การปรับค่าเกนของตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมในการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นโดยวิธีกลุ่มอนุภาค

The Optimal Gain Tuning of PI Controller for Linear Induction Motor Speed Control using a Particle Swarm Approach

ทรงกลด ศรีปรางค์ [1] วันชัย ทรัพย์สิงห์ [2]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบพีไอ สำหรับการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบ Single side ด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค วิธีการกลุ่มอนุภาคที่นำเสนอให้คุณสมบัติที่ดีกว่าแบบ Ziegler-Nichols ซึ่งเป็นวิธีการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ แบบดั้งเดิม ทั้งในรูปคุณลักษณะการลู่เข้าของผลการคำนวณ เวลาในการคำนวณที่รวดเร็วและให้ผลตอบเป็นที่พอใจอย่างยิ่งเมื่อเทียบกับวิธีการเดิม ในบทความนี้แสดงให้เห็นผลตอบสนองของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นด้วยการประยุกต์ใช้หลักการกลุ่มอนุภาคและหลักการของ Ziegler-Nichols ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ดังกล่าว โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/ Simulink ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองความเร็วของมอเตอร์ที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ ด้วยหลักการกลุ่มอนุภาคให้ผลค่าพุ่งเกิน (Overshoot) น้อยกว่า เป็นผลให้ระบบเข้าสู่ค่าคงตัวเร็วขึ้น อีกทั้งยังมีค่าอินทิเกรตสมบูรณ์ความคลาดเคลื่อน (Integrated Absolute Error) ต่ำอีกด้วยเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากหลักการของ Ziegler-Nichols

คำสำคัญ : การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค, มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น, ตัวควบคุมแบบพีไอ

Abstract

This article presents a method of Particle Swarm Optimization (PSO) in determining the optimal parameters of a PI (Proportional-Integral) controller for a Single-side Linear Induction Motor (SLIM) speed control. It approaches into a superior features, easy implementation, faster in computational and also results in a better convergence aspects comparing with a traditional Zigler Nicholes method while implements into the SLIM speed control system of such article. The Linear Induction Motor and the Particle Swarm Optimization algorithm in this project are also modeled in MATLAB/Simulink. It shows that the time response, an overshoot, convergence of speed response of the SLIM when the system implemented by PSO method is better than whiles implemented by another. Moreover it also results that the PID controller using PSO technique gives less overshoot, system is less sluggish and reduces the Integrated Absolute Error.

Keywords : Particle Swarm Optimization (PSO), Linear Induction Motor, PI Controller

[1] อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตไกลกังวล

[2] อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

1. บทนำ

ตัวแปรควบคุมแบบพีไอดีมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในวงจรอุตสาหกรรม เพราะมีขั้นตอนการทำงานที่ง่าย มีประเสถียรภาพที่ดี สามารถทำงานได้ในช่วงกว้าง แต่มีข้อเสียคือความยากลำบากในการหาค่าตัวแปรควบคุม ซึ่งมีโรงงานอุตสาหกรรมหลายแห่งประสบปัญหา เช่น มีสมการอันดับสูง ค่าหน่วงเวลาค่อนข้างนาน และความไม่เป็นเชิงเส้น เป็นต้น แต่ไม่นานมานี้มีกระบวนการแบบ Heuristic ช่วยในการปรับค่าตัวแปรของตัวควบคุมที่ใช้ในระบบควบคุม ซึ่งแบบแรกเป็นการปรับตามวิธี Ziegler – Nichole ต่อมาได้มีการคิดค้นวิธีการปรับค่าตัวแปรควบคุมให้ง่ายขึ้น จึงมีการใช้เทคนิคทางด้านปัญญาประดิษฐ์ เช่น โครงข่ายประสาทเทียม (Nural Network) วิธีกลุ่มอนุภาค (PSO) เป็นต้น

วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) ได้มีการคิดค้นครั้งแรกโดย Kennedy และ Eberhart [1] ซึ่งเป็นวิธีทาง Heuristic แบบใหม่ที่ถูกพัฒนา เพื่อแก้ปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้น เทคนิคกลุ่มอนุภาคนี้ใช้เวลาในการคำนวณน้อย และมีคุณสมบัติการลู่เข้าเป้าหมายได้ดีกว่าวิธีการสุ่มแบบดั้งเดิม

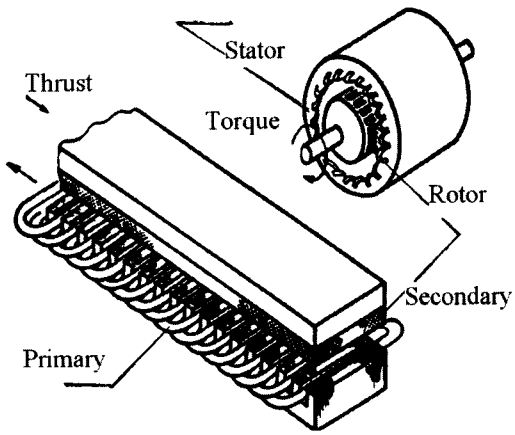
มอเตอร์เหนี่ยวเชิงเส้นจัดเป็นเครื่องกลที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม รวมไปถึงระบบการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ซึ่งมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นนั้นพัฒนาจากมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหมุน ในระบบการขับเคลื่อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นนั้นจะต้องมีการออกแบบระบบควบคุม โดยขึ้นอยู่กับการใช้งานเช่น ในการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นในการขับเคลื่อนยานพาหนะ สิ่งที่สนใจคือการควบคุมความเร็ว การที่จะให้มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นนั้นมีการตอบสนองต่อความเร็วที่ต้องการ จะต้องมีการออกแบบระบบควบคุมให้กับตัวมอเตอร์ ระบบควบคุมที่นิยมใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์คือ ระบบควบคุมแบบพีไอ เนื่องจากสามารถออกแบบให้ได้ผลตอบสนองที่ทำให้มอเตอร์เริ่มทำงานได้อย่างราบเรียบ วิธีการในการที่จะได้มาซึ่งระบบควบคุมแบบพีไอสำหรับใช้ในการควบคุมมอเตอร์นั้นมีหลายวิธี ซึ่งที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ ที่ใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น ซึ่งในการออกแบบนั้นได้นำค่าเกณฑ์ประสิทธิภาพระบบควบคุม (Performance Criteria) คือค่าปริพันธ์ของค่าผิดพลาดสัมบูรณ์แปรตามเวลา (Integrated of time weight square error: ITAE) ซึ่งนิยมใช้ในการออกแบบระบบควบคุม

2. มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น (Linear Induction Motor: LIM)

มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นมีพัฒนาการมาจากมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ใช้กันอยู่ทั่วไป

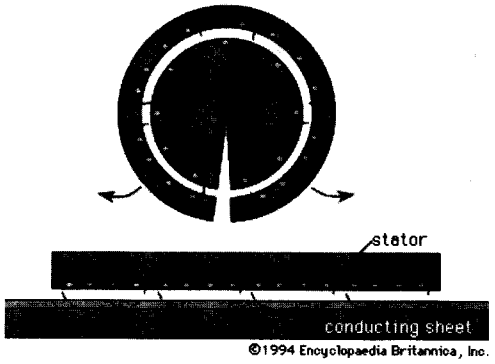
2.1 โครงสร้างและวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น

มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นแบบด้านเดียว (Single-Side Linear Induction Motor: SLIM) โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 1



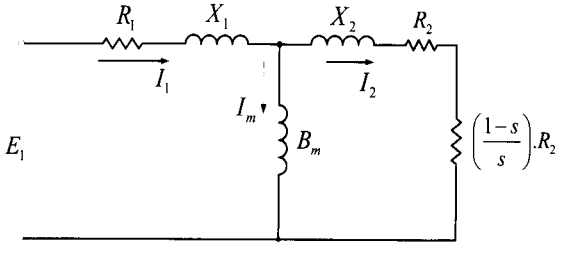
รูปที่ 1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบด้านเดียว

โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นนั้นพัฒนามาจากมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหมุน (Rotary Induction Motor: RIM) โดยทำการผ่าและคลี่ออก ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ที่มาของโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นในทางอุดมคติ

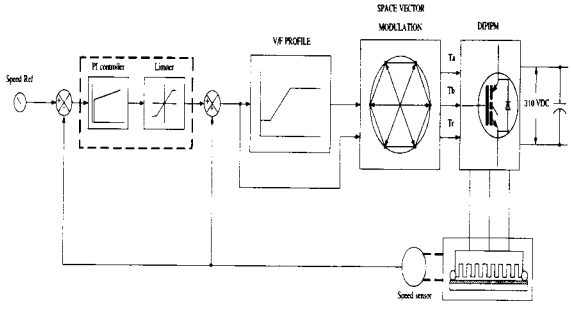
ผลการจากเปลี่ยนรูปแบบโครงสร้างของมอเตอร์ใหม่ทำให้มีข้อแตกต่างในเรื่องการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ คือ มอเตอร์จะเคลื่อนที่แบบเส้นตรงแนวราบ แต่รูปแบบวิธีการควบคุมสามารถกระทำได้เหมือนกับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหมุนโดยทั่วไป และวงจรสมมูลของมอเตอร์นั้นจะมีความซับซ้อนในการคำนวณเนื่องจากผลกระทบจากปลายสุด (End effect) แต่ในการใช้งานมอเตอร์ที่ความเร็วสูงและความเร็วต่ำนั้นจะแตกต่างกัน หากใช้งานมอเตอร์ที่ความเร็วต่ำนั้นไม่จำเป็นต้องพิจารณาเรื่องของผลกระทบปลายสุด วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นดังรูปที่ 3 [2], [3]



รูปที่ 3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น

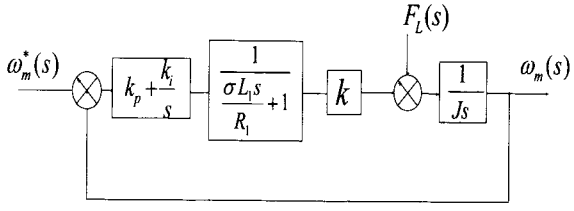
2.2 การออกแบบระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น

จากที่กล่าวในข้างต้นว่าระบบควบคุมของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหมุนสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นได้ ซึ่งในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยทั่วไปมี 2 วิธีคือ การควบคุมแบบสเกลา (V/F control) และการควบคุมแบบเวกเตอร์ (field oriented control) สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกการควบคุมแบบสเกลาโดยทำการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นด้วยวิธีการควบคุมสลิป (Slip Regulation) ซึ่งการควบคุมที่ใช้นั้นเป็นหนึ่งในวิธีการควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่ (V/F Control) เป็นวิธีที่ง่ายและไม่ยุ่งยากในการดำเนินการ โดยวิธีการควบคุมแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 4 [3]-[4]



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่ด้วยวิธีการควบคุมค่าสลิป

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการออกแบบระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นดังนั้นสิ่งแรกที่ต้องพิจารณาคือ โมเดลของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นนั้นมีไดอะแกรมดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบวงปิด

จากรูปที่ 4 $k = p\frac{M^2}{L_2} i_{mR}$ และ J คือค่าของแรงเฉื่อย และจากรูปสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงเปิดของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นเมื่อประมาณค่าของแรงจากโหลดที่มากระทำมีค่าเท่าศูนย์ได้ดังสมการที่ 1

$$G(s)H(s) = \left(\frac{k_p s + k_i}{s}\right)\cdot\left(\frac{k}{\frac{\sigma L_1}{R_1}s+1}\right)\cdot\left(\frac{1}{Js}\right) \qquad (1)$$

เมื่อทราบฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเปิดของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น ขั้นตอนต่อไปคือการหาค่าของพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นและตัวควบคุมพีไอ ซึ่งในงานวิจัยนี้นำเสนอการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) โดยจะกล่าวในหัวข้อถัดไป ในส่วนของค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวเชิงเส้นที่ใช้ในการจำลองการทำงานนั้นอยู่ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น

ค่าพารามิเตอร์	ปริมาณและหน่วย
R_1	2.15 Ω
L_1	104.9 mH
R_2	0.963 Ω
L_2	93.4 mH
L_m	93.4 mH
J	0.021 $kg.m^2$

2.3 การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO)

Kennedy และ Eberhart ได้นำเสนอแนวคิดของวิธีของกลุ่มอนุภาคครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ.1995 ซึ่งมาจากพฤติกรรมการอยู่ร่วมกันของสัตว์ เช่น ฝูงนก ฝูงผึ้ง เป็นต้น วิธีกลุ่มอนุภาคนี้เป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมอาศัยการค้นหาแบบกลุ่มประชากร แต่ละตัวดำเนินการเรียกว่า "อนุภาค" ซึ่งสามารถเคลื่อนย้ายตำแหน่งได้ อนุภาคนี้จะรวมตัวกันเป็นกลุ่ม เคลื่อนที่อยู่ในขอบเขตที่ต้องการค้นหา ระหว่างการเคลื่อนที่ อนุภาคจะมีการย้ายตำแหน่ง โดยอ้างอิงถึงตำแหน่งของตัวเอง และตำแหน่งของอนุภาคใกล้เคียงที่ได้เคลื่อนที่ผ่านมาแล้ว เพื่อใช้ในการหาทิศทางการเคลื่อนที่ต่อไป จนกว่าจะค้นตำแหน่งที่ดีที่สุด ซึ่งอาจค้นพบด้วยตนเองหรืออนุภาคใกล้เคียง โดยสมการที่เกี่ยวข้องการวิธีกลุ่มอนุภาคมีดังนี้

$$v_{i,m}^{(t+1)} = w.v_{i,m}^{(t)} + c_1 \times rand(\,)\times\left(pbest_{i,m} - x_{i,m}^{t}\right) + c_1 \times rand(\,)\times\left(pbest_{i,m} - x_{i,m}^{t}\right) \qquad (2)$$

$$x_{i,m}^{(t+1)} = v_{i,m}^{(t+1)} = x_{i,m}^{(t)} + v_{i,m}^{(t+1)} \qquad (3)$$

$$i = 1,2...,n\,;\; m = 1,2...,d$$

กำหนดให้

- n คือจำนวนของอนุภาคในกลุ่ม
- d คือมิติ (Dimension) หรือกลุ่มในขอบเขตที่ค้นหา
- i คือตำแหน่งจุดของรอบของการค้นหา
- $v_{i,m}^{(t)}$ คืออัตราเร็วของอนุภาคที่รอบของการค้นหา โดยที่ $v_d^{\min} \le v_{i,d}^{(t)} \le v_d^{\max}$
- w คือแฟคเตอร์น้ำหนักเฉื่อย (Inertia weight factor)
- c_1, c_2 คือค่าคงที่ของอัตราเร่ง
- $rand$ คือค่าที่ได้จากการสุ่มในช่วง 0 และ 1
- $x_{i,d}^{(t)}$ คือตำแหน่งของอนุภาคที่รอบของการค้นหา
- $pbest$ คือตำแหน่งที่ดีที่สุดของการค้นหาของอนุภาค
- $gbest$ คืออนุภาคที่ดีที่สุดที่ใช้ค้นหาคำตอบ

3. การดำเนินการหาค่าเกนของตัวควบคุมพีไอโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค

การออกแบบตัวควบคุมโดยการใช้วิธีกลุ่มอนุภาคนั้นจะมีการใช้ Object Function ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุม โดยฟังก์ชันนั้นจะเกิดจากการใช้

เกณฑ์ประสิทธิภาพของค่าผิดพลาด ช่วยในการตัดสินใจผลคำนวณ ซึ่งมีอยู่ 3 เกณฑ์ คือ การอินทิเกรตค่าสมบูรณ์ของค่าผิดพลาด (IAE) การอินทิเกรตเวลาคูณด้วยค่าผิดพลาดกำลังสอง (ITSE) และการอินทิเกรตค่าผิดพลาดกำลังสอง (ITAE)

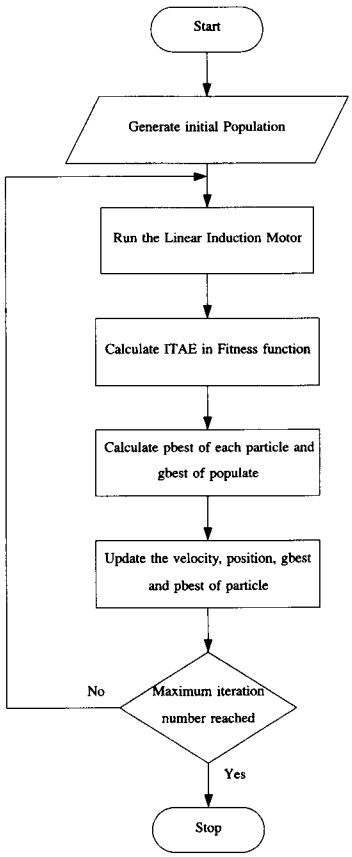
$$IAE = \int_0^\infty |e(t)|dt \qquad (4)$$

$$ITSE = \int_0^\infty te^2(t) \qquad (5)$$

$$ISE = \int_0^\infty e^2(t)dt \qquad (6)$$

เมื่อทราบฟังก์ชันวัตถุประสงค์ขั้นตอนต่อไปคือ การเขียนโปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมโดยมีขั้นตอนดังนี้

1) กำหนดตัวแปรเพื่อเก็บค่าจำนวนรอบสูงสุด (Max iteration) จำนวนอนุภาค (Number of Particle) ค่าคงที่อัตราเร่ง (c_1, c_2) ค่าเริ่มต้นแฟคเตอร์น้ำหนักเฉื่อย (w) ขอบเขตบนและขอบเขตล่างของค่าเกน k_p และ k_i และกำหนดค่าสูงสุดของอัตราเร็วของอนุภาค ($v_d^{(\max)}$)
2) กำเนิดจำนวนประชาการเริ่มต้น
3) ทำการจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นใน Simulink
4) ทำการหาค่าสูงสุดของเกณฑ์ประสิทธิภาพ
5) ทำการอัปเดทค่าที่ได้จาก 4) เป็น *pbest*
6) ทำการค้นหาค่าที่ดีที่สุดของทุกอนุภาคเป็น *gbest*
7) ทำการปรับปรุงค่าความไวของทุกอนุภาคจากสมการที่ 2 และตำแหน่งของอนุภาคจากสมการที่ 3
8) ค้นหาจนถึงรอบสูงสุด (Max. iteration) จะได้ค่า *gbest*



รูปที่ 6 โฟลว์ชาร์ตขั้นตอนหาค่าตัวควบคุมด้วยวิธี PSO

4. ผลการจำลองและประเมินผล

นำค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นในตารางที่ 1 มาเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเปิดได้ดังสมการที่ 7.

$$G(s)H(s) = \frac{0.0622}{0.1134s^2 + 0.021s} \qquad (7)$$

คำนวณหาค่าตัวควบคุม (k_p และ k_i) ด้วยหลักการของวิธีหลักการกลุ่มอนุภาค โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นดังนี้

ขนาดประชากร: 20

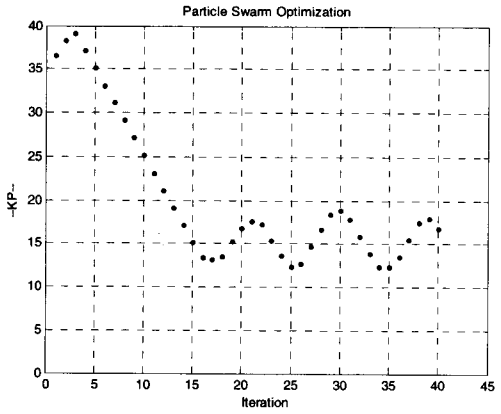
$w_{\max} = 0.9$, $w_{\min} = 0.4$

$c_1 = 0.5$, $c_2 = 0.5$

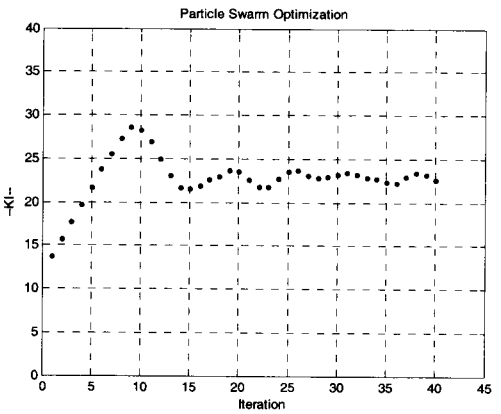
Iteration = 40

ผลการคำนวณค่าตัวควบคุม (k_p และ k_i) ด้วยวิธีหลักการกลุ่มอนุภาค เมื่อกำหนดวงรอบการคำนวณ (Iteration) เท่ากับ 40 วงรอบนั้น จะเห็นว่าค่า k_p และ k_i จะลู่เข้าสู่ค่าคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 7 ก. และ 7 ข. ตามลำดับ ซึ่งผลคำนวณที่ได้แสดงในตารางที่ 2.

อย่างไรก็ตามอัตราลู่เข้าที่ดี และความแม่นยำของค่า k_p และ k_i ที่คำนวณได้ด้วยวิธีหลักการกลุ่มอนุภาคนี้ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น และจำนวนวงรอบของการคำนวณ (Iteration)



(ก)



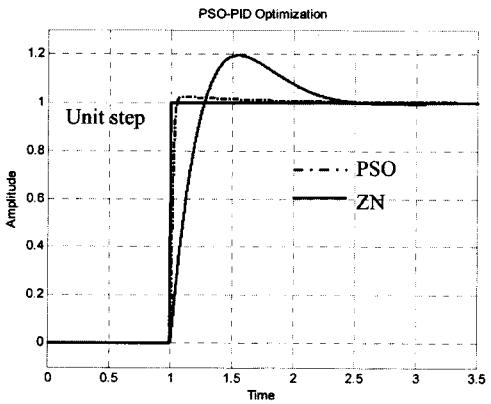
(ข)

รูปที่ 7 (ก) ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ k_p และ (ข) ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ k_i ด้วยหลักการวิธีกลุ่มนุภาค

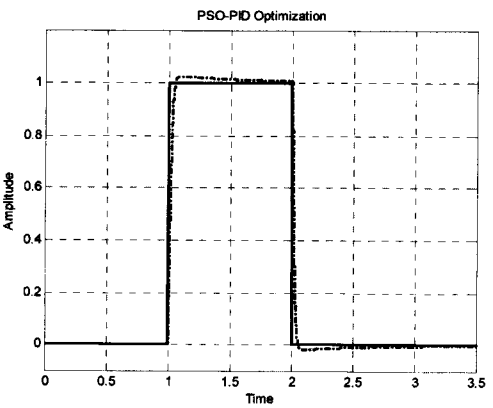
ตารางที่ 2 ค่าตัวควบคุมที่คำนวณได้ด้วยหลักการ PSO

ค่าพารามิเตอร์	ปริมาณและหน่วย
k_p	16.83
k_i	22.59

จากนั้นนำค่า k_p และ k_i จากตารางที่ 2. ไปแทนลงใน Block diagram ในรูปที่ 5. เพื่อทำการควบคุมแบบวงรอบปิด ซึ่งสามารถเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นเมื่อใช้ค่า และจากหลักการของ Ziegler-Nichole และ PSO ได้ดังแสดงในรูปที่ 8.



รูปที่ 8 ผลเปรียบเทียบผลตอบสนองการใช้ค่าตัวควบคุมด้วยหลักการ PSO และ Z-N Tuning



รูปที่ 9 ตัวอย่างการนำค่า k_p และ k_i มาใช้ในการควบคุมแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น

จากผลการทดลองการประยุกต์ใช้หลักการกลุ่มอนุภาคเพื่อหาค่าตัวควบคุมแบบพีไอในระบบควบคุมวงรอบปิดของการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นนั้น จะเห็นว่าผลตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมในหลักการ PSO ได้ผลดีกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ค่าตัวควบคุมจากหลักการ Ziegler-Nichole ทั้ง Settling time, Steady state error ดังแสดงในรูปที่ 8. และเมื่อทดสอบระบบทั้งขณะเริ่มทำงานและขณะหยุดทำงาน จะเห็นว่าผลตอบสนองทั้งสองสภาวะมีอัตราการกระเพื่อมสัญญาณ (Overshoot) อยู่ในระดับต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 9.

5. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการคำนวณค่าตัวควบคุมแบบพีไอ ที่ใช้ในระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบวงรอบปิดโดยใช้หลักการวิธีกลุ่มอนุภาค หรือ Particle Swarm Optimization ซึ่งผลตอบสนองของความเร็วจากระบบดังกล่าวมีการตอบสนองที่มีเสถียรภาพดี มีอัตราตอบสนองเชิงเวลาทั้งค่า Settling time ทั้งขณะเริ่มสั่งทำงานและเริ่มสั่งหยุดค่อนข้างน้อย อีกทั้งมีอัตราการกระเพื่อม (Overshoot) ค่อนข้างต่ำอีกเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าตัวควบคุมที่คำนวณได้ด้วยหลักการของ Ziegler-Nichole ซึ่งเป็นหลักการมาตรฐานที่ใช้กันโดยทั่วไป อย่างไรก็ตามการหาค่าตัวควบคุมด้วยหลักการกลุ่มอนุภาคนี้ทำได้แบบคำนวณค่าไว้ก่อน (Off - Line) เท่านั้น เช่นเดียวกันกับวิธีของ Ziegler-Nichole อีกเช่นกัน

เอกสารอ้างอิง

[1] Eberhart, R. and J. Kennedy (1995). "A new optimizer using particle swarm theory". Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, (MHS '95), 1995.

[2] Pai, R. M., I. Boldea, et al. (1988). "A complete equivalent circuit of a linear induction motor with sheet secondary.", IEEE Transactions on Magnetics, 24 (1): 639-654.

[3] Mi Ching, T. and C. Jeng Hu (1999). "A practical implementation of a linear induction motor drive using new generation DSP controller", Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications, 1999.

[4] Atencia, J., M. Martinez-Iturralde, et al. "Control strategies for positioning of linear induction motor: tests and discussion", IEEE International.Conference on Electric Machines and Drives (IEMDC'03), 2003.

[5] Karimi-Ghartemani, M., M. Zamani, et al. (2007). "An Optimal Fractional Order Controller for an AVR System Using Particle Swarm Optimization Algorithm", Engineering Systems Conference on Power Engineering, 2007.

วันชัย ทรัพย์สิงห์ สำเร็จการศึกษา คอ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า) และ วศ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ Ph.D. (Electrical Engineering) จาก Northumbria University, Newcastle, England, ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สนใจทำงานวิจัยด้าน Power Electronics and Applications

ทรงกลด ศรีปรางค์ เกิดที่จังหวัดตรัง ปี พ.ศ.2524 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี อส.บ. (เทคโนโลยีไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล เมื่อปี พ.ศ. 2550 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีรัตนโกสินทร์ วข.วังไกลกังวล และกำลังศึกษาระดับปริญญาโท (วศ.ม.) วิศวกรรมไฟฟ้า ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สนใจทำงานวิจัยด้านการประยุกต์ใช้ระบบสมองกลฝังตัว