

## การชดเชยผลของเดดไทม์ในซิงโครนัสมอเตอร์แม่เหล็กถาวรโดยใช้ตัวประมาณค่าสัญญาณรบกวนแบบเวกเตอร์

### Dead-Time Compensation for Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives Using a Vectorial Disturbance Estimator

บุรินทร์ พูลสงวน<sup>1</sup> และสุสันต์ นุ่นงาม<sup>2</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษานิเทศศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

<sup>2</sup>อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

#### บทคัดย่อ

ผลของ เดดไทม์เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร(PMSM) ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ อย่างไรก็ตามผลของเดดไทม์นี้สามารถทำให้ลดลงได้ บทความนี้ศึกษาวิธีการชดเชยผลของเดดไทม์โดยใช้ตัวประมาณค่าสัญญาณรบกวนแบบเวกเตอร์ ในวิธีการนี้ผลของเดดไทม์จะถูกมองให้อยู่ในรูปแบบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารบกวน ตัวประมาณค่าจะคำนวณหาแรงดันนี้แล้วนำไปชดเชยโดยการเพิ่มเข้าในวงควบคุมกระแส การศึกษานี้กระทำโดยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ผลที่ได้จากการจำลองยืนยันประสิทธิภาพของวิธีการนี้และจะได้นำไปใช้งานจริงต่อไป

**คำสำคัญ:** มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร(PMSM) การประมาณแรงดันด้วยเวกเตอร์ (vectorial disturbance estimator) แรงดันไฟฟ้าป้อนกลับ (Back Electromotive Force)

#### Abstract

Dead-time effect is unavoidable in inverter-driven PMSM drive. However, the reduction of its effect is possible. This study investigated a dead-time compensation technique using a vectorial disturbance estimator. In this technique, the dead-time effect was viewed as a disturbance voltage acting at the inverter output. The estimator determines the disturbance voltages using simple vector operations. The estimated disturbance voltages were then added to the current control loop to compensate the dead-time effect. The study was carried out by computer simulation using

MATLAB/ Simulink program. The results confirmed the effectiveness of the technique for future application in the real system.

**Keywords :** dead-time compensating, permanent-magnet synchronous motor (PMSM), disturbance voltage

## 1. บทนำ

ปัจจุบันนี้จึงมีโครนสมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSM) โดยทั่วไปจะใช้เทคนิคการควบคุมแบบพัลส์วิธิตมอ ดู เล ซึ่ น (PulseWidth Modulation:PWM)ของ อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน (Voltage Source inverter :VSI) ในระบบการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบ (PMSM) ใน PWM แบบ VSI จะมีผลของเวลาเดทไทม์อยู่ภายในสัญญาณการสวิตซ์ซึ่งเพื่อหลีกเลี่ยงการลัดวงจรที่อาจจะเกิดขึ้นในการทำงานพร้อมๆกันสำหรับการเปลี่ยนสถานะของการ on และ off ของสวิตซ์ตัวบนและตัวล่างในแต่ละกิ่งของอินเวอร์เตอร์สวิตซ์กำลัง (Munoz and Lipo, 1999) แม้ว่าเวลาเดทไทม์จะมีช่วงระยะเวลาสั้นๆเมื่อเทียบกับช่วงเวลาของพัลส์วิธิตมอ ดู เล ซึ่ น เป็นสาเหตุให้ต้องนำมาวิเคราะห์สำหรับรูปคลื่นสัญญาณที่บิดเบี้ยว (Distortion) และค่าแรงดันพื้นฐานที่ตกคร่อมแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์จะทำให้มีผลกระทบกับกระแสที่ผิดเพี้ยนและแรงบิดเกิดการแกว่งของแรงดันที่ผิดเพี้ยนไปนั้นอาจจะทำให้ระบบลงประสิทธิภาพลงได้ซึ่งการประมาณค่าฟลักไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่งของโรเตอร์หรือความเร็วจะลดลงตามแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เหล่านี้เป็นปัญหาที่น่าวิเคราะห์สำหรับการควบคุมความเร็วต่างๆ และ ที่ ความถี่ของ PWM สูงๆ

ดังนั้น การศึกษาของการนำผลกระทบของเดทไทม์ มาชดเชยในระบบจะถูกศึกษาและ ทำการปรับปรุงเพื่อให้มีระบบการควบคุมมอเตอร์มีประสิทธิภาพดีขึ้นในหลายๆ สาเหตุ มีวิธีที่จะสามารถนำไปใช้ได้เช่น เทคนิคการวิเคราะห์ แรงดันแบบค่าเฉลี่ยและ เทคนิคแบบปรับความกว้างของพัลส์ (pulse basis) (Leggate and Kerkman, 1997) เพื่อที่จะได้ทำการชดเชยได้อย่างถูกต้องแต่อย่างไรก็ตามความต้องการสัญญาณที่สมบูรณ์จากอัลกอริทึมและฮาร์ดแวร์ เช่นอัลกอริทึมสำหรับการปรับปรุงกระแสซึ่งเป็นเรื่องที่ไม่ง่ายที่จะควบคุมอินเวอร์เตอร์ ที่มีคุณลักษณะแบบไม่เป็นเชิงเส้นได้เช่น ช่วงเวลาการสวิตซ์และแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์ต่างๆ ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามภาระของโหลด ดังนั้นมันยากที่จะทำการชดเชยผลของเดทไทม์ควบคุมให้ได้ถูกต้อง เทคนิคที่ได้ทำการนำเสนอมาเพื่ออินเวอร์เตอร์แบบไม่เป็นเชิงเส้นได้รับการเสนอแนะเช่นเทคนิคของการสังเกตการณ์รบกวน (disturbance observer) (Kim และคณะ, 2003) และเทคนิคการปรับแต่งพารามิเตอร์ (Cichowski and Nieznanski, 2005)

ในงานวิจัยนี้ขอเสนอ การชดเชยผลของเดทไทม์ในโครนสมอเตอร์แม่เหล็กถาวรโดยใช้ตัวประมาณค่าสัญญาณรบกวนแบบเวกเตอร์โดยการประมาณแรงดันที่รบกวน เช่น ฟลักซ์ภายในและภายนอก ที่เราต้องการชดเชยเวลาเดทไทม์การประมาณแรงดันรบกวนโดยการ

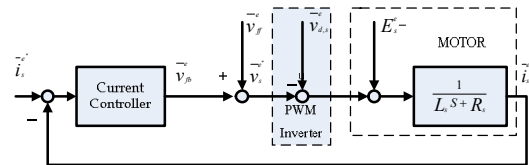
ป้อนกลับไปข้างหน้า (Feed Forward) แล้วนำไปบวกเข้าไปในรูปการควบคุมกระแส ในงานวิจัยนี้ไม่ต้องการเพิ่มวงจรไฟฟ้าสำหรับป้องกันการกลับขั้วของกระแส ดังนั้นจึงไม่ต้องการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ ซึ่งในหลายๆวิธีการทดลองและการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์เพื่อได้ค่าที่ถูกต้องในการชดเชยวิธีนี้ได้นำมาประยุกต์ใช้ในห้วงปฏิบัติการโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบแม่เหล็กถาวร เพื่อพิสูจน์ถึงประสิทธิภาพและบรรลุมิติประสงค์ของการใช้เทคนิคการชดเชยของเดดไทม์อีกแบบหนึ่ง

## 2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของเวลาเดดไทม์ที่มีผลกระทบต่อระบบการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบซิงโครนัสมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร
2. เพื่อศึกษาและจำลองการทำงานของเทคนิคการชดเชยเดดไทม์ด้วยตัวประมาณสัญญาณรบกวนด้วยเวกเตอร์ด้วยแบบจำลองโปรแกรม MATLAB/Simulink
3. เพื่อสร้างและทดสอบการทำงานของระบบจริงเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองในระบบควบคุมความเร็ว MATLAB/Simulink เพื่อแก้ไขและปรับปรุงชดเชยค่าเดดไทม์ในอนาคต

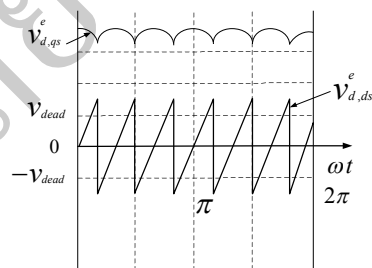
## 3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ PMSM

การมี dead time ในระบบจะทำให้ระบบไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อแก้ไขความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์สวิตช์โดยการแก้ไขปัญหาดชดเชย dead time ด้วยวิธีชดเชยเวกเตอร์อีกวิธีหนึ่งเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Munoz and Lipo, 1999) , (Kim และคณะ, 2003)



รูปภาพที่ 1 การชดเชยวงควบคุมกระแสด้วยแรงดันรบกวน

ดังรูปภาพที่ 1 เป็นการชดเชยการควบคุมในรูปกระแส ด้วยแรงดันรบกวน เป็นแบบจำลองทางพลวัตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบ (PMSM) รวมทั้งแรงดันรบกวนใน synchronous reference frame



รูปภาพที่ 2 แรงดันรบกวนในแกนอ้างอิงคงที่ในระหว่างเกิดผลกระทบ dead-time

เมื่อมอเตอร์หมุนภายใต้ Field Oriented Control (FOC) และกระแสในแกน d ของซิงโครนัส id จะเป็นบวก สามารถแสดงในรูป เวกเตอร์ของแรงดันรบกวนอาจจะแบ่งเดดไทม์ได้เป็น 6 Sector ด้วยขนาดเท่ากับ  $4V_{dead}/3$  ซึ่งเป็นไปตามตำแหน่งของโรเตอร์ทางไฟฟ้า (Kim และคณะ, 2003)

$$v_{dead} = \frac{T_d + T_{on} - T_{off}}{T_{PWM}} (v_{dc} - v_{sat} + v_f) + \frac{v_{sat} + v_f}{2} \quad (1)$$

เมื่อ  $V_{dead}$  เป็นแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์กำลังดังต่อไปนี้ เมื่อ  $T_d, T_{on}, T_{off}$  และ  $T_{pwm}$  แสดงถึงเวลาเกตไทม์ ช่วงเวลาการปิด-เปิดสวิตช์และคาบเวลาของพัลส์วิธมอดูเลชั่น (PWM)  $v_{sat}$  เป็นแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ขณะสถานะปิดวงจรและ  $v_f$  เป็นแรงดันป้อนกับที่ตกคร่อมที่ไดโอด  $v_{dead}$  เป็นแรงดันดีชีบัส ในทางปฏิบัติพารามิเตอร์เหล่านี้ปกติจะไม่สามารถวัดค่าได้ แต่เราสามารถทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดัน ตามภาระ โหลดที่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นแรงดัน  $v_{dead}$  จะเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของโหลดและยากที่จะประมาณการได้อย่างแม่นยำ

โดยทั่วไปการควบคุมลูปกระแสด้วยแรงดันรบกวนในรูปภาพที่ 2 โครงสร้างทางกลของ PMSM รวมทั้งแรงดันที่รบกวน ในแกนอ้างอิงแบบซิงโครนัสสามารถแสดงดังนี้

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^e \\ v_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & -\omega_r L_s \\ \omega_r L_s & R_s + L_s p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ p\theta_r \lambda_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{d,ds}^e \\ v_{d,qd}^e \end{bmatrix} \quad (2)$$

เมื่อ  $P$  คือ ค่าดิฟเฟอเรนเชียลของกระแส  $i_{ds}^e$  และ  $i_{qs}^e$  เป็นกระแสในสเตเตอร์  $v_{sd}^e$  และ  $v_{sq}^e$  เป็นแรงดันบนแกนอ้างอิงแบบคงที่หรือ Reference Stator voltage และ  $R_s, L_s, \theta_r$  และ  $\lambda_m$  แสดงถึงค่าความต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำในสเตเตอร์, ตำแหน่งของโรเตอร์ทางไฟฟ้า และ ฟลักซ์แม่เหล็กที่เหนี่ยวนำเนื่องมาจากการหมุนของโรเตอร์  $v_{d,ds}^e$  และ  $v_{d,qd}^e$  เป็นแรงดันที่รบกวนในระบบ

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^{s*} \\ v_{qs}^{s*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & 0 \\ 0 & R_s + L_s p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \end{bmatrix} + p\theta_r \lambda_m \begin{bmatrix} e_{ds}^s \\ e_{qs}^s \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} v_{d,ds}^e e_{qs}^s + v_{d,qd}^e e_{ds}^s \\ -v_{d,ds}^e e_{ds}^s + v_{d,qd}^e e_{qs}^s \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} e_{ds}^s & e_{qs}^s \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} -\sin\theta_r & \cos\theta_r \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

เมื่อกำหนดการป้อนกลับของแรงดัน ด้วยมุมของโรเตอร์  $\theta_r$  ซึ่งสมมุติเป็นสัญญาณไซน์ที่ปราศจากแรงดันรบกวน ดังนั้น การหมุนของโรเตอร์จะน้อยกว่าจะการหมุนของทางไฟฟ้าถ้าอัตราการสุ่มมากพอจะแสดงดังสมการดิฟเฟอเรนเชียลสามารถเขียนการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์ที่เกี่ยวข้องในโรเตอร์ ( $\Delta\lambda_{ds}, \Delta\lambda_{qs}$ ) ที่ ประมาณจากฟังก์ชันสเตเตอร์ จักรูปใหม่ได้

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{ds} \\ \Delta\lambda_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (v_{ds}^{s*} - R_s i_{ds}^s) T_s - L_s \Delta i_{ds}^s \\ (v_{qs}^{s*} - R_s i_{qs}^s) T_s - L_s \Delta i_{qs}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\Delta\theta_r \lambda_m + T_s v_{d,qd}^e) e_{ds}^s + T_s v_{d,ds}^e e_{qs}^s \\ (\Delta\theta_r \lambda_m + T_s v_{d,ds}^e) e_{qs}^s - T_s v_{d,qd}^e e_{ds}^s \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$T \hat{v}_{s,d,ds}^e (e_{ds}^{e^2} + e_{qs}^{e^2}) = \Delta\lambda_{ds} e_{qs}^s - \Delta\lambda_{qs} e_{ds}^s \quad (6)$$

$$\text{แรงดัน } \hat{v}_{d,ds}^e = \Delta\bar{\lambda}_s \times e_s^s / T_s \quad (7)$$

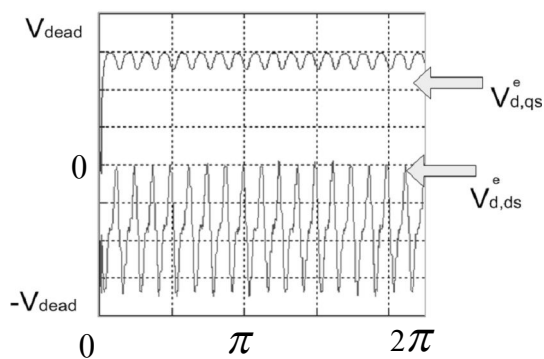
$$(\Delta\theta_r \lambda_m + T_s \hat{v}_{s,d,qd}^e) (e_{ds}^{e^2} + e_{qs}^{e^2}) = \Delta\lambda_{ds} e_{ds}^s + \Delta\lambda_{qs} e_{qs}^s \quad (8)$$

$$\text{แรงดัน } \hat{v}_{d,qd}^e = (\Delta\bar{\lambda}_s \bullet e_s^s - \Delta\theta_r \lambda_m) / T_s \quad (9)$$

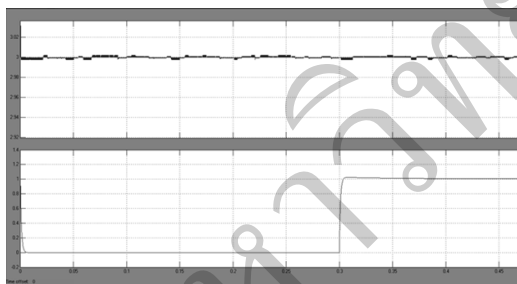
นำแรงดัน  $\hat{v}_{d,ds}^e$  และ  $\hat{v}_{d,qd}^e$  นำสมการไปเขียนใน Matlab/Simulink



เหมาะสมแล้วจะได้ แรงดันบนแกนอ้างอิง d และ q ที่การกระเพื่อมของแรงที่น้อยกว่าจึงทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น



รูปภาพที่ 6 แรงดันบนแกนอ้างอิงที่ลักษณะของสัญญาณรบกวน ของแรงดัน  $\hat{v}_{d,ds}^*$  และ  $\hat{v}_{d,qs}^*$  ในแต่ละช่วงเวลา



รูปภาพที่ 7 ผลตอบสนองของกระแสไหลดบนแกนอ้างอิง dq

รูปภาพที่ 7 แสดงการเพิ่มภาระโหลดทางไฟฟ้าให้กับระบบซึ่งเมื่อเกิดมีภาระทางไฟฟ้าขึ้นแล้วยังไม่เกิดการกระเพื่อมของแรงดันบนแกนอ้างอิง d และ q

## 5. บทสรุป

การชดเชยผลกระทบที่เกิดจากเดดไทม์ในอินเวอร์เตอร์โดยใช้วิธีการประมาณค่าการรบกวนด้วยเวกเตอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรเป็นพื้นฐานที่ต้องรู้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์และง่ายที่จะวัดค่าความเปลี่ยนแปลงต่างๆ โดยทั่วไปแล้วจะใช้วิธีปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ แต่ในงานวิจัยนี้ไม่จำเป็นต้องมีตัวตรวจจับข้อผิดพลาดของกระแสสามารถชดเชยที่ผลของเดดไทม์ และจะทำให้อินเวอร์เตอร์แบบไม่เป็นเชิงเส้นมีประสิทธิภาพดี

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณท่านอาจารย์และนักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

## 7. เอกสารอ้างอิง

- A. C. Oliveira, C. B. Jacobina, and A. M. N. Lima, (2007). Improved dead-time compensation for sinusoidal PWM inverters operating at high switching frequencies. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 4, pp. 2296–2304, Aug. 2007.
- A. Cichowski and J. Nieznanski, (2005). Self-tuning dead-time compensation method for voltage-source inverters, *IEEE Power Electron. Lett.*, vol. 3, no. 2, pp. 72–75, Jun. 2005.
- A.R.Munoz and T.A. Lipo, (1999). On-line dead-time

- compensation technique for open-loop PWM-VSI drives. *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 14, no. 4, pp. 683–689, Jul. 1999.
- C. H. Choi, K. R. Cho, and J. K. Seok, (2007). Inverter nonlinearity compensation in the presence of current measurement errors and switching device parameter uncertainties. *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 2, pp. 576–583, Mar. 2007.
- D. Leggate and R. J. Kerkman, (1997). Pulse-based dead-time Compensator for PWM voltage inverters. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 44, no. 2, pp. 191–197, Apr. 1997.
- H. S. Kim, H. T. Moon, and M. J. Youn, (2003). On-line dead-time compensation method using disturbance observer. *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 6, pp. 1336–1345, Nov. 2003.
- L. Ben-Brahim, (2004). On the compensation of dead time and zero-current crossing for a PWM-inverter-controlled AC servo drive. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 5, pp. 1113–1118, Oct. 2004.
- S. Chen, C. Namuduri, and S. Mir, (2002). Controller-induced parasitic torque ripples in a PM synchronous motor. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 5, pp. 1273–1281, Sep./Oct. 2002.
- S. Y. Kim and S. Y. Park, (2007). Compensation of dead-time effects based on adaptive harmonic filtering in the vector-controlled AC motor drives. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 3, pp. 1768–1777, Jun. 2007.
- L. Chen and F. Z. Peng, (2008). Dead-time elimination for voltage source inverter. *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 2, pp. 574–580, Mar. 2008.
- K. M. Cho, W. S. Oh, Y. T. Kim, and H. J. Kim. (2007). A New switching strategy for pulse width modulation (PWM) power converters. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 1, pp. 330–337, Feb. 2007.
- R. J. Kerkman, D. Leggate, D. W. Schlegel, and C. Winterhalter, (2003). Effects of parasitics on the control of voltage source inverters. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 18, no. 1, pp. 140–150, Feb. 2003.
- Y. K. Lin and Y. S. Lai, (2010). Dead-time Elimination of PWM-controlled inverter/converter polarity detection circuit. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 6, pp. 2121–2127, Jun. 2010.