ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
250345

SUT7-711-54-12-48

รายงานการวิจัย

การประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

(Energy Saving for Separately Excited DC Motor Drives)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

b0285301

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
250345

SUT7-71

รายงานการวิจัย

การประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

(Energy Saving for Separately Excited DC Motor Drives)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กองพล อารีรักษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นักวิจัย

อาจารย์ ดร.ธิดารัตน์ อารีรักษ์

สาขาวิชาคณิตศาสตร์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

เมษายน 2555

บทคัดย่อ

250345

การประหยัดพลังงานเป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึงต่อภาคอุตสาหกรรมเป็นอย่างยิ่งโดยเฉพาะงานทางด้านการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เนื่องจากมอเตอร์ดังกล่าวมีใช้กันอย่างกว้างขวาง พบได้โดยทั่วไปโดยเฉพาะในงานอุตสาหกรรมลากจูง เช่น รถไฟฟ้า เป็นต้น วิธีประหยัดพลังงานไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นในงานวิจัยนี้อาศัยการคำนวณหาค่ากระแสสนามที่เหมาะสมที่ก่อให้เกิดกำลังงานสูญเสียในมอเตอร์น้อยที่สุด ซึ่งการคำนวณดังกล่าวจำเป็นต้องใช้สมการพื้นฐานประกอบกับสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสมการกำลังงานสูญเสียหาได้จากการค้นหาโดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ คือ วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ระบบขับเคลื่อนในงานวิจัยประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่ต่อพ่วงกับวงจรแปลงผันแบบบัคก์ ตัวควบคุมกระแสสนามและตัวควบคุมความเร็วรอบใช้ตัวควบคุมแบบฐานกฎ การทดสอบการประหยัดพลังงาน มีการทดสอบกับระบบจริงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลการทดสอบพบว่า การควบคุมมอเตอร์ตามหลักการของงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถประหยัดพลังงานได้สูงสุด 48.61 เปอร์เซ็นต์ ในสภาวะโหลด 13 เปอร์เซ็นต์ของพิกัด และเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานจะลดลงเมื่อโหลดมีค่าเพิ่มขึ้น

Abstract

250345

Energy saving is a considered issue for industrial sectors, particularly in the electric motor drive. The study of energy saving for separately excited dc motor is the aim of the research. This motor is widely used and found especially in towing industry. In the research, the field current calculation is used to achieve the motor operation at the minimum power losses. The basic equations and power losses equation of motor are used to calculate the field current for energy saving operation. The adaptive tabu search is applied to search the parameters of power loss equation. A single-phase bridge rectifier connected with buck converter is a driving system in this research. The rule-based controller is used as the field current controller and speed controller. The results from the implementation in laboratory can confirm that the maximum percentage of energy saving is equal to 48.61% at 13% of rated load and the percentage of energy saving is decreased when the load is increased.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย เรื่อง การประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทั้งนี้ต้องขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณนางสาวศศิยา อุดมสุข ที่เป็นผู้ช่วยวิจัย และดำเนินการสร้างชุดทดสอบสำหรับการประหยัดพลังงาน ด้วยความทุ่มเท และการเอาใจใส่อย่างยิ่ง

กองพล อารีรักษ์

เมษายน 2555

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข

กิตติกรรมประกาศ ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญตาราง ..... ช

สารบัญรูป ..... ญ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น 2

1.4 ขอบเขตของการวิจัย 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์ 3

2 ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น 5

2.1 บทนำ 5

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 5

2.2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์ 5

2.2.2 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้ในงานวิจัย 9

2.3 กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น 10

2.3.1 กำลังงานสูญเสียเนื่องจากขดลวด 10

2.3.2 กำลังงานสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านอากาศ 10

2.3.3 กำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก 11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.4 กำลังงานสูญเสียจากแปรงถ่าน 13
2.3.5 กำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน 13
2.4 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น 14
2.4.1 การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์โดยการควบคุมกระแสสนาม 15
2.4.2 การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยการควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์ 15
2.5 สรุป 17
3 การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสีย 18
3.1 บทนำ 18
3.2 หลักการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 18
3.3 การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ 21
3.3.1 การทดสอบมอเตอร์สำหรับการระบุเอกลักษณ์ 22
3.3.2 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสีย 23
3.3.3 การทดสอบพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 29
3.3.4 การตรวจสอบผลการค้นหา 35
3.4 สรุป 36
4 การประหยัดพลังงานการขับเคลื่อนที่ใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ 37
4.1 บทนำ 37
4.2 การใช้วิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับประหยัดพลังงาน 37
4.3 ผลการคำนวณการประหยัดพลังงานที่ใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ 40
4.4 สรุป 42
5 การประหยัดพลังงานการขับเคลื่อนที่ใช้วิธีฐานแบบจำลอง 43
5.1 บทนำ 43
5.2 การใช้วิธีฐานแบบจำลองสำหรับประหยัดพลังงาน 43
5.2.1 การหาจุดการทำงานสำหรับประหยัดพลังงาน 43
5.2.2 การคำนวณกำลังงานอินพุต 56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.3 การหาสมการแทนความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนาม 50
5.2.4 การประมาณค่าในกรณีอยู่นอกจุดทดสอบ 58
5.3 ผลการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงาน 62
5.2.1 ผลการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานกรณีจุดทดสอบ 63
5.2.2 ผลการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานกรณีจุดทดสอบนอกช่วง 63
5.4 สรุป 76
6 โครงสร้างฮาร์ดแวร์สำหรับการขับเคลื่อนเพื่อประหยัดพลังงาน 77
6.1 บทนำ 77
6.2 บอร์ด dsPIC30F2010 77
6.2.1 คุณสมบัติของ dsPIC30F2010 79
6.2.2 คุณสมบัติด้านการประมวลผล 79
6.2.2 คุณสมบัติของ Peripheral I/O 79
6.3 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ 80
6.3.1 หลักการทำงานของวงจร 80
6.3.2 การออกแบบ 82
6.3.3 ผลการทดสอบวงจร 85
6.4 วงจรแปลงผันแบบบัคก์ 85
6.4.1 หลักการทำงานของวงจร 86
6.4.2 การออกแบบ 89
6.4.3 ผลการทดสอบวงจร 92
6.5 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์สำหรับงานวิจัย 95
6.5.1 ผลการทดสอบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ 95
6.6 สรุป 98
7 ตัวควบคุมแบบฐานกฎสำหรับการประหยัดพลังงาน 99
7.1 บทนำ 99

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบฐานกฎ 99
7.2.1 โหมดการทำงานที่ 1 การควบคุมกระแสสนามของมอเตอร์ 100
7.2.2 โหมดการทำงานที่ 2 การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ 102
7.3 การสร้างตัวควบคุมแบบฐานกฎด้วยบอร์ด dsPIC30F2010 103
7.4 สรุป 108
8 ผลการทดสอบการประหยัดพลังงาน 109
8.1 บทนำ 109
8.2 การทดสอบและผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ 109
8.3 สรุป 119
9 สรุปและข้อเสนอแนะ 120
9.1 สรุป 120
9.2 ข้อเสนอแนะ 121
รายการอ้างอิง 122
ภาคผนวก ก. บทความที่รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 124
ภาคผนวก ข. รายละเอียดข้อมูลต่าง ๆ ของอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับ
วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์และวงจรแปลงผันแบบบัคก์ 126
ประวัติผู้เขียน 144

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ผลการคำนวณกำลังงานอินพุตที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยวิธีดั้งเดิม....16
3.1 ผลการทดสอบมอเตอร์....23
3.2 ผลการกำหนดขอบเขตการค้นหา กรณีที่ 1 ถึงกรณีที่ 4....26
3.3 การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น....29
3.4 การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง....31
3.5 การทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น....32
3.6 การทดสอบค่าปรับลดรัศมี....33
3.7 ผลจากการทดสอบจำนวน 1000 รอบ/ครั้ง....35
3.8 ผลการทดสอบความถูกต้องของคำตอบจากการระบุเอกลักษณ์....36
4.1 ผลการคำนวณเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน ระหว่างวิธีดั้งเดิมกับวิธีทางคณิตศาสตร์....41
5.1 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 0.6 $N \cdot m$....44
5.2 จุดที่เกิดการประหยัดพลังงานในแต่ละความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์....47
5.3 ผลจากการคำนวณด้วยสมการของทั้ง 3 วิธี....57
5.4 ผลจากการคำนวณด้วยสมการทั้ง 3 วิธี ในกรณีจุดทดสอบนอกช่วง....59
5.5 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นกรณีจุดทดสอบ....64
5.6 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน ด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสองกรณีจุดทดสอบ....66
5.7 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน ด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสามกรณีจุดทดสอบ....68
5.8 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น กรณีจุดทดสอบนอกช่วง....70

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

5.9 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
ด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสอง กรณีจุดทดสอบนอกช่วง....72
5.10 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
ด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสาม กรณีจุดทดสอบนอกช่วง....74
6.1 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์....92
6.2 ผลทดสอบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กรณีที่ 1....96
6.3 ผลทดสอบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กรณีที่ 2....96
7.1 การทดสอบกฎ....100
8.1 ข้อมูลทางพลังงานในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
ชนิดแยกกระตุ้นวิธีฐานแบบจำลอง....111
8.2 ข้อมูลทางพลังงานในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
ชนิดแยกกระตุ้นแบบวิธีดั้งเดิม....113
8.3 ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน....115

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น 6
2.2 แผนภาพหลักการควบคุมความเร็วด้วยวิธีดั้งเดิม 15
3.1 สุ่มค่า S_0 ในพื้นที่การค้นหา 19
3.2 ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ S_0 19
3.3 กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่ 20
3.4 กำหนดค่า S_0 ใหม่ 20
3.5 กลไกการเดินย้อนรอย 21
3.6 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น 22
3.7 ภาพถ่ายการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น 22
3.8 แผนภาพการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียด้วยวิธี ATS 24
3.9 การลู่เข้าหาคำตอบ W ของขอบเขตการค้นหากรณีที่ 1 27
3.10 การลู่เข้าหาคำตอบ W ของขอบเขตการค้นหากรณีที่ 2 27
3.11 การลู่เข้าหาคำตอบ W ของขอบเขตการค้นหากรณีที่ 3 28
3.12 การลู่เข้าหาคำตอบ W ของขอบเขตการค้นหากรณีที่ 4 28
3.13 การลู่เข้าหาคำตอบ W ของขอบเขตการค้นหา 29
5.1 กราฟจุดต่ำสุดของกำลังงานสูญเสีย
เมื่อแรงบิดโหลด 0.6 $N \cdot m$ ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ 46
5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนาม 51
5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนาม
ที่ประมาณค่าจากวิธีการถดถอยเชิงเส้น 53
5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนาม
ที่ประมาณค่าจากวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสอง 54
5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนาม
ที่ประมาณค่าจากวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสาม 56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.6 ตัวอย่างการประมาณค่าแบบเชิงเส้น....58
5.7 กราฟเปรียบเทียบระหว่างจุดทดสอบและจุดทดสอบนอกช่วง จากสมการการถดถอยเชิงเส้น....61
5.8 กราฟเปรียบเทียบระหว่างจุดทดสอบและจุดทดสอบนอกช่วง จากสมการการถดถอยกำลังสอง....61
5.9 กราฟเปรียบเทียบระหว่างจุดทดสอบและจุดทดสอบนอกช่วง จากสมการการถดถอยกำลังสาม....62
6.1 โครงสร้างบอร์ด ET – dsPIC30F2010 TRAINING KIT V1.0/EXP....78
6.2 การจัดเรียงขาสัญญาณของ dsPIC30F2010....80
6.3 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์....80
6.4 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์....81
6.5 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่ใช้ในงานวิจัย....82
6.6 รูปสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ ในขณะที่ไม่ต่อตัวเก็บประจุ....83
6.7 รูปสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ ในขณะที่ต่อตัวเก็บประจุ....83
6.8 รูปสัญญาณแรงดันพลิ้วของแรงดันเอาต์พุต....84
6.9 ภาพการต่อวงจรสำหรับการทดสอบวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์....85
6.10 วงจรแปลงผันแบบบัคก์....86
6.11 โหมดการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคก์....87
6.12 รูปสัญญาณอธิบายหลักการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคก์....88
6.13 แผ่นป้ายชื่อของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น....89
6.14 วงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่ใช้ในการทดสอบ....90
6.15 การต่อวงจรสำหรับการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์....92
6.16 รูปสัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคก์....95
6.17 แผนภาพวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น....97

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

7.1 แผนภาพการทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีตัวควบคุมแบบฐานกฎ 107
8.1 แผนภาพวงจรทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
ชนิดแยกกระตุ้นสำหรับประหยัดพลังงาน.....110
8.2 กราฟเปรียบเทียบกำลังงานสูญเสียระหว่างวิธีฐานแบบจำลองสำหรับประหยัดพลังงาน
และวิธีดั้งเดิมในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์.....119