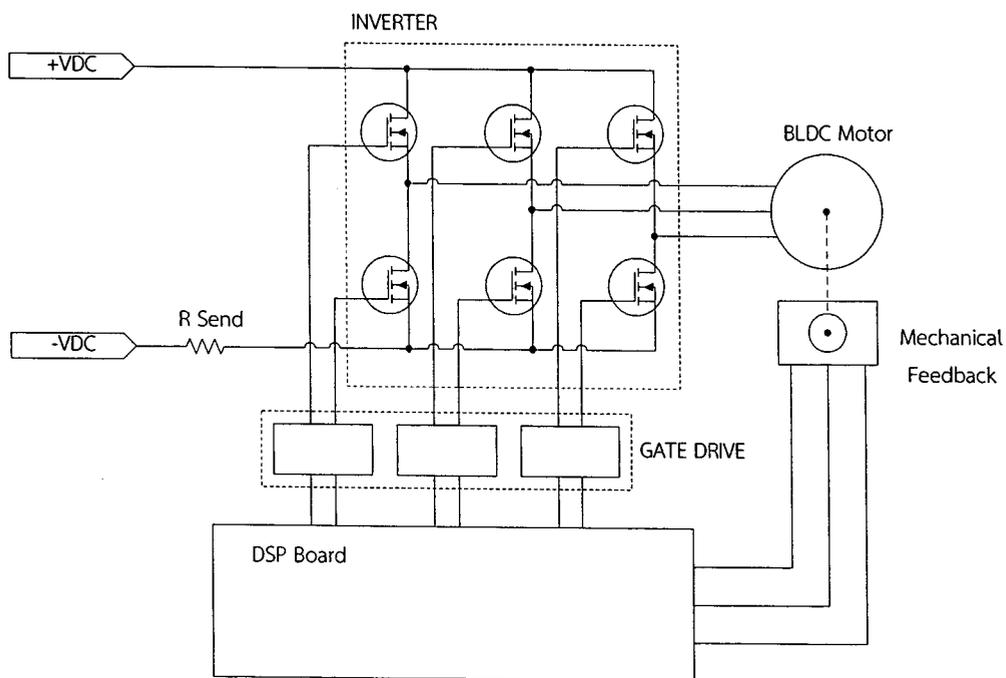


## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้เป็นการสืบค้นทฤษฎีเกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จัดทำขึ้น ประกอบไปด้วยเรื่องของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) ระบบการควบคุมหรืออินเวอร์เตอร์ และบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล รวมถึงเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review) และสรุปทฤษฎีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งส่วนประกอบของระบบที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โค้ดแอมระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านด้วยระบบ DSP

#### 2.1 มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor)

##### 2.1.1 คุณลักษณะโดยทั่วไปของมอเตอร์ BLDC

มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) เป็นมอเตอร์กระแสตรงที่มีการพัฒนาขึ้นใหม่ ซึ่งมีข้อดีกว่ามอเตอร์กระแสตรงที่มีแปรงถ่าน (Brush DC Motor) และเริ่มมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ข้อดีของมอเตอร์ไร้แปรงถ่านเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์แบบมีแปรงถ่าน

Feature	BLDC Motor	Brushed DC Motor
<b>Commutation</b>	Electronic commutation based on Hall position sensors	Brushed commutation
<b>Maintenance</b>	Less required due to absence of brushes	Periodic maintenance is required
<b>Life</b>	Longer	Shorter
<b>Speed/Torque Characteristics</b>	Flat – Enables operation on all speeds with rated load	Moderately flat – At higher speeds, brush friction increases, thus reducing useful torque
<b>Efficiency</b>	High – No voltage drop across brushes	Moderate
<b>Output Power/ Frame Size</b>	High – Reduced size due to superior thermal characteristics. Because BLDC has the windings on the stator, which is connected to the case, the heat dissipation is better	Moderate/Low – The heat produced by the armature is dissipated in the air gap, thus increasing the temperature in the air gap and limiting specs on the output power/frame size
<b>Rotor Inertia</b>	Low, because it has permanent magnets on the rotor. This improves the dynamic response.	Higher rotor inertia which limits the dynamic characteristics
<b>Speed Range</b>	Higher – No mechanical limitation imposed by brushes/commutator	Lower – Mechanical limitations be the brushes

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

<b>Electric Noise Generation</b>	Low, because it has permanent magnets on the rotor. This improves the dynamic response.	Arcs in the brushes will generate noise causing EMI in the equipment nearby
<b>Cost of Building</b>	Moderate – Since it has permanent magnets, building cost may be higher. However, steel & copper prices are up	Moderate – Due to increases in steel & copper. ( with wound field stator

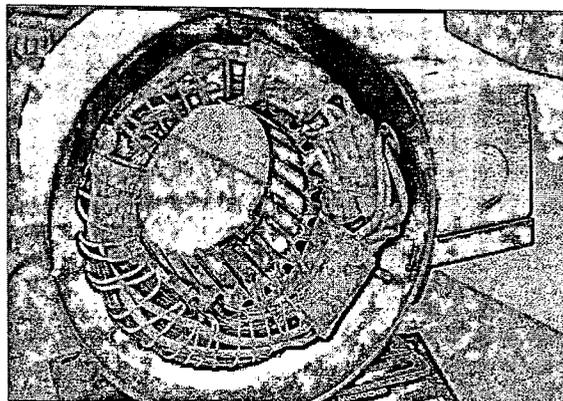
จากตารางแสดงให้เห็นว่ามอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน มีข้อดีมากกว่ามอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน จากข้อดีที่กล่าวมาส่งผลให้การศึกษาเพื่อใช้งานมอเตอร์ BLDC นั้นจึงมีความสำคัญ

2.1.2 หลักการและโครงสร้างของมอเตอร์ BLDC

BLDC นั้นจัดอยู่ในมอเตอร์ชนิดซิงโครนัส (Synchronous Motor) นั้นหมายถึง สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นมาจาก 2 ส่วนคือ เกิดจากสเตเตอร์ (Stator) และเกิดจากรอเตอร์ (Rotor) มอเตอร์ BLDC นั้นมีทั้ง 1 เฟส, 2 เฟส และ 3 เฟส สำหรับการใช้งานและการศึกษาในงานวิจัยนี้จะเจาะจง การใช้งานมอเตอร์ BLDC ในแบบ 3 เฟส รายละเอียดส่วนประกอบของมอเตอร์ BLDC เป็นดังนี้

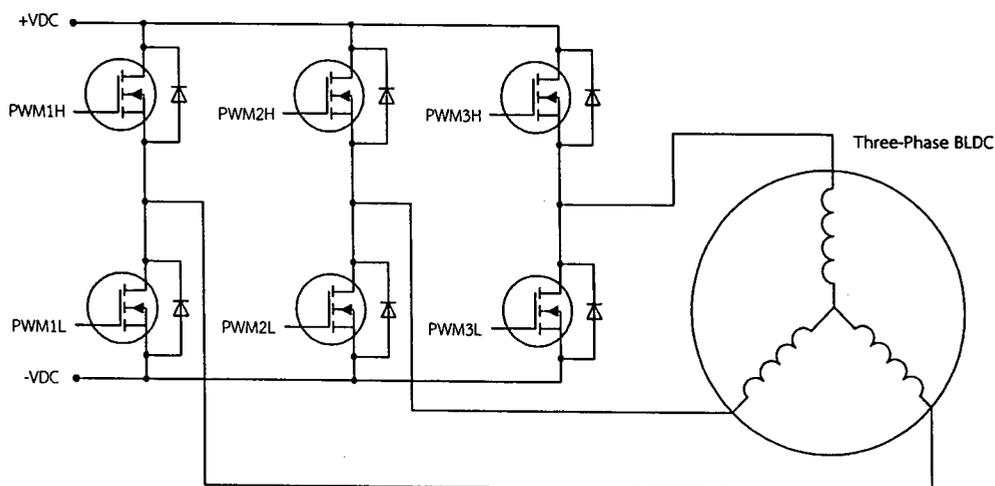
1 สเตเตอร์ (Stator)

สเตเตอร์ของมอเตอร์ BLDC นั้นประกอบด้วยร่องสล๊อต ในร่องสล๊อตนั้นบรรจุขดลวดจำนวน 3 เฟส ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 สเตเตอร์ของมอเตอร์ BLDC

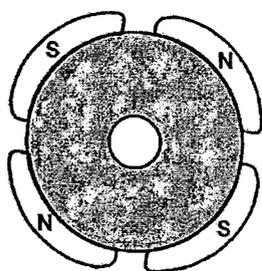
ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) การต่อใช้งานขดลวดในสเตเตอร์เป็นแบบสตาร์ (Star Winding) ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การต่อใช้งานขดลวดในสเตเตอร์ของมอเตอร์ BLDC

## 2 โรเตอร์ (Rotor)

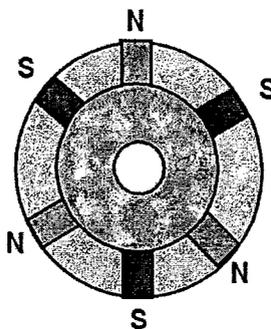
โรเตอร์ของมอเตอร์ BLDC นั้นประกอบด้วยแม่เหล็กถาวร ซึ่งสามารถมีขั้วแม่เหล็กได้ตั้งแต่ 2 ขั้ว ไปจนถึง 8 ขั้วแม่เหล็ก ดังภาพที่ 2.4



Circular core with magnets on the periphery



Circular core with rectangular magnets embedded in the rotor



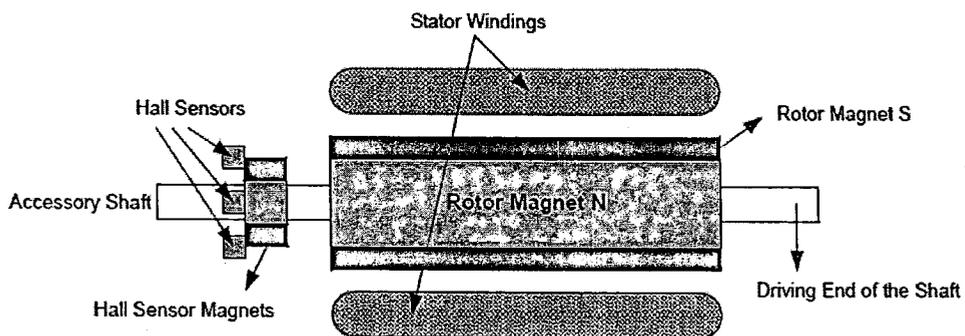
Circular core with rectangular magnets inserted into the rotor core

ภาพที่ 4 โรเตอร์ของมอเตอร์ BLDC [4]

เนื่องจากโรเตอร์ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก ดังนั้นวัสดุที่นำมาสร้างโรเตอร์นั้นจะต้องมีคุณสมบัติในการสร้างสนามแม่เหล็กที่ดี โดยตัวเลือกของวัสดุที่ใช้นั้นประกอบด้วย 2 ตัวคือ Ferrite Magnets และ Alloy Material Magnets ระหว่างวัสดุ 2 ชนิด Ferrite Magnetic นั้นจะให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อยกว่า Alloy Material Magnets ดังนั้นโรเตอร์ของมอเตอร์ BLDC จึงทำจาก Alloy Magnets

### 3 Hall Effect Sensors

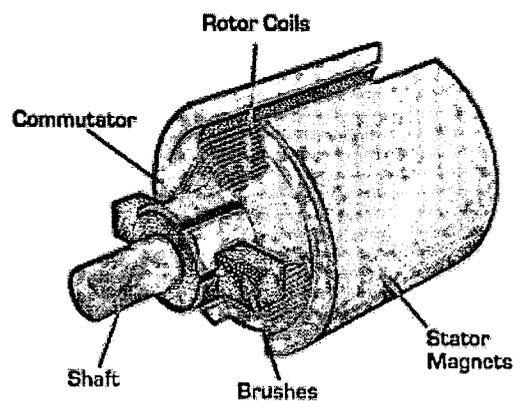
เนื่องจากมอเตอร์ BLDC นั้นไม่มีส่วนที่เรียกว่า Commutator ที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนแปลงสถานะของแหล่งที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ดังนั้นในการทำให้มอเตอร์ BLDC หมุนได้นั้นจะต้องใช้เทคนิคในการจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ ซึ่งจะต้องทราบขั้วของแม่เหล็กและตำแหน่งของโรเตอร์ โดยใช้เซนเซอร์ที่เรียกว่า Hall Effect เพื่อทำหน้าที่ในการตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ของมอเตอร์ ซึ่งเซนเซอร์จะถูกฝังอยู่ภายในตัวมอเตอร์ ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์ Hall Effect

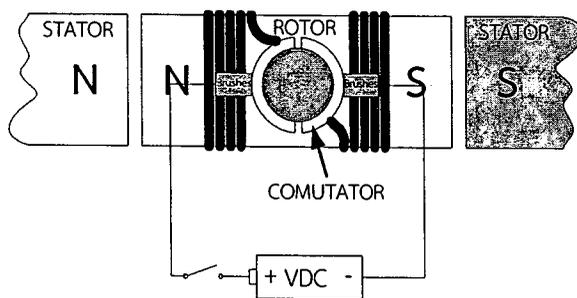
### 2.2 ระบบควบคุมและอินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์ BLDC

มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) เป็นมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) ที่มีการพัฒนาขึ้นใหม่ เพื่อลดข้อเสียต่างๆของมอเตอร์กระแสตรงโดยทั่วไป แต่เนื่องด้วยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของมอเตอร์ ส่งผลให้การขับเคลื่อนของมอเตอร์นั้นมีความซับซ้อนขึ้น คือด้วยโครงสร้างเดิมของมอเตอร์กระแสตรงดังแสดงในภาพที่ 6

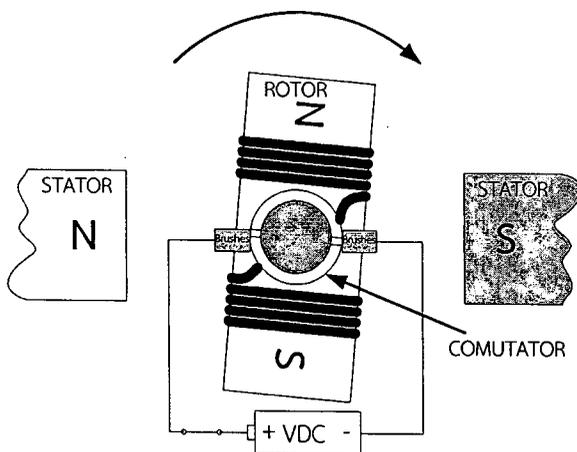


ภาพที่ 6 โครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน

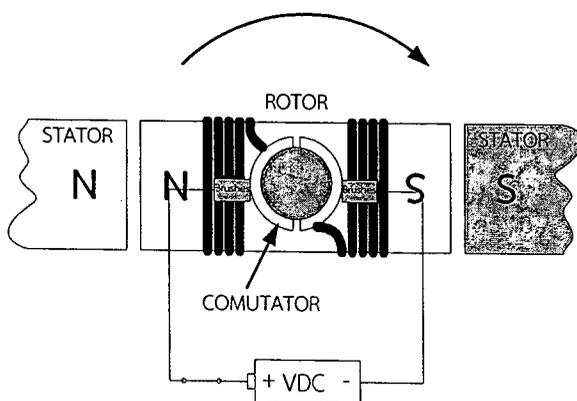
จากรูปจะเห็นว่าขดลวดนั้นจะพันอยู่บนส่วนของโรเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่เคลื่อนที่ ดังนั้นการที่จะจ่ายไฟฟ้าให้กับขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กให้เกิดการเหนี่ยวนำ จะต้องผ่านส่วนที่เป็นแปรงถ่าน แปรงถ่านจะสัมผัสอยู่กับส่วนที่เรียกว่า คอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ในส่วนนี้จะทำหน้าที่ในการสลับขั้วของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น การทำงานนั้นสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 7



(ก)



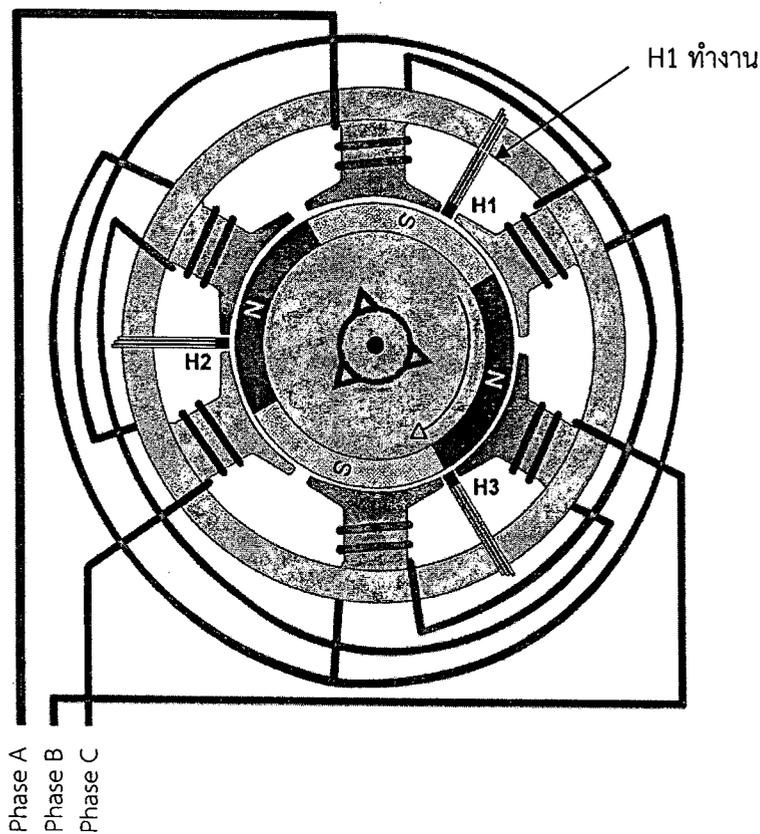
(ข)



(ค)

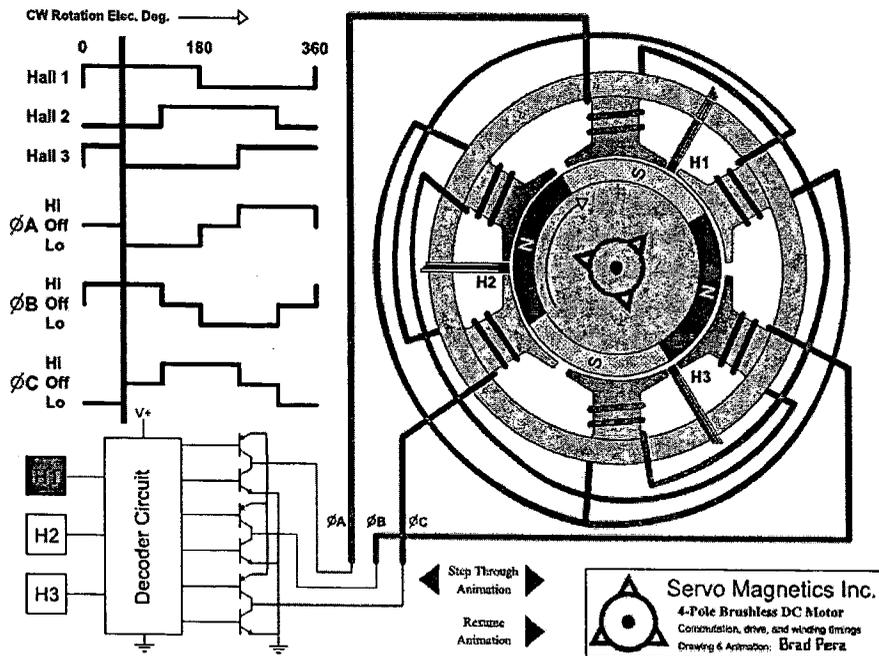
ภาพที่ 7 การหมุนของมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน

ดังนั้นเมื่อมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง โครงสร้าง การเริ่มหมุนหรือวิธีการที่จะทำให้มอเตอร์ หมุน จะมีการเทคนิคและวิธีการที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากมอเตอร์ BLDC ไม่มีแปลงถ่านและ คอมมิวเตเตอร์ที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนแปลงขั้วของแม่เหล็ก แต่เปลี่ยนเป็นเซนเซอร์แบบ Hall effect การจ่ายพลังงานเพื่อให้มอเตอร์หมุน ต้องทราบตำแหน่งของโรเตอร์โดยการวัดจาก Hall effect เซนเซอร์ โครงสร้างภายในของมอเตอร์ BLDC สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 8

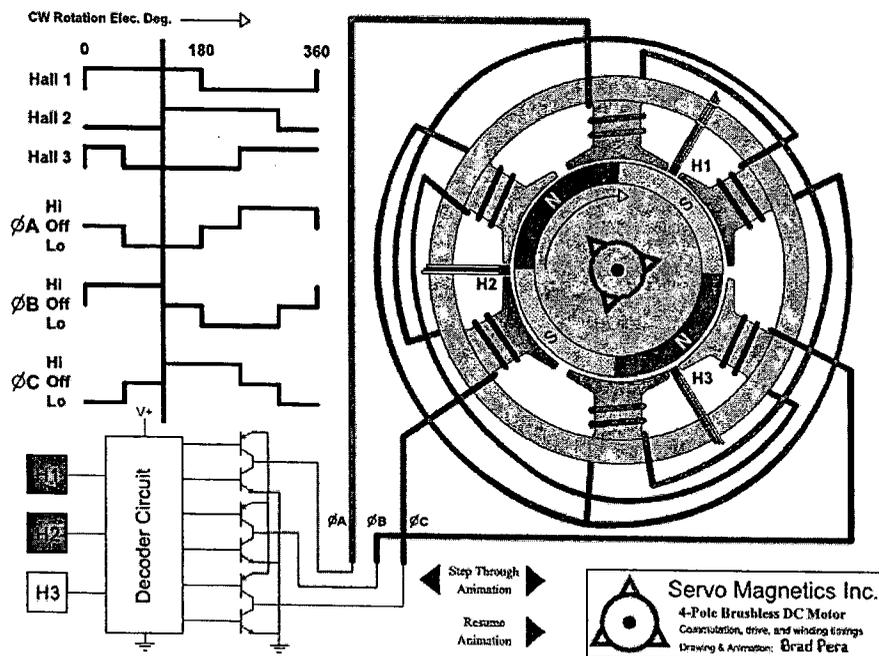


ภาพที่ 8 โครงสร้างภายในของมอเตอร์ BLDC

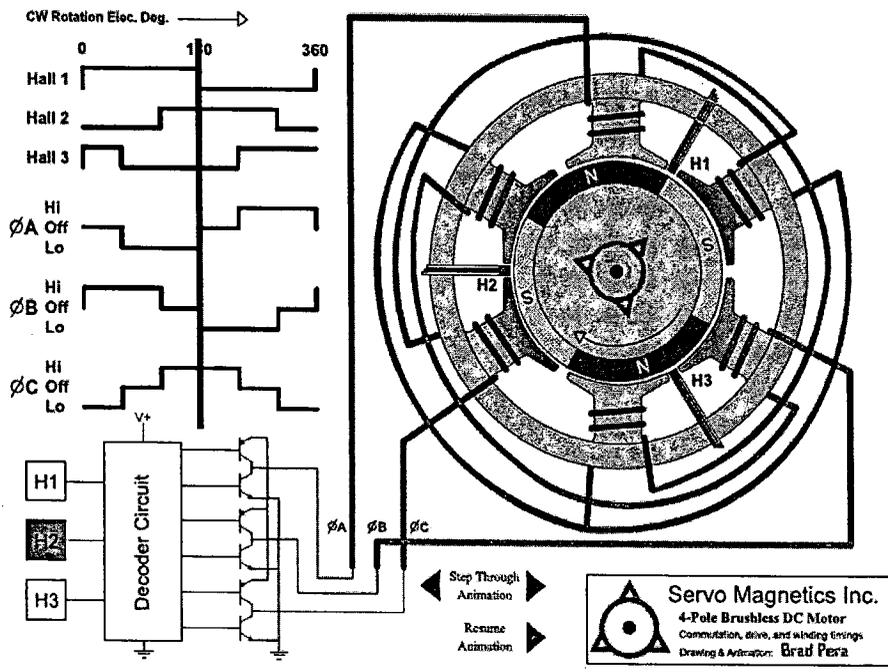
จากรูปการจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ BLDC ประกอบด้วย 3 เฟสคือ เฟส A (Phase A), เฟส B (Phase B) และเฟส C (Phase C) การควบคุมการจ่ายเริ่มจากเซนเซอร์ Hall effect 3 ตัว ตรวจสอบ รับสัญญาณสนามแม่เหล็กขั้วได้ ดังแสดงในรูป Hall (H1) กำลังทำงานเนื่องจากรับสัญญาณ แม่เหล็กขั้วได้ ดังนั้นสามารถแบ่งจังหวะการทำงานของ Hall เซนเซอร์ได้ทั้งหมด 6 จังหวะดังภาพ ที่ 9



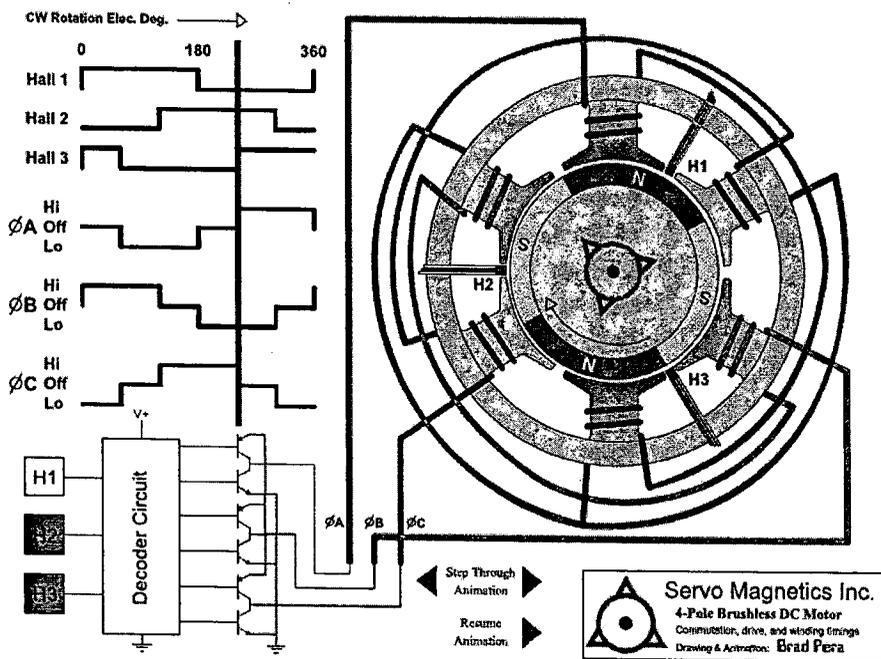
(ก) Hall (H1) ทำงานจ่ายพลังงานให้เฟส B



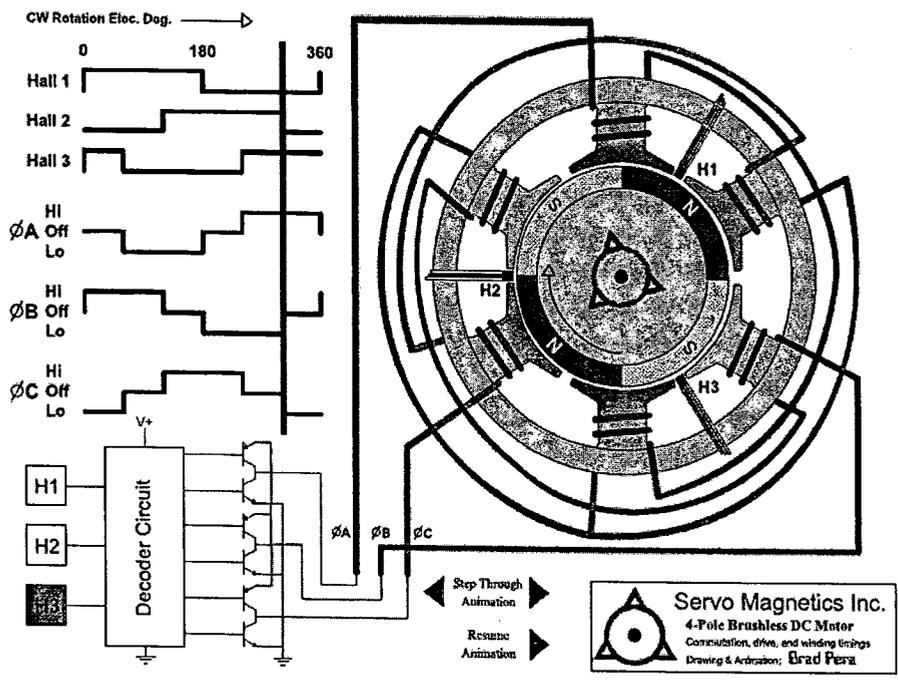
(จ) Hall (H1 และ H2) ทำงานจ่ายพลังงานให้เฟส C



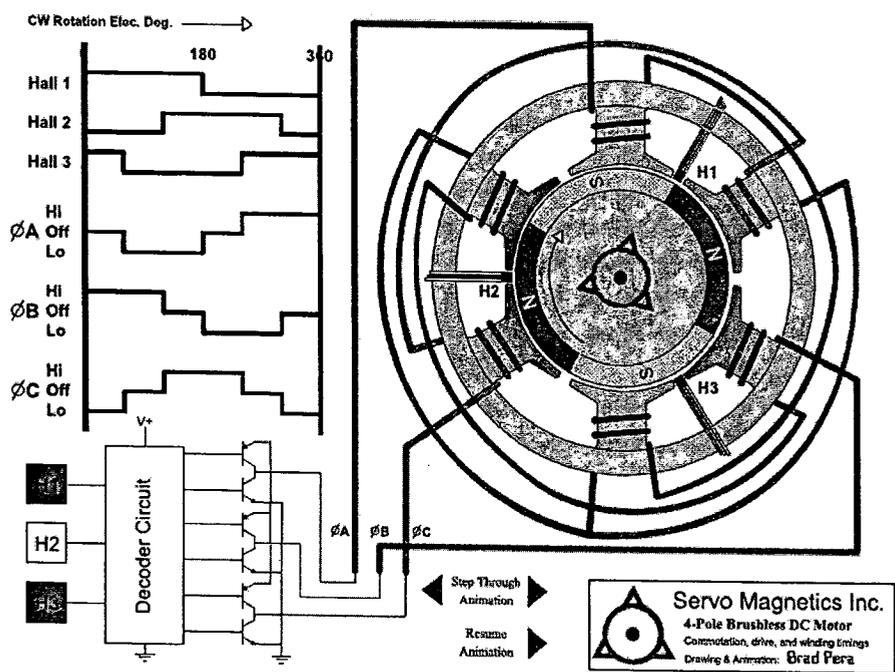
(ค) Hall (H2) ทำงานจ่ายพลังงานให้เฟส C



(ง) Hall (H2 และ H3) ทำงานจ่ายพลังงานให้เฟส A



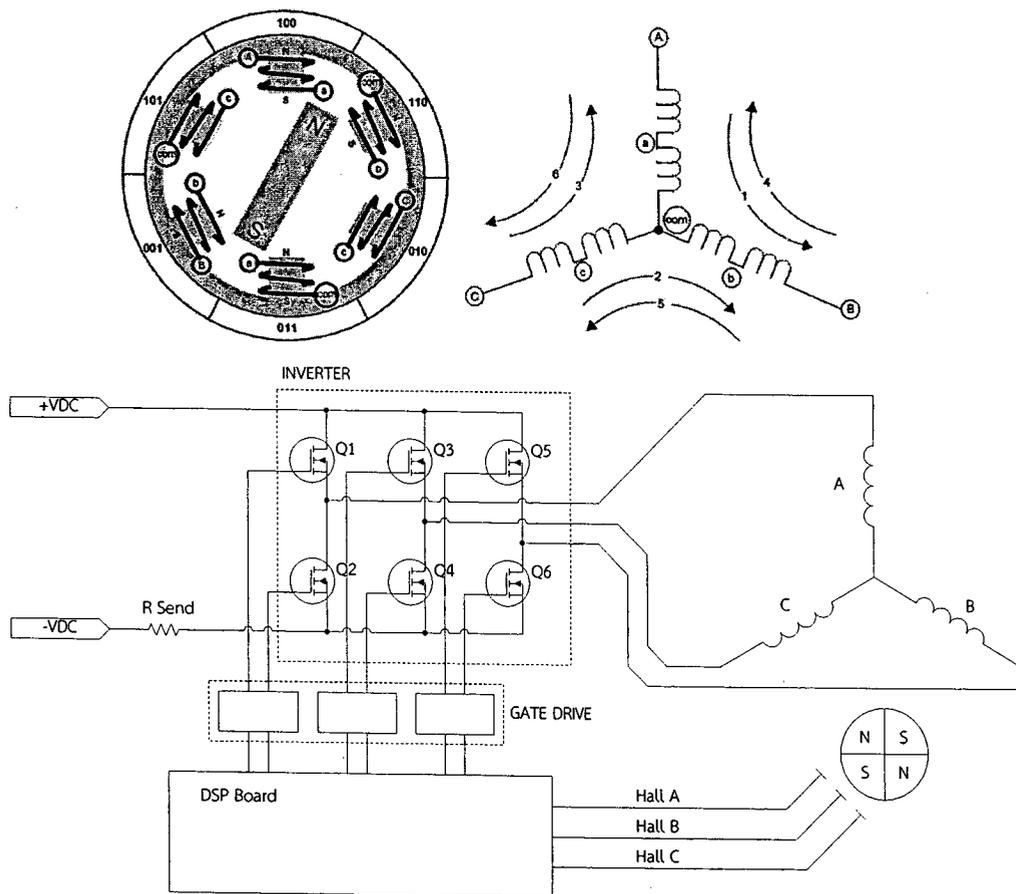
(จ) Hall (H3) ทำงานจ่ายพลังงานให้เฟส A



(ฉ) Hall (H3 และ H1) ทำงานจ่ายพลังงานให้เฟส B

ภาพที่ 9 จังหวะการทำงานของ Hall เซนเซอร์ทั้ง 3 ตัวและการจ่ายพลังงาน

จากรูปแสดงให้เห็นถึงหลักการทำงานของมอเตอร์ BLDC ที่มอเตอร์สามารถหมุนไปในทิศทางที่ต้องการ ในการปฏิบัติงานจริงวงจรการขับเคลื่อนของมอเตอร์ BLDC มีส่วนประกอบดังแสดงในภาพที่ 10



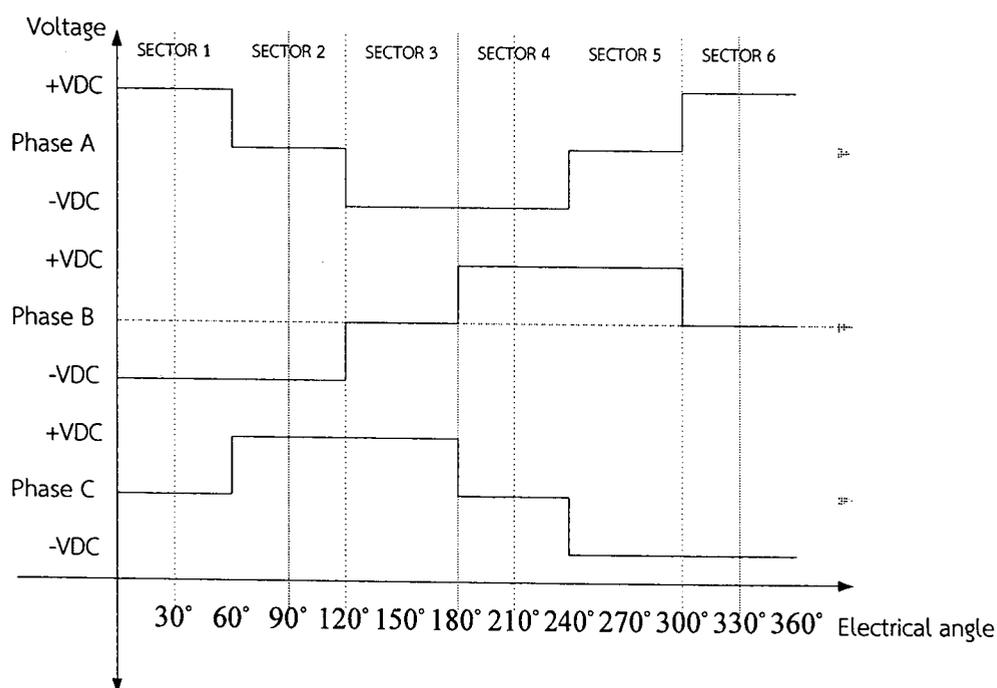
ภาพที่ 10 ส่วนประกอบของวงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์ BLDC เมื่อปฏิบัติงานจริง

จากรูปวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ BLDC ประกอบด้วย อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส, บอร์ดควบคุม (DSP, Microcontroller or Microprocessor ฯลฯ) และวงจรขับเคลื่อน (Gate Drive) ซึ่งอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่ในการ ON/OFF การจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังขดลวดของมอเตอร์ สามารถอธิบายการทำงานของสวิตช์แต่ละตัวตามการทำงานของ Hall เซนเซอร์ได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 จังหวะการทำงานของ Hall effect เซนเซอร์และการทำงานของสวิตช์เพื่อจ่ายพลังงาน

Sector	Hall Sensor Input			Active Switch		Phase Current		
	Hall A	Hall B	Hall C			A	B	C
1 (60)	1	0	0	Q1	Q6	+VDC	-VDC	NC
2 (120)	1	0	1	Q3	Q6	NC	-VDC	+VDC
3 (180)	0	0	1	Q3	Q2	-VDC	NC	+VDC
4 (240)	0	1	1	Q5	Q2	-VDC	+VDC	NC
5 (300)	0	1	0	Q5	Q4	NC	+VDC	-VDC
6 (360)	1	1	0	Q1	Q4	+VDC	NC	-VDC

สามารถวาดสัญญาณรูปคลื่นการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับแต่ละเฟสของมอเตอร์ BLDC ได้ ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 รูปคลื่นของแรงดันในแต่ละจังหวะการจ่ายพลังงานไฟฟ้า

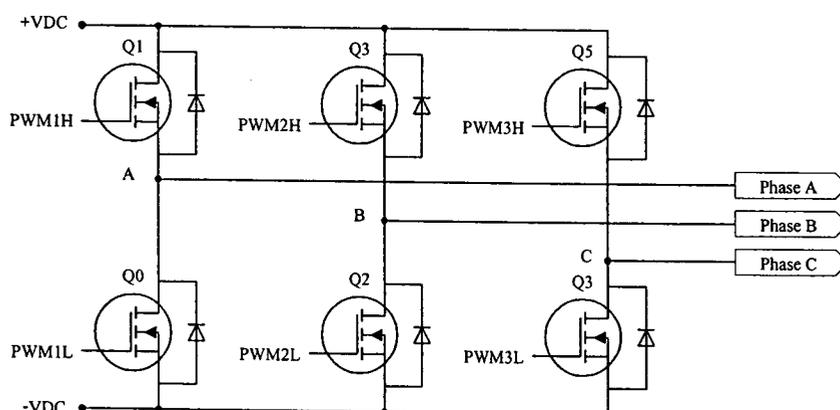
เมื่อทราบถึงจังหวะการทำงานของมอเตอร์ทำให้สามารถออกแบบระบบควบคุมการทำงานของมอเตอร์ BLDC ได้ จะเห็นว่าการทำงานของมอเตอร์ BLDC นั้นค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้นระบบควบคุมที่ใช้จะต้องสามารถตอบสนองต่อการออกแบบได้

### 2.3 อินเวอร์เตอร์และเทคนิคการสร้างสัญญาณพัลส์วิธึมอดูละชั้น (PWM)

อินเวอร์เตอร์ที่กล่าวถึงเป็นแบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source) โดยการกำเนิดแรงดันที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ในแต่ละเฟส ทำได้โดยการสวิตช์อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ซึ่งอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น ไอจีบีที (IGBT) เป็นต้น ดังนั้นรูปแบบการสวิตช์อินเวอร์เตอร์นั้นขึ้นอยู่กับค่าที่คำนวณเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม โดยใช้เทคนิคการสวิตช์แบบสเปซเวกเตอร์มอดูละชั้น (SVM)

#### 2.3.1 ระบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

การแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับให้กับโหลดสามเฟส นิยมแปลงผันผ่านอินเวอร์เตอร์สามเฟสซึ่งเหมาะกับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง เพราะถ้าหากจะใช้อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟลูบริดจ์จำนวน 3 ชุดได้ แต่ต้องใช้สวิตช์จำนวนถึง 12 ตัว นอกจากนี้ยังต้องอาศัยวงจรควบคุมที่ทำให้แต่ละเฟสต่างกัน 120 องศาของความถี่หลักมูล จึงไม่เหมาะที่จะเลือกใช้อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟลูบริดจ์สามตัว จึงมีการพัฒนาอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสขึ้นมาที่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออกได้ทั้งขนาดและความถี่เช่นในภาพที่ 12 จะเห็นว่ามีสวิตช์และไดโอดจำนวนอย่างละ 6 ตัว และประกอบด้วยสามกิ่งหรือสามเฟส



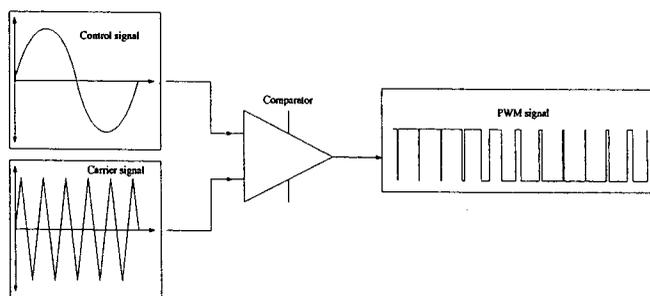
ภาพที่ 12 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

หลักการการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามเฟสในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสนั้น จะมีการสร้างสัญญาณในการควบคุมการทำงานของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ (MOSFET หรือ

IGBT) แต่ละตัว สัญญาณที่สร้างขึ้นนั้นจะเป็นแบบพีคดับเบิลยูเอ็ม Pulse with Modulation (PWM) เพื่อลดสัญญาณฮาร์มอนิก (Harmonic) ในระบบ เทคนิคและวิธีการสร้างสัญญาณแบบพีคดับเบิลยูเอ็มนั้นมีอยู่หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้มากในปัจจุบันในงานที่เกี่ยวข้องกับการขับเคลื่อนทางไฟฟ้ามีอยู่ 2 วิธี คือ เทคนิคการมอดูเลชันรูปคลื่นไซน์ (SPWM) และเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชัน (SVPWM)

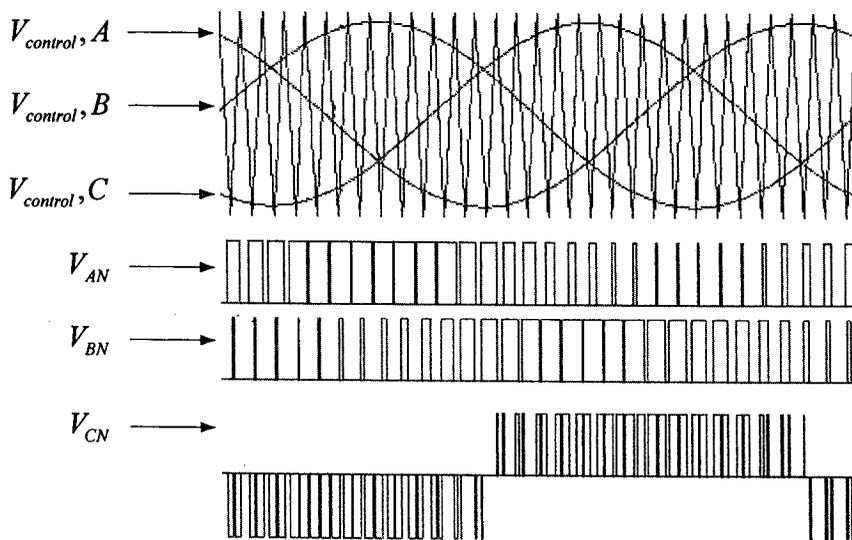
### 2.3.2 การสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มด้วยเทคนิคมอดูเลชันรูปคลื่นไซน์ (SPWM)

การสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มด้วยเทคนิค SPWM ถือได้ว่าเป็นวิธีการพื้นฐานในการสร้างสัญญาณแบบพีคดับเบิลยูเอ็มในอินเวอร์เตอร์สามเฟส เนื่องจากมีหลักการในการสร้างที่ง่ายและไม่ซับซ้อน ซึ่งหลักการในการสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มด้วยเทคนิคมอดูเลชันรูปคลื่นไซน์ แสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 หลักการสร้างสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันด้วยเทคนิคมอดูเลชันรูปคลื่นไซน์

จากรูปหลักการในการสร้างสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันด้วยเทคนิคมอดูเลชันรูปคลื่นไซน์ (SPWM) กระทำโดยการนำสัญญาณสองสัญญาณมาทำการเปรียบเทียบกันประกอบด้วยสัญญาณสามเหลี่ยมเรียกว่าสัญญาณ (Carrier signal) และสัญญาณรูปคลื่นไซน์เรียกว่าสัญญาณ (Control signal) สำหรับอินเวอร์เตอร์สามเฟสนั้นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ใช้มีทั้งหมด 3 สัญญาณและแต่ละสัญญาณมีมุมต่างเฟสกัน 120 องศา ดังภาพที่ 2.14 เพื่อสร้างสัญญาณสามเฟสแบบพีคดับเบิลยูเอ็ม จากรูปค่าแอมปริจูดระหว่างสัญญาณรูปคลื่นไซน์และสัญญาณสามเหลี่ยมนั้นจะมีค่าเท่ากัน แต่ความถี่ระหว่างสองสัญญาณนั้นจะมีค่าไม่เท่ากันคือ ค่าความถี่ของสัญญาณรูปคลื่นไซน์นั้นจะมีค่าอยู่ในช่วงที่ใช้งานกับโหลดที่นำมาใช้งาน หรือกำหนดตามค่าความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ใช้งานในภูมิภาคนั้นๆ เช่นในประเทศไทยค่าความถี่ของระบบไฟฟ้ามีค่าความถี่อยู่ที่ 50 เฮิร์ตซ์ ในส่วนค่าความถี่ของสัญญาณรูปคลื่นสามมนั้นจะเป็นตัวกำหนดสัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 14 การมอดูเลชันสัญญาณเพื่อสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มสามเฟส

ในการสร้างสัญญาณ PWM นั้นเป้าหมายคือต้องการที่จะปรับเปลี่ยนปริมาณของแรงดัน และความถี่ของแหล่งจ่ายที่จ่ายให้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้า ในการปรับปริมาณของแรงดัน และความถี่ของแหล่งจ่ายนั้นสามารถทำได้โดยการอัตราส่วนของ  $m_a$  และ  $m_f$  โดยที่  $m_a$  คืออัตราส่วนระหว่างขนาดแรงดันของสัญญาณรูปคลื่นไซน์ และสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม ดังสมการ

$$m_a = \frac{V_{control}}{V_{tri}} \quad (2.1)$$

โดยที่  $V_{control}$  คือค่าสูงสุดของสัญญาณรูปคลื่นไซน์ และ  $V_{tri}$  คือค่าสูงสุดของสัญญาณสามเหลี่ยม และ  $m_f$  คืออัตราส่วนระหว่างความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยม และสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ดังสมการ

$$m_f = \frac{f_{carrier}}{f_{control}} \quad (2.2)$$

โดยที่  $f_{carrier}$  คือค่าความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยม และ  $f_{control}$  คือค่าความถี่ของสัญญาณรูปคลื่นไซน์

ในการปรับเปลี่ยนขนาดของแรงดันหรือความถี่นั้นจะกระทำเฉพาะสัญญาณรูปคลื่นไซน์เท่านั้น ในส่วนของสัญญาณสามเหลี่ยมนั้นจะไม่มีปรับเปลี่ยน ในการกำหนดค่าขนาดของสัญญาณในสมการที่ 2.1 นั้นจะต้องกำหนดให้  $m_a$  นั้นมีค่าอยู่ในช่วง  $m_a \leq 1$  เนื่องจากเป็นช่วงที่อินเวอร์เตอร์

ทำงานในย่านมอดูเลชันเชิงเส้น ในย่านเชิงเส้นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูลในหนึ่งเฟสจะมีค่า ดังสมการ

$$(V_{AN})_1 = m_a \cdot \frac{V_d}{2} \quad (2.3)$$

โดยที่  $V_d$  คือแรงดันเชื่อมโยกระแสตรง

ในส่วนของแรงดัน  $V_{L-to-L}$  หรือ  $V_{AB}$  นั้นจะมีค่าตามสมการ

$$V_{L-to-L} = V_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} (V_{AN})_1 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot m_a \cdot \frac{V_d}{2} = 0.612 \cdot m_a \cdot V_d \quad (2.4)$$

ความหมายของการทำงานในย่านเชิงเส้น ตัวอย่างเช่น หากจ่ายแรงดันเชื่อมโยง 311 โวลต์ เมื่อปรับ  $m_a = 0.5$  จะได้แรงดันจะได้แรงดันเท่ากับ  $0.612 \times 0.5 \times 311 = 95.17$  โวลต์ การกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยม  $f_{carrier}$  นั้นจะคำนึงถึงการเกิดฮาร์โมนิกของแรงดันด้านออก ซึ่งการกำหนดค่าความถี่นั้นจะสามารถกำหนดการเกิดของฮาร์โมนิกได้ โดยจะกำหนดให้เกิดห่างจากค่าความถี่หลักมูล เพื่อจ่ายต่อการสร้างวงจรกรองฮาร์โมนิก การเกิดของฮาร์โมนิกจะเป็นฮาร์โมนิกเลขคี่เกิดขึ้นที่ไซด์แบนของ  $m_f$  และจำนวนเท่าของ  $m_f$  และผลจากค่าของแรงดัน  $V_{AN}$ ,  $V_{BN}$  และ  $V_{CN}$  นั้นมีเฟสต่างกัน 120 องศา ส่งผลให้เฟสจะเท่ากันทุกๆ  $3 m_f$  ทำให้แรงดันไฟฟ้าจะไม่มีฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 หารลงตัว เช่น 3, 9, 15, 21 เป็นต้น นอกจากนี้สำหรับในกรณีแรงดันเฟสที่มีโพลสมดุล ค่าแรงดันระหว่างสายจะไม่มีฮาร์โมนิกเลขคู่ เช่น ฮาร์โมนิก 2, 4, 6, 8 เป็นต้น สามารถสรุปประเด็นสำคัญของอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีการสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มด้วยเทคนิค SPWM ได้ดังนี้

- ที่ค่า  $m_f \leq 21$  หากต้องการกำจัดฮาร์โมนิกเลขคู่จะต้องใช้การสวิทซ์ซึ่งแบบพีคดับเบิลยูเอ็มที่ซิงโครไนส์ หมายถึง  $m_f$  จะต้องเป็นจำนวนเต็มและความถี่หลักมูลจะเริ่มและจบคาบพร้อมกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม และ  $m_f$  ต้องเป็นจำนวนเลขคี่

- ที่ค่า  $m_f \geq 21$  ฮาร์โมนิกย่อยที่เกิดขึ้นจากการสวิทซ์ซึ่งแบบพีคดับเบิลยูเอ็มที่ไม่ซิงโครไนส์ ( $m_f$  ไม่เป็นจำนวนเต็ม) จะมีค่าน้อย แต่ต้องตระหนักว่าควรหลีกเลี่ยงการสวิทซ์ซึ่งแบบพีคดับเบิลยูเอ็มแบบไม่ซิงโครไนส์ เพราะจะทำให้เกิดฮาร์โมนิกย่อยใกล้กับความถี่หลักมูล

- ที่ค่า  $m_a > 1$  หากไม่พิจารณาค่าของ  $m_f$  จะมีผลเช่นเดียวกับกรณีที่ 1

ทั้งหมดที่กล่าวในข้างต้นคือหลักการที่เกี่ยวข้องการสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มด้วยเทคนิคการมอดูเลชันรูปคลื่นไซน์ ซึ่งเห็นว่าการสร้างสัญญาณด้วยหลักการดังกล่าวนี้มีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน และง่ายต่อการสร้างเพื่อใช้งาน แต่จากสมการที่ 2.4 จะเห็นว่าการสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มด้วยเทคนิคมอดูเลชันรูปคลื่นไซน์นั้นแรงดันด้านออกจะมีค่าน้อย และในการสร้างสัญญาณ

สามเหลี่ยมนั้นอาจเกิดกรณีที่ไมซิงโครไนส์ อันเนื่องมาจากกระบวนการทำงานของฮาร์ดแวร์ จึงอาจก่อให้เกิดปัญหาเรื่องของฮาร์มอนิกย่อยที่เกิดขึ้นใกล้กับความถี่หลักมูล จากปัญหาดังกล่าวจึงมีการคิดค้นเทคนิคการสวิตช์ในรูปแบบใหม่โดยจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

### 2.3.3 การสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชัน (SVM)

การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชัน (SVM) นั้นจัดเป็นเทคนิคการมอดูเลชันขั้นสูงสำหรับอินเวอร์เตอร์สามเฟส และเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่เป็นที่นิยมในการขับเคลื่อนทางไฟฟ้า เนื่องจากการสร้างสัญญาณด้วยเทคนิคดังกล่าวเป็นการใช้หลักการจากการหมุนของสนามแม่เหล็กภายในเครื่องกลไฟฟ้าแบบหมุน ข้อดีในการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชันประกอบด้วย

- ให้ช่วงความถี่มอดูเลชันกว้าง ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับวิธี PWM แบบ Third-harmonic injection

- ให้ Harmonics ต่ำกว่า PWM มาตรฐาน (SPWM)

- ให้แรงดันเอาต์พุตสูงกว่าวิธีมอดูเลชันพื้นฐาน SPWM โดยประมาณ 15%

- ให้ประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อใช้กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง

- SVM มีแรงดันเอาต์พุตมากกว่าแบบ SPWM โดยปราศจากผลการลดทอนของสัญญาณแรงดันระหว่างสาย

- การประยุกต์ใช้งานง่าย และสัญญาณมอดูเลชันมีความแน่นอนกว่า SPWM

- ให้ประสิทธิภาพสูง

- สามารถป้องกันไม่ให้เกิดการสวิตช์โดยไม่จำเป็นได้

ข้อดีทั้งหมดที่กล่าวมาเกิดจากการทดลองใช้งานกับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก ในการที่จะทำให้เข้าใจถึงกระบวนการในการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มด้วยเทคนิค SVM นั้น จะต้องเข้าใจถึงหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหมุน

#### 1. หลักการของสเปซเวกเตอร์มอดูเลชัน (SVM)

หลักการในการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยการใช้นิยามของเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชันนั้น มาจากการศึกษาเกี่ยวกับการขับเคลื่อนขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก การหมุนของมอเตอร์นั้นจะใช้หลักการของสนามแม่เหล็กหมุน หากนำสมการของมอเตอร์เหนี่ยวนำมาพิจารณาแล้วจะเห็นว่า การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนนั้นมาจากการจ่ายแรงดันสามเฟสเข้าไปยังสเตเตอร์ภายในสเตเตอร์นั้นประกอบด้วยขดลวด เมื่อจ่ายแรงดันเข้าไปในขดลวดจะเกิดกระแสจากผลของไหลที่เป็น ความต้านทาน  $R$  และตัวเหนี่ยวนำ  $L$  สร้างสนามแม่เหล็กขึ้นในช่องว่างอากาศ (Air gap) สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเป็นสนามแม่เหล็กหมุนที่มีความเร็วตามสมการ  $2\omega/p$  เมื่อ

$\omega = 2\pi f$  และ  $p$  คือจำนวนขั้ว (Pole) สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดในช่องว่างอากาศจะทำให้โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเกิดการหมุน เกิดการเคลื่อนที่ตัดกันระหว่างตัวนำของโรเตอร์ และสนามแม่เหล็กหมุนทำให้เกิดแรงดันขึ้นในโรเตอร์ แรงดันที่เกิดในโรเตอร์จะส่งผลให้เกิดกระแสไหลในโรเตอร์ กระแสดังกล่าวก็จะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมา สนามแม่เหล็กทั้งสองที่เกิดขึ้นจะต้านกันทำให้เกิดแรงบิดตัวของโรเตอร์ให้หมุนไปในทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุน หลักการทั้งหมดที่กล่าวมานั้นเป็นหลักการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก จากหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถอธิบายเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ เริ่มจากสมการของแรงดันที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ของมอเตอร์ ดังสมการ

$$\begin{aligned} V_a &= V_m \sin(\omega t) \\ V_b &= V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c &= V_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (2.4)$$

จากสมการที่ 2.4 แรงดันที่จ่ายให้กับขดลวดของสเตเตอร์นั้นเป็นแรงดันที่มีความต่างเฟสกัน 120 องศาทางไฟฟ้า ในการวิเคราะห์เกี่ยวกับสมการของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสนั้น จะทำการวิเคราะห์เหมือนกับเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากง่ายต่อการคำนวณและการควบคุม ดังนั้นจะต้องทำการทรานส์ฟอร์มแรงดันสามเฟสให้เป็นแรงดันสองเฟส โดยการใช้ Clarke Transform การแปลงจากสามแกน  $abc$  ให้เป็นสองแกน  $\alpha\beta$  ใช้สมการดังนี้

$$\vec{V}_s^{(S)} = V_\alpha + jV_\beta = \frac{2}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c); \quad a \text{ คือ Unit vector} \quad (2.5)$$

$$\text{โดยที่ } a = 1.e^{j\frac{2\pi}{3}} = \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + j\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \text{ และ } a^2 = 1.e^{j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

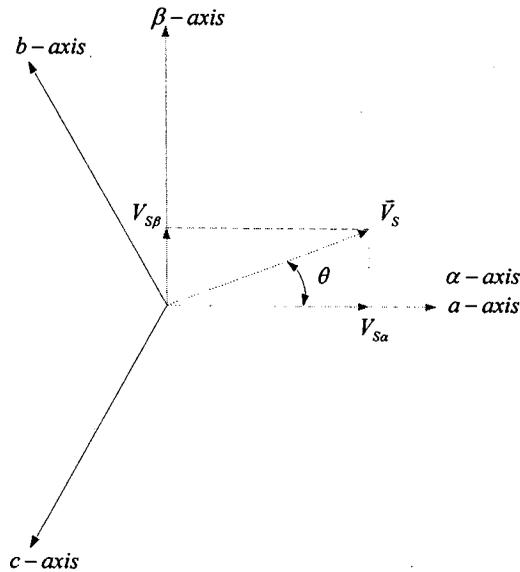
นำค่าของ  $a$  และ  $a^2$  แทนในสมการที่ 2.5 จะได้ตามสมการ

$$\vec{V}_s^{(S)} = V_\alpha + jV_\beta = \frac{2}{3}\left(V_a + \frac{1}{2} \cdot V_b + j\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_b - \frac{1}{2} \cdot V_c - j\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_c\right) \quad (2.6)$$

ทำการแยกส่วนของจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพจะได้ค่าของ  $V_\alpha$  และ  $V_\beta$  ตามสมการ

$$\begin{aligned} V_{S\alpha} &= \frac{2}{3} \left( V_a - \frac{1}{2} \cdot V_b - \frac{1}{2} \cdot V_c \right) \\ V_{S\beta} &= \frac{2}{3} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_b - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_c \right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

จากการคำนวณเพื่อการแปลงจากสามแกน  $abc$  เป็นสองแกน  $\alpha\beta$  สามารถเขียนเป็นเวกเตอร์ไคอะแกรมได้ดังภาพที่ 2.15



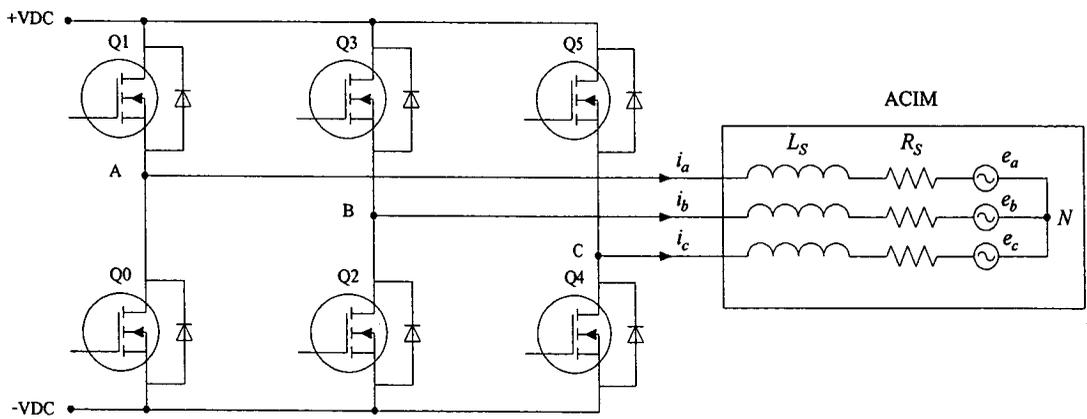
ภาพที่ 15 เวกเตอร์ไคอะแกรมการแปลง 3 แกนเป็น 2 แกน

จากรูปจะเห็นว่าเมื่อทำการแปลงจากสามแกนเป็นสองแกนแล้วผลรวมทางเวกเตอร์ของแกน  $\alpha$  และ  $\beta$  ในแต่ละช่วงเวลานั้นจะเกิดเวกเตอร์  $\vec{V}_s$  ขึ้นมา ซึ่งเวกเตอร์ดังกล่าวนี้จะหมุนเป็นวงกลมทุกๆการเปลี่ยนแปลงของ  $\theta$  การเกิดของเวกเตอร์ดังกล่าวนี้เป็นที่มาของหลักการในการสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชัน โดย  $\vec{V}_s$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8 และมุม  $\theta$  คำนวณได้จากสมการที่ 2.9

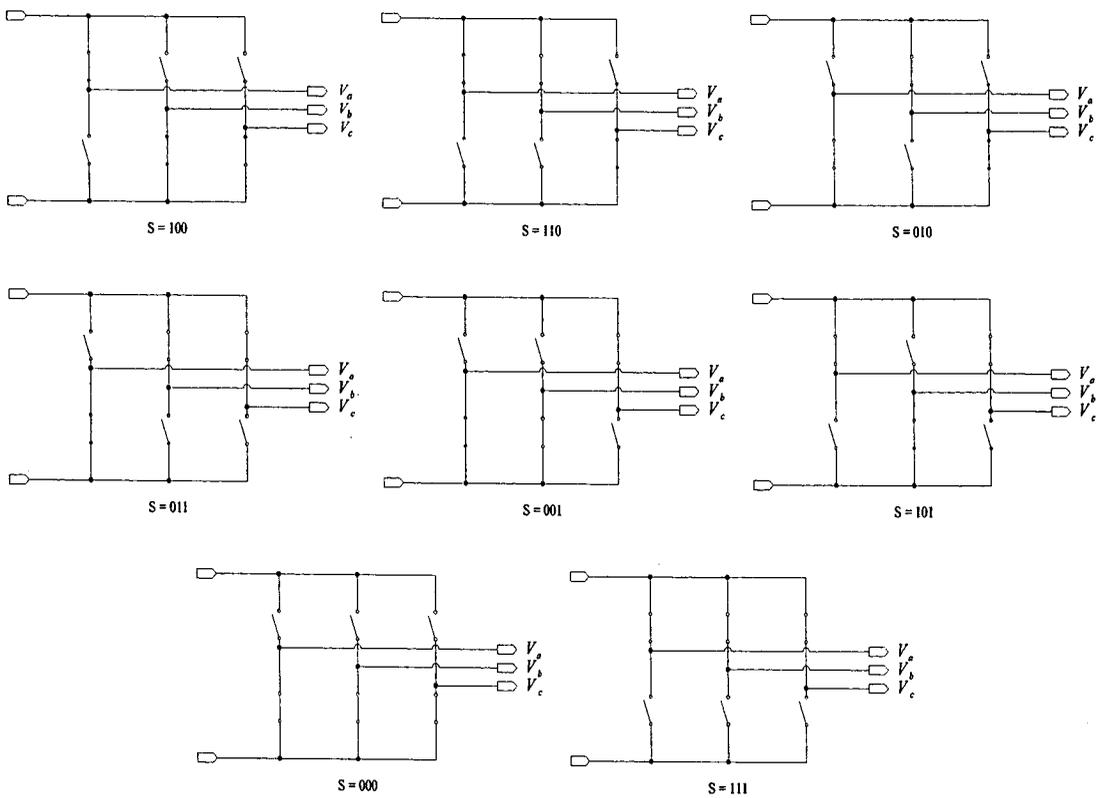
$$\vec{V}_s = \sqrt{V_{S\alpha}^2 + V_{S\beta}^2} \quad (2.8)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{V_{S\beta}}{V_{S\alpha}} \right) \quad (2.9)$$

ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นจะต้องใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟสดังภาพที่ 16 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์นั้นสามแบ่งการสวิตช์ออกเป็น 8 สถานะดังแสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 16 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส



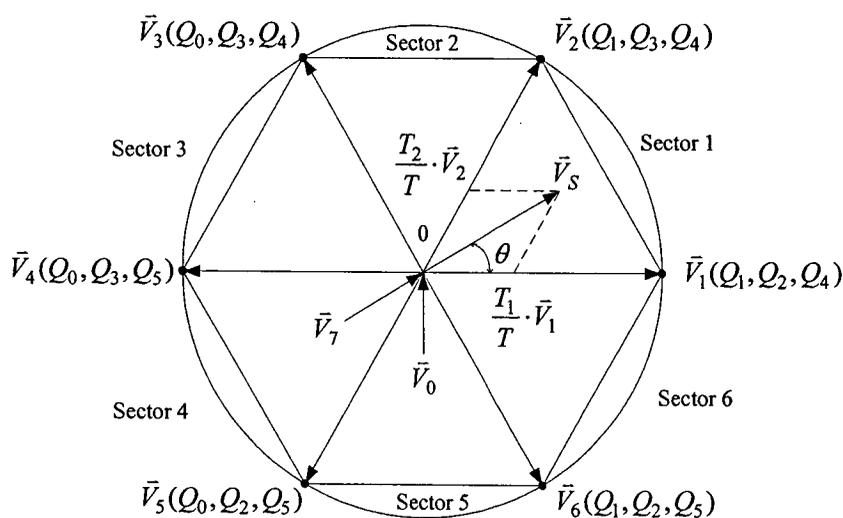
ภาพที่ 17 สถานะในการทำงานของสวิตช์ทั้ง 8 สถานะ

จากรูปสามารถนำมาเขียนตารางแสดงเซกเตอร์ทำงานของสวิตช์ได้ดังตารางที่ 2.3 การทำงานของสวิตช์นั้นจะคิดเพียง 6 เซกเตอร์เท่านั้นเนื่องจากเซกเตอร์ที่ S = 000 และ S = 111 นั้นจะไม่มีแรงดันทางด้านเอาต์พุต

ตารางที่ 2.3 เซกเตอร์การทำงานของสวิตช์ทั้ง 8 สถานะ

เซกเตอร์ของ สวิตช์	สวิตช์ที่ทำงาน	$V_{AN}$	$V_{BN}$	$V_{CN}$	เวกเตอร์ของ แรงดัน
000	$Q_0, Q_2, Q_4$	0	0	0	$\vec{V}_0$
100	$Q_1, Q_2, Q_4$	$\frac{2}{3}V_{DC}$	$-\frac{1}{3}V_{DC}$	$-\frac{1}{3}V_{DC}$	$\vec{V}_1$
110	$Q_1, Q_3, Q_4$	$\frac{1}{3}V_{DC}$	$\frac{1}{3}V_{DC}$	$-\frac{2}{3}V_{DC}$	$\vec{V}_2$
010	$Q_0, Q_3, Q_4$	$-\frac{1}{3}V_{DC}$	$\frac{2}{3}V_{DC}$	$-\frac{1}{3}V_{DC}$	$\vec{V}_3$
011	$Q_0, Q_3, Q_5$	$-\frac{2}{3}V_{DC}$	$\frac{1}{3}V_{DC}$	$\frac{1}{3}V_{DC}$	$\vec{V}_4$
001	$Q_0, Q_2, Q_5$	$-\frac{1}{3}V_{DC}$	$-\frac{1}{3}V_{DC}$	$\frac{2}{3}V_{DC}$	$\vec{V}_5$
101	$Q_1, Q_2, Q_5$	$\frac{1}{3}V_{DC}$	$-\frac{2}{3}V_{DC}$	$\frac{1}{3}V_{DC}$	$\vec{V}_6$
111	$Q_1, Q_3, Q_5$	0	0	0	$\vec{V}_7$

จากตารางที่ 2.3 สามารถนำมาเขียนเป็นเวกเตอร์โคออร์ดิเนตของแรงดันทั้ง 8 เซกเตอร์ได้ดังภาพที่ 18 เพื่อเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์  $\vec{V}_s$  ในแต่ละเซกเตอร์การทำงานของสวิตช์



ภาพที่ 18 เวกเตอร์โคออร์ดิเนตของแรงดันในแต่ละเซกเตอร์การทำงานของสวิตช์

## 2. ขั้นตอนในการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มด้วยเทคนิค SVM

ขั้นตอนในการดำเนินการเพื่อสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มด้วยเทคนิค SVM สามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาค่าของ  $\vec{V}_s$  และมุม  $\theta$  ในการคำนวณค่า  $\vec{V}_s$  และมุม  $\theta$  เพื่อทราบถึงสถานะของการสวิตช์ ขั้นตอนในการหา  $\vec{V}_s$  นั้น มีหลายรายงานการวิจัยที่นำเสนอวิธีการในการหาค่า ซึ่งสามารถสรุปวิธีการหาได้สองวิธีคือ

วิธีที่ 1 วิธีการคำนวณโดยใช้สมการจากการแปลงสามแกนเป็นสองแกน เริ่มจากการหา  $V_{s\alpha}$  และ  $V_{s\beta}$  และทำการหา  $\theta$  จากผลของ  $V_{s\alpha}$  และ  $V_{s\beta}$  ที่ได้ โดยมีขั้นตอนดังนี้

$$\begin{aligned} V_{s\alpha} &= \frac{2}{3} \left( V_a - \frac{1}{2} \cdot V_b - \frac{1}{2} \cdot V_c \right) \\ V_{s\beta} &= \frac{2}{3} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_b - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_c \right) \end{aligned} \quad (2.10)$$

เขียนเป็นเมทริกซ์

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\vec{V}_s = \sqrt{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} \quad (2.12)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{V_{s\beta}}{V_{s\alpha}} \right) \quad (2.13)$$

วิธีที่ 2 พิจารณาจากการเกิดของเวกเตอร์  $\vec{V}_s$  ดังภาพที่ 14 จากรูปเป็นการพิจารณาใน Sector ที่ 1 สามารถหาเวกเตอร์  $\vec{V}_s$  ได้จากสมการที่ 2.14

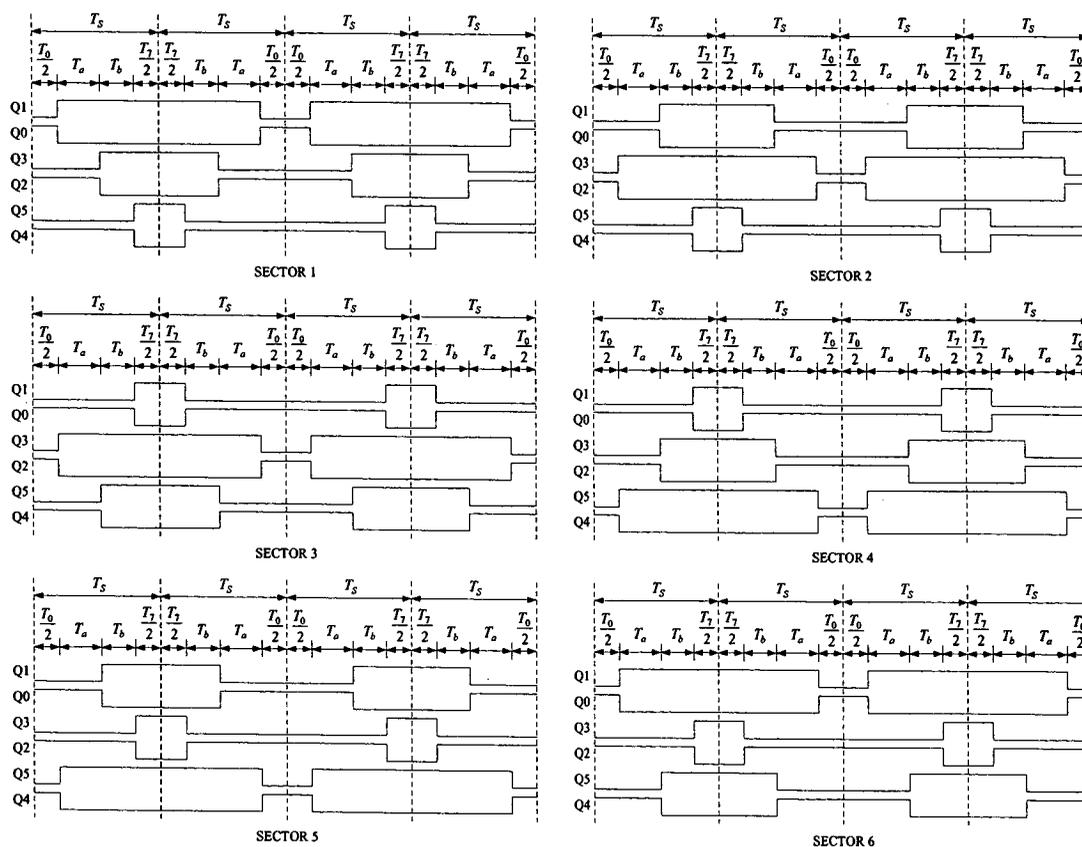
$$\vec{V}_s = \left( \frac{T_a}{T_s} \times \vec{V}_1 \right) + \left( \frac{T_b}{T_s} \times \vec{V}_2 \right) + \left( \frac{T_{0/17}}{T_s} \times \vec{V}_{0/17} \right) \quad (2.14)$$

โดยที่  $T_s$  คือ Sample time มีค่าเท่ากับ  $T_s = \frac{1}{F_{PWM}}$  เมื่อ  $F_{PWM}$  คือค่าของความถี่สัญญาณ PWM

จากภาพที่ 18 การทำงานของของสวิตช์นั้นมีการแบ่งออกเป็น 3 ช่วงในหนึ่งคาบเวลาของ  $T_s$  คือ ช่วงที่ 1 คือช่วงเวลาของ  $T_a$  ช่วงที่ 2 คือช่วงเวลาของ  $T_b$  และช่วงที่ 3 คือช่วงเวลาของ  $T_0$  และ  $T_7$  ซึ่งในช่วงที่สามนั้นจะไม่มีแรงดันเอาต์พุต ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า  $T_s = T_a + T_b + T_{0/7}$



ขั้นตอนที่ 3 หาช่วงเวลาการสวิตช์ของสวิตช์แต่ละตัว (Q0 ถึง Q6) รูปสถานะของการสวิตช์ในแต่ละเซกเตอร์แสดงดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 รูปแบบสถานะของการสวิตช์ของแต่ละเซกเตอร์

จากหลักการที่กล่าวมาในข้างต้นนั้นจะเห็นว่าการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยเทคนิค SVM นั้นจะมีกระบวนการในการสร้างที่ซับซ้อนเป็นอย่างมาก ดังนั้นในการสร้างนั้นจะต้องใช้เครื่องมือที่สามารถตอบสนองในเรื่องการคำนวณ เช่น ไมโครโปรเซสเซอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือ DSP เป็นต้น ซึ่งจากการสืบค้นงานวิจัยที่ผ่าน มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างสัญญาณ PWM มากมาย โดยการใช้เครื่องมือที่แตกต่างกัน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

ปัจจุบันมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (BLDC) มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ จึงมีงานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับมอเตอร์ชนิดนี้มากมาย ทั้งในเรื่องการออกแบบระบบการควบคุม และเครื่องมือที่ใช้ในการควบคุม เป็นต้น งานวิจัยที่ผ่านที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยชิ้นนี้มีดังต่อไปนี้

Bogdan Alecsa [5] นำเสนอและกล่าวว่ามอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านนั้น ถูกพบบ่อยในการประยุกต์ใช้กับงานที่มีพลังงานต่ำๆ ความเร็วสูง และความแม่นยำสูง และมอเตอร์ชนิดนี้มีข้อดีหลายประการ งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างระบบควบคุมของ BLDC โดยใช้ Field Programmable Gate Array (FPGA) ซึ่งเป็นระบบที่มีราคาค่อนข้างถูก ผลการทดลองระบบที่สร้างขึ้นสามารถใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านได้

Driss Yousfi [6] งานวิจัยนี้ทำการสร้างชุดทดลองของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน เพื่อใช้ในการเรียนการสอนในสาขาวิชา Power Electronic และ Motor Drive โดยใช้บอร์ด DSP ผลการทดลองนั้นสามารถใช้ในการเรียนการสอนได้จริง

Darko Cvetkovski [7] งานวิจัยนี้นำเสนอการสร้างชุดทดลองของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ดำเนินการโดยใช้ DSP เบอร์ MC56F8322 DSP ของ Freescale ซึ่งทำการออกแบบแผ่น PCB ของวงจรทั้งหมด ผลที่ได้คือสามารถใช้ในการสอนนักศึกษา เพื่อการเรียนรู้ได้

Kiing-Ing, W. and K. A. Silek (2009) ในงานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างระบบควบคุมของมอเตอร์ BLDC โดยมีจุดประสงค์เพื่อ ลดขนาดของวงจร และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผลที่ได้คือ ได้ชุดทดลองเพื่อใช้ในการเรียนการสอนระดับปริญญาตรีใน Curtin University of Technology, Malaysia ในรายวิชา เครื่องจักรกล (Machinery)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ถึงเทคนิควิธีการ รวมถึงเครื่องมือที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ BLDC ซึ่งสามารถนำเทคนิค และวิธีการดังกล่าวมาเป็นแนวทางในการสร้างระบบควบคุมของมอเตอร์ BLDC ได้