

การเพิ่มประสิทธิภาพของการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยการสวิตช์ด้วยวิธีการพัลส์วิดท์มอดูเลชันรูปคลื่นไซน์

Optimization of Brushless DC Motor Controlling by Switching with Pulse Width Modulation Approach

ทรงกลด ศรีปรังค์^{1*}, วันชัย ทรัพย์สิง²

Songklod Sriprang^{1*}, Wanchai Subsingha²

Received : 15 October 2012 ; Accepted : 10 December 2012

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ด้วยเทคนิคการสวิตช์แบบพัลส์วิดท์มอดูเลชันในแบบสเปซเวกเตอร์มอดูเลชัน (SVPWM) เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการสับเปลี่ยน (Commutation) ซึ่งทำให้เกิดการกระเพื่อมของแรงบิด และเสียงรบกวน โดยทำการวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดการกระเพื่อมของแรงบิดขณะสับเปลี่ยน และอธิบายรายละเอียดวิธีการสร้างสัญญาณ SVPWM สุดท้ายผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการสวิตช์ด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์นั้นสามารถลดการกระเพื่อมของแรงบิด ลดเสียงรบกวน และลดการเกิดฮาร์โมนิกส์ในระบบ กว่าวิธีการสวิตช์แบบ Six-step Commutation และระบบฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้นเป็นแบบอย่างง่ายและมีความน่าเชื่อถือ ทำให้ประสิทธิภาพการควบคุมสูงขึ้น

คำสำคัญ: เพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมมอเตอร์ BLDC เทคนิคการสวิตช์แบบ SVPWM มอเตอร์ BLDC

Abstract

This paper presents a three-phase Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) technique for a brushless DC motor drive to reduce the commutation torque. This is the cause of torque ripple and audible noise. The cause of torque ripple during commutation interval was analyzed, and the way to obtain the desired SVPWM is introduced in detail. Finally, experimental results show that the SVPWM approach is more effective for the minimization of the torque ripple and audible noise and reduce harmonic than the six-step commutation driving method. Its hardware circuits are simple and reliable.

Keywords: Optimization of BLDC Controlling, SVPWM Switching technique, BLDC Motor

บทนำ

ปัจจุบันมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านหรือที่รู้จักกันในชื่อ Brushless Direct Current Motor (BLDC Motor) นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานต่างๆ รวมถึงในงานอุตสาหกรรม

เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีในการส่งผ่านพลังงาน ซึ่งไม่ใช้แปรงถ่านในการส่งผ่านพลังงานเหมือนมอเตอร์กระแสตรงที่ใช้แปรงถ่าน¹ ระบบควบคุมของมอเตอร์ BLDC แสดงดัง Figure 1

¹ มทร.รัตนโกสินทร์ ว.จ.วังไกลกังวล ถนน เพชรเกษม ตำบลหนองแก อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

² มทร. วิทยุ 39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

* Email: songklod.sriprang@gmail.com, เบอร์โทร 0 3261 8500, เบอร์โทรสาร 0 3261 8570

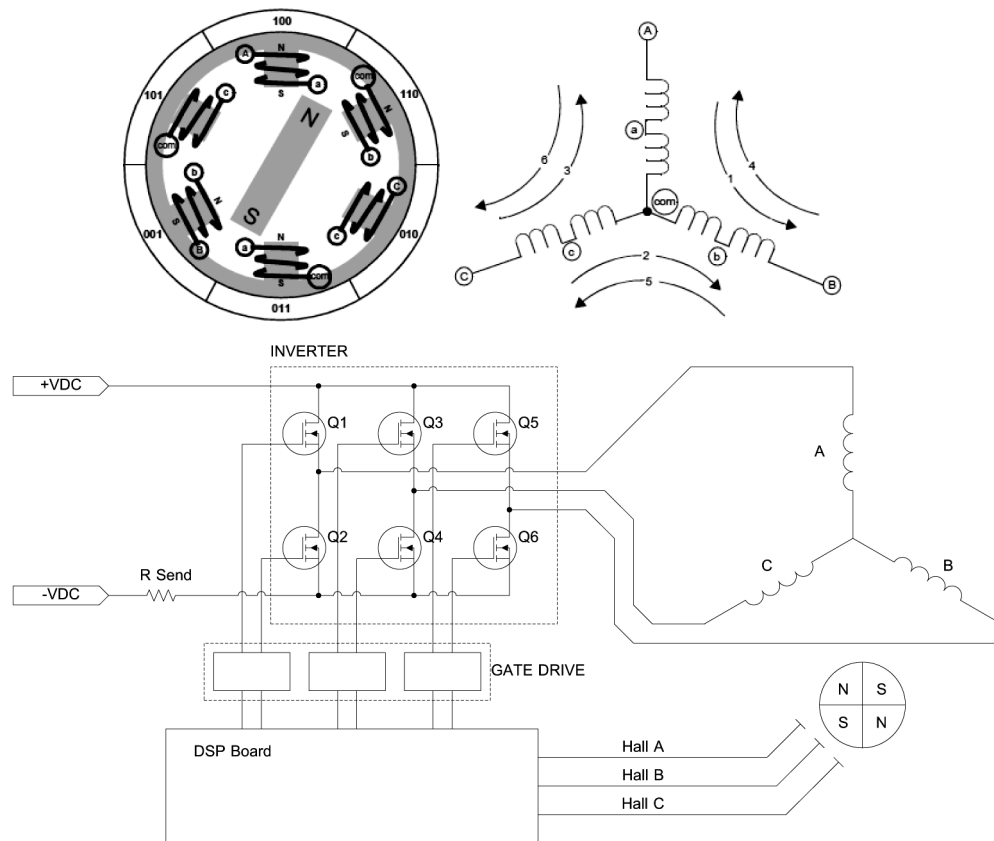


Figure 1 Diagram of Brushless DC Motor Control

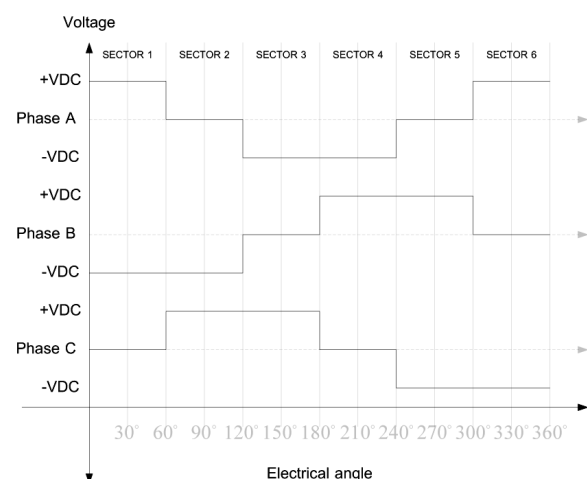
ในระบบควบคุมประกอบด้วย หน่วยประมวลผลกลาง ซึ่งอาจเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์, DSP หรือไมโครโปรเซสเซอร์ ฯลฯ, เซนเซอร์แบบ Hall Effect อินเวอร์เตอร์สามเฟส และแหล่งไฟฟ้ากระแสตรง

การควบคุมเริ่มจากหน่วยประมวลผลกลางรับค่าตำแหน่งของโรเตอร์จากเซนเซอร์ Hall Effect ทั้งสามตัว จากนั้นทำการประมวลผลสั่งการทำงานของสวิตช์โดยแบ่งออกเป็น 6 สถานะดัง Table 1

Table 1 Sector of switching

Sector	Hall Sensor Input			Active Switch		Phase Current		
	HA	HB	HC			A	B	C
1	1	0	0	Q1	Q6	+VDC	-VDC	NC
2	1	0	1	Q3	Q6	NC	-VDC	+VDC
3	0	0	1	Q3	Q2	-VDC	NC	+VDC
4	0	1	1	Q5	Q2	-VDC	+VDC	NC
5	0	1	0	Q5	Q4	NC	+VDC	-VDC
6	1	1	0	Q1	Q4	+VDC	NC	-VDC

สามารถวาดรูปคลื่นสัญญาณการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แต่ละเฟสของมอเตอร์ BLDC ได้ดัง Figure 2 หากวิเคราะห์จากรูปคลื่นของแรงดันดัง Figure 2 สามารถเปรียบเทียบได้กับหลักการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ใน

Figure 2 Pattern of voltage in the commutated ²

อินเวอร์เตอร์สามเฟสด้วยเทคนิครูปคลื่นสี่เหลี่ยม (3 Phase Square Wave Inverter) ซึ่งโดยปกติแล้วจะไม่นิยมใช้ในการควบคุม เนื่องจากมีข้อเสียหลายประการ จึงเป็นที่มาของการทำงานวิจัยในเรื่องนี้ เพื่อศึกษาเทคนิคการสวิตช์ และดำเนินการควบคุมมอเตอร์ BLDC โดยใช้เทคนิคการสวิตช์ด้วยหลักการพัลส์วิธี่มอดูเลชั่น (PWM) โดยใช้หลักการในการควบคุมมอเตอร์สามเฟสมาประยุกต์ใช้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ BLDC โดยจะสร้างระบบควบคุมแบบวงปิด ด้วยป้อนกลับความเร็วของมอเตอร์

หลักการและส่วนประกอบของระบบ

1. หลักการในการเพิ่มประสิทธิภาพมอเตอร์ BLDC

ข้อเสียของมอเตอร์ BLDC คือ เมื่อจ่ายพลังงานให้กับขดลวดของสเตเตอร์ที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ จะเกิดการแกว่งของแรงบิด (Torque Ripple) ที่เกิดจากการสับเปลี่ยน และมีเสียงดัง สัญญาณรูปคลื่นของ Back Electromotive Force (BEMF) ที่เกิดขึ้นเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal) ดัง Figure 3

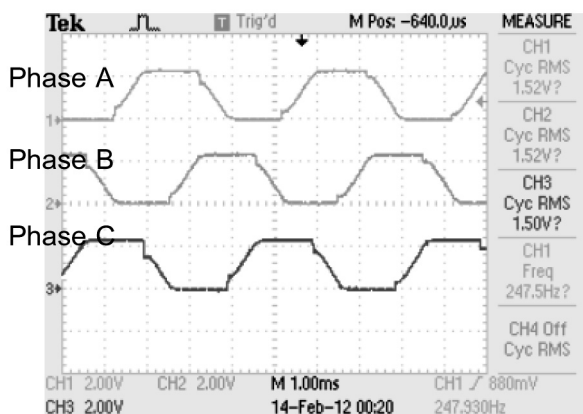


Figure 3 3-phase signal of BEMF

เนื่องจากการจ่ายพลังงานโดยการเปิด/ปิดสวิตช์ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยใช้ MOSFET หรือ IGBT ของวงจรอินเวอร์เตอร์ให้กับมอเตอร์ ซึ่งถูกกำหนดโดยอินพุตที่ได้จากเซนเซอร์ Hall Effect ทั้ง 3 ตัว รูปคลื่นที่ได้จะเป็นแบบรูปสี่เหลี่ยม หรือเรียกการควบคุมแบบนี้โดยทั่วไปว่า Six-step commutation รูปคลื่นของกระแสที่ไหลเข้าขดลวดในสเตเตอร์ จะเป็นดัง Figure 4 ซึ่งกระแสที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับแรงบิด จึงก่อให้เกิดการกระเพื่อมของแรงบิด (Torque Ripple) และเกิดการแกว่งของความเร็ว รวมถึงเกิดเสียงรบกวน (Audible Noise) สาเหตุที่ทำให้เกิดเหตุการณ์ดังกล่าวนี้

สามารถอธิบายได้ โดยการพิจารณาได้จากการทำงานของสวิตช์แต่ละตัวในวงจรอินเวอร์เตอร์ดัง Figure 5 และวงจรสมมูลของมอเตอร์ BLDC จากรูปมอเตอร์ BLDC มีการพันขดลวด 3 ชุดอยู่ในร่องสลิตของสเตเตอร์ และโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร (Permanent magnetic) และสามารถเขียนสมการแรงดันของขดลวดทั้ง 3 ชุดได้ดังสมการที่ (1)

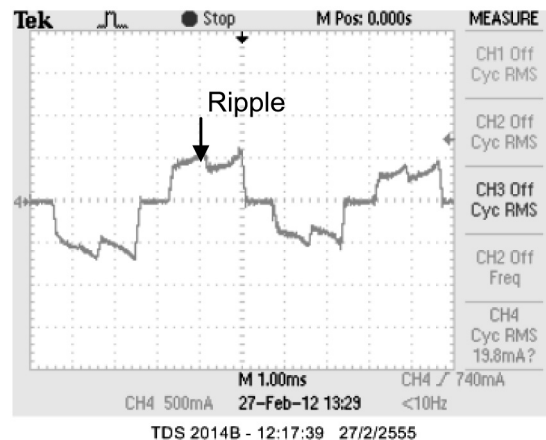


Figure 4 Pattern of current ripple

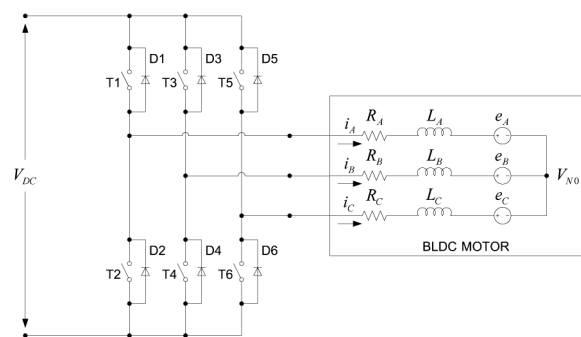


Figure 5 Block diagram of BLDC controlling

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{N0} \\ V_{N0} \\ V_{N0} \end{bmatrix} \quad (1)$$

โดยที่ R : ค่าความต้านทานแต่ละเฟส

$L = L_S - M$: ค่าอินดักแตนซ์แต่ละเฟส

L_S Self-inductance, M : Mutual-inductance

i_A, i_B, i_C : กระแสเฟส

e_A, e_B, e_C : Back EMF

V_{N0} : แรงดันนิวตรอน

$$T_e = \frac{e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C}{\omega_m} \quad (2)$$

โดยที่ ω_m : ความเร็วเชิงมุม

ในการวิเคราะห์การกระเพื่อมของแรงบิดของมอเตอร์ จะทำการพิจารณาเพื่อประกอบความเข้าใจเพียงช่วงการสับเปลี่ยน (Commutation) จากเฟส A ไปยังเฟส B ซึ่งในช่วงนี้ สวิตช์ T1 จะอยู่ในสถานะเปิดวงจร (OFF) และสวิตช์ T3 อยู่ในสถานะปิดวงจร (ON) ซึ่งสวิตช์ T6 จะยังคงปิดวงจร (ON) อยู่ ช่วงนี้เรียกว่าช่วงก่อนการสับเปลี่ยนวงจรจะเป็นดัง Figure 6 และช่วงนี้กระแสจะไหลเข้าขดลวดเป็นลักษณะคงที่แทนด้วย

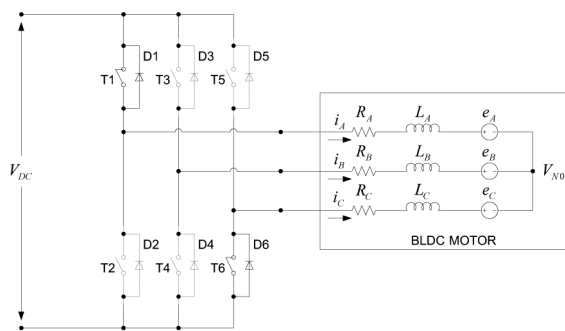


Figure 6 Circuit diagram before commutated

แต่อย่างไรก็ตามการถ่ายโอนของกระแสจะไม่เป็นไปโดยทันทีทันใด เนื่องจากกระแสจะไหลผ่านไดโอด D4 การสับเปลี่ยนของสวิตช์จะเสร็จสมบูรณ์สามารถพิจารณาได้ 3 กรณี³ ในช่วงเวลาของการสับเปลี่ยนจะพิจารณาให้ Back EMF มีลักษณะคงที่แทนด้วย E_m และในการสวิตช์ค่าความถี่ในการสวิตช์มีค่าสูงมาก ส่งผลให้ค่าอินดักแตนซ์มีค่ามากค่าความต้านทาน ดังนั้นจึงจะไม่พิจารณาค่าความต้านทาน ความชันของกระแสในการสับเปลี่ยนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \frac{di_A}{dt} &= -\frac{V + 2E_m}{3L} \\ \frac{di_B}{dt} &= +\frac{2(V + E_m)}{3L} \\ \frac{di_C}{dt} &= -\frac{(V + 4E_m)}{3L} \end{aligned} \quad (3)$$

พฤติกรรมของกระแสในขณะที่เกิดการสับเปลี่ยนแสดงดัง Figure 7 ช่วงเวลาในการสับเปลี่ยนของ t_1 และ t_2 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) และ (5)

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดในการสับเปลี่ยนทุกครั้งจะเกิดการกระเพื่อมของแรงบิด ซึ่งการแก้ปัญหาดังกล่าวนั้นจะต้องทำการตรวจสอบช่วงที่มีการสับเปลี่ยน และทำการสร้างสัญญาณแบบ PWM⁵ หรือเปลี่ยนเทคนิคการสวิตช์

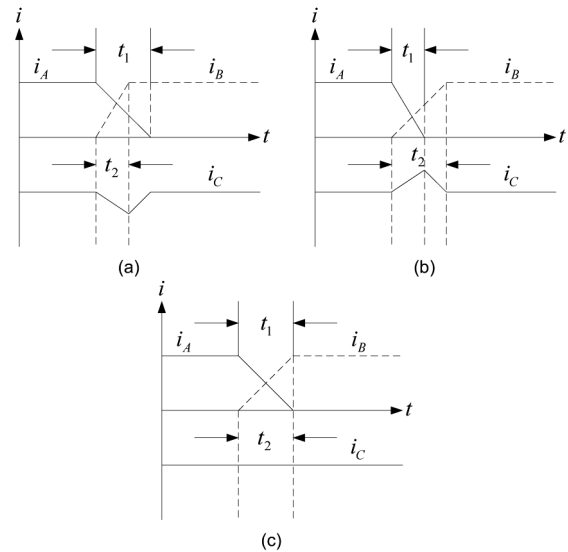


Figure 7 Behaviors of commutated current

$$(a) V_{DC} > 4E_m, t_1 > t_2$$

$$(b) V_{DC} < 4E_m, t_1 < t_2$$

$$(c) V_{DC} = 4E_m, t_1 = t_2$$

ช่วงเวลาในการสับเปลี่ยนของ t_1 และ t_2 สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$t_1 = \frac{3LI_m}{V_{DC} + 2E_m} \quad (4)$$

$$t_2 = \frac{3LI_m}{2(V_{DC} - E_m)} \quad (5)$$

2. เทคนิคการสวิตช์แบบ SVPWM

เทคนิคการสวิตช์แบบนี้เป็นที่นิยมในการใช้ควบคุมมอเตอร์ เนื่องจากการสวิตช์เกิดจากการพิจารณาจากเวกเตอร์ของแรงดันในแกน α และ β ลดการสูญเสียจากการสวิตช์ และลดการเกิดอาร์โม-นิกส์ในระบบ สนามแม่เหล็กของมอเตอร์จะหมุนเป็นวงกลม วงจรการควบคุมของมอเตอร์ประกอบด้วยสวิตช์ทั้งหมด 6 ตัว แสดงดัง Figure 8 จากวงจรสามารถแบ่งสถานะการทำงานของสวิตช์ทั้ง 6 ตัว ออกเป็น 8 สถานะ แต่จะมีเพียง 6 สถานะที่จะพิจารณา และการทำงานของสวิตช์จะเกิดเป็นเวกเตอร์ของแรงดันดัง Figure 9 ซึ่งสมการที่เกี่ยวข้องในการสร้างเวกเตอร์ของแรงดันดังกล่าว นั้นประกอบด้วย

$$V_A = V_{DC} \sin \omega t \quad (6)$$

$$V_B = V_{DC} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (7)$$

$$V_C = V_{DC} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \quad (8)$$

เมื่อ V_A, V_B, V_C : แรงดันเฟส
 V_{DC} : แรงดันกระแสตรงจากแหล่งจ่าย
 $\omega = 2\pi f$: ความเร็วเชิงมุม

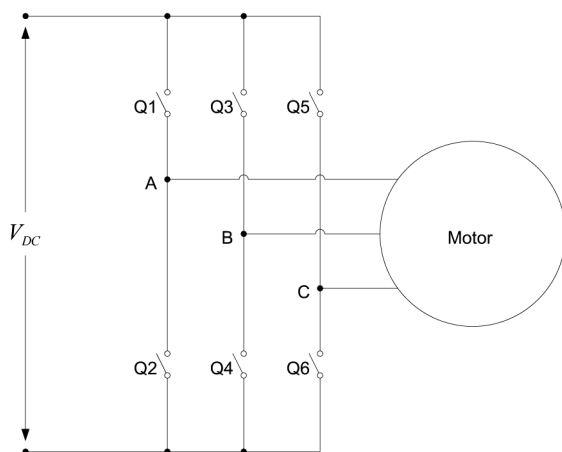


Figure 8 BLDC motor control diagram

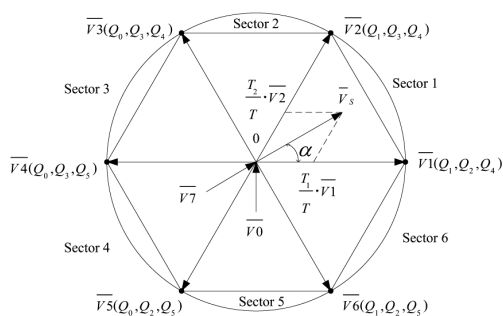


Figure 9 Vector of voltage in the 6 sector

เมื่อทราบค่าของแรงดัน V_A , V_B และ V_C จากนั้นก็
 ทำการสร้างสัญญาณ V_d และ V_q เพื่อหาค่าของ
 เวกเตอร์ $\vec{V}_s$ และมุม α จากสมการ

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{An} \\ V_{Bn} \\ V_{Cn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\vec{V}_s = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (10)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{V_d}{V_q} \right) \quad (11)$$

จากนั้นก็ทำการหาช่วงเวลาการสวิตช์ซึ่งที่ Sector
 ใดๆ โดยสมการ

$$T_1 = T \cdot m \cdot \frac{(\sin \pi/3 - \alpha)}{(\sin \pi/3)} \quad (12)$$

$$T_2 = T \cdot m \cdot \frac{(\sin \alpha)}{(\sin \pi/3)} \quad (13)$$

$$T_0 = T - (T_1 + T_2) \quad (14)$$

เมื่อ m คือ Modulation index

$$T \text{ คือ Sampling time } \left(T = \frac{1}{f_s} \right)$$

รูปแบบของการสวิตช์ในแต่ละสถานะจะไม่เหมือนกัน⁴⁻⁵
 ซึ่งสามารถระบุรูปแบบได้ดัง Figure 10 นำรูปแบบของการ
 สวิตช์ที่ได้ไปเขียนโปรแกรมในตัวประมวลผลกลาง

3. การคำนวณตำแหน่งของโรเตอร์

ในการที่จะทราบถึงตำแหน่งของโรเตอร์จะต้อง
 ทำการวัดค่าโดยใช้เซนเซอร์ Hall Effect ซึ่งตำแหน่งของ
 โรเตอร์จะเคลื่อนที่เป็นองศาทางไฟฟ้าครั้งละ 60 องศา และ
 ทำการกำหนดความสัมพันธ์ดัง Table 2

Table 2 Relationship of sensor and sector

Hall A	Hall B	Hall C	Sector
0	0	0	0 (Invalid)
1	0	0	4
1	0	1	5
0	0	1	1
0	1	1	3
0	1	0	2
1	1	0	6
1	1	1	7 (Invalid)

ทำให้ทราบถึงตำแหน่งของโรเตอร์ และทำการ
 คำนวณการสวิตช์โดยหลักการของ SVPWM

4. ส่วนประกอบของระบบ

ในการคำนวณดำเนินการทดลองระบบที่สร้าง
 ขึ้นมีไดอะแกรมส่วนประกอบทั้งหมดแสดงดัง Figure 11 ซึ่ง
 เป้าหมายของการควบคุมคือต้องการควบคุมความเร็วของ
 มอเตอร์แบบวงปิด เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุม

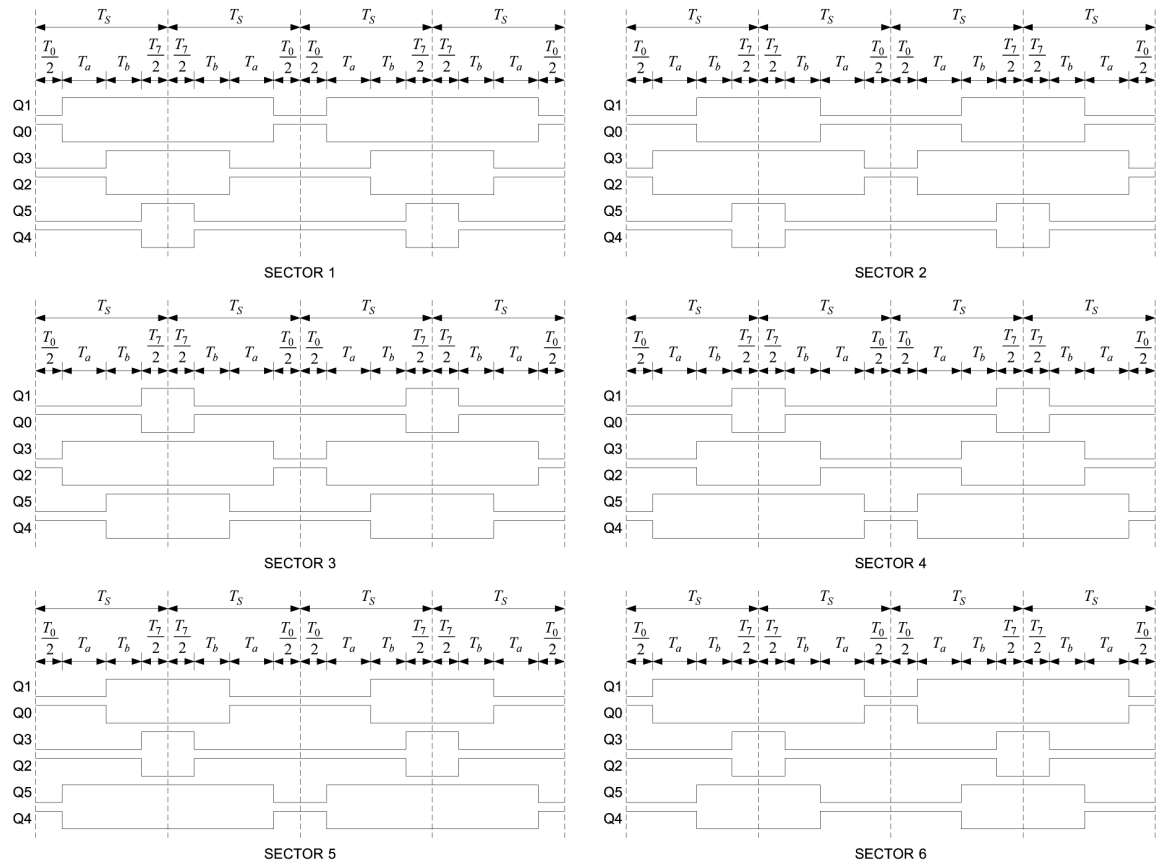


Figure 10 Pattern of space vector switching

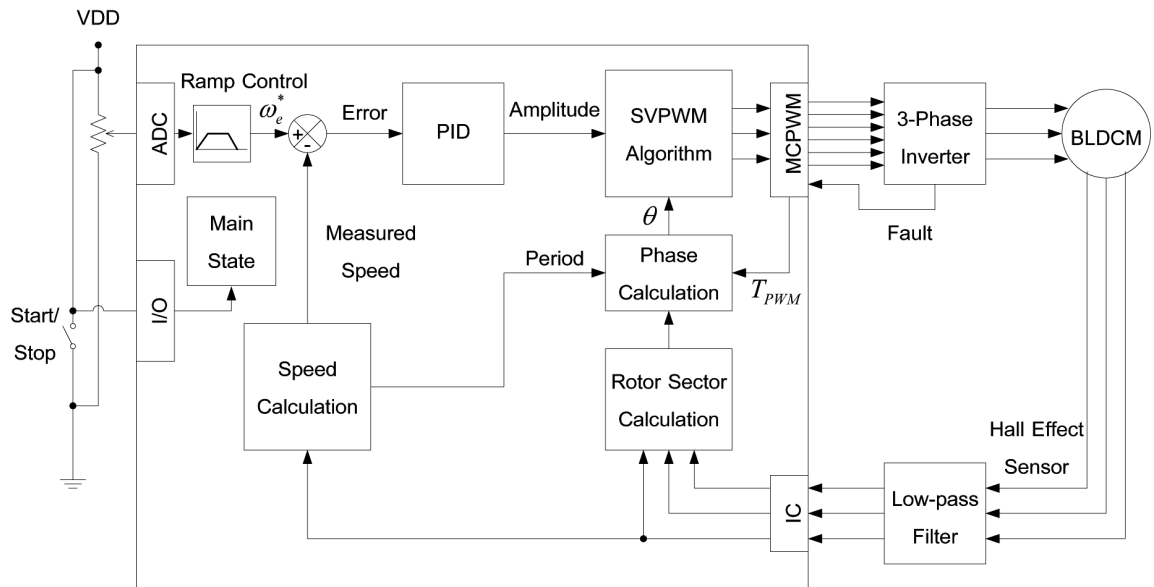


Figure 11 Control system diagram

การดำเนินการ

ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ดังแสดงเป็นไดอะแกรมดัง Figure 11 ในส่วนของการประมวลผลนั้น ดำเนินการโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล dsPIC30F ของบริษัท Microchip Inc ในส่วนของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ มีค่าพารามิเตอร์ดัง Table 3 เป็นมอเตอร์ของบริษัท Hurst มีขนาดพิกัด (Max Continuous Rating) กำลัง 26 วัตต์ แรงดัน 24 โวลต์ กระแส 1.16 แอมแปร์

Table 3 Parameter of BLDC motor

ค่าพารามิเตอร์	ปริมาณ
ความต้านทาน (L-L) (Ohms)	4.03
ค่าความเหนี่ยวนำ (L-L) ที่ 1 kHz (mH)	4.06
Torque Constant (Kt) (oz.in./Amp)	9.79
Voltage Constant (Ke) (Vpeak/K _{RPM})	7.24
Rotor Inertia (Jr) (oz-in-s ²)	0.000628

ผลการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ การควบคุมด้วยเทคนิค Six-step commutate และ SVPWM เพื่อเปรียบเทียบผลการทำงาน

เริ่มจากการทดลองขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธี Six-step commutation ผลของแรงดัน กระแส และการกระพือของกระแส แสดงดัง Figure 12, 13 และ Figure 14

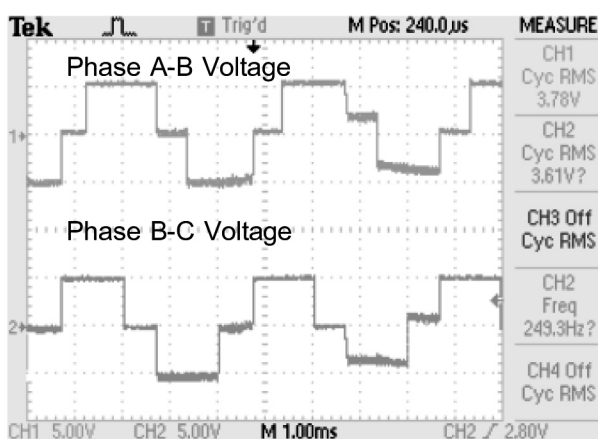


Figure 12 A-B and B-C voltage



Figure 13 Phase A current

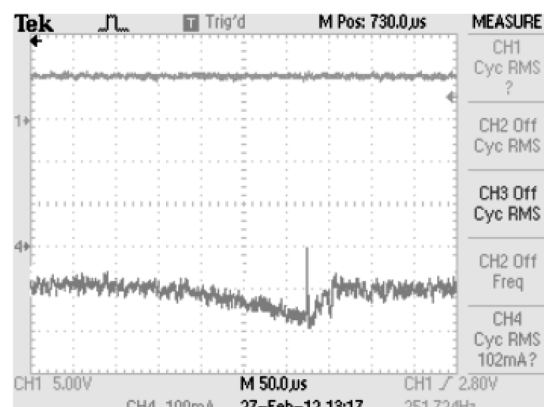


Figure 14 $V_{DC} > 4E_m, t_1 > t_2$ interval

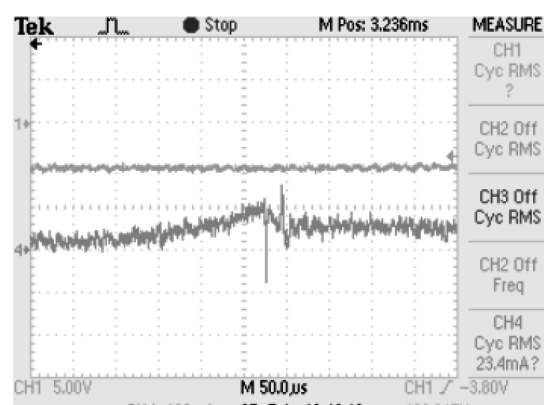


Figure 15 $V_{DC} < 4E_m, t_1 < t_2$ interval

แรงดันที่ได้จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมแสดงดัง Figure 12 และกระแสที่เกิดขึ้นดังแสดงใน Figure 13 มีการกระพือโดยสามารถอธิบายได้จากพฤติกรรมของกระแสจาก Figure 7 และภาพขยายของช่วงที่เกิดการกระพือของกระแสแสดงดัง Figure 14 และ 15 ซึ่งส่งผลให้เกิดการกระพือของแรงบิดด้วย รวมถึงเกิดเสียงรบกวนออกมา ประสิทธิภาพของระบบควบคุมแบบนี้จึงมีน้อย

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อต้องการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยการเปลี่ยนเทคนิคการสวิตช์เป็นแบบ SVPWM เพื่อลดการกระพือของแรงบิดในขณะการสับเปลี่ยน (Com-

mutation) และทำให้เสียงรบกวนลดลง ผลการทดลองที่ได้นั้น จะแสดงให้เห็นดัง Figure 16, 17 และ 18 ซึ่งจากการทดลอง แรงดันที่จ่ายให้ขดลวดจะเป็นแบบ PWM และกระแสที่เกิดขึ้น เป็นรูปคลื่นไซน์ (Sine wave) ไม่เกิดการกระเพื่อมของกระแส จะส่งผลให้ลดการกระเพื่อมของแรงบิดในขณะสับเปลี่ยน และ ลดเสียงรบกวนที่เกิดขึ้น

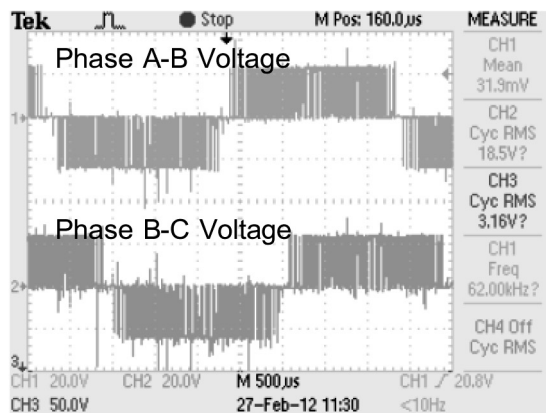


Figure 16 SVPWM signal

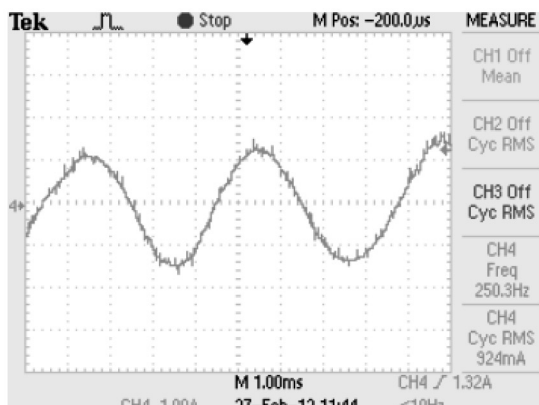


Figure 17 Illustration of phase current

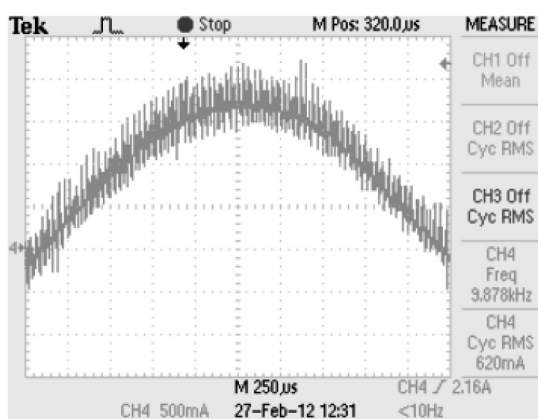


Figure 18 SVPWM current

สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมมอเตอร์ BLDC ซึ่งปัญหาสำคัญคือการกระเพื่อมของแรงบิด (Torque ripple) ของมอเตอร์ในขณะสับเปลี่ยน เทคนิควิธีการที่ใช้ คือ การเปลี่ยนเทคนิคการสวิตช์เป็นแบบ SVPWM ผลที่ได้ สามารถลดการกระเพื่อมของแรงบิดได้ และลดเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นได้ รวมทั้งฮาร์โมนิกส์ของระบบลดลง ซึ่งไม่มีการทดลองแต่สรุปด้วยหลักการของ SVPWM ดังนั้นสรุปได้ว่าการ ใช้เทคนิคสวิตช์แบบ SVPWM สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการ ควบคุมมอเตอร์ BLDC ได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มทร. รัตนโกสินทร์ วช.วังไกลกังวล (หัวหิน) ที่ได้ให้การสนับสนุน ในการทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. Tingna, S., G. Yuntao, et al. "A New Approach of Minimizing Commutation Torque Ripple for Brushless DC Motor Based on DC–DC Converter." Industrial Electronics, IEEE Transactions on 57(10): 3483-3490.
2. Sathyan, A., N. Milivojevic, et al. (2009). "An FPGA-Based Novel Digital PWM Control Scheme for BLDC Motor Drives." Industrial Electronics, IEEE Transactions on 56(8): 3040-3049.
3. Carlson, R., M. Lajoie-Mazenc, et al. (1992). "Analysis of torque ripple due to phase commutation in brushless DC machines." Industry Applications, IEEE Transactions on 28(3): 632-638.
4. ทรงกลด ศรีปรางค์, วันชัย ทวีพิสัย, "การดำเนินการ ควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นโดยใช้ dsPIC30F2010" การประชุมวิชาการ "แม่ฟ้าหลวงวิชาการ" ประจำปี พ.ศ. 2553 : 12 ปี ตามรอยสมเด็จพระเจ้า วันที่ 19-20 พฤศจิกายน 2553
5. Ruiqing, M., D. Junjun, et al. A novel sinusoidal current driving method for BLDCM based on SVPWM. Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2010 International Conference on.