

การชดเชยผลกระทบที่เกิดจากเดดไทม์ในอินเวอร์เตอร์ ของระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้า

กระแสดับแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

**Dead-Time's Effect Compensation for Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) Speed Control Systems**

กิตติพงษ์ สอนดี (Kittipong Sondee)\* ดร.สุขสันต์ นุ่นงาม (Dr. Suksun Nungam)\*\*

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาค่าเดดไทม์ที่มีอยู่ในอินเวอร์เตอร์ของระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดับแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรด้วยวิธีการชดเชย ซึ่งการมีเดดไทม์อยู่ในระบบดังกล่าวนี้จะส่งผลให้กระแสของอินเวอร์เตอร์มีลักษณะไม่เป็นไซน์ทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์ขึ้นในระบบ และส่งผลให้เสถียรภาพของระบบควบคุมต่ำลง ในการวิจัยนี้จะใช้การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยใช้การตรวจจับแรงดันผิดเพี้ยนที่สัญญาณขาออกของตัวควบคุมแบบอินทิเกรตที่ถูปรับควบคุมกระแสมาใช้ในการสร้างแรงดันผิดเพี้ยนเพื่อป้อนกลับเป็นสัญญาณชดเชยของระบบควบคุม ซึ่งจากการจำลองการทำงานพบว่ากระแสมีลักษณะความผิดเพี้ยนน้อยลงหรือมีลักษณะใกล้เคียงสัญญาณไซน์มากขึ้น และสามารถลดการเกิดฮาร์มอนิกส์ในระบบควบคุมความเร็วได้ รวมถึงทำให้เสถียรภาพการทำงานของระบบดีขึ้น

**ABSTRACT**

Technique of compensating method is proposed for solving problems of the dead-time in an inverter of speed control system in permanent magnet synchronous motor (PMSM). Existence of dead-time in speed control system can cause distortion of inverter's current which leads to harmonics occurring. In additions, it can affect the stability of the speed control system. MATLAB/Simulink program is adopted to simulate dead-time's effect compensation for permanent magnet synchronous motor (PMSM) speed control systems. In this paper, the voltage distortion of the integrator output of the synchronous  $d$ -axis proportional-integral (PI) current regulator is used to compensate the output voltage distortion due to the dead time effect. The simulation results show that current and harmonics distortions are reduced. In additions, the stability of the system is increased.

**คำสำคัญ:** การชดเชยผลกระทบที่เกิดจากเดดไทม์ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดับแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

**Key Words:** Dead-Time Compensation PMSM

---

\* นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

\*\* รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

## บทนำ

ในปัจจุบันระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (Ac machine drive) ที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSM) ได้มีการพัฒนาและถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม ในการทำงานของระบบควบคุมความเร็วจำเป็นต้องมีส่วนประกอบของอินเวอร์เตอร์เพื่อใช้ในการจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้เทคนิค Pulse width modulation ในการปรับความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ แม้ว่าอินเวอร์เตอร์จะสามารถจ่ายแรงดันและกระแสให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าดังกล่าวได้ แต่ในความเป็นจริงแล้วแรงดันและกระแสที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ยังมีความผิดเพี้ยนอยู่ [2],[3] อันเนื่องมาจากคุณลักษณะความไม่เชิงเส้นของอุปกรณ์สวิตซ์ เช่น ช่วงเวลา ON/OFF, แรงดันตกคร่อมสวิตซ์ขณะนำกระแส, ผลของเดดไทม์ในอินเวอร์เตอร์ และเมื่อพิจารณาแล้วพบว่าส่วนที่มีผลมากที่สุดต่อความผิดเพี้ยนของแรงดันและกระแสคือผลที่เกิดจากเดดไทม์ในอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เพื่อป้องกันการลัดวงจรที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานพร้อมกันของสวิตซ์ตัวบนและตัวล่างในแต่ละกิ่งของอินเวอร์เตอร์ขณะกำลังเปลี่ยนสถานะ แรงดันและกระแสผิดเพี้ยนดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดฮาร์มอนิกสั้ขึ้นในระบบควบคุมความเร็ว ซึ่งเป็นผลทำให้เสถียรภาพของการควบคุมความเร็วและการควบคุมแรงบิดลดลง

การแก้ไขปัญหาคคุณลักษณะความไม่เชิงเส้นของอุปกรณ์สวิตซ์ได้มีการแก้ไขมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้เทคนิค การวิเคราะห์แรงดันที่ผิดเพี้ยนแบบค่าเฉลี่ย (Average value theory) [7], [9] โดยเทคนิคนี้จะป้อนแรงดันที่ผิดเพี้ยนในแต่ละคาบเวลาเข้าไปในระบบเพื่อชดเชยปัญหาที่เกิดขึ้น เทคนิคการปรับความกว้างของพัลส์ในแต่ละคาบเวลา เพื่อให้สัญญาณพัลส์ที่ได้ใกล้เคียงกับอุดมคติมากที่สุด (A pulse-base compensation method) [6] โดยเทคนิคนี้

จำเป็นที่จะต้องตรวจจับทิศทางกระแสของอินเวอร์เตอร์ เทคนิคการชดเชยแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed forward method) [10],[5] โดยสัญญาณที่ใช้ในการชดเชยจะถูกป้อนเข้าไปเพื่อลดความผิดเพี้ยนของแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้น สัญญาณที่ใช้ในการชดเชยดังกล่าวจะถูกคำนวณจากค่าเวลาเดดไทม์ คาบเวลาความถี่สวิตซ์ทิศทางกระแสของอินเวอร์เตอร์ แรงดันที่ดีซีบัส ซึ่งในบางครั้งจะถูกเฉลยผลของแรงดันตกคร่อมสวิตซ์ เทคนิคการปรับความถี่สวิตซ์ให้สอดคล้องกับการทำงานของโหลด[1],[8] เทคนิคการชดเชยแบบออนไลน์(Online methods) [4], [12] ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีการคำนวณที่ซับซ้อนรวมทั้งต้องมีการปรับค่าของตัวแปรต่างๆให้สอดคล้องกับโหลดขณะทำงาน

แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคต่างๆที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ยังไม่สามารถชดเชยผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากเดดไทม์ในอินเวอร์เตอร์ได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากในความเป็นจริงขณะทำงานยังมีค่าของตัวแปรต่างๆที่เปลี่ยนไปมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับการทำงานของโหลดเช่น ความถี่สวิตซ์แรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตซ์ แรงดันดีซีบัส เฟสของกระแส ความเร็วของมอเตอร์ เป็นต้น ซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้ล้วนแล้วแต่ส่งผลให้เทคนิคการชดเชยดังกล่าวไม่สามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ รวมทั้งเทคนิคส่วนใหญ่ที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นจำเป็นต้องตรวจจับทิศทางของกระแสมาเพื่อใช้สร้างสัญญาณชดเชยดังนั้นอาจเกิดความผิดพลาดของการตรวจจับกระแสขณะตัดศูนย์ (Clamped to zero) [11] ซึ่งส่งผลให้การชดเชยไม่สามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์

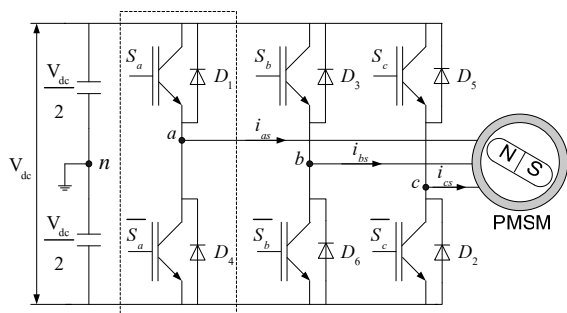
ในงานวิจัยนี้จึงขอเสนอการชดเชยผลที่เกิดจากเดดไทม์ในอินเวอร์เตอร์ อีกวิธีหนึ่งโดยใช้การตรวจจับแรงดันผิดเพี้ยนที่สัญญาณขาออกของตัวควบคุมแบบอินทิเกรตที่ถูควบคุมกระแสมาใช้ในการสร้างแรงดันผิดเพี้ยน เพื่อป้อนเข้าไปชดเชยผลที่เกิดจากเดดไทม์ในอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากโดยทั่วไประบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ PMSM จะนิยมกำหนดให้กระแสอ้างอิงที่  $d$ -axis ของรูปกระแสมีค่าเท่ากับศูนย์

ดังนั้นสัญญาณขาออกของตัวควบคุมแบบอินทิเกรตที่ถูควบคุมกระแสจะมีค่าคงที่ แต่เนื่องจากการมีอยู่ของเดดไทม์ในอินเวอร์เตอร์จึงทำให้แรงดันดังกล่าวมีการกระเพื่อม ดังนั้นเราสามารถลดผลที่เกิดจากการใส่เดดไทม์ในอินเวอร์เตอร์ได้ด้วยการกำจัดแรงดันกระเพื่อมดังกล่าวให้กลับมามีค่าคงที่ โดยจะไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของโหลดและการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรต่างๆ ในขณะทำงานซึ่งเทคนิคนี้จะให้ผลของการชดเชยที่ดีกว่าและมีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ซับซ้อน รวมทั้งยังสามารถทำงานที่สภาวะทรานเซียนท์ได้ดีและไม่เกิดปัญหาความผิดพลาดของการตรวจจับกระแสขณะตัดศูนย์ และยังไม่ต้องต่ออุปกรณ์ภายนอกใดๆเพิ่มเติม จึงเป็นแนวทางที่ดีหากนำวิธีการชดเชยดังกล่าวไปใส่ไว้ในระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ PMSM เพื่อทำให้ระบบมีเสถียรภาพในการทำงานที่ดีขึ้น

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

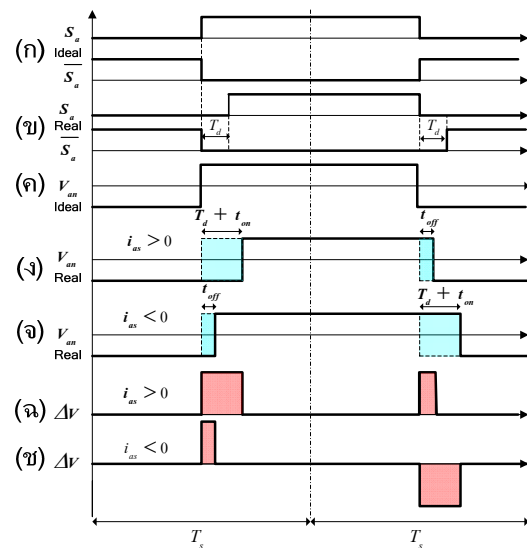
#### 1. ผลกระทบของเดดไทม์ในอินเวอร์เตอร์

ลักษณะโดยทั่วไปของอินเวอร์เตอร์สามเฟสในสภาวะกำลังสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 1 ไอจีบีทีทั้งหกตัวจะถูกขับด้วยสัญญาณพัลส์วรัมนอดูละชันที่ถูกรวมเข้ากับเวลาเดดไทม์เพื่อป้องกันความเสียหายในขณะเปลี่ยนสถานะของไอจีบีทีด้านบนและด้านล่าง โดยช่วงเวลาเดดไทม์จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับคาบเวลาของสวิตช์ โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 2-5  $\mu\text{s}$



ภาพที่ 1 แสดงวงจรภาคกำลังอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ต่อกับโหลดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ PMSM

ในภาพที่ 2 แสดงให้เห็นถึงรูปแบบสัญญาณสวิตช์ของเฟสเอ โดยในรูปที่ 2(ก) เป็นสัญญาณขับที่ขาเกตของไอจีบีที  $S_a$  และ  $\bar{S}_a$  โดยไม่รวมช่วงเวลาเดดไทม์ ส่วนในภาพที่ 2(ข) เป็นสัญญาณขับที่ขาเกตของไอจีบีที  $S_a$  และ  $\bar{S}_a$  โดยรวมช่วงเวลาเดดไทม์ซึ่งจะพบว่าสัญญาณ  $S_a$  และ  $\bar{S}_a$  ต่างถูกหน่วงด้วยช่วงเวลาเดดไทม์  $T_d$  ซึ่งจะไม่เหมือนกับสัญญาณในอุดมคติ ภาพที่ 2(ค) จะแสดงแรงดัน  $V_{an}$  ที่วัดเทียบระหว่างจุด a และจุด n โดยไม่รวมเวลาเดดไทม์ และในภาพที่ 2(ง) และ 2(จ) แสดงแรงดัน  $V_{an}$  ที่รวมช่วงเวลาเดดไทม์และช่วงเวลา ON/OFF ของอุปกรณ์สวิตช์ตามทิศทางการไหลของกระแสไหลอด จากภาพที่ 2(ง) และ 2(จ) สามารถพิจารณาคาบเวลาที่ผิดเพี้ยนได้ดังสมการที่ 1 และ 2 ตามทิศทางการไหลของกระแสไหลอด และสามารถเขียนแรงดันความผิดเพี้ยนได้ดังภาพที่ 2(ฉ) และ 2(ช) แรงดันความผิดเพี้ยนสามารถหาค่าได้โดยใช้สมการที่ 3 และสมการที่ 4



ภาพที่ 2 แสดงรูปแบบสัญญาณการสวิตช์ ก) สัญญาณ PWM อุดมคติ ข) สัญญาณ PWM ที่รวมเวลาเดดไทม์ ค) แรงดัน  $V_{an}$  อุดมคติ ง) จ) แรงดัน  $V_{an}$  ที่รวมช่วงเวลาเดดไทม์ ฉ) ช) แรงดันผิดเพี้ยนตามทิศทางของกระแสไหลอดที่เฟสเอ

$$T_{err} = -T_d - t_{on} + t_{off}, \quad i_{as} > 0 \quad (1)$$

$$T_{err} = T_d + t_{on} - t_{off}, \quad i_{as} < 0 \quad (2)$$

$$\Delta V = \frac{-T_d - t_{on} + t_{off}}{2T_s} V_{dc}, \quad i_{as} > 0 \quad (3)$$

$$\Delta V = \frac{T_d + t_{on} - t_{off}}{2T_s} V_{dc}, \quad i_{as} < 0 \quad (4)$$

จากสมการที่ 3 และ 4 เป็นสมการแสดงแรงดันผิดเพี้ยนของเฟสเอเพียงเฟสเดียว ซึ่งถ้าหากพิจารณาในระบบสามเฟสเราสามารถพิจารณาแรงดันที่ผิดเพี้ยนในแต่ละเฟสที่มีความสอดคล้องกับทิศทางของกระแสของไหลคได้ดังสมการที่ 5 [2]

$$V'_{as} = V' \{ 2\text{sign}(i_{as}) - \text{sign}(i_{bs}) - \text{sign}(i_{cs}) \}$$

$$V'_{bs} = V' \{ 2\text{sign}(i_{bs}) - \text{sign}(i_{cs}) - \text{sign}(i_{as}) \}$$

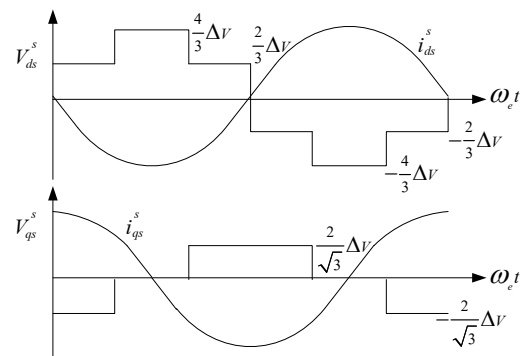
$$V'_{cs} = V' \{ 2\text{sign}(i_{cs}) - \text{sign}(i_{as}) - \text{sign}(i_{bs}) \}$$

$$V' \approx \frac{1}{3} \left\{ \frac{V_{dc}}{2} \frac{M}{T_s} \right\}$$

$$M = t_{off} - t_{on} - T_d$$

$$\text{sign}(i_{as}) = \begin{cases} 1, & i_{as} > 0 \\ 0, & i_{as} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

ในสมการที่ 5 แรงดัน  $V'_{as}, V'_{bs}, V'_{cs}$  เป็นแรงดันผิดเพี้ยนค่าเฉลี่ยในแต่ละเฟส แรงดันดังกล่าวหากทำการแปลงแกนให้อยู่บนแกนอ้างอิงคงที่(stationary reference frame) จะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3 ซึ่งพบว่าแรงดันผิดเพี้ยนจะกลับเฟสสัญญาณอยู่ 180 องศาทางไฟฟ้ากับสัญญาณของกระแสและสามารถใช้อนุกรมฟูเรียร์ในการวิเคราะห์หาอันดับของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งอันดับฮาร์มอนิกส์ดังกล่าวถูกแสดงในสมการที่ 6 และ 7 จากสมการดังกล่าวจะพบว่าการมีอยู่ของเดดไทม์ทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 1,5,7,11,13... ขึ้นในระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์



ภาพที่ 3 แสดงแรงดันผิดเพี้ยนเทียบกับกระแสบนแกนอ้างอิงคงที่  $\alpha\beta$ -axis

ไฟฟ้ากระแสสลับ PMSM โดยฮาร์มอนิกส์ดังกล่าวจะส่งผลต่อเสถียรภาพของการควบคุมความเร็วและการควบคุมแรงบิด รวมทั้งทำให้กระแสของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ PMSM เกิดความผิดเพี้ยน

$$v_{\alpha\_err}^s = \frac{4}{\pi} \Delta V \left\{ \sin \omega_e t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_e t + \frac{1}{7} \sin 7\omega_e t + \frac{1}{11} \sin 11\omega_e t + \frac{1}{13} \sin 13\omega_e t + \dots \right\} \quad (6)$$

$$v_{\beta\_err}^s = \frac{4}{\pi} \Delta V \left\{ -\cos \omega_e t + \frac{1}{5} \cos 5\omega_e t - \frac{1}{7} \cos 7\omega_e t + \frac{1}{11} \cos 11\omega_e t - \frac{1}{13} \cos 13\omega_e t + \dots \right\} \quad (7)$$

จากสมการที่ 6 และ 7 สามารถพิจารณาให้อยู่ในรูปของกระแสในสถานะไหลคสมมูลที่อยู่บนแกนอ้างอิงคงที่ได้ดังสมการที่ 8 และ 9

$$i_{\alpha\_err}^s = \frac{4}{\pi Z_L} \Delta V \left\{ \sin(\omega_e t - \phi) + \frac{1}{5} \sin 5(\omega_e t - \phi) + \frac{1}{7} \sin 7(\omega_e t - \phi) \right\} + \frac{4}{\pi Z_L} \Delta V \left\{ \frac{1}{11} \sin 11(\omega_e t - \phi) + \frac{1}{13} \sin 13(\omega_e t - \phi) + \dots \right\} \quad (8)$$



เคลื่อนที่  $v_{d\_com}^*$  และ  $v_{q\_com}^*$  เป็นสัญญาณที่ใช้ในการ  
ชดเชยของระบบ สัญญาณ  $v_{d\_integ}^r$  คือสัญญาณที่ใช้ใน  
การตรวจจับแรงดันผิดเพี้ยนของระบบที่ได้จากตัว  
ควบคุมแบบอินทิเกรตซึ่งสามารถพิจารณาและหาค่าได้  
ดังสมการที่ 14

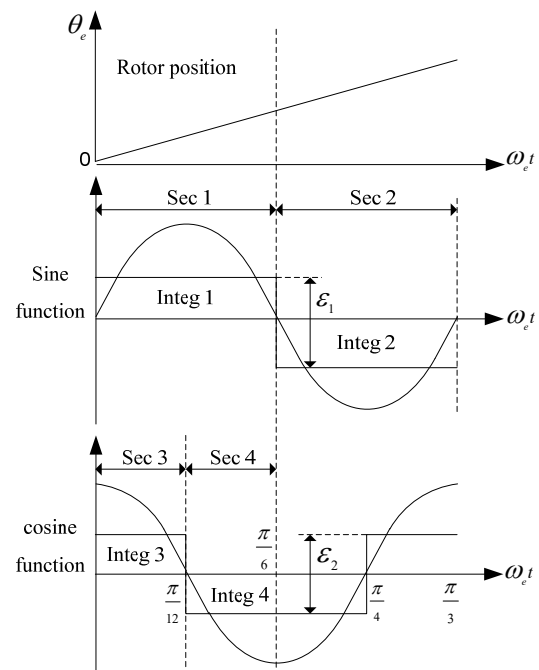
$$\begin{aligned} v_{d\_integ}^r &= k_i \int_0^t (i_{d\_ref}^r - i_d^r) dt \\ &= k_i \int_0^t i_{d\_err}^r dt \end{aligned} \quad (14)$$

แทนสมการที่ 12 ลงในสมการที่ 14 โดยพิจารณาฮาร์มอนิก  
อันดับที่ 6 จะได้สมการที่ 15 ซึ่งจะพบว่าสมการ  
ประกอบไปด้วยฟังก์ชันของไซน์และโคไซน์ โดยมุม  
ของฟังก์ชันทั้งสองจะสอดคล้องกับมุมโรเตอร์ของ  
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ PMSM และมีความถี่เป็นหก  
เท่าของความถี่ทางไฟฟ้าของระบบควบคุม ซึ่งทำให้ง่าย  
ต่อการนำสัญญาณดังกล่าวไปทำการควบคุมเพื่อสร้าง  
สัญญาณผิดเพี้ยนและชดเชยให้กับระบบ

$$\begin{aligned} v_{d\_integ}^r &= k_i \int_0^t i_{d\_err}^r dt \\ &= -k_i \frac{4\Delta V}{\pi} \int_0^t \left\{ \frac{12}{35Z_6} \sin(6\omega_e t - \phi_6) \right\} dt \\ &= k_i \frac{4\Delta V}{\pi Z_6} \frac{2}{35\omega_e} \left\{ \cos 6\omega_e t (\cos \phi_6) \right. \\ &\quad \left. + \sin 6\omega_e t (\sin \phi_6) \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

สมการที่ 15 สามารถจัดรูปได้ใหม่ดังสมการที่ 16

$$\begin{aligned} v_{d\_integ}^r &= K_1 \cos 6\omega_e t + K_2 \sin 6\omega_e t \\ K_1 &= K_i \frac{4\Delta V}{\pi Z_6} \frac{2}{35\omega_e} \cos \phi_6 \\ K_2 &= K_i \frac{4\Delta V}{\pi Z_6} \frac{2}{35\omega_e} \sin \phi_6 \end{aligned} \quad (16)$$



ภาพที่ 6 แสดงฮาร์มอนิกอันดับที่ 6 ซึ่งสอดคล้องกับ  
สมการที่ 16 และช่วงของการอินทิเกรตที่สอดคล้องกับมุมของโรเตอร์

### 3. เทคนิคที่ใช้ในการชดเชยเดดไทม์

จากสมการที่ 16 เป็นแรงดันของฮาร์มอนิกอันดับ  
ที่ 6 ซึ่งเป็นแรงดันผิดเพี้ยนที่ตรวจจับได้จากตัวควบคุม  
แบบอินทิเกรต และสามารถจัดแรงดันผิดเพี้ยน  
ดังกล่าวได้ด้วยการแบ่งช่วงการอินทิเกรตออกเป็น  
ทั้งหมดสี่ช่วงดังแสดงในภาพที่ 6

$$Integ1 = \int_0^{\frac{\pi}{6}} (v_{d\_integ}^r) d\theta_e = \int_0^{\frac{\pi}{6}} K_2 \sin 6\theta_e d\theta_e = \frac{K_2}{3} \quad (17)$$

$$Integ2 = \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{3}} (v_{d\_integ}^r) d\theta_e = \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{3}} K_2 \sin 6\theta_e d\theta_e = -\frac{K_2}{3} \quad (18)$$

$$\mathcal{E}_1 = Integ1 - Integ2 = 2 \frac{K_2}{3} \quad (19)$$

จากสมการที่ 17 และ 18 เป็นการแบ่งช่วงอินทิเกรต  $0 - \frac{\pi}{6}$  และ  $\frac{\pi}{6} - \frac{\pi}{3}$  การแบ่งช่วงแบบนี้สามารถจัดเทอมของโคไซน์ในสมการที่ 16 โดยผลของการอินทิเกรตสามารถเขียนรวมเป็นค่าคงที่ได้ในสมการที่ 19

$$\text{Integ3} = \int_0^{\frac{\pi}{6}} (v_{d\_integ}^r) d\theta_e = \int_0^{\frac{\pi}{6}} K_1 \cos 6\theta_e d\theta_e = \frac{K_1}{6} \quad (20)$$

$$\text{Integ4} = \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{3}} (v_{d\_integ}^r) d\theta_e = \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{3}} K_1 \cos 6\theta_e d\theta_e = -\frac{K_1}{6} \quad (21)$$

$$\mathcal{E}_2 = \text{Integ3} - \text{Integ4} = \frac{K_1}{3} \quad (22)$$

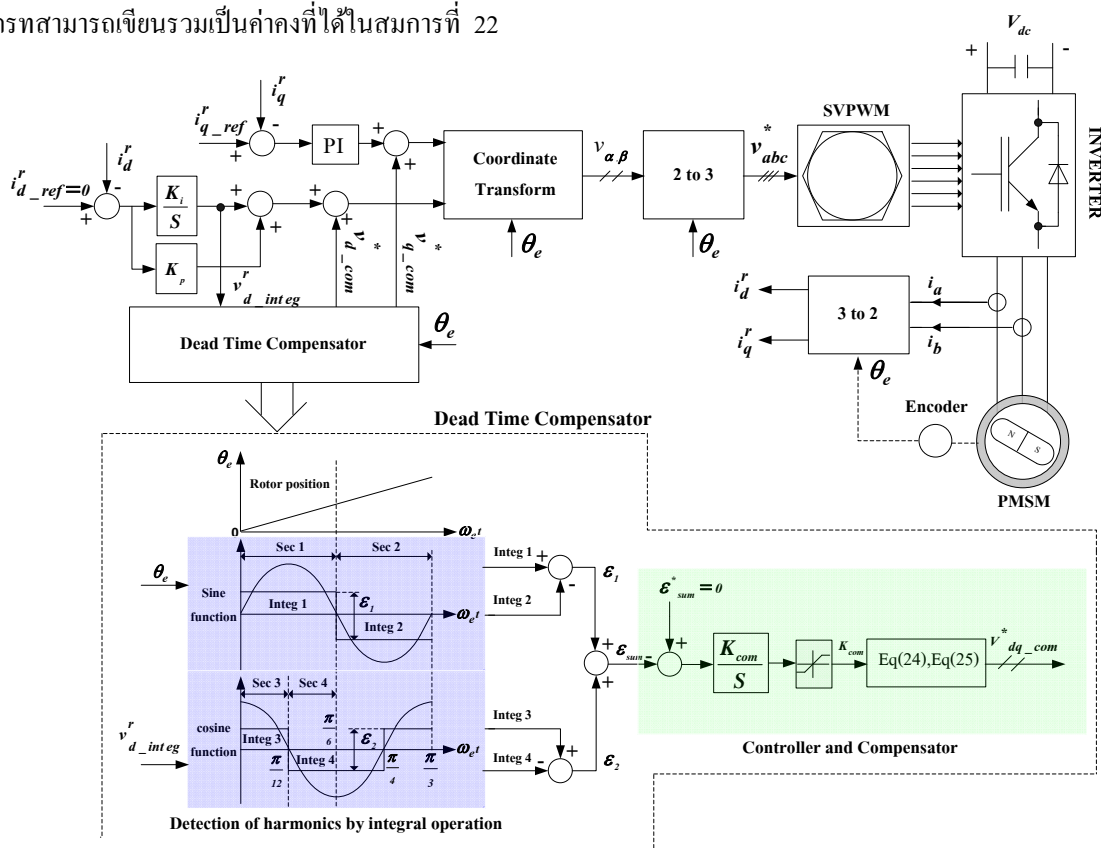
จากสมการที่ 20 และ 21 เป็นการแบ่งช่วงอินทิเกรต  $0 - \frac{\pi}{12}$  และ  $\frac{\pi}{12} - \frac{\pi}{6}$  การแบ่งช่วงแบบนี้สามารถจัดเทอมของไซน์ในสมการที่ 16 โดยผลของการอินทิเกรตสามารถเขียนรวมเป็นค่าคงที่ได้ในสมการที่ 22

เมื่อรวมค่าคงที่ที่ได้จากการอินทิเกรตทั้งสองช่วงจะได้สมการที่ 23 และสามารถจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ 6 และ 12 ให้หมดไปได้ด้วยการทำให้สมการที่ 23 มีค่าเท่ากับศูนย์โดยใช้ตัวควบคุมอินทิเกรตป้อนผ่านสมการที่ 24 และสมการที่ 25 เพื่อใช้เป็นสัญญาณชดเชยของระบบต่อไป บล็อกไดอะแกรมที่ใช้ในการควบคุมถูกแสดงในภาพที่ 7

$$\mathcal{E}_{sum} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 = \frac{2K_2}{3} + \frac{K_1}{3} \quad (23)$$

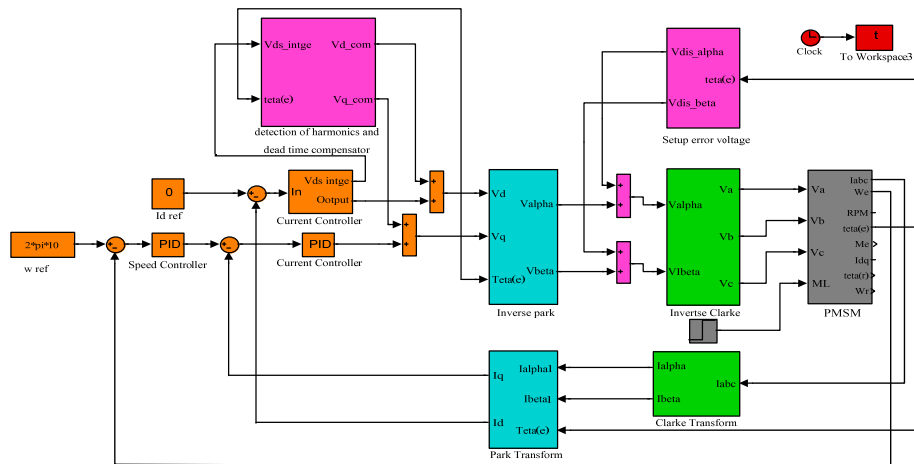
$$v_{d\_com}^* = K_{com} \left\{ -\frac{12}{35} \sin 6\omega_e t - \frac{24}{143} \sin 12\omega_e t \right\} \quad (24)$$

$$v_{q\_com}^* = K_{com} \left\{ -\frac{2}{35} \cos 6\omega_e t - \frac{2}{143} \cos 12\omega_e t \right\} \quad (25)$$



ภาพที่ 7 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมและการชดเชยเดดไทม์ในอินเวอร์เตอร์ของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

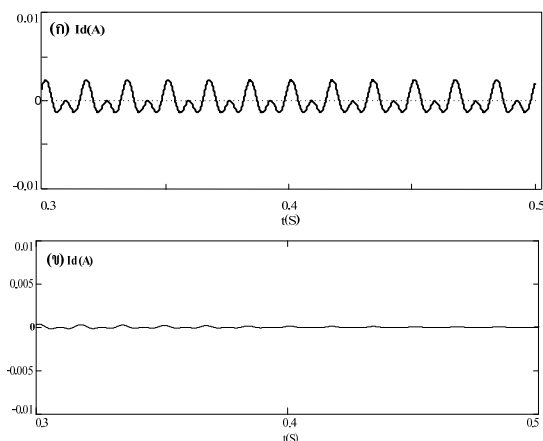
อุปกรณ์และวิธีการวิจัย



ภาพที่ 8 แสดงบล็อกไดอะแกรมที่ใช้ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink V.2009 a

ในงานวิจัยนี้จะใช้การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink V.2009 a ซึ่งถูกแสดงในภาพที่ 8 เพื่อจำลองการทำงานของระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ PMSM และระบบชดเชยผลกระทบที่เกิดจากเดดไทม์ในอินเวอร์เตอร์โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองถูกแสดงตามตารางที่ 1

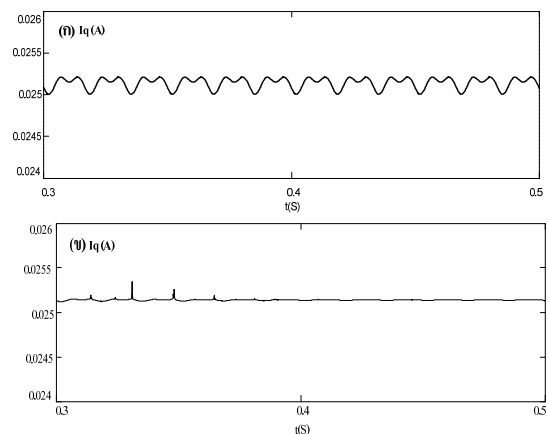
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล



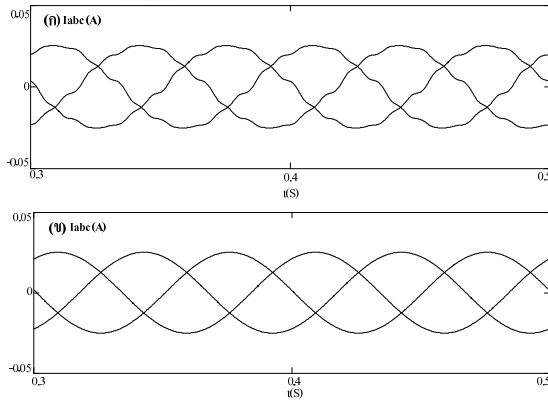
ภาพที่ 9 แสดงกระแส  $i_d^r$  ของระบบควบคุม ก) กระแส  $i_d^r$  ขณะที่ไม่มีการชดเชยเดดไทม์และ ข) กระแส  $i_d^r$  ขณะที่มีการชดเชยเดดไทม์

ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลอง

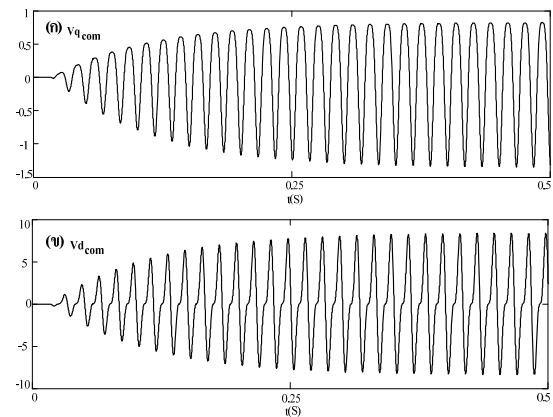
Ratings and parameters of PMSM		Specification of PWM inverter	
Power	750W	DC link	310V
Voltage/Current	200V/6A	PWM period	66 uS
Speed	3000 rpm	Dead-time	4 uS
Pole pairs	3	Trun-on/off delay	180/320 nS
Resistance	0.49	Saturation volt	1.09 V
Inductance	6.05 mH	Diode forward volt	1.3 V
Fluk linkage	0.0884 Wb	IGBT/Diode Ron	85/32 m Ω



ภาพที่ 10 แสดงกระแส  $i_q^r$  ของระบบควบคุม ก) กระแส  $i_q^r$  ขณะที่ไม่มีการชดเชยเดดไทม์และ ข) กระแส  $i_q^r$  ขณะที่มีการชดเชยเดดไทม์

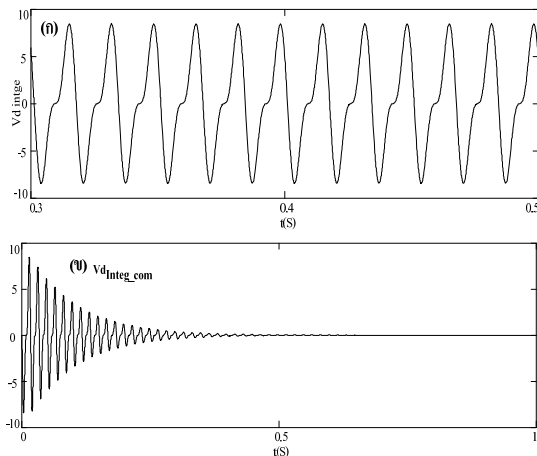


ภาพที่ 11 แสดงกระแสทั้งสามเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ PMSM ก) กระแสขณะที่ไม่มีการชดเชยผลของเดดไทม์ ข) กระแสขณะทำการชดเชยผลของเดดไทม์

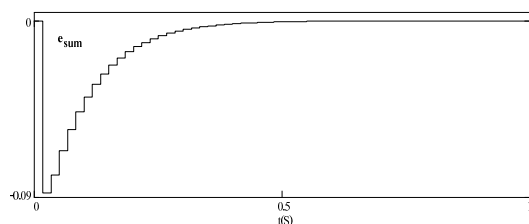


ภาพที่ 14 แสดงแรงดันที่ใช้ในการชดเชยเดดไทม์  
ก) แรงดัน  $v_{q\_com}^*$  ข) แรงดัน  $v_{d\_com}^*$

จากผลการจำลองการทำงาน ในภาพที่ 9 และภาพที่ 10 จะเห็นได้ว่ากระแส  $i_d^r$  และ  $i_q^r$  ในขณะที่ไม่มีการชดเชยผลของเดดไทม์จะมีความผิดเพี้ยนของกระแสมากแต่ในขณะเดียวกันเมื่อทำการชดเชยผลของเดดไทม์จะทำให้ความผิดเพี้ยนดังกล่าวลดน้อยลง หากพิจารณาภาพที่ 11 จะพบว่าเมื่อทำการชดเชยผลที่เกิดจากเดดไทม์กระแสจะมีลักษณะเป็นไซน์ที่ไม่ผิดเพี้ยนซึ่งจะช่วยลดฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบได้ ในภาพที่ 12 เป็นการแสดงแรงดัน  $v_{d\_integ}^r$  ซึ่งจะพบว่าเมื่อมีการชดเชยผลของเดดไทม์แล้วแรงดัน  $v_{d\_integ\_com}^r$  ซึ่งเป็นแรงดันผิดเพี้ยนที่ถูกตรวจจับได้จะมีขนาดลดลงเข้าสู่ใกล้ศูนย์ ในภาพที่ 13 เป็นการแสดงผลรวมของการอินทิเกรต ซึ่งจะพบว่าผลรวมดังกล่าวจะมีขนาดลดลงเป็นลำดับขั้นโดยการลดลงจะลดลงในทุกๆ  $\frac{\pi}{3}$  จนในที่สุดจะมีค่าเข้าสู่ใกล้ศูนย์เมื่อระบบสามารถทำการชดเชยเดดไทม์ได้ ในภาพที่ 14 เป็นการแสดงแรงดัน  $v_{d\_com}^*$  และ  $v_{q\_com}^*$  ที่ใช้ในการชดเชยโดยแรงดันชดเชยดังกล่าวได้มาจากการป้อนค่าคงที่  $K_{com}$  ผ่านสมการที่ 24 และ 25 ตามลำดับโดยจะพบว่า สัญญาณที่ใช้ในการชดเชยผลของเดดไทม์เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วจะมีลักษณะเหมือนกับสัญญาณความผิดเพี้ยนในภาพที่ 4



ภาพที่ 12 แสดงแรงดัน  $v_{d\_integ}^r$  ที่ได้จากตัวควบคุมอินทิเกรต ก) แรงดัน  $v_{d\_integ}^r$  ขณะไม่มีการชดเชยผลของเดดไทม์ ข) แรงดัน  $v_{d\_integ\_com}^r$  ขณะมีการชดเชยผลของเดดไทม์



ภาพที่ 13 แสดงผลรวมของการอินทิเกรต  $E_{sum}$

### สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองการทำงานของระบบชดเชยผลที่เกิดจากเดดไทม์ในอินเวอร์เตอร์โดยใช้โปรแกรม MATHLAB/Simulink V.2009a โดยผลที่ได้พบว่าระบบชดเชยสามารถทำการชดเชยผลที่เกิดจากเดดไทม์และผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์สวิตซ์ได้เป็นอย่างดี อีกทั้งการใช้เทคนิคการชดเชยดังกล่าวไม่จำเป็นต้องต่ออุปกรณ์ภายนอกใดๆเพิ่มเติมและยังครอบคลุมการทำงานในสภาวะต่างๆของระบบควบคุมความเร็วได้เป็นอย่างดีอีกด้วย ดังนั้นระบบชดเชยดังกล่าวจึงเหมาะที่จะทำไปใช้กับระบบควบคุมความเร็วเพื่อให้ได้เสถียรภาพของการทำงานที่ดีขึ้น

### แนวทางการพัฒนาต่อ

ในส่วนของการจำลองการทำงานที่ได้ถูกนำเสนอไปแล้วนั้นเป็นการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATHLAB/Simulink V.2009a ซึ่งในลำดับต่อไปจะได้นำหลักการชดเชยดังกล่าวไปสร้างระบบชดเชยเดดไทม์ในระบบจริงของระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ PMSM เพื่อให้เห็นถึงแนวทางในการปฏิบัติและจะถูกนำเสนอในโอกาสต่อไป

### เอกสารอ้างอิง

1. Attainese, C., Nardi, V. and Tomasso, G. "A Novel SVM Strategy for VSI Dead-Time-Effect Reduction" IEEE Transactions on Industrial Applications 41.6 (2005) : 1667-1673.
2. Choi, J., and Sul, S. "Inverter Output Voltage Synthesis Using Novel Dead Time Compensation." Transactions on Power Electronics 11.2 (1996) : 221-227.
3. Evans, P.D., ACGI, D., and Close, P.R. "Harmonic Distortion in PWM Inverter Output Waveforms." IEEE Proceedings 134.4 (1987) : 224-232.
4. Kim, H., Moon, H., and Youn, M. "On-Line dead-Time Compensation Method Using Disturbance Observer." IEEE Transactions on Power Electronics 18.6 (2003) : 1336-1344.
5. Kim, S.H., Park, T.S., Yoo, J.Y., Park, G.T., and Kim, N.J. "Dead Time Compensation in a vector-controlled Induction machine." IEEE (1998) : 1011-1016.
6. Leggate, D., and Kerkman, R.J. "Pulse-Based Dead-Time Compensator for PWM Voltage Inverters." IEEE 44.2 (1997) : 191-197.
7. Murai, Y., Watanbe, T., and Iwasaki, H. "Waveform Distortion and Correction Circuit for PWM Inverters with Switching Lag-Times." Transactions on Industry Applications 23.5 (1987) : 881-885.
8. Oliveira, A.C., Jacobina, C.B., and Lima, A.M. "Improved Dead-Time Compensation for Sinusoidal PWM Inverter Operating at High Switching Frequencies." IEEE Transactions on Industrial Electronics 54.4 (2007) : 2295-2303.
9. Seung-Gi J., Bang-Sup, L., Kyung-Seo, K., and Min-Ho, P. "The Analysis and compensation of Dead Time Effects in PWM Inverters." IEEE (1988) : 667-671.
10. Sukegawa, T., Kamiyoma, K., Mizuno, K., Matsui, T., and Okuyoma, T. "Fully Digital, Vectorlled PWM VSI-Fed ac Drives with an Inverter Dead-Time Comensation Strategy." Transactions on Industry Applications 27.3(1991) : 552-558.
11. Urasaki, N., Senjyu, T., Uzeno, K., and Funabashi, T. "A dead-Time Compensation Strategy for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Suppressing Current Distortion." IEEE (2003) :1255-1260.
12. Urasaki, N., Uezato, K., and Funabashi, T. "An Adaptive Dead-Time Compensation Strategy for voltage Source Inverter Fed Motor Drives" IEEE Transactions on Power Electronics 20.5 (2005) : 1150-1160.