

การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกอินทิกรัลแบบอัตโนมัติด้วย ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร Automated Genetic Algorithm Based Proportional plus Integral Controller Parameters for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System

ปกรณ์ โชตติยานนท์¹ วันจักรี เล่นวารี² และ มงคล กงศ์ศิริชัย^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

²ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกอินทิกรัล (PI Controller) เป็นตัวควบคุมที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร เนื่องจากโครงสร้างของตัวควบคุมที่ไม่ซับซ้อน ในขณะที่สามารถให้ค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์ได้ แต่อย่างไรก็ตาม การหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุดนั้นเป็นไม่ใช่งานที่ง่าย จากเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงเสนอการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยอัตโนมัติของ PI Controller สำหรับระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Motor: PMSM) โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) ซึ่งแสดงผลจำลองและผลทดลองเพื่อพิสูจน์ประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธีแบบลองผิดลองถูก

คำสำคัญ: ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกอินทิกรัล

Abstract

Proportional plus integral controller has been widely used in permanent magnet synchronous motor (PMSM) drive system due to its simple structure while achieving zero steady-state error. However, finding out the optimal parameters of the controller is not an easy task. For this reason, this paper presents an automated optimization of proportional plus integral controller for permanent magnet synchronous motor drive system using genetic algorithms. Simulation and experimental results verify the effectiveness than ones of the trial and error method

Keywords: Genetic Algorithm; Permanent Magnet Synchronous Motor; Proportional Plus Integral Controller

* ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ mongkol.kon@kmutt.ac.th โทร. 0 2470 9042

1. บทนำ

แนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้ามีอัตราที่เพิ่มสูงขึ้น กอปรกับแหล่งกำเนิดพลังงานหลักอาจจะไม่ได้เพิ่มสูงขึ้นในอัตราที่พอเพียง ส่งผลให้การออกแบบผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์นั้นให้ความสำคัญกับเรื่องของประสิทธิภาพพลังงาน การรักษาสีสิ่งแวดล้อม และประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ด้วยเหตุนี้ มอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSM) จึงถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายมากขึ้น ทั้งในโรงงานอุตสาหกรรมและอุปกรณ์เครื่องใช้ภายในบ้าน อาทิเช่น เครื่องปรับอากาศ ตู้เย็น และเครื่องซักผ้า เนื่องจาก PMSM มีขนาดที่กะทัดรัด มีอัตราส่วนระหว่างแรงบิดต่อความเฉื่อยสูง อีกทั้งยังมีช่วงความเร็วรอบในการทำงานที่กว้าง มีความหนาแน่นกำลังและประสิทธิภาพที่สูง

PMSM แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ มอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่ผิว (SPMSM) และมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายใน (IPMSM) สำหรับ SPMSM มีลักษณะโครงสร้างเป็นแม่เหล็กติดที่รอบ ๆ โรเตอร์ (Rotor) ส่งผลให้ความเหนี่ยวนำขดลวดสเตเตอร์แกน d (L_d) มีค่าเท่ากับความเหนี่ยวนำขดลวดสเตเตอร์แกน q (L_q) เป็นผลให้ง่ายต่อการควบคุมมอเตอร์ ในขณะที่ IPMSM มีลักษณะเป็นแม่เหล็กฝังอยู่ภายในโรเตอร์ ส่งผลให้ค่า L_q มีค่ามากกว่า L_d เป็นผลให้ IPMSM มีแรงบิดเพิ่มขึ้น (Rashid, 2001)

จากข้อดีของ PMSM ทั้งสองชนิด ส่งผลให้แนวโน้มงานวิจัยด้านมอเตอร์ในปัจจุบัน ให้ความสนใจ PMSM มากขึ้น อาทิเช่น งานวิจัยเกี่ยวกับรถไฟฟ้า (Rolling stock) และงานวิจัยเกี่ยวกับยานยนต์ไฟฟ้า (Electric vehicle) เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้ ต้องการสมรรถนะของระบบ

ขับเคลื่อนมอเตอร์ที่สูง ด้วยเหตุนี้ จึงมีงานวิจัยที่เสนอการปรับปรุงตัวควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรในการควบคุมเวกเตอร์ด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น ตัวควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy logic) (Uddin, 2011) (Rebeiro, 2012) แต่อย่างไรก็ตาม ตัวควบคุมดังกล่าวมีความซับซ้อนและใช้เวลาในการคำนวณที่มาก ด้วยเหตุนี้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกอินทิกรัล (PI) จึงเป็นตัวควบคุมที่นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์อย่างแพร่หลายเนื่องจากโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน โดยการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PI นั้น ทำได้โดยการสุ่มค่าพารามิเตอร์ และสังเกตผลการตอบสนองของระบบ เรียกวิธีดังกล่าวว่า วิธีการแบบลองผิดลองถูก (Trial and error method: TE) แต่อย่างไรก็ตาม การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมด้วยวิธีแบบลองผิดลองถูกนั้น จำเป็นต้องอาศัยความชำนาญของผู้ปฏิบัติงานและเวลาในการปรับแต่งค่อนข้างมาก อีกทั้งวิธีแบบลองผิดลองถูกนั้นไม่สามารถยืนยันค่าที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์ตัวควบคุมได้ ด้วยเหตุนี้ จึงมีงานวิจัยเกี่ยวกับวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบ PI ในแบบต่าง ๆ โดยวิธีที่ง่ายและได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมค่อนข้างมาก คือ วิธี Ziegler-Nichols (Meshram, 2012) แต่อย่างไรก็ตาม วิธีดังกล่าวขึ้นอยู่กับค่า P เพียงอย่างเดียว ซึ่งยากต่อการหาค่าพารามิเตอร์จากผลการตอบสนองแบบขั้นที่ทันใด (Step response) เมื่อสัญญาณเกิดการรบกวนจากการวัด อีกทั้งวิธีดังกล่าวไม่สามารถยืนยันค่า P ที่เหมาะสมที่สุดได้

จากปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงเสนอขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm: GA) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์

ตัวควบคุมแบบ PI สำหรับการขับเคลื่อน PMSM โดยวิธีที่นำเสนอสามารถลดความยุ่งยากและเวลาในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PI ได้ เนื่องจากเป็นระบบการหาค่าพารามิเตอร์ ตัวควบคุมแบบอัตโนมัติ ซึ่งมีการทำงานเป็นขั้นตอน อีกทั้งยังสามารถยืนยันค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดได้ด้วยประเมินแบบอินทิกรัลของค่าความผิดพลาดสมบูรณ์ (Integral of absolute error: IAE) โดยมีผลการจำลองและผลการทดลองพิสูจน์วิธีที่นำเสนอเทียบกับวิธีแบบ TE

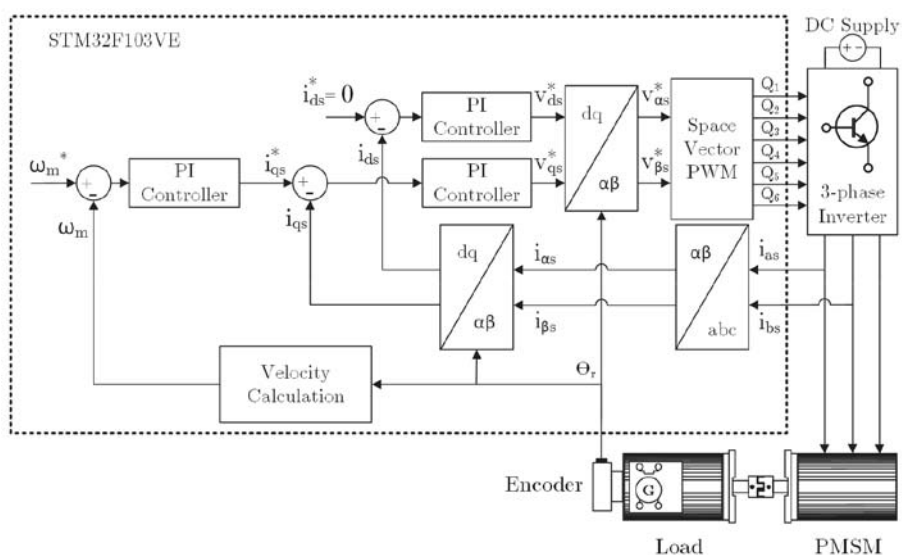
2. วิธีการศึกษา

2.1 อุปกรณ์

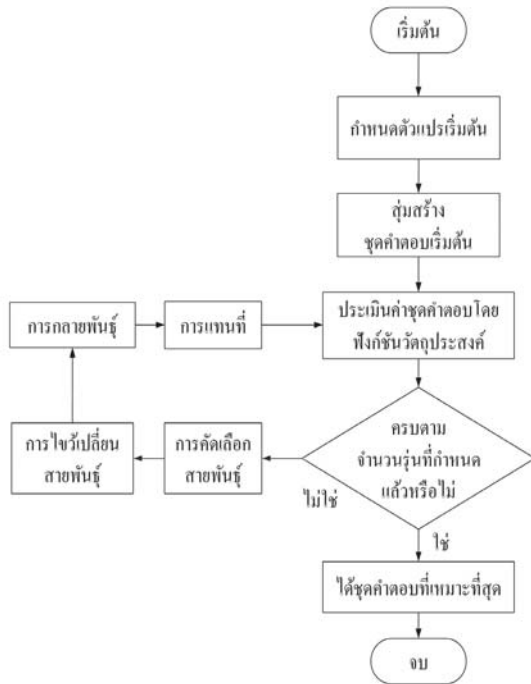
กระบวนการทำงานของวิธีที่นำเสนอประกอบไปด้วยสองส่วน คือ ส่วนของระบบขับเคลื่อน PMSM และส่วนของ GA (Chottianont, 2014)

1. ระบบขับเคลื่อน PMSM ประกอบด้วย ส่วนของวงจรกำลังไฟฟ้า ส่วนของมอเตอร์และชุดโพล และส่วนของระบบควบคุม ซึ่งใช้วิธีควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector Control) ที่ประกอบด้วยตัวควบคุมจำนวน 2 ชุดการทำงาน คือ ชุดควบคุมกระแสไฟฟ้าและความเร็วแสดงในรูปที่ 1

2. GA คือ กระบวนการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งอาศัยหลักการคัดเลือกตามธรรมชาติ (Natural selection) โดยถูกพัฒนาขึ้นจากการจำลองแนวคิดของหลักการวิวัฒนาการทางชีววิทยาและการคัดเลือกตามธรรมชาติ (Michalewicz, 1996) (Haupt, 2004) โดยสิ่งมีชีวิตที่มีสายพันธุ์ที่ดีกว่า มีโอกาสที่จะอยู่รอดและสืบสายพันธุ์ต่อไป ซึ่งงานวิจัยนี้อาศัยทฤษฎีดังกล่าวมาประยุกต์ โดยมีผังงานของกระบวนการทำงานดังแสดงในรูปที่ 2



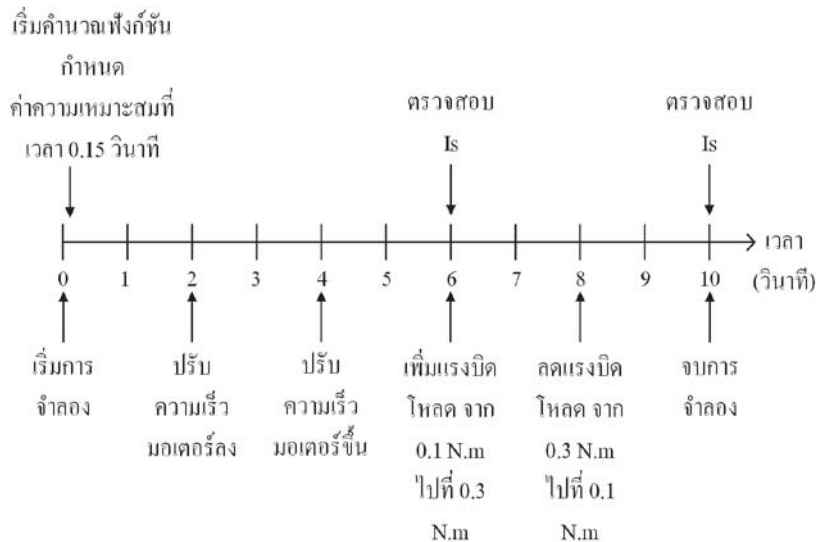
รูปที่ 1 แผนภาพโครงสร้างการทำงานโดยรวมของการขับเคลื่อน PMSM



กระบวนการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของ GA ในงานวิจัยนี้ทำงานร่วมกับแบบจำลองระบบขับเคลื่อน PMSM บนโปรแกรม MATLAB โดยรูปที่ 3 แสดงแผนผังการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมซึ่งใช้เวลาในการจำลองแต่ละชุดคำตอบทั้งหมด 10 วินาที และในงานวิจัยนี้ใช้วิธีอินทิกรัลของค่าความผิดพลาดสมบูรณ์ (Integral of Absolute Error: IAE) เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังสมการที่ (1) เพื่อประเมินค่าความผิดพลาดของความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ในแต่ละชุดคำตอบ โดยให้ความสำคัญทั้งการควบคุมความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าไปพร้อมกัน

$$IAE = \int_0^t (|e(t)_{\text{speed}}| + |e(t)_{\text{current}}|) dt \quad (1)$$

รูปที่ 2 ผังงานการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม



รูปที่ 3 แผนภาพเวลาการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในแต่ละชุดคำตอบ

นอกจากนี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด จึงได้ทำการวัดกระแสสแตเตอร์ (I_s) ณ สองช่วงเวลาในแต่ละชุดคำตอบโดยวัด ณ เวลาที่เพิ่มแรงบิดโหลดและเวลาจบการจำลอง โดยนำค่ากระแสไฟฟ้าสแตเตอร์ไปเปรียบเทียบกับค่ากระแสไฟฟ้าสแตเตอร์สูงสุด (กระแสไฟฟ้าพิกัด) หากกระแสสแตเตอร์สูงกว่ากระแสสแตเตอร์สูงสุด ให้พิจารณาชุดคำตอบนั้นเป็นชุดคำตอบที่ไม่ดี ซึ่งทำให้แน่ใจได้ว่าชุดคำตอบที่ได้มาจะมีค่ากระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ในช่วงเพิ่มแรงบิดโหลดที่ไม่สูงเกินค่ากระแสสูงสุดของมอเตอร์

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการวิจัยประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ผลการจำลองและผลการทดลองของการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของตัว PI controller โดย GA สำหรับการขับเคลื่อน PMSM ซึ่งผลการจำลองและผลการทดลองของวิธีที่นำเสนอถูกเปรียบเทียบกับผลของวิธีแบบ TE โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

3.1 ผลการจำลอง

เพื่อพิสูจน์แนวคิดที่นำเสนอ จึงได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าแบบ PI ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบขับเคลื่อน PMSM โดย GA บนโปรแกรม MATLAB ซึ่งพารามิเตอร์ของ PMSM ที่ใช้ในแบบจำลองระบบขับเคลื่อนแสดงดังตารางที่ 1 และแนวทางการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของ GA ดังแสดงในตารางที่ 2 สามารถอธิบายรายละเอียดได้ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของ PMSM

กำลังพิกัด (W)	100
แรงบิดพิกัด (N.m)	0.318
แรงดันพิกัด (V)	24
กระแสไฟฟ้าพิกัด (A)	5
ความถี่พิกัด (Hz)	200
ความเร็วรอบพิกัด (rpm)	3,000
จำนวนขั้วแม่เหล็ก (pole)	8
ความเฉื่อยของมอเตอร์ ($g.cm^2$)	42
ความเหนี่ยวนำขดลวดสแตเตอร์ (mH)	1.17
ฟลักซ์คัลลิ่งของแม่เหล็กถาวร (V.s)	0.0083
ความต้านทานสแตเตอร์ (Ω)	0.79
ค่าคงที่แรงบิด (N.m/A)	0.071

- **ค่าความห่างของรุ่น (Generation gap)** คือ ค่าดัชนีที่ใช้บอกปริมาณการคัดเลือกชุดคำตอบของขั้นตอนการคัดเลือกสายพันธุ์ ซึ่งค่าความห่างของรุ่นในโปรแกรมนี้ มีค่าระหว่าง 0-1 โดย 1 หมายถึง การคัดเลือกชุดคำตอบมา 100% ซึ่งการกำหนดค่าความห่างของรุ่น ต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของค่า โดยหากมีค่ามากเกินไป จะส่งผลให้การหาคำตอบเกิดความล่าช้า และหากค่าที่กำหนดมีค่าน้อยเกินไป ชุดคำตอบที่ได้ อาจไม่ใช่ชุดคำตอบที่เหมาะสมที่สุด
- **ค่าอัตราการไขว้เปลี่ยนพันธุ์ (Crossover rate)** คือ ค่าดัชนีบ่งบอกจำนวนการแลกเปลี่ยนค่าของตัวแปรระหว่างชุดคำตอบ 2 ชุดในขั้นตอนการไขว้เปลี่ยนสายพันธุ์ ซึ่งในโปรแกรมนี้มีค่าระหว่าง 0-1 โดย 1 หมายถึง การแลกเปลี่ยนค่าของตัวแปรทุกตัว การกำหนดค่าอัตราการไขว้เปลี่ยนพันธุ์นั้น จะส่งผลต่อความหลากหลายของค่าตัวแปร และกระบวนการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด

- **ค่าอัตราการกลายพันธุ์ (Mutation rate)** คือ ค่าดัชนีบ่งบอกจำนวนการเปลี่ยนค่าของตัวแปรภายในชุดคำตอบของตัวมันเองในขั้นตอนการกลายพันธุ์ ซึ่งในโปรแกรมนี้มีค่าระหว่าง 0-1 โดย 1 หมายถึง การเปลี่ยนค่าของตัวแปรทุกตัวในชุดคำตอบนั้น ๆ การกำหนดค่าอัตราการกลายพันธุ์ มีลักษณะเช่นเดียวกับการกำหนดค่าอัตราการไขว้เปลี่ยนพันธุ
- **ช่วงของค่าพารามิเตอร์ในตัวควบคุมแบบ PI** คือ ช่วงของการสุ่มค่าของตัวแปรในชุดคำตอบ โดยการกำหนดช่วงต้องคำนึงถึงค่าแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของลูปนั้น ๆ ด้วย เพื่อป้องกันให้ระบบเกิดความไม่เสถียร (Unstable) แต่อย่างไรก็ตาม วิธีที่สะดวกที่สุด คือ การทดสอบปรับค่าพารามิเตอร์โดยการสุ่มค่าก่อน เพื่อค้นหาช่วงที่ระบบสามารถทำงานได้โดยไม่เกิดความไม่เสถียร และนำมากำหนดเป็นช่วงของค่าพารามิเตอร์ในตัวควบคุม

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้ในการทดลอง

จำนวนรุ่น (Generation)	80
จำนวนประชากร (Population)	150
ความห่างของรุ่น (Generation gap)	0.9
อัตราการไขว้เปลี่ยนพันธุ (Crossover rate)	0.7
อัตราการกลายพันธุ์ (Mutation rate)	0.5
ช่วงของค่าพารามิเตอร์ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมความเร็วรอบแบบ PI	K_{p_speed} 0-100 K_{i_speed} 0-1000
ช่วงของค่าพารามิเตอร์ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบ PI	$K_{p_current}$ 0-100 $K_{i_current}$ 0-1000

โดยในหัวข้อถัดไปจะแบ่งผลการจำลองการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ ผลการจำลองการตอบสนองของความเร็วรอบมอเตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและโหลดแรงบิด เปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีแบบ TE ที่ช่วงความเร็วรอบต่ำและช่วงความเร็วรอบสูง โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

3.1.1 ผลการจำลองที่ช่วงความเร็วรอบต่ำ

การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมแบบ PI โดย GA เพื่อขับเคลื่อน PMSM ที่ช่วงความเร็วรอบต่ำ ประกอบด้วยการจำลองสองช่วงสถานการณ์ คือ ช่วงเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ และช่วงเปลี่ยนแปลงโหลดแรงบิด

โดยช่วงเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ ทำการปรับความเร็วรอบอ้างอิงของ PMSM ลง จากความเร็วรอบ 600 rpm เป็น 300 rpm ณ วินาทีที่ 2 และปรับความเร็วรอบกลับไปที่ 600 rpm ณ วินาทีที่ 4 ในขณะที่โหลดแรงบิดมีค่าคงที่ที่ 0.1 N.m หลังจากนั้นในช่วงเปลี่ยนแปลงโหลดแรงบิด ทำการปรับโหลดแรงบิดเพิ่มขึ้นจาก 0.1 N.m ไปที่ 0.3 N.m ณ วินาทีที่ 6 และปรับลดลงมาที่ 0.1 N.m ตามเดิม ณ วินาทีที่ 8 ในขณะที่ยังคงค่าความเร็วรอบของ PMSM ไว้ที่ 600 rpm

หลังจากโปรแกรมทำการหาค่าชุดคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแต่ละรุ่นเสร็จสิ้น โปรแกรมจะเลือกชุดคำตอบที่ให้ค่า IAE น้อยที่สุดรุ่นละ 1 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 4 และเมื่อจบกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ระบบจะได้ชุดคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการขับเคลื่อน PMSM ซึ่งมีค่าดังตารางที่ 3

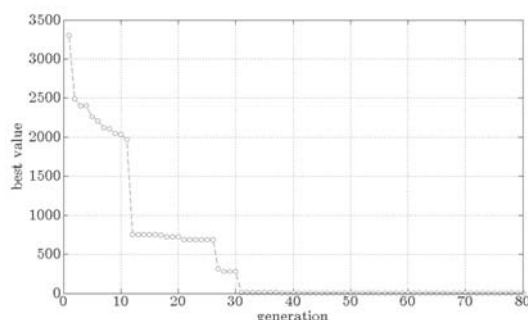
เมื่อได้ชุดคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการขับเคลื่อน PMSM แล้ว นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มา

ใส่ในแบบจำลองระบบขับเคลื่อน PMSM และนำผลการจำลองไปเปรียบเทียบกับวิธีแบบ TE ซึ่งแสดงผลโดยทำการขยายรูปในช่วงที่มีการปรับความเร็วรอบและโหลดแรงบิด ดังแสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ตามลำดับ

3.1.2 ผลการจำลองที่ช่วงความเร็วรอบสูง

ผลการจำลองที่ช่วงความเร็วรอบสูง ที่ช่วงเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ ทำการปรับความเร็วรอบอ้างอิงของ PMSM ลง จากความเร็วรอบ 2,700 rpm เป็น 2,400 rpm ณ วินาทีที่ 2 และปรับความเร็วรอบกลับมาที่ 2,700 rpm ณ วินาทีที่ 4 ในขณะที่โหลดแรงบิดมีค่าคงที่ที่ 0.1 N.m หลังจากนั้นในช่วงเปลี่ยนแปลงโหลดแรงบิด ทำการปรับโหลดแรงบิดเพิ่มขึ้นจาก 0.1 N.m ไปที่ 0.3 N.m ณ วินาทีที่ 6 และปรับลดลงมาที่ 0.1 N.m ตามเดิม ณ วินาทีที่ 8 ในขณะที่ยังคงค่าความเร็วรอบของ PMSM ไว้ที่ 2,700 rpm

เมื่อจบกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โปรแกรมจะเลือกชุดคำตอบที่ให้ค่า IAE น้อยที่สุดรุ่นละ 1 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 7 และระบบจะได้ชุดคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการขับเคลื่อน PMSM ซึ่งมีค่าแสดงดังแสดงในตารางที่ 4 นำค่าพารามิเตอร์ป้อนเข้าไปในแบบจำลองระบบขับเคลื่อน PMSM และเปรียบเทียบผลกับวิธีแบบ TE ดังแสดงในรูปที่ 8 และรูปที่ 9



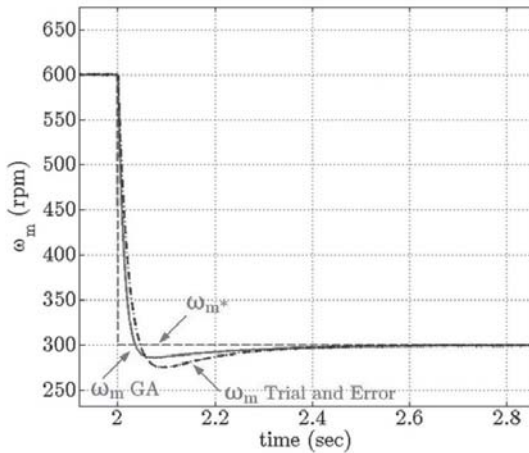
รูปที่ 4 ค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุดในแต่ละรุ่นที่ช่วงความเร็วรอบสูง

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ของ PI controller ที่ช่วงความเร็วรอบต่ำ

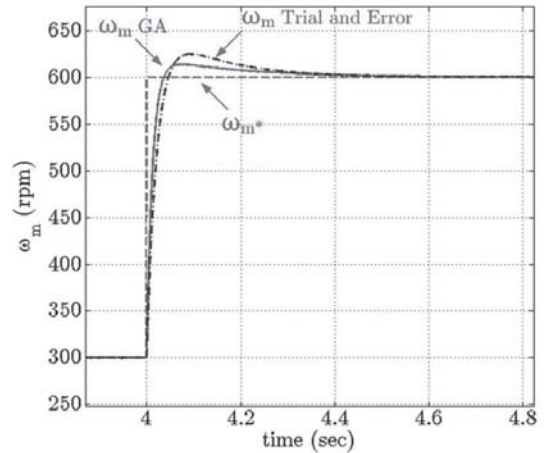
	GA method	TE method
K_{p_speed}	54.2131	35
K_{i_speed}	5.1787	6.6667
$K_{p_current}$	1.8213	0.9
$K_{i_current}$	769.23	980

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ของ PI controller ที่ช่วงความเร็วรอบสูง

	GA method	TE method
K_{p_speed}	36.1213	20
K_{i_speed}	6.7204	10
$K_{p_current}$	1.1764	2
$K_{i_current}$	899.556	945.321

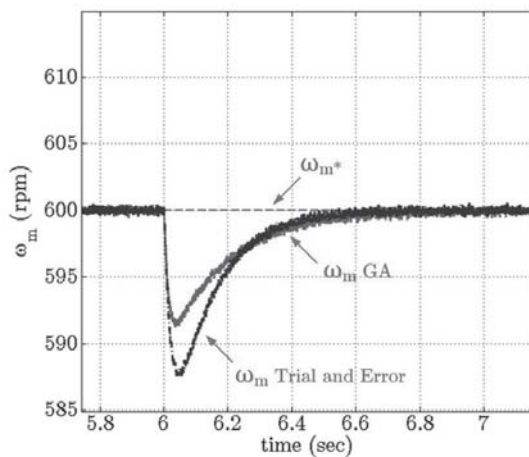


(ก)

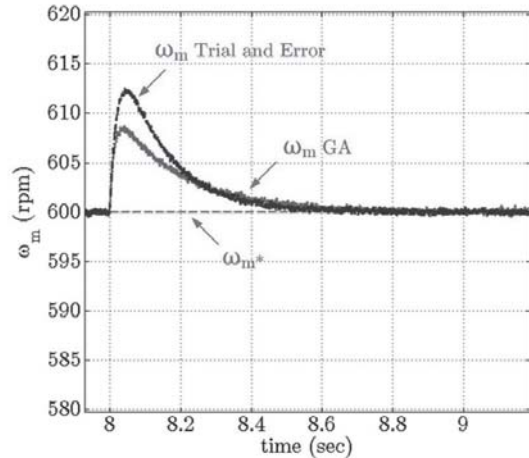


(ข)

รูปที่ 5 รูปขยายผลการจำลองการตอบสนองของความเร็วรอบมอเตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีแบบ TE ที่ช่วงความเร็วรอบต่ำ (ก) เมื่อมีการปรับลดความเร็วรอบลง ณ วินาทีที่ 2 (ข) เมื่อมีการปรับเพิ่มความเร็วรอบขึ้น ณ วินาทีที่ 4

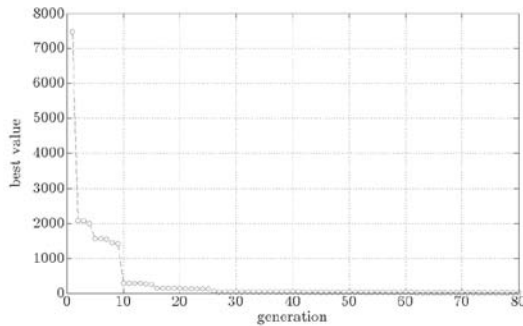


(ก)



(ข)

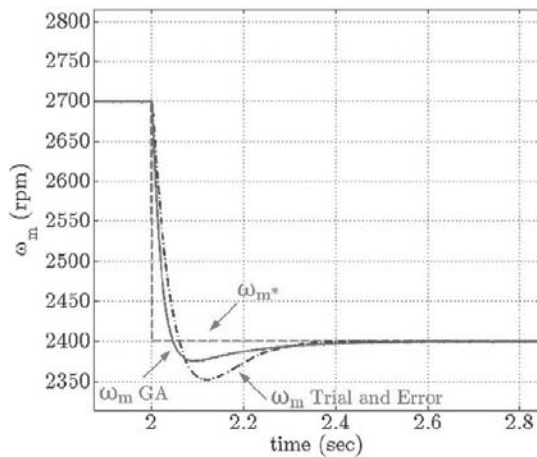
รูปที่ 6 รูปขยายผลการจำลองการตอบสนองของความเร็วรอบมอเตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดแรงบิดเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีแบบ TE ที่ช่วงความเร็วรอบต่ำ (ก) เมื่อมีการปรับเพิ่มโหลดแรงบิดขึ้น ณ วินาทีที่ 6 (ข) เมื่อมีการปรับลดโหลดแรงบิดลง ณ วินาทีที่ 8



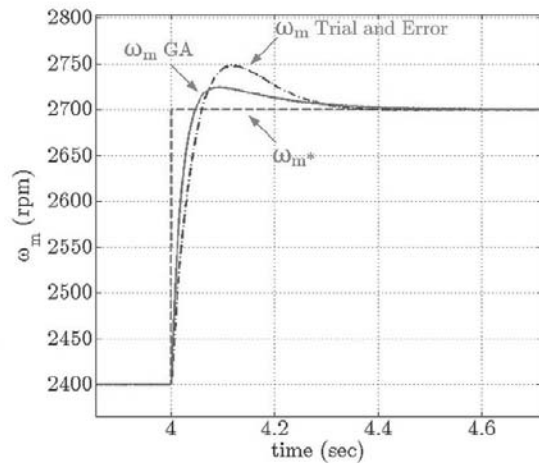
รูปที่ 7 ค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุดในแต่ละรุ่นในช่วงความเร็วรอบสูง

3.2 ผลการทดลอง

เพื่อเป็นการยืนยันผลจากการจำลองการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของ PI controller โดย GA สำหรับการขับเคลื่อน PMSM จึงได้ทำการออกแบบชุดทดลองขึ้น ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ผลการทดลองการตอบสนองของความเร็วรอบมอเตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและโหลดแรงบิดเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอ กับวิธีแบบ TE ที่ช่วงความเร็วรอบต่ำและช่วงความเร็วรอบสูง โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

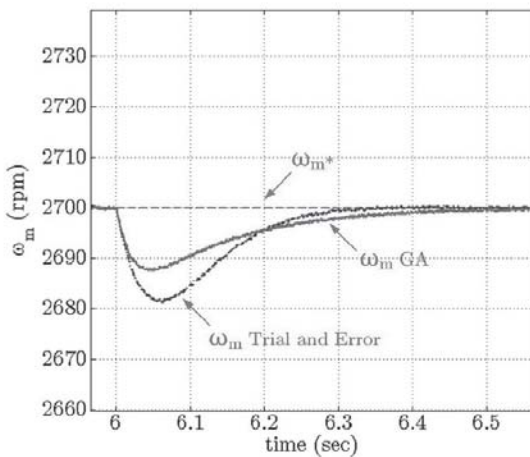


(ก)

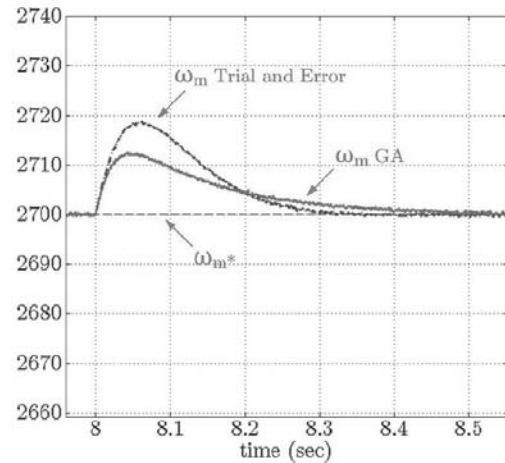


(ข)

รูปที่ 8 รูปขยายผลการจำลองการตอบสนองของความเร็วรอบมอเตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอ กับวิธีแบบ TE ที่ช่วงความเร็วรอบสูง (ก) เมื่อมีการปรับลดความเร็วรอบลง ณ วินาทีที่ 2 (ข) เมื่อมีการปรับเพิ่มความเร็วรอบขึ้น ณ วินาทีที่ 4



(ก)



(ข)

รูปที่ 9 รูปขยายผลการจำลองการตอบสนองของความเร็วรอบมอเตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดแรงบิดเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีแบบ TE ที่ช่วงความเร็วรอบสูง (ก) เมื่อมีการปรับเพิ่มโหลดแรงบิดขึ้น ณ วินาทีที่ 6 (ข) เมื่อมีการปรับลดโหลดแรงบิดลง ณ วินาทีที่ 8

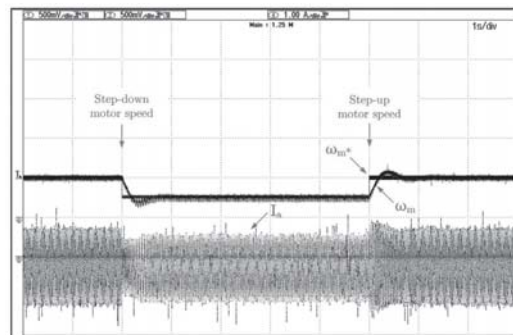
3.2.1 ผลการทดลองที่ช่วงความเร็วรอบต่ำ

รูปที่ 10 และรูปที่ 11 แสดงผลของวิธีแบบ TE และวิธีที่นำเสนอ เมื่อปรับความเร็วรอบมอเตอร์ ในขณะที่ยังคงโหลดแรงบิดไว้ที่ 0.1 N.m ตามลำดับ โดยปรับลดความเร็วรอบมอเตอร์ลงจาก 600 ไปที่ 300 rpm หลังจากนั้นทำการปรับเพิ่มความเร็วรอบมอเตอร์ขึ้นจาก 300 ไปที่ 600 rpm

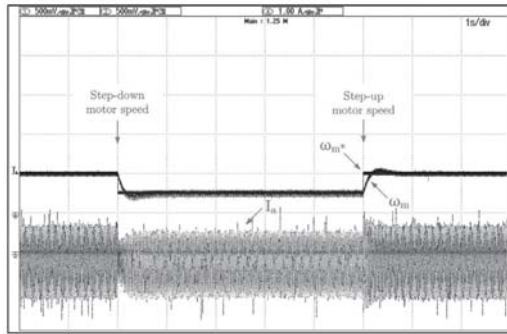
นอกจากนี้ รูปที่ 12 และรูปที่ 13 แสดงผลการทดลองเมื่อทำการปรับโหลดแรงบิดมอเตอร์ ในขณะที่ยังคงความเร็วรอบไว้ที่ 600 rpm ของวิธีแบบ TE และวิธีที่นำเสนอตามลำดับ โดยทำการปรับเพิ่มโหลดแรงบิดมอเตอร์ขึ้นจาก 0.1 N.m ไปที่ 0.3 N.m หลังจากนั้นทำการปรับลดโหลดแรงบิดมอเตอร์กลับไปยังขนาดเดิมที่ 0.1 N.m

3.2.2 ผลการทดลองที่ช่วงความเร็วรอบสูง

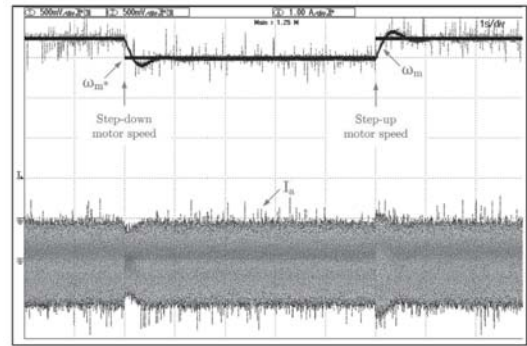
รูปที่ 14 และรูปที่ 15 แสดงผลของวิธีแบบ TE และวิธีที่นำเสนอ เมื่อปรับความเร็วรอบมอเตอร์ ในขณะที่ยังคงโหลดแรงบิดไว้ที่ 0.1 N.m ตามลำดับ โดยปรับลดความเร็วรอบมอเตอร์ลงจาก 2700 ไปที่ 2400 rpm หลังจากนั้นทำการปรับเพิ่มความเร็วรอบมอเตอร์ขึ้นจาก 2400 ไปที่ 2700 rpm



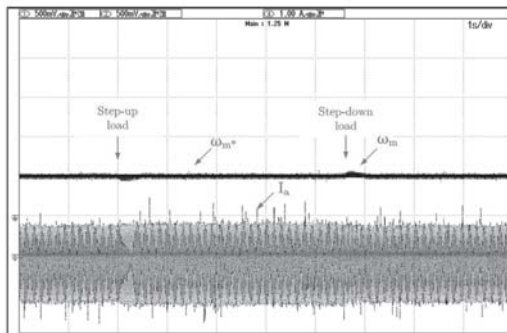
รูปที่ 10 ผลการทดลองการตอบสนองของความเร็วรอบมอเตอร์และกระแสไฟฟ้าเฟส A เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบมอเตอร์ของวิธีแบบ TE ที่ช่วงความเร็วรอบต่ำ



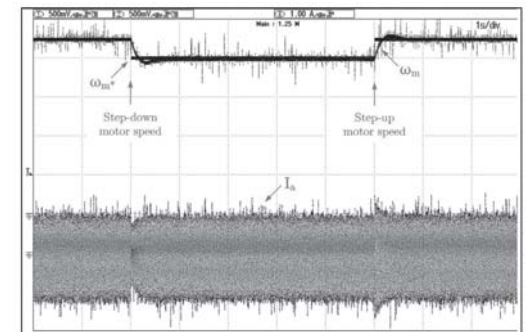
รูปที่ 11 ผลการทดลองการตอบสนองของความเร็วรอบมอเตอร์และกระแสไฟฟ้าเฟส A เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบมอเตอร์ของวิธีที่นำเสนอในช่วงความเร็วรอบต่ำ



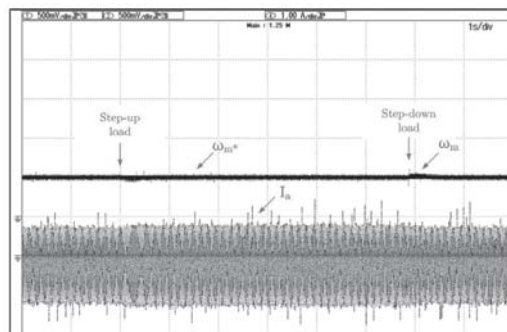
รูปที่ 14 ผลการทดลองการตอบสนองของความเร็วรอบมอเตอร์และกระแสไฟฟ้าเฟส A เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบมอเตอร์โดยวิธีแบบ TE ที่ช่วงความเร็วรอบสูง



รูปที่ 12 ผลการทดลองการตอบสนองของความเร็วรอบมอเตอร์และกระแสไฟฟ้าเฟส A เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดแรงบิดของวิธีแบบ TE ที่ช่วงความเร็วรอบต่ำ

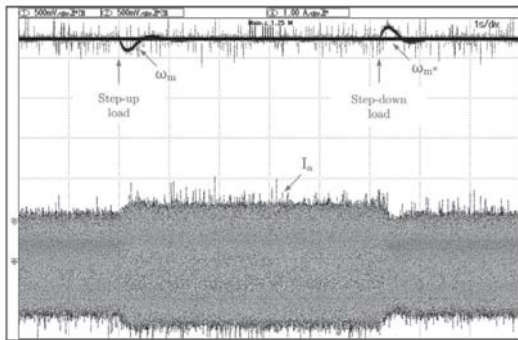


รูปที่ 15 ผลการทดลองการตอบสนองของความเร็วรอบมอเตอร์และกระแสไฟฟ้าเฟส A เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบมอเตอร์ของวิธีที่นำเสนอในช่วงความเร็วรอบสูง

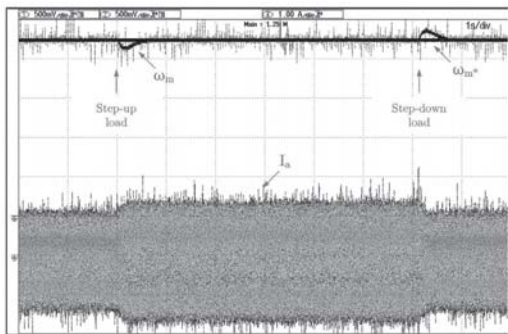


รูปที่ 13 ผลการทดลองการตอบสนองของความเร็วรอบมอเตอร์และกระแสไฟฟ้าเฟส A เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดแรงบิดของวิธีที่นำเสนอในช่วงความเร็วรอบต่ำ

นอกจากนี้ รูปที่ 16 และรูปที่ 17 แสดงผลการทดลองเมื่อทำการปรับโหลดแรงบิดมอเตอร์ในขณะที่ยังคงความเร็วรอบไว้ที่ 2700 rpm ของวิธีแบบ TE และวิธีที่นำเสนอตามลำดับ โดยทำการปรับเพิ่มโหลดแรงบิดมอเตอร์ขึ้นจาก 0.1 N.m ไปที่ 0.3 N.m หลังจากนั้นทำการปรับลดโหลดแรงบิดมอเตอร์กลับไปยังขนาดเดิมที่ 0.1 N.m



รูปที่ 16 ผลการทดลองการตอบสนองของความเร็วรอบมอเตอร์และกระแสไฟฟ้าเฟส A เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดแรงบิดโดยใช้วิธีแบบ TE ในช่วงความเร็วรอบสูง



รูปที่ 17 ผลการทดลองการตอบสนองของความเร็วรอบมอเตอร์และกระแสไฟฟ้าเฟส A เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดแรงบิดของวิธีที่นำเสนอในช่วงความเร็วรอบสูง

จากรูปที่ 10 ถึงรูปที่ 17 จะเห็นได้ว่าสมรรถนะการควบคุมความเร็ว (speed control performance) ของ PMSM มีการตอบสนองที่ดีขึ้นทั้งช่วงความเร็วรอบต่ำและสูง เมื่อใช้วิธีการนำเสนอในการหาค่าพารามิเตอร์ของ PI controller ในแง่ของ ค่าพุ่งต่ำ (Undershoot) และค่าพุ่งเกิน (Overshoot) ที่ลดลง รวมทั้งเวลาการตอบสนองที่ใช้ในการเข้าสู่ค่าค่าสั่ง (Settling time) ที่เร็วขึ้น

4. สรุป

งานวิจัยนี้จึงเสนอ GA เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของ PI Controller แบบอัตโนมัติสำหรับการขับเคลื่อน PMSM ซึ่งจากผลการจำลองและผลการทดลองเมื่อปรับความเร็วรอบมอเตอร์ ในขณะที่โหลดแรงบิดคงที่ พบว่า ที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ในช่วงการตอบสนองชั่วคราว (Transient response) ค่าพุ่งต่ำ (Undershoot) และค่าพุ่งเกิน (Overshoot) ของวิธีที่นำเสนอมีค่าน้อยกว่าวิธีแบบ TE ประมาณ 2-5% นอกจากนี้ กรณีที่เมื่อทำปรับโหลดแรงบิดมอเตอร์ ในขณะที่ความเร็วรอบของมอเตอร์คงที่ จะเห็นได้ว่าความเร็วรอบของวิธีที่นำเสนอ สามารถกลับเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้เร็วกว่าวิธีแบบ TE ประมาณ 0.5-1 วินาที ซึ่งผลการทดลองทั้งสองกรณีนี้ สามารถยืนยันประสิทธิภาพของวิธีที่นำเสนอได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

6. เอกสารอ้างอิง

- Rashid, M.H. (2001). Power Electronics Handbook, Canada: Academic Press.
- Uddin, M.N. and Rebeiro, R.S. (2011), Online Efficiency Optimization of a Fuzzy-Logic-Controller-Based IPMSM Drive, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47, No. 2, pp. 1043-1050.

- Rebeiro, R.S. and Uddin, M.N. (2012). Performance Analysis of an FLC-Based Online Adaptation of Both Hysteresis and PI Controllers for IPMSM Drive, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 48, No. 1, pp. 12-19.
- Meshram, P.M. and Kanojiya, R.G. (2012). Tuning of PID controller using Ziegler-Nichols method for speed control of DC motor, International Conference on Advances in Engineering, Science and Management, 30-31 March 2012, Tamil Nadu, India, pp. 117-122.
- Chottiyanont, P., Konghirun, M. and Lenwari, W. (2014). The use of genetic algorithms for speed and current controller designs for IPMSM drive, 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 22-25 October 2014, Hangzhou, China, pp. 2930-2935.
- Michalewicz, Z. (1996). Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Springer Press, Heidelberg, pp. 57-287.
- Haupt, R.L. and Haupt, S.E. (2004). Practical Genetic Algorithms, 2nd ed., John Wiley & Sons Press, United States of America, pp. 27-65.