

การประหยัดพลังงานสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
ชนิดแยกกระตุ้น

นางสาวศศิยา อุดมสุข



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2554

**ENERGY SAVING FOR SEPARATELY EXCITED
DC MOTOR DRIVE**

Sasiya Udomsuk



**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 2011**

การประหยัดพลังงานสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ทองพล อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

กรรมการ

(ผศ. ดร.ทองพัน อารีรักษ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศศิยา อุดมสุข : การประหยัดพลังงานสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยก
กระตุ้น (ENERGY SAVING FOR SEPARATELY EXCITED DC MOTOR DRIVE)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กองพล อารีรักษ์, 223 หน้า.

การประหยัดพลังงานเป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึงต่อภาคอุตสาหกรรมเป็นอย่างยิ่งโดยเฉพาะงาน
ทางด้านการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นการศึกษาการประหยัด
พลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เนื่องจากมอเตอร์ดังกล่าวมีใช้กันอย่าง
กว้างขวาง พบได้โดยทั่วไปโดยเฉพาะในงานอุตสาหกรรมลากจูง เช่น รถไฟฟ้า เป็นต้น วิธี
ประหยัดพลังงานไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นในงานวิจัย
วิทยานิพนธ์นี้อาศัยการคำนวณหาค่ากระแสสนามที่เหมาะสมที่ก่อให้เกิดกำลังงานสูญเสียใน
มอเตอร์น้อยที่สุด ซึ่งการคำนวณดังกล่าวจำเป็นต้องใช้สมการพื้นฐานประกอบกับสมการกำลังงาน
สูญเสียของมอเตอร์ โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสมการกำลังงานสูญเสียหาได้จากการค้นหาโดย
ใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ คือ วิธีการค้นหาแบบดาวยุติเชิงปรับตัว ระบบขับเคลื่อนในงานวิจัย
วิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่ต่อพ่วงกับวงจรแปลงผัน
แบบบัค ตัวควบคุมกระแสสนามและตัวควบคุมความเร็วรอบใช้ตัวควบคุมแบบฐานกฎ การ
ทดสอบการประหยัดพลังงาน มีการทดสอบกับระบบจริงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลการทดสอบ
พบว่า การควบคุมมอเตอร์ตามหลักการของงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถประหยัดพลังงานได้
สูงสุด 48.61 เปอร์เซ็นต์ ในสภาวะโหลด 13 เปอร์เซ็นต์ของฟลักซ์ และเปอร์เซ็นต์การประหยัด
พลังงานจะลดลงเมื่อโหลดมีค่าเพิ่มขึ้น

SASIYA UDOMSUK : ENERGY SAVING FOR SEPARATELY EXCITED DC
MOTOR DRIVE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. KONGPOL AREERAK,
Ph.D., 223 PP.

POWER LOSS MINIMIZATION/ SEPARATELY EXCITED DC MOTOR/
ADAPTIVE TABU SEARCH

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 thesis. This motor is widely used and found especially in towing industry. In the thesis, 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 thesis. 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.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2011

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กองพล อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยังต้องงานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กองพันธ์ อารีรักษ์ และอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงาน

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

ศศิยา อุดมสุข

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฐ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 การจัดรูปแบบรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	3
2 ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	4
2.2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์	4
2.2.2 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้ในงานวิจัย	8
2.3 กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น	9
2.3.1 กำลังงานสูญเสียเนื่องจากขดลวด	9
2.3.2 กำลังงานสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านอากาศ	9
2.3.3 กำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก	10
2.3.4 กำลังงานสูญเสียจากแปรงถ่าน	12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.5	กำลังงานสูญเสียจากการใช้งาน	12
2.4	การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น	13
2.4.1	การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์โดยการควบคุมกระแสสนาม	14
2.4.2	การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยการควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์	14
2.5	สรุป	16
3	การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสีย.....	17
3.1	บทนำ.....	17
3.2	หลักการทํางานของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว.....	17
3.3	การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์	20
3.3.1	การทดสอบมอเตอร์สำหรับการระบุเอกลักษณ์	21
3.3.2	การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสีย.....	23
3.3.3	การทดสอบพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว.....	28
3.3.4	การตรวจสอบผลการค้นหา.....	34
3.4	สรุป.....	35
4	การประหยัดพลังงานการขับเคลื่อนที่ใช้วิธีฐานแบบจำลอง	36
4.1	บทนำ.....	36
4.2	การใช้วิธีฐานแบบจำลองสำหรับประหยัดพลังงาน.....	36
4.2.1	การหาจุดการทำงานสำหรับประหยัดพลังงาน.....	36
4.2.2	การคำนวณกำลังงานอินพุต	39
4.2.3	การหาสมการแทนความสัมพันธ์ ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนาม.....	43
4.2.4	การประมาณค่าในกรณีอยู่นอกจุดทดสอบ	51
4.3	ผลการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงาน	56
4.3.1	ผลการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานกรณีจุดทดสอบ.....	56
4.3.2	ผลการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานกรณีจุดทดสอบนอกช่วง	56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4	สรุป.....	69
5	โครงสร้างฮาร์ดแวร์สำหรับการขับเคลื่อนเพื่อประหยัดพลังงาน.....	70
5.1	บทนำ.....	70
5.2	บอร์ด dsPIC30F2010	70
5.2.1	คุณสมบัติของ dsPIC30F2010	72
5.2.2	คุณสมบัติด้านการประมวลผล	72
5.2.3	คุณสมบัติของ Peripheral I/O.....	72
5.3	วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์	73
5.3.1	หลักการทำงานของวงจร	74
5.3.2	การออกแบบ	75
5.3.3	ผลการทดสอบวงจร	78
5.4	วงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	79
5.4.1	หลักการทำงานของวงจร	79
5.4.2	การออกแบบ	83
5.4.3	ผลการทดสอบวงจร	85
5.5	วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์	89
5.5.1	ผลการทดสอบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์	89
5.6	สรุป.....	92
6	ตัวควบคุมแบบฐานกฎสำหรับการประหยัดพลังงาน	93
6.1	บทนำ.....	93
6.2	การออกแบบตัวควบคุมแบบฐานกฎ	93
6.2.1	โหมดการทำงานที่ 1 การควบคุมกระแสสนามของมอเตอร์	94
6.2.2	โหมดการทำงานที่ 2 การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์	96
6.3	การสร้างตัวควบคุมแบบฐานกฎด้วยบอร์ด dsPIC30F2010	97
6.4	สรุป	102

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7 ผลการทดสอบการประหยัดพลังงาน	103
7.1 บทนำ.....	103
7.2 การทดสอบและผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์	103
7.3 สรุป.....	114
8 สรุปและข้อเสนอแนะ	115
8.1 สรุป	115
8.2 ข้อเสนอแนะ	116
รายการอ้างอิง.....	117
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	119
ภาคผนวก ข. ข้อมูลการคำนวณหาจุดการทำงานสำหรับประหยัดพลังงาน.....	121
ภาคผนวก ค. รายละเอียดข้อมูลต่าง ๆ ของอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับ วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์และวงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	180
ภาคผนวก ง. โปรแกรมควบคุมการทำงานของทั้งระบบ	198
ประวัติผู้เขียน	223

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ผลการคำนวณกำลังงานอินพุตที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยวิธีดั้งเดิม 15
3.1	ผลการทดสอบมอเตอร์..... 22
3.2	ผลการกำหนดขอบเขตการค้นหา กรณีที่ 1 ถึงกรณีที่ 4.....25
3.3	การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น 28
3.4	การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง..... 30
3.5	การทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น 31
3.6	การทดสอบค่าปรับลดรัศมี..... 32
3.7	ผลจากการทดสอบจำนวน 1000 รอบ/ครั้ง..... 34
3.8	ผลการทดสอบความถูกต้องของคำตอบจากการระบุเอกลักษณ์..... 35
4.1	ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 0.6 N · m 37
4.2	จุดที่เกิดการประหยัพลังงานในแต่ละความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ 40
4.3	ผลจากการคำนวณด้วยสมการของทั้ง 3 วิธี..... 50
4.4	ผลจากการคำนวณด้วยสมการทั้ง 3 วิธี ในกรณีจุดทดสอบนอกช่วง..... 53
4.5	การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัพลังงาน ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นกรณีจุดทดสอบ 57
4.6	การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัพลังงาน ด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสองกรณีจุดทดสอบ 59
4.7	การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัพลังงาน ด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสามกรณีจุดทดสอบ 61
4.8	การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัพลังงาน ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น กรณีจุดทดสอบนอกช่วง 63
4.9	การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัพลังงาน ด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสอง กรณีจุดทดสอบนอกช่วง 65

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน ด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสาม กรณีจุดทดสอบนอกช่วง	67
5.1 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์	86
5.2 ผลทดสอบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กรณีที่ 1	90
5.3 ผลทดสอบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กรณีที่ 2	90
6.1 การทดสอบกฎ	94
7.1 ข้อมูลทางพลังงานในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดแยกกระตุ้นวิธีฐานแบบจำลอง	105
7.2 ข้อมูลทางพลังงานในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดแยกกระตุ้นแบบวิธีดั้งเดิม	107
7.3 ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน	109
7.4 ผลการทดสอบตัวควบคุมแบบฐานกฎ ในกรณีที่มีมอเตอร์ไม่มีการจับโหลด	110
ข.1 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 0.2 N · m	122
ข.2 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 750 rpm และแรงบิด 0.2 N · m	122
ข.3 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1000 rpm และแรงบิด 0.2 N · m	123
ข.4 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1250 rpm และแรงบิด 0.2 N · m	124
ข.5 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1500 rpm และแรงบิด 0.2 N · m	125
ข.6 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1750 rpm และแรงบิด 0.2 N · m	126
ข.7 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2000 rpm และแรงบิด 0.2 N · m	127
ข.8 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2250 rpm และแรงบิด 0.2 N · m	128
ข.9 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2500 rpm และแรงบิด 0.2 N · m	129
ข.10 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2750 rpm และแรงบิด 0.2 N · m	130
ข.11 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 3000 rpm และแรงบิด 0.2 N · m	131
ข.12 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 0.4 N · m	132
ข.13 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 750 rpm และแรงบิด 0.4 N · m	133
ข.14 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1000 rpm และแรงบิด 0.4 N · m	134

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.15 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1250 rpm และแรงบิด 0.4 N · m	135
ข.16 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1500 rpm และแรงบิด 0.4 N · m	136
ข.17 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1750 rpm และแรงบิด 0.4 N · m	137
ข.18 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2000 rpm และแรงบิด 0.4 N · m	138
ข.19 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2250 rpm และแรงบิด 0.4 N · m	139
ข.20 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2500 rpm และแรงบิด 0.4 N · m	140
ข.21 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2750 rpm และแรงบิด 0.4 N · m	141
ข.22 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 3000 rpm และแรงบิด 0.4 N · m	142
ข.23 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 0.6 N · m	143
ข.24 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 750 rpm และแรงบิด 0.6 N · m	144
ข.25 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1000 rpm และแรงบิด 0.6 N · m	145
ข.26 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1250 rpm และแรงบิด 0.6 N · m	146
ข.27 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1500 rpm และแรงบิด 0.6 N · m	147
ข.28 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1750 rpm และแรงบิด 0.6 N · m	147
ข.29 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2000 rpm และแรงบิด 0.6 N · m	148
ข.30 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2250 rpm และแรงบิด 0.6 N · m	149
ข.31 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2500 rpm และแรงบิด 0.6 N · m	150
ข.32 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2750 rpm และแรงบิด 0.6 N · m	151
ข.33 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 3000 rpm และแรงบิด 0.6 N · m	152
ข.34 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 0.8 N · m	153
ข.35 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 750 rpm และแรงบิด 0.8 N · m	154
ข.36 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1000 rpm และแรงบิด 0.8 N · m	155
ข.37 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1250 rpm และแรงบิด 0.8 N · m	155
ข.38 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1500 rpm และแรงบิด 0.8 N · m	156
ข.39 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1750 rpm และแรงบิด 0.8 N · m	157
ข.40 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2000 rpm และแรงบิด 0.8 N · m	158

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.41 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2250 rpm และแรงบิด 0.8 N · m	158
ข.42 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2500 rpm และแรงบิด 0.8 N · m	159
ข.43 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2750 rpm และแรงบิด 0.8 N · m	160
ข.44 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 3000 rpm และแรงบิด 0.8 N · m	160
ข.45 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 1.0 N · m	162
ข.46 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 750 rpm และแรงบิด 1.0 N · m	162
ข.47 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1000 rpm และแรงบิด 1.0 N · m	163
ข.48 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1250 rpm และแรงบิด 1.0 N · m	163
ข.49 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1500 rpm และแรงบิด 1.0 N · m	164
ข.50 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1750 rpm และแรงบิด 1.0 N · m	165
ข.51 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2000 rpm และแรงบิด 1.0 N · m	165
ข.52 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2250 rpm และแรงบิด 1.0 N · m	166
ข.53 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2500 rpm และแรงบิด 1.0 N · m	166
ข.54 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2750 rpm และแรงบิด 1.0 N · m	167
ข.55 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 3000 rpm และแรงบิด 1.0 N · m	168
ข.56 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 1.2 N · m	168
ข.57 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 750 rpm และแรงบิด 1.2 N · m	169
ข.58 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1000 rpm และแรงบิด 1.2 N · m	169
ข.59 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1250 rpm และแรงบิด 1.2 N · m	170
ข.60 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1500 rpm และแรงบิด 1.2 N · m	170
ข.61 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1750 rpm และแรงบิด 1.2 N · m	171
ข.62 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2000 rpm และแรงบิด 1.2 N · m	171
ข.63 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2250 rpm และแรงบิด 1.2 N · m	171
ข.64 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2500 rpm และแรงบิด 1.2 N · m	172
ข.65 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2750 rpm และแรงบิด 1.2 N · m	172
ข.66 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 3000 rpm และแรงบิด 1.2 N · m	173

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.67 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 1.4 N · m	173
ข.68 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 750 rpm และแรงบิด 1.4 N · m	174
ข.69 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1000 rpm และแรงบิด 1.4 N · m	174
ข.70 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1250 rpm และแรงบิด 1.4 N · m	174
ข.71 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1500 rpm และแรงบิด 1.4 N · m	174
ข.72 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1750 rpm และแรงบิด 1.4 N · m	175
ข.73 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2000 rpm และแรงบิด 1.4 N · m	175
ข.74 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2250 rpm และแรงบิด 1.4 N · m	175
ข.75 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2500 rpm และแรงบิด 1.4 N · m	176
ข.76 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2750 rpm และแรงบิด 1.4 N · m	176
ข.77 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 1.5 N · m	177
ข.78 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 750 rpm และแรงบิด 1.5 N · m	177
ข.79 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1000 rpm และแรงบิด 1.5 N · m	177
ข.80 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1250 rpm และแรงบิด 1.5 N · m	177
ข.81 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1500 rpm และแรงบิด 1.5 N · m	177
ข.82 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1750 rpm และแรงบิด 1.5 N · m	178
ข.83 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2000 rpm และแรงบิด 1.5 N · m	178
ข.84 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2250 rpm และแรงบิด 1.5 N · m	178
ข.85 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2500 rpm และแรงบิด 1.5 N · m	178

สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

2.1	วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น.....	5
2.2	แผนภาพหลักการควบคุมความเร็วด้วยวิธีดั้งเดิม	14
3.1	สูตรค่า S_o ในพื้นที่การค้นหา.....	18
3.2	ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ S_o	18
3.3	กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่.....	19
3.4	กำหนดค่า S_o ใหม่.....	19
3.5	กลไกการเดินย้อนรอย.....	20
3.6	การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น.....	21
3.7	ภาพถ่ายการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น	22
3.8	แผนภาพการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียด้วยวิธี ATS.....	23
3.9	การรู้เข้าหาคำตอบ W ของขอบเขตการค้นหากรณีที่ 1.....	26
3.10	การรู้เข้าหาคำตอบ W ของขอบเขตการค้นหากรณีที่ 2	26
3.11	การรู้เข้าหาคำตอบ W ของขอบเขตการค้นหากรณีที่ 3.....	27
3.12	การรู้เข้าหาคำตอบ W ของขอบเขตการค้นหากรณีที่ 4	27
3.13	การรู้เข้าหาคำตอบ W ของขอบเขตการค้นหา.....	28
4.1	กราฟจุดต่ำสุดของกำลังงานสูญเสีย เมื่อแรงบิดโหลด 0.6 N·m ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ	39
4.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนาม	44
4.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนาม ที่ประมาณค่าจากวิธีการถดถอยเชิงเส้น	46
4.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนาม ที่ประมาณค่าจากวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสอง	48
4.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนาม ที่ประมาณค่าจากวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสาม.....	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ตัวอย่างการประมาณค่าแบบเชิงเส้น	52
4.7 กราฟเปรียบเทียบระหว่างจุดทดสอบและจุดทดสอบนอกช่วง จากสมการการถดถอยเชิงเส้น	54
4.8 กราฟเปรียบเทียบระหว่างจุดทดสอบและจุดทดสอบนอกช่วง จากสมการการถดถอยของพหุนามกำลังสอง	55
4.9 กราฟเปรียบเทียบระหว่างจุดทดสอบและจุดทดสอบนอกช่วง จากสมการการถดถอยของพหุนามกำลังสาม	55
5.1 โครงสร้างบอร์ด ET – dsPIC30F2010 TRAINING KIT V1.0/EXP	71
5.2 การจัดเรียงขาสัญญาณของ dsPIC30F2010.....	73
5.3 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์	73
5.4 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์	74
5.5 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	75
5.6 รูปสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ ในขณะที่ไม่ต่อตัวเก็บประจุ.....	76
5.7 รูปสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ ในขณะที่ยังต่อตัวเก็บประจุ	77
5.8 รูปสัญญาณแรงดันฟลักซ์ของแรงดันเอาต์พุต.....	77
5.9 ภาพการต่อวงจรสำหรับการทดสอบวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์.....	79
5.10 วงจรแปลงผันแบบบัคค์	79
5.11 โหมดการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	81
5.12 รูปสัญญาณอธิบายหลักการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	82
5.13 แผ่นป้ายชื่อของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น	83
5.14 วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ใช้ในการทดสอบ	84
5.15 การต่อวงจรสำหรับการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	86
5.16 รูปสัญญาณแรงดันทางคานเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์	89
5.17 แผนภาพวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น	91

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.1	แผนภาพการทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีตัวควบคุมแบบฐานกฎ..... 101
7.1	แผนภาพวงจรทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดแยกกระตุ้นสำหรับประหยัดพลังงาน 104
7.2	กราฟเปรียบเทียบกำลังงานสูญเสียระหว่างวิธีฐานแบบจำลองสำหรับประหยัดพลังงาน และวิธีดั้งเดิมในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ 113
ข.1	กราฟจุดต่ำสุดของกำลังงานสูญเสียเมื่อ แรงบิดโหลด 0.2 N · m ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ 132
ข.2	กราฟจุดต่ำสุดของกำลังงานสูญเสียเมื่อ แรงบิดโหลด 0.4 N · m ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ 143
ข.3	กราฟจุดต่ำสุดของกำลังงานสูญเสียเมื่อ แรงบิดโหลด 0.6 N · m ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ 153
ข.4	กราฟจุดต่ำสุดของกำลังงานสูญเสียเมื่อ แรงบิดโหลด 0.8 N · m ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ 161
ข.5	กราฟจุดต่ำสุดของกำลังงานสูญเสียเมื่อ แรงบิดโหลด 1.0 N · m ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ 168
ข.6	กราฟจุดต่ำสุดของกำลังงานสูญเสียเมื่อ แรงบิดโหลด 1.2 N · m ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ 173
ข.7	กราฟจุดต่ำสุดของกำลังงานสูญเสียเมื่อ แรงบิดโหลด 1.4 N · m ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ 176
ข.8	กราฟจุดต่ำสุดของกำลังงานสูญเสียเมื่อ แรงบิดโหลด 1.5 N · m ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ 179

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการประหยัดพลังงานไฟฟ้าเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับภาคอุตสาหกรรม โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้มุ่งเน้นไปที่การประหยัดพลังงานไฟฟ้าสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น การใช้งานมอเตอร์ดังกล่าว พบได้โดยทั่วไปในงานอุตสาหกรรมของ โรงงานทอผ้า โรงงานเส้นใยโพลีเอสเตอร์ โรงงานถลุงโลหะหรือเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อน รถไฟฟ้า เป็นต้น และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงยังเป็นเครื่องจักรกลที่สำคัญในระบบควบคุมเกือบ ทุกชนิดในปัจจุบันซึ่งพบเห็นได้ตั้งแต่การใช้ในเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน การใช้ในรถยนต์ การใช้ ในเครื่องคอมพิวเตอร์ การใช้ในหุ่นยนต์ (Chapman, 1999) ตลอดจนเครื่องจักรกลที่ทำงานแบบ อัตโนมัติ เช่น เครื่องจักรรีด เป็นต้น (Pothiya, Chaposri, Kamsawang and Kinare, 2003) มอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงดังกล่าวเป็นที่นิยมในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว และแรงบิด ที่สามารถเปลี่ยนแปลงไปตามการใช้งานได้เกือบทุกรูปแบบ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึง สนใจที่จะศึกษาและพัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ให้ใช้งานได้ ตามวัตถุประสงค์พร้อมทั้งคำนึงถึงการประหยัดพลังงานด้วยเช่นกัน ซึ่งในอดีตได้มีผู้คิดค้นวิธี ประหยัดพลังงาน คือ ทำการควบคุมกระแสสนามเพื่อให้ได้กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การใช้ตัวควบคุมเพื่อคำนวณค่ากระแสสนาม โดยใช้แบบจำลองแม่เหล็ก (Kusko and Galler, 1983) และการใช้ตัวควบคุมที่สามารถวัดกำลังงานในการขับเคลื่อนและค้นหา ค่ากระแสสนามที่เหมาะสม (Magaris, Goutas, Doulgeri and Paschli, 1991) เป็นต้น แต่เนื่องจากวิธี ที่กล่าวมานั้นต้องพึ่งพาสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อน ด้วยเหตุนี้งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึง มุ่งเน้นพัฒนาวิธีการประหยัดพลังงานโดยอาศัยการวิเคราะห์จากวงจรสมมูลอย่างง่ายของมอเตอร์ เพื่อประมาณค่ากำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ให้มีค่าน้อย ซึ่งเมื่อกำลังงานสูญเสียมีค่าน้อย จะส่งผลต่อการประหยัดพลังงาน คือ ที่ความเร็วและแรงบิดค่าหนึ่ง ระบบขับเคลื่อนที่พัฒนาขึ้นจะ จ่ายกำลังงานอินพุตให้น้อยกว่าระบบขับเคลื่อนปกติ ในขณะที่กำลังงานเอาต์พุตเท่าเดิม ดังนั้นเมื่อ กำลังงานอินพุตลดลง การใช้พลังงานสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์จะมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้มีการหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้า

กระแสดรงชนิดแยกกระตุ้น โดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ คือ วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (Adaptive Tabu search : ATS)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อค้นหาพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดรงชนิดแยกกระตุ้น โดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

1.2.2 เพื่อพัฒนาวิธีการประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดรงชนิดแยกกระตุ้น

1.2.3 ได้ต้นแบบชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดรงชนิดแยกกระตุ้นแบบประหยัดพลังงาน

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดรงชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีขนาด 0.5 แรงม้า

1.3.2 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดรงชนิดแยกกระตุ้นจะใช้วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ต่อกับวงจรแปลงผันแบบบัลค์ทั้งทางด้านวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรสนาม

1.3.3 การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดรงชนิดแยกกระตุ้น อาศัยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์เพื่อประหยัดพลังงาน ต้องมีค่าไม่เกินพิคคของมอเตอร์

1.4.2 สมการมอเตอร์เป็นสมการอย่างง่าย จะไม่คำนึงถึงสภาวะชั่วคราว โดยจะพิจารณาเฉพาะสภาวะอยู่ตัวเท่านั้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้ทางด้านการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดรงชนิดแยกกระตุ้น

1.5.2 ได้อุปกรณ์ที่สามารถขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดรงชนิดแยกกระตุ้นให้ใช้พลังงานอย่างประหยัด

1.5.3 สามารถนำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์มาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

1.5.4 ได้บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ หรือนานาชาติ

1.6 การจัดรูปแบบรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์

รายงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 8 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น และนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สมการพื้นฐานของมอเตอร์ รวมถึงรายละเอียดเกี่ยวกับกำลังงานสูญเสียและการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

บทที่ 3 นำเสนอวิธีการระบุเอกลักษณ์ของสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ คือ การค้นหาแบบตาข่ายปรับตัว

บทที่ 4 อธิบายถึงการประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยใช้วิธีฐานแบบจำลอง (Model Based Method : MBM) และนำเสนอในรูปแบบของการคำนวณเชิงตัวเลข

บทที่ 5 กล่าวถึงโครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นเพื่อประหยัดพลังงาน รวมถึงอธิบายหลักการทำงาน การออกแบบและเสนอผลการทดสอบในแต่ละวงจร

บทที่ 6 นำเสนอตัวควบคุมแบบฐานกฎ (rule based controller) ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ และอธิบายหลักการทำงาน การออกแบบ รวมถึงการสร้างตัวควบคุมแบบฐานกฎด้วยบอร์ด dsPIC30F2010

บทที่ 7 กล่าวถึงผลการทดสอบการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นเพื่อประหยัดพลังงาน

บทที่ 8 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมีอยู่ด้วยกัน 4 ส่วน คือ ภาคผนวก ก. แสดงรายการบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ ภาคผนวก ข. แสดงผลการคำนวณเพื่อหาจุดการทำงานสำหรับการประหยัดพลังงาน ค. แสดงรายละเอียดข้อมูลต่าง ๆ ของอุปกรณ์สำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์และวงจรแปลงผันแบบบัคกิ้ง ง. แสดงรายละเอียดโปรแกรมควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นบนบอร์ด dsPIC30F2010

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

2.1 บทนำ

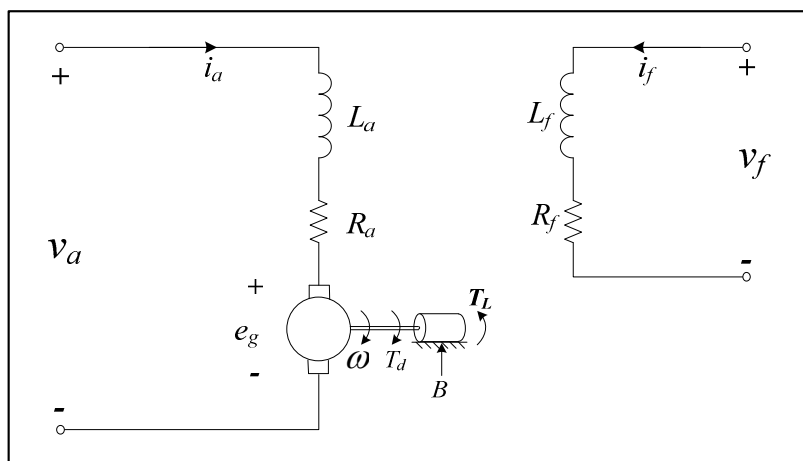
งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ซึ่งมอเตอร์ดังกล่าวเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่นิยมใช้สำหรับอุตสาหกรรมทางด้านรถไฟฟ้า จากการค้นคว้าเกี่ยวกับการประหยัดพลังงานในอดีพบว่าต้องอาศัยวิธีทางคณิตศาสตร์ และการคำนวณที่ยุ่งยากซับซ้อน ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องคิดค้นหาวิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อน โดยอาศัยการวิเคราะห์จากวงจรสมมูลอย่างง่ายของมอเตอร์ และจำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รวมถึงสมการคำนวณกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ดังกล่าว ด้วยเหตุนี้ จึงนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สมการพื้นฐานของมอเตอร์ รวมถึงรายละเอียดเกี่ยวกับกำลังงานสูญเสียและการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นไว้ในบทนี้

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น สามารถพิจารณาได้จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ โดยวงจรสมมูลดังกล่าวจะประกอบด้วยวงจรอาร์เมเจอร์ (armature circuit) และวงจรสนาม (field circuit) ซึ่งทั้ง 2 วงจรจะแยกจากกันอย่างอิสระ ดังนี้

2.2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์

วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น แสดงได้ดังรูปที่ 2.1 (Lankarany and Rezazade, 2007) ดังนี้



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

เป็นดังนี้

จากวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.1 ความหมายของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจรสมมูล

v_a คือ แรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ (V)

i_a คือ กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ (A)

R_a คือ ความต้านทานอาร์เมเจอร์ (Ω)

L_a คือ ความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์ (H)

e_g คือ แรงดันเหนี่ยวนำต้านกลับ (V)

ω คือ ความเร็วรอบมอเตอร์ (rad/s)

T_d คือ แรงบิดเหนี่ยวนำภายในในมอเตอร์ ($N \cdot m$)

B คือ ค่าคงที่ความเสียดทานหนืด ($N \cdot m \cdot s/rad$)

T_L คือ แรงบิดโหลด ($N \cdot m$)

v_f คือ แรงดันไฟฟ้าสนาม (V)

i_f คือ กระแสไฟฟ้าสนาม (A)

R_f คือ ความต้านทานสนาม (Ω)

L_f คือ ความเหนี่ยวนำสนาม (H)

เมื่อพิจารณาฝั่งวงจรอาร์เมเจอร์ตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้ดังสมการที่ (2.1)

$$v_a = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_g \quad (2.1)$$

จากสมการที่ (2.1) ถ้าพิจารณาเฉพาะในสภาวะคงตัวจะได้สมการที่ (2.2)

$$v_a = i_a R_a + e_g \quad (2.2)$$

เมื่อพิจารณาฝั่งวงจรสนามตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้สมการที่ (2.3)

$$v_f = i_f R_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (2.3)$$

จากสมการที่ (2.3) พิจารณาในสภาวะคงตัวจะได้สมการที่ (2.4)

$$v_f = i_f R_f \quad (2.4)$$

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงรับกำลังงานอินพุตเป็นกำลังงานไฟฟ้าและจ่ายกำลังงานเอาต์พุตเป็นกำลังงานกล กำลังงานเอาต์พุตของมอเตอร์ที่นำไปใช้งาน คือ แรงบิดที่เพลาและความเร็ว ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงลักษณะสมบัติการจ่ายกำลังงานเอาต์พุตของมอเตอร์จะหมายถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงบิดหรือเรียกอีกอย่างว่า ลักษณะสมบัติความเร็วแรงบิดของมอเตอร์ ซึ่งหาได้โดยตรงจากสมการแรงดันเหนี่ยวนำต้านกลับและแรงบิดเหนี่ยวนำภายในมอเตอร์ ทั้งสองสมการคำนวณได้ดังสมการที่ (2.5) และ (2.6) ตามลำดับ

$$e_g = K_v i_f \omega \quad (2.5)$$

เมื่อ K_v คือ ค่าคงที่ของแรงดัน (V · s/rad)

$$T_d = K_t i_f i_a \quad (2.6)$$

เมื่อ K_t คือ ค่าคงที่ของแรงบิด (N · m/A) โดยส่วนใหญ่แล้วจะกำหนดให้ $K_v = K_t = K$

เมื่อพิจารณาจากการหมุนในสภาวะคงตัว จะได้สมการที่ (2.7)

$$T_d = B\omega + T_L \quad (2.7)$$

การหาสมการความเร็วแรงบิดของมอเตอร์ เริ่มจากการพิจารณาตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์ฝั่งวงจรรีเมเจอร์ คือ สมการที่ (2.2) และสมมติให้กระแสสนามคงที่ ต่อมาแทนค่าสมการที่ (2.5) ลงในสมการที่ (2.2) จะได้สมการที่ (2.8) ดังนี้

$$v_a = i_a R_a + K i_f \omega \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.6) ทำการย้ายข้างสมการเพื่อหาค่า i_a เป็นไปดังสมการที่ (2.9) คือ

$$i_a = \frac{T_d}{K i_f} \quad (2.9)$$

นำสมการที่ (2.9) แทนลงในสมการที่ (2.8) จะได้สมการที่ (2.10) คือ

$$v_a = \frac{T_d}{K i_f} R_a + K i_f \omega \quad (2.10)$$

ดังนั้นเมื่อทำการย้ายข้างสมการที่ (2.10) เพื่อหาค่า ω จะได้สมการความเร็วแรงบิดของมอเตอร์ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.11) ดังนี้

$$\omega = \frac{v_a}{K i_f} - \frac{R_a}{(K i_f)^2} T_d \quad (2.11)$$

สมการคำนวณกำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุตของมอเตอร์ เป็นดังสมการที่ (2.12) และ (2.13) ตามลำดับ

$$P_{in} = v_a i_a + v_f i_f \quad (2.12)$$

$$P_{out} = T_L \omega \quad (2.13)$$

2.2.2 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้ในงานวิจัย วิทยานิพนธ์

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้งานมีพิกัด ดังนี้

วงจรอาร์เมเจอร์ : ค่าแรงดันอาร์เมเจอร์ 220 V กระแสอาร์เมเจอร์ 2.2 A กำลังงาน
0.37 kW และความเร็วรอบ 2360 rpm

วงจรสนาม : ค่าแรงดันสนาม 220 V และกระแสสนาม 0.3 A

จากการวัดค่าความต้านทานของมอเตอร์แล้วหาค่าเฉลี่ยจะได้ว่า R_a เท่ากับ
15.99 Ω และ R_f เท่ากับ 735.43 Ω

จากค่าพิกัดของมอเตอร์ที่ได้นำเสนอข้างต้นสามารถนำไปคำนวณหาพารามิเตอร์ที่
จำเป็นของมอเตอร์ได้ดังนี้

- ค่า K

นำสมการที่ (2.5) แทนในสมการที่ (2.2) จะได้ดังสมการที่ (2.14) คือ

$$v_a = i_a R_a + K i_f \omega \quad (2.14)$$

ทำการย้ายข้างสมการเพื่อหาค่า K และแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ จะได้

$$K = \frac{220 - (2.2 \times 15.99)}{(0.3 \times 247.14)} = 2.49$$

- ค่า T_d

จากสมการที่ (2.6) เมื่อแทนค่าสมการ จะได้

$$T_d = 2.49 \times 2.2 \times 0.3 = 1.6434 \text{ N} \cdot \text{m}$$

- ค่า B

จากสมการที่ (2.7) ย้ายข้างสมการหาค่า B และแทนค่าพารามิเตอร์ที่ทราบค่า จะ
ได้

$$B = \frac{1.6434 - 1.497}{247.14} = 5.924 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$$

ดังนั้นจากการคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ค่า K เท่ากับ 2.49 ค่า T_d เท่ากับ $1.6434 \text{ N} \cdot \text{m}$ และค่า B เท่ากับ $5.924 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$

2.3 กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์มี 5 ชนิด ซึ่งกำลังงานสูญเสียแต่ละชนิดเกิดจากปัจจัยที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

2.3.1 กำลังงานสูญเสียเนื่องจากขดลวด (copper losses)

กำลังงานสูญเสียชนิดนี้เกิดเนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านขดลวด ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในความต้านทานของขดลวด (ohmic loss) (Ryff, 1994) ซึ่งเกิดทั้งในขดลวดอาร์เมเจอร์และขดลวดสนาม แสดงได้ดังสมการที่ (2.15) และ (2.16) ตามลำดับ

$$P_a = i_a^2 R_a \quad (2.15)$$

$$P_f = i_f^2 R_f \quad (2.16)$$

โดยที่ P_a คือ กำลังงานสูญเสียอาร์เมเจอร์ (W)

P_f คือ กำลังงานสูญเสียสนาม (W)

2.3.2 กำลังงานสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านอากาศ (friction and windage losses)

กำลังงานสูญเสียดังกล่าวเกิดจากหลายปัจจัย คือ จากการเสียดสีในตลับลูกปืน การเสียดสีระหว่างแปรงถ่านกับผิวคอมมิวเตเตอร์ และจากการหมุนปะทะลมของตัวโรเตอร์ ค่ากำลังงานสูญเสียนี้อาจเพิ่มขึ้นตามความเร็วในการหมุน ซึ่งถ้ามอเตอร์ทำงานที่ความเร็วคงที่ ค่ากำลังงานสูญเสียจะมีค่าคงที่ด้วยโดยไม่คำนึงถึงปริมาณโหลด (วีริยะ, 2521) กำลังงานสูญเสียดังกล่าวข้างต้นสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.17)

$$P_m = K_m N^3 \quad (2.17)$$

โดยที่ P_m คือ กำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทานและแรงต้านอากาศ (W)

K_m คือ ค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทานและแรงต้านอากาศ

N คือ ความเร็วรอบมอเตอร์ (rpm)

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ไม่นำกำลังงานงานสูญเสียดังกล่าวไปพิจารณาในการคำนวณ เนื่องจากกำลังงานสูญเสียนี้ปกติจะมีค่าน้อย (Ryff, 1994) อีกทั้งสมการของกำลังงานสูญเสียดังกล่าวไม่ปรากฏพารามิเตอร์ที่พิจารณาอยู่ในสมการ ซึ่งพารามิเตอร์ที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเกี่ยวข้องกับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ คือ i_d, i_f, v_d และ v_f

2.3.3 กำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก (core losses)

กำลังงานสูญเสียชนิดนี้ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในแกนเหล็กของอาร์เมเจอร์ เมื่ออาร์เมเจอร์หมุนแกนเหล็กจะเคลื่อนผ่านขั้วเหนือและใต้ของขั้วแม่เหล็ก ทำให้สนามที่ผ่านแกนเหล็กมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ซึ่งทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียดังต่อไปนี้

- กำลังงานสูญเสียฮิสเทอรีซิส (hysteresis loss)

กำลังงานสูญเสียฮิสเทอรีซิสเกิดจากการเปลี่ยนทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก กำลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนทิศทาง สามารถแทนด้วยพื้นที่วงปิดฮิสเทอรีซิส ซึ่งกำลังงานสูญเสียฮิสเทอรีซิสเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของวงปิดฮิสเทอรีซิส หมายความว่า ถ้าป้อนแรงเคลื่อนแม่เหล็กเล็กน้อย วงปิดฮิสเทอรีซิสที่ได้จะมีขนาดเล็ก และกำลังงานสูญเสียฮิสเทอรีซิสจะมีค่าน้อย (Chapman, 1999) และกำลังงานสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับปริมาตรของแกนเหล็ก ความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด (Toro, 1990) ดังนั้นจึงได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.18)

$$P_h = k_h \omega B_m^n V \quad (2.18)$$

โดยที่ P_h คือ กำลังงานสูญเสียฮิสเทอรีซิส (W)

k_h คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับวัสดุ

n คือ ค่ายกกำลัง เท่ากับ 2 (Zaki, El-Sattar, Wahsh, Mashaly and Amer, 1998)

B_m คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด (T)

V คือ ปริมาตรของแกนเหล็ก (m^3)

- กำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (eddy current loss)

ลักษณะการทำงานของมอเตอร์ เมื่ออาร์เมเจอร์หมุน แกนเหล็กของอาร์เมเจอร์จะตัดกับเส้นแรงแม่เหล็ก ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในตัวอาร์เมเจอร์ และเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก เรียกว่า กระแสไหลวน และกำลังงานสูญเสียเนื่องจากการไหลของกระแสนี้ เรียกว่า กำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Nasar, 1995) กำลังงานสูญเสียดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับปริมาณของแกนเหล็ก ความหนาแน่นของแผ่นเหล็กบาง ความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.19)

$$P_e = k_e \omega^2 \delta^2 B_m^2 V \quad (2.19)$$

โดยที่ P_e คือ กำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (W)

k_e คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับความเหนี่ยวนำของวัสดุ

δ คือ ความหนาของแผ่นเหล็กบาง (m)

สมการรวมของกำลังงานสูญเสียฮิสเตอรีซิสและกำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนแสดงได้ดังสมการที่ (2.20)

$$P_h + P_e = K_1 \omega B_m^2 + K_2 \omega^2 B_m^2 \quad (2.20)$$

โดยที่ $K_1 = k_h V$

$K_2 = k_e \delta^2 V$

จากการศึกษาพบว่ากระแสที่ไหลในขดลวดสนามเป็นตัวสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ซึ่งแรงเคลื่อนแม่เหล็กดังกล่าวจะสร้างฟลักซ์แม่เหล็ก และเนื่องจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสสนาม ดังนั้นฟลักซ์แม่เหล็กจึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสสนามด้วยเช่นกัน (Fitzgerald, Kingsley and Umans, 1983) จากการอธิบายข้างต้นความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กและกระแสสนามดูได้จากสมการที่ (2.21)

$$B_m = f(i_f) = K i_f \quad (2.21)$$

โดยที่ K คือ ค่าคงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กกับกระแสสนาม

ดังนั้นสมการสำหรับคำนวณกำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็กจะเป็นดังสมการที่

(2.22)

$$P_i = K_h \omega i_f^2 + K_e \omega^2 i_f^2 \quad (2.22)$$

โดยที่ P_i คือ กำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก (W)

$$K_h = K_1 K$$

$$K_e = K_2 K^2$$

จากการศึกษาของ Zaki, El-Sattar, Wahsh, Mashaly and Amer (1998) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนมีค่าน้อยมาก จึงไม่พิจารณาค่ากำลังงานสูญเสียดังกล่าวในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

2.3.4 กำลังงานสูญเสียจากแปรงถ่าน (brush losses)

กำลังงานสูญเสียจากแปรงถ่านเกิดจากค่าความต้านทานของแปรงถ่าน เมื่อกระแสไหลผ่านแปรงถ่านจะเกิดแรงดันตกที่แปรงถ่าน เมื่อแรงดันตกนี้คูณกับกระแสที่ไหลผ่าน จะเกิดกำลังงานสูญเสียที่ตัวแปรงถ่าน ค่าแรงดันตกของแปรงถ่านจะขึ้นอยู่กับชนิดของแปรงถ่านที่ใช้ โดยทั่วไปจะใช้แปรงถ่านคาร์บอนและแกรไฟต์ ซึ่งวัสดุเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นตัวนำสูง จึงกำหนดให้ค่าแรงดันตกคร่อมเท่ากับ 1 V ต่อแปรงถ่าน 1 ชุด ในกรณีที่มีแปรงถ่านบวกและลบจำนวนทั้งหมด 2 ชุดจะได้แรงดันตกคร่อมแปรงถ่านรวมทั้งหมด 2 V (Chapman, 1999) ดังนั้นกำลังงานสูญเสียนี้จึงมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.23)

$$P_{BD} = V_e i_a \quad (2.23)$$

โดยที่ P_{BD} คือ กำลังงานสูญเสียจากแปรงถ่าน (W)

V_e คือ แรงดันตกคร่อมแปรงถ่าน มีค่าเท่ากับ 2 V

2.3.5 กำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน (stray losses)

กำลังงานสูญเสียชนิดนี้เป็นผลมาจากการบิดเบี้ยวของฟลักซ์แม่เหล็กอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาอาร์มเจอร์ และกระแสลัดวงจรในกระบวนการคอมมิวเตชัน (Guru and Hiziroglu, 2001)

กำลังงานสูญเสียนี้มีค่าแปรผันโดยตรงกับขนาดของกระแสไหลและความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยปกติกำลังงานสูญเสียดังกล่าวมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกำลังงานสูญเสียชนิดอื่น ซึ่งกำลังงานสูญเสียจากการใช้งานสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.24) ดังนี้

$$P_s = K_{st} i_a^2 N^2 \quad (2.24)$$

โดยที่ P_s คือ กำลังงานสูญเสียจากการใช้งาน (W)

K_{st} คือ ค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากการใช้งาน

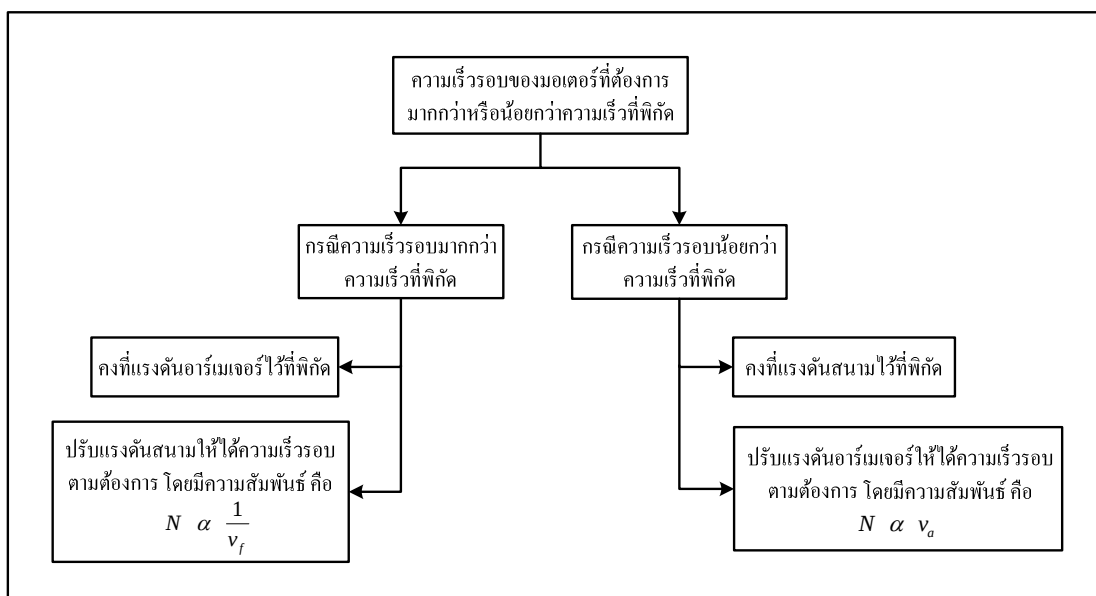
จากการอธิบายทั้งหมดข้างต้นสมการกำลังงานสูญเสียรวมในมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น จะเป็นดังสมการที่ (2.25)

$$P_{loss} = i_a^2 R_a + i_f^2 R_f + 2i_a + K_a i_a^2 \omega^2 + K_h i_f^2 \omega \quad (2.25)$$

โดยที่ $K_a = \frac{60^2}{4\pi^2} K_{st}$

2.4 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น จะใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง 2 ชุด เพื่อป้อนให้กับวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรสนาม ซึ่งมอเตอร์จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล ระบบขับเคลื่อนที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนี้มีข้อดี คือ ช่วงของความเร็วที่ปรับใช้งานกว้าง ดังนั้นจึงสามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานได้โดยง่าย การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น มีหลักการควบคุม 2 ส่วน (Chapman, 2005) ต่อไปนี้จะเรียกรวมทั้ง 2 ส่วนว่า วิธีดั้งเดิม ซึ่งแต่ละส่วนจะควบคุมความเร็วรอบในช่วงที่แตกต่างกัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภาพหลักการควบคุมความเร็วด้วยวิธีดั้งเดิม

จากรูปที่ 2.2 การควบคุมความเร็วรอบด้วยวิธีดั้งเดิมดังกล่าว คือ การควบคุมกระแสสนาม และการควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์ สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.4.1 การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์โดยการควบคุมกระแสสนาม

การควบคุมความเร็วรอบด้วยวิธีนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสสนาม ซึ่งทำได้โดยการปรับค่าแรงดันสนาม โดยที่แรงดันอาร์เมเจอร์มีค่าคงที่ จากสมการที่ (2.11) จะอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสนามและความเร็วของมอเตอร์ได้ว่า เมื่อค่ากระแสสนามมีค่าลดลง ความเร็วรอบของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้น ถ้าค่ากระแสสนามมีค่ามากขึ้น ความเร็วรอบของมอเตอร์จะลดลง แต่การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยวิธีนี้ สามารถควบคุมความเร็วรอบได้ตั้งแต่ความเร็วพิกัดขึ้นไปเท่านั้น ไม่สามารถควบคุมความเร็วให้ต่ำกว่าความเร็วพิกัดได้ เนื่องจากการควบคุมความเร็วรอบที่ต่ำกว่าความเร็วพิกัด ต้องการกระแสสนามจำนวนมาก ซึ่งถ้ากระแสสนามมีค่ามากเกินไปค่าพิกัดของขดลวดสนาม จะทำให้ขดลวดสนามเสียหายได้

2.4.2 การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์โดยการควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์

การควบคุมความเร็วด้วยวิธีนี้ คือ การปรับแรงดันที่จ่ายให้วงจรอาร์เมเจอร์ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่จ่ายให้วงจรรสนาม ซึ่งหมายถึงให้กระแสสนามคงที่นั่นเอง เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์จากสมการที่ (2.11) สังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มแรงดันอาร์เมเจอร์ ความเร็วรอบของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้น และถ้าลดแรงดันอาร์เมเจอร์ ความเร็วรอบของมอเตอร์จะลดลง การควบคุมความเร็วรอบด้วยวิธีนี้สามารถควบคุมความเร็วได้ไม่เกินความเร็วพิกัดเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากการควบคุมความเร็ว

รอบสูงกว่าความเร็วพิกัด จะต้องการแรงดันอาร์เมเจอร์ที่สูงมาก ซึ่งถ้าขดลวดอาร์เมเจอร์ได้รับแรงดันเกิน จะทำให้ฉนวนของมอเตอร์เสียหายได้

จากการควบคุมความเร็วรอบด้วยวิธีดั้งเดิมที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ได้ทำการกำหนดความเร็วรอบค่าต่าง ๆ ขึ้นมาเพื่อคำนวณหาค่ากำลังงานอินพุตที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม โดยการคำนวณอาศัยสมการพื้นฐานและพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.2 ผลการคำนวณแสดงได้ดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ผลการคำนวณกำลังงานอินพุตที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยวิธีดั้งเดิม

T_L (N · m)	N (rpm)	i_f (A)	v_f (V)	i_a (A)	v_a (V)	P_{in} (W)
0.2	1000	0.30	220.00	0.27	82.51	88.09
	2000	0.30	220.00	0.27	160.73	109.03
	2750	0.30	220.00	0.27	220.00	125.09
0.4	1000	0.30	220.00	0.54	86.79	112.47
	2000	0.30	220.00	0.54	165.01	154.36
	2750	0.29	216.66	0.55	220.00	183.79
0.6	1000	0.30	220.00	0.80	91.07	139.15
	2000	0.30	220.00	0.80	169.29	201.98
	2750	0.29	211.80	0.84	220.00	245.07
0.8	1000	0.30	220.00	1.07	95.35	168.12
	2000	0.30	220.00	1.07	173.58	251.89
	2750	0.28	206.88	1.14	220.00	309.47
1	1000	0.30	220.00	1.34	99.63	199.38
	2000	0.30	220.00	1.34	177.86	304.09
	2750	0.27	201.51	1.47	220.00	377.67
1.2	1000	0.30	220.00	1.61	103.91	232.93
	2000	0.30	220.00	1.61	182.14	358.59
	2750	0.27	195.99	1.81	220.00	450.07
1.4	1000	0.30	220.00	1.87	108.19	268.77
	2000	0.30	220.00	1.87	186.42	415.38
	2750	0.26	189.89	2.18	220.00	528.09
1.5	1000	0.30	220.00	2.01	110.33	287.55
	2000	0.30	220.00	2.01	188.56	444.63
	2750	0.26	189.52	2.20	220.00	532.84

ผลจากตารางที่ 2.1 การคำนวณกำลังงานอินพุตที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยวิธีดั้งเดิม จะใช้สำหรับเปรียบเทียบกับกำลังงานอินพุตที่ได้จากการควบคุมความเร็วรอบด้วยวิธีอื่น ๆ โดยในบทที่ 4 จะอธิบายเกี่ยวกับผลการเปรียบเทียบระหว่างวิธีดั้งเดิมกับวิธีฐานแบบจำลอง ซึ่งวิธีฐานแบบจำลองเป็นวิธีที่ผู้ทำวิจัยคิดค้นขึ้นเอง

2.5 สรุป

การอธิบายเนื้อหาในบทนี้ เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ซึ่งการทำความเข้าใจในเรื่องดังกล่าวมีความสำคัญมากสำหรับการหาแนวทางในการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ เนื่องจากสมการและค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ จำเป็นต้องนำไปใช้ในการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ เช่นนำไปคำนวณค่ากำลังงานตามวิธีดั้งเดิมและวิธีที่คิดค้นขึ้นใหม่ เพื่อนำผลการคำนวณมาเปรียบเทียบกัน เป็นต้น และในส่วนของสมการกำลังงานสูญเสีย ที่มีพารามิเตอร์บางตัวที่ไม่ทราบค่า ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์เข้ามาช่วยในการหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ซึ่งจะอธิบายอย่างละเอียดไว้ในบทที่ 3 ต่อไป



บทที่ 3

การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสีย

3.1 บทนำ

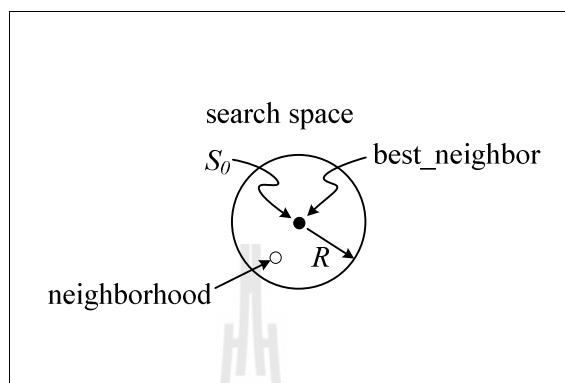
งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เพราะฉะนั้นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในสมการกำลังงานสูญเสียจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อผลการคำนวณ แต่เนื่องจากการยากที่ผู้วิจัยจะทราบพารามิเตอร์ของกำลังงานสูญเสียจากบริษัทผู้ผลิตมอเตอร์ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้ทางปัญญาประดิษฐ์สำหรับหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยเลือกวิธีที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search) หรือเรียกโดยย่อว่า “ATS” ดังนั้นในบทนี้จึงนำเสนอหลักการทํางาน กระบวนการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวที่ใช้สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสีย ขอบเขตการค้นหา และการทดสอบพารามิเตอร์รวมทั้งการตรวจสอบผลการค้นหาไว้ในบทนี้

3.2 หลักการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว เป็นอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามู (Tabu Search: TS) มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบให้ดียิ่งขึ้น อัลกอริทึมนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นโดย กองพัน อารีรักษ์ และสรวิทย์ สุจิตกร ในปี พ.ศ. 2545 โดยได้ทำการเพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในการค้นหาแบบตามูธรรมดา คือ การเดินย้อนรอย (black tracking) และการปรับรัศมีการค้นหา (adaptive search radius) กลไกการเดินย้อนรอยจะเกิดขึ้นเมื่อจำนวนคำตอบในแต่ละรอบเท่ากับจำนวนคำตอบสูงสุด กลไกนี้จะเลือกคำตอบในรายการตามู (Tabu list) เพื่อนำมากำหนดเป็นคำตอบเริ่มต้นสำหรับการค้นหาในรอบถัดไป ทั้งนี้เพื่อให้หลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น สำหรับกลไกการปรับรัศมีการค้นหาจะทำการปรับลดรัศมีในระหว่างการค้นหาจนกระทั่งการค้นหาเข้าไปใกล้คำตอบที่ดีที่สุด โดยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวพิจารณาได้ตามขั้นตอนดังนี้

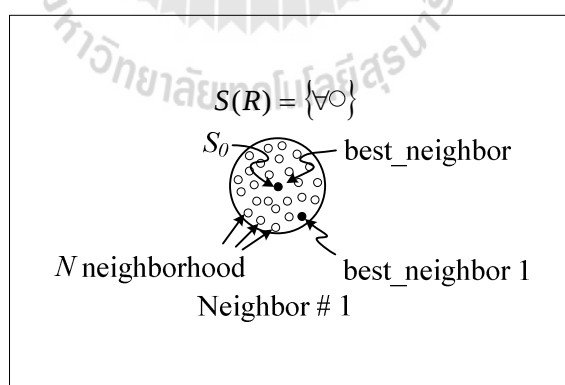
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพื้นที่การค้นหา รัศมีการค้นหา และจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา

ขั้นตอนที่ 2 ทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น S_0 ภายในพื้นที่การค้นหา (search space) และให้ S_0 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (best_neighbor) ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สุ่มค่า S_0 ในพื้นที่การค้นหา

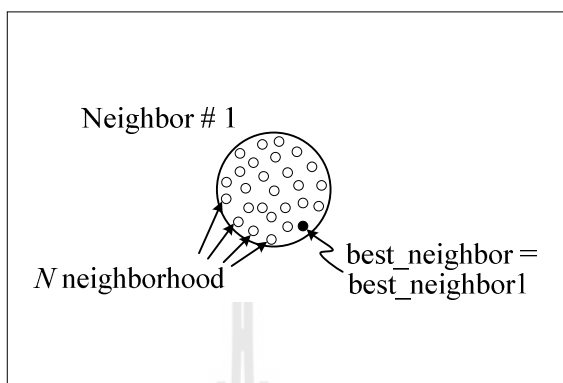
ขั้นตอนที่ 3 ทำการสุ่มเลือกคำตอบจำนวน N คำตอบ (N neighborhood) รอบ ๆ S_0 ภายในพื้นที่รัศมีการค้นหา R และกำหนดให้เซต $S(R)$ เป็นเซตของคำตอบ N คำตอบ ซึ่งเรียกว่า คำตอบรอบข้าง ดังรูปที่ 3.2



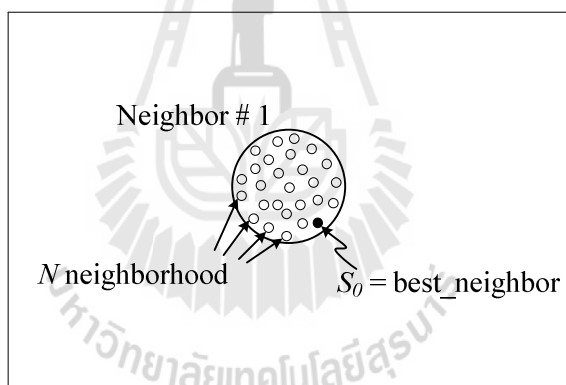
รูปที่ 3.2 ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ S_0

ขั้นตอนที่ 4 ทำการประเมินคำตอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสมาชิกใน $S(R)$ โดยกำหนดให้ S_i เป็นคำตอบที่ดีที่สุด (best_neighbor 1) ใน $S(R)$

ขั้นตอนที่ 5 ถ้า $S_1 < S_0$ ดังนั้นกำหนดให้ $S_0 = S_1$ และเก็บค่า S_0 ในรายการตามดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4

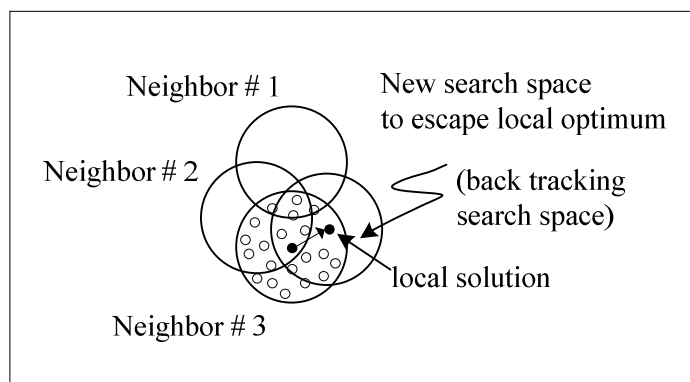


รูปที่ 3.3 กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่



รูปที่ 3.4 กำหนดค่า S_0 ใหม่

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



รูปที่ 3.5 กลไกการเดินย้อนรอย

ขั้นตอนที่ 7 จะเข้าสู่กลไกการเดินย้อนรอย เมื่อจำนวนคำตอบในแต่ละรอบไม่หลุดออกจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่น (local solution) เป็นจำนวนเท่ากับจำนวนคำตอบสูงสุดที่ได้ทำการตั้งค่าไว้ กลไกนี้จะเลือกคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการค้นหาในพื้นที่การค้นหาเดิมในรายการตามเพื่อนำมากำหนดเป็นคำตอบเริ่มต้นสำหรับการค้นหาในรอบถัดไป ทั้งนี้เพื่อให้หลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ดังรูปที่ 3.5

ขั้นตอนที่ 8 จะเข้าสู่กลไกการปรับค่ารัศมีการค้นหา โดยจะปรับลดรัศมีลงเรื่อย ๆ ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.1)

$$radius_{new} = \frac{radius_{old}}{DF} \quad (3.1)$$

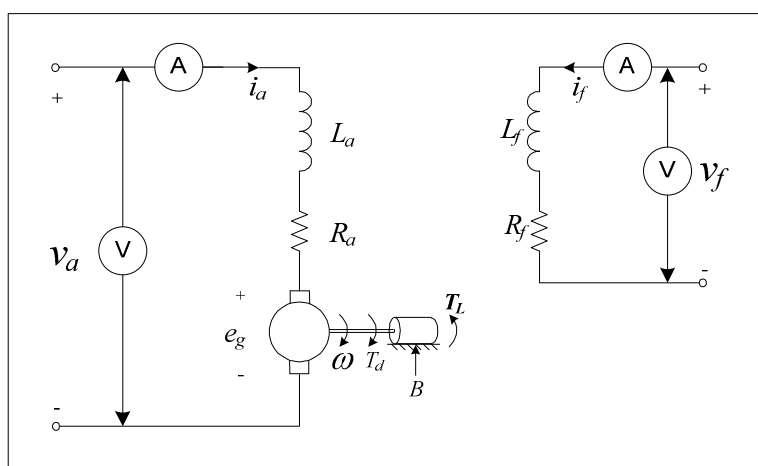
โดยที่ DF คือ ตัวประกอบปรับลดค่ารัศมี (Decreasing Factor)

3.3 การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์

การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ด้วยวิธี ATS ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะค้นหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียรวมในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ดังสมการที่ (2.25) โดยจะดำเนินการค้นหาพารามิเตอร์ 2 ค่า คือ ค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียฮิสเตอร์ซิส (K_h) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก และค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากการใช้งาน (K_{st}) การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์มีขั้นตอนในการดำเนินงาน 4 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

3.3.1 การทดสอบมอเตอร์สำหรับการระบุเอกลักษณ์

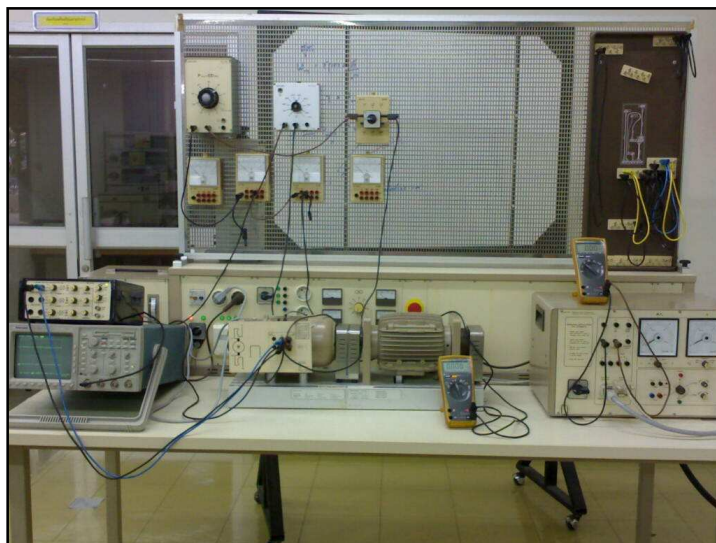
การทดสอบมอเตอร์เพื่อใช้สำหรับการระบุเอกลักษณ์ จะทำการทดสอบด้วยกัน 5 ชุดข้อมูล คือ 80% 90% 100% 110% และ 120% ของความเร็วพิกัด และได้ทำการแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ ชุดข้อมูล 80% 100% และ 120% ของความเร็วพิกัด จะใช้สำหรับการระบุเอกลักษณ์ และชุดข้อมูล 90% และ 110% ของความเร็วพิกัดใช้สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องจากการระบุเอกลักษณ์ โดยจะทำการทดสอบมอเตอร์ตามรูปที่ 3.6 และมีภาพถ่ายการทดสอบมอเตอร์เป็นดังรูปที่ 3.7 แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 3.6 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

การดำเนินการทดสอบมอเตอร์ จะดำเนินการดังนี้ คือ

- การทดสอบที่ 80% และ 90% ของความเร็วพิกัด จะปรับกระแสและแรงดันสนามให้คงที่ที่พิกัด และปรับแรงดันอาร์เมเจอร์ให้ได้ความเร็วตามที่ต้องการ
- การทดสอบที่ 100% ของความเร็วพิกัด จะปรับกระแสและแรงดันของวงจรสนามและวงจรอาร์เมเจอร์ไปที่พิกัด
- การทดสอบที่ 110% และ 120% ของความเร็วพิกัด จะปรับแรงดันอาร์เมเจอร์ให้คงที่ที่พิกัด และปรับแรงดันทางฝั่งวงจรสนามให้ได้ความเร็วตามที่ต้องการ



รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

การทดสอบมอเตอร์ที่ความเร็วต่าง ๆ นั้นได้ทำการวัดค่ากระแสและแรงดันทั้งด้านอาร์เมเจอร์และสนาม รวมถึงค่าแรงบิด เพื่อนำไปคำนวณหาค่ากำลังงานอินพุต กำลังงานเอาต์พุต และกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณค่ากำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุต ได้แสดงไว้ในบทที่ 2 สมการที่ (2.12) และ (2.13) ตามลำดับ ส่วนสมการคำนวณกำลังงานสูญเสียจะเป็นดังสมการที่ (3.2) และผลจากการทดสอบมอเตอร์พร้อมทั้งผลจากการคำนวณ แสดงได้ดังตารางที่ 3.1 ดังนี้

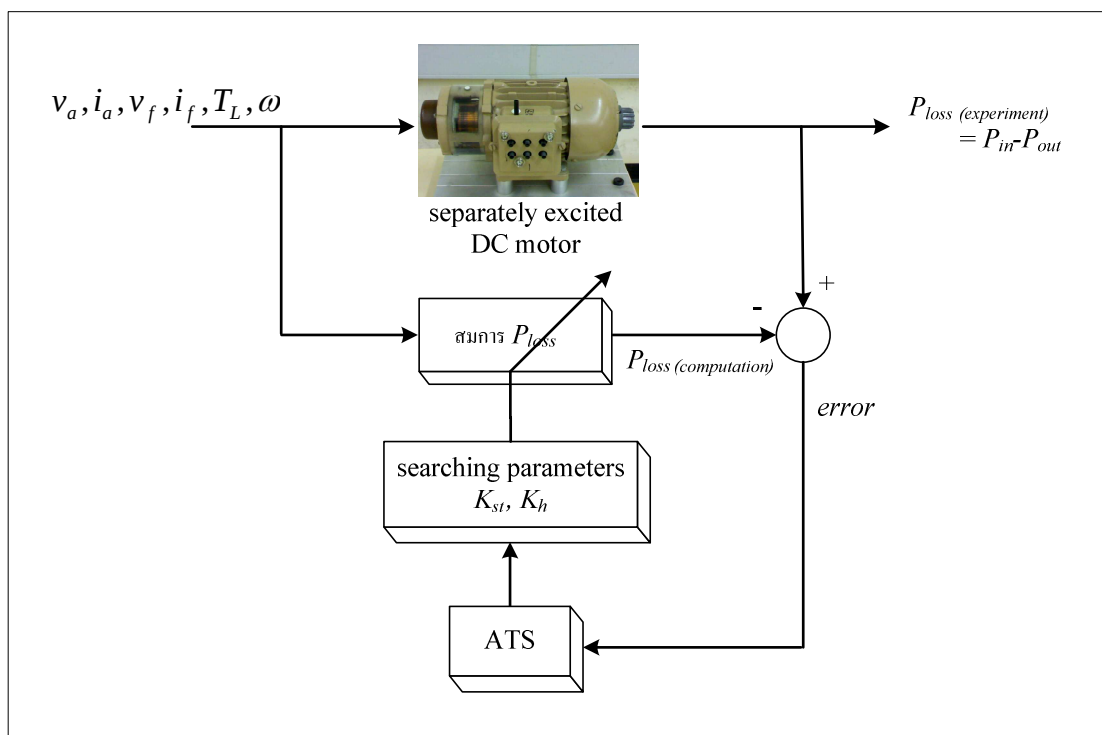
$$P_{loss} = P_{in} - P_{out} \quad (3.2)$$

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบมอเตอร์

speed		v_a	i_a	v_f	i_f	T_L	P_{in}	P_{out}	P_{loss}
%	rad/s	(V)	(A)	(V)	(A)	(N · m)	(W)	(W)	(W)
80	197.71	182.80	2.20	220.00	0.30	1.54	468.16	304.28	163.88
90	222.43	201.20	2.20	220.00	0.30	1.54	508.64	342.53	166.11
100	247.87	220.00	2.20	220.00	0.30	1.55	550.00	383.71	166.29
110	270.28	220.00	2.20	186.50	0.22	1.39	524.10	374.34	149.76
120	297.40	220.00	2.20	143.30	0.19	1.23	511.23	365.81	145.42

3.3.2 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสีย

การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียจะดำเนินการโดยค้นหาค่าพารามิเตอร์ 2 ค่า โดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตาบอดเชิงปรับตัว หรือวิธี ATS ตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.2 ซึ่งการค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี ATS สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 3.8 ดังนี้



รูปที่ 3.8 แผนภาพการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียด้วยวิธี ATS

จากรูปที่ 3.8 การคำนวณค่าความผิดพลาด (error) ระหว่างค่ากำลังงานสูญเสียจากการทดสอบ ($P_{loss(experiment)}$) กับค่ากำลังงานสูญเสียจากการคำนวณ ($P_{loss(computation)}$) จะเป็นอินพุตให้ ATS ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ โดยค่าผิดพลาดดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.3) และการเลือกค่าพารามิเตอร์ของวิธี ATS จะพิจารณาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ W ซึ่งหมายถึง ค่าความผิดพลาดอาร์เอ็มเอส (root mean square error) ของค่า $error$ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.4) ดังนี้

$$error = |P_{loss(experiment)} - P_{loss(computation)}| \quad (3.3)$$

$$W = \sqrt{\frac{\sum error^2}{n}} \quad (3.4)$$

โดยที่ $error$ คือ ผลต่างของค่ากำลังงานสูญเสียจากการทดสอบกับค่ากำลังงานสูญเสียจากการคำนวณ
 n คือ จำนวนจุดข้อมูลทั้งหมด

การกำหนดขอบเขตของการค้นหาเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่สำคัญ ดังนั้นที่มาของขอบเขตของพารามิเตอร์ทั้ง 2 ค่า สามารถอธิบายได้ดังนี้

- ขอบเขตค่า K_{st}

ขอบเขตค่า K_{st} ได้มาจากการเปรียบเทียบ เนื่องจาก K_{st} เป็นค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากการใช้งาน ซึ่งโดยทั่วไปสามารถคำนวณกำลังงานสูญเสียจากการใช้งานได้จากสมการที่ (3.5) คือ

$$P_s = 1\%P_{in} = 1\%(V_a i_a + V_f i_f) \quad (3.5)$$

จากการศึกษาของ Alexander Kusko ในปี ค.ศ. 1983 ได้สมการกำลังงานสูญเสียจากการใช้งานดังสมการที่ (3.6)

$$P_s = K_{st} \frac{60^2}{4\pi^2} i_a^2 \omega^2 \quad (3.6)$$

นำค่า P_s จากสมการที่ (3.5) แทนในสมการที่ (3.6) จะเป็นดังสมการที่ (3.7) ดังนี้

$$1\%(V_a i_a + V_f i_f) = K_{st} \frac{60^2}{4\pi^2} i_a^2 \omega^2 \quad (3.7)$$

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการที่ (3.7) โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.2.2 ซึ่งจากการคำนวณจะได้ค่า $K_{st} = 2.04 \times 10^{-7}$ ดังนั้นจึงกำหนดขอบเขตการค้นหา คือ $1 \times 10^{-9} - 1 \times 10^{-6}$

- ขอบเขตค่า K_h

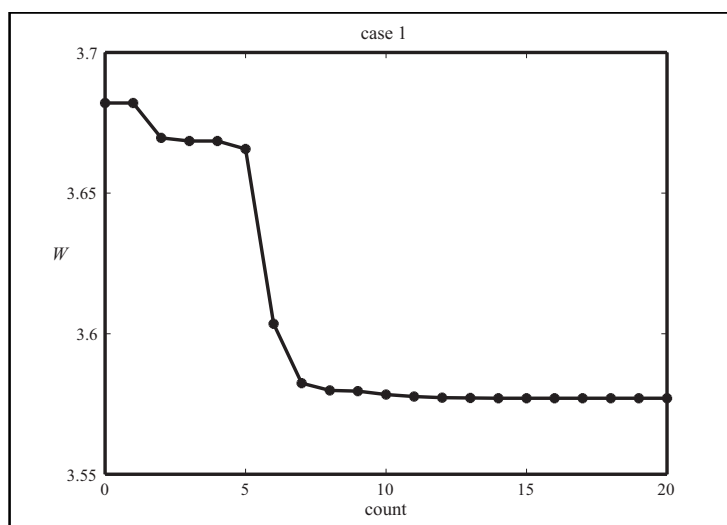
ขอบเขตค่า K_h ได้มาจากการศึกษาของ Zaki ในปี 1998 จากการศึกษาของ Zaki เป็นมอเตอร์ขนาดใหญ่ ขนาด 1kW มีค่า $K_h = 0.067$ แต่มอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เป็นมอเตอร์ขนาด 300 W ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า ดังนั้นค่า K_h จึงน่าจะมีค่าน้อยกว่าจึงกำหนดให้มีขอบเขตอยู่ในช่วง $1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-1}$

จากการกำหนดขอบเขตของพารามิเตอร์ข้างต้น ขอบเขตการค้นหาของ ATS เป็นดังตารางที่ 3.2 และทำการปรับขอบเขตการค้นหา เมื่อเกิดการชนกับขอบเขตบนหรือขอบเขตล่างของทั้ง 4 กรณี ยกตัวอย่างเช่น กรณีที่ 1 ค่า K_h มีค่าชนกับขอบเขตล่างการค้นหา จึงมีการขยายขอบเขตล่างออกไปอีก และเมื่อทำการปรับขอบเขตไปเรื่อย ๆ จะพบว่าขอบเขตการค้นหาในกรณีที่ 4 ค่าของพารามิเตอร์ทั้ง 2 อยู่ในช่วงของขอบเขตและมีค่า W น้อยที่สุด ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ขอบเขตของกรณิดังกล่าวในการค้นหาโดยวิธี ATS

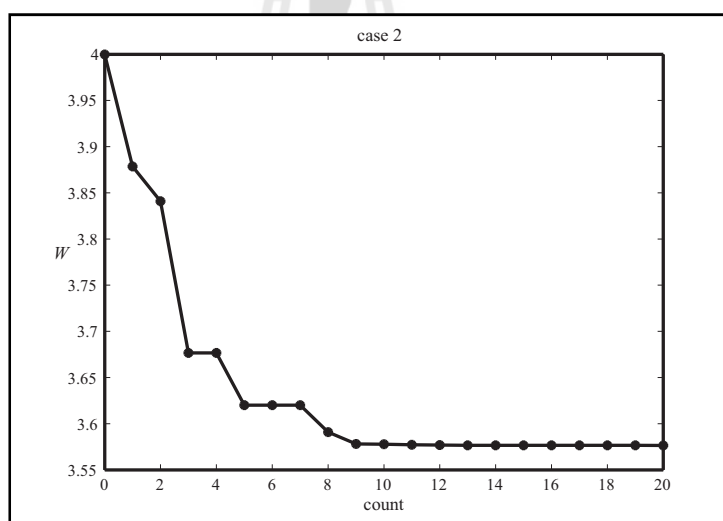
ตารางที่ 3.2 ผลการกำหนดขอบเขตการค้นหา กรณีที่ 1 ถึงกรณีที่ 4

พารามิเตอร์		K_{st}	K_h	W
กรณี				
กรณีที่ 1	limits	$[1 \times 10^{-9}, 1 \times 10^{-6}]$	$[1 \times 10^{-4}, 1 \times 10^{-1}]$	3.5800
	result	8.67×10^{-7}	1.00×10^{-4}	
กรณีที่ 2	limits	$[1 \times 10^{-9}, 1 \times 10^{-6}]$	$[1 \times 10^{-5}, 1 \times 10^{-1}]$	3.5765
	result	8.67×10^{-7}	1.00×10^{-5}	
กรณีที่ 3	limits	$[5 \times 10^{-7}, 1 \times 10^{-6}]$	$[1 \times 10^{-8}, 1 \times 10^{-5}]$	3.5764
	result	8.67×10^{-7}	1.00×10^{-8}	
กรณีที่ 4	limits	$[5 \times 10^{-7}, 1 \times 10^{-6}]$	$[7 \times 10^{-9}, 1 \times 10^{-7}]$	3.5764
	result	8.67×10^{-7}	4.46×10^{-8}	

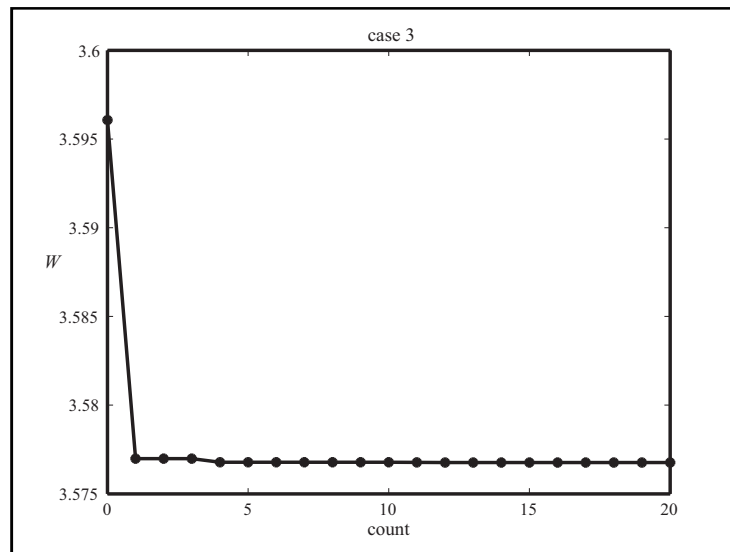
การปรับขอบเขตในแต่ละกรณีจะได้กราฟการลู่เข้าดังรูปที่ 3.9 ถึง 3.12 เมื่อพิจารณาจากกราฟจะสังเกตได้ว่าการลู่เข้าหาคำตอบเป็นไปอย่างรวดเร็วและรูปที่ 3.13 คือ กราฟการลู่เข้ารวมของทั้ง 4 กรณี เปรียบเทียบกัน แสดงได้ดังนี้



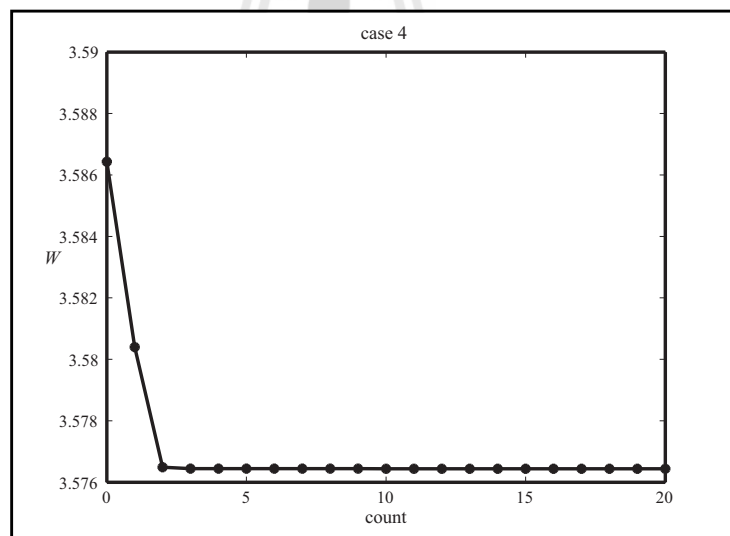
รูปที่ 3.9 การลู่เข้าหาคำตอบ W ของขอบเขตการค้นหาคณณที่ 1



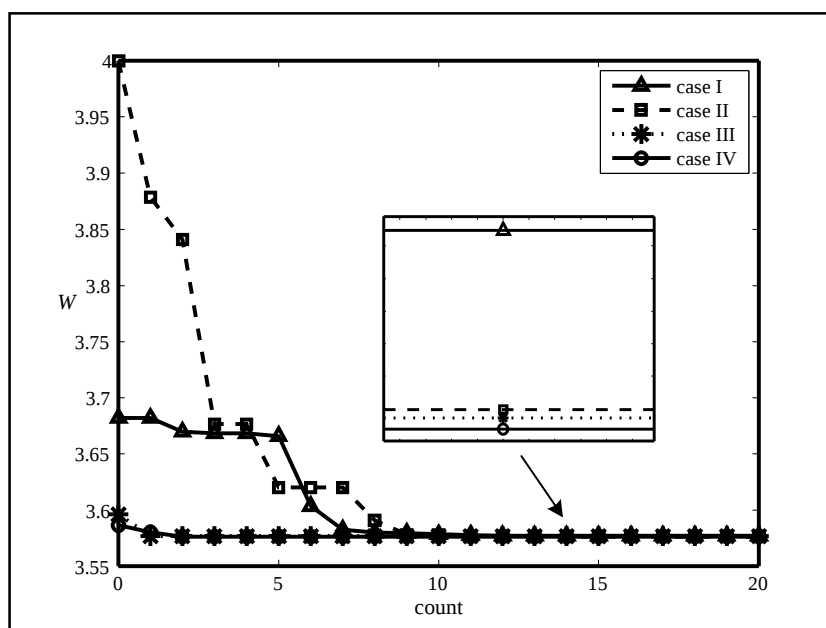
รูปที่ 3.10 การลู่เข้าหาคำตอบ W ของขอบเขตการค้นหาคณณที่ 2



รูปที่ 3.11 การหาค่าตอบ W ของขอบเขตการค้นหาคณณที่ 3



รูปที่ 3.12 การหาค่าตอบ W ของขอบเขตการค้นหาคณณที่ 4



รูปที่ 3.13 การลู่เข้าหาคำตอบ W ของขอบเขตการค้นหา

3.3.3 การทดสอบพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว

การค้นหาด้วยวิธี ATS ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญด้วยกัน 4 ค่า ได้แก่ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง รัศมีเริ่มต้น และตัวปรับลดครีสมิ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะส่งผลให้การค้นหาด้วยวิธี ATS มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ดังนั้นสามารถพิจารณาผลการทดสอบพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่า โดยใช้ขอบเขตของกรณีศึกษาที่ 4 ได้ตามตารางที่ 3.3 ถึง ตารางที่ 3.6 ดังนี้

ตารางที่ 3.3 การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น

ค่าที่ทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่					ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 คำตอบ							
ค่า W	3.5765	3.5764	3.5765	3.5765	3.5764	3.5765	5.5×10^{-5}
จำนวนรอบ	3	3	3	1	4	3	1.1

ตารางที่ 3.3 การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น (ต่อ)

ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	SD
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ							
ค่า W	3.5765	3.5765	3.5765	3.5765	3.5765	3.5765	0
จำนวนรอบ	6	1	1	1	6	3	2.74
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 30 คำตอบ							
ค่า W	3.5764	3.5765	3.5765	3.5766	3.5764	3.5765	8.4×10^{-5}
จำนวนรอบ	6	2	6	3	1	4	2.3
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 40 คำตอบ							
ค่า W	3.5764	3.5765	3.5765	3.5765	3.5765	3.5765	4.5×10^{-5}
จำนวนรอบ	5	1	6	1	2	3	3.28
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำตอบ							
ค่า W	3.5765	3.5764	3.5764	3.5766	3.5765	3.5765	8.4×10^{-5}
จำนวนรอบ	1	3	4	6	1	3	2.12
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 60 คำตอบ							
ค่า W	3.5765	3.5764	3.5764	3.5765	3.5765	3.5764	5.5×10^{-5}
จำนวนรอบ	1	7	2	2	1	2	2.51

ตารางที่ 3.4 การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง

ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	SD
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ							
ค่า W	3.5765	3.5765	3.5764	3.5766	3.5766	3.5765	8.4×10^{-5}
จำนวนรอบ	6	4	7	9	7	7	1.82
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 คำตอบ							
ค่า W	3.5766	3.5765	3.5765	3.5764	3.5765	3.5765	7.1×10^{-5}
จำนวนรอบ	4	7	9	2	3	5	2.92
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 30 คำตอบ							
ค่า W	3.5765	3.5765	3.5765	3.5764	3.576	3.5765	7.1×10^{-5}
จำนวนรอบ	6	3	1	3	6	4	2.17
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 40 คำตอบ							
ค่า W	3.5765	3.5765	3.5764	3.5766	3.5765	3.5765	7.1×10^{-5}
จำนวนรอบ	7	1	1	1	8	4	4.71
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 50 คำตอบ							
ค่า W	3.5765	3.5764	3.5766	3.5764	3.5765	3.5765	8.4×10^{-5}
จำนวนรอบ	2	2	3	3	3	3	0.55
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 60 คำตอบ							
ค่า W	3.5765	3.576	3.5766	3.5765	3.5764	3.5765	8.4×10^{-5}
จำนวนรอบ	2	5	4	3	5	4	1.3

ตารางที่ 3.5 การทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น

ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	SD
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1							
ค่า W	3.5764	3.5765	3.5764	3.5764	3.574	3.5764	4.5×10^{-5}
จำนวนรอบ	1	6	2	6	4	4	2.28
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 2							
ค่า W	3.5765	3.5764	3.5765	3.5764	3.5765	3.5765	5.5×10^{-5}
จำนวนรอบ	4	4	1	6	5	4	1.87
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 3							
ค่า W	3.5765	3.5765	3.5766	3.5764	3.5765	3.5765	7.1×10^{-5}
จำนวนรอบ	2	7	1	1	5	3	2.68
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 4							
ค่า W	3.5764	3.5765	3.5764	3.5766	3.5765	3.5765	8.4×10^{-5}
จำนวนรอบ	1	7	1	8	6	5	2.88
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 5							
ค่า W	3.5764	3.5765	3.5765	3.5765	3.5765	3.5765	4.5×10^{-5}
จำนวนรอบ	7	2	6	6	1	4	2.7
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 6							
ค่า W	3.5764	3.5765	3.5764	3.5765	3.5764	3.5764	5.5×10^{-5}
จำนวนรอบ	3	6	1	1	1	2	2.19

ตารางที่ 3.6 การทดสอบค่าปรับลดครีมี

ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	SD
ค่าตัวปรับลดครีมีเท่ากับ 1.1							
ค่า W	3.5766	3.5765	3.5766	3.5764	3.5765	3.5765	8.4×10^{-5}
จำนวนรอบ	3	1	2	1	1	2	0.89
ค่าตัวปรับลดครีมีเท่ากับ 1.2							
ค่า W	3.5764	3.5765	3.5764	3.5765	3.5764	3.5764	5.5×10^{-5}
จำนวนรอบ	1	4	1	2	2	2	1.22
ค่าตัวปรับลดครีมีเท่ากับ 1.3							
ค่า W	3.5764	3.5766	3.5765	3.5765	3.5765	3.5765	7.1×10^{-5}
จำนวนรอบ	4	3	4	4	1	3	1.3
ค่าตัวปรับลดครีมีเท่ากับ 1.4							
ค่า W	3.5764	3.5764	3.5764	3.5766	3.5765	3.5765	9.0×10^{-5}
จำนวนรอบ	3	1	3	1	1	2	1.76
ค่าตัวปรับลดครีมีเท่ากับ 1.5							
ค่า W	3.5765	3.5765	3.5764	3.5764	3.5765	3.5765	5.5×10^{-5}
จำนวนรอบ	3	3	3	3	1	3	0.89
ค่าตัวปรับลดครีมีเท่ากับ 1.6							
ค่า W	3.5765	3.5764	3.5764	3.5764	3.5764	3.5764	4.5×10^{-5}
จำนวนรอบ	1	3	3	3	3	3	0.89

จากตารางการทดสอบพารามิเตอร์ของ ATS ตามตารางที่ 3.3 ถึง ตารางที่ 3.6 ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การพิจารณาเลือกค่าพารามิเตอร์ และส่วนที่ 2 การพิจารณาเกี่ยวกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพารามิเตอร์ที่เลือกมา ซึ่งจะอธิบายได้ดังนี้

ส่วนที่ 1 การพิจารณาเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

การเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมพิจารณาจากค่า W ควบคู่ไปกับจำนวนรอบสามารถอธิบายได้ดังนี้

- จากตารางที่ 3.3 สังเกตได้ว่าค่า W ในกรณีจำนวนคำตอบเริ่มต้น 60 คำตอบ มีค่าน้อยที่สุดและจำนวนรอบก็น้อยที่สุดด้วย จึงเลือกใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 60 คำตอบ

- จากตารางที่ 3.4 พบว่าค่า W มีค่าเท่ากันหมดทุกจำนวนคำตอบรอบข้าง จึงมาพิจารณาที่จำนวนรอบ ซึ่งพบว่าจำนวนรอบของจำนวนคำตอบรอบข้าง 50 คำตอบ มีค่าน้อยที่สุด จึงเลือกใช้จำนวนคำตอบรอบข้างค่านี้

- จากตารางที่ 3.5 สังเกตได้ว่าค่า W ในกรณีค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1 และค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 6 มีค่าเท่ากันและน้อยที่สุด จึงพิจารณาที่จำนวนรอบเป็นลำดับต่อมา พบว่าค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 6 มีจำนวนรอบน้อยที่สุด จึงเลือกใช้ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 6

- ในทำนองเดียวกัน ตารางที่ 3.6 ค่าปรับลดรัศมีจะใช้หลักการเดียวกันกับการเลือกค่ารัศมีเริ่มต้น จึงได้ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.2

ส่วนที่ 2 การพิจารณาเกี่ยวกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation : SD)

การพิจารณาค่า SD คือ การพิจารณาว่าข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมีการแกว่งหรือกระจายตัวมากน้อยเท่าใด หากข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ใกล้ค่าเฉลี่ยมาก ค่า SD จะมีค่าน้อย ในทางกลับกันถ้าข้อมูลแต่ละจุดอยู่ห่างไกลจากค่าเฉลี่ย ค่า SD จะมีค่ามาก และเมื่อข้อมูลทุกตัวมีค่าเท่ากันหมด ค่า SD จะเท่ากับศูนย์ คือไม่มีการกระจายตัว การพิจารณาค่า SD ของแต่ละตาราง สามารถอธิบายได้ดังนี้

- ตารางที่ 3.3 เลือกใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 60 คำตอบ ค่า SD ของค่า W เท่ากับ 5.5×10^{-5} ซึ่งมีค่าน้อยมาก ดังนั้นข้อมูลของค่า W จึงมีการกระจายตัวไม่มากนัก และค่า SD ของจำนวนรอบ เท่ากับ 2.51 จะเห็นว่าข้อมูลมีการกระจายตัว เพราะข้อมูลบางจุดมีค่ากระโดดขึ้นมากกว่าข้อมูลจุดอื่น

- ตารางที่ 3.4 เลือกจำนวนคำตอบรอบข้าง 50 คำตอบ ค่า SD ของค่า W เท่ากับ 8.4×10^{-5} มีค่าน้อยมากเช่นกัน ดังนั้นข้อมูลของค่า W จึงมีการกระจายตัวน้อยมาก และค่า SD ของจำนวนรอบ เท่ากับ 0.55 พบว่าข้อมูลยังมีการกระจายตัว แต่น้อยมาก

- ตารางที่ 3.5 เลือกใช้ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 6 ค่า SD ของค่า W เท่ากับ 5.5×10^{-5} มีค่าน้อยมาก ดังนั้นค่า W จึงแทบไม่มีการกระจายตัว และค่า SD ของจำนวนรอบ เท่ากับ 2.19 ข้อมูลมีการกระจายตัว เพราะข้อมูลบางจุดมีค่าห่างจากค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด

- ตารางที่ 3.6 ใช้ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.2 ค่า SD ของค่า W เท่ากับ 5.5×10^{-5} มีค่าน้อยมาก ดังนั้นค่า W จึงแทบไม่มีการกระจายตัวเช่นเดียวกับตารางอื่น ๆ ที่กล่าวไปแล้ว และค่า SD ของจำนวนรอบ เท่ากับ 1.22 ข้อมูลมีการกระจายตัว แต่ข้อมูลมีค่าใกล้เคียงกันค่า SD จึงมีค่าไม่มาก

การเลือกค่าพารามิเตอร์ของ ATS ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ให้ความสำคัญกับค่า W และจำนวนรอบเป็นสำคัญ ด้วยเหตุนี้จึงพิจารณาผลจากส่วนที่ 1 เป็นสำคัญและจากการพิจารณา

ในส่วนที่ 1 สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้ จำนวนคำตอบเริ่มต้น เท่ากับ 60 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้าง เท่ากับ 50 คำตอบ ค่ารัศมีเริ่มต้น เท่ากับ 6 และค่าปรับลดรัศมี เท่ากับ 1.2 จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวของ ATS ไปทดสอบหาพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียจำนวน 1000 รอบ/ครั้ง เพื่อหาคำตอบสุดท้าย ซึ่งพิจารณาได้จากตารางที่ 3.7 ดังนี้

ตารางที่ 3.7 ผลจากการทดสอบจำนวน 1000 รอบ/ครั้ง

จำนวนครั้ง	K_{st}	K_h	W
1	8.68×10^{-7}	2.89×10^{-8}	3.5764
2	8.68×10^{-7}	5.1×10^{-8}	3.5764
3	8.68×10^{-7}	5.34×10^{-8}	3.5764
4	8.68×10^{-7}	4.28×10^{-8}	3.5764
5	8.68×10^{-7}	6.23×10^{-8}	3.5764
ค่าเฉลี่ย	8.68×10^{-7}	4.77×10^{-8}	3.5764

จากตารางที่ 3.7 ทำการทดสอบ 1000 รอบ จำนวน 5 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย จึงสรุปได้ว่า ค่า K_{st} เท่ากับ 8.68×10^{-7} และ ค่า K_h เท่ากับ 4.77×10^{-8} แต่ก่อนที่จะนำค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 ไปใช้กับสมการกำลังงานสูญเสีย จำเป็นต้องทำการตรวจสอบผลการค้นหาซึ่งจะอธิบายไว้ในหัวข้อต่อไป

3.3.4 การตรวจสอบผลการค้นหา

การตรวจสอบผลการค้นหา คือ การนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธี ATS ดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.3.3 ตารางที่ 3.7 มาทำการทดสอบความถูกต้องกับข้อมูล 90% และ 110% ของความเร็วพิกัด ซึ่งข้อมูล 2 ชุดนี้ไม่ได้นำไปใช้ในการค้นหาด้วยวิธี ATS การตรวจสอบทำได้โดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปแทนลงในสมการกำลังงานสูญเสีย สมการที่ (2.25) แล้วนำค่ากำลังงานสูญเสียที่ได้จากการคำนวณไปเปรียบเทียบกับค่ากำลังงานสูญเสียที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ตามตารางที่ (3.1) ซึ่งผลการตรวจสอบความถูกต้องแสดงได้ดังตารางที่ 3.8 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบความถูกต้องของคำตอบจากการระบุเอกลักษณ์

% ของความเร็วพิกัด	$P_{loss(experiment)}$ (W)	$P_{loss(computation)}$ (W)	% error
90	166.11	166.93	0.49
110	149.76	143.77	4

จากตารางที่ 3.8 ค่า % error จากการเปรียบเทียบของข้อมูลทั้ง 2 ชุด อยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธี ATS ตามตารางที่ 3.7 และเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 ค่า แทนลงในสมการที่ (2.25) จะเป็นดังสมการที่ (3.8) ดังนี้

$$P_{loss} = 15.99i_a^2 + 735.43i_f^2 + 2i_a + (7.92 \times 10^{-5})i_a^2\omega^2 + (4.77 \times 10^{-8})i_f^2\omega \quad (3.8)$$

จากสมการที่ (3.8) สังเกตได้ว่ากำลังงานสูญเสียจะขึ้นอยู่กับกระแสสนาม กระแสอาร์มเจอร์ และความเร็วรอบของมอเตอร์ ดังนั้นการประหยัดพลังงานในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการปรับลดกำลังงานสูญเสียจากกระแสสนามเป็นหลัก ส่วนพารามิเตอร์ที่เหลือจะขึ้นอยู่กับสถานะการใช้งานของมอเตอร์ โดยเนื้อหาในส่วนนี้จะนำเสนอไว้ในบทต่อไป

3.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ คือ วิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว ซึ่งเป็นอัลกอริทึมการค้นหาที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง โดยจะพบว่า การกำหนดขอบเขตของการค้นหา และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวิธี ATS ให้เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญต่อกระบวนการค้นหา โดยค่าพารามิเตอร์ของ ATS ที่เหมาะสมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้แก่ จำนวนคำตอบเริ่มต้น เท่ากับ 60 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้าง เท่ากับ 50 คำตอบ ค่ารัศมีเริ่มต้น เท่ากับ 6 และค่าปรับลดรัศมี เท่ากับ 1.2 โดยค่าของพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธี ATS เมื่อนำไปแทนค่าลงในสมการกำลังงานสูญเสียแล้วพบว่าค่ากำลังงานสูญเสียที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังงานสูญเสียที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ ดังนั้นจากการดำเนินงานทั้งหมดในการหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียด้วยวิธี ATS ให้ผลเป็นที่น่าพอใจอย่างยิ่ง และจะนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้เพื่อคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียเพื่อการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนที่ใช้วิธีฐานแบบจำลอง ซึ่งจะนำเสนอต่อไปในบทที่ 4

บทที่ 4

การประหยัดพลังงานการขับเคลื่อนที่ใช้วิธีฐานแบบจำลอง

4.1 บทนำ

การหาวิธีประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น คือ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงคิดค้นวิธีการประหยัดพลังงานขึ้น โดยจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสมการคำนวณของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เป็นฐานในการคำนวณเพื่อให้เกิดการประหยัดพลังงาน โดยจะเรียกวิธีประหยัดพลังงานที่คิดค้นใหม่นี้ว่า วิธีฐานแบบจำลอง (Model Based Method : MBM) นอกจากนี้จะนำเสนอผลการคำนวณพลังงานไฟฟ้าด้วยวิธีฐานแบบจำลอง และการเปรียบเทียบผลการคำนวณดังกล่าวกับการคำนวณด้วยวิธีดั้งเดิม เพื่อแสดงให้เห็นว่าวิธีฐานแบบจำลองสามารถประหยัดพลังงานได้

4.2 การใช้วิธีฐานแบบจำลองสำหรับประหยัดพลังงาน

วิธีฐานแบบจำลองสำหรับการประหยัดพลังงาน จะใช้วิธีการควบคุมมอเตอร์ทั้งการควบคุมกระแสสนามและการควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์ควบคู่กัน โดยการควบคุมกระแสสนามมีวัตถุประสงค์เพื่อประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อน ส่วนการควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมความเร็วให้ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งการคำนวณจะมีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

4.2.1 การหาจุดการทำงานสำหรับประหยัดพลังงาน

การหาจุดการทำงานเพื่อประหยัดพลังงาน จะคำนวณจากสมการพื้นฐานของมอเตอร์ซึ่งอธิบายไว้ในบทที่ 2 โดยเริ่มต้นจากการแทนค่ากระแสสนามตั้งแต่ 0.1-0.3 A จำนวน 30 ค่า ลงในสมการเพื่อคำนวณหา v_f , i_a , v_a และ P_{loss} ต่าง ๆ ที่ทำให้ได้ค่าความเร็วรอบและแรงบิดตามที่กำหนด โดยได้ยกตัวอย่างการคำนวณที่ความเร็วรอบ 500 rpm และแรงบิด 0.6 N·m ส่วนที่ค่าความเร็วรอบและแรงบิดอื่น ๆ ได้แสดงผลการคำนวณไว้ในภาคผนวก ข

- ตัวอย่างการคำนวณหาจุดที่เกิดการประหยัดพลังงาน ที่ความเร็วรอบ 500 rpm และ แรงบิด 0.6 N·m สามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณ ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 และบทที่ 3

ขั้นที่ 1 กำหนดค่าความเร็วรอบและแรงบิด ตามที่ต้องการ

ขั้นที่ 2 กำหนดค่ากระแสสนาม ให้มีค่า 0.1-0.3 A จำนวน 30 ค่า

ขั้นที่ 3 คำนวณค่ากระแสอาร์เมเจอร์ ตามสมการที่ (4.1) คือ

$$i_a = \frac{T_L}{K i_f} \quad (4.1)$$

ขั้นที่ 4 คำนวณค่าแรงดันเหนี่ยวนำต้านกลับ จากสมการที่ (4.2) คือ

$$e_g = K i_f \omega \quad (4.2)$$

ขั้นที่ 5 คำนวณค่าแรงดันสนามและแรงดันอาร์เมเจอร์ จากสมการที่ (4.3) และ (4.4) ตามลำดับ ดังนี้

$$v_f = i_f R_f \quad (4.3)$$

$$v_a = i_a R_a + e_g \quad (4.4)$$

ขั้นที่ 6 คำนวณค่ากำลังงานสูญเสีย จากสมการที่ (4.5) ดังนี้

$$P_{loss} = 15.99 i_a^2 + 735.43 i_f^2 + 2 i_a + (7.92 \times 10^{-5}) i_a^2 \omega^2 + (4.77 \times 10^{-8}) i_f^2 \omega \quad (4.5)$$

จากการคำนวณทั้ง 6 ขั้นตอน จะได้ผลการคำนวณที่ความเร็วรอบ 500 rpm และแรงบิด 0.6 N·m ดังตารางที่ 4.1 ดังต่อไปนี้

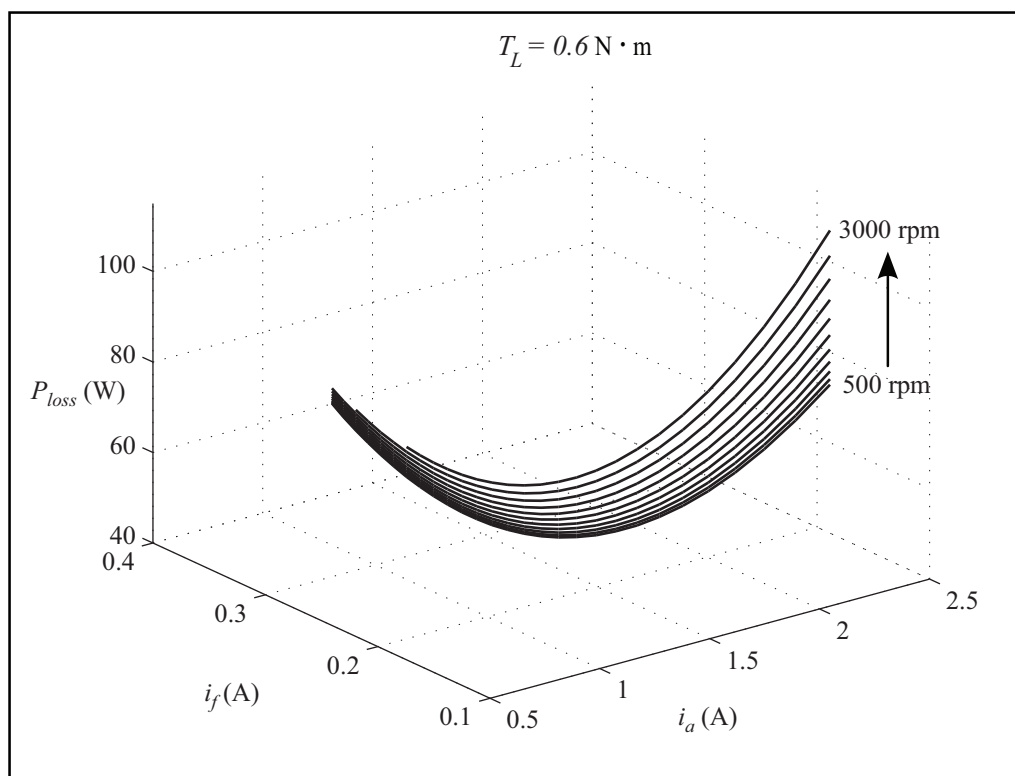
ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณที่ความเร็วรอบ 500 rpm และแรงบิด 0.6 N·m

i_f (A)	v_f (V)	i_a (A)	v_a (V)	P_{loss} (W)
0.1138	83.6869	2.1176	48.6957	86.4314

ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณที่ความเร็วรอบ 500 rpm และแรงบิด 0.6 N · m (ต่อ)

i_f (A)	v_f (V)	i_a (A)	v_a (V)	P_{loss} (W)
0.1207	88.7588	1.9966	47.6600	79.3104
0.1277	93.8307	1.8886	46.8335	73.5583
0.1345	98.9027	1.7918	46.1839	68.9166
0.1414	103.9746	1.7044	45.6855	65.1884
0.1483	109.0465	1.6251	45.3171	62.2213
0.1552	114.1184	1.5529	45.0613	59.8959
0.1621	119.1904	1.4868	44.9038	58.1174
0.1690	124.2623	1.4261	44.8326	56.8100
0.1759	129.3342	1.3702	44.8375	55.9126
0.1828	134.4062	1.3185	44.9099	55.3750
0.1897	139.4781	1.2705	45.0424	55.1562
0.1966	144.5500	1.2260	45.2287	55.2221
0.2035	149.6220	1.1844	45.4633	55.5443
0.2104	154.6939	1.1456	45.7415	56.0990
0.2172	159.7658	1.1092	46.0592	56.8660
0.2241	164.8378	1.0751	46.4126	57.8282
0.2310	169.9097	1.0430	46.7986	58.9710
0.2379	174.9816	1.0128	47.2143	60.2819
0.2448	180.0536	0.9842	47.6573	61.7500
0.2517	185.1255	0.9573	48.1253	63.3661
0.2586	190.1974	0.9317	48.6163	65.1220
0.2655	195.2693	0.9075	49.1285	67.0106
0.2724	200.3413	0.8846	49.6602	69.0257
0.2793	205.4132	0.8627	50.2101	71.1618
0.2862	210.4851	0.8419	50.7769	73.4142
0.2931	215.5571	0.8221	51.3593	75.7785
0.3000	220.6290	0.8032	51.9562	78.2511

จากผลการคำนวณในตารางที่ 4.1 พบว่ากำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด เท่ากับ 55.1562 W ในสภาวะกระแสสนาม เท่ากับ 0.1897 A และเมื่อนำไปพล็อตกราฟดูความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสนาม กระแสอาร์เมเจอร์และกำลังงานสูญเสีย จะได้ดังรูปที่ 4.1 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 กราฟจุดต่ำสุดของกำลังงานสูญเสียเมื่อ แรงบิด โหลด 0.6 N · m ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.1 คือ กราฟแสดงจุดต่ำสุดของกำลังงานสูญเสียเมื่อคำนวณโดยกำหนดแรงบิด เท่ากับ 0.6 N · m และเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วรอบตั้งแต่ 500-3000 rpm เพิ่มขึ้นทีละ 250 rpm ซึ่งจุดต่ำสุดในกราฟ หมายถึง จุดที่กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ซึ่งก็คือ จุดที่เกิดการประหยัดพลังงาน

4.2.2 การคำนวณกำลังงานอินพุต

จากหัวข้อ 4.2.1 เมื่อทำการคำนวณที่ค่าความเร็วรอบและแรงบิดที่แตกต่างกันไป จะได้ค่าต่าง ๆ ของจุดที่เกิดการประหยัดพลังงาน ค่าที่ได้ คือ ค่าแรงดันสนาม แรงดันอาร์เมเจอร์ กระแสสนามและกระแสอาร์เมเจอร์ ซึ่งค่าเหล่านี้จะนำไปคำนวณค่ากำลังงานอินพุต ตามสมการที่ (4.6) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบในขั้นตอนต่อไปและได้แสดงผลจากการคำนวณแสดงไว้ดังตารางที่ 4.2 จากตารางนี้ได้กำหนดค่าความเร็วรอบและแรงบิดต่าง ๆ คือ กำหนดค่าความเร็วรอบ เท่ากับ

500-3000 rpm และกำหนดค่าแรงบิด เท่ากับ $0.2\text{--}1.4\text{ N}\cdot\text{m}$ และ $1.5\text{ N}\cdot\text{m}$ ซึ่งที่ค่าแรงบิด $1.5\text{ N}\cdot\text{m}$ นี้คือ ค่าพิกัดของมอเตอร์ โดยต่อไปจะเรียกข้อมูลเหล่านี้ว่า จุดทดสอบ

$$P_{in} = v_a i_a + v_f i_f \quad (4.6)$$

ตารางที่ 4.2 จุดที่เกิดการประหยัพลังงานในแต่ละความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์

T_L (N·m)	N (rpm)	v_a (V)	i_a (A)	v_f (V)	i_f (A)	P_{in} (W)
0.2	500	26.1225	0.7059	83.6869	0.1138	27.9617
	750	33.5405	0.7059	83.6869	0.1138	33.1976
	1000	40.9584	0.7059	83.6869	0.1138	38.4336
	1250	48.3764	0.7059	83.6869	0.1138	43.6696
	1500	55.7943	0.7059	83.6869	0.1138	48.9056
	1750	63.2123	0.7059	83.6869	0.1138	54.1416
	2000	63.2123	0.7059	83.6869	0.1138	54.1416
	2250	81.4494	0.6655	88.7588	0.1207	64.9184
	2500	89.3169	0.6655	88.7588	0.1207	70.1544
	2750	97.1844	0.6655	88.7588	0.1207	75.3904
	3000	105.0519	0.6655	88.7588	0.1207	80.6263
0.4	500	36.7845	1.0353	114.1184	0.1552	55.7892
	750	46.8998	1.0353	114.1184	0.1552	66.2611
	1000	57.0152	1.0353	114.1184	0.1552	76.7331
	1250	68.6741	0.9912	119.1904	0.1621	87.3867
	1500	79.2390	0.9912	119.1904	0.1621	97.8587
	1750	89.8040	0.9912	119.1904	0.1621	108.3307
	2000	100.3689	0.9912	119.1904	0.1621	118.8026
	2250	114.3332	0.9507	124.2623	0.1690	129.6975
	2500	125.3477	0.9507	124.2623	0.1690	140.1694
	2750	136.3622	0.9507	124.2623	0.1690	150.6414
	3000	147.3767	0.9507	124.2623	0.1690	161.1133

ตารางที่ 4.2 จุดที่เกิดการประหยัพลังงานในแต่ละความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ (ต่อ)

T_L (N · m)	N (rpm)	v_a (V)	i_a (A)	v_f (V)	i_f (A)	P_{in} (W)
0.6	500	45.0424	1.2705	139.4781	0.1897	83.6807
	750	57.4056	1.2705	139.4781	0.1897	99.3887
	1000	70.8543	1.2260	144.5500	0.1966	115.2759
	1250	83.6672	1.2260	144.5500	0.1966	130.9838
	1500	96.4800	1.2260	144.5500	0.1966	146.6918
	1750	109.2928	1.2260	144.5500	0.1966	162.3998
	2000	125.0377	1.1844	149.6220	0.2035	178.5348
	2250	138.3001	1.1844	149.6220	0.2035	194.2428
	2500	151.5625	1.1844	149.6220	0.2035	209.9508
	2750	169.1493	1.1456	154.6939	0.2104	226.3108
	3000	182.8612	1.1456	154.6939	0.2104	242.0187
0.8	500	52.1427	1.4334	164.8378	0.2241	111.6890
	750	66.1327	1.4789	159.7658	0.2172	132.5135
	1000	81.3649	1.4334	164.8378	0.2241	153.5770
	1250	95.9761	1.4334	164.8378	0.2241	174.5210
	1500	110.5872	1.4334	164.8378	0.2241	195.4650
	1750	127.6611	1.3906	169.9097	0.2310	216.7852
	2000	142.7218	1.3906	169.9097	0.2310	237.7291
	2250	157.7825	1.3906	169.9097	0.2310	258.6731
	2500	176.6944	1.3503	174.9816	0.2379	280.2291
	2750	192.2046	1.3503	174.9816	0.2379	301.1730
	3000	212.5015	1.3123	180.0536	0.2448	322.9460
1.0	500	58.1491	1.6404	180.0536	0.2448	139.4678
	750	74.1089	1.6404	180.0536	0.2448	165.6478
	1000	91.1484	1.5954	185.1255	0.2517	192.0208
	1250	107.5578	1.5954	185.1255	0.2517	218.2007
	1500	123.9672	1.5954	185.1255	0.2517	244.3807

ตารางที่ 4.2 จุดที่เกิดการประหยัพลังงานในแต่ละความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ (ต่อ)

T_L (N · m)	N (rpm)	v_a (V)	i_a (A)	v_f (V)	i_f (A)	P_{in} (W)
1.0	1750	140.3766	1.5954	185.1255	0.2517	270.5606
	2000	159.7023	1.5529	190.1974	0.2586	297.1872
	2250	176.5613	1.5529	190.1974	0.2586	323.3672
	2500	197.2711	1.5125	195.2693	0.2655	350.2285
	2750	214.5796	1.5125	195.2693	0.2655	376.4084
	3000	217.7474	1.6404	180.0536	0.2448	401.2672
1.2	500	63.8042	1.7691	200.3413	0.2724	167.4519
	750	81.5623	1.7691	200.3413	0.2724	198.8678
	1000	99.3204	1.7691	200.3413	0.2724	230.2837
	1250	117.0786	1.7691	200.3413	0.2724	261.6998
	1500	136.8356	1.7254	205.4132	0.2793	293.4728
	1750	155.0433	1.7254	205.4132	0.2793	324.8888
	2000	173.2510	1.7254	205.4132	0.2793	356.3047
	2250	194.8401	1.6838	210.4851	0.2862	388.3226
	2500	213.4974	1.6838	210.4851	0.2862	419.7386
	2750	219.4167	1.8151	195.2693	0.2655	450.1000
	3000	218.5108	2.0255	174.9816	0.2379	484.2256
1.4	500	68.8867	1.9183	215.5571	0.2931	195.3231
	750	87.9935	1.9183	215.5571	0.2931	231.9750
	1000	107.1004	1.9183	215.5571	0.2931	268.6270
	1250	126.2072	1.9183	215.5571	0.2931	305.2788
	1500	147.3064	1.8742	220.0000	0.3000	342.0762
	1750	166.8628	1.8742	220.0000	0.3000	378.7281
	2000	186.4192	1.8742	220.0000	0.3000	415.3800
	2250	205.9756	0.8742	220.0000	0.3000	246.0562
	2500	217.9848	1.9645	210.4851	0.2862	488.4700
	2750	220.0000	2.1740	190.1974	0.2586	527.4754

ตารางที่ 4.2 จุดที่เกิดการประหยัพลังงานในแต่ละความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ (ต่อ)

T_L (N · m)	N (rpm)	v_a (V)	i_a (A)	v_f (V)	i_f (A)	P_{in} (W)
1.4	3000	220.0000	2.2000	173.5600	0.2400	525.6544
1.5	500	71.2213	2.0080	220.0000	0.3000	209.0146
	750	90.7777	2.0080	220.0000	0.3000	248.2845
	1000	110.3341	2.0080	220.0000	0.3000	287.5544
	1250	129.8905	2.0080	220.0000	0.3000	326.8243
	1500	149.4469	2.0080	220.0000	0.3000	366.0942
	1750	169.0033	2.0080	220.0000	0.3000	405.3640
	2000	188.5597	2.0080	220.0000	0.3000	444.6339
	2250	208.1162	2.0080	220.0000	0.3000	483.9040
	2500	220.0000	2.1048	210.4851	0.2862	523.2994
	2750	220.0000	2.2000	189.3700	0.2600	533.2362
	3000	220.0000	2.2000	173.5600	0.2400	525.6544

หมายเหตุ บรรทัดที่มีแถบแรเงา คือ ค่าแรงดันอาร์มเจอร์เกินค่าพิกัด ต้องควบคุมด้วยวิธีดั้งเดิม

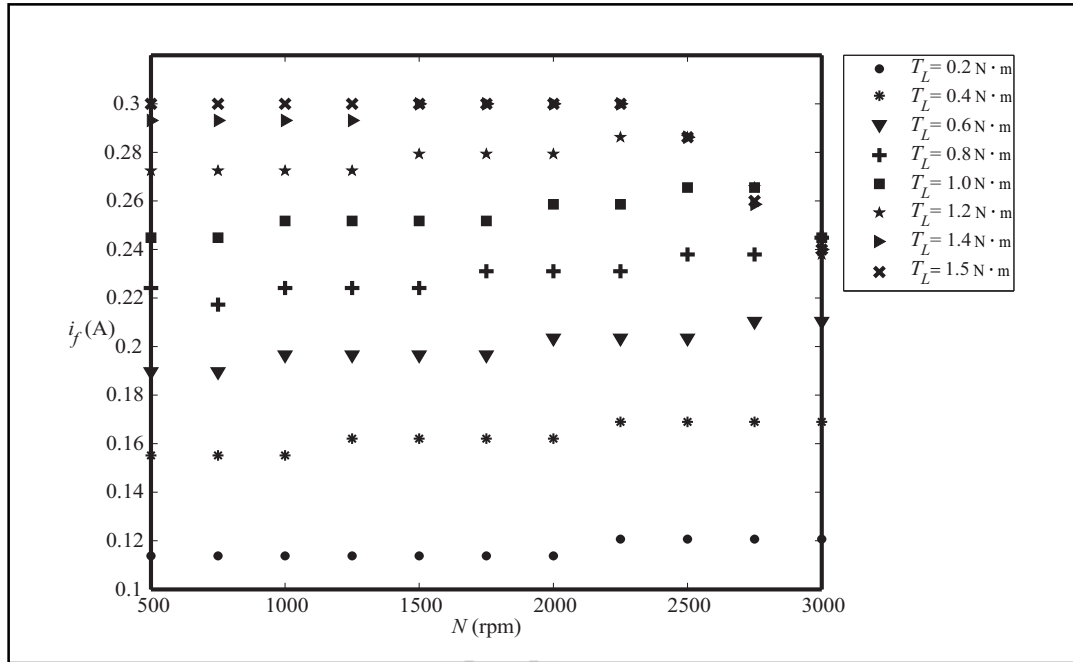
จากตารางที่ 4.2 นำข้อมูลจากการคำนวณไปพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนาม แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 โดยจากรูปที่ 4.2 สังเกตได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนามของแต่ละแรงบิดที่กำหนด มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ขาค่อยการคำนวณเมื่อต้องการค่าที่อยู่นอกเหนือจากจุดที่ทดสอบมา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาสมการเพื่อแทนความสัมพันธ์ดังกล่าว ซึ่งจะอธิบายไว้ในหัวข้อถัดไป

4.2.3 การหาสมการแทนความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนาม

การหาสมการแทนความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนาม มีวัตถุประสงค์ คือ เพื่อประมาณค่าจุดที่เกิดการประหยัพลังงานได้ ไม่ว่าจะกำหนดค่าตามที่ได้ทดสอบมาหรือนอกช่วงของจุดทดสอบ โดยสมการแทนความสัมพันธ์ดังกล่าวจะใช้วิธีการประมาณค่า ซึ่งจะเปรียบเทียบกัน 3 วิธี ดังต่อไปนี้

- วิธีที่ 1 การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression : LR)

การถดถอยเชิงเส้น คือ การแทนชุดข้อมูลด้วยสมการเส้นตรง มีสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.7) ดังนี้



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนาม

$$i_f = a_0 + a_1 N \quad (4.7)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ a_1 และ a_0 หาได้จากสมการที่ (4.8) และ (4.9) ตามลำดับ

$$a_1 = \frac{n \sum N i_f - \sum N \sum i_f}{n \sum N^2 - (\sum N)^2} \quad (4.8)$$

$$a_0 = \overline{i_f} - a_1 \overline{N} \quad (4.9)$$

โดยที่ N คือ ความเร็วรอบ (rpm)

n คือ จำนวนชุดข้อมูล

$\overline{i_f}$ คือ กระแสสนามเฉลี่ย (A)

$\overline{N}$ คือ ความเร็วรอบเฉลี่ย (rpm)

ดังนั้นจากข้อมูลในตารางที่ 4.2 จะได้สมการแทนความสัมพันธ์ด้วยวิธีถดถอยเชิงเส้น ตามจุดทดสอบแรงบิดทั้ง 8 ค่า ดังสมการที่ (4.10) ถึง (4.17) ดังต่อไปนี้

$$T_L = 0.2 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.1102 + (3.514 \times 10^{-6})N \quad (4.10)$$

$$T_L = 0.4 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.1513 + (6.521 \times 10^{-6})N \quad (4.11)$$

$$T_L = 0.6 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.1852 + (8.276 \times 10^{-6})N \quad (4.12)$$

$$T_L = 0.8 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.214 + (9.028 \times 10^{-6})N \quad (4.13)$$

$$T_L = 1.0 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.2444 + (5.2664 \times 10^{-6})N \quad (4.14)$$

$$T_L = 1.2 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.281 - (4.765 \times 10^{-6})N \quad (4.15)$$

$$T_L = 1.4 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.313 - (1.492 \times 10^{-5})N \quad (4.16)$$

$$T_L = 1.5 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.322 - (1.823 \times 10^{-5})N \quad (4.17)$$

จากสมการที่ (4.10) ถึง (4.17) เมื่อแทนค่าความเร็วรอบลงไป จะได้ค่ากระแสสนามที่ทำให้ประหยัดพลังงานและสามารถนำค่ากระแสดังกล่าวไปพล็อตกราฟเทียบกับรูปที่ 4.2 แสดงได้ดังรูปที่ 4.3

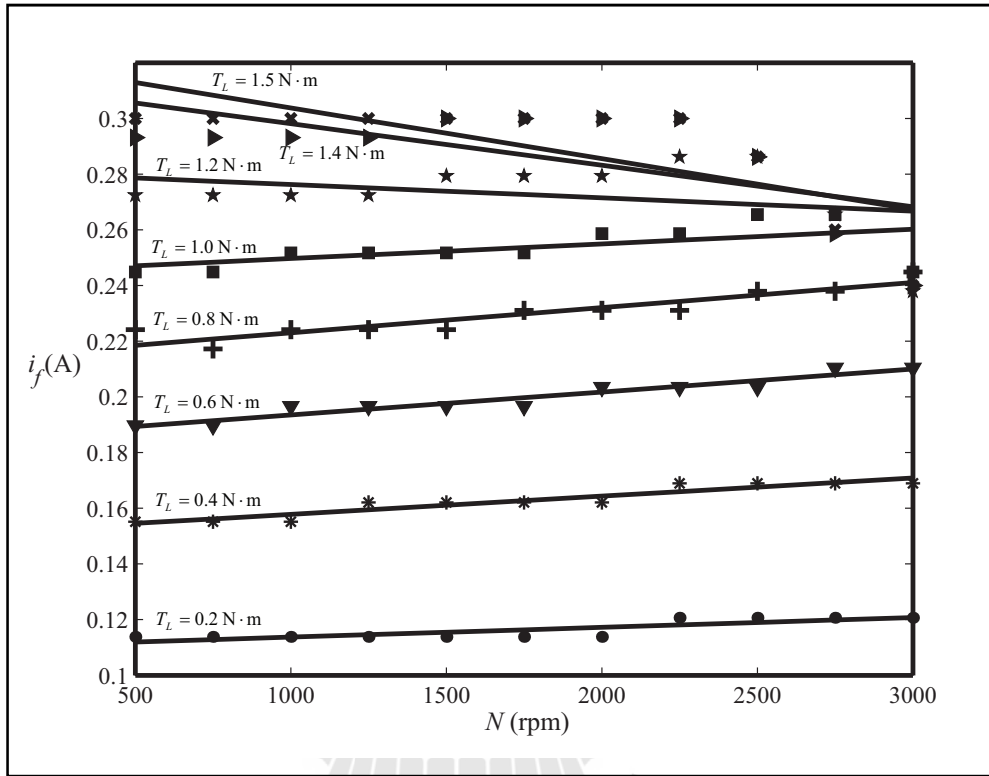
ค่ากระแสนามที่ได้จากวิธีการถดถอยเชิงเส้น เมื่อนำไปคำนวณค่าต่าง ๆ เพื่อให้ได้ค่ากำลังงานอินพุต จะแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 โดยตารางดังกล่าวจะรวมผลการคำนวณจากวิธีการประมาณค่าทั้ง 3 วิธีเข้าด้วยกัน เพื่อให้เห็นการเปรียบเทียบที่ชัดเจนยิ่งขึ้น

- วิธีที่ 2 การถดถอยของพหุนามกำลังสอง (2-order polynomial regression)

การถดถอยของพหุนามกำลังสอง คือ การแทนชุดข้อมูลด้วยสมการพหุนามกำลังสอง จะได้สมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.18) ดังนี้

$$i_f = a_0 + a_1 N + a_2 N^2 \quad (4.18)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ a_0, a_1 และ a_2 หาได้จากสมการที่ (4.19) ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนาม
ที่ประมาณค่าจากวิธีการถดถอยเชิงเส้น

$$\begin{bmatrix} n & \sum N & \sum N^2 \\ \sum N & \sum N^2 & \sum N^3 \\ \sum N^2 & \sum N^3 & \sum N^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum i_f \\ \sum N i_f \\ \sum N^2 i_f \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

ดังนั้นจะได้สมการจากวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสอง ดังสมการที่ (4.20) ถึง (4.27) ดังนี้

$$T_L = 0.2 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.1145 - (2.79 \times 10^{-6})N + (1.8 \times 10^{-9})N^2 \quad (4.20)$$

$$T_L = 0.4 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.1494 + (9.2213 \times 10^{-6})N - (7.716 \times 10^{-10})N^2 \quad (4.21)$$

$$T_L = 0.6 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.1868 + (6.026 \times 10^{-6})N + (6.43 \times 10^{-10})N^2 \quad (4.22)$$

$$T_L = 0.8 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.221 - (1.77 \times 10^{-6})N + (3.086 \times 10^{-9})N^2 \quad (4.23)$$

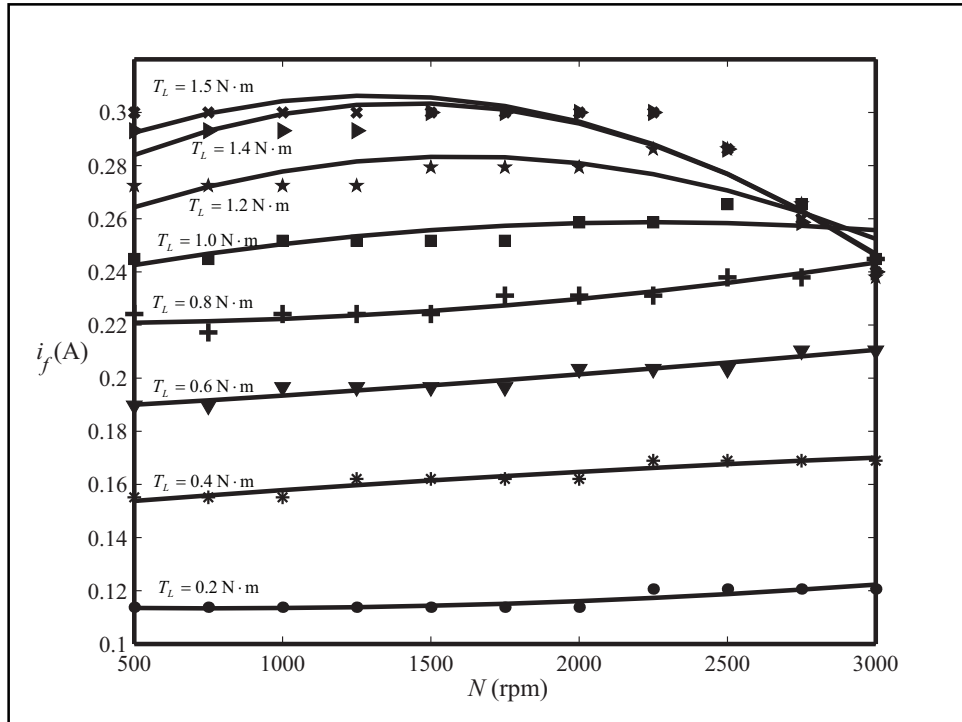
$$T_L = 1.0 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.232 + (2.372 \times 10^{-5})N - (5.272 \times 10^{-9})N^2 \quad (4.24)$$

$$T_L = 1.2 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.243 + (5.059 \times 10^{-5})N - (1.582 \times 10^{-8})N^2 \quad (4.25)$$

$$T_L = 1.4 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.257 + (6.54 \times 10^{-5})N - (2.3 \times 10^{-8})N^2 \quad (4.26)$$

$$T_L = 1.5 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.27 + (5.526 \times 10^{-5})N - (2.1 \times 10^{-8})N^2 \quad (4.27)$$

นำค่าความเร็วรอบแทนลงในสมการจากวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสอง ค่าต่าง ๆ ที่คำนวณได้นำไปเปรียบเทียบกับในตารางที่ 4.3 และนำค่ากระแสนามพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.2 จะได้ดังรูปที่ 4.4 จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่าลักษณะเส้นกราฟจากวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสอง เป็นรูปเส้นโค้งพาราโบลา ซึ่งเส้นกราฟมีทั้งที่ผ่านจุดหรือใกล้เคียงค่าจากการคำนวณและห่างไกลค่าจากการคำนวณ ดังนั้นอาจเกิดความผิดพลาดบ้างเล็กน้อยในบางค่าที่ต้องการ



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนาม
ที่ประมาณค่าจากวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสอง

- วิธีที่ 3 การถดถอยของพหุนามกำลังสาม (3-order polynomial regression)

การถดถอยของพหุนามกำลังสาม คือ การแทนชุดข้อมูลด้วยสมการพหุนามกำลังสาม จะได้สมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.28) ดังนี้

$$i_f = a_0 + a_1 N + a_2 N^2 + a_3 N^3 \quad (4.28)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ a_0, a_1, a_2 และ a_3 หาได้จากสมการที่ (4.29)

$$\begin{bmatrix} n & \sum N & \sum N^2 & \sum N^3 \\ \sum N & \sum N^2 & \sum N^3 & \sum N^4 \\ \sum N^2 & \sum N^3 & \sum N^4 & \sum N^5 \\ \sum N^3 & \sum N^4 & \sum N^5 & \sum N^6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum i_f \\ \sum N i_f \\ \sum N^2 i_f \\ \sum N^3 i_f \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

ดังนั้น จะได้สมการแทนความสัมพันธ์ด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสามตามจุดทดสอบแรงบิดทั้ง 8 ค่า ดังสมการที่ (4.30) ถึง (4.37) ดังต่อไปนี้

$$T_L = 0.2 \text{ N} \cdot \text{m} :$$

$$i_f = 0.12 - (1.71 \times 10^{-5})N + (1.11 \times 10^{-8})N^2 - (1.77 \times 10^{-12})N^3 \quad (4.30)$$

$$T_L = 0.4 \text{ N} \cdot \text{m} :$$

$$i_f = 0.155 - (3.79 \times 10^{-6})N + (7.69 \times 10^{-9})N^2 - (1.612 \times 10^{-12})N^3 \quad (4.31)$$

$$T_L = 0.6 \text{ N} \cdot \text{m} :$$

$$i_f = 0.183 + (1.49 \times 10^{-5})N - (5.13 \times 10^{-9})N^2 + (1.1 \times 10^{-12})N^3 \quad (4.32)$$

$$T_L = 0.8 \text{ N} \cdot \text{m} :$$

$$i_f = 0.224 - (7.88 \times 10^{-6})N + (7.06 \times 10^{-9})N^2 - (7.56 \times 10^{-13})N^3 \quad (4.33)$$

$$T_L = 1.0 \text{ N} \cdot \text{m} :$$

$$i_f = 0.26 - (4.4 \times 10^{-5})N + (3.88 \times 10^{-8})N^2 - (8.39 \times 10^{-12})N^3 \quad (4.34)$$

$$T_L = 1.2 \text{ N} \cdot \text{m} :$$

$$i_f = 0.31 - (1.1 \times 10^{-4})N + (8.83 \times 10^{-8})N^2 - (1.98 \times 10^{-11})N^3 \quad (4.35)$$

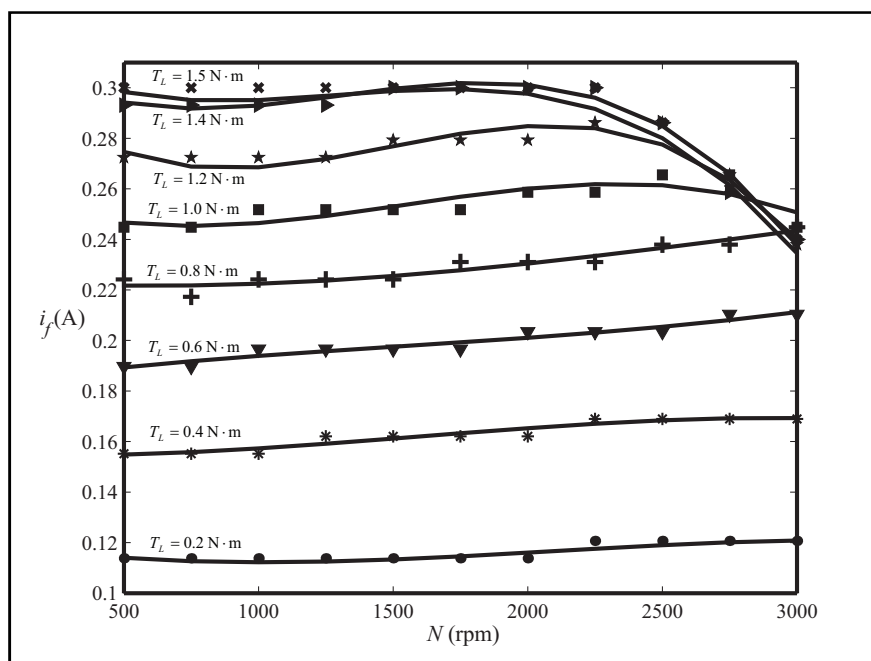
$$T_L = 1.4 \text{ N} \cdot \text{m} :$$

$$i_f = 0.316 - (7.3 \times 10^{-5})N + (6.71 \times 10^{-8})N^2 - (1.715 \times 10^{-11})N^3 \quad (4.36)$$

$$T_L = 1.5 \text{ N} \cdot \text{m} :$$

$$i_f = 0.32 - (6.96 \times 10^{-5})N + (6.02 \times 10^{-8})N^2 - (1.55 \times 10^{-11})N^3 \quad (4.37)$$

จากสมการที่ (4.30) ถึง (4.37) นำค่าความเร็วรอบแทนลงในสมการ ได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 4.3 และได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนามเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.2 จะได้ดังรูปที่ 4.5 ดังนี้



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนาม
ที่ประมาณค่าจากวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสาม

ตารางที่ 4.3 ผลจากการคำนวณด้วยสมการของทั้ง 3 วิธี

T_L (N·m)	N (rpm)	การถดถอยเชิงเส้น			การถดถอยพหุนาม กำลังสอง			การถดถอยพหุนาม กำลังสาม		
		i_f (A)	v_a (V)	P_{in} (W)	i_f (A)	v_a (V)	P_{in} (W)	i_f (A)	v_a (V)	P_{in} (W)
0.2	1000	0.11	40.95	38.43	0.11	40.91	38.43	0.11	40.71	38.40
	2000	0.12	72.09	59.50	0.12	71.62	59.45	0.12	71.58	59.45
	2750	0.12	96.67	75.34	0.12	97.03	75.38	0.12	96.82	75.36
0.4	1000	0.16	57.43	76.77	0.16	57.43	76.77	0.16	57.34	76.76
	2000	0.16	101.34	118.92	0.16	101.51	118.94	0.17	101.74	118.97
	2750	0.17	136.53	150.66	0.17	136.34	150.64	0.17	136.51	150.66

ตารางที่ 4.3 ผลจากการคำนวณด้วยสมการของทั้ง 3 วิธี (ต่อ)

T_L (N·m)	N (rpm)	การถดถอยเชิงเส้น			การถดถอยพหุนาม กำลังสอง			การถดถอยพหุนาม กำลังสาม		
		i_f (A)	v_a (V)	P_{in} (W)	i_f (A)	v_a (V)	P_{in} (W)	i_f (A)	v_a (V)	P_{in} (W)
0.6	1000	0.19	70.36	115.16	0.19	70.36	115.16	0.19	70.43	115.18
	2000	0.20	124.31	178.41	0.20	124.17	178.39	0.20	124.03	178.36
	2750	0.21	167.65	226.06	0.21	167.82	226.09	0.21	167.71	226.07
0.8	1000	0.22	81.19	153.54	0.22	81.08	153.52	0.22	81.09	153.52
	2000	0.23	143.16	237.81	0.23	142.20	237.64	0.23	142.47	237.69
	2750	0.24	192.77	301.27	0.24	193.17	301.34	0.24	193.50	301.40
1	1000	0.25	90.82	191.94	0.25	90.95	191.97	0.25	90.31	191.85
	2000	0.25	158.14	296.92	0.26	159.59	297.17	0.26	160.32	297.31
	2750	0.26	210.44	375.75	0.26	209.50	375.63	0.26	209.86	375.67
1.2	1000	0.28	99.93	230.45	0.28	100.17	230.54	0.27	98.71	230.20
	2000	0.27	169.96	355.92	0.28	173.92	356.42	0.28	175.58	356.76
	2750	0.27	220.00	448.55	0.26	217.58	450.15	0.26	218.19	450.13
1.4	1000	0.30	107.89	268.84	0.30	108.10	268.92	0.29	107.08	268.62
	2000	0.28	179.42	415.23	0.30	184.65	415.33	0.30	186.42	415.57
	2750	0.27	220.00	509.21	0.26	220.00	521.31	0.27	220.00	517.02
1.5	1000	0.30	110.33	287.74	0.30	110.33	287.74	0.30	109.59	287.76
	2000	0.29	182.64	445.29	0.30	187.12	444.82	0.30	187.57	444.81
	2750	0.27	220.00	538.36	0.26	220.00	534.93	0.26	220.00	534.29

จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่ากระแสสนามและแรงดันอาร์เมเจอร์จากทั้ง 3 วิธี มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นเมื่อคำนวณค่ากำลังงานอินพุต ค่าที่ได้จึงใกล้เคียงกันด้วย

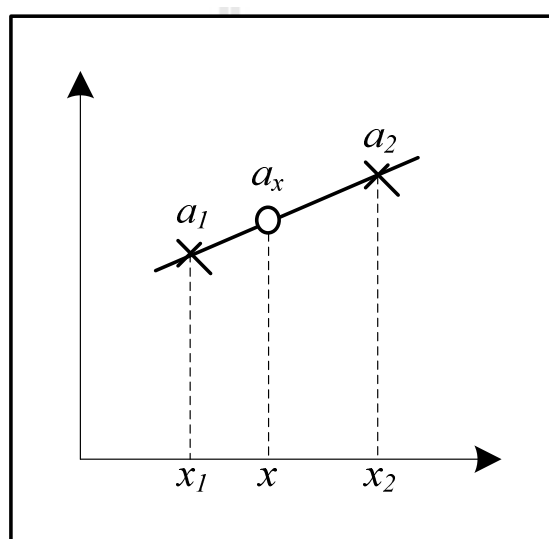
4.2.4 การประมาณค่าในกรณีอยู่นอกจุดทดสอบ

การประมาณค่าในกรณีที่อยู่นอกช่วงจุดทดสอบ จะใช้วิธีการประมาณค่าแบบเชิงเส้น (Linear Interpolation : LI) ซึ่งวิธีการประมาณค่าดังกล่าว คือ การหาค่าระหว่างจุดที่ไม่ตรงกับจุดข้อมูล ยกตัวอย่างเช่น จากรูปที่ 4.6 ต้องการหา a_x เมื่อทราบค่า a_1, a_2, x, x_1 และ x_2 ดังนั้นจากสมการที่ (4.38) คือ

$$\frac{a_2 - a_1}{a_x - a_1} = \frac{x_2 - x_1}{x - x_1} \quad (4.38)$$

ปรับรูปสมการใหม่เพื่อหาค่า a_x จะได้สมการที่ (4.39) ดังนี้

$$a_x = a_1 + \frac{(a_2 - a_1)(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} \quad (4.39)$$



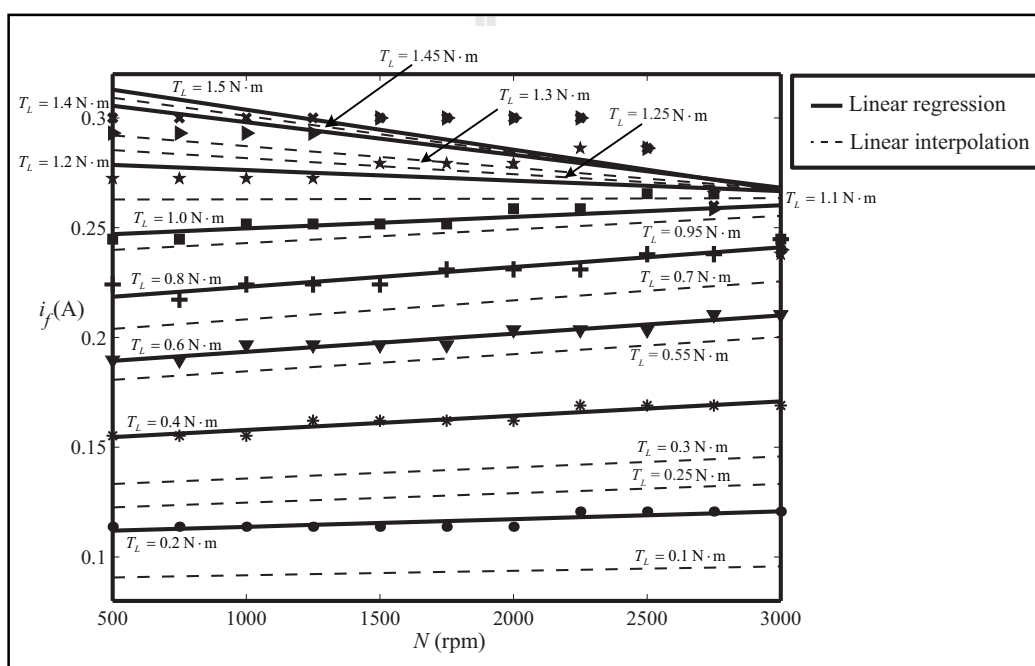
รูปที่ 4.6 ตัวอย่างการประมาณค่าแบบเชิงเส้น

การประมาณค่าแบบเชิงเส้นชุดข้อมูลของจุดทดสอบที่มีอยู่ ได้พิจารณาเป็นคู่ ๆ เช่น ต้องการแรงบิด $0.3 \text{ N} \cdot \text{m}$ ต้องทำการประมาณค่าแรงบิดในช่วง $0.2\text{-}0.4 \text{ N} \cdot \text{m}$ ดังนั้นจึงได้ทำการกำหนดจุดทดสอบนอกช่วงจุดทดสอบเดิมขึ้นมา คือ $0.1, 0.25, 0.3, 0.55, 0.7, 0.95, 1.1, 1.25, 1.3$ และ 1.45 เรียกจุดเหล่านี้ว่าจุดทดสอบนอกช่วง นำจุดทดสอบนอกช่วงเหล่านี้ไปทำการประมาณค่าแบบเชิงเส้นเพื่อนำไปหาสมการมาแทนความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสนามเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.2.3 ซึ่งผลการคำนวณของจุดทดสอบนอกช่วงจากสมการทั้ง 3 วิธี ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 ดังต่อไปนี้

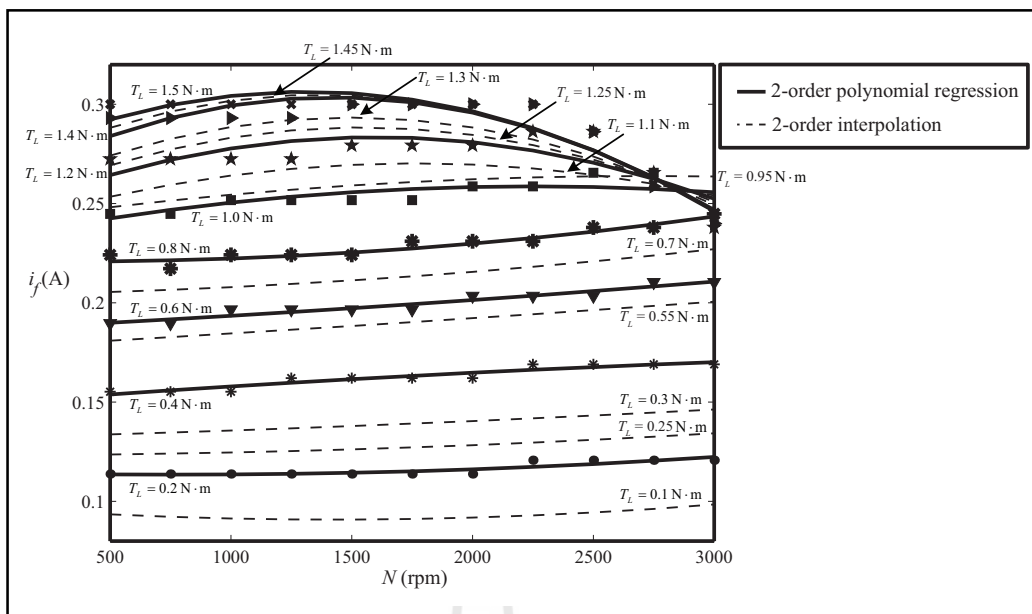
ตารางที่ 4.4 ผลจากการคำนวณด้วยสมการทั้ง 3 วิธี ในกรณีจุดทดสอบนอกช่วง

T_L (N · m)	N (rpm)	การลดถอยเชิงเส้น			การลดถอยพหุนาม กำลังสอง			การลดถอยพหุนาม กำลังสาม		
		i_f (A)	v_a (V)	P_{in} (W)	i_f (A)	v_a (V)	P_{in} (W)	i_f (A)	v_a (V)	P_{in} (W)
0.1	1000	0.09	30.91	19.72	0.09	30.85	19.70	0.09	30.55	19.59
	2000	0.09	55.71	30.34	0.09	54.87	30.20	0.09	54.70	30.18
	2750	0.10	75.00	38.31	0.10	75.66	38.39	0.10	75.24	38.34
0.25	1000	0.12	45.40	47.98	0.12	45.37	47.98	0.12	45.20	47.96
	2000	0.13	79.72	74.28	0.13	79.41	74.26	0.13	79.44	74.26
	2750	0.13	106.94	94.07	0.13	107.17	94.09	0.13	107.06	94.08
0.3	1000	0.14	49.59	57.56	0.14	49.58	57.56	0.13	49.43	57.55
	2000	0.14	87.10	89.12	0.14	86.96	89.11	0.14	87.05	89.11
	2750	0.14	116.98	112.87	0.14	117.06	112.88	0.14	117.05	112.88
0.55	1000	0.18	67.26	105.55	0.18	67.26	105.55	0.18	67.29	105.55
	2000	0.19	118.69	163.49	0.19	118.63	163.48	0.19	118.58	163.47
	2750	0.20	159.99	207.15	0.20	160.07	207.16	0.20	160.03	207.15
0.7	1000	0.21	75.89	134.34	0.21	75.83	134.33	0.21	75.87	134.33
	2000	0.22	133.84	208.07	0.22	133.29	207.98	0.22	133.35	207.99
	2750	0.22	180.31	263.61	0.22	180.60	263.66	0.22	180.71	263.67
0.95	1000	0.24	88.47	182.33	0.25	90.32	183.05	0.24	88.06	182.26
	2000	0.25	154.45	282.12	0.26	160.01	283.39	0.25	155.91	282.38
	2750	0.25	206.07	357.09	0.26	212.34	358.22	0.25	205.81	357.06
1.1	1000	0.26	95.43	211.17	0.26	95.61	211.23	0.26	94.57	211.02
	2000	0.26	164.10	326.38	0.27	166.81	326.77	0.27	168.01	327.01
	2750	0.26	215.69	412.78	0.26	213.56	412.65	0.26	214.04	412.68
1.25	1000	0.28	101.95	240.04	0.28	102.19	240.13	0.27	100.84	239.80
	2000	0.27	172.35	370.69	0.28	176.64	371.12	0.29	178.45	371.46
	2750	0.26	220.00	469.12	0.26	218.86	469.13	0.26	219.79	469.04
1.3	1000	0.29	103.95	249.64	0.29	104.18	249.72	0.28	102.94	249.40
	2000	0.28	174.72	385.50	0.29	179.33	385.84	0.29	181.29	386.18
	2750	0.26	220.00	488.26	0.26	220.15	488.28	0.26	220.00	488.26
1.45	1000	0.30	109.26	278.09	0.30	109.26	278.09	0.29	108.34	278.14
	2000	0.28	181.04	430.21	0.30	185.89	430.01	0.30	187.24	430.10
	2750	0.26	220.00	532.84	0.26	220.00	532.84	0.26	220.00	532.84

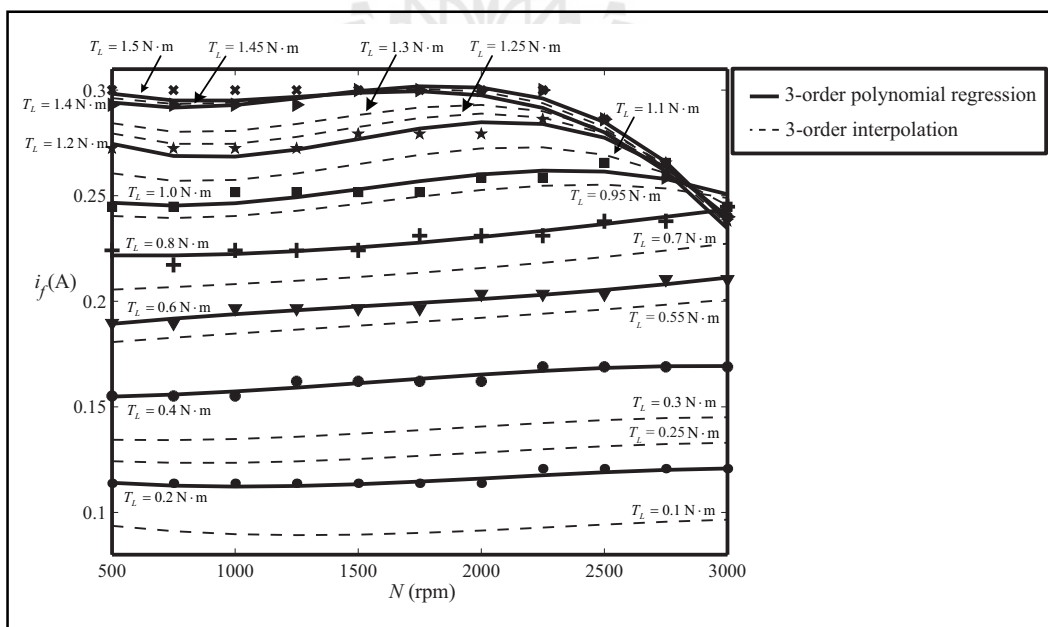
จากตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณของจุดทดสอบนอกช่วงจากสมการทั้ง 3 วิธี ค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกันและนำข้อมูลจากตารางที่ 4.4 ไปพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.3, 4.4 และ 4.5 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องว่าเส้นกราฟของจุดทดสอบนอกช่วงอยู่ระหว่างเส้นกราฟของจุดทดสอบหรือไม่ ซึ่งกราฟการเปรียบเทียบจะเป็นดังรูปที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่าเส้นกราฟจุดทดสอบนอกช่วงอยู่ระหว่างเส้นกราฟจากจุดทดสอบจริง และนอกจากสมการการถดถอยทั้ง 3 วิธีแล้ว กรณีวิธีดั้งเดิมก็ได้คำนวณจุดทดสอบนอกช่วงโดยใช้วิธีเดียวกันกับที่นำเสนอในหัวข้อนี้



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบระหว่างจุดทดสอบและจุดทดสอบนอกช่วง
จากสมการการถดถอยเชิงเส้น



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบระหว่างจุดทดสอบและจุดทดสอบนอกช่วง
จากสมการการถดถอยของพหุนามกำลังสอง



รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบระหว่างจุดทดสอบและจุดทดสอบนอกช่วง
จากสมการการถดถอยของพหุนามกำลังสาม

4.3 ผลการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงาน

ผลการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงาน จะใช้ค่ากำลังงานอินพุตจากวิธีฐานแบบจำลองทั้ง 3 วิธีการประมาณค่า ไปเปรียบเทียบกับค่าจากการคำนวณด้วยวิธีดั้งเดิม ดังนั้นการหาเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานจึงเป็นดังสมการที่ (4.40) ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน} = \frac{P_{in, classical} - P_{in, MBM}}{P_{in, classical}} \times 100\% \quad (4.40)$$

ผลการคำนวณเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ เปรียบเทียบผลการคำนวณกรณีจุดทดสอบและกรณีจุดทดสอบนอกช่วง สามารถอธิบายได้ดังนี้

4.3.1 ผลการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานกรณีจุดทดสอบ

ผลการเปรียบเทียบในกรณีจุดทดสอบ มีทั้งหมด 3 ตาราง คือ ตารางที่ 4.5 ใช้วิธีฐานแบบจำลองที่ประมาณค่าด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิม ส่วนตารางที่ 4.6 และ 4.7 จะเป็นวิธีฐานแบบจำลองที่ประมาณค่าด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสอง และวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสาม ในการเปรียบเทียบตามลำดับ ซึ่งจากตารางทั้งสาม จะพบว่าผลการคำนวณด้วยวิธีฐานแบบจำลองมีการประหยัดพลังงานเกิดขึ้นในจุดทดสอบเป็นส่วนใหญ่ มีเพียงบางจุด เช่น ที่แรงบิดสูง ๆ เกิดการประหยัดพลังงานได้น้อยมากหรือไม่มีการประหยัดพลังงานเลย

4.3.2 ผลการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานกรณีจุดทดสอบนอกช่วง

ผลการเปรียบเทียบในกรณีจุดทดสอบนอกช่วง จะทำเช่นเดียวกับในกรณีจุดทดสอบที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น มีตารางผลการคำนวณ 3 ตารางเช่นเดียวกัน คือ ตารางที่ 4.8, 4.9 และ 4.10 จากตารางทั้ง 3 จะเห็นว่าค่าจากการคำนวณด้วยวิธีฐานแบบจำลองมีเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานสูงถึง 74.31% ซึ่งการประหยัดพลังงานจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อแรงบิดต่ำ แต่จะค่อย ๆ ลดลงเมื่อแรงบิดมีค่าสูงขึ้น

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น กรณีจุดทดสอบ

T_L (N·m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			วิธีการถดถอยเชิงเส้น			เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
		i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,classical}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,MBM}$ (W)	วิธีดั้งเดิม - วิธีการถดถอยเชิงเส้น
0.2	1000	0.30	82.51	88.09	0.11	40.95	38.43	56.37
	2000	0.30	160.73	109.03	0.12	72.09	59.50	45.43
	2750	0.30	220.00	125.09	0.12	96.67	75.34	39.77
0.4	1000	0.30	86.79	112.47	0.16	57.43	76.77	31.74
	2000	0.30	165.01	154.36	0.16	101.34	118.92	22.96
	2750	0.29	220.00	183.79	0.17	136.53	150.66	18.03
0.6	1000	0.30	91.07	139.15	0.19	70.36	115.16	17.24
	2000	0.30	169.29	201.98	0.20	124.31	178.41	11.67
	2750	0.29	220.00	245.07	0.21	167.65	226.06	7.76
0.8	1000	0.30	95.35	168.12	0.22	81.19	153.54	8.67
	2000	0.30	173.58	251.89	0.23	143.16	237.81	5.59
	2750	0.28	220.00	309.47	0.24	192.77	301.27	2.65
1	1000	0.30	99.63	199.38	0.25	90.82	191.94	3.73
	2000	0.30	177.86	304.09	0.25	158.14	296.92	2.36
	2750	0.27	220.00	377.67	0.26	210.44	375.75	0.51

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น กรณีจุดทดสอบ (ต่อ)

T_L (N·m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			วิธีการถดถอยเชิงเส้น			เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
		i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,classical}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,MBM}$ (W)	วิธีดั้งเดิม - วิธีการถดถอยเชิงเส้น
1.2	1000	0.30	103.91	232.93	0.28	99.93	230.45	1.06
	2000	0.30	182.14	358.59	0.27	169.96	355.92	0.74
	2750	0.27	220.00	450.07	0.27	220.00	448.55	0.34
1.4	1000	0.30	108.19	268.77	0.30	107.89	268.84	ไม่ประหยัด
	2000	0.30	186.42	415.38	0.28	179.42	415.23	0.04
	2750	0.26	220.00	528.09	0.27	220.00	509.21	3.58
1.5	1000	0.30	110.33	287.55	0.30	110.33	287.74	ไม่ประหยัด
	2000	0.30	188.56	444.63	0.29	182.64	445.29	ไม่ประหยัด
	2750	0.26	220.00	532.84	0.27	220.00	538.36	ไม่ประหยัด

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสอง กรณีจุดทดสอบ

T_L (N · m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			การถดถอยของพหุนาม กำลังสอง (2-order)			เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
		i_f (A)	v_a (V)	$P_{in, classical}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in, MBM}$ (W)	วิธีดั้งเดิม - 2 order
0.2	1000	0.30	82.51	88.09	0.11	40.91	38.43	56.37
	2000	0.30	160.73	109.03	0.12	71.62	59.45	45.47
	2750	0.30	220.00	125.09	0.12	97.03	75.38	39.74
0.4	1000	0.30	86.79	112.47	0.16	57.43	76.77	31.74
	2000	0.30	165.01	154.36	0.16	101.51	118.94	22.95
	2750	0.29	220.00	183.79	0.17	136.34	150.64	18.04
0.6	1000	0.30	91.07	139.15	0.19	70.36	115.16	17.24
	2000	0.30	169.29	201.98	0.20	124.17	178.39	11.68
	2750	0.29	220.00	245.07	0.21	167.82	226.09	7.74
0.8	1000	0.30	95.35	168.12	0.22	81.08	153.52	8.68
	2000	0.30	173.58	251.89	0.23	142.20	237.64	5.66
	2750	0.28	220.00	309.47	0.24	193.17	301.34	2.63
1	1000	0.30	99.63	199.38	0.25	90.95	191.97	3.72
	2000	0.30	177.86	304.09	0.26	159.59	297.17	2.28
	2750	0.27	220.00	377.67	0.26	209.50	375.63	0.54

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสอง กรณีจุดทดสอบ (ต่อ)

T_L (N · m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			การถดถอยของพหุนาม กำลังสอง (2-order)			เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
		i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,classical}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,MBM}$ (W)	วิธีดั้งเดิม - 2 order
1.2	1000	0.30	103.91	232.93	0.28	100.17	230.54	1.03
	2000	0.30	182.14	358.59	0.28	173.92	356.42	0.61
	2750	0.27	220.00	450.07	0.26	217.58	450.15	ไม่ประหยัด
1.4	1000	0.30	108.19	268.77	0.30	108.10	268.92	ไม่ประหยัด
	2000	0.30	186.42	415.38	0.30	184.65	415.33	0.01
	2750	0.26	220.00	528.09	0.26	220.00	521.31	1.28
1.5	1000	0.30	110.33	287.55	0.30	110.33	287.74	ไม่ประหยัด
	2000	0.30	188.56	444.63	0.30	187.12	444.82	ไม่ประหยัด
	2750	0.26	220.00	532.84	0.26	220.00	534.93	ไม่ประหยัด

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสาม กรณีจุดทดสอบ

T_L (N · m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			การถดถอยของพหุนาม กำลังสาม (3-order)			เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
		i_f (A)	v_a (V)	$P_{in, classical}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in, MBM}$ (W)	วิธีดั้งเดิม - 3 order
0.2	1000	0.30	82.51	88.09	0.11	40.71	38.40	56.41
	2000	0.30	160.73	109.03	0.12	71.58	59.45	45.47
	2750	0.30	220.00	125.09	0.12	96.82	75.36	39.76
0.4	1000	0.30	86.79	112.47	0.16	57.34	76.76	31.75
	2000	0.30	165.01	154.36	0.17	101.74	118.97	22.93
	2750	0.29	220.00	183.79	0.17	136.51	150.66	18.03
0.6	1000	0.30	91.07	139.15	0.19	70.43	115.18	17.23
	2000	0.30	169.29	201.98	0.20	124.03	178.36	11.69
	2750	0.29	220.00	245.07	0.21	167.71	226.07	7.75
0.8	1000	0.30	95.35	168.12	0.22	81.09	153.52	8.68
	2000	0.30	173.58	251.89	0.23	142.47	237.69	5.64
	2750	0.28	220.00	309.47	0.24	193.50	301.40	2.61
1	1000	0.30	99.63	199.38	0.25	90.31	191.85	3.78
	2000	0.30	177.86	304.09	0.26	160.32	297.31	2.23
	2750	0.27	220.00	377.67	0.26	209.86	375.67	0.53

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสาม กรณีจุดทดสอบ (ต่อ)

T_L (N · m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			การถดถอยของพหุนาม กำลังสาม (3-order)			เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
		i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,classical}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,MBM}$ (W)	วิธีดั้งเดิม - 3 order
1.2	1000	0.30	103.91	232.93	0.27	98.71	230.20	1.17
	2000	0.30	182.14	358.59	0.28	175.58	356.76	0.51
	2750	0.27	220.00	450.07	0.26	218.19	450.13	ไม่ประหยัด
1.4	1000	0.30	108.19	268.77	0.29	107.08	268.62	0.06
	2000	0.30	186.42	415.38	0.30	186.42	415.57	ไม่ประหยัด
	2750	0.26	220.00	528.09	0.27	220.00	517.02	2.10
1.5	1000	0.30	110.33	287.55	0.30	109.59	287.76	ไม่ประหยัด
	2000	0.30	188.56	444.63	0.30	187.57	444.81	ไม่ประหยัด
	2750	0.26	220.00	532.84	0.26	220.00	534.29	ไม่ประหยัด

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการลดรอบเชิงเส้น กรณีจุดทดสอบนอกช่วง

T_L (N·m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			วิธีการลดรอบเชิงเส้น (LR)			เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
		i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,classical}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,MBM}$ (W)	วิธีดั้งเดิม - LR
0.1	1000	0.30	80.37	76.76	0.09	30.91	19.72	74.31
	2000	0.30	158.59	87.23	0.09	55.71	30.34	65.22
	2750	0.30	217.26	95.08	0.10	75.00	38.31	59.71
0.25	1000	0.30	83.58	93.97	0.12	45.40	47.98	48.94
	2000	0.30	161.80	120.15	0.13	79.72	74.28	38.17
	2750	0.30	220.00	139.68	0.13	106.94	94.07	32.65
0.3	1000	0.30	84.65	99.99	0.14	49.59	57.56	42.43
	2000	0.30	162.87	131.41	0.14	87.10	89.12	32.18
	2750	0.30	220.00	154.21	0.14	116.98	112.87	26.81
0.55	1000	0.30	90.00	132.26	0.18	67.26	105.55	20.20
	2000	0.30	168.22	189.86	0.19	118.69	163.49	13.89
	2750	0.29	220.00	229.45	0.20	159.99	207.15	9.72
0.7	1000	0.30	93.21	153.34	0.21	75.89	134.34	12.39
	2000	0.30	171.44	226.65	0.22	133.84	208.07	8.20
	2750	0.28	220.00	276.81	0.22	180.31	263.61	4.77
0.95	1000	0.30	98.56	191.35	0.24	88.47	182.33	4.72
	2000	0.30	176.79	290.83	0.25	154.45	282.12	3.00
	2750	0.28	220.00	360.14	0.25	206.07	357.09	0.85

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น กรณีจุดทดสอบนอกช่วง (ต่อ)

T_L (N·m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			วิธีการถดถอยเชิงเส้น			เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
		i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,classical}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,MBM}$ (W)	วิธีดั้งเดิม - วิธีการถดถอยเชิงเส้น
1.1	1000	0.30	101.77	215.86	0.26	95.43	211.17	2.17
	2000	0.30	180.00	331.06	0.26	164.10	326.38	1.41
	2750	0.27	220.00	413.29	0.26	215.69	412.78	0.12
1.25	1000	0.30	104.98	241.67	0.28	101.95	240.04	0.67
	2000	0.30	183.21	372.57	0.27	172.35	370.69	0.50
	2750	0.26	220.00	469.12	0.26	220.00	469.12	ไม่ประหยัด
1.3	1000	0.30	106.05	250.56	0.29	103.95	249.64	0.37
	2000	0.30	184.28	386.70	0.28	174.72	385.50	0.31
	2750	0.26	220.00	488.26	0.26	220.00	488.26	ไม่ประหยัด
1.45	1000	0.30	109.26	278.09	0.30	109.26	278.09	ไม่ประหยัด
	2000	0.30	187.49	429.94	0.28	181.04	430.21	ไม่ประหยัด
	2750	0.26	220.00	532.84	0.26	220.00	532.84	ไม่ประหยัด

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสอง กรณีจุดทดสอบนอกช่วง

T_L (N · m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			การถดถอยของพหุนาม กำลังสอง (2-order)			เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
		i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,classical}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,MBM}$ (W)	วิธีดั้งเดิม - 2 order
0.1	1000	0.30	80.37	76.76	0.09	30.85	19.70	74.34
	2000	0.30	158.59	87.23	0.09	54.87	30.20	65.38
	2750	0.30	217.26	95.08	0.10	75.66	38.39	59.62
0.25	1000	0.30	83.58	93.97	0.12	45.37	47.98	48.94
	2000	0.30	161.80	120.15	0.13	79.41	74.26	38.20
	2750	0.30	220.00	139.68	0.13	107.17	94.09	32.64
0.3	1000	0.30	84.65	99.99	0.14	49.58	57.56	42.43
	2000	0.30	162.87	131.41	0.14	86.96	89.11	32.19
	2750	0.30	220.00	154.21	0.14	117.06	112.88	26.80
0.55	1000	0.30	90.00	132.26	0.18	67.26	105.55	20.20
	2000	0.30	168.22	189.86	0.19	118.63	163.48	13.89
	2750	0.29	220.00	229.45	0.20	160.07	207.16	9.72
0.7	1000	0.30	93.21	153.34	0.21	75.83	134.33	12.40
	2000	0.30	171.44	226.65	0.22	133.29	207.98	8.24
	2750	0.28	220.00	276.81	0.22	180.60	263.66	4.75
0.95	1000	0.30	98.56	191.35	0.25	90.32	183.05	4.34
	2000	0.30	176.79	290.83	0.26	160.01	283.39	2.56
	2750	0.28	220.00	360.14	0.26	212.34	358.22	0.53

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการลดรอบของพุนามกำลังสอง กรณีจุดทดสอบนอกช่วง (ต่อ)

T_L (N · m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			การลดรอบของพุนาม กำลังสอง (2-order)			เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
		i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,classical}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,MBM}$ (W)	วิธีดั้งเดิม - 2 order
1.1	1000	0.30	101.77	215.86	0.26	95.61	211.23	2.15
	2000	0.30	180.00	331.06	0.27	166.81	326.77	1.29
	2750	0.27	220.00	413.29	0.26	213.56	412.65	0.15
1.25	1000	0.30	104.98	241.67	0.28	102.19	240.13	0.64
	2000	0.30	183.21	372.57	0.28	176.64	371.12	0.39
	2750	0.26	220.00	469.12	0.26	218.86	469.13	ไม่ประหยัด
1.3	1000	0.30	106.05	250.56	0.29	104.18	249.72	0.34
	2000	0.30	184.28	386.70	0.29	179.33	385.84	0.22
	2750	0.26	220.00	488.26	0.26	220.00	488.28	ไม่ประหยัด
1.45	1000	0.30	109.26	278.09	0.30	109.26	278.09	ไม่ประหยัด
	2000	0.30	187.49	429.94	0.30	185.89	430.01	ไม่ประหยัด
	2750	0.26	220.00	532.84	0.26	220.00	532.84	ไม่ประหยัด

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสาม กรณีจุดทดสอบนอกช่วง

T_L (N · m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			การถดถอยของพหุนาม กำลังสาม (3-order)			เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
		i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,classical}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,MBM}$ (W)	วิธีดั้งเดิม - 3 order
0.1	1000	0.30	80.37	76.76	0.09	30.55	19.59	74.47
	2000	0.30	158.59	87.23	0.09	54.70	30.18	65.41
	2750	0.30	217.26	95.08	0.10	75.24	38.34	59.68
0.25	1000	0.30	83.58	93.97	0.12	45.20	47.96	48.96
	2000	0.30	161.80	120.15	0.13	79.44	74.26	38.19
	2750	0.30	220.00	139.68	0.13	107.06	94.08	32.65
0.3	1000	0.30	84.65	99.99	0.13	49.43	57.55	42.44
	2000	0.30	162.87	131.41	0.14	87.05	89.11	32.19
	2750	0.30	220.00	154.21	0.14	117.05	112.88	26.80
0.55	1000	0.30	90.00	132.26	0.18	67.29	105.55	20.19
	2000	0.30	168.22	189.86	0.19	118.58	163.47	13.90
	2750	0.29	220.00	229.45	0.20	160.03	207.15	9.72
0.7	1000	0.30	93.21	153.34	0.21	75.87	134.33	12.39
	2000	0.30	171.44	226.65	0.22	133.35	207.99	8.23
	2750	0.28	220.00	276.81	0.22	180.71	263.67	4.75
0.95	1000	0.30	98.56	191.35	0.24	88.47	182.33	4.75
	2000	0.30	176.79	290.83	0.25	154.45	282.12	2.91
	2750	0.28	220.00	360.14	0.25	206.07	357.09	0.86

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสาม กรณีจุดทดสอบนอกช่วง (ต่อ)

T_L (N · m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			การถดถอยของพหุนาม กำลังสาม (3-order)			เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
		i_f (A)	v_a (V)	$P_{in, classical}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in, MBM}$ (W)	วิธีดั้งเดิม - 3 order
1.1	1000	0.30	101.77	215.86	0.26	95.43	211.17	2.24
	2000	0.30	180.00	331.06	0.26	164.10	326.38	1.22
	2750	0.27	220.00	413.29	0.26	215.69	412.78	0.15
1.25	1000	0.30	104.98	241.67	0.28	101.95	240.04	0.78
	2000	0.30	183.21	372.57	0.27	172.35	370.69	0.30
	2750	0.26	220.00	469.12	0.26	220.00	469.12	0.02
1.3	1000	0.30	106.05	250.56	0.29	103.95	249.64	0.46
	2000	0.30	184.28	386.70	0.28	174.72	385.50	0.14
	2750	0.26	220.00	488.26	0.26	220.00	488.26	ไม่ประหยัด
1.45	1000	0.30	109.26	278.09	0.30	109.26	278.09	ไม่ประหยัด
	2000	0.30	187.49	429.94	0.28	181.04	430.21	ไม่ประหยัด
	2750	0.26	220.00	532.84	0.26	220.00	532.84	ไม่ประหยัด

4.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนที่ใช้วิธีฐานแบบจำลอง โดยจะคำนวณค่ากระแสสนามและแรงดันอาร์เมเจอร์ ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถลดกำลังงานสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นและควบคุมความเร็วรอบตามที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ และได้จากผลการคำนวณแสดงไว้ในตารางข้างต้น และเนื่องจากวิธีการประหยัดพลังงานดังกล่าวใช้สมการพื้นฐานในการคำนวณ ซึ่งถือเป็นข้อดีของวิธีการนี้ ดังนั้นการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์หลังจากนี้จะใช้การคำนวณของวิธีการถดถอยเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว เพราะค่าที่ได้จากวิธีประมาณค่าทั้ง 3 วิธี มีความใกล้เคียงกัน แต่สัมประสิทธิ์ของวิธีการถดถอยเชิงเส้นมีน้อยกว่าวิธีอื่น จึงสามารถลดความยุ่งยากในการคำนวณได้ดีกว่า



บทที่ 5

โครงสร้างฮาร์ดแวร์สำหรับการขับเคลื่อนเพื่อประหยัดพลังงาน

5.1 บทนำ

ระบบที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ประกอบด้วยสอง ส่วนหลัก คือ วงจรเรียงกระแส และวงจรชอปเปอร์ วงจรเรียงกระแสที่ใช้ในงานวิจัย วิทยานิพนธ์ คือ วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็น กระแสตรง ในขณะที่วงจรชอปเปอร์ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จาก วงจรเรียงกระแสเพื่อเข้ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น วงจรชอปเปอร์ดังกล่าวใช้วงจร ที่เรียกว่า วงจรแปลงผันแบบบัคค์ โดยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ สำหรับวงจรชอป เเปอร์ คือ มอสเฟต ซึ่งการควบคุมการทำงานของมอสเฟต จะใช้บอร์ด dsPIC30F2010 ของ บริษัท ETT เนื่องจากบอร์ดดังกล่าวมีราคาไม่สูงมาก อีกทั้งสามารถหาซื้อได้ในประเทศไทย ด้วย เหตุนี้ในบทนี้จึงได้อธิบายเกี่ยวกับบอร์ด dsPIC30F2010 และนำเสนอวิธีการออกแบบระบบ ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นทั้งสองวงจร รวมถึงอธิบายหลักการทำงาน และเสนอผลการทดสอบในแต่ละวงจร

5.2 บอร์ด dsPIC30F2010

บอร์ด ET-dsPIC30F2010 TRAINING KIT V1.0 EXP ประกอบไปด้วย วงจรพื้นฐานที่ จำเป็นสำหรับการศึกษาเรียนรู้และทดลองใช้งานทรัพยากรต่าง ๆ ของ MCU ตระกูล dsPIC โดย ภายในบอร์ดได้จัดเตรียมวงจรใช้งานที่จำเป็นไว้อย่างครบถ้วน (สามารถดูรูปโครงสร้างของบอร์ด ได้ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งส่วนประกอบของบอร์ดดังกล่าว เป็นดังนี้

- ใช้ dsPIC30F2010 เป็น MCU ประจำบอร์ด
- วงจร LED ใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า +5 V โดยใช้ LED สีแดง ขนาด 3 mm จำนวน 4 ชุด สำหรับใช้ในการทดสอบการทำงานของเอาต์พุตต่าง ๆ
- วงจรปรับแรงดัน 0-5 V โดยใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้แบบเก็อมมาชนิดมีแกนปรับ จำนวน 4 ชุด สำหรับใช้ในการทดสอบการทำงานของ A/D
- วงจร Push-Button Switch จำนวน 4 ชุดสำหรับใช้ทดสอบการทำงานของอินพุตต่าง ๆ
- วงจร Mini Speaker สำหรับใช้ทดสอบการกำเนิดเสียง Beep หรือเสียงอื่น ๆ

5.2.1 คุณสมบัติของ dsPIC30F2010

dsPIC30F2010 เป็น MCU ที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลแบบ 16 บิต มีจุดเด่นในด้านของความสามารถในการประมวลผลข้อมูลสัญญาณแบบดิจิทัล สำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานควบคุมต่าง ๆ โครงสร้างภายในเป็นการผสมผสานระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจร DSP (digital signal processing) รวมเข้าไว้ด้วยกัน หรืออาจเรียก MCU ตระกูล dsPIC ว่าเป็น DSC หรือ Digital Signal Controller ก็ได้

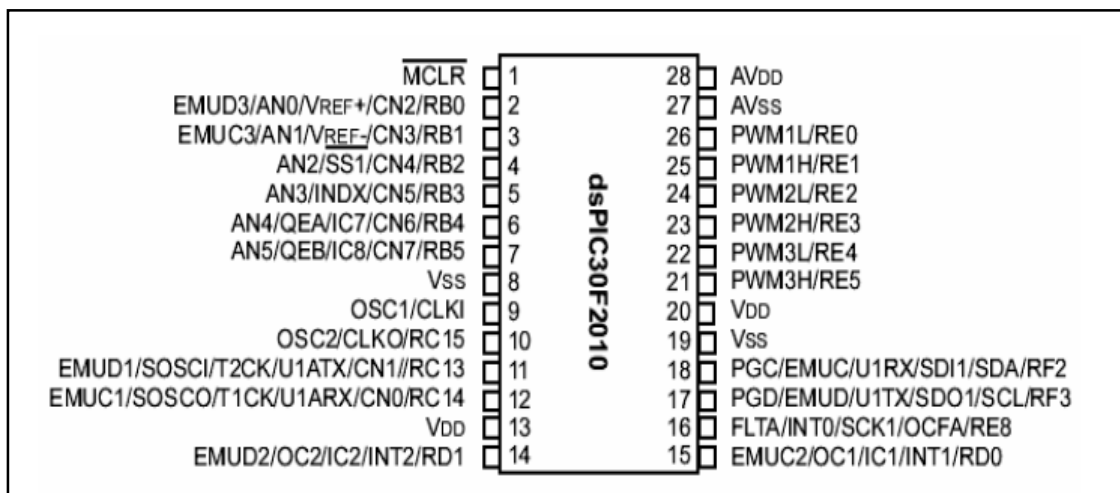
5.2.2 คุณสมบัติด้านการประมวลผล

- มีหน่วยความจำ RAM ขนาด 512 Byte
- มีหน่วยความจำข้อมูลถาวรแบบ EEPROM ขนาด 1 Kbyte
- สามารถประมวลผลด้วยความเร็วสูงสุดที่ 30 MIPS (30 ล้านคำสั่งต่อวินาที)
- รองรับสัญญาณนาฬิกาจากแหล่งกำเนิดภายนอก 0-40 MHz
- รองรับการใช้งานกับแหล่งกำเนิดความถี่แบบ XTAL ในย่าน 4-10 MHz
- มีวงจรควบคุมความถี่ภายในแบบ Phase-Lock-Loop โดยสามารถกำหนดค่าอัตรา การคูณความถี่ได้ 3 ระดับ คือ 4 เท่า 8 เท่า และ 16 เท่า
- รองรับการขัดจังหวะ (interrupt) ได้ถึง 27 แหล่ง พร้อมสัญญาณขัดจังหวะจากภายนอก 3 แหล่ง และสามารถจัดระดับความสำคัญของการขัดจังหวะได้ 8 ระดับ

5.2.3 คุณสมบัติของ Peripheral I/O

- ขาสัญญาณ I/O สามารถจ่ายกระแส และรับกระแส ได้มากถึง 25 mA
- มี Timer ขนาด 16 บิต จำนวน 3 ชุด และสามารถโปรแกรมใช้งานเป็น Timer แบบ 32 บิตได้โดยใช้ Timer 16 บิต 2 ช่องรวมกัน มี Input Capture ขนาด 16 บิต จำนวน 4 ช่อง
- มี Output Compare/PWM ขนาด 16 บิต จำนวน 2 ช่อง
- มีวงจรสื่อสารอนุกรมแบบ SPI จำนวน 1 ช่อง
- มีวงจรสื่อสารอนุกรมแบบ I2C จำนวน 1 ช่อง
- มีวงจรสื่อสารอนุกรมแบบ UART จำนวน 1 ช่อง
- มีวงจร DCPWM สำหรับใช้ควบคุมมอเตอร์ 3 ช่อง
- มีวงจรถอดรหัสแบบ QEIM ขนาด 16 บิต จำนวน 1 ช่อง
- มีวงจร A/D ขนาด 10 บิต จำนวน 6 ช่อง

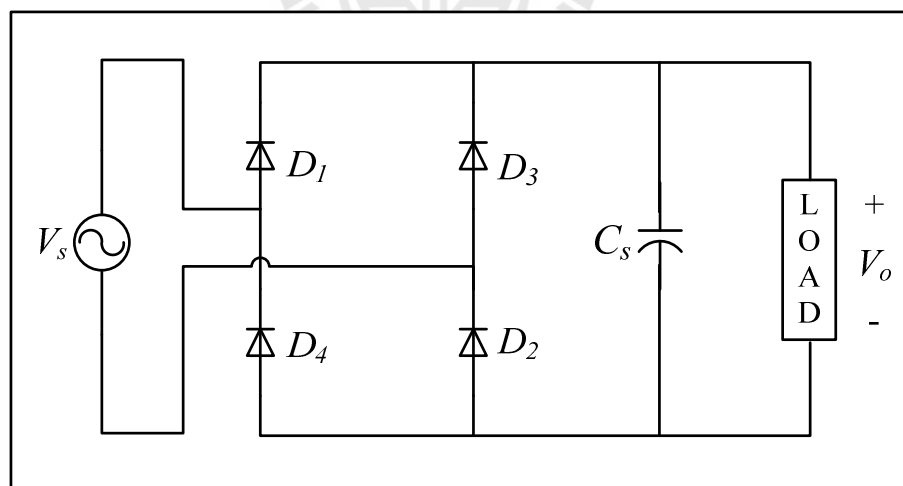
รายละเอียดต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 5.2 ดังนี้



รูปที่ 5.2 การจัดเรียงขาสัญญาณของ dsPIC30F2010

5.3 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์

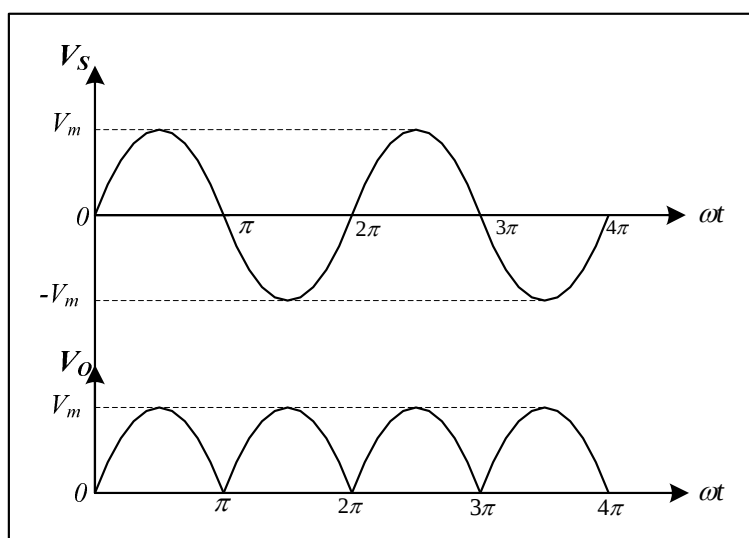
วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ ถือว่าเป็นวงจรหนึ่งในการแปลงกระแสสลับเป็น กระแสตรง โครงสร้างของวงจรประกอบด้วยไดโอดทั้งหมด 4 ตัว ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์

5.3.1 หลักการทำงานของวงจร

จากวงจรดังรูปที่ 5.3 สามารถพิจารณาโหมดการทำงานได้เป็น 2 โหมด โดยในแต่ละโหมดไดโอดจะทำงานครั้งละ 2 ตัวสลับกัน คือ โหมดที่ 1 ช่วงซีกบวกของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ไดโอด D_1, D_2 นำกระแส และโหมดที่ 2 ช่วงซีกลบของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ไดโอด D_3, D_4 นำกระแส ซึ่งจากการทำงานในแต่ละโหมดจะได้รูปสัญญาณของค่าแรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 5.4 ดังนี้



รูปที่ 5.4 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์

จากรูปที่ 5.4 เมื่อคำนวณค่าแรงดันเอาต์พุตเฉลี่ย ($V_{o,av}$) ที่ได้จากวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ โดยพิจารณาจากพื้นที่ใต้กราฟในรูปดังกล่าว จะคำนวณได้ดังสมการที่ (5.1) ดังนี้

$$V_{o,av} = \frac{2V_m}{\pi} \quad (5.1)$$

โดยที่ V_m คือ ค่ายอดของแรงดันอินพุตที่จ่ายให้วงจรเรียงกระแส

เมื่อพิจารณาการคำนวณแรงดันไฟฟ้าด้านกลับด้านลบ (V_{RRM} : Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.2) ดังนี้

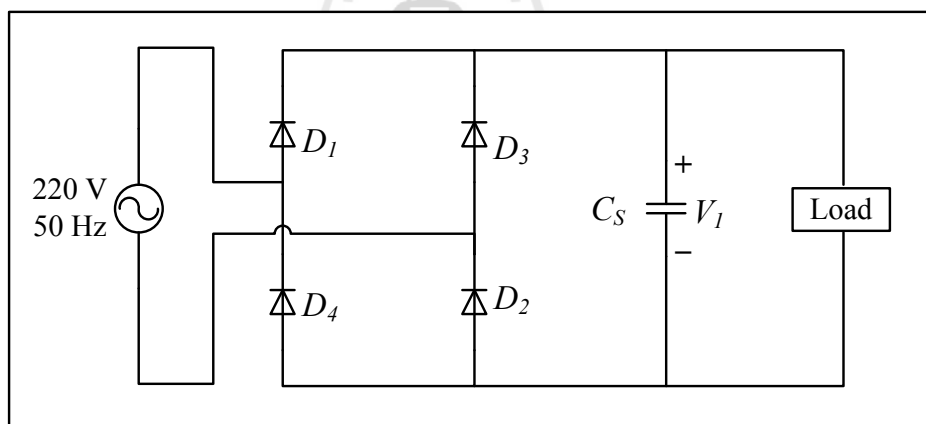
$$V_{RRM} = V_m \quad (5.2)$$

เมื่อพิจารณาสมการคำนวณกระแสไดโอดเฉลี่ย ($I_{D,av}$) จะได้ดังสมการที่ (5.3)

$$I_{D,av} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{O,av}(t) dt = \frac{V_m}{\pi R} \quad (5.3)$$

5.3.2 การออกแบบ

วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วงจรที่เป็นลักษณะมอดูล เพราะฉะนั้นจึงทำการออกแบบพิกัดของมอดูลวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ ซึ่งการออกแบบจะคำนึงถึงพิกัดของแรงดันและกระแสเป็นสำคัญ โดยวงจรเรียงกระแสที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.5 ดังนี้

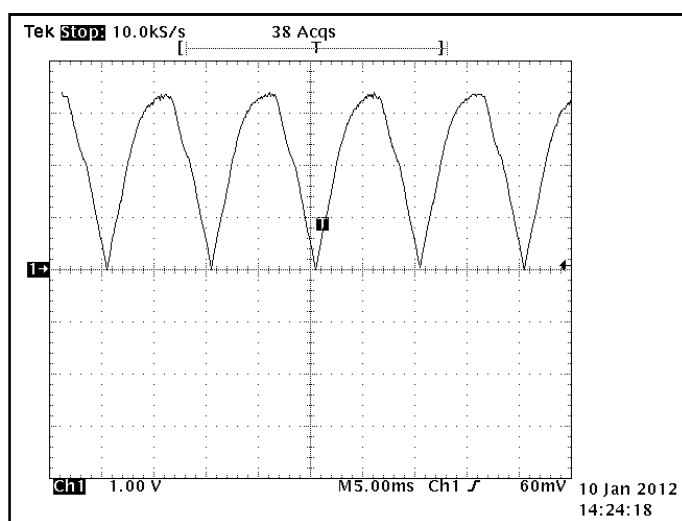


รูปที่ 5.5 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

จากรูปที่ 5.5 ตัวเก็บประจุ (C_s) ต่อขนานกับโหลดเพื่อทำหน้าที่ปรับเรียบแรงดันเอาต์พุตที่ออกจากวงจรเรียงกระแส ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้แรงดันเอาต์พุตมีตัวประกอบความพลัว (ripple factor) เท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ จากข้อกำหนดดังกล่าวข้างต้นสามารถออกแบบได้ตามขั้นตอนดังนี้

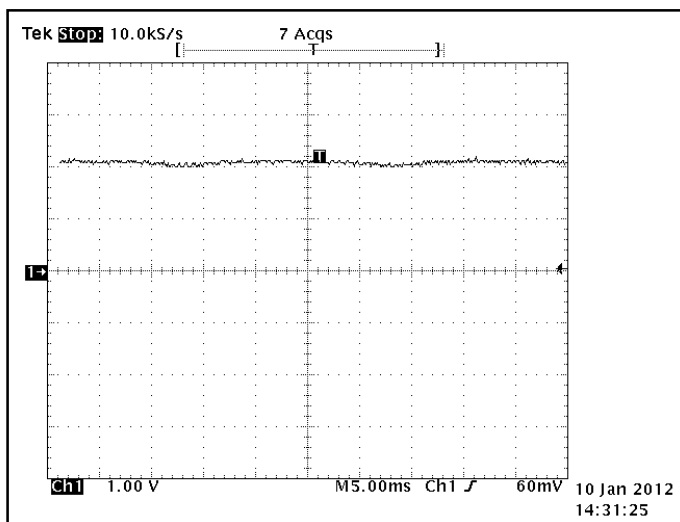
ขั้นที่ 1 เลือกตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุที่เลือกใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ คือ ตัวเก็บประจุขนาด $1000\ \mu\text{F}$ ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุที่มีอยู่ในห้องทดลอง ดังนั้นจึงทดสอบตัวเก็บประจุดังกล่าว เพื่อดูว่าแรงดันเอาต์พุตมีตัวประกอบความพลัวตามที่กำหนดหรือไม่ โดยการทดสอบจะปรับแรงดันให้ได้แรงดันเอาต์พุต เท่ากับ $220\ \text{V}$ ผลจากการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 5.6 ถึง 5.8 ดังนี้

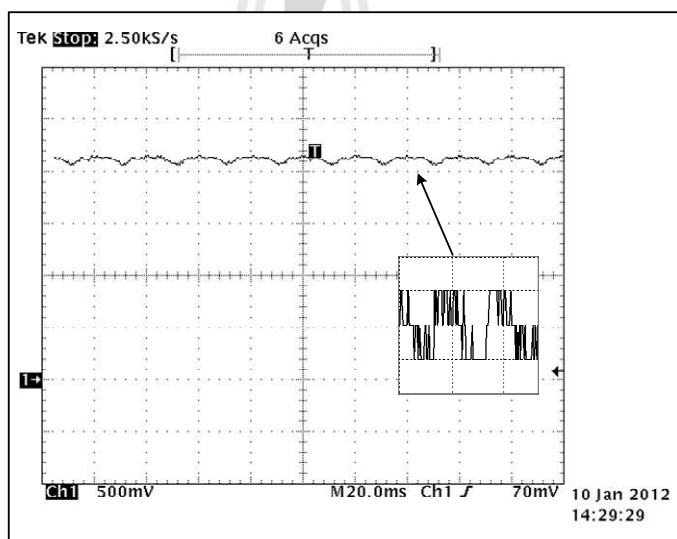


รูปที่ 5.6 รูปสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ในขณะที่ไม่ต่อตัวเก็บประจุ

รูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อต่อตัวเก็บประจุขนาด $1000\ \mu\text{F}$ กับโหลด รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตจะมีลักษณะเรียบขึ้น และจากรูปที่ 5.8 รูปสัญญาณแรงดันพลัวของแรงดันเอาต์พุต จะสังเกตว่าตัวประกอบความพลัวมีค่าไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ ซึ่งจากรูปสัญญาณพบว่าแรงดันพลัวมีค่าเท่ากับ $4\ \text{V}$ ดังนั้นตัวเก็บประจุขนาด $1000\ \mu\text{F}$ จึงสามารถนำมาใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้



รูปที่ 5.7 รูปสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ในขณะที่ต่อตัวเก็บประจุ



รูปที่ 5.8 รูปสัญญาณแรงดันพลั่วของแรงดันเอาต์พุต

ขั้นที่ 2 คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับด้านลบ จากสมการที่ (5.2)

$$V_{RRM} = V_m = \sqrt{2} \times 220$$

คำนึงถึงค่าตัวประกอบนิรภัย (safety factor) 25 เปอร์เซ็นต์ จะได้

$$V_{RRM} = 31113 \times 1.25 = 388.91 \text{ V}$$

ดังนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าด้านกลับด้านลบ เท่ากับ 388.91 V

ขั้นที่ 3 คำนวณค่ากระแสไดโอดเฉลี่ย

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ซึ่งมีพิกัดกระแสมากที่สุด คือ ฟังวงจรรีเมเจอร์มีค่ากระแส เท่ากับ 2.2 A และค่านึงถึงค่าตัวประกอบนิรภัย 25 เปอร์เซ็นต์ จะได้กระแส เท่ากับ $2.2 + (2.2 \times 0.25) = 2.75 \text{ A}$ ดังนั้นค่ากระแสไดโอดเฉลี่ยจึงต้องมีค่ามากกว่า 2.75 A

จากการออกแบบวงจรข้างต้น สามารถนำค่าที่ได้ไปเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ศึกษาจากเอกสารข้อมูลแล้วพบว่าไดโอดเบอร์ GPBC1504 มีค่าตรงกับความต้องการที่ออกแบบไว้ คือ $V_{RRM} = 400 \text{ V}$ และ $I_{D,av} = 12 \text{ A}$ (ซึ่งเป็นค่ามากกว่าค่าที่กำหนดไว้) โดยเอกสารข้อมูลของไดโอดแสดงไว้ในภาคผนวก ก

5.3.3 ผลการทดสอบวงจร

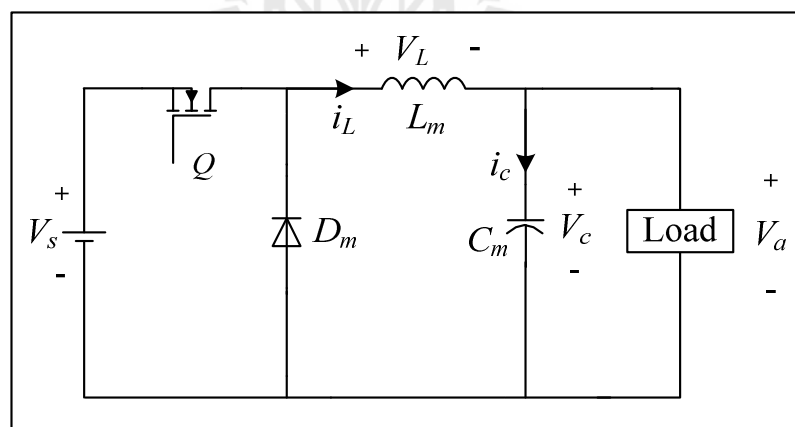
การทดสอบวงจรจะทดสอบโดยเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านตัวปรับแรงดัน (variac) จ่ายให้กับมอดูลวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์เพื่อให้เอาต์พุต เท่ากับ 220 V ซึ่งโหลดในขณะทดสอบจะใช้โหลดความต้านทาน คือ หลอดไฟ ขนาด 220 V 100 W ในการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกจะยังไม่ใส่ตัวเก็บประจุสำหรับปรับเรียบแรงดัน เพื่อเปรียบเทียบผลของทั้งสองขั้นตอนว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร ในการทดสอบดังกล่าวได้ต่อวงจรตามรูปที่ 5.9 จากผลการทดสอบดังรูป เมื่อไม่มีการต่อตัวเก็บประจุจะได้ผลดังรูปที่ 5.6 ซึ่งจากภาพดังกล่าวสังเกตได้ว่าค่าแรงดันพลีของรูปสัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสมีค่ามาก และเมื่อใส่ตัวเก็บประจุสำหรับปรับเรียบแรงดันจะได้ผลดังรูปที่ 5.7 ซึ่งได้แสดงไว้ในหัวข้อ 5.3.2 ข้างต้น



รูปที่ 5.9 ภาพการต่อวงจรสำหรับการทดสอบวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์

5.4 วงจรแปลงผันแบบบัคค์

วงจรแปลงผันแบบบัคค์ เป็นวงจรชนิดหนึ่งสำหรับปรับเปลี่ยนค่าแรงดันเอาต์พุต ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง มีมอสเฟตทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ดังรูปที่ 5.10 ดังนี้

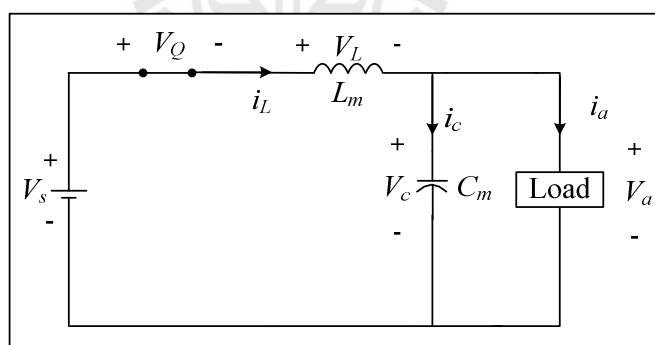


รูปที่ 5.10 วงจรแปลงผันแบบบัคค์

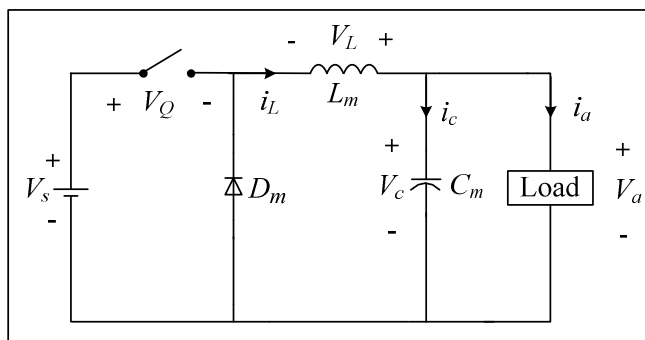
5.4.1 หลักการทำงานของวงจร

วงจรดังรูปที่ 5.10 เป็นวงจรสำหรับปรับเปลี่ยนระดับแรงดันทางด้านเอาต์พุต (V_a) โดยอุปกรณ์สวิตช์ของวงจร ได้แก่ มอสเฟต ซึ่งทำหน้าที่ในการสับแรงดันไฟฟ้าอินพุต (V_s) ให้ได้ค่าแรงดันเอาต์พุตตามที่ต้องการ โดยวงจรดังกล่าวจะทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่า

น้อยกว่าหรือเท่ากับแรงดันอินพุตเสมอ วงจรแปลงผันแบบบัคก็มีการทำงานของวงจรแบ่งออกเป็น 2 โหมด คือ โหมดที่ 1 เป็นโหมดที่มอสเฟตทำงาน และในโหมดที่ 2 เป็นโหมดที่มอสเฟตหยุดทำงาน ซึ่งการอธิบายหลักการทำงานในแต่ละโหมด พิจารณาได้จากรูปที่ 5.11 การทำงานของวงจรดังกล่าวจะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 โหมดอย่างชัดเจน ซึ่งการทำงานในโหมดที่ 1 มอสเฟตจะทำงาน เพราะฉะนั้นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (V_s) จะจ่ายกระแสผ่านขดลวด (i_L) และไหลผ่านตัวเก็บประจุ (i_C) โดยกระแสที่ไหลผ่านขดลวดจะเพิ่มขึ้นจาก I_1 จนถึงค่า I_2 ดังรูปที่ 5.12 ในขณะที่กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก $I_1 - i_d$ จนกระทั่งถึงค่า $I_2 - i_d$ ซึ่งในสภาวะนี้กระแสที่จ่ายให้โหลด (i_d) จะมีค่าคงที่ตลอดสภาวะการทำงานในโหมดนี้ ส่วนในโหมดที่ 2 เป็นโหมดที่มอสเฟตหยุดทำงาน ซึ่งการทำงานในโหมดนี้ขดลวดจะคืนพลังงาน และจ่ายกระแสผ่านตัวเก็บประจุ ผ่านโหลดและผ่านไดโอด (D_m) โดยกระแสที่ไหลผ่านขดลวดจะลดลงจากค่า I_2 จนกระทั่งถึงค่า I_1 ในขณะที่กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะลดลงจาก $I_2 - i_d$ จนกระทั่งถึงค่า $I_1 - i_d$ ซึ่งในสภาวะนี้กระแสที่จ่ายให้โหลดยังคงมีค่าคงที่ตลอดสภาวะการทำงาน นอกจากนี้สังเกตได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้โหลดในโหมดที่ 2 มาจากการคืนพลังงานของขดลวดที่สะสมพลังงานจากโหมดที่ 1 แต่กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้โหลดในโหมดที่ 1 มาจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุต



ก) การทำงานในโหมดที่ 1



ข) การทำงานในโหมดที่ 2

รูปที่ 5.11 โหมดการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบักก์

จากรูปที่ 5.12 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันทางด้านเอาต์พุตกับแรงดันอินพุต จะคำนวณหาแรงดันเฉลี่ยทางด้านเอาต์พุตได้ดังสมการที่ 5.4 ดังต่อไปนี้

$$V_a = \frac{1}{T} \int_0^T V_o dt = \frac{V_s}{T} \times t_1 \quad (5.4)$$

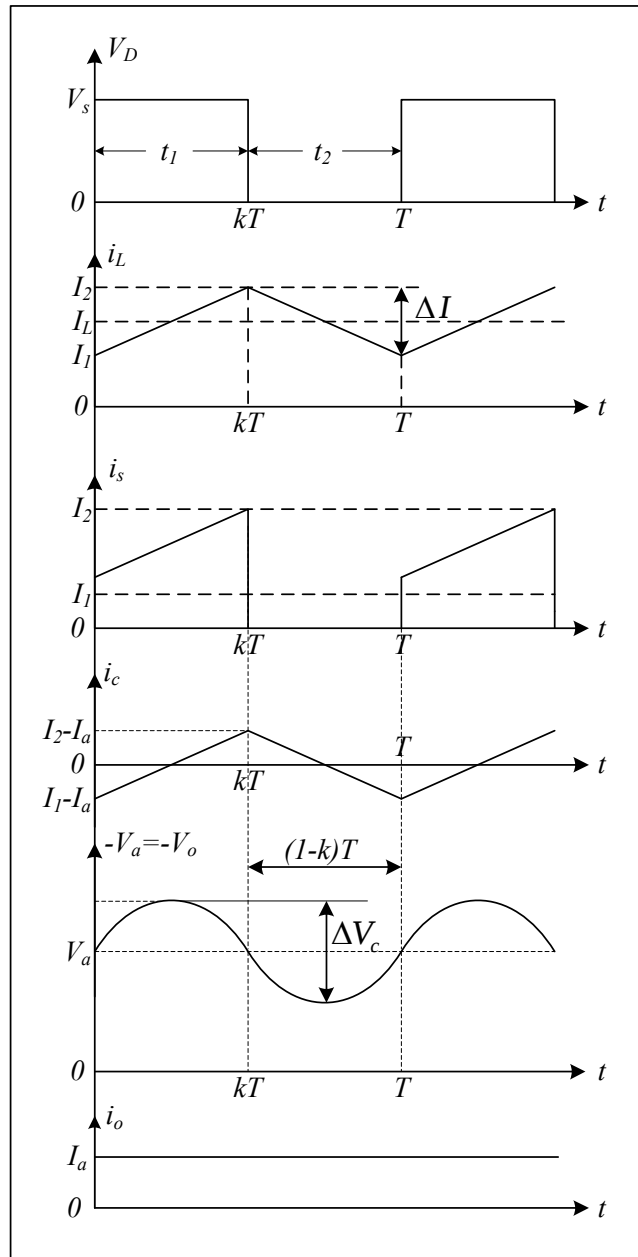
โดย t_1 คือ ช่วงเวลาการทำงานของมอสเฟต มีสมการคำนวณดังสมการที่ (5.5) และ t_2 คือ ช่วงเวลาหยุดทำงานของมอสเฟต แสดงได้ดังสมการที่ (5.6) ดังนี้

$$t_1 = kT \quad (5.5)$$

$$t_2 = (1 - k)T \quad (5.6)$$

เมื่อ k คือ รอบทำงาน (duty cycle)

T คือ คาบการทำงานของมอสเฟต (s)



รูปที่ 5.12 รูปสัญญาณอธิบายหลักการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

แทนค่า t_1 จากสมการที่ (5.5) ลงในสมการที่ (5.4) จะได้สมการคำนวณค่าแรงดันเอาต์พุตดังสมการที่ (5.7) ดังนี้

$$V_a = kV_s \quad (5.7)$$

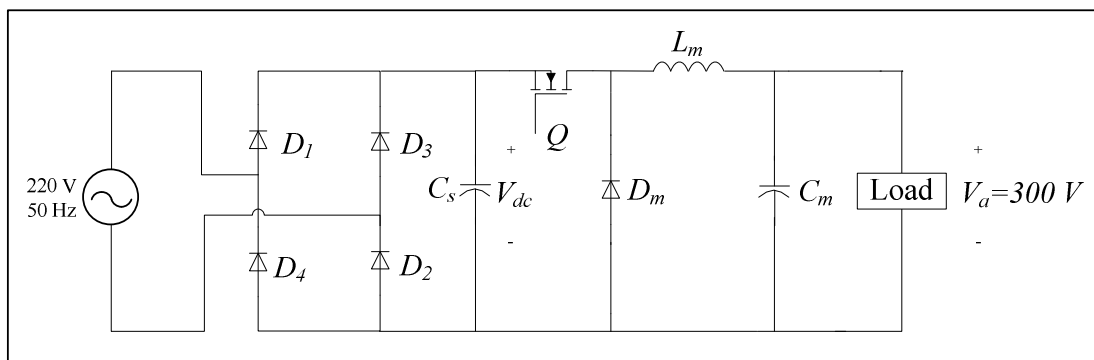
5.4.2 การออกแบบ

การออกแบบวงจรแปลงผันแบบบักก์ จำเป็นต้องทราบพิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เนื่องจากโพลของวงจรแปลงผันแบบบักก์ คือ มอเตอร์ดังกล่าว ดังนั้นวงจรแปลงผันแบบบักก์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จึงมีทั้งหมด 2 วงจรด้วยกัน คือ ฟังวงจรอาร์เมเจอร์และฟังวงจรสนาม โดยพิกัดของมอเตอร์ดังกล่าวได้มาจากแผ่นป้ายชื่อ (nameplate) ดังรูปที่ 5.13 ดังนี้

ELWE	
Typ MsI	- Mot.
220 V	2.2 A
0.37 kW	
2360 min ⁻¹	
Err. 220 V	0.3 A
DIN VDE 0530	

รูปที่ 5.13 แผ่นป้ายชื่อของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

จากรูปที่ 5.13 ค่าพิกัดกระแสมากที่สุดของมอเตอร์ คือ กระแสอาร์เมเจอร์ เท่ากับ 2.2 A และพิกัดแรงดันของทั้งสองฝั่งมีค่าเท่ากัน คือ 220 V ซึ่งในการออกแบบวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ฟังวงจรของมอเตอร์ จะใช้ค่าพิกัดมากที่สุดของมอเตอร์ในการออกแบบและคำนึงถึงค่าตัวประกอบนิรภัย 25 เปอร์เซ็นต์ โดยจะทำการกำหนดให้ค่าพิกัดกระแสมากกว่า $2.2 + (2.2 \times 0.25) = 2.75$ A (กำหนดใช้ 5 A) และมีค่าพิกัดแรงดันมากกว่า $220 + (220 \times 0.25) = 275$ V (กำหนดใช้ 300 V) ดังนั้นวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 วงจรจึงใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ เหมือนกัน โดยเหตุผลที่กำหนดให้ใช้พารามิเตอร์ของวงจรทั้ง 2 เหมือนกัน นอกจากการออกแบบโดยคำนึงถึงพิกัดกระแสมากที่สุดของมอเตอร์แล้ว อีกส่วนหนึ่ง คือ ถ้าววงจรแปลงผันแบบบักก์ฟังวงจรอาร์เมเจอร์เกิดความเสียหาย หรือชำรุด สามารถนำวงจรแปลงผันแบบบักก์ฟังวงจรสนามมาใช้แทนฟังวงจรอาร์เมเจอร์ได้ โดยรูปวงจรที่ใช้ในการออกแบบเป็นดังรูปที่ 5.14 ดังนี้



รูปที่ 5.14 วงจรแปลงผันแบบบักก์ที่ใช้ในการทดสอบ

จากรูปที่ 5.14 วงจรแปลงผันแบบบักก์ต่ออยู่กับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ ซึ่งการกำหนดค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบมีดังนี้

- ค่าแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบักก์ (V_{dc}) จะมีค่าประมาณ 311 V
- แรงดันเอาต์พุต (V_a) มีค่า เท่ากับ 300 V
- ความถี่ในการสวิตช์ เท่ากับ 10 kHz
- ตัวเก็บประจุ (C_m) ที่ต่อขนานกับโหลดเพื่อปรับค่าแรงดันพลั่วของแรงดันเอาต์พุตให้เรียบ ดังนั้นกำหนดค่าแรงดันพลั่ว (ΔV_c) เท่ากับ 1%
- ตัวเหนี่ยวนำ (L_m) ที่ต่ออนุกรมกับโหลดเพื่อปรับกระแสพริ้วของกระแสเอาต์พุตให้เรียบ จึงกำหนดค่ากระแสพลั่ว (ΔI) เท่ากับ 0.1 A (2% ของ 5 A)

จากข้อกำหนดดังกล่าวข้างต้น สามารถคำนวณค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการเลือกอุปกรณ์ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้ (M. H. Rashid, 2004)

ขั้นที่ 1 คำนวณขนาดของตัวเหนี่ยวนำ จากสมการที่ (5.8) ดังนี้

$$L = \frac{V_a(V_{dc} - V_a)}{\Delta I f_s V_{dc}} \quad (5.8)$$

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการที่ (5.8) จะได้

$$L = \frac{300 \times (311 - 300)}{0.1 \times 10 \times 10^3 \times 311} = 10.6 \text{ mH}$$

ดังนั้น ตัวเหนี่ยวนำมีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับ 10.6 mH

ขั้นที่ 2 คำนวณขนาดของตัวเก็บประจุ จากสมการที่ (5.9) ดังต่อไปนี้

$$\Delta V_c = \frac{\Delta I}{8f_s C} \quad (5.9)$$

จากสมการที่ (5.9) ย้ายข้างสมการหาค่า C และแทนค่าที่กำหนดลงในสมการจะได้

$$C = \frac{0.1}{8 \times 10 \times 10^3 \times 0.01 \times 300} = 0.42 \mu F$$

ดังนั้น ตัวเก็บประจุมีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับ 0.42 μF

ขั้นที่ 3 การออกแบบไดโอด (D_m)

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.10 ไดโอดต้องมีพิกัดแรงดันมากกว่าค่าแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 311 V แต่เมื่อพิจารณาค่าตัวประกอบนิรภัย 25 เปอร์เซ็นต์ ค่าพิกัดแรงดันของไดโอดจะมีค่ามากกว่า 388.75 V เพราะฉะนั้นจึงเลือกใช้ไดโอดเบอร์ MUR1560 มีค่าเท่ากับ 600 V ซึ่งมากกว่าค่าที่กำหนดไว้ โดยเอกสารข้อมูลของไดโอดแสดงไว้ในภาคผนวก ก

ขั้นที่ 4 การออกแบบมอสเฟต (Q)

การออกแบบมอสเฟตจะคำนึงถึงค่าพิกัดของแรงดันและกระแส จากหัวข้อที่ 5.4.2 ค่าพิกัดแรงดันและกระแสของมอเตอร์เมื่อคำนึงถึงตัวประกอบนิรภัย คือ 275 V และ 2.75 A ดังนั้นมอสเฟตที่เลือกใช้จึงมีค่าพิกัดแรงดันมากกว่า 275 V และมีพิกัดกระแสมากกว่า 2.75 A จากข้อกำหนดดังกล่าวจึงได้เลือกใช้มอสเฟตเบอร์ STW12NK80Z ซึ่งมีพิกัดแรงดันและกระแส คือ 800 V และ 10.5 A โดยเอกสารข้อมูลของมอสเฟตดังกล่าวได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก

5.4.3 ผลการทดสอบวงจร

การทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ มีลักษณะวงจรการทดสอบดังรูปที่ 5.14 โดยการทดสอบจะปรับเปลี่ยนค่าเวลาในการทำงานของมอสเฟต (t_1) หรือรอบทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ โดยจัดอุปกรณ์สำหรับการทดสอบดังรูปที่ 5.15 โหลดที่ใช้ในการทดสอบ คือ หลอดไฟ ขนาด 220 V 100 W และการปรับค่าเวลาในการทำงานของมอสเฟต จะปรับด้วยบอร์ด dsPIC30F2010 ที่โปรแกรมด้วยภาษาซี การทดสอบดังกล่าวจะป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้ได้

V_s เท่ากับ 220 V ทำการกำหนดรอบทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ และวัดค่าแรงดันอินพุตเอาต์พุต ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 5.1 และภาพของรูปสัญญาณทางด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์จะมีลักษณะดังรูปที่ 5.16

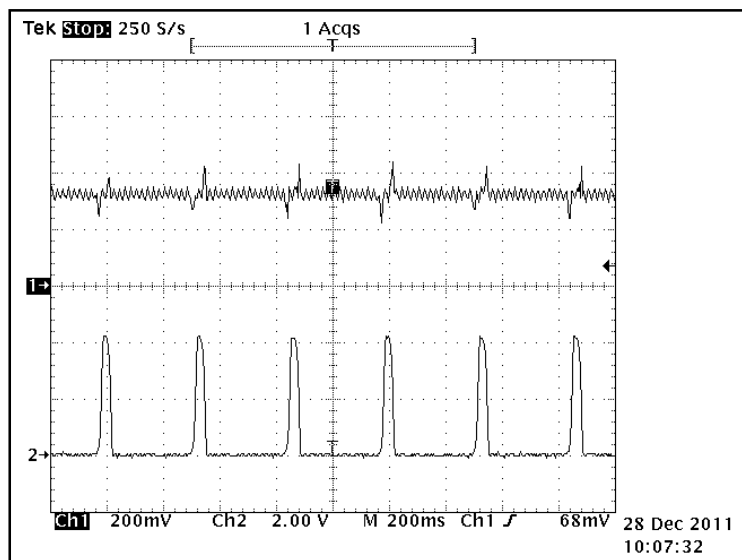


รูปที่ 5.15 การต่อวงจรสำหรับการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์

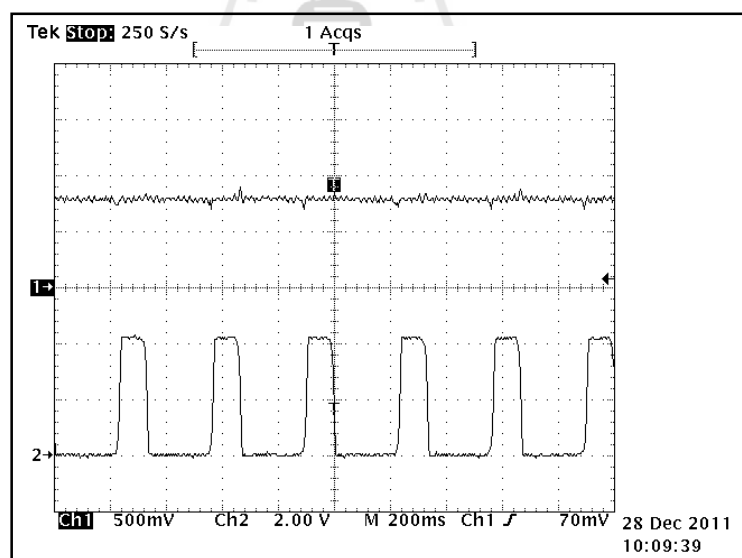
ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์

รอบทำงาน (เปอร์เซ็นต์)	V_{dc} (V)	V_{out} (V)
10	220	26.49
30		75.00
50		118.00
70		156.20
90		198.90

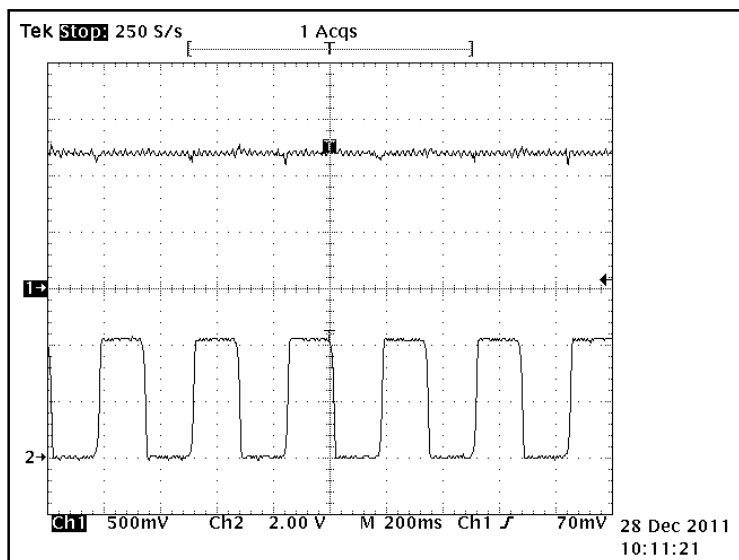
จากรูปที่ 5.16 ช่องสัญญาณที่ 1 ของออสซิลโลสโคปเป็นรูปสัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ในขณะที่ช่องสัญญาณที่ 2 เป็นรูปสัญญาณจุดชนวน (trigger signal) จากบอร์ด dsPIC30F2010



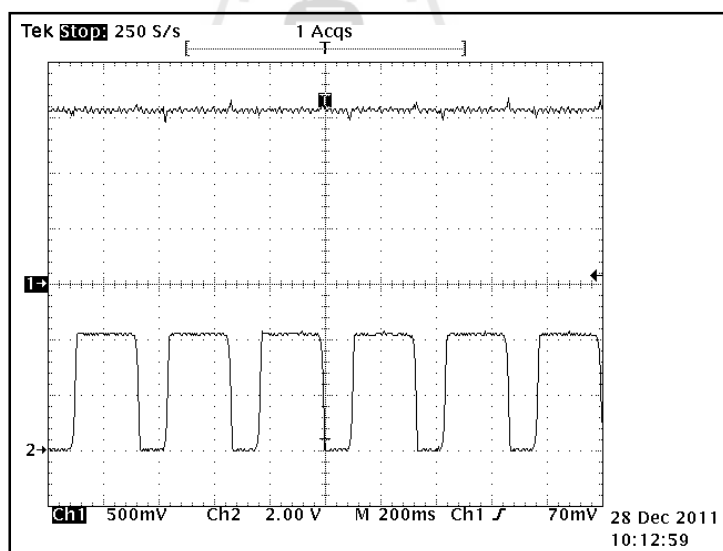
ก) รูปสัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคกิ้งที่รอบทำงานเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์



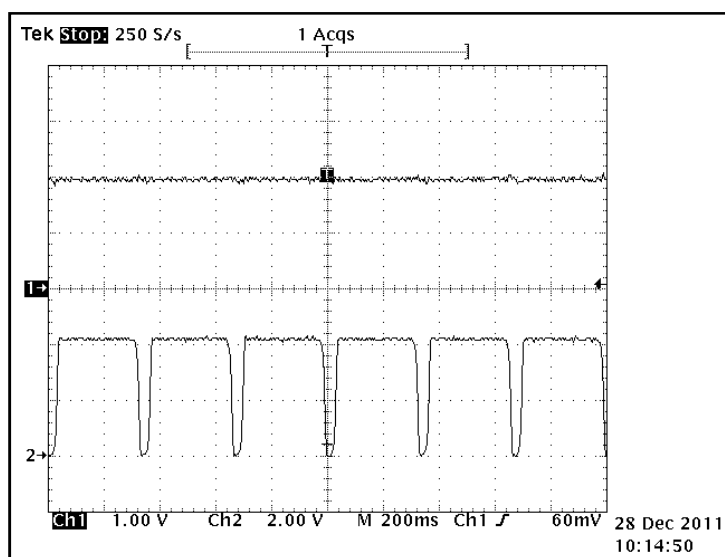
ข) รูปสัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคกิ้งที่รอบทำงานเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์



ค) รูปสัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งที่รอบทำงานเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์



ง) รูปสัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งที่รอบทำงานเท่ากับ 70 เปอร์เซ็นต์



จ) รูปสัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์
ที่รอบทำงานเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 5.16 รูปสัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

5.5 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์

วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เป็นการนำวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ และวงจรแปลงผันแบบบัคค์ มาทำงานร่วมกันเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยมีโครงสร้างของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ดังรูปที่ 5.17 และสามารถอธิบายการทดสอบได้ดังนี้

5.5.1 ผลการทดสอบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์

การทดสอบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ในหัวข้อนี้ เป็นการทดสอบในกรณีที่ยังไม่มีตัวควบคุม (open loop) คือ การทดสอบจะปรับเปลี่ยนค่ารอบทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 วงจร ซึ่งการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 กำหนดรอบทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ฝั่งวงจรสนามให้คงที่ แต่ทำการเปลี่ยนแปลงรอบทำงานของฝั่งอาร์มเจอร์ ส่วนกรณีที่ 2 จะทำตรงกันข้ามกับกรณีที่ 1 ซึ่งการทดสอบทั้ง 2 กรณีนี้ จะเหมือนกับการควบคุมความเร็วรอบด้วยวิธีดั้งเดิม ตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 และการทดสอบวงจรขับเคลื่อนนี้ไม่ได้ทำการควบคุมแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ (V_{dc}) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันดังกล่าวไม่มากนัก โดยผลการทดสอบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แสดงได้ดังตารางที่ 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ จาก

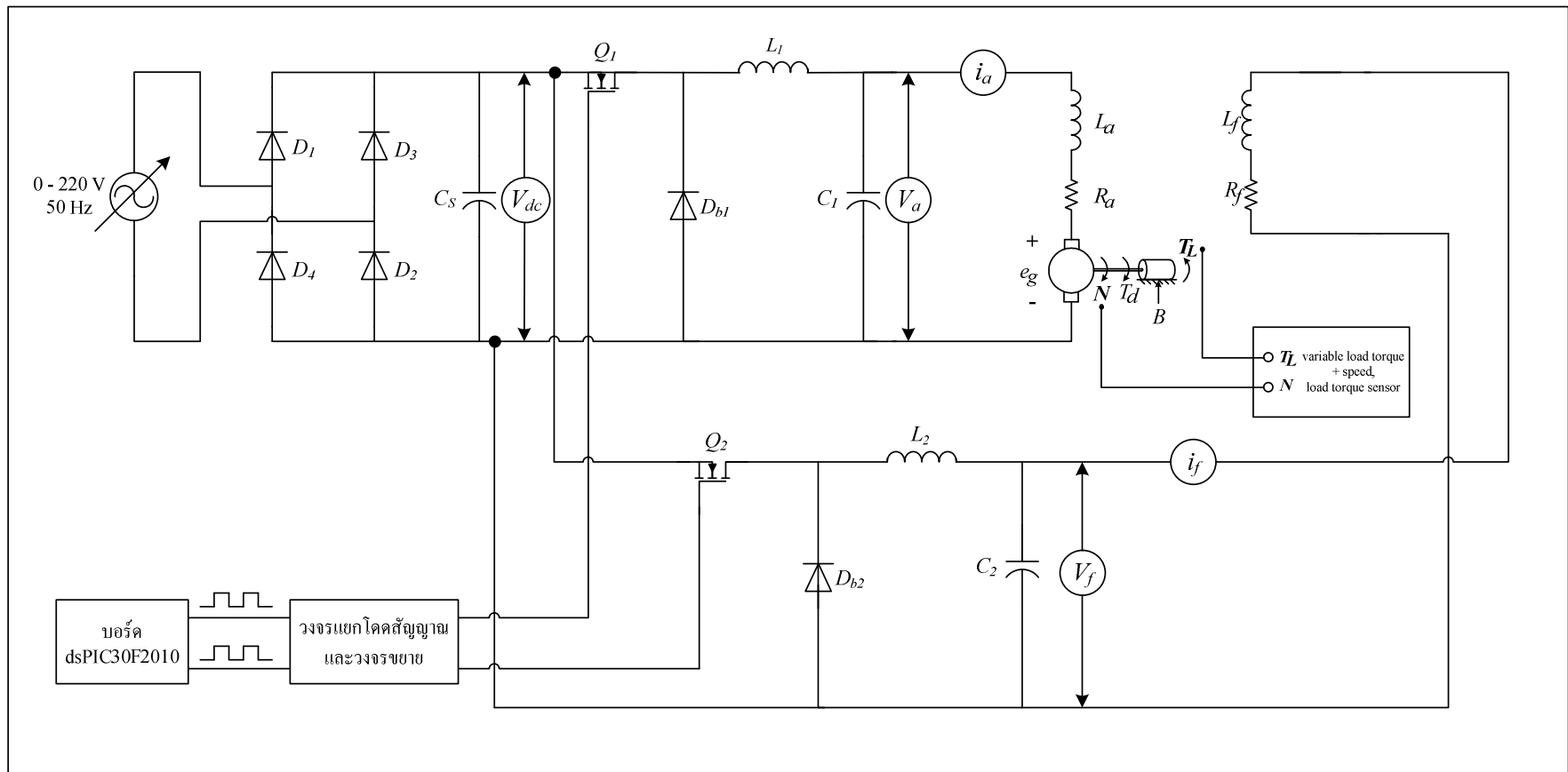
ตารางผลการทดสอบทั้งสองตาราง สันเกตได้ว่าเมื่อมีการปรับเปลี่ยนรอบทำงานของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ไม่ว่าฝั่งใดก็ตาม จะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นไปตามหลักการของการควบคุมความเร็วรอบด้วยวิธีดั้งเดิม

ตารางที่ 5.2 ผลทดสอบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กรณีที่ 1

V_{dc} (V)	k_f (%)	V_f (V)	i_f (A)	k_a (%)	V_a (V)	i_a (A)	N (rpm)
220	95	190	0.28	5	15	0.1	190
		190	0.28	10	42	0.12	570
		190	0.28	20	82	0.14	1120
		190	0.28	40	135	0.16	1795
		190	0.28	60	160	0.19	2134
		190	0.28	80	168	0.19	2181
		190	0.28	90	180	0.2	2338

ตารางที่ 5.3 ผลทดสอบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กรณีที่ 2

V_{dc} (V)	k_f (%)	V_f (V)	i_f (A)	k_a (%)	V_a (V)	i_a (A)	N (rpm)
220	95	190	0.28	95	190	0.19	2472
	90	180	0.28		190	0.18	2524
	80	170	0.26		190	0.18	2548
	70	170	0.26		190	0.18	2577
	60	170	0.26		190	0.18	2592
	50	160	0.24		190	0.18	2633
	40	150	0.23		190	0.18	2650



รูปที่ 5.17 แผนภาพวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

จากรูปที่ 5.17 จะสังเกตได้ว่าสัญญาณจุดชนวนมอสเฟตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 วงจร ได้จากบอร์ด dsPIC30F2010 โดยการเขียนโปรแกรมภาษาซี และต้องผ่านวงจรแยกโคดสัญญาณและวงจรขยายสัญญาณก่อนที่จะนำไปจุดชนวนมอสเฟต โดยสาเหตุที่ต้องใช้วงจรแยกโคดสัญญาณ คือ สำหรับแยกกราวด์ของสัญญาณแต่ละสัญญาณให้ออกจากกัน ซึ่งปัญหาของกราวด์นั้นถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญมาก เพราะปัญหากราวด์อาจทำให้เกิดความเสียหายแก่วงจรและอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ ส่วนการผ่านวงจรขยายสัญญาณนั้น เพื่อขยายแรงดันของสัญญาณที่ออกจากบอร์ด dsPIC30F2010 ซึ่งมีค่าประมาณ 5 V ให้ได้สัญญาณจุดชนวนตามที่มอสเฟตต้องการ คือ อย่างน้อย 10 V จึงจะทำให้การจุดชนวนมอสเฟตไม่เกิดปัญหาขึ้น

5.6 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอโครงสร้างฮาร์ดแวร์สำหรับการขับเคลื่อนเพื่อประหยัดพลังงาน โดยแสดงให้เห็นว่าวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์กับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ รวมทั้งใช้บอร์ด dsPIC30F2010 สร้างสัญญาณจุดชนวนให้มอสเฟต มีความสามารถขับเคลื่อนมอเตอร์ที่สภาวะความเร็วรอบต่าง ๆ ได้ คูได้จากการทดสอบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระดุนดังกล่าวข้างต้น วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ดังกล่าวสามารถปรับค่าแรงดันได้หลายย่าน ตั้งแต่ค่าแรงดันน้อยมาก จนถึงค่าที่ใกล้เคียงค่าพิคกของมอเตอร์ อีกทั้งยังสามารถปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ตลอดย่านการทำงาน ซึ่งการปรับความเร็วรอบดังกล่าวเป็นการปรับความกว้างของสัญญาณจุดชนวนของมอสเฟตจากบอร์ด dsPIC30F2010 และในส่วนของการควบคุมชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระดุนสำหรับประหยัดพลังงาน จะใช้ตัวควบคุมแบบฐานกฎ ซึ่งจะนำเสนอในบทถัดไป

บทที่ 6

ตัวควบคุมแบบฐานกฎสำหรับการประหยัดพลังงาน

6.1 บทนำ

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นเพื่อประหยัดพลังงานสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ตัวควบคุมที่เรียกว่า ตัวควบคุมแบบฐานกฎ (rule based controller) โดยมีหลักการการคำนวณที่ไม่ยุ่งยากและซับซ้อนมากนัก ตัวควบคุมดังกล่าวจะใช้สำหรับวิธีการประหยัดพลังงาน ซึ่งมีการคำนวณหาค่ากระแสสนามที่เหมาะสมค่าหนึ่งตามสภาวะการทำงานของมอเตอร์ ที่ทำให้กำลังงานสูญเสียในมอเตอร์มีค่าน้อยที่สุด รวมถึงควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นให้ได้ตามความต้องการอีกด้วย ซึ่งในบทนี้ได้นำเสนอรายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับตัวควบคุมแบบฐานกฎที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

6.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบฐานกฎ

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นเพื่อประหยัดพลังงานสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกลักษณะของตัวควบคุมเป็นตัวควบคุมแบบฐานกฎ ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มตัวควบคุมชำนาญการ (expert controller) ชนิดหนึ่ง โดยองค์ประกอบของตัวควบคุมดังกล่าว แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ เครื่องอนุมาน (inference engine) และฐานความรู้ (knowledge base) เครื่องอนุมานในที่นี้คือคอมพิวเตอร์ ส่วนฐานความรู้ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นข้อมูล (database) และส่วนที่เป็นกฎ (rule base) ให้การตัดสินใจสั่งการ โดยมีรูปแบบเป็นตรรกเชิงศึกษาสำนึก (heuristic logic) (กองพล อารีรักษ์, 2545) ดังนี้

ถ้า.....แล้ว..... (if.....then.....)

การออกแบบตัวควบคุมแบบฐานกฎสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ กฎการควบคุมได้มาจากการศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบ ซึ่งการศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมดังกล่าวอาศัยการสังเกตระบบ รวมถึงมีการเก็บข้อมูลต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ ทั้งนี้เนื่องจากการออกแบบกฎในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีจุดประสงค์เพื่อควบคุมการทำงาน 2 โหมด คือ กระแสสนามของมอเตอร์และความเร็วรอบของมอเตอร์ ซึ่งการออกแบบกฎมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.2.1 โหมดการทำงานที่ 1 การควบคุมกระแสสนามของมอเตอร์

โหมดการทำงานที่ 1 จะคำนวณหาค่ากระแสสนามที่เหมาะสมเพื่อประหยัดพลังงาน โดยก่อนการคำนวณโปรแกรมจะรับข้อมูลความเร็วรอบและแรงบิดตามที่ต้องการ หลังจากโปรแกรมคำนวณค่ากระแสสนามเป็นที่เรียบร้อยแล้ว โปรแกรมจะส่งค่ารอบทำงานเพื่อทำการปรับมุมจุดชนวนที่มอสเฟตของวงจรแปลงผันแบบบักก์ฝั่งวงจรสนามให้ได้กระแสสนามตามที่ต้องการ จึงจะเปลี่ยนไปทำงานในโหมดการทำงานที่ 2 (อธิบายไว้ในหัวข้อต่อไป)

การควบคุมกระแสสนามด้วยวิธีการข้างต้นนั้น คือการปรับค่าแรงดันฝั่งวงจรสนาม เนื่องจากกระแสสนามมีค่าแปรผันตรงกับแรงดันทางฝั่งสนาม ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบและปรับเปลี่ยนกฎในการควบคุม ดังตารางที่ 6.1 ดังนี้

ตารางที่ 6.1 การทดสอบกฎ

ชุดของกฎ	error1 > 0		error1 < 0		เวลาที่ใช้ (นาทิจ)
	ขนาดของ error1	เพิ่มรอบทำงาน	ขนาดของ error1	ลดรอบทำงาน	
1	>0.015	1.5	<-0.015	1.5	1.12
	>0.010	0.5	<-0.010	0.5	
	>0.005	0.1	<-0.005	0.1	
2	>0.015	2.0	<-0.015	2.0	0.53
	>0.012	1.0	<-0.012	1.0	
	>0.010	0.5	<-0.010	0.5	
	>0.007	0.3	<-0.007	0.3	
	>0.005	0.1	<-0.005	0.1	
3	>0.015	2.5	<-0.015	2.5	0.42
	>0.012	1.5	<-0.012	1.5	
	>0.010	1.0	<-0.010	1.0	
	>0.007	0.5	<-0.007	0.5	
	>0.005	0.1	<-0.005	0.1	

โดย error1 คือ ค่าผิดพลาดของกระแสสนาม คำนวณได้ดังสมการที่ 6.1 ดังนี้

$$\text{error1} = \text{Value.Ifcal} - \text{Value.Ifact} \quad (6.1)$$

ส่วนเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดของกระแสสนาม คำนวณได้ดังสมการที่ (6.2) คือ

$$\text{percent_error1} = \frac{\text{Value.Ifcal} - \text{Value.Ifact}}{\text{Value.Ifcal}} \times 100 \quad (6.2)$$

เมื่อ Value.Ifcal คือ กระแสสนามจากการคำนวณด้วยวิธีฐานแบบจำลอง

Value.Ifact คือ กระแสสนามในขณะใด ๆ

การออกแบบกฎตามตารางที่ 6.1 มีแนวคิด คือ ถ้า error1 มีค่ามาก การปรับรอบทำงานจะมีค่ามาก ทั้งนี้เนื่องจากผู้วิจัยต้องการให้ error1 มีค่าลดลงในระยะเวลาที่ไม่มากนัก แต่ ถ้า error1 มีค่าน้อย การปรับรอบทำงานก็จะมีค่าลดลงตามค่า error1 ด้วย เนื่องจากการปรับรอบทำงานในช่วงนี้จะเป็นการปรับละเอียดเพราะค่า error1 มีค่าน้อยลง โดยการทดสอบกฎดังกล่าว ทำการทดสอบที่แรงบิด 0.2 N·m และความเร็วรอบ 1500 rpm จากตารางที่ 6.1 จะพบว่าเมื่อปรับกฎเปลี่ยนไป จะทำให้เวลาในการลู่เข้าเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นจึงได้เลือกกฎชุดที่ 3 ในการควบคุมกระแสสนามของมอเตอร์เนื่องจากใช้เวลาในการลู่เข้าน้อยที่สุด และสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

- กฎที่ 1 ถ้า <ค่าผิดพลาดของกระแสสนามเป็นบวกและมีขนาดเกินกว่า 0.015 A>
แล้ว <เพิ่มรอบทำงาน 2.5 เปอร์เซนต์>
- กฎที่ 2 ถ้า <ค่าผิดพลาดของกระแสสนามเป็นบวกและมีขนาดเกินกว่า 0.012 A>
แล้ว <เพิ่มรอบทำงาน 1.5 เปอร์เซนต์>
- กฎที่ 3 ถ้า <ค่าผิดพลาดของกระแสสนามเป็นบวกและมีขนาดเกินกว่า 0.010 A>
แล้ว <เพิ่มรอบทำงาน 1.0 เปอร์เซนต์>
- กฎที่ 4 ถ้า <ค่าผิดพลาดของกระแสสนามเป็นบวกและมีขนาดเกินกว่า 0.007 A>
แล้ว <เพิ่มรอบทำงาน 0.5 เปอร์เซนต์>
- กฎที่ 5 ถ้า <ค่าผิดพลาดของกระแสสนามเป็นบวกและมีขนาดเกินกว่า 0.005 A>
แล้ว <เพิ่มรอบทำงาน 0.1 เปอร์เซนต์>
- กฎที่ 6 ถ้า <ค่าผิดพลาดของกระแสสนามเป็นลบและมีขนาดเกินกว่า 0.015 A>
แล้ว <ลดรอบทำงาน 2.5 เปอร์เซนต์>

กฎที่ 7 ถ้า <ค่าผิดพลาดของกระแสสนามเป็นลบและมีขนาดเกินกว่า 0.012 A>
แล้ว <ลดรอบทำงาน 1.5 เปอร์เซ็นต์>

กฎที่ 8 ถ้า <ค่าผิดพลาดของกระแสสนามเป็นลบและมีขนาดเกินกว่า 0.010 A>
แล้ว <ลดรอบทำงาน 1.0 เปอร์เซ็นต์>

กฎที่ 9 ถ้า <ค่าผิดพลาดของกระแสสนามเป็นลบและมีขนาดเกินกว่า 0.007 A>
แล้ว <ลดรอบทำงาน 0.5 เปอร์เซ็นต์>

กฎที่ 10 ถ้า <ค่าผิดพลาดของกระแสสนามเป็นลบและมีขนาดเกินกว่า 0.005 A>
แล้ว <ลดรอบทำงาน 0.1 เปอร์เซ็นต์>

6.2.2 โหมดการทำงานที่ 2 การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

โหมดการทำงานที่ 2 สำหรับควบคุมความเร็วรอบให้ได้ตามที่ต้องการ การควบคุมดังกล่าวทำได้โดยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าของวงจรฟีดแบ็คอาร์เมเจอร์ ด้วยการปรับมุมจุดชนวนของมอสเฟตของวงจรแปลงผันแบบบักคัพวงจรอาร์เมเจอร์ โดยเงื่อนไขการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าพิจารณาจากค่าผิดพลาดของความเร็วรอบ (error2) ดังสมการที่ (6.3) ดังนี้

$$\text{error2} = N_t - \text{Value.Nact} \quad (6.3)$$

ส่วนเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดของความเร็วรอบ คำนวณได้ดังสมการที่ (6.4) คือ

$$\text{percent_error2} = \frac{N_t - \text{Value.Nact}}{N_t} \times 100 \quad (6.4)$$

เมื่อ N_t คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ต้องการ

Value.Nact คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ในขณะใด ๆ

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ หมายถึง การปรับค่าแรงดันฟีดแบ็ควงจรอาร์เมเจอร์ เนื่องจากความเร็วรอบมีลักษณะแปรผันตรงกับแรงดันอาร์เมเจอร์ จึงได้ออกแบบกฎของการควบคุมนี้ไว้เพียง 1 ชุด ไม่ได้ทำการปรับเปลี่ยนกฎและเปรียบเทียบเวลาในการลู่เข้าดังเช่นกฎการควบคุมกระแสสนาม เพราะกฎชุดดังกล่าวใช้เวลาในการลู่เข้าไม่แตกต่างกันในแต่ละครั้งที่มีการปรับเปลี่ยนกฎการควบคุมกระแสสนาม ผู้วิจัยจึงเห็นว่าไม่จำเป็นต้องทำการปรับเปลี่ยนอะไร ดังนั้นกฎที่ได้จากการออกแบบจึงมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- กฎที่ 1 ถ้า <ค่าผิดพลาดของความเร็วรอบเป็นบวกและมีขนาดเกินกว่า 200 rpm>
แล้ว <เพิ่มรอบทำงาน 1.5 เปอร์เซ็นต์>
- กฎที่ 2 ถ้า <ค่าผิดพลาดของความเร็วรอบเป็นบวกและมีขนาดเกินกว่า 100 rpm>
แล้ว <เพิ่มรอบทำงาน 1.0 เปอร์เซ็นต์>
- กฎที่ 3 ถ้า <ค่าผิดพลาดของความเร็วรอบเป็นบวกและมีขนาดเกินกว่า 50 rpm>
แล้ว <เพิ่มรอบทำงาน 0.5 เปอร์เซ็นต์>
- กฎที่ 4 ถ้า <ค่าผิดพลาดของความเร็วรอบเป็นบวกและมีขนาดเกินกว่า 10 rpm>
แล้ว <เพิ่มรอบทำงาน 0.1 เปอร์เซ็นต์>
- กฎที่ 5 ถ้า <ค่าผิดพลาดของความเร็วรอบเป็นลบและมีขนาดเกินกว่า 200 rpm>
แล้ว <ลดรอบทำงาน 1.5 เปอร์เซ็นต์>
- กฎที่ 6 ถ้า <ค่าผิดพลาดของความเร็วรอบเป็นลบและมีขนาดเกินกว่า 100 rpm>
แล้ว <ลดรอบทำงาน 1.0 เปอร์เซ็นต์>
- กฎที่ 7 ถ้า <ค่าผิดพลาดของความเร็วรอบเป็นลบและมีขนาดเกินกว่า 50 rpm>
แล้ว <ลดรอบทำงาน 0.5 เปอร์เซ็นต์>
- กฎที่ 8 ถ้า <ค่าผิดพลาดของความเร็วรอบเป็นลบและมีขนาดเกินกว่า 10 rpm>
แล้ว <ลดรอบทำงาน 0.1 เปอร์เซ็นต์>

6.3 การสร้างตัวควบคุมแบบฐานกฎด้วยบอร์ด dsPIC30F2010

การสร้างตัวควบคุมแบบฐานกฎด้วยบอร์ด dsPIC30F2010 มีแผนภาพการทำงานดังรูปที่ 6.1 จากแผนภาพดังกล่าวจะเป็นระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีตัวควบคุมแบบฐานกฎ ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวจะควบคุมกระแสสนามและความเร็วรอบของมอเตอร์ สำหรับการประหยัดพลังงาน โดยโปรแกรมภาษาซีเฉพาะส่วนของตัวควบคุมแบบฐานกฎบนบอร์ด dsPIC30F2010 สามารถอธิบายได้ดังนี้

- โปรแกรมในโหมดการควบคุมกระแสสนาม

```
error1 = Value.Ifcal - Value.Ifact;           //คำนวณค่าความผิดพลาดของกระแสสนาม
if(error1 >= 0)
percent_error1 = (Value.Ifcal - Value.Ifact)*100/Value.Ifcal;
else
percent_error1 = (Value.Ifact - Value.Ifcal)*100/Value.Ifcal;

//ตรวจสอบค่าความผิดพลาดว่าเป็นบวกหรือ
ลบแล้วคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาด
```

```

{
if (percent_error1 <= 5)
    {
        System.EnaCtrlIFieldMode = false;
        System.EnaCal_IField = false;
        System.EnaCtrlSpeedMode = true;
        Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty;
    }
    else
    {
if (error1>0)
    {
if (error1 > 15)
    Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty+25;
else if (error1 > 12)
    Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty+15;
else if (error1 > 10)
    Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty+10;
else if (error1 > 7)
    Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty+5;
else if (error1 > 5)
    Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty+1;
if(Value.CalPWM1Duty > 950)
    Value.CalPWM1Duty = 950;
    }
else
    {
if (error1 < -15)
    Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty-25;
else if (error1 < -12)

```

//เริ่มโหมดการควบคุมกระแสสนาม
 //ถ้าเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5
 //ออกจากโหมดการควบคุมกระแส
 //หยุดการคำนวณกระแสสนาม
 //เริ่มโหมดการควบคุมความเร็วรอบ
 //ส่งค่ารอบทำงานของฟั้งวงจรสนาม
 //ถ้าค่าความผิดพลาดเป็นบวก
 //ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่า 15
 //เพิ่มรอบทำงาน 25 (2.5 เปอร์เซนต์)
 //ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่า 12
 //เพิ่มรอบทำงาน 15 (1.5 เปอร์เซนต์)
 //ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่า 10
 //เพิ่มรอบทำงาน 10 (1.0 เปอร์เซนต์)
 //ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่า 7
 //เพิ่มรอบทำงาน 5 (0.5 เปอร์เซนต์)
 //ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่า 5
 //เพิ่มรอบทำงาน 1 (0.1 เปอร์เซนต์)
 //ถ้ารอบทำงานของฟั้งวงจรสนามมากกว่า 950 (95 เปอร์เซนต์)
 //ให้รอบทำงานของฟั้งวงจรสนามเท่ากับ 950 (95 เปอร์เซนต์)
 //ถ้าค่าความผิดพลาดเป็นลบ
 //ถ้าค่าความผิดพลาดน้อยกว่า -15
 //ลดรอบทำงาน 25 (2.5 เปอร์เซนต์)
 //ถ้าค่าความผิดพลาดน้อยกว่า -12

```

Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty-15; //ลดรอบทำงาน 15 (1.5 เปอร์เซ็นต์)
else if (error1 < -10) //ถ้าค่าความผิดพลาดน้อยกว่า -10
Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty-10; //ลดรอบทำงาน 10 (1.0 เปอร์เซ็นต์)
else if (error1 < -7) //ถ้าค่าความผิดพลาดน้อยกว่า -7
Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty-5; //ลดรอบทำงาน 5 (0.5 เปอร์เซ็นต์)
else if (error1 < -5) //ถ้าค่าความผิดพลาดน้อยกว่า -5
Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty-1; //ลดรอบทำงาน 1 (0.1 เปอร์เซ็นต์)
if(Value.CalPWM1Duty < 100) //ถ้ารอบทำงานของฟังก์ชัน นาม
น้อยกว่า 100 (10 เปอร์เซ็นต์)
Value.CalPWM1Duty = 100; //ให้รอบทำงานของฟังก์ชัน นาม
เท่ากับ 100 (10 เปอร์เซ็นต์)
    }
}
}

```

```

else Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty; //ส่งค่ารอบทำงานของฟังก์ชัน นาม

```

- โปรแกรมในโหมดการควบคุมความเร็วรอบ

```

error2 = N_t - Value.Nact; //คำนวณค่าความผิดพลาดของความเร็วรอบ
if(error2 >= 0)
Value.percent_error2 = (unsigned long)( N_t - Value.Nact)*100/N_t;
else
Value.percent_error2 = (unsigned long)( Value.Nact - N_t)*100/N_t;
//ตรวจสอบค่าความผิดพลาดว่าเป็นบวกหรือ
ลบแล้วคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาด

//เริ่มโหมดการควบคุมความเร็วรอบ
if (Value.percent_error2 <= 5) //ถ้าเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดน้อยกว่าหรือ
{ //เท่ากับ 5
Value.CalPWM2Duty = Value.PWM2Duty; //ส่งค่ารอบทำงานของฟังก์ชันอาร์เมเจอร์
}
else
{

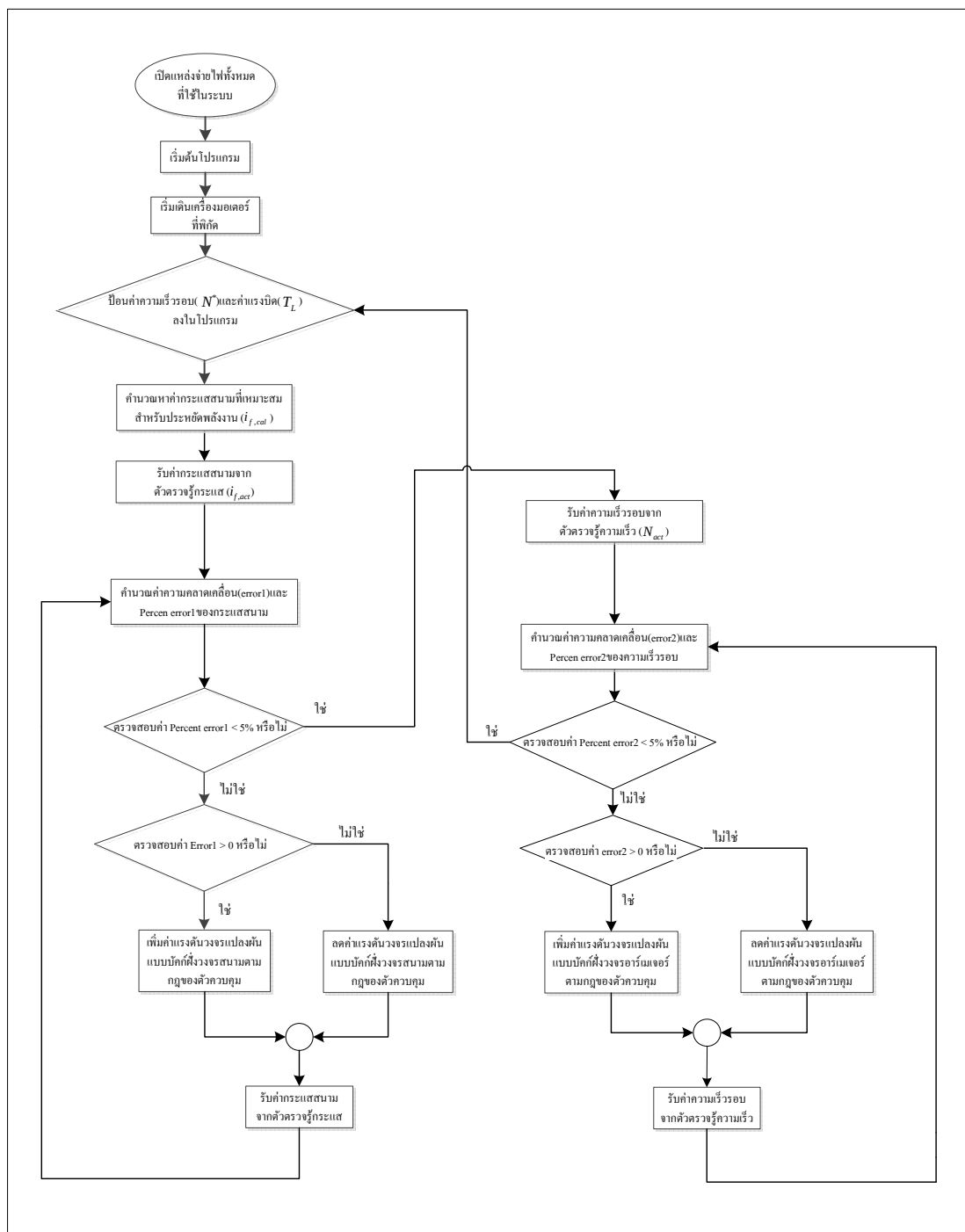
```

```

if (error2 > 0)                                     //ถ้าค่าความผิดพลาดเป็นบวก
{
    if (error2 > 200)                                //ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่า 200
        Value.CalPWM2Duty = Value.PWM2Duty+15;    //เพิ่มรอบทำงาน 15 (1.5 เปอร์เซ็นต์)
    else if (error2 > 100)                            //ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่า 100
        Value.CalPWM2Duty = Value.PWM2Duty+10;    //เพิ่มรอบทำงาน 10 (1.0 เปอร์เซ็นต์)
    else if (error2 > 50)                             //ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่า 50
        Value.CalPWM2Duty = Value.PWM2Duty+5;     //เพิ่มรอบทำงาน 5 (0.5 เปอร์เซ็นต์)
    else //if (error2 > 10)                          //ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่า 10
        Value.CalPWM2Duty = Value.PWM2Duty+1;     //เพิ่มรอบทำงาน 1 (0.1 เปอร์เซ็นต์)
    }
else                                                //ถ้าค่าความผิดพลาดเป็นลบ
{
    if (error2 < -200)                               //ถ้าค่าความผิดพลาดน้อยกว่า -200
        Value.CalPWM2Duty = Value.PWM2Duty-15;    //ลดรอบทำงาน 15 (1.5 เปอร์เซ็นต์)
    else if (error2 < -100)                          //ถ้าค่าความผิดพลาดน้อยกว่า -100
        Value.CalPWM2Duty = Value.PWM2Duty-10;    //ลดรอบทำงาน 10 (1.0 เปอร์เซ็นต์)
    else if (error2 < -50)                           //ถ้าค่าความผิดพลาดน้อยกว่า -50
        Value.CalPWM2Duty = Value.PWM2Duty-5;     //ลดรอบทำงาน 5 (0.5 เปอร์เซ็นต์)
    else //if (error2 < -10)                         //ถ้าค่าความผิดพลาดน้อยกว่า -10
        Value.CalPWM2Duty = Value.PWM2Duty-1;     //ลดรอบทำงาน 1 (0.1 เปอร์เซ็นต์)
    }
}
}

else Value.CalPWM2Duty = Value.PWM2Duty; //ส่งค่ารอบทำงานของฟังก์ชันจอร์เมเจอร์

```



รูปที่ 6.1 แผนภาพการทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีตัวควบคุมแบบฐานกฎ

จากรูปที่ 6.1 การทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ ขั้นแรกจะทำการเปิดแหล่งจ่ายไฟทั้งหมดที่ใช้ในระบบ หลังจากนั้นจึงเริ่มต้นการทำงานของโปรแกรมซึ่งโปรแกรกดังกล่าวจะควบคุมกระบวนการทำงานทั้งหมด เพื่อประหยัดพลังงานในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า

กระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยในช่วงต้นของกระบวนการทำงานจะเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ จนกระทั่งได้แรงดันวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรสนามที่พิกัด (220 V) ต่อมาจึงทำการป้อนค่าความเร็วรอบและแรงบิดที่ต้องการ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับคำนวณหาค่ากระแสสนามที่เหมาะสมสำหรับประหยัดพลังงาน หลังจากนั้นจะทำการปรับค่ากระแสสนามดังกล่าวจากวงจรแปลงผันแบบบัลค์ฟีดวงจรสนามด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และรับค่ากระแสสนามของมอเตอร์ผ่านตัวตรวจรู้กระแส เพื่อตรวจสอบว่ากระแสสนามดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับกระแสสนามที่ต้องการหรือไม่ ซึ่งการตรวจสอบจะทำการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของกระแสสนามตามสมการที่ (6.2) ถ้าค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมีค่ามากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ วงจรแปลงผันแบบบัลค์จะทำหน้าที่เพิ่มและลดแรงดันฟีดวงจรสนามตามกฎของตัวควบคุมที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.2 จนกว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของกระแสสนามจะมีค่าน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ แล้วไมโครคอนโทรลเลอร์จึงจะเปลี่ยนไปควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยมีการทำงานเช่นเดียวกับการควบคุมกระแสสนาม ต่างกันเพียงแค่การควบคุมความเร็วรอบนั้น วงจรแปลงผันแบบบัลค์ที่ทำหน้าที่เพิ่มลดแรงดัน คือ ฟีดวงจรอาร์เมเจอร์ และเมื่อต้องการหยุดการทำงานของโปรแกรมหรือเปลี่ยนจุดการทำงานใหม่ สามารถทำได้โดยลดแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟจนหมดแล้วจึงป้อนค่าความเร็วรอบและแรงบิดค่าใหม่ลงในโปรแกรม

6.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอตัวควบคุมแบบฐานกฎที่ใช้สำหรับการประหยัดพลังงาน และควบคุมกระบวนการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ให้ได้ตามความต้องการ โดยตัวควบคุมแบบฐานกฎมีกระบวนการทำงานที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน คือ จะตรวจสอบจากการคำนวณค่าผิดพลาด แล้วตัวควบคุมดังกล่าวจึงจะทำการปรับเพิ่มหรือลดแรงดันตามกฎที่ได้ออกแบบไว้ และจากการทดสอบกฎจะพบว่าตัวควบคุมชนิดนี้ใช้เวลาในการควบคุมไม่นานมาก จึงถือเป็นข้อดีของตัวควบคุมแบบฐานกฎ คือ ไม่ซับซ้อนและใช้เวลาไม่มาก และต่อไปจะเป็นการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นสำหรับประหยัดพลังงาน โดยมีผลเปรียบเทียบกับวิธีการขับเคลื่อนด้วยวิธีดั้งเดิม ซึ่งจะนำเสนอในบทถัดไป

บทที่ 7

ผลการทดสอบการประหยัดพลังงาน

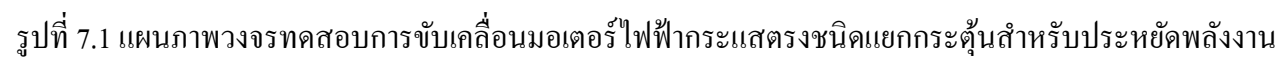
7.1 บทนำ

ผลการทดสอบการประหยัดพลังงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น จะเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนที่ใช้วิธีฐานแบบจำลอง กับการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม ดังนั้นในบทนี้จึงนำเสนอผลการทดสอบและการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานระหว่างสองวิธีดังกล่าวเพื่อให้เห็นว่า การประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนที่ใช้วิธีฐานแบบจำลองสามารถประหยัดพลังงานได้จริง นอกจากนี้ได้นำเสนอกราฟพื้นที่ของการประหยัดพลังงาน (region of energy saving) เพื่อยืนยันผลการประหยัดพลังงานด้วยวิธีดังกล่าวได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งรายละเอียดทั้งหมดรวมถึงอภิปรายผลได้นำเสนอไว้ในบทนี้ด้วยเช่นกัน

7.2 การทดสอบและผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์

การทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นสำหรับประหยัดพลังงานตามหลักการของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ แสดงได้ดังรูปที่ 7.1 ซึ่งจากรูปวงจรถัดกล่าวพบว่า ได้แบ่งการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นออกเป็น 2 โหมด คือ ควบคุมกระแสสนามและความเร็วรอบของมอเตอร์ และหลักการทำงานของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์นี้สามารถอธิบายได้ดังแผนภาพการทำงานรูปที่ 6.1 ในบทที่ 6

การทดสอบชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ ได้ทำการทดสอบทั้งแบบมีตัวควบคุมเพื่อประหยัดพลังงานหรือวิธีฐานแบบจำลองและไม่มีตัวควบคุมหรือวิธีดั้งเดิม และมีการเก็บข้อมูลทางพลังงาน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ ซึ่งการเก็บข้อมูลทางพลังงานจะทำการบันทึกข้อมูลแรงบิด โหลด ความเร็วรอบของมอเตอร์ รวมทั้งกระแสและแรงดันของวงจรมอเตอร์ทั้งสองฝั่ง เพื่อนำไปคำนวณหา กำลังงานอินพุต กำลังงานเอาต์พุตและกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ โดยผลการทดสอบดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 7.1 และ 7.2 ตามลำดับ



รูปที่ 7.1 แผนภาพวงจรทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นสำหรับประหยัดพลังงาน

ตารางที่ 7.1 ข้อมูลทางพลังงานในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นวิธีฐานแบบจำลอง

T_L (N·m)	N^* (rpm)	N_{act} (rpm)	$i_{f,cal}$ (A)	i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	P_{loss} (W)
0.2	1000	1012	0.114	0.120	80	0.900	60	63.600	21.200	42.400
	1200	1219	0.114	0.120	80	0.950	70	76.100	25.530	50.570
	1300	1341	0.115	0.110	70	1.000	80	87.700	28.090	59.610
	1400	1408	0.115	0.120	80	0.900	80	81.600	29.490	52.110
	1500	1495	0.116	0.110	70	0.900	90	88.700	31.310	57.390
0.5	1000	988	0.176	0.180	120	1.100	70	98.600	51.730	46.870
	1200	1211	0.177	0.180	120	1.200	80	117.600	63.410	54.190
	1300	1321	0.178	0.190	130	1.200	100	144.700	69.170	75.530
	1400	1401	0.179	0.170	115	1.250	100	144.550	73.360	71.190
	1500	1527	0.179	0.180	120	1.200	110	153.600	79.950	73.650
0.8	1000	1002	0.223	0.220	140	1.600	80	158.800	83.940	74.860
	1200	1184	0.225	0.230	150	1.600	100	194.500	99.190	95.310
	1300	1317	0.226	0.230	150	1.600	110	210.500	110.330	100.170
	1400	1447	0.227	0.230	150	1.600	120	226.500	121.220	105.280
	1500	1510	0.228	0.220	145	1.600	125	231.900	126.500	105.400

ตารางที่ 7.1 ข้อมูลทางพลังงานในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นวิธีฐานแบบจำลอง (ต่อ)

T_L (N·m)	N^* (rpm)	N_{act} (rpm)	$i_{f,cal}$ (A)	i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	P_{loss} (W)
1.1	1000	1001	0.263	0.250	170	1.850	90	209.000	115.310	93.690
	1200	1169	0.263	0.270	185	2.000	100	249.950	134.660	115.290
	1300	1337	0.263	0.260	180	2.000	120	286.800	154.010	132.790
	1400	1342	0.263	0.270	180	2.000	120	288.600	154.590	134.010
	1500	1460	0.263	0.250	180	2.000	125	295.000	168.180	126.820
1.2	1000	995	0.276	0.280	180	2.250	90	252.900	125.040	127.860
	1200	1177	0.275	0.280	190	2.200	110	295.200	147.910	147.290
	1300	1238	0.275	0.270	185	2.200	110	291.950	155.570	136.380
	1400	1360	0.274	0.270	180	2.200	130	334.600	170.900	163.700
	1500	1457	0.274	0.280	190	2.200	120	317.200	183.090	134.110



ตารางที่ 7.2 ข้อมูลทางพลังงานในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นแบบวิธีดั้งเดิม

T_L (N·m)	N^* (rpm)	N_{act} (rpm)	i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	P_{loss} (W)
0.2	1000	1043	0.30	200	0.75	85	123.75	21.84	101.91
	1200	1205	0.30	200	0.70	100	130.00	25.24	104.76
	1300	1318	0.30	200	0.70	1110	137.00	27.60	109.40
	1400	1395	0.30	200	0.70	115	140.50	29.22	111.28
	1500	1565	0.30	200	0.70	130	151.00	32.78	118.22
0.5	1000	1020	0.30	200	1.10	90	159.00	53.41	105.59
	1200	1218	0.30	200	1.10	100	170.00	63.77	106.23
	1300	1335	0.30	200	1.10	115	186.50	69.90	116.60
	1400	1389	0.30	200	1.10	120	192.00	72.73	119.27
	1500	1513	0.30	200	1.10	130	203.00	79.22	123.78
0.8	1000	1010	0.30	200	1.50	90	195.00	84.61	110.39
	1200	1181	0.30	200	1.50	105	217.50	98.94	118.56
	1300	1332	0.30	200	1.50	120	240.00	111.59	128.41
	1400	1447	0.30	200	1.50	130	255.00	121.22	133.78
	1500	1502	0.30	200	1.60	130	268.00	125.83	142.17

ตารางที่ 7.2 ข้อมูลทางพลังงานในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นแบบวิธีดั้งเดิม (ต่อ)

T_L (N·m)	N^* (rpm)	N_{act} (rpm)	i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	P_{loss} (W)
1.1	1000	1006	0.30	200	1.90	90	231.00	115.88	115.12
	1200	1183	0.30	200	1.90	110	269.00	136.27	132.73
	1300	1268	0.30	200	1.90	115	278.50	146.06	132.44
	1400	1446	0.30	200	1.90	130	307.00	166.57	140.43
	1500	1526	0.30	200	1.95	135	323.25	175.78	147.47
1.2	1000	990	0.30	200	2.10	90	249.00	124.41	124.59
	1200	1180	0.30	200	2.10	110	291.00	148.28	142.72
	1300	1324	0.30	200	2.10	120	312.00	166.38	145.62
	1400	1380	0.30	200	2.10	125	322.50	173.42	149.08
	1500	1471	0.30	200	2.10	130	333.00	184.85	148.15

โดย N^* คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ต้องการ

N_{act} คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ในขณะใด ๆ โดยมีความคลาดเคลื่อน $\pm 5\%N^*$

$i_{f,cal}$ คือ กระแสสนามจากการคำนวณด้วยวิธีฐานแบบจำลอง

i_f คือ กระแสสนามในขณะใด ๆ โดยมีความคลาดเคลื่อน $\pm 5\%i_{f,cal}$

จากตารางผลการทดสอบ พบว่าที่สภาวะแรงบิดโหลดและความเร็วรอบต่าง ๆ ค่ากำลังงานอินพุตของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์วิธีฐานแบบจำลอง มีค่าน้อยกว่ากำลังงานอินพุตของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบวิธีดั้งเดิม โดยเฉพาะที่แรงบิดโหลดต่ำ ๆ จนถึง 50 เปอร์เซ็นต์ของแรงบิดโหลดเต็มพิกัด (โหลดเต็มพิกัดมีค่าเท่ากับ $1.5 \text{ N}\cdot\text{m}$) ค่ากำลังงานอินพุตของระบบขับเคลื่อนทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก ซึ่งหมายถึงสามารถประหยัดพลังงานได้มาก ส่วนในช่วงแรงบิดโหลดมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของแรงบิดโหลดพิกัด สามารถประหยัดพลังงานได้เช่นกัน แต่ในบางสภาวะ บางค่าความเร็วรอบไม่สามารถประหยัดพลังงานได้ เช่น ในสภาวะแรงบิดโหลด เท่ากับ $1.1 \text{ N}\cdot\text{m}$ และความเร็วรอบ เท่ากับ 1300 rpm โดยผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน แสดงได้ดังตารางที่ 7.3 และจากค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ในขณะใด ๆ (N_{act}) ที่ได้แสดงในตารางผลการทดสอบ จะใช้ความคลาดเคลื่อน $\pm 5\%$ เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้เป็นโหลดให้กับมอเตอร์ (pendulum) ไม่สามารถกำหนดค่าโหลดให้คงที่ได้ตลอดเวลา ผู้วิจัยจึงต้องปรับชุดควบคุมโหลดดังกล่าวเพื่อให้ได้โหลดที่ค่า ๆ หนึ่งตลอดช่วงการทดสอบ ด้วยเหตุนี้ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ไม่สามารถที่จะเข้าสู่ค่าที่ต้องการ ภายใต้เงื่อนไขความคลาดเคลื่อนที่น้อยมาก ๆ และเพื่อเป็นการยืนยันว่าการรู้เข้าดังกล่าว ไม่ได้เกิดจากสมรรถนะที่ไม่ดีของตัวควบคุมแบบฐานกฎ ผู้วิจัยจึงได้ทดสอบตัวควบคุมดังกล่าว ในกรณีที่มอเตอร์ไม่มีการขับโหลด (no-load) ซึ่งผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 7.4

ตารางที่ 7.3 ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน

T_L ($\text{N}\cdot\text{m}$)	N^* (rpm)	วิธีดั้งเดิม				วิธีฐานแบบจำลอง				เปอร์เซ็นต์ การประหยัด พลังงาน
		N_{act} (rpm)	i_f (A)	V_a (V)	P_{in} (W)	N_{act} (rpm)	i_f (A)	V_a (V)	P_{in} (W)	
0.2	1000	1043	0.3	85	123.75	1012	0.12	60	63.60	48.61
	1200	1205	0.3	100	130.00	1219	0.12	70	76.10	41.46
	1300	1318	0.3	1110	137.00	1341	0.11	80	87.70	35.99
	1400	1395	0.3	115	140.50	1408	0.12	80	81.60	41.92
	1500	1565	0.3	130	151.00	1495	0.11	90	88.70	41.26
0.5	1000	1020	0.3	90	159.00	988	0.18	70	98.60	37.99
	1200	1218	0.3	100	170.00	1211	0.18	80	117.60	30.82
	1300	1335	0.3	115	186.50	1321	0.19	100	144.70	22.41
	1400	1389	0.3	120	192.00	1401	0.17	100	144.55	24.71
	1500	1513	0.3	130	203.00	1527	0.18	110	153.60	24.33

ตารางที่ 7.3 ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน (ต่อ)

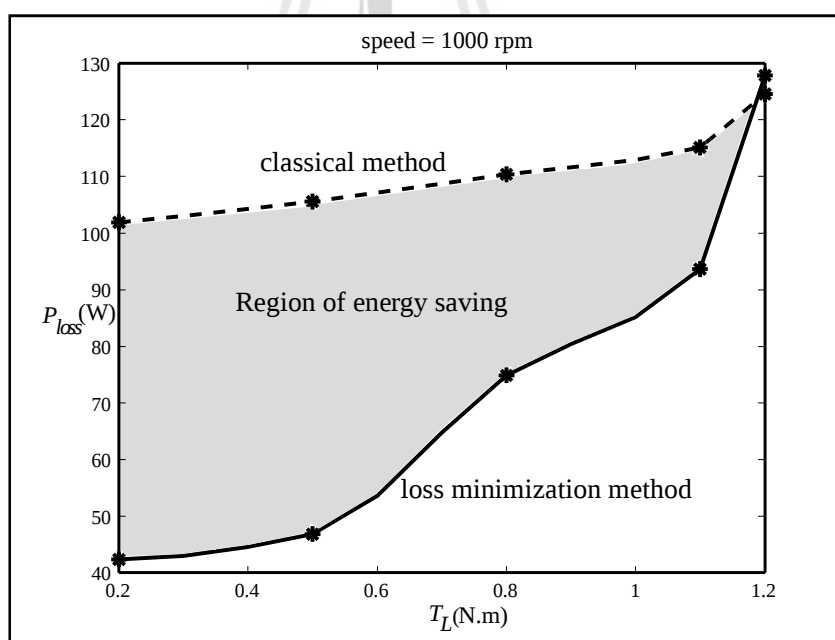
T_L (N·m)	N^* (rpm)	วิธีดั้งเดิม				วิธีฐานแบบจำลอง				เปอร์เซ็นต์ การประหยัด พลังงาน
		N_{act} (rpm)	i_f (A)	V_a (V)	P_{in} (W)	N_{act} (rpm)	i_f (A)	V_a (V)	P_{in} (W)	
0.8	1000	1010	0.3	90	195.00	1002	0.22	80	158.80	18.56
	1200	1181	0.3	105	217.50	1184	0.23	100	194.50	10.57
	1300	1332	0.3	120	240.00	1317	0.23	110	210.50	12.29
	1400	1447	0.3	130	255.00	1447	0.23	120	226.50	11.18
	1500	1502	0.3	130	268.00	1510	0.22	125	231.90	13.47
1.1	1000	1006	0.3	90	231.00	1001	0.25	90	209.00	9.52
	1200	1183	0.3	110	269.00	1169	0.27	100	249.95	7.08
	1300	1268	0.3	115	278.50	1337	0.26	120	286.80	ไม่ประหยัด
	1400	1446	0.3	130	307.00	1342	0.27	120	288.60	5.99
	1500	1526	0.3	135	323.25	1460	0.25	125	295.00	8.74
1.2	1000	990	0.3	90	249.00	995	0.28	90	252.90	ไม่ประหยัด
	1200	1180	0.3	110	291.00	1177	0.28	110	295.20	ไม่ประหยัด
	1300	1324	0.3	120	312.00	1238	0.27	110	291.95	6.43
	1400	1380	0.3	125	322.50	1360	0.27	130	334.60	ไม่ประหยัด
	1500	1471	0.3	130	333.00	1457	0.28	120	317.20	4.74

ตารางที่ 7.4 ผลการทดสอบตัวควบคุมแบบฐานกฎ ในกรณีที่มอเตอร์ไม่มีการขับโหลด

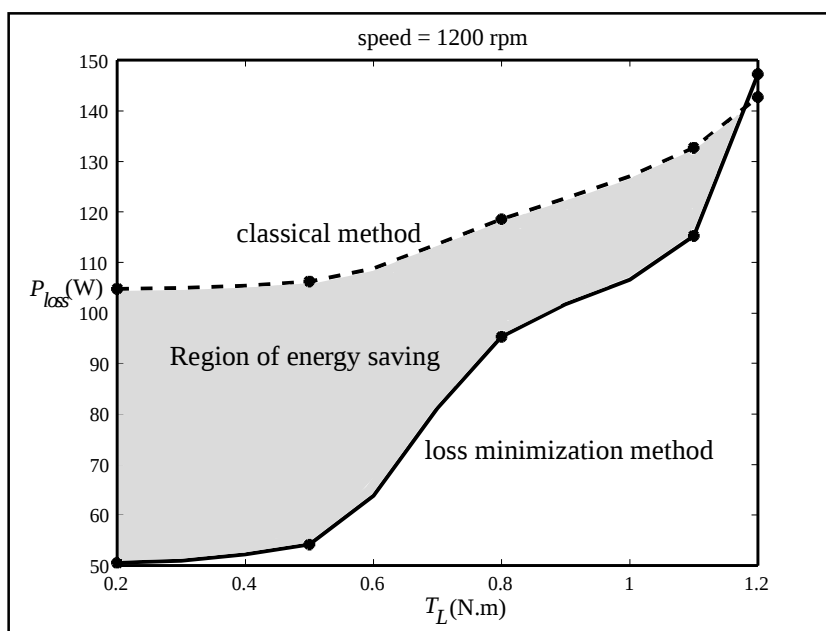
N^* (rpm)	N_{act} (rpm)	i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)
600	600	0.3	210	0.14	45
800	800	0.3	210	0.15	60
1000	1002	0.3	210	0.15	76
1200	1204	0.3	210	0.16	90
1500	1513	0.3	210	0.17	115

จากตารางที่ 7.3 พบว่าเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานในสภาวะแรงบิดโหลดต่ำ ๆ ประหยัดพลังงานได้ถึง 48.61 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในสภาวะ 50 เปอร์เซ็นต์ของโหลดเต็มพิกัด ประหยัดพลังงานได้ 18.56 เปอร์เซ็นต์ และในสภาวะ 80 เปอร์เซ็นต์ของโหลดเต็มพิกัดประหยัด

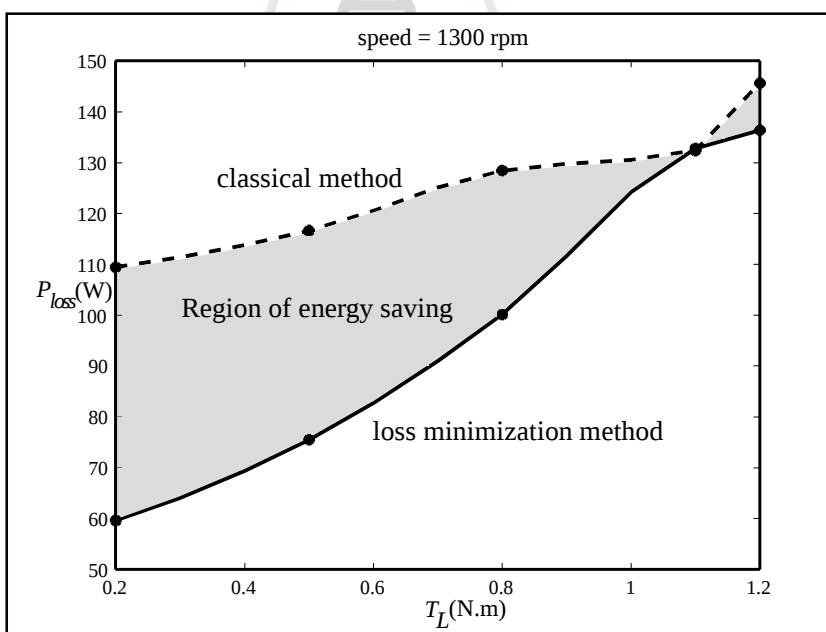
พลังงานได้เพียง 6.43 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากการคำนวณดังกล่าวข้างต้น สังเกตได้ว่าเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานจะมีค่าลดลง และจากผลดังกล่าวการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นตามหลักการของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ นอกจากจะลดกำลังงานอินพุตแล้ว กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ก็ลดลงด้วยเช่นกัน ดังนั้นจากผลทั้งหมดข้างต้นเมื่อนำไปวาดกราฟได้ดังรูปที่ 7.2 เพื่อเปรียบเทียบค่ากำลังงานสูญเสียของมอเตอร์และแรงบิดโหลด ระหว่างกรณีวิธีฐานแบบจำลองสำหรับประหยัดพลังงานและวิธีดั้งเดิม ในสถานะแรงบิดโหลดและความเร็วรอบตามที่ได้อ่านไปแล้วข้างต้น ซึ่งจากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่าที่ทุก ๆ ค่าความเร็วรอบที่คำนวณ ช่วงที่แรงบิดโหลดต่ำ ผลต่างของค่ากำลังงานสูญเสียของทั้ง 2 วิธี มีค่าต่างกันมาก และเมื่อแรงบิดโหลดเพิ่มขึ้นผลต่างของค่ากำลังงานสูญเสียมีค่าลดลง ซึ่งหมายถึงการประหยัดพลังงานมีค่าลดลงด้วย สาเหตุที่การประหยัดพลังงานลดลงเมื่อแรงบิดโหลดเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่ากระแสสนามมีค่ามากขึ้นเพราะต้องการแรงบิดของมอเตอร์ที่สูงขึ้น และค่ากระแสสนามสูงขึ้นจนเกือบจะเท่ากับวิธีดั้งเดิม จึงทำให้การประหยัดพลังงานลดลง ดังนั้นจากผลการทดสอบทั้งหมดที่กล่าวไปแล้วข้างต้น พบว่าการควบคุมมอเตอร์โดยวิธีฐานแบบจำลองสามารถประหยัดพลังงานได้



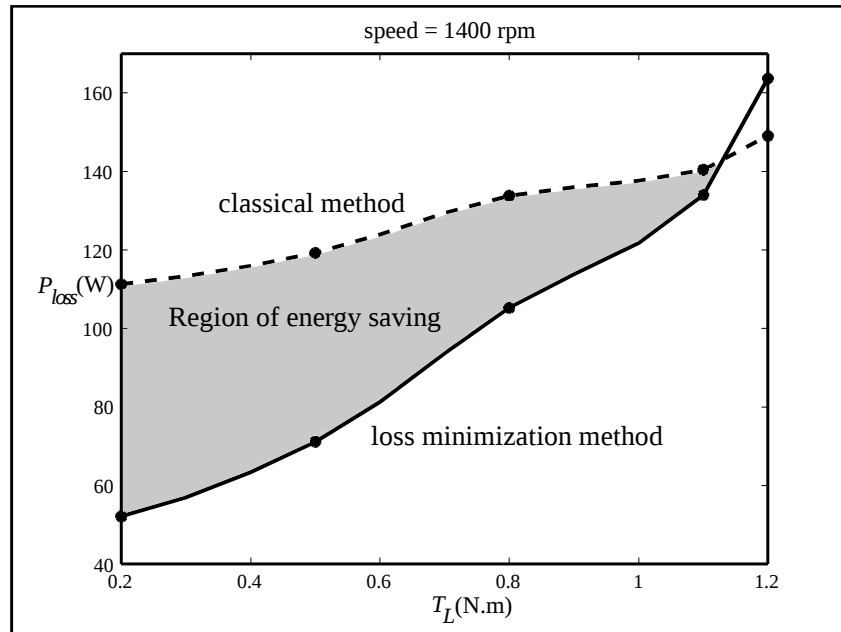
ก) ความเร็วรอบ เท่ากับ 1000 rpm



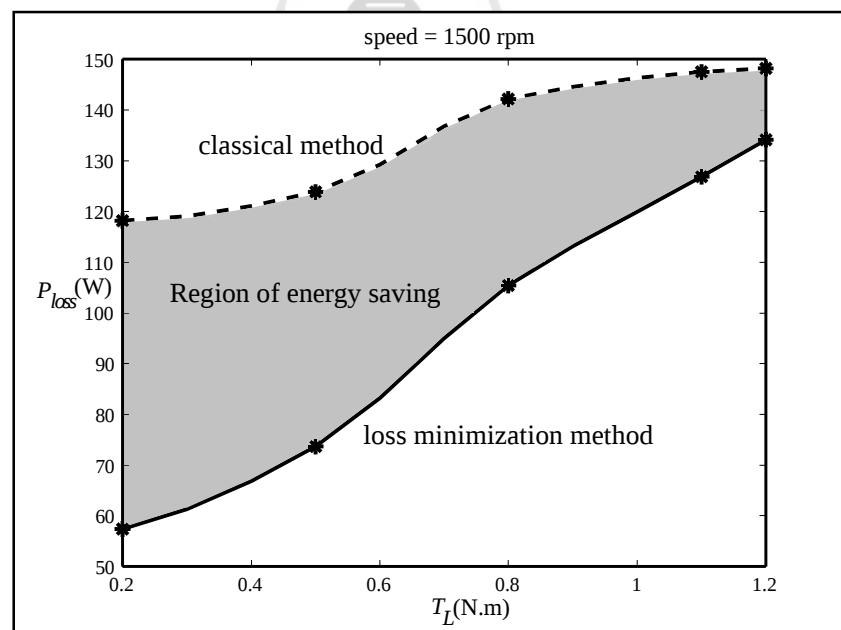
ข) ความเร็วรอบ เท่ากับ 1200 rpm



ค) ความเร็วรอบ เท่ากับ 1300 rpm



ง) ความเร็วรอบ เท่ากับ 1400 rpm



จ) ความเร็วรอบ เท่ากับ 1500 rpm

รูปที่ 7.2 กราฟเปรียบเทียบกำลังงานสูญเสียระหว่างวิธีฐานแบบจำลองสำหรับประหยัดพลังงาน และวิธีดั้งเดิมในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์

7.3 สรุป

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นเพื่อประหยัดพลังงานสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ตัวควบคุมแบบฐานกฎ และจากผลการทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลทางพลังงานของมอเตอร์ ในสถานะที่มีตัวควบคุมสำหรับการประหยัดพลังงานตามหลักการของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ เปรียบเทียบกับสถานะที่ไม่มีตัวควบคุม พบว่า การควบคุมมอเตอร์ตามหลักการดังกล่าวประหยัดพลังงานได้ถึง 48.61 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่แรงบิดโหลดต่ำ ๆ และที่สถานะ 50 เปอร์เซ็นต์ของโหลดเต็มพิกัด ประหยัดพลังงานได้ 18.56 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากผลดังกล่าวข้างต้น ตัวควบคุมที่ได้ออกแบบเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ทุกประการ กล่าวคือ ตัวควบคุมสามารถปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เพื่อให้ได้ความเร็วรอบตามที่ต้องการ โดยอยู่บนเงื่อนไขของการประหยัดพลังงานได้ตลอดสถานะการทำงานของมอเตอร์ คือ ตั้งแต่ไม่มีโหลด (no-load) ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ของโหลดเต็มพิกัด โดยถ้าโหลดสูงขึ้น หลักการการประหยัดพลังงานที่พัฒนาอาจทำงานได้ไม่ดี



บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการศึกษา ออกแบบ และสร้างชุดควบคุมระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เพื่อประหยัดพลังงาน โดยอาศัยการวิเคราะห์จากวงจรสมมูลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า อีกทั้งยังได้ศึกษาเกี่ยวกับกำลังงานสูญเสียชนิดต่าง ๆ ของมอเตอร์ ซึ่งรายละเอียดได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 ของรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ที่เรียกว่า การค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ในการค้นหาพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ดังกล่าว โดยได้ทำการทดสอบมอเตอร์และแบ่งข้อมูลจากการทดสอบออกเป็น 2 ชุด เพื่อใช้ในการค้นหาด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์และเพื่อการตรวจสอบผลการค้นหา รายละเอียดดังกล่าวในการค้นหาพารามิเตอร์ของกำลังงานสูญเสียได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 ของรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ส่วนในบทที่ 4 ของรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้อธิบายเกี่ยวกับการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีฐานแบบจำลอง ซึ่งเป็นวิธีการที่ผู้วิจัยคิดค้นขึ้นใหม่ โดยวิธีดังกล่าวใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสมการคำนวณของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เป็นฐานในการคำนวณเพื่อให้เกิดการประหยัดพลังงาน ซึ่งในบทนี้ได้นำเสนอผลการคำนวณและการเปรียบเทียบผลการคำนวณเพื่อยืนยันว่าวิธีการประหยัดพลังงานตามหลักการของงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถลดกำลังงานสูญเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนในบทที่ 5 ของรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอหลักการทำงานรวมถึงวิธีการออกแบบของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ที่ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์และวงแปลงผันแบบบัคค์ และผลการทดสอบวงจรดังกล่าว

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นเพื่อประหยัดพลังงาน ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้เลือกใช้ตัวควบคุมที่เรียกว่า ตัวควบคุมแบบฐานกฎ ได้นำเสนอในบทที่ 6 ของรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งการควบคุมดังกล่าว จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การควบคุมกระแสสนามของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นให้ได้ตามค่าที่คำนวณด้วยวิธีฐาน

แบบจำลอง และส่วนที่ 2 ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้ได้ตามความต้องการ ส่วนในบทที่ 7 ของรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ได้นำเสนอผลการทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลทางพลังงานของมอเตอร์ ในสถานะที่มีตัวควบคุมสำหรับประหยัดพลังงานตามหลักการของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เปรียบเทียบกับสถานะที่ไม่มีตัวควบคุม พบว่าการควบคุมมอเตอร์ตามหลักการดังกล่าวประหยัดพลังงานได้ถึง 48.61 เปอร์เซ็นต์ในขณะที่แรงบิดโหลดต่ำ ๆ และที่สถานะ 50 เปอร์เซ็นต์ของโหลดเต็มพิกัด ประหยัดพลังงานได้ 18.56 เปอร์เซ็นต์ จากผลดังกล่าวข้างต้น ตัวควบคุมที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ทุกประการ

8.2 ข้อเสนอแนะ

- ควรดำเนินการศึกษา ออกแบบ และสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นเพื่อประหยัดพลังงาน ในช่วงแรงบิดโหลดตั้งแต่ 70 – 100 เปอร์เซ็นต์ ให้สามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่าเดิม ซึ่งเป็นช่วงที่มอเตอร์ได้รับการคาดหวังว่าจะต้องทำงานด้วยประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อให้ครอบคลุมย่านการทำงานให้ครบถ้วน
- ควรปรับปรุงชุดควบคุมของมอเตอร์ด้านการลู่อื่นในสถานะคงตัวให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจใช้ตัวควบคุมชนิดอื่นที่ให้ผลการดำเนินงานที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบฐานกฎ
- ควรพัฒนาการคำนวณค่าแรงบิดโหลดเพื่อใช้ในการประมาณค่าแรงบิดโหลดที่เกิดขึ้นตามสถานะการใช้งานจริง ซึ่งจะช่วยลดภาระค่าใช้จ่ายการใช้ตัวตรวจรู้แรงบิด

รายการอ้างอิง

- กองพล อารีรักษ์. (2545). ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 1.5 แรงม้า ที่ใช้พลังงานอย่างเหมาะสมที่สุด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- กองพัน อารีรักษ์ และ สราวุฒิ สุจิตจร. (2545). การเปรียบเทียบสมรรถนะของการค้นหาด้วยจินเนติกอัลกอริทึมกับวิธีดาบ. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี 9: 61-68.
- อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2552).1. ปัญญาเชิงคำนวณ. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- นคร ภักดีชาติ, ญัฐพล วงศ์สุนทรชัย และ ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตีวิไล. (2547). คู่มือการทดลองเบื้องต้น dsPIC Microcontroller ด้วยภาษา C กับ MPLab C30. กรุงเทพฯ : อินโนเวติฟอิเล็กทรอนิกส์.
- Rashid, M. H. (2004). **Power electronics circuit, devices, and applications**. USA: Pearson.
- Lankarany, M., and Rezazade, A. (2007). Parameter Estimation Optimization Based on Genetic Algorithm Applied to DC Motor. **Conf. on Electrical Engineering (ICEE)**. : 1-6.
- Ryff, P. F. (1994). **ELECTRIC MACHINERY**. NJ: Prentic-Hill.
- Pichetjamroen, W. (1978). **Electrical Machine I**. Bangkok: SE-ED UK.
- Chapman, S. J. (1999). **ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS**. Boston: Mc Graw.
- Toro, V. D. (1990). **Basic Machines**. NJ: Prentic-Hill.
- Nasar, S. A. (1995). **Electric Machines and Power Systems**. New York: Mc Graw-Hill.
- Nasar, S. A. (1995). **Electric Machines and Power Systems**. New York: Mc Graw-Hill.
- Fitzgerald, A. E., Kingsley,jr, C. and Umans, S. D. (1983). **ELECTRIC MACHINERY**. New York: Mc Graw-Hill.
- Zaki, A. M., ElSattar, A. A., Wahsh, S., Mashaly, H. M. and Amer, S. I. (1998). Efficiency-optimized Speed Control for a Separately Excited DC Motor Using Adaptive Neuron controller. **IEEE Tran On Industrial Electronics**. 1: 421-426.

Guru, B. S., and Hizioglu, H. R. (2001). **ELECTRIC MACHINERY AND TRANSFORMER**.
New York: Oxford University Press.

Kusko, A., and Galler, D. (1983). Control means for minimization of losses in ac and dc motor drives. **IEEE Tran Industrial Application**. IA-19: 561-570.

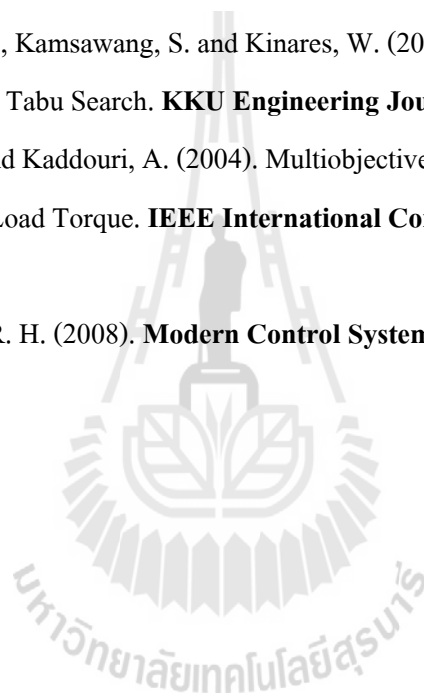
Jean, S. and Tignol, P. (2001). Galois' Thory of Algebraic Equations. **Word Scientific**.

Puangdownreong, D., Areerak, K-N., Srikaew, A., Sujijorn, S. and Totarong, P. (2002). System Identification via Adaptive Tabu Search. **IEEE International Conf. on Technology (ICIT02)**. : 915-920.

Pothiya, S., Chanposri, S., Kamsawang, S. and Kinares, W. (2003). Parameter Identification of a DC Motor Using Tabu Search. **KKU Engineering Journal**. 30(3): 173-188.

Dupuis, A., Ghribi, M. and Kaddouri, A. (2004). Multiobjective Genetic Estimation of DC Motor Parameters and Load Torque. **IEEE International Conf. on Ind. Technology (ICIT)**. : 1511-1514

Dorf, R. C. and Bishop, R. H. (2008). **Modern Control System**. Massachussetts: Pearson ED.



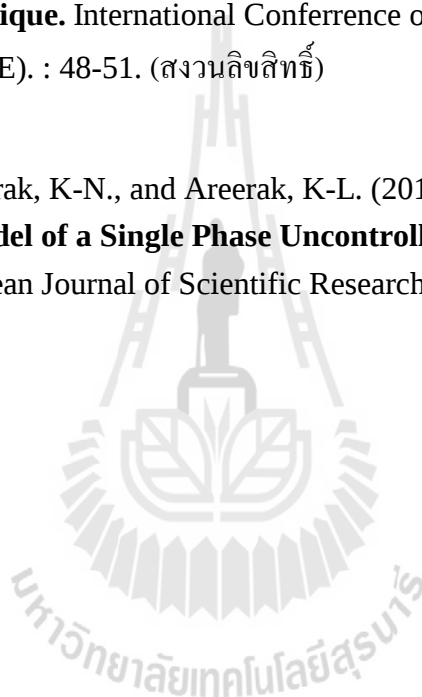
ภาคผนวก ก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. Udomsuk, S., Areerak, T., Areerak, K-L., and Areerak, K-N. (2011).
Power Loss Identification of Separately Excited DC Motor Using Adaptive Tabu Search. European Journal of Scientific Research. : 488-497. (สงวนลิขสิทธิ์)
2. Udomsuk, S., Areerak, K-L., Areerak, K-N., and Srikaew, A. (2010).
Parameters Identification of Separately Excited DC Motor using Adaptive Tabu Search Technique. International Conference on Advance in Energy Engineering (ICAEE). : 48-51. (สงวนลิขสิทธิ์)
3. Udomsuk, S., Areerak, K-N., and Areerak, K-L. (2011).
Mathematical Model of a Single Phase Uncontrolled Rectifier Feeding a Buck Converter . European Journal of Scientific Research. : 89-98. (สงวนลิขสิทธิ์)



ภาคผนวก ข

ข้อมูลการคำนวณหาจุดการทำงานสำหรับประหยัดพลังงาน



ตารางที่ ข.1 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 0.2 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.10000	73.54300	0.80321	25.88098	19.41669
0.10690	78.61493	0.75139	25.95152	19.05678
0.11379	83.68686	0.70585	26.12250	19.00950
0.12069	88.75879	0.66552	26.37670	19.22164
0.12759	93.83072	0.62955	26.70062	19.65387
0.13448	98.90266	0.59726	27.08354	20.27659
0.14138	103.97460	0.56813	27.51682	21.06720
0.14828	109.04650	0.54170	27.99344	22.00816
0.15517	114.11840	0.51763	28.50761	23.08574
0.16207	119.19040	0.49560	29.05455	24.28900
0.16897	124.26230	0.47537	29.63024	25.60920
0.17586	129.33420	0.45673	30.23130	27.03925
0.18276	134.40620	0.43949	30.85486	28.57333
0.18966	139.47810	0.42351	31.49846	30.20670
0.19655	144.55000	0.40865	32.15999	31.93538
0.20345	149.62200	0.39480	32.83764	33.75606
0.21035	154.69390	0.38186	33.52980	35.66597
0.21724	159.76580	0.36973	34.23511	37.66275
0.22414	164.83780	0.35836	34.95235	39.74440
0.23103	169.90970	0.34766	35.68045	41.90921
0.23793	174.98160	0.33758	36.41846	44.15570
0.24483	180.05360	0.32807	37.16555	46.48261
0.25172	185.12550	0.31909	37.92097	48.88884
0.25862	190.19740	0.31058	38.68406	51.37342
0.26552	195.26930	0.30251	39.45422	53.93552
0.27241	200.34130	0.29485	40.23090	56.57441
0.27931	205.41320	0.28757	41.01364	59.28944
0.28621	210.48510	0.28064	41.80198	62.08003
0.29310	215.55710	0.27404	42.59554	64.94568
0.30000	220.62900	0.26774	43.39395	67.88595

ตารางที่ ข.2 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 750 rpm และแรงบิด 0.2 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.10000	73.54300	0.80321	32.39979	19.59168
0.10690	78.61493	0.75139	32.91990	19.20992

ตารางที่ ข.2 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 750 rpm และแรงบิด 0.2 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.11379	83.68686	0.70585	33.54045	19.14465
0.12069	88.75879	0.66552	34.24422	19.34178
0.12759	93.83072	0.62955	35.01772	19.76137
0.13448	98.90266	0.59726	35.85021	20.37335
0.14138	103.9746	0.56813	36.73306	21.15475
0.14828	109.04650	0.54170	37.65925	22.08776
0.15517	114.11840	0.51763	38.62300	23.15842
0.16207	119.19040	0.49560	39.61951	24.35563
0.16897	124.26230	0.47537	40.64478	25.67050
0.17586	129.33420	0.45673	41.69541	27.09583
0.18276	134.40620	0.43949	42.76854	28.62573
0.18966	139.47810	0.42351	43.86171	30.25535
0.19655	144.55000	0.40865	44.97282	31.98067
0.20345	149.62200	0.39480	46.10003	33.79834
0.21035	154.69390	0.38186	47.24177	35.70552
0.21724	159.76580	0.36973	48.39665	37.69983
0.22414	164.83780	0.35836	49.56346	39.77923
0.23103	169.90970	0.34766	50.74113	41.94199
0.23793	174.98160	0.33758	51.92872	44.18661
0.24483	180.05360	0.32807	53.12538	46.51181
0.25172	185.12550	0.31909	54.33038	48.91645
0.25862	190.19740	0.31058	55.54304	51.39958
0.26552	195.26930	0.30251	56.76277	53.96035
0.27241	200.34130	0.29485	57.98903	56.59799
0.27931	205.41320	0.28757	59.22133	59.31187
0.28621	210.48510	0.28064	60.45925	62.10139
0.29310	215.55710	0.27404	61.70238	64.96605
0.30000	220.62900	0.26774	62.95037	67.90539

ตารางที่ ข.3 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1000 rpm และแรงบิด 0.2 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.10000	73.54300	0.803213	38.91859	19.83668
0.10690	78.61493	0.751393	39.88828	19.42432
0.11379	83.68686	0.705854	40.95840	19.33385
0.12069	88.75879	0.665519	42.11174	19.50998

ตารางที่ ข.3 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1000 rpm และแรงบิด 0.2 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.12759	93.83072	0.629545	43.33481	19.91188
0.13448	98.90266	0.597261	44.61687	20.50882
0.14138	103.97460	0.56813	45.94930	21.27732
0.14828	109.04650	0.54170	47.32507	22.19919
0.15517	114.11840	0.51763	48.73839	23.26016
0.16207	119.19040	0.49560	50.18447	24.44890
0.16897	124.26230	0.47537	51.65931	25.75632
0.17586	129.33420	0.45673	53.15951	27.17505
0.18276	134.40620	0.43949	54.68222	28.69908
0.18965	139.47810	0.42351	56.22496	30.32346
0.19655	144.55000	0.40865	57.78564	32.04409
0.20345	149.62200	0.39480	59.36243	33.85753
0.21035	154.69390	0.38186	60.95374	35.76090
0.21724	159.76580	0.36973	62.55819	37.75174
0.22414	164.83780	0.35836	64.17458	39.82800
0.23103	169.90970	0.34766	65.80182	41.98789
0.23793	174.98160	0.33758	67.43898	44.22989
0.24483	180.05360	0.32807	69.08521	46.55268
0.25172	185.12550	0.31909	70.73978	48.95512
0.25862	190.19740	0.31058	72.40202	51.43621
0.26552	195.26930	0.30251	74.07132	53.99510
0.27241	200.34130	0.29485	75.74715	56.63101
0.27931	205.41320	0.28757	77.42903	59.34327
0.28621	210.48510	0.28064	79.11652	62.13130
0.29310	215.55710	0.27404	80.80922	64.99457
0.30000	220.62900	0.26774	82.50678	67.93261

ตารางที่ ข.4 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1250 rpm และแรงบิด 0.2 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.10000	73.54300	0.80321	45.43740	20.15167
0.10690	78.61493	0.75139	46.85666	19.69999
0.11379	83.68686	0.70585	48.37635	19.57711
0.12069	88.75879	0.66552	49.97927	19.72624
0.12759	93.83072	0.62955	51.65191	20.10539
0.13448	98.90266	0.59726	53.38354	20.68299

ตารางที่ ข.4 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1250 rpm และแรงบิด 0.2 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.14138	103.97460	0.56813	55.16554	21.43491
0.14828	109.04650	0.54170	56.99088	22.34247
0.15517	114.11840	0.51763	58.85377	23.39098
0.16207	119.19040	0.49560	60.74943	24.56883
0.16897	124.26230	0.47537	62.67384	25.86665
0.17586	129.33420	0.45673	64.62362	27.27689
0.18276	134.40620	0.43949	66.59589	28.79339
0.18966	139.47810	0.42351	68.58821	30.41104
0.19655	144.55000	0.40865	70.59846	32.12563
0.20345	149.62200	0.39480	72.62482	33.93363
0.21035	154.69390	0.38186	74.66571	35.83209
0.21724	159.76580	0.36973	76.71974	37.81849
0.22414	164.83780	0.35836	78.78569	39.89070
0.23103	169.90970	0.34766	80.86251	42.04691
0.23793	174.98160	0.33758	82.94924	44.28553
0.24483	180.05360	0.32807	85.04505	46.60523
0.25172	185.12550	0.31909	87.14919	49.00483
0.25862	190.19740	0.31058	89.26099	51.48331
0.26552	195.26930	0.30251	91.37987	54.03978
0.27241	200.34130	0.29485	93.50527	56.67345
0.27931	205.41320	0.28757	95.63673	59.38365
0.28621	210.48510	0.28064	97.77379	62.16976
0.29310	215.55710	0.27404	99.91606	65.03124
0.30000	220.62900	0.26774	102.06320	67.96761

ตารางที่ ข.5 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1500 rpm และแรงบิด 0.2 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.10000	73.54300	0.80321	51.95620	20.53667
0.10690	78.61493	0.75139	53.82503	20.03691
0.11379	83.68686	0.70585	55.79430	19.87443
0.12069	88.75879	0.66552	57.84679	19.99055
0.12759	93.83072	0.62955	59.96900	20.34190
0.13448	98.90266	0.59726	62.15021	20.89586
0.14138	103.97460	0.56813	64.38178	21.62752
0.14828	109.04650	0.54170	66.65669	22.51758

ตารางที่ ข.5 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1500 rpm และแรงบิด 0.2 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.15517	114.11840	0.51763	68.96916	23.55088
0.16207	119.19040	0.49560	71.31439	24.71540
0.16897	124.26230	0.47537	73.68837	26.00150
0.17586	129.33420	0.45673	76.08772	27.40138
0.18276	134.40620	0.43949	78.50957	28.90865
0.18966	139.47810	0.42351	80.95146	30.51807
0.19655	144.55000	0.40865	83.41129	32.22528
0.20345	149.62200	0.39480	85.88722	34.02665
0.21035	154.69390	0.38186	88.37768	35.91910
0.21724	159.76580	0.36973	90.88128	37.90007
0.22414	164.83780	0.35836	93.39681	39.96734
0.23103	169.90970	0.34766	95.92319	42.11903
0.23793	174.98160	0.33758	98.45950	44.35354
0.24483	180.05360	0.32807	101.00490	46.66946
0.25172	185.12550	0.31909	103.55860	49.06559
0.25862	190.19740	0.31058	106.12000	51.54087
0.26552	195.26930	0.30251	108.68840	54.09439
0.27241	200.34130	0.29485	111.26340	56.72533
0.27931	205.41320	0.28757	113.84440	59.43300
0.28621	210.48510	0.28064	116.43110	62.21676
0.29310	215.55710	0.27404	119.02290	65.07605
0.30000	220.62900	0.26774	121.61960	68.01039

ตารางที่ ข.6 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1750 rpm และแรงบิด 0.2 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.10000	73.54300	0.80321	58.47501	20.99166
0.10690	78.61493	0.75139	60.79341	20.43508
0.11379	83.68686	0.70585	63.21225	20.22580
0.12069	88.75879	0.66552	65.71431	20.30291
0.12759	93.83072	0.62955	68.28610	20.62140
0.13448	98.90266	0.59726	70.91688	21.14744
0.14138	103.97460	0.56813	73.59803	21.85515
0.14828	109.04650	0.54170	76.32251	22.72453
0.15517	114.11840	0.51763	79.08455	23.73984
0.16207	119.19040	0.49560	81.87935	24.88862

ตารางที่ ข.6 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1750 rpm และแรงบิด 0.2 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.16897	124.26230	0.47537	84.70291	26.16087
0.17586	129.33420	0.45673	87.55183	27.54849
0.18276	134.40620	0.43949	90.42325	29.04487
0.18966	139.47810	0.42351	93.31471	30.64457
0.19655	144.55000	0.40865	96.22411	32.34306
0.20345	149.62200	0.39480	99.14962	34.13657
0.21035	154.69390	0.38186	102.08960	36.02194
0.21724	159.76580	0.36973	105.04280	37.99648
0.22414	164.83780	0.35836	108.00790	40.05790
0.23103	169.90970	0.34766	110.98390	42.20427
0.23793	174.98160	0.33758	113.96980	44.43391
0.24483	180.05360	0.32807	116.96470	46.74537
0.25172	185.12550	0.31909	119.96800	49.13739
0.25862	190.19740	0.31058	122.97890	51.60890
0.26552	195.26930	0.30251	125.99700	54.15893
0.27241	200.34130	0.29485	129.02150	56.78665
0.27931	205.41320	0.28757	132.05210	59.49132
0.28621	210.48510	0.28064	135.08830	62.27230
0.29310	215.55710	0.27404	138.12970	65.12901
0.30000	220.62900	0.26774	141.17600	68.06095

ตารางที่ ข.7 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2000 rpm และแรงบิด 0.2 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.10000	73.54300	0.80321	58.47501	20.99166
0.10690	78.61493	0.75139	60.79341	20.43508
0.11379	83.68686	0.70585	63.21225	20.22580
0.12069	88.75879	0.66552	65.71431	20.30291
0.12759	93.83072	0.62955	68.28610	20.62140
0.13448	98.90266	0.59726	70.91688	21.14744
0.14138	103.97460	0.56813	73.59803	21.85515
0.14828	109.04650	0.54170	76.32251	22.72453
0.15517	114.11840	0.51763	79.08455	23.73984
0.16207	119.19040	0.49560	81.87935	24.88862
0.16897	124.26230	0.47537	84.70291	26.16087
0.17586	129.33420	0.45673	87.55183	27.54849

ตารางที่ ข.7 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2000 rpm และแรงบิด 0.2 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.18276	134.40620	0.43949	90.42325	29.04487
0.18966	139.47810	0.42351	93.31471	30.64457
0.19655	144.55000	0.40865	96.22411	32.34306
0.20345	149.62200	0.39480	99.14962	34.13657
0.21035	154.69390	0.38186	102.08960	36.02194
0.21724	159.76580	0.36973	105.04280	37.99648
0.22414	164.83780	0.35836	108.00790	40.05790
0.23103	169.90970	0.34766	110.98390	42.20427
0.23793	174.98160	0.33758	113.96980	44.43391
0.24483	180.05360	0.32807	116.96470	46.74537
0.25172	185.12550	0.31909	119.96800	49.13739
0.25862	190.19740	0.31058	122.97890	51.60890
0.26552	195.26930	0.30251	125.99700	54.15893
0.27241	200.34130	0.29485	129.02150	56.78665
0.27931	205.41320	0.28757	132.05210	59.49132
0.28621	210.48510	0.28064	135.08830	62.27230
0.29310	215.55710	0.27404	138.12970	65.12901
0.30000	220.62900	0.26774	141.17600	68.06095

ตารางที่ ข.8 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2250 rpm และแรงบิด 0.2 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.10000	73.54300	0.80321	71.51262	22.11164
0.10690	78.61493	0.75139	74.73017	21.41521
0.11379	83.68686	0.70585	78.04815	21.09073
0.12069	88.75879	0.66552	81.44936	21.07181
0.12759	93.83072	0.62955	84.92029	21.30943
0.13448	98.90266	0.59726	88.45022	21.76670
0.14138	103.97460	0.56813	92.03051	22.41548
0.14828	109.04650	0.54170	95.65414	23.23394
0.15517	114.11840	0.51763	99.31532	24.20498
0.16207	119.19040	0.49560	103.00930	25.31502
0.16897	124.26230	0.47537	106.73200	26.55317
0.17586	129.33420	0.45673	110.48000	27.91063
0.18276	134.40620	0.43949	114.25060	29.38019
0.18966	139.47810	0.42351	118.04120	30.95594

ตารางที่ ข.8 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2250 rpm และแรงบิด 0.2 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.19655	144.55000	0.40865	121.84980	32.63296
0.20345	149.62200	0.39480	125.67440	34.40716
0.21035	154.69390	0.38186	129.51360	36.27507
0.21724	159.76580	0.36973	133.36590	38.23379
0.22414	164.83780	0.35836	137.23010	40.28084
0.23103	169.90970	0.34766	141.10530	42.41410
0.23793	174.98160	0.33758	144.99030	44.63175
0.24483	180.05360	0.32807	148.88440	46.93222
0.25172	185.12550	0.31909	152.78680	49.31414
0.25862	190.19740	0.31058	156.69690	51.77635
0.26552	195.26930	0.30251	160.61410	54.31779
0.27241	200.34130	0.29485	164.53780	56.93757
0.27931	205.41320	0.28757	168.46750	59.63488
0.28621	210.48510	0.28064	172.40290	62.40903
0.29310	215.55710	0.27404	176.34340	65.25938
0.30000	220.62900	0.26774	180.28890	68.18539

ตารางที่ ข.9 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2500 rpm และแรงบิด 0.2 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.10000	73.54300	0.80321	78.03142	22.77663
0.10690	78.61493	0.75139	81.69854	21.99717
0.11379	83.68686	0.70585	85.46610	21.60428
0.12069	88.75879	0.66552	89.31688	21.52835
0.12759	93.83072	0.62955	93.23739	21.71794
0.13448	98.90266	0.59726	97.21689	22.13439
0.14138	103.97460	0.56813	101.24670	22.74817
0.14828	109.04650	0.54170	105.31990	23.53640
0.15517	114.11840	0.51763	109.43070	24.48115
0.16207	119.19040	0.49560	113.57420	25.56819
0.16897	124.26230	0.47537	117.74650	26.78610
0.17586	129.33420	0.45673	121.94410	28.12564
0.18276	134.40620	0.43949	126.16430	29.57929
0.18966	139.47810	0.42351	130.40450	31.14082
0.19655	144.55000	0.40865	134.66260	32.80510
0.20345	149.62200	0.39480	138.93680	34.56782

ตารางที่ ข.9 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2500 rpm และแรงบิด 0.2 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.21035	154.69390	0.38186	143.22560	36.42537
0.21724	159.76580	0.36973	147.52740	38.37470
0.22414	164.83780	0.35836	151.84130	40.41321
0.23103	169.90970	0.34766	156.16590	42.53868
0.23793	174.98160	0.33758	160.50050	44.74921
0.24483	180.05360	0.32807	164.84420	47.04316
0.25172	185.12550	0.31909	169.19620	49.41909
0.25862	190.19740	0.31058	173.55590	51.87577
0.26552	195.26930	0.30251	177.92260	54.41212
0.27241	200.34130	0.29485	182.29590	57.02718
0.27931	205.41320	0.28757	186.67520	59.72012
0.28621	210.48510	0.28064	191.06010	62.49021
0.29310	215.55710	0.27404	195.45030	65.33679
0.30000	220.62900	0.26774	199.84530	68.25928

ตารางที่ ข.10 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2750 rpm และแรงบิด 0.2 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.10000	73.54300	0.80321	84.55023	23.51162
0.10690	78.61493	0.75139	88.66692	22.64038
0.11379	83.68686	0.70585	92.88405	22.17189
0.12069	88.75879	0.66552	97.18441	22.03294
0.12759	93.83072	0.62955	101.55450	22.16946
0.13448	98.90266	0.59726	105.98360	22.54079
0.14138	103.97460	0.56813	110.46300	23.11588
0.14828	109.04650	0.54170	114.98580	23.87071
0.15517	114.11840	0.51763	119.54610	24.78640
0.16207	119.19040	0.49560	124.13920	25.84801
0.16897	124.26230	0.47537	128.76100	27.04354
0.17586	129.33420	0.45673	133.40820	28.36329
0.18276	134.40620	0.43949	138.07800	29.79934
0.18966	139.47810	0.42351	142.76770	31.34516
0.19655	144.55000	0.40865	147.47540	32.99535
0.20345	149.62200	0.39480	152.19920	34.74539
0.21035	154.69390	0.38186	156.93750	36.59149
0.21724	159.76580	0.36973	161.68900	38.53044

ตารางที่ ข.10 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2750 rpm และแรงบิด 0.2 N · m (ต่อ)

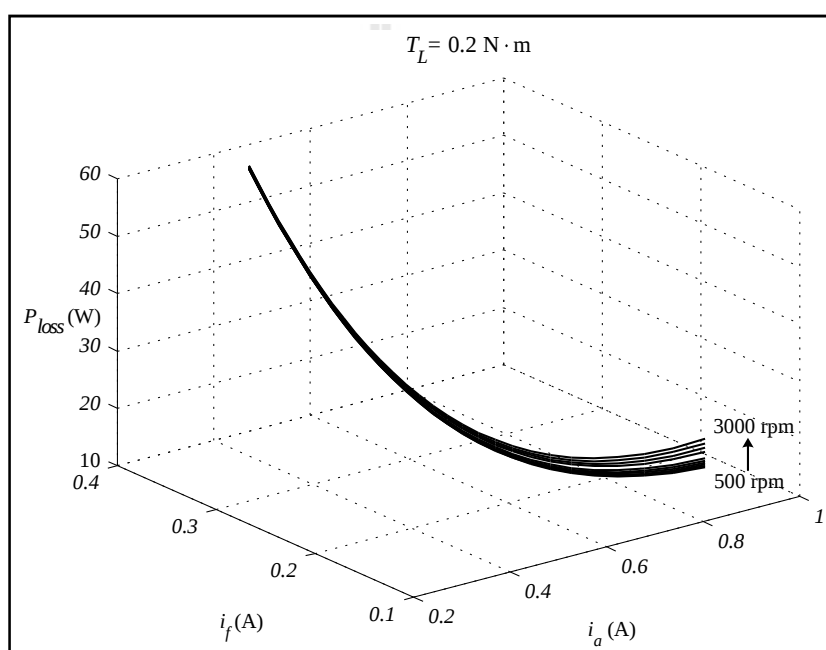
i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.22414	164.83780	0.35836	166.45240	40.55951
0.23103	169.90970	0.34766	171.22660	42.67638
0.23793	174.98160	0.33758	176.01080	44.87905
0.24483	180.05360	0.32807	180.80400	47.16578
0.25172	185.12550	0.31909	185.60560	49.53508
0.25862	190.19740	0.31058	190.41490	51.98566
0.26552	195.26930	0.30251	195.23120	54.51637
0.27241	200.34130	0.29485	200.05400	57.12622
0.27931	205.41320	0.28757	204.88290	59.81433
0.28621	210.48510	0.28064	209.71740	62.57993
0.29310	215.55710	0.27404	214.55710	65.42234
0.30000	220.62900	0.26774	219.40170	68.34094

ตารางที่ ข.11 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 3000 rpm และแรงบิด 0.2 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.10000	73.54300	0.80321	91.06903	24.31661
0.10690	78.61493	0.75139	95.63530	23.34484
0.11379	83.68686	0.70585	100.30200	22.79355
0.12069	88.75879	0.66552	105.05190	22.58559
0.12759	93.83072	0.62955	109.87160	22.66398
0.13448	98.90266	0.59726	114.75020	22.98589
0.14138	103.97460	0.56813	119.67920	23.51862
0.14828	109.04650	0.54170	124.65160	24.23685
0.15517	114.11840	0.51763	129.66150	25.12072
0.16207	119.19040	0.49560	134.70410	26.15448
0.16897	124.26230	0.47537	139.77560	27.32550
0.17586	129.33420	0.45673	144.87240	28.62357
0.18276	134.40620	0.43949	149.99160	30.04035
0.18966	139.47810	0.42351	155.13100	31.56896
0.19655	144.55000	0.40865	160.28820	33.20372
0.20345	149.62200	0.39480	165.46160	34.93987
0.21035	154.69390	0.38186	170.64950	36.77342
0.21724	159.76580	0.36973	175.85050	38.70101
0.22414	164.83780	0.35836	181.06350	40.71975
0.23103	169.90970	0.34766	186.28730	42.82719

ตารางที่ ข.11 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 3000 rpm และแรงบิด 0.2 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.23793	174.98160	0.33758	191.52110	45.02124
0.24483	180.05360	0.32807	196.76390	47.30008
0.25172	185.12550	0.31909	202.01500	49.66212
0.25862	190.19740	0.31058	207.27380	52.10601
0.26552	195.26930	0.30251	212.53970	54.63055
0.27241	200.34130	0.29485	217.81210	57.23470



รูปที่ ข.1 กราฟจุดต่ำสุดของกำลังงานสูญเสียเมื่อ แรงบิดโหลด 0.2 N · m ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

ตารางที่ ข.12 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 0.4 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.10000	73.54300	1.60643	38.72436	52.39099
0.10690	78.61493	1.50279	37.96629	48.01054
0.11379	83.68686	1.41171	37.40910	44.64562
0.12069	88.75879	1.33104	37.01835	42.08769
0.12759	93.83072	1.25909	36.76705	40.18278
0.13448	98.90266	1.19452	36.63374	38.81522
0.14138	103.97460	1.13625	36.60116	37.89672

ตารางที่ ข.12 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 0.4 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.14828	109.04650	1.08340	36.65525	37.35895
0.15517	114.11840	1.03525	36.78445	37.14834
0.16207	119.19040	0.99120	36.97919	37.22243
0.16897	124.26230	0.95074	37.23142	37.54720
0.17586	129.33420	0.91346	37.53440	38.09511
0.18276	134.40620	0.87899	37.88237	38.84370
0.18966	139.47810	0.84702	38.27042	39.77451
0.19655	144.55000	0.81730	38.69434	40.87222
0.20345	149.62200	0.78960	39.15048	42.12405
0.21035	154.69390	0.76371	39.63567	43.51928
0.21724	159.76580	0.73947	40.14714	45.04882
0.22414	164.83780	0.71671	40.68247	46.70499
0.23103	169.90970	0.69532	41.23952	48.48120
0.23793	174.98160	0.67516	41.81640	50.37180
0.24483	180.05360	0.65615	42.41143	52.37192
0.25172	185.12550	0.63817	43.02313	54.47735
0.25862	190.19740	0.62115	43.65016	56.68442
0.26552	195.26930	0.60502	44.29133	58.98992
0.27241	200.34130	0.58970	44.94556	61.39106
0.27931	205.4132	0.57514	45.61188	63.88536
0.28621	210.48510	0.56128	46.28943	66.47066
0.29310	215.55710	0.54808	46.97740	69.14502
0.30000	220.62900	0.53548	47.67508	71.90674

ตารางที่ ข.13 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 750 rpm และแรงบิด 0.4 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.10000	73.54300	1.60643	45.24316	53.09098
0.10690	78.61493	1.50279	44.93467	48.62312
0.11379	83.68686	1.41171	44.82705	45.1862
0.12069	88.75879	1.33104	44.88587	42.56826
0.12759	93.83072	1.25909	45.08414	40.6128
0.13448	98.90266	1.19452	45.40041	39.20226
0.14138	103.97460	1.13625	45.8174	38.24692
0.14828	109.04650	1.08340	46.32106	37.67733
0.15517	114.11840	1.03525	46.89984	37.43905

ตารางที่ ข.13 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 750 rpm และแรงบิด 0.4 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.16207	119.19040	0.99120	47.54415	37.48893
0.16897	124.26230	0.95074	48.24596	37.79238
0.17586	129.33420	0.91346	48.9985	38.32144
0.18276	134.40620	0.87899	49.79605	39.05328
0.18966	139.47810	0.84702	50.63367	39.96912
0.19655	144.55000	0.81730	51.50717	41.05341
0.20345	149.62200	0.78960	52.41288	42.29317
0.21035	154.69390	0.76371	53.34764	43.67749
0.21724	159.76580	0.73947	54.30868	45.19715
0.22414	164.83780	0.71671	55.29358	46.84433
0.23103	169.90970	0.69532	56.3002	48.61234
0.23793	174.98160	0.67516	57.32666	50.49545
0.24483	180.05360	0.65615	58.37127	52.4887
0.25172	185.12550	0.63817	59.43254	54.58782
0.25862	190.19740	0.62115	60.50914	56.78907
0.26552	195.26930	0.60502	61.59988	59.08921
0.27241	200.34130	0.58970	62.70368	61.48539
0.27931	205.4132	0.57514	63.81958	63.97509
0.28621	210.48510	0.56128	64.94669	66.55611
0.29310	215.55710	0.54808	66.08424	69.2265
0.30000	220.62900	0.53548	67.23149	71.98452

ตารางที่ ข.14 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1000 rpm และแรงบิด 0.4 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.10000	73.54300	1.60643	51.76197	54.07097
0.10690	78.61493	1.50279	51.90305	49.48073
0.11379	83.68686	1.41171	52.245	45.94301
0.12069	88.75879	1.33104	52.7534	43.24105
0.12759	93.83072	1.25909	53.40124	41.21482
0.13448	98.90266	1.19452	54.16708	39.74412
0.14138	103.97460	1.13625	55.03364	38.73721
0.14828	109.04650	1.08340	55.98688	38.12307
0.15517	114.11840	1.03525	57.01523	37.84605
0.16207	119.19040	0.99120	58.10911	37.86203
0.16897	124.26230	0.95074	59.26049	38.13564

ตารางที่ ข.14 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1000 rpm และแรงบิด 0.4 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.17586	129.33420	0.91346	60.46261	38.6383
0.18276	134.40620	0.87899	61.70972	39.34668
0.18966	139.47810	0.84702	62.99692	40.24157
0.19655	144.55000	0.81730	64.31999	41.30708
0.20345	149.62200	0.78960	65.67527	42.52993
0.21035	154.69390	0.76371	67.05961	43.89898
0.21724	159.76580	0.73947	68.47022	45.4048
0.22414	164.83780	0.71671	69.9047	47.0394
0.23103	169.90970	0.69532	71.36089	48.79594
0.23793	174.98160	0.67516	72.83692	50.66856
0.24483	180.05360	0.65615	74.3311	52.6522
0.25172	185.12550	0.63817	75.84194	54.74248
0.25862	190.19740	0.62115	77.36812	56.93559
0.26552	195.26930	0.60502	78.90843	59.22822
0.27241	200.34130	0.58970	80.46181	61.61744
0.27931	205.4132	0.57514	82.02727	64.10071
0.28621	210.48510	0.56128	83.60396	66.67575
0.29310	215.55710	0.54808	85.19108	69.34057
0.30000	220.62900	0.53548	86.78791	72.09341

ตารางที่ ข.15 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1250 rpm และแรงบิด 0.4 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.10000	73.54300	1.60643	58.28077	55.33095
0.10690	78.61493	1.50279	58.87142	50.58338
0.11379	83.68686	1.41171	59.66295	46.91605
0.12069	88.75879	1.33104	60.62092	44.10606
0.12759	93.83072	1.25909	61.71833	41.98885
0.13448	98.90266	1.19452	62.93374	40.44080
0.14138	103.97460	1.13625	64.24988	39.36757
0.14828	109.04650	1.08340	65.65269	38.69616
0.15517	114.11840	1.03525	67.13061	38.36933
0.16207	119.19040	0.99120	68.67407	38.34172
0.16897	124.26230	0.95074	70.27502	38.57698
0.17586	129.33420	0.91346	71.92671	39.04570
0.18276	134.40620	0.87899	73.62340	39.72391

ตารางที่ ข.15 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1250 rpm และแรงบิด 0.4 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.18966	139.47810	0.84702	75.36017	40.59187
0.19655	144.55000	0.81730	77.13281	41.63323
0.20345	149.62200	0.78960	78.93767	42.83434
0.21035	154.69390	0.76371	80.77158	44.18375
0.21724	159.76580	0.73947	82.63176	45.67178
0.22414	164.83780	0.71671	84.51581	47.29020
0.23103	169.90970	0.69532	86.42158	49.03199
0.23793	174.98160	0.67516	88.34718	50.89112
0.24483	180.05360	0.65615	90.29093	52.86240
0.25172	185.12550	0.63817	92.25135	54.94132
0.25862	190.19740	0.62115	94.22710	57.12397
0.26552	195.26930	0.60502	96.21698	59.40694
0.27241	200.34130	0.58970	98.21993	61.78723
0.27931	205.4132	0.57514	100.23500	64.26221
0.29310	215.55710	0.54808	104.29790	69.48724
0.30000	220.62900	0.53548	106.34430	72.23341

ตารางที่ ข.16 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1500 rpm และแรงบิด 0.4 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.10000	73.54300	1.60643	64.79958	56.87092
0.10690	78.61493	1.50279	65.83980	51.93106
0.11379	83.68686	1.41171	67.08090	48.10533
0.12069	88.75879	1.33104	68.48844	45.16330
0.12759	93.83072	1.25909	70.03543	42.93488
0.13448	98.90266	1.19452	71.70041	41.29229
0.14138	103.97460	1.13625	73.46612	40.13802
0.14828	109.04650	1.08340	75.31850	39.39660
0.15517	114.11840	1.03525	77.24600	39.00890
0.16207	119.19040	0.99120	79.23903	38.92801
0.16897	124.26230	0.95074	81.28955	39.11638
0.17586	129.33420	0.91346	83.39082	39.54363
0.18276	134.40620	0.87899	85.53708	40.18497
0.18966	139.47810	0.84702	87.72342	41.02001
0.19655	144.55000	0.81730	89.94563	42.03185
0.20345	149.62200	0.78960	92.20006	43.20639
0.21035	154.69390	0.76371	94.48354	44.53181

ตารางที่ ข.16 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1500 rpm และแรงบิด 0.4 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.21724	159.76580	0.73947	96.79331	45.99809
0.22414	164.83780	0.71671	99.12693	47.59674
0.23103	169.90970	0.69532	101.48230	49.32050
0.23793	174.98160	0.67516	103.85740	51.16315
0.24483	180.05360	0.65615	106.25080	53.11932
0.25172	185.12550	0.63817	108.66080	55.18435
0.25862	190.19740	0.62115	111.08610	57.35422
0.26552	195.26930	0.60502	113.52550	59.62538
0.27241	200.34130	0.58970	115.97810	61.99475
0.27931	205.4132	0.57514	118.44270	64.45961
0.28621	210.48510	0.56128	120.91850	67.01756
0.29310	215.55710	0.54808	123.40480	69.66649
0.30000	220.62900	0.53548	125.90070	72.40451

ตารางที่ ข.17 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1750 rpm และแรงบิด 0.4 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.10000	73.54300	1.60643	71.31838	58.69089
0.10690	78.61493	1.50279	72.80818	53.52377
0.11379	83.68686	1.41171	74.49885	49.51083
0.12069	88.75879	1.33104	76.35597	46.41277
0.12759	93.83072	1.25909	78.35253	44.05292
0.13448	98.90266	1.19452	80.46708	42.29860
0.14138	103.97460	1.13625	82.68236	41.04854
0.14828	109.04650	1.08340	84.98432	40.22440
0.15517	114.11840	1.03525	87.36139	39.76474
0.16207	119.19040	0.99120	89.80399	39.62090
0.16897	124.26230	0.95074	92.30409	39.75387
0.17586	129.33420	0.91346	94.85492	40.13210
0.18276	134.40620	0.87899	97.45076	40.72986
0.18966	139.47810	0.84702	100.08670	41.52599
0.19655	144.55000	0.81730	102.75850	42.50294
0.20345	149.62200	0.78960	105.46250	43.64609
0.21035	154.69390	0.76371	108.19550	44.94315
0.21724	159.76580	0.73947	110.95480	46.38372
0.22414	164.83780	0.71671	113.73800	47.95901

ตารางที่ ข.17 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1750 rpm และแรงบิด 0.4 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.23103	169.90970	0.69532	116.54300	49.66147
0.23793	174.98160	0.67516	119.36770	51.48464
0.24483	180.05360	0.65615	122.21060	53.42295
0.25172	185.12550	0.63817	125.07020	55.47157
0.25862	190.19740	0.62115	127.94510	57.62632
0.26552	195.26930	0.60502	130.83410	59.88353
0.27241	200.34130	0.58970	133.73620	62.24000
0.27931	205.4132	0.57514	136.65040	64.69290
0.28621	210.48510	0.56128	139.57580	67.23974
0.29310	215.55710	0.54808	142.51160	69.87834
0.30000	220.62900	0.53548	145.45710	72.60673

ตารางที่ ข.18 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2000 rpm และแรงบิด 0.4 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.10000	73.54300	1.60643	77.83719	60.79086
0.10690	78.61493	1.50279	79.77656	55.36151
0.11379	83.68686	1.41171	81.91680	51.13257
0.12069	88.75879	1.33104	84.22349	47.85446
0.12759	93.83072	1.25909	86.66962	45.34296
0.13448	98.90266	1.19452	89.23375	43.45972
0.14138	103.97460	1.13625	91.89860	42.09915
0.14828	109.04650	1.08340	94.65013	41.17955
0.15517	114.11840	1.03525	97.47677	40.63688
0.16207	119.19040	0.99120	100.36890	40.42039
0.16897	124.26230	0.95074	103.31860	40.48942
0.17586	129.33420	0.91346	106.31900	40.81109
0.18276	134.40620	0.87899	109.36440	41.35858
0.18966	139.47810	0.84702	112.44990	42.10981
0.19655	144.55000	0.81730	115.57130	43.04652
0.20345	149.62200	0.78960	118.72490	44.15344
0.21035	154.69390	0.76371	121.90750	45.41777
0.21724	159.76580	0.73947	125.11640	46.82869
0.22414	164.83780	0.71671	128.34920	48.37701
0.23103	169.90970	0.69532	131.60360	50.05489
0.23793	174.98160	0.67516	134.87800	51.85558

ตารางที่ ข.18 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2000 rpm และแรงบิด 0.4 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.24483	180.05360	0.65615	138.17040	53.77329
0.25172	185.12550	0.63817	141.47960	55.80298
0.25862	190.19740	0.62115	144.80400	57.94029
0.26552	195.26930	0.60502	148.14260	60.18140
0.27241	200.34130	0.58970	151.49430	62.52298
0.27931	205.4132	0.57514	154.85810	64.96207
0.28621	210.48510	0.56128	158.23300	67.49611
0.29310	215.55710	0.54808	161.61840	70.12278
0.30000	220.62900	0.53548	165.01360	72.84006

ตารางที่ ข.19 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2250 rpm และแรงบิด 0.4 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.10000	73.54300	1.60643	84.35599	63.17082
0.10690	78.61493	1.50279	86.74493	57.44429
0.11379	83.68686	1.41171	89.33475	52.97054
0.12069	88.75879	1.33104	92.09101	49.48837
0.12759	93.83072	1.25909	94.98672	46.80502
0.13448	98.90266	1.19452	98.00042	44.77567
0.14138	103.97460	1.13625	101.11480	43.28984
0.14828	109.04650	1.08340	104.31590	42.26205
0.15517	114.11840	1.03525	107.59220	41.62530
0.16207	119.19040	0.99120	110.93390	41.32648
0.16897	124.26230	0.95074	114.33320	41.32305
0.17586	129.33420	0.91346	117.78310	41.58062
0.18276	134.40620	0.87899	121.27810	42.07113
0.18966	139.47810	0.84702	124.81320	42.77148
0.19655	144.55000	0.81730	128.38410	43.66257
0.20345	149.62200	0.78960	131.98730	44.72843
0.21035	154.69390	0.76371	135.61940	45.95567
0.21724	159.76580	0.73947	139.27790	47.33299
0.22414	164.83780	0.71671	142.96030	48.85075
0.23103	169.90970	0.69532	146.66430	50.50077
0.23793	174.98160	0.67516	150.38820	52.27599
0.24483	180.05360	0.65615	154.13030	54.17034
0.25172	185.12550	0.63817	157.88900	56.17858

ตารางที่ ข.19 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2250 rpm และแรงบิด 0.4 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.25862	190.19740	0.62115	161.66300	58.29612
0.26552	195.26930	0.60502	165.45120	60.51899
0.27241	200.34130	0.58970	169.25240	62.84369
0.27931	205.4132	0.57514	173.06580	65.26714
0.28621	210.48510	0.56128	176.89030	67.78665
0.29310	215.55710	0.54808	180.72530	70.39981
0.30000	220.62900	0.53548	184.57000	73.10450

ตารางที่ ข.20 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2500 rpm และแรงบิด 0.4 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.10000	73.54300	1.60643	90.87479	65.83078
0.10690	78.61493	1.50279	93.71331	59.77210
0.11379	83.68686	1.41171	96.75270	55.02474
0.12069	88.75879	1.33104	92.09101	49.48837
0.12759	93.83072	1.25909	94.98672	46.80502
0.13448	98.90266	1.19452	98.00042	44.77567
0.14138	103.97460	1.13625	101.11480	43.28984
0.14828	109.04650	1.08340	104.31590	42.26205
0.15517	114.11840	1.03525	107.59220	41.62530
0.16207	119.19040	0.99120	110.93390	41.32648
0.16897	124.26230	0.95074	114.33320	41.32305
0.17586	129.33420	0.91346	117.78310	41.58062
0.18276	134.40620	0.87899	121.27810	42.07113
0.18966	139.47810	0.84702	124.81320	42.77148
0.19655	144.55000	0.81730	128.38410	43.66257
0.20345	149.62200	0.78960	131.98730	44.72843
0.21035	154.69390	0.76371	135.61940	45.95567
0.21724	159.76580	0.73947	139.27790	47.33299
0.22414	164.83780	0.71671	142.96030	48.85075
0.23103	169.90970	0.69532	146.66430	50.50077
0.23793	174.98160	0.67516	150.38820	52.27599
0.24483	180.05360	0.65615	154.13030	54.17034
0.25172	185.12550	0.63817	157.88900	56.17858
0.25862	190.19740	0.62115	161.66300	58.29612
0.26552	195.26930	0.60502	165.45120	60.51899

ตารางที่ ข.20 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2500 rpm และแรงบิด 0.4 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.27241	200.34130	0.58970	169.25240	62.84369
0.27931	205.4132	0.57514	173.06580	65.26714
0.28621	210.48510	0.56128	176.89030	67.78665
0.29310	215.55710	0.54808	180.72530	70.39981
0.30000	220.62900	0.53548	184.57000	73.10450
0.10000	73.54300	1.60643	97.39360	68.77073
0.10690	78.61493	1.50279	100.68170	62.34494
0.11379	83.68686	1.41171	104.17070	57.29517
0.12069	88.75879	1.33104	107.82610	53.33288
0.12759	93.83072	1.25909	111.62090	50.24514
0.13448	98.90266	1.19452	115.53380	47.87200
0.14138	103.97460	1.13625	119.54730	46.09146
0.14828	109.04650	1.08340	123.64760	44.80911
0.15517	114.11840	1.03525	127.82290	43.95099
0.16207	119.19040	0.99120	132.06380	43.45845
0.16897	124.26230	0.95074	136.36220	43.28454
0.17586	129.33420	0.91346	140.71130	43.39128

ตารางที่ ข.21 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2750 rpm และแรงบิด 0.4 N · m

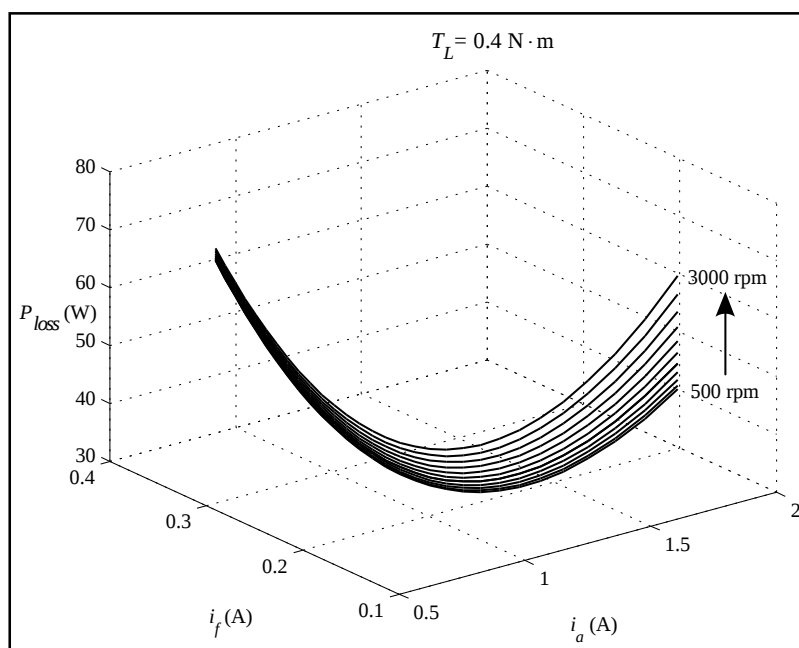
i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.18276	134.40620	0.87899	145.10550	43.74771
0.18966	139.47810	0.84702	149.53970	44.32835
0.19655	144.55000	0.81730	154.00980	45.11210
0.20345	149.62200	0.78960	158.51200	46.08135
0.21035	154.69390	0.76371	163.04340	47.22134
0.21724	159.76580	0.73947	167.60100	48.51956
0.22414	164.83780	0.71671	172.18250	49.96543
0.23103	169.90970	0.69532	176.78570	51.54989
0.23793	174.98160	0.67516	181.40870	53.26517
0.24483	180.05360	0.65615	186.04990	55.10459
0.25172	185.12550	0.63817	190.70780	57.06233
0.25862	190.19740	0.62115	195.38100	59.13337
0.26552	195.26930	0.60502	200.06830	61.31331
0.27241	200.34130	0.58970	204.76870	63.59830
0.27931	205.4132	0.57514	209.48110	65.98495

ตารางที่ ข.21 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2750 rpm และแรงบิด 0.4 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.28621	210.48510	0.56128	195.54760	68.11137
0.29310	215.55710	0.54808	199.83210	70.70943
0.30000	220.62900	0.53548	204.12640	73.40005

ตารางที่ ข.22 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 3000 rpm และแรงบิด 0.4 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.10000	73.54300	1.60643	103.91240	71.99068
0.10690	78.61493	1.50279	107.65010	65.16281
0.11379	83.68686	1.41171	111.58860	59.78183
0.12069	88.75879	1.33104	115.69360	55.54348
0.12759	93.83072	1.25909	119.93800	52.22320
0.13448	98.90266	1.19452	124.30040	49.65239
0.14138	103.97460	1.13625	128.76360	47.70239
0.14828	109.04650	1.08340	133.31340	46.27368
0.15517	114.11840	1.03525	137.93830	45.28826
0.16207	119.19040	0.99120	142.62880	44.68433
0.16897	124.26230	0.95074	147.37670	44.41239
0.17586	129.33420	0.91346	152.17540	44.43241
0.18276	134.40620	0.87899	157.01910	44.71175
0.18966	139.47810	0.84702	161.90290	45.22355
0.19655	144.55000	0.81730	166.82260	45.94558
0.20345	149.62200	0.78960	171.77440	46.85928
0.21035	154.69390	0.76371	176.75540	47.94909
0.21724	159.76580	0.73947	181.76260	49.20184
0.22414	164.83780	0.71671	186.79360	50.60637
0.23103	169.90970	0.69532	191.84640	52.15314
0.23793	174.98160	0.67516	196.91900	53.83396
0.24483	180.05360	0.65615	202.00980	55.64178
0.25172	185.12550	0.63817	207.11720	57.57049
0.25862	190.19740	0.62115	212.23990	59.61479
0.26552	195.26930	0.60502	217.37680	61.77004



รูปที่ ข.2 กราฟจุดต่ำสุดของกำลังงานสูญเสียเมื่อ แรงบิด โหลด 0.4 N · m ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

ตารางที่ ข.23 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 0.6 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.11379	83.68686	2.11756	48.69570	86.43136
0.12069	88.75879	1.99659	47.66000	79.31042
0.12759	93.83072	1.88864	46.83348	73.55825
0.13448	98.90266	1.79178	46.18394	68.91659
0.14138	103.97460	1.70438	45.68549	65.18842
0.14828	109.04650	1.62511	45.31706	62.22132
0.15517	114.11840	1.55288	45.06130	59.89585
0.16207	119.19040	1.48680	44.90382	58.11735
0.16897	124.26230	1.42611	44.83261	56.81002
0.17586	129.33420	1.37019	44.83749	55.91257
0.18276	134.40620	1.31848	44.90987	55.37499
0.18966	139.47810	1.27054	45.04238	55.15619
0.19655	144.55000	1.22596	45.22869	55.22209
0.20345	149.62200	1.18440	45.46333	55.54431
0.21035	154.69390	1.14557	45.74154	56.09898
0.21724	159.76580	1.10920	46.05917	56.86597
0.22414	164.83780	1.07507	46.41259	57.82817
0.23103	169.90970	1.04298	46.79859	58.97097

ตารางที่ ข.23 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 0.6 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.23793	174.98160	1.01275	47.21434	60.28185
0.24483	180.05360	0.98422	47.65732	61.75001
0.25172	185.12550	0.95725	48.12530	63.36609
0.25862	190.19740	0.93173	48.61627	65.12198
0.26552	195.26930	0.90753	49.12845	67.01058
0.27241	200.34130	0.88455	49.66021	69.02568
0.27931	205.41320	0.86271	50.21013	71.16182
0.28621	210.48510	0.84192	50.77687	73.41419
0.29310	215.55710	0.82211	51.35925	75.77854
0.30000	220.62900	0.80321	51.95620	78.25109

ตารางที่ ข.24 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 750 rpm และแรงบิด 0.6 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.11379	83.68686	2.11756	56.11365	87.64766
0.12069	88.75879	1.99659	55.52753	80.39168
0.12759	93.83072	1.88864	55.15057	74.52578
0.13448	98.90266	1.79178	54.95061	69.78743
0.14138	103.97460	1.70438	54.90174	65.97638
0.14828	109.04650	1.62511	54.98287	62.93768
0.15517	114.11840	1.55288	55.17668	60.54995
0.16207	119.19040	1.48680	55.46878	58.71697
0.16897	124.26230	1.42611	55.84714	57.36169
0.17586	129.33420	1.37019	56.30160	56.42182
0.18276	134.40620	1.31848	56.82355	55.84653
0.18966	139.47810	1.27054	57.40563	55.59405
0.19655	144.55000	1.22596	58.04151	55.62977
0.20345	149.62200	1.18440	58.72572	55.92482
0.21035	154.69390	1.14557	59.45350	56.45495
0.21724	159.76580	1.10920	60.22071	57.19970
0.22414	164.83780	1.07507	61.02370	58.14167
0.23103	169.90970	1.04298	61.85928	59.26604
0.23793	174.98160	1.01275	62.72460	60.56006
0.24483	180.05360	0.98422	63.61715	62.01277
0.25172	185.12550	0.95725	64.53470	63.61465
0.25862	190.19740	0.93173	65.47525	65.35746

ตารางที่ ข.24 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 750 rpm และแรงบิด 0.6 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.26552	195.26930	0.90753	66.43700	67.23398
0.27241	200.34130	0.88455	67.41834	69.23791
0.27931	205.41320	0.86271	68.41782	71.36370
0.28621	210.48510	0.84192	69.43414	73.60646
0.29310	215.55710	0.82211	70.46610	75.96187
0.30000	220.62900	0.80321	71.51262	78.42608

ตารางที่ ข.25 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1000 rpm และแรงบิด 0.6 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.11379	83.68686	2.11756	63.53160	89.35048
0.12069	88.75879	1.99659	63.39505	81.90546
0.12759	93.83072	1.88864	63.46767	75.88033
0.13448	98.90266	1.79178	63.71728	71.00662
0.14138	103.97460	1.70438	64.11798	67.07952
0.14828	109.04650	1.62511	64.64869	63.94059
0.15517	114.11840	1.55288	65.29207	61.46569
0.16207	119.19040	1.48680	66.03374	59.55643
0.16897	124.26230	1.42611	66.86167	58.13402
0.17586	129.33420	1.37019	67.76570	57.13476
0.18276	134.40620	1.31848	68.73723	56.50669
0.18966	139.47810	1.27054	69.76888	56.20707
0.19655	144.55000	1.22596	70.85434	56.20053
0.20345	149.62200	1.18440	71.98812	56.45753
0.21035	154.69390	1.14557	73.16547	56.95330
0.21724	159.76580	1.10920	74.38225	57.66691
0.22414	164.83780	1.07507	75.63482	58.58058
0.23103	169.90970	1.04298	76.91996	59.67913
0.23793	174.98160	1.01275	78.23486	60.94956
0.24483	180.05360	0.98422	79.57698	62.38063
0.25172	185.12550	0.95725	80.94411	63.96263
0.25862	190.19740	0.93173	82.33422	65.68712
0.26552	195.26930	0.90753	83.74555	67.54674
0.27241	200.34130	0.88455	85.17646	69.53504
0.27931	205.41320	0.86271	86.62552	71.64634
0.28621	210.48510	0.84192	88.09141	73.87564

ตารางที่ ข.25 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1000 rpm และแรงบิด 0.6 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.29310	215.55710	0.82211	89.57294	76.21853
0.30000	220.62900	0.80321	91.06903	78.67108

ตารางที่ ข.26 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1250 rpm และแรงบิด 0.6 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.11379	83.68686	2.11756	70.94955	91.53983
0.12069	88.75879	1.99659	71.26257	83.85174
0.12759	93.83072	1.88864	71.78476	77.62189
0.13448	98.90266	1.79178	72.48394	72.57414
0.14138	103.97460	1.70438	73.33422	68.49784
0.14828	109.04650	1.62511	74.31450	65.23004
0.15517	114.11840	1.55288	75.40746	62.64307
0.16207	119.19040	1.48680	76.59870	60.63574
0.16897	124.26230	1.42611	77.87620	59.12703
0.17586	129.33420	1.37019	79.22981	58.05141
0.18276	134.40620	1.31848	80.65091	57.35546
0.18966	139.47810	1.27054	82.13213	56.99524
0.19655	144.55000	1.22596	83.66716	56.93435
0.20345	149.62200	1.18440	85.25051	57.14245
0.21035	154.69390	1.14557	86.87744	57.59404
0.21724	159.76580	1.10920	88.54379	58.26762
0.22414	164.83780	1.07507	90.24593	59.14489
0.23103	169.90970	1.04298	91.98065	60.21025
0.23793	174.98160	1.01275	93.74512	61.45033
0.24483	180.05360	0.98422	95.53682	62.85359
0.25172	185.12550	0.95725	97.35351	64.41003
0.25862	190.19740	0.93173	99.19320	66.11098
0.26552	195.26930	0.90753	101.05410	67.94887
0.27241	200.34130	0.88455	102.93460	69.91706
0.27931	205.41320	0.86271	104.83320	72.00973
0.28621	210.48510	0.84192	106.74870	74.22173
0.29310	215.55710	0.82211	108.67980	76.54852
0.30000	220.62900	0.80321	110.62540	78.98607

ตารางที่ ข.27 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1500 rpm และแรงบิด 0.6 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.11379	83.68686	2.11756	78.36750	94.21569
0.12069	88.75879	1.99659	79.13009	86.23053
0.12759	93.83072	1.88864	80.10186	79.75046
0.13448	98.90266	1.79178	81.25061	74.48999
0.14138	103.97460	1.70438	82.55046	70.23134
0.14828	109.04650	1.62511	83.98031	66.80604
0.15517	114.11840	1.55288	85.52284	64.08209
0.16207	119.19040	1.48680	87.16366	61.95490
0.16897	124.26230	1.42611	88.89073	60.34069
0.17586	129.33420	1.37019	90.69391	59.17175
0.18276	134.40620	1.31848	92.56458	58.39284
0.18966	139.47810	1.27054	94.49538	57.95855
0.19655	144.55000	1.22596	96.47998	57.83125
0.20345	149.62200	1.18440	98.51291	57.97957
0.21035	154.69390	1.14557	100.58940	58.37717
0.21724	159.76580	1.10920	102.70530	59.00181
0.22414	164.83780	1.07507	104.85700	59.83459
0.23103	169.90970	1.04298	107.04130	60.85940
0.23793	174.98160	1.01275	109.25540	62.06239
0.24483	180.05360	0.98422	111.49660	63.43165
0.25172	185.12550	0.95725	113.76290	64.95685
0.25862	190.19740	0.93173	116.05220	66.62903
0.26552	195.26930	0.90753	118.36260	68.44035
0.27241	200.34130	0.88455	120.69270	70.38397
0.27931	205.41320	0.86271	123.04090	72.45387
0.28621	210.48510	0.84192	125.40590	74.64472
0.29310	215.55710	0.82211	127.78660	76.95185
0.30000	220.62900	0.80321	130.18190	79.37107

ตารางที่ ข.28 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1750 rpm และแรงบิด 0.6 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.11379	83.68686	2.11756	85.78545	97.37808
0.12069	88.75879	1.99659	86.99762	89.04183
0.12759	93.83072	1.88864	88.41895	82.26605
0.13448	98.90266	1.79178	90.01728	76.75419

ตารางที่ ข.28 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1750 rpm และแรงบิด 0.6 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.14138	103.97460	1.70438	91.76670	72.28003
0.14828	109.04650	1.62511	93.64613	68.66858
0.15517	114.11840	1.55288	95.63823	65.78275
0.16207	119.19040	1.48680	97.72862	63.51390
0.16897	124.26230	1.42611	99.90527	61.77503
0.17586	129.33420	1.37019	102.15800	60.49580
0.18276	134.40620	1.31848	104.47830	59.61884
0.18966	139.47810	1.27054	106.85860	59.09701
0.19655	144.55000	1.22596	109.29280	58.89122
0.20345	149.62200	1.18440	111.77530	58.96889
0.21035	154.69390	1.14557	114.30140	59.30269
0.21724	159.76580	1.10920	116.86690	59.86949
0.22414	164.83780	1.07507	119.46820	60.64970
0.23103	169.90970	1.04298	122.10200	61.62657
0.23793	174.98160	1.01275	124.76560	62.78574
0.24483	180.05360	0.98422	127.45650	64.11482
0.25172	185.12550	0.95725	130.17230	65.60310
0.25862	190.19740	0.93173	132.91120	67.24127
0.26552	195.26930	0.90753	135.67120	69.02120
0.27241	200.34130	0.88455	138.45080	70.93578
0.27931	205.41320	0.86271	141.24860	72.97876
0.28621	210.48510	0.84192	144.06320	75.14463
0.29310	215.55710	0.82211	146.89350	77.42850
0.30000	220.62900	0.80321	149.73830	79.82606

ตารางที่ ข.29 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2000 rpm และแรงบิด 0.6 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.11379	83.68686	2.11756	93.20340	101.02700
0.12069	88.75879	1.99659	94.86514	92.28563
0.12759	93.83072	1.88864	96.73605	85.16865
0.13448	98.90266	1.79178	98.78395	79.36672
0.14138	103.97460	1.70438	100.98290	74.64389
0.14828	109.04650	1.62511	103.31190	70.81767
0.15517	114.11840	1.55288	105.75360	67.74505
0.16207	119.19040	1.48680	108.29360	65.31275

ตารางที่ ข.29 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2000 rpm และแรงบิด 0.6 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.16897	124.26230	1.42611	110.91980	63.43003
0.17586	129.33420	1.37019	113.62210	62.02354
0.18276	134.40620	1.31848	116.39190	61.03346
0.18966	139.47810	1.27054	119.22190	60.41061
0.19655	144.55000	1.22596	122.10560	60.11426
0.20345	149.62200	1.18440	125.03770	60.11042
0.21035	154.69390	1.14557	128.01330	60.37059
0.21724	159.76580	1.10920	131.02840	60.87067
0.22414	164.83780	1.07507	134.07930	61.59022
0.23103	169.90970	1.04298	137.16270	62.51177
0.23793	174.98160	1.01275	140.27590	63.62036
0.24483	180.05360	0.98422	143.41630	64.90308
0.25172	185.12550	0.95725	146.58170	66.34876
0.25862	190.19740	0.93173	149.77010	67.94770
0.26552	195.26930	0.90753	152.97970	69.69141
0.27241	200.34130	0.88455	156.20900	71.57249
0.27931	205.41320	0.86271	159.45630	73.58441
0.28621	210.48510	0.84192	162.72050	75.72144
0.29310	215.55710	0.82211	166.00030	77.97849
0.30000	220.62900	0.80321	169.29470	80.35105

ตารางที่ ข.30 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2250 rpm และแรงบิด 0.6 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.11379	83.68686	2.11756	100.62140	105.16240
0.12069	88.75879	1.99659	102.73270	95.96195
0.12759	93.83072	1.88864	105.05310	88.45827
0.13448	98.90266	1.79178	107.55060	82.32759
0.14138	103.97460	1.70438	110.19920	77.32294
0.14828	109.04650	1.62511	112.97780	73.25330
0.15517	114.11840	1.55288	115.86900	69.96900
0.16207	119.19040	1.48680	118.85850	67.35145
0.16897	124.26230	1.42611	121.93430	65.30570
0.17586	129.33420	1.37019	125.08620	63.75498
0.18276	134.40620	1.31848	128.30560	62.63670
0.18966	139.47810	1.27054	131.58510	61.89937

ตารางที่ ข.30 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2250 rpm และแรงบิด 0.6 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.19655	144.55000	1.22596	134.91850	61.50037
0.20345	149.62200	1.18440	138.30010	61.40416
0.21035	154.69390	1.14557	141.72530	61.58088
0.21724	159.76580	1.10920	145.19000	62.00533
0.22414	164.83780	1.07507	148.69040	62.65613
0.23103	169.90970	1.04298	152.22340	63.51500
0.23793	174.98160	1.01275	155.78620	64.56628
0.24483	180.05360	0.98422	159.37610	65.79646
0.25172	185.12550	0.95725	162.99110	67.19385
0.25862	190.19740	0.93173	166.62910	68.74831
0.26552	195.26930	0.90753	170.28830	70.45098
0.27241	200.34130	0.88455	173.96710	72.29408
0.27931	205.41320	0.86271	177.66400	74.27081
0.28621	210.48510	0.84192	181.37780	76.37516
0.29310	215.55710	0.82211	185.10710	78.60181
0.30000	220.62900	0.80321	188.85110	80.94604

ตารางที่ ข.31 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2500 rpm และแรงบิด 0.6 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.11379	83.68686	2.11756	108.03930	109.78440
0.12069	88.75879	1.99659	110.60020	100.07080
0.12759	93.83072	1.88864	113.37020	92.13489
0.13448	98.90266	1.79178	116.31730	85.63679
0.14138	103.97460	1.70438	119.41540	80.31718
0.14828	109.04650	1.62511	122.64360	75.97547
0.15517	114.11840	1.55288	125.98440	72.45458
0.16207	119.19040	1.48680	129.42350	69.62999
0.16897	124.26230	1.42611	132.94890	67.40204
0.17586	129.33420	1.37019	136.55030	65.69013
0.18276	134.40620	1.31848	140.21930	64.42854
0.18966	139.47810	1.27054	143.94840	63.56327
0.19655	144.55000	1.22596	147.73130	63.04956
0.20345	149.62200	1.18440	151.56250	62.85009
0.21035	154.69390	1.14557	155.43730	62.93355
0.21724	159.76580	1.10920	159.35150	63.27349

ตารางที่ ข.31 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2500 rpm และแรงบิด 0.6 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.22414	164.83780	1.07507	163.30150	63.84744
0.23103	169.90970	1.04298	167.28410	64.63625
0.23793	174.98160	1.01275	171.29640	65.62347
0.24483	180.05360	0.98422	175.33600	66.79493
0.25172	185.12550	0.95725	179.40050	68.13837
0.25862	190.19740	0.93173	183.48810	69.64312
0.26552	195.26930	0.90753	187.59680	71.29991
0.27241	200.34130	0.88455	191.72520	73.10057
0.27931	205.41320	0.86271	195.87170	75.03797
0.28621	210.48510	0.84192	200.03500	77.10579
0.29310	215.55710	0.82211	204.21400	79.29846
0.30000	220.62900	0.80321	208.40750	81.61103

ตารางที่ ข.32 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2750 rpm และแรงบิด 0.6 N · m

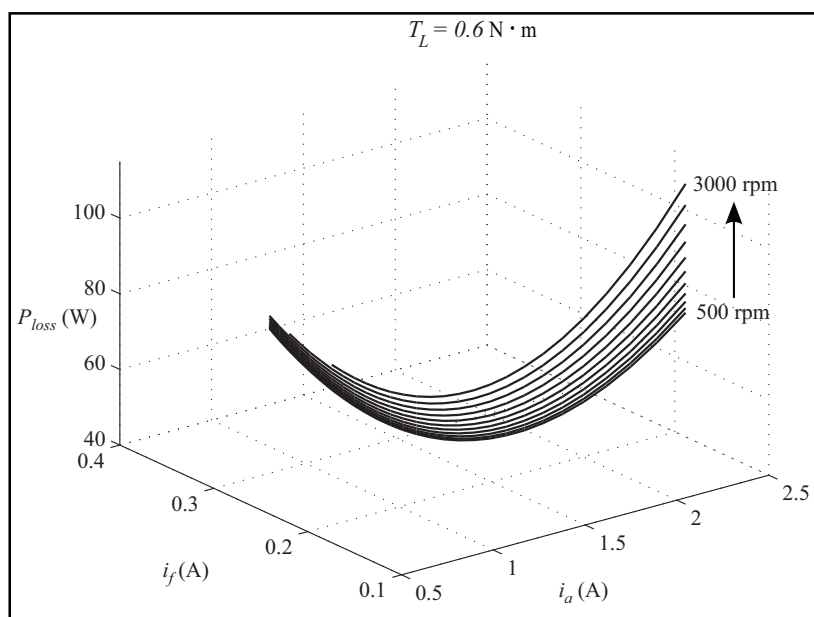
i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.11379	83.68686	2.11756	115.45730	114.89280
0.12069	88.75879	1.99659	118.46770	104.61210
0.12759	93.83072	1.88864	121.68730	96.19854
0.13448	98.90266	1.79178	125.08400	89.29434
0.14138	103.97460	1.70438	128.63170	83.62659
0.14828	109.04650	1.62511	132.30940	78.98420
0.15517	114.11840	1.55288	136.09980	75.20180
0.16207	119.19040	1.48680	139.98850	72.14839
0.16897	124.26230	1.42611	143.96340	69.71904
0.17586	129.33420	1.37019	148.01440	67.82897
0.18276	134.40620	1.31848	152.13300	66.40901
0.18966	139.47810	1.27054	156.31160	65.40232
0.19655	144.55000	1.22596	160.54410	64.76182
0.20345	149.62200	1.18440	164.82490	64.44823
0.21035	154.69390	1.14557	169.1493	64.42861
0.21724	159.76580	1.10920	173.51300	64.67513
0.22414	164.83780	1.07507	177.91260	65.16416
0.23103	169.90970	1.04298	182.34480	65.87553
0.23793	174.98160	1.01275	186.80670	66.79195
0.24483	180.05360	0.98422	191.29580	67.89850

ตารางที่ ข.32 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2750 rpm และแรงบิด 0.6 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.25172	185.12550	0.95725	195.80990	69.18230
0.25862	190.19740	0.93173	200.34710	70.63212
0.26552	195.26930	0.90753	204.90540	72.23820
0.27241	200.34130	0.88455	209.48330	73.99196
0.27931	205.41320	0.86271	214.07940	75.88588
0.28621	210.48510	0.84192	218.69230	77.91333

ตารางที่ ข.33 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 3000 rpm และแรงบิด 0.6 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.11379	83.68686	2.11756	122.87520	120.48780
0.12069	88.75879	1.99659	126.33520	109.58590
0.12759	93.83072	1.88864	130.00440	100.64920
0.13448	98.90266	1.79178	133.85060	93.30022
0.14138	103.97460	1.70438	137.84790	87.25119
0.14828	109.04650	1.62511	141.97520	82.27946
0.15517	114.11840	1.55288	146.21520	78.21066
0.16207	119.19040	1.48680	150.55340	74.90662
0.16897	124.26230	1.42611	154.97790	72.25671
0.17586	129.33420	1.37019	159.47850	70.17151
0.18276	134.40620	1.31848	164.04670	68.57809
0.18966	139.47810	1.27054	168.67490	67.41652
0.19655	144.55000	1.22596	173.35690	66.63715
0.20345	149.62200	1.18440	178.08730	66.19858
0.21035	154.69390	1.14557	182.86120	66.06606
0.21724	159.76580	1.10920	187.67460	66.21027
0.22414	164.83780	1.07507	192.52370	66.60628
0.23103	169.90970	1.04298	197.4055	67.23284
0.23793	174.98160	1.01275	202.3169	68.07171
0.24483	180.05360	0.98422	207.2556	69.10718
0.25172	185.12550	0.95725	212.2193	70.32566
0.25862	190.19740	0.93173	217.206	71.71532



รูปที่ ข.3 กราฟจุดต่ำสุดของกำลังงานสูญเสียเมื่อ แรงบิด โหลด $0.6 \text{ N} \cdot \text{m}$ ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

ตารางที่ ข.34 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด $0.8 \text{ N} \cdot \text{m}$

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.14828	109.04650	2.16681	53.97887	96.59528
0.15517	114.11840	2.07050	53.33814	91.32825
0.16207	119.19040	1.98240	52.82846	86.97376
0.16897	124.26230	1.90148	52.43379	83.39768
0.17586	129.33420	1.82692	52.14059	80.49163
0.18276	134.40620	1.75798	51.93738	78.16720
0.18966	139.47810	1.69405	51.81434	76.35172
0.19655	144.55000	1.63461	51.76304	74.98499
0.20345	149.62200	1.57920	51.77617	74.01683
0.21035	154.69390	1.52742	51.84740	73.40508
0.21724	159.76580	1.47893	51.9712	73.11419
0.22414	164.83780	1.43343	52.14271	73.11393
0.23103	169.90970	1.39064	52.35766	73.37853
0.23793	174.98160	1.35033	52.61228	73.88587
0.24483	180.05360	1.31229	52.90320	74.61688
0.25172	185.12550	1.27634	53.22746	75.55507
0.25862	190.19740	1.24230	53.58237	76.68611
0.26552	195.26930	1.21004	53.96556	77.99749

ตารางที่ ข.34 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 0.8 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.27241	200.34130	1.17940	54.37487	79.47826
0.27931	205.41320	1.15028	54.80837	81.11880
0.28621	210.48510	1.12256	55.26431	82.91062
0.29310	215.55710	1.09615	55.74111	84.84623
0.30000	220.62900	1.07095	56.23733	86.91898

ตารางที่ ข.35 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 750 rpm และแรงบิด 0.8 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.14828	109.04650	2.16681	63.64468	100.59810
0.15517	114.11840	2.07050	63.45352	94.72684
0.16207	119.19040	1.98240	63.39342	89.89901
0.16897	124.26230	1.90148	63.44832	85.95432
0.17586	129.33420	1.82692	63.60469	82.76444
0.18276	134.40620	1.75798	63.85106	80.22561
0.18966	139.47810	1.69405	64.17759	78.25321
0.19655	144.55000	1.63461	64.57586	76.77770
0.20345	149.62200	1.57920	65.03857	75.74145
0.21035	154.69390	1.52742	65.55937	75.09642
0.21724	159.76580	1.47893	66.13274	74.80228
0.22414	164.83780	1.43343	66.75382	74.82498
0.23103	169.90970	1.39064	67.41835	75.13561
0.23793	174.98160	1.35033	68.12254	75.70949
0.24483	180.05360	1.31229	68.86304	76.52543
0.25172	185.12550	1.27634	69.63686	77.56522
0.25862	190.19740	1.24230	70.44135	78.81304
0.26552	195.26930	1.21004	71.27411	80.25519
0.27241	200.34130	1.17940	72.13299	81.87968
0.27931	205.41320	1.15028	73.01607	83.67605
0.28621	210.48510	1.12256	73.92158	85.63507
0.29310	215.55710	1.09615	74.84795	87.74864
0.30000	220.62900	1.07095	75.79374	90.00957

ตารางที่ ข.36 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1000 rpm และแรงบิด 0.8 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.14828	109.04650	2.16681	73.31050	99.65176
0.15517	114.11840	2.07050	73.56891	94.11908
0.16207	119.19040	1.98240	73.95838	89.53212
0.16897	124.26230	1.90148	74.46285	85.75146
0.17586	129.33420	1.82692	75.06880	82.66442
0.18276	134.40620	1.75798	75.76474	80.17910
0.18966	139.47810	1.69405	76.54084	78.21996
0.19655	144.55000	1.63461	77.38868	76.72443
0.20345	149.62200	1.57920	78.30096	75.64033
0.21035	154.69390	1.52742	79.27134	74.92388
0.21724	159.76580	1.47893	80.29428	74.53808
0.22414	164.83780	1.43343	81.36494	74.45155
0.23103	169.90970	1.39064	82.47904	74.63748
0.23793	174.98160	1.35033	83.63280	75.07289
0.24483	180.05360	1.31229	84.82287	75.73797
0.25172	185.12550	1.27634	86.04627	76.61557
0.25862	190.19740	1.24230	87.30033	77.69081
0.26552	195.26930	1.21004	88.58266	78.95067
0.27241	200.34130	1.17940	89.89112	80.38379
0.27931	205.41320	1.15028	91.22376	81.98016
0.28621	210.48510	1.12256	92.57885	83.73098
0.29310	215.55710	1.09615	93.95479	85.62844
0.30000	220.62900	1.07095	95.35016	87.66563

ตารางที่ ข.37 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1250 rpm และแรงบิด 0.8 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.14828	109.04650	2.16681	82.97631	101.94410
0.15517	114.11840	2.07050	83.684300	96.21221
0.16207	119.19040	1.98240	84.52334	91.45089
0.16897	124.26230	1.90148	85.47738	87.51680
0.17586	129.33420	1.82692	86.53290	84.29401
0.18276	134.40620	1.75798	87.67841	81.68803
0.18966	139.47810	1.69405	88.90409	79.62114
0.19655	144.55000	1.63461	90.20151	78.02901
0.20345	149.62200	1.57920	91.56336	76.85796

ตารางที่ ข.37 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1250 rpm และแรงบิด 0.8 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.21035	154.69390	1.52742	92.98331	76.06297
0.21724	159.76580	1.47893	94.45582	75.60600
0.22414	164.83780	1.43343	95.97605	75.45476
0.23103	169.90970	1.39064	97.53972	75.58169
0.23793	174.98160	1.35033	99.14306	75.96316
0.24483	180.05360	1.31229	100.78270	76.57879
0.25172	185.12550	1.27634	102.45570	77.41095
0.25862	190.19740	1.24230	104.15930	78.44433
0.26552	195.26930	1.21004	105.89120	79.66556
0.27241	200.34130	1.17940	107.64920	81.06294
0.27931	205.41320	1.15028	109.43150	82.62619
0.28621	210.48510	1.12256	111.23610	84.34624
0.29310	215.55710	1.09615	113.06160	86.21509
0.30000	220.62900	1.07095	114.90660	88.22562

ตารางที่ ข.38 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1500 rpm และแรงบิด 0.8 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.14828	109.04650	2.16681	92.64212	104.74590
0.15517	114.11840	2.07050	93.79968	98.77047
0.16207	119.19040	1.98240	95.08830	93.79606
0.16897	124.26230	1.90148	96.49191	89.67443
0.17586	129.33420	1.82692	97.99701	86.28574
0.18276	134.40620	1.75798	99.59209	83.53227
0.18966	139.47810	1.69405	101.26730	81.33369
0.19655	144.55000	1.63461	103.01430	79.62349
0.20345	149.62200	1.57920	104.82580	78.34618
0.21035	154.69390	1.52742	106.69530	77.45520
0.21724	159.76580	1.47893	108.61740	76.91124
0.22414	164.83780	1.43343	110.58720	76.68091
0.23103	169.90970	1.39064	112.60040	76.73573
0.23793	174.98160	1.35033	114.65330	77.05127
0.24483	180.05360	1.31229	116.74250	77.60646
0.25172	185.12550	1.27634	118.86510	78.38308
0.25862	190.19740	1.24230	121.01830	79.36530
0.26552	195.26930	1.21004	123.19980	80.53931

ตารางที่ ข.38 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1500 rpm และแรงบิด 0.8 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.27241	200.34130	1.17940	125.40740	81.89301
0.27931	205.41320	1.15028	127.63920	83.41577
0.28621	210.48510	1.12256	129.89340	85.09824
0.29310	215.55710	1.09615	132.16850	86.93211
0.30000	220.62900	1.07095	134.46300	88.91005

ตารางที่ ข.39 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1750 rpm และแรงบิด 0.8 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.14828	109.04650	2.16681	102.30790	108.05710
0.15517	114.11840	2.07050	103.91510	101.79390
0.16207	119.19040	1.98240	105.65330	96.56762
0.16897	124.26230	1.90148	107.50640	92.22436
0.17586	129.33420	1.82692	109.46110	88.63960
0.18276	134.40620	1.75798	111.50580	85.71183
0.18966	139.47810	1.69405	113.63060	83.35762
0.19655	144.55000	1.63461	115.82720	81.50788
0.20345	149.62200	1.57920	118.08810	80.10498
0.21035	154.69390	1.52742	120.40720	79.10056
0.21724	159.76580	1.47893	122.77890	78.45379
0.22414	164.83780	1.43343	125.19830	78.12999
0.23103	169.90970	1.39064	127.66110	78.09960
0.23793	174.98160	1.35033	130.16360	78.33721
0.24483	180.05360	1.31229	132.70240	78.82097
0.25172	185.12550	1.27634	135.27450	79.53196
0.25862	190.19740	1.24230	137.87730	80.45373
0.26552	195.26930	1.21004	140.50830	81.57193
0.27241	200.34130	1.17940	143.16550	82.87400
0.27931	205.41320	1.15028	145.84690	84.34892
0.28621	210.48510	1.12256	148.55070	85.98695
0.29310	215.55710	1.09615	151.27530	87.77950
0.30000	220.62900	1.07095	154.01940	89.71893

ตารางที่ ข.40 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2000 rpm และแรงบิด 0.8 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.14828	109.04650	2.16681	111.97380	111.87770
0.15517	114.11840	2.07050	114.03050	105.28240
0.16207	119.19040	1.98240	116.21820	99.76558
0.16897	124.26230	1.90148	118.52100	95.16659
0.17586	129.33420	1.82692	120.92520	91.35558
0.18276	134.40620	1.75798	123.41940	88.22670
0.18966	139.47810	1.69405	125.99380	85.69292
0.19655	144.55000	1.63461	128.64000	83.68218
0.20345	149.62200	1.57920	131.35050	82.13436
0.21035	154.69390	1.52742	134.11920	80.99905
0.21724	159.76580	1.47893	136.94040	80.23365
0.22414	164.83780	1.43343	139.80940	79.80202
0.23103	169.90970	1.39064	142.72180	79.67328
0.23793	174.98160	1.35033	145.67380	79.82099
0.24483	180.05360	1.31229	148.66220	80.22234
0.25172	185.12550	1.27634	151.68390	80.85759
0.25862	190.19740	1.24230	154.73620	81.70960
0.26552	195.26930	1.21004	157.81690	82.76341
0.27241	200.34130	1.17940	160.92360	84.00592
0.27931	205.41320	1.15028	164.05450	85.42563
0.28621	210.48510	1.12256	167.20790	87.01240
0.29310	215.55710	1.09615	170.38220	88.75726
0.30000	220.62900	1.07095	173.57580	90.65225

ตารางที่ ข.41 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2250 rpm และแรงบิด 0.8 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.14828	109.04650	2.16681	121.63960	116.20770
0.15517	114.11840	2.07050	124.14580	109.23610
0.16207	119.19040	1.98240	126.78320	103.38990
0.16897	124.26230	1.90148	129.53550	98.50111
0.17586	129.33420	1.82692	132.38930	94.43370
0.18276	134.40620	1.75798	135.33310	91.07690
0.18966	139.47810	1.69405	138.35710	88.33960
0.19655	144.55000	1.63461	141.45280	86.14638
0.20345	149.62200	1.57920	144.61290	84.43433

ตารางที่ ข.41 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2250 rpm และแรงบิด 0.8 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.21035	154.69390	1.52742	147.83120	83.15067
0.21724	159.76580	1.47893	151.10200	82.25083
0.22414	164.83780	1.43343	154.42050	81.69697
0.23103	169.90970	1.39064	157.7825	81.45680
0.23793	174.98160	1.35033	161.18410	81.50261
0.24483	180.05360	1.31229	164.62200	81.81056
0.25172	185.12550	1.27634	168.09330	82.35997
0.25862	190.19740	1.24230	171.59520	83.13292
0.26552	195.26930	1.21004	175.12540	84.11375
0.27241	200.34130	1.17940	178.68170	85.28876
0.27931	205.41320	1.15028	182.26220	86.64590
0.28621	210.48510	1.12256	185.86520	88.17457
0.29310	215.55710	1.09615	189.48900	89.86538
0.30000	220.62900	1.07095	193.13220	91.71001

ตารางที่ ข.42 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2500 rpm และแรงบิด 0.8 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.14828	109.04650	2.16681	131.30540	121.04710
0.15517	114.11840	2.07050	134.26120	113.65490
0.16207	119.19040	1.98240	137.34810	107.44070
0.16897	124.26230	1.90148	140.55000	102.22790
0.17586	129.33420	1.82692	143.85340	97.87396
0.18276	134.40620	1.75798	147.24680	94.26241
0.18966	139.47810	1.69405	150.72030	91.29765
0.19655	144.55000	1.63461	154.26560	88.90048
0.20345	149.62200	1.57920	157.87530	87.00489
0.21035	154.69390	1.52742	161.54320	85.55543
0.21724	159.76580	1.47893	165.26350	84.50533
0.22414	164.83780	1.43343	169.03160	83.81486
0.23103	169.90970	1.39064	172.84320	83.45014
0.23793	174.98160	1.35033	176.69440	83.38207
0.24483	180.05360	1.31229	180.58190	83.58562
0.25172	185.12550	1.27634	184.50270	84.03911
0.25862	190.19740	1.24230	188.45420	84.72370
0.26552	195.26930	1.21004	192.43400	85.62296

ตารางที่ ข.42 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2500 rpm และแรงบิด 0.8 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.27241	200.34130	1.17940	196.43990	86.72252
0.27931	205.41320	1.15028	200.46990	88.00973
0.28621	210.48510	1.12256	204.52250	89.47346
0.29310	215.55710	1.09615	208.59580	91.10387
0.30000	220.62900	1.07095	212.68860	92.89221

ตารางที่ ข.43 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2750 rpm และแรงบิด 0.8 N · m

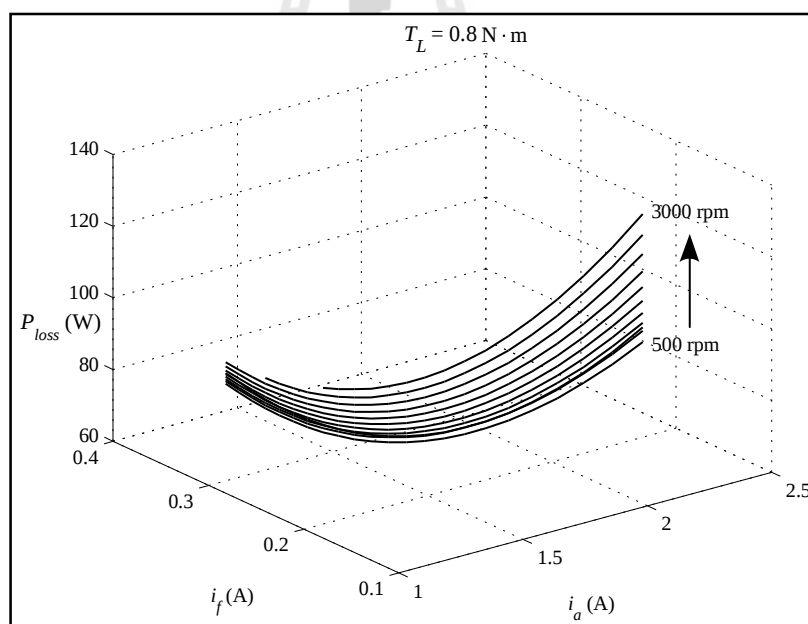
i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.14828	109.04650	2.16681	140.97120	126.39590
0.15517	114.11840	2.07050	144.37660	118.53880
0.16207	119.19040	1.98240	147.91310	111.91780
0.16897	124.26230	1.90148	151.56460	106.34700
0.17586	129.33420	1.82692	155.31750	101.67630
0.18276	134.40620	1.75798	159.16050	97.78323
0.18966	139.47810	1.69405	163.08360	94.56707
0.19655	144.55000	1.63461	167.07840	91.94450
0.20345	149.62200	1.57920	171.13770	89.84602
0.21035	154.69390	1.52742	175.25510	88.21332
0.21724	159.76580	1.47893	179.42510	86.99714
0.22414	164.83780	1.43343	183.64270	86.15569
0.23103	169.90970	1.39064	187.90380	85.65330
0.23793	174.98160	1.35033	192.20460	85.45937
0.24483	180.05360	1.31229	196.54170	85.54753
0.25172	185.12550	1.27634	200.91210	85.89499
0.25862	190.19740	1.24230	205.31320	86.48192
0.26552	195.26930	1.21004	209.74250	87.29103
0.27241	200.34130	1.17940	214.1980	88.30720
0.27931	205.41320	1.15028	218.67760	89.51712

ตารางที่ ข.44 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 3000 rpm และแรงบิด 0.8 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.14828	109.04650	2.16681	150.63700	132.25420
0.15517	114.11840	2.07050	154.49200	123.88790
0.16207	119.19040	1.98240	158.47810	116.82130

ตารางที่ ข.44 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 3000 rpm และแรงบิด 0.8 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.16897	124.26230	1.90148	162.57910	110.85850
0.17586	129.33420	1.82692	166.78160	105.84090
0.18276	134.40620	1.75798	171.07420	101.63940
0.18966	139.47810	1.69405	175.44680	98.14786
0.19655	144.55000	1.63461	179.89130	95.27842
0.20345	149.62200	1.57920	184.40010	92.95775
0.21035	154.69390	1.52742	188.96710	91.12434
0.21724	159.76580	1.47893	193.58660	89.72627
0.22414	164.83780	1.43343	198.25390	88.71946
0.23103	169.90970	1.39064	202.96450	88.06629
0.23793	174.98160	1.35033	207.71490	87.73450
0.24483	180.05360	1.31229	212.50150	87.69629
0.25172	185.12550	1.27634	217.32150	87.92762



รูปที่ ข.4 กราฟจุดต่ำสุดของกำลังงานสูญเสียเมื่อ แรงบิดโหลด 0.8 N · m ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

ตารางที่ ข.45 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 1.0 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.18276	134.40620	2.19745	58.96489	107.22030
0.18966	139.47810	2.11756	58.58630	103.36110
0.19655	144.55000	2.04326	58.29739	100.16090
0.20345	149.62200	1.97400	58.08901	97.54161
0.21035	154.69390	1.90927	57.95327	95.43758
0.21724	159.76580	1.84866	57.88323	93.79348
0.22414	164.83780	1.79178	57.87283	92.56228
0.23103	169.90970	1.73830	57.91673	91.70387
0.23793	174.98160	1.68791	58.01022	91.18383
0.24483	180.05360	1.64036	58.14909	90.97252
0.25172	185.12550	1.59542	58.32962	91.04427
0.25862	190.19740	1.55288	58.54848	91.37680
0.26552	195.26930	1.51254	58.80267	91.95065
0.27241	200.34130	1.47425	59.08953	92.74880
0.27931	205.41320	1.43785	59.40662	93.75630
0.28621	210.48510	1.40320	59.75176	94.95995
0.29310	215.55710	1.37019	60.12297	96.34810
0.30000	220.62900	1.33869	60.51845	97.91041

ตารางที่ ข.46 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 750 rpm และแรงบิด 1.0 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.18276	134.40620	2.19745	70.87856	108.53020
0.18966	139.47810	2.11756	70.94955	104.57740
0.19655	144.55000	2.04326	71.11021	101.29340
0.20345	149.62200	1.97400	71.35141	98.59858
0.21035	154.69390	1.90927	71.66524	96.42638
0.21724	159.76580	1.84866	72.04477	94.72049
0.22414	164.83780	1.79178	72.48394	93.43313
0.23103	169.90970	1.73830	72.97742	92.52350
0.23793	174.98160	1.68791	73.52048	91.95664
0.24483	180.05360	1.64036	74.10892	91.70240
0.25172	185.12550	1.59542	74.73903	91.73471
0.25862	190.19740	1.55288	75.40746	92.03090
0.26552	195.26930	1.51254	76.11123	92.57121
0.27241	200.34130	1.47425	76.84765	93.33834

ตารางที่ ข.46 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 750 rpm และแรงบิด 1.0 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.27931	205.41320	1.43785	77.61431	94.31708
0.28621	210.48510	1.40320	78.40903	95.49404
0.29310	215.55710	1.37019	79.22981	96.85735
0.30000	220.62900	1.33869	80.07487	98.39651

ตารางที่ ข.47 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1000 rpm และแรงบิด 1.0 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.18276	134.40620	2.19745	82.79224	110.36390
0.18966	139.47810	2.11756	83.31280	106.28020
0.19655	144.55000	2.04326	83.92303	102.87880
0.20345	149.62200	1.97400	84.61381	100.07830
0.21035	154.69390	1.90927	85.37720	97.81070
0.21724	159.76580	1.84866	86.20631	96.01831
0.22414	164.83780	1.79178	87.09506	94.65231
0.23103	169.90970	1.73830	88.03811	93.67098
0.23793	174.98160	1.68791	89.03074	93.03856
0.24483	180.05360	1.64036	90.06875	92.72423
0.25172	185.12550	1.59542	91.14843	92.70131
0.25862	190.19740	1.55288	92.26643	92.94664
0.26552	195.26930	1.51254	93.41978	93.44000
0.27241	200.34130	1.47425	94.60577	94.16370
0.27931	205.41320	1.43785	95.82201	95.10218
0.28621	210.48510	1.40320	97.06629	96.24176
0.29310	215.55710	1.37019	98.33665	97.57030
0.30000	220.62900	1.33869	99.63128	99.07706

ตารางที่ ข.48 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1250 rpm และแรงบิด 1.0 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.18276	134.40620	2.19745	94.70592	112.72160
0.18966	139.47810	2.11756	95.67605	108.46960
0.19655	144.55000	2.04326	96.73586	104.91720
0.20345	149.62200	1.97400	97.87620	101.98090
0.21035	154.69390	1.90927	99.08917	99.59053
0.21724	159.76580	1.84866	100.3679	97.68694

ตารางที่ ข.48 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1250 rpm และแรงบิด 1.0 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.22414	164.83780	1.79178	101.70620	96.21983
0.23103	169.90970	1.73830	103.09880	95.14631
0.23793	174.98160	1.68791	104.54100	94.42961
0.24483	180.05360	1.64036	106.02860	94.03801
0.25172	185.12550	1.59542	107.55780	93.94409
0.25862	190.19740	1.55288	109.12540	94.12402
0.26552	195.26930	1.51254	110.72830	94.55701
0.27241	200.34130	1.47425	112.36390	95.22487
0.27931	205.41320	1.43785	114.02970	96.11160
0.28621	210.48510	1.40320	115.72360	97.20311
0.29310	215.55710	1.37019	117.44350	98.48694
0.30000	220.62900	1.33869	119.18770	99.95204

ตารางที่ ข.49 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1500 rpm และแรงบิด 1.0 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.18276	134.40620	2.19745	106.61960	115.60320
0.18966	139.47810	2.11756	108.03930	111.14540
0.19655	144.55000	2.04326	109.54870	107.40860
0.20345	149.62200	1.97400	111.13860	104.30620
0.21035	154.69390	1.90927	112.80110	101.76590
0.21724	159.76580	1.84866	114.52940	99.72636
0.22414	164.83780	1.79178	116.31730	98.13568
0.23103	169.90970	1.73830	118.15950	96.94950
0.23793	174.98160	1.68791	120.05130	96.12977
0.24483	180.05360	1.64036	121.98840	95.64374
0.25172	185.12550	1.59542	123.96720	95.46304
0.25862	190.19740	1.55288	125.98440	95.56304
0.26552	195.26930	1.51254	128.03690	95.92225
0.27241	200.34130	1.47425	130.12200	96.52186
0.27931	205.41320	1.43785	132.23740	97.34533
0.28621	210.48510	1.40320	134.38080	98.37810
0.29310	215.55710	1.37019	136.55030	99.60729
0.30000	220.62900	1.33869	138.74410	101.02150

ตารางที่ ข.50 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1750 rpm และแรงบิด 1.0 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.18276	134.40620	2.19745	118.53330	119.00880
0.18966	139.47810	2.11756	120.40260	114.30780
0.19655	144.55000	2.04326	122.36150	110.35290
0.20345	149.62200	1.97400	124.40100	107.05430
0.21035	154.69390	1.90927	126.51310	104.33680
0.21724	159.76580	1.84866	128.69090	102.13660
0.22414	164.83780	1.79178	130.92840	100.39990
0.23103	169.90970	1.73830	133.22020	99.08053
0.23793	174.98160	1.68791	135.56150	98.13906
0.24483	180.05360	1.64036	137.94830	97.54142
0.25172	185.12550	1.59542	140.37660	97.25817
0.25862	190.19740	1.55288	142.84340	97.26370
0.26552	195.26930	1.51254	145.34540	97.53572
0.27241	200.34130	1.47425	147.88010	98.05466
0.27931	205.41320	1.43785	150.44510	98.80337
0.28621	210.48510	1.40320	153.03810	99.76672
0.29310	215.55710	1.37019	155.65720	100.93130
0.30000	220.62900	1.33869	158.30050	102.28530

ตารางที่ ข.51 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2000 rpm และแรงบิด 1.0 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.18276	134.40620	2.19745	130.44700	122.93830
0.18966	139.47810	2.11756	132.76580	117.95670
0.19655	144.55000	2.04326	135.17430	113.75030
0.20345	149.62200	1.97400	137.66340	110.22530
0.21035	154.69390	1.90927	140.22510	107.30320
0.21724	159.76580	1.84866	142.85250	104.91760
0.22414	164.83780	1.79178	145.53950	103.01240
0.23103	169.90970	1.73830	148.28090	101.53940
0.23793	174.98160	1.68791	151.07180	100.45750
0.24483	180.05360	1.64036	153.90810	99.73106
0.25172	185.12550	1.59542	156.78610	99.32947
0.25862	190.19740	1.55288	159.70230	99.22601
0.26552	195.26930	1.51254	162.65400	99.39740
0.27241	200.34130	1.47425	165.63830	99.82328

ตารางที่ ข.51 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2000 rpm และแรงบิด 1.0 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.27931	205.41320	1.43785	168.65280	100.48570
0.28621	210.48510	1.40320	171.69540	101.36900
0.29310	215.55710	1.37019	174.76400	102.45910
0.30000	220.62900	1.33869	177.85690	103.74370

ตารางที่ ข.52 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2250 rpm และแรงบิด 1.0 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.18276	134.40620	2.19745	142.36060	127.39170
0.18966	139.47810	2.11756	145.12910	122.09220
0.19655	144.55000	2.04326	147.98710	117.60060
0.20345	149.62200	1.97400	150.92580	113.81900
0.21035	154.69390	1.90927	153.93700	110.66510
0.21724	159.76580	1.84866	157.01400	108.06950
0.22414	164.83780	1.79178	160.15060	105.97330
0.23103	169.90970	1.73830	163.34150	104.32620
0.23793	174.98160	1.68791	166.58200	103.08500
0.24483	180.05360	1.64036	169.86790	102.21260
0.25172	185.12550	1.59542	173.19550	101.67690
0.25862	190.19740	1.55288	176.56130	101.44990
0.26552	195.26930	1.51254	179.96250	101.50730
0.27241	200.34130	1.47425	183.39640	101.82770
0.27931	205.41320	1.43785	186.86050	102.39240
0.28621	210.48510	1.40320	190.35260	103.18490
0.29310	215.55710	1.37019	193.87090	104.19050
0.30000	220.62900	1.33869	197.41340	105.39640

ตารางที่ ข.53 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2500 rpm และแรงบิด 1.0 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.18276	134.40620	2.19745	154.27430	132.36910
0.18966	139.47810	2.11756	157.49230	126.71410
0.19655	144.55000	2.04326	160.80000	121.90390
0.20345	149.62200	1.97400	164.18820	117.83540
0.21035	154.69390	1.90927	167.64900	114.42250
0.21724	159.76580	1.84866	171.17560	111.59210

ตารางที่ ข.53 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2500 rpm และแรงบิด 1.0 N · m (ต่อ)

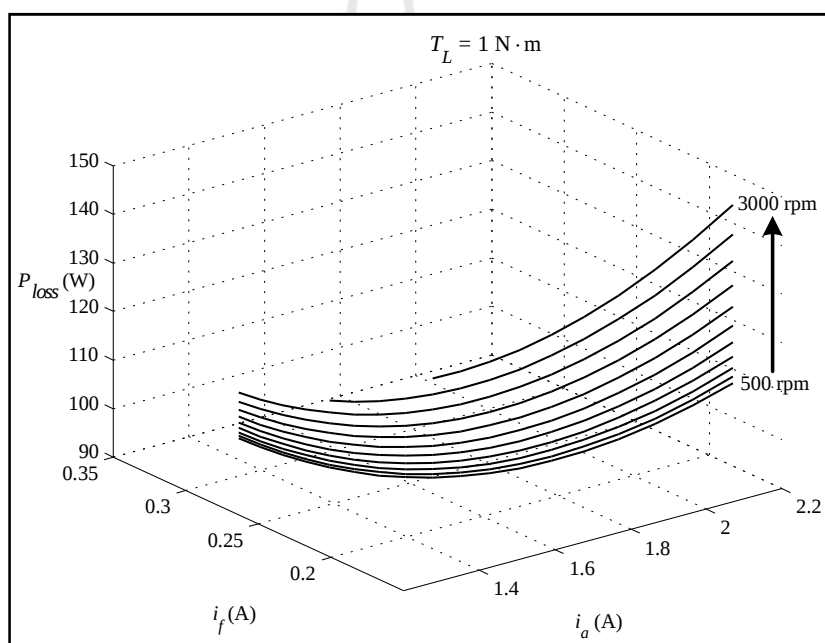
i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.22414	164.83780	1.79178	174.76170	109.28250
0.23103	169.90970	1.73830	178.40220	107.44080
0.23793	174.98160	1.68791	182.09230	106.02170
0.24483	180.05360	1.64036	185.82770	104.98620
0.25172	185.12550	1.59542	189.60490	104.30060
0.25862	190.19740	1.55288	193.42030	103.93550
0.26552	195.26930	1.51254	197.27110	103.86550
0.27241	200.34130	1.47425	201.15450	104.06800
0.27931	205.41320	1.43785	205.06820	104.52340
0.28621	210.48510	1.40320	209.00990	105.21440
0.29310	215.55710	1.37019	212.97770	106.12570
0.30000	220.62900	1.33869	216.96980	107.24360

ตารางที่ ข.54 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2750 rpm และแรงบิด 1.0 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.18276	134.40620	2.19745	166.18800	137.87040
0.18966	139.47810	2.11756	169.85560	131.82260
0.19655	144.55000	2.04326	173.61280	126.66010
0.20345	149.62200	1.97400	177.45060	122.27470
0.21035	154.69390	1.90927	181.36100	118.57540
0.21724	159.76580	1.84866	185.33710	115.48560
0.22414	164.83780	1.79178	189.37290	112.94000
0.23103	169.90970	1.73830	193.46290	110.88320
0.23793	174.98160	1.68791	197.60260	109.26740
0.24483	180.05360	1.64036	201.78760	108.05170
0.25172	185.12550	1.59542	206.01430	107.20040
0.25862	190.19740	1.55288	210.27930	106.68280
0.26552	195.26930	1.51254	214.57960	106.47180
0.27241	200.34130	1.47425	218.91260	106.54400

ตารางที่ ข.55 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 3000 rpm และแรงบิด 1.0 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.18276	134.40620	2.19745	178.10170	143.89560
0.18966	139.47810	2.11756	182.21880	137.41760
0.19655	144.55000	2.04326	186.42560	131.86940
0.20345	149.62200	1.97400	190.71300	127.13680
0.21035	154.69390	1.90927	195.07300	123.12390
0.21724	159.76580	1.84866	199.49860	119.74990
0.22414	164.83780	1.79178	203.9840	116.94590
0.23103	169.90970	1.73830	208.52360	114.65350
0.23793	174.98160	1.68791	213.11280	112.82230
0.24483	180.05360	1.64036	217.74740	111.40910



รูปที่ ข.5 กราฟจุดต่ำสุดของกำลังงานสูญเสียเมื่อ แรงบิด โหลด 1.0 N · m ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

ตารางที่ ข.56 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 1.2 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.22414	164.83780	2.15014	63.60295	116.17320
0.23103	169.90970	2.08596	63.47581	113.94700
0.23793	174.98160	2.02549	63.40816	112.17580

ตารางที่ ข.56 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 1.2 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.24483	180.05360	1.96844	63.39497	110.81690
0.25172	185.12550	1.91451	63.43178	109.83370
0.25862	190.19740	1.86345	63.51458	109.19410
0.26552	195.26930	1.81505	63.63979	108.87010
0.27241	200.34130	1.76910	63.80418	108.83730
0.27931	205.41320	1.72542	64.00486	109.07430
0.28621	210.48510	1.68384	64.23920	109.56220
0.29310	215.55710	1.64422	64.50482	110.28410
0.30000	220.62900	1.60643	64.79958	111.22540

ตารางที่ ข.57 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 750 rpm และแรงบิด 1.2 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.22414	164.83780	2.15014	78.21407	117.42720
0.23103	169.90970	2.08596	78.53649	115.12730
0.23793	174.98160	2.02549	78.91842	113.28860
0.24483	180.05360	1.96844	79.35481	111.86800
0.25172	185.12550	1.91451	79.84119	110.82790
0.25862	190.19740	1.86345	80.37356	110.13600
0.26552	195.26930	1.81505	80.94834	109.76370
0.27241	200.34130	1.76910	81.56231	109.68630
0.27931	205.41320	1.72542	82.21256	109.88190
0.28621	210.48510	1.68384	82.89647	110.33130
0.29310	215.55710	1.64422	83.61167	111.01750
0.30000	220.62900	1.60643	84.35599	111.92540

ตารางที่ ข.58 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1000 rpm และแรงบิด 1.2 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.22414	164.83780	2.15014	92.82518	119.18290
0.23103	169.90970	2.08596	93.59718	116.77960
0.23793	174.98160	2.02549	94.42868	114.84660
0.24483	180.05360	1.96844	95.31464	113.33940
0.25172	185.12550	1.91451	96.25059	112.21980
0.25862	190.19740	1.86345	97.23254	111.45460
0.26552	195.26930	1.81505	98.25689	111.01470

ตารางที่ ข.58 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1000 rpm และแรงบิด 1.2 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.27241	200.34130	1.76910	99.32043	110.87480
0.27931	205.41320	1.72542	100.42030	111.01240
0.28621	210.48510	1.68384	101.55370	111.40800
0.29310	215.55710	1.64422	102.71850	112.04410
0.30000	220.62900	1.60643	103.91240	112.90540

ตารางที่ ข.59 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1250 rpm และแรงบิด 1.2 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.22414	164.83780	2.15014	107.43630	121.44010
0.23103	169.90970	2.08596	108.65790	118.90410
0.23793	174.98160	2.02549	109.93890	116.84970
0.24483	180.05360	1.96844	111.27450	115.23120
0.25172	185.12550	1.91451	112.66000	114.00940
0.25862	190.19740	1.86345	114.09150	113.15010
0.26552	195.26930	1.81505	115.56540	112.62320
0.27241	200.34130	1.76910	117.07860	112.40290
0.27931	205.41320	1.72542	118.62790	112.46600
0.28621	210.48510	1.68384	120.21100	112.79230
0.29310	215.55710	1.64422	121.82530	113.36410
0.30000	220.62900	1.60643	123.46880	114.16530

ตารางที่ ข.60 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1500 rpm และแรงบิด 1.2 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.22414	164.83780	2.15014	122.04740	124.19890
0.23103	169.90970	2.08596	123.71860	121.50070
0.23793	174.98160	2.02549	125.44920	119.29790
0.24483	180.05360	1.96844	127.23430	117.54350
0.25172	185.12550	1.91451	129.06940	116.19670
0.25862	190.19740	1.86345	130.95050	115.22220
0.26552	195.26930	1.81505	132.87400	114.58920
0.27241	200.34130	1.76910	134.83670	114.27050
0.27931	205.41320	1.72542	136.83560	114.24250
0.28621	210.48510	1.68384	138.86830	114.48430
0.29310	215.55710	1.64422	140.93220	114.97740

ตารางที่ ข.61 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1750 rpm และแรงบิด 1.2 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.22414	164.83780	2.15014	136.65850	127.45940
0.23103	169.90970	2.08596	138.77920	124.56940
0.23793	174.98160	2.02549	140.95950	122.19130
0.24483	180.05360	1.96844	143.19410	120.27620
0.25172	185.12550	1.91451	145.47880	118.78170
0.25862	190.19740	1.86345	147.80950	117.67120
0.26552	195.26930	1.81505	150.18250	116.91260
0.27241	200.34130	1.76910	152.59480	116.47770
0.27931	205.41320	1.72542	155.04330	116.34210
0.28621	210.48510	1.68384	157.52550	116.48390
0.29310	215.55710	1.64422	160.03900	116.88400
0.30000	220.62900	1.60643	162.58160	117.52530

ตารางที่ ข.62 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2000 rpm และแรงบิด 1.2 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.22414	164.83780	2.15014	151.26960	131.22140
0.23103	169.90970	2.08596	153.83990	128.11020
0.23793	174.98160	2.02549	156.46970	125.52980
0.24483	180.05360	1.96844	159.15400	123.42920
0.25172	185.12550	1.91451	161.88820	121.76440
0.25862	190.19740	1.86345	164.66840	120.49690
0.26552	195.26930	1.81505	167.49110	119.59340
0.27241	200.34130	1.76910	170.35290	119.02460
0.27931	205.41320	1.72542	173.25100	118.76470
0.28621	210.48510	1.68384	176.18280	118.79120
0.29310	215.55710	1.64422	179.14590	119.08390
0.30000	220.62900	1.60643	182.13810	119.62530

ตารางที่ ข.63 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2250 rpm และแรงบิด 1.2 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.22414	164.83780	2.15014	165.88070	135.48510
0.23103	169.90970	2.08596	168.90060	132.12310
0.23793	174.98160	2.02549	171.98000	129.31340
0.24483	180.05360	1.96844	175.11380	127.00270

ตารางที่ ข.63 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2250 rpm และแรงบิด 1.2 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.25172	185.12550	1.91451	178.29760	125.14470
0.25862	190.19740	1.86345	181.52740	123.69940
0.26552	195.26930	1.81505	184.79960	122.63170
0.27241	200.34130	1.76910	188.11100	121.91090
0.27931	205.41320	1.72542	191.45870	121.51030
0.28621	210.48510	1.68384	194.84010	121.40610
0.29310	215.55710	1.64422	198.25270	121.57720
0.30000	220.62900	1.60643	201.69450	122.00520

ตารางที่ ข.64 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2500 rpm และแรงบิด 1.2 N · m

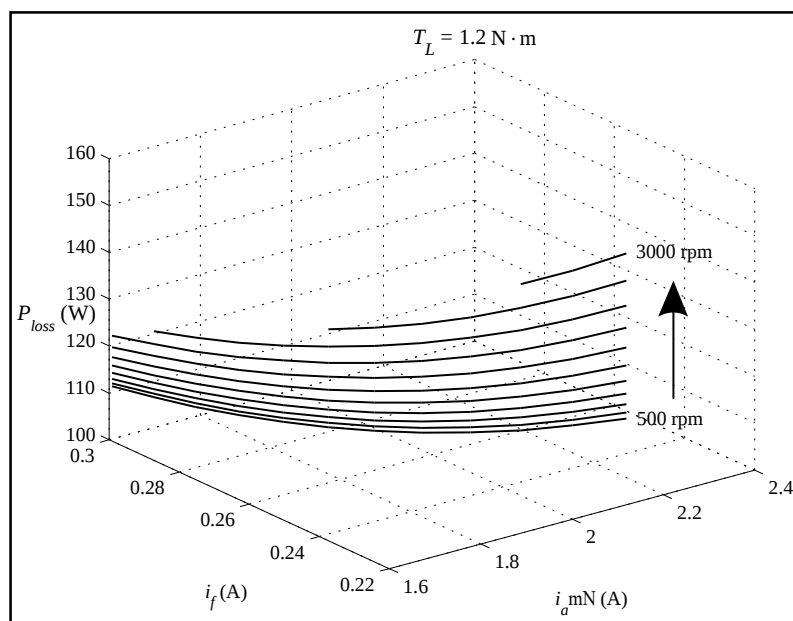
i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.22414	164.83780	2.15014	180.49190	140.25030
0.23103	169.90970	2.08596	183.96130	136.60810
0.23793	174.98160	2.02549	187.49020	133.54220
0.24483	180.05360	1.96844	191.07360	130.99660
0.25172	185.12550	1.91451	194.70700	128.92280
0.25862	190.19740	1.86345	198.38640	127.27860
0.26552	195.26930	1.81505	202.10820	126.02740
0.27241	200.34130	1.76910	205.86920	125.13690
0.27931	205.41320	1.72542	209.66640	124.57890
0.28621	210.48510	1.68384	213.49740	124.32860
0.29310	215.55710	1.64422	217.35960	124.36380

ตารางที่ ข.65 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2750 rpm และแรงบิด 1.2 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.22414	164.83780	2.15014	195.10300	145.51720
0.23103	169.90970	2.08596	199.02200	141.56520
0.23793	174.98160	2.02549	203.00050	138.21610
0.24483	180.05360	1.96844	207.03350	135.41090
0.25172	185.12550	1.91451	211.11640	133.09850
0.25862	190.19740	1.86345	215.24540	131.23460
0.26552	195.26930	1.81505	219.41670	129.78050

ตารางที่ ข.66 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 3000 rpm และแรงบิด 1.2 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.22414	164.83780	2.15014	209.71410	151.28560
0.23103	169.90970	2.08596	214.08270	146.99440
0.23793	174.98160	2.02549	218.51080	143.33520



รูปที่ ข.6 กราฟจุดต่ำสุดของกำลังงานสูญเสียเมื่อ แรงบิดโหลด 1.2 N · m ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

ตารางที่ ข.67 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 1.4 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.25862	190.19740	2.17403	68.48069	130.13790
0.26552	195.26930	2.11756	68.47690	128.75570
0.27241	200.34130	2.06395	68.51884	127.74380
0.27931	205.41320	2.01299	68.60311	127.07290
0.28621	210.48510	1.96448	68.72664	126.71730
0.29310	215.55710	1.91826	68.88668	126.65440
0.30000	220.62900	1.87416	69.08070	126.86390

ตารางที่ ข.68 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 750 rpm และแรงบิด 1.4 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.25862	190.19740	2.17403	85.33966	131.41990
0.26552	195.26930	2.11756	85.78545	129.97200
0.27241	200.34130	2.06395	86.27696	128.89930
0.27931	205.41320	2.01299	86.81080	128.17200
0.28621	210.48510	1.96448	87.38391	127.76410
0.29310	215.55710	1.91826	87.99352	127.65250
0.30000	220.62900	1.87416	88.63711	127.81670

ตารางที่ ข.69 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1000 rpm และแรงบิด 1.4 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.25862	190.19740	2.17403	102.19860	133.21480
0.26552	195.26930	2.11756	103.09400	131.67490
0.27241	200.34130	2.06395	104.03510	130.51700
0.27931	205.41320	2.01299	105.01850	129.71080
0.28621	210.48510	1.96448	106.04120	129.22960
0.29310	215.55710	1.91826	107.10040	129.04990
0.30000	220.62900	1.87416	108.19350	129.15060

ตารางที่ ข.70 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1250 rpm และแรงบิด 1.4 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.25862	190.19740	2.17403	119.05760	135.52240
0.26552	195.26930	2.11756	120.40260	133.86420
0.27241	200.34130	2.06395	121.79320	132.59690
0.27931	205.41320	2.01299	123.22620	131.68930
0.28621	210.48510	1.96448	124.69850	131.11390
0.29310	215.55710	1.91826	126.20720	130.84650
0.30000	220.62900	1.87416	127.74990	130.86550

ตารางที่ ข.71 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1500 rpm และแรงบิด 1.4 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.25862	190.19740	2.17403	135.91660	138.34290
0.26552	195.26930	2.11756	137.71110	136.54010
0.27241	200.34130	2.06395	139.55130	135.13900

ตารางที่ ข.71 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1500 rpm และแรงบิด 1.4 N · m (ต่อ)

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.27931	205.41320	2.01299	141.43390	134.10740
0.28621	210.48510	1.96448	143.35570	133.41690
0.29310	215.55710	1.91826	145.31400	133.04240
0.30000	220.62900	1.87416	147.30640	132.96160

ตารางที่ ข.72 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1750 rpm และแรงบิด 1.4 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.25862	190.19740	2.17403	152.77560	141.67620
0.26552	195.26930	2.11756	155.01970	139.70250
0.27241	200.34130	2.06395	157.30950	138.14330
0.27931	205.41320	2.01299	159.64160	136.96510
0.28621	210.48510	1.96448	162.01300	136.13860
0.29310	215.55710	1.91826	164.42090	135.63750
0.30000	220.62900	1.87416	166.86280	135.43880

ตารางที่ ข.73 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2000 rpm และแรงบิด 1.4 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.25862	190.19740	2.17403	169.63460	145.52230
0.26552	195.26930	2.11756	172.32820	143.35140
0.27241	200.34130	2.06395	175.06760	141.60980
0.27931	205.41320	2.01299	177.84930	140.26260
0.28621	210.48510	1.96448	180.67030	139.27900
0.29310	215.55710	1.91826	183.52770	138.63190
0.30000	220.62900	1.87416	186.41920	138.29710

ตารางที่ ข.74 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2250 rpm และแรงบิด 1.4 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.25862	190.19740	2.17403	186.49350	149.88120
0.26552	195.26930	2.11756	189.63680	147.48680
0.27241	200.34130	2.06395	192.82570	145.53850
0.27931	205.41320	2.01299	196.05700	143.99960
0.28621	210.48510	1.96448	199.32750	142.83810
0.29310	215.55710	1.91826	202.63460	142.02550

ตารางที่ ข.74 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2250 rpm และแรงบิด 1.4 N · m (ต่อ)

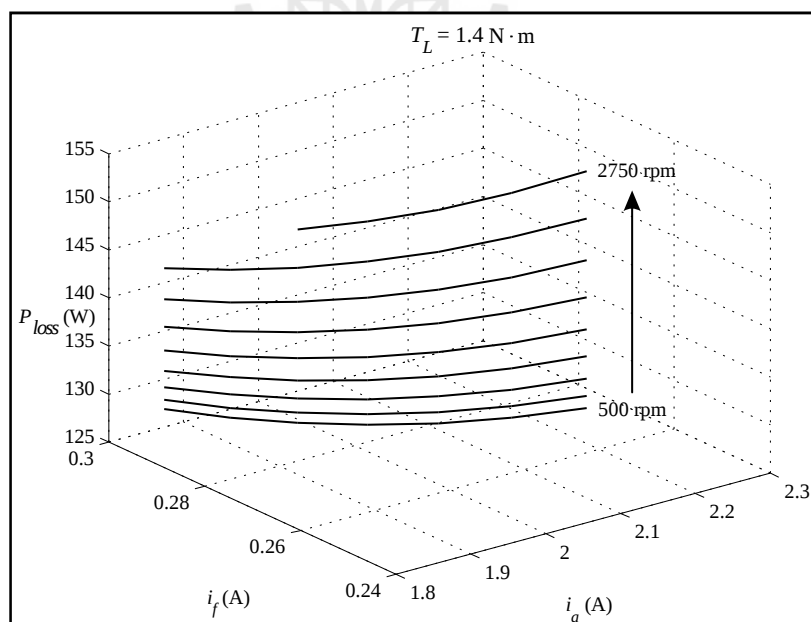
i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.30000	220.62900	1.87416	205.97560	141.53650

ตารางที่ ข.75 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2500 rpm และแรงบิด 1.4 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.25862	190.19740	2.17403	203.35250	154.75300
0.26552	195.26930	2.11756	206.94530	152.10880
0.27241	200.34130	2.06395	210.58380	149.92930
0.27931	205.41320	2.01299	214.26470	148.17640
0.28621	210.48510	1.96448	217.98480	146.81600

ตารางที่ ข.76 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2750 rpm และแรงบิด 1.4 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.25862	190.19740	2.17403	220.21150	160.13750



รูปที่ ข.7 กราฟจุดต่ำสุดของกำลังงานสูญเสียเมื่อ แรงบิด โหลด 1.4 N · m ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

ตารางที่ ข.77 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 1.5 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.27931	205.41320	2.15678	70.90223	137.07740
0.28621	210.48510	2.10481	70.97037	136.25220
0.29310	215.55710	2.05528	71.07761	135.75230
0.30000	220.62900	2.00803	71.22126	135.55450

ตารางที่ ข.78 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 750 rpm และแรงบิด 1.5 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.27931	205.41320	2.15678	89.10992	138.33910
0.28621	210.48510	2.10481	89.62763	137.45390
0.29310	215.55710	2.05528	90.18445	136.89810
0.30000	220.62900	2.00803	90.77768	136.64820

ตารางที่ ข.79 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1000 rpm และแรงบิด 1.5 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.27931	205.41320	2.15678	107.31760	140.10560
0.28621	210.48510	2.10481	108.28490	139.13630
0.29310	215.55710	2.05528	109.29130	138.50220
0.30000	220.62900	2.00803	110.33410	138.17950

ตารางที่ ข.80 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1250 rpm และแรงบิด 1.5 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.27931	205.41320	2.15678	125.52530	142.37680
0.28621	210.48510	2.10481	126.94220	141.29930
0.29310	215.55710	2.05528	128.39810	140.56470
0.30000	220.62900	2.00803	129.89050	140.14820

ตารางที่ ข.81 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1500 rpm และแรงบิด 1.5 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.27931	205.41320	2.15678	143.73300	145.15270
0.28621	210.48510	2.10481	145.59940	143.94300
0.29310	215.55710	2.05528	147.50500	143.08550
0.30000	220.62900	2.00803	149.44690	142.55440

ตารางที่ ข.82 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 1750 rpm และแรงบิด 1.5 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.27931	205.41320	2.15678	161.94070	148.43330
0.28621	210.48510	2.10481	164.25670	147.06740
0.29310	215.55710	2.05528	166.61180	146.06460
0.30000	220.62900	2.00803	169.00330	145.39810

ตารางที่ ข.83 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2000 rpm และแรงบิด 1.5 N · m

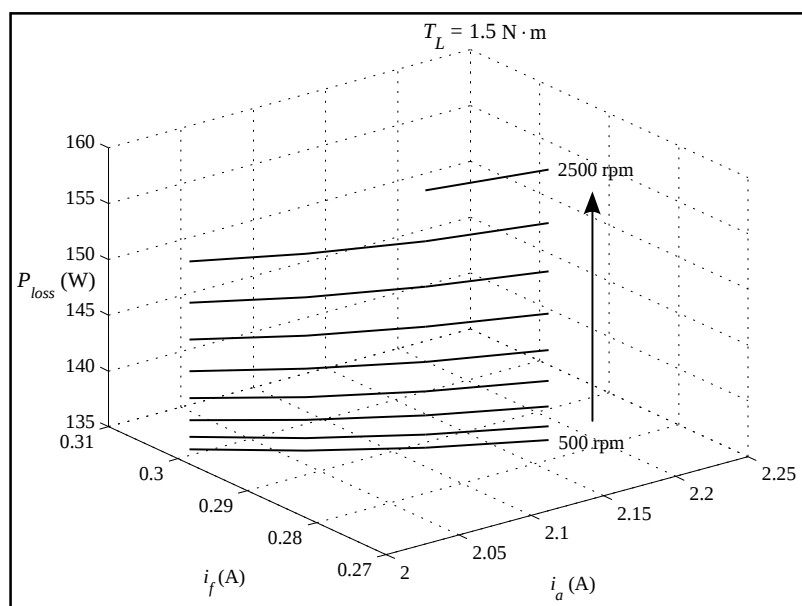
i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.27931	205.41320	2.15678	180.14840	152.21860
0.28621	210.48510	2.10481	182.91400	150.67250
0.29310	215.55710	2.05528	185.71870	149.50200
0.30000	220.62900	2.00803	188.55970	148.67930

ตารางที่ ข.84 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2250 rpm และแรงบิด 1.5 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.27931	205.41320	2.15678	198.35610	156.50860
0.28621	210.48510	2.10481	201.57120	154.75830
0.29310	215.55710	2.05528	204.82550	153.39770
0.30000	220.62900	2.00803	208.11620	152.39800

ตารางที่ ข.85 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 2500 rpm และแรงบิด 1.5 N · m

i_f (A)	V_f (V)	i_a (A)	V_a (V)	P_{loss} (W)
0.27931	205.41320	2.15678	216.56380	161.30330
0.28621	210.48510	2.10481	220.22850	159.32470



รูปที่ ข.8 กราฟจุดต่ำสุดของกำลังงานสูญเสียเมื่อ แรงบิดโหลด $1.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ





ภาคผนวก ค

รายละเอียดข้อมูลต่าง ๆ ของอุปกรณ์ที่ใช้
สำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์และวงจรแปลงผันแบบบัคค์



GBPC 12, 15, 25, 35 SERIES

Bridge Rectifiers (Glass Passivated)

Features

- Integrally molded heatsink provided very low thermal resistance for maximum heat dissipation.
- Surge overload ratings from 300 amperes to 400 amperes.
- Isolated voltage from case to lead over 2500 volts.
- UL certified, UL #E96005

Suffix "W"

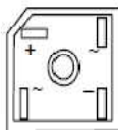
Wire Lead Structure

Suffix "M"

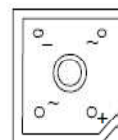
Terminal Location Face to Face



GBPC



GBPC-W



Absolute Maximum Ratings * $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value							Units		
		005	01	02	04	06	08	10			
V _{RRM}	Maximum Repetitive Reverse Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V		
V _{RMS}	Maximum RMS Bridge Input Voltage	35	70	140	280	420	560	700	V		
V _R	DC Reverse Voltage (Rated V _R)	50	100	200	400	600	800	1000	V		
I _{F(AV)}	Average Rectified Forward Current										
	@ T _A = 55°C										
	GBPC12									12	A
	GBPC15									15	A
	GBPC25									25	A
	GBPC35	35	A								
I _{FSM}	Non-Repetitive Peak Forward Surge Current										
	GBPC12, 25, 25									300	A
	8.3ms Single Half-Sine-Wave										
	GBPC35									400	A
T _{STG}	Storage Temperature Range								°C		
T _J	Operating Junction Temperature								°C		

* These ratings are limiting values above which the serviceability of any semiconductor device may be impaired.

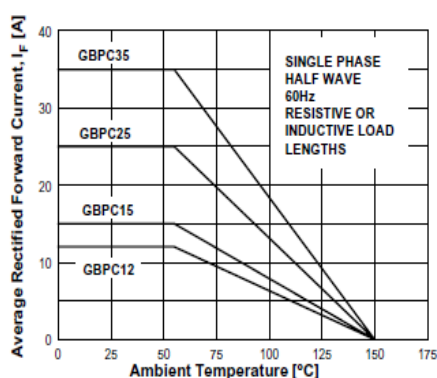
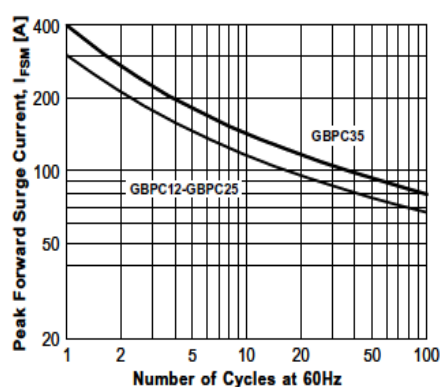
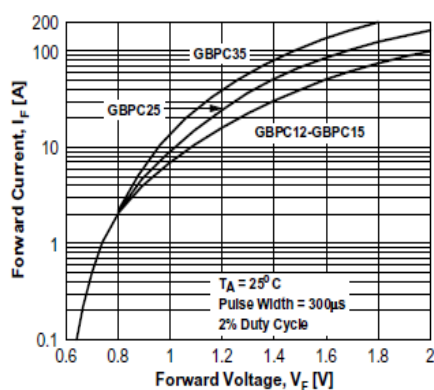
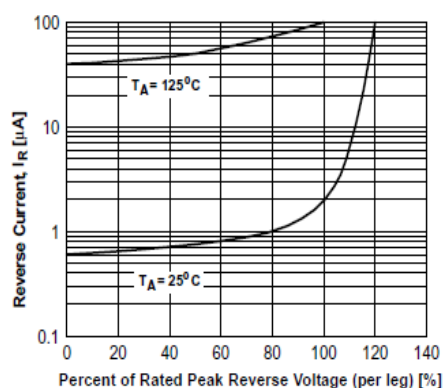
Thermal Characteristics

Symbol	Parameter	Value	Units
P_D	Power Dissipation	83.3	W
$R_{\theta JL}$	Thermal Resistance, Junction to Lead	1.5	$^\circ\text{C/W}$

GBPC 12, 15, 25, 35 SERIES Bridge Rectifiers (Glass Passivated)

Electrical Characteristics $T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
V_F	Forward Voltage Drop, per bridge @ 6.0A GBPC12 @ 7.5A GBPC15 @ 12.5A GBPC25 @ 17.5A GBPC35	1.1 (Max.)	V
I_R	Reverse Current, per element @ Rated V_R $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = 125^\circ\text{C}$	5.0 (Max.) 500 (Max.)	μA μA
	I^2t Rating for Fusing $t < 8.35\text{ms}$ GBPC12, 15, 25 GBPC35	375 660	A^2Sec A^2Sec
C_T	Total Capacitance, per leg $V_R = 4.0\text{V}$ $f = 1.0\text{MHz}$ GBPC12, 15, 25 GBPC35	180 200	pF pF

Typical Performance Characteristics**Figure 1. Forward Current Derating Curve****Figure 2. Non-Repetitive Surge Current****Figure 3. Forward Voltage Characteristics****Figure 4. Reverse Current vs Reverse Voltage**

TRADEMARKS

The following are registered and unregistered trademarks Fairchild Semiconductor owns or is authorized to use and is not intended to be an exhaustive list of all such trademarks.

ACE [™]	FAST [®]	ISOPLANAR [™]	Power247 [™]	Stealth [™]
ActiveArray [™]	FAST [™]	LittleFET [™]	PowerEdge [™]	SuperFET [™]
Bottomless [™]	FPS [™]	MICROCOUPLER [™]	PowerSaver [™]	SuperSOT [™] -3
CoolFET [™]	FRFET [™]	MicroFET [™]	PowerTrench [®]	SuperSOT [™] -6
CROSSVOLT [™]	GlobalOptoisolator [™]	MicroPak [™]	QFET [®]	SuperSOT [™] -8
DOVE [™]	GTO [™]	MICROWIRE [™]	QS [™]	SyncFET [™]
EcoSPARK [™]	HiSeC [™]	MSX [™]	QT Optoelectronics [™]	TinyLogic [®]
E ² CMOS [™]	I ² C [™]	MSXPro [™]	Quiet Series [™]	TINYOPTO [™]
EnSigna [™]	i-Lo [™]	OCX [™]	RapidConfigure [™]	TruTranslation [™]
FACT [™]	ImpliedDisconnect [™]	OCXPro [™]	RapidConnect [™]	UHC [™]
FACT Quiet Series [™]		OPTOLOGIC [®]	μSerDes [™]	UltraFET [®]
		OPTOPLANAR [™]	SILENT SWITCHER [®]	UniFET [™]
Across the board. Around the world. [™]		PACMAN [™]	SMART SINK [™]	VCX [™]
The Power Franchise [®]		POP [™]	SPM [™]	
Programmable Active Droop [™]				

DISCLAIMER

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS.

LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION.

As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, or (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

PRODUCT STATUS DEFINITIONS**Definition of Terms**

Datasheet Identification	Product Status	Definition
Advance Information	Formative or In Design	This datasheet contains the design specifications for product development. Specifications may change in any manner without notice.
Preliminary	First Production	This datasheet contains preliminary data, and supplementary data will be published at a later date. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice in order to improve design.
No Identification Needed	Full Production	This datasheet contains final specifications. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice in order to improve design.
Obsolete	Not In Production	This datasheet contains specifications on a product that has been discontinued by Fairchild semiconductor. The datasheet is printed for reference information only.

Rev. 114

MUR1510, MUR1515, MUR1520, MUR1540, MUR1560

Preferred Devices

SWITCHMODE™ Power Rectifiers

... designed for use in switching power supplies, inverters and as free wheeling diodes, these state-of-the-art devices have the following features:

- Ultrafast 35 and 60 Nanosecond Recovery Time
- 175°C Operating Junction Temperature
- Popular TO-220 Package
- High Voltage Capability to 600 Volts
- Low Forward Drop
- Low Leakage Specified @ 150°C Case Temperature
- Current Derating Specified @ Both Case and Ambient Temperatures

Mechanical Characteristics:

- Case: Epoxy, Molded
- Weight: 1.9 grams (approximately)
- Finish: All External Surfaces Corrosion Resistant and Terminal Leads are Readily Solderable
- Lead Temperature for Soldering Purposes: 260°C Max. for 10 Seconds
- Shipped 50 units per plastic tube
- Marking: U1510, U1515, U1520, U1540, U1560

MAXIMUM RATINGS

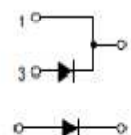
Please See the Table on the Following Page



ON Semiconductor™

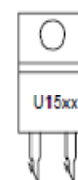
<http://onsemi.com>

**ULTRAFAST
RECTIFIERS
15 AMPERES
100-600 VOLTS**



TO-220AC
CASE 221B
PLASTIC

MARKING DIAGRAM



U15xx = Device Code
xx = 10, 15, 20,
40 or 60

ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping
MUR1510	TO-220	50 Units/Rail
MUR1515	TO-220	50 Units/Rail
MUR1520	TO-220	50 Units/Rail
MUR1540	TO-220	50 Units/Rail
MUR1560	TO-220	50 Units/Rail

Preferred devices are recommended choices for future use and best overall value.

MUR1510, MUR1515, MUR1520, MUR1540, MUR1560

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	MUR					Unit
		1510	1515	1520	1540	1560	
Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	V_{RRM} V_{RWM} V_R	100	150	200	400	600	Volts
Average Rectified Forward Current (Rated V_R)	$I_{F(AV)}$	15 @ $T_C = 150^{\circ}\text{C}$			15 @ $T_C = 145^{\circ}\text{C}$		Amps
Peak Rectified Forward Current (Rated V_R , Square Wave, 20 kHz)	I_{FRM}	30 @ $T_C = 150^{\circ}\text{C}$			30 @ $T_C = 145^{\circ}\text{C}$		Amps
Nonrepetitive Peak Surge Current (Surge applied at rated load conditions halfwave, single phase, 60 Hz)	I_{FSM}	200			150		Amps
Operating Junction Temperature and Storage Temperature Range	T_J, T_{stg}	-85 to +175					$^{\circ}\text{C}$

THERMAL CHARACTERISTICS

Maximum Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	1.5	$^\circ\text{C/W}$
--	-----------------	-----	--------------------

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Maximum Instantaneous Forward Voltage (Note 1.) ($I_F = 15$ Amps, $T_C = 150^\circ\text{C}$) ($I_F = 15$ Amps, $T_C = 25^\circ\text{C}$)	V_F	0.85 1.05	1.12 1.25	1.20 1.50	Volts
Maximum Instantaneous Reverse Current (Note 1.) (Rated dc Voltage, $T_C = 150^\circ\text{C}$) (Rated dc Voltage, $T_C = 25^\circ\text{C}$)	I_R	500 10	500 10	1000 10	μA
Maximum Reverse Recovery Time ($I_F = 1.0$ Amp, $di/dt = 50$ Amps/ μs)	t_{rr}	35	80		ns

1. Pulse Test: Pulse Width = 300 μs , Duty Cycle $\leq 2.0\%$.

MUR1510, MUR1515, MUR1520, MUR1540, MUR1560

MUR1510, MUR1515, MUR1520

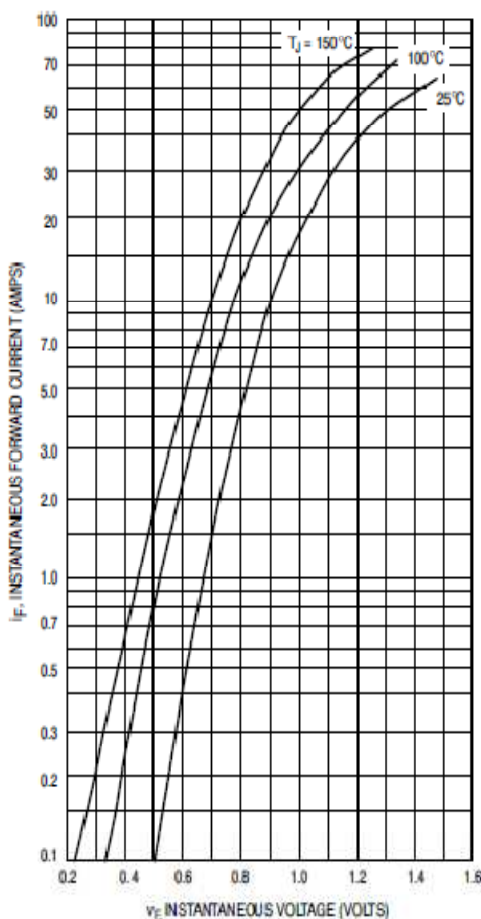


Figure 1. Typical Forward Voltage

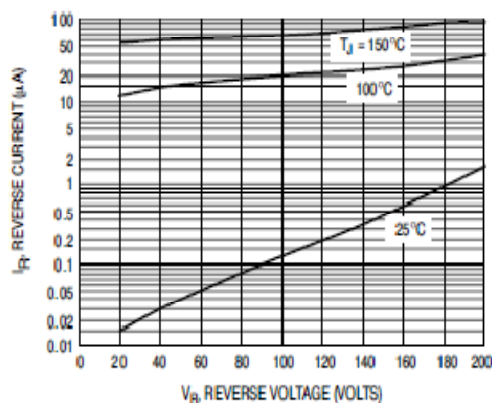


Figure 2. Typical Reverse Current

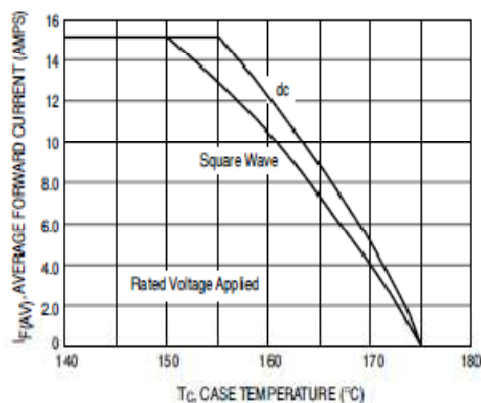


Figure 3. Current Derating, Case

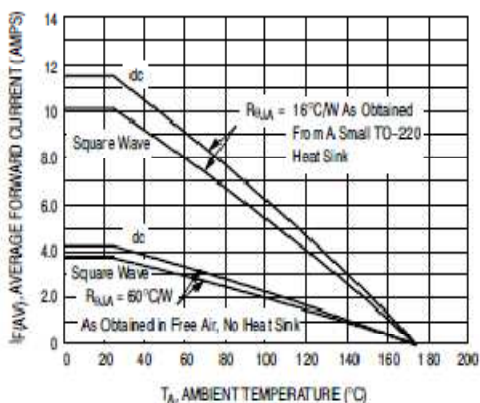


Figure 4. Current Derating, Ambient

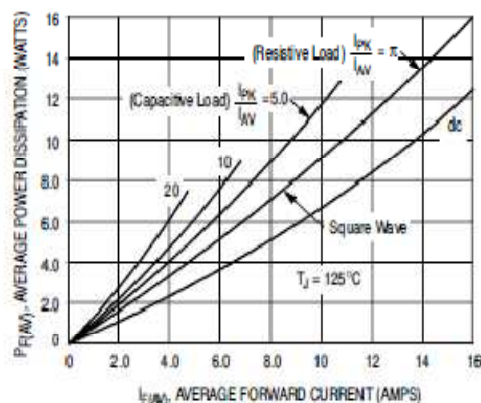


Figure 5. Power Dissipation

MUR1510, MUR1515, MUR1520, MUR1540, MUR1560

MUR1540

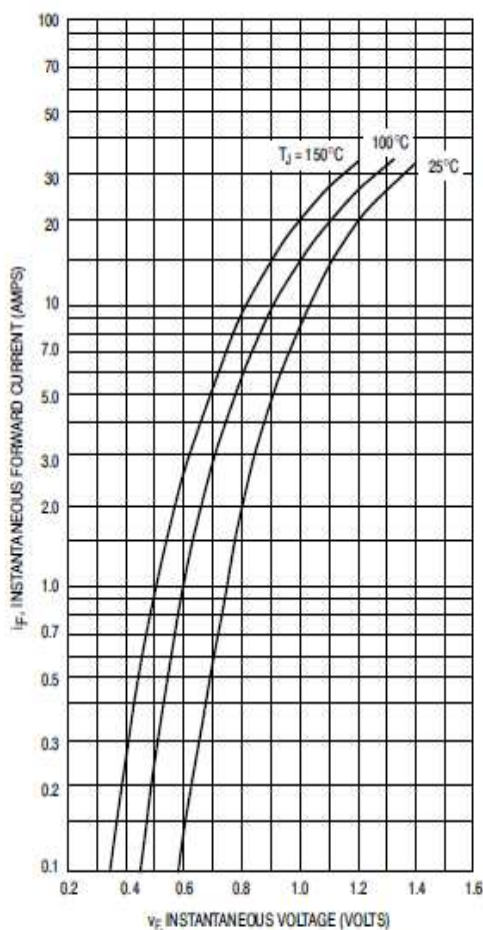


Figure 6. Typical Forward Voltage

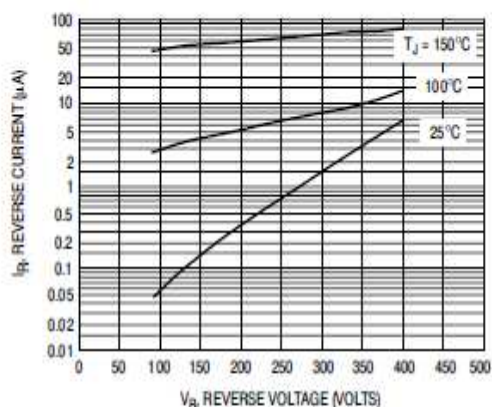


Figure 7. Typical Reverse Current

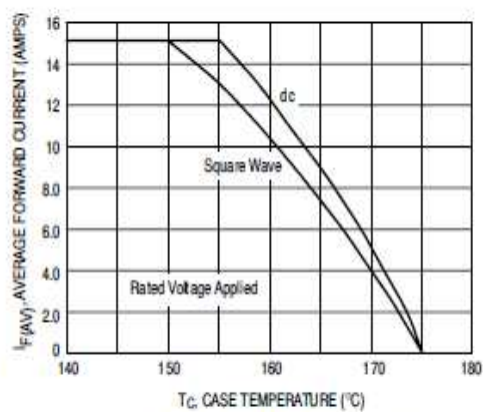


Figure 8. Current Derating, Case

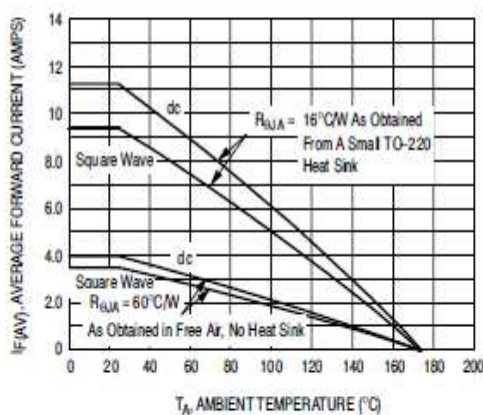


Figure 9. Current Derating, Ambient

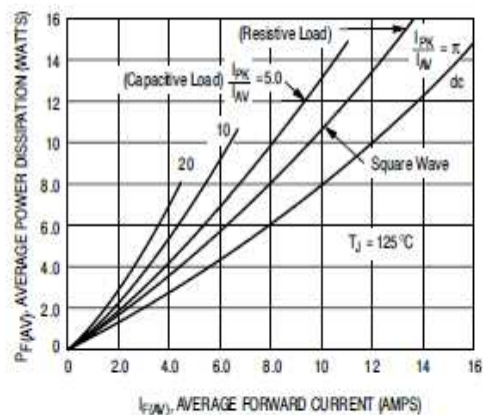


Figure 10. Power Dissipation

MUR1510, MUR1515, MUR1520, MUR1540, MUR1560

MUR1560

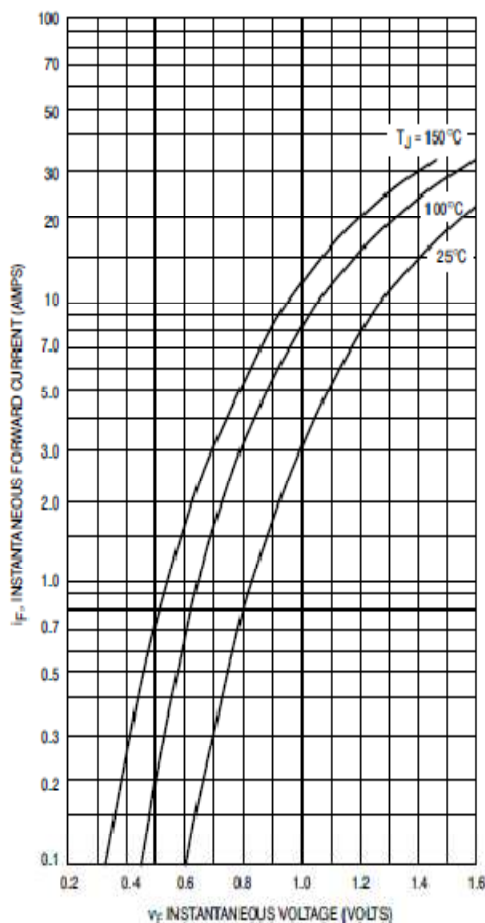


Figure 11. Typical Forward Voltage

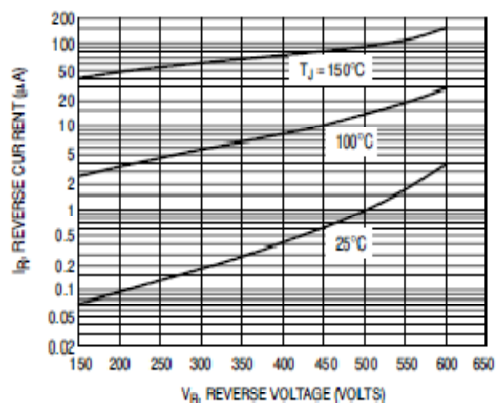


Figure 12. Typical Reverse Current

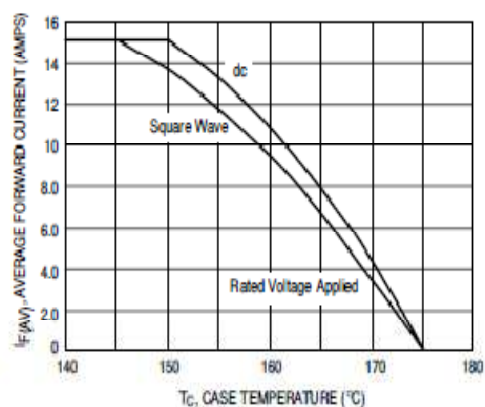


Figure 13. Current Derating, Case

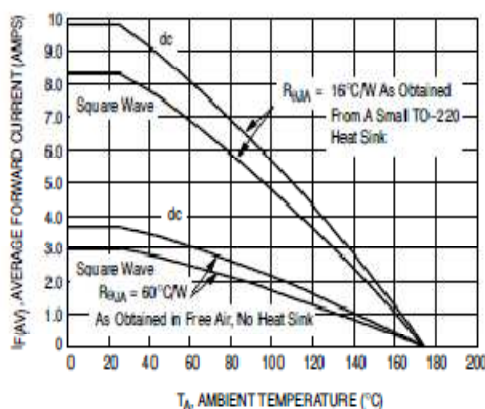


Figure 14. Current Derating, Ambient

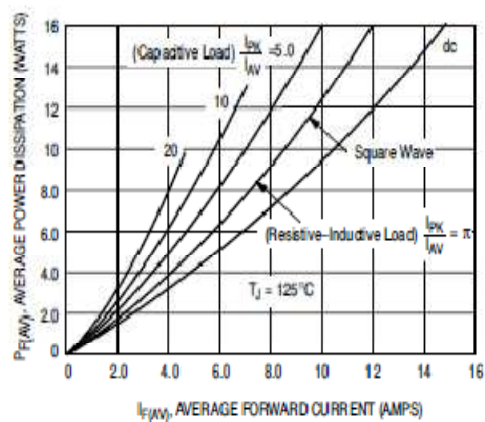


Figure 15. Power Dissipation

MUR1510, MUR1515, MUR1520, MUR1540, MUR1560

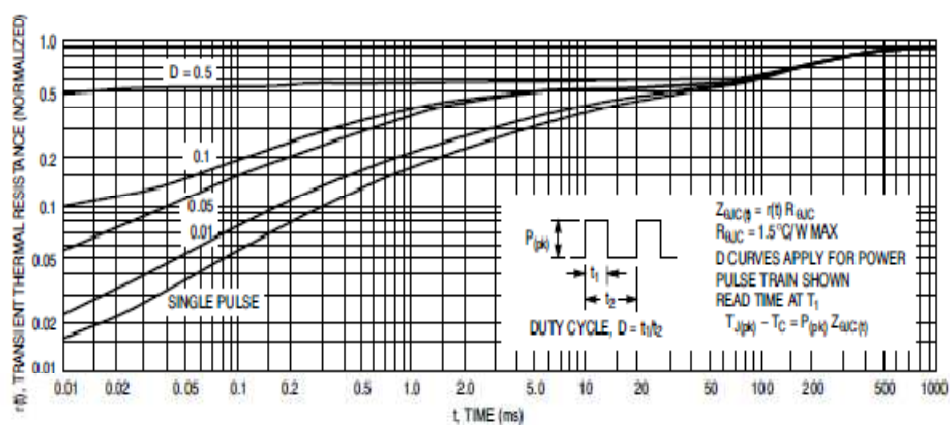


Figure 16. Thermal Response

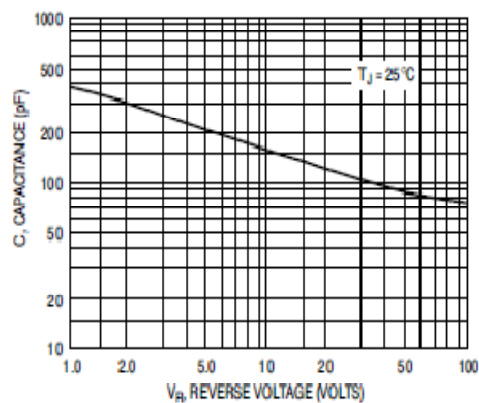
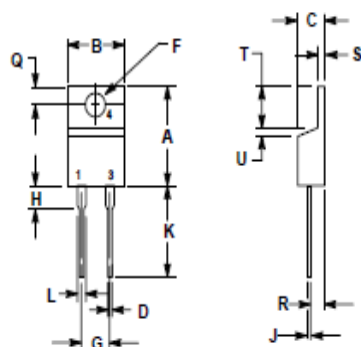


Figure 17. Typical Capacitance

MUR1510, MUR1515, MUR1520, MUR1540, MUR1560

PACKAGE DIMENSIONS

TO-220 TWO-LEAD
CASE 221B-04
ISSUE D



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.

DIM.	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
A	0.595	0.620	15.11	15.75
B	0.380	0.405	9.65	10.29
C	0.160	0.190	4.06	4.82
D	0.025	0.035	0.64	0.89
E	0.142	0.147	3.61	3.73
F	0.190	0.210	4.83	5.33
G	0.110	0.130	2.79	3.30
H	0.018	0.025	0.46	0.64
I	0.500	0.562	12.70	14.27
J	0.045	0.060	1.14	1.52
K	0.100	0.120	2.54	3.04
L	0.080	0.110	2.04	2.79
M	0.045	0.055	1.14	1.39
N	0.235	0.255	5.97	6.48
O	0.000	0.050	0.00	1.27



STW12NK80Z

N-CHANNEL 800V - 0.65Ω - 10.5A TO-247
Zener-Protected SuperMESH™ Power MOSFET

TYPE	V _{DSS}	R _{DS(on)}	I _D	P _w
STW12NK80Z	800 V	< 0.75 Ω	10.5 A	190 W

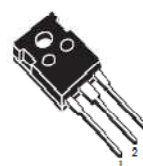
- TYPICAL R_{DS(on)} = 0.65 Ω
- EXTREMELY HIGH dv/dt CAPABILITY
- 100% AVALANCHE TESTED
- GATE CHARGE MINIMIZED
- VERY LOW INTRINSIC CAPACITANCES
- VERY GOOD MANUFACTURING REPEATABILITY

DESCRIPTION

The SuperMESH™ series is obtained through an extreme optimization of ST's well established strip-based PowerMESH™ layout. In addition to pushing on-resistance significantly down, special care is taken to ensure a very good dv/dt capability for the most demanding applications. Such series complements ST full range of high voltage MOSFETs including revolutionary MDmesh™ products.

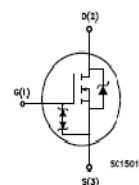
APPLICATIONS

- HIGH CURRENT, HIGH SPEED SWITCHING
- IDEAL FOR OFF-LINE POWER SUPPLIES



TO-247

INTERNAL SCHEMATIC DIAGRAM



ORDERING INFORMATION

SALES TYPE	MARKING	PACKAGE	PACKAGING
STW12NK80Z	W12NK80Z	TO-247	TUBE

STW12NK80Z**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS**

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_{DS}	Drain-source Voltage ($V_{GS} = 0$)	800	V
V_{DGR}	Drain-gate Voltage ($R_{GS} = 20\text{ k}\Omega$)	800	V
V_{GS}	Gate- source Voltage	± 30	V
I_D	Drain Current (continuous) at $T_C = 25^\circ\text{C}$	10.5	A
I_D	Drain Current (continuous) at $T_C = 100^\circ\text{C}$	6.6	A
$I_{DM}(\bullet)$	Drain Current (pulsed)	42	A
P_{TOT}	Total Dissipation at $T_C = 25^\circ\text{C}$	190	W
	Derating Factor	1.51	W/ $^\circ\text{C}$
$V_{ESD(G-S)}$	Gate source ESD (HBM-C=100pF, R=1.5K Ω)	6000	V
$dv/dt(1)$	Peak Diode Recovery voltage slope	4.5	V/ns
T_j T_{stg}	Operating Junction Temperature Storage Temperature	-55 to 150	$^\circ\text{C}$

(●) Pulse width limited by safe operating area

(1) $I_{SD} \leq 10.5\text{A}$, $di/dt \leq 200\text{A}/\mu\text{s}$, $V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$, $T_j \leq T_{JMAX}$.

(*) Limited only by maximum temperature allowed

THERMAL DATA

$R_{thj-case}$	Thermal Resistance Junction-case Max	0.66	$^\circ\text{C}/\text{W}$
$R_{thj-amb}$	Thermal Resistance Junction-ambient Max	50	$^\circ\text{C}/\text{W}$
T_l	Maximum Lead Temperature For Soldering Purpose	300	$^\circ\text{C}$

AVALANCHE CHARACTERISTICS

Symbol	Parameter	Max Value	Unit
I_{AR}	Avalanche Current, Repetitive or Not-Repetitive (pulse width limited by T_j max)	10.5	A
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy (starting $T_j = 25^\circ\text{C}$, $I_D = I_{AR}$, $V_{DD} = 50\text{ V}$)	400	mJ

GATE-SOURCE ZENER DIODE

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
BV_{GSO}	Gate-Source Breakdown Voltage	$I_{GS} = \pm 1\text{mA}$ (Open Drain)	30			V

PROTECTION FEATURES OF GATE-TO-SOURCE ZENER DIODES

The built-in back-to-back Zener diodes have specifically been designed to enhance not only the device's ESD capability, but also to make them safely absorb possible voltage transients that may occasionally be applied from gate to source. In this respect the Zener voltage is appropriate to achieve an efficient and cost-effective intervention to protect the device's integrity. These integrated Zener diodes thus avoid the usage of external components.

STW12NK80Z

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_{CASE} = 25^{\circ}\text{C}$ UNLESS OTHERWISE SPECIFIED)
ON/OFF

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_{(BR)DSS}$	Drain-source Breakdown Voltage	$I_D = 1\text{ mA}$, $V_{GS} = 0$	800			V
I_{DSS}	Zero Gate Voltage Drain Current ($V_{GS} = 0$)	$V_{DS} = \text{Max Rating}$ $V_{DS} = \text{Max Rating}$, $T_C = 125^{\circ}\text{C}$			1 50	μA μA
I_{GSS}	Gate-body Leakage Current ($V_{DS} = 0$)	$V_{GS} = \pm 20\text{V}$			± 10	μA
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	$V_{DS} = V_{GS}$, $I_D = 100\text{ }\mu\text{A}$	3	3.75	4.5	V
$R_{DS(on)}$	Static Drain-source On Resistance	$V_{GS} = 10\text{V}$, $I_D = 5.25\text{ A}$		0.65	0.75	Ω

DYNAMIC

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$g_{fs} (1)$	Forward Transconductance	$V_{DS} = 15\text{ V}$, $I_D = 5.25\text{ A}$		12		S
C_{iss} C_{oss} C_{rss}	Input Capacitance Output Capacitance Reverse Transfer Capacitance	$V_{DS} = 25\text{V}$, $f = 1\text{ MHz}$, $V_{GS} = 0$		2620 250 53		pF pF pF
$C_{oss\text{ eq.}} (3)$	Equivalent Output Capacitance	$V_{GS} = 0\text{V}$, $V_{DS} = 0\text{V to } 640\text{V}$		100		pF

SWITCHING ON

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$t_{d(on)}$ t_r	Turn-on Delay Time Rise Time	$V_{DD} = 400\text{ V}$, $I_D = 5.25\text{ A}$ $R_G = 4.7\Omega$, $V_{GS} = 10\text{ V}$ (Resistive Load see, Figure 3)		30 18		ns ns
Q_g Q_{gs} Q_{gd}	Total Gate Charge Gate-Source Charge Gate-Drain Charge	$V_{DD} = 640\text{V}$, $I_D = 10.5\text{ A}$, $V_{GS} = 10\text{V}$		87 14 44		nC nC nC

SWITCHING OFF

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$t_{d(off)}$ t_f	Turn-off Delay Time Fall Time	$V_{DD} = 400\text{ V}$, $I_D = 5.25\text{ A}$ $R_G = 4.7\Omega$, $V_{GS} = 10\text{ V}$ (Resistive Load see, Figure 3)		70 20		ns ns
$t_{r(v\phi)}$ t_f t_c	Off-voltage Rise Time Fall Time Cross-over Time	$V_{DD} = 640\text{ V}$, $I_D = 10.5\text{ A}$, $R_G = 4.7\Omega$, $V_{GS} = 10\text{V}$ (Inductive Load see, Figure 5)		16 15 28		ns ns ns

SOURCE DRAIN DIODE

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
I_{SD} $I_{SDM} (2)$	Source-drain Current Source-drain Current (pulsed)				10.5 42	A A
$V_{SD} (1)$	Forward On Voltage	$I_{SD} = 10.5\text{ A}$, $V_{GS} = 0$			1.6	V
t_{rr} Q_{rr} I_{RRM}	Reverse Recovery Time Reverse Recovery Charge Reverse Recovery Current	$I_{SD} = 10.5\text{ A}$, $di/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}$ $V_{DD} = 100\text{ V}$, $T_J = 150^{\circ}\text{C}$ (see test circuit, Figure 5)		635 5.9 18.5		ns μC A

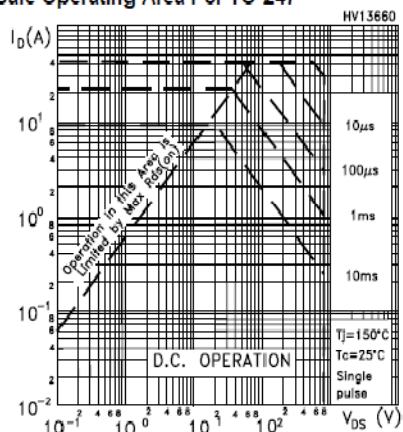
Note: 1. Pulsed: Pulse duration = 300 μs , duty cycle 1.5 %.

2. Pulse width limited by safe operating area.

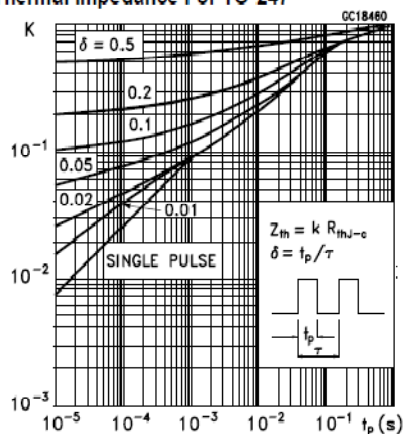
3. $C_{oss\text{ eq.}}$ is defined as a constant equivalent capacitance giving the same charging time as C_{oss} when V_{DS} increases from 0 to 80% V_{DSS} .

STW12NK80Z

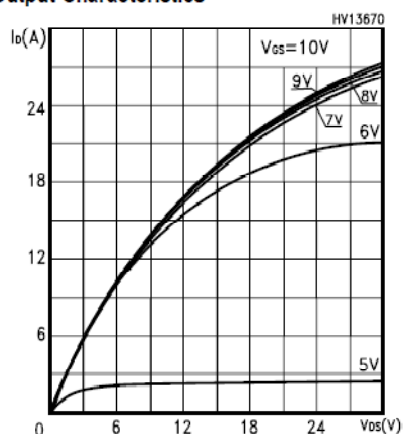
Safe Operating Area For TO-247



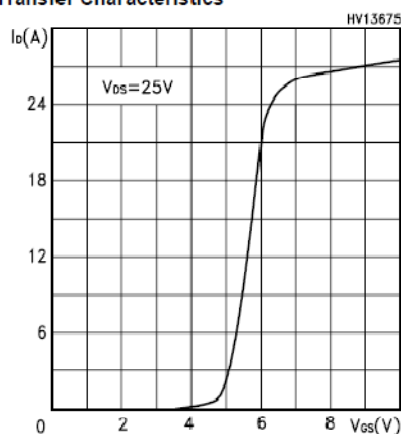
Thermal Impedance For TO-247



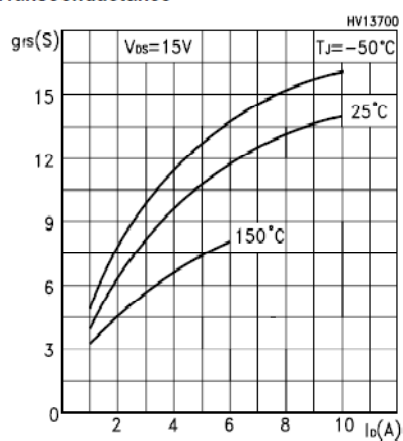
Output Characteristics



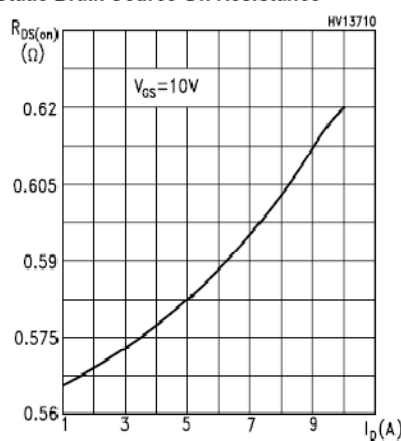
Transfer Characteristics



Transconductance

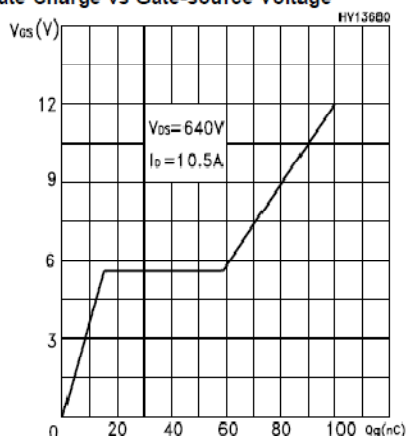


Static Drain-source On Resistance

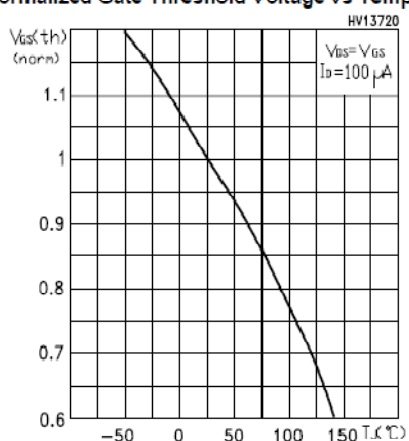


STW12NK80Z

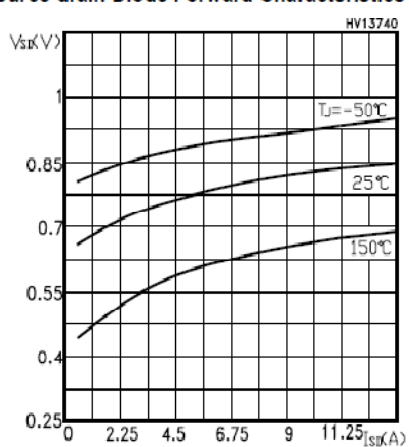
Gate Charge vs Gate-source Voltage



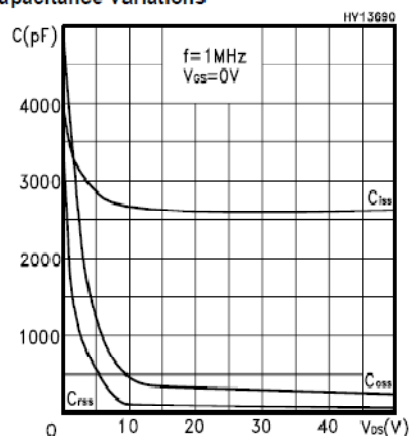
Normalized Gate Threshold Voltage vs Temp.



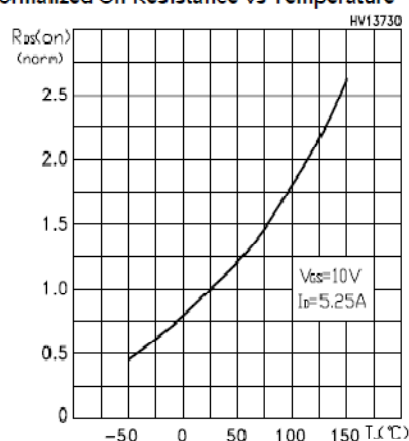
Source-drain Diode Forward Characteristics



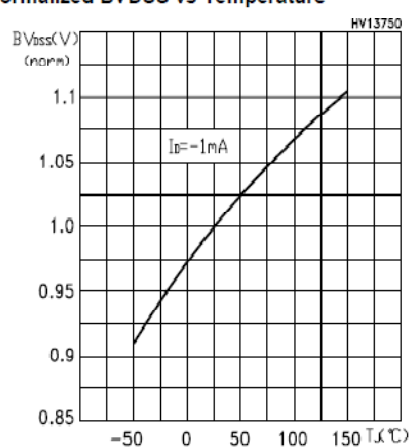
Capacitance Variations

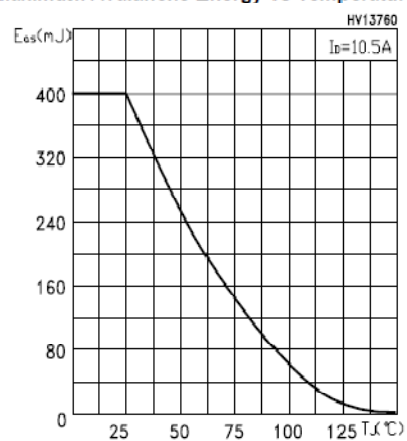


Normalized On Resistance vs Temperature



Normalized BVDSS vs Temperature



STW12NK80Z**Maximum Avalanche Energy vs Temperature**

STW12NK80Z

Fig. 1: Unclamped Inductive Load Test Circuit

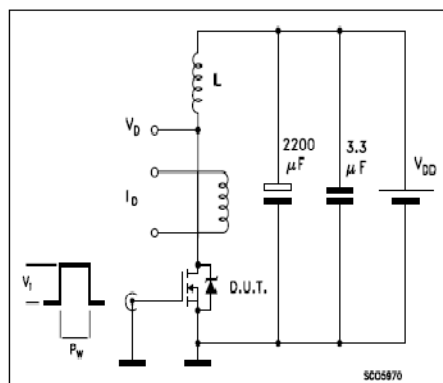


Fig. 2: Unclamped Inductive Waveform

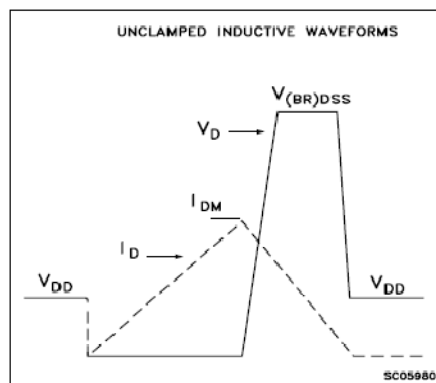


Fig. 3: Switching Times Test Circuit For Resistive Load

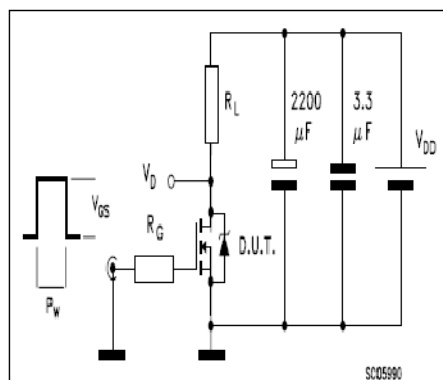


Fig. 4: Gate Charge test Circuit

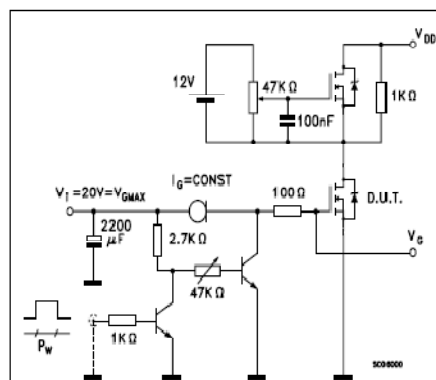
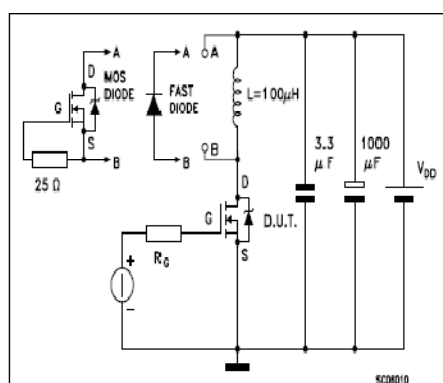


Fig. 5: Test Circuit For Inductive Load Switching And Diode Recovery Times



ภาคผนวก ง

**โปรแกรมควบคุมการทำงานของทั้งระบบ
เพื่อประหยัดพลังงาน**


```

void Process2(void);
void Process2(void);
void CalADCValue (void);
void Control_speed (void);
void Control_ifield (void);
void UART_ChkTimeout(void);
void UART_Transmit(void);
void Init_Uasrt(void);
void UART_WriteTxBuffer(void);

/***** เริ่มโปรแกรม main *****/
int main(void)
{
    init_mcpwm();
    init_adc();
    init_timer();
    init_gpio();
    Init_Uasrt();
    InitValue();

    while(1)
    {
        Timer();
        ReadADCValue();
        CalADCValue();
        Control_ifield ();
        Control_speed ();

        SetPWMDuty(Value.PWM1Duty, Value.PWM2Duty);

```

// การประกาศฟังก์ชันย่อย

// เรียกใช้โปรแกรมย่อยสำหรับกำหนดค่าเริ่มต้นของ
มอดูล

// เรียกใช้โปรแกรมย่อยสำหรับกำหนดค่าเริ่มต้นของ
ตัวแปร

// ลูปการทำงานต่อเนื่อง

// เรียกใช้ฟังก์ชันตัวนับเวลา

// เรียกใช้ฟังก์ชันแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็น
สัญญาณดิจิทัล

// เรียกใช้ฟังก์ชันสำหรับการคำนวณ

// เรียกใช้ฟังก์ชันควบคุมกระแสสนาม

// เรียกใช้ฟังก์ชันควบคุมกระแสสนาม

```

// === Control Field Circuit === // เรียกใช้ฟังก์ชันสำหรับควบคุมกระบวนการของ
Process1();                      ตัวควบคุมกระแสสนาม
// === Control Armature Circuit === // เรียกใช้ฟังก์ชันสำหรับควบคุมกระบวนการของ
Process2();                      ตัวควบคุมความเร็วรอบ

//===== UART =====
UART_Transmit();
UART_WriteTxBuffer();
System.SwitchOn = PORTEbits.RE8;
    }
}

void Timer(void)                // ฟังก์ชันย่อยตัวนับเวลา
{
    if(System.OnEnterTimeBase1ms)
    {
        System.OnEnterTimeBase1ms=0;
        if(System.IsTimer1Enable && Counter.Timer1 > 0) {Counter.Timer1--;}
                                // ตัวนับเวลาของ Process1
        if(System.IsTimer2Enable && Counter.Timer2 > 0) {Counter.Timer2--;}
                                // ตัวนับเวลาของ Process 2
        if(IsUartRxTimeoutEnable() && Uart.Rx.TimeOutCounter > 0)
                                Uart.Rx.TimeOutCounter--;
                                // ตัวนับเวลาของมอดูล UART
        System.OnEnterReadADC = 1; // ตัวควบคุมเวลาของมอดูล ADC
        System.OnEnterCalADC = 1;  // ตัวควบคุมเวลาสำหรับการคำนวณ
        System.OnEnterSetPWM = 1;  // ตัวควบคุมเวลาสำหรับการเปลี่ยนแปลงค่า
        }                          รอบการทำงาน
    }

void InitValue(void)            // ฟังก์ชันสำหรับประกาศค่าเริ่มต้นของตัวแปร

```

```

{
    Value.PWM1Duty = 0;           // กำหนดรอบทำงานฝั่งวงจรสนาม เท่ากับ 0%
    Value.PWM2Duty = 0;           // กำหนดรอบทำงานฝั่งวงจรอาร์เมเจอร์ เท่ากับ 0%
    Value.Tload = 20;             // กำหนดค่าแรงบิดโหลด เช่น 0.2 N.m = 20
    Proc1 = Initial;              // กำหนดสถานะฟังก์ชันสำหรับควบคุมกระบวนการ
                                // ควบคุมกระแสสนาม เป็น Initial

    System.OnEnterProc1 = 1;

    Proc2 = Initial;              // กำหนดสถานะฟังก์ชันสำหรับควบคุมกระบวนการ
                                // ควบคุมความเร็วรอบ เป็น Initial

    System.OnEnterProc2 = 1;
    System.EnaCal_IField = 1;
    System.EnaCtrlIFieldMode = 0;
    System.EnaCtrlSpeedMode = 0;

    LED0 = 1;
    LED1 = 1;
    LED2 = 1;
}

```

โปรแกรม pwm.c

```
#include "system.h"
```

```
/* ***** */
```

```
/* ฟังก์ชันกำหนดค่าเริ่มต้นของมอดูล PWM สำหรับบอร์ด dsPIC30F2010 */
```

```
/* ความถี่ PWM = 10 KHz */
```

```
/* ***** */
```

```
void init_mcpwm()
```

```
{
```

```
    PTCNbits.PTOS = 0; // PWM timer post-scale
```

```
    PTCNbits.PTCKPS = 0; // PWM timer pre-scale
```

```
    PTCNbits.PTMOD = 0; // PWM operates in free-running Mode continuously
```

```
    PTMR = 0; // PWM counter value, start at 0
```

```

PTPER = 2949; // PWM Timebase period = 0.1 ms

PWMCON1bits.PMOD3 = 1; // PWM in independent mode
PWMCON1bits.PMOD2 = 1; // PWM in independent mode
PWMCON1bits.PMOD1 = 1; // PWM in independent mode
PWMCON1bits.PEN3H = 1; // PWM High pin is enabled
PWMCON1bits.PEN2H = 1; // PWM High pin is enabled
PWMCON1bits.PEN1H = 1; // PWM High pin is enabled
PWMCON1bits.PEN3L = 0; // PWM Low pin disabled (direction control later?)
PWMCON1bits.PEN2L = 0; // PWM Low pin disabled (direction control later?)
PWMCON1bits.PEN1L = 0; // PWM Low pin disabled (direction control later?)

// Duty Cycle has a max value of 2xPeriod since output can change
// on rising or falling edge of T_cy

PDC1 = 0; // PWM#1 Duty Cycle register (11-bit)
PDC2 = 0; // PWM#2 Duty Cycle register (11-bit)
PDC3 = 0; // PWM#3 Duty Cycle register (11-bit)
PTCONbits.PTEN = 1; // Enable PWM Timerbase !
}

//=====
//   ฟังก์ชันสำหรับกำหนดค่ารอบทำงานของ PWM
//=====

void SetPWMDuty(unsigned int CH1, unsigned int CH2)
{
    //=== Time Base 1ms ===
    if(System.OnEnterSetPWM)
    {
        System.OnEnterSetPWM= 0;
        // PWM CH1 Duty (0 - 1023)
        PDC1 = (unsigned long)CH1*2949*2/1023;
        // PWM CH2 Duty (0 - 1023)
        PDC2 = (unsigned long)CH2*2949*2/1023;
    }
}

```

```

    }
}

*****

โปรแกรม adc.c

#include "system.h"

/*****
/* ฟังก์ชันสำหรับกำหนดค่าเริ่มต้นของมอดูล ADC */
*****/

void init_adc()
{
    ADCON1bits.ADON = 0;
    // กำหนดการทำงานของพิน ADC
    SetChanADC10(ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN0 &
                 ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN1 &
                 ADC_CH0_NEG_SAMPLEA_NVREF);

    ConfigIntADC10(ADC_INT_DISABLE);
    // เปิดฟังก์ชัน ADC และ เปิดการใช้งาน ADC
    OpenADC10(ADC_MODULE_ON &
              ADC_IDLE_STOP &
              ADC_FORMAT_INTG &
              ADC_CLK_MANUAL &
              ADC_AUTO_SAMPLING_ON &
              ADC_SAMPLE_SIMULTANEOUS,

              ADC_VREF_AVDD_AVSS &
              ADC_SCAN_ON &
              ADC_CONVERT_CH0 &
              ADC_SAMPLES_PER_INT_16 &
              ADC_ALT_BUF_OFF &
              ADC_ALT_INPUT_OFF ,

```

```

        ADC_SAMPLE_TIME_1 &
        ADC_CONV_CLK_INTERNAL_RC &
        ADC_CONV_CLK_Tcy,

        ENABLE_AN0_ANA & // Enable RB0 = ADC0
        ENABLE_AN1_ANA , // Enable RB1 = ADC1
// การตั้งค่า ADC = ON ADC0 ,OFF ADC[2..7]
        SKIP_SCAN_AN2 & // Disable Scan ADC2
        SKIP_SCAN_AN3 & // Disable Scan ADC3
        SKIP_SCAN_AN4 & // Disable Scan ADC4
        SKIP_SCAN_AN5 & // Disable Scan ADC5
        SKIP_SCAN_AN6 & // Disable Scan ADC6
        SKIP_SCAN_AN7); // Disable Scan ADC7
    }

void ReadADCValue(void) // ฟังก์ชันสำหรับแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็น
                        สัญญาณดิจิทัล

{
    //=== Time Base 1ms === (Fs = 1kHz)
    if(System.OnEnterReadADC)
    {
        ADCON1bits.SAMP = 1; // เริ่มการชักตัวอย่างของ ADC
        while(!ADCON1bits.SAMP); // รอ ADC ชักตัวอย่างเสร็จ
        ConvertADC10(); // แปลงผล
        while(BusyADC10()); // รอการแปลงผลเสร็จ

        Value.ADC_CH[0] = ADCBUF0;
        Value.ADC_CH[1] = ADCBUF1;

        // อ่านค่าที่ได้จากการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็น
        สัญญาณดิจิทัลจากช่องที่ 0-1
    }
}

```

```

        System.OnEnterReadADC = 0;
    }
}

void CalADCValue (void)          // ฟังก์ชันสำหรับคำนวณค่าจากตัวตรวจรู้
{
    unsigned int NactTmp;          // กำหนดตัวแปร NactTmp
    unsigned int ii=0,sum=0;        // กำหนดตัวแปร ii เท่ากับ 0 และ sum เท่ากับ 0

    if(System.OnEnterCalADC)
    {
        System.OnEnterCalADC = 0;
        Value.Ifact = (((unsigned long)Value.ADC_CH[0]*1000+930)/1974);
                                // คำนวณเพื่อแปลงค่ากระแสสนามจากตัวตรวจรู้

        for(ii=1;ii<=10;ii++)
        {
            NactTmp = (((unsigned long)Value.ADC_CH[1]*4935)/1023)+60;
            sum=sum+NactTmp;
        }

        Value.Nact = sum/10;        // คำนวณหาค่าเฉลี่ยของความเร็วรอบเนื่องจากค่าเกิด
                                    // การแกว่งไปมา
    }
    // คำนวณเพื่อแปลงค่าความเร็วรอบจากตัวตรวจรู้
}

```

โปรแกรม *timer.c*

```
#include "system.h"

/*****

/* ฟังก์ชันสำหรับกำหนดค่าเริ่มต้นของมอดูล timer */

*****/

void init_timer()
{
    CloseTimer2();

    // Config Timer2 Interrupt Control
    ConfigIntTimer2(T2_INT_ON &    // Enable Timer2 Interrupt
                   T2_INT_PRIOR_1); // Timer2 Interrupt Priority = 1
    WriteTimer2(0);                // Reset Timer2 Count

    /*****

    // ET-dsPIC30F2010 TRAINING KIT V1.0 Hardware Board
    // XTAL = 7.3728MHz
    // Fosc = 7.3728 MHz x 16 = 117.9648 MHz
    // Fcy = Fosc / 4
    //      = 117.9648 / 4 = 29.4912 MHz
    // Tcy = 1 / 29.4912 MHz
    //      = 33.90842 nS
    /*****

    // Desire Frequency = 1 KHz (1.0 mS Period)
    // Desire Timer Prescale = 1
    // Timer Clock = 29.4912 MHz
    // 1 Cycle = 33.90842nS
    // 1 KHz Cycle Count = 1mS / 33.90842nS
    //                      = 29491.2 Cycle
    // 4 KHz Cycle Count = 0.25mS / 33.90842nS
    //                      = 7372 Cycle
```

```

OpenTimer2(T2_ON &                // ON Timer2
            T2_IDLE_STOP &         // Disable Timer2 in IDLE Mode
            T2_GATE_OFF &          // Disable Timer2 Gate Control
            T2_PS_1_1 &            // Timer2 Prescale = 1:1

            T2_32BIT_MODE_OFF &    // Disable External Sync.
            T2_SOURCE_INT ,         // Timer2 Clock Source = Internal
            7372);                  // Timer frequency = 4kHz
}

/*****/
/* ฟังก์ชัน interrupt ของมอดูล timer */
/*****/
void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _T2Interrupt(void)
{
    //timebase 0.25 ms
    WriteTimer2(0);
    // Reset Timer2 Count
    IFS0bits.T2IF = 0;                // Reset Timer2 Interrupt Flag

    if(++Counter.TimeBase_1ms >= 4) // ตัวนับฐานเวลา 1 ms
    {
        System.OnEnterTimeBase1ms = 1;

        if(++Counter.TimeBase_100ms >= 100)
        {
            // ตัวนับฐานเวลา 100 ms

            System.OnEnterCal_IField = 1;
            System.OnEnterCtrlSpeedMode = 1;
            Uart.CanSendData = true;
            Counter.TimeBase_100ms = 0;
        }
    }
}

```

```

        } // end 100ms

        Counter.TimeBase_1ms = 0;

    } // end 1ms
}

*****

โปรแกรม Process1.c
#include "system.h"

void Process1(void) // ฟังก์ชันสำหรับควบคุมกระบวนการของตัวควบคุม
{
    switch(Proc1) // เริ่มต้นสวิตช์มีสถานะเป็น Initial (Proc1 = Initial)
    {
        case Initial: // สถานะสำหรับกำหนดค่าเริ่มต้นของกระบวนการ
            if(System.OnEnterProc1)
            {
                System.OnEnterProc1 = 0;
                StartTimer1(1000); // นับเวลา 1 วินาที
            }

            Value.PWM1Duty = 0; // กำหนดรอบทำงาน เท่ากับ 0%
            LED0 = OFF;

            if(IsTimer1TimOut() && IsSwitch_TurnOn)
            {
                // ถ้านับเวลาครบและกดสวิตช์สถานะของ Proc1
                Proc1 = Standby; // จะเปลี่ยนจาก Initial ไปเป็น Standby
                System.OnEnterProc1 = 1;
            }

            break;

        case Standby: // สถานะรอคำสั่ง
            if(System.OnEnterProc1)
            {

```

```

System.OnEnterProc1 = 0;

StartTimer1(1000);          // นับเวลา 1 วินาที
}

LED0 = ON;
LED1 = OFF;

if(IsTimer1TimOut())
{
    // ถ้านับเวลาครบสถานะของ Proc1 เปลี่ยนเป็น State1
    Proc1 = State1;
    System.OnEnterProc1 = 1;
}

break;

case State1:                // สถานะเริ่มการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคค์
    if(System.OnEnterProc1)   // ฟังวงจรสนาม
    {
        System.OnEnterProc1 = 0;
    }

    Value.PWM1Duty = 950;    // กำหนดค่ารอบทำงาน เช่น 950 เท่ากับ 95%

    if(IsSwitch_TurnOn)
    {
        Status.SW1 = true;
    }

    if(IsSwitch_TurnOff && Status.SW1==true)
    {
        // ถ้ากดสวิตช์และสถานะของสวิตช์เป็นจริง
        Proc1 = State2;      // สถานะของ Proc1 เปลี่ยนเป็น State2
        System.OnEnterProc1 = 1;
        Status.SW1 = false;
    }

```

```

        break;

    case State2:                // สถานะเปิดการทำงานของตัวควบคุมกระแสสนาม
        if(System.OnEnterProc1)
        {
            System.OnEnterProc1 = 0;
            System.EnaCtrlIFieldMode = true;
        }                    // กำหนดให้ตัวควบคุมกระแสสนามเริ่มทำงาน
        LED1 = ON;
        LED2 = OFF;
        Value.PWM1Duty = Value.CalPWM1Duty;
                                // รับค่ารอบทำงานจากตัวควบคุมกระแสสนาม
        break;
    }
}

*****
โปรแกรม Process2.c
#include "system.h"
void Process2(void)            // ฟังก์ชันสำหรับควบคุมกระบวนการของตัวควบคุม
                                ความเร็วรอบ
{
    switch(Proc2)
    {
        case Initial:          // สถานะสำหรับกำหนดค่าเริ่มต้นของกระบวนการ
            if(System.OnEnterProc2)
            {
                System.OnEnterProc2 = 0;
                StartTimer2(1000);    // นับเวลา 1 วินาที
            }
            Value.PWM2Duty = 0;        // กำหนดรอบทำงาน เท่ากับ 0%

```

```

if(IsTimer2TimOut() && IsSwitch_TurnOn)
{
    // ถ้านับเวลาครบและกดสวิตช์สถานะของ Proc2
    Proc2 = Standby;           เปลี่ยนจาก Initial ไปเป็น Standby
    System.OnEnterProc2 = 1;
}
break;

case Standby:                // สถานะรอคำสั่ง
    if(System.OnEnterProc2)
    {
        System.OnEnterProc2 = 0;
        StartTimer2(10000);   // นับเวลา 10 วินาที
    }

    if(IsTimer2TimOut())
    {
        // ถ้านับเวลาครบสถานะของ Proc2 เปลี่ยนเป็น State1
        Proc2 = State1;
        System.OnEnterProc2 = 1;
    }
    break;

case State1:                // สถานะเริ่มการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบักกิ้ง
    if(System.OnEnterProc2)   ฟังวงจรอาร์เมเจอร์
    {
        System.OnEnterProc2 = 0;
    }

    Value.PWM2Duty = 500;     // กำหนดค่ารอบทำงาน เช่น 500 เท่ากับ 50%

```

```

if(System.EnaCtrlSpeedMode)
{
    // ถ้าตัวควบคุมความเร็วรอบเริ่มทำงานสถานะของ
    Proc2 = State2;          Proc2 เปลี่ยนเป็น State2
}
break;

case State2:                // สถานการณ์ทำงานของตัวควบคุมความเร็วรอบ
    if(System.OnEnterProc2)  เริ่มทำงาน
    {
        System.OnEnterProc2 = 0;
    }
    Value.PWM2Duty = Value.CalPWM2Duty;
    // รับค่ารอบทำงานจากตัวควบคุมความเร็วรอบ
    break;
}
}

*****

โปรแกรม Cal.c
#include "system.h"
const unsigned int N_t=1000;    // กำหนดค่าความเร็วรอบตามที่ต้องการ
float fcal;
float a0,a1;
int error1;
int percent_error1;
void Control_ifield(void)      // ฟังก์ชันสำหรับควบคุมกระแสสนาม
{
    // การทำงานของฟังก์ชัน คือ นำค่า Value.Tload และ
    if(System.OnEnterCal_IField)  N_t ที่กำหนดไปคำนวณตามเงื่อนไขเพื่อให้
    {
        ได้ Ifcal ที่ทำให้ประหยัดพลังงาน
        if(System.EnaCal_IField)
        {

```

```

System.OnEnterCal_IField = 0;

if (Value.Tload <= 20)           //เงื่อนไขการคำนวณหา Ifcal จะขึ้นอยู่กับValue.Tload
{
    a0=0.1102-(((20-Value.Tload)*(0.1513-0.1102))/(40-20));
    a1=(3.514/1000000)-(((20-Value.Tload)*((6.521/1000000)-(3.514/1000000)))/(40-20));
    fcal=a0+(a1*N_t);
}

else if (Value.Tload <= 40)
{
    a0=(((Value.Tload-20)*(0.1513-0.1102))/(40-20))+0.1102;
    a1=(((Value.Tload-20)*((6.521/1000000)-(3.514/1000000)))/(40-20))+(3.514/1000000);
    fcal=a0+(a1*N_t);
}

else if (Value.Tload <= 60)
{
    a0=(((Value.Tload-40)*(0.1852-0.1513))/(60-40))+0.1513;
    a1=(((Value.Tload-40)*((8.2762/1000000)-(6.521/1000000)))/(60-40))+(6.521/1000000);
    fcal=a0+(a1*N_t);
}

else if (Value.Tload <= 80)
{
    a0=(((Value.Tload-60)*(0.214-0.1852))/(80-60))+0.1852;
    a1=(((Value.Tload-60)*((9.028/1000000)-(8.276/1000000)))/(80-60))+(8.276/1000000);
    fcal=a0+(a1*N_t);
}

else if (Value.Tload <= 100)
{
    a0=(((Value.Tload-80)*(0.2444-0.214))/(100-80))+0.214;
    a1=(((Value.Tload-80)*((5.2664/1000000)-(9.028/1000000)))/(100-80))+(9.028/1000000);
    fcal=a0+(a1*N_t);
}

```

```

}

else if (Value.Tload <= 120)
{
a0=(((Value.Tload-100)*(0.281-0.2444))/(120-100))+0.2444;
a1=(((Value.Tload-100)*((-4.765/1000000)-(5.2664/1000000)))/
(120-100))+5.2664/1000000);

fcal=a0+(a1*N_t);
}

else if (Value.Tload <= 140)
{
a0=(((Value.Tload-120)*(0.313-0.281))/(140-120))+0.281;
a1=(((Value.Tload-120)*((-1.492/1000000)+(4.765/1000000)))/
(140-120))-(4.765/1000000);

fcal=a0+(a1*N_t);
}

else //if (Value.Tload <= 150)
{
a0=(((Value.Tload-140)*(0.322-0.313))/(150-140))+0.313;
a1=(((Value.Tload-140)*((-1.823/1000000)+(1.492/1000000)))/(150-140))-(1.492/1000000);
fcal=a0+(a1*N_t);
}

Value.Ifcal=fcal*1000;
error1 = Value.Ifcal - Value.Ifact;    // จำนวนค่าความผิดพลาดของกระแสสนาม

if(error1 >= 0)
    percent_error1 = (Value.Ifcal - Value.Ifact)*100/Value.Ifcal;
else
    percent_error1 = (Value.Ifact - Value.Ifcal)*100/Value.Ifcal;
}

// ตรวจสอบค่าความผิดพลาดว่าเป็นบวกหรือลบแล้ว
// คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาด

```

```

if (System.EnaCtrlIFieldMode) // ถ้า System.EnaCtrlIFieldMode เป็น true จะเริ่มการ
{
    ทำงานของโหมดควบคุมกระแสสนาม
    /*** โปรแกรมย่อยสำหรับตัวควบคุมแบบฐานกฎของโหมดควบคุมกระแสสนาม***/
    if (percent_error1 <= 5) // ถ้า percent_error1 น้อยกว่าหรือเท่ากับ 5
    {
        System.EnaCtrlIFieldMode = false; // ออกจากโหมดการควบคุมกระแสสนาม
        System.EnaCal_IField = false; // หยุดการคำนวณกระแสสนาม
        System.EnaCtrlSpeedMode = true; // เริ่มการทำงานโหมดควบคุมความเร็วรอบ
        Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty;
        // ส่งค่ารอบทำงานของฟั้่งวงจรสนาม
    }
    else
    {
        if (error1>0) //ถ้าค่าความผิดพลาดเป็นบวก
        {
            if (error1 > 15) //ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่า 15
                Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty+25; //เพิ่มรอบทำงาน 25 (2.5%)
            else if (error1 > 12) //ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่า 12
                Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty+15; //เพิ่มรอบทำงาน 15 (1.5%)
            else if (error1 > 10) //ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่า 10
                Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty+10; //เพิ่มรอบทำงาน 10 (1.0%)
            else if (error1 > 7) //ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่า 7
                Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty+5; //เพิ่มรอบทำงาน 5 (0.5%)
            else if (error1 > 5) //ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่า 5
                Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty+1; //เพิ่มรอบทำงาน 1
            (0.1%)if (Value.CalPWM1Duty > 950) Value.CalPWM1Duty = 950;
            //ถ้ารอบทำงานของฟั้่งวงจรสนามมากกว่า 950 (95%)
            //ให้รอบทำงานของฟั้่งวงจรสนาม เท่ากับ 950 (95%)
        }
        else // ถ้าค่าความผิดพลาดเป็นลบ

```

```

{
if (error1 < -15) //ถ้าค่าความผิดพลาดน้อยกว่า -15
Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty-25; //ลดรอบทำงาน 25 (2.5%)
else if (error1 < -12) //ถ้าค่าความผิดพลาดน้อยกว่า -12
Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty-15; //ลดรอบทำงาน 15 (1.5%)
else if (error1 < -10) //ถ้าค่าความผิดพลาดน้อยกว่า -10
Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty-10; //ลดรอบทำงาน 10 (1.0%)
else if (error1 < -7) //ถ้าค่าความผิดพลาดน้อยกว่า -7
Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty-5; //ลดรอบทำงาน 5 (0.5%)
else if (error1 < -5) //ถ้าค่าความผิดพลาดน้อยกว่า -5
Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty-1; //ลดรอบทำงาน 1 (0.1%)
if(Value.CalPWM1Duty < 100) Value.CalPWM1Duty = 100;
//ถ้ารอบทำงานของฟังก์ชันน้อยกว่า 100 (10%)
} //ให้รอบทำงานของฟังก์ชันเท่ากับ 100 (10%)
}

else Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty;
// ส่งค่ารอบทำงานของวงจรสนาม
}

int error2;
void Control_speed (void) // ฟังก์ชันสำหรับควบคุมความเร็วรอบ
{
error2 = N_t - Value.Nact; // คำนวณค่าความผิดพลาดของความเร็วรอบ

if(error2 >= 0)
Value.percent_error2 = (unsigned long)( N_t - Value.Nact)*100/N_t;
else
Value.percent_error2 = (unsigned long)( Value.Nact - N_t)*100/N_t;
// ตรวจสอบค่าความผิดพลาดว่าเป็นบวกหรือลบแล้ว

```

คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาด

```

if (System.OnEnterCtrlSpeedMode && System.EnaCtrlSpeedMode)
    // ตรวจสอบเงื่อนไขการเริ่มการทำงานโหมดควบคุม
    {
        // ความเร็วรอบ
        System.OnEnterCtrlSpeedMode = 0;
        /***โปรแกรมย่อยสำหรับตัวควบคุมแบบฐานกฎของโหมดควบคุมความเร็วรอบ***/
        if (Value.percent_error2 <= 5) // ถ้าเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5
        {
            Value.CalPWM2Duty = Value.PWM2Duty;
            // ตั้งค่ารอบทำงานของฟังก์ชันอาร์เมเจอร์
        }
        else
        {
            if (error2 > 0) // ถ้าค่าความผิดพลาดเป็นบวก
            {
                if (error2 > 200) // ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่า 200
                    Value.CalPWM2Duty = Value.PWM2Duty+15; //เพิ่มรอบทำงาน 15 (1.5%)
                else if (error2 > 100) // ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่า 100
                    Value.CalPWM2Duty = Value.PWM2Duty+10; //เพิ่มรอบทำงาน 10 (1.0%)
                else if (error2 > 50) // ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่า 50
                    Value.CalPWM2Duty = Value.PWM2Duty+5; //เพิ่มรอบทำงาน 5 (0.5%)
                else //if (error2 > 10) // ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่า 10
                    Value.CalPWM2Duty = Value.PWM2Duty+1; //เพิ่มรอบทำงาน 1 (0.1%)
            }
            else // ถ้าค่าความผิดพลาดเป็นลบ
            {
                if (error2 < -200) // ถ้าค่าความผิดพลาดน้อยกว่า -200
                    Value.CalPWM2Duty = Value.PWM2Duty-15; //ลดรอบทำงาน 15 (1.5%)
                else if (error2 < -100) // ถ้าค่าความผิดพลาดน้อยกว่า -100
                    Value.CalPWM2Duty = Value.PWM2Duty-10; //ลดรอบทำงาน 10 (1.0%)
            }
        }
    }

```

```

else if (error2 < -50)                                //ถ้าค่าความผิดพลาดน้อยกว่า -50
Value.CalPWM2Duty = Value.PWM2Duty-5; //ลดรอบทำงาน 5 (0.5%)
else //if (error2 < -10)                             //ถ้าค่าความผิดพลาดน้อยกว่า -10
Value.CalPWM2Duty = Value.PWM2Duty-1; //ลดรอบทำงาน 1 (0.1%)
    }
}
}

else Value.CalPWM2Duty = Value.PWM2Duty;
                                //ส่งค่ารอบทำงานของฟังก์ชันจอร์เมเจอร์
}

*****

โปรแกรม gpio.c
#include "system.h"
void init_gpio(void)                                // ฟังก์ชันสำหรับกำหนดการทำงานของพิน
{                                                    ใน microcontroller
// ===== Digital Input =====
TRISEbits.TRISE8 = 1;                             // กำหนดให้เป็นสวิตช์เพื่อเปลี่ยนสถานะการทำงาน
// ===== Digital Output =====
TRISBbits.TRISB3 = 0;                             // กำหนดให้เป็น LED1
TRISBbits.TRISB4 = 0;                             // กำหนดให้เป็น LED2
TRISBbits.TRISB5 = 0;                             // กำหนดให้เป็น LED3
}

*****

ไฟล์ define.h                                // ไฟล์สำหรับประกาศตัวแปรหลักที่ใช้ใน โปรแกรม
#ifndef _DEFINE_H_
#define _DEFINE_H_

#define IsTimer1TimOut() (System.IsTimer1Enable && Counter.Timer1 <= 0)
#define StartTimer1(val) {System.IsTimer1Enable = 1; Counter.Timer1 = val;}
#define StopTimer1() {System.IsTimer1Enable = 0;}

```

```

#define IsTimer2TimOut()      (System.IsTimer2Enable && Counter.Timer2 <= 0)
#define StartTimer2(val)      {System.IsTimer2Enable = 1; Counter.Timer2 = val;}
#define StopTimer2()          {System.IsTimer2Enable = 0;}
#define IsSwitch_TurnOn      (PORTEbits.RE8 == 0)
#define IsSwitch_TurnOff     (PORTEbits.RE8 == 1)
#define LED0                  LATBbits.LATB3
#define LED1                  LATBbits.LATB4
#define LED2                  LATBbits.LATB5
#define ON                    0
#define OFF                    1

typedef enum
{
    false = 0,
    true  = 1
}bool;

typedef enum
{
    Initial = 0,
    Standby = 1,
    State1 = 2,
    State2 = 3,
}TProc;

typedef struct                // ประกาศตัวแปรสำหรับการควบคุมหลักของระบบ
{
    unsigned OnEnterTimeBase1ms:1;
    unsigned OnEnterReadADC:1;
    unsigned OnEnterCalADC:1;

```

```

    unsigned OnEnterSetPWM:1;
    unsigned IsTimer1Enable:1;
    unsigned IsTimer2Enable:1;
    unsigned OnEnterProc1:1;
    unsigned OnEnterProc2:1;
    unsigned OnEnterCal_IField:1;
    unsigned EnaCal_IField:1;
    unsigned EnaCtrlIFieldMode:1;
    unsigned EnaCtrlSpeedMode:1;
    unsigned OnEnterCtrlSpeedMode:1;
    unsigned SwitchOn:1;
    bool UartRxTimeoutEnable:1;
} TSystem;

typedef struct                                // ประกาศตัวแปรทั่วไป (ขนาด 8-32 บิต)
{
    unsigned int ADC_CH[2];
    unsigned int PWM1Duty;
    unsigned int PWM2Duty;
    unsigned int CalPWM1Duty;
    unsigned int CalPWM2Duty;
    unsigned int Ifact;
    unsigned int Nact;
    unsigned long NactSum;
    unsigned int Tload;
    unsigned int Ifcal;
    unsigned int Step;
    unsigned int percent_error2;
} TValue;

```

```

typedef struct                                // ประกาศตัวแปรของตัวนับเวลา
{
    unsigned int TimeBase_1ms;
    unsigned int TimeBase_100ms;
    unsigned int TimeBase_1s;
    unsigned int Timer1;
    unsigned int Timer2;
} TCounter;
#endif

*****

ไฟล์ system.h                                // ไฟล์หลักสำหรับเรียกใช้ไฟล์ย่อย
#ifndef _SYSTEM_H_
#define _SYSTEM_H_

#include "p30f2010.h"                          // ไฟล์สำหรับประกาศค่ารีจิสเตอร์ของ dsPIC30F2010
#include "pwm.h"                               // ไฟล์สำหรับใช้ไลบรารีฟังก์ชัน MCPWM
#include "adc10.h"                             // ไฟล์สำหรับใช้ไลบรารีฟังก์ชัน ADC 10 บิต
#include "define.h"
#include "timer.h"
#include "uart1.h"

extern TValue Value;
extern TCounter Counter;
extern TSystem System;
extern TProc Proc1;
extern TProc Proc2;
extern TStatus Status;
extern TUart Uart;
}

// การประกาศตัวแปรเพื่อให้เห็นทั้งระบบ

#endif

```

ประวัติผู้เขียน

นางสาวศศิยา อุดมสุข เกิดเมื่อวันที่ 5 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดนครราชสีมา เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาที่ 1-6 ที่โรงเรียนวัดสระแก้ว ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนสุรนารีวิทยา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2552 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถาบันการศึกษาเดิม

ระหว่างศึกษาระดับปริญญาโท ได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจำนวน 6 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม (2) ปฏิบัติการวงจรและอุปกรณ์ (3) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1 (4) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 2 (5) ปฏิบัติการระบบควบคุม และ (6) ปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีความสนใจในด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การควบคุมอัตโนมัติ และปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งจากการทำวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ และความเข้าใจ ทางด้านการประหยัดพลังงาน การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า และมีผลงานตีพิมพ์ปรากฏดังภาคผนวก ก. จำนวน 3 ฉบับ