตำแหน่งที่ ติดตั้งที่สเตเตอร์ โดยสัญญาณจากตัวตรวจจับตำแหน่งจะถูก

นำมาสร้างตัวเลขสามหลักที่มีการเปลี่ยนแปลงทุกๆ 60 องศา ทางไฟฟ้า โดยสัญญาณจากตัวตรวจจับฮอลล์นี้จะถูกนำไป กำหนดจังหวะเวลาการขับ (drive timing) ของสวิตซ์กำลัง และขณะมอเตอร์หมุนจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back electromotive forces) [4] โดยสัญญาณแสดงในรูปที่ 2

### 2.2 แบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ในตัวแปรเฟส จะได้สมการของชุดขดลวดสามเฟสในตัวแปร เฟสซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + (L-M) \begin{bmatrix} di_a/dt \\ di_b/dt \\ di_c/dt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

เมื่อ

- $v_{an} \ v_{bn} \ v_{cn}$  คือ แรงดันเฟสของสเตเตอร์
- $i_{an} \ i_{bn} \ i_{cn}$  คือ กระแสเฟสของเฟสของสเตเตอร์
- $e_{an} \ e_{bn} \ e_{cn}$  คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ
- $R$  คือ ความต้านทานสเตเตอร์
- $L$  คือ ความเหนี่ยวนำ
- $M$  คือ ความเหนี่ยวนำร่วม

ซึ่งค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับหาได้จาก

$$e_k = \omega_m f_k (\theta_r) \quad (2)$$

เมื่อ  $k$  คือ  $a \ b$  และ  $c$  โดยฟังก์ชันของ  $f_a \ f_b$  และ  $f_c$  จะมีรูปร่างเหมือนกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับดังรูปที่ 2 ซึ่ง จะมีค่าขนาด  $\pm 1$  และ  $\theta_r$  เป็นตำแหน่งตัวตรวจจับฮอลล์สาม ตัวที่วางห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า

ซึ่งแบบจำลองทางพลวัตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ไร้แปรงถ่าน จะประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนทางกลและส่วน ทางไฟฟ้า โดยส่วนแรกเป็นการหาค่าแรงบิดสนามแม่เหล็กที่ ได้จากส่วนทางไฟฟ้างดสมการที่ 3

$$T_e = \sum_k k_t i_k f_k (\theta_r) \quad (3)$$

ส่วนสมการที่ 4 เป็นลักษณะการเคลื่อนที่ทางกลของ มอเตอร์ โดยจะมีความสัมพันธ์กับทางไฟฟ้าในส่วนความเร็ว และตำแหน่งโรตอร์ดังสมการที่ 5

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (4)$$



$$\frac{d\theta_r}{dt} = \frac{P}{2} \omega_m \quad (5)$$

- เมื่อ
- $T_e$  = แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า
  - $T_L$  = แรงบิดโหลด
  - $\omega_m$  = ความเร็วการเคลื่อนที่ของมอเตอร์
  - $J$  = แรงเฉื่อยโรเตอร์
  - $B$  = ค่าคงที่การหน่วง
  - $kt$  = ค่าคงที่แรงบิด
  - $P$  = จำนวนขั้ว
  - $\theta_r$  = องศาทางไฟฟ้า

จากความสัมพันธ์ของสมการทั้งหมดของระบบในรูปแบบปริภูมิสถานะ

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_s} [v_{an} - e_a - Ri_a] \quad (6)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{L_s} [v_{bn} - e_b - Ri_b] \quad (7)$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{1}{L_s} [v_{cn} - e_c - Ri_c] \quad (8)$$

เมื่อ  $L_s = L-M$  การแปลงลาปลาซของสมการที่ 6 7 และ 8

$$I_a = \frac{1}{L_s s + R} [v_{an} - e_a] \quad (9)$$

$$I_b = \frac{1}{L_s s + R} [v_{bn} - e_b] \quad (10)$$

$$I_c = \frac{1}{L_s s + R} [v_{cn} - e_c] \quad (11)$$

และการแปลงลาปลาซของสมการที่ 4

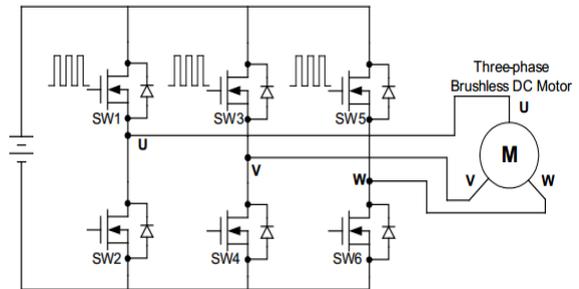
$$T_e - T_L = (Js+B)\omega_m \quad (12)$$

เมื่อความเร็วของมอเตอร์สามารถหาได้จาก

$$\omega_m = \frac{1}{(Js+B)} (T_e - T_L) \quad (13)$$

### 2.3 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ใช้คอมมิวนิเตอร์ทางอิเล็กทรอนิกส์เพื่อควบคุมการสับเปลี่ยนทิศทางกระแสสำหรับกำหนดทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง จะใช้โครงสร้างบริดจ์สามเฟสแสดงดังรูปที่ 3 สำหรับการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ จะควบคุมด้วยสวิตช์ตัวบนของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า โดยใช้การควบคุมด้วยสัญญาณพัลส์บวเอ็ม (PWM) ซึ่งเกิดจากการมอดูเลตสัญญาณแรงดันโดยปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้ความเร็วของมอเตอร์เปลี่ยนแปลง วิธีการนี้ทำได้ง่ายและสามารถจำกัดค่ากระแสเริ่มหมุน เพื่อควบคุมความเร็วและแรงบิด หลักการทำงานที่อธิบายข้างต้นสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1 เป็นการแสดงค่าองศา ตำแหน่งของตัวตรวจจับฮอลล์ และการกำหนดรูปแบบการสวิตช์ [4-5]



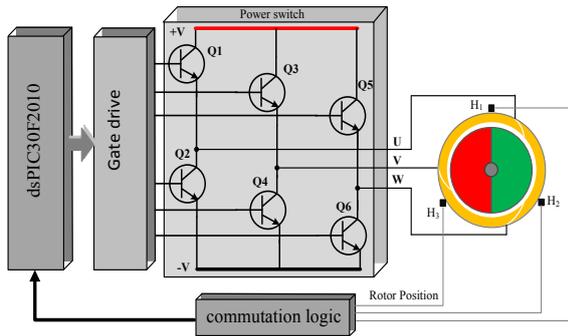
รูปที่ 3 บริดจ์สามเฟส

ตารางที่ 1 ลำดับคอมมิวนิเตอร์สำหรับการหมุน

Electrical angle	Hall sensor			Phase current			Switch closed	
	H1	H2	H3	Ia	Ib	Ic		
0°-60°	1	0	1	+	-	off	sw1	sw4
60°-120°	1	0	0	+	off	-	sw1	sw6
120°-180°	1	1	0	off	+	-	sw3	sw6
180°-240°	0	1	0	-	+	off	sw3	sw2
240°-300°	0	1	1	-	off	+	sw5	sw2
300°-360°	0	0	1	off	-	+	sw5	sw4

### 3. การออกแบบระบบควบคุม

ในการออกแบบระบบควบคุมนั้นแยกออกเป็นสองส่วนคือส่วนงานทางด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วย วงจรขับเกต สวิตช์กำลัง และระบบควบคุมใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F2010 แสดงไดอะแกรมการทำงานของระบบควบคุมดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ไดอะแกรมการทำงานของวงจรควบคุม

### 3.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F2010 ซึ่งสามารถประมวลผลข้อมูลได้ 16 บิต ซึ่งมีความเร็วเพียงพอสำหรับการออกแบบการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากมีความสามารถหลักคือ มีโมดูลสร้างสัญญาณพัลส์แอมป์ 6 ช่องอิสระหรือ 3 คู่ เป็นคอมพริเมนต์ และมีตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต [5] เป็นต้น

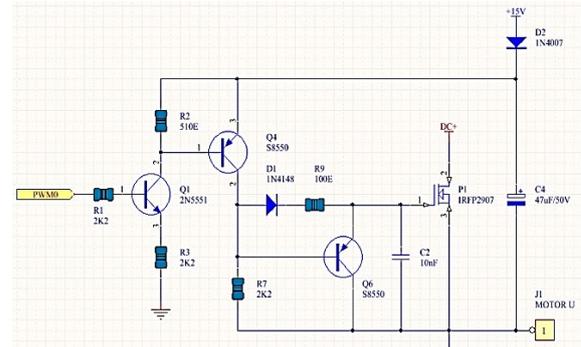
### 3.2 วงจรขับเกตและวงจรมอสเฟตกำลัง

ในส่วนของวงจรขับเกต (gate drive) นี้ได้ถูกนำมาใช้เพื่อขับขาเกตของทรานซิสเตอร์กำลัง (power transistor) ไอจีบีที (IGBT) หรือมอสเฟต (MOSFET) เพื่อการทำงานของสวิชต์กำลังเหล่านี้ โดยอาศัยการทำให้มอสเฟตนำกระแสและหยุดนำกระแสอย่างรวดเร็วทำได้โดยใช้ทรานซิสเตอร์คู่คอมพลีเมนต์ (complement) ต่อร่วมกันแบบวงจรคอลเลคเตอร์ร่วม (common collector) ทำหน้าที่ใส่ประจุและดึงประจุออกจากเกตของมอสเฟตเพื่อกระตุ้นให้การสะสมประจุและการคายประจุของเกตในมอสเฟตวงจรกำลัง ส่วนวงจรมอสเฟตกำลังชนิด 3 เฟส แบบบริดจ์ ดังรูปที่ 5

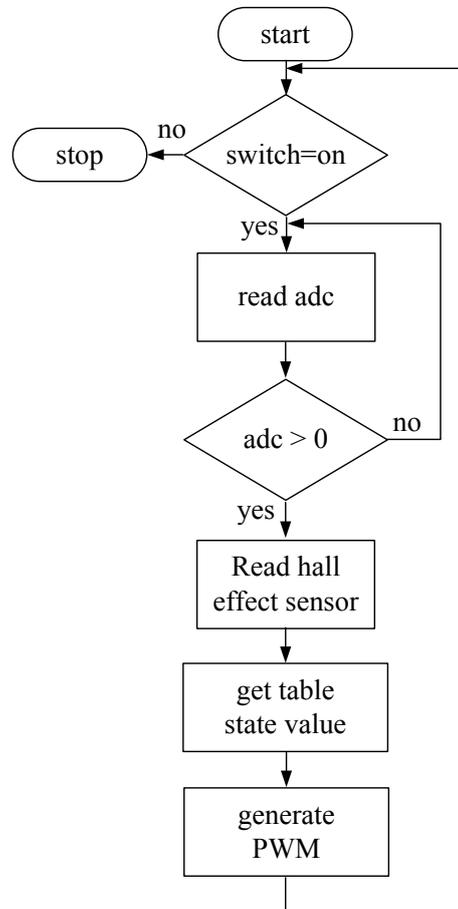
### 3.3 ขั้นตอนควบคุมการทำงาน

ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F2010 ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยตัวตรวจจับฮอลล์จะตรวจจับตำแหน่งของสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ป้อนกลับมาให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ออกคำสั่งควบคุมความเร็วของมอเตอร์โดยใช้หลักการรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal method) ที่มีมุมต่างกัน 120 องศา โดยการทำงาน 1 รอบใช้การอ้างอิง 6 ชั้นแสดงดังตารางที่ 1 (0°-360°) เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์แอมป์ สำหรับควบคุมการทำงานของวงจรบริดจ์สามเฟส เพื่อจ่ายกำลังงานไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยตัวตรวจจับฮอลล์จะส่งสัญญาณ

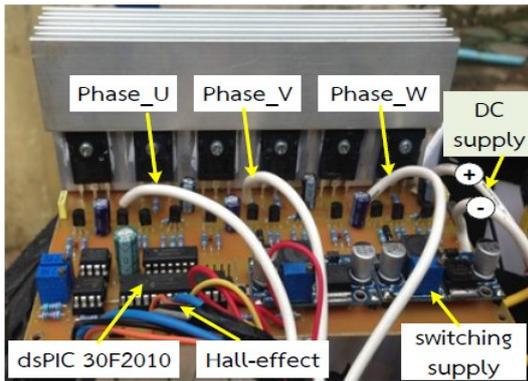
เข้ามาที่พอร์ต RB3 RB4 และ RB5 เพื่อกำหนดลำดับการทำงานของสวิชต์กำลัง ทั้ง 6 ตัว (SW<sub>1</sub>-SW<sub>6</sub>) เมื่อกำหนดให้ความถี่การสวิชต์เท่ากับ 50 kHz โดยสัญญาณควบคุมของวงจรจากโมดูลพัลส์แอมป์ของไมโครคอนโทรลเลอร์จะต่อกับวงจรขับเกตเพื่อควบคุมการทำงานของสวิชต์กำลัง แสดงดังรูปที่ 5 สำหรับควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งจะมีลำดับขั้นตอนการควบคุมการทำงานดังรูปที่ 6 และจากไดอะแกรมการทำงานของวงจรควบคุมได้นำมาทดสอบกับวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ดังรูปที่ 7 เป็นแผงวงจรควบคุมต้นแบบที่นำเสนอ



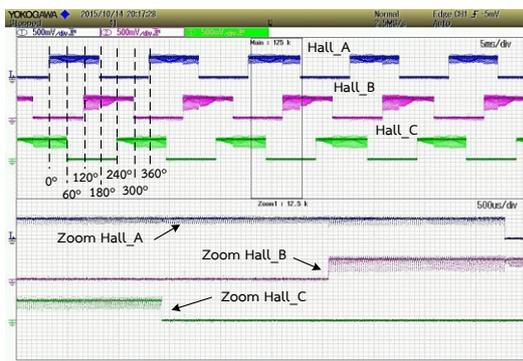
รูปที่ 5 วงจรขับเกตและมอสเฟตกำลัง



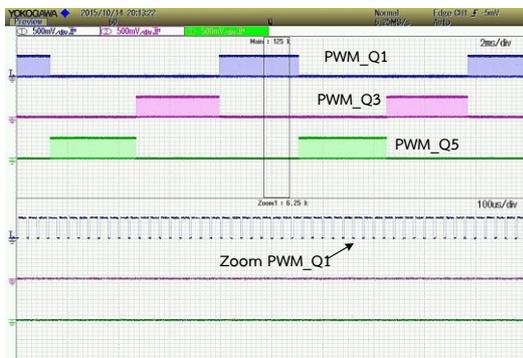
รูปที่ 6 แผนผังการทำงานของโปรแกรม



รูปที่ 7 แผงวงจรควบคุมต้นแบบที่นำเสนองาน



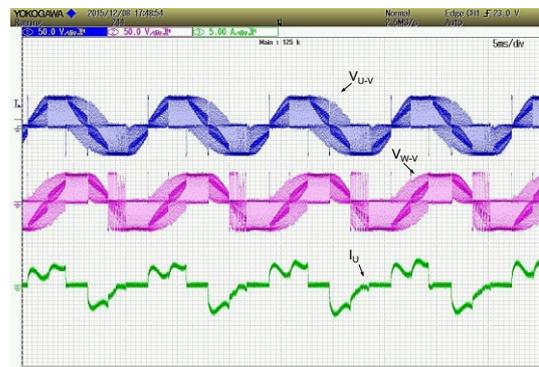
รูปที่ 8 สัญญาณตัวตรวจจับสนภูมิ



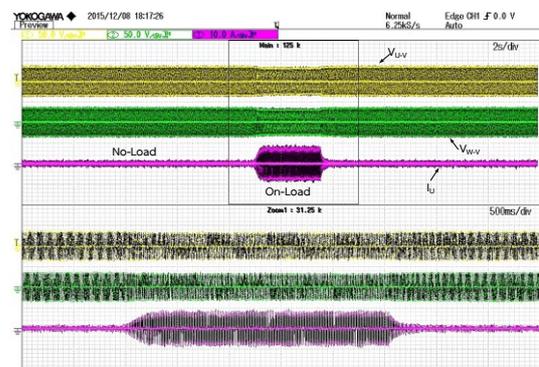
รูปที่ 9 เปรียบเทียบสัญญาณ PWM

และ V-W และกระแสไหลผ่านเฟส U ในขณะที่ทำการทดสอบขณะมีโหลด ส่วนในรูปที่ 11 ทำการทดสอบโดยการเพิ่มและลดโหลดแบบทันทีทันใดโดยใช้วิธีการกดเบรกเป็นการแทนการเพิ่มโหลด และปล่อยเบรกเป็นการแทนการลดโหลด

จากการทดสอบขับซึ่งรถจักรยานสามล้อไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 11 ผลที่ได้จากการทดสอบความเร็วสูงสุดของรถจักรยานสามล้อไฟฟ้าที่น้ำหนักบรรทุก 80 กิโลกรัม รถจักรยานสามล้อไฟฟ้าสามารถทำความเร็วสูงสุดเฉลี่ยได้ 21.9 กิโลเมตร/ชั่วโมง โดยเมื่อประจุแบตเตอรี่เต็ม และทดสอบการวิ่งให้จนกว่าแบตเตอรี่หมดจากรถจักรยานสามล้อไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ระยะทางเฉลี่ย 22.1 กิโลเมตร ตามลำดับ



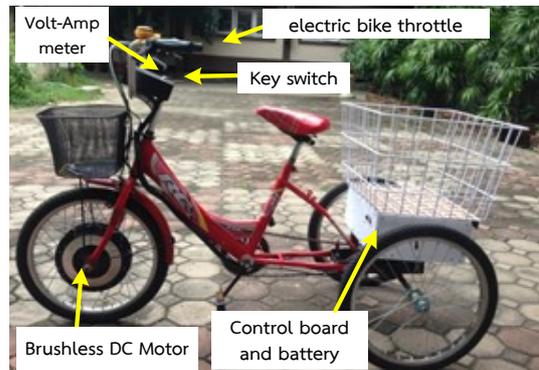
รูปที่ 10 แรงดัน และกระแสที่มอเตอร์



รูปที่ 11 การเพิ่มและลดโหลดแบบขึ้น

4. ผลการวิจัยและอภิปราย

ในบทความนี้เลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านขนาด 36 โวลต์ 350 วัตต์ และติดตั้งแทนดุมล้อเดิมของล้อจักรยานขนาด 20 นิ้ว ใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 12 แอมแปร์ต่อชั่วโมง จำนวน 3 ลูกต่ออนุกรม โดยเลือกสวิตช์กำลังเบอร์ IRFP2907 ซึ่งให้เหมาะสมกับการใช้งานจากชุดวงจรต้นแบบในรูปที่ 7 ได้ทำการวัดสัญญาณการทำงานของตัวตรวจจับสนภูมิดังรูปที่ 8 เพื่อดูลักษณะการทำงานเป็นไปตามหลักการของการตรวจสอบตำแหน่งโรเตอร์ ส่วนรูปที่ 9 แสดงสัญญาณพีดีบีวีเอ็มที่ควบคุมสวิตช์ด้านบน (Q1 Q3 และ Q5) ส่วนรูปที่ 10 แสดงลักษณะของแรงดันที่เฟส U-W



รูปที่ 12 จักรยานสามล้อไฟฟ้า



## 5. สรุป

จากผลการทดสอบการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ที่ใช้ขับเคลื่อนรถจักรยานสามล้อไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมที่นำเสนอสามารถควบคุมความเร็วรถจักรยานได้ตามต้องการ บนเงื่อนไขการทดสอบที่มีน้ำหนักบรรทุกทุก 80 กิโลกรัม จักรยานสามล้อไฟฟ้าวิ่งได้ความเร็วเฉลี่ย 21.9 กิโลเมตร/ชั่วโมง และแบตเตอรี่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิดแห้งขนาด 12 โวลต์ 12 แอมแปร์ต่อชั่วโมง จำนวน 3 ลูก ต่ออนุกรมกันเพื่อให้ได้ระดับแรงดันที่ 36 โวลต์ โดยระยะเวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่ให้เต็ม ประมาณ 5 ชั่วโมงในการอัดประจุแบตเตอรี่ 1 ครั้งจักรยานสามล้อไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ระยะทางเฉลี่ย 22.1 กิโลเมตร โดยการพัฒนาต่อไปจะเพิ่มฟังก์ชันให้มีการกลับทางหมุนเพื่อให้สามารถถอยหลังได้ และระบบตัดสัญญาณในขณะต้องการหยุดจากการเบรคจักรยาน

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัย และสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่สนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยในครั้งนี้

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chan, T.F, Yan, L.T. and Fang, S.Y. (2002). In-wheel permanent-magnet brushless dc motor drive for an electric bicycle, *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 17, no. 2, June 2002, pp. 229 – 233.
- [2] Kahveci, H., Okumus, H.I. and Ekici, M. (2014). Improved brushless DC motor speed controller with digital signal processor, *IET Journals & Magazines*, vol. 50, no. 12, June 2014, pp. 864 – 866.
- [3] Xia, C.L. (2012). *Permanent magnet brushless DC motor drives and controls*, John Wiley & Sons, Singapore.
- [4] Liu, D. (2008). *Brushless DC motors made easy*, freescale, 2008.
- [5] Souza, S.D. (2004). *Sensored BLDC motor control using dsPIC30F2010*, Microchip Technology, 2004.