การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

The PID Controller Design For Brushless DC Motor Speed Control Using An Adaptive Tabu Search Algorithm

โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง[1*], พีรวัจน์ มีสุข[2]

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าเครื่องกลการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพมหานคร
*Corresponding author email: koson.c@cit.kmutnb.ac.th

Received 11 April 2020 Revised 14 May 2020 Accepted 5 June 2020

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน โดยอาศัยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับประยุกต์ใช้ในการค้นหาค่าที่เหมาะสม การออกแบบตัวควบคุมดังกล่าวใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ผลการออกแบบตัวควบคุม ได้ $K_P = 5.7169$ $K_I = 109.4564$ และ $K_D = 0.0077$ ผลการจำลองสถานการณ์ระบบมีสมรรถนะการควบคุม ดังนี้ $P.O. = 0\%$ $t_r = 0.0128\,s$ และ $t_s = 0.0221\,s$ นอกจากนี้ยังได้มีการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกับตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค การจำลองสถานกาณ์แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอมีประสิทธิภาพการควบคุมที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค

คำสำคัญ: มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ตัวควบคุมพีไอดี วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

Abstract

This paper presents the design of PID controllers for speed control of brushless DC motors using the adaptive Tabu search method. This method is one of the artificial intelligence method for applying to find a suitable value. The design of the controller uses the transfer function of the brushless DC electric motor model as an objective function. The controller design results can be $K_P = 5.7169$ $K_I = 109.4564$ and $K_D = 0.0077$. The simulation results show performance of system $P.O. = 0\%$ $t_r = 0.0128 s$ and $t_s = 0.0221 s$. Moreover, the control performance is compared with the controller designed by the particle swarm optimization method. The results show that the proposed method can efficiently obtain the bester performance of the response compared with the particle swarm optimization method.

Keywords: brushless DC motor, PID controller, adaptive tabu search

บทนำ

ในปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor : BLDC Motor) เป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้กันมากในภาคอุตสาหกรรม โดยใช้ในเครื่องมือวัดและเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ มอเตอร์ BLDC ยังคงรักษาคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน (Brushed DC Motor)แต่จะไม่ใช้แปรงถ่านในการสับเปลี่ยนกระแส (Commutator) ในขณะที่การสับเปลี่ยนกระแสจะเป็นระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งทำให้มีการบำรุงรักษาน้อย และมอเตอร์ชนิดนี้สามารถควบคุมความเร็วได้ง่ายและมีคุณสมบัติที่ดีในการสงผ่านพลังงานโดยไม่ใชแปรงถ่านในการส่งผ่านพลังงาน (ทรงกลด ศรีปรางค์ และวันชัย ทรัพยสิง, 2556)

การควบคุมมอเตอร์ BLDC สามารถทำได้หลายวิธี โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้ตัวควบคุมพีไอดี (Proportional Integral Derivative: PID) เพราะโครงสร้างตัวควบคุมมีความเรียบง่ายและมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังมีเสถียรภาพและสามารถทำงานได้ในช่วงกว้าง โดยการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ BLDC มีด้วยกันหลายวิธี การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแบบดั้งเดิม อาจอาศัยวิธีโลกัสของราก วิธีตอบสนองเชิงความถี่ หรือ วิธีการปรับแต่งค่าตามกฎซิกเลอร์-นิโคลส์ การออกแบบบางขั้นตอนของวิธีการเหล่านี้จำเป็นต้องเลือกอาศัยการเลือกค่าจากผู้ออกแบบ ภายหลังการออกแบบระบบควบคุมมีผลตอบสนองไม่เป็นที่น่าพอใจ ผู้ออกแบบต้องดำเนินการออกแบบใหม่ นอกจากนี้หากระบบควบคุมมีความซับซ้อนมากก็อาจทำให้มีความยากลำบากในการออกแบบได้ โดยในปัจจุบันได้มีการนำเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ในการแก้ปัญหามาประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม ยกตัวอย่างเช่น การค้นหาด้วยวิธีจีเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm: GAs) การค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) โดยล่าสุดได้มีการนำเสนอการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบค้างคาว (ชูเกียรติ คีรี และคณะ , 2562) นอกจากนี้ยังมีวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search: ATS) (อาทิตย์ ศรีแก้ว , 2552 และ กองพัน อารีรักษ์, 2557) โดยในอดีตได้วิธี ATS ได้ประผลสำเร็จในการแก้ไขปัญหาทางด้านวิศวกรรมอย่างมาก เช่น การระบุเอกลักษณ์ของระบบ การออกแบบตัวควบคุมวงจรแปลงผันกำลัง (ปราจรี ประ-สมศักดิ์, 2553) และอื่น ๆ อีกมากมาย ด้วยข้อได้เปรียบของวิธี ATS ทีสามารถค้นหาหลุดออกจาก

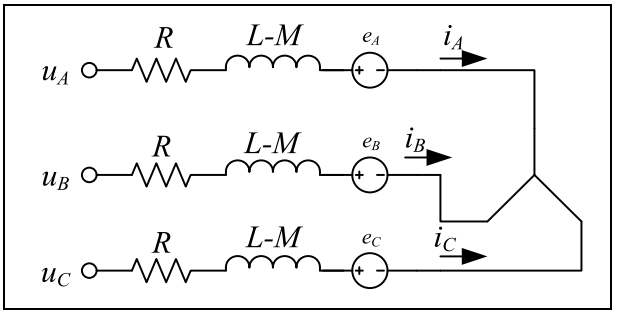
คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบและทำการค้นหาต่อไปจนกระทั่งได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง ดังนั้น ในบทความนี้จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ BLDC โดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว นอกจากนี้ยังมีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี PSO ซึ่งมีคุณลักษณะคล้ายกับอัลกอริทึม GA เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วข้อได้เปรียบของ PSO คือ อัลกอริทึมมีความเรียบง่าย ใช้พารามิเตอร์จำนวนน้อย เพื่อปรับแต่งอัลกอริทึม PSO ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลากหลายงาน เช่น การหาค่าเหมาะสมที่สุดของฟังก์ชัน การฝึกสอนเครือข่ายประสาทเทียม ระบบควบคุม และงานอื่น ๆ ที่สามารถใช้ GA ได้(C. Kiree, et al. 2015 ภายหลังการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี PSO ได้นำผลไปเปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอ

รายละเอียดที่นำเสนอในบทความประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านจะกล่าวในหัวข้อที่ 2 ส่วนในหัวข้อที่ 3 นำเสนออัลกอริทึมวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวและผลการออกแบบนำเสนอในหัวข้อที่ 4 หัวข้อที่ 5 แสดงผลการจำลองสถานการณ์สมรรถนะการควบคุม และสุดท้ายในหัวข้อที่ 6 เป็นการสรุปผล

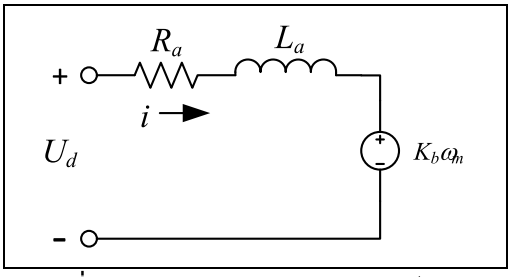
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านทั่วไปมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต่างกันตรงที่มอเตอร์ BLDC (Vinod KR Singh Patel and A. K. Pandey. 2013) ประกอบด้วยเฟสทั้งหมด 3 เฟส กรณีนี้เป็นมอเตอร์ BLDC แบบ 3 เฟส ต่อแบบ Y แสดงได้ดังภาพที่ 1 พิจารณาการทำงานงานของระบบจะทำงานครั้งละ 2 เฟส กล่าวคือ AB, BC และ CA โดยควบคุมผ่านการสวิทช์ของอินเวอร์เตอร์ สามารถเขียนให้อยู่ในวงจรสมมูลอย่างง่ายได้ดังภาพที่ 2 เมื่อ $L_a = L - M$ และ $e = K_b \omega_m$



ภาพที่ 1 วงจรสมมูลมอเตอร์ BLDC 3 เฟส ต่อแบบ Y



ภาพที่ 2 วงจรสมมูลอย่างง่ายมอเตอร์ BLDC

จากภาพที่ 2 พิจารณาด้วยกฎผลรวมแรงดันของเคอร์ชอฟ KVL สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$U_d = R_a i + L_a \frac{di}{dt} + K_b \omega_m \qquad (1)$$

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนการหมุนของมอเตอร์ อธิบายได้ตามสมการที่ (2)

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + B_v \omega_m \qquad (2)$$

พิจารณาให้ $T_L = 0$ เมื่อ $T_e = K_T i$ และจัดรูปสมการให้อยู่ในเทอมของกระแส จะได้

$$i = \frac{J}{K_T} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{B_v}{K_T} \omega_m \qquad (3)$$

นำสมการที่ (3) แทนในสมการที่ (1) จะได้เป็นสมการที่ (4) และดำเนินการแปลงลาปลาซ(Laplace Transform) สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบได้ดังสมการที่ (5)

$$U_d = \left(\frac{L_a J}{K_T}\right)\frac{d^2\omega_m}{dt^2} + \left(\frac{R_a J + L_a B_v}{K_T}\right)\frac{d\omega_m}{dt} + \left(\frac{R_a B_v + K_b K_T}{K_T}\right)\omega_m \qquad (4)$$

$$G_u(s) = \frac{\Omega(s)}{U_d(s)} = \frac{K_T}{L_a J s^2 + (R_a J + L_a B_v)s + (R_a B_v + K_b K_T)} \qquad (5)$$

โดยที่

U_d คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุต (V)

e_A คือ แรงดันเหนี่ยวนำป้อนกลับ (V)

R_a คือ ค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ (Ω)

L_a คือ ค่าความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์ (H)

J คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Kg-m^2)

T_L คือ ค่าแรงบิดที่โหลด (N.m)

ω_m คือ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (rad/sec)

B_v คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (N.m/(rad/sec))

K_b คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำป้อนกลับ (V/(rad/sec))

K_T คือ ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ของแรงบิด (N.m)

M คือ ค่าความเหนี่ยวนำระหว่างเฟส

ฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองมอเตอร์ BLDC ในสมการที่ (5) เป็นระบบอันดับสอง โดยทั่วไปมอเตอร์ BLDC ขับเคลื่อนด้วยแรงดันไฟฟ้าผ่านอินเวอร์เตอร์ที่เป็นชุดขับเคลื่อน เพื่อให้แบบจำลองของระบบมีความสมจริงจึงพิจารณาวงจรขยายของชุดขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์ที่แทนได้ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับหนึ่งเข้าไป ทำให้สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบได้ดังสมการที่ (6) โดยที่ K_A คือ ค่าอัตราขยายและ τ_A คือ ค่าเวลาคงตัวทางเวลาอัตราขยาย

$$G_P(s)=\left(\frac{K_A}{T_A s+1}\right)\left(\frac{K_T}{L_aJs^2+(R_aJ+L_aB_v)s+(R_aB_v+K_bK_T)}\right) \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของมอเตอร์ BLDC ร่วมกับพารามิเตอร์วงจรอินเวอร์เตอร์สามารถหาได้จากวิธีการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์โดยอาศัยวิธีการค้นหาแบบ BS (ชูเกียรติ คีรี และคณะ ,2562) เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดลงในสมการที่ (7) ฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้า BLDC แสดงได้ดังนี้

$$G_p(s)=\frac{0.04887}{5.72\times10^{-9}s^3+7.233\times10^{-6}s^2+0.002233s+0.04147} \quad (7)$$

อัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search: ATS) เป็นอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากการค้นหาแบบตาบู (Tabu Search: TS) โดยได้มีการเพิ่ม 2 ขั้นตอนเข้าไป โดยขั้นตอนแรก คือ การเดินย้อนรอย (Back tracking) ทำให้มีโอกาสพบคำตอบใหม่และหลุดออกจากคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นได้ ขั้นตอนที่สอง คือ การปรับรัศมีระหว่างการค้นหา อัลกอริทึม ATS มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

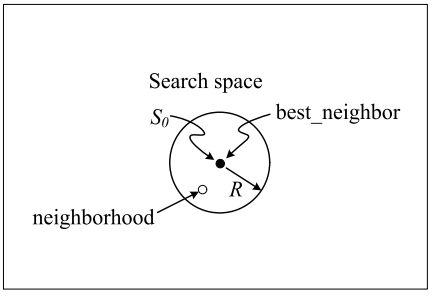
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพื้นที่การค้นหา รัศมีการค้นหา และจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา

ขั้นตอนที่ 2 ทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น S_0 ภายในพื้นที่การค้นหา และให้ S_0 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ดังภาพที่ 3

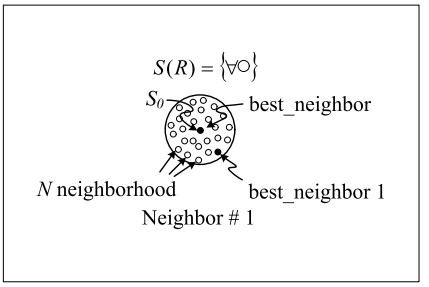
ขั้นตอนที่ 3 ทำการสุ่มเลือกคำตอบจำนวน N คำตอบ รอบ ๆ S_0 (neighborhood) ภายในพื้นที่รัศมีการค้นหา R และกำหนดให้เซต $S(R)$ เป็นเซตของคำตอบ N คำตอบ ซึ่งเรียกว่า คำตอบรอบข้าง ดังภาพที่ 4

ขั้นตอนที่ 4 ทำการประเมินคำตอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสมาชิกใน $S(R)$ โดยกำหนดให้ S_1 เป็นคำตอบที่ดีที่สุด (best neighbor) ใน $S(R)$

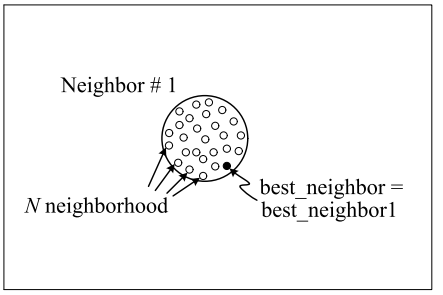
ขั้นตอนที่ 5 ถ้า $S_1 < S_0$ ดังนั้นกำหนดให้ $S_0 = S_1$ และเก็บค่า S_0 ในรายการตาบูดังภาพที่ 5 และภาพที่ 6 ตามลำดับ



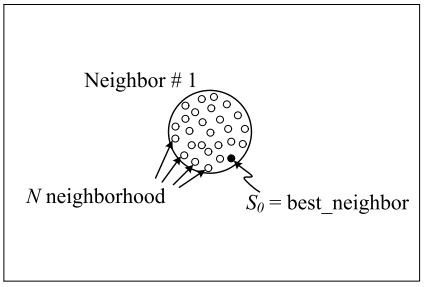
ภาพที่ 3 สุ่มค่า S_0 ในพื้นที่การค้นหา



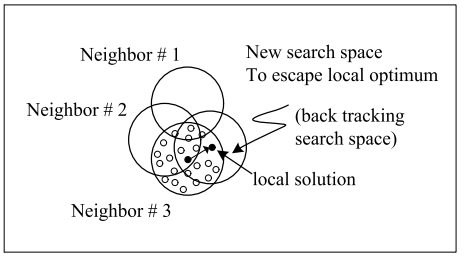
ภาพที่ 4 ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ S_0



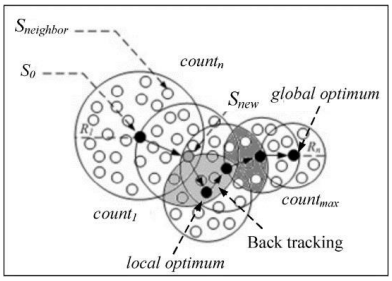
ภาพที่ 5 กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่



ภาพที่ 6 กำหนดค่า S_0 ใหม่



ภาพที่ 7 กลไกการเดินย้อนรอย



ภาพที่ 8 กลไกการเดินย้อนรอยและการปรับลดค่ารัศมี

ขั้นตอนที่ 6 ถ้า $count \geq count_{\max}$ จะหยุดกระบวนการการค้นหา โดยที่ค่า S_0 คือคำตอบที่ดีที่สุดไม่เช่นนั้นจะกลับไปสู่ขั้นตอนที่ 3 และเริ่มกระบวนการใหม่อีกครั้งจนกระทั่งได้คำตอบที่พอใจ

ขั้นตอนที่ 7 จะเข้าสู่กลไกการเดินย้อนรอย เมื่อจำนวนคำตอบในแต่ละรอบไม่หลุดออกจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่นเป็นจำนวนเท่ากับจำนวนคำตอบสูงสุดที่ได้ทำการตั้งค่าไว้ กลไกนี้จะเลือกคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการค้นหาในพื้นที่การค้นหาเดิมในรายการตาบูเพื่อนำมากำหนดเป็นคำตอบเริ่มต้นสำหรับการค้นหาในรอบถัดไป ทั้งนี้เพื่อให้หลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ดังภาพที่ 8 ซึ่งใช้ค่า local solution ในรายการตาบูเป็นค่าเริ่มต้นการค้นหา

ขั้นตอนที่ 8 จะเข้าสู่กลไกการปรับค่ารัศมีการค้นหา โดยจะปรับลดรัศมีลงในระหว่างรอบการค้นหามีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (8)

$$radius_{new} = \frac{radius_{old}}{DF} \quad (8)$$

โดยที่ *DF* คือ ตัวประกอบปรับลดค่ารัศมี (Decreasing Factor)

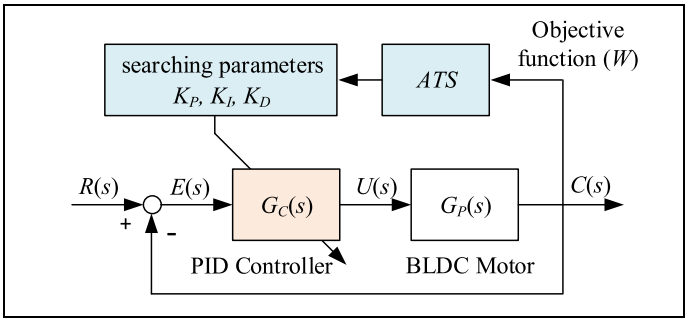
การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ BLDC ด้วยวิธี ATS

ตัวควบคุมพีไอดีเป็นตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพจึงมีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมพีไอดีแสดงดังสมการที่ (9) โดยที่ K_P คืออัตราการปรับสัดส่วนสัญญาณ K_I คือ อัตราการอินทิเกรตสัญญาณและ K_D คือ อัตราการอนุพันธ์สัญญาณตามลำดับ พารามิเตอร์ตัวควบคุมทั้งสามที่กระทำกับสัญญาณถูกร่วมเข้าด้วยกัน เพื่อปรับปรุงสัญญาณอย่างเหมาะสมสำหรับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ BLDC

$$G_C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s} \quad (9)$$

แผนภาพบล็อกไดอะแกรมการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธี ATS แสดงดังภาพที่ 9 กระบวนการออกแบบเริ่มต้นจากการกำหนดพารามิเตอร์ K_P K_I และ K_D ด้วยอัลกอริทึม ATS จากนั้นจำลองสถานการณ์ตรวจสอบสมรรถนะการควบคุมและคำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยในที่นี้ คือ ค่า W

เป็นตัวชี้วัดคุณภาพของคำตอบในแต่ละรอบของการค้นหา



ภาพที่ 9 แผนภาพการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธี ATS

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่พิจารณาในบทความนี้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบหลายตัวแปร (K. Chaijarurnudomrung, et al. 2011) ซึ่งสามารถกำหนดนัยสำคัญของผลตอบสนองที่สนใจได้ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ W คำนวนได้จากสมการที่ 10 และสมการที่ 11 ดังนี้

$$W(t_r, t_s, P.O.) = \sigma t_r + \alpha t_s + \gamma P.O. \quad (10)$$

และ $\sigma + \alpha + \gamma = 1$ (11)

โดยที่

$P.O.$ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์พุ่งเกิน (%)

t_r คือ ค่าเวลาขึ้น (s)

t_s คือ ค่าเวลาสู่เข้าสภาวะคงตัว (s)

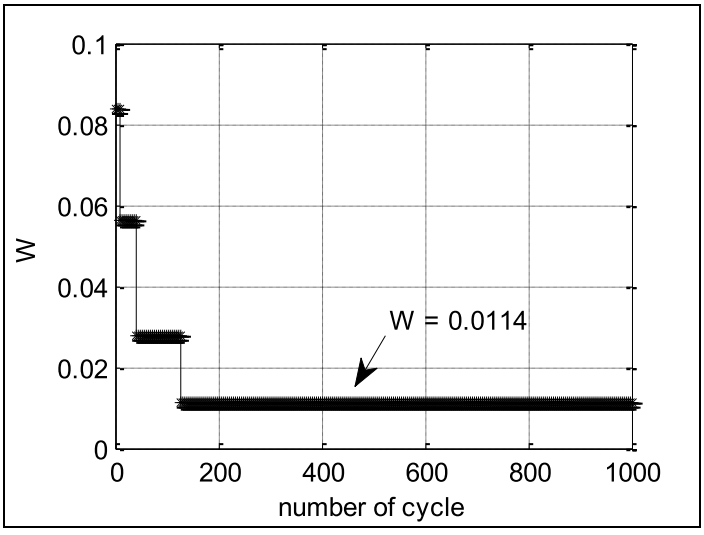
เมื่อ σ α และ γ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับการกำหนดนัยสำคัญของค่า $P.O.$ t_r และ t_s ตามลำดับ ซึ่งในบทความนี้กำหนดให้ค่า σ α และ γ มีค่าเท่ากับ 0.33 0.33 และ 0.34 ตามลำดับ อัลกอริทึม ATS จะดำเนินการค้นหาพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ทำให้ W มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งหมายถึงตัวควบคุมที่ได้จาก ATS จะให้ประสิทธิภาพของผลตอบสนองการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ BLDC ที่ดีที่สุด พารามิเตอร์อัลกอริทึม ATS กำหนดขึ้นจากการทดสอบกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 20 ชุด โดยในบทความนี้เลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม ATS ดังนี้

- จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 5
- จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10
- ค่ารัศมีเริ่มต้นการค้นหาเท่ากับ 1
- ค่าตัวประกอบปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3

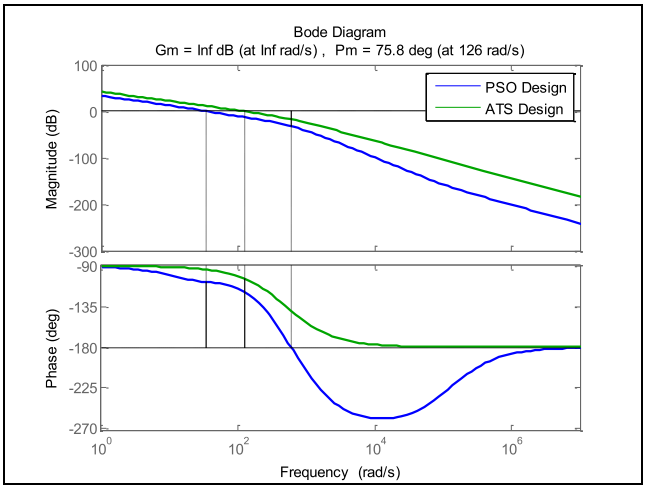
- เงื่อนไขการเดินย้อนรอย ถ้าไม่สามารถหลุดออกจากคำตอบแบบท้องถิ่นได้เป็นจำนวน 100 รอบการค้นหา
- กำหนดจำนวนรอบการค้นหาสูงสุด 1000 รอบ

ผลการศึกษา

กำหนดการค้นหาพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดีมีค่า K_P ขอบเขตอยู่ในช่วง [0,10] K_I ขอบเขตอยู่ในช่วง [0,120] และ K_D ขอบเขตอยู่ในช่วง [0,0.1] ตามลำดับ ขอบเขตสูงสุดของพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ใช้ในการค้นหาออกแบบให้ที่มีค่า Gm และ Pm มากที่สุด โดยที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพ นอกจากนี้ยังได้มีการนำวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่กลุ่มอนุภาคมาประยุกต์ใช้ภายใต้เงื่อนไขฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียวกัน ภาพที่ 10 แสดงการลู่เข้าค่าน้อยที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (*W*) ของอัลกอริทึม ATS ในจำนวนรอบการค้นหาสูงสุด 1000 รอบ ซึ่งพบว่าอัลกอริทึม ATS สามารถหลุดออกจากคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นสู่บริเวณค้นหาที่ได้คำตอบแบบวงกว้างได้ ผลการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี ATS และ วิธี PSO แสดงดังตารางที่ 1



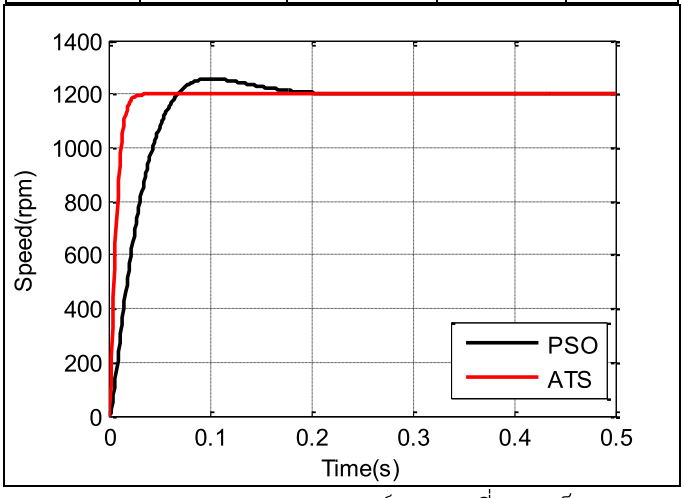
ภาพที่ 10 การลู่เข้าค่าน้อยสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์



ภาพที่ 11 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบ

ตารางที่ 1 ผลการออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดี

วิธีการออกแบบ	พารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดี			W
	K_P	K_I	K_D	
PSO	1.2931	38.63	0.00001	1.6256
ATS	5.7169	109.4564	0.0077	0.0114



ภาพที่ 12 ผลตอบสนองการควบคุมมอเตอร์ BLDC ที่ความเร็วรอบ 1200 rpm

จากพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธี PSO และวิธี ATS ในตารางที่ 1 นำมาวิเคราะห์ในโดเมนความถี่เปรียบกัน แสดงได้ดังภาพที่ 11 ซึ่งพบว่าตัว

ควบคุมที่ได้จากวิธี PSO มี Gm = 32.1 dB และ Pm = 72.3 deg ส่วนตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี ATS มี Gm = ∞ dB และ Pm = 75.8 deg ยืนยันได้ว่าพารามิเตอร์ที่ได้รับการออกแบบจากทั้ง 2 วิธียังคงทำให้ระบบมีเสถียรภาพ ซึ่งในขั้นตอนไปเป็นการทดสอบสมรรถะการควบคุมโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วย MATLAB/Simulink กำหนดให้มอเตอร์ BLDC รักษาความเร็วรอบที่ 1,200 rpm ผลการตอบสนองของตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี ATS เปรียบเทียบกับตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี PSO แสดงได้ดังภาพที่ 12 และผลการวิเคราะห์สมรรถนะการควบคุม แสดงดังตารางที่ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 สมรรถนะการควบคุม

วิธีการออกแบบ	ผลการตอบสนองของระบบ		
	t_r	$P.O.(\%)$	t_s
PSO	0.0443	4.72	0.156
ATS	0.0128	0	0.0221

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอดีที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธี ATS มีผลการตอบสนอง $P.O.$ t_r และ t_s ดีกว่าตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี PSO

สรุปผลการศึกษา

บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านด้วยวิธี ATS รายละเอียดฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองของมอเตอร์ BLDC และอัลกอริทึม ATS ได้ถูกอธิบายไว้ด้วย การออกแบบตัวควบคุมใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบหลายตัวแปรที่คำนวนได้จากผลตอบสนองของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ ผลการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี ATS ได้นำไปเปรียบเทียบกับการออกแบบตัวบคุมด้วยวิธี PSO ผลการจำลองสถานการณ์พบว่า ตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธี ATS มีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี PSO แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งสามารถค้นหาคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีผู้วิจัยต้องขอขอบคุณวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระ

จอมเกล้าพระนครเหนือและคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ที่ให้การสนับสนุนเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

กองพัน อารีรักษ์ (2557). การออกแบบตัวควบคุมแบบเหมาะสมที่สุดสำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์. รายงานการวิจัย วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เฉลิมพล เรืองพัฒนาวิวัฒน์ และ ยุทธนา กันทะพะเยา. (2559). การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับจักรยาน สามล้อไฟฟ้า. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย-เทคโนโลยีราชมงคลล้านนา. ปีที่ 1 ฉบับที่ 1. 17-22

ชูเกียรติ คีรี รัตนา พูลจันทร์ และ ดนุพล คำปัญญา. (2562). การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีอย่างเหมาะสมสำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านด้วยการค้นหาแบบค้างคาว. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 42, 30 ตุลาคม – 1 พฤศจิกายน 2562. ณ โรงแรมเดอะกรีนเนอรี่ รีสอร์ท เขาใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา., 261-264.

ชูเกียรติ คีรี โภควินท์ สำาราญมาก ประเสริฐ แสงโป๋ ญาณวรรณ เก่งถนอมม้า และดนุพล คำาปัญญา. (2562). การระบุเอกลักษณ์แบบจำาลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านด้วยการหาค่าเหมาะที่สุดแบบค้างคาว. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 42 , 30 ตุลาคม – 1 พฤศจิกายน 2562. ณ โรงแรมเดอะกรีนเนอรี่รีสอร์ท เขาใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา. 265-268.

ปราจรี ประสมศักดิ์ (2553). การประยุกต์ฟัซซีลอจิกสำหรับการควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ทรงกลด ศรีปรางค์ และ วันชัย ทรัพย์สิง. (2556) การเพิ่มประสิทธิภาพของการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบไรแปรงถ่านโดยการสวิตช์ด้วยวิธีการพัลส์วิดธ์มอดูเลชั่นรูปคลื่นไซน์. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่ 32 ฉบับที่ 5 . 584 – 591.

วิภาวัลย์ นาคทรัพย์ ยงยุทธ นาราษฎร์ พกิจ สุวัตถิ์ และ นลินรัตน์ วิศวกิตติ. (2556). การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้การออกแบบตัวควบคุมพีไอที่มีค่าพุ่งเกินน้อยที่สุด. การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ครั้งที่

4 และการประชุมระดับนานาชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีรัตนโกสินทร์ ครั้งที่ 1 “การยกระดับงานวิจัยเพื่อขับเคลื่อนเศรษฐกิจและสังคมอย่างยั่งยืน” 26-28 มิถุนายน 2562 ณ โรงแรมรอยัล-ริเวอร์ กรุงเทพมหานคร. 51 – 60.

สัมฤทธิ์ จันทะนา. (2555). การศึกษาการสั่นสะเทือนทางกลของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในฮาร์ดดิสก์ด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2552). ปัญญาเชิงคำนวณ. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

C. Kiree, D. Kumpanya, S. Tunyasrirut and D. Puangdownreong. Application of Particle Swarm Optimization to Identify Model Parameters of BLDC Motor. ANSCSE19, 2015, pp. 84–88

K. Chaijarurnudomrung, K-N. Areerak, K-L. Areerak and A. Srikaew. (2011). The controller design of three-phase controlled rectifier using an adaptive tabu search algorithm. The 8th Electrical Engineering/Electronics, Compu-ter, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand – Conference, 2011

Vinod KR Singh Patel and A. K. Pandey. (2013). Modeling and performance analysis of PID controlled BLDC motor and different schemes of PWM controlled BLDC motor. International Journal of Scientific and Research Publications, 2013, pp. 141–154