

## การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสด้วยเทคนิคสเปสเวกเตอร์ อินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ

### 3 PHASE INDUCTION MOTOR CONTROL WITH 3 LEVEL SPACE VECTOR PULSE INVERTER TECHNIQUE

ณธรรม เกิดสำอางค์, ธีรยุทธ จันทน์แจ่ม, สุธี รุกขพันธุ์ และ อนุชิต เจริญ  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบสร้างอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับแรงดัน สำหรับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยการสร้างสัญญาณสเปสเวกเตอร์ (Space Vector) ร่วมกับสัญญาณ Pulse Width Modulation (PWM) ด้วยชิพเอฟพีจีเอเบอร์ XC2S50-5tq-144 เนื่องจากสามารถโปรแกรมได้ และมีความเร็วในการสร้างสัญญาณการสวิตช์สูง และราคาถูก และส่วนขับเคลื่อนมอเตอร์ใช้ไอซีขับเกตเบอร์ IR2130 ซึ่งมีส่วนป้องกันแรงดันเกินและกระแสลัดวงจร สำหรับสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะมีลักษณะคล้ายซายน์มากขึ้น เป็นผลให้กระแสที่ได้เป็นซายน์มากขึ้น ฮาร์มอนิกส์ของแรงดันและกระแสมีค่าน้อยเป็นผลให้ประสิทธิภาพในการควบคุมมอเตอร์สูงขึ้น และในการออกแบบสัญญาณควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสจะใช้หลักการควบคุมอัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อความถี่ (V/f) ซึ่งสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์โดยให้แรงบิดที่คงตัว

**คำสำคัญ:** อินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ, เอฟพีจีเอ, SVM

#### ABSTRACT

This research is a design of 3 level voltage inverter for controlling 3 phase induction motor. Space Vector(SV) modulated with Pulse Width Modulation(PWM) signal is generated by using FPGA chip XC2S50-5tq-144 because it is programmable and has high frequency to generate switching signal, and also, has low price. Part of motor driving uses of IR2130 three phase bridge driver which has over-voltage and short circuit protection system. With closer sinusoidal output voltage signal results to closer sinusoidal current signal is obtained. Lower harmonics of voltage and current results to higher motor control efficiency. For design of the 3 phase induction motor speed control signal, principle of voltage frequency (V/f) ratio control is used which can control the motor speed to provide constant torque.

**KEYWORDS:** Space Vector Modulation, FPGA, three-level voltage inverter.

## 1. บทนำ

ปัจจุบันวงการอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้มอเตอร์ร่วมกับงานผลิตเป็นหลัก การควบคุมมอเตอร์จึงเข้ามามีบทบาทในงานอุตสาหกรรมมากขึ้นและมีความสำคัญมาก การมีระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพจะช่วยให้การผลิตมีคุณภาพไปแข่งขันในตลาดได้ การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสทางอุตสาหกรรมได้มีการพัฒนาไปอย่างต่อเนื่อง สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานทั่วไปนิยมสร้างอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับแรงดัน ซึ่งพบว่าแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้เป็นชายน และเพื่อให้แรงดันและกระแสเอาต์พุตเป็นชายนมากขึ้นจึงได้เพิ่มระดับของแรงดันมากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมมอเตอร์ให้สูงขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงออกแบบสร้างอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับแรงดัน โดยใช้ชิพเอฟพีจีเอในการสร้างสัญญาณควบคุมมอเตอร์

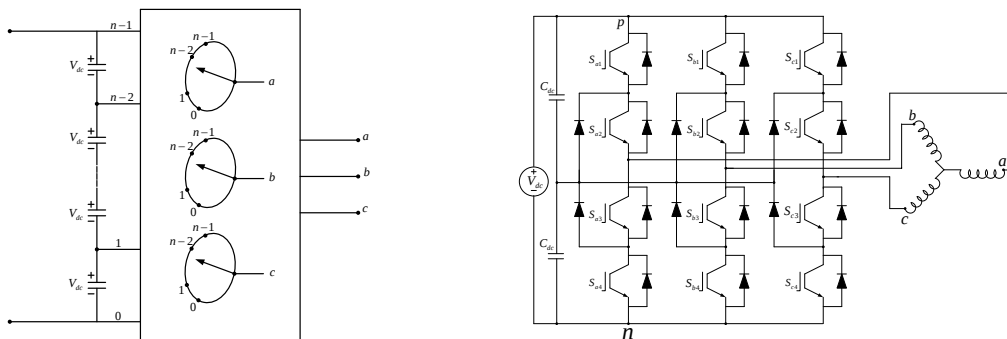
## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 หลักการของการแปลงหลายระดับโดยสเปซเวกเตอร์

การแปลงหลายระดับด้วยใช้สเปซเวกเตอร์ [1 - 3], [5 - 7] คือการสังเคราะห์แรงดัน เพื่อที่จะสร้างแรงดันเอาต์พุตขึ้นมาจากแรงดันหลายระดับ

#### 2.1.1 เวกเตอร์ของการสวิตช์ สถานะของสวิตช์และเวกเตอร์แรงดันอ้างอิง

การสร้างแรงดันขึ้นมาจากแรงดันหลายระดับ จะมีรูปแบบโครงสร้างของการสวิตช์แบบแรงดันหลายระดับดังที่แสดงในรูปที่ 1 (ข)



ก) รูปแบบการสวิตช์แบบแรงดันหลายระดับ      ข) รูปแบบการต่อสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับแรงดัน

รูปที่ 1 สวิตช์แรงดันหลายระดับ และการต่ออินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับแรงดัน

จากรูปที่ 1 (ก) จะเห็นว่าในแต่ละเฟสสามารถที่จะแสดงแทนได้โดยสวิตช์หลายทางแบบ 1 ขั้ว ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสถานะในการสวิตช์ ที่แต่ละเฟสจะสร้างแรงดันไลน์ของ 3 เฟสขึ้นมาได้ ดังแสดงในสมการที่ (1) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงเวกเตอร์ใน 3 มิติของ Euclidean เวกเตอร์สเปซ

$$\bar{V} = [V_{ab} \quad V_{bc} \quad V_{ca}]^T \quad (1)$$

ถ้าตำแหน่งของสวิตช์ในแต่ละเฟส ของเฟส a, b และ c อยู่ในตำแหน่ง i, j และ k ตามลำดับ แล้ว จะทำให้สามารถแสดงสถานะของการสวิตช์ได้ด้วยเวกเตอร์การสวิตช์ นั่นคือ

$$\bar{V}_{ijk} = V_{dc} [i-j \quad j-k \quad k-i]^T \quad (2)$$

เมื่อ  $i, j, k \in [0, n-1]$

การแยกแยะถึงความแตกต่างระหว่างสถานะของการสวิตช์กับเวกเตอร์ของการสวิตช์ค่อนข้างที่จะเป็นส่วนสำคัญ ซึ่งเวกเตอร์ของการสวิตช์ที่แตกต่างกันสามารถที่จะสร้างขึ้นมาได้จากหลายๆ สถานะของการสวิตช์และสถานะของการสวิตช์สามารถที่จะหาได้จากสมการ

$$N_{state} = n^x \quad (3)$$

เมื่อ  $N_{state}$  คือ จำนวนสถานะของการสวิตช์

$n$  คือ ระดับของการแปลง

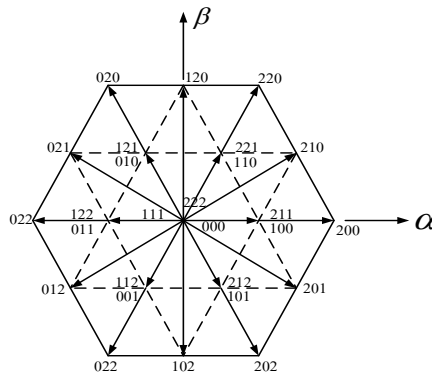
$x$  คือ จำนวนเฟส (  $x = 3$  เมื่อเป็น 3 เฟส)

การสร้างเวกเตอร์ในการสวิตช์สามารถที่จะสร้างได้จากสมการ (4)

$$N_{vector} = 1 + 6 \sum_{i=1}^{n-1} i \quad (4)$$

เมื่อ  $N_{vector}$  คือ จำนวนของเวกเตอร์ที่ได้จากการสวิตช์ตามจำนวนสถานะของการสวิตช์ในแต่ละระดับของการแปลง

จะเห็นว่าจำนวนสถานะของการสวิตช์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อจำนวนระดับของการแปลงเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 2 จะแสดงให้เห็นถึงสเปซเวกเตอร์ของแรงดันในอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ



รูปที่ 2 สเปซเวกเตอร์ของแรงดันในอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ

### 2.1.2 สเปซเวกเตอร์มอดดูเลชั่นของการแปลงแบบ 3 ระดับ [4, 5]

เป็นการเลือกของมอดดูเลเตอร์ที่จะจัดสถานะของการสวิตช์ในช่วงเวลาที่ต้องการหรือเรียกว่า ดิวตี้ไซเคิล เพื่อที่จะสร้างเวกเตอร์แรงดันอ้างอิงขึ้นมา หรืออาจจะพูดได้อีกอย่างว่าเป็นการประมาณค่าของเวกเตอร์แรงดันขึ้นมาโดยคำนวณมาจากชุดควบคุมแรงดันซึ่งมีการใช้ PWM ของเวกเตอร์ของการสวิตช์จำนวนมากนั่นเอง

ในการสังเคราะห์เวกเตอร์แรงดันอ้างอิงนี้สามารถดำเนินการได้โดยใช้เวกเตอร์สามตัวที่อยู่ใกล้กันมากที่สุด (Nearest Three Vectors : NTVs) แสดงค่าของเวกเตอร์แรงดันอ้างอิงดังกล่าว

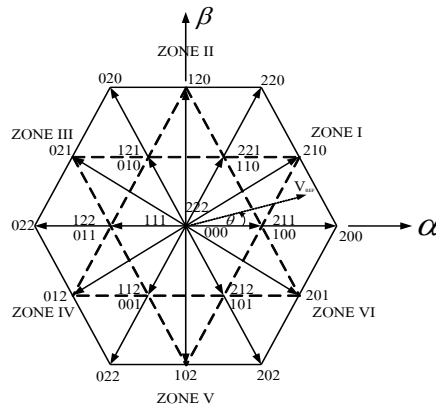
$$\bar{V}_{ref} = d_1 \bar{V}_1 + d_2 \bar{V}_2 + d_3 \bar{V}_3 \quad (5)$$

เมื่อ  $d_1, d_2, d_3$  คือ ดิวตี้ไซเคิลของเวกเตอร์แรงดัน  $\bar{V}_1, \bar{V}_2$  และ  $\bar{V}_3$  ตามลำดับ โดยที่

$$d_1 + d_2 + d_3 = 1 \quad (6)$$

ซึ่งจากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นถึงสเปซเวกเตอร์แรงดันของการแปลงแบบ 3 เฟส ที่มีการกำหนดสถานะของการสวิตช์ด้วยหมายเลขหลายๆ ตัวในบางครั้งอาจจะกำหนดให้เป็น 2, 1, 0 หรืออาจจะกำหนดให้เป็น p, o, n ก็ได้ ในรูปที่ 3 นั้นเราจะเห็นได้ว่าเวกเตอร์ของสถานะของการสวิตช์และเวกเตอร์อ้างอิงสามารถแสดงให้เห็นได้บนระนาบ 2 มิติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการประมาณค่าของเวกเตอร์อ้างอิง โดยการใช้ NTVs ซึ่งสามารถที่จะช่วยแก้ปัญหาได้โดยการใช้สมการ (5) และ (6) เพื่อให้ได้ค่าของ  $\bar{V}_{ref}$  จากรูปที่ 3 นั้นจะทำให้เห็นได้ว่าจะสามารถใช้ระบบโคออร์ดิเนตได้ใน 2 รูปแบบด้วยกัน คือ

1. Rectangular coordinate หรือเรียกว่าแบบ  $\alpha, \beta$
2. Polar coordinate หรือเรียกว่าแบบ  $\rho, \theta$



รูปที่ 3 ตำแหน่งใดๆ ของเวกเตอร์อ้างอิงในระนาบ 2 มิติ

และสามารถที่จะทราบได้ว่าเวกเตอร์อ้างอิงนั้นจะอยู่ในโซน (Zone) ใดจากทั้งหมด 6 โซน ด้วยกัน ซึ่งดูได้จากมุมของเวกเตอร์อ้างอิงนั่นเอง โดยที่ค่าของ  $\theta$  จะมีค่าเป็น

$$0 \leq \theta < 60^\circ \quad \vec{V}_{ref} \quad \text{จะอยู่ใน Zone I}$$

$$60^\circ \leq \theta < 120^\circ \quad \vec{V}_{ref} \quad \text{จะอยู่ใน Zone II}$$

$$120^\circ \leq \theta < 180^\circ \quad \vec{V}_{ref} \quad \text{จะอยู่ใน Zone III}$$

$$180^\circ \leq \theta < 240^\circ \quad \vec{V}_{ref} \quad \text{จะอยู่ใน Zone IV}$$

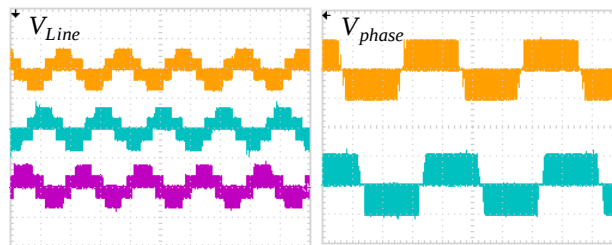
$$240^\circ \leq \theta < 300^\circ \quad \vec{V}_{ref} \quad \text{จะอยู่ใน Zone V}$$

$$300^\circ \leq \theta < 360^\circ \quad \vec{V}_{ref} \quad \text{จะอยู่ใน Zone VI}$$

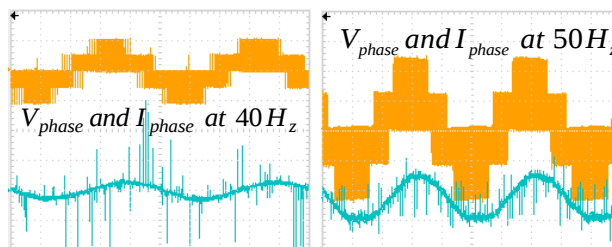
ค่ามุมของเวกเตอร์อ้างอิงนั้นจะสามารถทราบได้โดยปกติอยู่แล้วจากการหาค่าของโซนในแต่ละโซน ซึ่งทำให้สามารถที่จะรู้ตำแหน่งของสามเหลี่ยมเล็กที่เวกเตอร์อ้างอิงชี้ได้ ถ้าหากสามารถหาค่าตามสมการต่อไปนี้ได้ นั่นก็จะทำให้สามารถที่จะทราบได้ว่าเวกเตอร์อ้างอิงมีจุดยอดอยู่ที่ sector ใด

### 3. ผลการทดลอง

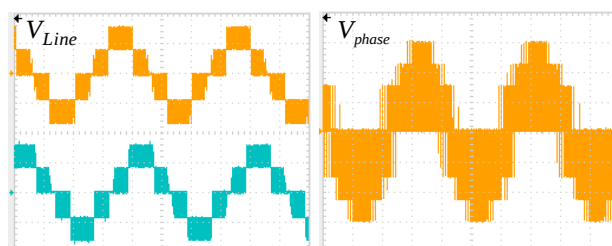
การทดสอบในงานวิจัยนี้ ใช้โหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส พิกัดแรงดัน 380/220 โวลต์ 220 วัตต์ 1410 รอบต่อนาที ต่อมอเตอร์แบบสตาร์ โดยใช้หลักการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่เพื่อรักษาแรงบิดที่พิกัดและรูปสัญญาณ SVPWM โดยส่วนแรกจะทดสอบวัดสัญญาณ SVPWM ของอินเวอร์เตอร์สอง และสามระดับ และในส่วนที่ทำทดสอบโดยการปรับความเร็วรอบมอเตอร์ที่ความถี่ต่างๆ แล้วค่อยๆ ปรับภาระโหลดขึ้นจนถึงพิกัด บันทึกผลรูปคลื่นและวัดค่าต่างๆ โดยใช้ฮอสซิลโลสโคปของ Tektronix รุ่น Four Channel Digital Storage Oscilloscope, Model TPS 2024 200 MHz 2 GS/s



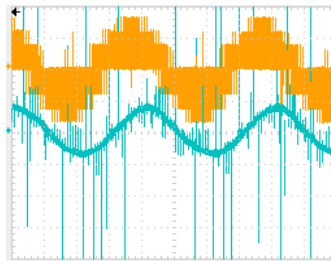
รูปที่ 4 สัญญาณแรงดันเฟสและไลน์  $V_A$ ,  $V_B$  และ  $V_C$  ของอินเวอร์เตอร์แบบสองระดับ



รูปที่ 5 แรงดันและกระแสเฟสที่ความถี่ 40 และ 50 เฮิรตซ์ ของอินเวอร์เตอร์แบบสองระดับ



รูปที่ 6 สัญญาณแรงดันไลน์  $V_{AB}$  กับ  $V_{BC}$  และแรงดันเฟส  $V_A$  ของอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ



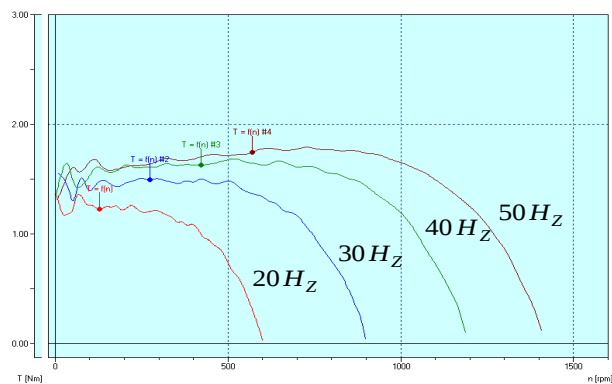
รูปที่ 7 สัญญาณแรงดันและกระแสเฟส ขณะขับมอเตอร์ไร้การโหลด

จากผลการทดสอบรูปที่ 4 แสดงสัญญาณแรงดันเฟสที่ A, B และ C และสัญญาณแรงดันไลน์ที่ A-B และ B-C ซึ่งเป็นสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิค Space Vector แบบ Space Vector Pulse Width Modulation ( SVPWM ) แบบสองระดับ จะมีลักษณะสัญญาณใกล้เคียงซายน์และแต่ละเฟสห่างกัน 120 องศา และจากรูปที่ 5 แสดงสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิคแบบ SVPWM แบบสองระดับ และสัญญาณกระแส ที่ความถี่ 40 และเฮิร์ตซ์ 50 เฮิร์ตซ์ และจากรูปที่ 6 แสดงสัญญาณแรงดันไลน์และเฟสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิคแบบ SVPWM แบบสามระดับที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ และรูปที่ 7 แสดงสัญญาณแรงดันเอาต์พุตและสัญญาณกระแสเฟส ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิคแบบ SVPWM แบบสามระดับ เมื่อนำไปควบคุมความเร็วมอเตอร์

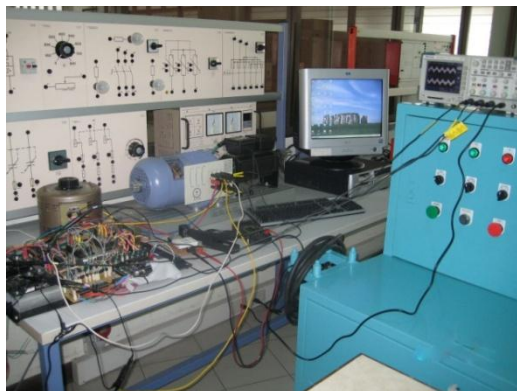
จากตารางที่ 1 โดยเพิ่มความถี่ขึ้นทีละ 10 เฮิร์ตซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไลน์กระแสและแรงบิด ซึ่งพบว่าช่วงความถี่ 20 - 50 เฮิร์ตซ์ เป็นช่วงที่สามารถรักษาค่าอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่ จึงสามารถทำให้การควบคุมแรงบิดเปลี่ยนแปลงน้อยขณะขับโหลดเต็มพิกัด แต่ช่วงที่เลยความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ไปแล้ว เป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงบิดมากจึงไม่สามารถรักษาค่าแรงดันต่อความถี่คงที่ได้ เนื่องจากฟลักซ์ที่ช่องอากาศลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น จึงเป็นผลทำให้แรงบิดมีค่าลดต่ำลง จากรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิดที่ความถี่ 20, 30, 40 และ 50 เฮิร์ตซ์ ทำการทดสอบโดยใช้โปรแกรมจะพบว่าแต่ละความถี่ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความเร็วและแรงบิดที่ได้เพิ่มขึ้น และจากรูปที่ 9 แสดงรูปการทดสอบขณะทำการควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์สามระดับ

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบเครื่องควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

| ความถี่ (Hz) | กระแสไลน์ (A) | แรงดันไลน์ (V) | แรงบิด (N.m) |
|--------------|---------------|----------------|--------------|
| 20           | 0.6287        | 228.60         | 1.35         |
| 30           | 0.6297        | 278.93         | 1.42         |
| 40           | 0.6271        | 330.38         | 1.62         |
| 50           | 0.6268        | 377.82         | 1.70         |
| 60           | 0.6302        | 377.66         | 1.24         |
| 70           | 0.6295        | 377.15         | 1.06         |
| 80           | 0.6304        | 376.42         | 0.83         |
| 90           | 0.6302        | 375.30         | 0.65         |
| 100          | 0.6278        | 375.80         | 0.57         |



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิด ที่ความถี่ 20, 30, 40 และ 50 เฮิรตซ์



รูปที่ 9 การทดลองควบคุมมอเตอร์ของอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ

#### 4. สรุป

จากผลการทดสอบควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้แรงดันต่อความถี่ และรูปแบบสัญญาณ SVPWM คงที่ สำหรับช่วงความถี่ 20 ถึง 50 เฮิรตซ์ สามารถนำไปขับโหลดได้ตามพิกัด ที่ช่วงความถี่ต่ำกว่า 20 เฮิรตซ์ จะไม่สามารถนำไปขับโหลดตามพิกัดได้ เนื่องจากความต้านทานภายในของมอเตอร์ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม ซึ่งส่งผลให้เกิดฟลักซ์ในช่องอากาศไม่คงที่เป็นผลให้ไม่สามารถนำไปขับโหลดตามพิกัดได้ และในช่วงที่ความถี่มากกว่า 50 เฮิรตซ์ ถึง 100 เฮิรตซ์ พบว่าแรงดันและกระแสที่สเตเตอร์มีค่าคงที่ ส่งผลให้แรงบิดมีค่าลดลงเนื่องจากไม่สามารถรักษาฟลักซ์ในช่องอากาศให้คงที่ได้ สำหรับสัญญาณแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตที่ได้จะมีลักษณะคล้ายซายน์ และการใช้ FPGA มีผลดีทางด้านสามารถปรับเปลี่ยนโปรแกรมได้ง่าย และความเร็วในการสร้างสัญญาณสำหรับควบคุมการสวิตช์สูง สำหรับงานวิจัยนี้ยังคงต้องพัฒนาเพิ่มเพื่อใช้กับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสโดยใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Bimal K. Bose. (2002). **Modern Power Electronics and AC Drives**. New Jersey : Prentice-Hall
- [2] F. Z. Peng and J-S Lat. (1996). "Multilevel Converter - A New Breed of Converters". **IEEE Transactions on Industry Applications**. Vol.32. (No.3.): Pages 509-517.
- [3] A. Nabae, I. Takahashi, H. Agaki.(1981). "A New Neutral-Point-Clamped PWM, Inverter". **IEEE Transactions on Industry Applications**. Vol.IA-17. (No.5.): Pages 518-523.
- [4] Nikola Celanovic. (2000). **Space Vector Modulation and Control of Multilevel Converters**. Ph.D. Thesis of University of Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [5] J. Pou. (2002). **Modulation and Control of Three - phase PWM multilevel converters**. PhD Thesis. Technical University of Catalonia Terrassa. Spain.
- [6] W. Kolomyjski, M. Malinowski and M. P.Kazmierkowski. "Adaptive Space Vector Modulator for Three - level NPC PWM Inverter-Fed Induction Motor" in **Proc. IEEE. AMC06**. Istanbul. Turkey.
- [7] L.G. Franquelo, Ma.A.M. Prats, R.C Portillo, J.I.L Galvan, M.A Perales, J.M Carrasco, E.G Diez, J.L.M. Jimenez. (2006). "Three dimension spec-vector modulation algorithm for four-leg multilevel converters using abc coordinate" **IEEE Trans on Ind. Electronics**. Vol.53. (No.2.): Pages 458-466.

## ประวัติผู้เขียนบทความ



อาจารย์ณรรณ เกิดสำอางค์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต  
1761 ถนนพัฒนาการ เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250  
โทรศัพท์: 0-2321-6930-9 ext.1212



อาจารย์ธีรยุทธ จันทร์แจ่ม สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต  
1761 ถนนพัฒนาการ เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250  
โทรศัพท์: 0-2321-6930-9 ext.1212



อาจารย์สุธี รุกขพันธุ์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต  
1761 ถนนพัฒนาการ เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250  
โทรศัพท์: 0-2321-6930-9 ext.1212



อาจารย์อนชิต เจริญ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต  
1761 ถนนพัฒนาการ เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250  
โทรศัพท์: 0-2321-6930-9 ext.1212