

การพัฒนาตัวควบคุมพีไอและพีไอดีบนอีเอสพี 32 สำหรับการควบคุม
ความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยอินเวอร์เตอร์ร่วมกับตัวกรองคาถมาน
DEVELOPMENT OF PI AND PID CONTROLLERS BASED ON ESP32
FOR SPEED CONTROL OF A THREE-PHASE INDUCTION MOTOR
USING AN INVERTER WITH A KALMAN FILTER

ภูมิพัฒน์ คำคำ^{1*}, ชัชวาล มงคล¹, จักรพันธ์ ปิ่นทอง¹, เสกสรรค์ สุขชัยพร¹
Phumiphat Kakham^{1*}, Chatchawarn Mongkhon¹, Jakaphan Pinthong¹,
Seksan Suchaipron¹

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ อ.เมือง จ.ฉะเชิงเทรา ประเทศไทย 24000

¹Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University, Muang, Chachoengsao, Thailand, 24000

*Corresponding author e-mail: phumiphat@techno.rru.ac.th

วันที่รับระบบ 27 พฤศจิกายน 2568

วันที่แก้ไขบทความ 27 ธันวาคม 2568

วันที่ตอบรับบทความ 29 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ

ระบบปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยอินเวอร์เตอร์ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมระบบควบคุมความเร็วนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสายพานลำเลียง ช่วยให้สามารถควบคุมและจัดการวัสดุได้อย่างแม่นยำ ปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้งาน และสามารถปรับสายการผลิตที่แตกต่างกันให้ทำงานร่วมกันได้ สำหรับงานบางประเภทต้องการความแม่นยำในการควบคุมและรักษาระดับความเร็วรอบ เช่น ระบบสายพานลำเลียง ระบบสูบน้ำ เครื่องมือกลสำหรับการผลิตพลาสติกและเครื่องเป่าลม บทความวิจัยนี้นำเสนอระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่พัฒนาบนไมโครคอนโทรลเลอร์ อีเอสพี 32 ให้ทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอและพีไอดีถูกออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ ตัวกรองแบบผ่านความถี่ต่ำและอนุกรมตัวกรองแบบผ่านความถี่ต่ำกับตัวกรองแบบคาถมานถูกนำมาใช้กรองสัญญาณรบกวนการวัดความเร็วรอบ ความเร็วรอบที่เพลามอเตอร์จะถูกวัดโดยตรงด้วยเอ็นโคเดอร์และแปลงให้เป็นรอบต่อนาทีก่อนส่งไปยังตัวกรองสัญญาณรบกวนและตัวควบคุม ตามลำดับสัญญาณควบคุมความเร็วมอเตอร์เป็นสัญญาณแอนะล็อก 4-20 มิลลิแอมป์ ผลการทดสอบพบว่าอนุกรมตัวกรองแบบผ่านความถี่ต่ำกับตัวกรองแบบคาถมานสามารถทำงานร่วมกับตัวควบคุมพีไอและพีไอดีให้สมรรถนะของระบบควบคุมอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ โดยที่ตัวกรองแบบผ่านความถี่ต่ำกับตัวควบคุมพีไอดีใช้เวลาตอบสนองต่ำสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันไดน้อยที่สุด

คำสำคัญ: ตัวกรองคาถมาน, ตัวควบคุมพีไอและพีไอดี, มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส, ระบบควบคุมความเร็ว, อินเวอร์เตอร์

Abstract

Variable speed control of three-phase induction motors using inverters is widely implemented in diverse industrial applications, leading to notable advancements in efficiency for conveyor belt systems. This control mechanism enables precise handling of materials, thereby enhancing operational effectiveness in industrial settings. Additionally, it facilitates seamless adaptation to varying production requirements, ensuring accurate control and maintenance of rotational speed for tasks that demand high precision, such as conveyor systems, water pumping systems, and production machine tools. Furthermore, fans and blowers also derive benefits from this speed control system. This paper introduces a feedback control system developed on the ESP32 microcontroller, which interfaces with an inverter to achieve precise speed control of three-phase induction motors. The PI and PID controller parameters were determined utilizing the Ziegler-Nichols method. To effectively mitigate speed noise, a low-pass filter and a low-pass filter cascade with a Kalman filter were employed. The motor shaft speed is directly measured using an encoder, converted to RPM, and subsequently subjected to the noise filter and controller. The motor speed control signal is an analog signal ranging from 4 - 20 mA. The test results successfully demonstrate the integration of the low-pass filter cascade with the Kalman filter, alongside the PI and PID controllers, ensuring that the control system operates within acceptable limits. Furthermore, both the low-pass filter and PID controller exhibit the shortest rise time.

Keywords: Kalman filter, PI and PID controller, Three-phase induction motor, Speed control system, Inverter

1. บทนำ

การควบคุมความเร็วมอเตอร์อย่างแม่นยำในระบบอัตโนมัติทางอุตสาหกรรมจะทำให้ได้รับสมรรถนะที่เหมาะสม (Ellahi, 2021) และเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงาน มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายตั้งแต่กระบวนการผลิตจนถึงการขนส่ง การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ชนิดนี้เป็นงานที่ซับซ้อนเนื่องจากลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ (Idoko *et al.*, 2017) อย่างไรก็ตาม การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นกระบวนการที่มีความจำเป็นต่อการใช้งาน โดยเฉพาะการควบคุมความเร็วรอบด้วยตัวควบคุมพีไอดี (Djalal & Faisal, 2020)

ตัวควบคุมพีไอดีถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในการปรับแรงดันไฟฟ้าหรือความเร็วสำหรับมอเตอร์ในฟังก์ชันของผลต่าง (Error) ระหว่างค่าความเร็วเป้าหมาย (Setpoint) และค่าความเร็วที่วัดได้ ตัวควบคุมพีไอดีประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ตัวควบคุมตามสัดส่วน (P) ตัวควบคุมปริพันธ์ (I) และตัวควบคุมอนุพันธ์ (D) ตัวควบคุมตามสัดส่วนให้การตอบสนองแบบทันทีต่อการเบี่ยงเบนจากค่าที่ตั้งไว้ ตัวควบคุมปริพันธ์จะช่วยลดความผิดพลาดในสภาวะคงที่ และตัวควบคุมอนุพันธ์จะช่วยเพิ่มการตอบสนองของตัวควบคุมต่อสภาวะที่เปลี่ยนแปลง การศึกษาการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยตัวควบคุมพีไอดีมีมาอย่างต่อเนื่อง เช่น ตัวควบคุมพีไอดีสำหรับอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยอาศัยการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ MATLAB Simulink (Choo & Arthumunathan, 2015) การศึกษาสมรรถนะด้านความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ด้วยวิธีการควบคุมเวกเตอร์โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอและพีไอดีที่พัฒนาบนซอฟต์แวร์ MATLAB (Korsane *et al.*, 2018) การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการไม่ควบคุมและควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยตัวควบคุมพีไอดีด้วย MATLAB Simulink (Mishra *et al.*, 2018) การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้วงจรแปลงผันแบบบริดจ์และตัวควบคุมแบบพีไอดีด้วย MATLAB Simulink (Hartono *et al.*, 2019) การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้ Simulink (Akpama *et al.*, 2020)

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่หรือวงจรเรียงกระแสให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้วยการมอดูเลตแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตหรือความเร็วของอินเวอร์เตอร์ โดยทั่วไปอินเวอร์เตอร์ที่มีจำหน่ายสำหรับใช้งานในภาคอุตสาหกรรมจะมีจุดรับสัญญาณอินพุตที่เป็นแรงดันไฟฟ้า 0 ถึง 10 โวลต์ หรือ กระแสไฟฟ้า 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์ สำหรับปรับความเร็วเพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ อีเอสพี 32 ทำหน้าที่ประมวลผลตามขั้นตอนวิธีของตัวควบคุมให้ทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์ รวมถึงการคำนวณความเร็วรอบที่ได้รับสัญญาณป้อนกลับจากเ็นโคเดอร์

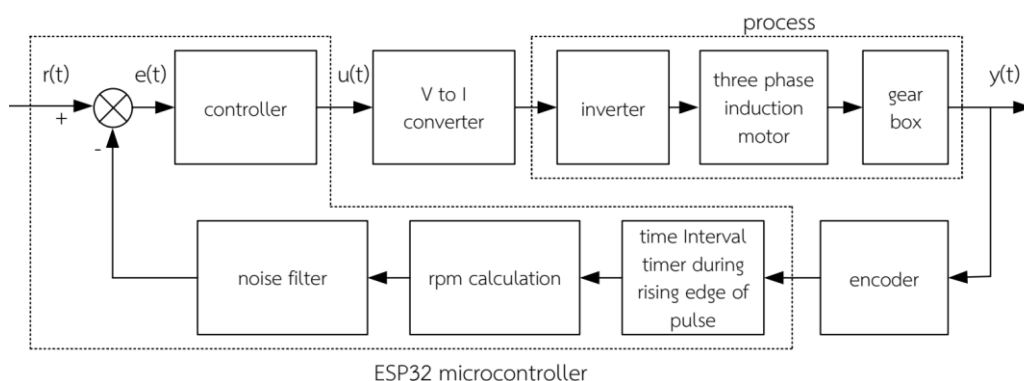
การศึกษาส่วนใหญ่ดังกล่าวข้างต้นใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB Simulink ในจำลองการทำงาน ซึ่งพบว่าตัวควบคุมพีไอดีสามารถลดความเร็วที่เกินค่าเป้าหมาย (Overshoot) และเข้าสู่ความเร็วค่าเป้าหมายได้เป็นอย่างดี

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยอินเวอร์เตอร์ร่วมกับตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมพีไอดีที่พัฒนาบน อีเอสพี 32 และศึกษาสมรรถนะของระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้น

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ อีเอสพี 32 กระบวนการ (Process) และ เอ็นโคเดอร์ (Encoder) ดังภาพที่ 1 กระบวนการประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์สามเฟส มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส และเกียร์ทดรอบ ไมโครคอนโทรลเลอร์ อีเอสพี 32 ถูกโปรแกรมชุดคำสั่งตามขั้นตอนวิธี (Algorithm) รวม 4 ฟังก์ชัน คือ ตัวควบคุม (Controller) ไทเมอร์บันทึกคาบเวลาระหว่างขอบขาขึ้นของพัลส์ (Time interval timer) คำนวณความเร็วรอบต่อนาที (Rpm calculation) และ กรองสัญญาณรบกวน (Noise filter) สัญญาณควบคุมที่ออกจากตัวควบคุม ($u(t)$) จะอยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า 0 – 3.3 โวลต์ จะถูกแปลงให้เป็นกระแสไฟฟ้า 4 – 20 มิลลิแอมป์ ป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมความเร็วรอบ (N_s) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในฟังก์ชันของความถี่ทางไฟฟ้า (f) หรือ $N_s = 120 * f / P$ เมื่อ P แทนจำนวน ขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ เอ็นโคเดอร์จะถูกต่อเข้ากับเพลามอเตอร์โดยตรง ทำหน้าที่ตรวจรู้และ ป้อนกลับความเร็วรอบของมอเตอร์ให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ อีเอสพี 32 คำนวณเป็นความเร็วรอบต่อนาที ก่อนส่งเข้าตัวกรองสัญญาณรบกวน และตัวควบคุม

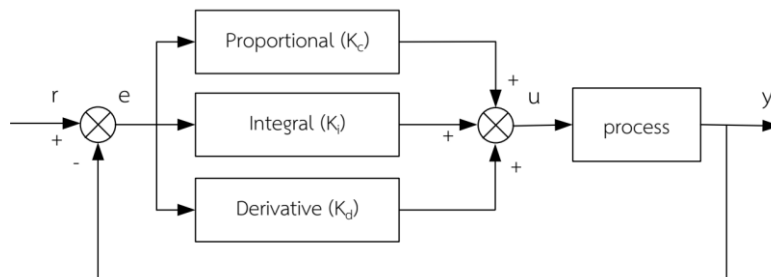


ภาพที่ 1 ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

3.1 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีและพีไอดี

ตัวควบคุมพีไอดีถูกนำไปใช้ในการควบคุมแบบป้อนกลับ เนื่องจากให้ผลตอบสนองที่ดีด้วยการปรับสัญญาณเอาต์พุตด้วยค่าผิดพลาดระหว่างค่าเป้าหมาย (setpoint, r) กับค่าเอาต์พุตของระบบ (y) ตัวควบคุมส่งสัญญาณควบคุม (u) ปรับกระบวนการทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าผิดพลาด (e) โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดค่าผิดพลาดและทำให้ระบบเข้าสู่ค่าเป้าหมาย พารามิเตอร์ของตัวควบคุม คือ อัตราขยายเชิงสัดส่วน (K_c) อัตราขยายเชิงปริพันธ์ (K_i) และอัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (K_d) สมการที่ (1) เป็นสมการตัวควบคุมพีไอดี สำหรับตัวควบคุมพีไอดีจะประกอบด้วยนิพจน์ $K_c e(t) + K_i \int_0^t e(t)$ ใน การศึกษานี้ใช้ไลบรารีพีไอดีสำหรับอาดยุโนซึ่งพัฒนาโดย Beauregard (2017)

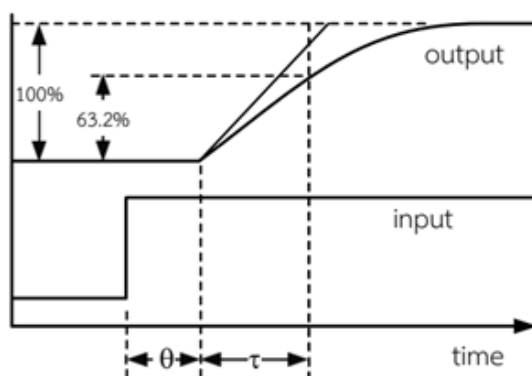
$$u(t) = K_c e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$



ภาพที่ 2 ส่วนประกอบของตัวควบคุมพีไอดี

การคำนวณพารามิเตอร์ตัวควบคุมด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ ซึ่งใช้ผลตอบสนองของ กระบวนการแบบเปิดวงจรที่มีต่อสัญญาณแบบสแต็ป (Open-loop step response) โดยปกติ ผลตอบสนองจะเป็นเส้นโค้งรูปตัวเอส (S-shaped curve) ซึ่งสามารถประมาณค่าด้วยผลตอบสนอง ที่เป็นเชิงเส้นที่รวมค่าเวลาที่ระบบไม่ตอบสนอง (First order plus dead time model หรือ FOPDT) ดังภาพที่ 3 และมีฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบดังสมการที่ (2) โดยที่ K_p เป็นอัตราขยายของ ระบบ τ เป็นค่าเวลาคงตัวของระบบ (Process time constant) และ θ เป็นค่าเวลาที่ระบบไม่ ตอบสนอง (Dead time) หรือ ค่าเวลาหน่วง (delay) ค่าเวลาคงตัวของระบบ (τ) คำนวณ ณ จุดตัด เส้นโค้งเอานต์พุตที่ระดับความสูงร้อยละ 63.2 (Wade, 2004) พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณได้ จากสูตรของซีเกลอร์-นิโคลส์ ดังตารางที่ 1

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (2)$$



ภาพที่ 3 เส้นโค้งการตอบสนองของตัวแบบ FOPDT สำหรับวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ (Wade, 2004)

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ปรับแต่งค่าอัตราขยายตัวควบคุมด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ (Wade, 2004)

controller	K_c	K_i	K_d
P	$\frac{\tau}{\theta}$	0	0
PI	$0.9 \frac{\tau}{\theta}$	$\frac{K_c}{\theta/0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{\tau}{\theta}$	$\frac{K_c}{2\theta}$	$0.5\theta K_c$

3.2 การออกแบบตัวกรองสัญญาณแบบคาลมาน

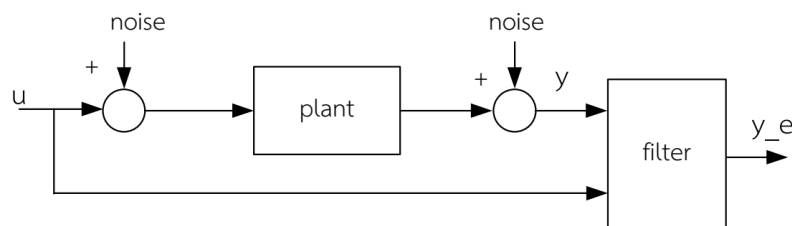
ตัวกรองสัญญาณแบบคาลมาน (Kalman filter) เป็นขั้นตอนวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ประมาณค่าสถานะของระบบพลวัต ซึ่งถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง (Ellahi, 2021) โดยพิจารณาสัญญาณที่ไม่แน่นอนและไม่สมบูรณ์ที่มีอยู่ด้วยหลักการรวมข้อมูลจากการวัดที่ผ่านมาและทำนายสถานะของระบบเพื่อประมาณการสถานะปัจจุบันที่เหมาะสมที่สุด ตัวกรองสัญญาณแบบคาลมานทำนายสถานะปัจจุบันของระบบด้วยการประมาณค่าจากสถานะก่อนหน้า (Previous state) และตัวแบบพลวัตของระบบ (System's dynamic model) โดยนำปัจจัยการควบคุมที่ถูกใช้กับระบบเข้ามาและประมาณการความไม่แน่นอนหรือความสัมพันธ์ของสถานะที่ทำนายไว้

การศึกษานี้ใช้ตัวกรองสัญญาณแบบคาลมานที่สร้างข้อมูลและเปรียบเทียบผลตอบสนองที่เกิดจากการกรองสัญญาณกับผลตอบสนองจริงของกระบวนการ ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยใช้ไลบรารีคาลมานสำหรับอาดยุโนซึ่งพัฒนาโดย Fétick (2019) ตัวแบบปริภูมิสถานะ (state space model) ประมาณค่าได้จากสมการที่ (3) และสมการเอาต์พุต (output equation) คำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + q_k \quad (3)$$

$$y_k = Cx_k + r_k \quad (4)$$

เมื่อ x_k เป็นเวกเตอร์สถานะ (State vector) โดยที่ $k=1,2,3,\dots,n$ A เป็นเมตริกซ์เปลี่ยนสถานะ (State transition matrix) B เป็นเมตริกซ์อินพุต u_k เป็นเวกเตอร์อินพุต q_k เป็นสัญญาณรบกวนระบบ y_k เป็นเอาต์พุต C เป็นเมตริกซ์เอาต์พุต และ r_k เป็นสัญญาณรบกวนการวัด



ภาพที่ 4 โครงสร้างตัวกรองสัญญาณแบบคาลมาน (Gaeid, 2013)

กระบวนการของตัวกรองคาลมานมี 2 ขั้นตอน คือ การประมาณค่า (Prediction) ด้วยสมการที่ (5) และ (6) และการแก้ไขค่า (Correction) ด้วยสมการที่ (7) ถึง (9) (Kumar & Murthy, 2015; Boonsing and Kaewpradit, 2021)

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_k \quad (5)$$

$$\bar{P}_k = AP_{k-1}A^T + Q \quad (6)$$

$$K_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - C\hat{x}_k^-) \quad (7)$$

$$\hat{x}_k = \bar{P}_k C^T (C\bar{P}_k C^T + R)^{-1} \quad (8)$$

$$P_k = (I - K_k C)\bar{P}_k \quad (9)$$

เมื่อ $\hat{x}^-$ เป็นค่าคาดการณ์ (Prediction) ของเวกเตอร์สถานะ $\hat{x}_k$ เป็นค่าประมาณ (Estimation) ของเวกเตอร์สถานะ $\bar{P}$ เป็นค่าคาดการณ์ความแปรปรวนของความผิดพลาด P เป็นค่าปรับปรุง(update) ความแปรปรวนของความผิดพลาด Q เป็นเมตริกซ์ของค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนระบบ z เป็นเวกเตอร์ของค่าจากการวัด R เป็นเมตริกซ์ของค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนการวัด และ I เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย

3.3 อุปกรณ์การทดสอบ

อุปกรณ์ทดสอบสำหรับการศึกษานี้ประกอบด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ อีเอสพี 32 ตัวแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์สามเฟส มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เกียร์ทดรอบ และเอ็นโคเดอร์ โดยการประกอบและเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังภาพที่ 1

ไมโครคอนโทรลเลอร์ อีเอสพี 32 ทำหน้าที่เป็นสมองกลฝังตัวควบคุมการทำงานของระบบ โดยส่งสัญญาณควบคุมความเร็วมอเตอร์ในรูปของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตแบบแอนะล็อก 0-3.3 โวลต์ ส่งต่อให้ตัวแปลงแรงดันไฟฟ้าให้เป็นกระแสไฟฟ้า 4-20 มิลลิแอมป์ เพื่อให้อยู่ในรูปแบบของสัญญาณมาตรฐานสำหรับควบคุมความเร็วของอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบขนาด 0.75 กิโลวัตต์ แรงดันไฟฟ้าสามเฟส 200-230 โวลต์ มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 0.2 กิโลวัตต์ 4 ขั้วแม่เหล็ก แรงดันไฟฟ้าสามเฟส 230 โวลต์ เกียร์ทดรอบอัตราส่วน 1:30 และเอ็นโคเดอร์แบบโรตารี 600 พัลส์ต่อรอบ

3.4 การออกแบบโปรแกรม

โปรแกรมที่พัฒนาบนไอเอสพี 32 สำหรับส่งสัญญาณให้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็ว มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ประกอบด้วย 5 ฟังก์ชัน คือ ตัวควบคุมพีไอหรือพีไอดี ไทเมอร์บันทึก คาบเวลาของพัลส์ (Time interval timer) คำนวณความเร็วรอบ (Rpm calculation) ตัวกรอง สัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำ (Low pass filter) และตัวกรองสัญญาณแบบคาลมาน (Kalman filter)

ความเร็วรอบที่เฟลมอเตอร์ถูกตรวจรู้ด้วยเอ็นโคเดอร์ ซึ่งส่งสัญญาณพัลส์เฟส A และ B เข้าไอเอสพี 32 ผ่านกระบวนการขัดจังหวะการทำงาน (Interrupt) ด้วยสัญญาณที่ขอบขาขึ้นของพัลส์ เฟส A ตรวจจับและบันทึกคาบเวลาระหว่างขอบขาขึ้นของพัลส์เฟส B เพื่อคำนวณความเร็วรอบต่ออนาที ก่อนส่งไปกรองสัญญาณรบกวนด้วยตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำ และ/หรือ ตัวกรอง สัญญาณแบบคาลมาน ความเร็วรอบที่ถูกกรองสัญญาณรบกวนแล้วจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับ ความเร็วเป้าหมาย ผลต่างของความเร็ว ($e(t)$) จะถูกคำนวณตามขั้นตอนวิธีของตัวควบคุม และ ส่งเอาต์พุตเป็นสัญญาณควบคุม 0-3.3 โวลต์ ($u(t)$) และส่งออกทางพอร์ตแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ของ ไอเอสพี 32

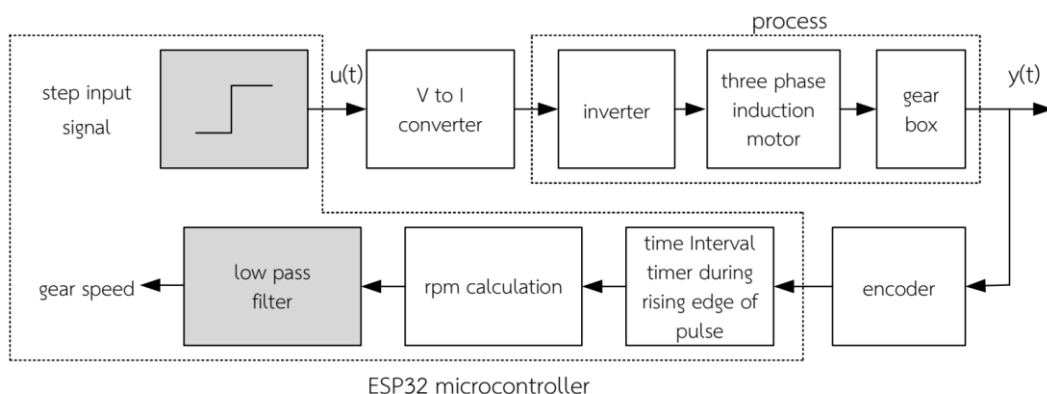
การคำนวณความเร็วรอบมอเตอร์อาศัยเอ็นโคเดอร์ ซึ่งให้เอาต์พุต 600 พัลส์ต่อรอบ (CPR) การคำนวณคาบเวลาของพัลส์เฟส B จำนวน 1 ลูกคลื่น อาศัยโปรแกรมบริการการขัดจังหวะ (Interrupt service routine) จากสัญญาณขอบขาขึ้นของพัลส์เฟส A แล้วคำนวณช่วงเวลาจากขอบ ขาขึ้นของพัลส์ปัจจุบัน (t_1) กับพัลส์ก่อนหน้า (t_0) ของพัลส์เฟส B ดังนั้นคาบเวลาของพัลส์ 1 ลูกคลื่น คือ $t_1 - t_0$ มีหน่วยเป็นนาที่ ดังนั้นความเร็วรอบของเฟลมอเตอร์ด้านออกเกียร์ทดรอบ (อัตราส่วน 1:30) ในหน่วยรอบต่ออนาที จึงคำนวณได้จากสมการที่ (10)

$$n = \frac{1}{30CPR(t_1 - t_0)} \quad (10)$$

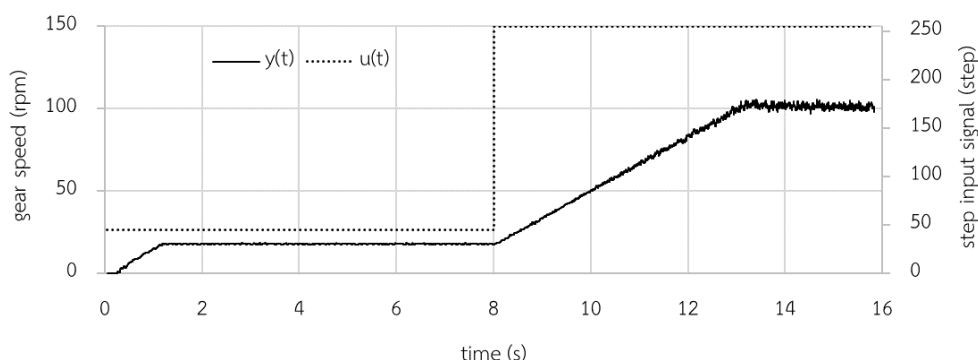
3.5 การคำนวณพารามิเตอร์ตัวควบคุมด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์

การคำนวณพารามิเตอร์ตัวควบคุมด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ ดำเนินการด้วยการทดสอบด้วย ระบบดังภาพที่ 5 เพื่อหาผลตอบสนองของกระบวนการที่มีต่อสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันได (Step input) กำหนดให้ส่งสัญญาณแบบขั้นบันไดออกจากช่องแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ของ

อีเอสพี 32 ที่ระดับ 45 (จากระดับสูงสุด คือ 255) ด้วยระยะเวลา 8 วินาที แล้วเปลี่ยนเป็น 255 แบบทันที จะได้ผลตอบสนองเป็นเส้นโค้งรูปตัวเอส ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 5 ระบบสำหรับทดสอบหาผลตอบสนองสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันได



ภาพที่ 6 ผลตอบสนองสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันได

ผลตอบสนองสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันไดจากระดับ 45 เป็น 255 ดังภาพที่ 6 เป็น ผลตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นซึ่งรวมค่าเวลาที่ระบบไม่ตอบสนอง (FOPDT) ค่าเวลาที่ระบบไม่ตอบสนอง (θ) มีค่า 0.03 วินาที และประมาณค่าเวลาคงตัวของระบบ (τ) ณ จุดตัดเส้นโค้งเอานต์พุดที่ระดับความสูงร้อยละ 63.2 มีค่า 3.16 วินาที คำนวณพารามิเตอร์ของ ตัวควบคุมพีไอดี จากสูตรของซีเกลอร์-นิโคลส์ ดังตารางที่ 1 จะได้อัตราขยายเชิงสัดส่วน (K_c) อัตราขยายเชิงปริพันธ์ (K_i) และอัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (K_d) สำหรับตัวควบคุมพีไอ และพีไอดี เท่ากับ (88.33, 822.25, 0) และ (117.77, 1827.22, 1.90) ตามลำดับ

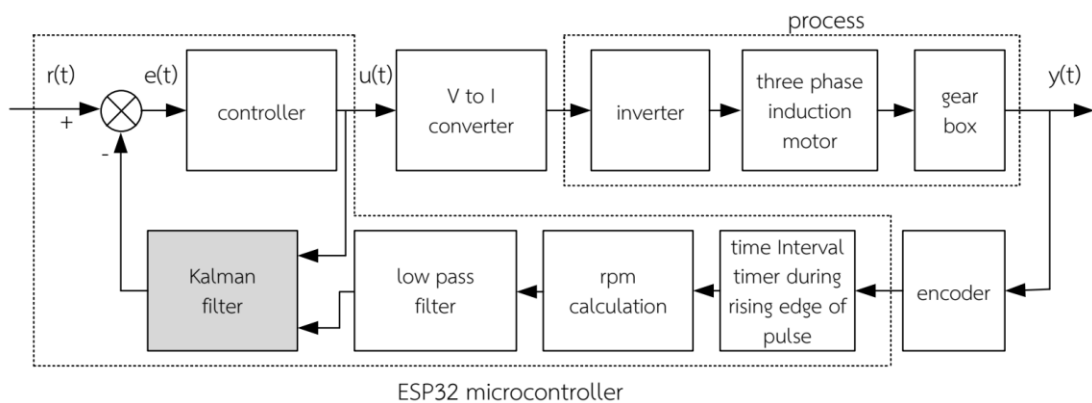
4. ผลการวิจัย

4.1 สมรรถนะของระบบควบคุม

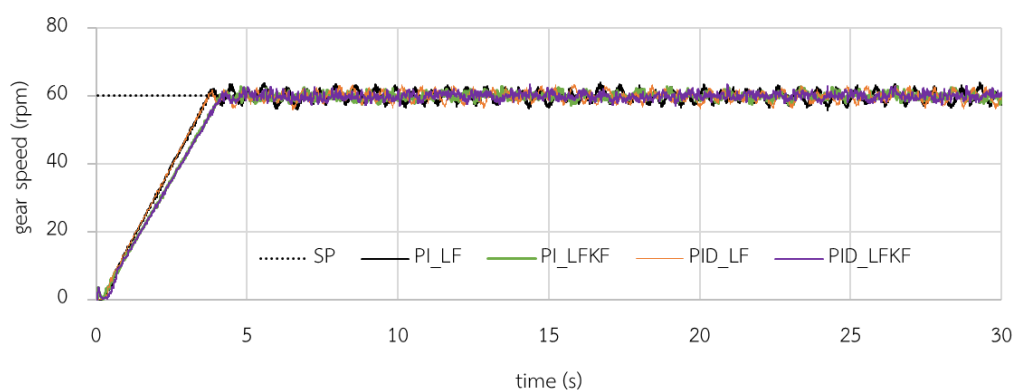
การทดสอบเพื่อประเมินสมรรถนะตัวกรองสัญญาณกับตัวควบคุมพีไอ (PI) และพีไอดี (PID) กับตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำ (LF) และอนุกรมตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำกับตัวกรองสัญญาณแบบคาลมาน (LKF) ด้วยระบบดังภาพที่ 7 การศึกษาที่ใช้ตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำ ตัดความถี่ที่ 25 เฮิรตซ์ ตัวกรองสัญญาณแบบคาลมานที่มีเมตริกซ์ของค่าความแปรปรวนของสัญญาณ (Q) และเมตริกซ์ของค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนการวัด (R) ดังนี้

$$Q = \begin{bmatrix} 0.0001 & 0 \\ 0 & 0.0004 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.49 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix} \quad (12)$$



ภาพที่ 7 ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพร้อมตัวกรองสัญญาณรบกวน



ภาพที่ 8 เส้นโค้งเปรียบเทียบผลที่ได้จากระบบควบคุมความเร็ว

ตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำ (LF) จะให้ระบบควบคุมใช้เวลาตอบสนองต่อสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันได (Rise time) น้อยกว่าอนุกรมตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำกับตัวกรองสัญญาณแบบคาบมาน (LFKF) ในการศึกษาครั้งนี้ประเมินค่าเวลาตอบสนองต่อสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันไดระหว่างค่าร้อยละ 10 ถึง 90 ของความเร็วที่เพลากีเยอร์ (Gear speed) ขณะอยู่ในสถานะคงตัว (Steady state)

ค่าร้อยละของเอาต์พุตที่สูงเกินกว่าค่าเป้าหมาย (% Overshoot) พิจารณาที่ผลตอบสนองของระบบทั้ง 4 แบบ ดังภาพที่ 8 ด้วยสมการที่ (13) โดยภาพรวมพบว่า ค่าความเร็วที่เพลากีเยอร์จะแกว่งหรือกระเพื่อม (Fluctuate) อยู่ในกรอบไม่เกินร้อยละ 5 ของค่าความเร็วเป้าหมาย ยกเว้นกรณีตัวควบคุมพีไอกับตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำ (PI_LF) จะมีการแกว่งของความเร็วรอบมากกว่าร้อยละ 5 ตลอดเวลา จึงไม่สามารถประเมินค่าเวลาตอบสนองต่อสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันได (N/A) และเวลาคลาดเคลื่อนจากค่าเป้าหมาย (Settling time) จึงมีค่าเป็นอนันต์ อย่างไรก็ตามในด้านของการไปใช้งาน ตัวควบคุมที่ทำงานร่วมกับตัวกรองสัญญาณอีก 3 แบบ คือ PI_LFKF PID_LF และ PID_LFKF ให้สมรรถนะของการควบคุมอยู่เกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยที่ตัวควบคุมพีไอดีที่ทำงานร่วมกับตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำให้สมรรถนะของการควบคุมที่ดีที่สุดสำหรับระบบที่ประกอบขึ้นในการศึกษาครั้งนี้ กล่าวคือ ใช้เวลาตอบสนองต่อสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันได 2.85 วินาที และเวลาคลาดเคลื่อนจากค่าเป้าหมาย 4.17 วินาที

$$\%overshoot = \frac{peak-setpoint}{setpoint} \times 100\% \quad (13)$$

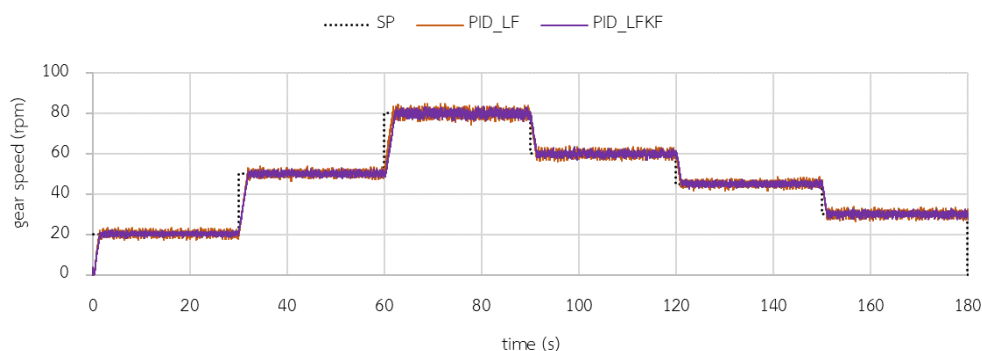
ตารางที่ 2 สมรรถนะของระบบควบคุม

controller	filter	rise time	maximum	settling time
		(s)	overshoot (%)	(s)
PI	LF	N/A	>5	∞
	LFKF	3.21	<5	4.73
PID	LF	2.85	<5	4.17
	LFKF	3.07	<5	4.21

4.2 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย

การทดสอบหาผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย (Set point tracking) จำนวน 6 ค่า คือ 20 50 80 60 45 และ 30 รอบต่อนาที เพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบต่อการ

เปลี่ยนแปลงความเร็วเป้าหมายทั้งแบบเพิ่มขึ้นและลดลง ค่าความเร็วเป้าหมายจะเปลี่ยนค่าอัตโนมัติทุกๆ เวลา 30 วินาที ผลการทดสอบตัวควบคุมพีไอดีที่ทำงานร่วมกับตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำ (PID_LF) และอนุกรมตัวกรองแบบผ่านความถี่ต่ำกับตัวกรองสัญญาณแบบคาลมาน (PID_LFKF) พบว่าระบบควบคุมทั้งสองตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายได้เป็นอย่างดี แต่ระบบควบคุม PID_LF ใช้เวลาตอบสนองต่อสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันไดน้อยกว่าตัวควบคุม PID_LFKF โดยเฉพาะในช่วงความเร็วที่เพลาเกียร์ 50 ถึง 80 รอบต่อนาที ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 เส้นโค้งเปรียบเทียบผลตอบสนองการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย

5. อภิปรายผลการวิจัย

ผลการทดสอบระบบควบคุมที่ใช้ในการศึกษานี้พบว่าตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำทำให้ระบบควบคุมใช้เวลาตอบสนองต่อสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันไดน้อยกว่าตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำร่วมกับตัวกรองสัญญาณแบบคาลมาน เนื่องจากระบบที่มีขั้นตอนวิธีการประมวลผลมากกว่าย่อมใช้เวลาในการประมวลผลมากกว่า แต่ในการศึกษาเบื้องต้นพบว่าการใช้ตัวกรองสัญญาณแบบคาลมานเพียงตัวเดียวจะทำให้ความเร็วที่เพลาเกียร์มีค่าแกว่งมากกว่าร้อยละ 5 ของค่าความเร็วเป้าหมาย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้อนุกรมตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำกับตัวกรองสัญญาณแบบคาลมานเพื่อให้ผลการกรองที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (ความเร็วที่เพลาเกียร์มีค่าแกว่ง <5%) สำหรับระบบควบคุมบางระบบอาจแตกต่างออกไป เช่น ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงด้วย MATLAB/Simulink ที่สามารถแทนที่ตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำด้วยตัวกรองสัญญาณแบบคาลมานได้ โดยที่ยังสามารถลดสัญญาณรบกวนและเพิ่มประสิทธิภาพในการตอบสนองได้ (Boonsing & Kaewpradit, 2021)

ตัวควบคุมพีไอกับตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำทำให้ความเร็วที่เพลาเกียร์แกว่งมากกว่าร้อยละ 5 จึงไม่สามารถประเมินค่าเวลาตอบสนองต่อสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันได และเวลาคลาดเคลื่อนจากค่าเป้าหมายมีค่าเป็นอนันต์ อย่างไรก็ตาม โดยภาพรวมความเร็วที่เพลาเกียร์ของ

ระบบที่ทดสอบจะแกว่งอยู่ในกรอบบวกและลบไม่เกินร้อยละ 5 ของค่าความเร็วเป้าหมาย ดังนั้นถ้าพิจารณาในด้านของการนำไปใช้งาน ตัวควบคุมพีไอและพีไอดีที่ทำงานร่วมกับตัวกรองสัญญาณทั้งสองแบบให้สมรรถนะของการควบคุมที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ยกเว้นกรณีตัวควบคุมพีไอและตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำ โดยที่ตัวควบคุมพีไอดีกับตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำให้สมรรถนะของการควบคุมที่ดีที่สุดสำหรับระบบที่ประกอบอุปกรณ์ทดสอบขึ้นในการศึกษานี้ นอกจากนี้ระบบควบคุมพีไอดีกับตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำ และอนุกรมตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำกับตัวกรองสัญญาณแบบคาบมานยังให้ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายได้เป็นอย่างดี แต่ระบบควบคุมพีไอดีกับตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำมีค่าเวลาตอบสนองต่อสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันไดน้อยกว่าโดยเฉพาะความเร็วที่เพลาเกียร์ตั้งแต่ 50 ถึง 80 รอบต่อนาที เมื่อพิจารณาเฉพาะตัวควบคุมจะพบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีจะให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาอื่น เช่น การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวิธีควบคุมเวกเตอร์แบบง่าย ซึ่งใช้ MATLAB พบว่าตัวควบคุมพีไอดีให้ค่าเวลาคลาดเคลื่อนจากค่าเป้าหมายต่ำและช่วยลดค่าเอาต์พุตที่สูงเกินกว่าค่าเป้าหมายเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอ (Korsane *et al.*, 2018) และการศึกษาเปรียบเทียบตัวควบคุมชนิดต่างๆ กับการควบคุมความเร็วมอเตอร์สามเฟสด้วย MATLAB Simulink (Mishra *et al.*, 2018) เป็นต้น

6. สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาระบบควบคุมแบบป้อนกลับด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ อีเอสพี 32 สำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้อินเวอร์เตอร์ ในการศึกษานี้ใช้วิธีซีเกลอร์-นิโคลส์สำหรับคำนวณพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอและพีไอดี ตัวกรองสัญญาณรบกวนที่ใช้ในการศึกษามี 2 แบบคือ ตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำ และอนุกรมตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำกับตัวกรองสัญญาณแบบคาบมาน ผลการศึกษาระบบควบคุมที่ประกอบอุปกรณ์ขึ้นพบว่า การใช้ตัวควบคุมพีไอดีกับอนุกรมตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำกับตัวกรองสัญญาณแบบคาบมาน และตัวควบคุมพีไอดีกับอนุกรมตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำกับตัวกรองสัญญาณแบบคาบมาน ให้สมรรถนะของระบบควบคุมอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยความเร็วที่เพลาเกียร์มีค่าแกว่งน้อยกว่าร้อยละ 5 ในขณะที่การใช้ตัวควบคุมพีไอดีกับตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำมีสมรรถนะดีที่สุดสำหรับระบบที่ในการศึกษาโดยเฉพาะด้านเวลาตอบสนองต่อสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันได

7. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนจากหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม การผลิตอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชชนครินทร์

8. เอกสารอ้างอิง

- Akpama, E.J., Omini, I.E., Effiong, E.E., & Ezenwosu, R.U. (2020). PID speed controlled model of induction motor using Simulink. **International Journal of Engineering Research and Management**, 7(10), 24–28.
- Beauregard, B. (2017). **Arduino PID library** (Version 1.2.1). Retrieved from <https://github.com/br3ttb/Arduino-PID-Library/tree/master>
- Boonsing, S., & Kaewpradit, P. (2021). Comparison of PI and PID control performances coupled with Kalman filter for DC motor speed control via MATLAB/Simulink. **Engineering Journal Chiang Mai University**, 28(1), 195–211.
- Choo, K.L., & Arthumunathan, D. D. (2015). Performance analysis of PID controller for three-phase inverter fed induction motor. **Infrastructure University Kuala Lumpur Research Journal**, 3(1), 50–56.
- Djalal, M.R., & Faisal. (2020). Design of optimal PID controller for three-phase induction motor based on ant colony optimization. **SINERGI**, 24(2), 125–132. Doi: <https://doi.org/10.22441/sinergi.2002.2.006>
- Ellahi, N. (2021). Extended Kalman filter based brushless DC motor for rotor position and speed control. **TechRxiv**, 1 – 12. Doi: <https://doi.org/10.36227/techrxiv.17208848.v1>
- Fétick, R.J.L. (2019). **Kalman library**. Retrieved from <https://github.com/rfetick/Kalman>
- Gaeid, K.S. (2013). Optimal Kalman filter design with DC motor speed controlled parameters. **Journal of Asian Scientific Research**, 3(12), 1157–1172.
- Hartono, H., Sudjoko, R.I., & Iswahyudi, P. (2019). Speed control of three-phase induction motor using universal bridge and PID controller. **Journal of Physics: Conference Series**, 1381, 012053. Doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1381/1/012053>
- Idoko, A.A., Thuku, I.T., Musa, T.T., & Amos, C. (2017). Design of tuning mechanism of PID controller for application in three-phase induction motor speed control. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, 4(11), 138–147. Doi: <https://doi.org/10.22161/ijaers.4.11.21>
- Korsane, D.T., Polke, A., Mude, S.K., Hiwarkar, C.S., & Korsane, K. (2018). Speed performance of three-phase induction motor by using simplified vector control

method. **International Journal of Engineering Research in Electrical and Electronic Engineering**, 4(3), 172–178.

Kumar, R., & Murthy, R. (2015). **Kalman filter for speed control of DC motor for robotic safety critical application**. In Proceedings of the 2nd National Conference on Emerging Trends in Science and Technology. Sapthagiri College of Engineering, Bangalore, India.

Mishra, H., Singh, R., & Solanki, M. (2018). Investigation of three-phase induction speed control strategies using no controller and PID controller. **International Research Journal of Engineering and Technology**, 5(6), 1464–1468.

Wade, H. L. (2004). **Basic and advanced regulatory control: System design and application** (2nd ed.). Research Triangle Park, NC: Instrumentation, Systems, and Automation Society.