

ST-007

การออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส  
ด้วยวิธีแรงดันต่อความถี่ที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์  
Design and Construction of Inverter for 3 Phase Induction Motor Speed  
Control with Constant V/F Method Controlled by Microcontroller

ธนัช เอกเกื้อกุล<sup>1,\*</sup> วิชาญ ศรีสุวรรณ<sup>2</sup> และกฤษกร สมบัติมาก<sup>3</sup>

Tanut Aekkuerkul<sup>1,\*</sup> Wichan Srisuwan<sup>2</sup> and Kritsakorn Sombatmak<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ขอนแก่น 40000

<sup>3</sup>บริษัท เคเค เอ็นเนอร์จี รีซอร์สเซส จำกัด (สำนักงานใหญ่)

\*Corresponding author's e-mail: tanut.aek@neu.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ด้วยวิธีแรงดันต่อความถี่ที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์โมดูล AT90PWM316 เพื่อที่จะนำอินเวอร์เตอร์ไปใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสสลับ 3 เฟสให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีขึ้น ซึ่งการควบคุมแบบนี้จะรักษาให้อัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่ที่จ่ายให้มอเตอร์มีค่าคงที่ตลอดเวลา เมื่อต้องการให้แรงบิดคงที่ทุกๆ ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยจะทำการเขียนโปรแกรมให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นโปรแกรมสร้างพัลส์แบบพัลส์วิดท์มอดูเลชัน และโปรแกรมแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล แล้วป้อนโปรแกรมลงไปในไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยมีวงจรเดบท์ทำหน้าที่เป็นวงจรถับกำลัง สัญญาณที่ได้จะนำไปขับขาเกตของ IGBT ที่อยู่ในภาคอินเวอร์เตอร์ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นชุดสวิตซ์ด้วยความเร็วสูง โดยใช้ทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด ½ แรงม้า ในขณะที่ไม่มีโหลด จากการทดสอบ จะพบว่าอินเวอร์เตอร์สามารถปรับความถี่ได้ตั้งแต่ 19.80 Hz ถึง 127.6 Hz และสามารถควบคุมความเร็วได้ตั้งแต่ 954 rpm ถึง 3650 rpm ในขณะที่มีค่าแรงบิดคงที่ เท่ากับ 2.5 N.m และมีอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่ เท่ากับ 1.80 เป็นผลทำให้ส่วนประกอบทางฮาร์ดแวร์ของระบบน้อยลง ต้นทุนระบบลดลง แต่มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีขึ้น

**คำสำคัญ:** อินเวอร์เตอร์ มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส วิธีแรงดันต่อความถี่ที่ ไมโครคอนโทรลเลอร์

## ABSTRACT

This paper presents the design and construction of an inverter for a 3-phase induction motor speed control with a constant voltage-to-frequency method controlled by an AT90PWM316 microcontroller in order to apply the inverter to control the speed of a 3-phase AC motor for better performance. This control maintains the ratio of voltage to frequency supplied to the motor constant at all times to keep the torque constant every variable speed of the motor. It programmed the microcontroller as a Pulse-Width Modulation program and Analog to Digital conversion program then compressed the program into the microcontroller and had a dead-time circuit acts as a power driving circuit by which the signal was driven to the gate of the IGBT in the inverter sector which acted as a high-speed switching. It was tested with a ½ horsepower 3 phase induction motor while there was no load. From the test, it was found that the inverter could adjust the frequency from 19.80 Hz to 127.6 Hz and could control the speed from 954 rpm to 3650 rpm while having a constant torque value of 2.5 N.m and a constant voltage-to-frequency ratio of 1.80. As a result, there were less hardware components of the system and reduced system costs but had better performances.

**Keywords:** inverter, 3 phase induction motor, constant V/F method, microcontroller.

## บทนำ

ในปัจจุบันการใช้งานส่วนใหญ่ของเครื่องกระแสสลับเป็นที่นิยมมากกว่าเครื่องกระแสตรง (Lamas G., 2016) เนื่องจากความง่ายและโครงสร้างที่ทนทานที่สุดโดยไม่มีเครื่องสับเปลี่ยนเชิงกล และมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น การควบคุมอุตสาหกรรมและระบบอัตโนมัติ ด้วยเหตุนี้มอเตอร์เหนี่ยวนำจึงมักถูกเรียกว่าเป็นงานหลักของอุตสาหกรรมเคลื่อนที่ เช่น ประสิทธิภาพของเครื่องจักร ความทนทาน ความน่าเชื่อถือ ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า แรงดันกระแสเพื่อม แรงดันเอาต์พุตที่เสถียร และแรงบิดที่เกี่ยวข้อง มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอยู่ที่ลำดับแรกสุด การควบคุมมอเตอร์จึงมีความสำคัญมาก การใช้งานมอเตอร์ครอบคลุมทุกอย่างตั้งแต่เครื่องซักผ้าที่อยู่อาศัย พัดลม รวมไปถึงจนถึงเครื่องมือไฟฟ้าแบบมือถือ และตัวยกกระจัดรถยนต์ ระบบควบคุมและไดรฟ์อุตสาหกรรมต่างๆ มากที่สุดในทั้งหมด การใช้งานมีการควบคุมมอเตอร์แบบอนาล็อกไปสู่การควบคุมแบบดิจิทัลที่แม่นยำของมอเตอร์ โดยใช้โปรเซสเซอร์ที่แตกต่างกัน โดยการควบคุมแบบดิจิทัลของมอเตอร์เหนี่ยวนำส่งผลให้การทำงานของมอเตอร์มีประสิทธิภาพมากขึ้น (Ping Wei, 2015) ส่งผลให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น การกระจายพลังงานที่ต่ำกว่า แม้ว่าในปัจจุบันจะมีการใช้เทคนิคการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบต่างๆ มากมาย (Kiavash Parhizkar, 2015, Dinesh Kumar,

2017 และ Hen-Geul (Henry) Yeh, 2018 ) แต่เทคนิคการควบคุมที่นิยมมากที่สุด คือ การสร้างการจ่าย ความถี่ ซึ่งมีอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าต่ออัตราส่วนความถี่คงที่ เทคนิคนี้รู้จักกันแพร่หลายในชื่อการควบคุมแบบ V/F (M.S.Aspalli, 2012) เทคนิคนี้อธิบายการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสด้วยการควบคุมโวลต์ต่อเฮิร์ตซ์ (V/F) โดยใช้ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลประสิทธิภาพสูง ระบบได้รับการออกแบบเป็นระบบควบคุมมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ใช้อุปกรณ์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) ประสิทธิภาพสูง ทำให้การทำงานที่ดีขึ้น เป็นผลทำให้ส่วนประกอบทางฮาร์ดแวร์ ของระบบน้อยลง ต้นทุนระบบลดลง แต่มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีขึ้น โปรแกรมซอฟต์แวร์ถูกเขียนโดย ไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) และจะสร้างความถี่ของสัญญาณพัลส์ส่งไปยังขาเกท IGBT วิธีการทั่วไปของการ ควบคุมมอเตอร์ คือ การแปลงแรงดันไฟฟ้าของสายเป็นกระแสตรง ก่อนกระแสตรงถูกแปลงอีกครั้งเป็นไฟฟ้า กระแสสลับเฟสเดียวหรือสามเฟสตามความต้องการโหลด แรงดันเอาต์พุต ความถี่ หรือทั้งสองอย่างของ อินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมโดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังและโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ (Mohd Najib Bin Hussin, 2014 และอนุชา ตีผาง, 2022 ) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและสร้างอินเวอร์เตอร์สำหรับ มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสด้วยวิธี V/F คงที่ที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อที่จะนำอินเวอร์เตอร์ไปใช้ในการ ควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสสลับ 3 เฟสให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีขึ้น ซึ่งการควบคุมแบบนี้ จะรักษาให้อัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่ที่จ่ายให้มอเตอร์มีค่าคงที่ตลอดเวลา เมื่อต้องการให้แรงบิดคงที่ ทุก ๆ ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไป

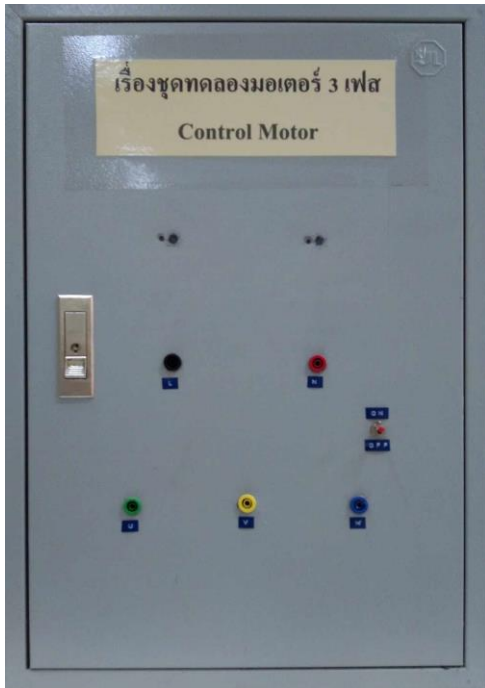
### วัตถุประสงค์

1. ออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสด้วยวิธี V/F คงที่ ที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อที่จะนำอินเวอร์เตอร์ไปใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ กระแสสลับ 3 เฟสให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีขึ้น
2. เพื่อหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสด้วยวิธี V/F คงที่ที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ อันได้แก่ การทดสอบวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ความถี่ต่างๆ และการ ทดสอบการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความถี่ต่างๆ

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 1. โครงสร้างอินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

โครงสร้างอินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้ วงจรเรียงกระแสพร้อมตัวเก็บประจุ วงจรแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง +5 V และ +15 V วงจรบอร์ด สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์โมดูล AT90PWM316 วงจรแยกแสงเบอร์ TLP250 วงจรภาคขับสวิตช์ IGBT และตู้กล่องควบคุม แสดงดังภาพที่ 1



(ก)



(ข)

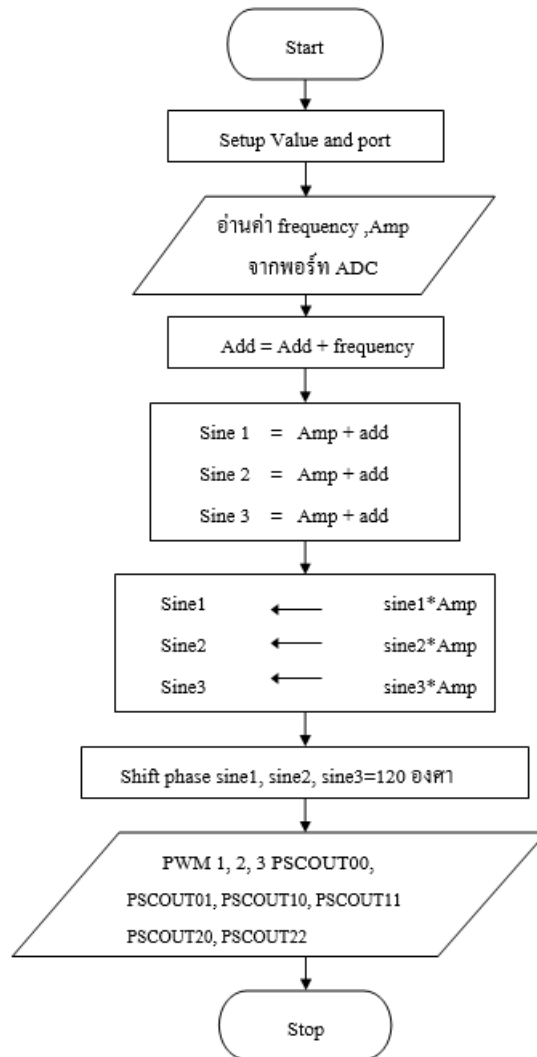
ภาพที่ 1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

(ก) โครงสร้างภายนอกตู้ (ข) โครงสร้างภายในตู้

## 2. การออกแบบโปรแกรมการสร้างสัญญาณ PWM จากไมโครคอนโทรลเลอร์

การทำงานของโปรแกรมเริ่มต้นด้วยการเซ็ตค่าต่างๆ ให้กับรีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้อง เช่น Time2 สำหรับสร้างสัญญาณ PWM กำหนดเอาต์พุต PSCOUT00, PSCOUT01, PSCOUT10, PSCOUT11, PSCOUT20, PSCOUT22 และกำหนดพอร์ตรับสัญญาณแอนะล็อก เมื่อโปรแกรมทำการกำหนดค่าเริ่มต้นเรียบร้อยแล้ว โปรแกรมจะทำการอ่านค่าความถี่และค่าระดับกระแสจากค่าความต้านทานที่ปรับค่าได้ที่ต่อกับพอร์ต ADC ทั้ง 1 Channel มาทำการประมวลผล โดยค่าที่อ่านได้จะนำมารวมกับค่าที่กำหนดไว้ในตัวแปร Sin 1, Sin 2, Sin 3 ซึ่งจะแต่ละค่าจะไม่เท่ากันเพื่อให้เกิดความมุ่มต่างกัน 120 องศา เป็นการทำงานในระบบ 3 เฟส ค่าที่ได้จาก Sin1, Sin2, Sin3 ที่ทำการเลื่อนเฟสแล้วจะถูกส่งออกทางพอร์ต PWM ทั้ง 6 ช่อง คือ PSCOUT00, PSCOUT01, PSCOUT10, PSCOUT11 และ PSCOUT20, PSCOUT22 เพื่อส่งต่อให้วงจร IGBT Diver ให้ทำงานต่อไป แสดงดังภาพที่ 2

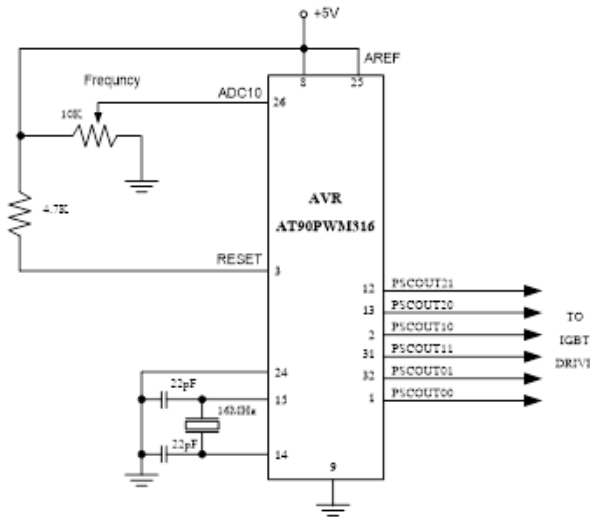




ภาพที่ 2 โปรแกรมการสร้างสัญญาณ PWM จากไมโครคอนโทรลเลอร์

### 3. วงจรบอร์ดสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์

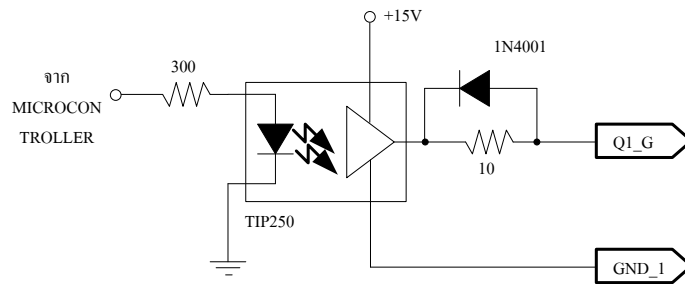
ภาพที่ 3 บอร์ดสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT90PWM316 จะทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ซึ่งจำเป็นต้องมีการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของทุกส่วนโดยสามารถใช้โปรแกรมภาษาซี ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับค่าแรงดันเข้ามาที่ขา 26 ซึ่งภายในไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล เมื่อโปรแกรมคำนวณและประมวลผลเรียบร้อยแล้วก็จะส่งสัญญาณพัลส์ออกมาที่ขา PSCOUT00, PSCOUT01, PSCOUT10, PSCOUT11 และ PSCOUT20, PSCOUT22 เพื่อปรับความเร็วของมอเตอร์



ภาพที่ 3 วงจรบอร์ดสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์

#### 4. การออกแบบวงจรภาคขับสวิตช์ IGBT

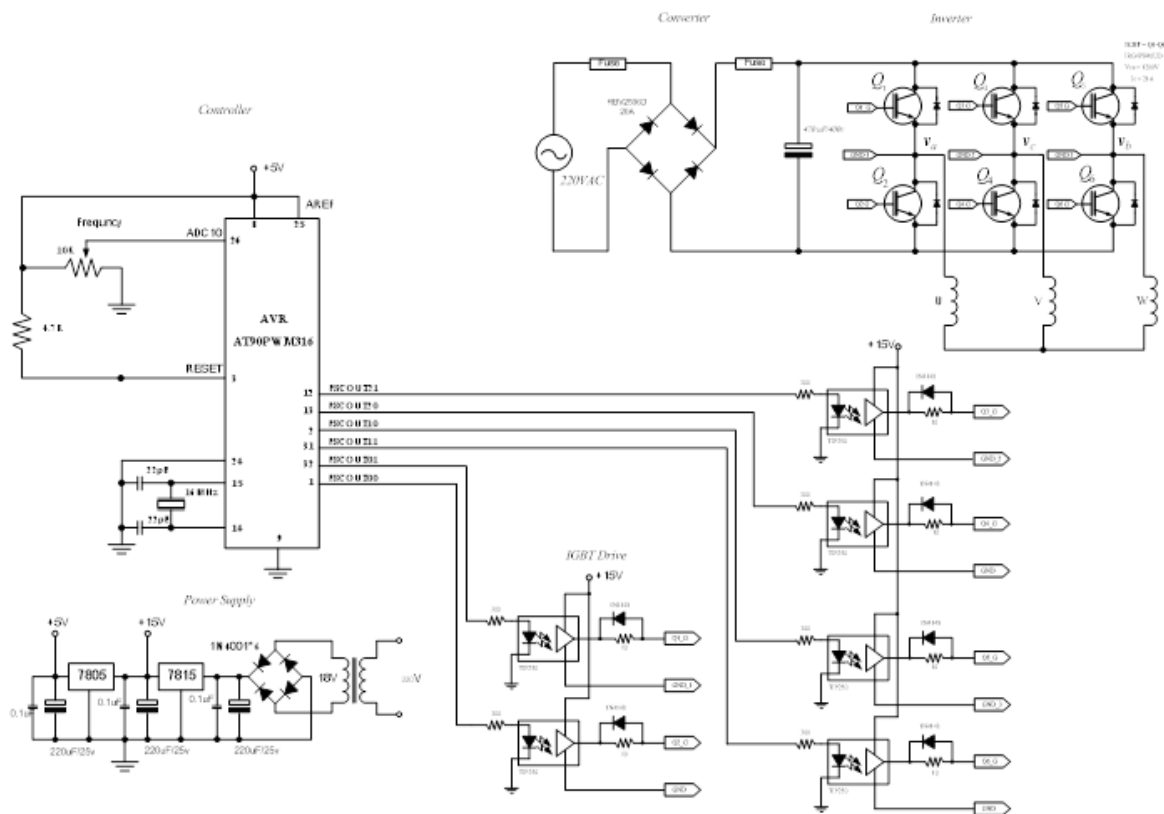
จากภาพที่ 4 การออกแบบวงจรขับสวิตช์ IGBT จะใช้วงจรแยกแสงเบอร์ TLP250 เพื่อแยกแรงดันไฟต่ำกับแรงดันไฟสูงออกจากกัน โดย R3U จะใช้ค่าอยู่ระหว่าง  $10 \Omega$  ถึง  $100 \Omega$  เพื่อป้องกันการเกิดการแกว่งของสัญญาณที่ขาเกตของ IGBT ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่า R เท่ากับ  $10 \Omega$  การแกว่งของสัญญาณเกิดจากตัวเก็บประจุที่ขาเกตของ IGBT หากมองจากเอาต์พุตของวงจรแยกแสงจะประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำแฝงที่เกิดจากลายวงจร และตัวเก็บประจุที่ขาเกตของ IGBT เป็นวงจร LC ซึ่งจะทำให้เกิดความถี่แกว่ง (Damping Frequency) เนื่องจากสัญญาณที่เอาต์พุตของวงจรแยกแสงเป็นสัญญาณพัลส์ PWM ที่ประกอบด้วยฮาร์โมนิกของสัญญาณไซน์หลายความถี่ ซึ่งอาจทำให้เกิดการออสซิลเลทได้ จึงจำเป็นต้องใส่ตัวต้านทาน R เท่ากับ  $10 \Omega$  เพื่อควบคุมไม่ให้เกิดการแกว่งของสัญญาณโดยจะทำให้ผลของ L ในลายวงจรลดลงจะมีผลของ R และ C เท่านั้นโดยการเพิ่มขึ้นของแรงดัน และลดลงของระดับแรงดันพัลส์ของสัญญาณ PWM จะขึ้นกับค่าเวลาคงตัวของ R เท่ากับ  $10 \Omega$  และ C ที่ขาเกตของ IGBT โดยมีค่าที่  $\tau$  เท่ากับ 28 ns



ภาพที่ 4 วงจรภาคขับสวิตช์ IGBT

### 5. วงจรควบคุมการทำงาน

ภาพที่ 5 วงจรควบคุมการทำงาน สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ วงจรกำลัง และวงจรควบคุม ซึ่งวงจรกำลังจะประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแส ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง แล้วส่งต่อไปยังจอร์สวิตช์ IGBT ทั้ง 6 ตัว เพื่อทำการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสต่อไป ส่วนวงจรควบคุมจะประกอบไปด้วยวงจรแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง +5 V และ +15 V วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ และวงจรภาคขับสวิตช์ IGBT ทั้ง 6 ตัว



ภาพที่ 5 วงจรควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

## 6. มอเตอร์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ



ภาพที่ 6 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ถ่ายจากภาพจริง

จากภาพที่ 6 แสดงมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด ½ hp เมื่อ Input ที่เข้ามา 380 V ให้ต่อใช้งานแบบ Y จะกินกระแสประมาณ 1 A แต่ถ้า Input ที่เข้ามา 230 V ให้ต่อใช้งานแบบ Δ จะกินกระแส 2 A ซึ่งมีข้อมูลดังตารางที่ 1

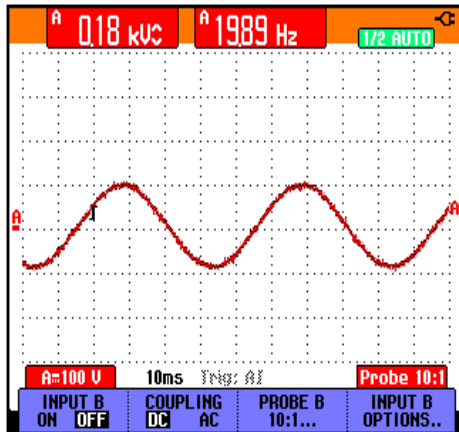
### ตารางที่ 1 ข้อมูลที่อ่านได้จาก Name plate ของมอเตอร์

จากข้อมูลที่อ่านได้จาก Name plate จะสามารถนำมาคำนวณหาค่าต่างๆ ได้ ดังนี้	
แรงบิดพิกัด (Rated Torque)	$M_n \text{ (Nm)} = \frac{P_n(\text{kW}) \cdot 9550}{n_n \text{ (rpm)}} = \frac{0.37\text{kW} \cdot 9550}{1410\text{rpm}} = 2.5 \text{ N} \cdot \text{m}$
กำลังไฟฟ้าเสมือน (Apparent Power)	$S = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot I_1 = \sqrt{3} \cdot 380\text{V} \cdot 1.1\text{A} = 714\text{VA}$
กำลังไฟฟ้าจริง (Real Power)	$P = S \cdot \cos\phi = 724\text{W} \cdot 0.75 = 743\text{W}$
ประสิทธิภาพของมอเตอร์ (Efficiency Factor)	$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{re}} = \frac{370\text{W}}{543\text{W}} = 0.68 = 68\%$

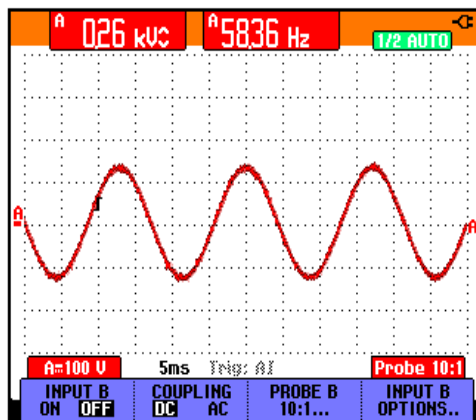


ผลการวิจัย

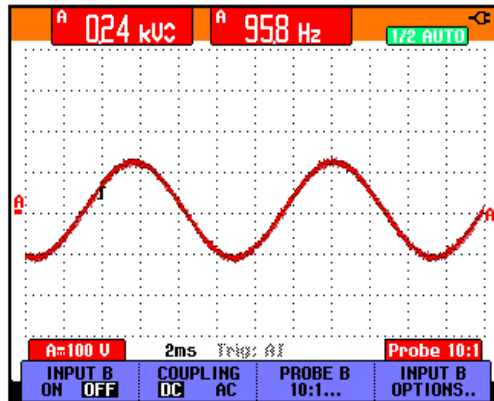
1. การทดสอบวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ความถี่ต่างๆ



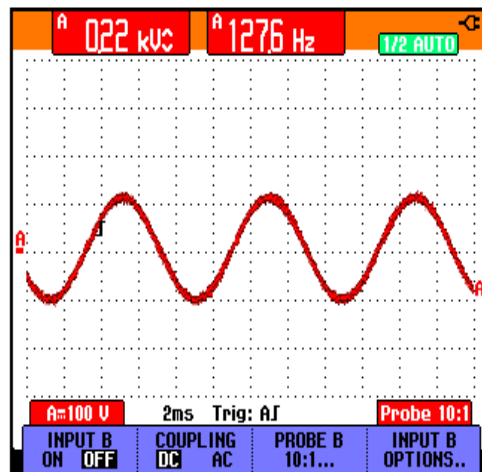
ภาพที่ 7 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่ 19.89 Hz



ภาพที่ 8 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่ 58.36 Hz



ภาพที่ 9 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่ 95.80 Hz



ภาพที่ 10 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่ 127.60

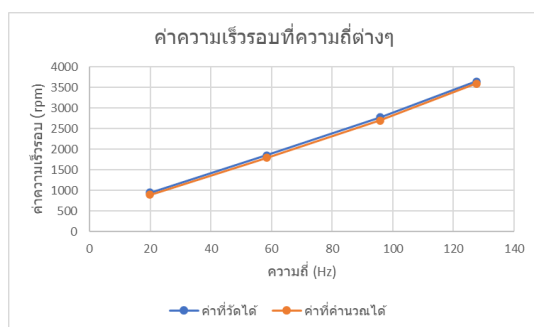
จากการทดสอบวัดสัญญาณของแรงดันเอาต์พุตจากภาพที่ 7 ถึง ภาพที่ 10 ที่ค่าความถี่ต่างๆ จะพบว่า อินเวอร์เตอร์สามารถปรับความถี่ได้จริง และสามารถนำไปต่อใช้งานกับมอเตอร์เพื่อที่จะควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้จริงอีกด้วย

## 2. การทดสอบการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ความถี่ต่างๆ

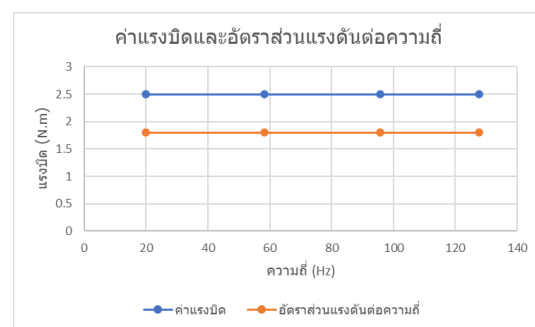
ตารางที่ 2 การปรับความเร็วรอบที่ความถี่ต่างๆ ในขณะไม่มีโหลด

ความถี่ (Hz)	แรงดันสแตเตอร์ (V)	กระแสสแตเตอร์ (A)	แรงบิด (N.m)	อัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ (V/F)	ความเร็วของมอเตอร์ที่วัดได้ (rpm)	ความเร็วจากการคำนวณ $N = 120 f/p$ (rpm)
19.89	35.80	0.35	2.50	1.80	954	900
58.36	105.05	0.95	2.50	1.80	1860	1800
95.80	172.44	1.50	2.50	1.80	2780	2700
127.60	230	2.00	2.50	1.80	3650	3600

จากตารางที่ 2 จะพบว่า การเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ค่าต่างๆ จะทำให้ความเร็วของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยการควบคุมวิธีนี้จะรักษาให้อัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่ที่จ่ายให้มอเตอร์คงที่ตลอดเวลา เมื่อต้องการให้แรงบิดคงที่ทุกๆ ค่าความเร็วที่เปลี่ยนไป และเมื่อนำมาคำนวณจากสูตร  $N = 120 f/p$  เมื่อความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับเปลี่ยนแปลงไป ความเร็วของมอเตอร์ก็จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย และมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ จากผลการทดสอบนี้สามารถควบคุมความเร็วได้ตั้งแต่ 954 rpm ถึง 3650 rpm และสามารถเขียนเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 11



(ก)



(ข)

ภาพที่ 11 กราฟแสดงค่าที่ความถี่ต่างๆ ในขณะไม่มีโหลด

(ก) ความเร็ว (ข) แรงบิดและอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่

### สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

จากการทดสอบอินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสด้วยวิธีแรงดันต่อความถี่คงที่ที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ จะพบว่า อินเวอร์เตอร์สามารถปรับความถี่ได้ตั้งแต่ 19.80 Hz ถึง 127.6 Hz โดยที่ความถี่ 19.89 Hz ความเร็วของมอเตอร์ที่วัดได้ เท่ากับ 954 rpm ที่ความถี่ 58.36 Hz ความเร็วของมอเตอร์ที่วัดได้ เท่ากับ 1860 rpm ที่ความถี่ 95.80 Hz ความเร็วของมอเตอร์ที่วัดได้ เท่ากับ 2780 rpm และที่ความถี่ 127.60 Hz ความเร็วของมอเตอร์ที่วัดได้ เท่ากับ 3650 rpm ในขณะที่มีค่าแรงบิดคงที่ เท่ากับ 2.5 N.m และมีอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่ เท่ากับ 1.80 เมื่อนำมาคำนวณจากสูตร  $N = 120 f/p$  ความเร็วของมอเตอร์ที่คำนวณได้ จะมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วของมอเตอร์ที่วัดได้ เป็นผลทำให้ส่วนประกอบทางฮาร์ดแวร์ของระบบน้อยลง ต้นทุนระบบลดลง แต่มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีขึ้น

### เอกสารอ้างอิง

- อนุชา ดีผาง และชัยพร อัดโตดดร. (2022). การออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ความเร็ว 3 ระดับแบบอัตโนมัติที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์, *JEET*, 9(1), 56-69.
- Dinesh Kumar. (2017). *Performance Analysis of Three-Phase Induction Motor with AC Direct and VFD*. 3rd International Conference on Communication Systems (ICCS-2017). 1-10.
- Hen-Geul (Henry) Yeh. (2018). *Speed Control of Three-Phase Induction Motor using Variable Frequency Drive*. Master of Science in Electrical Engineering. California State University, Long Beach. January 2018.
- Kiavash Parhizkar and Seyed Said Mirkamali. (2015). Controlling Speed of Induction Motor using Three Phase Boost Converter. *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences*. Vol. 5 (S3), 2015. 1133-1142.
- Lamas G., Syllignakis J., Karapidakis E. (2016). The Study and Evaluation of the 3 phase Induction Motor Controlled by an Inverter to Identify Power Losses and Energy Saving. *Engineering and Industry Series Volume Power Systems, Energy Markets and Renewable Energy Sources in South-Eastern Europe*. 2016. 283-295.
- M.S.Aspalli, Asha.R , P.V. Hunagund. (2012). Three Phase Induction Motor Drive using IGBTs and Constant V/F Method. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. Vol. 1, Issue 5, November 2012, 463-469.

Mohd Najib Bin Hussin. (2014). *Three Phase Inverter for Induction Motor by using PI Repetitive Controller with Arduino*. Degree of Master Electrical Engineering. Faculty of Electrical and Electronic Engineering Universiti Tun Hussein Onn Malaysia. JULY 2014.

Ping Wei, jinpeng Yu, Fatao Shi, Xiao Wei, Yan Wang, Quanwen Zhao. (2015). *The PWM Control of the Three-phase Induction Motor*. International Conference on Manufacturing Science and Engineering (ICMSE 2015). 842-845.