การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านโดยใช้เทคนิคการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

นางสาวศรุตา หวานสูงเนิน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2565

PID CONTROLLER DESIGN FOR BLDC MOTOR SPEED REGULATION USING ADAPTIVE TABU SEARCH TECHNIQUE

SARUTA WANSUNGNOEN

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2022

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านโดยใช้เทคนิคการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)

ประธานกรรมการ

.....

(รศ. ดร.กองพัน อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

.....

(ผศ. ดร.จักรกริช ภักดีโต)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)

.....

(รศ. ดร.กิตติ อัตถกิจมงคล)

กรรมการ

.....

(ผศ. ดร.สุดารัตน์ ขวัญอ่อน)

กรรมการ

.....

(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ

.....

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ศรุตา หวานสูงเนิน : การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านโดยใช้เทคนิคการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (PID CONTROLLER DESIGN FOR BLDC MOTOR SPEED REGULATION USING ADAPTIVE TABU SEARCH TECHNIQUE) อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รองศาสตราจารย์ ดร.กองพัน อารีรักษ์, 135 หน้า.

คำสำคัญ : มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน/แบบจำลองกล่องดำ/กฎซีกเลอร์-นิโคลส์/การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว/ตัวควบคุมพีไอดี

ปัจจุบันการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง อีกทั้งการบำรุงรักษาง่ายเพราะมอเตอร์ชนิดนี้ไม่มีแปรงถ่าน โดยทั่วไปมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านมักจำหน่ายพร้อมกับชุดควบคุมที่มีวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ที่สามารถควบคุมได้แบบวงเปิด อย่างไรก็ตามการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้เป็นไปตามความเร็วรอบอ้างอิงได้แม้ว่าโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจำเป็นต้องใช้การควบคุมแบบวงปิด ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไรแปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์ด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม และวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์โดยอาศัยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว นอกจากนี้การออกแบบตัวควบคุมดังกล่าวจะอาศัยพลานต์ที่เป็นแบบจำลองกล่องดำที่อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน การยืนยันผลการควบคุมความเร็วรอบที่ได้จากการออกแบบจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์พร้อมทั้งผลจากชุดทดสอบจริง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสมรรถนะการควบคุมความเร็วรอบที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีสมรรถนะที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมอย่างชัดเจน

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

SARUTA WANSUNGNOEN : PID CONTROLLER DESIGN FOR BLDC MOTOR SPEED REGULATION USING ADAPTIVE TABU SEARCH TECHNIQUE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. KONGPAN AREERAK, Ph.D., 135 PP.

Keyword : Brushless direct current motor/Black-box model/Ziegler-Nichols Approach/ adaptive Tabu search/PID controller

Nowadays, BLDC motors are widely used because they are no brushes, resulting in high efficiency and easy maintenance. Generally, commercial BLDC motors are sold with a control unit in which the DC-to-AC converter is included. This converter can be controlled in the open loop mode. However, the closed-loop control mode is required when the load torque of these motors is changed. Therefore, this thesis presents the PID controller design for a BLDC motor speed regulation applied with a commercial control unit. This controller is designed with the conventional approach and the artificial intelligence approach using adaptive Tabu search. In addition, the black-box transfer function model is used to be the system plant for the controller design. The simulation and experimental results are used to confirm that the proposed techniques can be regulated the speed of BLDC motors. Moreover, the speed performance controlled by the artificial intelligence approach is clearly better than the conventional approach.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Electrical Engineering

Academic Year 2022

Student's Signature.....

Advisor's Signature.....

Co-Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งทางด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.กองพัน อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำและแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมทั้งยังได้ช่วยสละเวลาเพื่อตรวจทาน แก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์จนกระทั่งมีความสมบูรณ์และสนับสนุนค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ในการวิจัย อีกทั้งยังเป็นกำลังใจและแบบอย่างที่ดีพร้อมทั้งข้อคิดสำหรับการดำเนินชีวิตให้กับผู้วิจัยเสมอมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกริช ภักดีโต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการและคำแนะนำในการตรวจแก้วิทยานิพนธ์ ตลอดจนเป็นกำลังใจในการศึกษาค้นคว้าและความช่วยเหลือต่าง ๆ ในการวิจัยครั้งนี้

คณาจารย์ เลขานุการและผู้ช่วยสอนประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาด้านวิชาการ การติดต่อประสานงานและข้อคิดในการดำเนินชีวิตอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

บุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการทำงาน การใช้งานอุปกรณ์ต่าง ๆ รวมทั้งขอขอบคุณเพื่อนพี่น้องบัณฑิตศึกษาทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและให้กำลังใจในการศึกษาค้าตลอดมา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ต่าง ๆ ทั้งในอดีตจนถึงปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอดจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต

ศรุตา หวานสูงเนิน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ช
สารบัญรูป ..... ฌ
บทที่
1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย 3
1.3 สมมติฐานการวิจัย 3
1.4 ขอบเขตงานวิจัยวิทยานิพนธ์ 3
1.5 ระเบียบวิธีวิจัย 4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์ 5
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง 7
2.1 บทนำ 7
2.2 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน 7
2.3 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน 10
2.4 สรุป 13
3 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดไร้แปรงถ่านด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 14
3.1 บทนำ 14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน 14
3.2.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน 14
3.2.2 หลักการทำงานและวิธีการควบคุมความเร็วรอบ 15
3.2.3 แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน 21
3.3 การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 21
3.4 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกล่องดำด้วยการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 24
3.5 สรุป 32

4 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน 33
4.1 บทนำ 33
4.2 ตัวควบคุมพีไอดี 33
4.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยกฎซีกเลอร์-นิโคลส์ 34
4.4 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 39
4.5 การเปรียบเทียบสมรรถนะผลการควบคุมการจำลองสถานการณ์โดยใช้ตัวควบคุมจากการออกแบบด้วยกฎซีกเลอร์-นิโคลส์และตัวควบคุมจากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 44
4.6 การทดสอบการคงค่าความเร็วรอบเมื่อโหลดทางกลมีการเปลี่ยนแปลง 46
4.7 สรุป 49

5 การสร้างชุดทดสอบและผลการทดสอบตัวควบคุมสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์ 51
5.1 บทนำ 51
5.2 ชุดทดสอบ 51
5.2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน 53
5.2.2 บอร์ดขับเคลื่อน 54

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.3 การออกวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและวงจรขยายแรงดัน 56

5.2.4 บอร์ด Arduino Mega 2560 59

5.2.5 โมดูลแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะล็อก MCP7425 60

5.3 การทดสอบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน 61

5.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะผลการควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ตัวควบคุมจากการออกแบบด้วยกฎของซีกเลอร์-นิโคลส์และการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 66

5.5 สรุป 68

6 สรุปและข้อเสนอแนะ 69

6.1 สรุป 69

6.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต 70

รายการอ้างอิง 72

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. พารามิเตอร์ของการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวที่ใช้ในการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี 76

ภาคผนวก ข. กฎซีกเลอร์-นิโคลส์ 82

ภาคผนวก ค. คู่มือการใช้งานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์และไอซีเบอร์ LM331N 84

ภาคผนวก ง. โปรแกรมภาษาซีที่ใช้สำหรับทดสอบเพื่อวิเคราะห์สมรรถนะตัวควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน 112

ภาคผนวก จ. ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 115

ประวัติผู้เขียน 135

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน 8

2.2 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน 11

3.1 ลำดับการคอมมิวเตชัน 17

3.2 ผลการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดบอร์ดเชิงพาณิชย์ 20

3.3 ค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 28

3.4 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกล่องดำโดยการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 28

4.1 ค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 41

5.1 ค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีไอดี 61

ก.1 การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้นที่ใช้ในการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปของแบบจำลองกล่องดำ 77

ก.2 การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้างที่ใช้ในการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปของแบบจำลองกล่องดำ 77

ก.3 การทดสอบค่ารัศมีการค้นหาที่ใช้ในการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปของแบบจำลองกล่องดำ 78

ก.4 การทดสอบค่าอัตราปรับลดรัศมีที่ใช้ในการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปของแบบจำลองกล่องดำ 78

ก.5 การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้นที่ใช้ในการค้นหาค่าตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน 79

ก.6 การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้างที่ใช้ในการค้นหาค่าตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน 80

ก.7 การทดสอบค่ารัศมีการค้นหาที่ใช้ในการค้นหาค่าตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน 80

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ก.8 การทดสอบค่าอัตราปรับลดรัศมีที่ใช้ในการค้นหาค่าตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน 81
ข.1 กฎซีกเลอร์-นิโคลส์สำหรับการตอบสนองแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ (แนวทางที่ 1) 83
ข.2 กฎซีกเลอร์-นิโคลส์สำหรับการตอบสนองที่มีการสั่นไกว (แนวทางที่ 2) 83

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

3.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน 15
3.2 หลักการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน 16
3.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน 16
3.4 สัญญาณการคอมมิวเตชันของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน 18
3.5 แผนภาพมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดบอร์ดขับเคลื่อน 19
3.6 ชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ 20
3.7 สุ่มค่า S_0 ภายใต้ขอบเขตการค้นหา 22
3.8 คำตอบรอบข้าง S_0 22
3.9 กำหนดค่าคำตอบรอบข้างใหม่ 23
3.10 กำหนดค่า S_0 ใหม่ 23
3.11 กลไกการเดินย้อนรอย 24
3.12 ขั้นตอนการดำเนินงานในการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกล่องดำ 25
3.13 แผนภาพการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกล่องดำ
ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 26
3.14 ผลการตอบสนองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านเมื่อจ่าย
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง $V_{in,dc}$ เท่ากับ 3.7 โวลต์ 26
3.15 การลู่เข้าหาคำตอบ ε ที่เหมาะสมที่สุดของการค้นหาค่าพารามิเตอร์ 28
3.16 การตรวจสอบความถูกต้องของการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิง
ปรับตัวที่ความเร็วรอบ 20000 rpm 29
3.17 การตรวจสอบความถูกต้องของการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิง
ปรับตัวที่ความเร็วรอบ 16000 rpm 30
3.18 การตรวจสอบความถูกต้องของการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิง
ปรับตัวที่ความเร็วรอบ 17000 rpm 30
3.19 การตรวจสอบความถูกต้องของการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิง
ปรับตัวที่ความเร็วรอบ 18000 rpm 31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.20 การตรวจสอบความถูกต้องของการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวที่ความเร็วรอบ 19000 rpm 31

4.1 การตอบสนองแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา 35

4.2 การตอบสนองรูปทรงเอสของผลตอบสนองความเร็วรอบจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน 35

4.3 แผนภาพการเชื่อมต่อบล็อก Simulink สำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านด้วยตัวควบคุมพีไอดี 37

4.4 ผลการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการออกแบบด้วยกฎของซีกเลอร์-นิโคลส์ ที่ความเร็วรอบ 20000 rpm 37

4.5 ผลการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการออกแบบด้วยกฎของซีกเลอร์-นิโคลส์ ที่ความเร็วรอบ 5000 rpm 38

4.6 ผลการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการออกแบบด้วยกฎของซีกเลอร์-นิโคลส์ ที่ความเร็วรอบ 10000 rpm 38

4.7 ผลการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการออกแบบด้วยกฎของซีกเลอร์-นิโคลส์ ที่ความเร็วรอบ 15000 rpm 39

4.8 แผนภาพการเชื่อมต่อบล็อก Simulink สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน 40

4.9 ผลการลู่เข้าหาคำตอบ ε ที่เหมาะสมที่สุด 42

4.10 ผลการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีจากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ที่ความเร็วรอบ 20000 rpm 42

4.11 ผลการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีจากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ที่ความเร็วรอบ 5000 rpm 43

4.12 ผลการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีจากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ที่ความเร็วรอบ 10000 rpm 43

4.13 ผลการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีจากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ที่ความเร็วรอบ 15000 rpm 44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.14 การเปรียบเทียบผลการควบคุมการจำลองสถานการณ์ที่ความเร็วรอบ 5000 rpm 45
4.15 การเปรียบเทียบผลการควบคุมการจำลองสถานการณ์ที่ความเร็วรอบ 10000 rpm 45
4.16 การเปรียบเทียบผลการควบคุมการจำลองสถานการณ์ที่ความเร็วรอบ 15000 rpm 45
4.17 การเปรียบเทียบผลการควบคุมการจำลองสถานการณ์ที่ความเร็วรอบ 20000 rpm 46
4.18 แผนภาพการเชื่อมต่อบล็อก Simulink สำหรับการจำลองสถานการณ์การคงค่าความเร็วเมื่อโหลดทางกลมีการเปลี่ยนแปลง 47
4.19 การเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์การคงค่าความเร็วรอบที่ความเร็วรอบ 5000 rpm 48
4.20 การเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์การคงค่าความเร็วรอบที่ความเร็วรอบ 10000 rpm 48
4.21 การเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์การคงค่าความเร็วรอบที่ความเร็วรอบ 15000 rpm 49
5.1 แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ 52
5.2 ชุดทดสอบตัวควบคุมพีไอดีในห้องปฏิบัติการ 53
5.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน 53
5.4 บอร์ดขับเคลื่อนเชิงพาณิชย์ 54
5.5 ไอซีเบอร์ LM331N 56
5.6 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยไอซีเบอร์ LM331N 57
5.7 ไอซีเบอร์ 741 58
5.8 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟสด้วยไอซีเบอร์ 741 58
5.9 บอร์ด Arduino Mega 2560 59

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.10 โมดูลแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะล็อก MCP7425 60
5.11 ผลการควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ตัวควบคุมจากการออกแบบด้วย กฎของซีกเลอร์-นิโคลส์ที่ 5000 rpm 62
5.12 ผลการควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ตัวควบคุมจากการออกแบบด้วย กฎของซีกเลอร์-นิโคลส์ที่ 10000 rpm 62
5.13 ผลการควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ตัวควบคุมจากการออกแบบด้วย กฎของซีกเลอร์-นิโคลส์ที่ 15000 rpm 63
5.14 ผลการควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ตัวควบคุมจากการออกแบบด้วย กฎของซีกเลอร์-นิโคลส์ที่ 20000 rpm 63
5.15 ผลการควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ตัวควบคุมจากการออกแบบด้วย วิธีการแบบตาบูเชิงปรับตัวที่ 5000 rpm 64
5.16 ผลการควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ตัวควบคุมจากการออกแบบด้วย วิธีการแบบตาบูเชิงปรับตัวที่ 10000 rpm 64
5.17 ผลการควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ตัวควบคุมจากการออกแบบด้วย วิธีการแบบตาบูเชิงปรับตัวที่ 15000 rpm 65
5.18 ผลการควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ตัวควบคุมจากการออกแบบด้วย วิธีการแบบตาบูเชิงปรับตัวที่ 20000 rpm 65
5.19 การเปรียบเทียบสมรรถนะผลการควบคุมความเร็วรอบที่ 5000 rpm 66
5.20 การเปรียบเทียบสมรรถนะผลการควบคุมความเร็วรอบที่ 10000 rpm 66
5.21 การเปรียบเทียบสมรรถนะผลการควบคุมความเร็วรอบที่ 15000 rpm 67
5.22 การเปรียบเทียบสมรรถนะผลการควบคุมความเร็วรอบที่ 20000 rpm 67

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน (brushless direct current motor, BLDC) ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมอเตอร์ดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูง มีแรงบิดที่ความเร็วรอบสูง มีการตอบสนองทางพลวัตรวดเร็ว การบำรุงรักษาง่าย และมีอายุการใช้งานยาวนานกว่ามอเตอร์ประเภทอื่น ๆ เนื่องจากไม่มีแปรงถ่าน (V.K.S. Patel, A.K. Pandey, 2013) ด้วยเหตุผลที่กล่าวไว้ข้างต้นมอเตอร์ดังกล่าวจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลายภาคส่วน อาทิเช่น ยานยนต์ การบินและอวกาศ การขนส่ง การแพทย์ หรือแม้กระทั้งเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือน การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน จะอาศัยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นเอซี (DC/AC converter) เนื่องจากโครงสร้างภายในของมอเตอร์ดังกล่าวมีขดลวดจำนวน 3 ชุด ที่มีหน้าที่ในการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก ซึ่งเป็นหลักการที่ไม่ต้องอาศัยแปลงถ่าน หลักการดังกล่าวคล้ายกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสซิงโครนัส นั่นจึงเป็นเหตุผลให้การใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านจำเป็นต้องมีวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า (S.D. Souza, 2004; D. Liu, 2008; J. Carlos Gamazo Real, G. Jaime Gomez, 2015) การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านจะดำเนินการผ่านวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมได้ทั้งแบบวงเปิดหรือวงปิดขึ้นอยู่กับการใช้งานในลักษณะต่าง ๆ อย่างไรก็ตามการควบคุมแบบวงปิดจะสามารถทำให้ผู้ใช้งานสามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ได้แม้ว่าโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอ การออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านโดยใช้เทคนิคการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว เพื่อให้สามารถควบคุมความเร็วรอบโดยมีสมรรถนะที่ดี มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านเชิงพาณิชย์มักถูกขายพร้อมกับชุดควบคุม ซึ่งเปรียบเสมือนตัวขับเร้า (actuator) การประยุกต์ให้ชุดควบคุมสามารถทำงานแบบวงปิดโดยมีตัวควบคุมพีไอดี (PID controller) จำเป็นต้องมีการหาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์หรือแบบจำลองของระบบที่ศึกษา การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการตรงโดยใช้ทฤษฎีวงจรไฟฟ้าพื้นฐาน แต่เนื่องจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาที่มีทั้งมอเตอร์และชุดควบคุมส่งผลให้มีความซับซ้อนเป็นอย่างมากในการวิเคราะห์ลักษณะเชิงกายภาพ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อีกวิธีหนึ่งคือการใช้แบบจำลองกล่องดำ (Black-box model) หรือฟังก์ชันถ่ายโอนกล่องดำ (Black-box transfer

function) ซึ่งเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้จากโครงสร้างทั้งหมด กล่าวคือ แบบจำลองดังกล่าวจะต้องอธิบายพฤติกรรมผลการตอบสนองของทั้งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่ถูกขับเคลื่อนด้วยชุดควบคุมเชิงพาณิชย์ ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต ซึ่งข้อมูลที่นำมาใช้หาความสัมพันธ์ดังกล่าวมาจากการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ โดยการทดสอบจะอาศัยการควบคุมแบบวงเปิดเพื่อให้ได้ข้อมูลผลการตอบสนอง ฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวจะอยู่ในรูปเลขพหุนาม (polynomial number) งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้แบบจำลองกล่องดำในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสาม (3rd-order transfer function) ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันอินพุตและความเร็วเอาต์พุต (P. Khluabwannarat, A. Nawikavatan, 2020) โดยสามารถระบุค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่นำมาเป็นแบบจำลองได้ด้วยการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligent, AI)

เนื่องจากวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ได้รับความนิยมนำมาใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรมอย่างมาก ไม่เพียงแต่การระบุเอกลักษณ์เท่านั้น แต่ยังสามารถนำมาใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมได้เช่นกัน วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มีหลายวิธี เช่น วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (adaptive tabu search, ATS) (K. Chaijarurnudomrung, K-N. Areerak, K-L. Areerak, A. Srikaew, 2011; T. Sopapirm, K-N. Areerak, K-L. Areerak, A. Srikaew, 2011; J. Pakdeeto, R. Chanpittayagit, K-N. Areerak, K-L. Areerak, 2017) วิธีการค้นหาแบบจีนเนติก (genetic algorithm, GA) (H.M. Kojabadi, Q. Cao, L. Chang, M. Ghribi, A. Dupuis, 2015; B. Achiammal, R. Kayalvizhi, 2015) วิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (particle swarm optimization, PSO) (X. Li, M. Chen, Y. Tsutomu, 2013; E. Sahin, M.S. Ayas, I.H. Altas, 2014) และวิธีการผสมเกสรดอกไม้ (flower pollination algorithm) (D. Puangdownreong, 2017) เป็นต้น จากงานวิจัยในอดีตพบว่าวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ได้รับการพิสูจน์ด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์แล้วว่ามีการลู่เข้าหาคำตอบของปัญหา (convergence) ที่ดี (D. Puangdownreong, K-N. Areerak, S. Sujitjorn, T. Kulworawanichpong, 2009) งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสาม หลังจากได้ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสามของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา จึงได้พัฒนาต่อยอดโดยนำฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวมาประยุกต์สำหรับการออกแบบตัวควบคุม ตัวควบคุมที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้คือตัวควบคุมพีไอดี เนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่สามารถออกแบบให้ได้ผลการตอบสนองที่มีสมรรถนะที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอหรือพีดี (A. K. Srivastava, D. Kumar, S. M. Tripathi, P. K. Sen, 2012; S. Pati, M. Patnaik, A. Panda, 2014) แต่ก็เป็นตัวควบคุมที่มีความซับซ้อนในการออกแบบ ซึ่งวิธีการดั้งเดิมที่นำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีคือวิธีการของซีกเลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols Approach) แต่เพื่อให้ได้สมรรถนะผลการตอบสนองที่ดีที่สุดจึงได้มีการประยุกต์ใช้วิธีการ

ค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุด โดยจะทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของการออกแบบตัวควบคุมทั้งตัวควบคุมที่ได้จากวิธีการแบบดั้งเดิม และวิธีการที่นำเสนอผ่านการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB และผลจากชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษา ค้นคว้า และสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมวงเปิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์

1.2.2 เพื่อศึกษา ค้นคว้า และสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับการหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีไอดีของระบบควบคุมวงปิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์

1.2.3 เพื่อแสดงให้เห็นว่าการใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ในการออกแบบตัวควบคุมให้สมรรถนะที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม

1.2.4 เพื่อศึกษาและดำเนินการสร้างชุดทดสอบสำหรับใช้ยืนยันผลการวิเคราะห์การหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมของระบบควบคุมวงปิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์

1.2.5 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมรรถนะของการออกแบบตัวควบคุมโดยการใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์และวิธีการแบบดั้งเดิม

1.3 สมมติฐานการวิจัย

การออกแบบตัวควบคุมโดยใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์จะให้สมรรถนะผลการตอบสนองการควบคุมความเร็วรอบที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม

1.4 ขอบเขตงานวิจัยวิทยานิพนธ์

1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้แบบจำลองกล่องดำในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสามเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

1.4.2 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวและเปรียบเทียบสมรรถนะกับวิธีแบบดั้งเดิมจะอาศัยวิธีการของซีกเลอร์-นิโคลส์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5 ระเบียบวิธีวิจัย

ขั้นที่ 1 ศึกษาทบทวน รวบรวมข้อมูลพร้อมทั้งสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน การระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์และการออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

ขั้นที่ 2 ศึกษาและทำการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกล่องดำที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันอินพุตและความเร็วเอาต์พุตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

ขั้นที่ 3 ศึกษาและทำการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแบบดั้งเดิม และวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

ขั้นที่ 4 วิเคราะห์และเปรียบเทียบสมรรถนะของการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว โดยอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วย Simulink บนโปรแกรม MATLAB

ขั้นที่ 5 ดำเนินการสร้างชุดทดสอบสำหรับใช้ยืนยันผลการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีตัวควบคุมพีไอดี

ขั้นที่ 6 สรุปผลการศึกษา จัดทำข้อเสนอแนะ พร้อมทั้งจัดทำบทความทางวิชาการและรูปเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับหลักการทำงานเบื้องต้นของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

1.6.2 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้คือแบบจำลองกล่องดำที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสาม

1.6.3 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

1.6.4 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีไอดีของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

1.6.5 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการสร้างชุดทดสอบจริงเพื่อใช้ยืนยันผลการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

1.6.6 ได้บทความวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ระดับชาติ และ/หรือ นานาชาติ

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วย 6 บทซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนองานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังนี้

บทที่ 1 นำเสนอบทนำและภาพรวมของงานวิจัย สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไรแปรงถ่านโดยใช้เทคนิคการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว โดยกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหาการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน วัตถุประสงค์ที่ทำการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้นพร้อมทั้งกำหนดขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมทั้งประโยชน์ที่ผู้วิจัยคาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 นำเสนอปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน รวมถึงวิธีการในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

บทที่ 3 นำเสนอการหาแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (กรณียังไม่มีตัวควบคุม) โดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ในการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อยู่ในรูปของแบบจำลองกล่องดำ

บทที่ 4 นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน ด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและวิธีแบบตาบูเชิงปรับตัว โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากบทที่ 3 มาเป็นพื้นฐานในการออกแบบตัวควบคุม อีกทั้งยังมีการจำลองสถานการณ์การคงค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านเมื่อโหลดทางกลมีการเปลี่ยนแปลง

บทที่ 5 นำเสนอการสร้างชุดทดสอบจริงที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมสำหรับควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน และนำเสนอผลการทดสอบการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระหว่างวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและวิธีแบบตาบูเชิงปรับตัว โดยอาศัยสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมจากบทที่ 4

บทที่ 6 เป็นบทสรุปสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยได้นำเสนอผลลัพธ์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้

ภาคผนวกมีอยู่ 5 ส่วน ได้แก่ ภาคผนวก ก. แสดงพารามิเตอร์ของการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวที่ใช้ในการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ภาคผนวก ข. แสดงตารางการคำนวณโดยใช้กฎซีกเกลอร์-นิโคลส์ ภาคผนวก ค. แสดงคู่มือการใช้งานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์และไอซีเบอร์ LM331N ภาคผนวก ง. แสดงโปรแกรมภาษาซีที่ใช้สำหรับทดสอบเพื่อวิเคราะห์สมรรถนะตัวควบคุม

ความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน ภาคผนวก จ. แสดงผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพราะจะทำให้ทราบถึงแนวทางในการประยุกต์ใช้วิธีต่าง ๆ ซึ่งในอดีตที่ผ่านมางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ดังกล่าวมีทั้งวิธีการแบบดั้งเดิมและวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการหาแบบจำลองของมอเตอร์ฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน เนื้อหาในบทนี้จึงนำเสนอการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อ คือ งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน และงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

2.2 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

การออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเป็นพื้นฐาน ดังนั้นการศึกษาแนวทางการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิจารณาจึงมีความจำเป็น โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2001	Ljung, L.	บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับแบบจำลองกล่องดำ โดยกล่าวว่าแบบจำลองกล่องดำของระบบนั้นไม่ได้ใช้ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับลักษณะหรือความสัมพันธ์ทางกายภาพของระบบ แต่มาจากการพิจารณาอินพุตและเอาต์พุตในลักษณะการหาเส้นโค้งที่เหมาะสม (curve-fitting) แทนการสร้างแบบจำลอง ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวสามารถทำงานได้ครอบคลุมทั้งระบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นกล่าวคือสามารถทำงานในระบบที่มีความซับซ้อนได้
2011	Tibor, B., Fedák, V., and Durovský, F.	บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการหาแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน โดยพิจารณาจากพฤติกรรมของมอเตอร์ในระหว่างการคอมมิวเตชัน ปัจจัยที่สำคัญคือลักษณะแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคาดการณ์ค่าแรงบิดที่แม่นยำ ซึ่งกำหนดได้ด้วยสัญญาณในรูปของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back-EMF) ผ่านการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink
2016	Ridwan, M., Yuniarto, M. N., and Soedibyo.	บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน โดยอ้างอิงจากวงจรสมมูลของมอเตอร์ดังกล่าวแบบแม่นตรง ประกอบไปด้วยสมการทางกลและสมการทางไฟฟ้า โดยวิเคราะห์ในสภาวะไร้โหลดและสภาวะมีโหลด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2016	Mohankrishna, C., and Pandey, A.K.	บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการใช้แบบจำลองปริภูมิสถานะร่วมกับ MATLAB/Simulink ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพและผลตอบสนองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน
2017	Poovizhi, M., Kumaran, M. S., Ragul, P., Priyadarshini, L. I., and Logambal, R.	บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านด้วยการใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ภายใต้การควบคุมของเทคนิคการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (pulse width modulation PWM) แบบจำลองดังกล่าวถูกสร้างขึ้นจากการสังเกตลักษณะของความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน รวมถึงกระแสและแรงดันของอินเวอร์เตอร์
2017	Dasari, M., Reddy, A. S., and Kumar, M. V.	บทความนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้เหมาะสมและเกิดประโยชน์สูงสุดในการใช้งานอย่างแพร่หลายของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด โดยเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างวิธี ANFIS แบบดั้งเดิมกับวิธี GA-ANFIS โดยอยู่ภายใต้การวิเคราะห์แบบวงเปิดและวงปิด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2018	Zheng, Y., Cao, Z., and Wang, S.	บทความนี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบความไม่แน่นอนของผลตอบสองของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับหนึ่งและอันดับสองตามทฤษฎีกับผลการตอบสนองจากการทดลองเชิงปฏิบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน ทำให้ทราบว่าการพิจารณาลักษณะหรือพฤติกรรมของมอเตอร์ในขณะเกิดการคอมมิวเตชันเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีปัจจัยหลักขึ้นอยู่กับวงจรสมมูลของมอเตอร์ โดยวิธีที่ได้มาซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มาจากการพิจารณาลักษณะทางกายภาพที่ใช้หลักการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ไฟฟ้า รวมถึงวิเคราะห์ระบบเครื่องจักรกลไฟฟ้า แต่ถ้าระบบที่พิจารณามีความซับซ้อนหรือเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น การใช้หลักการดังกล่าวจะทำได้ยากและให้ผลการตอบสนองที่มีความคลาดเคลื่อน จึงมีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุตจึงถูกนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว อย่างไรก็ตามแบบจำลองประเภทนี้จะไม่สามารถระบุถึงลักษณะทางกายภาพของระบบที่พิจารณาได้ แต่สามารถให้ผลตอบสนองระหว่างอินพุตและเอาต์พุตที่มีความถูกต้อง ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุมได้

2.3 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

ตัวควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านสามารถออกแบบได้ทั้งวิธีแบบดั้งเดิมและวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ การปริทัศน์วรรณกรรมเพื่อให้เห็นถึงแนวโน้มงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2014	Hazari, M. R., Jahan, E., Siraj, M. E., Khan M. T. I., and Saleque, A. M.	บทความนี้นำเสนอการออกแบบอัลกอริทึมการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านอย่างง่ายโดยใช้คอนโทรลเลอร์อเนกประสงค์ การออกแบบดังกล่าวสามารถช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถกำหนดทิศทางการหมุนของมอเตอร์ได้ นั่นคือวงจรควบคุมที่ทำการออกแบบจะกำหนดทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสเตเตอร์ โดยอัลกอริทึมที่ออกแบบประกอบไปด้วย วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ ลอจิกเกต อุปกรณ์สวิตช์ชิ่ง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านและเซนเซอร์
2016	เฉลิมพล เรืองพัฒนาวิวัฒน์ และยุทธนา กันทะพะเยา	บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์โดยนำไปใช้กับจักรยานสามล้อไฟฟ้า อาศัยกระบวนการคอมมิวเตชันทางอิเล็กทรอนิกส์ของอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมการสับเปลี่ยนทิศทางของกระแสไฟฟ้าสำหรับกำหนดทิศทางการหมุนของมอเตอร์ และการปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2016	Sharma, A., Negi, H., and Punetha, D.	บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับแนวคิดการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน ผ่านเทคนิคการควบคุมแบบผสมระหว่างตัวควบคุม CMAC และตัวควบคุม PID เพื่อเสริมประสิทธิภาพตอนเริ่มเดินเครื่องและลดการสูญเสียในแกน (core loss)
2016	Sarala, P., Kodad, S. F., and Sarvesh, B.	บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการวิเคราะห์การควบคุมกระแสแบบวงปิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน โดยอาศัยการเปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเดิม ร่วมกับการใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อแสดงผลของการทดสอบการควบคุมแบบวงปิดที่ความเร็วรอบคงที่และความเร็วรอบที่ปรับค่าได้ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน
2020	Khluabwannarat, P., Nawikavatan, A., and Puangdownreong, D.	บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเชิงเศษส่วนสำหรับระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านด้วยขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้แบบขนาน เพื่อระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน และประยุกต์ใช้วิธีข้างต้นเพื่อออกแบบตัวควบคุม FOPID สำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2021	Beladjine, D. E., Boudana, D., Moualdia, A., Hallouz, M., and Wira, P.	บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านโดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้ตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิมกับการใช้ตัวควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียม โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink จำลองสถานการณ์

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน นิยมใช้วิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ เนื่องจากสามารถให้ผลการค้นหาตัวควบคุมที่ให้สมรรถนะของการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมความเร็วรอบที่ออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม

2.4 สรุป

การปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยในอดีตที่อธิบายไว้ข้างต้นได้นำเสนองานวิจัยตามลำดับปีที่พิมพ์ คณะผู้วิจัยและอธิบายสาระสำคัญของงานวิจัย พร้อมทั้งสรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องในแต่ละงานไว้พอสังเขป ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นแนวทางสำหรับการทำงานวิจัย จากข้อมูลงานวิจัยในอดีตส่งผลให้แนวทางงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้คือการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต เพื่อนำไปใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุม นอกจากนี้ยังได้ประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ในการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มาพร้อมกับชุดขับเคลื่อนที่มีขายตามท้องตลาด การดำเนินการหาแบบจำลองและการออกแบบตัวควบคุมจะได้อธิบายไว้ในบทถัดไป

บทที่ 3
การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

3.1 บทนำ

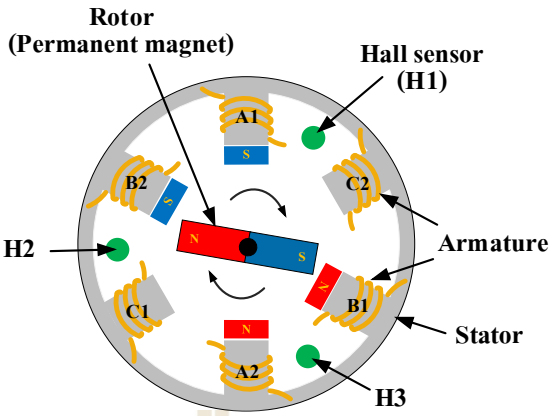
ในบทนี้นำเสนอวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว เพื่อประยุกต์ใช้ในการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อยู่ในรูปของแบบจำลองกล่องดำ โดยแบบจำลองดังกล่าวเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต ที่อยู่ในรูปของเลขเศษส่วนพหุนาม การค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองกล่องดำจะทำให้ได้แบบจำลองสำหรับนำไปใช้เพื่อออกแบบตัวควบคุมเป็นลำดับถัดไป สำหรับวิธีการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ซึ่งรายละเอียดของวิธีการดังกล่าวได้ถูกอธิบายไว้อย่างละเอียด นอกจากนี้รายละเอียดเกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านยังได้นำเสนอรายละเอียดไว้ในบทนี้เพื่อให้เข้าใจถึงโครงสร้าง หลักการทำงาน และการควบคุม

3.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านถูกกำหนดให้อยู่ในประเภทของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิดซิงโครนัสที่ถูกควบคุมโดยการคอมมิวเตชันทางอิเล็กทรอนิกส์ ตามมาตรฐาน NEMA MG7-1987 (M. Poovizhi, M. S. Kumaran, P. Ragul, L. I. Priyadarshini, R. Logambal, 2017) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านได้รับความนิยมและถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย เพื่อให้เหมาะสมกับงานในลักษณะต่าง ๆ เนื่องจากมอเตอร์ดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูง มีการตอบสนองทางพลวัตรวดเร็ว การบำรุงรักษาง่าย และมีอายุการใช้งานยาวนานกว่ามอเตอร์ประเภทอื่น ๆ รายละเอียดเกี่ยวกับการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน ได้นำเสนอไว้ดังต่อไปนี้

3.2.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน คือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิดซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร โครงสร้างภายในของมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1

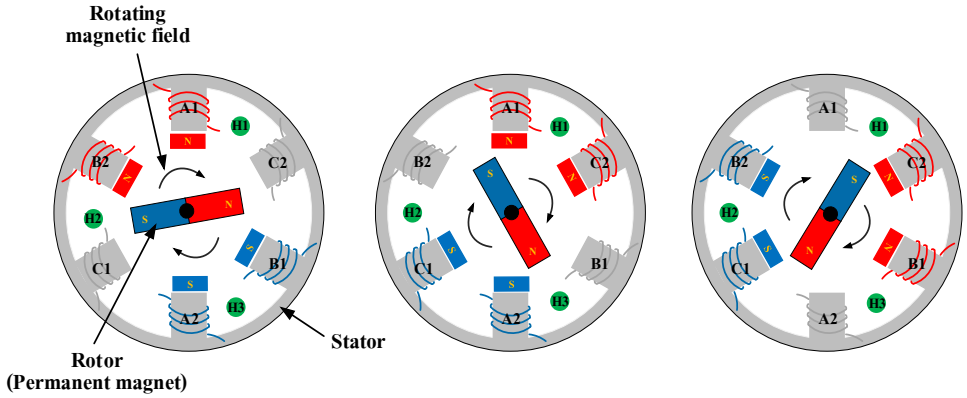


รูปที่ 3.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

พิจารณาจากรูปที่ 3.1 พบว่ามีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนดังนี้ ส่วนที่หนึ่ง เป็นส่วนที่อยู่กับที่หรือที่เรียกว่า สเตเตอร์ (stator) มีขดลวดอาร์เมเจอร์พันอยู่และเชื่อมต่อเข้ากับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าทางอิเล็กทรอนิกส์เพื่อกำหนดจังหวะการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวดดังกล่าวเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุน ส่วนที่สอง คือส่วนหมุนหรือที่เรียกว่า โรเตอร์ (rotor) โดยโรเตอร์จะมีลักษณะเป็นขั้วแม่เหล็กถาวร การทำงานในส่วนนนี้จะสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กหมุนที่ถูกสร้างมาจากกระแสที่ไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ กล่าวคือเกิดแรงผลักและแรงดูดของขั้วแม่เหล็กวนไปแต่ละชุดขดลวดตามลักษณะของสนามแม่เหล็กหมุน ส่วนที่สาม คือตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์หรือที่เรียกว่า ตัวตรวจจับฮอลล์ (hall sensor) จำนวน 3 ตัว ติดตั้งห่างกัน 120 องศา ตัวตรวจจับฮอลล์จะทำงานเมื่อโรเตอร์หมุนโดยตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์และสังสัญญาณให้วงจรควบคุมเป็นสัญญาณลอจิก เพื่อให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเกิดลำดับการสับเปลี่ยนทางอิเล็กทรอนิกส์หรือที่เรียกว่า การคอมมิวเตชันทางอิเล็กทรอนิกส์ ส่งผลให้สามารถควบคุมทิศทางและความเร็วรอบของมอเตอร์ได้

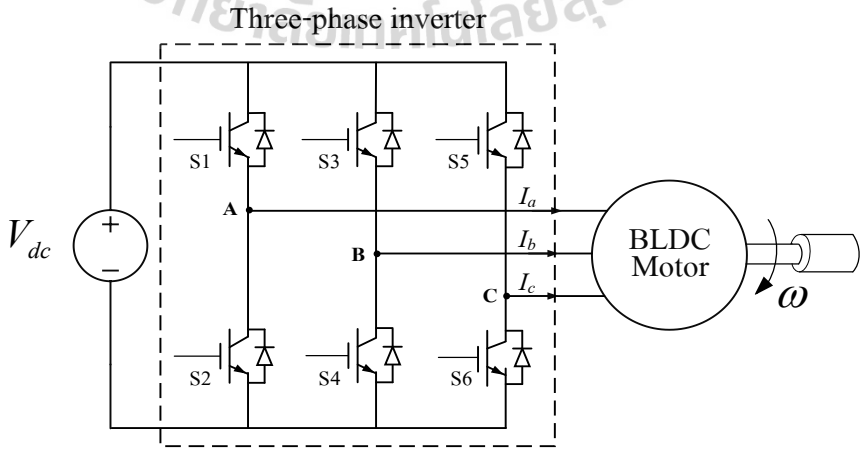
3.2.2 หลักการทำงานและวิธีการควบคุมความเร็วรอบ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านถูกพัฒนามาจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน โดยอาศัยกระบวนการคอมมิวเตชันแบบอิเล็กทรอนิกส์ ในการควบคุมการไหลของกระแสในขดลวดแทนการคอมมิวเตชันทางกลเพื่อลดปัญหาการเสียดสีที่ทำให้เกิดความร้อน การสึกหรอ และการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า หลักการขับเคลื่อนของมอเตอร์จะตั้งอยู่บนพื้นฐานของแรงดึงดูด (attraction) หรือแรงผลัก (repulsion) ระหว่างขั้วแม่เหล็กเช่นเดียวกันกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับซิงโครนัส ซึ่งจะใช้ขดลวดสเตเตอร์ 2 ชุดในการทำงานต่อครั้งเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กสับเปลี่ยนกัน แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 หลักการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

พิจารณาจากรูปที่ 3.2 การทำงานจะเริ่มเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดสเตเตอร์ชุดแรก นั่นคือ A1 และ B2 และสร้างขั้วแม่เหล็กเพื่อดึงดูดขั้วแม่เหล็กถาวรขั้วตรงข้ามที่อยู่ในส่วนของโรเตอร์ ส่งผลทำให้โรเตอร์เกิดการเคลื่อนที่ เมื่อกระแสเลื่อนไปที่ชุดขดลวดที่อยู่ถัดไป (A1 และ C2) อย่างต่อเนื่องจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ตามลำดับการเปลี่ยนแปลงของขดลวดแต่ละชุด ทำให้โรเตอร์มีการเคลื่อนที่ตามการหมุนของสนามแม่เหล็กหมุน โดยตำแหน่งสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์จะถูกตรวจจับสัญญาณด้วยตัวตรวจจับฮอลล์ทั้ง 3 ตัว (H_1 H_2 และ H_3) ที่อยู่บริเวณสเตเตอร์ เพื่อนำไปสร้างชุดตัวเลข 3 หลักที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละ 60 องศาของการหมุน สัญญาณดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการกำหนดจังหวะเวลาการขับ (drive timing) ของสวิตช์ในวงจรแปรงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นเอซี แผนภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

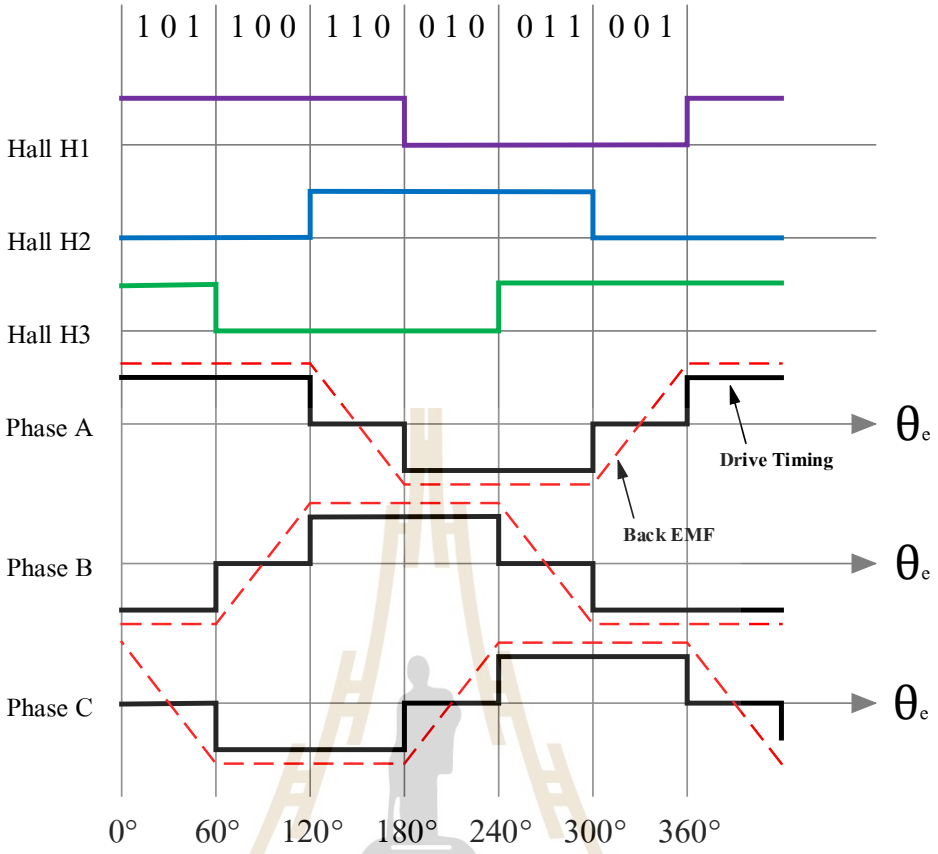
จากรูปที่ 3.3 พบว่าวงจรที่นำมาใช้สำหรับควบคุมเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟส มีสวิตช์ทั้งหมด 6 ตัว ซึ่งในการนำมาใช้งานกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านจำเป็นต้องมีการกำหนดจังหวะการทำงานของสวิตช์แต่ละตัวตามหลักการคอมมิวเตชัน สามารถแสดงลำดับการคอมมิวเตชันได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ลำดับการคอมมิวเตชัน

องศาของการหมุน (θ_e)	**สัญญาณตัวตรวจจับฮอลล์**			**กระแสเฟสในขดลวด**			**สวิตช์ปิด**	
	H_1	H_2	H_3	I_a	I_b	I_c		
$0^\circ - 60^\circ$	1	0	1	+	-	off	S1	S4
$60^\circ - 120^\circ$	1	0	0	+	off	-	S1	S6
$120^\circ - 180^\circ$	1	1	0	off	+	-	S3	S6
$180^\circ - 240^\circ$	0	1	0	-	+	off	S3	S2
$240^\circ - 300^\circ$	0	1	1	-	off	+	S5	S2
$300^\circ - 360^\circ$	0	0	1	off	-	+	S5	S4

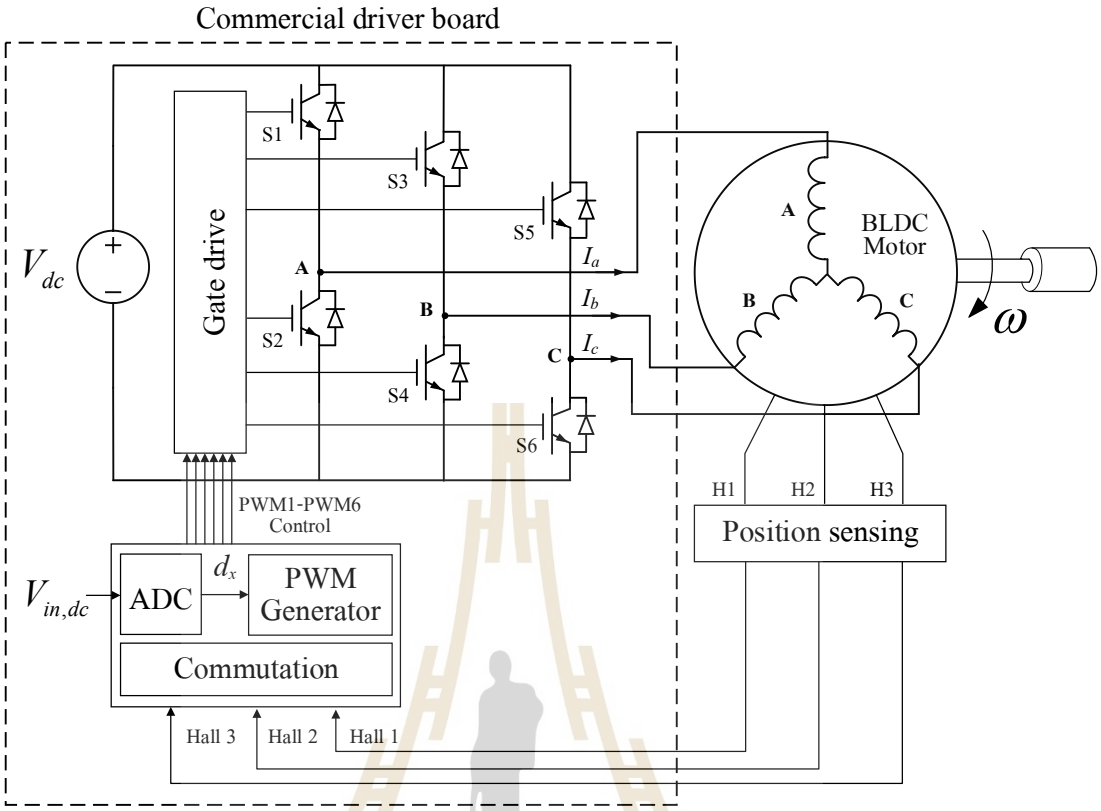
จากตารางที่ 3.1 พบว่าการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน จะปรากฏตัวเลขดิจิตอล 3 หลักจำนวน 6 ชุด สามารถแบ่งจังหวะการทำงานของมอเตอร์ได้เป็น 6 โหมดตามการทำงานของสวิตช์ ซึ่งจะเป็นการควบคุมให้มอเตอร์หมุนได้ครบ 1 รอบ อย่างไรก็ตามในขณะที่มอเตอร์หมุนจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back EMF) เหมือนกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ (D. Liu, 2008) โดยสามารถแสดงรายละเอียดสัญญาณจากตัวตรวจจับฮอลล์ จังหวะการขับเร้า และค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับในแต่ละโหมดการทำงานได้ดังรูปที่ 3.4

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



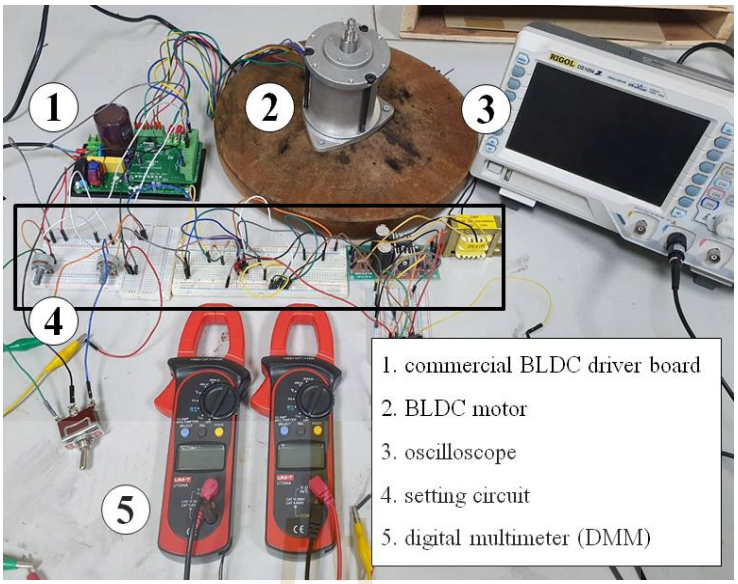
รูปที่ 3.4 สัญญาณการคอมมิวเตชันของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

รูปสัญญาณจากตัวตรวจจับฮอลล์ จังหวะเวลาขับเร้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ ในรูปที่ 3.4 เกิดจากหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน ที่มีลักษณะคล้ายกับมอเตอร์ซิงโครนัสสามเฟส โดยทั่วไปการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านจะมีชุดบอร์ดขับเคลื่อน ที่มีอุปกรณ์สวิตช์ที่เชื่อมต่อเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ให้เป็นที่เรียบร้อย โดยอุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าวจะถูกขับด้วยสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM1-PWM6) ที่สร้างขึ้นโดยอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM Generator) และวงจรขับเกท (gate drive) ซึ่งแผนภาพการต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในบอร์ดขับเคลื่อนกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านเชิงพาณิชย์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แผนภาพมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดบอร์ดขับเคลื่อน

พิจารณาจากรูปที่ 3.5 อินพุตของวงจรสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มเป็นสัญญาณควบคุมความเร็วรอบ (d_x) ซึ่งจะถูกปรับเปลี่ยนตามแรงดันแอนะล็อก ($V_{in,dc}$) ที่ป้อนให้กับชุดบอร์ดขับเคลื่อน ดังนั้นชุดบอร์ดขับเคลื่อนจึงมีพฤติกรรมเป็นตัวขับเร้าเปรียบเสมือนการควบคุมความเร็วรอบแบบวงเปิดสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านเชิงพาณิชย์ สามารถแสดงการเชื่อมต่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านพร้อมชุดบอร์ดขับเคลื่อนได้ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งมีผลการควบคุมแบบวงเปิดแสดงได้ดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.6 ชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ

จากรูปที่ 3.6 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่นำมาใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้คือมอเตอร์รุ่น Ø72-201105-220 ของบริษัท Beijing Electechnic พิกัดความเร็วรอบเท่ากับ 23000 rpm โดยในงานวิจัยจะทดสอบที่ความเร็วรอบประมาณ 85% ของความเร็วรอบพิกัดนั่นคือที่ความเร็วรอบ 20000 rpm

ตารางที่ 3.2 ผลการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดบอร์ดเชิงพาณิชย์

แรงดันไฟฟ้า ($V_{in,dc}$)	0.38	0.74	1.11	1.47	1.84	2.20	2.57	2.92	3.27	3.68
ความเร็วรอบ (rpm)	2000	4000	6000	8000	1000	12000	14000	16000	18000	20000

จากตารางที่ 3.2 พบว่าเป็นการควบคุมความเร็วรอบแบบวงเปิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดบอร์ดเชิงพาณิชย์ ซึ่งหากโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ไม่สามารถคงค่าความเร็วรอบให้คงที่ได้ เพื่อให้สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ดังกล่าวได้แม้โหลดมีการเปลี่ยนแปลง จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบตัวควบคุมวงปิด ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอตัวควบคุมพีไอดี โดยจะทำการออกแบบตัวควบคุมผ่านแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านพร้อมชุดบอร์ดเชิงพาณิชย์ รายละเอียดเกี่ยวกับแบบจำลองได้นำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป

3.2.3 แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

การศึกษางานวิจัยในอดีตพบว่า แนวทางการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านแบ่งออกเป็น 2 แนวทางนั่นคือวิธีการตรงที่ใช้ทฤษฎีพื้นฐานทางไฟฟ้าร่วมกับการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า อย่างไรก็ตามเมื่อมีการใช้งานมอเตอร์ดังกล่าวร่วมกับชุดบอร์ดควบคุมเชิงพาณิชย์พบว่ามีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกนำเสนอการหาแบบจำลองโดยอาศัยแบบจำลองกล่องดำในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสาม (D. Puangdownreong, P. Khluabwannarat, A. Nawikavatan, 2020) เนื่องจากแบบจำลองโดยทั่วไปของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน จะอยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองและบอร์ดขับเคลื่อนสามารถประมาณได้โดยใช้แบบจำลองอันดับหนึ่ง แบบจำลองดังกล่าวจะอยู่ในรูปของอัตราส่วนระหว่างความเร็วรอบ (ω) และแรงดันอินพุต $(V_{in,dc})$ แสดงดังสมการที่ (3-1)

$$G(s)=\frac{\omega(s)}{V_{in,dc}(s)}=\frac{a_0}{b_3s^3+b_2s^2+b_1s+b_0} \tag{3-1}$$

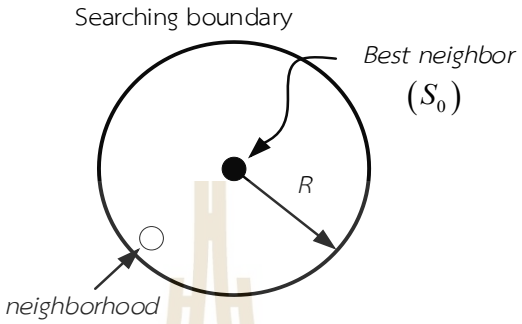
จากสมการที่ (3-1) จะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ปรากฏอยู่ในแบบจำลอง (a_0, b_3, b_2, b_1 และ b_0) เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ไม่สามารถอธิบายความหมายเชิงกายภาพของระบบได้ อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถให้ผลการตอบสนองที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นการหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ซึ่งจะนำเสนอรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

3.3 การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวเป็นหนึ่งในวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย (D. Puangdownreong, K-N. Areerak, A. Srikaew, S. Sujitjorn, P. Totarong, 2002) อัลกอริทึมดังกล่าวถูกพัฒนามาจากการค้นหาตาบูแบบดั้งเดิม (Tabu Search : TS) มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบให้ดีขึ้น ทั้งความรวดเร็วในการค้นหาคำตอบและความถูกต้องในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง โดยได้มีการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์แล้วว่าวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวสามารถลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง (global solution) ซึ่งหลุดจากคำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะถิ่น (local solution) ได้ อัลกอริทึมนี้ถูกพัฒนาโดยการเพิ่ม 2 กลไกนั่นคือ การเดินย้อนรอย (back tracking) และการปรับลดรัศมีการค้นหา (adaptive radius) มีขั้นตอนการประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว สามารถแสดงดังต่อไปนี้

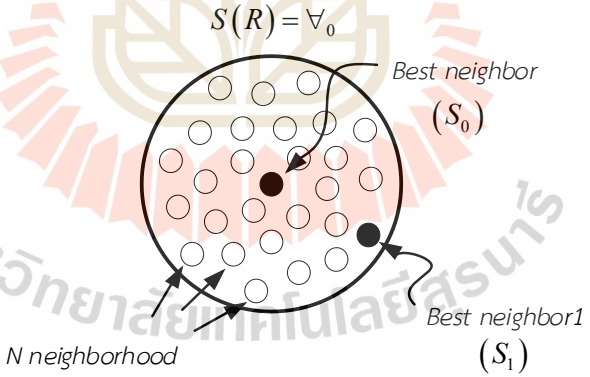
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดขอบเขตการค้นหา รัศมีการค้นหา และจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา

ขั้นตอนที่ 2 ทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้นภายใต้ขอบเขตของการค้นหาโดยกำหนดเป็น S_0 และให้เป็นคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นแสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 สุ่มค่า S_0 ภายใต้ขอบเขตการค้นหา

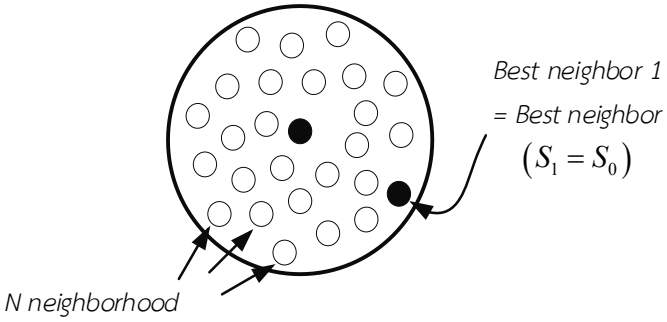
ขั้นตอนที่ 3 สุ่มเลือกคำตอบจำนวน N คำตอบรอบ ๆ S_0 ภายใต้รัศมีของขอบเขตการค้นหา R และกำหนด $S(R)$ ให้เป็นคำตอบรอบข้าง N คำตอบแสดงดังรูปที่ 3.8



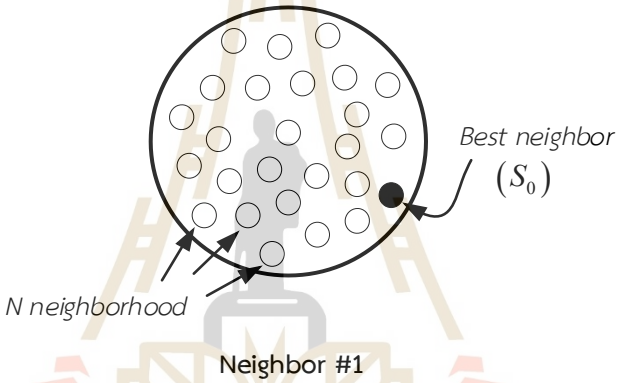
รูปที่ 3.8 คำตอบรอบข้าง S_0

ขั้นตอนที่ 4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของระบบจะทำการประเมินคำตอบของแต่ละสมาชิกในเซ็ต $S(R)$ โดยมี S_1 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดในเซ็ตดังกล่าว

ขั้นตอนที่ 5 ถ้า $S_1 > S_0$ จำกำหนดให้ $S_1 = S_0$ และเก็บค่าในรายการตาบูแสดงดังรูปที่ 3.9 และ 3.10



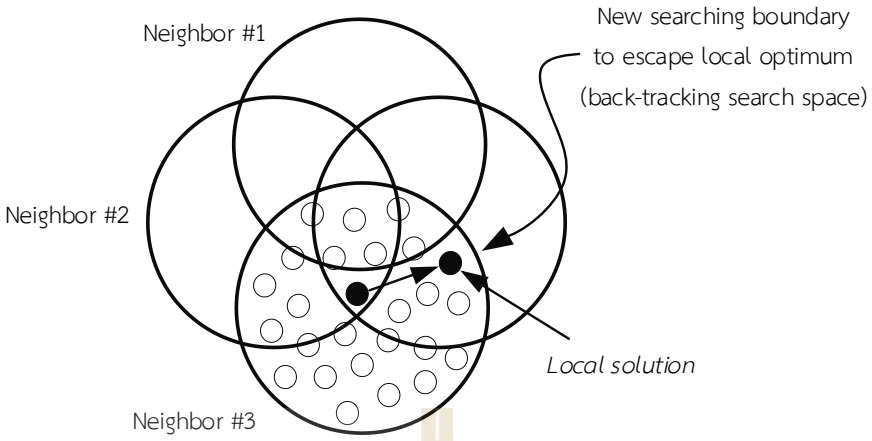
รูปที่ 3.9 กำหนดค่าคำตอบรอบข้างใหม่



รูปที่ 3.10 กำหนดค่า S_0 ใหม่

ขั้นตอนที่ 6 ถ้าจำนวนรอบของการค้นหาน้อยกว่าจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหานั่นคือ $round < round_{max}$ จะหยุดกระบวนการค้นหา โดยค่า S_0 จะเป็นคำตอบที่ดีที่สุด มิเช่นนั้นจะกลับไปสู้ขั้นตอนที่ 3 และเริ่มกระบวนการใหม่จนกระทั่งได้คำตอบที่พึงพอใจ

ขั้นตอนที่ 7 กระบวนการเดินย้อนรอยจะเกิดขึ้นเมื่อจำนวนคำตอบในแต่ละรอบไม่หลุดออกจากคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นเป็นจำนวนเท่ากับจำนวนคำตอบสูงสุดที่กำหนดไว้ กลไกนี้จะเลือกคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการค้นหาในขอบเขตการค้นหาเดิมในรายการตาบู เพื่อนำมากำหนดเป็นคำตอบเริ่มต้นสำหรับการค้นหาในรอบถัดไป เพื่อให้หลุดออกจากคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 กลไกการเดินย้อนรอย

ขั้นตอนที่ 8 กลไกการปรับลดรัศมีการค้นหาจะปรับลดรัศมีลงเรื่อย ๆ ตามความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ (3-2)

$$radius_{new} = \frac{radius_{old}}{DF} \tag{3-2}$$

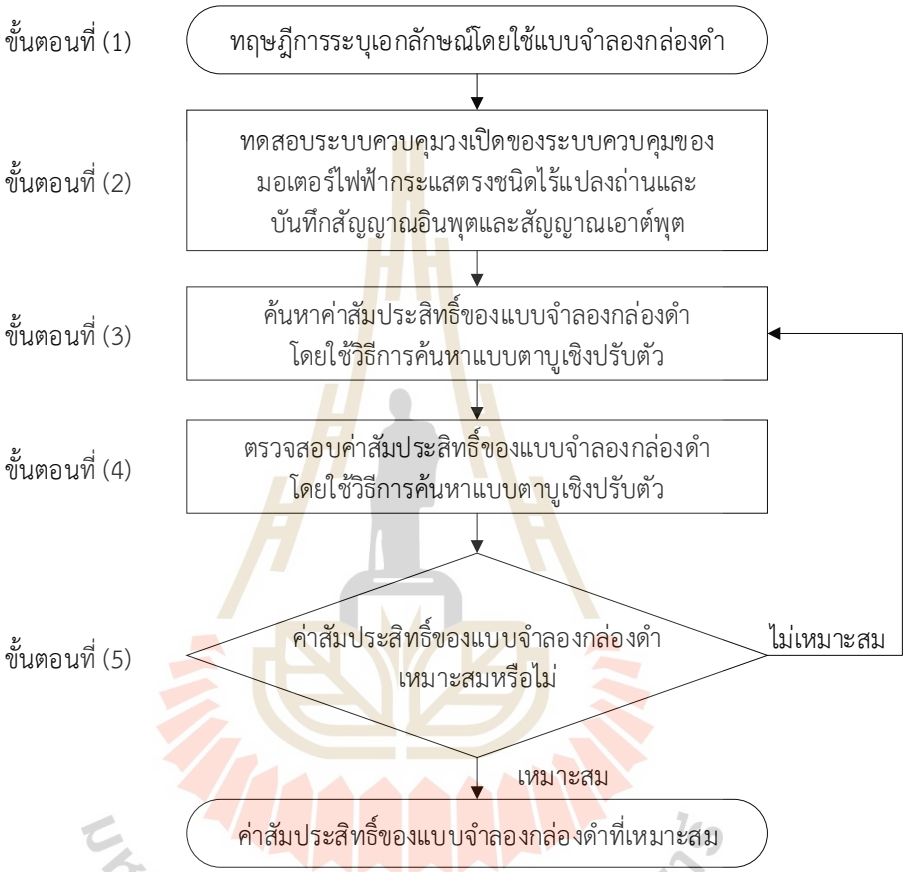
โดย DF คือ อัตราการปรับลดรัศมี

การศึกษาขั้นตอนการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวได้ทำให้มีความเข้าใจในการนำวิธีการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้สำหรับหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกล่องดำดังสมการที่ (3-1) ซึ่งจะได้นำเสนอรายละเอียดไว้ในหัวข้อถัดไป

3.4 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกล่องดำด้วยการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

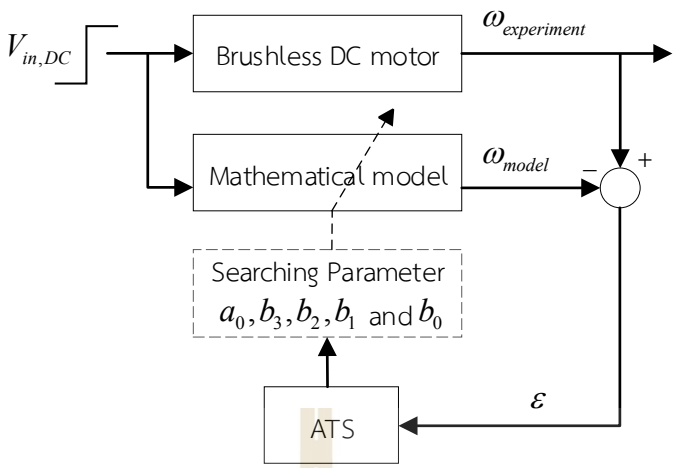
หัวข้อนี้นำเสนอการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดบอร์ดควบคุมเชิงพาณิชย์ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้แบบจำลองกล่องดำที่เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสาม ทั้งนี้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวจะมีค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าอยู่ 5 ตัว ได้แก่ a_0, b_3, b_2, b_1 และ b_0 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่นำเสนอนี้จะอาศัยการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวที่มีการอธิบายขั้นตอนการค้นหาไว้แล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ในลำดับถัดมาเป็นการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหา โดยจะกำหนดให้ผลตอบสนองความเร็วรอบจากชุด

ทดสอบจริงที่ค่าแรงดันอินพุตต่าง ๆ เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหา ส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ที่จะได้จากการระบุเอกลักษณ์สามารถอธิบายพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและความเร็วรอบที่เป็นเอาต์พุตได้อย่างถูกต้อง ขั้นตอนการดำเนินงานในการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกล่องดำสามารถแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการดำเนินงานในการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกล่องดำ

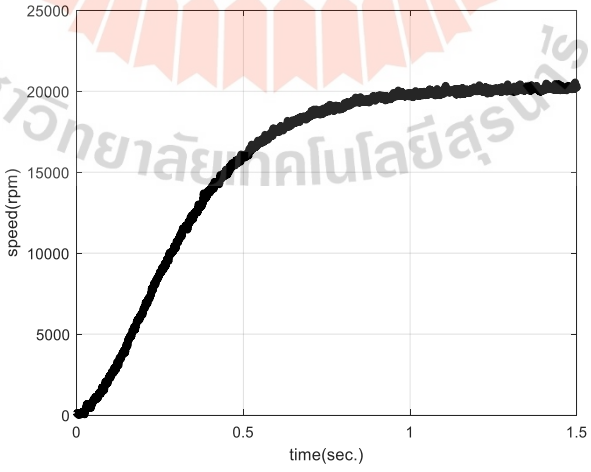
แบบจำลองกล่องดำที่ได้นำเสนอข้างต้นเป็นแบบจำลองวงเปิดของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.5 ซึ่งประกอบไปด้วย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน และชุดควบคุมมอเตอร์ เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองดังกล่าวจึงได้อาศัยการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ซึ่งไดอะแกรมในการค้นหาค่าพารามิเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แผนภาพการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกล่องดำ
ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

พิจารณาจากรูปที่ 3.13 ขั้นตอนในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกล่องดำสามารถอธิบายได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง $V_{in,dc}$ เพื่อจ่ายให้ชุดควบคุมของมอเตอร์ให้หมุนที่ความเร็วรอบ 20000 rpm ซึ่งมีค่า $V_{in,dc}$ เท่ากับ 3.7 โวลต์ โดยผลการตอบสนองแสดงได้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ผลการตอบสนองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง $V_{in,dc}$ เท่ากับ 3.7 โวลต์

ขั้นตอนที่ 2 นำแบบจำลองกล่องดำที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสาม แสดงดังสมการที่ (3-1) โดยได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.2.3 มาพิจารณาหาค่าผลการตอบสนองจากความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต

ขั้นตอนที่ 3 ดำเนินการค้นหาค่าพารามิเตอร์ โดยนำค่าความคาดเคลื่อน (ε) ของการเปรียบเทียบระหว่างค่าผลตอบสนองความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านกับค่าผลตอบสนองความเร็วที่ได้จากแบบจำลองเข้าสู่กระบวนการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว แสดงได้ดังสมการที่ (3-3)

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\Sigma error^2}{n}} \tag{3-3}$$

โดย $error$ คำนวณได้จาก $\left|\omega_{experiment} - \omega_{model}\right|$ และ n คือ จำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 4 กระบวนของการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวจะมีลักษณะการทำงานวนซ้ำตามจำนวนรอบที่กำหนดไว้ แต่ถ้าเจอคำตอบที่ดีที่สุดอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวจะหยุดการทำงาน และให้คำตอบเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ผลตอบสนองของแบบจำลองกล่องดำมีค่าใกล้เคียงกับผลตอบสนองที่ได้จากการทดลองมากที่สุดซึ่งถือเป็นคำตอบของกระบวนการค้นหา ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกล่องดำด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว จำเป็นต้องมีการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าว เพื่อให้การค้นหามีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวจะประกอบไปด้วยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ 4 ค่าได้แก่ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง รัศมีการค้นหา และอัตราปรับบลดรัศมี ถ้าพารามิเตอร์ดังกล่าวมีความเหมาะสมจะส่งผลให้กระบวนการในการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยรายละเอียดของการทดสอบค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 สามารถดูได้จากภาคผนวก ก. ตารางที่ (ก.1-ก.4) ซึ่งเป็นการทดลองสุ่มค่าที่ให้ผลการค้นหามีค่า ε น้อยที่สุด

จากการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวในภาคผนวก ก. พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่า ε เฉลี่ยที่น้อยที่สุดสามารถแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

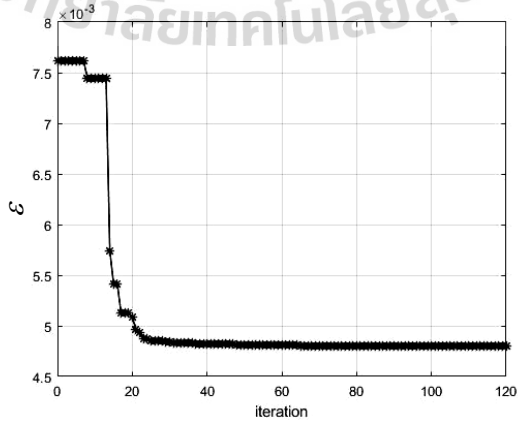
พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
จำนวนคำตอบเริ่มต้น (Initial number of neighbor)	150
จำนวนคำตอบรอบข้าง (Number of neighbor)	250
รัศมีการค้นหา (Radius)	30
อัตราการปรับลดรัศมี (Decreasing factor : DF)	1.08

ผลจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ในตารางที่ (3.3) ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกล่องดำแบบวงเปิดแสดงดังตารางที่ (3.4) และสามารถเขียนเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสามดังสมการที่ (3-4) นอกจากนี้ผลการลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดของการค้นหาค่าพารามิเตอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.15

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกล่องดำโดยการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

พารามิเตอร์	ค่าที่ได้
a_0	0.2059 x 10^8
b_3	0.0597
b_2	31.2477
b_1	364.4712
b_0	1069.9862

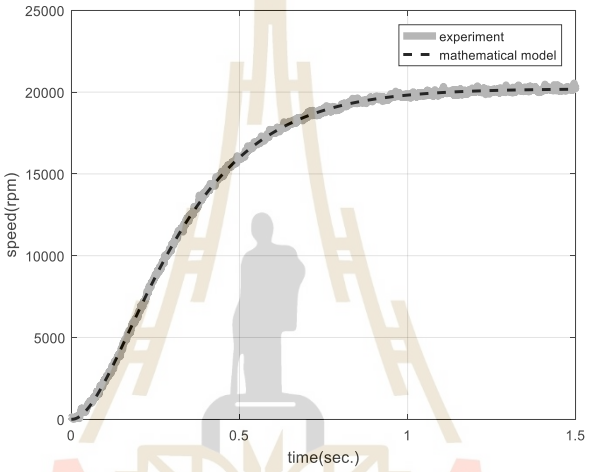
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.15 การลู่เข้าหาคำตอบ ε ที่เหมาะสมที่สุดของการค้นหาค่าพารามิเตอร์

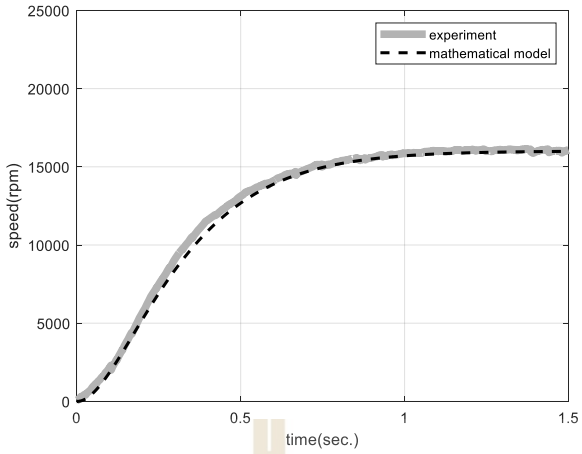
$$G(s) = \frac{0.2059 \times 10^8}{0.0597s^3 + 31.2477s^2 + 364.4712s + 1069.9862} \quad (3\text{-}4)$$

การตรวจสอบความถูกต้องของผลการระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว จะอาศัยวิธีการเปรียบเทียบระหว่างระหว่างผลที่ได้จากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวและผลการทดสอบจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่ความเร็วรอบ 20000 rpm ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.16

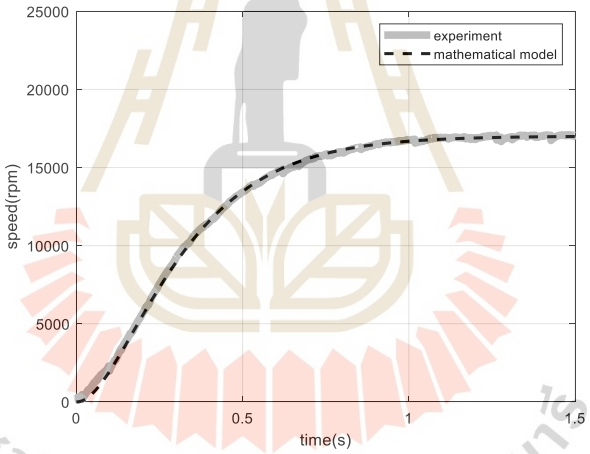


รูปที่ 3.16 การตรวจสอบความถูกต้องของการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวที่ความเร็วรอบ 20000 rpm

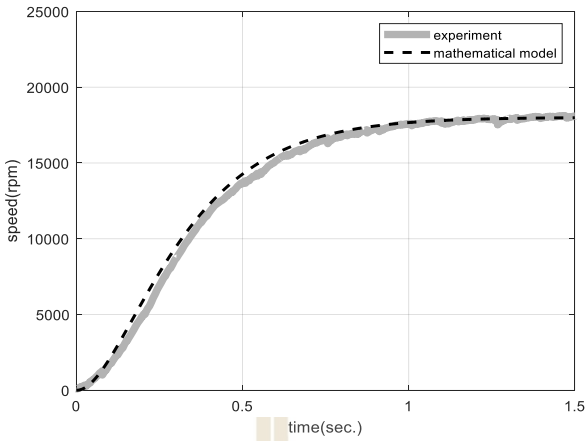
เพื่อยืนยันผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกล่องดำที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ การเปรียบเทียบผลตอบสนองที่ความเร็วรอบ 16000 17000 18000 และ 19000 rpm แสดงได้ดังรูปที่ 3.17 ถึง 3.20 ตามลำดับซึ่งความเร็วรอบดังกล่าวไม่ใช่ผลการทดสอบที่นำมาใช้ในกระบวนการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง



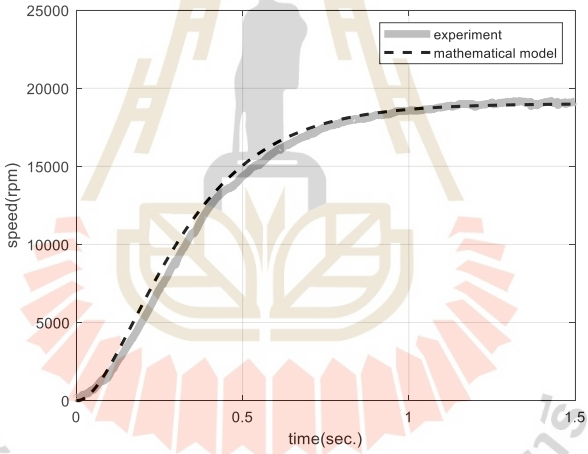
รูปที่ 3.17 การตรวจสอบความถูกต้องของการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ที่ความเร็วรอบ 16000 rpm



รูปที่ 3.18 การตรวจสอบความถูกต้องของการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ที่ความเร็วรอบ 17000 rpm



รูปที่ 3.19 การตรวจสอบความถูกต้องของการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ที่ความเร็วรอบ 18000 rpm



รูปที่ 3.20 การตรวจสอบความถูกต้องของการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ที่ความเร็วรอบ 19000 rpm

พิจารณาจากรูปที่ 3.16 จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของความเร็วรอบที่ได้จากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวและผลการทดสอบจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน มีลักษณะรูปสัญญาณที่สอดคล้องกันทั้งในสภาวะชั่วครู่และสภาวะอยู่ตัว ยิ่งไปกว่านั้นแม้ว่าข้อมูลที่นำมาใช้ในการยืนยันผลการตอบสนองในรูปที่ 3.17 ถึง 3.20 ไม่ได้เป็นข้อมูลสำหรับการระบุเอกลักษณ์ แต่เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองก็ยังคงมีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ ทั้งนี้ผลการตอบสนองในรูปที่ 3.17 ถึง 3.20 ยังคงปรากฏความคลาดเคลื่อนอยู่เล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบที่พิจารณา ดังนั้นแบบจำลองกล่องดำที่ได้นำเสนอในงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ที่ได้มีการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว จึงเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้องสามารถนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมได้ รายละเอียดการออกแบบตัวควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดบอร์เชิงพาณิชย์จะได้กล่าวรายละเอียดไว้ในบทถัดไป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ได้ดำเนินการแล้วในหัวข้อนี้ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติจำนวน 1 บทความ และได้รับการตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติจำนวน 1 บทความ โดยจะแสดงบทความฉบับสมบูรณ์ไว้ในภาคผนวก จ. ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Chaicharoenaudomrung, K., Wansungnoen, S., Pakdeeto, J., Areerak, K-N. and Areerak, K-L. (2021) Parameter Identification of BLDC Motor by using Adaptive Tabu Search. **2021 International Conference on Power, Energy and Innovation (ICPEI 2021)**. : 5-8

รัฐพล โพธิ์สังข์, จักรกริช ภักดีโต, ศรุตา หวานสูงเนิน, กองพัน อารีรักษ์ และกองพล อารีรักษ์. การระบุเอกลักษณ์แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี** ปีที่ 16 ฉบับที่ 3 ประจำเดือนกรกฎาคม - กันยายน 2566.

3.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 3 ได้อธิบายเกี่ยวกับโครงสร้าง และหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน โดยโครงสร้างของมอตอร์จะประกอบไปด้วย 3 ส่วนสำคัญได้แก่ ส่วนที่หนึ่ง สเตเตอร์ที่มีขดลวดอาร์เมอเจอร์พันอยู่และเชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ส่วนที่สองโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร และส่วนที่สาม ตัวตรวจจับฮอลล์ มีหน้าที่ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์และส่งสัญญาณให้วงจรควบคุมเป็นสัญญาณลอจิกเพื่อให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดการควบคุมทิศทางและความเร็วรอบของมอเตอร์ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอแบบจำลองกล่องดำของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ผลการระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองสามารถยืนยันได้จากการเปรียบเทียบผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองและผลตอบสนองจากการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านในห้องปฏิบัติการ โดยแบบจำลองที่ได้ดังกล่าวสามารถอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้องสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ในอนาคต

บทที่ 4
การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

4.1 บทนำ

บทที่ผ่านมาได้นำเสนอแบบจำลองกล่องดำของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสาม โดยมีการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ผลตอบสนองความเร็วที่ได้จากแบบจำลองที่นำเสนอมีความถูกต้องทั้งสภาวะชั่วครู่และสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นแบบจำลองจึงมีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุม เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการดำเนินการต่อยอดเพื่อสร้างตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน การออกแบบตัวควบคุมในบทนี้ประกอบไปด้วย 2 วิธี ได้แก่ การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีแบบดั้งเดิมโดยใช้กฎซีกเลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols) และการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ค่าตัวควบคุมที่ได้จากบทนี้จะถูกนำไปใช้สำหรับชุดทดสอบจริงเป็นลำดับถัดไป

4.2 ตัวควบคุมพีไอดี

ตัวควบคุมพีไอดี เป็นตัวควบคุมที่ใช้ในระบบวงปิดที่มีการป้อนกลับ ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่ได้มาจากผลต่างระหว่างค่าอ้างอิงและค่าเอาต์พุตของกระบวนการ ตัวควบคุมพีไอดีได้รับการเสนอครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1922 โดยมินอร์สกี (N. Minorsky, 1992) ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างกว้างขวางในระบบควบคุมของงานอุตสาหกรรม โดยตัวควบคุมพีไอดีประกอบไปด้วย 3 องค์ประกอบได้แก่ องค์ประกอบการปรับสัดส่วน (proportional) องค์ประกอบการปริพันธ์ (intrgral) และองค์ประกอบการอนุพันธ์ (derivative) (K-N. Areerak, 2017) ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมพีไอดีสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4-1)

$$G_C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \tag{4-1}$$

โดย K_P คือ อัตราขยายเชิงปรับส่วน (proportional gain)

K_I คือ อัตราขยายเชิงปริพันธ์ (integral gain)

K_D คือ อัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (derivative gain)

สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ตัวควบคุมพีไอดีที่จะถูกนำไปใช้สำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตามในขั้นแรกจะพิจารณาผลการควบคุมจากการจำลองสถานการณ์ด้วยบล็อก Simulink บนโปรแกรม MATLAB ทั้งวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีแบบดั้งเดิมโดยใช้กฎซีกเลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols) และการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิง โดยรายละเอียดของการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 2 วิธีจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

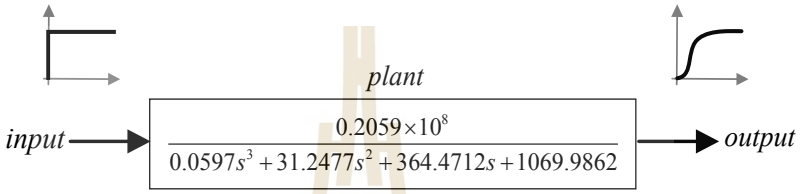
4.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยกฎซีกเลอร์-นิโคลส์

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีโดยอาศัยการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยกฎซีกเลอร์-นิโคลส์ แนวทางการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการดังกล่าวจะอาศัยเพียงแค่ผลการตอบสนองจริงของระบบที่ไม่ต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมพีไอดีสามารถพิจารณาจากสมการที่ (4-1) และเมื่อกำหนดให้ $K_I = \frac{K_P}{T_i}$ และ $K_D = K_P T_d$ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4-2) วิธีการออกแบบด้วยกฎซีกเลอร์-นิโคลส์ถือว่ามีความสะดวกและเหมาะสมกับระบบควบคุมที่มีความซับซ้อนในทางปฏิบัติ

$$G_C(s) = K_P + \frac{K_P}{T_i s} + K_P T_d s \qquad (4\text{-}2)$$

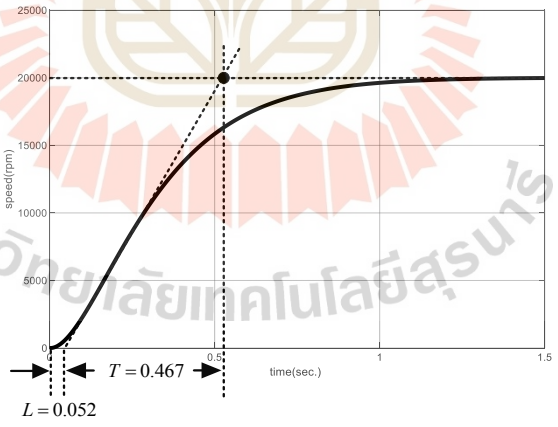
การออกแบบด้วยกฎซีกเลอร์-นิโคลส์นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ประกอบไปด้วย 2 แนวทาง ดังนี้ แนวทางที่ 1 ผลการตอบสนองของระบบจะต้องมีลักษณะเป็นรูปทรงเอส (s-shape) เมื่อได้รับอินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย แนวทางดังกล่าวใช้กับระบบที่มีตัวขับเร้าหรือเรียกว่าระบบควบคุมแบบวงเปิด ถ้าผลการตอบสนองแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยไม่เป็นรูปทรงเอสจะต้องออกแบบด้วยแนวทางที่ 2 ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ทดสอบกับระบบวงปิด โดยดำเนินการทดสอบเพื่อหาอัตราขยาย K ที่ทำให้ระบบเริ่มมีการสั่นไกว (K-N. Areerak, 2017) เมื่อพิจารณาจากบทที่ 3 ผลการตอบสนองความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน พบว่ามีลักษณะของผลตอบสนองแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยรูปทรงเอส ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีจะอาศัยแนวทางที่ 1 ของกฎซีกเลอร์-นิโคลส์ สามารถดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ดำเนินการหาการตอบสนองแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์จากชุดทดสอบจริง โดยพลานต์ของระบบคือผลการระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวของการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่ความเร็วรอบ 20000 rpm ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 อย่างไรก็ตามในขั้นตอนนี้จะอาศัยบล็อก Simulink มาเพื่อช่วยจำลองผลการตอบสนองของแบบจำลองที่ผ่านการระบุเอกลักษณ์แล้ว



รูปที่ 4.1 การตอบสนองแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ขั้นตอนที่ 2 พิจารณาผลการตอบสนองรูปทรงเอสของระบบที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 สามารถแสดงผลการตอบสนองรูปทรงเอสได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การตอบสนองรูปทรงเอสของผลตอบสนองความเร็วรอบจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

จากรูปที่ 4.2 ทำการลากเส้นสัมผัส โดยสามารถอ่านค่าเวลาประวิง $L = 0.052$ วินาที และค่าคงตัวทางเวลา $T = 0.467$ วินาที จากนั้นนำค่าดังกล่าวเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีในขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 3 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีจากการคำนวณ โดยสามารถดูสมการการคำนวณสำหรับแนวทางที่ 1 ของกฎซีกเลอร์-นิโคลส์ได้จากภาคผนวก ข ตารางที่ (ข.1) จะได้ดังสมการ (4-3) ถึง (4-5)

$$K_P = 1.2\frac{T}{L} \tag{4-3}$$

$$T_i = 2L \tag{4-4}$$

$$T_d = 0.5L \tag{4-5}$$

จากสมการที่ (4-3) ถึง (4-5) ทำการแทนค่า $L = 0.052$ วินาที และ $T = 0.467$ วินาที จากขั้นตอนที่ 2 ได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$K_P = 1.2 \times \left(\frac{0.467}{0.052}\right) = 10.7769$$

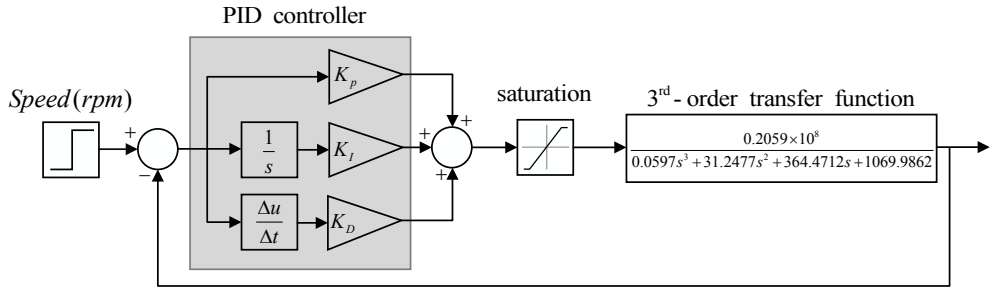
$$T_i = 2 \times 0.052 = 0.104$$

$$T_d = 0.5 \times 0.052 = 0.026$$

แทนค่า K_P, T_i และ T_d ที่ได้ในสมการที่ (4-2) จะได้

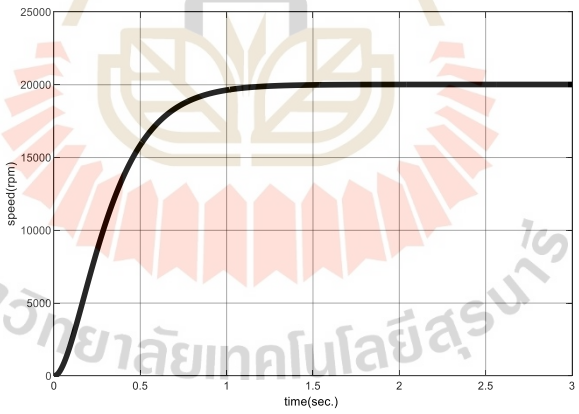
$$\begin{aligned} G_C(s) &= K_P + \frac{K_P}{T_i s} + K_P T_d s \\ &= 10.7769 + \frac{10.7769}{0.104s} + (10.7769)(0.026)s \\ &= 10.7769 + \frac{103.6240}{s} + 0.2802s \end{aligned}$$

ดังนั้นจากการกำหนด $K_I = \frac{K_P}{T_i}$ และ $K_D = K_P T_d$ จะได้ค่าตัวควบคุม $K_P = 10.7769$ $K_I = 103.6240$ และ $K_D = 0.2802$ ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้สำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์โดยใช้กฎของซีกเลอร์-นิโคลส์ ทั้งนี้ในการออกแบบตัวควบคุมโดยใช้กฎของซีกเลอร์-นิโคลส์ ไม่ได้คำนึงถึงขอบเขตของสัญญาณควบคุมดังที่กล่าวมาข้างต้น อย่างไรก็ตามในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาขอบเขตของสัญญาณควบคุมขณะจำลองสถานการณ์ด้วยบล็อก Simulink บนโปรแกรม MATLAB เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายแก่ชุดบอร์ดขับเคลื่อนในขณะที่นำค่าพารามิเตอร์ไปใช้งานจริง โครงสร้างของแผนภาพควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้ชนิดแปรงถ่านด้วยตัวควบคุมพีไอดี ด้วยบล็อก Simulink บนโปรแกรม MATLAB สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3



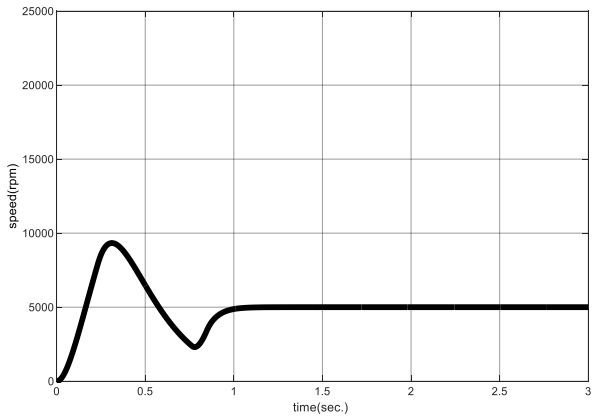
รูปที่ 4.3 แผนภาพการเชื่อมต่อบล็อก Simulink สำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านด้วยตัวควบคุมพีไอดี

จากรูปที่ 4.3 ขอบเขตของสัญญาณควบคุม (saturation) จะได้มาจากคู่มือการใช้งานชุดบอร์ดขับเคลื่อนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน แสดงไว้ในภาคผนวก ค โดยมีช่วงของขอบเขตของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1.28 V ถึง 3.83 V สามารถแสดงผลการควบคุมที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยบล็อก Simulink บนโปรแกรม MATLAB ที่ความเร็วรอบ 20000 rpm ดังรูปที่ 4.4

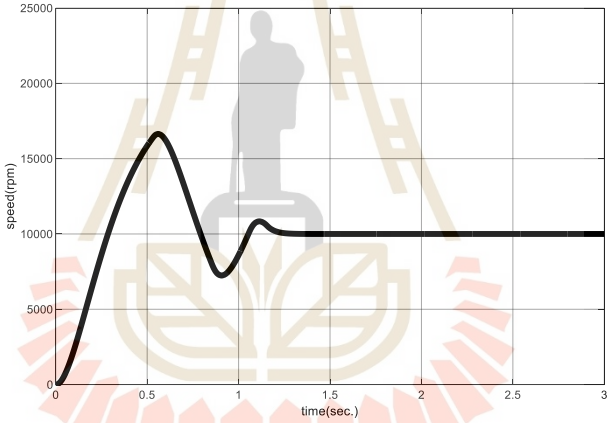


รูปที่ 4.4 ผลการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการออกแบบด้วยกฎของซีกเลอร์-นิโคลส์ ที่ความเร็วรอบ 20000 rpm

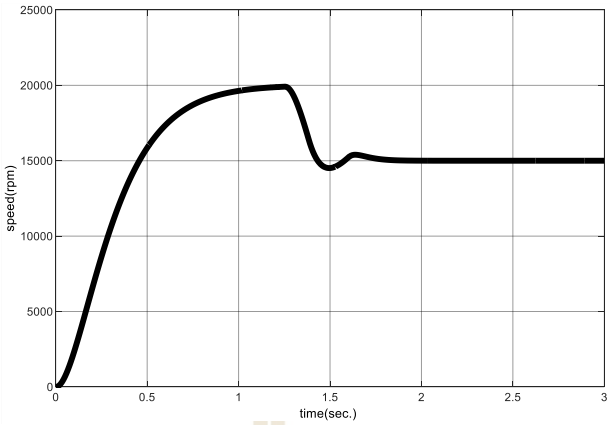
เพื่อยืนยันผลการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านโดยใช้กฎของซีกเลอร์-นิโคลส์ การเปรียบเทียบผลตอบสนองที่ความเร็วรอบ 5000 10000 และ 15000 rpm แสดงได้ดังรูปที่ 4.5 ถึง 4.7 ตามลำดับ ซึ่งความเร็วรอบดังกล่าวไม่ใช่ผลการตอบสนองจากชุดทดสอบที่นำมาใช้ในกระบวนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี



รูปที่ 4.5 ผลการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการออกแบบด้วยกฎของซีกเลอร์-นิโคลส์ ที่ความเร็วรอบ 5000 rpm



รูปที่ 4.6 ผลการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการออกแบบด้วยกฎของซีกเลอร์-นิโคลส์ ที่ความเร็วรอบ 10000 rpm



รูปที่ 4.7 ผลการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการออกแบบด้วยกฎของซีกเลอร์-นิโคลส์ ที่ความเร็วรอบ 15000 rpm

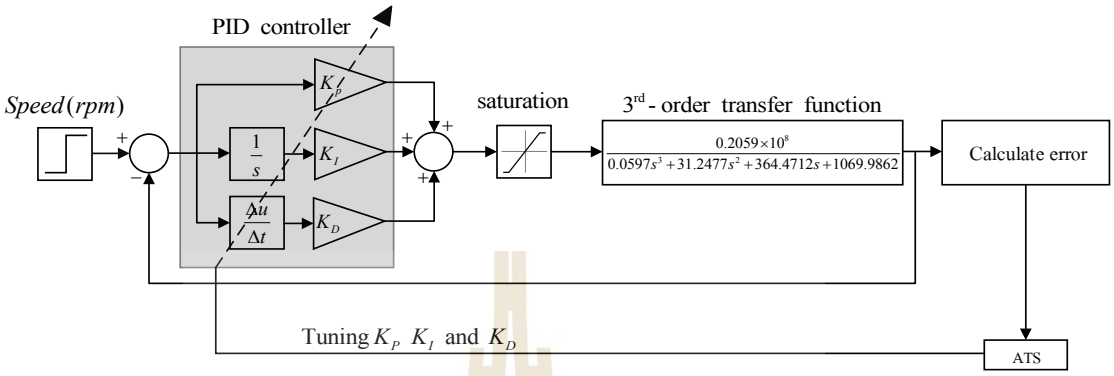
พิจารณาจากรูปที่ 4.4 จะสังเกตได้ว่า ผลการควบคุมการจำลองสถานการณ์โดยใช้ตัวควบคุมจากการออกแบบด้วยกฎของซีกเลอร์-นิโคลส์ สามารถควบคุมให้ความเร็วรอบเป็นไปตามค่าที่กำหนดได้ แต่เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.5 ถึง 4.7 ซึ่งเป็นความเร็วรอบที่ไม่ได้ใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยกฎของซีกเลอร์-นิโคลส์ จะเห็นได้ว่า สามารถควบคุมให้ความเร็วรอบเป็นไปตามค่าที่กำหนดได้เช่นกัน แต่สมรรถนะในการควบคุมจะมีความผิดเพี้ยนบ้าง เนื่องจากการออกแบบด้วยวิธีการดั้งเดิมไม่ได้พิจารณาสัญญาณตัวควบคุมทำให้เกิดการพุ่งเกินและมีการสั่นไกวเล็กน้อยก่อนลู่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่เป็นผลมาจากการอิ่มตัวของสัญญาณควบคุม ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ ซึ่งจะทำให้สามารถกำหนดสมรรถนะการควบคุมของตัวควบคุมให้ดียิ่งขึ้นพร้อมทั้งนำเอาสัญญาณการควบคุมมาเป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการออกแบบ โดยรายละเอียดจะกล่าวไว้ในหัวข้อถัดไป

4.4 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

จากหัวข้อที่ 4.2 ได้กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีโดยการใช้วิธีการแบบดั้งเดิมด้วยกฎของซีกเลอร์-นิโคลส์ พบว่าการออกแบบด้วยกฎดังกล่าวไม่ได้คำนึงถึงขอบเขตของสัญญาณควบคุม ทำให้ค่าของตัวควบคุมที่ได้ไม่เหมาะสม ส่งผลให้เกิดการพุ่งเกิน ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่นำเสนอในบทนี้ จะนำเอาขอบเขตของสัญญาณควบคุมมาเป็นส่วนหนึ่งในขณะค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะทำให้ตัวควบคุมมีความสอดคล้องกับชุดทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ วิธีการที่นำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีจะอาศัยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว แผนภาพการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับการควบคุมความเร็วรอบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านโดยการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แผนภาพการเชื่อมต่อบล็อก Simulink สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

จากรูปที่ 4.8 สามารถแสดงขั้นตอนในการออกแบบตัวควบคุมได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดอินพุตเป็นสัญญาณแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยให้กับระบบ

ขั้นตอนที่ 2 พิจารณาขอบเขตของสัญญาณควบคุม เพื่อทำให้การออกแบบตัวควบคุมจากการจำลองสถานการณ์ในบล็อก Simulink บนโปรแกรม MATLAB สอดคล้องกับชุดทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้ขอบเขตของสัญญาณควบคุมได้มากจากคู่มือการใช้งานชุดบอร์ดขับเคลื่อนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน แสดงไว้ในภาคผนวก ค โดยมีช่วงของขอบเขตของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1.28 V ถึง 3.83 V ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากชุดควบคุมเชิงพาณิชย์

ขั้นตอนที่ 3 พิจารณาแบบจำลองกล่องดำในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสามที่ประกอบไปด้วยค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกล่องดำ a_0, b_3, b_2, b_1 และ b_0 แสดงดังตารางที่ 3.4 ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 มาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

ขั้นตอนที่ 4 ทำการประเมินค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าความเร็วรอบอ้างอิงกับค่าความเร็วรอบที่ได้ให้มีค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด

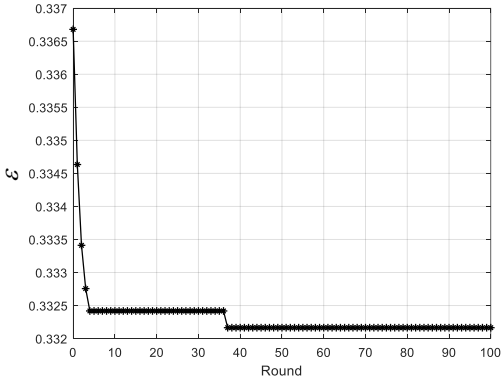
ขั้นตอนที่ 5 ทำการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมและส่งให้กับแบบจำลอง เพื่อใช้สำหรับหาผลตอบสนองความเร็วของระบบต่อไป กระบวนการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวจะมีลักษณะการทำงานวนซ้ำตามจำนวนรอบที่กำหนดไว้ แต่ถ้าเจอคำตอบที่ดีที่สุดอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวจะหยุดการทำงานและให้คำตอบเป็นค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุด ในการค้นหาค่าตัวควบคุมพีไอดีด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวจำเป็นต้องมีการทดสอบ

ค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าวเพื่อให้การค้นหามีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวประกอบไปด้วยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ 4 ค่าได้แก่ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง รัศมีการค้นหา และอัตราปรับบลดรัศมี ถ้าพารามิเตอร์ดังกล่าวมีความเหมาะสมจะส่งผลให้ระบวนการในการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยรายละเอียดของการทดสอบค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 สามารถดูได้จากภาคผนวก ก ตารางที่ (ก.5-ก.8) ซึ่งเป็นการทดลองสุ่มค่าที่ให้ผลการค้นหามีค่า ε น้อยที่สุด จากการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวในภาคผนวก ก พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่า ε เฉลี่ยที่น้อยที่สุดแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

พารามิเตอร์	**ค่าที่ใช้**
จำนวนคำตอบเริ่มต้น (Initial number of neighbor)	50
จำนวนคำตอบรอบข้าง (Number of neighbor)	60
รัศมีการค้นหา (Radius)	50
อัตราการปรับลดรัศมี (Decreasing factor : DF)	1.14

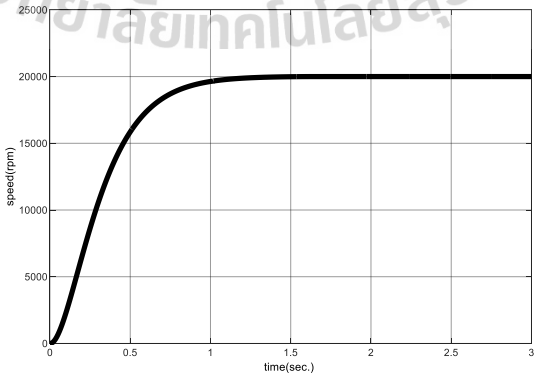
สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดให้ขอบเขตการค้นหาของค่าตัวควบคุม K_P K_I และ K_D มีค่าเท่ากับ [5,15] , [0.0001,0.01] และ [0.05,1] ตามลำดับ ทั้งนี้คำตอบที่ได้จากการหาค่าตัวควบคุมดังกล่าว จะต้องมีค่าอยู่ระหว่างขอบเขตที่กำหนดไว้ ในกรณีที่คำตอบจากการหาค่าตัวควบคุมมีค่าใกล้เคียงกับขอบเขตบนหรือขอบเขตล่างจะต้องดำเนินการปรับเปลี่ยนขอบเขตของคำตอบและทำการค้นหาใหม่จนกว่าจะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด การหาค่าตัวควบคุมดังกล่าวจะพิจารณาผลการลู่เข้าของค่า ε ทั้งหมด 5 ครั้ง เพื่อนำมาใช้ในการเลือกค่าตัวควบคุม ที่เหมาะสมที่สุดผ่านเงื่อนไขค่า ε ที่น้อยที่สุด อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์อีกด้วย สำหรับผลการค้นหาค่าดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลการลู่เข้าหาคำตอบ ε ที่เหมาะสมที่สุด

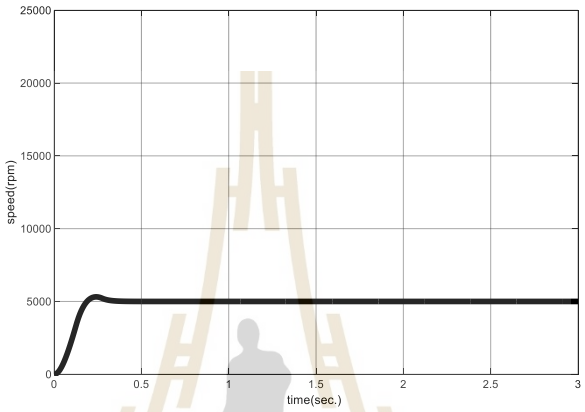
จากรูปที่ 4.9 แสดงการลู่เข้าหาคำตอบของค่า ε ในจำนวนรอบการค้นหาสูงสุดเท่ากับ 100 รอบจะเห็นได้ว่าค่า ε มีค่าลดลงในแต่ละรอบการค้นหา ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่าวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวสามารถค้นหาค่าตัวควบคุม K_P K_I และ K_D ที่เหมาะที่สุดทำให้ผลตอบสนองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านสามารถลู่เข้าสู่ค่าความเร็วรอบอ้างอิงได้อย่างมีสมรรถนะที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม

ผลจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ทำให้ได้ค่าตัวควบคุมพีไอดี $K_P = 10.7166$ $K_I = 0.0011$ และ $K_D = 0.4351$ ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีไอดีที่นำมาประยุกต์ใช้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์โดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว สามารถแสดงผลการควบคุมที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยบล็อก Simulink บนโปรแกรม MATLAB ที่ความเร็วรอบ 20000 rpm ดังรูปที่ 4.10

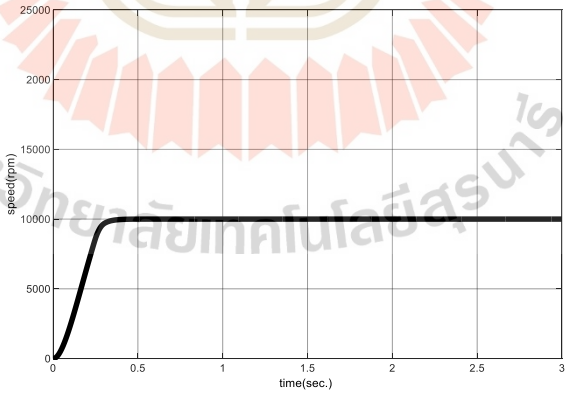


รูปที่ 4.10 ผลการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีจากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ที่ความเร็วรอบ 20000 rpm

เพื่อยืนยันผลการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับการควบคุมควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว การเปรียบเทียบผลตอบสนองที่ความเร็วรอบ 5000 10000 และ 15000 rpm สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11 ถึง 4.13 ตามลำดับ ซึ่งความเร็วรอบดังกล่าวไม่ได้นำมาใช้ในกระบวนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

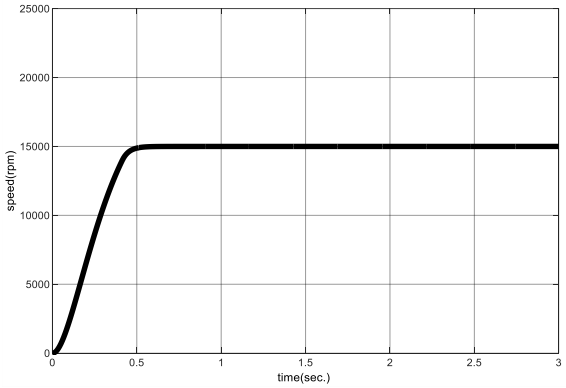


รูปที่ 4.11 ผลการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีจากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ที่ความเร็วรอบ 5000 rpm



รูปที่ 4.12 ผลการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีจากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ที่ความเร็วรอบ 10000 rpm

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

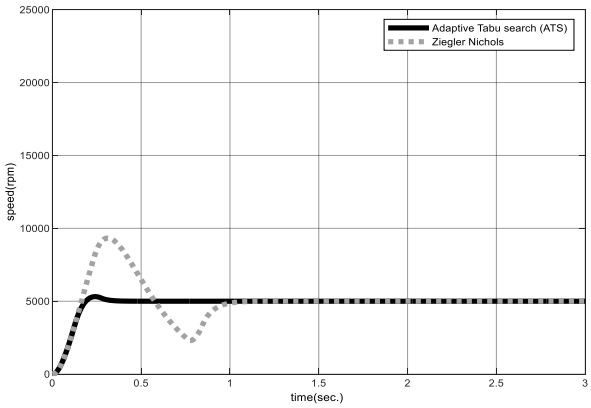


รูปที่ 4.13 ผลการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีจากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ที่ความเร็วรอบ 15000 rpm

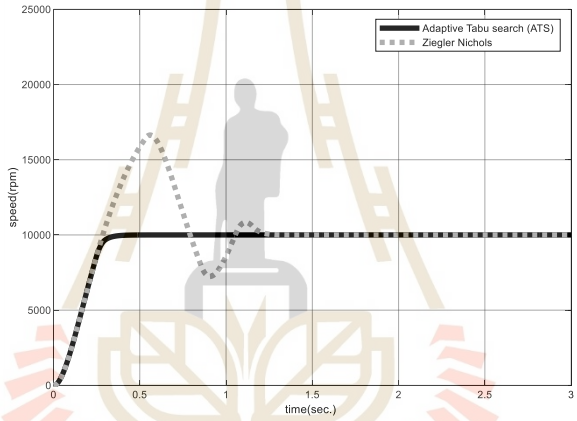
พิจารณาจากรูปที่ 4.10 จะสังเกตได้ว่า ผลการควบคุมการจำลองสถานการณ์โดยใช้ตัวควบคุมจากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวสามารถควบคุมให้ความเร็วรอบเป็นไปตามค่าที่กำหนดได้ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.11 ถึง 4.13 ซึ่งเป็นความเร็วรอบที่ไม่ได้นำมาใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุม ผลตอบสนองก็ยังสามารถถูกควบคุมให้ความเร็วรอบเป็นไปตามค่าที่กำหนดได้เช่นกัน จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวทำให้เห็นว่าค่าควบคุมที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวมีสมรรถนะผลการตอบสนองความเร็วรอบที่ดี รายละเอียดการเปรียบเทียบสมรรถนะของผลการควบคุมจากการออกแบบด้วยกฎของซีกเลอร์-นิโคลส์และวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวจะนำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป

4.5 การเปรียบเทียบสมรรถนะผลการควบคุมการจำลองสถานการณ์โดยใช้ตัวควบคุมจากการออกแบบด้วยกฎซีกเลอร์-นิโคลส์และตัวควบคุมจากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

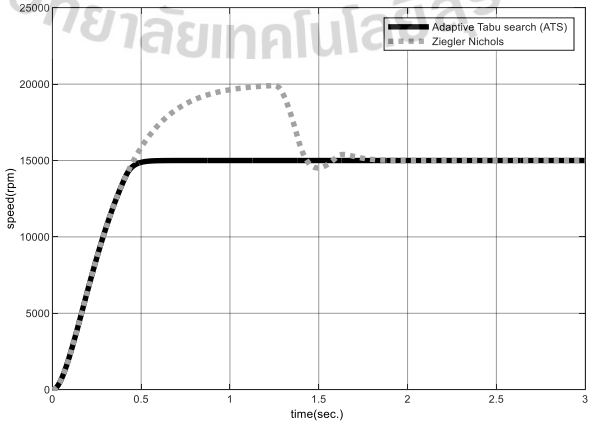
ในหัวข้อที่ 4.3 และ 4.4 เป็นการนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมด้วยกฎซีกเลอร์-นิโคลส์และการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบตาบูเชิงปรับตัว และได้แสดงผลการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์ผลการตอบสนองความเร็วรอบด้วยวิธีทั้งสอง ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเปรียบเทียบสมรรถนะผลการตอบสนองของตัวควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์ที่ความเร็วรอบ 5000 10000 15000 และ 20000 rpm ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.14 ถึง 4.17 ดังนี้



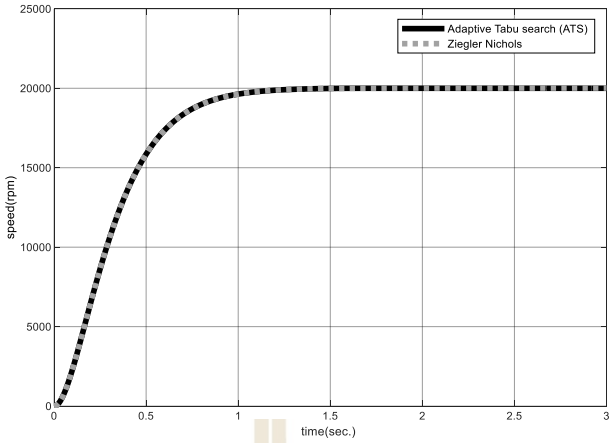
รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบผลการควบคุมการจำลองสถานการณ์ที่ความเร็วรอบ 5000 rpm



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบผลการควบคุมการจำลองสถานการณ์ที่ความเร็วรอบ 10000 rpm



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบผลการควบคุมการจำลองสถานการณ์ที่ความเร็วรอบ 15000 rpm

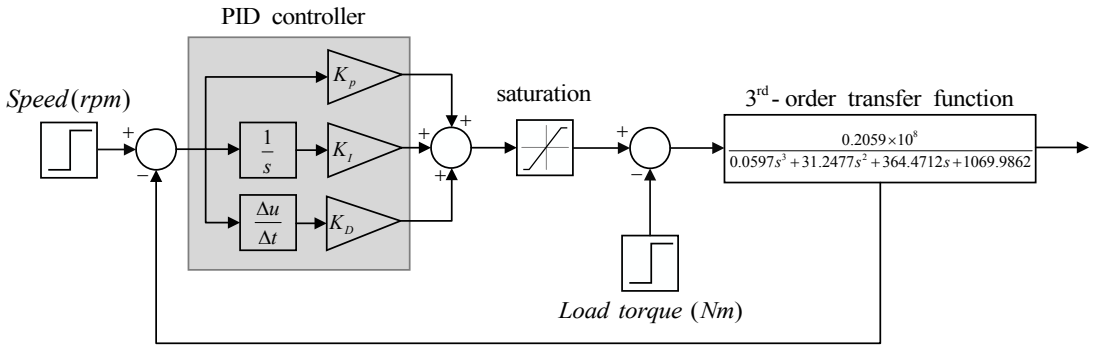


รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบผลการควบคุมการจำลองสถานการณ์ที่ความเร็วรอบ 20000 rpm

พิจารณาจากรูปที่ 4.14 ถึง 4.17 จะสังเกตได้ว่า ผลการควบคุมความเร็วรอบด้วยการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB ตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบตาบูเชิงปรับตัวมีสมรรถนะการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยกฎซีกเลอร์-นิโคลส์ โดยพิจารณาจาก ช่วงเวลาขาขึ้น ช่วงเวลาเข้าที่ และเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน ทั้งนี้เป็นเพราะการออกแบบตัวควบคุมด้วยกฎซีกเลอร์-นิโคลส์ไม่ได้คำนึงถึงขอบเขตของสัญญาณควบคุมเหมือนกับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการตาบูเชิงปรับตัว ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถนำเอาขอบเขตของสัญญาณควบคุมเป็นส่วนหนึ่งในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหาตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุด โดยจะใช้ค่าสัญญาณควบคุมที่สอดคล้องกับชุดทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ จึงทำให้ตัวควบคุมที่ได้มีสมรรถการควบคุมที่ดีกว่า รายละเอียดการสร้างชุดทดสอบและการนำตัวควบคุมที่ได้จาการออกแบบในบทนี้ไปใช้กับชุดทดสอบเพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์ในห้องปฏิบัติการจะได้กล่าวรายละเอียดไว้ในบทถัดไป

4.6 การทดสอบการคงค่าความเร็วรอบเมื่อโหลดทางกลมีการเปลี่ยนแปลง

จากหัวข้อที่ 4.5 ได้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะผลการตอบสนองของตัวควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทดสอบการคงค่าความเร็วรอบเมื่อโหลดทางกลมีการเปลี่ยนแปลง แผนภาพการจำลองสถานการณ์การคงค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านเมื่อโหลดทางกลมีการเปลี่ยนแปลง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แผนภาพการเชื่อมต่อบล็อก Simulink สำหรับการจำลองสถานการณ์การคงค่าความเร็วเมื่อโหลดทางกลมีการเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 4.18 ดำเนินการเปรียบเทียบสมรรถนะผลการตอบสนองของการคงค่าความเร็วรอบเมื่อโหลดทางกลมีการเปลี่ยนแปลงที่วินาทีที่ 3 ทั้งนี้จะดำเนินการทดสอบโหลดทางกลที่ค่าพิกัด โดยสามารถพิจารณาการคำนวณค่าโหลดทางกลพิกัดได้ดังสมการที่ (4-6)

$$P_{out,rated} = \tau_{rated}\omega_n \qquad (4\text{-}6)$$

โดย $P_{out,rated}$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัดของมอเตอร์ (W)

τ_{rated} คือ ค่าโหลดทางกลที่พิกัดของมอเตอร์ (Nm)

ω_n คือ ค่าความเร็วรอบเชิงมุม (rad) และเมื่อกำหนดให้ $\omega_n = \dfrac{2\pi N_m}{60}$

N_m คือ ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ (rpm)

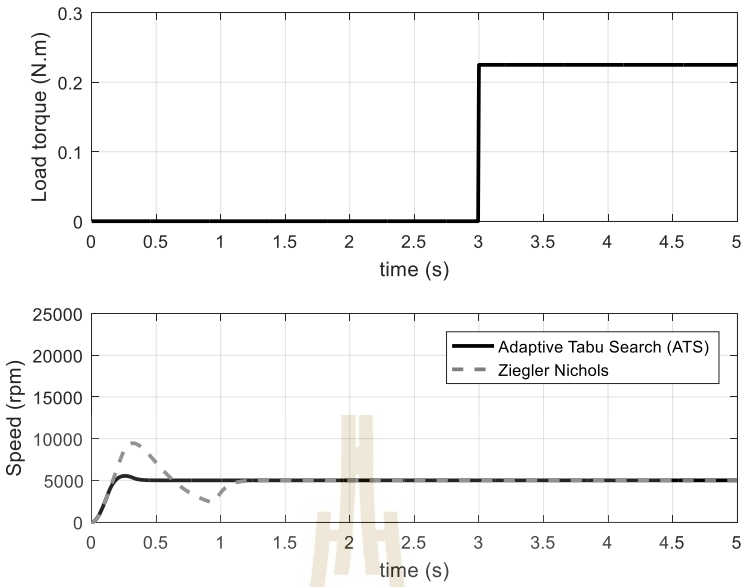
จากสมการ (4-6) พิจารณาจากค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดังภาคผนวก ค มีค่าเท่ากับ 471 W และทำการทดสอบที่ความเร็วรอบ 20000 rpm จะได้ว่า

$$471 = \tau_{rated}\left(\frac{2\pi \times 20000}{60}\right)$$

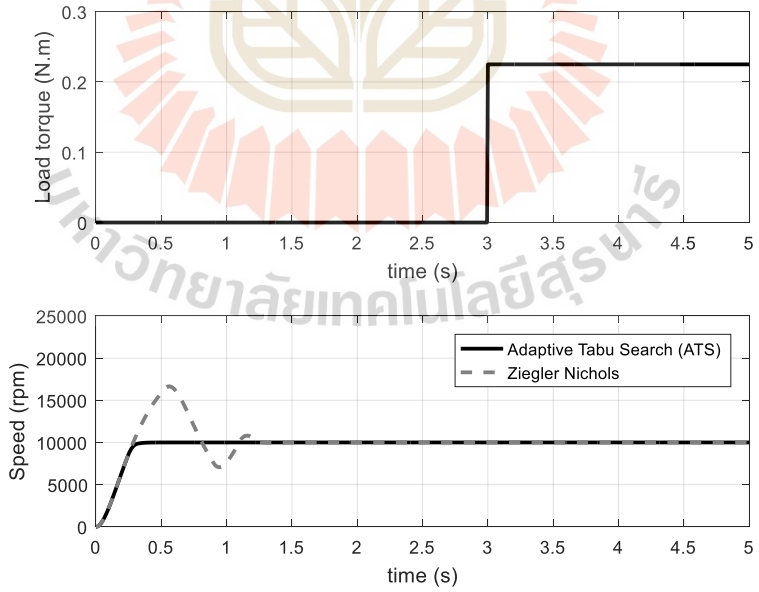
$$\tau_{rated} = 0.225Nm$$

จากค่าโหลดทางกลที่ได้นำมาดำเนินการจำลองสถานการณ์ที่ความเร็วรอบ 5000 10000 และ 15000 rpm ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.19 ถึง 4.21 ดังนี้

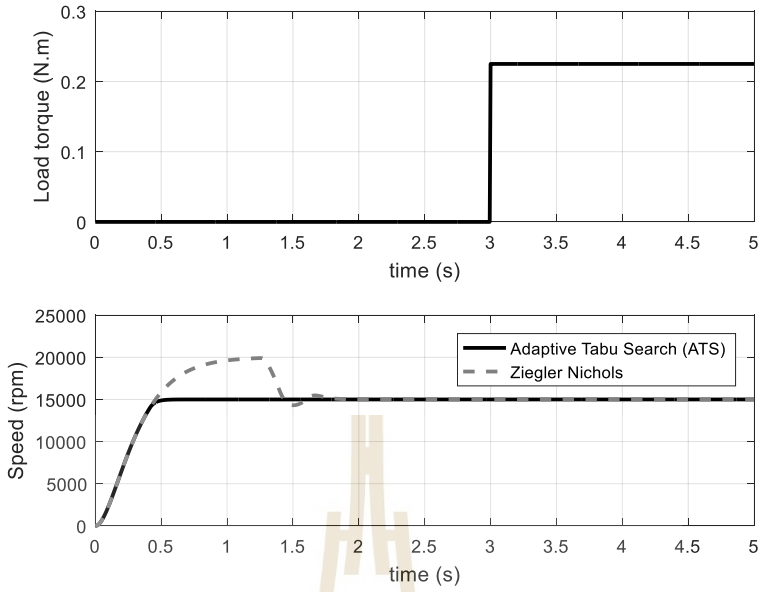
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์การคงค่าความเร็วรอบที่ความเร็วรอบ 5000 rpm



รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์การคงค่าความเร็วรอบที่ความเร็วรอบ 10000 rpm



รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์การคงค่าความเร็วรอบ ที่ความเร็วรอบ 15000 rpm

พิจารณาจากรูปที่ 4.19 ถึง 4.21 จะสังเกตได้ว่า ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อโหลดทางกลมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 ไปเป็น 0.225 Nm ที่วินาทีที่ 3 พบว่าตัวควบคุมพีไอดีสามารถควบคุมให้ความเร็วรอบให้เป็นไปตามค่าความเร็วรอบอ้างอิงที่กำหนดได้แม้โหลดมีการเปลี่ยนแปลงทั้งในกรณีตัวควบคุมที่ออกแบบโดยใช้กฎของซีกเลอร์-นิโคลส์และตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว รายละเอียดการสร้างชุดทดสอบและการนำตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบในบทนี้ไปใช้กับชุดทดสอบเพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์ในห้องปฏิบัติการจะได้กล่าวรายละเอียดไว้ในบทถัดไป

4.7 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 4 ได้นำเสนอขั้นตอนและวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมที่ใช้กฎซีกเลอร์-นิโคลส์ และการประยุกต์ใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ด้วยการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะผลการตอบสนองที่เกิดจากตัวควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์ ผลการเปรียบเทียบพบว่าตัวควบคุมที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยการใช้กฎซีกเลอร์-นิโคลส์ เนื่องจากอัลกอริทึมการค้นหาของวิธีการแบบตาบูเชิงปรับตัวมีการพิจารณาขอบเขตของสัญญาณควบคุมเพื่อไม่ให้เกิดการอิ่มตัวของสัญญาณ

ดังกล่าว ซึ่งค่าสัญญาณควบคุมเป็นค่าที่สอดคล้องกับชุดทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ ยิ่งไปกว่านั้นยังได้นำเสนอผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง โดยพบว่าตัวควบคุมพีไอดีที่ออกแบบจากทั้ง 2 วิธีสามารถควบคุมให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านเป็นไปตามค่าความเร็วรอบอ้างอิงที่กำหนดได้แม้โหลดมีการเปลี่ยนแปลง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
การสร้างชุดทดสอบและผลการทดสอบตัวควบคุมสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์

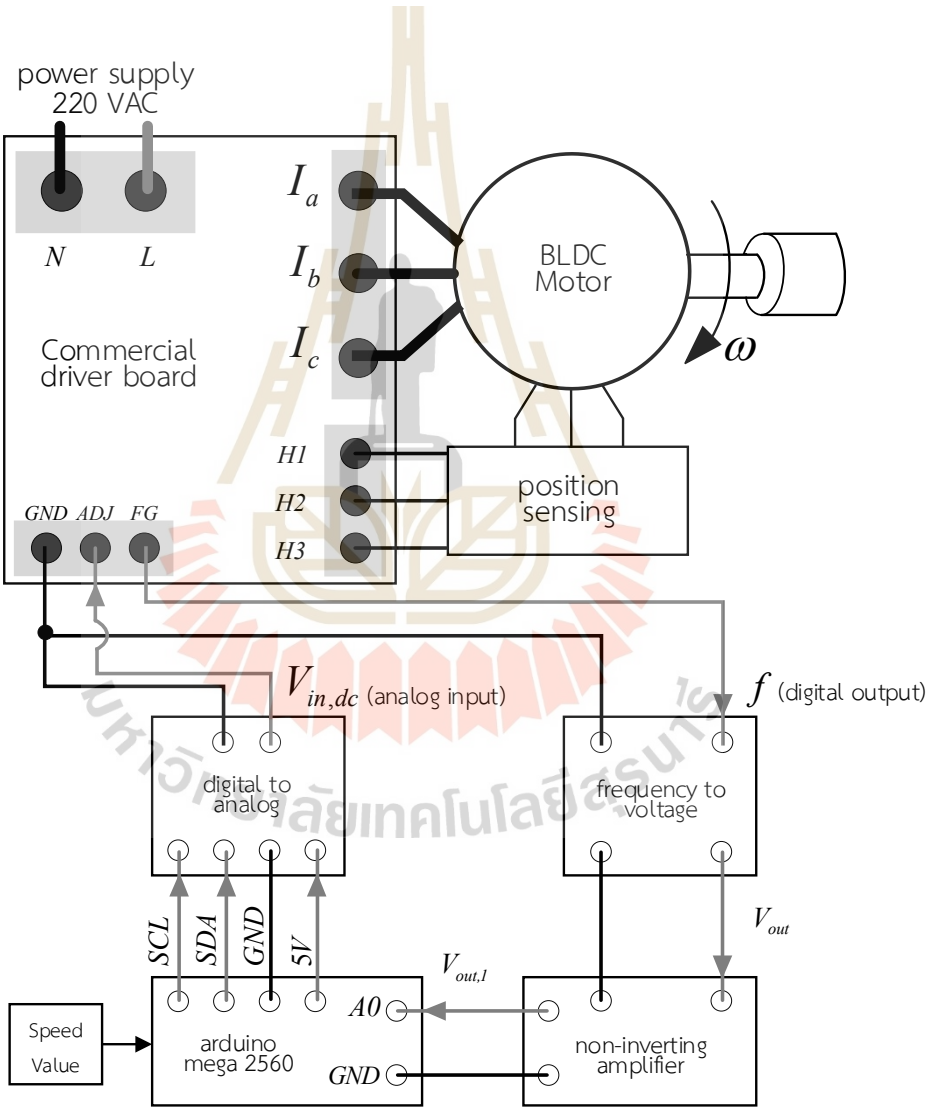
5.1 บทนำ

บทที่ผ่านมาได้นำเสนอขั้นตอนและผลการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์ ด้วยการใช้วิธีการซีกเลอร์-นิโคลส์และวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ในบทนี้จะนำเสนอการสร้างชุดทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการและการนำตัวควบคุมพีไอดีที่ได้ทำการออกแบบไว้ในบทที่ 4 ทั้งสองวิธี มาใช้สำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านจำเป็นต้องมีการส่งกลับค่าความเร็วรอบเพื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร็วรอบอ้างอิงกับค่าความเร็วรอบจริงจากชุดทดสอบ ซึ่งจะต้องมีการดัดแปลงวงจรจากชุดควบคุมเชิงพาณิชย์เพื่อให้เป็นค่าความเร็วรอบจากชุดทดสอบ รายละเอียดการออกแบบวงจรและผลการควบคุมความเร็วรอบมีรายละเอียดดังนี้

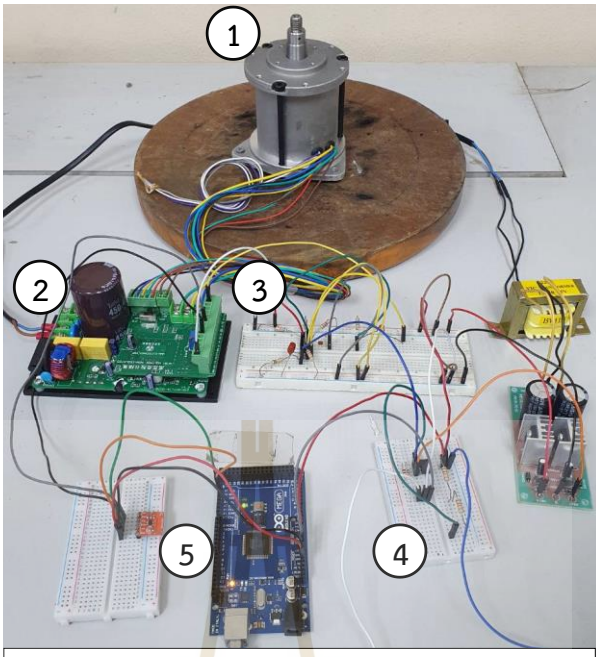
5.2 ชุดทดสอบ

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านด้วยตัวควบคุมเชิงพาณิชย์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สามารถทำได้โดยการทดสอบแบบวงเปิดที่มีตัวขับเร้าเพื่อหาผลการตอบสนอง อย่างไรก็ตามเอาต์พุตที่ได้จากชุดควบคุมเชิงพาณิชย์จะเป็นสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่เปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบของมอเตอร์ แต่ในการส่งกลับค่าความเร็วรอบเพื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร็วรอบอ้างอิงกับค่าความเร็วรอบจริงจากชุดทดสอบสำหรับการควบคุมแบบวงปิดจะต้องอาศัยค่าที่อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อให้สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ดังกล่าวได้ การสร้างชุดทดสอบจึงจำเป็นต้องมีวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า (frequency to voltage converter) เพื่อส่งข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่ได้ไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านลูปย้อนกลับ (feedback loop) ในลำดับถัดมาเป็นการปรับแต่งสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้ค่าแรงดันดังกล่าวมีความเหมาะสมกับบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ นอกจากนี้วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อกก็มีความสำคัญ เนื่องจาก

เอาต์พุตจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะเป็นค่าสัญญาณพัลส์แบบดิจิตอล ซึ่งยังไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับชุดบอร์ดควบคุมเชองพาณิชย์ได้ ดังนั้นชุดทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการจะประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญ 5 ส่วน ดังนี้ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน บอร์ดขับเคลื่อน วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและวงจรขยายแรงดันไฟฟ้า วงจรแปลงดิจิตอลเป็นแอนะล็อกและบอร์ด Arduino Mega 2560 แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 และชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 โดยข้อมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านและบอร์ดขับเคลื่อนสามารถแสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ค.



รูปที่ 5.1 แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์



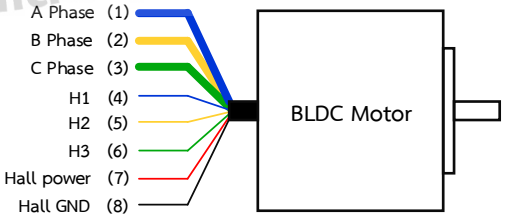
1. BLDC motor
2. commercial BLDC driver board
3. frequency to voltage converter
4. non-inverting amplifier
5. Arduino Mega 2560

รูปที่ 5.2 ชุดทดสอบตัวควบคุมพีไอดีในห้องปฏิบัติการ

5.2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านรุ่น Ø72-201105-220 ของบริษัท Beijing Electechnic สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 (ก) ซึ่งมีการเชื่อมต่อกับชุดบอร์ดขับเคลื่อนจากทางบริษัทแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 (ข)

(ก) โครงสร้างภายนอก



(ข) ไดอะแกรมการเชื่อมต่อ

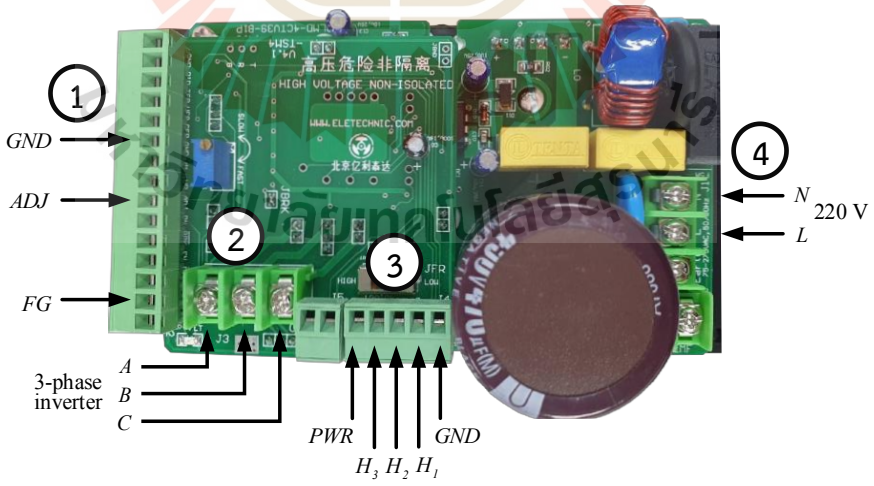
รูปที่ 5.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

คุณสมบัติที่สำคัญของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านรุ่น Ø72-201105-220

- ความเร็วรอบสูงสุด 23000 rpm
- กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด 471 W
- ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V เป็นแหล่งจ่ายโดยภายในชุดบอร์ดขับเคลื่อนจะมีวงจรเรียงกระแสในตัว ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับตัวมอเตอร์
- โรเตอร์เป็นแบบแม่เหล็กถาวร 2 ขั้ว
- สามารถใช้งานที่อุณหภูมิ 0 ถึง 70 °C
- ตัวตรวจจับฮอลล์ 3 ตัวอยู่ภายใน ติดตั้งห่างกัน 120 องศา ใช้การวัดตำแหน่งของโรเตอร์
- ควบคุมผ่านบอร์ดขับเคลื่อนรุ่น BLMD-4CTV39-B1P-TSM4
- น้ำหนักโดยประมาณ 1200 g

5.2.2 บอร์ดขับเคลื่อน

บอร์ดขับเคลื่อนที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นบอร์ดขับเคลื่อนเชิงพาณิชย์รุ่น BLMD-4CTV39-B1P-TSM4 ของบริษัท Beijing Electechnic แสดงได้ดังรูปที่ 5.4 บอร์ดขับเคลื่อนนี้อาศัยไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V เป็นแหล่งจ่าย โดยภายในจะมีวงจรเรียงกระแสเพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะเป็นแหล่งจ่ายของวงจรแปลงผันสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เป็นลำดับถัดไป



รูปที่ 5.4 บอร์ดขับเคลื่อนเชิงพาณิชย์

คุณสมบัติที่สำคัญของบอร์ดขับเคลื่อนรุ่น BLMD-4CTV39-B1P-TSM4

- เป็นบอร์ดขับเคลื่อนที่สามารถใช้แหล่งจ่ายแรงดันได้ทั้งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC)
  - แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ : 75-275 V, 50/60 Hz
  - แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง : 75-390 V_{DC}
- กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดสามเฟส 9.3 A (Peak)
- สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ได้สูงสุด 50000 rpm
- แรงดันอ้างอิงของตัวตรวจจับฮอลล์ 5 V_{DC}
- ใช้สัญญาณแอนะล็อกเพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์แบบวงเปิด เปรียบเสมือนตัวขับเร้า
- ขอบเขตของสัญญาณควบคุมแอนะล็อก 1.28 ถึง 3.83 V
- มีวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยสวิตช์ไอจีบีที (IGBT) 6 ตัว
- สามารถกลับทิศทางการหมุนของโรเตอร์ได้
- มีวิธีการควบคุมความเร็วรอบ 3 วิธี
  - ใช้โพเทนชิโอมิเตอร์แบบปรับค่าได้พิกัด 10 kΩ เปรียบเสมือนเป็นวงจรแบ่งแรงดัน
  - ใช้วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะล็อกที่สามารถสั่งงานด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์
  - ใช้สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) ที่มีตัวกรองผ่านความถี่ต่ำ (RC-filter)
- มีระบบการป้องกันกระแสเกินพิกัด
- มีระบบการป้องกันแรงดันเกินพิกัด
- มีตัวระบายความร้อนเพื่อป้องกันอุณหภูมิเกินพิกัด
- ช่วงอุณหภูมิที่สามารถทำงานได้ -10 ถึง 70 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 5.4 เป็นบอร์ดขับเคลื่อนเชิงพาณิชย์ การใช้งานสามารถแบ่งพอร์ตการเชื่อมต่อที่ได้เป็น 4 ส่วน ดังนี้

1. การเชื่อมต่อสำหรับการควบคุมความเร็วรอบ

พอร์ตที่ใช้งานคือพอร์ต ADJ ซึ่งเป็นพอร์ตอินพุตเพื่อรับสัญญาณแรงดันแบบแอนะล็อกสำหรับควบคุมความเร็วรอบ นอกจากนี้ยังมีพอร์ต FG ซึ่งเป็นพอร์ตแบบเอาต์พุตที่มีลักษณะเป็น

สัญญาณพัลส์ ความถี่ของสัญญาณดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของมอเตอร์ สุดท้ายคือพอร์ต GND ซึ่งเป็นกราวด์ของระบบ

2. การเชื่อมต่อวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสไปยังมอเตอร์

การต่อวงจรอินเวอร์เตอร์ไปยังมอเตอร์จะใช้พอร์ต A B และ C ซึ่งเป็นพอร์ตที่จ่ายกระแส I_a I_b และ I_c ให้กับมอเตอร์ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.1

3. การเชื่อมต่อส่วนของตัวตรวจจับฮอลล์

พอร์ต H_1 H_2 และ H_3 เป็นพอร์ตสัญญาณตัวตรวจจับฮอลล์ที่ถูกติดตั้งไว้กับมอเตอร์ เพื่อตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์

4. การเชื่อมต่อแหล่งจ่าย

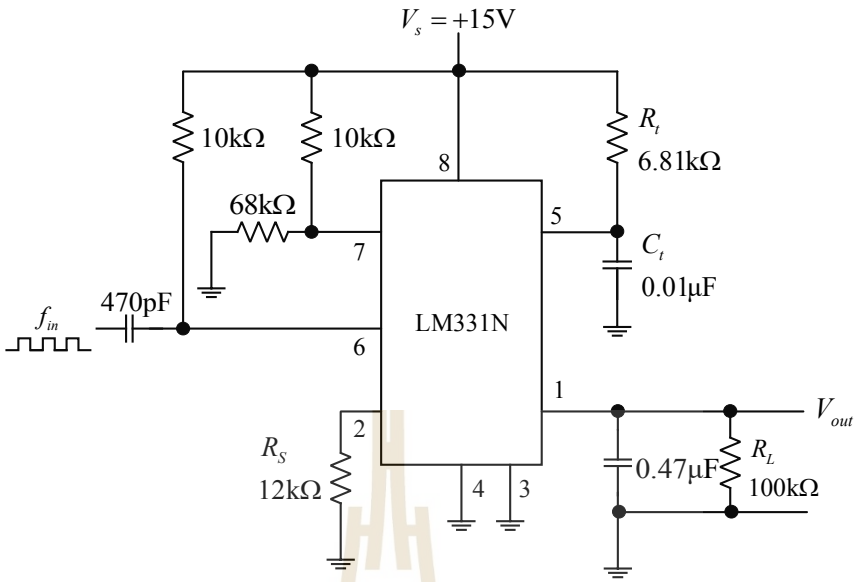
บอร์ดขับเคลื่อนรุ่น BLMD-4CTV39-B1P-TSM4 ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สามารถเชื่อมต่อไฟที่เป็นแหล่งจ่ายได้ที่พอร์ต L และ N ซึ่งพอร์ตดังกล่าวสามารถใช้ได้กับทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V เนื่องจากมีความสะดวกและเหมาะสมกับอุปกรณ์การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

จากพอร์ตการเชื่อมต่อทั้ง 4 ส่วน พบว่าสามารถประยุกต์ใช้พอร์ตส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 มาใช้สำหรับตัวควบคุมพีไอดีที่เป็นตัวควบคุมวงปิดให้กับระบบได้ อย่างไรก็ตามส่วนที่ต้องมีการพัฒนาเพิ่มคือวงจรการแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบแอนะล็อก เพื่อเป็นค่าป้อนกลับไปยังบอร์ด Arduino Mega 2560 ที่จะใช้สำหรับโปรแกรมตัวควบคุมพีไอดี รายละเอียดการออกแบบวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.2.3

5.2.3 การออกวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและวงจรขยายแรงดัน

วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าจะอาศัยความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตที่แปรผันตรงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ จากเงื่อนไขดังกล่าวการออกแบบวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันเพื่อใช้ตรวจวัดความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีลักษณะเป็นการหาสัมประสิทธิ์ของสมการเส้นตรง ซึ่งจะมีค่าเอาต์พุตของวงจรออกมาในรูปของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง การออกแบบวงจรดังกล่าวในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ไอซี LM331N สำหรับการแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า ไอซี LM331N แสดงได้ดังรูปที่ 5.5 และการต่อวงจรการทำงานของไอซี LM331N แสดงดังรูปที่ 5.6

รูปที่ 5.5 ไอซี LM331N



รูปที่ 5.6 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยไอซี LM331N

จากวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันในรูปที่ 5.6 สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ R_L R_S R_t และ C_t ได้ดังนี้ $R_L = 100k\Omega$ $R_S = 12k\Omega$ $R_t = 6.8k\Omega$ และ $C_t = 0.01\mu F$ และสามารถแสดงสมการการออกแบบได้ดังสมการที่ (5-1) โดยค่าพารามิเตอร์และสมการดังกล่าวได้มาจากคู่มือการใช้งานของไอซีเบอร์ LM331N ซึ่งสามารถแสดงได้ในภาคผนวก ค.

$$V_{out} = f_{in} \times 2.09\mathrm{V_{DC}} \times \frac{R_L}{R_S} \times \left(R_t C_t\right) \qquad (5\text{-}1)$$

โดย V_{out} คือ สัญญาณแรงดันเอาต์พุตของไอซี LM331N

f_{in} คือ สัญญาณความถี่อินพุตของไอซี LM331N

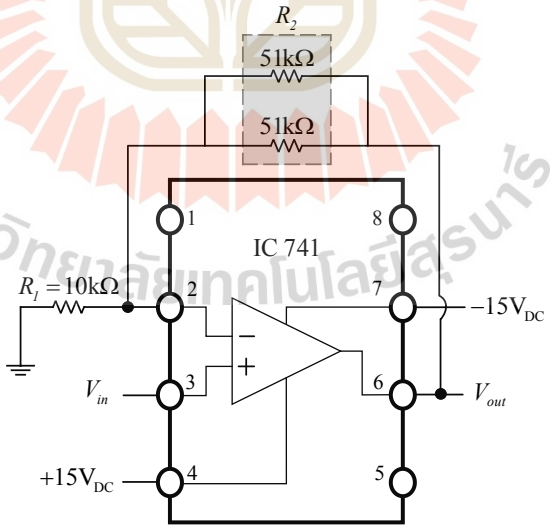
R_L R_S R_t และ C_t คือ ค่าพารามิเตอร์ในการปรับตั้งวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน

จากสมการที่ (5-1) ใช้สำหรับการออกแบบวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน แหล่งจ่ายไฟของไอซี LM331N มีค่าเท่ากับ 15 V_{DC} ความถี่ของสัญญาณอินพุตที่ใช้ออกแบบได้กำหนดไว้ที่ค่าสูงสุดคือ 1.15 kHz หรือประมาณ 23000 rpm ซึ่งได้มาจากการออกแบบที่พิกัดความเร็วรอบของมอเตอร์ อย่างไรก็ตามการทดสอบจะทำที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ประมาณ 20000 rpm ดังนั้นจากสมการที่ (5-1) สามารถคำนวณค่าแรงดันเอาต์พุตได้ดังนี้

$$V_{out} = 1.15\text{kHz} \times 2.09\text{V}_{\text{DC}} \times \frac{100k\Omega}{12k\Omega} \times 6.81k\Omega \times 0.01\mu\text{F}$$

จากการคำนวณแรงดันเอาต์พุตของไอซี LM331N ในสมการที่ (5-1) ถ้าความถี่ที่รับเข้ามาเท่ากับ 1.15 kHz แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเท่ากับ 1.36 V_{DC} แรงดันที่ได้จากวงจรดังกล่าวจะต้องถูกส่งต่อไปยังบอร์ด Arduino mega 2560 ที่เป็นตัวประมวลผลการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดี บอร์ดดังกล่าวสามารถอ่านค่าแรงดันได้ที่ 0 ถึง 5 V_{DC} ฉะนั้นจึงต้องเพิ่มแรงดันของวงจรแปลงความถี่เพื่อให้มีความเหมาะสม จากเงื่อนไขดังกล่าวจึงได้ออกแบบวงจรเพิ่มแรงดันไฟฟ้าคือ วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (non-inverting amplifier) เป็นวงจรขยาย การออกแบบวงจรดังกล่าวจะใช้ไอซีเบอร์ 741 แสดงได้ดังรูปที่ 5.7 และการต่อวงจรการทำงานของไอซี 741 แสดงดังรูปที่ 5.8

รูปที่ 5.7 ไอซีเบอร์ 741



รูปที่ 5.8 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟสด้วยไอซีเบอร์ 741

จากวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันในรูปที่ 5.8 สามารถออกแบบค่าพารามิเตอร์ R_1 และ R_2 เพื่อหาค่าอัตราขยายสัญญาณแรงดัน $A_v = \frac{V_{in}}{V_{out}}$ ได้ดังสมการที่ (5-2)

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1} \qquad (5\text{-}2)$$

โดย A_v คือ อัตราขยายสัญญาณแรงดัน

R_1 และ R_2 คือ ความต้านทานสำหรับการออกแบบวงจรขยายสัญญาณ

จากสมการที่ (5-2) สำหรับการออกแบบวงจรขยายสัญญาณแรงดัน กำหนดพารามิเตอร์ไว้ที่ $R_1 = 10k\Omega$ และ $R_2 = 25.5k\Omega$ ดังนั้นจากสมการที่ (5-2) สามารถคำนวณค่าอัตราขยายแรงดันได้ดังนี้

$$A_v = 1 + \frac{25.5k\Omega}{10k\Omega} = 3.55$$

5.2.4 บอร์ด Arduino Mega 2560

บอร์ด Arduino Mega 2560 แสดงดังรูปที่ 5.9 เป็นบอร์ดที่ใช้ชิพ ATmega2560 รองรับการเขียนโปรแกรมภาษาซีของ Arduino ซึ่งง่ายต่อการเขียนโปรแกรมสำหรับใช้งาน และสามารถรองรับการใช้งานได้หลากหลาย

รูปที่ 5.9 บอร์ด Arduino Mega 2560

คุณสมบัติที่สำคัญของบอร์ด Arduino Mega 2560

- ไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 10 บิต
- แรงดันไฟฟ้าที่ใช้งาน 5 V_{DC}
- แรงดันไฟฟ้าอินพุต 7-12 V_{DC}

- หน่วยความจำ
  - หน่วยความจำแฟลชสำหรับโหลดโปรแกรมขนาด 256 KB
  - หน่วยความจำแบบ EEPROM ขนาด 4 KB
  - หน่วยความจำแบบ SRAM ขนาด 8 KB
- ความเร็วของสัญญาณนาฬิกา 16 MHz
- ดิจิตอลอินพุตและเอาต์พุต 54 ช่องสัญญาณ
- มีพอร์ตพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) จำนวน 15 ช่องสัญญาณที่สามารถกำหนดความละเอียดได้ 8 บิต
- แอนะล็อกอินพุต 16 ช่องสัญญาณ

โดยปกติการใช้งานพอร์ตไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีเอาต์พุตเป็นสัญญาณดิจิตอล แต่สัญญาณควบคุมที่จะนำไปใช้ควบคุมบอร์ดเชิงพาณิชย์จะต้องเป็นสัญญาณแอนะล็อก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจรแปลงดิจิตอลเป็นแอนะล็อก ซึ่งรายละเอียดของวงจรดังกล่าวได้นำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป

5.2.5 โมดูลแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะล็อก MCP7425

จากหัวข้อที่ 5.2.1 ได้กล่าวถึงคุณสมบัติของบอร์ดขับเคลื่อนโดยสามารถควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านได้ทั้งหมด 3 รูปแบบ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้รูปแบบการป้อนสัญญาณควบคุมแบบแอนะล็อกในรูปของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า $\left(V_{in,dc}\right)$ ซึ่งต่อเข้าบริเวณพอร์ต ADJ ของบอร์ดขับเคลื่อน โดยใช้โมดูล MCP7425 แสดงได้ดังรูปที่ 5.10

รูปที่ 5.10 โมดูลแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะล็อก MCP7425

สำหรับโมดูลนี้ใช้สำหรับการรับสัญญาณดิจิตอลจากบอร์ด Arduino mega 2560 แปลงเป็นสัญญาณแรงดันแอนะล็อก $\left(V_{in,dc}\right)$ มีความละเอียด 12 บิต (12-bit resolution) ที่แรงดัน +5 V_{DC} ซึ่งหมายถึงจะรับสัญญาณดิจิตอลที่ค่าตัวเลขอยู่ระหว่าง 0-4096 ผลการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก คำนวณได้จากสมการที่ (5-3)

$$V_{in,dc} = \frac{D_{out} \times V_{ref}}{4096} \quad (5\text{-}3)$$

โดย D_{out} คือ ค่าตัวเลขดิจิตอลที่ได้จากบอร์ด Arduino

V_{ref} คือ แรงดันอ้างอิงซึ่งกำหนดไว้เท่ากับ 5 V_{DC}

คุณสมบัติที่สำคัญของโมดูลแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก MCP7425

- เชื่อมต่อแบบ I2C ความละเอียด 12 บิต
- ไฟเลี้ยง 2.7 ถึง 5.5 V_{DC}
- หน่วยความจำ EEPROM
- ช่วงอุณหภูมิที่สามารถทำงานได้ -40 ถึง 125 °C

5.3 การทดสอบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

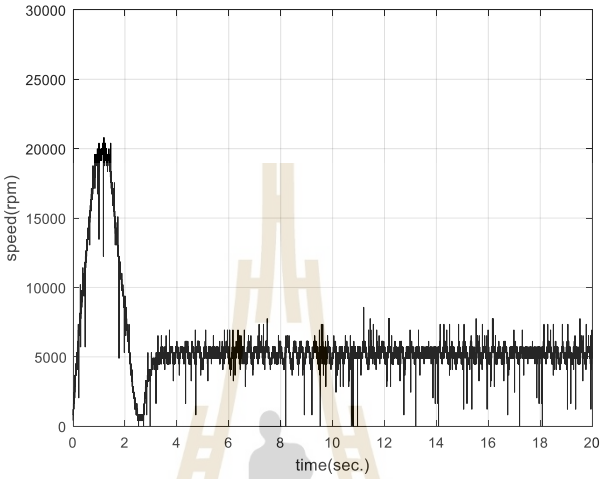
การทดสอบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบแบบวงปิดในห้องปฏิบัติการ โดยมีการเขียนโปรแกรมตัวควบคุมพีไอดีบนบอร์ด Arduino Mega 2560 ด้วยโปรแกรมภาษาซีที่มีการกำหนดความเร็วอ้างอิงและขอบเขตของสัญญาณควบคุม ค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้ในงานนี้ได้มาจากการออกแบบด้วยกฎซีกเลอร์-นิโคลส์และวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว แสดงได้ดังตารางที่ 5.1 เพื่อพิจารณาสมรรถนะผลการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านโดยรายละเอียดของโปรแกรมภาษาซีสำหรับบอร์ด Arduino Mega 2560 ที่มีตัวควบคุมพีไอดีแสดงไว้ใน ภาคผนวก ง.

ตารางที่ 5.1 ค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีไอดี

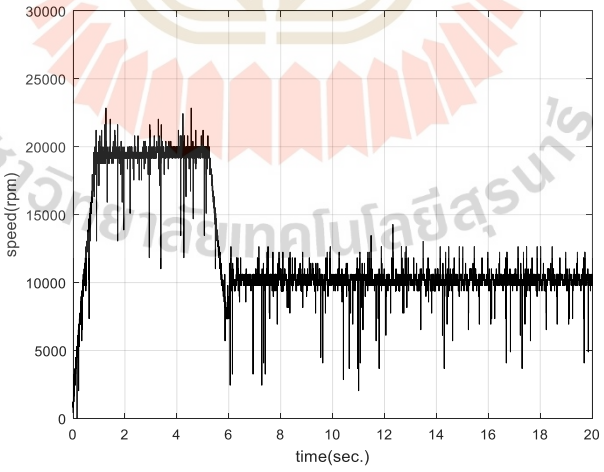
สัมประสิทธิ์	กฎซีกเลอร์-นิโคลส์	การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว
K_P	10.7769	10.7166
K_I	103.6240	0.0011
K_D	0.2802	0.4351

จากตารางค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีไอดีดังตารางที่ 5.1 สามารถนำค่าดังกล่าวไปใช้สำหรับชุดทดสอบ เมื่อกำหนดค่าความเร็วรอบอ้างอิงเป็น 5000 10000 15000 และ 20000 rpm ผลการ

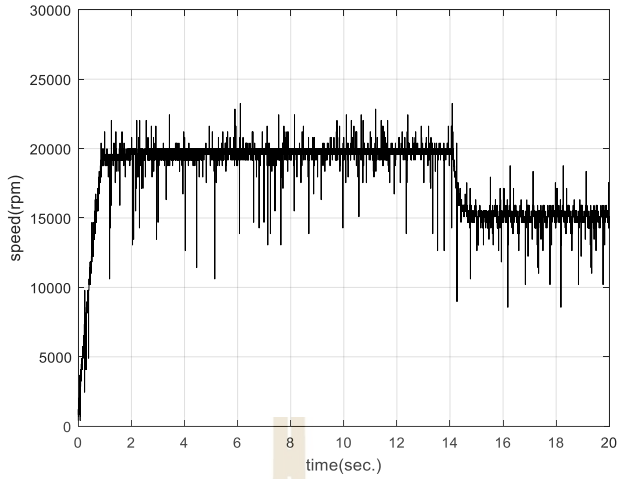
ทดสอบการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์ในห้องปฏิบัติการ โดยอาศัยตัวควบคุมพีไอดีที่ได้รับการออกแบบด้วยกฎซีกเลอร์-นิโคลส์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.11 ถึง 5.14



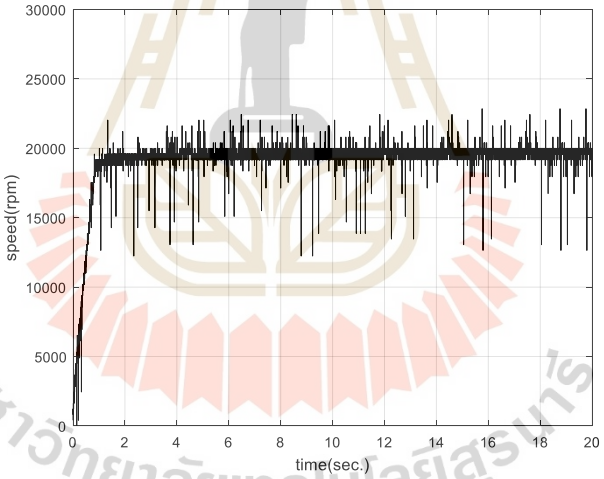
รูปที่ 5.11 ผลการควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ตัวควบคุมจากการออกแบบด้วยกฎของซีกเลอร์-นิโคลส์ที่ 5000 rpm



รูปที่ 5.12 ผลการควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ตัวควบคุมจากการออกแบบด้วยกฎของซีกเลอร์-นิโคลส์ที่ 10000 rpm



รูปที่ 5.13 ผลการควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ตัวควบคุมจากการออกแบบด้วยกฎของซีกเลอร์-นิโคลส์ที่ 15000 rpm

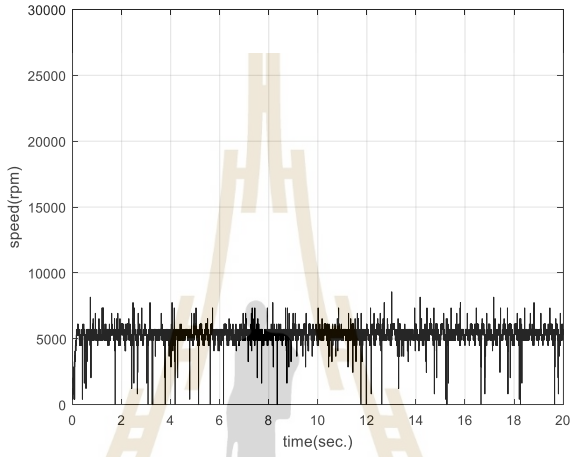


รูปที่ 5.14 ผลการควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ตัวควบคุมจากการออกแบบด้วยกฎของซีกเลอร์-นิโคลส์ที่ 20000 rpm

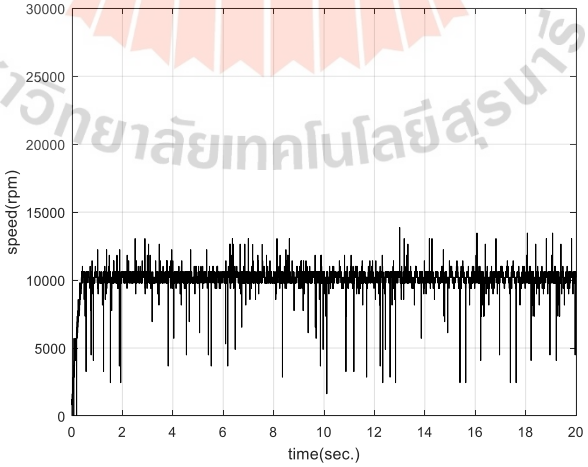
พิจารณาจากรูปที่ 5.11 ถึง 5.13 จะสังเกตได้ว่า ผลตอบสนองความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านสามารถควบคุมให้เป็นไปตามความเร็วรอบอ้างอิงที่กำหนดได้ แต่สมรรถนะในการควบคุมจะมีความผิดเพี้ยนบ้าง โดยมีการพุ่งเกินก่อนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 5.14 ที่ความเร็วรอบ 20000 rpm พบว่า ผลการควบคุมความเร็วรอบมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีไม่มีการ

พุ่งเกินก่อนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ซึ่งจากผลการทดสอบในรูปที่ 5.11 ถึง 5.14 ให้ผลสอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยบล็อก Simulink บนโปรแกรม MATLAB ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4

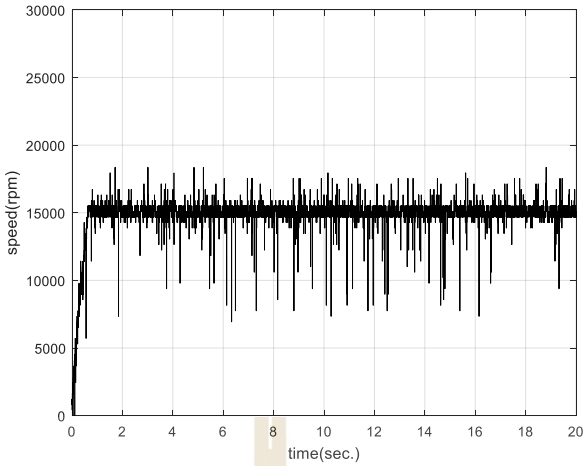
ในลำดับถัดมาเป็นผลการทดสอบการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีตัวควบคุมพีไอดี โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมได้จากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.15 ถึง 5.18



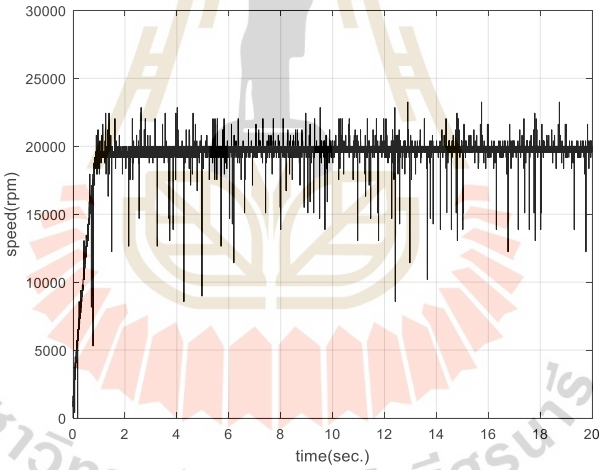
รูปที่ 5.15 ผลการควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ตัวควบคุมจากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวที่ 5000 rpm



รูปที่ 5.16 ผลการควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ตัวควบคุมจากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวที่ 10000 rpm



รูปที่ 5.17 ผลการควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ตัวควบคุมจากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวที่ 15000 rpm



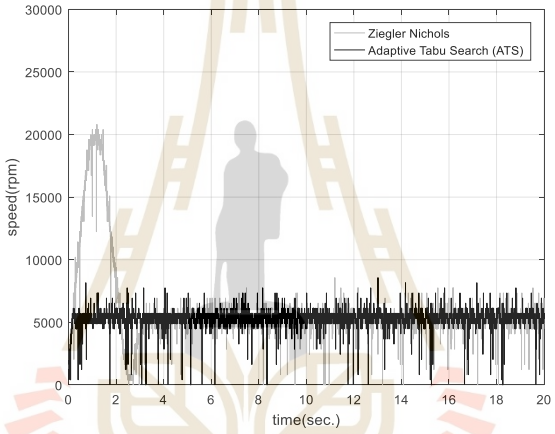
รูปที่ 5.18 ผลการควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ตัวควบคุมจากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวที่ 20000 rpm

พิจารณาจากรูปที่ 5.15 ถึง 5.18 พบว่า ผลตอบสนองความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านสามารถถูกควบคุมให้เป็นไปตามความเร็วรอบอ้างอิงที่กำหนดได้ทั้ง 4 ช่วงความเร็วรอบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB การเปรียบเทียบสมรรถนะของผลควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านด้วยตัวควบคุมแบบดั้งเดิมและวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวจะนำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป

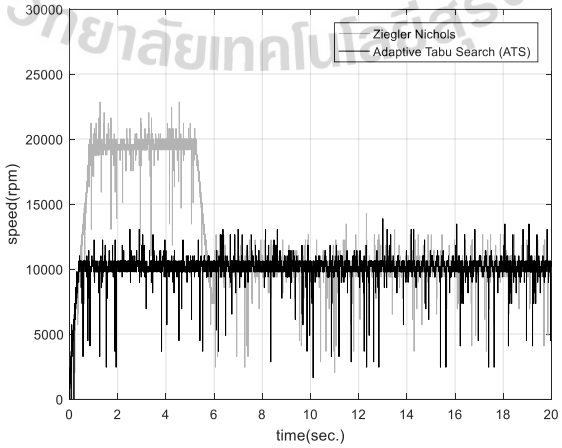
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะผลการควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ตัวควบคุมจากการออกแบบด้วยกฎของซีกเลอร์-นิโคลส์และการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

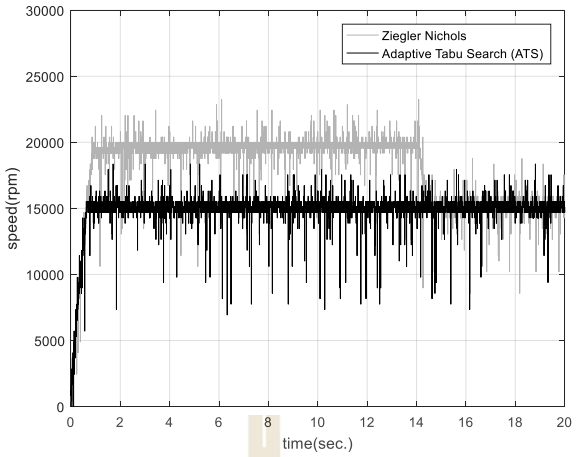
ในหัวข้อที่ 5.3 เป็นการนำเสนอผลการทดสอบการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์ตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งได้จากการออกแบบด้วยกฎซีกเลอร์-นิโคลส์และวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว เพื่อแสดงให้เห็นผลการควบคุมความเร็วรอบ การเปรียบเทียบสมรรถนะผลการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์ พร้อมทั้งมีการควบคุมแบบวงปิดด้วยตัวควบคุมพีไอดีที่ความเร็วรอบ 5000 10000 15000 และ 20000 rpm สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.19 ถึง 5.22 ตามลำดับ ดังนี้



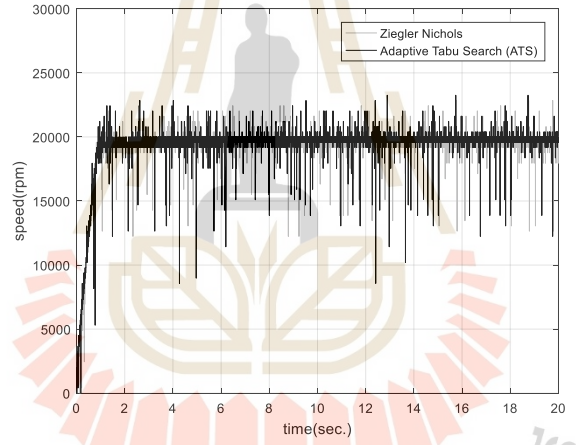
รูปที่ 5.19 การเปรียบเทียบสมรรถนะผลการควบคุมความเร็วรอบที่ 5000 rpm



รูปที่ 5.20 การเปรียบเทียบสมรรถนะผลการควบคุมความเร็วรอบที่ 10000 rpm



รูปที่ 5.21 การเปรียบเทียบสมรรถนะผลการควบคุมความเร็วรอบที่ 15000 rpm



รูปที่ 5.22 การเปรียบเทียบสมรรถนะผลการควบคุมความเร็วรอบที่ 20000 rpm

จากรูปที่ 5.19 ถึง 5.22 พบว่า ผลการควบคุมความเร็วรอบที่ทดสอบกับชุดทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการด้วยตัวควบคุมพีไอดีที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบตาบูเชิงปรับตัวมีสมรรถนะการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยกฎของซีกเลอร์-นิโคลส์ โดยพิจารณาจาก ช่วงเวลาขาขึ้น ช่วงเวลาเข้าที่ และเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน ทั้งนี้เป็นเพราะการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวสามารถออกแบบโดยคำนึงถึงขอบเขตของสัญญาณควบคุม ส่งผลให้สัญญาณควบคุมของชุดทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการไม่เกิดการอิ่มตัวของสัญญาณ ส่งผลให้ตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวมีสมรรถนะที่ดีกว่าในการลู่เข้าค่าอ้างอิงที่ตั้งไว้

5.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 5 ได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบและการทดสอบความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์โดยชุดตัวควบคุมพีไอดีที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมจะใช้กฎซีกเลอร์-นิโคลส์ และการประยุกต์ใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ด้วยการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะผลการควบคุมความเร็วรอบจากชุดทดสอบจริง พบว่าผลการควบคุมความเร็วรอบที่มีตัวควบคุมพีไอดีจากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวให้สมรรถนะที่ดีกว่าตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยกฎของซีกเลอร์-นิโคลส์เนื่องจากอัลกอริทึมการค้นหาของวิธีการแบบตาบูเชิงปรับตัวสามารถพิจารณาขอบเขตของสัญญาณควบคุมเพื่อให้สอดคล้องกับชุดทดสอบจริงในทางปฏิบัติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 6
สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านโดยใช้เทคนิคการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้เริ่มจากการค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน แนวทางการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำได้ 2 วิธีคือ การพิสูจน์แบบแม่นตรงโดยอาศัยการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าร่วมกับหลักการของเครื่องจักรกลไฟฟ้า สำหรับอีกแนวทางหนึ่งเป็นการอาศัยแบบจำลองกล่องดำที่อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสาม แบบจำลองดังกล่าวสามารถอธิบายพฤติกรรมและผลการตอบสนองทางพลวัตของมอเตอร์ได้อย่างถูกต้อง จากนั้นจึงนำแบบจำลองไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีเป็นลำดับถัดไป

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เริ่มจากการพิจารณาระบบแบบวงเปิด (กรณียังไม่มีตัวควบคุม) เพื่อหาค่าผลการตอบสนอง จากนั้นจึงอาศัยวิธีตาบูเชิงปรับตัวในการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองกล่องดำในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสาม เพื่อยืนยันผลการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวดำเนินการโดยเปรียบเทียบผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองในสภาวะความเร็วรอบอื่นที่ไม่ได้ใช้ในการพิจารณา ผลการตอบสนองยังคงมีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นแบบจำลองกล่องดำที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวจึงเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้องสามารถนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมได้ รายละเอียดการหาแบบจำลองได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 3 หลังจากนั้นจึงทำการเพิ่มตัวควบคุมพีไอดีเข้าไปในระบบ โดยที่ตัวควบคุมดังกล่าวออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมโดยใช้กฎซีกเลอร์-นิโคลส์ และการประยุกต์ใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ด้วยการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว การเปรียบเทียบสมรรถนะผลการควบคุมอาศัยการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB นอกจากนี้ยังได้มีการจำลองสถานการณ์การคงค่าความเร็วรอบของมอเตอร์เมื่อโหลดทางกลมีการเปลี่ยนแปลงบนโปรแกรม MATLAB ในบทที่ 4 งานวิจัยวิทยานิพนธ์ไม่เพียงแต่อาศัยการจำลองสถานการณ์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมเท่านั้น แต่ยังได้มีการสร้างชุดทดสอบสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์ ผลการ

ทดสอบพบว่าตัวควบคุมพีไอดีที่ออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวให้สมรรถนะการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม เนื่องจากอัลกอริทึมการค้นหาของวิธีการแบบตาบูเชิงปรับตัวสามารถพิจารณาขอบเขตของสัญญาณควบคุมเพื่อให้สอดคล้องกับชุดทดสอบจริงในทางปฏิบัติ รายละเอียดเกี่ยวกับการสร้างชุดทดสอบและผลการทดสอบนำเสนอไว้แล้วในบทที่ 5

จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้คือการมุ่งเน้นที่จะประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีไอดีในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์ นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบสมรรถนะตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ การเปรียบเทียบผลการตอบสนองทั้งจากการจำลองสถานการณ์และชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการให้ผลที่สอดคล้องกัน โดยตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ให้สมรรถนะการควบคุมความเร็วรอบที่ดีกว่า เนื่องจากการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมไม่ได้คำนึงถึงผลของสัญญาณควบคุมจึงทำให้เกิดการพุ่งเกินก่อนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ลำดับถัดมาคือการนำเสนอแบบจำลองกล่องดำที่อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนมาใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุม ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวสามารถให้ผลการตอบสนองที่มีความถูกต้องสามารถใช้ในการออกแบบตัวควบคุมได้เป็นอย่างดี

6.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

- วิธีการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้สำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านนั้นสามารถประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์อื่น ๆ นอกเหนือจากที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ เช่น การค้นหาแบบจีนเนติกอัลกอริทึม (GA) และการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO) เป็นต้น

- ควรออกแบบวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน (frequency to voltage converter) ให้มีแรงดันเอาต์พุตที่เหมาะสมกับย่านการอ่านค่าของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

- ควรมีการออกแบบวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (RC filter) เพื่อลดสัญญาณรบกวนที่ออกมากจากวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน เนื่องจากสัญญาณดังกล่าวจะส่งผลให้การทำงานในส่วนของการอ่านค่าของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาจเกิดความผิดพลาด

- ควรพัฒนาออกแบบตัวฐานของมอเตอร์ให้มั่นคง เนื่องจากความเร็วรอบของมอเตอร์หมุนเร็วขึ้นแรงหนีศูนย์กลางจะทำให้มอเตอร์สั่นและอาจเกินอันตรายต่อผู้ใช้งานได้

- ควรมีการออกแบบลายวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานจริงในอนาคต

- ควรมีการทดสอบการคงค่าความเร็วรอบของมอเตอร์เมื่อโหลดทางกลมีการเปลี่ยนแปลงด้วยชุดทดสอบจริง

รายการอ้างอิง

กองพัน อารีรักษ์. (2560). *ระบบควบคุม: Control system*. (พิมพ์ครั้งที่ 1). สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

จักรกริช ภักดีโต. (2557). *การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง* (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

เฉลิมพล เรื่องพัฒนาวิวัฒน์, และยุทธนา กันทะพะเยา. (2554). การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับจักรยานสามล้อไฟฟ้า. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, 1*(1), 17-22.

ประภาพรรณ เคลือบวัณณรัตน์. (2563). *การออกแบบตัวควบคุม PID เชิงเศษส่วนสำหรับระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านด้วยขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้แบบขนาน* (วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์, กรุงเทพมหานคร.

ภักดี สวัสดิ์นะที. (2556). *การสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม* (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

ศิริพงษ์ ปะวะโก. (2560). *เครื่องถ่วงสมดุลแผ่นเหวี่ยงหมุนแนวตั้ง* (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

Achiammal, B., & Kayalvizhi, R. (2014) Genetic Algorithm based PI controller for Negative Output Elementary LUO converter. *2014 IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technology,* (pp.1099-1103). India: Ramanathapuram. doi:10.1109/ICACCCT.2014.7019267.

Bayoumi, E.H.E., & Soliman, M.H. (2007). PID/PI tuning for minimal overshoot of permanent magnet brushless DC motor drive using partical swarm optimization. *Electromotion Scientific Journal, 14,* 198-208.

Beladjing, D.E., Boudana, D., Moualdia, M., Hallouz, M., & Wira, P. (2021) A Comparative Study of BLDC Motor Speed Control Using PI and ANN Regulator. *2021 18th International Multi-conference on Systems, Signals & Devices (SSD),* (pp.1291-1295). Tunisia: Monastir. doi:10.1109/SSD52085.2021.9429474.

Carlos Gamazo Real, J., & Jaime Gomez, G. (2015). Position and speed in brushless DC motors using the derivative of terminal phase voltage technique with a simple and versatile motor driver implementation. *Journal of Electrical Engineering and Technology, 10*(4), 1540-1551.

Dasari, M., Reddy, A.S., & Kumar, M.V. (2017) Modeling of a commercial BLDC motor and control using GA-ANFIS tuned PID controller. *2017 International Conference on Innovative Research in Electrical Sciences (IICIRES),* (pp.1-6). India: Nagapattinam. doi:10.1109/IICIRES.2017.8078305.

Hazari, M.R., Jahan, E., Siraj, M.E., Khan, M.I.T., & Saleque, A.M. (2014) Design of a Brushless DC (BLDC) motor controller. *International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology,* (pp.1-6). Bangladesh: Dhaka. doi:10.1109/ICEEICT.2014.6919048.

Khluabwannarat, P., Nawikavatan, A., & Puangdownreong, D. (2020) Application of Parellel Flower Pollination Algorithm to Fractional-Order Model Identification of BLDC Motor. *Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON),* (pp.131-134). Thailand: Phuket. doi:10.1109/ECTI-CON49241.2020.9158274.

Kojabadi, H.M., Cao, Q., Chang, L., Ghribi, M., & Dupuis, A. (2005) Optimal PI controller gains using a multi-loop multi-objective genetic algorithm in IM drives. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering,* (pp.470-473). Canada: Saskatoon, SK. doi:10.1109/CCECE.2005.1556972.

Li, X., Chen, M., & Tsutomu, Y. (2013) A method of searching PID controller's optimized coefficients for Buck converter using particle swarm optimization. *2013 IEEE 10th International Conference on Power Electronics and Drive System (PEDS),* (pp.238-243). Japan: Kitakyushu. doi:10.1109/PEDS.2013.6527021.

Ljung, L. (2001). Black-box Models from Input-Output Measurements. *18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC),* (pp.138-146). Hungary: Budapest. doi: 10.1109/IMTC.2001.928802

Mohankrishna, C., Rajesh Kumar Gowd, N., Ramesh, A., & Subba Rao Gupta. (2016). Modelling and Simulation of BLDC Motor Using State Space Approach. International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, *Instrumentation and Control Engineering, 4*(5), 533-538. doi:10.17148/IJIREEICE.2016.45123

Patel, V.K.S., & Pandey, A.K. (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*, *3*(4), 1-14.

Patel, V.K.S., & Pandey, A.K. (2013). Modeling and simulation of brushless DC motor using PWM control technique. *International Journal of Engineering Research and Applications*, *3*(3), 612-620.

Poovizhi, M., Kumaran, M.S., Ragul, P., & Priyadarshini L.I. (2017). Investigation of mathematical modelling of brushless dc motor (BLDC) drives by using matlab-simulink. *International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC),* (pp. 178-183). India: Chennai. doi:10.1109/ICPEDC.2017.8081083

Puangdownreong, D., Areerak, K-N., Sujitjorn, S., & Kulworawanichpong, T. (2009) Convergence analysis of adaptive tabu search. *ScienceAsia, 30*(2), 183-190.

Ridwan, M., Yuniarto, M.N., & Soedibyo. (2016) Electrical equivalent circuit based modeling and analysis of brushless direct current (BLDC) motor. *International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, (pp.471-478). Indonesia: Lombok. doi:10.1109/ISITIA.2016.7828706.

Sahin, E., Ayas, M.S., & Altas, I.H. (2014) A PSO optimized fractional-order PID controller for a PV system with DC-DC boost converter. *2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition,* (pp.477-481). Türkiye: Antalya. doi: 10.1109/EPEPEMC.2014.6980539.

Sarala, P., Kodad, S.F., & Sarvesh, B. (2016) Analysis of closed loop current controlled BLDC motor drive. *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT),* (pp.1464-1468). India: Chennai. doi:10.1109/ICEEOT.2016.7754925.

Sharma, A. Negi, H., & Punetha, D. (2016) Adaptive speed control of BLDC motor with effective starting and minimized cost and core loss. *2016 International Conference on Advances in Computing,* (pp.1-4). India: Dehradun. doi:10.1109/ICACCA.2016.7578885.

Tibor, B., Fedák, V., & Durovský F. (2011) Modeling and simulation of the BLDC motor in MATLAB GUI. *2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics,* (pp.1403-1407). Poland: Gdansk. doi: 10.1109/ISIE.2011.5984365

Zheng, Y., Cao, Z., & Wang, S. (2018) Comparative Study of BLDC Motor Modeling. *2018 Australian & New Zealand Control Conference (ANZCC).* (pp.62-64). Australia: Melbourne, VIC. doi:10.1109/ANZCC.2018.8606596.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก

พารามิเตอร์ของการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวที่ใช้ในการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก.1 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปของแบบจำลองกล่องดำด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

ตารางที่ ก.1 การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้นที่ใช้ในการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปของแบบจำลองกล่องดำ

ค่า ε					
ครั้งที่	**จำนวนคำตอบเริ่มต้น**				
	100	150	200	250	300
1	0.0173360	0.017002	0.019902	0.024679	0.025747
2	0.0254789	0.027972	0.029265	0.013162	0.012425
3	0.0220723	0.016252	0.024386	0.008793	0.016471
4	0.0175303	0.015759	0.011523	0.021710	0.028668
5	0.0168055	0.012747	0.027143	0.023397	0.014460
ค่าเฉลี่ย	0.0198441	0.017946	0.022444	0.018360	0.019500

ตารางที่ ก.2 การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้างที่ใช้ในการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปของแบบจำลองกล่องดำ

ค่า ε					
ครั้งที่	**จำนวนคำตอบรอบข้าง**				
	100	150	200	250	300
1	0.0135945	0.019253	0.019623	0.010979	0.009244
2	0.0247813	0.017386	0.011073	0.011870	0.010117
3	0.0161677	0.014759	0.011546	0.010684	0.014848
4	0.0262909	0.010587	0.012763	0.011870	0.015219
5	0.0216589	0.008864	0.015830	0.011925	0.010099
ค่าเฉลี่ย	0.0204987	0.014100	0.014161	0.011466	0.011906

ตารางที่ ก.3 การทดสอบค่ารัศมีการค้นหาที่ใช้ในการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปของแบบจำลองกล่องดำ

ค่า ε					
ครั้งที่	**ค่ารัศมีการค้นหา (เปอร์เซ็นต์)**				
	10	**20**	**30**	**40**	**50**
1	0.0184725	0.021999	0.013279	0.018655	0.014386
2	0.0187487	0.014808	0.015575	0.022289	0.015481
3	0.0155756	0.010956	0.016183	0.021710	0.020441
4	0.0246175	0.014338	0.015372	0.020072	0.015541
5	0.0260240	0.024016	0.009814	0.020462	0.011646
ค่าเฉลี่ย	0.0206876	0.017223	0.014045	0.020637	0.015495

ตารางที่ ก.4 การทดสอบค่าอัตราปรับลดรัศมีที่ใช้ในการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปของแบบจำลองกล่องดำ

ค่า ε					
ครั้งที่	**ค่าอัตราการปรับลดรัศมี**				
	1.02	**1.04**	**1.06**	**1.08**	**1.10**
1	0.0115486	0.008111	0.011491	0.011688	0.012798
2	0.0112123	0.015941	0.012041	0.013179	0.017449
3	0.0112667	0.009317	0.013430	0.009896	0.007594
4	0.0122850	0.017113	0.013662	0.011081	0.011105
5	0.0146088	0.009605	0.007548	0.010924	0.012443
ค่าเฉลี่ย	0.0121843	0.012018	0.011634	0.01354	0.012273

จากการทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวได้ทั้งหมดข้างต้น ผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าว สรุปได้ดังนี้

จากตารางที่ ก.1 เมื่อพิจารณาจากค่า ε พบว่าในกรณีจำนวนคำตอบเริ่มต้น 150 คำตอบ มีค่า ε น้อยที่สุดจึงเลือกใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 150 คำตอบ

จากตารางที่ ก.2 เมื่อพิจารณาจากค่า ε พบว่าในกรณีจำนวนคำตอบรอบข้าง 250 คำตอบ มีค่า ε น้อยที่สุดจึงเลือกใช้จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 250 คำตอบ

จากตารางที่ ก.3 เมื่อพิจารณาจากค่า ε พบว่าในกรณีค่ารัศมีการค้นหาเท่ากับ 30% มีค่า ε น้อยที่สุดจึงเลือกใช้ค่ารัศมีการค้นหาเท่ากับ 30%
จากตารางที่ ก.4 เมื่อพิจารณาจากค่า ε พบว่าในกรณีค่ารัศมีการปรับลดเท่ากับ 1.08 มีค่า ε น้อยที่สุดจึงเลือกใช้รัศมีการปรับลดเท่ากับ 1.08

ก.2 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการค้นหาค่าตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

ตารางที่ ก.5 การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้นที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

ค่า ε					
ครั้งที่	**จำนวนคำตอบเริ่มต้น**				
	30	**40**	**50**	**60**	**70**
1	0.14667088	0.14654053	0.14652147	0.14656157	0.14664403
2	0.14659367	0.14663592	0.14660402	0.14662597	0.14657615
3	0.14652509	0.14664596	0.14655544	0.14657002	0.14662464
4	0.14652705	0.14653247	0.14661703	0.14661215	0.14664403
5	0.14654924	0.14653503	0.14651173	0.14656456	0.14661215
ค่าเฉลี่ย	0.14657319	0.14657798	0.14656194	0.14658685	0.14662020

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.6 การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้างที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

ค่า ε					
ครั้งที่	**จำนวนคำตอบรอบข้าง**				
	30	**40**	**50**	**60**	**70**
1	0.14655070	0.14658787	0.14656411	0.14651523	0.14654850
2	0.14664530	0.14651151	0.14652352	0.14654313	0.14653429
3	0.14653961	0.14655424	0.14652957	0.14655794	0.14649975
4	0.14651234	0.14652140	0.14655676	0.14655676	0.14652488
5	0.14655792	0.14656522	0.14654369	0.14651151	0.14659287
ค่าเฉลี่ย	0.14656117	0.14654805	0.14654353	0.14653691	0.14654006

ตารางที่ ก.7 การทดสอบค่ารัศมีการค้นหาที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

ค่า ε					
ครั้งที่	**ค่ารัศมีการค้นหา (เปอร์เซ็นต์)**				
	30	**40**	**50**	**60**	**70**
1	0.14667088	0.14654053	0.14652147	0.14656157	0.14664403
2	0.14659367	0.14663592	0.14660402	0.14662597	0.14657615
3	0.14652509	0.14664596	0.14655544	0.14657002	0.14662464
4	0.14652705	0.14653247	0.14661703	0.14661215	0.14664403
5	0.14654924	0.14653503	0.14651173	0.14656456	0.14661215
ค่าเฉลี่ย	0.14657319	0.14657798	0.14656194	0.14658685	0.14662020

ตารางที่ ก.8 การทดสอบค่าอัตราปรับลดรัศมีที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

ค่า ε					
ครั้งที่	**ค่าอัตราการปรับลดรัศมี**				
	1.10	**1.12**	**1.14**	**1.16**	**1.18**
1	0.14654850	0.14654933	0.14652647	0.14652710	0.14655416
2	0.14653429	0.14648448	0.14653429	0.14659287	0.14659932
3	0.14649975	0.14654975	0.14650416	0.14654933	0.14648448
4	0.14652488	0.14647488	0.14653429	0.14648448	0.14654933
5	0.14659287	0.14659932	0.14652710	0.14649975	0.14648448
ค่าเฉลี่ย	0.14654006	0.14653155	0.14652526	0.14653071	0.14653435

จากการทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวได้ทั้งหมดข้างต้น ผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าว สรุปได้ดังนี้

จากตารางที่ ก.1 เมื่อพิจารณาจากค่า ε พบว่าในกรณีจำนวนคำตอบเริ่มต้น 50 คำตอบ มีค่า ε น้อยที่สุดจึงเลือกใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำตอบ

จากตารางที่ ก.2 เมื่อพิจารณาจากค่า ε พบว่าในกรณีจำนวนคำตอบรอบข้าง 60 คำตอบ มีค่า ε น้อยที่สุดจึงเลือกใช้จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 60 คำตอบ

จากตารางที่ ก.3 เมื่อพิจารณาจากค่า ε พบว่าในกรณีค่ารัศมีการค้นหาเท่ากับ 50% มีค่า ε น้อยที่สุดจึงเลือกใช้ค่ารัศมีการค้นหาเท่ากับ 50%

จากตารางที่ ก.4 เมื่อพิจารณาจากค่า ε พบว่าในกรณีค่ารัศมีการปรับลดเท่ากับ 1.14 มีค่า ε น้อยที่สุดจึงเลือกใช้รัศมีการปรับลดเท่ากับ 1.14

ภาคผนวก ข

กฎซีกเลอร์-นิโคลส์

ตารางที่ ข.1 กฎซีกเลอร์-นิโคลส์สำหรับการตอบสนองแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของพลานต์ (แนวทางที่ 1)

ชนิดของตัวควบคุม	K_P	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

ตารางที่ ข.2 กฎซีกเลอร์-นิโคลส์สำหรับการตอบสนองที่มีการสั่นไกว (แนวทางที่ 2)

ชนิดของตัวควบคุม	K_P	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ค

คู่มือการใช้งานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน ที่มีชุดควบคุมเชิงพาณิชย์และไอซีเบอร์ LM331N

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

北京亿利泰达科技有限公司
Beijing Eletechnic Ltd.

Φ72-201105-220 Brushless DC Motor for Centrifuge

Product Datasheet

Φ72-201105-220 BLDC Overview

- Three Phase, Six Step, Full Wave, Y-Circuit
- Sintered Nd-Fe-B Permanent Magnet Rotor
- Hall Sensor
- Stepless (Coggingless)
- Slot

Parameters	Φ72-201105-220 BLDC Absolute Maximum Ratings	Unit
Rotor/Bearing Broken Speed	23000	rpm
Winding and Rotor Temperature	-20 to +130	℃
Front/Rear Lids Surface Temperature	0 to 70	℃
HIPOT (Winding to Shell)	2000VDC, 1s	

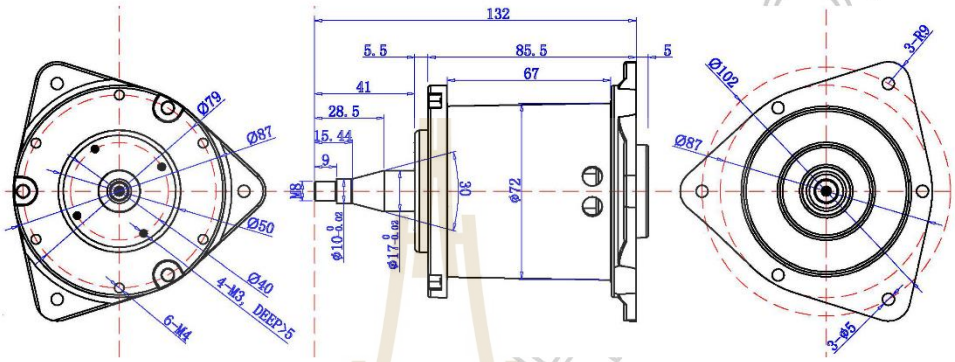
Notice: The Absolute Maximum Ratings are those values beyond which the safety of the device cannot be guaranteed

Parameters	Φ72-201105-220 BLDC Intrinsic Characteristics (20℃)	Unit
Resistance (Including Line)	12	Ohm
Inductance (Including Line)	19	mH
Speed-Torque Gradient	24500	rpm/Nm
Torque Constant	0.12	Nm/A
Speed Constant	95	rpm/V
Back-EMF Constant	10	mV/rpm
Rotor Magnetic Poles	2	Poles
Weight (Including Line)	Approximate 1200	g

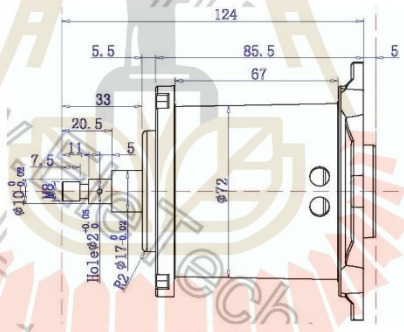
WWW.ELETECHNIC.COM
สถาบันเทคโนโลยีสุรนารี

北京亿利泰达科技有限公司
Beijing Eletechnic Ltd.

Φ72-201105-220 BLDC Physical Size (Unit: mm)



Taper Shaft

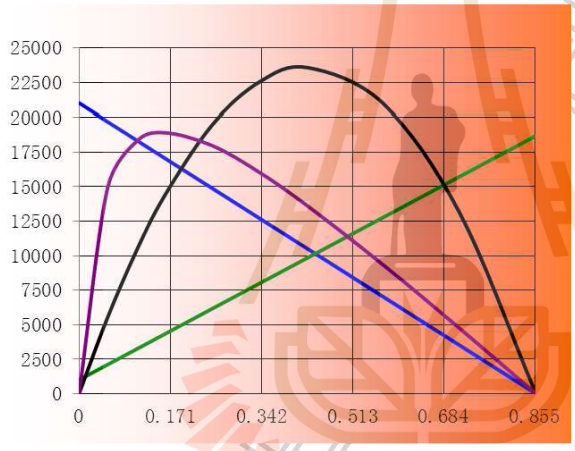


Multi-step Shaft

www.etech มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

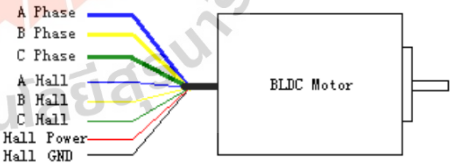
北京亿利泰达科技有限公司
Beijing Eletechnic Ltd.

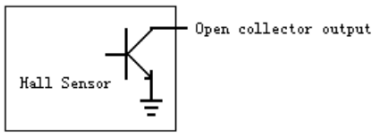
Parameters	Φ72-201105-220 BLDC Performance Characteristics (20℃)					Unit
Nominal Voltage	220					V
Maximum Output Power (P2)	471					W
(See Curves Below)	**No Load Point**	**Some Loaded Points Performance**				
Output Torque (T)	0	0.1	0.15	0.2	0.25	Nm
Output Speed (N)	21000	18550	17330	16100	14880	rpm
Input Current (I)	0.40	1.23	1.64	2.05	2.46	A
Output Power (P2)	0	194	272	337	390	W
Efficiency (η)	0	72	76	75	72	%
Free-convection Cooling	If the shell temperature of the motor is higher than 85℃, fan or other cooling equipments must be installed. Otherwise the motor may be damaged by hotness.					



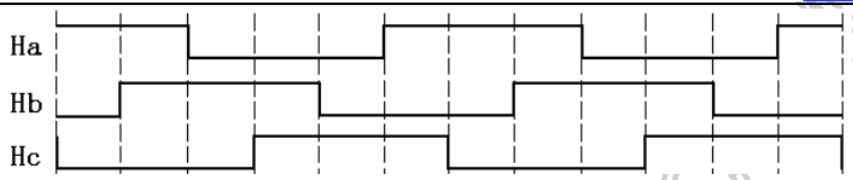
Φ72-201105-220 BLDC Connection Diagram and Hall Output Waveforms

- Three Phases: AWG18, Blue thick--A phase, Yellow thick--B phase, Green thick--C phase
- Halls: AWG24, Blue thin--A hall, Yellow thin--B hall, Green thin--C hall, Red thin--Hall power supply, Black thin--Hall GND
- Three Encoder Halls: AWG24, Purple, Gray, White
- Brown: MZ6-105, Positive Temperature Coef. Resistance
- Hall Supply Voltage: 4.5 to 16VDC Regulated Supply
- Hall Power Supply Current: Less than 20mA
- Hall Output: Open collector. Require external pull-up resistors. Maximum output voltage is 16V
- Electrical Hall Sensor Phasing: 120°





北京亿利泰达科技有限公司
Beijing Eletechnic Ltd.



Hall Sensor Output Commutation Waveforms

Notice: The A, B, C three windings and Ha, Hb, Hc three hall sensors must be connected correctly, otherwise the controller and motor may be damaged.

Eletechnic BLDC Motor Product Code Regulation

X - Y - Z

X: Flange Size (mm)
Y: Sub-series
Z: Nominal Voltage (V)

is registered trademark of Beijing Eletechnic Ltd. Eletechnic reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Eletechnic makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Eletechnic assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. All parameters which may be provided in Eletechnic data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters must be validated for each customer application by customer's technical experts. Eletechnic does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Eletechnic products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Eletechnic product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Eletechnic products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Eletechnic and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Eletechnic was negligent regarding the design or manufacture of the part.

Beijing Eletechnic Ltd.
Tel: 0086-10-68422061
Fax: 0086-10-68422061
EMAIL: SALES@ELETECHNIC.COM
HTTP://WWW.ELETECHNIC.COM

北京亿利泰达科技有限公司
Beijing Eletechnic Ltd.

BLMD-4CTV39-B1P-TSM4 High Voltage Brushless DC Motor Driver

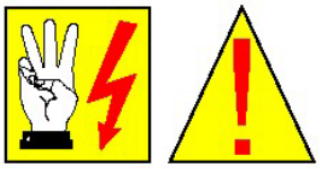
Product Datasheet

BLMD-4CTV39-B1P-TSM4 is a high voltage, three phase, trapezoidal wave and hall sensored Brushless DC Motor Driver (BLMD). This driver has two sub-types, AC type and DC type. AC type is suitable for 75-275VAC, 50/60Hz, one phase power supply. And DC type is suitable for 75-390VDC power supply. Three phase rated output current is 4ADC.

- Internal AC to DC Rectifier and Filter (Only for AC type)
- Three Phase IGBTs H-Bridge (15.625kHz PWM)
- Hall Sensor Electrical Phasing 120°/240°
- Reference Voltage for Hall Sensors--+5V
- Motor Over Temperature Protection--PTC
- Forward/Reverse Direction Control--F/R
- Speed Frequency Feedback--FG
- System Malfunction Fault Feedback--FLT
- Run Enable/Disable Control--En
- Dynamic Braking Control--BRK
- PWM Control--ADJ
- PWM Gradient Control--dt
- Motor Line Current Feedback--CFB
- Input Voltage Feedback--VFB
- Heat Sink Temperature Feedback--TFB
- Motor Running Direction Feedback--DIR
- Over Current Protection
- Over Voltage Lockout
- Under Voltage Lockout
- Heat Sink Over Temperature Protection

4	C	T	V	39	-	B	1P	-	T	S	M4
Rated 4ADC	Current Protection	Temperature Protection	Voltage Lockout	Max 390VDC		Bootstrap	One Phase Protection		Trapezoidal Wave	S:Sensored SL:Sensorless	Sub-type

北京亿利泰达科技有限公司
Beijing Eletechnic Ltd.



Please read Safety Warning below carefully before installing and operating this driver!

- This product should be installed and serviced by a qualified technician, electrician, or electrical maintenance person familiar with its operation and the hazards involved.
- Proper installation, which includes wiring, mounting in proper enclosure, fusing, cooling, and grounding can reduce the chance of electrical shocks, fires, or explosion in this product or products used with this product, such as motors, coils, hall sensors and/or other circuits connected to it.
- Be sure to eliminate body static electricity when operation.
- To connect or disconnect any junction when power on is FORBIDDEN. J3 or J4 phase missing is FORBIDDEN.
- Do not touch the PCB board, and/or other circuits connected to it, when power on. Eye protection must be worn and insulated tools must be used when working under power.
- All output and input terminals are NOT ISOLATED from the incoming AC mains supply and may be at up to 400V with respect to earth, regardless of the input mains supply voltage applied. These terminals are live during connection. Do not attempt to access these terminals during this time.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

北京亿利泰达科技有限公司
Beijing Eletechnic Ltd.

Absolute Maximum Ratings

(The Absolute Maximum Ratings are those values beyond which the safety of the driver cannot be guaranteed)

Parameter	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltage	V_{J1}	275 (rms) 390 (max)	VAC VDC
Three Phase Peak Output Current	I_A, I_B, I_C	9.3 (peak)	ADC
Min Permissible Inductance of Motor	L_{Motor} (line to line)	1	mH
Max Controllable Motor Speed	One Magnetic Pole-pair Rotor	50000	rpm
Hall Reference Voltage Output Current	I_{+5V}	20	mA
Hall, PTC, F/R, EN, BRK, ADJ, dt Inputs Voltage Range	V_{Ha}, V_{Hb}, V_{Hc}, V_{PTC}, $V_{F/R}$, V_{EN}, V_{BRK}, V_{ADJ}, V_{dt}	-0.5 to +5.5	V
FG, FLT, CFB, VFB, TFB, DIR Outputs Shortcut Current	I_{FG}, I_{FLT}, I_{CFB}, I_{VFB}, I_{TFB}, I_{DIR}	+25 (Shortcut to GND) -25 (Shortcut to +5V)	mA
Operating Ambient Temperature Range	Ta	-10 to +70	C
HIPOT	J1: N/L to Earth	2000VDC, 1s	

Electrical Characteristics

(J1=220VAC, 50Hz, Ta=20C, unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Min	Typical	Max	Unit
J1--Power Supply					
AC 50/60Hz, 1 Phase	V_{AC}	75	110/220	275	VAC
	I_{AC}	-	5	-	AAC
DC	V_{DC}	75	155/310	390	VDC
	I_{DC}	-	4	-	ADC
J3--Three Phase Driver Output					
A, B, C Driver Output	V_{ABC}	-	155/310	-	VDC
	I_{ABC}	-	4	-	ADC
PWM Frequency	f_{PWM}	-	15.625	-	kHz
PWM Resolution	ΔPWM	-	1/256	-	-
J4--+5V--Reference Voltage for Hall Sensors					
Output Voltage	V_{+5V}	4.8	5.1	5.4	VDC
Output Current	I_{+5V}	-	-	20	mA
J4--Ha, Hb, Hc--Digital Inputs					
High Threshold Volt	V_{IH}	3.5	-	5.5	V
Low Threshold Volt	V_{IL}	-0.5	-	1.5	V
High State Current	I_{IH}	-	-	3.2	mA
Low State Current	I_{IL}	-	-	4.5	mA

J5--PTC--Digital Input

High Threshold Volt	V_{IH}	3.5	-	5.5	V
Low Threshold Volt	V_{IL}	-0.5	-	1.5	V
High State Current	I_{IH}	-	-	1.5	mA
Low State Current	I_{IL}	-	-	5.5	mA

J2--FG, FLT, DIR--Digital Outputs

High State Volt	V_{OH}	4	-	-	V
Low State Volt	V_{OL}	-	-	0.7	V
Source Current	I_{OH}	-	(note1)	3	mA
Sink Current	I_{OL}	-1	(note1)	-	mA

J2--F/R--Digital Input

High Threshold Volt	V_{IH}	4.5	-	5.5	V
Low Threshold Volt	V_{IL}	-0.5	-	0.5	V
High State Current	I_{IH}	-	JFR@LOW	-1.8	mA
Low State Current	I_{IL}	-	JFR@HIGH	0.17	mA

J2--EN, BRK--Digital Inputs

High Threshold Volt	V_{IH}	3.5	-	5.5	V
Low Threshold Volt	V_{IL}	-0.5	-	1.5	V
High State Current	I_{IH}	-	-	0.08	mA
Low State Current	I_{IL}	-	-	0.25	mA

J2--ADJ--PWM Control Analog Input

0% / 100% PWM	V_{ADJ}	1.28	-	3.83	V
Input Current @3.83V	I_{IH}	-	-	-6.5	uA
Input Current @1.28V	I_{IL}	-20	-	-	uA
A/D Resolution	ΔV	-	1/256	-	-

J2--dt--PWM Gradient Control Analog Input

0us / 355123200us	Vdt	1.28	-	3.83	V
Input Current @3.83V	I_{IH}	-1.2	-	-	mA
Input Current @1.28V	I_{IL}	-	-	1.2	mA
A/D Resolution	ΔV	-	1/256	-	-

J2--CFB--Motor Line Current Feedback Analog Output

Output Volt Range	V_{CFB}	0	-	6	V
Output Current	I_{CFB}	-	(note1)	-	mA
Coefficient	K_{CFB}	-	1.5625A/1V	-	ADC/VDC

J2--VFB--Input Voltage Feedback Analog Output

Output Volt Range	V_{VFB}	0	-	5.5	V
Output Current	I_{VFB}	-	(note1)	-	mA
Coefficient	K_{VFB}	-	100V/1V	-	VDC/VDC

J2--TFB--Heat Sink Temperature Feedback Analog Output

Output Volt Range	V_{TFB}	0	-	5.5	V
Output Current	I_{TFB}	-	(note1)	-	mA

Over Current Protection

Lockout Current	I_A, I_B, I_C	-	9.3	-	ADC
Unlock Current	I_A, I_B, I_C	-	2	-	ADC

Over Voltage Lockout

Lockout Voltage	V_{BEMF}	-	400	-	VDC
Unlock Voltage	V_{BEMF}	-	395	-	VDC

Under Voltage Lockout

Lockout Voltage	V_{BEMF}	-	50	-	VDC
Unlock Voltage	V_{BEMF}	-	45	-	VDC

Heat Sink Over Temperature Protection

Lockout Temperature	Ts	-	85	-	C
Unlock Temperature	Ts	-	75	-	C

NOTE1: $I_{FG}+I_{FLT}+I_{DIR}+I_{VFB}+I_{CFB}+I_{TFB}<30mA$!

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

北京亿利泰达科技有限公司
Beijing Eletechnic Ltd.

Junction Table

Junction	Pin	Type	Function
J1	To Earth	-	Earth Line
	L(+)	Power Supply	AC Live Line, DC Positive
	N(-)	Power Supply	AC Null line, DC Negative
J3	A	Driver Output	A Phase Line Driver
	B	Driver Output	B Phase Line Driver
	C	Driver Output	C Phase Line Driver
J4	GND	Signals GND	Hall Sensors GND
	Ha	Digital Input	A Hall Sensor, TTL Compatible
	Hb	Digital Input	B Hall Sensor, TTL Compatible
	Hc	Digital Input	C Hall Sensor, TTL Compatible
	+5V	Reference Output	Reference Voltage for Hall Sensors
J5	PTC	Digital Input	One Pin of PTC
	GND	Signals GND	Another Pin of PTC
J2	F/R	Digital Input	Forward/Reverse Direction Control, TTL Compatible
	FG	Digital Output	Speed Frequency Feedback, TTL Compatible
	FLT	Digital Output	System Malfunction Fault Feedback, TTL Compatible
	EN	Digital Input	Run Enable/Disenable Control, TTL Compatible
	BRK	Digital Input	Dynamic Braking Control, TTL Compatible
	DN	Voltage Divider	Potentiometer Down Pin
	ADJ	Analog Input	PWM Control (Open Loop Stepless Speed Control)
	UP	Voltage Divider	Potentiometer Up Pin
	dt	Analog Input	PWM Gradient Control
	GND	Signals GND	Signals GND
	CFB	Analog Output	Motor Line Current Feedback
	VFB	Analog Output	Input Voltage Feedback
	TFB	Analog Output	Heat Sink Temperature Feedback
	DIR	Digital Output	Motor Running Direction Feedback, TTL Compatible
	GND	Signals GND	Signals GND

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Main Functions Description

J1--Power Supply:

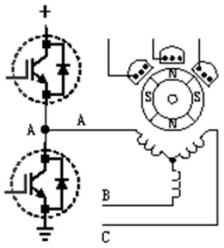
This driver has two sub-types, AC type and DC type.

AC type is suitable for 75-275VAC, 50/60Hz, 1 Phase power supply. There is a build-in rectifier and filter AC to DC converter. Its maximum load capability is 5AAC. The FUSE is 5A.

DC type is suitable for 75-390VDC power supply. Its maximum load capability is 4ADC.

Because of the different structures of GND Lines, these two sub-types cannot be substituted for each other. Otherwise the GND Lines will be broken.

J3--A, B, C Three Phase Line Drivers:



The driver internal circuit is shown in right figure. Three phase, trapezoidal wave, H-Bridge could drive either Y or Delta winding motor. Please see the "Commutation Truth Table" for reference.

The use of 15.625kHz Pulse Width Modulating (PWM) at the three bottom IGBTs provides an energy efficient method of controlling the motor speed by varying the average voltage applied to each stator winding during the commutation sequence. PWM resolution is 1/256.

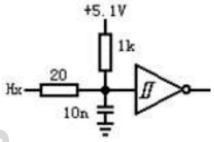
To connect or disconnect J3 when power on is FORBIDDEN! J3 phase missing is FORBIDDEN!

J4--+5V--Reference Voltage for Hall Sensors:

+5.1VDC reference power could output Max 20mA for hall sensors.

It is FORBIDDEN to supply any other loads!

J4--Ha, Hb, Hc--Hall Digital Inputs:

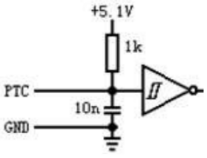


TTL compatible. The internal circuit is shown in right figure. Please see the "Commutation Truth Table" for reference.

The hall sensor electrical phasing must be 120°/240°. And Ha, Hb, Hc signals must be connected correctly according to A, B, C windings. Otherwise the driver and motor may be damaged!

To connect or disconnect J4 when power on is FORBIDDEN! J4 phase missing is FORBIDDEN!

J5--PTC--Motor Over Temperature Protection Digital Input:



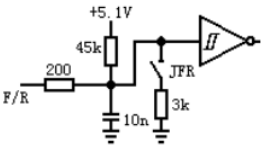
J5 connects to the internal temperature sensor of motor. TTL compatible. The internal circuit is shown in right figure. Please see the "Commutation Truth Table" for reference.

The circuit configuration parameter of J5 is only matching for MZ6 series PTC (Positive Temperature Coefficient Resistance). We could not guarantee J5 match other type of temperature sensor.

If PTC pin is high, FLT pin outputs low, FLT Led on, H-Bridge off (Z state). If PTC pin is low, driver auto-restart, and FLT pin outputs high, FLT Led off, H-Bridge on.

J5 could not be left floating. That means if it is left floating, PTC pin is always high, the driver is under protection for ever. So, please shortcut PTC to GND if not use.

J2--F/R--Forward/Reverse Direction Control Digital Input:

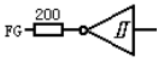


TTL compatible. The internal circuit is shown in right figure. Please see the "Commutation Truth Table" for reference.

When F/R signal is high or float, the rotation direction of motor is forward. When F/R is low, it is reverse. When F/R is float, JFR switch could change the direction manually. The running direction also depends on the structure of BLDC motor and connection.

Suddenly reverse running when high speed is not recommended! Because the load, motor and driver maybe broken due to the pulse reversed acceleration, pulse current and heat. So, we suggest to use BRK function instead of F/R to brake the rotor and its load.

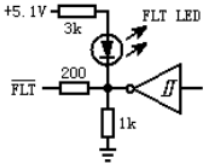
J2--FG--Speed Frequency Feedback Digital Output:



TTL compatible. The internal circuit is shown in right figure. Its frequency is linear to the motor speed. Pulse duty cycle is about 50%. The output waveforms are shown in left figure.

FG (Hz) = Speed (rpm) * n * 3 / 60. n means the number of magnetic pole-pairs (NOT POLES) of the rotor, n=1, 2, 3, 4……

J2--FLT--System Malfunction Fault Feedback Digital Output:

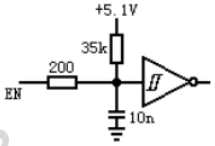


TTL compatible. The internal circuit is shown in right figure. Please see the "Commutation Truth Table" for reference.

A logic high means the motor works normally. A logic low means there are something wrong and causes the FLT Led on and H-Bridge off (Z state).

There is a 1.2k resistance between FLT pin and GND, to provide logic low when power off.

J2--En--Run Enable/Disenable Control Digital Input:



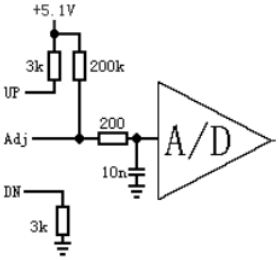
TTL compatible. The internal circuit is shown in right figure. Please see the "Commutation Truth Table" for reference.

A logic high or float causes motor works normally, while a low causes H-Bridge off (Z state) and motor to coast.

J2--BRK--Dynamic Braking Control Digital Input:

Please see chapter "How to Use BRK Function" for details.

J2--ADJ--PWM Control Analog Input:



Open loop stepless speed control. Analog signal. The internal circuit is shown in right figure.

An A/D converts the voltage of ADJ pin to a byte (0x00 to 0xFF). Software assigns this byte value to PWM according to dt algorithm. The Pulse Width Modulating at the three bottom IGBTs controls the motor speed by varying the average voltage applied to each stator winding.

A/D resolution is 1/256 (0.01V). The functional relation is piecewise function. Its expression is:

1. PWM=0x00, PWM%=0%, (U_{ADJ}<1.28V);
2. PWM=(U_{ADJ}-1.28)*100, PWM%=((U_{ADJ}-1.28)*100/255)*100%, (1.28V<=U_{ADJ}<=3.83V);
3. PWM=0xFF, PWM%=100%, (3.83V<U_{ADJ}).

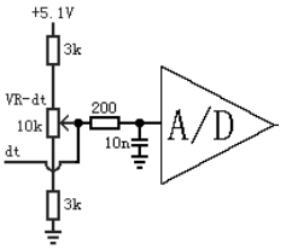
There are three ways to control speed:

First, connect the top foot and bottom foot of a 10kOhm potentiometer to the UP pin and DN pin of J2 separately. And connect the middle foot of the potentiometer to ADJ pin. 10kOhm must be used, other value is not matching. Please see the "Application Circuit Examples" for reference.

Second, using an operational amplifier (or D/A). Connect the output of operational amplifier (or D/A) directly to ADJ pin. Leave UP pin and DN pin floating.

Third, connect a filtered Pulse Width Modulation signal to ADJ pin. Leave UP pin and DN pin floating. There must be an external RC filter. RC>640us and f>15kHz are recommended.

J2--dt--PWM Gradient Control Analog Input:



Analog signal. The internal circuit is shown in right figure.

ADJ controls the value of PWM, and dt controls the gradient of PWM. The physical significance of dt is the time constant of PID algorithm.

The software uses three steps to convert the analog voltage to a time constant.

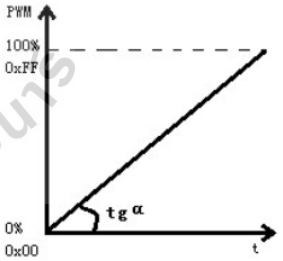
First step: An A/D converts the voltage of dt pin to a byte (0x00 to 0xFF). A/D resolution is 1/256 (0.01V). The functional relation is piecewise function, the same as ADJ. Its expression is:

1. n=0x00, (U_{dt}<1.28V);
2. n=(U_{dt}-1.28)*100, (1.28V<=U_{dt}<=3.83V);
3. n=0xFF, (3.83V<U_{dt}).

Second step: In order to extend control range, software does a square, N=n*n. N is a word (two bytes). N could only be 0, 1, 4, 9……65025.

The last step: dt=N*16us, the unit is us. It is just the time constant.

Let's have some samples. As shown in right figure. tga=dPWM/dt= 1/(N*16), the unit is 1/us.



1. If n=0, then N=0, then dt=0us, dPWM/dt=tga=infinity. So the software assigns ADJ value to PWM as fast as possible, not any time constant.

2. If n=1, then N=1, then dt=1*16=16us. That means, if now ADJ changes, software would not assigns ADJ value to PWM immediately. It will do PWM=PWM+1 (or PWM-1) every 16us. So PWM line slopes up or down gradually, tga=dPWM/dt= 1/16 (1/us). Let's suppose: Now ADJ suddenly steps up from 1.28V to 3.83V, then PWM will start from 0x00, and PWM++ every 16us. So after 4080us (255 times of 16us), PWM slopes up to 0xFF (PWM=100%).

3. Because of square algorithm, N could not be 2 or 3.

4. If n=2, then N=4, then dt=4*16=64us. Software would do PWM=PWM+1 (or PWM-1) every 64us. Let's suppose: Now ADJ suddenly steps up from 1.28V to 3.83V, then PWM will start from 0x00, and PWM++ every 64us. So after 16320us (255 times of 64us), PWM slopes up to 0xFF (PWM=100%).

5. And so on, N=9, 16……65025.

6. The Max time constant: n=255, N=n*n=65025, dt=N*16=65025*16=1040400us. Let's suppose: Now ADJ suddenly steps up from 1.28V to 3.83V, then PWM will start from 0x00, and PWM++ every 1040400us. So after

265302000us=4min25s (255 times of 1040400us), PWM slopes up to 0xFF (PWM=100%).

There are three ways to control speed:

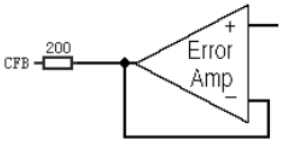
First, adjust the VR potentiometer according to the arrow instructions on board "SLOW-FAST".

Second, using an operational amplifier (or D/A). Connect the output of operational amplifier (or D/A) directly to dt pin. Please see the "Application Circuit Examples" for reference.

Third, connect a filtered Pulse Width Modulation signal directly to dt pin. There must be an external RC filter. RC>640us and f>15kHz are recommended.

J2--CFB--Motor Line Current Feedback Analog Output:

Analog signal. The internal circuit is shown in right figure.

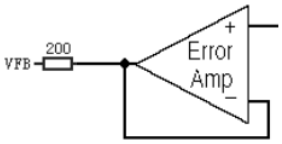


This signal feeds back the line current of three phase, its unit is DC Ampere. It is linear. Please see the "Electrical Characteristics Table" for its Coefficient.

The formula of motor line current is: $I_{LINE}=V_{CFB}*1.5625$. The unit is ADC.

J2--VFB--Input Voltage Feedback Analog Output:

Analog signal. The internal circuit is shown in right figure.

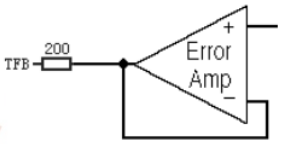


This signal feeds back the rectified and filtered DC voltage (the voltage of the filter capacitor, namely the voltage of JX-BEMF pin). Its unit is DC Voltage. It is linear. Please see the "Electrical Characteristics Table" for its Coefficient.

The formula of motor voltage is: $V_{BEMF}=V_{VFB}*100$. The unit is VDC.

J2--TFB--Heat Sink Temperature Feedback Analog Output:

Analog signal. The internal circuit is shown in right figure.



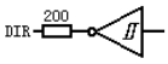
This signal feeds back the temperature of the heat sink. It is non-linear due to the NTC. Please check below table for details.

Approximate linear formula: Ts (C)=85-31.25*(3.69-V_{TFB}). This formula is precise enough in temperature range from 70 to 85C, but not precise enough in low temperature range.

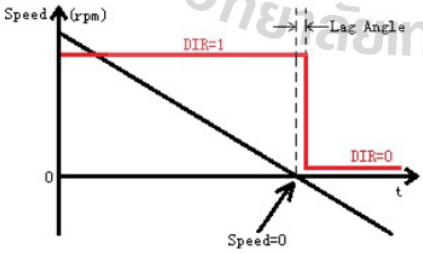
Heat Sink Temperature	Ts	50	60	70	75	80	85	C
Output Voltage	V_{TFB}	2.29	2.75	3.17	3.37	3.55	3.69	V

J2--DIR--Motor Running Direction Feedback Digital Output:

TTL compatible. The internal circuit is shown in right figure.



Motor only has two running directions, clockwise or counterclockwise. DIR outputs 0 or 1 to feedback the two directions separately. Whether 0=clockwise or 1=clockwise, depends on the structure of BLDC motor and should be determined by experiment.



Shown in left figure. Theoretically, DIR reverses its output at the zero-crossing point of speed. That means, if suppose, on the left of zero-crossing point, motor runs clockwise and DIR=1; then on the right of zero-crossing point, it must be counterclockwise and DIR=0.

But in practice, DIR reversal point lags behind the zero-crossing point of speed, due to the discreteness of Hall Encoder.

DIR reverses at just the point of the first Encoder signal behind the zero-crossing point. The max electrical lag angle is: θe<60° . The max mechanical lag angle (shaft angle) is: θm=θe /n, n means the number of magnetic pole-pairs (NOT POLES) of the rotor, n=1, 2, 3, 4……

Over Current Protection:

An over current protection circuit is inside this driver in order to limit the current of J3 H-Bridge. Please see the "Electrical Characteristics Table" for reference.

When current meets the upper limit, over current protection is active, and FLT pin outputs low, FLT Led on, H-Bridge off (Z state). When current returns to normal, driver auto-restart, and FLT pin outputs high, FLT Led off, H-Bridge on. Please see the "Commutation Truth Table" for reference.

Normally, the frequency of over current protection would be several hundred Hz to several kHz. And the motor winding will make a noise of the same frequency.

Over Voltage Lockout:

An over voltage lockout has been incorporated. Please see the "Electrical Characteristics Table" for reference.

When the rectified and filtered DC voltage goes up to trigger this function, FLT pin outputs low, FLT Led on, H-Bridge off (Z state). When voltage returns to normal, driver auto-restart, and FLT pin outputs high, FLT Led off, H-Bridge on. Please see the "Commutation Truth Table" for reference.

Please note: Over Voltage Lockout function perhaps does not have any capability to eliminate the root cause of voltage rising. So, even if lockout, the supply power voltage maybe still go up, the driver maybe still in danger.

Under Voltage Lockout:

An under voltage lockout has been incorporated to prevent damage to the IC and the H-Bridge. Please see the "Electrical Characteristics Table" for reference.

When the rectified and filtered DC voltage goes down to trigger this function, FLT pin outputs low, FLT Led on, H-Bridge off (Z state). When voltage returns to normal, driver does not restart immediately, it will wait for 1.5s, then auto-restart, and FLT pin outputs high, FLT Led off, H-Bridge on.

Similarly, when power supply turn on, the driver will wait for 1.5s first, then start. Please see the "Commutation Truth Table" for reference.

Heat Sink Over Temperature Protection:

A heat sink over temperature protection is inside the driver. Please see the "Electrical Characteristics Table" for reference.

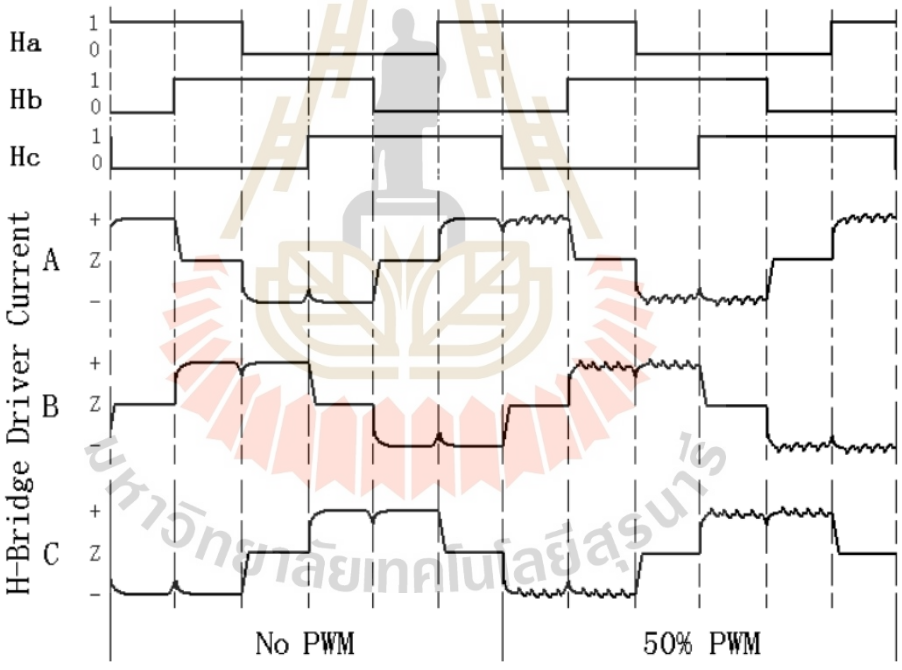
85C sink temperature causes over temperature protection active, FLT pin outputs low, FLT Led on, H-Bridge off (Z state). When sink temperature drops down below 75C, driver auto-restart, and FLT pin outputs high, FLT Led off, H-Bridge on. Please see the "Commutation Truth Table" for reference.

Electrical Earthing:

J1-Earth pin is earth terminal, it directly connects to the Heat Sink. This pin is insulated from the rest of all circuits. Please see the "Absolute Maximum Ratings" for reference.

Commutation Truth Table

Hall Inputs			Control Inputs			PTC OT	OC	OV	UV	Sink OT	H-Bridge Driver			FLT pin	FLT LED
Ha	Hb	Hc	F/R	EN	BRK						A	B	C		
X	X	X	X	X	X	Any One Active					Z	Z	Z	0	ON
1	1	1	X	X	1						Z	Z	Z	0	ON
0	0	0	X	X	1						Z	Z	Z	0	ON
1	1	1	X	X	0						0	0	0	0	ON
0	0	0	X	X	0						0	0	0	0	ON
			X	0	X	All Inactive					Z	Z	Z	1	OFF
Six Valid Combinations (Figure Below)			X	1	0						0	0	0	1	OFF
			1/0	1	1						Normal Commutation (Figure Below)			1	OFF



Normal Commutation Waveforms, F/R=1

Note: "1"=High, "0"=Low, "X"=Don't care, "Z"=High impedance, "+"= Positive current, "-"=Negative current

北京亿利泰达科技有限公司
Beijing Eletechnic Ltd.

How to Use BRK Function

Default Setting

The default setting of BRK function is invalid. Please read the following instructions carefully before using this function!

About the Danger and Complexity of Brake Function

The danger and complexity are due to the Over Current Protection, the load and the external control circuit.

For the Over Current Protection: When using BRK function, the Over Current Protection is disabled. Inappropriate operation and control will cause the driver broken!

For the load: Please fix the motor and the load carefully before using this function. Otherwise the load maybe broken by the brake force and people maybe injured!

For the external control circuit: There must be an external circuit, accurate control software and a lot of experiments to verify the reliability of all the system, otherwise the driver and/or the motor and/or the external circuit maybe broken!

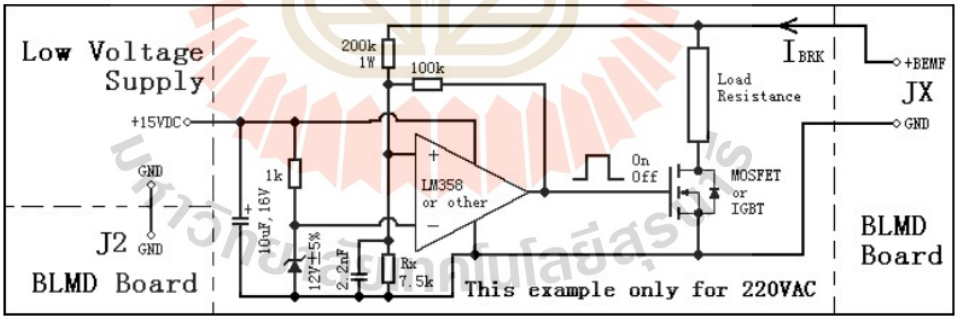
Simple Theory of Brake Function

Brushless DC Motor is not only a motor, but also a generator. As well, Brushless DC Motor Driver is not only a driver, but also a rectifier. Brake function is just using motor as a generator, to convert kinetic energy to three phase electric energy, and then rectify AC to DC, output DC electric energy to JX, and use up or store up electric energy.

There are two key items: First is the external circuit to use up or store up electric energy. Second is control logic.

External Circuit (This example only for reference)

Having an external circuit to use up or store up electric energy is very important. Generator continually converts kinetic energy to electric energy. If electric energy could not be used up as quickly as possible, the voltage of JX (BEMF pin) would keep on rising until trigger the Over Voltage Lockout. It is just the reason why the driver has the Over Voltage Lockout function.



Customers must make an external circuit themselves, this circuit is not on our board.

For example, construct an external circuit as shown in above figure, including a comparator, a MOSFET (or IGBT), and a Load Resistance. This circuit could use up the electric energy automatically. When braking, kinetic energy converts to electric energy. The voltage of JX-BEMF pin rises up. The comparator turns on the MOSFET. Load Resistance converts electric energy to thermal energy. BEMF voltage drops down. The comparator turns off the MOSFET.

The power supply of above example is 220VAC. The comparator will turn on the MOSFET at BEMF=360VDC (on level), and turn off at BEMF=340VDC (off level). To increase/decrease the value of Rx will decrease/increase both the

on/off level.

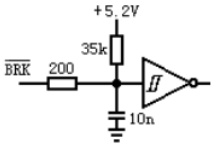
Please note: Do not set the off level too low. It must be much higher than 310VDC, because 310VDC is the normal power supply voltage. Likewise, do not set the on level too high, it must be lower than 400VDC, because it is the level of Over Voltage Lockout. Please see the "Electrical Characteristics Table" for reference.

Choosing a proper Load Resistance is very important. Please see the "Absolute Maximum Ratings" for reference. The Rated Output Current is 4ADC. So the min value of Load Resistance is 360VDC/4ADC=90 Ohm. If the value of Load Resistance is too low, the IBRK will be too high, and the driver will be broken.

Higher value of Load Resistance causes lower IBRK, and longer time duration of braking, and more frequent Over Voltage Lockout, vice versa. The dissipation power of Load Resistance should be carefully chosen according to the braking power and temperature, normally several hundred Watts or more.

If power supply is 110VAC, please set the comparator on level at BEMF=220VDC, and off level at BEMF=200VDC. Do not set the off level too low. It must be much higher than 155VDC, because 155VDC is the normal supply voltage.

Control Logic:



BRK signal is TTL compatible. The internal circuit is shown in right figure. Please see the "Commutation Truth Table" for reference.

A logic high or float allows motor running normally (motor mode), while a low causes motor to brake (generator mode).

In generator mode, ADJ and dt work in the same way as in motor mode. That means generator power is also determined by PWM and its gradient on H-Bridge.

Warming again: When using BRK function, the Over Current Protection is disabled. That means the drive could not limit the braking current automatically. So proper input of ADJ and dt is the only way to control the generator power and braking current.

In consideration of prudent principle, during the experiment, we suggest: PWM duty cycle (ADJ) from low to high, PWM gradient (dt) from slow to fast, and the value of Load Resistance from high to low.

A sample of braking experiment:

Now let's use nature language to describe a braking software.

Before start, please be sure the external circuit is settled, motor and its loads are fixed properly. The purpose of this experiment is to program a software to brake a running motor.

First, let's suppose the initial states of the driver: EN=1 system on, BRK=1 motor mode, PWM=100% full speed running. There are four key points in the following software, please pay special attention:

Line1: EN=0;/*Turn off the driver.*/

Line2: dt=0;ADJ=0;/*This is the first key point: Although now EN=0 H-Bridge off, PWM is still 0xFF (100%). The changing of EN has no effect on PWM value. If now we let BRK=0, the motor will brake under 100%PWM, it is too hard and dangerous. So we first let dt=0 and ADJ=0. That means we hope PWM decrease to 0 as quickly as possible.*/

Line3: __delay_cycles(Client Delay+128us);

/*This is the second key point: Why use delay, there are two reasons. First, client system has time delay. For example, RC filter, transmission delay and so on. Client must guarantee enough delay time to decrease the voltage of dt pin and ADJ pin blow 1.28V. Second, A/D converter samples both the value of dt and ADJ every 64us. So delay 128us could guarantee PWM change to 0x00 (0%).*/

Line4: BRK=0;/*Change to generator mode.*/

```
Line5: dt=2.49V;/*This is the third key point: n=(2.49V-1.28V)*100=121, N=n*n=121*121=14641, that means the time
                 constant is 14641*16us*255 about 60s (PWM from 0% to 100%). It is only a sample. We only want to
                 express the prudent principle: from low to high, from slow to fast. For first time experiment, dt value
                 should be assigned enough slow than needed.*/
Line6: __delay_cycles(Client Delay+128us);/*This is the fourth key point: We emphasize here, change dt first, and delay
                                           to guarantee, then change ADJ. If on the contrary, the result is not correct.*/
Line7: EN=1;/*Turn on the driver. Now, ADJ and PWM are all 0.*/
Line8: ADJ=5V;/*The experiment target is change PWM from 0% to 100%.*/
……
/*Now PWM is increasing gradually. And motor is decelerating.*/
……
/*Now motor stops.*/
Line9: EN=0; /*Round off work.*/
Line10: dt=0;ADJ=0;
Line11: __delay_cycles(128us+Client Delay);
```

For first time experiment, deceleration time maybe too long. Let's improve it gradually.

The purpose of following improvements is to increase the deceleration, reduce the time. We could change two items: First is dt, second is Load Resistance. Please note: Change these two items GRADUALLY.

Step1: Decrease dt to increase the generator power.

Step2: The consequence of Step1 is that Over Voltage Lockout becomes more and more frequently. So to decrease the value of Load Resistance, in order to increase the braking current.

Step3: The consequence of Step2 is that Load Resistance becomes hotter and hotter. So to increase the dissipation power of Load Resistance.

Please repeat above improvements until achieve your purpose.

Please note: The braking power could not be infinitely great. For the above sample, the max voltage is 360VDC, the max permissible current is 4ADC, the min permissible Load Resistance is 90 Ohm. So the max braking power is 360*4=1440W. That means the deceleration could not be infinitely great, and also, the braking time could not be infinitely short.

The Final Step:

Please find out the JBRK junction, shown in right photo. And welded short cut on the PCB board. The brake function is valid.

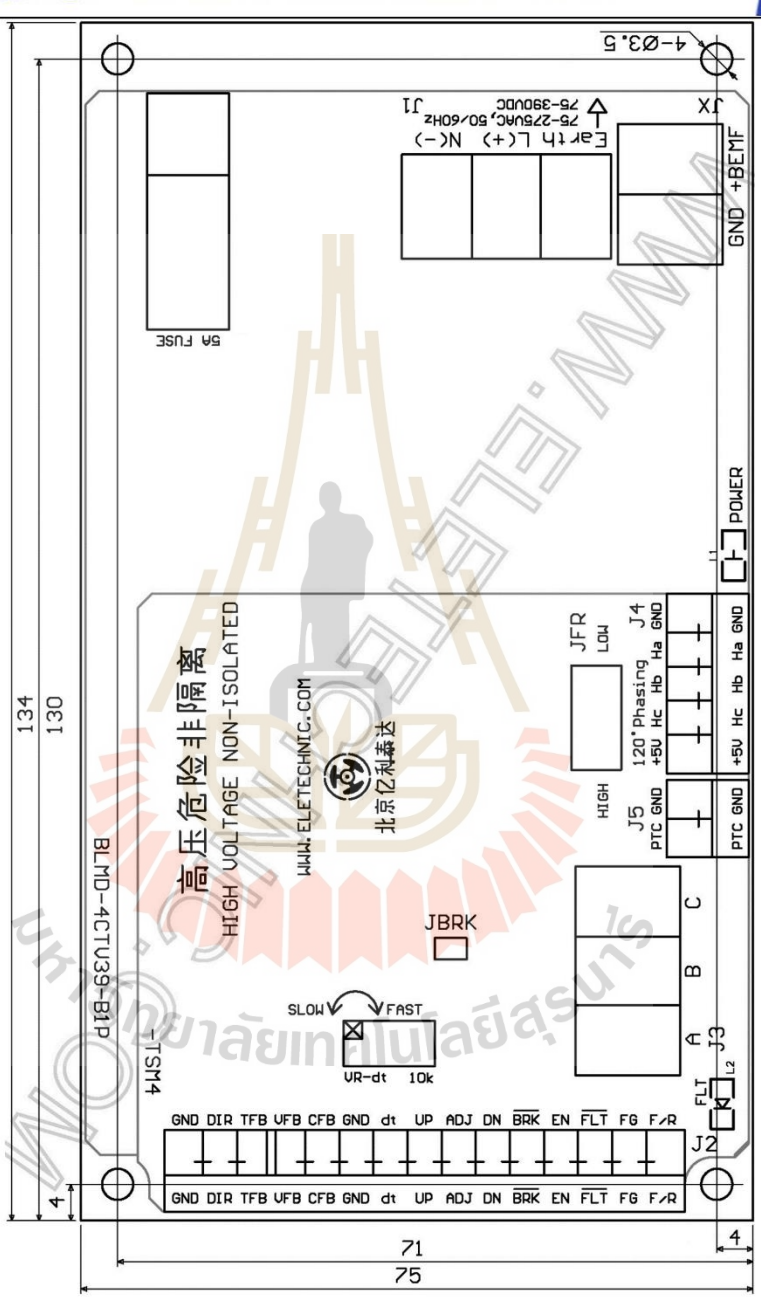
Driver Dimension and Connection Diagram (Unit: mm)

The driver dimension is 134 (L) * 75 (W) * 65 (H). The approximate weight of the driver is 325g (including intrinsic heat sink).

The radiator can be custom-made according to the output power, heating and cooling condition of the application.

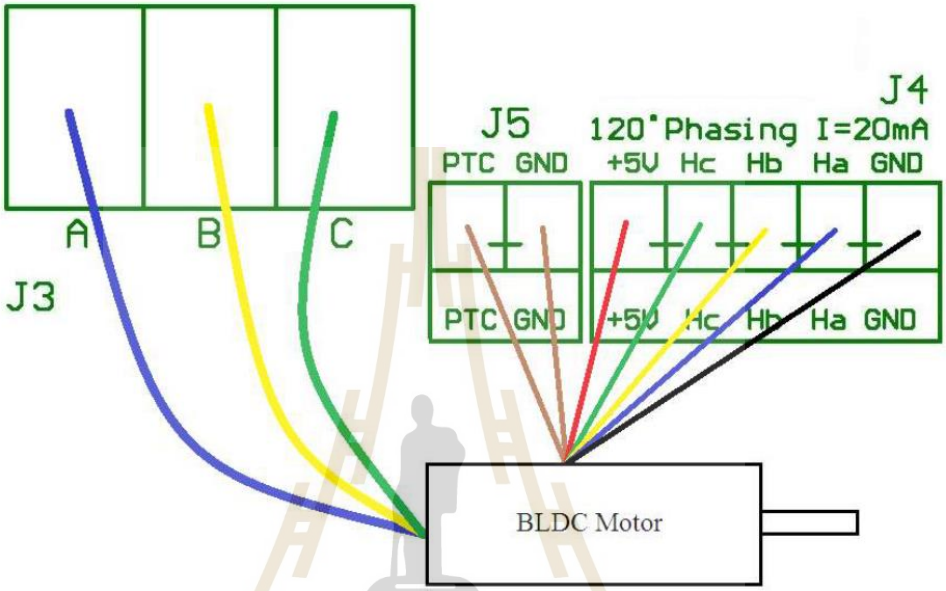
If the temperature of the sink is always higher than 85C, cooling fan must be installed. Otherwise the driver would be over temperature lockout.

北京亿利泰达科技有限公司
Beijing Eletechnic Ltd.

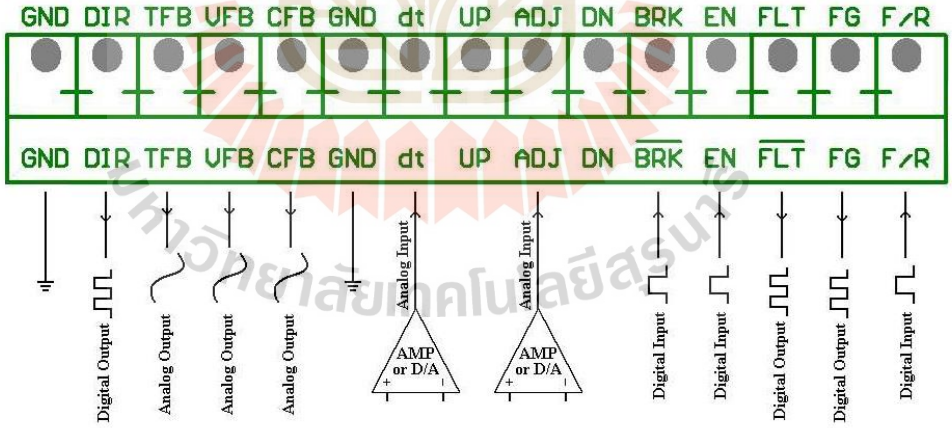


北京亿利泰达科技有限公司
Beijing Eletechnic Ltd.

Application Circuit Examples

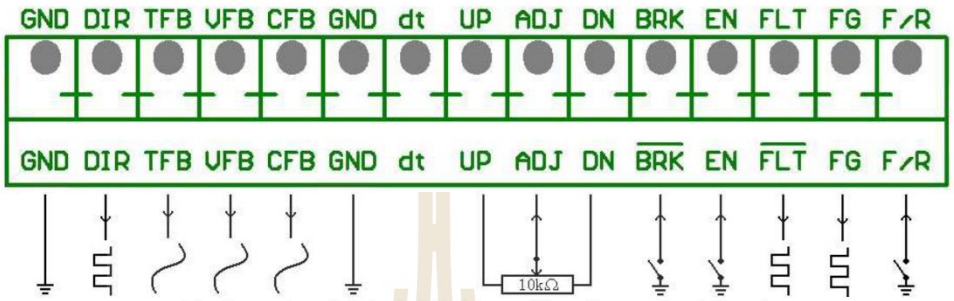


The Connection of BLDC Motor



The Connection of Digital Control and Operational Amplifier (or D/A) Speed Control

北京亿利泰达科技有限公司
Beijing Eletechnic Ltd.



The Connection of Mechanical Switches and Potentiometer Speed Control

is registered trademark of Beijing Eletechnic Ltd. Eletechnic reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Eletechnic makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Eletechnic assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. All parameters which may be provided in Eletechnic data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters must be validated for each customer application by customer's technical experts. Eletechnic does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Eletechnic products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Eletechnic product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Eletechnic products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Eletechnic and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Eletechnic was negligent regarding the design or manufacture of the part.

Beijing Eletechnic Ltd.
Tel: 0086-10-68422061
Fax: 0086-10-68422061
EMAIL: SALES@ELETECHNIC.COM
HTTP://WWW.ELETECHNIC.COM

คู่มือการใช้งานไอซีเบอร์ LM331N

Product Folder | Sample & Buy | Technical Documents | Tools & Software | Support & Community

TEXAS INSTRUMENTS

LM231, LM331

SNOSBI2C – JUNE 1999 – REVISED SEPTEMBER 2015

LMx31x Precision Voltage-to-Frequency Converters

1 Features

- Ensured Linearity 0.01% Maximum
- Improved Performance in Existing Voltage-to-Frequency Conversion Applications
- Split or Single-Supply Operation
- Operates on Single 5-V Supply
- Pulse Output Compatible With All Logic Forms
- Excellent Temperature Stability: ±50 ppm/°C Maximum
- Low Power Consumption: 15 mW Typical at 5 V
- Wide Dynamic Range, 100 dB Minimum at 10-kHz Full Scale Frequency
- Wide Range of Full Scale Frequency: 1 Hz to 100 kHz
- Low-Cost

2 Applications

- Voltage to Frequency Conversions
- Frequency to Voltage Conversions
- Remote-Sensor Monitoring
- Tachometers

3 Description

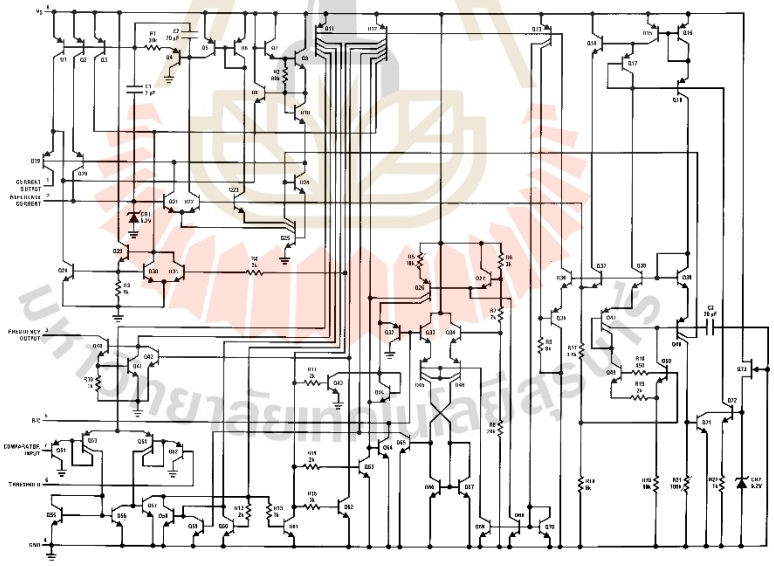
The LMx31 family of voltage-to-frequency converters are ideally suited for use in simple low-cost circuits for analog-to-digital conversion, precision frequency-to-voltage conversion, long-term integration, linear frequency modulation or demodulation, and many other functions. The output when used as a voltage-to-frequency converter is a pulse train at a frequency precisely proportional to the applied input voltage. Thus, it provides all the inherent advantages of the voltage-to-frequency conversion techniques, and is easy to apply in all standard voltage-to-frequency converter applications.

Device Information(1)

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
LM231 LM331	PDIP (8)	9.81 mm × 6.35 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

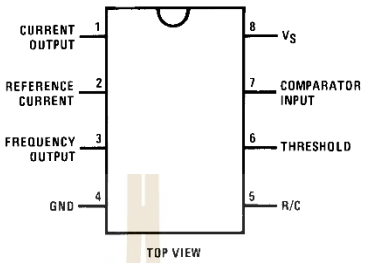
Schematic Diagram



An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

6 Pin Configuration and Functions

P Package
8-Pin PDIP
Top View



TOP VIEW

Pin Functions

PIN		I/O	DESCRIPTION
NAME	NO.		
IOUT	1	O	Current Output
IREF	2	I	Reference Current
FOUT	3	O	Frequency Output. This output is an open-collector output and requires a pullup resistor.
GND	4	G	Ground
RC	5	I	R-C filter input
THRESH	6	I	Threshold input
COMPIN	7	I	Comparator Input
VS	8	P	Supply Voltage

7 Specifications

7.1 Absolute Maximum Ratings[1][2][3]

		MIN	MAX	UNIT
Supply Voltage, V_S			40	V
Output Short Circuit to Ground		Continuous		
Output Short Circuit to V_{CC}		Continuous		
Input Voltage		−0.2	$+V_S$	V
Lead Temperature (Soldering, 10 sec.)	PDIP		260	°C

(1) Stresses beyond those listed under *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, which do not imply functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under *Recommended Operating Conditions*. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.
(2) All voltages are measured with respect to GND = 0 V, unless otherwise noted.
(3) If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the TI Sales Office/Distributors for availability and specifications.

7.2 ESD Ratings

			VALUE	UNIT
$V_{(ESD)}$	Electrostatic discharge	Human body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001[1][2]	±500	V

(1) JEDEC document JEP155 states that 500-V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.
(2) Human body model, 100 pF discharged through a 1.5-kΩ resistor.

Copyright © 1999–2015, Texas Instruments Incorporated

7.3 Recommended Operating Conditions

		MIN	MAX	UNIT
Operating Ambient Temperature	LM231, LM231A	−25	85	°C
	LM331, LM331A	0	70	°C
Supply Voltage, V_S (1)		4	40	V

(1) All voltages are measured with respect to GND = 0 V, unless otherwise noted.

7.4 Thermal Information

THERMAL METRIC (1)		LM312, LM331 P (PDIP) 8 PINS	UNIT
$R_{\theta JA}$	Junction-to-ambient thermal resistance	100	°C/W

(1) For more information about traditional and new thermal metrics, see the *Semiconductor and IC Package Thermal Metrics* application report, SPRA953.

7.5 Electrical Characteristics

All specifications apply in the circuit of Figure 16, with 4.0 V ≤ V_S ≤ 40 V, T_A = 25°C, unless otherwise specified.

PARAMETER		TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
VFC Non-Linearity (1)		4.5 V ≤ V_S ≤ 20 V		±0.003	±0.01	% Full-Scale
		T_{MIN} ≤ T_A ≤ T_{MAX}		±0.006	±0.02	% Full-Scale
VFC Non-Linearity in Circuit of Figure 14		V_S = 15 V, f = 10 Hz to 11 kHz		±0.024	±0.14	%Full-Scale
Conversion Accuracy Scale Factor (Gain)	LM231, LM231A	V_{IN} = −10 V, R_S = 14 kΩ	0.95	1	1.05	kHz/V
	LM331, LM331A		0.9	1	1.1	kHz/V
Temperature Stability of Gain	LMx31	T_{MIN} ≤ T_A ≤ T_{MAX}, 4.5 V ≤ V_S ≤ 20 V		±30	±150	ppm/°C
	LMx31A			±20	±50	ppm/°C
Change of Gain with V_S		4.5 V ≤ V_S ≤ 10 V		0.01	0.1	%/V
		10 V ≤ V_S ≤ 40 V		0.006	0.06	%/V
Rated Full-Scale Frequency		V_{IN} = −10 V	10.0			kHz
Gain Stability vs. Time (1000 Hours)		T_{MIN} ≤ T_A ≤ T_{MAX}		±0.02		% Full-Scale
Over Range (Beyond Full-Scale) Frequency		V_{IN} = −11 V	10%			
INPUT COMPARATOR						
Offset Voltage				±3	±10	mV
LM231/LM331		T_{MIN} ≤ T_A ≤ T_{MAX}		±4	±14	mV
LM231A/LM331A		T_{MIN} ≤ T_A ≤ T_{MAX}		±3	±10	mV
Bias Current				−80	−300	nA
Offset Current				±8	±100	nA
Common-Mode Range		T_{MIN} ≤ T_A ≤ T_{MAX}	−0.2		V_{CC} − 2	V
TIMER						
Timer Threshold Voltage, Pin 5			0.63 × V_S	0.667 × V_S	0.7 × V_S	
Input Bias Current, Pin 5		V_S = 15 V				
All Devices		0V ≤ $V_{PIN\ 5}$ ≤ 9.9 V		±10	±100	nA
LM231/LM331		$V_{PIN\ 5}$ = 10 V		200	1000	nA
LM231A/LM331A		$V_{PIN\ 5}$ = 10 V		200	500	nA
$V_{SAT\ PIN\ 5}$ (Reset)		I = 5 mA		0.22	0.5	V

(1) Non-linearity is defined as the deviation of f_{OUT} from V_{IN} × (10 kHz/−10 V_{DC}) when the circuit has been trimmed for zero error at 10 Hz and at 10 kHz, over the frequency range 1 Hz to 11 kHz. For the timing capacitor, C_T, use NPO ceramic, Teflon®, or polystyrene.

Copyright © 1999–2015, Texas Instruments Incorporated

Electrical Characteristics (continued)

All specifications apply in the circuit of Figure 16, with 4.0 V ≤ V_S ≤ 40 V, T_A = 25°C, unless otherwise specified.

PARAMETER		TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
CURRENT SOURCE (PIN 1)						
Output Current	LM231, LM231A	R_S = 14 kΩ, $V_{PIN\ 1}$ = 0	126	135	144	µA
	LM331, LM331A		116	136	156	µA
Change with Voltage		0V ≤ $V_{PIN\ 1}$ ≤ 10 V		0.2	1	µA
Current Source OFF Leakage	LM231, LM231A, LM331, LM331A			0.02	10	nA
	All Devices	T_A = T_{MAX}		2	50	nA
Operating Range of Current (Typical)				(10 to 500)		µA
REFERENCE VOLTAGE (PIN 2)						
LM231, LM231A			1.76	1.89	2.02	V_{DC}
LM331, LM331A			1.7	1.89	2.08	V_{DC}
Stability vs. Temperature				±60		ppm/°C
Stability vs. Time, 1000 Hours				±0.1%		
LOGIC OUTPUT (PIN 3)						
V_{SAT}		I = 5 mA		0.15	0.5	V
		I = 3.2 mA (2 TTL Loads), T_{MIN} ≤ T_A ≤ T_{MAX}		0.1	0.4	V
OFF Leakage				±0.05	1	µA
SUPPLY CURRENT						
LM231, LM231A		V_S = 5 V	2	3	4	mA
		V_S = 40 V	2.5	4	6	mA
LM331, LM331A		V_S = 5 V	1.5	3	6	mA
		V_S = 40 V	2	4	8	mA

7.6 Dissipation Ratings

	VALUE	UNIT
Package Dissipation at 25°C(1)	1.25	W

(1) The absolute maximum junction temperature ($T_J$max) for this device is 150°C. The maximum allowable power dissipation is dictated by $T_J$max, the junction-to-ambient thermal resistance (Θ_{JA}), and the ambient temperature T_A, and can be calculated using the formula $P_D$max = ($T_J$max - T_A) / Θ_{JA}. The values for maximum power dissipation will be reached only when the device is operated in a severe fault condition (e.g., when input or output pins are driven beyond the power supply voltages, or the power supply polarity is reversed). Obviously, such conditions should always be avoided.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Copyright © 1999–2015, Texas Instruments Incorporated

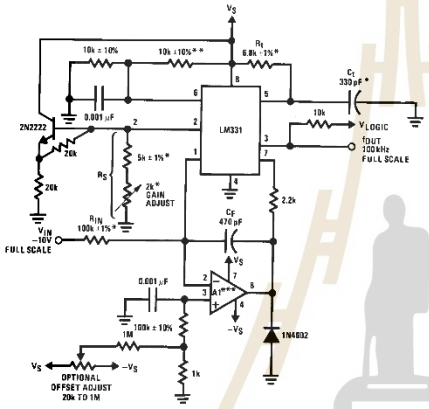
9.3 System Examples

9.3.1 F-to-V Converters

In these applications, a pulse input at f_{IN} is differentiated by a C-R network and the negative-going edge at pin 6 causes the input comparator to trigger the timer circuit. Just as with a V-to-F converter, the average current flowing out of pin 1 is $I_{AVERAGE} = i \times (1.1\ R_t C_t) \times f$.

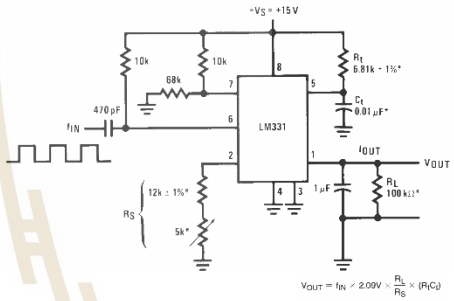
In the simple circuit of Figure 18, this current is filtered in the network R_L = 100 kΩ and 1 µF. The ripple will be less than 10-mV peak, but the response will be slow, with a 0.1 second time constant, and settling of 0.7 second to 0.1% accuracy.

In the precision circuit, an operational amplifier provides a buffered output and also acts as a 2-pole filter. The ripple will be less than 5-mV peak for all frequencies above 1 kHz, and the response time will be much quicker than in Figure 18. However, for input frequencies below 200 Hz, this circuit will have worse ripple than Figure 18. The engineering of the filter time-constants to get adequate response and small enough ripple simply requires a study of the compromises to be made. Inherently, V-to-F converter response can not.



100 kHz Full-Scale, ±0.03% Non-Linearity
*Use stable components with low temperature coefficients.
**This resistor can be 5 kΩ or 10 kΩ for V_S=8V to 22V, but must be 10 kΩ for V_S=4.5V to 8V.
***Use low offset voltage and low offset current op-amps for A1: recommended types LF411A or LF356.

Figure 17. Precision Voltage-to-Frequency Converter



10 kHz Full-Scale, ±0.06% Non-Linearity
*Use stable components with low temperature coefficients.

Figure 18. Simple Frequency-to-Voltage Converter

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ง

โปรแกรมภาษาซีที่ใช้สำหรับทดสอบเพื่อวิเคราะห์สมรรถนะตัวควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โปรแกรมภาษาซีที่ใช้สำหรับทดสอบเพื่อวิเคราะห์สมรรถนะตัวควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

```
**********************************************************************************************
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MCP4725.h>
Adafruit_MCP4725 dac;

//กำหนดตัวแปร
float Speed, Speed_act, Vo, Vo_v;
float kp=10.7166, ki=0.0011, kd=0.4351, Ts=0.0001;
float err, p, i, d, i_1, pid, pre_err=0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  dac.begin(0x60); }                    //สำหรับโมดูล MCP4725A0

void loop() {
   Speed = 5000;                        //ความเร็วรอบอ้างอิง
   Vo = analogRead(A0);                 //ค่าแรงดันจริง
   Vo_v = (Vo*4.9)/1023;
   Speed_act = (Vo_v*5.19e3) + 573;  //สมการแปลงค่าแรงดันเป็นความเร็วรอบ


//ตัวควบคุม PID
  err = Speed - Speed_act;
  p = kp*err;
  i = (ki*Ts*err) + i_1;
  d = kd*(err-pre_err)/Ts;

//Anti-Windup
  if (d>=4095) {d=2940;}
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
  else if (d<=1250) {d=1250;}
  pid = p + i + d;

//กำหนดขอบเขตสัญญาณควบคุมของบอร์ดขับเคลื่อน
  if (pid >= 4095)                    //ขอบเขตบน
    {pid = 2940;}
  else if (pid <= 1250)               //ขอบเขตล่าง
    {pid = 0;}

  dac.setVoltage(pid, false);
  i_1 = i;
  pre_err = err;}
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก จ

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Chaicharoenaudomrung, K., Wansungnoen, S., Pakdeeto, J., Areerak, K-N. and Areerak, K-L. (2021) Parameter Identification of BLDC Motor by using Adaptive Tabu Search. **2021 International Conference on Power, Energy and Innovation (ICPEI 2021)**. : 5-8

รัฐพล โพธิ์สังข์, จักรกริช ภักดีโต, ศรุตา หวานสูงเนิน, กองพัน อารีรักษ์ และกองพล อารีรักษ์. การระบุเอกลักษณ์แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี** ปีที่ 16 ฉบับที่ 3 ประจำเดือนกรกฎาคม - กันยายน 2566.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI 2021)
October 20-22, 2021, Nakhon Ratchasima, THAILAND

Parameter Identification of BLDC Motor by using Adaptive Tabu Search

Koson Chaicharoenaudomrung[1] Saruta Wansungnoen[2] Jakkrit Pakdeeto[3] Kongpan Areerak[2*] and Kongpol Areerak[2]
[1] Department of Electrical Engineering Technology, College of Industrial Technology, KMUTNB
[2] School of Electrical Engineering, Instituted of Engineering, Suranaree University of Technology
[3] Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, KMUTNB
*kongpan@sut.ac.th

***Abstract*—** This paper presents the parameter identification of a brushless direct current (BLDC) motor including the commercial controller board by using the adaptive Tabu search (ATS) technique. The black-box mathematical model with the unknown coefficient values in the third order transfer function is used. To represent the actual speed response, these coefficient values will be identified while the input voltage is changed. The identification technique in this paper will use an ATS. The result can confirm that the mathematical model identified by proposed technique can provide the accurate response compared with the experiment.

***Keywords*—** brushless direct current motor, parameter identification, adaptive Tabu search

I. INTRODUCTION

Nowadays, BLDC motor is popular to use in many industrial applications such as electric vehicles, aircrafts, and submarines because it is high efficiency and long-life duration [1]. The BLDC motor can be operated at high speed where it can carry on the many load-torques. Moreover, this motor does not have the brushes, resulting in low cost of maintenance. However, most of BLDC motor in the commercial market might be sold with the driver board together in which the significant parameters do not appear. The commercial controller board is the same as actuator used to operate the BLDC motor or it can be called open loop controller. To modify them into the closed loop control in the future, the mathematical model of BLDC motor driven by the controller board is required. From literature reviews [1-3], there are two ways to achieve the mathematical model. First way is the direct mathematical model derivation by using the basic circuit theory in which it is very complicated to analyze the BLDC motor including the controller board. The second way is the black-box transfer function representing the relation between input and output function [2]. The transfer function in term of polynomial numbers is used to represent the actual speed response with unknown coefficient values. These values can be easily identified by using the artificial intelligent techniques. The polynomial transfer function of pole term will be set equal to the third order [2]. In addition, the zero term is defined in zero order as similar as the gain value. Whole of coefficient values will be identified by using the artificial intelligent technique.

From the previous research works [2, 4-7], many artificial intelligent methods are reported to use in the application of parameters identification such as genetic algorithm (GA), particle swarm optimization (PSO), cuckoo search algorithm, adaptive Tabu search (ATS), etc. For the ATS [4, 6, 8, 9], this technique is developed from the conventional Tabu search by added the back tracking mechanism and adaptive boundary radius. In addition, the ATS method was also proven that it can escape the local solution and rapidly converge to the correct best global solution. Therefore, this paper presents the parameters identification of the BLDC motor including the commercial controller board by using the ATS technique. In the future, these parameters will be used in the process of controller design obtaining the desired response with simple control theory. To reduce the complexity of the exact mathematical model derivation, the linear model with simple black-box transfer function is applied. The aim of this paper will present how to identify the coefficient values of simple mathematical model represented the speed response of the BLDC motor driven by commercial controller board.

This paper is structed as follows: the introduction is addressed in Section I and the basic theory involving BLDC motor operation is addressed in Section II. In Section III, the simplified mathematical model and the actual speed testing are explained. The parameter identifications of BLDC motor including the controller board is described in Section IV. Finally, Section V is the conclusion.

II. BLDC MOTOR WORKING PRINCIPLE

A. Principle of BLDC motor operation

In this paper, the considered system is the BLDC motor driven by the commercial controller board as depicted the equivalent circuit in Fig.1. BLDC motors work on the same as the brush DC motor whereas the permanent magnet is replaced the rotor coil and its brushes are removed.

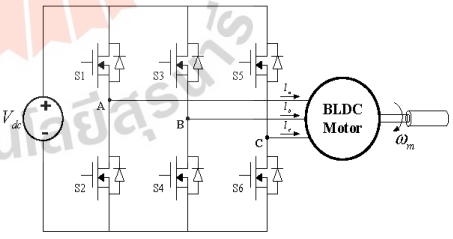


Fig. 1 Equivalent circuit of BLDC motor including a driver board.

From Fig. 1, the BLDC motor is similarly as an alternating current (AC) synchronous motor having the permanent magnet in rotor [3]. As for the principle of rotating force [10], there are two basic forces (attraction and repulsion) among the magnetic poles between the stator and rotor when the current is supplied through the stator coils, resulting in rotational force. However, the BLDC motor is different from AC motor in term of input power in which it is only supplied with the DC power source. Moreover, an inverter circuit must be included to control the current coils.

2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI 2021)
October 20-22, 2021, Nakhon Ratchasima, THAILAND

The IGBT switch driving signals are also different because the BLDC motor will be operated with two phases in a one-time cycle. After each cycle is finished, working phases will be continuously shifted into the next sequence. This principle is set as the pattern of commutation sequence of IGBT switch used for the BLDC driver circuit. When the current pass through in each couple coil, the rotating magnetic field is occurred as depicted in Fig. 2.

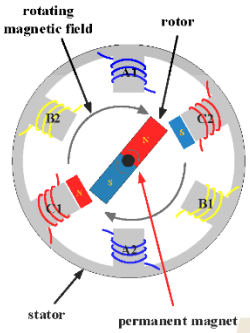


Fig. 2 Rotating magnetic field.

The occurred magnetizing field in Fig. 2 will be sensed by the hall sensors installed at stator. There are three hall sensors in each BLDC motor to measure the rotor position in which they will be set separately equal to 120 degrees. The signals from hall sensor and phase currents can be shown in table I.

Table I. rotating commutation sequence.

electrical angle (θ_e)	hall sensor			phase current			switch closed	
	H1	H2	H3	I_a	I_b	I_c		
0° - 60°	1	0	1	+	-	off	S1	S4
60° - 120°	1	0	0	+	off	-	S1	S6
120° - 180°	1	1	0	off	+	-	S3	S6
180° - 240°	0	1	0	-	+	off	S3	S2
240° - 300°	0	1	1	-	off	+	S5	S2
300° - 360°	0	0	1	off	-	+	S5	S4

As seen from table I, the hall sensor signals will be defined the switching patterns as called "phase shift commutation electronic" [11]. These switching patterns are always used to drive the inverter circuit as called "drive timing". The back electromotive force (emf), hall sensor signal, and phase current when the motor is working can be shown in Fig. 3.

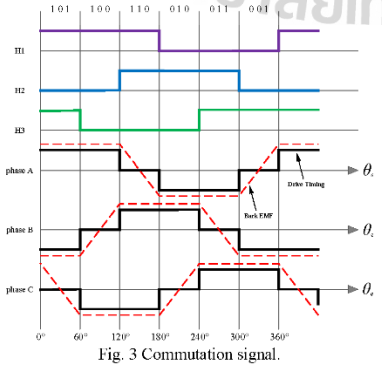


Fig. 3 Commutation signal.

B. Speed adjustment for BLDC motor driven by commercial board

For the commercial driver board, it is used to supply the power to the BLDC motor as seen in Fig. 4. This board consumes the power from DC or AC sources and it can control the integrated IGBT switch to supply the power toward a BLDC motor.

Fig. 4 Commercial driver board.

The controller board in Fig. 4 receives the analog voltage ($V_{in,DC}$) to adjust the control signal. This signal is the same as speed regulation signal. However, this signal has not received from the controller. Thus, this board behaves as an open loop controller for BLDC motor. The output voltage from this board is the pulse shape with the switching pattern as described in the previous section. The analog voltage adjustment can be set from the simple voltage divider circuit in order to feed the analog voltage into the ADJ-pin of the commercial board. However, the way how to design the P or PI or PID controller for this BLDC is necessary to know the mathematical model. The details of mathematical model and experimental testing to identify the parameter will be described in the next section.

III. EXPERIMENTAL SETUP

In this paper, a brushless DC motor and a commercial controller board are used in the experiment in which their nameplates are shown in Table II and Table III, respectively.

Table II. BLDC motor parameters.

Maximum Output Power	471 W
Nominal Voltage	220 V
Rotor/Bearing rated Speed	23000 rpm
Rotor Magnetic Poles	2 poles

Table III. Control unit of BLDC motor parameters.

Power supply voltage	275 V_{rms} (AC)/ 390 V_{max} (DC)
Three Phase Peak Output Current	9.3 A (Peak)
Max controllable Motor Speed	50000 rpm
Reference Voltage of Hall Sensor	5 V_{DC}

The test rig can be illustrated in Fig. 5. The testing motor is performed by feeding input voltage into controller unit and the motor speed is measured. The speed result of testing rig when the $V_{in,DC}$ signal is changed from 0 to 3.7 V can be illustrated in Fig. 6.

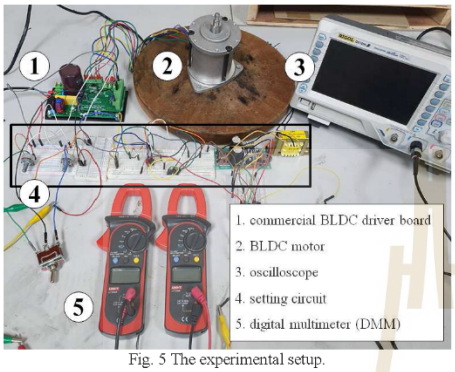


Fig. 5 The experimental setup.

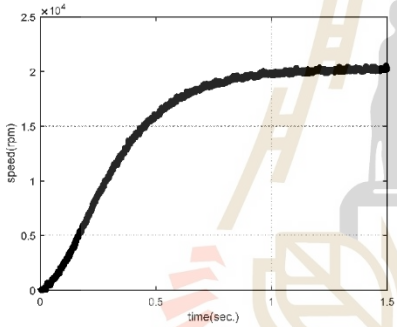


Fig. 6 Speed response from experiment.

In this paper, the mathematical model is represented by the simple transfer function in terms of speed output over $V_{in,DC}$. The speed response can be simplified the estimation model in 3rd-order transfer function as shown in (1) [2].

$$G(s)=\frac{\omega(s)}{V_{in,dc}(s)}=\frac{a_0}{b_3s^3+b_2s^2+b_1s+b_0} \quad (1)$$

To determine the coefficient values (a_0 , b_3 , b_2 , b_1 , and b_0) of the proposed transfer function, the proposed ATS technique will be applied. However, the rated speed of the BLDC motor is 23000 rpm whereas this paper will provide the motor speed equal to 20000 rpm because of the safety of devices. The details of parameter identification are described in Section IV.

IV. Parameter Identification

The ATS is a one powerful tool of the artificial intelligence techniques in which it has been developed from the conventional Tabu search by adding two mechanisms as follows: The back-tracking and adaptive radius are added to provide the better performance and global optimization [6]. The ATS procedures can be shown as follows:

Step 1 Determining the parameter boundary. In this paper, the coefficient of searching radius and the maximum number of search cycles ($Count_{max}$) are defined in this step.

Step 2 ATS process will randomly create the parameters or coefficient values with the number of N_{sts}. The searching area to find the best answer or initial parameter are set as S_0 parameter.

Step 3 Randomly generating the answer around S_0 within radius R into N number of answers sets. This step answers will be stored in the set of $S(R)$.

Step 4 Evaluating the answer to each member of the set $S(R)$ with an objective function until the best answer of $S1$ is achieved.

Step 5 If $S_1 < S_0$ then adjust $S_0 = S_1$.

Step 6 If $Count \geq Count_{max}$ stop searching where S_0 is the best value, otherwise return to step 3. In this step, the back tracing is used to escape from the local solution and the DF search radius reduction as shown in (2) is applied.

$$R_{new}=\frac{R_{old}}{DF} \quad (2)$$

The Coefficient values Identification with ATS

As the ATS search procedures are described before, the block diagram of motor speed identification is shown in Fig. 7. The objective function can be calculated by (3).

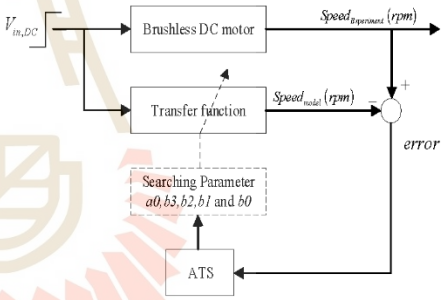


Fig. 7 Block Diagram of ATS for Motor Speed identification.

$$W_x=\sqrt{\frac{\sum error^2}{n}} \quad (3)$$

where $error=\left|Speed_{(experiment)}-Speed_{(model)}\right|$ and n is the number of data experimental results.

From the equation (3), the objective function of parameter identification is the speed error between the experimental result and the speed response from the proposed transfer function. To determine the parameters by using an adaptive tabu algorithm, the initial parameters of the proposed technique can be set as follows: The initial number of answers is equal to 150. The number of neighbor answers is equal to 2 5 0 . In addition, the radius and the decreasing factor of radius are defined as 3 0 and 1 . 0 8 , respectively. These initial parameters can be obtained from the trial and error. The aim of the ATS search is to minimize the W_x value to achieve the correct model and the response from the proposed transfer function will be most like to the experimental results. After the ATS is applied, the coefficient

values of the proposed transfer function are given in Table IV and the convergence results with the optimal W_x equal to 0.004801 can be depicted in Fig. 8.

Table IV. The coefficients obtained from ATS method.

a_0	b_3	b_2	b_1	b_0	W_x
0.2059×10^8	0.0597	31.2477	364.4712	1069.9862	0.004801

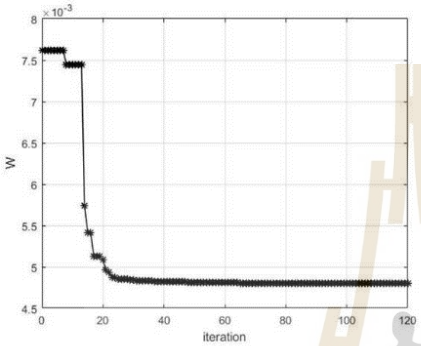


Fig. 8 The convergence of W value

It can be seen in Table IV that the parameters from the ATS method obtain the minimum W_x value. In Fig. 8 show the convergence of W_x value with the searching iteration equal to 120. The transfer function of the proposed a BLDC motor model including a marketing controller board is shown in (4) in which these parameters are identified from the ATS approach. To confirm the proposed model, the speed response compared with the experiment result is illustrated in Fig. 9.

$$G(s)=\frac{0.2059\times10^8}{0.0597s^3+31.2477s^2+364.4712s+1069.9862} \quad (4)$$

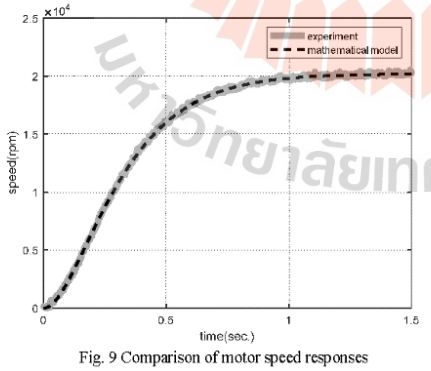


Fig. 9 Comparison of motor speed responses

In Fig. 9, the motor speed response from 0 to 20000 rpm is compared between the experimental results and the proposed model in (4). It can be seen that the speed values of the model are the same as the experiment in both of transient and steady response. The results can confirm that the ATS method can be used to identify the model of BLDC motor including commercial controller board.

V. Conclusion

This paper presents the application of the ATS method to identify the identity of BLDC motor. The third-order transfer function is used to represent the model of the system. The unknown coefficient values of transfer function are determined by the ATS method. The error values between the experiment and the proposed model results are used to be the main objective function for the proposed technique. The comparison between the speed response of the model with the corresponding experimental results can confirm that the ATS method can be used to provide the correct parameter identification of BLDC motor including controller board.

References

[1] V. Kr and S. Patel, "Modeling and Performance Analysis of PID Controlled BLDC Motor and Different Schemes of PWM Controlled BLDC Motor," in *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2013, vol. 3, no. 4, pp. 1-14.

[2] P. Khluabwannarat, A. Nawikavatan, and D. Puangdownreong, "Application of Parallel Flower Pollination Algorithm to Fractional-Order Model Identification of BLDC Motor," in *2020 17th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2020, pp. 131-134.

[3] M. Poovizhi, M. S. Kumaran, P. Ragul, L. I. Priyadarshini, and R. Logambal, "Investigation of mathematical modelling of brushless dc motor(BLDC) drives by using MATLAB-SIMULINK," in *2017 International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC)*, 2017, pp. 178-183.

[4] D. Puangdownreong, K. Areerak, A. Srikaew, S. Sujitjorn, and P. Totarong, "System identification via Adaptive Tabu Search," in *2002 IEEE International Conference on Industrial Technology, 2002. IEEE ICIT '02.*, 2002, vol. 2, pp. 915-920 vol.2.

[5] D. Puangdownreong, A. Nawikavatan, and C. Thammarat, "Optimal Design of I-PD Controller for DC Motor Speed Control System by Cuckoo Search," *Procedia Computer Science*, vol. 86, pp. 83-86, 2016/01/01/ 2016.

[6] S. Sujitjorn, T. Kulworawanichpong, D. Puangdownreong, and K.-N. Areerak, "Adaptive Tabu Search and Applications in Engineering Design," in *Integrated Intelligent Systems for Engineering Design*, 2006, pp. 233-257: IOS PressVan Diemenstraat 94 1013 CN Amsterdam Netherlands.

[7] W. Peng, Z. Yang, C. Liu, J. Xiu, and Z. Zhang, "An Improved PSO Algorithm for Battery Parameters Identification Optimization Based on Thevenin Battery Model," in *2018 5th IEEE International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems (CCIS)*, 2018, pp. 295-298.

[8] J. Pakdeeto, K.-N. Areerak, and K.-L. Areerak, "THE DC MOTOR IDENTIFICATION USING GENETIC ALGORITHM WITH MULTI-OBJECTIVE FUNCTIONS," in *the 9th South East Asia Technical University Consortium (SEATUC)*, Suranaree University of Technology, 2015, vol. 1, p. 84, 2015.

[9] C. Ketthanom, P. Artameeyanant, and V. Pratumshat, "Application of Adaptive Tabu Search to PIDA Controller Design," in *2019 16th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2019, pp. 121-124.

[10] J. Carlos Gamazo Real and G. Jaime Gomez, "Sensorless Detection of Position and Speed in Brushless DC Motors using the Derivative of Terminal Phase Voltages Technique with a Simple and Versatile Motor Driver Implementation," (in En), *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 10, no. 4, pp. 1540-1551, 07/01 2015.

[11] D. Zhao, X. Wang, L. Xu, L. Xia, and Y. Huangfu, "A New Phase-Delay-Free Commutation Method for BLDC Motors Based on Terminal Voltage," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 5, pp. 4971-4976, 2021.

ที่ อว 0604.8.1.3/1386

คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
เลขที่ 85 ถ.สถลมาร์ค
ต.เมืองศรีไค อ.วารินชำราบ
จ.อุบลราชธานี 34190

31 สิงหาคม 2565

เรื่อง ตอบรับบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม

เรียน คุณกองพัน อารีรักษ์

ตามที่ท่านได้ส่งบทความวิจัย เรื่อง “การระบุเอกลักษณ์แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์” โดยมีผู้เขียนร่วม คือ รัฐพล โพธิ์สังข์ (ชื่อแรก), จักรกริช ภักดีโต, ศรุตา หวานสูงเนิน และ กองพล อารีรักษ์ เพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม ตามความทราบนั้น

บัดนี้ บทความดังกล่าวของท่าน ได้ผ่านการประเมินจากผู้ทรงคุณวุฒิเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว และกองบรรณาธิการ ได้พิจารณาเห็นชอบในการนำบทความของท่าน เพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม ปีที่ 16 ฉบับที่ 3 ประจำเดือนกรกฎาคม - กันยายน 2566 ประเภท บทความวิจัย และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ท่านจะให้ความสนใจในการส่งบทความเพื่อตีพิมพ์ ในวารสารฯ ในโอกาสต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง)
บรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม

สำนักงานกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม
โทร. 045 –353319 อีเมล์อิเล็กทรอนิกส์ : engj_assistant@ubu.ac.th

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม
Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การระบุเอกลักษณ์แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

Dynamic Model Identification of BLDC Motor Using Artificial Intelligence Techniques

รัฐพล โพธิ์สังข์[1] จักรกริช ภักดีโต[2] ศรุตา หวานสูงเนิน[1] กองพัน อารีรักษ์[1]* กองพล อารีรักษ์[1]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

[2] ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10800

Ratapon Phosung[1] Jakkrit Pakdeeto[2] Saruta Wansungnoen[1] Kongpan Areerak[1]* Kongpol Areerak[1]

[1] School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000

[2] Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, KMUTNB, Bangkok 10800

* Corresponding author.

E-mail: kongpan@sut.ac.th; Telephone: 0 4422 4520

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่มีชุดบอร์ดขับเคลื่อน โดยทั่วไปมอเตอร์ดังกล่าวจะถูกควบคุมการทำงานเพื่อให้สามารถใช้งานในระดับความเร็วรอบที่ต้องการได้ แบบจำลองที่มีความถูกต้องเพื่อใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุมจึงมีความสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบแม่นตรงของระบบดังกล่าวมีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก บทความนี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองกล่องดำเพื่ออธิบายผลการตอบสนองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่มีชุดขับเคลื่อน แบบจำลองดังกล่าวจำเป็นต้องระบุค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันถ่ายโอน ดังนั้นบทความนี้จึงได้ประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์สำหรับการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองกล่องดำที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน วิธีการที่นำเสนอในบทความนี้ได้แก่ การค้นหาแบบจีนเนติกอัลกอริทึม (GA) การค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO) และการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (ATS) ซึ่งจะทำการค้นหาจนกว่าค่าความคาดเคลื่อนจะมีค่าน้อยที่สุด ผลการระบุเอกลักษณ์พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากวิธีการค้นหาทั้ง 3 วิธีสามารถอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้ถูกต้องแม่นยำ การยืนยันสมรรถนะของวิธีการที่นำเสนอในบทความนี้จะอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างผลการตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองกับผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านในห้องปฏิบัติการ เพื่อแสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองมีความสอดคล้องกันทั้งในสภาวะชั่วครู่และสภาวะอยู่ตัว

คำสำคัญ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน แบบจำลองกล่องดำ การระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลอง การค้นหาแบบจีนเนติกอัลกอริทึม (GA) การค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO) การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (ATS)

Abstract

This paper presents the model of brushless direct current motor including the commercial driver board. Generally, the motor speed is controlled by setting the desired conditions. The accurate model for the controller design is very

important. However, the exact mathematical model is very complicated. As a result, this paper presents the black-box model to explain the response of the brushless direct current motor driven by the commercial driver board. The identification of the proposed model is necessary to search the transfer function coefficients. Therefore, this paper presents the artificial intelligence techniques to identify the black-box model represented by the transfer function. The proposed genetic algorithm (GA), particle swarm optimization (PSO) and adaptive tabu search (ATS) will tune the unknown parameters until the minimum fitness value is obtained. It can be found that the proposed methods can provide the accurate dynamic model. The performance of the presented methodology is verified by the comparison results of the speed responses from the proposed model and experimentation. The results can show that the proposed technique can provide the accurate model useful for the controller design.

Keywords

brushless direct current motor; black-box model; model identification; genetic algorithm (GA) method; particle swarm optimization (PSO) method; adaptive tabu search (ATS) method

1. บทนำ

ในปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (brushless direct current motor: BLDC) เป็นที่นิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลาย อาทิเช่น อากาศยาน ยานยนต์ รถไฟฟ้า เรือดำน้ำ คอมพิวเตอร์ การแพทย์ และระบบควบคุมอัตโนมัติในสายการผลิตของภาคอุตสาหกรรม เป็นต้น [1,2] เนื่องจากสามารถควบคุมการทำงานได้อย่างถูกต้องแม่นยำ อัตราส่วนระหว่างแรงบิดต่อขนาดพิกัดกำลังที่ค่อนข้างสูง มีประสิทธิภาพสูง การดูแลบำรุงรักษาที่ต่ำ อีกทั้งยังมีอายุการใช้งานยาวนาน [3,4] โดยส่วนใหญ่การใช้งานมอเตอร์ดังกล่าวมักจะมีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เพื่อให้สามารถใช้งานในความเร็วรอบที่ต้องการได้ ดังนั้นการออกแบบและการวิเคราะห์ระบบควบคุมความเร็วรอบจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมการทำงานและพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ จากการศึกษางานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการนำเสนอแนวทางการหาแบบจำลองของมอเตอร์ BLDC ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แนวทางคือ แนวทางที่ 1 การพิสูจน์หาแบบจำลองด้วยทฤษฎีวงจรไฟฟ้าพื้นฐาน [1,5,6] เป็นแนวทางที่อาศัยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ตั้งอยู่บนหลักฟิสิกส์พื้นฐาน แบบจำลองที่ได้จะสามารถอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ปรากฏในแบบจำลองสามารถอธิบายความหมายทางฟิสิกส์ของระบบได้ แต่ถึงอย่างไรก็ตาม แนวทางดังกล่าวเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับมอเตอร์ BLDC ที่มีชุดบอร์ดขับเคลื่อนจะมีความยุ่งยากซับซ้อนในการพิสูจน์หาแบบจำลองเป็นอย่างมาก ดังนั้นในบทความนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาแนวทางที่ 2 คือ การสร้างแบบจำลองกล่องดำ (black-box model) ที่มีการระบุเอกลักษณ์แบบจำลอง (model identification) [7] โดยอาศัยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพลวัตที่สนใจโดยอาศัยข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของระบบที่ได้จากการทดสอบ ค่าพารามิเตอร์ที่ปรากฏในแบบจำลองไม่สามารถอธิบายความหมายทางฟิสิกส์ แต่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของระบบพลวัตได้อย่างถูกต้อง สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ BLDC ที่พิจารณาในบทความนี้จะกำหนดให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสาม [7] เนื่องจากแบบจำลองโดยทั่วไปของมอเตอร์ BLDC จะอยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสอง แต่เมื่อพิจารณาร่วมกับชุดบอร์ดขับเคลื่อนแบบจำลองที่ได้จะอยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสาม ซึ่งสามารถระบุค่าสัมประสิทธิ์ของ

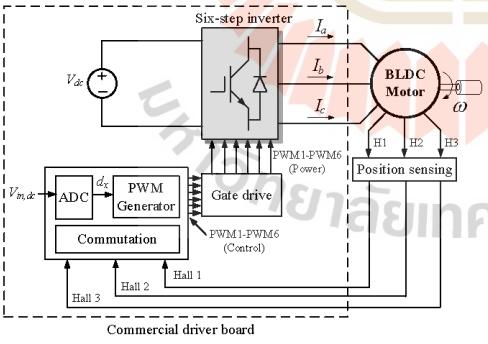
ฟังก์ชันถ่ายโอนที่นำมาเป็นแบบจำลองได้ด้วยการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ วิธีการดังกล่าวได้รับความนิยมนำมาใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรมเป็นอย่างมาก ไม่เพียงแต่การระบุเอกลักษณ์เท่านั้น แต่ยังสามารถนำมาใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมได้เช่นกัน วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มีมากมายดังตัวอย่างต่อไปนี้ วิธีการค้นหาแบบจีนเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithm: GA) [8,9] วิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (particle swarm optimization: PSO) [10,11] วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (ATS) [12-14] และวิธีการผสมเกสรดอกไม้ (flower pollination algorithm: FPA) [15] เป็นต้น ตัวอย่างการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์จากงานวิจัยในอดีตมีดังนี้ การออกแบบวงจรกรองกำลังแบบแอกทีฟด้วยวิธี ATS [16] และวิธี GA [17] การประยุกต์ใช้วิธี PSO เพื่อหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดแบบแยกกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ [18] การออกแบบสายอากาศแถวลำดับด้วยอัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งเทียม (artificial bee colony: ABC) [19] การประยุกต์ใช้วิธีอาณานิคมมด (ant colony optimization: ACO) เพื่อแก้ปัญหาการไหลของกำลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด [20] เป็นต้น สำหรับบทความนี้ได้เลือกวิธี GA PSO และ ATS มาประยุกต์ใช้สำหรับการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์ BLDC เนื่องจากวิธีการทั้ง 3 ได้รับการพิสูจน์ด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์แล้วว่ามีการลู่เข้าหาคำตอบของปัญหา (convergence) [21–23] จากผลการระบุเอกลักษณ์ที่ได้ พร้อมทั้งการยืนยันด้วยผลการทดสอบของมอเตอร์ BLDC ในห้องปฏิบัติการ แสดงให้เห็นว่า วิธีการที่ได้นำเสนอในบทความนี้สามารถสร้างแบบจำลองที่อธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำเหมาะสำหรับการนำไปใช้ต่อยอดและพัฒนาเพื่อการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ BLDC ต่อไปในอนาคต

บทความนี้ประกอบไปด้วย 6 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่ 1 เป็นบทนำ ส่วนที่ 2 เป็นการนำเสนอระบบที่พิจารณา และส่วนที่ 3 จะกล่าวถึงแบบจำลองของระบบที่พิจารณา รวมถึงชุดทดสอบที่ใช้ในการระบุเอกลักษณ์ หลักการค้นหาของวิธี GA PSO และ ATS จะได้รับการนำเสนอในส่วนที่ 4 สำหรับส่วนที่ 5 เป็นการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ พร้อมทั้งดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องในลำดับสุดท้าย ส่วนที่ 6 เป็นการสรุปข้อดีของวิธีการที่ได้นำเสนอในบทความนี้

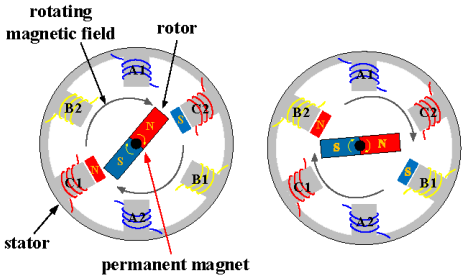
2. ระบบที่พิจารณา

ระบบที่พิจารณาแสดงดังรูปที่ 1 จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ มอเตอร์ BLDC และชุดบอร์ดขับเคลื่อน ในส่วนของมอเตอร์ BLDC เป็นมอเตอร์ที่พัฒนามาจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน โดยใช้กระบวนการคอมมิวเตชันแบบอิเล็กทรอนิกส์ ในการควบคุมการไหลของกระแสในขดลวดแทนการคอมมิวเตชันทางกลเพื่อลดปัญหาการเสียดสีทำให้เกิดความร้อน การสึกหร่อ และการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [24,25] การขับเคลื่อนมอเตอร์จะตั้งอยู่บนพื้นฐานของแรงดึงดูดหรือแรงผลักระหว่างขั้วแม่เหล็กเช่นเดียวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับซิงโครนัส ดังแสดงในรูปที่ 2 [26] ซึ่งจะใช้ขดลวดสเตเตอร์ 2 ชุดในการทำงานต่อครั้งเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กสับเปลี่ยนกัน การทำงานจะเริ่มเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดสเตเตอร์ชุดที่ 1 ในจำนวน 3 ชุด และสร้างขั้วแม่เหล็กเพื่อดึงดูดขั้วแม่เหล็กถาวรขั้วตรงข้ามของโรเตอร์ส่งผลทำให้โรเตอร์เกิดการเคลื่อนที่ เมื่อกระแสเลื่อนไปที่ชุดขดลวดที่อยู่ถัดไปอย่างต่อเนื่องจะเกิดลำดับการเปลี่ยนแปลงแต่ละชุดทำให้โรเตอร์ติดตามการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กหมุน โดยตำแหน่งสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์จะถูกตรวจจับสัญญาณด้วยตัวตรวจจับฮอลล์ทั้ง 3 ตัว (H_1 H_2 และ H_3) ที่อยู่บริเวณสเตเตอร์ เพื่อนำไปสร้างชุดตัวเลขสาม

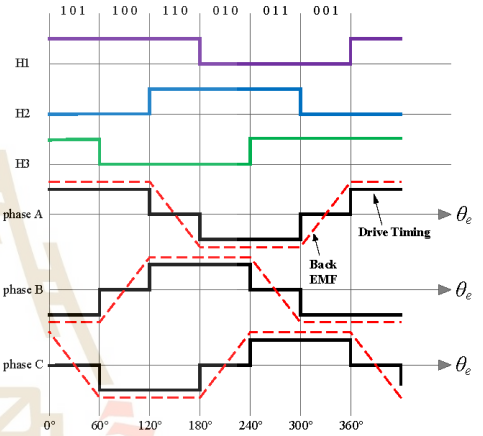
หลักที่มีการเปลี่ยนแปลงทุก ๆ 60 องศา นอกจากนี้สัญญาณดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในกำหนดจังหวะเวลาการขับ (drive timing) ของสวิตช์ IGBT และขณะมอเตอร์หมุนจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back electromotive forces) อีกด้วย โดยรูปสัญญาณจากตัวตรวจจับฮอลล์ จังหวะเวลาการขับและแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ แสดงได้ในรูปที่ 3 สำหรับชุดบอร์ดขับเคลื่อนจะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ BLDC ผ่านการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีอุปกรณ์สวิตช์ IGBT 6 ตัว เนื่องจากหลักการทำงานของมอเตอร์ BLDC จะมีลักษณะคล้ายกับมอเตอร์ซิงโครนัสสามเฟส อุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าวจะถูกขับด้วยสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM1-PWM6) ที่สร้างขึ้นโดยอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM Generator) และวงจรขับเกท (gate drive) โดยที่อินพุตของวงจร PWM Generator เป็นสัญญาณควบคุมความเร็วรอบ (d_x) ซึ่งจะถูกปรับเปลี่ยนตามแรงดันแอนะล็อก ($V_{in,dc}$) ที่ป้อนให้กับชุดบอร์ดขับเคลื่อน ดังนั้นชุดขับเคลื่อนจึงมีพฤติกรรมเป็นระบบควบคุมความเร็วรอบแบบวงเปิดสำหรับมอเตอร์ BLDC เนื่องจากสัญญาณ d_x ไม่ได้ถูกปรับจากตัวควบคุมโดยตรง



รูปที่ 1 ไดอะแกรมชุดบอร์ดขับเคลื่อนที่เชื่อมต่อกับมอเตอร์ BLDC



รูปที่ 2 หลักการหมุนของมอเตอร์



รูปที่ 3 สัญญาณการคอมมิวเตชัน

3. แบบจำลองและชุดทดสอบของระบบที่พิจารณา

3.1 แบบจำลองของมอเตอร์ BLDC

แบบจำลองของมอเตอร์ BLDC รวมทั้งชุดขับเคลื่อนในบทความนี้เป็นแบบจำลองกล่องดำที่แทนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสามเนื่องจากแบบจำลองโดยทั่วไปของมอเตอร์ BLDC จะอยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองและชุดบอร์ดขับเคลื่อนสามารถประมาณได้โดยใช้แบบจำลองอันดับหนึ่ง [7] ซึ่งจะเขียนอยู่ในรูปของอัตราส่วนระหว่างการแปลงลาปลาซ

ของความเร็วรอบ (ω) ต่อการแปลงลาปลาซของแรงดันอินพุต $V_{in,dc}$ ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{V_{in,dc}(s)} = \frac{a_0}{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \qquad (1)$$

จากสมการที่ (1) จะเห็นว่า ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ปรากฏภายในแบบจำลอง (a_0, b_3, b_2, b_1 และ b_0) จะไม่สามารถอธิบายความหมายทางกายภาพของระบบได้ ดังนั้นการหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 5 ต่อไป

3.2 ชุดทดสอบของมอเตอร์ BLDC

ชุดทดสอบของมอเตอร์ BLDC แสดงได้ดังในรูปที่ 4 จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักทั้งหมด 5 ชุดคือ วงจรแบ่งแรงดัน วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน ชุดบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ และมอเตอร์ BLDC ของบริษัท Beijing Eletechnic ซึ่งสามารถแสดงข้อมูลต่าง ๆ ของชุดบอร์ดขับเคลื่อนและมอเตอร์ได้ดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

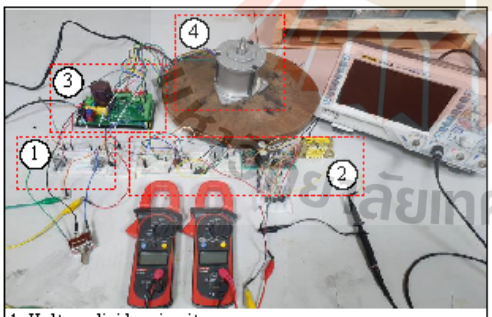
ตารางที่ 1 ข้อมูลของชุดบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์

แรงดันแหล่งจ่าย	275 V_{rms} (AC)/ 390 V_{max} (DC)
กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดสามเฟส	9.3 A (Peak)
ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่สามารถควบคุมได้สูงสุด	50000 rpm
แรงดันอ้างอิงของฮอลล์เซ็นเซอร์	5 V_{dc}

ตารางที่ 2 ข้อมูลของมอเตอร์ BLDC

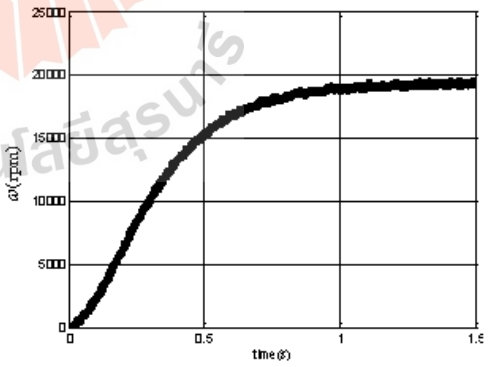
กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด	471 W
แรงดันไฟฟ้าของระบบ	220 V
ความเร็วพิกัดของโรเตอร์	23000 rpm
ขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าของโรเตอร์	4 poles

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า ความเร็วพิกัดของมอเตอร์ BLDC จะมีค่าเท่ากับ 23000 rpm หากดำเนินการทดสอบมอเตอร์ที่ค่าพิกัดอาจส่งผลทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ภายในระบบได้ ดังนั้นการทดสอบมอเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลนำไปใช้ในกระบวนการระบุเอกลักษณ์จะทดสอบที่ความเร็วรอบต่ำกว่าพิกัดของมอเตอร์ BLDC ($\approx$ 20000 rpm) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5



1. Voltage divider circuits
2. Frequency to voltage converter circuit
3. Commercial driver board
4. Brushless DC motor

รูปที่ 4 ชุดทดสอบของระบบที่พิจารณา



รูปที่ 5 ผลการทดสอบความเร็วรอบของมอเตอร์ BLDC

4. หลักการค้นหาของวิธี GA PSO และ ATS

สำหรับในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอหลักการค้นหาของวิธี GA PSO และ ATS ที่ใช้ในการระบุเอกลักษณ์ ซึ่งจะสรุปเป็นขั้นตอนเพื่ออธิบายหลักการค้นหาไว้พอสังเขปดังนี้

4.1 วิธี GA

วิธี GA เป็นอัลกอริทึมที่อาศัยแนวคิดการวิวัฒนาการทางสายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตเพื่อความอยู่รอดในระบบชีววิทยา โดยทำการจำลองอยู่บนคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในกระบวนการคำนวณค้นหาคำตอบของปัญหาที่ต้องการค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งสามารถสรุปเป็นขั้นตอนการค้นหาได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดให้รุ่นประชากร ($Generation$) เป็นจำนวนรอบการค้นหาและ $Generation_{\max}$ เป็นจำนวนรุ่นประชากรสูงสุดของการค้นหา

ขั้นที่ 2 สร้างประชากรเริ่มต้น (initial population) จำนวน m โครโมโซม โดยแต่ละโครโมโซมจะอยู่ในรูปของตัวแปรค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการค้นหา ดังแสดงได้ในสมการที่ 2

$$\boldsymbol{C_i} = \left[a_{0,i} \quad b_{3,i} \quad b_{2,i} \quad b_{1,i} \quad b_{0,i} \right] \; ; \; i = 1,2,3...m \qquad (2)$$

โดยที่ $\boldsymbol{C_i}$ คือ โครโมโซมตัวที่ 1 ถึง m

ขั้นที่ 3 ทำการประเมินค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซมโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (ε) แล้วส่งค่ากลับให้ระบบการค้นหาแบบจีนเนติกอัลกอริทึม

ขั้นที่ 4 ทำการคัดเลือกโครโมโซมเพื่อนำมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ให้กับรุ่นประชากรถัดไป

ขั้นที่ 5 นำต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ได้จากขั้นที่ 4 มาเข้ากระบวนการเพื่อให้ได้ประชากรลูกหลานที่ดีขึ้น พร้อมทั้งประเมินค่าความเหมาะสมด้วย ε

ขั้นที่ 6 แทนที่ประชากรรุ่นเดิมด้วยโครโมโซมประชากรลูกหลาน

ขั้นที่ 7 ถ้า $Generation > Generation_{\max}$ ให้หยุดการค้นหา โดยโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมดีที่สุดจะเป็นคำตอบของระบบการค้นหา มิฉะนั้นแล้วให้กลับไปที่ขั้นที่ 4 ใหม่

4.2 วิธี PSO

วิธี PSO เป็นอัลกอริทึมการค้นหาเชิงประชากรโดยมีอนุภาคย่อย ๆ จำนวน n อนุภาค รวมกลุ่มกันเคลื่อนที่ไปในปริภูมิการค้นหา เพื่อค้นหาคำตอบที่ต้องการ โดยทิศทางการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคจะแปรเปลี่ยนไปตามข้อมูลการค้นหาที่ผ่านมาของอนุภาคนั้น ๆ และข้อมูลการค้นหาจากอนุภาคที่พบคำตอบดีที่สุดภายในกลุ่ม สำหรับขั้นตอนการค้นหาสามารถสรุปได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดจำนวนรอบของการค้นหา ($Iteration$) และจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา ($Iteration_{\max}$)

ขั้นที่ 2 ทำการสุ่มค่าเวกเตอร์ตำแหน่งและเวกเตอร์ความเร็วโดยเวกเตอร์ดังกล่าวจะมีมิติเท่ากับจำนวนของตัวแปรที่ต้องการค้นหา ดังแสดงได้ในสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

$$\overrightarrow{\boldsymbol{P_j}} = \left[a_{0,j} \quad b_{3,j} \quad b_{2,j} \quad b_{1,j} \quad b_{0,j} \right]^T \; ; \; j = 1,2,3...n \qquad (3)$$

$$\overrightarrow{\boldsymbol{V_j}} = \left[v_{1,j} \quad v_{2,j} \quad v_{3,j} \quad v_{4,j} \right]^T \; ; \; j = 1,2,3...n \qquad (4)$$

โดยที่ $\overrightarrow{\boldsymbol{P_j}}$ คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคตัวที่ 1 ถึง n

$\overrightarrow{\boldsymbol{V_j}}$ คือ เวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคตัวที่ 1 ถึง n

ขั้นที่ 3 ทำการประเมินค่าความเหมาะสมของแต่ละอนุภาคด้วย ε ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี

- กรณีที่ 1 ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาคใดมีค่าดีกว่าค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดของกลุ่มอนุภาค หรือค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง ($gbest$) ให้บันทึกค่าความเหมาะสมและเวกเตอร์ตำแหน่งด้วยการกำหนดให้ $gbest = f(\overrightarrow{\boldsymbol{P_j}})$ และ $\overrightarrow{\boldsymbol{P}}_{gbest} = \overrightarrow{\boldsymbol{P_j}}$

- กรณีที่ 2 ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาคใดมีค่าดีกว่าค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดของอนุภาคตัวเดียวกัน ($pbest$) ที่เคยพบมาก่อน ให้บันทึกค่าความเหมาะสมและเวกเตอร์ตำแหน่งด้วยการกำหนดให้ $pbest = f(\vec{P}_j)$ และ $\vec{P}_{pbest,j} = \vec{P}_j$

ขั้นที่ 4 ทำการปรับค่าความเร็วของอนุภาคด้วยสมการที่ (5)

$$\vec{V}_i(new) = \vec{V}_i(old) + \rho_p\left(\vec{P}_{pbest,i} - \vec{P}_i(old)\right) + \rho_g\left(\vec{P}_{gbest,i} - \vec{P}_i(old)\right) \quad (5)$$

โดยที่ C_p คือ ค่าคงที่ความเร่งขององค์ประกอบเชิงปริชาน

C_g คือ ค่าคงที่ความเร่งขององค์ประกอบทางสังคม

ρ_p คือ ตัวประกอบแบบสุ่มขององค์ประกอบเชิงปริชาน

ρ_g คือ ตัวประกอบแบบสุ่มขององค์ประกอบทางสังคม

ขั้นที่ 5 ทำการปรับค่าเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคสำหรับรอบการค้นหาต่อไปโดยใช้สมการที่ (6)

$$\vec{P}_j(new) = \vec{P}_j(old) + \vec{V}_j(new) \quad (6)$$

ขั้นที่ 6 ถ้า $Iteration > Iteration_{\max}$ ให้หยุดการค้นหา โดยคำตอบที่ดีที่สุดแบบ $gbest$ จะเป็นคำตอบของระบบการค้นหา มิฉะนั้นแล้วให้กลับไปที่ขั้นที่ 3 ใหม่

4.3 วิธี ATS

วิธี ATS เป็นอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้นจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู โดยทำการเพิ่มกลไกการเดินย้อนรอยและการปรับลดค่ารัศมี เพื่อแก้ปัญหาการติดอยู่ในคำตอบแบบวงแคบเฉพาะถิ่นและเพิ่มสมรรถนะในการค้นหา [27] ซึ่งสามารถสรุปเป็นขั้นตอนการค้นหาได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดพื้นที่การค้นหา รัศมีการค้นหา ($radius$) จำนวนรอบของการค้นหา ($Round$) และจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา ($Round_{\max}$)

ขั้นที่ 2 ทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น (S_0) ภายใต้พื้นที่การค้นหา และให้ S_0 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น

ขั้นที่ 3 ทำการสุ่มเลือกคำตอบจำนวน N คำตอบรอบ ๆ S_0 ภายในพื้นที่รัศมีการค้นหา R และกำหนดให้เซ็ต $S(R)$ เป็นเซ็ตของคำตอบ N คำตอบ ซึ่งเรียกว่า คำตอบรอบข้าง โดยสมาชิกของเซ็ต $S(R)$ ที่นำเสนอในบทความนี้คือ พารามิเตอร์ที่จะทำการค้นหา ประกอบไปด้วย a_0 b_3 b_2 b_1 และ b_0

ขั้นที่ 4 ทำการประเมินคำตอบของแต่ละสมาชิกใน $S(R)$ ด้วย ε โดยกำหนดให้ S_1 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดใน $S(R)$

ขั้นที่ 5 ถ้า $S_1 < S_0$ จะกำหนดให้ $S_0 = S_1$ และเก็บค่า S_0 ในรายการตาบู

ขั้นที่ 6 ถ้า $Round < Round_{\max}$ จะหยุดกระบวนการค้นหา โดยที่ค่า S_0 คือ คำตอบที่ดีที่สุดไม่เช่นนั้นจะกลับไปสู่ขั้นตอนที่ 3

ขั้นที่ 7 จะเข้าสู่กลไกลการเดินย้อนรอยเพื่อแก้ปัญหาจำนวนคำตอบในแต่ละรอบไม่หลุดออกจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่นตามจำนวนคำตอบสูงสุดที่ตั้งค่าไว้ โดยอาศัยการเลือกคำตอบที่ดีที่สุดจากพื้นที่การค้นหาเดิมในรายการตาบู เพื่อมากำหนดเป็นคำตอบเริ่มต้นในการค้นหารอบถัดไป

ขั้นที่ 8 จะเข้าสู่กลไกการปรับค่ารัศมีการค้นหา โดยจะปรับลดรัศมีลงเรื่อย ๆ ด้วยอัตราการปรับลดรัศมี DF ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (7)

$$radius_{new} = \frac{radius_{old}}{DF} \quad (7)$$

5. การระบุเอกลักษณ์แบบจำลองของมอเตอร์ BLDC ด้วยวิธี GA PSO และ ATS

จากหัวข้อที่ผ่านได้อธิบายหลักการค้นหาของวิธี GA PSO และ ATS ไว้แล้ว ดังนั้นในหัวข้อนี้จะนำหลักการค้นหาของดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองของมอเตอร์ BLDC โดยเนื้อหาที่สำคัญจะประกอบด้วย กระบวนการระบุเอกลักษณ์แบบจำลอง ผลการระบุเอกลักษณ์แบบจำลอง และการยืนยันผลการระบุเอกลักษณ์ ซึ่งจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 5.1-5.3 ตามลำดับ

5.1 กระบวนการระบุเอกลักษณ์แบบจำลอง

โครงสร้างบล็อกไดอะแกรมสำหรับกระบวนการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองมอเตอร์ BLDC แสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนในการระบุเอกลักษณ์ได้ดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 ทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต $V_{in,dc}$ จาก 0 V (0 rpm) ไปเป็น 3.7 V ($\approx$ 20000 rpm)

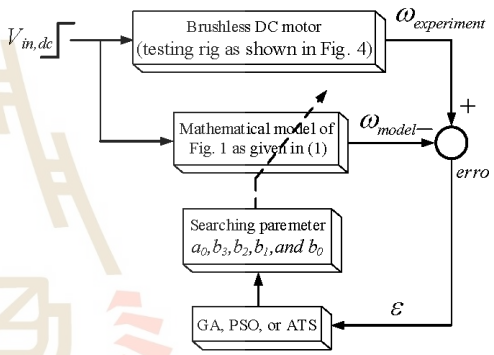
ขั้นที่ 2 นำผลตอบสนองความเร็วรอบของชุดทดสอบ ($\omega_{experiment}$) มาเปรียบเทียบกับผลตอบสนองความเร็วรอบของแบบจำลอง (ω_{model}) ผ่านค่าความคาดเคลื่อน ($error$) เพื่อนำมาใช้คำนวณหาค่าความผิดพลาดอาร์เอ็มเอส หรือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (ε) ดังแสดงในสมการที่ (8)

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum error^2}{n}} \qquad (8)$$

โดยที่ $error$ คำนวณได้จาก $\left|\omega_{experiment} - \omega_{model}\right|$ และ n คือ จำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด

ขั้นที่ 3 นำค่า ε ส่งให้วิธีการค้นหา GA PSO และ ATS ทำการค้นหาค่า a_0 b_3 b_2 b_1 และ b_0 จนกระทั่งได้ค่า ε ที่น้อยที่สุด โดยจะกำหนดให้ขอบเขตการค้นหาค่า a_0 b_3 b_2 b_1 และ b_0 มีค่าเท่ากับ [0, 0.5×10^8] [0, 0.1] [25, 35] [340, 370] และ [1040, 1080] ตามลำดับ ทั้งนี้คำตอบที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีต่าง ๆ จะต้องมีค่าอยู่ระหว่างขอบเขตที่กำหนดไว้ ในกรณีที่คำตอบจากการระบุเอกลักษณ์มีค่าใกล้เคียงกับขอบเขตบนหรือขอบเขตล่างจะต้องดำเนินการปรับเปลี่ยนขอบเขตของคำตอบ และทำการค้นหาใหม่จนกว่าจะได้ค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุด

การระบุเอกลักษณ์แบบจำลองมอเตอร์ BLDC จำเป็นต้องมีการทดสอบพารามิเตอร์ของวิธี GA PSO และ ATS เพื่อให้การค้นหามีประสิทธิภาพสูงสุด โดยในบทความนี้ได้ดำเนินการทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าวโดยอาศัยเกณฑ์การพิจารณาจากค่า ε เฉลี่ยที่น้อยที่สุด ซึ่งสามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละอัลกอริทึมได้ดังนี้



รูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมกระบวนการระบุเอกลักษณ์แบบจำลอง

วิธี GA ได้เลือกใช้ขนาดของประชากรเท่ากับ 50 โครโมโซม การคัดเลือกสายพันธุ์แบบบแฟ้นสุ่มครอบอาณาจักร การค้นหา การทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียวที่ระดับค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.8 และการทำมิวเตชันแบบยูนิฟอร์มที่ระดับค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.04 โดยกำหนดให้จำนวนรอบสูงสุดของการค้นหาเท่ากับ 120 รอบ เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขยุติการค้นหา

วิธี PSO ในบทความนี้ได้เลือกใช้จำนวนอนุภาค ค่าคงที่ความเร่งแบบ C_p และค่าคงที่ความเร่งแบบ C_g เท่ากับ 30

0.75 และ1.0 ตามลำดับ โดยกำหนดให้จำนวนรอบสูงสุดของการค้นหาเท่ากับ 120 รอบ เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขยุติการค้นหาเช่นเดียวกัน

วิธี ATS ในบทความนี้ได้เลือกใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง รัศมีการค้นหา และอัตราปรับลดรัศมีเท่ากับ 150 250 30 และ1.08 ตามลำดับ โดยกำหนดให้จำนวนรอบสูงสุดของการค้นหาเท่ากับ 120 รอบ เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขยุติการค้นหาเช่นเดียวกัน

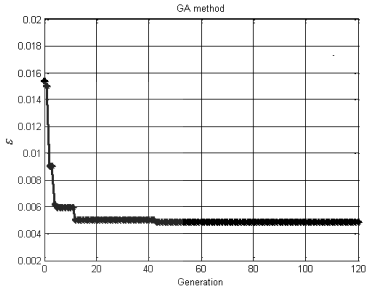
เมื่อทราบถึงองค์ประกอบที่สำคัญทั้งหมดสำหรับการระบุเอกลักษณ์แล้ว การใช้วิธี GA PSO และ ATS ในการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองมอเตอร์ BLDC ซึ่งผลการระบุเอกลักษณ์ดังกล่าว จะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 5.2

5.2 ผลการระบุเอกลักษณ์แบบจำลอง

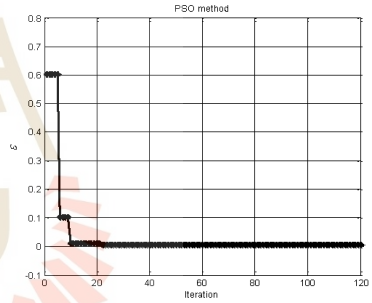
การระบุเอกลักษณ์แบบจำลองมอเตอร์ BLDC ผ่านการค้นหาค่า a_0 b_3 b_2 b_1 และ b_0 สำหรับในบทความนี้จะพิจารณาผลการลู่เข้าของค่า ε ทั้งหมด 5 ครั้ง เพื่อนำมาใช้ในการเลือกค่า a_0 b_3 b_2 b_1 และ b_0 ที่เหมาะสมที่สุด ผ่านเงื่อนไขค่า ε ที่น้อยที่สุด อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการระบุเอกลักษณ์อีกด้วย สำหรับผลการค้นหาดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7 ถึง 9 และตารางที่ 3

จากรูปที่ 7 ถึง 9 แสดงการลู่เข้าของค่า ε ในจำนวนรอบการค้นหาสูงสุดเท่ากับ 120 จะเห็นได้ว่าค่า ε มีค่าลดลงในแต่ละรอบการค้นหา ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่าวิธี GA PSO และ ATS สามารถค้นหาค่า a_0 b_3 b_2 b_1 และ b_0 ที่ทำให้ผลตอบสนอง $\omega_{experiment}$ และ ω_{model} มีค่าใกล้เคียงกันได้

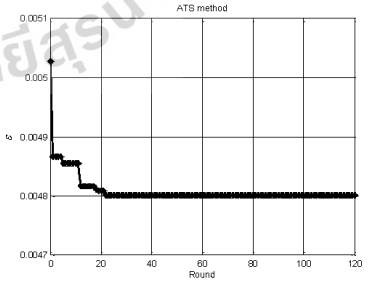
จากตารางที่ 3 จะพบว่า แบบจำลองที่ได้จากทั้ง 3 วิธี สามารถอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้ถูกต้อง โดยค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ε ที่ได้จากวิธี ATS มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวิธี GA และ PSO ตามลำดับ แต่ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาถึงค่าเวลาเฉลี่ยในกระบวนการระบุเอกลักษณ์ วิธี ATS จะใช้เวลาเฉลี่ยในการค้นหามากที่สุดเมื่อเทียบกับวิธี GA และ PSO ตามลำดับ การหาค่าเวลาเฉลี่ยจะอาศัยคำสั่งพื้นฐานในโปรแกรม MATLAB อย่างไรก็ตามคอมพิวเตอร์พกพาที่ใช้ในการระบุเอกลักษณ์สำหรับบทความนี้ใช้ซีพียูประมวลผล Intel Core i7-4500U ความถี่ 1.80 GHz แรมขนาด 8 Gb



รูปที่ 7 การลู่เข้าหาคำตอบ ε ที่เหมาะสมที่สุดของวิธี GA



รูปที่ 8 การลู่เข้าหาคำตอบ ε ที่เหมาะสมที่สุดของวิธี PSO



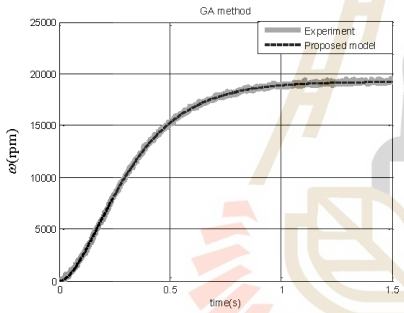
รูปที่ 9 การลู่เข้าหาคำตอบ ε ที่เหมาะสมที่สุดของวิธี ATS

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดและแบบจำลองของมอเตอร์ BLDC ที่ได้จากวิธี GA PSO และ ATS

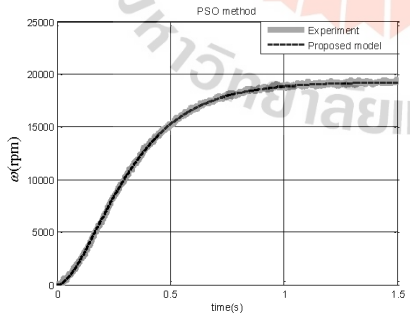
วิธี	ค่าพารามิเตอร์					เวลาเฉลี่ย (วินาที)	ε	แบบจำลอง
	a_0	b_3	b_2	b_1	b_0			
GA	0.2021×10^8	0.0799	30.6347	358.6502	1048.8231	181.1548	0.004851	$\frac{0.2021\times10^8}{0.0799s^3+30.6347s^2+358.6502s+1048.8231}$
PSO	0.2041×10^8	0.0782	30.2992	361.8813	1060.5996	253.6682	0.004974	$\frac{0.2041\times10^8}{0.0782s^3+30.2992s^2+361.8813s+1060.5996}$
ATS	0.2042×10^8	0.0551	30.995	361.4188	1061.2141	920.2222	0.004801	$\frac{0.2042\times10^8}{0.0551\,s^3+30.995s^2+361.4188s+1061.2141}$

5.3 การยืนยันผลการระบุเอกลักษณ์

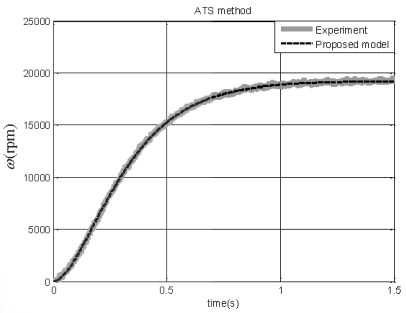
การตรวจสอบความถูกต้องของผลการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองด้วยวิธีการค้นหา GA PSO และ ATS จะอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างผลเฉลยจากแบบจำลองและผลการทดสอบจากมอเตอร์ BLDC ที่ความเร็วรอบ 20000 รอบต่อนาที ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10 ถึง 12



รูปที่ 10 การตรวจสอบความถูกต้องของการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธี GA

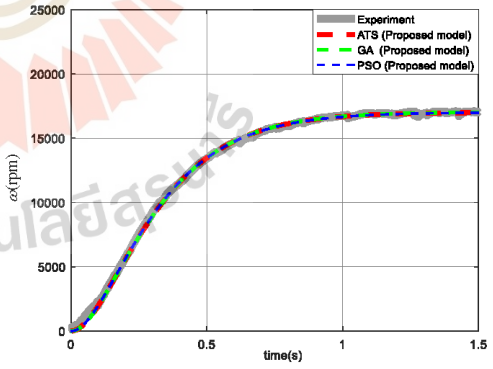


รูปที่ 11 การตรวจสอบความถูกต้องของการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธี PSO



รูปที่ 12 การตรวจสอบความถูกต้องของการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธี ATS

เพื่อยืนยันผลจากการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองที่นำเสนอในบทความนี้ การเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ความเร็วรอบ 17000 รอบต่อนาที แสดงได้ดังรูปที่ 13 ซึ่งความเร็วรอบดังกล่าวไม่ใช่ชุดข้อมูลที่นำมาใช้ในการกระบวนการค้นหา



รูปที่ 13 การตรวจสอบความถูกต้องของการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธี ATS GA และ PSO ที่ความเร็วรอบ 17000 รอบต่อวินาที

พิจารณาจากรูปที่ 10 ถึง 12 จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของความเร็วรอบที่ได้จากแบบจำลองและผลการทดสอบจากมอเตอร์ BLDC มีลักษณะรูปสัญญาณที่สอดคล้องกันทั้งในสภาวะชั่วครู่และสภาวะอยู่ตัว ยิ่งไปกว่านั้นแม้ว่าข้อมูลที่นำมาใช้ในการยืนยันผลการตอบสนองในรูปที่ 13 ไม่ได้เป็นข้อมูลสำหรับการระบุเอกลักษณ์ แต่เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองก็ยังคงมีความถูกต้องทั้งในสภาวะชั่วครู่และสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นแบบจำลองกล่องดำที่นำเสนอในบทความนี้จากกระบวนการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธี GA PSO และ ATS จึงเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้อง

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองของมอเตอร์ BLDC ที่เชื่อมต่อกับชุดขับเคลื่อนด้วยวิธี GA PSO และ ATS ผ่านการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกล่องดำในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสาม ผลการระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองสามารถยืนยันได้จากการเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองและผลการทดสอบจากมอเตอร์ BLDC ในห้องปฏิบัติการ และแบบจำลองที่ได้จากวิธีการทั้ง 3 สามารถนำไปใช้อธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นแบบจำลองที่ได้รับการนำเสนอในบทความนี้จึงเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ BLDC ต่อไปในอนาคต อย่างไรก็ตามการระบุเอกลักษณ์สามารถใช้วิธีการอื่น ๆ ได้เช่นเดียวกัน โดยอาศัยหลักการและแนวทางที่ได้กล่าวไว้ในบทความนี้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (SUT) สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (TSRI) กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (NSRF) และกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงานเครื่องจักรกล และการควบคุม (PEMC) ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย รวมทั้งสถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Patel V.K.S., Pandey A.K. Modeling and simulation of brushless DC motor using PWM control technique. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2013; 3(3): 612–620.

[2] Arun Prasad K.M., Nair U. An intelligent fuzzy sliding mode controller for a BLDC motor. In: *International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications*. 2017. p. 274–278.

[3] Rao A.P.C., Obulesh Y.P., Babu C.S. Mathematical modeling of BLDC motor with closed loop speed control using PID controller under various loading conditions. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2012; 7(10): 1321–1328.

[4] Patel V.K.S., Pandey A.K. 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; 3(4): 1–14.

[5] Mohankrishna C., Pandey A.K. Modelling and simulation of BLDC motor using state space approach. *International Journal of Innovative Research in Electrical, electronics, Instrumentation and Control Engineering*. 2016; 4(5): 533–538.

[6] Poovizhi M., Kumaran M.S., Ragul P., Priyadarshini L.I. Investigation of mathematical modelling of brushless dc motor(BLDC) drives

by using matlab-simulink. In: *International Conference on Power and Embedded Drive Control*. 2017. p. 178–183.

[7] Khluabwannarat P., Nawikavatan A., Puangdownreong D. Application of parallel flower pollination algorithm to fractional-order model identification of BLDC motor. In: *International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*. 2020. p. 131–134.

[8] Kojabadi H.M., Cao Q., Chang L., Ghribi M., Dupuis A. Optimal PI controller gains using a multi-loop multi -objective genetic algorithm in IM drives. In: *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. 2015. p. 470–473.

[9] Achiammal B., Kayalvizhi R. Genetic algorithm based PI controller for negative output elementary LUO converter. In: *IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technologies*. 2015. p. 470–473.

[10] Li X., Chen M., Tsutomu Y. A method of searching PID controller's optimized coefficients for Buck converter using particle swarm optimization. In: *IEEE 10th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. 2013. p. 238–243.

[11] Sahin E., Ayas M.S., Altas I.H. A PSO optimized fractional-order PID controller for a PV system with DC-DC boost converter. In: *16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition*. 2014. p. 477–481.

[12] Chaijarurnudomrung K., Areerak K-N., Areerak K-L., Srikaew A. The controller design of three-phase controlled rectifier using an adaptive tabu search algorithm. In: *8th Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*. 2011. p. 605–608.

[13] Sopapirm T., Areerak K-N., Areerak K-L., Srikaew A. The application of adaptive tabu search algorithm and averaging model to the optimal controller design of buck converters. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2011; 12(5): 1707–1713.

[14] Pakdeeto J., Chanpittayagit R., Areerak K-N., Areerak K-L. The optimal controller design of buck-boost converter by using adaptive tabu search algorithm based on state-space averaging model. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2017; 12(3): 1146–1155.

[15] Puangdownreong D. Fractional order PID controller design for DC motor speed control system via flower pollination algorithm. *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*. 2017; 17(1): 14–23.

[16] Narongrit T., Areerak K-L., Areerak K-N. Design of an active power filter using adaptive tabu search. In: *Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on Artificial Intelligent, Knowledge Engineering and Data Bases*. 2009 p. 314–318.

[17] Narongrit T., Areerak K-L., Areerak K-N. Design of an active power filter using genetic algorithm technique. In: *Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Artificial Intelligent, Knowledge Engineering and Data Bases*. 2010. p. 46–50.

[18] Rojanaworahiran K., Chayakulkheeree K. Real and reactive powers decomposition optimal power flow using particle swarm optimization. In: *International Conference on Power, Energy and Innovation*. 2019. p. 78–81.

[19] Wang L., Zhang X., Zhang X. Antenna array design by artificial bee colony algorithm with similarity induced search method. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2019; 55(6): 7201904.

[20] Soares J., Sousa T., Vale Z.A., Morais H., Faria P. Ant colony search algorithm for the optimal power flow problem. In: *IEEE Power and Energy Society General* Meeting. 2017. p. 1–8.

[21] Puansdownreong D., Areerak K-N., Sujitjorn S., Kulworawanichpong T. Convergence analysis of adaptive tabu search. *ScienceAsia*. 2009; 30(2): 183–190.

[22] Sharapov R.R., Lapshin A.V. Convergence of genetic algorithms. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2006; 16(3): 392–397.

[23] Tian D. A review of convergence analysis of particle swarm optimization. *International Journal of Grid and Distributed Computing*. 2013; 6(6): 117–128.

[24] Chan T.F., Yan L-T., Fang S-Y. In-wheel permanent-magnet brushless DC motor drive for an electric bicycle. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2002; 17(2): 229–233.

[25] Kahveci H., Okumus H.I., Ekici M. Improved brushless DC motor speed controller with digital signal processor. *IET Journals & Magazines*. 2014; 50(12): 864–866.

[26] Carlos Gamazo Real J., Jaime Gomez G. Position and speed in brushless DC motors using the derivative of terminal phase voltages technique with a simple and versatile motor driver implementation. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2015; 10(4): 1540–1551.

[27] Puansdownreong D., Areerak K-N., Srikaew A., Sujitjorn S., Totarong P. System identification via adaptive tabu search. In: *IEEE International Conference on Industrial Technology*. 2002. p. 915–920.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นางสาวศรุตา หวานสูงเนิน เกิดเมื่อวันที่ 19 พฤศจิกายน พ.ศ. 2540 ศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนอัสสัมชัญนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา ชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสุรนารีวิทยา จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2562 และได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ในปี พ.ศ. 2563 ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขณะศึกษาต่อระดับปริญญาโทได้ทำหน้าที่เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และมีผลงานด้านวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 2 บทความ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี