

การออกแบบระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยวิธีการควบคุมแรงดันต่อความถี่สำหรับเครื่องสีข้าวแบบดั้งเดิม

Design of an induction motor speed control system using V/f control method for a traditional paddy cleaning machine

องอาจ ทับบุรี¹, กัญยรัตน์ เอกเอี่ยม^{1*}
Ong-art Tubburee¹, Kanyarat Ek-iam^{1*}

Received: 31 March 2021 ; Revised: 24 June 2021 ; Accepted: 29 July 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ในการขับเคลื่อนเครื่องสีข้าว โดยการสร้างระบบแปลงผันกำลังไฟฟ้าเพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่จ่ายให้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด ½ แรงม้า ด้วยการนำคลื่นแรงดันอ้างอิงทั้งสามเฟสมาเปรียบเทียบกับคลื่นสามเหลี่ยมเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์บนฐานการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ ผลการทดสอบยืนยันให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความถี่ระหว่าง 10–50 เฮิรตซ์ ทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 204–1,424 รอบต่อนาที และจากการสีข้าวพันธุ์ กข41 และหอมปทุมธานี 1 พบว่าความถี่ที่เหมาะสมคือ 30 เฮิรตซ์ ซึ่งทำให้ได้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดเกินกว่า 98% และมีข้าวลีบปะปนออกมาน้อยกว่า 5% นอกจากนี้ผลของการใช้วิธีการที่นำเสนอแทนเครื่องยนต์ ดีเซลขนาด 487 ซีซี. ทำให้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลดลงกว่า 4 เท่า และไม่เกิดการปลดปล่อยมลพิษออกสู่ธรรมชาติ

คำสำคัญ: เครื่องสีข้าว มอเตอร์เหนี่ยวนำ ความถี่ การควบคุมแรงดันต่อความถี่

Abstract

The aim of this research is to design a 3-phase induction motor speed control system for driving a traditional paddy cleaning machine, using a power conversion system to vary the voltage and frequency for a ½ hp 3-phase induction motor. The three command voltage waves were compared with a triangular wave to generate the switching signals for the inverter, based on a V/f control method. The experimental results showed that a change of command frequency between the range of 10–50 Hz resulted in a change of 3-phase induction motor speed falling within the range of 204–1,424 rpm. In addition, the frequency of 30 Hz was the optimum frequency for a RD41 paddy and Pathum Thani 1 paddy which led to a paddy gain higher than 98% and the undeveloped kernel of less than 5% being obtained. Furthermore, by replacing a conventional 487-cc diesel engine with the proposed method, the energy cost was reduced by more than 4 times and the emission of air pollution was eliminated.

Keywords: paddy cleaning machine, induction motor, frequency, V/f control

¹ อาจารย์, สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 13180

* ติดต่อ: kanyarat@vru.ac.th, ekiam.kt@gmail.com

¹ Lecture, Department of Industrial Electrical Technology, Faculty of Industrial Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, Tambon Klong Neung, Pathumthani 13180 Thailand

* Corresponding author: E-mail: kanyarat@vru.ac.th, ekiam.kt@gmail.com

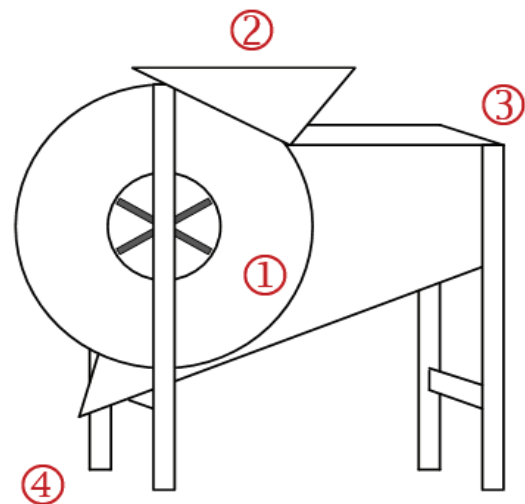
บทนำ

เครื่องสีฟัดข้าวเป็นเครื่องจักรของชาวนาที่จะใช้ภายหลังการเก็บเกี่ยวข้าวและผ่านเครื่องนวดข้าวจนได้เมล็ดข้าวเรียบร้อยแล้ว แต่เนื่องจากเมล็ดข้าวที่ผ่านกระบวนการนวดข้าวมาจะมีข้าวลีบ เศษฟางข้าว ขี้ข้าว หรือแม้แต่ฝุ่นละอองปะปนมาด้วย ชาวนาจึงต้องคัดแยกสิ่งเจือปนออกจากเมล็ดข้าวโดยใช้เครื่องสีฟัดข้าว (วินิต ชินสุวรรณ และคณะ, 2541) ซึ่งลักษณะเป็นกลองที่ด้านหลังกลมมน และมีขาตั้ง 4 ขา ด้านบนสุดมีช่องสำหรับบรรจุข้าวเปลือกที่ต้องการคัดแยกสิ่งเจือปนออก ภายในมีตะแกรงเหล็กเพื่อช่วยกระจายเมล็ดข้าว และมีใบพัดขนาดใหญ่หลายใบทำด้วยไม้อยู่ภายในตัวเครื่อง ดัง Figure 1 (a) กระบวนการสีฟัดจะอาศัยการทำงานร่วมกันของส่วนประกอบต่างๆ ดัง Figure 1 (b) โดยการหมุนแกนใบพัดเครื่องสีฟัดข้าว (หมายเลข 1) เมื่อใบพัดหมุนจนได้ความเร็วลมเพียงพอแล้ว จึงเทข้าวเปลือกลงในช่องรับข้าวด้านบนของตัวเครื่อง (หมายเลข 2) ข้าวเปลือกจะทยอยไหลลงสู่ด้านล่างผ่านตะแกรงเหล็กเพื่อให้เมล็ดข้าวกระจายออก แรงลมจะทำให้สิ่งเจือปนปลิวออกทางด้านหลัง (หมายเลข 3) แต่เมล็ดข้าวที่มีน้ำหนักมากกว่าจะไหลลงด้านล่างของตัวเครื่องและรวมกันออกมาด้านนอก (หมายเลข 4) ชาวนาจะนำเมล็ดข้าวที่ได้รับไปเก็บไว้ในยุ้งฉางเพื่อรอการสีรับประทาน หรือเก็บเป็นเมล็ดพันธุ์สำหรับเพาะปลูกในฤดูกาลต่อไป (สุทธิพงษ์ จำรูญรัตน์ และภิรมย์ ตั้งจิตเพียรผล, 2559)

การใช้เครื่องยนต์เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนเครื่องจักรต่างๆ ได้รับความนิยมนอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคการเกษตร ไม่เว้นแม้กระทั่งการใช้เป็นต้นกำลังในการหมุนใบพัดของเครื่องสีฟัดข้าว (เจษฎา อุดมกิจมงคล, 2554 ; (เสาวณี จันทะพงษ์ และพรชนก เทพขาม, 2561) เนื่องจากสามารถทำงานได้ต่อเนื่องโดยไม่มีการหยุดพัก อีกทั้งยังสามารถควบคุมความเร็วรอบของใบพัดได้ด้วยการรักษารอบของเครื่องยนต์ ทำให้การสีฟัดข้าวเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามผลจากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงจะทำให้เกิดฝุ่นละออง เขม่าควัน และก๊าซเรือนกระจก (Kumar *et al.*, 2013 ; กฤตวัฒน์ โตเจริญ และคณะ 2560) ลอยสู่ชั้นบรรยากาศทำให้เกิดภาวะโลกร้อนซึ่งเป็นปัญหาที่ทุกประเทศกำลังเผชิญกับผลกระทบที่ตามมาอย่างร้ายแรงในปัจจุบัน หลายประเทศทั่วโลกจึงให้ความสำคัญกับการใช้เทคโนโลยีจากพลังงานสะอาด เช่น เปลี่ยนการใช้รถยนต์ที่ใช้น้ำมันมาเป็นรถยนต์ที่ใช้ไฟฟ้าแทน เป็นต้น



(a)



(b)

Figure 1 Traditional paddy cleaning machine

(a) Photograph (b) Simplified schematic

เนื่องจากการใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลังแทนเครื่องยนต์มีข้อดีกว่าหลายประการ เช่น ราคาไฟฟ้าต่ำกว่าราคาน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง มลภาวะเป็นศูนย์ เพราะไม่มีการปล่อยก๊าซอันตรายต่างๆ จากการใช้งานต้องการการซ่อมบำรุงน้อยกว่า และเกิดแรงสั่นสะเทือนน้อยกว่าการใช้เครื่องยนต์ (อนุชิต อุไรรัตน์ และเฉลิม จินาดูน, 2563) จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้มอเตอร์ในการขับเคลื่อนระบบต่างๆ พบว่ามีการใช้ทั้งมอเตอร์กระแสตรง และมอเตอร์กระแสสลับหรือที่เรียกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction motor) ซึ่งต่างก็มีข้อโดดเด่นและข้อด้อยที่แตกต่างกัน คือ หากพิจารณาเรื่องราคาจะพบว่ามอเตอร์กระแสสลับมีราคาต่ำกว่า อีกทั้งยังมีน้ำหนักน้อยกว่า และมีความทนทานมากกว่า แต่หากต้องนำมอเตอร์มาใช้งานในระบบที่ต้องการควบคุมความเร็วรอบ กลับพบว่า ชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงมีราคาต่ำกว่า (Merve *et al.*, 2014) สาเหตุเพราะมอเตอร์กระแสสลับต้องใช้ชุดแปลงผันกำลัง

(Power converter) ที่สร้างจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อควบคุมแรงดัน (Voltage) และความถี่ (Frequency) ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ แต่ด้วยเทคโนโลยีด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันเป็นไปอย่างรวดเร็ว ทำให้ราคาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมีราคาถูกลง (Christian *et al.*, 2006 ; Simon *et al.*, 2008) สาเหตุดังกล่าวทำให้มอเตอร์กระแสสลับได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการใช้เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนระบบต่างๆ ในภาคอุตสาหกรรม

ดังนั้น ทางคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำระบบควบคุมแบบปรับความเร็วได้ โดยการสร้างระบบแปลงผันกำลังมาควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อใช้เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนใบพัดของเครื่องสีฝัดข้าวแบบดั้งเดิมให้กับชาวนาที่ต้องการคัดแยกเมล็ดพันธุ์ข้าว ซึ่งจะเป็นอีกหนึ่งช่องทางที่ช่วยลดต้นทุนเมล็ดพันธุ์ข้าว และยังช่วยลดต้นทุนด้านเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ที่ใช้เป็นต้นกำลังในการหมุนใบพัดเครื่องสีฝัดข้าววิธีการเดิม อีกทั้งยังช่วยลดการปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์สู่อากาศ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างระบบแปลงผันแรงดันและความถี่สำหรับเป็นแหล่งจ่ายกำลังที่ใช้ปรับความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
2. เพื่อหาสมรรถนะของการปรับเปลี่ยนความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนใบพัดของเครื่องสีฝัดข้าวแบบดั้งเดิม
3. เพื่อทดสอบหาความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนใบพัดที่เหมาะสมกับการคัดแยกข้าวสีออกจากข้าวเต็มเมล็ด

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

1.1 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การหมุนของเพลลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำ อาศัยหลักการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนในขดลวด สเตเตอร์ (Stator winding) ทั้งสามชุดที่ต่อรับพลังงานจากระบบไฟฟ้าสามเฟสได้ดูล ผลของสนามแม่เหล็กหมุนที่ตัดผ่านช่องว่างอากาศ (Air gap) จะตัดผ่านแท่งตัวนำที่วางเรียงอยู่ในโรเตอร์ (Rotor) ทำให้เกิดกระแสไหลในแท่งตัวนำของโรเตอร์ที่มีการลัดวงจรที่ปลายทั้งสองข้าง จนเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นจากตัวนำบนโรเตอร์อีกหนึ่งแรง ทำให้โรเตอร์หมุนออกตัวไปได้ กรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำความเร็วโรเตอร์จะมีค่าต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสที่สเตเตอร์เสมอ เพราะหากความเร็วโรเตอร์เท่ากับความเร็วซิงโครนัส จะไม่เกิดการตัดกันระหว่างสนามแม่เหล็กหมุนกับแท่งตัวนำโรเตอร์ทำให้ไม่เกิดแรงบิดขึ้นที่โรเตอร์ โดย

ความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัส (n) กับความเร็วโรเตอร์ (n_r) สามารถเขียนในรูปความสัมพันธ์ของความเร็วที่เรียกว่า ค่าสลิป (Slip) ใช้อักษรย่อ s ดังนี้ (Stephen, 2005)

$$nr = (1-s) ns \quad (1)$$

จากสมการ (1) พบว่าค่าสลิปเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้ความเร็วโรเตอร์เปลี่ยนแปลง แต่ในมอเตอร์เหนี่ยวนำไม่สามารถทำให้ค่าสลิปเป็น 0 ได้ เพราะจะทำให้ไม่เกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กขึ้นในโรเตอร์ ดังนั้นการปรับความเร็วโรเตอร์จึงทำได้โดยการปรับความเร็วซิงโครนัส ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของความถี่ (f) ของแรงดันไฟฟ้าต่อจำนวนคู่ขั้วแม่เหล็ก (P) ดังนี้

$$n_s = \frac{120f}{P} \quad (2)$$

สมการ (2) แสดงให้เห็นว่าความเร็วซิงโครนัสสามารถกำหนดได้โดยค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าและจำนวนคู่ขั้วแม่เหล็ก แต่การเปลี่ยนแปลงจำนวนคู่ขั้วแม่เหล็กเป็นสิ่งที่ทำไม่ได้หลังจากติดตั้งมอเตอร์ใช้งานไปแล้ว ดังนั้นการปรับความเร็วความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่จะส่งผลให้ความเร็วโรเตอร์เปลี่ยนแปลงไป โดยการปรับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าจึงเป็นวิธีที่เหมาะสม และสามารถปรับความเร็วได้ในช่วงกว้างและมีความละเอียดกว่า

1.2 การควบคุมแรงดันต่อความถี่

ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยการควบคุมความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์เหนี่ยวนำ อย่างไรก็ตามหากพิจารณาจากวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะพบว่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์จะอยู่ในรูปความเหนี่ยวนำ (Inductance) เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นการปรับลดความถี่ของแรงดันไฟฟ้าให้ต่ำลงเพื่อลดความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีผลให้ค่าความต้านทานไฟสลล็บของตัวเหนี่ยวนำ (X_L) มีค่าลดลง และความต้านทานรวมทางไฟฟ้าของมอเตอร์ (Z_T) ก็จะลดลงด้วยเช่นกัน ดังสมการ

$$Z_T = R_T + j(2\pi fL) \quad (3)$$

การลดลงของความต้านทานรวมทางไฟฟ้าจะทำให้กระแสไหลเข้ามอเตอร์เหนี่ยวนำสูงขึ้น จนอาจทำให้มอเตอร์เสียหายได้ ดังนั้นเพื่อควบคุมไม่ให้กระแสไหลเข้ามอเตอร์เหนี่ยวนำจนเกินพิกัด จึงจำเป็นต้องปรับลดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์เหนี่ยวนำด้วย

การควบคุมการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่อความถี่ (V/f Control) เป็นวิธีการควบคุมแบบพื้นฐานที่ประหยัดค่าใช้จ่าย และเป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสามารถใช้ได้กับโหลดที่มีแรงบิดแบบคงที่และแรงบิดแบบแปรผัน โดยสามารถสร้างแรงบิดได้ถึง 150% ของแรงบิดปกติขณะเริ่มเดินและขณะขับโหลดเต็มพิกัด (Reddy & Jegathesan, 2011 ; Omkar et al., 2019) วิธีการควบคุมนี้จึงเหมาะสำหรับการควบคุมพัดลมทั่วไป และพัดลมระบายอากาศ

การปรับค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้า นอกจากผลดีที่ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำปรับความเร็วรอบได้นั้น หากไม่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม จะ

ส่งผลให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดของมอเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้หากความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีค่าลดลง จะทำให้สนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่มอเตอร์ ในทางกลับกันหากความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีค่าสูงขึ้น จะทำให้สนามแม่เหล็กมีค่าลดลงและอาจทำให้มอเตอร์มีแรงไม่เพียงพอที่จะขับโหลด ดังนั้นวิธีการควบคุมการเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่จึงต้องควบคุมสนามแม่เหล็กให้คงที่ตลอดย่านการทำงานจนถึงความถี่ที่พิกัด ดัง Figure 2 (a) โดยการกำหนดอัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่จะต้องคงที่ตลอดเวลา ดังสมการ

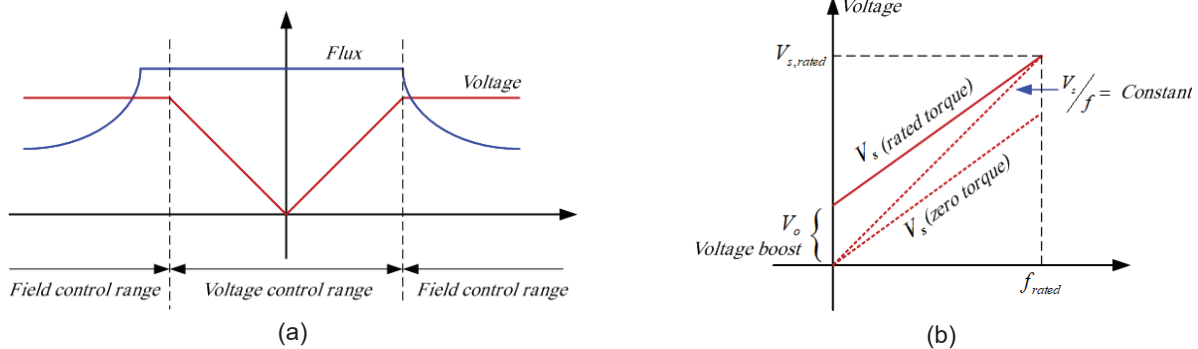


Figure 2 The characteristics of V/f control (a) The relationship between stator voltage and frequency (b) The principle of stator voltage compensation

โดยที่ V_s คือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์เหนี่ยวนำ (V), f คือความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Hz), n_s คือความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (rpm), ϕ_{ag} คือเส้นแรงแม่เหล็กผ่านช่องว่างอากาศ (Wb)

Figure 3 แสดงให้เห็นว่าการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่อความถี่จะใช้การกำหนดความถี่อ้างอิง (Command frequency, f^*) มาสร้างเป็นความเร็วอ้างอิง (Command speed, ω_c^*) เพื่อนำมาอินทิเกรตเป็นความเร็ว

เชิงมุม (ω_r^*) สำหรับสร้างสัญญาณแรงดันเฟสอ้างอิง (Command phase voltage, V_s^*) ที่มีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ (Sine wave) โดยที่ขนาดแรงดันเฟสอ้างอิง จะได้จากอัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่ที่พิกัดของ (G) ตามสมการ (4) มีผลทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดสเตเตอร์คงที่ แต่อย่างไรก็ตามหากความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์เหนี่ยวนำลดลง ในทางปฏิบัติแล้วการปรับลด

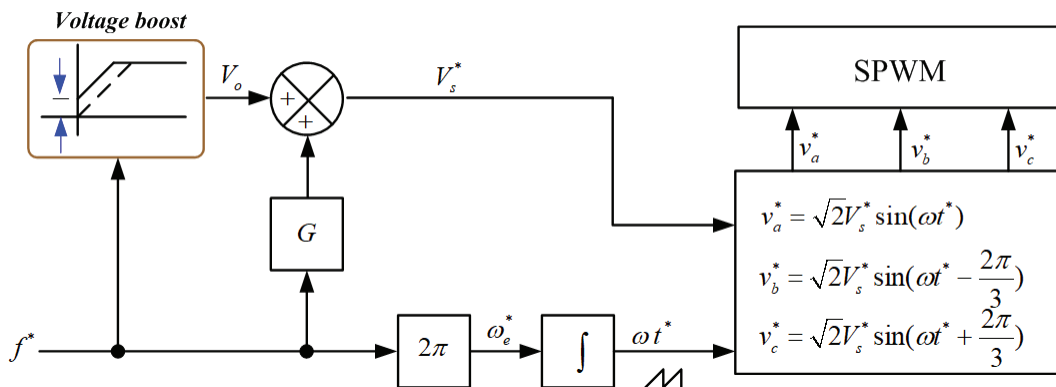


Figure 3 Simplified diagram of the open-loop V/f control with the voltage boost technique

แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์เหนี่ยวนำจากอัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่ที่พิกัดจะมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะรักษาให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดสเตเตอร์คงที่ได้ เนื่องจากผลของแรงดันตกคร่อมความต้านทานสเตเตอร์ ดังนั้นการเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นในขณะที่มอเตอร์ทำงานที่ความถี่ต่ำด้วยวิธีการทบระดับแรงดันไฟฟ้า (Voltage boost) ตาม Figure 2 (b) จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการควบคุมการทำงานย่านความถี่ต่ำของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยอัตราทบระดับแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าสูงเมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำทำงานที่ความถี่ต่ำ และจะมีค่าลดต่ำลงจนเข้าสู่ค่าอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่เมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้นจนถึงพิกัด (Alfredo *et al.*, 1998 ; Zhang *et al.*, 2017) ผลที่ได้รับจากการควบคุมแรงดันต่อความถี่คือสัญญาณแรงดันเฟสอ้างอิงทั้ง 3 เฟส ที่สามารถปรับเปลี่ยนขนาดได้จากผลของการปรับความถี่เพื่อนำไปใช้สร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์ด้วยคลื่นไซน์ (Sinusoidal pulse width modulation, SPWM) โดยใช้ตัวประมวลผลของไมโครชิพรุ่น PIC18F4431 รับผิดชอบความถี่อ้างอิงจากการใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้

2. การออกแบบระบบขับเคลื่อนแบบปรับความเร็วได้สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ระบบขับเคลื่อนแบบปรับความเร็วได้ (Variable Speed Drive) หรืออาจเรียกสั้นๆ ว่าระบบ วีเอสดี (VSD) คือระบบที่สร้างมาจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง บนพื้นฐานการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเอาต์พุต (Output) เพื่อจ่ายให้มอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage source inverter) แต่จากหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันจะแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ทั้งขนาดแรงดันและความถี่ ขณะที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าของประเทศไทยไม่มีการการส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า ดังนั้นระบบขับเคลื่อนแบบปรับความเร็วได้จึงจำเป็นต้องใช้ตัวเรียงกระแส (Rectifier) เพื่อแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้รับจากการไฟฟ้าให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดคงที่และเพียงพอต่อความต้องการ เพื่อจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Dehong *et al.*, 2016 ; Guha & Narayanan, 2016) ดังแสดงใน Figure 4

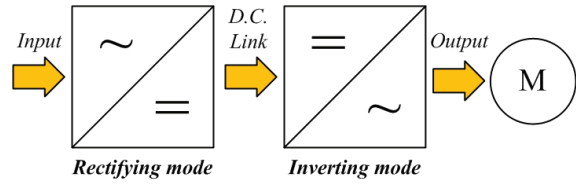


Figure 4 Block diagram of a proposed variable speed drive for induction motor

2.1 การออกแบบอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส

โครงสร้างวงจรของอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส เกิดจากการนำสวิตช์กำลัง (Power switch) และไดโอดกำลัง (Power diode) อย่างละ 6 ตัว มาต่อกันเป็นวงจรดัง Figure 5 โดยมีหลักการทำงานคือ เมื่อสวิตช์กำลังตัวที่ 1 (S_1) นำกระแสไฟฟ้า จะส่งผลให้ขั้ว a ต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และหากสวิตช์กำลังตัวที่ 4 (S_4) นำกระแสไฟฟ้า จะส่งผลให้ขั้ว a ต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Bin, 2005) ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้โมดูลอินเวอร์เตอร์จากสวิตช์ไอจีบีที (Inverter IGBT Module) รุ่น TM-032

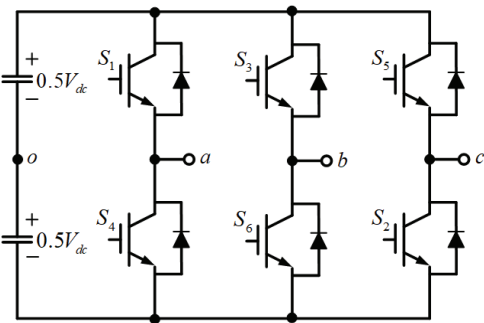


Figure 5 Topology of the three-phase inverter

จากวัตถุประสงค์หลักเพื่อปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ด้วยการปรับความถี่และขนาดแรงดันเอาต์พุต ดังนั้นการสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลัง (Switching signals) ในการวิจัยครั้งนี้จึงเลือกใช้เทคนิคการมอดูเลตความกว้างพัลส์ด้วยคลื่นไซน์ โดยการนำสัญญาณแรงดันเฟสอ้างอิงที่ได้จากวิธีการควบคุมการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่อความถี่ มาเปรียบเทียบกับคลื่นสามเหลี่ยม (Triangular wave) (Gurav *et al.*, 2018) ดังแสดงใน Figure 6 (a) ทำให้ได้สัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังทั้ง 6 ตัว ดังแสดงใน Figure 6 (b) 6 (c) และ 6 (d) ตามลำดับ

โดยปกติแล้วเทคนิคการมอดูเลตความกว้างพัลส์ด้วยคลื่นไซน์ จะกำหนดให้ค่าสูงสุดของสัญญาณแรงดันเฟสอ้างอิงมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าสูงสุดของคลื่นสัญญาณสามเหลี่ยม (V_{m1}) โดยอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดของสัญญาณแรงดันเฟสอ้างอิงกับค่าสูงสุดของคลื่นสัญญาณสามเหลี่ยม จะถูกเรียกว่า ดัชนีการมอดูเลต (Modulation index, m_a) ทั้งนี้สำหรับอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับแรงดันเอาต์พุต แสดงได้ในเทอมของดัชนีการมอดูเลต คือ

$$m_a = \frac{2\sqrt{2}V_{LL,rms}}{\sqrt{3}V_{dc}} \quad (5)$$

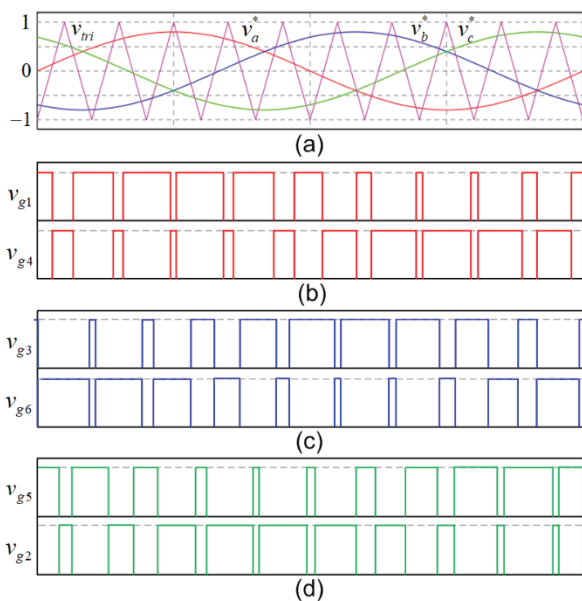


Figure 6 Waveforms of the SPWM Technic
 (a) A comparison of command voltages and triangular wave (b) Switching signals for leg-A
 (c) Switching signals for leg-B (d) Switching signals for leg-C

สมการ (5) แสดงให้เห็นว่าหากกำหนดให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ดัชนีการมอดูเลตเต็ม ($m_a = 1$) เพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย 220 โวลต์ ให้มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขดลวดสามแม่เหล็กต่อวงจรแบบเดลต้า (Delta connection) จะต้องมีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้มาจากตัวเรียงกระแสไม่น้อยกว่า 360 โวลต์

2.2 การออกแบบตัวเรียงกระแส

เครื่องสีผัดข้าวเป็นเครื่องจักรของชาวนา ดังนั้นการออกแบบระบบควบคุมเพื่อปรับความเร็วรอบของใบพัดจึงควรใช้ระบบไฟฟ้า 1 เฟส แรงดัน 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ เป็นแหล่งจ่ายพลังงานจึงจะเหมาะสมที่สุด เพราะเป็นระบบ

ไฟฟ้าที่ทุกบ้านเรือนมีใช้กัน ตัวเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบไดโอด (Diode rectifiers) เป็นตัวเรียงกระแสที่มีหลักการทำงานไม่ซับซ้อน ราคาไม่แพง อีกทั้งยังได้เปรียบด้านความทนทานกว่าตัวเรียงกระแสประเภทอื่นๆ (Kolar & Friedli, 2013) แต่อย่างไรก็ตามตัวเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบไดโอดโดยทั่วไปให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้สูงสุดเพียง 198 โวลต์ ซึ่งไม่เพียงพอสำหรับการแปลงผันไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับระบบ 3 เฟส 3 สาย เพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำตามสมการ (5)

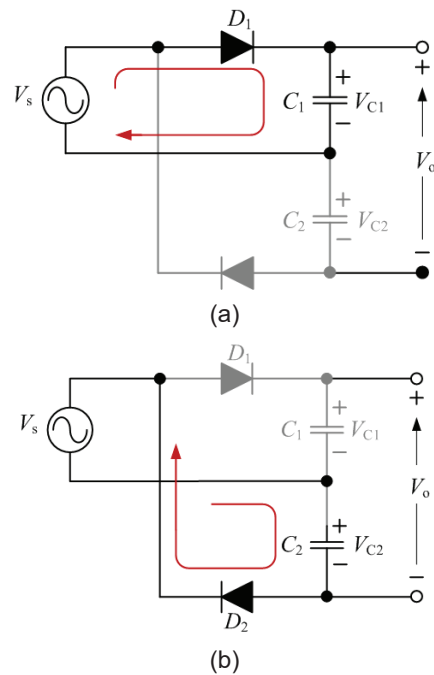


Figure 7 Operation for full wave rectifier voltage doubler
 (a) Positive half-cycle
 (b) Negative half cycle

การวิจัยครั้งนี้จึงเลือกใช้ตัวเรียงกระแสแบบไดโอดเพื่อเรียงกระแสยอดคลื่นด้านอินพุตทั้งไซเคิลบวกและไซเคิลลบไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อสะสมไว้ในตัวเก็บประจุขนาด 60 ไมโครฟารัด พิกัดแรงดัน 450 โวลต์ จำนวน 2 ตัวด้านเอาต์พุต ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้โหลดด้านเอาต์พุต ซึ่งเรียกว่าตัวเรียงกระแสเต็มคลื่นหนึ่งเฟสแบบให้แรงดันเอาต์พุตสองเท่า (Full wave voltage doubler) โดยหลักการทำงานคือ เมื่อคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับช่วงไซเคิลบวกถูกจ่ายให้กับวงจร จะมีกระแสไหลผ่านไดโอด D_1 เนื่องจากได้รับการไบอัสตรง ในขณะที่ไดโอด D_2 จะได้รับการไบอัสกลับ ช่วงการทำงานนี้ตัวเก็บประจุ C_1 เริ่มชาร์จประจุไฟฟ้ากระแสตรงที่เรียงมาจากไดโอด D_1 ดังแสดงใน Figure 7 (a) ทำให้มีแรงดันไฟฟ้ากระแส

ตรงดกร่อมตัวเก็บประจุ C_1 เท่ากับค่าสูงสุดของคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านอินพุต ตามสมการ

$$V_{C1} = \sqrt{2} \times V_s \tag{6}$$

หากคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับช่วงไซเคิลลบถูกจ่ายให้กับวงจร จะมีกระแสไหลผ่านไดโอด D_2 เนื่องจากได้รับการไบอัสตรง ในขณะที่ไดโอด D_1 จะได้รับการไบอัสกลับ ช่วงการทำงานนี้ตัวเก็บประจุ C_2 จะเริ่มชาร์จประจุไฟฟ้ากระแสตรงที่เรียงมาจากไดโอด D_2 ดังแสดงใน Figure 7 (b) ทำให้มีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดกร่อมตัวเก็บประจุ C_2 เท่ากับค่าสูงสุดของคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านอินพุต ตามสมการ

$$V_{C2} = \sqrt{2} \times V_s \tag{7}$$

ดังนั้น หากพิจารณาจากโครงสร้างวงจรใน Figure 7 จะพบว่าตัวเก็บประจุทั้งสองตัวต่อแบบอนุกรมกันโดยมีโพลตรงมาต่อคร่อมอยู่ ทำให้แรงดันที่โพลตรงได้รับจะมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสองตัวรวมกัน ดังสมการ

$$V_o = V_{C1} + V_{C2} = 2[\sqrt{2} \times V_s] \tag{8}$$

จากสมการ (8) แสดงให้เห็นว่าตัวเรียงกระแสที่เลือกใช้สามารถให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้สูงถึง 2.83 เท่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านอินพุต ดังนั้นหากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านอินพุตมีค่า 220 โวลต์ จะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านเอาต์พุต มีค่าสูงถึง 622 โวลต์

ผลการทดสอบและอภิปรายผล

การสีฝัดข้าวเพื่อตัดแยกสิ่งเจือปนที่ปะปนมากับข้าวเปลือกไม่ว่าจะเป็นข้าวลีบ เศษฟางข้าว ข้อข้าว หรือแม้แต่ผงฝุ่นละอองออกได้มากน้อยเพียงใดนั้นประกอบด้วยปัจจัยหลายประการ อาทิเช่น ความชื้นของข้าวเปลือก คุณภาพของข้าวเปลือก การเก็บรักษาข้าวเปลือก และที่สำคัญคือความเร็วของลมจากใบพัดของเครื่องสีฝัด ดังนั้นเพื่อยืนยันความเป็นไปได้และความน่าเชื่อถือของระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยวิธีการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่สำหรับเครื่องสีฝัดข้าวแบบดั้งเดิมที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น จึงได้ทำการทดสอบโดยนำระบบขับเคลื่อนแบบปรับความเร็วได้มาควบคุมความเร็วรอบ

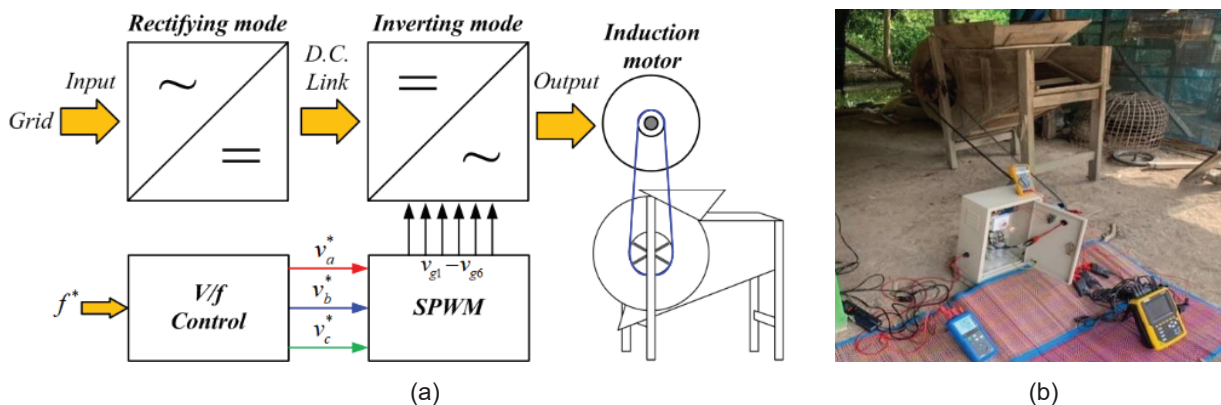


Figure 8 Testing and Implementation of the proposed system (a) Simplified block diagram of the experimental setup (b) Experimental setup

Table 1 Frequency and voltage of the proposed system at different command frequencies

Command frequencies (Hz)	Output frequency		Line-to-line voltage		
	Measured value (Hz)	Relative error (%)	Calculated value (V)	Measured value (V)	Relative error (%)
10	11.11	11.10	131.82	124.80	5.33
20	20.51	2.55	170.41	160.10	6.05
30	30.21	0.70	181.96	190.40	4.64
40	40.13	0.33	196.44	198.50	1.05
50	50.19	0.38	222.06	219.80	1.02

ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด ½ แรงม้า ความเร็วโรเตอร์ที่พิกัด 1,430 rpm ตามไดอะแกรมการทดสอบ ใน Figure 8 (a) เพื่อใช้เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนเครื่องสีฟัดข้าวแบบดั้งเดิม ดังแสดงใน Figure 8 (b) โดยมีผลการทดสอบ ดังนี้

1. การทดสอบระบบควบคุมการเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่

การทดสอบโดยการปรับตั้งความถี่อ้างอิง (f^*) ตั้งแต่ 10 Hz จากนั้นเพิ่มความถี่ขึ้นครั้งละ 10 Hz จนกระทั่งถึงความถี่พิกัดคือ 50 Hz เพื่อบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงของความถี่และแรงดันระหว่างสายต้านเอาต์พุตของระบบที่ออกแบบและสร้างขึ้น ผลการวัดค่าด้วยมัลติมิเตอร์ยี่ห้อ fluke รุ่น 115 TRUE RMS เพื่อหาความแตกต่างของที่วัดได้กับค่าที่ได้จากการคำนวณแสดงดัง Table 1

ผลการทดสอบใน Table 1 แสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนค่าความถี่อ้างอิง (f^*) ของระบบควบคุมการ

เปลี่ยนแปลงแรงดันต่อความถี่ ส่งผลทำให้ความถี่และแรงดันระหว่างสายต้านเอาต์พุตของระบบขับเคลื่อนแบบปรับความเร็วได้สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ออกแบบและสร้างขึ้น มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป็นไปตามหลักการที่วางไว้ คือ เมื่อความถี่อ้างอิงมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ความถี่ของแรงดันต้านเอาต์พุตเปลี่ยนเข้าใกล้ค่าอ้างอิง ขณะที่แรงดันระหว่างสายต้านเอาต์พุตก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ในทางกลับกันหากปรับลดความถี่อ้างอิงให้มีค่าต่ำลง ความถี่ของแรงดันระหว่างสายต้านเอาต์พุตจะมีค่าลดลงเข้าใกล้ค่าอ้างอิง และแรงดันระหว่างสายต้านเอาต์พุตก็จะมีค่าลดลงด้วย ทั้งนี้หากเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับค่าทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณจะพบว่า ผลการทดสอบที่ความถี่สูงจะได้ร้อยละความแตกต่างมีค่าต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากผลของการทบระดับแรงดัน เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำทำงานย่านความถี่ต่ำด้วยวิธีการเปิดตารางที่ใช้ (Look up table) ยังมีความละเอียดไม่เพียงพอในย่านความถี่ที่ไม่ใช่ค่าคงตัว

Table 2 The test results for two types of paddy (15% moisture) at different command frequencies

Test descriptions	RD41				Pathum Thani 1			
	20	25	30	35	20	25	30	35
Command frequencies (Hz)	20	25	30	35	20	25	30	35
Wind velocity (m/s)	2.20	3.80	5.60	7.50	2.10	3.80	5.50	7.60
Total paddy obtained (kg)	47.13	45.64	44.36	43.12	46.70	45.62	44.54	43.29
Paddy grain obtained (%)	99.16	98.76	98.02	95.36	99.27	98.89	98.51	95.80
Undeveloped kernel obtained (%)	50.20	24.00	5.00	4.20	40.60	22.40	4.20	3.60

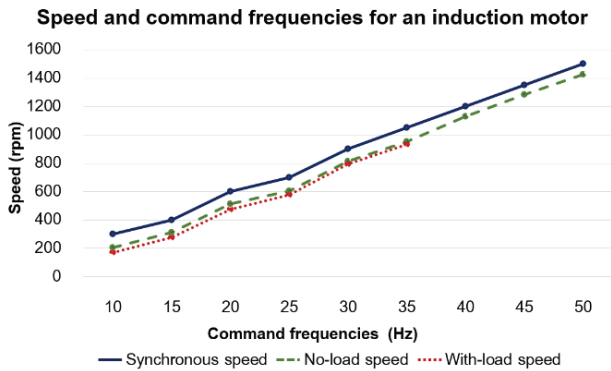


Figure 9 The performance of variable speed controlled at different command frequencies

2. การทดสอบปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การทดสอบโดยนำระบบขับเคลื่อนแบบปรับความเร็วได้สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ออกแบบและสร้างขึ้นต่อเป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากนั้นทำการปรับความถี่อ้างอิง (f^*) เริ่มตั้งแต่ 10 Hz และเพิ่มความถี่ขึ้นครั้งละ 5 Hz จนถึงความถี่ที่กักคือ 50 Hz เพื่อวัดความเร็วรอบของเพลามอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้เครื่องมือวัดความเร็วรอบยี่ห้อ DIGICON รุ่น DT-268TP ทั้งในกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนตัวเปล่า (ไม่ต่อโหลด) และกรณีต่อโหลด เพื่อเปรียบเทียบกับความเร็วเชิงโคโรนัสที่ได้จากการคำนวณ ผลที่ได้แสดงใน Figure 9

ผลการทดสอบใน Figure 9 แสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนค่าความถี่อ้างอิง (f^*) จาก 10 Hz เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงความถี่ที่กัก 50 Hz มีผลทำให้ความเร็วรอบของเพลามอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นจากความเร็วรอบต่ำสุดกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนตัวเปล่า 204 rpm ไปจนถึงความเร็วรอบที่ความถี่ที่กัก คือ 1,424 rpm และหากพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงความเร็วดังกล่าวเทียบกับความเร็วเชิงโคโรนัสที่ได้จากการคำนวณ พบว่ามีความแตกต่างค่อนข้างคงที่ตลอดย่านความเร็วที่ค่าสลิปอยู่ระหว่าง 5.07-32.00% อย่างไรก็ตามผลการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำไปขับเคลื่อนใบพัดเครื่องสีฝัดข้าวแบบดั้งเดิม พบว่าการขับเคลื่อนที่ความถี่ต่ำกว่า 25 Hz ความเร็วรอบของเพลามอเตอร์เหนี่ยวนำจะต่ำกว่าความเร็วรอบกรณีหมุนตัวเปล่าที่อัตราการรักษาความเร็ว (Speed regulation) เฉลี่ย 9.87% สาเหตุเนื่องจากความเร็วรอบที่ต่ำทำให้แรงเฉื่อยในใบพัดมีค่าต่ำ มอเตอร์เหนี่ยวนำจึงต้องใช้แรงบิดมากขึ้นเพื่อหมุนให้ใบพัดเคลื่อนที่ ส่งผลให้ความเร็วรอบของเพลาลดลง แต่เมื่อความถี่สูงกว่า 25 Hz ความเร็วรอบของเพลามอเตอร์เหนี่ยวนำจะใกล้เคียงความเร็วรอบกรณีหมุนตัวเปล่ามากขึ้น ที่อัตราการรักษาความเร็วเฉลี่ย 2.26% และเนื่องจากโครงสร้างของตัวเครื่องและใบพัดของเครื่องสีฝัดข้าวทำมาจากไม้ และไม่ได้ออกแบบมาให้หมุนที่ความเร็วสูง ดังนั้นการทดสอบกรณีต่อโหลดให้มอเตอร์เหนี่ยวนำจึงสามารถ

ทำได้ที่ค่าความถี่ไม่เกิน 35 Hz เท่านั้น เพราะอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องสีฝัดข้าวแบบดั้งเดิมได้

3. การทดสอบใช้งานระบบปรับความเร็วรอบใบพัดเครื่องสีฝัดข้าวเพื่อแยกข้าวสาลี

การทดสอบโดยระบบปรับความเร็วรอบใบพัดเครื่องสีฝัดข้าวที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น มาทดลองสีฝัดข้าวเปลือกค่าความชื้น 15% จำนวน 2 สายพันธุ์ที่ได้รับความนิยมนำมาเพาะปลูกในจังหวัดปทุมธานี ได้แก่ พันธุ์ กข41 และพันธุ์หอมปทุมธานี 1 ที่ประกอบด้วยข้าวเต็มเมล็ดน้ำหนัก 45 กิโลกรัม และข้าวสาลีอีก 5 กิโลกรัม มาผสมกัน เพื่อใช้ทดสอบหาปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและข้าวสาลีที่สามารถแยกได้จากการสีฝัดที่ความเร็วลมระดับต่างๆ ตามที่ปรากฏใน Table 2 โดยการวัดความเร็วลมบริเวณตะแกรงเหล็กซึ่งเป็นตำแหน่งคัดแยกสิ่งเจือปนออกจากข้าวเต็มเมล็ด ด้วยเครื่องวัดความเร็วลมยี่ห้อ DIGICON รุ่น DA-43A

การพิจารณาปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและข้าวสาลีของข้าวพันธุ์ กข41 และหอมปทุมธานี 1 จากการสีฝัดที่ความเร็วลมจากการหมุนของใบพัดในระดับต่างๆ โดยการปรับค่าความถี่อ้างอิง (f^*) ใน Table 2 พบว่าการสีฝัดที่ความเร็วลมต่ำจะได้ข้าวเปลือกทั้งหมดจากช่องรับข้าวปริมาณมากกว่าการสีฝัดที่ความเร็วลมสูง แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณารายละเอียดจากปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและปริมาณข้าวสาลีที่ปะปนรวมกันมาเป็นข้าวเปลือกทั้งหมดจากช่องรับข้าว พบว่ากรณีข้าวพันธุ์ กข41 การสีฝัดที่ความเร็วลม 3.80 m/s และ 2.20 m/s โดยการปรับค่าความถี่อ้างอิง (f^*) 25 Hz และ 20 Hz จะได้ข้าวเต็มเมล็ดปริมาณสูงถึง 98.76% และ 99.16% ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามความเร็วลมที่ได้ อาจไม่เพียงพอที่จะแยกข้าวสาลีออกจากข้าวเต็มเมล็ด ส่งผลให้มีข้าวสาลีปะปนมากับข้าวเต็มเมล็ดในปริมาณสูงถึง 24.00% และเพิ่มขึ้นเป็น 50.20% ที่ค่าความถี่อ้างอิง (f^*) 25 Hz และ 20 Hz ตามลำดับ จากนั้นหากเพิ่มความเร็วลมเป็น 5.60 m/s โดยการปรับค่าความถี่อ้างอิง (f^*) เท่ากับ 30 Hz พบว่าปริมาณข้าวเต็มเมล็ดที่ได้ยังอยู่ในระดับสูง คิดเป็น 98.02% ขณะที่ปริมาณข้าวสาลีที่ปะปนมากับข้าวเต็มเมล็ดลดลงอย่างเห็นได้ชัด เหลือเพียง 5.00% ทั้งนี้หากทดลองเพิ่มค่าเพิ่มความเร็วลมเป็น 7.50 m/s จากการเพิ่มค่าความถี่อ้างอิง (f^*) ขึ้นไปเท่ากับ 35 Hz จะทำให้ปริมาณข้าวสาลีที่ปะปนมากับข้าวเต็มเมล็ดลดลงได้อีก 0.80% แต่มีผลทำให้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดที่ไต่ลดลงถึง 2.66% เนื่องจากความเร็วลมที่สูงเกินไปทำให้ข้าวเต็มเมล็ดถูกพัดปะปนไปกับข้าวสาลีมากขึ้น ดังนั้นความเร็วลมที่ได้จากการหมุนของใบพัดของเครื่องสีฝัดข้าวแบบดั้งเดิมที่เหมาะสมสำหรับข้าวพันธุ์ กข41 ความชื้น 15% คือ 5.60 m/s จากค่าความถี่อ้างอิง (f^*) เท่ากับ 30 Hz และสอดคล้องกับข้าวพันธุ์หอมปทุมธานี 1 ที่ความชื้น 15% ซึ่งผลจากการสีฝัดข้าวที่ความเร็วลม 5.50 m/s ด้วยการปรับค่าความถี่อ้างอิง (f^*) เท่ากับ 30 Hz ทำให้ได้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ด 98.51%

Table 3 A comparison of the proposed system and conventional system (Using diesel engine)

Test parameters	VSD with induction motor ½ hp.	Diesel engine 487 cc.
Rate power	393.00 W	5900.00 W
Energy consumption	0.52 hp./hr.	210.00 g-hp./hr.
Energy costs	1.50 Bath/hr.	5.95 Bath/hr.
Noise levels	No	72.40 dBA
Air pollutions	No	Yes

Note: The average of electricity and fuel costs from 4 Jan to 24 Dec 2020

โดยมีข้าวลีบปะปนออกมาคิดเป็น 4.20% และหากลดความเร็วลมลงเหลือ 3.80 m/s จะมีข้าวลีบปะปนออกมาสูงขึ้นถึง 5.33 เท่าตัว ขณะที่การเพิ่มความเร็วลมขึ้นเท่ากับ 7.60 m/s จะได้ข้าวเต็มเมล็ดลดลงเหลือ 95.80%

นอกจากนี้ การตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าขณะทำการสีฟัดข้าวด้วยระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยวิธีการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่สำหรับเครื่องสีฟัดข้าวแบบตั้งเดิมที่ออกแบบและสร้างขึ้น ด้วยเครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า (Power analyzer) ยี่ห้อ Chauvin Arnoux รุ่น C.A.8331 เพื่อเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ ขนาด 487 ซีซี. เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนแบบเดิม แสดงใน Table 3 พบว่ามีพิกัดกำลังของระบบต้นกำลังน้อยกว่า ดังนั้นอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจึงน้อยกว่า และผลจากการใช้ไฟฟ้าเป็นพลังงานขั้นต้นซึ่งมีราคาต่อหน่วยถูกกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้มูลค่าพลังงานที่ใช้ลดลงกว่า 4 เท่าตัว อีกทั้งยังไม่ทำให้เกิดเสียงดังรบกวนและลดการปล่อยมลพิษออกสู่ธรรมชาติอีกด้วย

สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาและการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างระบบแปลงผันแรงดันและความถี่สำหรับเป็นแหล่งจ่ายกำลังให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนใบพัดของเครื่องสีฟัดข้าวแบบตั้งเดิม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการปรับความถี่อ้างอิงของระบบควบคุมที่นำเสนอให้สูงขึ้นมีผลทำให้ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีค่าสูงขึ้นเข้าใกล้ค่าอ้างอิง โดยผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่อ้างอิงระหว่าง 10–50 Hz ทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 204 –1,424 rpm ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Zhang, Z. Liu, Y. และ Bazzi A. M. (2017) ที่ได้ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของวิธีการควบคุมแรงดันต่อความถี่แบบวงเปิด สำหรับเครื่องจักรกลแบบเหนี่ยวนำ พบว่าการชดเชยแรงดันจากผลของความต้านทานในขดลวดสเตเตอร์ให้มีค่าสูงขึ้นกว่าอัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่คงที่แบบเดิม ในย่านการทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าพิกัดจะทำให้

มอเตอร์สามารถควบคุมแรงบิด และความเร็วรอบให้คงที่ได้ (Alfredo *et al.*, 1998) อย่างไรก็ตามการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ยังพบว่า การปรับความถี่อ้างอิงสูงกว่า 35 Hz อาจมีผลทำให้เครื่องสีฟัดข้าวแบบตั้งเดิมได้รับความเสียหาย เนื่องจากความเร็วใบพัดที่สูงเกินไป

จากการทดสอบสีฟัดข้าวพันธุ์ กข41 และหอมปทุมธานี 1 โดยการปรับเปลี่ยนค่าความถี่อ้างอิงจาก 20 Hz เพิ่มขึ้นจนถึง 35 Hz เพื่อปรับระดับความเร็วลมที่ได้จากการหมุนของใบพัด พบว่าที่ความเร็วลมระหว่าง 5.50 m/s ถึง 5.60 m/s ที่ได้จากปรับค่าความถี่อ้างอิงเท่ากับ 30 Hz มีความเหมาะสมสำหรับการสีฟัดข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์ เนื่องจากทำให้ได้รับปริมาณข้าวเต็มเมล็ดสูงกว่า 98.00% และมีข้าวลีบปะปนออกมาน้อยกว่า 5.00% สอดคล้องกับงานวิจัยของ สุทธิพงษ์ จำรูญรัตน์ และภิรมย์ ตั้งจิตเพียรผล (2559) ที่ได้ทำการพัฒนาเครื่องคัดแยกสิ่งเจือปนในเมล็ดข้าวปลูกพันธุ์ สุพรรณบุรี 1 พบว่า ความเร็วลมที่น้อยเกินไปจะไม่สามารถคัดแยกสิ่งเจือปนออกจากข้าวเต็มเมล็ดได้ และหากความเร็วลมที่สูงเกินไปจะทำให้ข้าวเต็มเมล็ดปะปนออกมากับสิ่งเจือปน นอกจากนี้หากเปรียบเทียบกับต้นกำลังที่เป็นเครื่องยนต์แบบเดิม พบว่ามีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่า ดังนั้นวิธีการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนเครื่องสีฟัดข้าวแบบตั้งเดิมที่นำเสนอ จึงสามารถลดมูลค่าพลังงานที่ใช้ได้กว่า 4 เท่าตัว

ข้อเสนอแนะ

1. เกษตรกรสามารถนำหลักการวิจัยนี้ไปปรับใช้เพื่อปรับความเร็วลมจากใบพัดของเครื่องสีฟัดข้าว ด้วยการปรับความถี่อ้างอิงที่เหมาะสมกับพันธุ์ข้าวชนิดอื่นๆ ได้ เพื่อให้ได้ข้าวเต็มเมล็ดจำนวนมากเมื่อเทียบกับข้าวลีบ

2. การใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะช่วยลดต้นทุนค่าไฟฟ้าให้กับเกษตรกรได้ และยังช่วยลดขั้นตอนการแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้อยู่เดิม ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ และเครื่องมือทดสอบที่ใช้ในการวิจัย และขอขอบคุณคุณสวัสดิ์ เอกเอี่ยม และคุณวิเชียร พูลผล ชาวนาตำบลระแหง อำเภอลาดหลุมแก้ว จังหวัดปทุมธานี ที่เอื้อเฟื้อเครื่องสี่เฟ็ดข้าวแบบดั้งเดิม ข้าวพันธุ์ กข41 และหอมปทุมธานี 1 เพื่อใช้ทดสอบผลการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- กฤตวัฒน์ โดเจริญ, อาทิตยา วัฒนะไมตรี และจิรายุส แม้นนิล. (2560). การศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กที่ใช้ น้ำมันดีเซลและการระเหยเอทานอลในโหมดเชื้อเพลิงร่วม [ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยบูรพา].
- เจษฎา อุดมกิจมงคล. (2554). อุตสาหกรรมเครื่องจักรกลการเกษตร (Agricultural Machinery). รายงานผลการศึกษาด้านวิชาการของสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- วินิต ชินสุวรรณ, ณรงค์ ปัญญา และศรีสมร ทวีโชคชาญชัย. (2541). การศึกษาปัจจัยสำหรับออกแบบเครื่องทำความสะอาดข้าวเปลือกหอมมะลิในระดับกลุ่มเกษตรกร. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น, 3 (2), 19-30.
- สุทธิพงษ์ จำรูญรัตน์ และภิรมย์ ตั้งจิตเพียรผล. (2559). การพัฒนาเครื่องคัดแยกสิ่งเจือปนในเมล็ดข้าวปลูก. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- เสาวณี จันทะพงษ์ และพรชนก เทพขาม. (2561). นวัตกรรม การเกษตร: ทางออกปัญหาความเหลื่อมล้ำของไทย ตอน 2. ธนาคารแห่งประเทศไทย.
- อนุชิต อุไรรัตน์ และเฉลิม จินาดุน. (2563). ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสำหรับเครื่องจักรรีดยางไฟฟ้า. วารสารวิจัยราช มงคลกรุงเทพ, 14 (1), 1-13.
- Alfredo, M.G., Thomas. A.L. & Donald, W.N. (1998). A new induction motor V/f control method capable of high performance and precise regulation at low speeds. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 34 (4), 813–821.
- Bin, W. (2005). *High-power converters and AC drives*. IEEE Press and John Wiley.
- Christian, K., Frede, B. & Paul, T. (2006). Alternate ASDs: Evaluation of the converter topologies suitable for integrated motor drives. *IEEE Industry Applications*, 12 (2), 71–83.

- Dehong, Z., Jin, Z. & Yunhua, L. (2016). Model predictive control scheme of five-leg AC-DC-AC converter-fed induction motor drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63 (7), 4517–4526.
- Guha, A. & Narayanan, G. (2016). Small-signal stability analysis of an open-loop induction motor drive including the effect of inverter dead-time. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52 (1), 242–253.
- Gurav, R.D., Morey, S.B. & Joshi P.M. (2018). 3-ph 2-level VSI with sinusoidal pulse width modulation. *Proceedings of the 3rd International Conference for Convergence in Technology (I2CT)* (pp. 1-4). Pune, India.
- Kolar, J.W. & Friedli, T. (2013). The essence of three-phase PFC rectifier systems—Part I. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28 (1), 176-198.
- Kumar, S., Cho, J.H., Park, J. and Moon, I. (2013). Advances in diesel-alcohol blend and their effects on the performance and emissions of diesel engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 46-72.
- Merve, Y., Mehmet, P. & Hasan K. (2014). A survey on comparison of electric motor types and drives used for electric vehicles. *Proceedings of the 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition* (pp. 218-223). Antalya, Turkey.
- Omkar, G., Onkar, U., Swapnil, R., Ashish, R. & Rekha, S. (2019). V/F speed control technique of three phase induction motor. *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering (IJREEICE)*, 7 (1), 40–44.
- Reddy, M.H.V. & Jegathesan, V. (2011). Open loop V/f control of induction motor based on hybrid PWM with reduced torque ripple. *Proceedings of the 2011 International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology* (pp. 331-336). Nagercoil, India.
- Simon, R., Philipp, K., Marcelo, H. & Johann, K. (2008). Towards a 30 kW/liter, three-phase unity power factor rectifier. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 128 (4), 481–490.
- Stephen, J.C. (2005). *Electric machinery fundamentals*. (4th ed.). USA: McGraw-Hill.

Zhang, Z., Liu, Y. & Bazzi A. M. (2017). An improved high-performance open-loop V/f control method for induction machines. *Proceedings of the 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* (pp. 615-619). Tampa, FL, USA.