

# ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลแบบฝังตัวเพื่อการประมาณตำแหน่งเริ่มต้นของโรเตอร์ของมอเตอร์ ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร

## An Embedded Digital Signal Controller for Initial Rotor Position Estimation of PMSM Drives

วนพันธ์ วัชวุฒิ (1) สุขสันต์ นุ่นงาม (2)

(1)ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

(2)ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

E-mail: wanapun@hotmail.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ การพัฒนาวิธีการประมาณค่าตำแหน่งเริ่มต้นของโรเตอร์ ของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรที่ไม่มีตัวตรวจจับ หลักการประมาณการอยู่ที่ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นจากการป้อนสัญญาณความถี่สูงเข้าไปในขณะที่ยังไม่หมุน โดยใช้ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลแบบฝังตัว เพื่อให้ตัวควบคุมมีขนาดเล็ก และราคาถูก ผลการทดสอบ โดยการกำหนดค่าเริ่มต้นของสัญญาณความถี่สูงที่แตกต่างกัน จะได้ผลตอบสนองที่ช่วยในการหาตำแหน่งเริ่มต้นได้ถูกต้องมากขึ้น

คำสำคัญ: มอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร

### Abstract

This paper presents the development of an initial rotor position estimation of permanent magnet synchronous motors (PMSM) without a position sensors drives with embedded digital signal controller. The principle of the estimation is based on induced voltage of electromagnetic flux by injecting high-frequency voltage at standstill. The controller is embedded digital signal controller (DSC) due to the small and cheap controller. Experimental results show that changing initial frequency capable of reliable.

Keywords: permanent magnet synchronous motor, PMSM

เว้น 1 บรรทัด

### 1. บทนำ

มอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet Synchronous Machine, PMSM) ใช้ในการกำหนดตำแหน่งที่ต้องการความละเอียดสูง เช่น หุ่นยนต์และการประยุกต์ทางเครื่องมือจักรกล (Robotic and machine tool) ปัจจุบันมอเตอร์ชนิดนี้มีราคาถูกลงทำให้มีการนำมาใช้งานมากขึ้น การหาตำแหน่งของโรเตอร์ (Rotor position)

เพื่อให้สอดคล้อง (Synchronized) กับส่วนควบคุม โดยทั่วไปจะใช้สัญญาณจาก resolver, optical encoder และทรานสดิวเซอร์แบบฮอลล์ (Hall-effect transducer) ในปัจจุบันมีการใช้งานโดยไม่ต้องใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง ทำให้ราคาต่ำลงอีก การควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร ที่ไม่มีตัวตรวจจับ (Sensorless) จะหาตำแหน่งหรือทิศทางหมุนได้ ด้วยวิธีต่างๆ โดยหากจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับ (Back-electromotive-force, back-EMF ) ซึ่งจะเกิดเมื่อมอเตอร์มีการหมุน แต่ถ้ามอเตอร์อยู่นิ่งๆ ไม่มีการหมุนจะทำให้หาจาก back-EMF ไม่ได้ [1]-[4] M.R. Zolghadri และคณะ [5] จะกำหนดจุดเริ่มต้นของ มอเตอร์โดยการป้อนแรงดันคงที่และจำกัดกระแส วิธีการของ Hyunbae Kim และคณะ[6] ใช้ตัวสังเกตการณ์ (Observer) ตามค่าข้อผิดพลาดของ saliency vector model และวิธีการใช้ตัวสังเกตการณ์การอิมตัวของ saliency component กับ fundamental harmonic ของ saliency vector model วิธีการของ Joachinem Holtz และ Hangwen Pan[7] หาตำแหน่งโรเตอร์ของมอเตอร์แบบไร้ตัวตรวจจับที่ตัวควบคุมและมอเตอร์อยู่ห่างกัน โดยการดูจากค่าเฟสการรบกวนคลื่นเคลื่อนที่ของขดลวด สเตเตอร์ วิธีของ Takahiro Yuzawa และคณะ[8] หาตำแหน่งของโรเตอร์ โดยการหาจากการตอบสนองของกระแสที่เกิดจากการอิมตัวของสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์ เมื่อป้อนแรงดันให้กับมอเตอร์ Ji-Hoon Jang และคณะ [9] ใช้วิธีการป้อนแรงดันความถี่สูงและความต้านทานต่อไฟฟ้าสลับ (Impedance) โดยใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite-element analysis) Babak Nahid-Mobarakeh และคณะ [10] ได้ประมาณการจาก back-EMF ของ PMSM เพื่อให้การหาค่าพารามิเตอร์ได้ถูกต้อง โดยแสดงผลของการเกิดแรงดันตกคร่อม (Voltage drop) จากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และข้อผิดพลาดจากการวัดแหล่งจ่ายไฟตรง และได้แนะนำวิธีการปรับปรุง โดยใช้วิธีออนไลน์ เพื่อหาความต้านทานของสเตเตอร์ Jianwen Shao และคณะ[11] ควบคุมการทำงานของ มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปลงถ่านไร้ตัวตรวจจับ โดยการตรวจสอบการไหลผ่านศูนย์ (Cross

zero point) ของ back-EMF โดยใช้ตัวควบคุมขนาดเล็ก (Microcontroller System on chip) เพื่อให้มีราคาถูกลง และไม่เปลืองเนื้อที่ วิธีของ Joachim Holtz [12] ใช้การป้อนสัญญาณพาหะ (Carrier signal) ความถี่สูงเข้าไปในแนวแกนที่จะประมาณการตำแหน่งของโรเตอร์ แล้วใช้การแยกสัญญาณจากสัญญาณพาหะ (Demodulation) เพื่อนำมาหาตำแหน่งของโรเตอร์ต่อไป

ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอการ นำระบบสมองกลฝังตัว (Embedded System) แบบตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Controller, DSC) ที่มีขนาดเล็ก มีส่วนต่างๆที่จำเป็นอยู่ในชิพ (Chip) เดียวกัน และราคาถูกลงกว่า เมื่อเทียบกับวิธีการของ Joachim Holtz [12] ใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing, DSP) และวิธีอื่นๆ

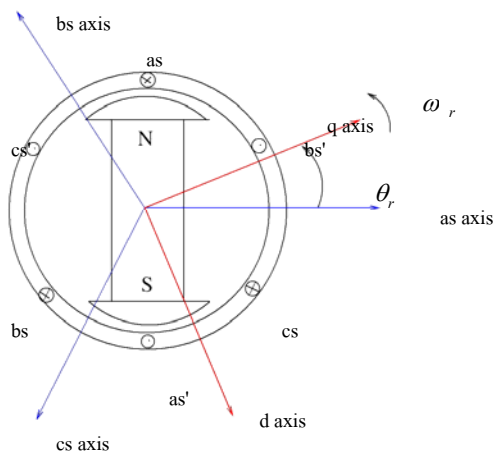
ในขั้นตอนของการวิจัยนี้จะทดลองหาข้อมูลของการทดลองกับ PMSM เพื่อนำผลที่ได้นำมาใช้ในการวิจัยครั้งต่อไป

## 2. วิธีประมาณ

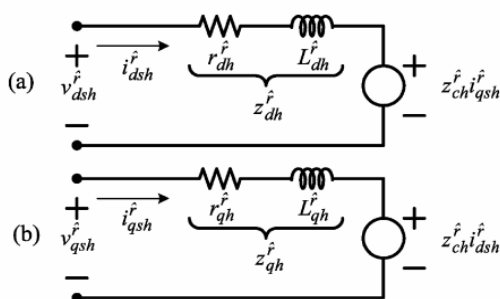
### 2.1 หลักการประมาณ

จากรูปที่ 1 เป็นแบบจำลองของ PMSM จะนำมาเปลี่ยน จากกรอบแบบ 3 แกน เปลี่ยนมาเป็นแบบ 2 แกนได้ตามสมการ (1)

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \\ V_{os}^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 120) & \cos(\theta + 120) \\ \sin\theta & \sin(\theta - 120) & \sin(\theta + 120) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad (1)$$



รูปที่ 1 แบบจำลอง PMSM [13]



รูปที่ 2 แบบจำลองของ PMSM ที่ความถี่สูง [14]

รูปที่ 2 เป็นแบบจำลองของ PMSM ที่ความถี่สูง โดยรูป (a) เป็นวงจรเทียบเท่าแกน d และรูป (b) เป็นวงจรเทียบเท่าแกน q สมการที่ (2) เป็นสมการแรงดันของ PMSM [14]

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^r \\ v_{qs}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & -\omega_r L_s \\ \omega_r L_s & R_s + L_s p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \lambda_{PM} \end{bmatrix} \quad (2)$$

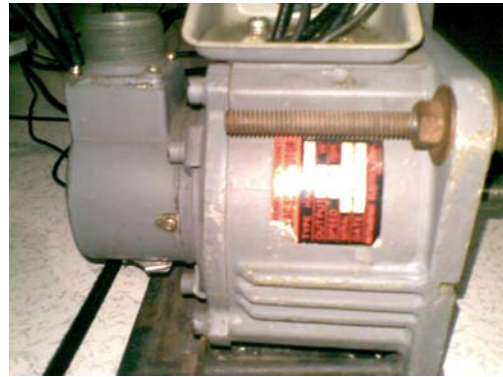
## 2.2 วิธีการประมาณ

### 2.2.1 หาความถี่ที่จะใช้

ขั้นแรกจะทำการป้อนสัญญาณความถี่สูงแรงดันต่ำ เข้าไปที่เฟสใดเฟสหนึ่งของมอเตอร์ และวัดสัญญาณจากอีกเฟสหนึ่ง แล้วทดลองปรับความถี่และสังเกต การวัดสัญญาณจากอีกเฟส โดยเลือกความถี่ที่ให้แรงดันสัญญาณที่สูง

### 2.2.2 หาตำแหน่งของโรเตอร์

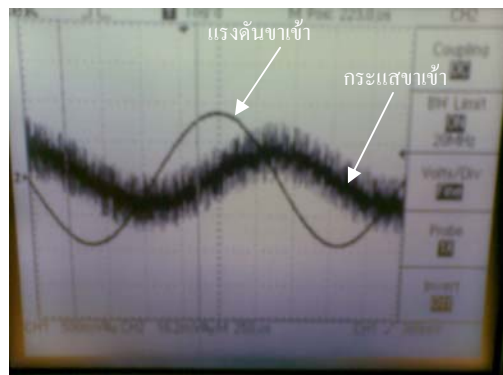
เมื่อเลือกความถี่จากขั้นแรกได้แล้ว ทดลองปรับตำแหน่งของโรเตอร์และวัดสัญญาณจากอีกเฟส



รูปที่ 3 มอเตอร์ที่ใช้ทดลอง 3 เฟส ขนาด 300 วัตต์ 2000 รอบต่อนาที

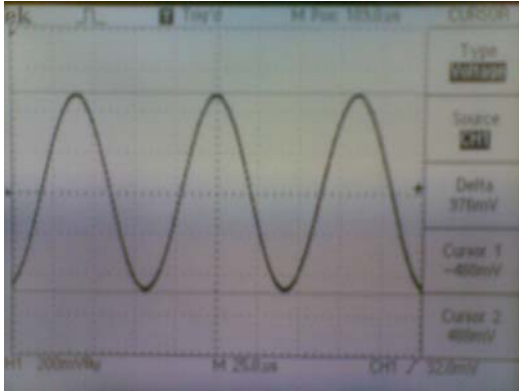
## 3. ผลการทดลอง

ป้อนแรงดันขาเข้า ขนาด 2 Vpp ความถี่ 11.63 KHz รูปที่ 4 ด้านล่าง เป็นรูปความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาเข้าและกระแส

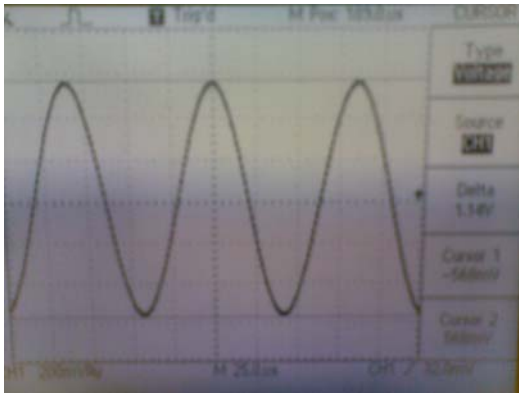


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาเข้าและกระแสขาเข้า

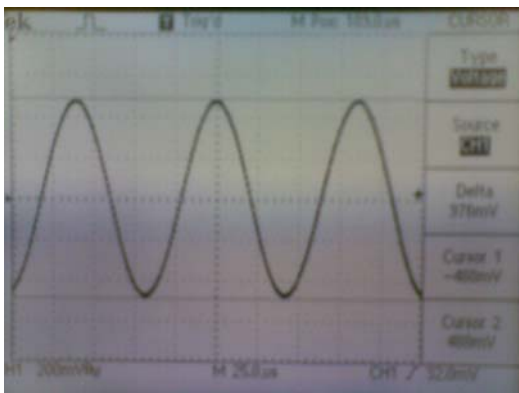
กระแสขาเข้ามีขนาดต่ำจะมีสัญญาณรบกวนผสมอยู่ด้วย แต่รูปร่างเป็นลักษณะของสัญญาณไซน์ที่มีการเลื่อนของเฟส



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาออก ขนาดและเวลาที่มุมของโรเตอร์ 0 องศาทางกล



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาออก ขนาดและเวลาที่มุมของโรเตอร์ประมาณ 23 องศาทางกล



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาออก ขนาดและเวลาที่มุมของโรเตอร์ประมาณ 45 องศาทางกล

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ของแรงดันและมุมของโรเตอร์ทางกล

มุมของโรเตอร์ทางกล (องศา)	แรงดันขาออก (โวลต์)
0	0.976
23	1.140
45	0.976
78	1.140
90	0.976

จากการวัดและตารางที่ 1 ค่ามุมของโรเตอร์จะสัมพันธ์กับขนาด ของสัญญาณขาออก

#### 4. สรุป

จากผลการทดลองนี้เมื่อป้อนสัญญาณขาออก และวัดแรงดันขาออกจากอีกเฟส ขนาดของสัญญาณจะแปรตามมุมของโรเตอร์ ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกของการวิจัย

ในขั้นตอนต่อไปของการวิจัย จะนำตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล (DSC) มาสร้างสัญญาณขาเข้า และวัดแรงดันขาออก

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] J. R.Hendershot Jr., THE Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors"; Magna Physics Publishing and Oxford University Press; 1994.
- [2] Joohn-Sheok IOM, and Seung-Ki sul ; "New Approach for the Low-Speed Operation of PMSM Drives Without Rotational Position Sensors" IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 11, NO. 3, MAY 1996.
- [3] John Chiasson, "Modelling and High-Performance Control of Electric Machines", IEEE Press Series on Power Engineering, A JOHN WILEY & SON, INC., PUBLICATION, 2005.
- [4] Paul P. Acarnley and John F. Watson, "Review of Position-Sensorless Operation of Brushless Permanent-Magnet Machines.", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 53, NO. 2, APRIL 2006.
- [5] Malakondaiah Naidu, Bimal K. Bose, "ROTOR POSITION ESTIMATION SCHEME OF A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE FOR HIGH PERFORMANCE VARIABLE SPEED DRIVE",IEEE-IAS Annual Meeting 1992.
- [6] M.R. Zolghadri, J. Guiraud, J. Davoine, D. Roze, "A DSP Based Direct Torque Controller for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives" Proceedings of the 29th IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC98, 17-22 May 1998, Fukuoka JAPAN, PP: 2055-2061 Vol. 2.

- [7] H. Kim, K.K Huh, R.D. Lorenz, T.M. Jahns, "A Novel Method for Initial Rotor Position Estimation for IPM Synchronous Machine Drives," IEEE IAS 2003 Annual Conference, Salt Lake City, Utah, Oct. 12-16, 2003, vol. 2, pp.1173-1180, IEEE Transactions On Industry Applications, pp. 1369-1378, Vol. 40, No. 5, September/October 2004.
- [8] J. Holtz, H. Pan: Acquisition of Rotor Anisotropy Signals in Sensorless Position Control Systems, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, No. 5, 2004, pp. 1377-1387.
- [9] Takahiro Yuzawa, Kohji Tanaka, Rintaro Moriyama, Ichiro Miki, "An Efficient Estimation Method of Sensorless Initial Rotor Position for Surface PM Synchronous Motor", IEMDC 2001 IEEE International Electric Machines and Drives, 2001
- [10] Babak Nahid-Mobarakeh, Farid Meibody-Tabar, and François-Michel Sargos, "Back-EMF estimation based sensorless control of PMSM: robustness with respect to measurement errors and inverter irregularities", IEEE-IAS'04, vol. 3, pp. 1858-1865, Seattle, October 2004
- [11] Jianwen Shao, Dennis Nolan, Maxime Teissier, and David Swanson, "A Novel Microcontroller-Based Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drive for Automotive Fuel Pumps", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL.39, NO.6, NOVEMBER/DECEMBER 2003.
- [12] Joachim Holtz: Initial Rotor Polarity Detection and Sensorless Control of PM Synchronous Machines, 41st IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Tampa, Florida, Oct. 8-12, 2006.
- [13] Michael J. Marcel, "Implementation of Independent Wheel Control for an Autonomous Vehicle using a Permanent Magnet Synchronous Machine "Smart Wheel", Thesis. Department of Electrical Engineering, The University of Alabama, Tuscaloosa, AL, 2004.