

การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมความเร็วรอบ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม

Design of an Optimal Fuzzy Logic Controller for Speed Control of a BLDC Motor Using a Genetic Algorithm

สายฟ้า นพรัตน์ สรศักดิ์ อาจหาญ ขวนะ อยู่กักดี และ โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง*

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

koson.c@cit.kmutnb.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิก(Fuzzy logic control: FLC) สำหรับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC motor: BLDC) โดยอาศัยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm: GA) ในบทความนี้ได้แสดงการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนของ BLDC เพื่อใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุม พร้อมทั้งรายละเอียดการออกแบบฟังก์ชันสมาชิกและกฎของฟัซซี อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมถูกใช้ค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันสมาชิกอินพุตของฟัซซี ประสิทธิภาพการควบคุมถูกประเมินด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบหลายตัวแปรบนพื้นฐานการจำลองสถานการณ์ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุม FLC ที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอ สามารถลดค่าพุงเกินของระบบและลดเวลาการตอบสนองของการควบคุมได้

คำสำคัญ: ตัวควบคุมฟัซซี อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

Abstract

This paper presents the design of a fuzzy logic controller (FLC) for speed control of a brushless DC motor (BLDC) using a genetic algorithm (GA). In this paper, mathematical modeling of the BLDC motor transfer function is described for controller design. Details of the fuzzy membership functions and rule base design are also provided. The GA is applied to optimize the parameters of the input membership functions. Control performance is evaluated using a multi-objective function based on simulation. Simulation results demonstrate that the proposed FLC design can reduce system overshoot and shortens the control response time.

Keywords: Fuzzy Controller, Genetic Algorithm, Brushless DC Motor

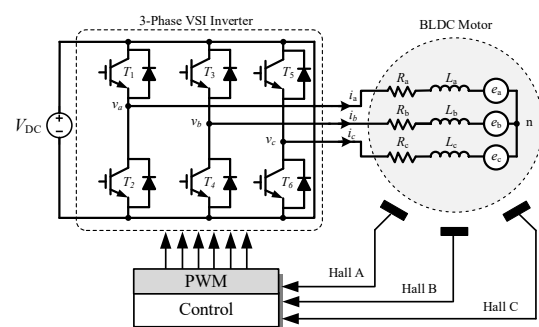
1. บทนำ

ในปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้าถือได้ว่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในระบบอัตโนมัติและเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ สำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำในการควบคุมความเร็วรอบและแรงบิด มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน [1] ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพราะมีข้อได้เปรียบหลายประการ เช่น บำรุงรักษาค่า อายุการใช้งานนานและมีประสิทธิภาพสูง นอกจากนี้มอเตอร์ BLDC ยังมีคุณสมบัติในการตอบสนองต่อคำสั่งควบคุมได้อย่าง

รวดเร็ว จึงมักถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์หลายประเภท เช่น ยานยนต์ไฟฟ้า หุ่นยนต์ ระบบขับเคลื่อนของโดรน ระบบอัตโนมัติทางอุตสาหกรรม และเครื่องใช้ไฟฟ้าอัจฉริยะต่าง ๆ

การควบคุมการทำงานของมอเตอร์ BLDC ให้มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องอาศัยเทคนิคการควบคุมที่ซับซ้อนและแม่นยำ ควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้สอดคล้องกับตำแหน่งของโรเตอร์ โดยมีตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก(Hall sensor) ทำหน้าที่ระบุตำแหน่งของโรเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 1 ด้วยเหตุนี้ การพัฒนาและปรับปรุงระบบควบคุม BLDC ให้มีประสิทธิภาพจึงเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่อง โดยมีการนำเสนองานวิจัยการควบคุมมอเตอร์ BLDC ด้วยวิธีการที่หลากหลาย ตัวควบคุมฟัซซีเป็นหนึ่งในวิธีการควบคุมที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เพราะมีโครงสร้างการควบคุมที่เรียบง่าย สามารถลดการพุงเกินและจัดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้ การออกแบบตัวควบคุมสามารถใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and error: TE) หรือวิธีการของซิกเกลอร์-นิโคลส์ (Ziegler – Nichols: ZN) แต่อย่างไรก็ตามการกำหนดค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟัซซีให้เหมาะสมไม่ใช่เรื่องง่าย[3-4] จึงได้มีแนวคิดการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกที่มีข้อได้เปรียบด้านการออกแบบการควบคุมด้วยภาษาที่เข้าใจง่าย มีความยืดหยุ่นในการควบคุม อย่างไรก็ตามการออกแบบการควบคุมให้มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญออกแบบกฎการควบคุม รวมถึงการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โดยที่ไม่สามารถยืนยันค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมได้ จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น

ในบทความนี้จึงเสนอการออกแบบและการหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันสมาชิกสำหรับตัวควบคุมแบบฟัซซีที่ใช้ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ BLDC โดยใช้อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม การประเมินประสิทธิภาพการควบคุมพิจารณาด้วยค่าดัชนีต่าง ๆ ประกอบด้วย การพุงเกิน เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวและค่าผิดพลาดในสภาวะคงตัว สมรรถนะการควบคุมยืนยันด้วยผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมฟัซซีแบบทั่วไปกับตัวควบคุมฟัซซีที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการที่นำเสนอ



รูปที่ 1 การขับเคลื่อนมอเตอร์ BLDC

2. แบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

จากภาพที่ 1 แสดงวงจรสมมูลของมอเตอร์ BLDC โดยที่ขดลวดแต่ละเฟสแทนที่ด้วยความต้านทาน (R_s) และตัวเหนี่ยวนำ (L_s) แรงดันไฟฟ้าต้านกลับแต่ละเฟส e_{an} e_{bn} และ e_{cn} การขับเคลื่อนอาศัยอินเวอร์เตอร์สามเฟส ตำแหน่งโรเตอร์ถูกตรวจจบบด้วยเซ็นเซอร์วัดสนามแม่เหล็ก (Hall sensor) ทั้ง 3 ตัว ที่ถูกติดตั้งอยู่ภายใน ส่งสัญญาณให้กับระบบควบคุม เพื่อสร้างสัญญาณขับสวิตช์ แบบจำลองของมอเตอร์ BLDC สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแรงดันที่ขั้วทั้ง 3 เฟส ได้ดังสมการที่ (1)-(3) ตามลำดับ

$$v_{an} = R_a i_a + \frac{d}{dt} (L_a i_a + M_{ab} i_b + M_{ac} i_c) + e_{an} \quad (1)$$

$$v_{bn} = R_b i_b + \frac{d}{dt} (L_b i_b + M_{ba} i_a + M_{bc} i_c) + e_{bn} \quad (2)$$

$$v_{cn} = R_c i_c + \frac{d}{dt} (L_c i_c + M_{ca} i_a + M_{cb} i_b) + e_{cn} \quad (3)$$

พิจารณาขดลวดทั้ง 3 มีความสมมาตรตัวเหนี่ยวนำแต่ละเฟสเท่ากัน สำหรับค่าความเหนี่ยวนำรวมจึงเท่ากันและกระแสไฟฟ้าสามเฟสเป็นตามเงื่อนไข

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (4)$$

จากสมการที่ (1) - (3) สามารถลดรูปสมการได้เป็น

$$v_{an} = R i_a + (L - M) \frac{di_a}{dt} + e_{an} \quad (5)$$

$$v_{bn} = R i_b + (L - M) \frac{di_b}{dt} + e_{bn} \quad (6)$$

$$v_{cn} = R i_c + (L - M) \frac{di_c}{dt} + e_{cn} \quad (7)$$

การควบคุมสวิตช์ทำงานครึ่งละ 2 เฟส เมื่อ $L_d = L - M$ และ $e = K_b \omega_m$ โดยที่ K_b คือ ค่าคงที่แรงดันของมอเตอร์ สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$v_d = R_d i + L_d \frac{di}{dt} + K_b \omega_m \quad (8)$$

สมการแรงบิดทางไฟฟ้าสามารถเขียนแสดงดังสมการ

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} = K_T i \quad (9)$$

เมื่อ K_T คือ ค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์ สมการเคลื่อนที่แบบหมุนสามารถเขียนได้ดังนี้

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_m}{dt} + B \omega_m \quad (10)$$

พิจารณา $T_L = 0$ นำสมการที่ (8) แทนลงใน (9) และจัดให้อยู่ในรูปเทอมของกระแส จะได้

$$i = \frac{J}{K_T} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{B}{K_T} \omega_m \quad (11)$$

จากสมการข้างต้นดำเนินการแปลงลาปลาซและจัดรูปได้เป็น

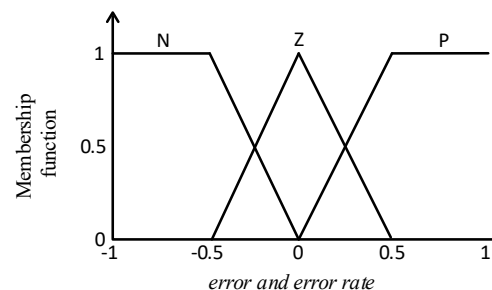
$$G_d(s) = \frac{\omega_m(s)}{v_d(s)} = \frac{K_T}{Ls^2 + (R_d J + JB)s + (R_d B + K_b K_T)} \quad (12)$$

มอเตอร์ BLDC ถูกควบคุมผ่านชุดขับเคลื่อนที่สามารถแทนได้ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับหนึ่ง ทำให้สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบได้ดังสมการที่ (13) โดยที่ K_c คือ ค่าอัตราขยายและ τ_c คือ ค่าคงตัวทางเวลาของชุดขับเคลื่อน

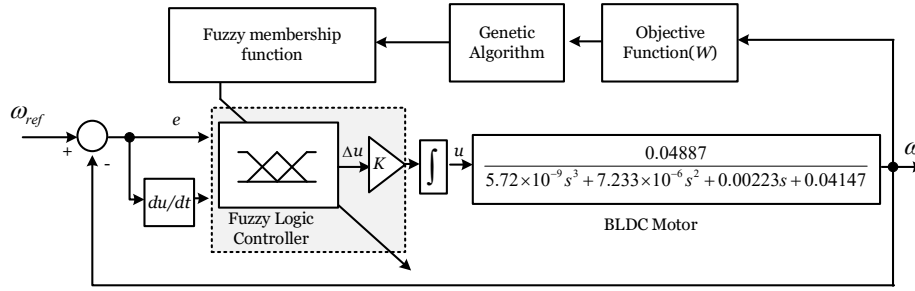
$$G_p(s) = \left(\frac{K_c}{\tau_c s + 1} \right) \frac{K_T}{JLs^2 + (JR_d + JB)s + (R_d B + K_b K_T)} \quad (13)$$

3. การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิก

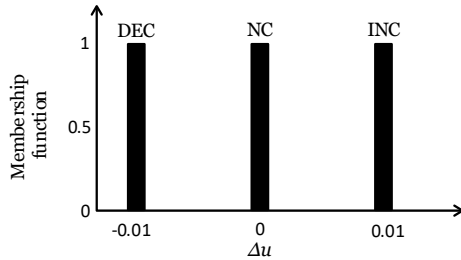
ตัวควบคุมฟัซซีใช้เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้ ลอจิกแบบดั้งเดิม (Boolean Logic) ที่มีข้อจำกัดในการจัดการกับข้อมูลที่ไม่ชัดเจนหรือมีความไม่แน่นอน การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีมี 3 ขั้นตอนหลักได้แก่ การฟัซซีฟิเคชัน (Fuzzification) กลไกการอนุมาน (Inference Mechanism) และการดีฟัซซีฟิเคชัน (Defuzzification) ในบทความนี้ ค่าความคลาดเคลื่อน (error) เป็นค่าความแตกต่างระหว่างความเร็วที่อ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ ส่วนค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อน (Error Rate) จะอยู่ในรูปแบบของอัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อนเทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเวลา สัญญาณทั้งสองจะถูกส่งไปยังฟังก์ชันสมาชิกเพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการอนุมาน ตัวควบคุมฟัซซีถูกออกแบบโดยใช้วิธีการอนุมานแบบ (Sugeno Inference Method) ซึ่งใช้ค่าความคลาดเคลื่อนและอัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อนเป็นตัวแปรนำเข้า โดยแต่ละกฎฟัซซีจะอยู่ในรูปแบบ ถ้า-แล้ว (If-Then) ค่าผลลัพธ์จากกฎแต่ละข้อจะถูกคำนวณโดยใช้ฟังก์ชันเชิงเส้น และนำมารวมกันด้วยวิธีเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Weighted Average) โดยใช้อัตราส่วนของค่าความเป็นสมาชิก (Membership Degree) ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต รูปแบบฟังก์ชันสมาชิกตัวแปรอินพุตแบบรูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมคางหมูถูกใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีข้อดีในเรื่องของเวลาคำนวณและความง่ายในการเขียนโปรแกรม ฟังก์ชันสมาชิกนี้ถูกกำหนดให้มีลักษณะสมมาตร โดยมีขอบเขตอยู่ระหว่าง $[-1, 1]$ ส่วนเอาต์พุตมีการอนุมานแบบซุกิโนที่มีขอบเขตอยู่ระหว่าง $[-0.01, 0.01]$ ดังแสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ตามลำดับ



ภาพที่ 2 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต



รูปที่ 4 แผนภาพการออกแบบ FLC สำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ BLDC ด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม



รูปที่ 3 ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต

การกำหนดกฎของฟัซซีถูกออกแบบโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความคลาดเคลื่อนกับเอาต์พุตของฟัซซีที่เป็นค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม ตัวแปรอินพุตของฟัซซีเป็นแบบ 3x3 ทำให้มีกฎของฟัซซี 9 กฎ ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยมีค่าอัตราขยาย $K = 540$

ตารางที่ 1 กฎของฟัซซี

Input Fuzzy		error		
		N	Z	P
error rate	N	DEC	DEC	INC
	Z	DEC	NC	INC
	P	DEC	NC	DEC

4. การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิกด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม

อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมเป็นวิธีการค้นหาแบบหนึ่งที่ยึดตามหลักของการคัดเลือกโดยธรรมชาติและพันธุกรรมเชิง พันธุศาสตร์เพื่อใช้ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในพื้นที่ของคำตอบที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อนซึ่งมีกระบวนการอยู่สามข้อคือ การคัดเลือกสายพันธุ์ เป็นกระบวนการที่เลือกประชากรที่ดีที่สุดในแต่ละรุ่น เพื่อให้อัลกอริทึมสามารถเลือกสมาชิกที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดในการสร้างรุ่นถัดไป โดยจะมีการคัดเลือกตามคุณสมบัติหรือค่าฟิตเนส (Fitness value) ของแต่ละตัวแทนพันธุกรรม หลังจากการคัดเลือกสายพันธุ์แล้ว การปฏิบัติการทางสายพันธุ์จะเกิดขึ้น ซึ่งรวมถึงกระบวนการหลักสองประเภท คือ การผสมพันธุ์ (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation) การผสมพันธุ์เป็นการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างสองสายพันธุ์เพื่อสร้างลูกหลานที่มีคุณสมบัติดีขึ้น การกลายพันธุ์จะเป็นการเปลี่ยนแปลงบางส่วนของพันธุกรรมของลูกหลาน เพื่อเพิ่มความหลากหลายและหลีกเลี่ยงปัญหาที่อาจเกิดขึ้นจากการคัดเลือกที่จำกัด เมื่อการผสมพันธุ์และการกลายพันธุ์เสร็จสิ้นแล้ว

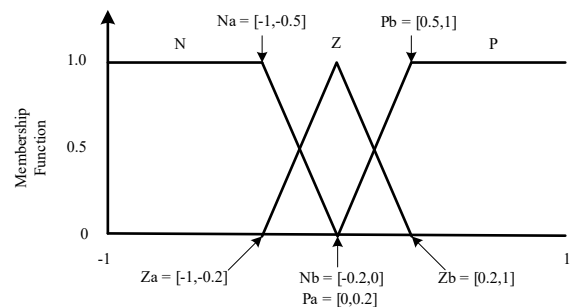
ขั้นตอนต่อไปคือการแทนที่ ซึ่งหมายถึงการนำประชากรที่ดีที่สุดในการรุ่นก่อนหน้าออกและนำลูกหลานที่ได้รับการปรับปรุงใหม่มาแทนที่ เพื่อให้ประชากรในรุ่นถัดไปมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น แผนภาพการออกแบบ FLC ที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมสำหรับควบคุมความเร็วรอบของ BLDC แสดงดังรูปที่ 4 กระบวนการออกแบบเริ่มต้นจากการกำหนดพารามิเตอร์ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม จากนั้นจำลองสถานการณ์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอนที่อ้างอิงตาม [2] ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทำหน้าที่ประเมินประสิทธิภาพของการควบคุมความเร็วรอบ โดยมีค่า W เป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพของพารามิเตอร์ในแต่ละรอบของการค้นหาเป็นค่าของฟิตเนส

การออกแบบ FLC ด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมกำหนดให้ จำนวนรุ่น (Generation) = 300 จำนวนประชากร (Population) = 20 ความห่างของรุ่น (Generation gap) = 1 อัตราการไขว้เปลี่ยนพันธุ์ (Crossover rate) = 0.8 อัตราการกลายพันธุ์ (Mutation rate) = 1 พารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ต้องค้นหาเป็นตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิกอินพุตรวมถึงค่าของอัตราขยาย K มีทั้งหมด 13 ค่า ผลตอบสนองของการควบคุมถูกประเมินประสิทธิภาพของการควบคุมด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังกล่าวประกอบด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ฟุ้งเกิน (percent overshoot: PO) ช่วงเวลาขึ้น (rise time: t_r) ช่วงเวลาเข้าที่ (setting time: t_s) และค่าผิดพลาดในสภาวะคงตัว (steady-state error: e_{ss}) พิจารณาร่วมกันเป็นฟังก์ชันแบบหลายตัวแปร เขียนได้ดังสมการที่ 14

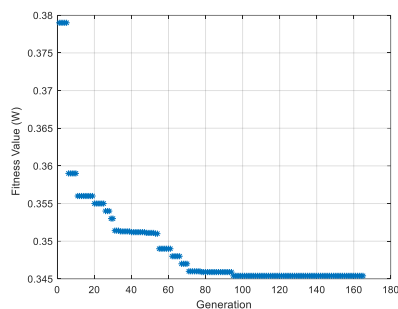
$$W = PO + t_r + t_s + e_{ss} \quad (14)$$

5. ผลการจำลองสถานการณ์

การออกแบบ FLC กำหนดให้ช่วงขอบเขตของค้นหาตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิกอินพุตดังรูปที่ 5 และค่าอัตราขยาย K มีขอบเขตการค้นหาในช่วง 1 ถึง 1×10^7 ผลลัพธ์ของการค้นหาในแต่ละรอบที่ประเมินผ่านค่าฟิตเนสที่ต่ำที่สุดแสดงในรูปที่ 6

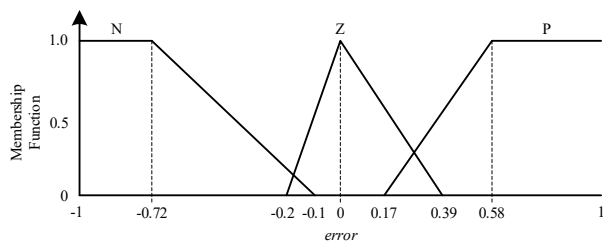


รูปที่ 5 ขอบเขตค้นหาของฟังก์ชันสมาชิก error และ error rate

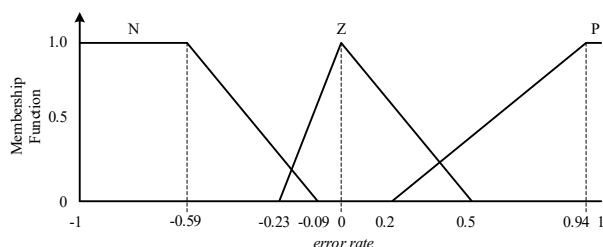


ภาพที่ 6 การลู่เข้าค่าน้อยสุดของ Fitness value (W)

ในภาพที่ 6 จะเห็นได้ว่า ค่า Fitness value หรือค่า W มีค่าลดลงเมื่อจำนวนรอบของการค้นหาหรือจำนวนรุ่นเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่ประมาณรุ่นที่ 100 ผลลัพธ์ให้คำตอบออกมาจากระบบการค้นหา 300 รอบ พารามิเตอร์ FLC ที่เหมาะสมของฟังก์ชันสมาชิกอินพุตของ $error$ และ $error\ rate$ แสดงดังภาพที่ 7 และ 8 ตามลำดับ โดยที่ค่าอัตราขยาย K ที่ออกแบบเท่ากับ 5.45×10^4

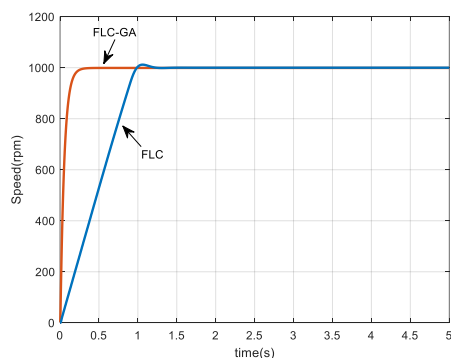


รูปที่ 7 ฟังก์ชันสมาชิก $error$ ที่ได้จากอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม



รูปที่ 8 ฟังก์ชันสมาชิก $error\ rate$ ที่ได้จากอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม

การจำลองสถานการณ์ทดสอบประสิทธิภาพการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ BLDC กำหนดให้ความเร็วอ้างอิง 1,000 rpm โดยมีผลตอบสนองความเร็วรอบ แสดงในรูปที่ 9



ภาพที่ 9 ผลตอบสนองความเร็วรอบมอเตอร์ BLDC

ตารางที่ 2 ตารางผลการเปรียบเทียบของระบบ

วิธีออกแบบ	ผลการตอบสนอง				W
	PO	$t_r(s)$	$t_s(s)$	e_{ss}	
FLC	1.1952	0.762	0.94	0	2.9032
FLC-GA	0	0.1109	0.2015	0	0.3454

จากรูปที่ 9 แสดงผลตอบสนองความเร็วรอบของมอเตอร์ BLDC เปรียบเทียบกันระหว่างตัวควบคุมฟัซซี (FLC) กับ ตัวควบคุมฟัซซีที่ถูกออกแบบด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม (FLC-GA) ซึ่งพบว่า ตัวควบคุมทั้งสองสามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้เข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงที่ 1,000 rpm ได้ โดยมีค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวเป็นศูนย์ แต่เมื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองค่าฟังก์ชัน ช่วงเวลาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่ พบว่า ตัวควบคุม FLC-GA ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับตัวควบคุม FLC โดยมีรายละเอียดของผลตอบสนองแสดงในตารางที่ 2

6 สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุม FLC ที่เหมาะสมสำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ BLDC เพื่อให้สามารถควบคุมความเร็วรอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตปรับตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิกอินพุตฟัซซีที่เหมาะสมบนพื้นฐานการจำลองสถานการณ์ผ่านฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ สมรรถนะการควบคุมได้รับการประเมินด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบหลายตัวแปร ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอมีประสิทธิภาพการควบคุมที่เหนือกว่าตัวควบคุม FLC ถือเป็นแนวทางการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ BLDC ให้ดียิ่งขึ้น สามารถลดค่าฟังก์ชัน ช่วงเวลาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่ได้ โดยมีผลการจำลองสถานการณ์ยืนยันประสิทธิภาพการควบคุมของวิธีที่นำเสนอ

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Sharma, N. Kumar Sharma, M. Bajaj, V. Kumar, F. Jurado, and S. Kamel, "Optimal BLDC Motor Control Using a WOA-based LQR Strategy," 2022 4th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Nevsehir, Turkey 2022, pp. 14-17.
- [2] ชูเกียรติ ศิริ โภควินท์ สำราญมาก ประเสริฐ แสงโป้ ญาณวรรณ เก่งถนอมมา และดนุพล คำปัญญา, "การระบุเอกลักษณ์แบบจาลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ด้วยการหาค่าเหมาะที่สุดแบบค้างคาว," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 42, 31 ตุลาคม - 1 พฤศจิกายน 2562, หน้า 265-268
- [3] J. Pakdeeto, S. Wansungnoen, K-L Areerak, and K-N Areerak, "Optimal Speed Controller Design of Commercial BLDC Motor by Adaptive Tabu Search Algorithm," IEEE Access, vol. 11, 2023
- [4] Y. Xu, M. Sun, S. Huang, S. Luo, and B. Hu, "Research on BLDC Motor Controller Based on GA Optimization," China Automation Congress (CAC), 25-27 November 2022.