



# วิธีการค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้าน

กลับเป็นศูนย์ ด้วยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวด

สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

## An Initial Rotor Position Detection Method with Zero Back-EMF Using a Magnetic Field Winding Excited Technique for a Brushless DC Motor

ไทรภพ บัวระกอด และ วิจิตร กิณเรศ

Traiphop Buarakod and Vijit Kinnares

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอ วิธีการค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเป็นศูนย์ สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่กักกำลัง 100 วัตต์ 30 โวลท์ และ 4,500 รอบต่อนาที สำหรับการควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ด้วยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์ ทำให้ค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น จากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ลู่เฟสก่อน จากนั้นได้ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบลูปเปิด โดยใช้เทคนิคแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา เพื่อให้มอเตอร์เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ และตรวจสอบแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้น โดยใช้วงจร ซีโรครอสซิง เพื่อใช้คำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ และความเร็วรอบ จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ และคาบเวลาการเกิด ซีโรครอสซิง หลังจากนั้นได้ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบลูปปิด ย่านความเร็วรอบ 500 ถึง 4,500 รอบต่อนาที นอกจากนี้ยังได้พิจารณาการกระจายสนามแม่เหล็กจากการกระตุ้น ขณะเริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์อีลิเมนต์ 2 มิติ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPEED ในระบบควบคุมทั้งหมด ได้ถูกประมวลผลโดยใช้ dsPIC ซึ่งเป็นตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล (DSC) ขนาด 16 บิต

### ABSTRACT

This paper presents an initial rotor position detection method when the back emf is zero using a magnetic field winding excited technique for a 100W, 30V and 4500rpm brushless DC (BLDC) motor without a position sensor for speed sensorless control. Using the magnetic field stator winding excited technique helps starting of the BLDC motor resulting in identifying the initial rotor position by exciting each dual winding. After that, the motor is controlled in open loop operation with a 120 degree rectangular wave technique in order to generate back electromotive force (back-EMF). The back-EMF is monitored by using zero crossing. The rotor position and speed are calculated from the relation between back-EMF and zero crossing periods. Then, the motor is driven in closed loop speed control, with an operating speed range of 500 to 4500rpm. Additionally, considering magnetic flux distribution resulting from the proposed initial stator excitation is given using 2-D Finite Element Analysis (2-D FEA) by the SPEED software package. The overall control system is processed by a 16-bit dsPIC which is a Digital Signal Controller (DSC).

**Keywords:** Sensorless Control, Brushless DC Motor, Digital Signal Controller (DSC).

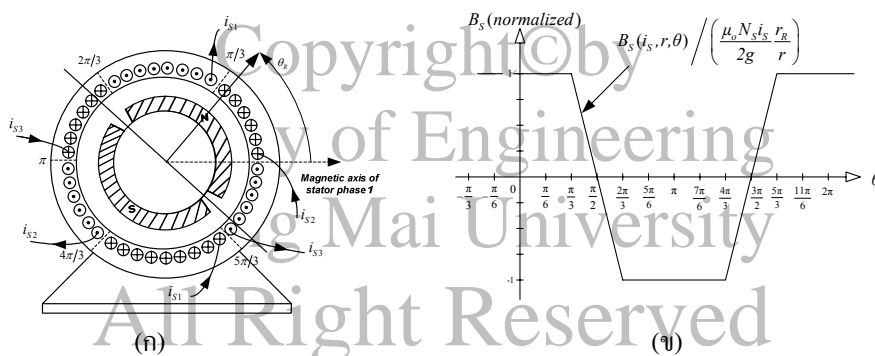
### 1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้ได้มีการนำมอเตอร์ที่มีแม่เหล็กถาวรมาใช้กันอย่างทั่วไป อาทิเช่น ในงานด้านอุตสาหกรรม, เครื่องใช้ในครัวเรือน และอุตสาหกรรมการทำเหมือง ในการควบคุมมอเตอร์ให้ได้ประสิทธิภาพสูง ซึ่งมีความจำเป็นในการรู้ตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น ฉะนั้นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านทั่วไป จะใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์แบบตัวตรวจจับปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effects) สำหรับหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น [1]-[4], หากการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ไม่ตรงตามตำแหน่งของโรเตอร์จะส่งผลทำให้กระแสไฟฟ้าสูงขณะเริ่มต้น และช่วงทำงาน มอเตอร์ร้อน และเกิดการสั่น ผลจากการขับเคลื่อนสัญญาณไม่ตรงตามตำแหน่งโรเตอร์ ซึ่งความจำเป็นในการรู้ตำแหน่งโรเตอร์นั้นมีความสำคัญมากในการควบคุมมอเตอร์ แต่ข้อจำกัดในการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับปรากฏการณ์ฮอลล์ ในงานบางประเภทไม่สามารถติดตั้งอุปกรณ์ได้ อาทิเช่น งานที่มีอุณหภูมิสูง และมอเตอร์คอมเพรสเซอร์แบบปิด ซึ่งในบทความนี้จะนำเสนอการค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเป็นศูนย์ ด้วยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์ สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน โดยใช้เทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์แต่ละคู่เฟสก่อน เพื่อช่วยค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น เมื่อทราบตำแหน่งเริ่มต้นแน่นอนแล้ว จากนั้นจะส่งสัญญาณขับเคลื่อนมอเตอร์ตามตำแหน่งของ

โรเตอร์แบบรูปเปิด โดยเทคนิคแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา (120° rectangular-wave technique) เพื่อให้ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ และตรวจสอบแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ โดยใช้วงจรรีโครอสซิง [2]-[4], และเวลาที่เกิดรีโครอสซิง นี้มีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบมอเตอร์ เพื่อใช้ในการคำนวณตำแหน่งโรเตอร์ และความเร็วรอบ สำหรับการควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ด้วยการควบคุมความเร็วแบบพีไอ

### 2. ลักษณะสนามแม่เหล็กสเตเตอร์

จากโครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ในรูปที่ 1 (ก) สำหรับใช้ในการพิจารณาลักษณะสนามแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์ ( $B_s$ ) ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กันจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 1 (ข) เป็นความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กสเตเตอร์ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์ทางอุดมคติ จะมีลักษณะคล้ายสี่เหลี่ยมคางหมูเปรียบเทียบกับมุมมองทางด้านสเตเตอร์ในแต่ละองศา สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น และกระแสไฟฟ้าในแต่ละองศา [5]-[6], ในสมการที่ (1)



รูปที่ 1 (ก) โครงสร้างของมอเตอร์ (ข) ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กสเตเตอร์ทางอุดมคติ

$$\vec{B}_s(i_s, r, \theta) = \begin{cases} \frac{\mu_o N_s i_s r_R}{2g} \hat{r} & ; -\frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{\pi}{3} \\ \frac{\mu_o N_s i_s r_R}{2g} \frac{6}{\pi} (\pi/2 - \theta) \hat{r} & ; \frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3} \\ -\frac{\mu_o N_s i_s r_R}{2g} \hat{r} & ; \frac{2\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{4\pi}{3} \\ \frac{\mu_o N_s i_s r_R}{2g} \frac{6}{\pi} (\theta - 3\pi/2) \hat{r} & ; \frac{4\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{5\pi}{3} \end{cases} \quad (1)$$

เมื่อกำหนดให้

$B_s$  = ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสเตเตอร์ (T)

$\mu_o$  = ความซึมซาบอากาศ

$N_s$  = จำนวนรอบขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส (Turn)

$i_s$  = กระแสทางด้านสเตเตอร์ต่อเฟส (Amp)

$\theta$  = มุมทางด้านสเตเตอร์ (Degree)

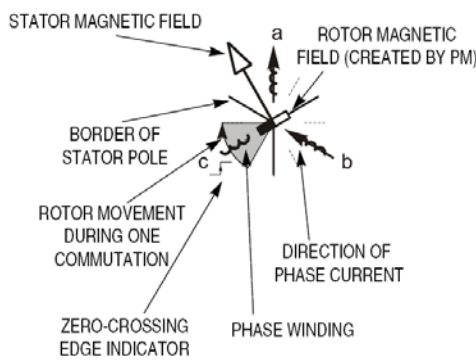
$r, r_R$  = รัศมีของช่องว่างอากาศ และโรเตอร์ (mm)

$g$  = ช่องว่างอากาศ (mm)

$\hat{r}$  = เวกเตอร์ตามทิศทางโรเตอร์ ต่อหนึ่งหน่วย

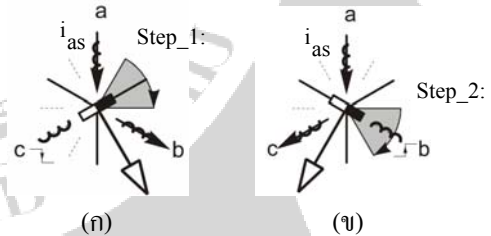
### 3. วิเคราะห์สนามแม่เหล็กสเตเตอร์

ในรูปที่ 2 แสดงทิศทางกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กในขดลวดแต่ละคู่เฟสตามสัญญาณในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ทิศทางสนามแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์และทิศทางการเคลื่อนที่ของ โรเตอร์ ผลจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์



รูปที่ 2 ทิศทางสนามแม่เหล็ก, กระแสไฟฟ้า, แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ และการเคลื่อนที่ของโรเตอร์

ในรูปที่ 3 (ก) แสดงการกระตุ้นขณะเริ่มต้น ในระดับที่ 1 เป็นการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่เฟส A-B ทิศทางของกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านเฟส A ไปเฟส B ผลจากการกระตุ้นขณะเริ่มต้นทำให้ทราบทิศทางของตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น ไม่ว่าโรเตอร์จะอยู่ในตำแหน่งไหนก็ตาม จะถูกกระตุ้นในขณะเริ่มต้นเพื่อให้ได้ตำแหน่งโรเตอร์ที่ต้องการทราบก่อน และในรูปที่ 3 (ข) จะเป็นการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่เฟส A-C ในระดับที่ 2 เพื่อให้ทราบตำแหน่งของโรเตอร์ที่แน่นอนก่อนจะขับเคลื่อนแบบเปิด ดังนั้นจะเห็นว่ากระแสที่ไหลผ่านเฟส A จะเป็นกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่คงที่เพื่อต้องการทราบตำแหน่งโรเตอร์ที่ต้องการ

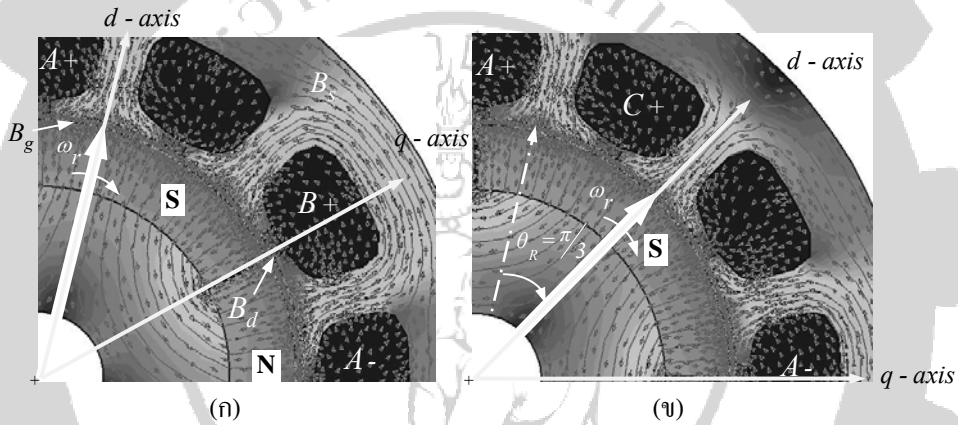


รูปที่ 3 การกระตุ้นสนามแม่เหล็กจากขดลวดสเตเตอร์ (ก) กระตุ้นเฟส A-B และ (ข) กระตุ้นเฟส A-C เพื่อหาตำแหน่งของโรเตอร์เริ่มต้น

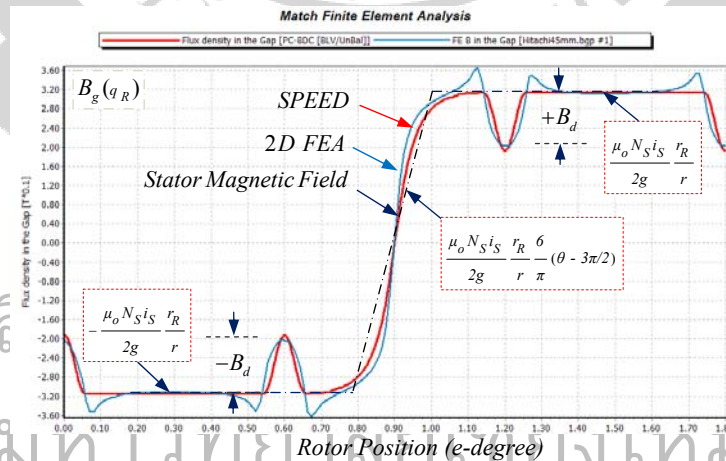
จากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์ ในรูปที่ 3 (ก),(ข) โดยใช้โปรแกรม SPEED และโปรแกรมการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ 2 มิติ (2-D FEA) [6], ซึ่งจะแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กเมื่อถูกกระตุ้นสนามแม่เหล็ก และตำแหน่งโรเตอร์ที่เคลื่อนที่ เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่กระตุ้นทางด้านสเตเตอร์ในแต่ละระดับดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) ผลจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่คู่เฟส A-B และส่วนในรูปที่ 4 (ข) ผลจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่คู่เฟส A-C จะเห็นว่าตำแหน่งของโรเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกากระยะมุมที่เคลื่อนที่ 60° ตามทิศทางสนามแม่เหล็กที่ถูกกระตุ้นในแกนอ้างอิงทางด้าน โรเตอร์ ( $dq$ -axis) ส่วนในรูปที่ 5 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ช่องว่างอากาศ ( $B_g$ ) กับ

สนามแม่เหล็กสเตเตอร์ทางด้านอุดมคติ ( $B_s$ ) ซึ่งแสดงเป็นเส้นประ โดยใช้โปรแกรม SPEED และ โปรแกรม 2-D FEA ลักษณะใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบกับสมการของสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ทางอุดมคติ ในสมการที่ (1)

ซึ่งผลที่เกิดจากสนามแม่เหล็กที่สลีทเปิด ( $B_d$ : Open Slots) ส่งผลให้สนามแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสนามแม่เหล็กทางอุดมคติ ทั้งทางด้านบวกและด้านลบ ( $\pm B_d$ )



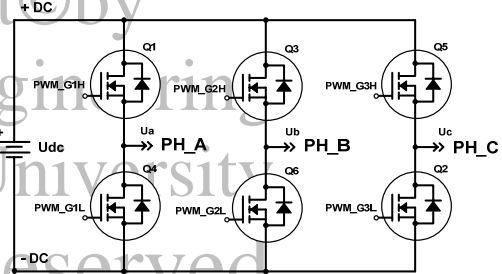
รูปที่ 4 เส้นแรงแม่เหล็ก ทิศทางการเคลื่อนที่โรเตอร์ และทิศทางการกระจายของสนามแม่เหล็กที่ถูกกระตุ้นขดลวดสเตเตอร์ (ก) กระตุ้นสนามแม่เหล็กที่เฟส A-B และ (ข) กระตุ้นสนามแม่เหล็กที่เฟส A-C ตามลำดับ



รูปที่ 5 สนามแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ จากโปรแกรมออกแบบมอเตอร์ (SPEED) และ โปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ 2 มิติ (2-D FEA) เปรียบเทียบกับสนามแม่เหล็กสเตเตอร์ทางอุดมคติ

#### 4. การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน จะใช้การควบคุมแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา [7]-[8], ซึ่งแสดงในตารางที่ 1 เป็นสัญญาณสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ในแต่ละระดับเพื่อขับชุดเกตมอสเฟสแต่ละกิ่ง แสดงในรูปที่ 6 เป็นวงจรพื้นฐานอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

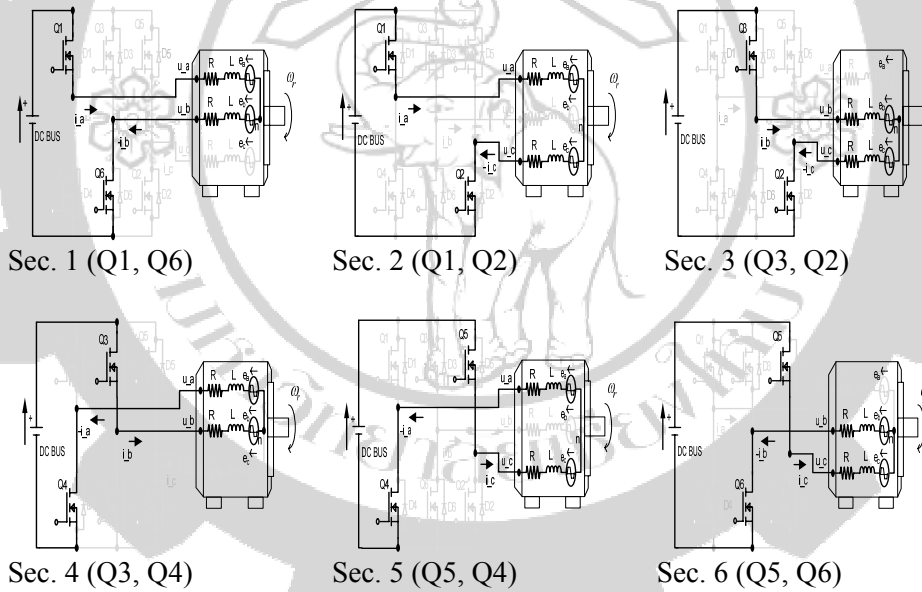


รูปที่ 6 ชุดขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์ภาคกำลัง 3 เฟส

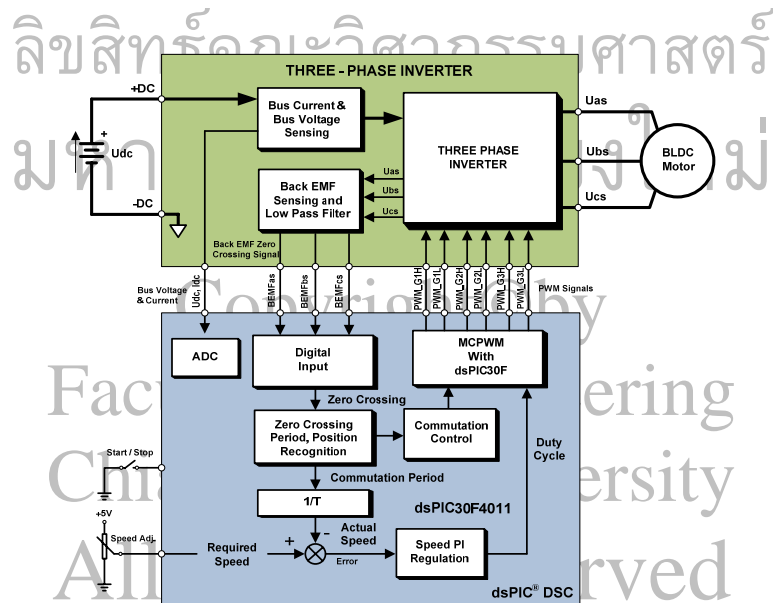
ตารางที่ 1 สัญญาณขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเทคนิคสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา (120° rectangular-wave technique)

SEC.	1H	1L	2H	2L	3H	3L	U <sub>as</sub>	U <sub>bs</sub>	U <sub>cs</sub>
1	1	0	0	1	0	0	U <sub>dc</sub> /2	-U <sub>dc</sub> /2	0
2	1	0	0	0	0	1	U <sub>dc</sub> /2	0	-U <sub>dc</sub> /2
3	0	0	1	0	0	1	0	U <sub>dc</sub> /2	-U <sub>dc</sub> /2
4	0	1	1	0	0	0	-U <sub>dc</sub> /2	U <sub>dc</sub> /2	0
5	0	1	0	0	1	0	-U <sub>dc</sub> /2	0	U <sub>dc</sub> /2
6	0	0	0	1	1	0	0	-U <sub>dc</sub> /2	U <sub>dc</sub> /2

หมายเหตุ : “1”: switch ON (using  $f_{PWM} = 20kHz.$ ), “0”: switch OFF



รูปที่ 7 สัญญาณการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเทคนิคสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา ในแต่ละระดับ



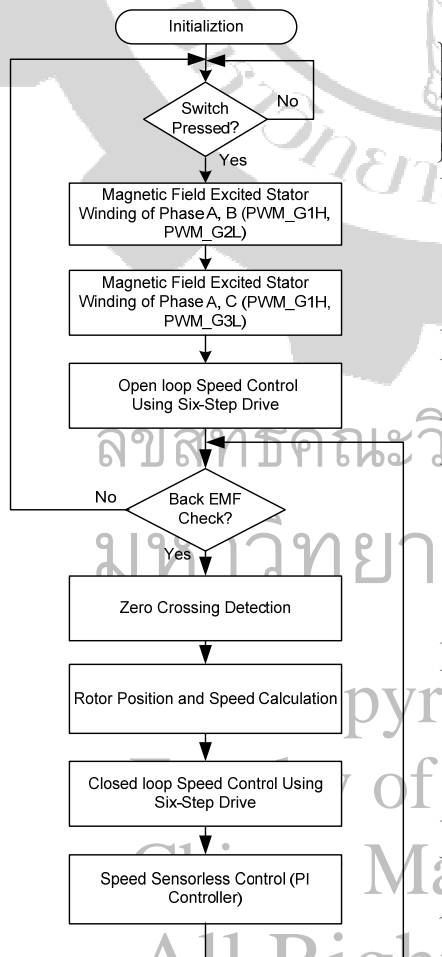
รูปที่ 8 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

ในรูปที่ 8 แสดงระบบควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับโดยอาศัย การค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับโดยตรง คาบเวลาการเกิดซีโรครอสซิง สำหรับคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ และควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยใช้ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล (DSC), dsPIC<sup>®</sup> ขนาด 16 บิตของบริษัท Microchip [9]-[12],

### 5. อัลกอริทึมการควบคุมมอเตอร์

อัลกอริทึมของการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์จะเริ่มต้นด้วยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดด้านสเตเตอร์แต่ละคู่เฟส เพื่อทราบตำแหน่งของโรเตอร์ที่แน่นอนเพื่อใช้ในการออกตัวเริ่มต้นของมอเตอร์ [11]-[13],

เมื่อได้ตำแหน่งของโรเตอร์แล้วจะทำการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบลูปเปิด โดยเทคนิคแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา เพื่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเมื่อมอเตอร์หมุน ตัวควบคุมจะทำการตรวจสอบแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่วัด โดยตรงจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และทำการเปรียบเทียบกับวงจรีโรครอสซิง เพื่อทำการควบคุมแบบลูปปิด ตัวควบคุมจะทำการคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์และความเร็วรอบมอเตอร์ จากคาบเวลาที่เกิด ซีโรครอสซิง เพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ในย่านความเร็วรอบ 500 ถึง 4,500 รอบต่อนาที โดยการควบคุมความเร็วแบบพีไอ ดังแสดงขั้นตอนในรูปที่ 9 ในแต่ละขั้นตอนสำหรับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน



ขั้นตอนที่ 1: การตรวจสอบการเปิด - ปิด การควบคุมก่อนการกระตุ้นสนามแม่เหล็กเพื่อหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น

ขั้นตอนที่ 2:  
ระดับที่ 1 กระตุ้นสนามแม่เหล็กคู่เฟส A-B  
ระดับที่ 2 กระตุ้นสนามแม่เหล็กคู่เฟส A-C เพื่อหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น ซึ่งโรเตอร์จะเคลื่อนที่ตามการกระตุ้นสนามแม่เหล็กในแต่ละคู่เฟส

ขั้นตอนที่ 3: เมื่อทราบตำแหน่งโรเตอร์แล้ว จะขับเคลื่อนแบบลูปเปิด เพื่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ

ขั้นตอนที่ 4: การตรวจสอบแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับหลังจากมอเตอร์หมุนแบบลูปเปิด และหาตำแหน่งที่เกิดซีโรครอสซิง เพื่อหาความสัมพันธ์จากคาบเวลาที่เกิดซีโรครอสซิง สำหรับการคำนวณตำแหน่งโรเตอร์ และความเร็วรอบมอเตอร์

ขั้นตอนที่ 5: การคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ ความเร็วรอบจากสมการที่ (6) และการควบคุมแบบลูปปิดหลังจากการคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ โดยอาศัยแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้น จากการขับเคลื่อนแบบลูปเปิด

ขั้นตอนที่ 6: การควบคุมระบบขับเคลื่อนความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับแบบ พีไอ

รูปที่ 9 อัลกอริทึมของระบบขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

### 6. การออกแบบวงจรตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้า

$$F(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{s}{d_3s^3 + d_2s^2 + d_1s + d_0} \quad (2)$$

#### ด้านกลับโดยตรง

วงจรสำหรับตัวตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ แสดงในรูปที่ 10 ในแต่ละเฟส สำหรับวงจรตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับโดยตรง ในส่วนการออกแบบให้ใกล้เคียงเฟสเลื่อน 90 องศา ระหว่างย่านความถี่รอบต่ำ ( $\omega_{rLow}$ ) ถึงย่านความถี่รอบสูง ( $\omega_{rHigh}$ ) [14]-[16], ซึ่งสามารถแบ่งส่วนของการออกแบบวงจรตรวจจับได้แก่ ส่วนของวงจรเลื่อนเฟส 90 องศา (90° Phase shifting) ส่วนของวงจรกรองสูงผ่าน (High-Pass filter) และส่วน ของวงจรกรองต่ำผ่าน (Low-Pass filter) ดังแสดงในรูปที่ 11 โดยพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอน ในแต่ละส่วนของการออกแบบ จะแสดงความสัมพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอน ( $F(s)$ ) ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับโดยตรง ( $U_i(s)$ ) และสัญญาณที่ได้ใหม่ ( $U_o(s)$ ) [17], ในรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอน ดังแสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ (2)

เมื่อ

$$d_3 = R_1R_4C_1C_3$$

$$d_2 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)R_4C_3 + (R_1C_1 + R_1C_2)\left(1 + \frac{R_4C_3}{R_3C_2} + \frac{C_3}{C_2}\right) - R_1C_2$$

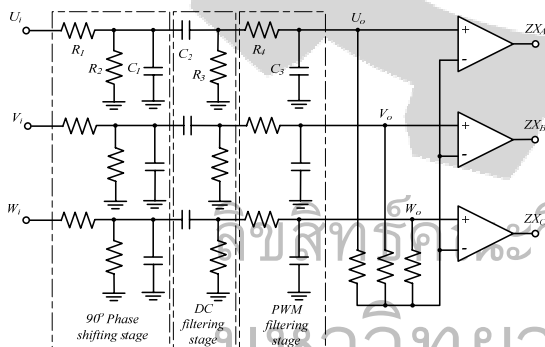
$$d_1 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)\left(1 + \frac{R_4C_3}{R_3C_2} + \frac{C_3}{C_2}\right) + \frac{R_1C_1 + R_1C_2}{R_3C_2}$$

$$d_0 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)\frac{1}{R_3C_2}$$

#### 6.1 ขั้นตอนการออกแบบวงจร

การออกแบบวงจรเลื่อนเฟสให้ใกล้เคียง 90 องศา ที่เกิดขึ้นจะต้องน้อยกว่า 10 เท่าของความถี่พื้นฐาน ( $f$ ) ( $f = P\omega_r / 120$ ) ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็ก ( $P$ ) และความเร็วรอบมอเตอร์ ( $\omega_r$ ) จะกรองความถี่ต่ำผ่าน ด้วยความต้านทาน ( $R_1, R_2$ ) และคาปาซิเตอร์ ( $C_1$ ) เพื่อรักษาเฟสของสัญญาณให้ใกล้เคียง 90 องศา สามารถหาความถี่ที่ตัดออก ( $f_{cut1}$ ) ในสมการที่ (3)

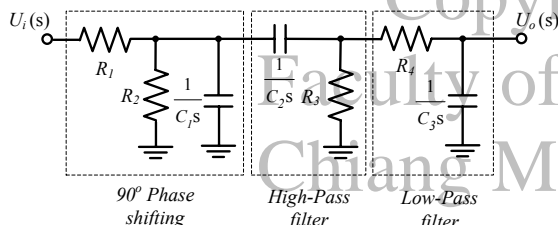
$$f_{cut1} = \frac{R_1 + R_2}{2\pi R_1R_2C_1} < \frac{1}{10} \left( \frac{P\omega_{rLow}}{120} \right) = \frac{P\omega_{rLow}}{1200} \quad (3)$$



รูปที่ 10 วงจรตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับโดยตรง

ส่วนการออกแบบวงจรกรองความถี่สูงผ่าน ด้วยความต้านทาน ( $R_3$ ) และคาปาซิเตอร์ ( $C_2$ ) ความถี่ในการตัดออก ( $f_{cut2}$ ) ต้องน้อยกว่า 10 เท่าของความถี่พื้นฐาน สามารถหาได้ในสมการที่ (4)

$$f_{cut2} = \frac{1}{2\pi R_3C_2} < \frac{1}{10} \left( \frac{P\omega_{rLow}}{120} \right) = \frac{P\omega_{rLow}}{1200} \quad (4)$$



รูปที่ 11 วงจรฟังก์ชันถ่ายโอนสำหรับตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับโดยตรง

ขณะที่ความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์ ( $f_{PWM}$ ) ความถี่สูง เมื่อย่านความถี่รอบสูง จะเป็นฟังก์ชันสำหรับส่วนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ด้วยความต้านทาน ( $R_4$ ) และคาปาซิเตอร์ ( $C_3$ ) ดังนั้น ความถี่ในการตัดออก ( $f_{cut3}$ ) จะต้องมี

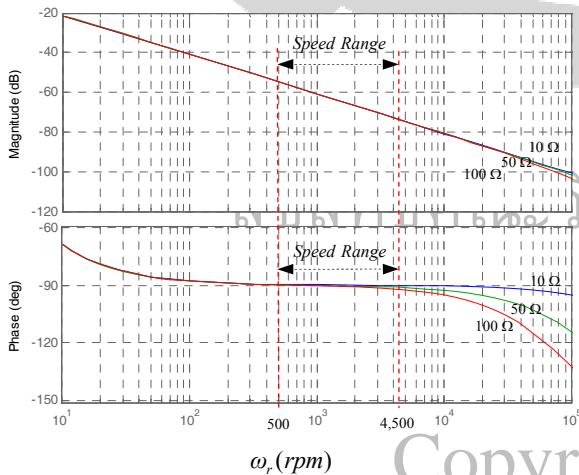
ด.บัวระกวด และ ว.กิมเรศ

ระยะความถี่น้อยกว่าความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์ ( $f_{PWM}$ ) และมากกว่าความถี่พื้นฐาน สามารถหาได้ในสมการที่ (5)

$$\frac{P\omega_{rHigh}}{120} < f_{cut3} = \frac{1}{2\pi R_4 C_3} \ll f_{PWM} \quad (5)$$

6.2 ผลจากการออกแบบ

ความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์ ( $f_{PWM}$ ) 20 kHz และจำนวนขั้วแม่เหล็ก ( $P$ ) 4 ขั้ว ระหว่างย่านความเร็วควบคุม ความเร็วรอบต่ำ ( $\omega_{rLow}$ ) 500 รอบต่อนาที ถึงความเร็วรอบสูง ( $\omega_{rHigh}$ ) 4,500 รอบต่อนาที จากสมการ (2)-(5) จะได้ค่าตัวแปรสำหรับวงจร คือ  $R_1 = 1M\Omega$ ,  $R_2 = 1M\Omega$ ,  $R_3 = 1M\Omega$ ,  $R_4 = 10\Omega$ ,  $C_1, C_2 = 1\mu F$  และ  $C_3 = 100nF$  ผลที่ได้ทำให้แน่ใจว่าเฟสที่ถูกเลื่อนเฟสให้ใกล้ 90 องศา ระหว่างย่านความเร็วรอบควบคุม แสดงในผลตอบสนองขนาด (Magnitude Response) และผลตอบสนองเฟส (Phase Response) ขณะที่ความแตกต่างค่าความต้านทาน ( $R_4$ ) ในรูปที่ 12 ในย่านความเร็วรอบ 500 ถึง 4,500 รอบต่อนาที สำหรับวงจรตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับโดยตรง



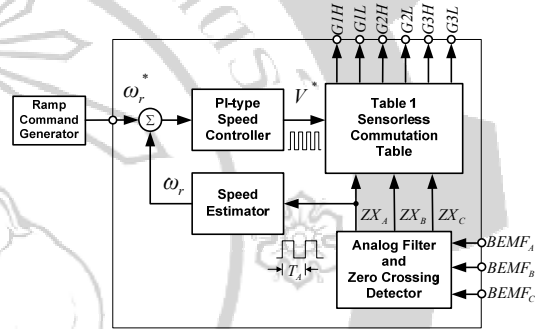
รูปที่ 12 ผลตอบสนองขนาด และเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ

6.3 การคำนวณหาความเร็วรอบมอเตอร์

รูปที่ 13 แสดงไดอะแกรมการคำนวณหาความเร็วรอบจากคาบเวลาการเกิดซีโรครอสซิง ซึ่งในรูปควบคุมความเร็ว

แบบ พีไอ และสัญญาณในการขับเคลื่อนของสวิตช์ ซึ่งสัญญาณคาบเวลาของ ซีโรครอสซิง ( $T_A$ ) จะใช้ในการคำนวณหาความเร็วรอบ ( $\hat{\omega}_r$ ) สามารถหาได้ในสมการที่ (6)

$$\hat{\omega}_r = \frac{1}{T_A} \times \frac{60}{(P/2)} = \frac{120}{PT_A} \quad (6)$$



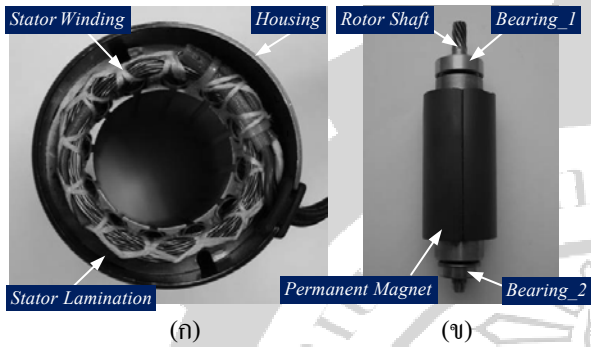
รูปที่ 13 ไดอะแกรมการคำนวณหาความเร็วรอบมอเตอร์

ตารางที่ 2 จะแสดงข้อจำกัด และตัวแปรของมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน สำหรับการควบคุมความเร็วรอบ ในส่วนของข้อจำกัดชุดควบคุม, ตัวแปรมอเตอร์ และข้อจำกัดในการควบคุมมอเตอร์ สำหรับการทดสอบมอเตอร์ และแสดงโครงสร้างของมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบรูปที่ 14 ประกอบด้วยส่วนของสเตเตอร์ และส่วนของโรเตอร์ที่เป็นแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์แม่เหล็กติดพื้นผิว

ตารางที่ 2 ข้อจำกัด และตัวแปรในการควบคุมมอเตอร์

Hardware Boards	Max. voltage:	50 VDC
Characteristics	Max. Current:	10 A
	Motor Type:	3PH, BLDC Motor
Motor Characteristics	Rate Motor Spec.:	100W, 30V, 1.2A, 4P
	Max. Torque	0.05 Nm (7.08 oz-in)
	Resistance ( $R_s$ ):	1 ohm
	Inductance ( $L_s$ ):	1 mH
	EMF Constant ( $K_e$ ):	0.13 V.s/rad
	Rotor Inertial ( $J$ ):	0.12 kg.cm.s <sup>2</sup>
	Max. Speed range:	4,500 rpm
Drive Characteristics	Frequency switching:	20 kHz.
	Motor Starting:	Ramp Starting
	Speed Controller:	PI - Control
	Protection:	I >, U > Protection.

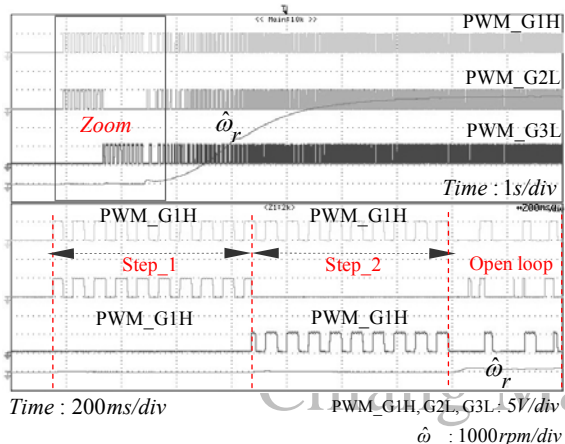




รูปที่ 14 โครงสร้าง (ก) ส่วนของสเตเตอร์, (ข) ส่วนของโรเตอร์แม่เหล็กถาวรแบบติดพื้นผิวโรเตอร์

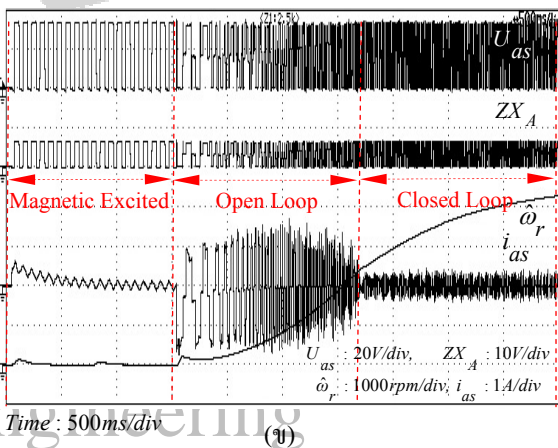
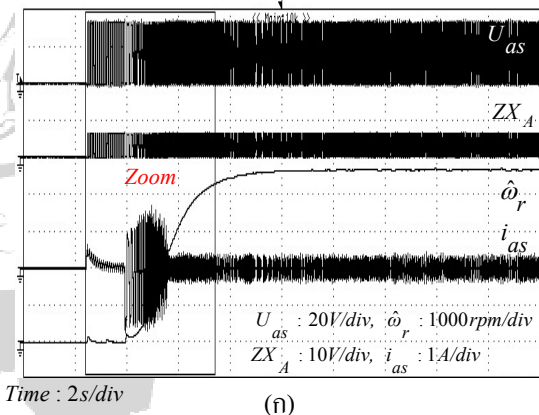
7. ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบในรูปที่ 15 แสดงสัญญาณขับเคลื่อน (G1H, G2L, G3L) และความถี่รอบ ( $\omega_r$ ) ขณะออกตัวเริ่มต้น โดยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดทางด้านสเตเตอร์ที่นำเสนอ โดยระดับที่ 1 (Step\_1) เป็นการกระตุ้นเฟส A-B เพื่อหาตำแหน่งเริ่มต้นของโรเตอร์สถานะแรกของการออกตัวของมอเตอร์ และระดับที่ 2 (Step\_2) เป็นการกระตุ้นเฟส A-C เพื่อทราบตำแหน่งของโรเตอร์ที่แน่นอน ก่อนที่จะตั้งสัญญาณในการขับเคลื่อนแบบลูปเปิด โดยใช้เทคนิคแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา ด้วยความถี่สวิตซ์ ( $f_{PWM}$ ) 20kHz, Duty Circle 50% และขับเคลื่อนแบบลูปเปิด หลังจากรู้ตำแหน่งของโรเตอร์ ตามสัญญาณการขับเคลื่อนในตารางที่ 1



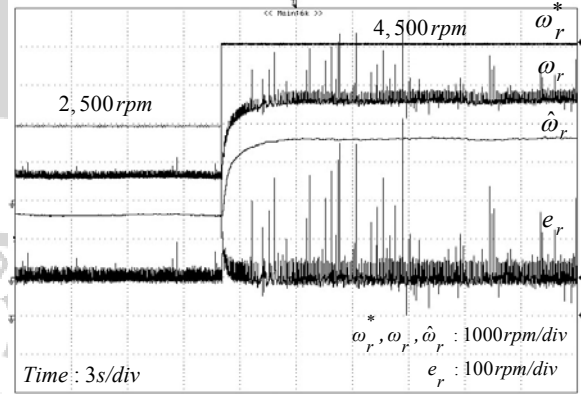
รูปที่ 15 สัญญาณขับเคลื่อนเกต PWM (G1H, G2L, G3L) และความถี่รอบ ( $\omega_r$ ) ขณะออกตัวเริ่มต้น

ผลการทดสอบในรูปที่ 16 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้า, ตำแหน่งของโรเตอร์, กระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์ และความถี่รอบขณะออกตัวเริ่มต้นด้วยการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก ก่อนการขับเคลื่อนแบบลูปเปิด เพื่อทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ และขับเคลื่อนมอเตอร์แบบลูปปิดเพื่อควบคุมแบบ พีไอ จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าขณะกระตุ้นเริ่มต้น จะเป็นกระแสตรงเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กให้คงที่ ในการหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น และกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น เมื่อแรงบิดของมอเตอร์เริ่มออกตัว จนถึงความเร็วที่กักกระแสจะลดลง ส่วนในรูปที่ 16 (ข) แสดงภาพขยายสัญญาณของรูปที่ 16 (ก) ในแต่ละขั้นตอนของการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

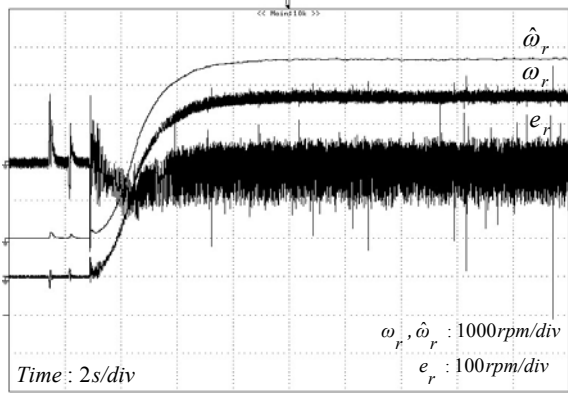


รูปที่ 16 แรงดันไฟฟ้า Line to line ( $U_{as}$ ), ตำแหน่งของโรเตอร์ ( $ZX_A$ ), กระแสด้านสเตเตอร์เฟส A ( $i_{as}$ ) และความถี่รอบ ( $\omega_r$ ) (ก) การขับเคลื่อนขณะเริ่มต้น และ (ข) ภาพขยายสัญญาณ

ส่วนในรูปที่ 17 เป็นการเปรียบเทียบความเร็วรอบจากการวัด ( $\omega_r$ ), การคำนวณจากคาบเวลา ( $\hat{\omega}_r$ ) และความเร็วรอบที่ผิดพลาด ( $e_r = \omega_r - \hat{\omega}_r$ ) ที่ความเร็วรอบขณะเริ่มต้น ถึงความเร็วรอบพิกัด 4,500 รอบต่อนาที ส่วนในรูปที่ 18 แสดงความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลงจากความเร็วรอบ 500 2,500 และ 4,500 รอบต่อนาที ตามลำดับ ขณะไร้ภาระแรงบิด ส่วนในรูปที่ 19 แสดงความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลงจากความเร็วรอบจาก 2,500 เป็น 4,500 รอบต่อนาที ตามความเร็วรอบคำสั่ง ( $\omega_r^*$ ) ขณะไร้ภาระแรงบิด

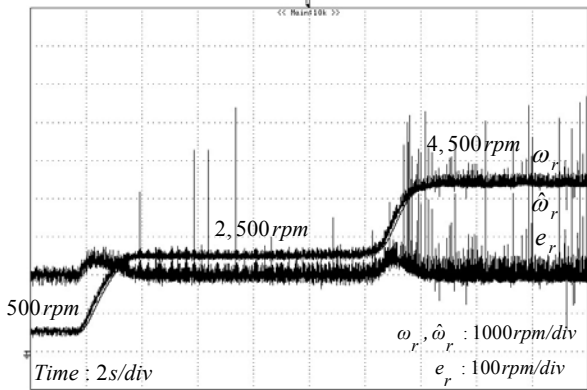


รูปที่ 19 ความเร็วคำสั่ง ( $\omega_r^*$ ), การวัด ( $\omega_r$ ), การคำนวณ ( $\hat{\omega}_r$ ) และความเร็วรอบที่ผิดพลาด ( $e_r$ )

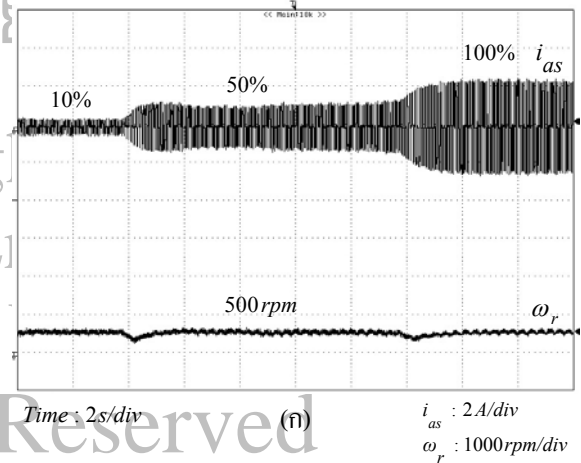


รูปที่ 17 ความเร็วรอบจากการคำนวณ ( $\hat{\omega}_r$ ), การวัด ( $\omega_r$ ) และความเร็วรอบที่ผิดพลาด ( $e_r$ )

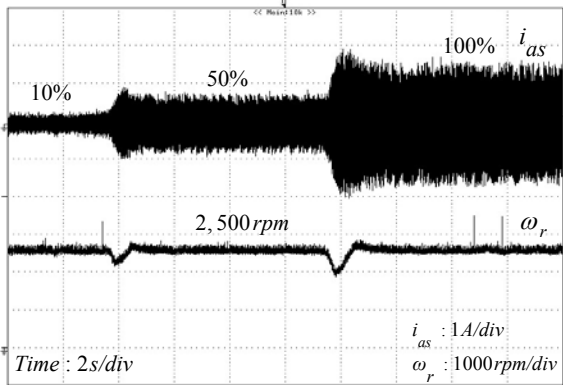
ในรูปที่ 20 แสดงการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่ความเร็วรอบคำสั่ง เมื่อมอเตอร์รับภาระแรงบิด มอเตอร์จะรักษาระดับความเร็วรอบให้คงที่โดยการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ ในรูปที่ 20 (ก) ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที รูปที่ 20 (ข) ที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที และรูปที่ 20 (ค) ที่ความเร็วรอบ 4,500 รอบต่อนาที ในแต่ละภาระแรงบิดที่ 10%, 50%, 100% ของพิกัดแรงบิด หรือ 0.005, 0.025, 0.05 Nm (0.7, 3.5, 7.08 oz-in) ตามลำดับ จากการควบคุมความเร็วรอบแบบ พีไอ กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อมอเตอร์รับภาระ และความเร็วคงที่ดังแสดงในรูปผลการทดสอบในแต่ละความเร็วรอบในย่านการควบคุมความเร็ว 500 ถึง 4,500 รอบต่อนาทีที่ออกแบบไว้



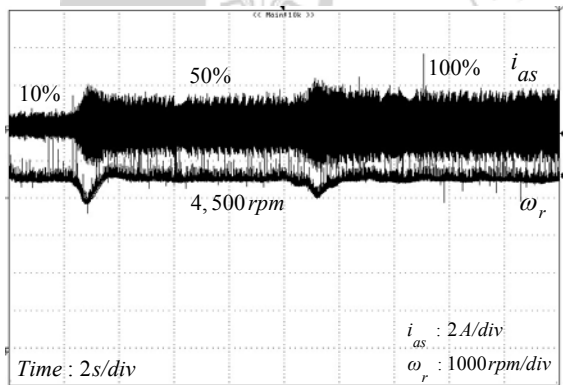
รูปที่ 18 ความเร็วรอบจากการคำนวณ ( $\hat{\omega}_r$ ), การวัด ( $\omega_r$ ) ที่ความเร็วรอบ 500 2,500 และ 4,500 รอบต่อนาที และความเร็วรอบที่ผิดพลาด ( $e_r$ )



รูปที่ 20 (ก) (ข) (ค)  $i_{as}$  : 2A/div  $\omega_r$  : 1000rpm/div



(ข)



(ค)

รูปที่ 20 กระแสไฟฟ้าเฟส A ( $i_{as}$ ), ความเร็วรอบ ( $\omega_r$ ) ขณะรับภาระแรงบิด 10%, 50%, 100% ของพิกัดแรงบิด ที่ความเร็วรอบ (ก) 500 รอบต่ออนาที, (ข) 2,500 รอบต่ออนาที และ (ค) 4,500 รอบต่ออนาที

### 8. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบ การค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น โดยใช้เทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กขดลวดสเตเตอร์ ที่นำเสนอมานี้จะออกตัวเริ่มต้นของมอเตอร์ จะถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กคงที่ให้กับขดลวดด้านสเตเตอร์ ในการค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น เมื่อรู้ตำแหน่งโรเตอร์แล้ว จะขับเคลื่อน

มอเตอร์แบบรูปเปิดด้วยเทคนิคสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา เพื่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ สำหรับตรวจสอบแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับด้วย วงจรซีโร-ครอสซิง เพื่อใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ และความเร็วรอบมอเตอร์ จากผลการค้นหาตำแหน่งโรเตอร์เริ่มต้น จนถึงความเร็วรอบพิกัด 4,500 รอบต่ออนาที ซึ่งเปรียบเทียบความเร็วรอบที่ผิดพลาดในช่วงที่ขับเคลื่อนแบบรูปเปิด ระบบยังไม่ได้ควบคุมความเร็วรอบ จะเห็นได้จากความเร็วรอบที่ผิดพลาดในช่วงขับเคลื่อนแบบรูปเปิด เมื่อมอเตอร์ขับเคลื่อนแบบรูปปิด แล้วระบบควบคุมจะควบคุมความเร็วรอบ โดยควบคุมแบบ พีไอ จะรักษาระดับของความเร็วรอบเอาไว้ในช่วงการออกแบบที่ความเร็วรอบ 500 ถึง 4,500 รอบต่ออนาที ไม่ว่าจะความเร็วรอบของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงก็ตาม หรือเมื่อรับภาระแรงบิด ขณะย่านความเร็วรอบ 500 2,500 และ 4,500 รอบต่ออนาที ที่ภาระแรงบิดพิกัด 10%, 50%, 100% ตามลำดับที่ความเร็วรอบคำสั่ง มอเตอร์ก็ยังสามารถรักษาความเร็วรอบไว้ เนื่องจากการที่ทราบตำแหน่งของโรเตอร์ และขับเคลื่อนมอเตอร์ให้ตรงกับตำแหน่งโรเตอร์กับสัญญาณในการขับเคลื่อนแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา ด้วยความถี่สวิตซ์ 20kHz จึงทำให้สัญญาณขับเคลื่อนกับตำแหน่งของโรเตอร์นั้น สัมพันธ์กัน และยังสามารถนำไปใช้กับงานที่มีข้อจำกัด สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ได้

ลิขสิทธิ์ © ๒๕๕๒ วิศวกรรมศาสตรมหาวิทาลัยเชียงใหม่  
Copyright © by Faculty of Engineering Chiang Mai University All Right Reserved

เอกสารอ้างอิง

- [1] JR Hendershot, TJE Miller. Design of brushless Permanent Magnet Motor. Oxford University Press, Monographs in Electrical and Electronic Engineering, 1994.
- [2] P. Damodharan, K. Vasudrean. Indirect Back-EMF Zero Crossing Detection for Sensorless BLDC Motor Operating. Power Electronics and Drive Systems Conference, PEDS 2005; Vol.2: 1107-1111.
- [3] Li Qiang, Lin Mingyao et al. Research on Filters for Back EMF Zero-Crossing Detecting in Sensorless BLDC Motor Drive. International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2005; Vol.2: 1899-1902.
- [4] J. Shao, D. Nolan. Further Improvement of Direct Back EMF Detection for Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives. Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2005; Vol.2: 933-937.
- [5] John Chiasson. Modeling and High-Performance Control of Electric Machines. IEEE Press series on power engineering. John Wiley & Sons, 2005.
- [6] PC-BDC 8.0.1, SPEED Consortium, University of Glasgow, 2008.
- [7] Jianwen shao. An Improved Microcontroller-base Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drive for Application. Industry Application Conference, IAS 2005; Vol.4: 2512-2517.
- [8] Jianwen Shao, Dennis Nolan et al. A Novel Microcontroller-based Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drive for Automotive Fuel Pump. IEEE Transaction on Industry Applications, 2003; Vol.39, No.6: 1734-1740.
- [9] Microchip Technology Inc. MPLAB. Available, 2007 ([www.microchip.com](http://www.microchip.com)).
- [10] Microchip Technology Inc. dsPIC30F4011. Available, 2007 ([www.microchip.com](http://www.microchip.com)).
- [11] Zezhong Xia, Wen Li et al. Design of a Control System for Sensorless Brushless DC Motor Using the dsPIC. Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2008; 551-556.
- [12] K.S. Rama Rao, Nagadeven et al. Sensorless Control of a BLDC Motor with Back EMF Detection Method using DSPIC. Power and Energy Conference, PECon 2008; 243-248.
- [13] Kwang-woon Lee, Dae-kyong Kim et al. A Novel Starting Method of the Surface Permanent Magnet BLDC Motors without Position Sensor for Reciprocating Compressor. IEEE Transaction on Industry Applications, 2008; Vol.44, No.1: 85-92.
- [14] Tae-Hyung Kim, Mehrdad Ehsani. Sensorless Control of the BLDC Motors From Near-Zero to High Speeds. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004; Vol.19, No.6: 1635-1645.
- [15] J. Wisniewski, W. Kaczara. The Sensorless Rotor Position Identification and Low Speed Operation of the Axial Flux Permanent Magnet Motor Controlled by the Novel PIPCRM Method. Power Electronics Specialists Conference, PESC 2008; 1502-1507.
- [16] Chuanyang Wang, Longya Xu. A Novel Approach for Sensorless Control of PM Machines Down to Zero Speed without Signal Injection or Special PWM Technique. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004; Vol.19, No.6: 1601-1607.
- [17] H.C. Chen, Y.C. Chang et al. Practical Sensorless Control for Inverter-fed BDCM Compressors. IET Electric Power Application, 2007; Vol.1, No.1: 127-132.

Copyright©by

Faculty of Engineering  
Chiang Mai University  
All Right Reserved