

# ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสำหรับ เครื่องจักรรีดยางไฟฟ้า

## A Three- Phase Induction Motor Drive System with Power Factor Correction Circuits for Electric Rubber Rolling Machine

อนุชิต อูไรรัตน์<sup>1\*</sup>, เฉลิม จินาตุน<sup>1</sup>

Anuchit Aurairat<sup>1\*</sup>, Chalerm Jinatun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

<sup>1</sup>Faculty of Industrial and Technology, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Thailand

\*Corresponding author. Tel.: 08 9744 0089, E-mail: anuchit.aur@rmutr.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแนวทางใหม่สำหรับเครื่องจักรรีดยางไฟฟ้าคือระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพร้อมวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง วิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบดั้งเดิมในแง่ของการลดผลรวมความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกและทำให้ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำคงที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่อลดผลรวมความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิก ไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวจะถูกแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสผ่านวงจรแปลงแบบทบทวนแรงดันไฟฟ้าด้วยโหมดกระแสไหลต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังใช้วิธี  $V/f$  เพื่อควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำและนำวิธีการกลุ่มอนุภาคมาใช้ในการหาค่าเกณฑ์การควบคุม โดยใช้วิธีการค่าปริพันธ์ของค่าผิดพลาดกำลังสองแปรตามเวลา (เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์) จากการพัฒนาด้านแบบพบว่าวิธีการนี้สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าได้ระหว่าง 0.97 ถึง 0.98 และผลรวมความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกเท่ากับ 3.17 เปอร์เซ็นต์ซึ่งนำไปสู่การลดกำลังไฟฟ้าต้านกลับของเครื่องกำเนิดและทำให้การสูญเสียในแกนเหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้าลดลง

**คำสำคัญ :** เครื่องจักรรีดยางไฟฟ้า ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส วงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังไฟฟ้า  
ผลรวมความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิก

### ABSTRACT

This paper presents a novel approach for electric rubber rolling machines as a three-phase induction motor drive system with power factor correction circuits. The proposed approach was more efficient than the traditional ones in terms of lower total harmonic distortion and stability speed of the induction motor. Moreover, to reduce total harmonic distortion, the single-phase alternating current input was converted to the three-phase one via a boost converter for

Received 13-11-2019  
Revised 24-02-2020  
Accepted 03-03-2020

its continuous condition mode. Besides, the V/f method was employed to control the induction motor speed. The particle swarm optimization using the integral time squared errors (an objective function) was applied to determine the control gain. Based on the photo type developed, the results indicated that the approach was able to correct the power factor of the source between 0.97 and 0.98, and the total harmonic distortion was 3.17 percent. This leads to the reduction of the reactive power of the generator; and consequently, the core loss of the electrical machine is decreased.

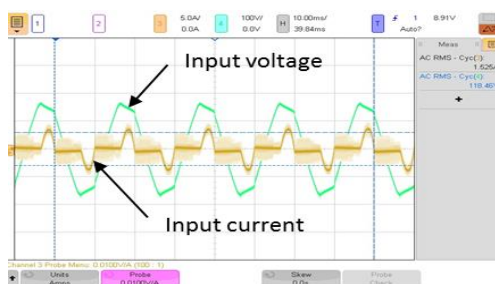
**Keyword:** Electric rubber rolling machine, Three-phase induction motor drive system, Power factor correction circuit, Total harmonic distortion

## 1. บทนำ

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่ทำรายได้ให้แก่เกษตรกรโดยมีมูลค่าการส่งออกของประเทศไทยเป็นอันดับ 2 รองจากข้าว [1] ปัจจุบันแนวโน้มการปลูกยางพารามีมากขึ้นเนื่องจากเป็นพืชที่ให้ผลตอบแทนสูง อายุการเก็บเกี่ยวยาวนาน ค่อนข้างในการปลูกและราคาของยางพาราเมื่อแปรรูปแล้วมีมูลค่าสูง เกษตรกรจึงปลูกยางพารามากขึ้น การจำหน่ายผลผลิตจากยางพาราแบ่งได้ออกเป็นสองประเภทคือ น้ำยางพาราและยางพาราแผ่น การจำหน่ายยางพาราแผ่นนั้นได้รับความนิยมมากกว่าการจำหน่ายน้ำยางสดเนื่องจากสามารถเก็บไว้ได้นาน การผลิตยางพาราแผ่นนั้นจำเป็นต้องใช้เครื่องจักรรีดยาง ปัจจุบันสามารถแบ่งเครื่องจักรรีดยางเป็นสองชนิดตามต้นกำลังที่ใช้คือ ชนิดที่ใช้มีมอเตอร์และชนิดที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ปัจจุบันเครื่องจักรรีดยางพาราได้มีการนำเอามอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ 1 เฟส (Single phase induction motor) มาใช้ในการขับเคลื่อนลูกรีดมากขึ้นจากเดิมนั้นเคยใช้กำลังจากคนเมื่อเปลี่ยนมาใช้มอเตอร์ไฟฟ้าทำให้มีความสะดวกและสามารถผลิตยางแผ่นได้มากขึ้นแต่ใช้เวลาน้อยลง ปัญหาของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส

คือ มีโครงสร้างที่ยุ่งยากเมื่อเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ 3 เฟส (Three phase induction motor) เนื่องจากมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ 1 เฟสที่ใช้กับเครื่องจักรรีดยางนั้นจำเป็นต้องมีแรงบิดในช่วงออกตัว (Starting torque) สูงและต้องมีแรงบิดในขณะทำงานสูง (Running torque) จึงจำเป็นต้องมีคาปาซิเตอร์ เพื่อเพิ่มแรงบิดขณะออกตัวและเพื่อเพิ่มแรงบิดในขณะทำงานปกติหลังจากออกตัวไปแล้ว (Capacitor start and capacitor run) ปัญหาที่พบบ่อยในปัจจุบันคือคาปาซิเตอร์เสียบ่อย เป็นต้นเหตุให้เสียเวลาและเกิดความล่าช้าในการผลิตยางแผ่นและขนาดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟสมีขนาดใหญ่กว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่พิกัดแรงม้าเท่ากันและปัญหาที่สำคัญของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำคือตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ 1 เฟสและ 3 เฟส มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำ ทำให้มีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าส่วนหนึ่งไปโดยเปล่าประโยชน์ ในปัจจุบันการไฟฟ้ามีการเรียกเก็บเงินค่าตัวประกอบกำลังจากผู้ประกอบการรายใหญ่ และปัญหาที่สำคัญของเกษตรกรชาวสวนยางพาราคือพื้นที่ทำการเกษตรส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่ห่างไกล ปัจจุบันระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในพื้นที่ชนบท

เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส จึงไม่สามารถนำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ 3 เฟสมาใช้กับเครื่องจักรที่ดัดแปลงไฟฟ้าได้และปัญหาอีกประการหนึ่งคือเครื่องจักรที่ดัดแปลงไฟฟ้าที่ไม่มีระบบอินเวอร์เตอร์ควบคุมไม่สามารถควบคุมแรงบิดและความเร็วตามที่ต้องการ จึงจำเป็นต้องมีอินเวอร์เตอร์มาควบคุม หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์คือแปลงผันจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและแปลงผันจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่แรงดันและความถี่ที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ทำให้สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของอินเวอร์เตอร์เพื่อให้สามารถควบคุมแรงบิดและความเร็วได้ตามต้องการ กระบวนการแรกของอินเวอร์เตอร์คือการแปลงผันจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงทำให้รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าด้านอินพุตไม่เป็นคลื่นไซน์ ทำให้เกิดฮาร์มอนิกและตัวประกอบกำลังมีค่าต่ำดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ผลการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง

ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power factor) คืออัตราส่วนระหว่างกำลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริง (True power, P) มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt : W)

ค่ากำลังงานที่ปรากฏ (Apparent power, S) มีหน่วยเป็น โวลต์-แอมป์ (VA) [2] ดังสมการที่ 1 ถึง 3

$$P.F. = \frac{P}{S} = \frac{V_{rms} I_{rms} \cos \theta_1}{V_{rms} I_{rms}} \quad (1)$$

เมื่อไม่คิดฮาร์มอนิกลำดับสูง  $V_{rms} = V_{1rms}$

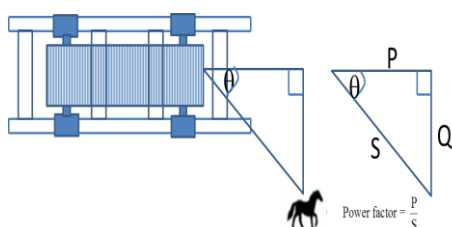
$$P.F. = \frac{I_{1rms}}{I_{rms}} \cos \theta_1 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} P.F. &= \frac{I_{1rms}}{\sqrt{\sum_i I_{rms}^2}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\sum_{i=2}^{\infty} I_i^2}{I_1^2}}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} \end{aligned} \quad (3)$$

กำลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการทำงานจริงต่อขนาดกำลังงานทั้งหมดที่ต้องการจากระบบไฟฟ้าส่วนเกินจากกำลังงานที่ใช้ทำงานจริงเรียกว่ากำลังไฟฟ้าต้านกลับ (Reactive power) มีหน่วยเป็นวาร์ (VAR) กำลังไฟฟ้าต้านกลับที่ไม่เกิดประโยชน์เป็นภาระกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าสายส่งและเกิดกำลังงานสูญเสียในอุปกรณ์เหล่านี้ดังแสดงในภาพที่ 2 มาตรฐานตัวประกอบกำลังและความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกถูกกำหนดโดยมาตรฐาน IEC/EN61000-3-2[3]

ภาพที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบกำลังงานที่มีมาใช้ในการลากรถเทียบได้กับกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏการเคลื่อนที่ของรถม้าในทิศทางที่ต้องการคือกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังที่มีมาต้องใช้มากขึ้นโดยไม่ได

มีการเคลื่อนที่ของรถในทิศทางที่ต้องการคือ กำลังไฟฟ้าต้านกลับ (Reactive power) ตัวประกอบ กำลังคือค่าโคไซน์ (Cosine) ของมุมที่เกิดขึ้นตาม ภาพในกรณีที่มีม้าออกแรงตั้งฉากกับรางในทิศทางที่ เคลื่อนที่ ที่ไม่เกิดงานขึ้นในกรณีนี้คือตัวประกอบ กำลังเท่ากับศูนย์ในทางกลับกันถ้าม้าเดินอยู่บนราง กำลังที่ใช้เพื่อจะลากรถก็จะใช้น้อยที่สุด



**ภาพที่ 2** การเปรียบเทียบกำลังงานที่ใช้ในการลากรถของม้ากับกำลังงานทางไฟฟ้า

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องดัง ตารางที่ 1 ยังไม่มีการทำวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแก้ไข ตัวประกอบกำลังกรณีโหลดเป็นเครื่องจักรรีดยาง ไฟฟ้า จากเหตุผลดังที่กล่าวมาในช่วงต้นจึงนำมาสู่ การนำเสนอการแก้ไขและปรับปรุงข้อบกพร่องของ เครื่องจักรรีดยางพาราแบบเดิม โดยการพัฒนาระบบ ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีวงจรแก้ไขตัว ประกอบกำลังไฟฟ้าสำหรับเครื่องจักรรีดยางไฟฟ้า โดยการออกแบบและสร้างระบบสมองกลฝังตัวเพื่อ ควบคุมการทำงาน โดยมีวงจรแปลงผันจากไฟฟ้า กระแสสลับเฟสเดียวที่มีวงจรควบคุมตัวประกอบ กำลังและแปลงผันจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้า กระแสสลับสามเฟส ออกแบบและสร้างระบบควบคุม ความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์

**ตารางที่ 1** การทบทวนวรรณกรรม

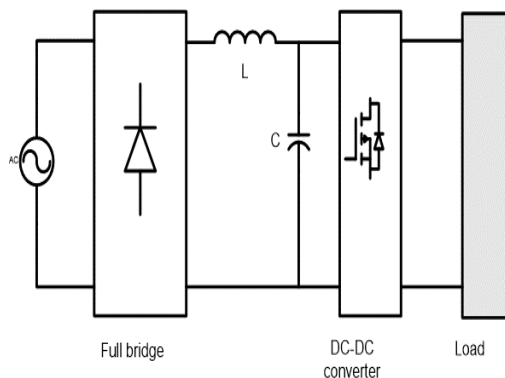
| เรื่อง                                                                                                                                         | วิธีการ                                            | ผลลัพธ์                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| เครื่องรีดยางพาราแบบต่อเนื่อง[1]                                                                                                               | ใช้มอเตอร์กระแสสลับขับเคลื่อน ลูกรีด               | - เครื่องรีดทำงานได้ต่อเนื่อง<br>- ไม่มีวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง                |
| วงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการพัฒนาตัวประกอบกำลัง ด้วยการแปลงผันแบบบูสต์[4]                                                              | ใช้วงจรแปลงผันแบบบูสต์ ควบคุมตัวประกอบกำลังด้วย PI | - ทดสอบกับโหลดตัวต้านทาน<br>- PF = 0.95                                        |
| การออกแบบวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ ชนิดแก้ไขตัวประกอบกำลังและ วงจร เลื่อน เฟส พูล บริด จ์ อินเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องชาร์จ แบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า[5] | ใช้วงจรแปลงผันแบบบูสต์ควบคุม ตัวประกอบกำลัง        | - ใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่รถยนต์ ไฟฟ้า                                           |
| การออกแบบตัวควบคุมฟuzzyแบบ กำหนดเกณฑ์ฟuzzyสำหรับควบคุม การทำงานการขนานมอเตอร์แปลง ผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง[6]                             | ควบคุมตัวประกอบกำลังด้วย FUZZY                     | - ทดสอบกับโหลดตัวต้านทาน<br>- THD = 4.41%<br>- ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9861 |

## 2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

### 2.1 เทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลัง

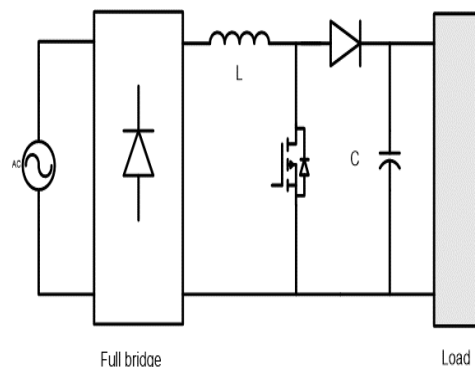
การแก้ไขตัวประกอบกำลังมี 2 วิธีการคือ เทคนิคการแก้ตัวประกอบกำลังแบบพาสซีฟ (Passive power factor correction techniques) และเทคนิค

การแก้ตัวประกอบกำลังแบบแอคทีฟ (Active power factor correction techniques) [7] ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยภาพที่ 3(ก) คือวงจร Passive power factor correction ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสทำหน้าที่แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง



(ก) Passive power factor correction

ภาพที่ 3 วงจรแปลงผันที่มีการแก้ตัวประกอบกำลัง



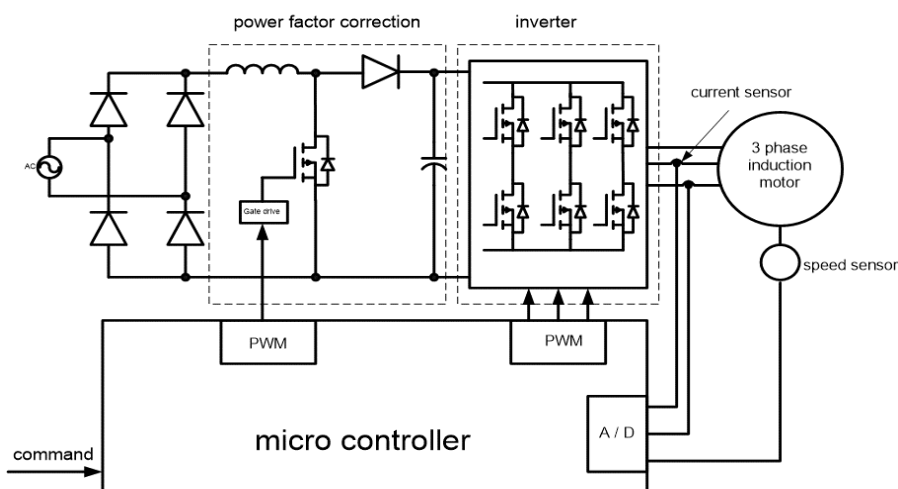
(ข) Active power factor correction

โดยมีวงจรกรองกระแสซึ่งประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ต่ออนุกรมและตัวเก็บประจุ (Capacitor) ต่อขนานอยู่กับวงจรดังรูปซึ่งตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่ในวงจรนี้จะทำหน้าที่เพิ่มตัวประกอบกำลังให้สูงขึ้น วงจรนี้สามารถทำให้ ตัวประกอบกำลังมีค่าสูงได้ถึง 0.98 แต่ข้อเสียของ วงจรนี้ก็คือสามารถนำไปใช้กับโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าไม่ สูงมากนัก ภาพที่ 3(ข) ใช้เทคนิคการแก้ตัวประกอบ กำลังแบบแอคทีฟซึ่งเป็นการทำงานงานเกี่ยวข้องกับ การปรับปรุงตัวประกอบกำลังของกระแสอินพุทโดย ใช้อุปกรณ์สวิตซ์ซิ่งเช่น มอสเฟต (MOSFET) และไอจีบีที

(IGBT) ซึ่งเป็นผลมาจากความก้าวหน้าในอุปกรณ์สาร กึ่งตัวนำไฟฟ้าและไมโครอิเล็กทรอนิกส์เช่นมอสเฟต นั้นเป็นที่นิยมสำหรับวงจรปรับปรุงตัวประกอบ กำลังไฟฟ้า เนื่องจากความเร็วในการใช้งานสูง พอประมาณและง่ายในการขับ ส่วนไอจีบีทีได้ถูก นำมาใช้เมื่อไม่นานมานี้สำหรับแรงดันไฟฟ้าสูงที่ กำลังไฟฟ้าขนาดกลาง โดยที่เทคนิคนี้สามารถ ปรับปรุงตัวประกอบกำลังได้ใกล้เคียง 0.99 และ ค่าผลรวมของความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก (THD) อยู่ที่ ประมาณ 3 ถึง 5% การขับสวิตซ์ซิ่งของวงจรแก้ไข ตัวประกอบกำลังแบบแอคทีฟแบ่งออกได้เป็น 3 โหมด [8] ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 โหมดการทำงานของวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบแอคทีฟ

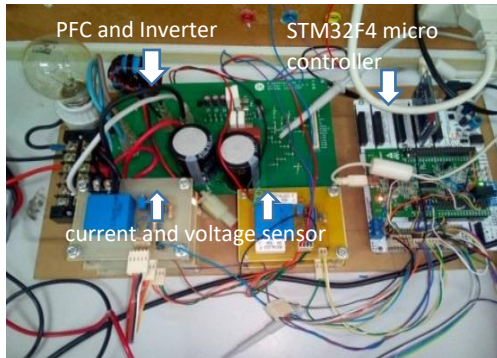
| โหมด                       | ข้อดี/ข้อเสีย                                                                                                                                                                      |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| กระแสไหลต่อเนื่อง (CCM)    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- มีความยุ่งยากในการขับสวิตช์</li> <li>- ตัวเหนี่ยวนำมีขนาดใหญ่</li> <li>- ค่าประสิทธิภาพของกระแส (<math>I_{rms}</math>) ปานกลาง</li> </ul> |
| กระแสไหลไม่ต่อเนื่อง (DCM) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าประสิทธิภาพของกระแส (<math>I_{rms}</math>) สูง</li> <li>- ขนาดตัวเหนี่ยวนำลดลง</li> <li>- ระบบเสถียรภาพที่สุด</li> </ul>               |
| กระแสวิกฤต (CrM)           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าประสิทธิภาพของกระแส (<math>I_{rms}</math>) สูงมาก</li> <li>- ไม่สามารถเปลี่ยนความถี่สัญญาณขับสวิตช์</li> </ul>                         |



ภาพที่ 4 ส่วนประกอบของระบบ

2.2 วิธีดำเนินการวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง  
งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการแก้ตัวประกอบกำลังแบบแอคทีฟและใช้วงจรทบทระดับแรงดัน (Boost converter) ทำงานในโหมดกระแสไหลต่อเนื่อง (CCM) เพื่อให้กระแสใกล้เคียงสัญญาณช่ายด์และมีค่าผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกต่ำที่สุด การดำเนินงานวิจัยนี้มีส่วนประกอบของระบบดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งประกอบด้วยวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงมี

ไดโอดกำลัง 1 เฟสต่อแบบบริด (Single phase bridge rectifier) ทำหน้าที่เป็นวงจรแปลงผันส่วนต่อมาคือระบบควบคุมตัวประกอบกำลังใช้วงจรแปลงผันจากกระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดวงจรทบทระดับแรงดัน[9] โดยการแก้ไขตัวประกอบกำลังใช้อัลกอริทึมการควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์ (PI) เป็นตัวควบคุมและส่วนของอินเวอร์เตอร์ใช้อัลกอริทึมการควบคุมแบบ V/f ชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัยดังภาพที่ 5

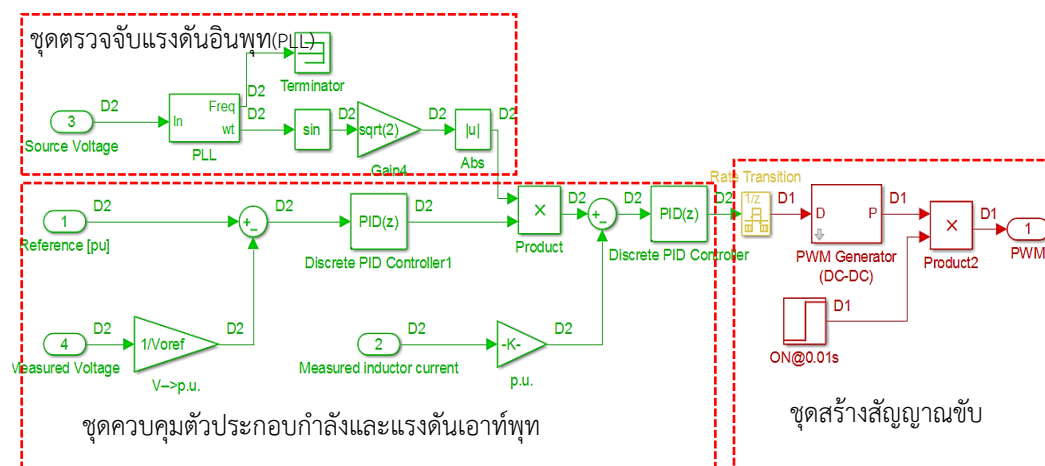


(ก) วงจรแปลงผันและระบบควบคุม



(ข) เครื่องจักรรีดยางไฟฟ้า

ภาพที่ 5 ชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพที่ 6 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบควบคุมตัวประกอบกำลัง

ระบบควบคุมตัวประกอบกำลัง ประกอบด้วยระบบสามส่วนคือ ชุดตรวจจับสนแรงดันอินพุต (PLL) ทำหน้าที่ตรวจจับสนแรงดันอินพุต กระแสสลับ ชุดควบคุมตัวประกอบกำลังและแรงดันเอาต์พุต ทำหน้าที่ในการเปรียบเทียบแรงดันเอาต์พุตกับสัญญาณอ้างอิง[10] และชุดสร้างสัญญาณขับ ดังภาพที่ 6 การทำงานของวงจรทบทวนแรงดันที่มีการควบคุมตัวประกอบกำลังแสดงให้เห็นว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ขนาด 220 โวลต์ ป้อนเข้าสู่วงจรทบทวนแรงดันผ่านทางวงจรเรียงกระแส

แบบเต็มคลื่น โดยมีตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำหน้าที่กรองกระแสขาเข้า  $L_1$  ทำหน้าที่เก็บและถ่ายพลังงานในวงจรทบทวนแรงดัน  $C_2$  ทำหน้าที่กรองกระแสไฟฟ้าขาออก วงจรควบคุมใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนปริพันธ์ (PI) เพื่อควบคุมรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าด้านอินพุต ( $I_L$ ) ให้เป็นรูปคลื่นไซน์และอินเฟสกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านอินพุตและควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตให้คงที่เท่ากับ 400 โวลต์

อัตราการขยายแรงดันของวงจรทบทระดับ  
สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 4 [11]

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{(1-D)} \quad (4)$$

ค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดที่ยังคงทำให้อยู่ในโหมด  
กระแสไหลต่อเนื่องดังสมการที่ 5

$$L_{min} = \left( \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \right) \quad (5)$$

ขนาดของตัวเก็บประจุที่เล็กที่สุดที่ทำให้แรงดันไฟฟ้า  
ขาออกเรียบตามข้อกำหนดดังแสดงในสมการที่ 6

$$C_{min} = \frac{D}{Rf \left( \frac{\Delta V_o}{V_o} \right)} \quad (6)$$

และความถี่ในการสวิตช์ดังแสดงในสมการที่ 7

$$f = \left( \frac{D(1-D)^2 R}{2L_{min}} \right) \quad (7)$$

เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุตของ  
วงจรทบทระดับแรงดันดังสมการที่ 4 นั้นผ่านการเรียง  
กระแสโดยวงจรเรียงกระแสแบบหนึ่งเฟสชนิดเต็ม  
คลื่นโดยที่ยังไม่ได้ผ่านวงจรกรองแรงดันไฟฟ้าจึง  
ยังคงทำให้แรงดันยังคงมีองค์ประกอบของรูปคลื่น  
ไซน์อยู่ดังนั้นค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จึงเป็น  
ค่าเฉลี่ยดังสมการที่ 8

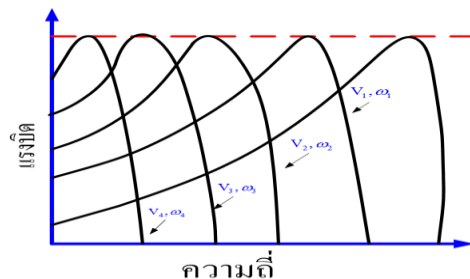
$$V_{in(ave)} = \frac{2V_{max}}{\pi} \quad (8)$$

งานวิจัยนี้เลือกใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟส  
แบบพีดับบริวเอ็ม (PWM) โดยมอเตอร์เหนี่ยวนำ  
สามเฟสต่อแบบสตาร์ดังนั้นค่าประสิทธิภาพของ  
แรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล ( $n=1$ ) ดังสมการที่ 9

$$V_{Line(rms)} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} (V_d) = 0.78 V_d \quad (9)$$

จากสมการที่ 4 ถึง 9 เมื่อกำหนดให้โหลด  
เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสามเฟสขนาด 1 H.P.  
ที่ 746 W โดยประมาณเท่ากับ 1 kW และให้ค่า  
ประสิทธิภาพของแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูลเท่ากับ  
380 V ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาดเท่ากับ  
2,500 uF และเลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาด 0.25 uH

การควบคุมมอเตอร์นั้นใช้หลักการ  
ควบคุมแบบ V/f อาศัยหลักการแรงบิด (Torque)  
และขนาดเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux) แปรผันตาม  
อัตราส่วนของแรงดันและความถี่



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความถี่

จากภาพที่ 7 หากสามารถรักษา  
อัตราส่วนระหว่างแรงดันและความถี่ไว้ได้ตลอดไปจะ  
ทำให้สามารถรักษาแรงบิดให้คงที่ได้ตลอด ซึ่งข้อดี  
ของการควบคุมแบบ V/f คือเป็นระบบที่ง่ายไม่  
ยุ่งยาก[12] สามารถทำงานได้ไวเมื่อเทียบกับระบบ  
ควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector control) เนื่องจากมี

ขั้นตอนทำงานที่น้อยกว่าทำให้เหมาะกับงานที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงบ่อย ๆ ดังนั้นการควบคุมด้วย V/f จึงเหมาะสมกับเครื่องจักรรีดยางพาราเป็นอย่างมาก เพราะเครื่องจักรรีดยางนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดค่อนข้างบ่อยและรวดเร็วจากขนาดของแผ่นยางที่ไม่เท่ากันและจากอัตราความเร็วในการป้อนแผ่นยาง อย่างไรก็ตามระบบการควบคุมแบบ V/f ก็ยังมีข้อเสียอยู่คือหากไม่สามารถรักษ้อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความถี่เอาไว้ได้ระบบจะหลุดออกจากการควบคุมและเกิดความไม่เสถียรภาพขึ้นในทันที

การหาค่าพารามิเตอร์การควบคุมมอเตอร์พิจารณาจากสมการที่ 10 สมการที่ 11 - 12

$$T_m = \frac{3(1-\sigma)}{2} \frac{V_s^2}{\sigma \omega_s^2 L_s} \frac{2}{S_p / S + S / S_p} \quad (10)$$

$$= T_p \frac{2}{S_p / S + S / S_p}$$

$$T_p = \frac{3(1-\sigma)}{2} \frac{V_s^2}{\sigma \omega_s^2 L_s} \quad (11)$$

$$|\vec{\psi}_s| \approx \frac{|\vec{V}_s|}{2\pi f} \quad (12)$$

การควบคุมอินเวอร์เตอร์ใช้อัลกอริทึมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์ (PI) และนำวิธีการกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization, PSO) มาใช้ในการหาค่าเกณฑ์การควบคุม ( $k_p$  และ  $k_i$ ) โดยใช้วิธีการค่าปริพันธ์ของค่าผิดพลาดกำลังสองแปรตามเวลา (Integral time square error, ITAE) ดังสมการที่ 13 เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์[13] (Object function)

$$F = \int_0^\infty t \cdot |e(t)|^2 dt \quad (13)$$

ตัวแปรเริ่มต้นของวิธีกลุ่มอนุภาคทั้งหมด  
ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตัวแปรเริ่มต้นในการใช้หาค่าเกณฑ์ของระบบควบคุมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค

| ค่าพารามิเตอร์           | ค่าที่ใช้                    |
|--------------------------|------------------------------|
| จำนวนอนุภาค              | 20                           |
| ขนาด (Dimension)         | 2                            |
| ค่าถ่วงน้ำหนัก           | $W_{\max}=0.9, W_{\min}=0.4$ |
| ค่าคงที่ $C_1$ และ $C_2$ | 0.7, 0.7                     |
| จำนวนรอบการคำนวณ         | 50                           |
| สูงสุด(iteration)        | 200                          |
| ค่าสูงสุดของ $k_p$       | 0.001                        |
| ค่าต่ำสุดของ $k_p$       | 200                          |
| ค่าสูงสุดของ $k_i$       | 0.001                        |
| ค่าต่ำสุดของ $k_i$       | 200                          |

ผลการจำลองเพื่อหาค่าเกณฑ์ของระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาคดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าเกณฑ์ของระบบควบคุมจากวิธีกลุ่มอนุภาค

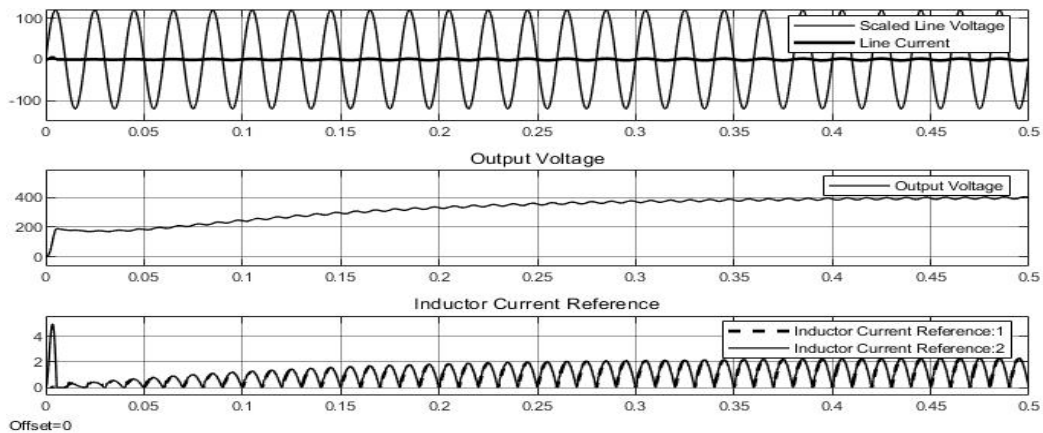
| ค่าพารามิเตอร์         | ค่าที่ได้ |
|------------------------|-----------|
| $k_p$                  | 22.24     |
| $k_i$                  | 7.98      |
| ดัชนีสมรรถนะของระบบ    | 0.0139    |
| เปอร์เซ็นต์การฟุ้งเกิน | 0 %       |

### 3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

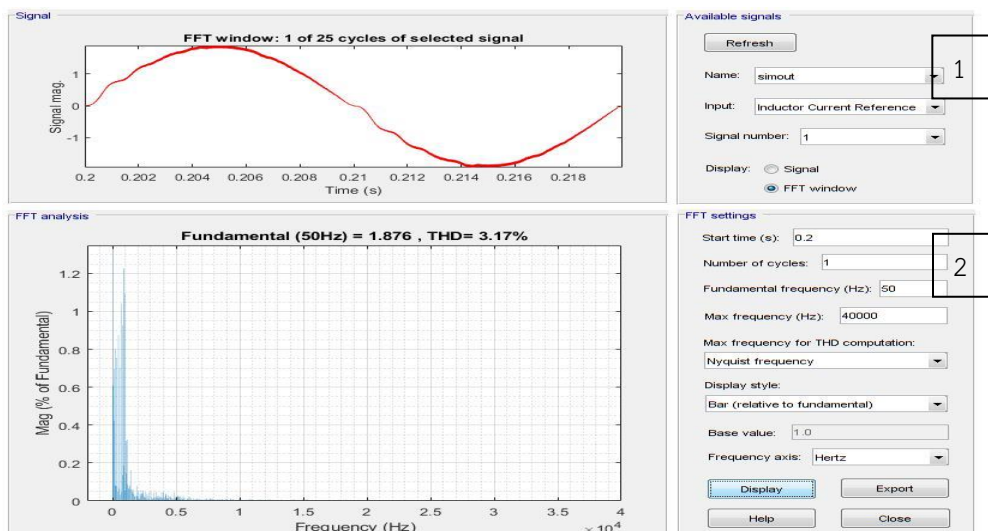
#### 3.1 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมแมทแล็บ

ผลจากการจำลองระบบดังภาพที่ 8 กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุตเกิดขึ้นพร้อมกันและมีรูปคลื่นของสัญญาณเป็นคลื่นไซน์

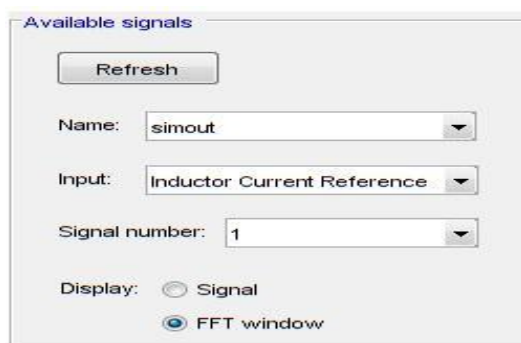
ส่วนของกระแสของตัวเหนี่ยวนำมีองค์ประกอบเป็นคลื่นไซน์ แรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันถูกควบคุมอยู่ที่ 400 โวลต์ แสดงถึงความสามารถในการควบคุมตัวประกอบกำลังและแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของระบบควบคุม



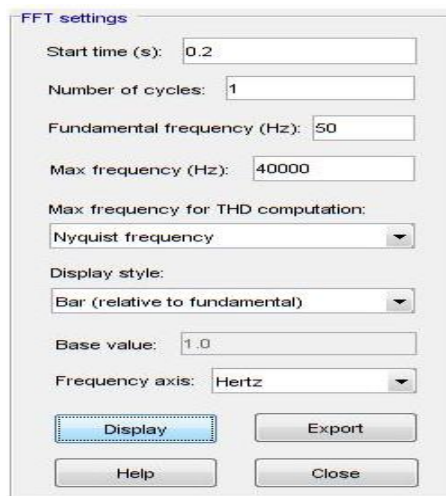
ภาพที่ 8 สัญญาณของกระแสและแรงดันอินพุตที่ได้จากการจำลองเมื่อมีการควบคุมตัวประกอบกำลัง



ภาพที่ 9 ความผิดเพี้ยนของสัญญาณเมื่อมีการควบคุมตัวประกอบกำลัง



ภาพขยาย 1



ภาพขยาย 2

ภาพที่ 9 (ต่อ) ความผิดเพี้ยนของสัญญาณเมื่อมีการควบคุมตัวประกอบกำลัง

#### ตารางที่ 5 ผลการทดสอบระบบควบคุม

| ลำดับ | แรงบิด<br>(Nm) | ความเร็ว<br>(rpm) | ตัวประกอบกำลัง |           | ค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณ |           |
|-------|----------------|-------------------|----------------|-----------|---------------------------|-----------|
|       |                |                   | มี PFC         | ไม่มี PFC | มี PFC                    | ไม่มี PFC |
| 1     | 0.2            | 1500              | 0.98           | 0.65      | 3.17                      | 96.4      |
| 2     | 0.3            | 1500              | 0.98           | 0.64      | 3.17                      | 96.5      |
| 3     | 0.4            | 1500              | 0.97           | 0.64      | 3.17                      | 96.5      |
| 4     | 0.5            | 1500              | 0.97           | 0.64      | 3.17                      | 96.5      |

#### 3.2 ผลการทดลอง

เมื่อมีการควบคุมตัวประกอบกำลังกระแสอินพุตมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์และอินเฟสกับแรงดันอินพุต เมื่อวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของสัญญาณของระบบที่มีการควบคุมตัวประกอบกำลังดังภาพที่ 9 ค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณ (THD) เท่ากับ 3.17 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในช่วงที่ไม่เกินค่ามาตรฐานและค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.98 ตารางที่ 5 แสดงการทดสอบที่แรงบิดของมอเตอร์เท่ากับ 0.2 ถึง 0.5 Nm. เมื่อระบบไม่มีวงจรควบคุม

ตัวประกอบกำลัง ตัวประกอบกำลังอยู่ระหว่าง 0.64 ถึง 0.65 ค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณ อยู่ระหว่าง 96.4 ถึง 96.5 เปอร์เซ็นต์

#### 4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังตลอดจนระบบอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเพื่อใช้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสำหรับใช้กับ

เครื่องจักรรีดยางไฟฟ้า ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องจักรเพิ่มขึ้น สามารถลดขนาดของมอเตอร์ลงได้เนื่องจากขนาดของมอเตอร์สามเฟสมีขนาดเล็กกว่ามอเตอร์เฟสเดียวที่พิกัดแรงม้าเท่ากัน อีกทั้งมอเตอร์สามเฟสไม่มีคาปาซิเตอร์เพื่อช่วยในการเริ่มต้นดังนั้นมอเตอร์สามเฟสจึงบำรุงรักษาง่ายกว่ามอเตอร์เฟสเดียว กระบวนการทำงานวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือการออกแบบและการสร้างระบบควบคุมกระบวนการออกแบบนำเสนอการออกแบบระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยการควบคุมแบบ V/f โดยที่ระบบควบคุมเป็นแบบวงปิด (Close loop) และตัวควบคุมตัวประกอบกำลังที่ใช้เป็นแบบ PI controller ในการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ นำวิธีกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization) มาประยุกต์ใช้ และการออกแบบฮาร์ดแวร์นำเสนอการประยุกต์ใช้ระบบสมองกลฝังตัว (Embedded system) โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล STM32F4 เป็นส่วนประมวลผลและสั่งงานทั้งระบบ โดยมีการจำลองการทำงานและการเขียนโปรแกรมด้วยโปรแกรมแมทแลปซิมูลิงค์ (Matlab/simulink) เมื่อทำการออกแบบระบบทั้งหมดแล้ว จึงทำการสร้างระบบจริงเพื่อทดสอบการทำงาน ผลการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นถึงระบบควบคุมที่ออกแบบมาสามารถควบคุมตัวประกอบกำลังให้มีค่าใกล้เคียงกับ 1 มากที่สุดเมื่อโหลดทางกลเพิ่มขึ้น และสามารถควบคุมผลรวมของความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก (THD) ไม่เกิน 5% และสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้คงที่ได้ตามเงื่อนไขที่ต้องการ

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ที่ใช้งบประมาณสนับสนุนงานวิจัย และให้การสนับสนุนซอฟต์แวร์ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Matlab/simulink ตลอดจนสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

## 6. อ้างอิง

- [1] บรรจบ อรชร, อนุศิษฐ์ อันมานะตระกูล, ทนงศักดิ์ ภักดีบุญ และคณะ. เครื่องรีดยางพาราแบบต่อเนื่อง. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 2550; 30(1):167-81.
- [2] Mohamed K, Metwaly, Haitham Z, et al. Power Factor Correction of Three-Phase PWM AC Chopper Fed Induction Motor Drive System Using HBCC Technique. IEEE Access. 2017; 7: 43438-52.
- [3] Henao GA, Castro JA, Trujillo CL, et al. Design and Development of a LED Driver Prototype with a Single-Stage PFC and Low Current Harmonic Distortion. IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS.2017; 15(8): 1368-1375.
- [4] ดำรง จินขาวชา, ประสิทธิ์ จันทน์มนตรี. วงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการพัฒนาค่าตัวประกอบกำลังด้วยการแปลงผันแบบบูสต์. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2550; 17(2): 43-51.
- [5] จารุวัฒน์ มณีรัตนพร, ญัฐพงษ์ แก่นมาลี. การออกแบบวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ชนิดแก้ไขตัวประกอบกำลังและวงจร เลื่อนเฟสฟูลบริดจ์อิน

- เวอร์เตอร์สำหรับเครื่องชาร์จแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2562; 19(1):73-87.
- [6] ยุทธนา กันทะพะเยา, เฉลิมพล เรื่องพัฒนาวิวัฒน์. การออกแบบตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดเกณฑ์ฟuzzyสำหรับควบคุม การทำงานการขนานมอดูลแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง. วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2559; 9(3):11-24.
- [7] Oruganti R, Srinivasan R. Single phase power factor correctionn - A review. Sadhana. 1997; 22(6):753-80.
- [8] Power Factor Correction (PFC) Handbook. Colorado, USA: SCILLC. 2014
- [9] STK57FU394AG-E 2-in-1 PFC and Inverter Intelligent Power Module (IPM), 600 V, 15 A[Internet}.Semiconductor; 2016 [Cite 2020 Jan]. Available from: <https://www.onsemi.com/pub/CollateraV/STK57FU394AG-E-D.PDF>
- [10] Mitja U, Tine K, Primo S, et al. Integrated single-phase PFC charger for electric vehicles. Electrical Engineering. 2018; 100:2421-9.
- [11] Behzad M, Aleksandar P. Low-Volume PFC ectifier Based on Nonsymmetric Multilevel Boost Converter. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS. 2015; 30(3):1372-96.
- [12] ระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าขั้นสูง. ยุทธนา ขำสุวรรณ.เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2559.
- [13] ทรงกลด ศรีปรารงค์, วันชัย ทรัพย์สิงห์. การออกแบบและประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล dSPIC ในอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6. 5-7 พฤษภาคม 2553; โรงแรมเดอะ รีเจนท์ ซะอำบีช รีสอร์ท ซื่อเดิม ฮอลิเดย์ อินน์ รีสอร์ท รีเจนท์บีช, เพชรบุรี. 2553.