

## การมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิด้วยบอร์ดอาดุยโน้ อูโน่ ในโปรแกรมทิงเกอร์แคท Space Vector Pulse Width Modulation with Arduino UNO Board in TinkerCAD Program

ธนิต บุญใส<sup>1</sup>, สุเมธ เทศกุล<sup>2</sup>, ศศิพร ผลไพศาลศักดิ์<sup>3</sup> และ คณิตพันธ์ บุญสมเชื้อ<sup>4\*</sup>  
Tanit Boonsai<sup>1</sup>, Sumeth Theskul<sup>2</sup>, Sasiporn Phonpaisansak<sup>3</sup> and Kanitphan Boonsomchuae<sup>4\*</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สังกัดมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

<sup>1,2,3,4</sup>Technical Education Department, Faculty of Technical Education,  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi Pathum Thani 12110

Received : 2024-05-28 Revised : 2024-07-23 Accepted : 2024-09-03

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบโปรแกรมและจำลองการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิด้วยโปรแกรมทิงเกอร์แคท (TinkerCAD) เพื่อสร้างสัญญาณดับลิวิตซ์ (PWM Signals) สำหรับควบคุมเกทของอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 2 ระดับ ที่สามารถปรับค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ ในการวิจัยมีการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมทิงเกอร์แคทของโปรแกรมที่ถูกออกแบบ และทดสอบการทำงานจริงด้วยบอร์ด อาดุยโน้ อูโน่ (Arduino Uno)

ผลของการจำลองการทำงานและผลของการทดสอบแสดงให้เห็นว่าโปรแกรมทิงเกอร์แคท สามารถนำมาพัฒนาและออกแบบการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิได้ ทั้งนี้จากผลการจำลองและทดสอบพบว่ารูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีความสมมาตร มีระบบ 3 เฟสที่สมดุล สามารถปรับค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้แม่นยำโดยมีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.21%

**คำสำคัญ :** ทิงเกอร์แคท, บอร์ด อาดุยโน้ อูโน่, การมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิ

### Abstract

This research presented the design and simulation of space vector pulse width modulation (SVPWM) using TinkerCAD to generate PWM signals for controlling the gate of power electronic switch devices in a two-level, three-phase voltage source inverter circuit, which could adjust the frequency of the output voltage. The research included simulating the designed program using TinkerCAD and testing its performance with an Arduino Uno board.

The simulation and examination results showed that TinkerCAD could be used to develop and design SVPWM. From the results of the simulation and examination, it was found that the output voltage waveform was symmetrical, had a balanced 3-phase system, and could accurately adjust the output voltage frequency. The average percentage error in the output voltage frequency value was less than or equal to 1.21%.

**Keywords :** TinkerCAD, Arduino UNO Board, Space Vector Pulse Width Modulation

### 1. บทนำ

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 2 ระดับ ที่ถูกควบคุมด้วยวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิ (Space Vector Pulse Width Modulation)

\*คณิตพันธ์ บุญสมเชื้อ

E-mail address: kanitphan\_b@rmutt.ac.th

มีการพัฒนาและใช้งานอย่างแพร่หลาย ทำให้วิธีการมอดูเลตดังกล่าวได้ถูกศึกษาและจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมแมทแลบ/ซิมูลิงค์ (MATLAB/SIMULINK) [1] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีลิขสิทธิ์และมีค่าใช้จ่ายในการใช้งานโปรแกรมที่สูง ซึ่งทำให้การศึกษาและออกแบบพัฒนา ที่ต้องการจำลองการทำงานก่อนสร้างชุดต้นแบบมีข้อจำกัด

ในงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้โปรแกรมแมทแลบ/ซิมูลิงค์ เพื่อพัฒนาและจำลองการทำงานการสร้างสัญญาณพัลส์แบบลิวิตเอ็ม (PWM Signals) หรือสัญญาณสวิทช์ของอุปกรณ์สวิทช์ เช่น มอสเฟต (MOSFET) หรือ ไอจีบีที (IGBT) ที่อยู่ภายในวงจรอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิ ได้นำบอร์ด อาดูยโน้ อุโน้ (Arduino UNO Board) เชื่อมต่อกับโปรแกรมแมทแลบ/ซิมูลิงค์ ที่ติดตั้งภายในคอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถพัฒนาชุดต้นแบบหรือพัฒนาวิธีการมอดูเลตแบบใหม่ได้ โดยหลังจากพัฒนาวิธีการมอดูเลตใหม่แล้วจะสามารถจำลองการสร้างสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ หรือสัญญาณพัลส์แบบลิวิตเอ็มด้วยโปรแกรมแมทแลบ/ซิมูลิงค์ และเชื่อมต่อส่งสัญญาณพัลส์แบบลิวิตเอ็มให้บอร์ด อาดูยโน้ อุโน้ เพื่อสร้างสัญญาณสวิทช์ควบคุมอุปกรณ์สวิทช์ภายในอินเวอร์เตอร์ให้ทำงานตามที่กำหนดได้ [2] [3]

ในงานวิจัยนี้จึงเสนอแนวทางในการพัฒนาและจำลองการสร้างสัญญาณพัลส์แบบลิวิตเอ็มด้วยวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิ สำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 2 ระดับ ด้วยโปรแกรมทิงเกอร์แคท (TinkerCAD) ซึ่งมีแบบจำลอง (Model) ของบอร์ด อาดูยโน้ อุโน้ อยู่ในโปรแกรมดังกล่าว โปรแกรมทิงเกอร์แคท ไม่มีค่าใช้จ่ายในการใช้งาน และสามารถเข้าใช้งาน เว็บ บราวเซอร์ (Web Browser) ได้ จะสามารถลดข้อจำกัดของนักวิจัย นักพัฒนา นักศึกษา ที่จะศึกษา พัฒนา และจำลองการทำงานชุดควบคุมการสร้างสัญญาณพัลส์แบบลิวิตเอ็มด้วยวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิ ก่อนลงมือสร้างชุดต้นแบบด้วยการนำโปรแกรมทิงเกอร์แคทช่วยในการพัฒนาโปรแกรม

## 2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษานำโปรแกรมทิงเกอร์แคทช่วยในการพัฒนาโปรแกรมในการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิ สำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 2 ระดับ ด้วยแบบจำลองของบอร์ด อาดูยโน้ อุโน้ ภายในโปรแกรมทิงเกอร์แคท

2.2 เพื่อทดสอบหาสมรรถนะของโปรแกรมที่พัฒนาด้วยโปรแกรมทิงเกอร์แคท โดยเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากจำลองการทำงานในโปรแกรมทิงเกอร์แคท และการทดสอบด้วยบอร์ด อาดูยโน้ อุโน้ จริง เทียบกับค่าที่กำหนดให้ทำงาน

## 3. สมมุติฐานงานวิจัย

ในโปรแกรมทิงเกอร์แคท มีแบบจำลองของบอร์ด อาดูยโน้ อุโน้ ที่รองรับการเขียนโปรแกรมภาษาซี (C Programming Language) ของบอร์ด อาดูยโน้ อุโน้ ควรสามารถนำมาพัฒนาเขียนคำสั่งให้สามารถสร้างสัญญาณพัลส์แบบลิวิตเอ็มด้วยวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิ สำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 2 ระดับ และสามารถจำลองการทำงานภายในโปรแกรมเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการพัฒนาโปรแกรมได้

## 4. ขอบเขตการวิจัย

4.1 พัฒนาโปรแกรมการสร้างสัญญาณพัลส์แบบลิวิตเอ็มด้วยวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิ สำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 2 ระดับ ด้วยโปรแกรมทิงเกอร์แคท

4.2 โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถสร้างสัญญาณ พัลส์แบบลิวิตเอ็มที่ทำให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตทั้ง 3 เฟส มีรูปคลื่นสมมาตร มีเฟสต่างกัน 120 องศา และสามารถปรับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้

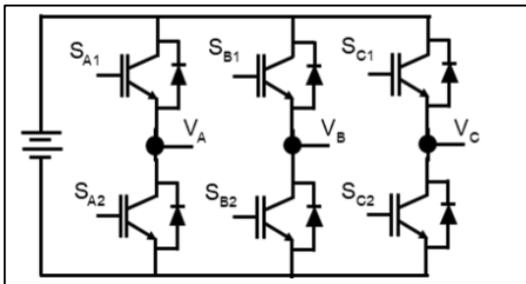
4.3 ทดสอบจำลองการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรมทิงเกอร์แคท และทดสอบการใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นด้วยบอร์ด อาดูยโน้ อุโน้ จริง

## 5. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

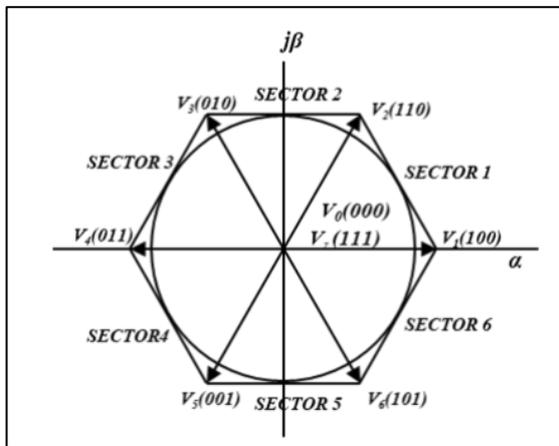
### 5.1 หลักการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิ

อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 2 ระดับ ดังแสดงในรูปที่ 1 มีอุปกรณ์สวิทช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ไอจีบีที) อยู่ 6 ตัว จัดวางเป็นกิ่ง (Branch) ได้ 3 กิ่ง เท่ากับจำนวนของเฟส สามารถกำหนดรูปแบบการสวิทช์ได้ 8 แบบ ประกอบด้วย (100) (110) (010) (011) (001) (101) (000) และ (111) โดยเลขค่า 1 หมายถึงอุปกรณ์สวิทช์ตัวบนของกิ่งเท่านั้นที่จะทำงานนำกระแสไฟฟ้า เลขค่า 0 หมายถึงอุปกรณ์สวิทช์ตัวล่างของกิ่งเท่านั้นที่จะทำงานนำกระแสไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น (100) หมายถึง สวิทช์  $S_{A1}$  สวิทช์  $S_{B2}$  และสวิทช์

$S_{C2}$  ทำงานขณะที่อุปกรณ์สวิตช์อื่นที่เหลือถูกกำหนดให้ไม่ทำงานหรือหยุดนำกระแสไฟฟ้า โดยแต่ละรูปแบบการสวิตช์สามารถสร้างเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า (Voltage Vector) ในปริภูมิ (Space) ได้ 8 เวกเตอร์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกได้แก่กลุ่มเวกเตอร์แอคทีฟ (Active Vector) ประกอบด้วยเวกเตอร์  $V_1(100)$   $V_2(110)$   $V_3(010)$   $V_4(011)$   $V_5(001)$  และ  $V_6(101)$  กลุ่มที่สองได้แก่กลุ่มเวกเตอร์ศูนย์ (Zero Vector) ประกอบด้วยเวกเตอร์  $V_0(000)$  และ  $V_7(111)$  ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับ 3 เฟส 2 ระดับ



รูปที่ 2 เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าในปริภูมิ

หลักการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิ [4] ได้กำหนดลำดับการใช้เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าในปริภูมิเวกเตอร์ทั้งหมด 8 เวกเตอร์ ด้วยการจัดเรียงลำดับเวกเตอร์เพื่อลดความสูญเสีย (Loss) จากการเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์สวิตช์ในอินเวอร์เตอร์ จึงกำหนดให้การจัดเรียงลำดับเวกเตอร์แล้วจะมีการเปลี่ยนสถานะอุปกรณ์สวิตช์ที่ขาของอินเวอร์เตอร์เกิดขึ้นมี

เพียงหนึ่งขาเท่านั้นต่อการเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์สวิตช์หนึ่งครั้ง ดังนั้นจะใช้เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่อยู่ใกล้เคียงกัน เช่น จากรูปที่ 2 จะใช้  $V_1(100)$  และ  $V_2(110)$  เพื่อสร้างเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ (เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง) ขณะที่เวกเตอร์นั้นเคลื่อนที่อยู่ภายในพื้นที่เซกเตอร์ (Sector) ที่ 1 และทุกคาบการสวิตช์ (Switching Period) จะต้องมีการใช้เวกเตอร์ศูนย์ทั้ง 2 ตัวร่วมอยู่ด้วยเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มีฮาร์มอนิกส์ต่ำ โดยสามารถแสดงลำดับการเรียงของเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละคาบการสวิตช์ของทั้ง 6 เซกเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 1 [5]

ตารางที่ 1 ลำดับของเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าใน 1 คาบการสวิตช์

เซกเตอร์	ลำดับเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า
1	$V_0-V_1-V_2-V_7-V_2-V_1-V_0$
2	$V_0-V_3-V_2-V_7-V_2-V_3-V_0$
3	$V_0-V_3-V_4-V_7-V_4-V_3-V_0$
4	$V_0-V_5-V_4-V_7-V_4-V_5-V_0$
5	$V_0-V_5-V_6-V_7-V_6-V_5-V_0$
6	$V_0-V_1-V_6-V_7-V_6-V_1-V_0$

ตารางที่ 2 ค่าเวลาการใช้เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าใน 1 คาบการสวิตช์

เซกเตอร์	ลำดับการใช้เวลาเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า
1	$T_d/4-T_d/2-T_d/2-T_d/2-T_d/2-T_d/2-T_d/4$
2	$T_d/4-T_d/2-T_d/2-T_d/2-T_d/2-T_d/2-T_d/4$
3	$T_d/4-T_d/2-T_d/2-T_d/2-T_d/2-T_d/2-T_d/4$
4	$T_d/4-T_d/2-T_d/2-T_d/2-T_d/2-T_d/2-T_d/4$
5	$T_d/4-T_d/2-T_d/2-T_d/2-T_d/2-T_d/2-T_d/4$
6	$T_d/4-T_d/2-T_d/2-T_d/2-T_d/2-T_d/2-T_d/4$

ในแต่ละเซกเตอร์จะมีการเรียงลำดับเวกเตอร์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นค่าเวลาในการใช้งาน (Dwell Time) ของเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าภายใน 1 คาบการสวิตช์ ของแต่ละเซกเตอร์ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2 ซึ่งจะสอดคล้องกับเวกเตอร์ที่แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตัวแปรค่าเวลา  $T_a$ ,  $T_b$ , และ  $T_z$  สามารถคำนวณหาค่าได้ด้วยสมการที่ 1 ถึง 3 โดยที่ตัวแปร  $m$  หมายถึงค่าดัชนีการ

มอดูเลต (Modulation Index) ตัวแปร  $\alpha^\circ$  หมายถึงค่ามุมของเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่อยู่ภายในแต่ละเซกเตอร์ และแปร  $T_s$  หมายถึง ค่าคาบเวลาการสุ่ม (Sampling Period) [6]

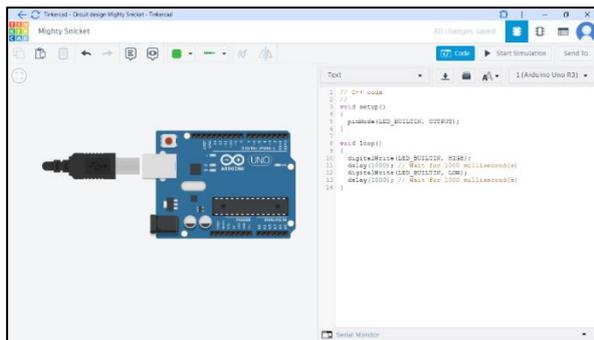
$$T_a = T_s \cdot m \cdot \sin(60^\circ - \alpha^\circ) / \sin(60^\circ) \quad (1)$$

$$T_b = T_s \cdot m \cdot \sin(\alpha^\circ) / \sin(60^\circ) \quad (2)$$

$$T_z = T_s - T_x - T_y \quad (3)$$

## 5.2 โปรแกรมทิงเกอร์แคท (TinkerCAD)

โปรแกรมทิงเกอร์แคท เป็นโปรแกรมที่ใช้งานง่าย ทำงานบนเว็บเบราว์เซอร์โดยไม่มีค่าใช้จ่าย สามารถใช้สำหรับออกแบบ 3 มิติ ออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เขียนโปรแกรมและการจำลองการทำงาน โปรแกรมทิงเกอร์แคทมีแบบจำลองของบอร์ด อาดูยโน้ อุโน้ ดังที่แสดงตัวอย่างไว้ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 บอร์ด อาดูยโน้ อุโน้ ในโปรแกรมทิงเกอร์แคท

การเขียนโปรแกรมในแบบจำลองบอร์ด อาดูยโน้ อุโน้ สามารถเขียนในโหมดอักขร (Text) หรือบล็อก (Block) ได้โดยในโหมดอักขร ภาษาที่ใช้ในการเขียนเป็นภาษาที่มีโครงสร้างของแบบภาษาซี และมีชุดคำสั่งในไลบรารีของอาดูยโน้ ด้วย ดังนั้นเมื่อเขียนชุดคำสั่งหรือโปรแกรมใช้งานที่ต้องเสร็จแล้วจะสามารถจำลองการทำงานของโปรแกรมที่ออกแบบไว้ในแบบจำลองบอร์ด อาดูยโน้ อุโน้ และดูผลการจำลองการทำงานตามโปรแกรมและการเชื่อมต่อกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบไว้ในโปรแกรมทิงเกอร์แคทได้ ทำให้ทราบผลการทำงานของโปรแกรมและวงจรที่ออกแบบก่อนสร้างชุดต้นแบบจริง เมื่อผลของจำลองการทำงาน แสดงผลทำงานได้ถูกต้องตามวัตถุประสงค์ของการออกแบบแล้วสามารถทำสำเนา (Copy) โปรแกรมที่เขียนไว้ ไปวางลงใน

โปรแกรม อาดูยโน้ ไอดีอี (Arduino IDE) ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับพัฒนาของตัวบอร์ด อาดูยโน้ อุโน้ ได้โดยตรงเพื่อทดสอบการทำงานจริงได้ของโปรแกรมที่ออกแบบไว้กับบอร์ด อาดูยโน้ อุโน้ จริงได้

## 5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการดำเนินการพัฒนาออกแบบได้มีการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีการดำเนินงานวิจัยที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้บอร์ด อาดูยโน้ มาพัฒนาสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มเพื่อควบคุมการทำงานของชุดอินเวอร์เตอร์ รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้โปรแกรมทิงเกอร์แคทในการพัฒนาโปรแกรมชุดทดลองจากการศึกษาค้นคว้าพบบางงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

5.3.1 การพัฒนานำบอร์ด อาดูยโน้ อุโน้ มาใช้เพื่อควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส โดยออกแบบให้บอร์ด อาดูยโน้ อุโน้ สร้างสัญญาณสวิตซ์ทำงานในโหมดนำกระแส 180 องศา (180-Conduction Mode) แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะมีลักษณะรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave) และจ่ายแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อเพิ่มระดับของแรงดันไฟฟ้าให้เท่ากับ 223 โวลต์ [7]

5.3.2 การทดลองเพื่อวัดค่าความต้านทานภายในของมัลติมิเตอร์ของโปรแกรมทิงเกอร์แคท เป็นการประยุกต์ใช้โปรแกรมทิงเกอร์แคท เพื่อเป็นชุดปฏิบัติการทดลองของนักศึกษาสาขาวิชาด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยการจำลองการทำงานเสมือนการต่อจริงฝึกวัดหาค่าความต้านทานภายในของมัลติมิเตอร์ [8]

5.3.3 การพัฒนาอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส 7 ระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์ ด้วยการจำลองการทำงานบนโปรแกรม แมทแลบ/ซิมูลิงค์ ในการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มด้วยการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบไซน์ จะเป็นการทำงานร่วมกันของโปรแกรมแมทแลบ/ซิมูลิงค์ ที่สร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแล้วส่งออกที่พอร์ตดิจิทัลของบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล เบอร์ TMS320F28335 เพื่อควบคุมให้อินเวอร์เตอร์สร้างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้า 1 เฟส 7 ระดับ ที่จะทำให้ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมมีค่าลดลง [9]

5.3.4 การนำบอร์ด อาดูยโน้ อุโน้ ภายในโปรแกรมทิงเกอร์แคท มาพัฒนาช่วยในเป็นชุดปฏิบัติการทดลองในวิชา Arduino & Robot สำหรับการเรียนการสอน โดยการใช้การสอน

แบบทดลองและเทคนิคร่วมด้วยช่วยงานกลุ่ม ของนักเรียนมัธยมชั้นปีที่ 5 [10]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีงานวิจัยนำบอร์ด อาคูยโน้ อูโน้ มาพัฒนาเพื่อสร้างเป็นชุดควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ทั้งแบบระบบแรงดันไฟฟ้า 1 เฟสหลายระดับ และแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 2 ระดับ ที่ทำงานในโหมดต่อเนื่อง ด้วยการพัฒนาและจำลองการทำงานของชุดคำสั่งที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรมแมทแล็บ/ซิมูลิงค์ และมีงานวิจัยที่นำโปรแกรมทิงเกอร์แคท มาช่วยในการสอนปฏิบัติทดลอง แต่ยังไม่พบบางงานวิจัยที่นำโปรแกรมทิงเกอร์แคทมาช่วยในการพัฒนาสร้างเป็นชุดควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ด้วยวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิ และใช้เป็นชุดจำลองเพื่อสาธิตการทำงานของวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิ

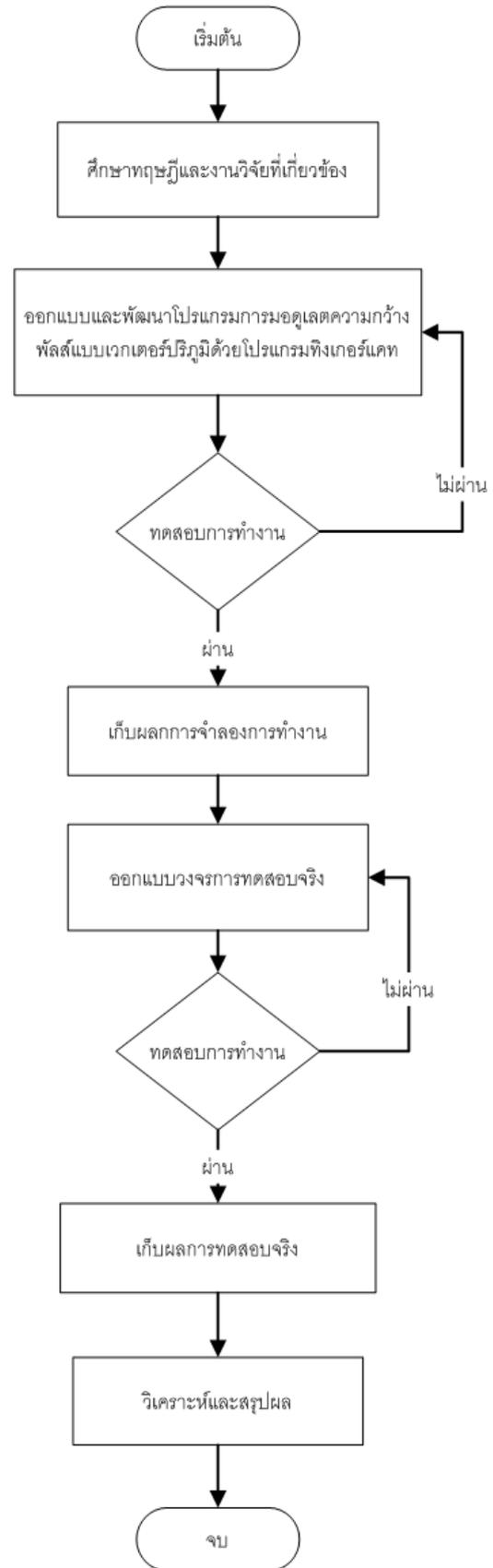
## 6.วิธีการดำเนินวิจัย

ขั้นตอนในการดำเนินวิจัยสามารถแสดงแผนภาพการดำเนินงานวิจัยได้ในรูปที่ 4

### 6.1การพัฒนาโปรแกรมและวงจรจำลองการทำงาน

งานวิจัยนี้เสนอการนำโปรแกรมทิงเกอร์แคท มาพัฒนาเพื่อให้บอร์ด อาคูยโน้ อูโน้ สามารถทำการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิ สำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 2 ระดับได้ โดยในส่วนของโปรแกรมได้ถูกดำเนินการพัฒนาขั้นตอนในการสร้างสัญญาณพีดับลิวเอ็มด้วยวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิ ซึ่งจะใช้วิธีการเปิดตาราง (Lookup Table) ของค่าไซน์ (sine) เพื่อใช้ในการคำนวณตามสมการที่ 1 และ 2 ด้วยการกำหนดให้แต่ละเซกเตอร์จะมีการสุ่มทั้งหมด 5 ครั้ง มุมในการสุ่มแต่ละครั้งจะเพิ่มขึ้นครั้งละ 12 องศา

ในการสร้างสัญญาณพีดับลิวเอ็มหรือสัญญาณสวิตซ์ในงานวิจัยนี้จะใช้ชุดคำสั่งของบอร์ด อาคูยโน้ อูโน้ ได้แก่ `digitalWrite(pin,value)` ในการกำหนดสถานะของการทำงานของสวิตซ์ในแต่ละกึ่งของอินเวอร์เตอร์ ในการเรียงลำดับการทำงานในแต่ละกึ่งจะเรียงตามลำดับของเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าตามตารางที่ 1 สำหรับคำสั่ง `delayMicroseconds(value)` ถูกใช้ในการหน่วงเวลาเพื่อใช้งานเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าแต่ละตัวโดยใช้สมการที่ 1 ถึง 3

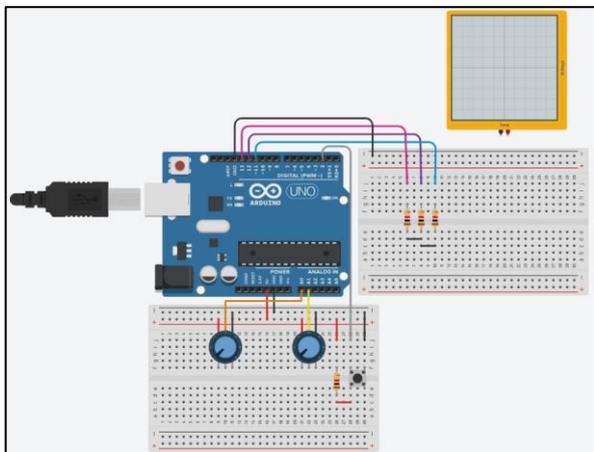


รูปที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. เริ่มต้น
2. กำหนดค่ามุมของไซน์ที่มีมุมระหว่าง 0-60 องศา
3. กำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรที่จะใช้งาน
4. ประกาศตัวแปรที่จะใช้งาน
5. ประกาศฟังก์ชันคำนวณเวลา
  - 5.1 อ่านค่า Modulation Index
  - 5.2 อ่านค่า Frequency Output
  - 5.3 คำนวณค่าเวลาตามตารางที่ 2
6. กำหนดการสื่อสารกับเครื่องคอมพิวเตอร์แบบอนุกรม
7. กำหนดการใช้งานของขา อาดูยโน้
8. เรียกใช้งานฟังก์ชันการคำนวณตามข้อ 5
9. กำหนดการใช้ฟังก์ชันการขัดจังหวะโปรแกรม
10. สร้างสถานะของขาเอาต์พุต ตามลำดับเวกเตอร์ในตารางที่ 1
11. หน่วงเวลาสถานะของขาเอาต์พุต ตามเวลาที่ได้จากฟังก์ชันคำนวณเวลา
12. วนกลับไปทำงานในข้อ 10
13. กรณีมีการขัดจังหวะการทำงาน เรียกฟังก์ชันคำนวณเวลาทำงาน

รูปที่ 5 อัลกอริทึมวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิ

การคำนวณหาเวลาในหน่วยและเรียงลำดับของเวลาในการหน่วงตามลำดับค่าเวลาของแต่ละเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่จะเรียงตามลำดับแสดงไว้ในตารางที่ 2 สำหรับการเปลี่ยนค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะใช้การขัดจังหวะ (interruption) จากสัญญาณภายนอกของขาที่ถูกกำหนดให้รับค่าสัญญาณขัดจังหวะ เมื่อถูกขัดจังหวะจะไปทำงานส่วนของโปรแกรมที่บริการการขัดจังหวะ โดยโปรแกรมจะทำการใช้คำสั่ง analogRead (pin) เพื่ออ่านค่าของดัชนีการมอดูเลตและค่าความถี่เอาต์พุตที่ต้องการ และนำมาคำนวณค่าเวลาตามสมการที่ 1 ถึง 3 โดยสามารถแสดงอัลกอริทึมแบบบรรยายในการออกแบบโปรแกรมในรูปที่ 5

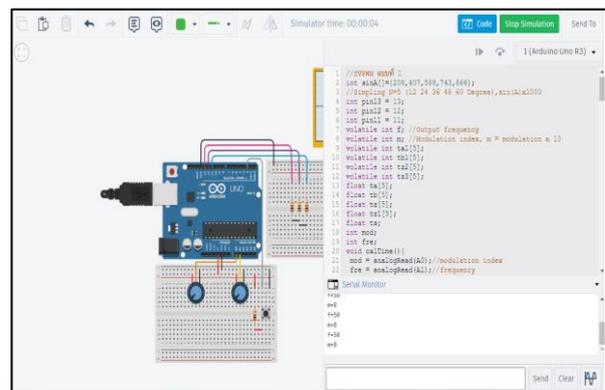


รูปที่ 6 วงจรจำลองการทำงานบนโปรแกรมทิงเกอร์แคท

โปรแกรมที่ถูกพัฒนาจะถูกออกแบบให้สามารถปรับค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ตั้งแต่ 10-50Hz และปรับค่าดัชนีการมอดูเลตได้ด้วยการปรับหมุนตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ (Variable Resistor)

การออกแบบวงจรเพื่อจำลองการทำงานจะกำหนดให้ภาคอินพุตของบอร์ด อาดูยโน้ อูโน่ รับค่าแรงดันไฟฟ้าจากตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ 2 ตัว เป็นสัญญาณอินพุตสำหรับใช้ในการปรับค่าดัชนีการมอดูเลต (m) และค่าความถี่ (f) ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์โดยเชื่อมต่อเข้าขา A0 และ A1 ของบอร์ด อาดูยโน้ อูโน่ ตามลำดับและใช้สวิทช์เป็นตัวสร้างสัญญาณขัดจังหวะให้บอร์ด อาดูยโน้ อูโน่ ด้วยการป้อนสัญญาณที่ขา 2 ของบอร์ด อาดูยโน้ อูโน่ ซึ่งทำการอ่านค่าดัชนีการมอดูเลตและความถี่เอาต์พุตที่กำหนด และทำการคำนวณหาค่าเวลาใช้งานของแต่ละเวกเตอร์ตามสมการที่ 1 ถึง 3 โดยลักษณะของวงจรที่ถูกออกแบบเพื่อการจำลองการทำงานได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6

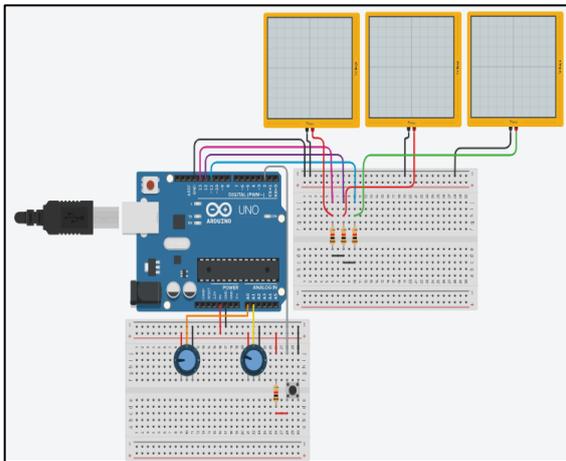
โปรแกรมที่เสนอได้มีการกำหนดให้มีการแสดงค่าดัชนีการมอดูเลต และค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ถูกนำไปแสดงออกที่ซีเรียล มอนิเตอร์ (Serial Monitor) ของโปรแกรมทิงเกอร์แคท ดังแสดงในรูปที่ 7



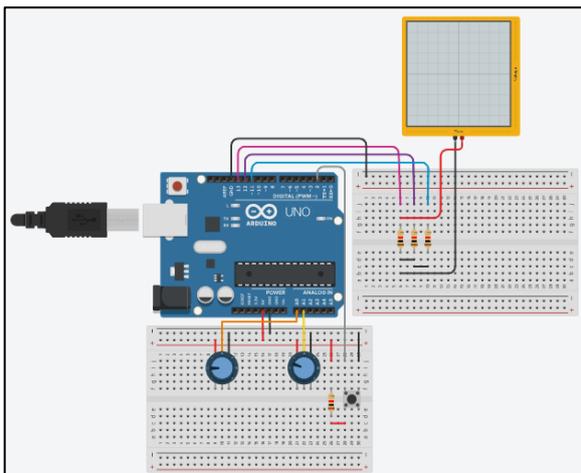
รูปที่ 7 ซีเรียล มอนิเตอร์ ในโปรแกรมทิงเกอร์แคท

การวัดรูปคลื่นสัญญาณจะใช้แบบจำลองออสซิลโลสโคปของโปรแกรมทิงเกอร์แคท มาใช้ทำการวัด โดยการวัดสัญญาณพีคดับลิวเอ็มสำหรับนำไปขับเกทของไอจีบีที (IGBT) หรือมอสเฟต (MOSFET) ที่ถูกส่งออกที่ขา 13 สำหรับเฟส A ที่ขา 12 สำหรับเฟส B และที่ขา 11 สำหรับเฟส C มีวงจรการวัดดังที่แสดงในรูปที่ 8

การวัดแรงดันไฟฟ้าเฟส (Phase Voltage) ที่จะเกิดขึ้นจากสัญญาณพีดับลิวิตีเอ็มจะใช้วิธีด้วยการนำตัวต้านทาน 3 ตัว มาต่อเชื่อมเป็นโหลด (Load) แบบสตาร์ (Star) ดังแสดงในรูปที่ 9 แล้วป้อนสัญญาณพีดับลิวิตีเอ็มจากขา 13 ขา 12 และ ขา 11 ของบอร์ด อาคูโยโน อนุโน เข้าที่โหลดตัวต้านทานดังกล่าวเมื่อนำออสซิลโลสโคปมาวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานจะได้รูปร่างของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟส จะทำให้สามารถตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณพีดับลิวิตีเอ็มที่สร้างขึ้นได้ โดยตรวจจากรูปร่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟสและความถี่ที่เกิดขึ้น

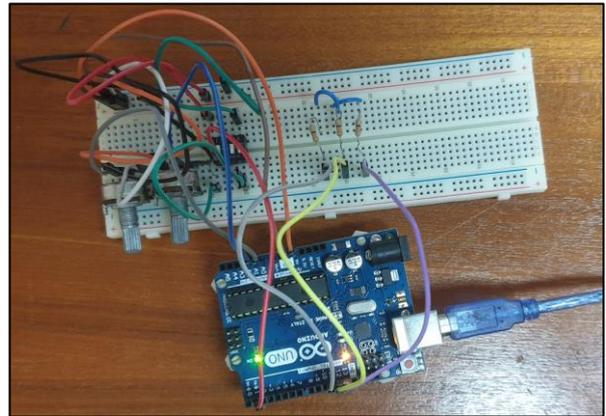


รูปที่ 8 วงจรการวัดสัญญาณพัลส์สวิตซ์ขา 13 ขา 12 และ ขา 11



รูปที่ 9 วงจรการวัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเฟส

สำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย (Line Voltage) จะใช้แบบจำลองออสซิลโลสโคปวัดที่ปลายด้านบนของโหลดตัวต้านทานที่ต่อแบบสตาร์ จะสามารถตรวจสอบรูปร่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายและความถี่ที่เกิดขึ้นได้ ถ้าหากสัญญาณพีดับลิวิตีเอ็มที่ถูกสร้างขึ้นมีความผิดพลาดจากการพัฒนาโปรแกรมรูปร่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ทั้งแรงดันไฟฟ้าเฟสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายที่เกิดขึ้นจะผิดเพี้ยน ไม่มีความสมมาตรหรือมีความถี่ไม่ถูกต้อง



รูปที่ 10 วงจรการทดสอบจริง

```

copy_of_svpwm_dedtime | Arduino IDE 2.3.2
File Edit Sketch Tools Help
Arduino Uno
copy_of_svpwm_dedtime1.ino
1 //SVPWM แบบที่ 1
2 int sinA[]=(208,407,588,743,866);
3 //Sampling N=5 (12 24 36 48 60 Degree),sin(A)x1000
4 int pin13 = 13;
5 int pin12 = 12;
6 int pin11 = 11;
7 volatile int f; //Output frequency
8 volatile int m; //Modulation index, m = modulation x 10
9 volatile int ts[5];
10 volatile int tb[5];
11 volatile int tz[5];
12 volatile int tz3[5];
13 float ta[5];
14 float tb[5];
15 float tz[5];
16 float tz1[5];
17 float ts;
18 int mod;
19 int fca;
Output Serial Monitor x
Message (Enter to send message to 'Arduino Uno' on 'COM11')
m=0
    
```

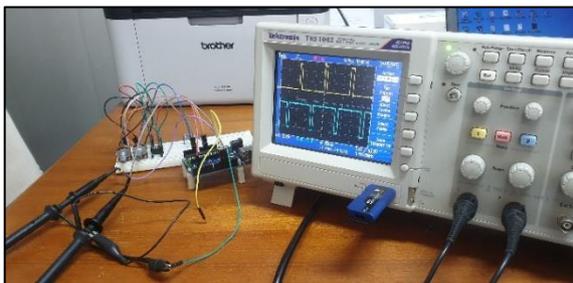
รูปที่ 11 ซีเรียล มอนิเตอร์ ในโปรแกรม อาคูโยโน ไอดีอี

6.2การออกแบบการทดสอบจริง

วงจรถูกใช้ในการทดสอบจริงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่ถูกพัฒนาและจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ทิงเกอร์แคท ด้วยการนำโปรแกรมที่ถูกออกแบบพัฒนามาเข้า

สู่โปรแกรมอาดุยโน้ ไอดีอี (Arduino IDE) ที่ถูกติดตั้งไว้ภายในคอมพิวเตอร์ และเชื่อมต่อกับ บอร์ด อาดุยโน้ อุโน้ ด้วยพอร์ตยูเอสบี (USB) ในการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่ถูกพัฒนา จะทำการวัดสัญญาณพีดับลิวเอ็มที่จ่ายออกที่ขาดิจิทัล (Digital Pin) ของ บอร์ด อาดุยโน้ อุโน้ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณตามสมการที่ 1 ถึง 3 ดังแสดงวงจรการทดสอบได้ในรูปที่ 10 โดยค่าดัชนีการมอดูเลต และค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ต้องการจะถูกแสดงออกที่ ซีเรียลมอนิเตอร์ ของโปรแกรม อาดุยโน้ ไอดีอี ดังที่แสดงในรูปที่ 11

ในการทดสอบจริง สัญญาณพีดับลิวเอ็มของขา 13 ขา 12 และขา 11 จากบอร์ด อาดุยโน้ อุโน้ จะถูกป้อนเข้าสู่ตัวต้านทาน 3 ตัวที่ถูกต้องกันแบบสแตร์ โดยสัญญาณพีดับลิวเอ็มที่ป้อนให้ตัวต้านทานแต่ละตัวจะเกิดการหักล้างและเสริมกัน เมื่อวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานแต่ละตัวจะได้ลักษณะรูปร่างของแรงดันไฟฟ้าเฟส วัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างตัวต้านทาน 2 ตัวจะได้ลักษณะรูปร่างของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย ซึ่งจะถูกใช้ในการตรวจสอบความสมมาตร ความถี่ และความต่างเฟสของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟส โดยในการวิจัยนี้ใช้ออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัล ยี่ห้อ แทคโทรนิคส์ (TEKTRONIX) รุ่นทีบีเอส (TBS) 1042 แบบ 2 ช่อง (Channel) เป็นเครื่องมือวัดและบันทึกรูปคลื่นจากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 12

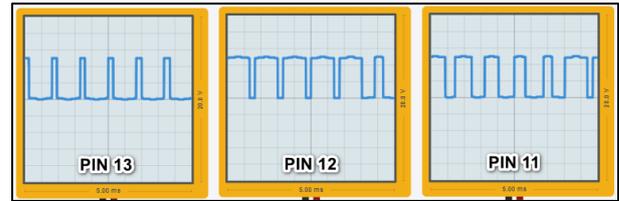


รูปที่ 12 การวัดในการทดสอบจริง

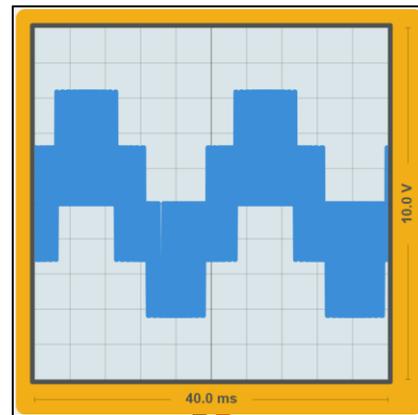
## 7. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

### 7.1 การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมทิงเกอร์แคท

ในงานวิจัยได้ดำเนินการจำลองการทำงานเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการพัฒนาโปรแกรมการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิด้วยโปรแกรมทิงเกอร์แคท โดยตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณพีดับลิวเอ็ม รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเฟส และแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย ที่เกิดขึ้นจากการทำงานของโปรแกรมที่เสนอ



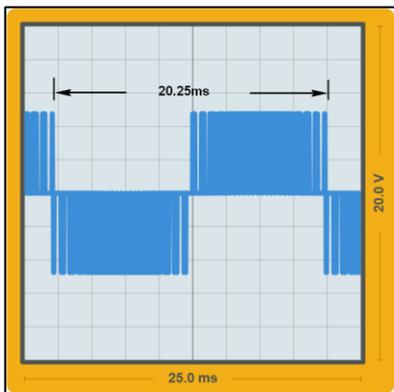
รูปที่ 13 สัญญาณพีดับลิวเอ็มของขา 13 ขา 12 และ ขา 11  
(X:500  $\mu$ s/Div. Y :2V/Div.)



รูปที่ 14 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟส A  
(X:5ms/Div. Y:1V/Div.)

ในรูปที่ 13 แสดงรูปสัญญาณพีดับลิวเอ็ม จากบอร์ด อาดุยโน้ อุโน้ ในโปรแกรมทิงเกอร์แคท จำลองการทำงานตามโปรแกรมที่พัฒนาและส่งสัญญาณพีดับลิวเอ็มออกที่ขา 13 ขา 12 และ ขา 11 ของ บอร์ด อาดุยโน้ อุโน้ ตามที่ออกแบบไว้ ในการจำลองการทำงานได้กำหนดให้ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (f) เท่ากับ 50 Hz และมีค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ (m) เท่ากับ 0.8 จากรูปพบว่าสัญญาณพีดับลิวเอ็มเกิดขึ้นทั้งสามขาตามที่กำหนด แต่เนื่องจากแบบจำลองออสซิลโลสโคปของโปรแกรมทิงเกอร์แคท เป็นแบบ 1 ช่องสัญญาณทำให้สัญญาณที่วัดได้จากแบบออสซิลโลสโคปจะไม่เข้าจังหวะกัน สัญญาณที่อ่านได้จึงไม่สามารถแสดงลำดับเวกเตอร์แรงดันที่ถูกต้องได้ ในงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการตรวจสอบด้วยการนำสัญญาณพัลส์สวิตซ์มาหักล้างกันเพื่อสร้างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่ถูกพัฒนา หากการเรียงลำดับเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าได้ถูกต้องและเวลาในการใช้งานเวกเตอร์คำนวณได้ถูกต้อง รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเฟสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายจะเป็นเป็นรูปคลื่นที่มีความสมมาตร

และเมื่อวัดความถี่ของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเฟสหรือแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายจะมีความถี่ตามที่กำหนดไว้ แต่มีข้อจำกัดในการยืนยันความถูกต้องของความต่างเฟสของแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากการไม่เข้าจังหวะกันของออสซิลโลสโคปทั้ง 3 ตัวขณะทำการวัด แต่สามารถถูกตรวจสอบด้วยการทดสอบจริง



รูปที่ 15 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายเฟส A และ B ( $V_{AB}$ ) (X:2.5ms/Div. Y:2V/Div.)

ในรูปที่ 14 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของเฟส A โดยรูปคลื่นของเฟส B และเฟส C ก็จะมีลักษณะเดียวกัน รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟส A ที่แสดงขณะที่โปรแกรมทำงานที่  $m=0.8$  และ  $f=50$  Hz รูปคลื่นที่ปรากฏเป็นรูปคลื่นแบบ 6 ขั้นบันได (6 Step) และรูปคลื่นมีความสมมาตร เป็นการแสดงถึงความถูกต้องของลำดับเวกเตอร์มีการเรียงอย่างถูกต้องตามที่แสดงในตารางที่ 1

สำหรับการตรวจสอบผลคำนวณค่าเวลาการใช้ของแต่ละเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าตามสมการที่ 1 ถึง 3 และการเรียงลำดับการใช้เวลาตามตารางที่ 2 ของโปรแกรมที่เสนอจะใช้รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายในการตรวจสอบ หากมีการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่เรียงลำดับเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าถูกต้อง สัญญาณพีดับบลิวเอ็มของเฟส A จะหักล้างกับสัญญาณพีดับบลิวเอ็มของเฟส B จะได้รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายที่มีลักษณะสมมาตร และหากการคำนวณค่าเวลาในการใช้เวกเตอร์และเรียงลำดับตามตารางที่ 2 ถูกต้อง ความถี่ของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายก็จะมีความถี่ตามที่ต้องการ โดยรูปที่ 15 แสดงให้เห็นถึง

ความสมมาตรและความถี่ของรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย

ตารางที่ 3 ค่าความถี่ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า  $V_{AB}$  จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมทิงเกอร์แคท เมื่อให้  $m=0.8$

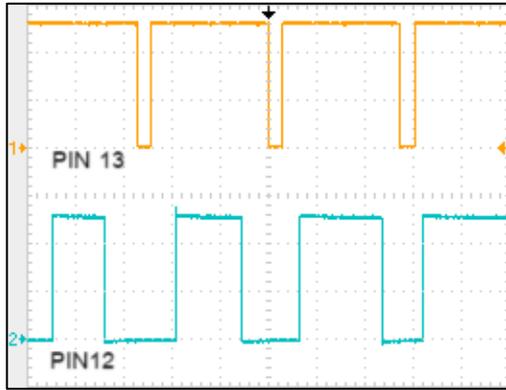
ความถี่ที่กำหนด (Hz)	ความถี่จากการจำลองการทำงาน (Hz)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
5	4.94	1.23
10	9.92	0.79
15	14.88	0.79
20	19.84	0.79
25	24.69	1.23
30	29.41	1.96
35	34.48	1.48
40	39.45	1.38
45	44.44	1.23
50	49.38	1.23
ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน		1.21

ในการจำลองการทำงานกำหนดให้ดัชนีการมอดูเลตคงที่เท่ากับ 0.8 และดำเนินการปรับค่าความถี่ตั้งแต่ค่าเริ่มต้นที่ 5 Hz เพิ่มขึ้นครั้งละ 5Hz จนค่าความถี่เท่ากับ 50 Hz เพื่อตรวจสอบความสามารถและประสิทธิภาพของโปรแกรมที่เสนอ โดยผลจากการจำลองได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3 ซึ่งพบว่ามี ความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นของค่าความถี่ที่โปรแกรมสร้างขึ้น เทียบกับความถี่ที่ต้องการ โดยมีค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่โปรแกรมสร้างเท่ากับ 1.21% ซึ่งเกิดจากการปัดเศษขณะทำการคำนวณค่าเวลาการใช้งาน และการตีความคำสั่งของโปรแกรมทิงเกอร์แคท

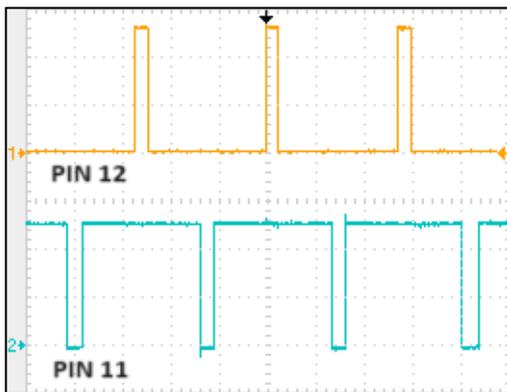
## 7.2 ผลการทดสอบจริง

งานวิจัยได้ดำเนินการทดสอบจริงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องและการนำไปใช้งานได้จริงของการพัฒนาโปรแกรมการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิด้วยโปรแกรมทิงเกอร์แคท โดยดำเนินการตรวจวัดสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ บอร์ด อาดูยโน้ อูโน้ จ่ายออกมาที่ขา 13 ขา 12 และขา 11 ดังแสดงในรูปที่ 16 และรูปที่ 17 ด้วยออสซิลโลสโคปแบบ 2 ช่อง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนขนาดความกว้างของ

พัลส์ของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มแต่ละลูก ซึ่งเป็นไปตามการคำนวณของสมการที่ 1 ถึง 3 ที่ค่าของมุมในฟังก์ชันไซน์ (Sine Function) มีการเปลี่ยนค่ามุมและการเรียงลำดับเวกเตอร์ จึงทำให้ความกว้างพัลส์มีการเปลี่ยนแปลง



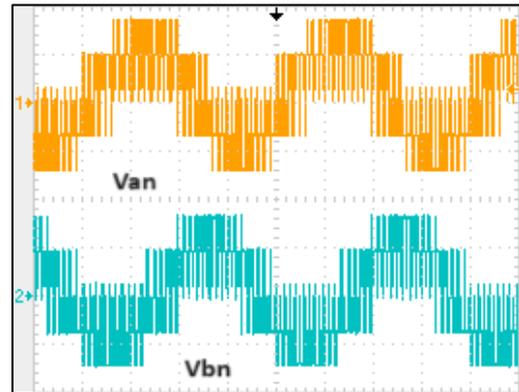
รูปที่ 16 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มขา 13 และขา 12  
(X:250µs/Div. Y: 2V/Div.)



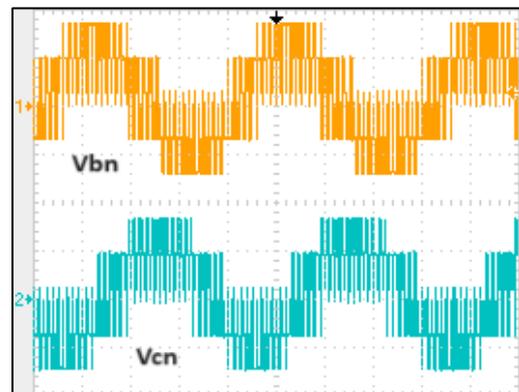
รูปที่ 17 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มขา 12 และขา 11  
(X:250µs/Div. Y:2V/Div.)

ในการทดสอบจริงได้นำเครื่องมือวัดออสซิลโลสโคปมาวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานที่ต่อแบบสตาร์ จะได้สัญญาณคลื่นแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส เพื่อตรวจสอบความต่างเฟสของแรงดันไฟฟ้างดแสดงในรูปที่ 17 และ 18 โดยรูปที่ 18 แสดงถึงความต่างเฟสของเฟส A กับเฟส B ห่างกัน 120 องศา รูปที่ 19 แสดงถึงความต่างเฟสของเฟส B กับเฟส C ห่างกัน 120 องศา รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเฟสทั้ง 3 เฟสมีลักษณะสมมาตรและต่างเฟสกัน 120 องศา สำหรับสัญญาณคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายจะถูกนำมาใช้ในการหาค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้า

เอาต์พุตที่จะถูกสร้างขึ้นด้วยอินเวอร์เตอร์ จากรูปที่ 20 แสดงรูปสัญญาณคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย A และ B ที่  $m=0.8$  และ  $f = 50\text{Hz}$  ที่แสดงความสมมาตรของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ทิงเกอร์แคทที่แสดงถึงความถูกต้องของโปรแกรมที่ถูกพัฒนาสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ด้วยวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิได้



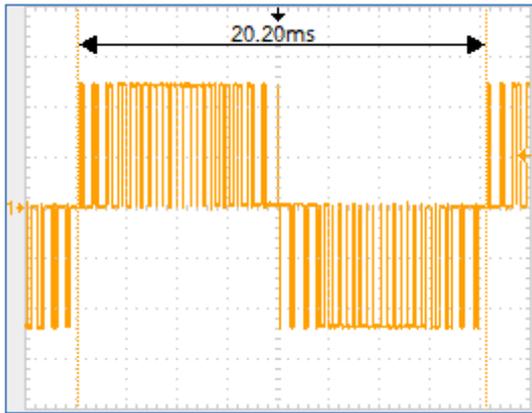
รูปที่ 18 สัญญาณคลื่นแรงดันไฟฟ้าเฟส A และ B  
(X:5ms/Div. Y:2V/Div.)



รูปที่ 19 สัญญาณคลื่นแรงดันไฟฟ้าเฟส B และ C  
(X: 5ms/Div. Y:2V/Div.)

สำหรับความสามารถในการสร้างค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตนั้น จากผลการทดสอบได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4 พบว่ามีความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเทียบกับความถี่ที่ต้องการ โดยมีค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่โปรแกรมสร้างเท่ากับ 0.77% ซึ่งเกิดจากการปัดเศษขณะทำการคำนวณค่า

เวลาการใช้งานและเวลาที่เสียไปจากการตีความหมายของคำสั่งของไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ของบอร์ดอาดุยโน้ อูโน่ ทั้งนี้ทั้งหากพิจารณารวมทั้งผลการจำลองและผลการทดสอบจริง พบว่า ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าต่ำกว่า 2 % สะท้อนถึงสมรรถนะของโปรแกรมที่ออกแบบที่มีความแม่นยำในการสร้างค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสูง



รูปที่ 20 สัญญาณคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย A และ B  
(X:5ms/Div. Y:2V/Div.)

ตารางที่ 4 ค่าความถี่ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายจากการทดสอบจริง เมื่อให้  $m=0.8$

ความถี่ที่กำหนด (Hz)	ความถี่จากการจำลองการทำงาน (Hz)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
5	4.98	0.50
10	9.90	0.99
15	14.88	0.79
20	19.84	0.79
25	24.88	0.5
30	29.76	0.79
35	34.72	0.79
40	39.68	0.79
45	44.64	0.79
50	49.50	0.99
ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน		0.77

## 8.สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 8.1สรุปผลการวิจัย

8.1.1โปรแกรมทิงเกอร์แคท สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมและจำลองการทำงานการสร้างสัญญาณที่ดับลิวเอ็มด้วยวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิเพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 2 ระดับได้

8.1.2โปรแกรมที่ถูกพัฒนาสามารถทำงานได้ทั้งบนแบบจำลองบอร์ด และบอร์ดจริงของบอร์ด อาดุยโน้ อูโน่ ได้

8.1.3โปรแกรมที่ถูกพัฒนาสามารถปรับค่าความถี่แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนจากผลการจำลองการทำงานเท่ากับ 1.21% และจากการทดลองจริงมีค่าเท่ากับ 0.77% ซึ่งแสดงถึงสมรรถนะของโปรแกรมที่ออกแบบที่มีความแม่นยำในการสร้างค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตทำให้สามารถประยุกต์โปรแกรมที่ถูกพัฒนาไปใช้งานในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสตามวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิด้วยบอร์ด อาดุยโน้ อูโน่ ได้

8.1.4โปรแกรมและแบบจำลองที่เสนอในงานวิจัย สามารถนำไปประยุกต์ช่วยในการเรียนการสอนในหัวข้อการที่เกี่ยวข้องกับวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 2 ระดับได้

8.1.5ข้อจำกัดของเครื่องมือวัดได้แก่ออสซิลโลสโคปของโปรแกรม TINKERCAD จะเป็น 1 ช่อง (Channel) ทำให้การวัดสัญญาณที่ดับลิวเอ็มทั้ง 3 เฟส เพื่อตรวจสอบการเรียงลำดับเวกเตอร์ไม่สามารถทำได้โดยตรงแต่ใช้การตรวจสอบจากความสมมาตรของสัญญาณรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเฟสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายแทนได้

### 8.2ข้อเสนอแนะ

8.2.1ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองโดยนำโปรแกรมที่ออกแบบไปใช้งานกับบอร์ด อาดุยโน้ อูโน่ เท่านั้น ควรมีการทำวิจัยเพิ่มเติมโดยนำโปรแกรมที่ออกแบบไปใช้งานกับบอร์ด อาดุยโน้ รุ่นอื่นเพิ่มเติมเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโปรแกรม

8.2.2ในงานวิจัยนี้้นำวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิแบบต่อเนื่องมาใช้ในการวิจัยเท่านั้น งานวิจัยถัดไปควรศึกษาพัฒนาโปรแกรมวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิแบบไม่ต่อเนื่อง

8.2.3 ประยุกต์ใช้โปรแกรมทิงเกอร์แคทมาพัฒนาโปรแกรมเพื่อให้สามารถจำลองการสร้างสัญญาณพัลส์สวิตซ์ด้วยวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเวกเตอร์ปริภูมิ ทำงานในย่าน โอเวอร์ มอดูเลชัน (Over Modulation) ได้

#### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Iqbal, and et al. "Matlab/Simulink Model of Space Vector PWM for Three-Phase Voltage Source Inverter", *Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference*, United Kingdom, pp. 1096-1100, 6-8 Sept., 2006.
- [2] S. A. Zulkifli, M. N. Hussin and A. S. Saad, "MATLAB-Arduino as a low cost microcontroller for 3 phase inverter", *2014 IEEE Student Conference on Research and Development*, Penang, Malaysia, pp. 1-5, 2014.
- [3] Z. E. A. Kherroubi, and et al. "Real time implementation of space vector pulse width modulation using Arduino DUE board", *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, Italy, pp. 3576-3581, 2016.
- [4] H. W. van der Broeck, H. . -C. Skudelny and G. V. Stanke, "Analysis and realization of a pulsewidth modulator based on voltage space vectors", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.24, No.1, pp. 142-150, Jan.-Feb., 1988.
- [5] A. Arif, Y. Bekakra, and D. Ben Attous, "Fuzzy Logic Control Using SVPWM to Enhance the Control of the DFIG Driven by a Wind Turbine", *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*, 20(1), pp. 39-50, 2022.
- [6] A. M. Trzynadlowski, and et al. "Random pulse width modulation techniques for converter-fed drive systems-a review", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, no. 5, pp. 1166-1175, Sept.-Oct. 1994.
- [7] S. Hossain, and et al. "MOSFET-based Three-Phase Inverter using Arduino - Applicable in Microgrid Systems", *2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, Maharashtra, India, pp. 1-5, 2021.
- [8] R. Katman, N. Sisuk, and A. Kaewpoonsuk, "An Experiment to Measure the Internal Resistance Of a Multimeter on the TinkerCAD Program", *PSRU Journal of Science and Technology*, 7(1), pp. 100-116, 2022. (in Thai).
- [9] B. Wasuri, B. Hiransing, and A. Jangwanitlert, "7-Level H-Bridge Cascaded Inverter for Renewable Energy Source", *Journal of Science and Technology Thonburi University*, Vol.6, No.2, pp. 46-58, 2022. (in Thai).
- [10] R. Supha, T. Gumjudpai, and N. Khomkham, "Developing Skills and Techniques for Teaching Arduino & Robot with TinkerCAD for Mathayomsuksa 5 Students", *The Journal of Research and Academics*, Vol.7, No.1, pp. 167-182, 2024. (in Thai).