



รายงานการวิจัย

การประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดแยกกระตุ้น (Energy Saving for Separately Excited DC Motor Drives)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดแยกกระตุ้น

(Energy Saving for Separately Excited DC Motor Drives)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กองพล อารีรักษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นักวิจัย

อาจารย์ ดร. ชิดารัตน์ อารีรักษ์

สาขาวิชาคณิตศาสตร์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

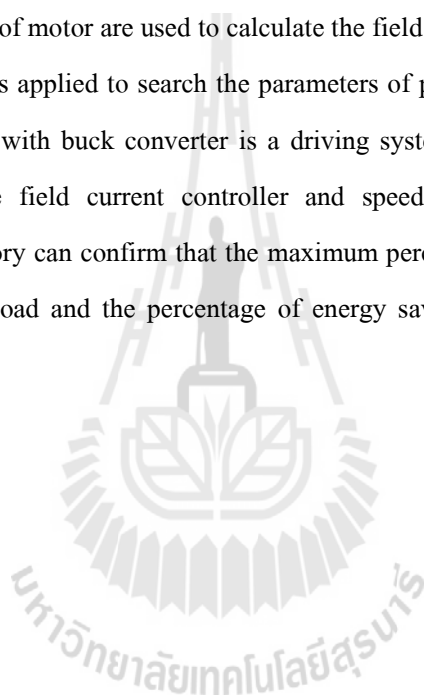
เมษายน 2555

บทคัดย่อ

การประหยัดพลังงานเป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึงต่อภาคอุตสาหกรรมเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะงานทางด้านการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เนื่องจากมอเตอร์ดังกล่าวมีใช้กันอย่างกว้างขวาง พบได้โดยทั่วไป โดยเฉพาะในงานอุตสาหกรรมลากจูง เช่น รถไฟฟ้า เป็นต้น วิธีประหยัดพลังงานไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นในงานวิจัยนี้อาศัยการคำนวณหาค่ากระแสสนามที่เหมาะสมที่ก่อให้เกิดกำลังงานสูญเสียในมอเตอร์น้อยที่สุด ซึ่งการคำนวณดังกล่าวจำเป็นต้องใช้สมการพื้นฐานประกอบกับสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสมการกำลังงานสูญเสียหาได้จากการค้นหาโดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ คือ วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ระบบขับเคลื่อนในงานวิจัยประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่ต่อพ่วงกับวงจรแปลงผันแบบบักค์ ตัวควบคุมกระแสสนามและตัวควบคุมความเร็วรอบใช้ตัวควบคุมแบบฐานกฎ การทดสอบการประหยัดพลังงาน มีการทดสอบกับระบบจริงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลการทดสอบพบว่า การควบคุมมอเตอร์ตามหลักการของงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถประหยัดพลังงานได้สูงสุด 48.61 เปอร์เซ็นต์ ในสภาวะโหลด 13 เปอร์เซ็นต์ของพิกัด และเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานจะลดลงเมื่อโหลดมีค่าเพิ่มขึ้น

Abstract

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



กิตติกรรมประกาศ

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

กองพล อารีรักษ์

เมษายน 2555



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	3
2 ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	5
2.2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์	5
2.2.2 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้ในงานวิจัย	9
2.3 กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น	10
2.3.1 กำลังงานสูญเสียเนื่องจากขดลวด	10
2.3.2 กำลังงานสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านอากาศ.....	10
2.3.3 กำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

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

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

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

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

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

สารบัญตาราง

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

สารบัญตาราง (ต่อ)

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

สารบัญรูป

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

สารบัญรูป (ต่อ)

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

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.1	แผนภาพการทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีตัวควบคุมแบบฐานกฎ..... 107
8.1	แผนภาพวงจรทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดแยกกระตุ้นสำหรับประหยัคพลังงาน 110
8.2	กราฟเปรียบเทียบกำลังงานสูญเสียระหว่างวิธีฐานแบบจำลองสำหรับประหยัคพลังงาน และวิธีดั้งเดิมในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ 119



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการประหยัดพลังงานไฟฟ้าเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับภาคอุตสาหกรรม โดยงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นไปที่การประหยัดพลังงานไฟฟ้าสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยก กระตุ่น การใช้งานมอเตอร์ดังกล่าว พบได้โดยทั่วไปในงานอุตสาหกรรมของโรงงานทอผ้า โรงงานเส้นใยโพลีเอสเตอร์ โรงงานถลุงโลหะหรือเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า เป็นต้น และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงยังเป็นเครื่องจักรกลที่สำคัญในระบบควบคุมเกือบทุกชนิดในปัจจุบัน ซึ่งพบเห็นได้ตั้งแต่การใช้ในเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน การใช้ในรถยนต์ การใช้ในเครื่อง คอมพิวเตอร์ การใช้ในหุ่นยนต์ (Chapman, 1999) ตลอดจนเครื่องจักรกลที่ทำงานแบบอัตโนมัติ เช่น เครื่องจักรรีด เครื่องมือทางกล เป็นต้น (Pothiya, Chaposri, Kamsawang and Kinares, 2003) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงดังกล่าวเป็นที่นิยมในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วและแรงบิด ที่สามารถเปลี่ยนแปลงไปตามการใช้งานได้เกือบทุกรูปแบบ งานวิจัยนี้จึง สนใจที่จะศึกษาและพัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ่น ให้ใช้งานได้ ตามวัตถุประสงค์พร้อมทั้งคำนึงถึงการประหยัดพลังงานด้วยเช่นกัน ซึ่งในอดีตได้มีผู้คิดค้นวิธี ประหยัดพลังงาน คือ ทำการควบคุมกระแสสนามเพื่อให้ได้กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การใช้ตัวควบคุมเพื่อคำนวณค่ากระแสสนาม โดยใช้แบบจำลองแม่เหล็ก (Kusko and Galler, 1983) และ การใช้ตัวควบคุมที่สามารถวัดกำลังงานในการขับเคลื่อนและค้นหา ค่ากระแสสนามที่เหมาะสม (Magaris, Goutas, Doulgeri and Paschli, 1991) เป็นต้น แต่เนื่องจากวิธี ที่กล่าวมานั้นต้องพึ่งพาสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อน ด้วยเหตุนี้งานวิจัยจึงมุ่งเน้นพัฒนา วิธีการประหยัดพลังงาน โดยอาศัยการวิเคราะห์จากกฎสมมูลอย่างง่ายของมอเตอร์เพื่อประมาณค่า กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ให้มีค่าน้อย ซึ่งเมื่อกำลังงานสูญเสียน้อย จะส่งผลต่อการ ประหยัดพลังงาน คือ ที่ความเร็วและแรงบิดค่าหนึ่ง ระบบขับเคลื่อนที่พัฒนาขึ้นจะจ่ายกำลังงาน อินพุตให้น้อยกว่าระบบขับเคลื่อนปกติ ในขณะที่กำลังงานเอาต์พุตเท่าเดิม ดังนั้นเมื่อกำลังงาน อินพุตลดลง การใช้พลังงานสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์จะมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ใน งานวิจัยได้มีการหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิด

แยกกระตุ้น โดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ คือ วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (Adaptive Tabu search : ATS)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อค้นหาพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

1.2.2 เพื่อพัฒนาวิธีการประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

1.2.3 ได้ต้นแบบชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นแบบประหยัดพลังงาน

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้ในงานวิจัยมีขนาด 0.5 แรงม้า

1.3.2 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นจะใช้วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ต่อกับวงจรแปลงผันแบบบัก์ทั้งทางด้านวงจรรีเมเจอร์และวงจรถาน

1.3.3 การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น อาศัยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์เพื่อประหยัดพลังงาน ต้องมีค่าไม่เกินพิกัดของมอเตอร์

1.4.2 สมการมอเตอร์เป็นสมการอย่างง่าย จะไม่คำนึงถึงสถานะชั่วคราว โดยจะพิจารณาเฉพาะสถานะอยู่ตัวเท่านั้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้ทางด้านการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

1.5.2 ได้อุปกรณ์ที่สามารถขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นให้ใช้พลังงานอย่างประหยัด

1.5.3 สามารถนำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์มาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

1.5.4 ได้บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ หรือนานาชาติ

1.6 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย

รายงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 9 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัย รวมทั้งขอบเขตของงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น และนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สมการพื้นฐานของมอเตอร์ รวมถึงรายละเอียดเกี่ยวกับกำลังงานสูญเสียและการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

บทที่ 3 นำเสนอวิธีการระบุเอกลักษณ์ของสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบอดเชิงปรับตัว ซึ่งเป็นวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

บทที่ 4 กล่าวถึงการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยใช้วิธีทางคณิตศาสตร์และนำเสนอขั้นตอนการคำนวณ รวมถึงผลการคำนวณด้วยวิธีดังกล่าว

บทที่ 5 อธิบายถึงการประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยใช้วิธีฐานแบบจำลองและนำเสนอในรูปแบบของการคำนวณเชิงตัวเลข

บทที่ 6 กล่าวถึงโครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นเพื่อประหยัดพลังงาน รวมถึงอธิบายหลักการทำงาน การออกแบบและเสนอผลการทดสอบในแต่ละวงจร

บทที่ 7 นำเสนอตัวควบคุมแบบฐานกฎ (rule based controller) ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่ใช้ในงานวิจัย และอธิบายหลักการทำงาน การออกแบบ รวมถึงการสร้างตัวควบคุมแบบฐานกฎด้วยบอร์ด dsPIC30F2010

บทที่ 8 กล่าวถึงผลการทดสอบการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นเพื่อประหยัดพลังงาน

บทที่ 9 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมีอยู่ด้วยกัน 4 ส่วน คือ ภาคผนวก ก. แสดงรายการบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการทำวิจัย ภาคผนวก ข. แสดงผลการคำนวณเพื่อหาจุดการทำงานสำหรับการประหยัดพลังงาน ค. แสดงรายละเอียดข้อมูลต่าง ๆ ของอุปกรณ์สำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส

แบบบริดจ์และวงจรแปลงผันแบบบัตกึ่ง. แสดงรายละเอียดโปรแกรมควบคุมการขับเคลื่อน
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นบนบอร์ด dsPIC30F2010



บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

2.1 บทนำ

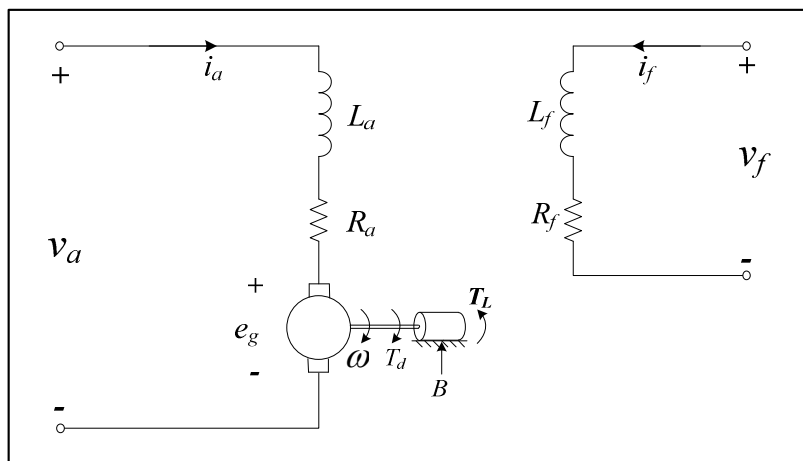
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ซึ่งมอเตอร์ดังกล่าวเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่นิยมใช้สำหรับอุตสาหกรรมทางด้านรถไฟ จากการศึกษาเกี่ยวกับการประหยัดพลังงานในอดีตพบว่าต้องอาศัยวิธีทางคณิตศาสตร์ และการคำนวณที่ยุ่งยากซับซ้อน ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องคิดค้นหาวิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อน โดยอาศัยการวิเคราะห์จากวงจรสมมูลอย่างง่ายของมอเตอร์ และจำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รวมถึงสมการคำนวณกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ดังกล่าว ด้วยเหตุนี้จึงนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 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 แรงบิดเหนี่ยวนำภายในมอเตอร์ ($N \cdot m$)

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)

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

เมื่อพิจารณาฝั่งวงจรมอเตอร์ตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์ 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 ($V \cdot s/rad$)

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

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

เมื่อพิจารณาจากการหมุนในสภาวะคงตัว จะได้สมการที่ (2.7)

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

การหาสมการความเร็วแรงบิดของมอเตอร์ เริ่มจากการพิจารณาตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์ฝั่งวงจรรอาร์เมเจอร์ 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

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้งานมีพิกัด ดังนี้

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

วงจрсสนาม : ค่าแรงดันสนาม 220 V และกระแสสนาม 0.3 A

จากการวัดค่าความต้านทานของมอเตอร์แล้วหาค่าเฉลี่ยจะได้ว่า R_a เท่ากับ 15.99 Ω และ R_f เท่ากับ 735.43 Ω

จากค่าพิกัดของมอเตอร์ที่ได้นำเสนอข้างต้นสามารถนำไปคำนวณหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นของมอเตอร์ได้ดังนี้

- 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)

งานวิจัยนี้ไม่นำกำลังงานงานสูญเสียดังกล่าวไปพิจารณาในการคำนวณ เนื่องจากกำลังงานสูญเสียนี้ปกติกจะมีค่าน้อย (Ryff, 1994) อีกทั้งสมการของกำลังงานสูญเสียดังกล่าวไม่ปรากฏพารามิเตอร์ที่พิจารณาอยู่ในสมการ ซึ่งพารามิเตอร์ที่พิจารณาในงานวิจัยนี้จะเกี่ยวข้องกับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ คือ i_a, i_f, v_a 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 ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กัวัสดุ

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) กำลังงานสูญเสียดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับปริมาตรของแกนเหล็ก 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)

สมการรวมของกำลังงานสูญเสียฮิสเตอร์ซิสและกำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนแสดงได้ดังสมการที่ (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 จึงไม่พิจารณาค่ากำลังงานสูญเสียดังกล่าวในงานวิจัย

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)

กำลังงานสูญเสียชนิดนี้เป็นผลมาจากการบิดเบี้ยวของฟลักซ์แม่เหล็กอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาอาร์เมเจอร์ และกระแสลัดวงจรในกระบวนการคอมมิวเตชัน (Guru and Hiziroglu, 2001) กำลังงานสูญเสียนี้มีค่าแปรผัน โดยตรงกับขนาดของกระแสไหลและความเร็วรอบของมอเตอร์

โดยปกติกำลังงานสูญเสียดังกล่าวมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกำลังงานสูญเสียชนิดอื่น ซึ่งกำลังงานสูญเสียจากการไถ่ใช้งานสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.24) ดังนี้

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

โดยที่ P_s คือ กำลังงานสูญเสียจากการไถ่ใช้งาน (W)

K_{st} คือ ค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากการไถ่ใช้งาน

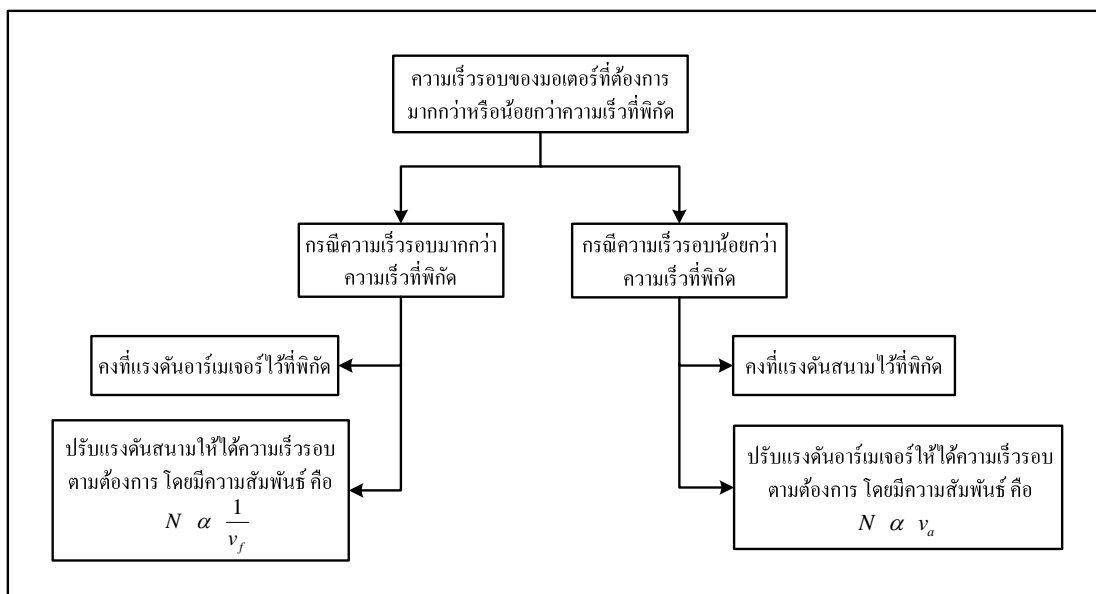
จากการอธิบายทั้งหมดข้างต้นสมการกำลังงานสูญเสียรวมในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น จะเป็นดังสมการที่ (2.25)

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

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

2.4 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น จะใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 2 ชุด เพื่อป้อนให้กับวงจรรีเมเจอร์และวงจรถานาม 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

การควบคุมความเร็วรอบด้วยวิธีนี้เป็น การเปลี่ยนแปลงค่ากระแสสนาม ซึ่งทำได้ โดยการปรับค่าแรงดันสนาม โดยที่แรงดันอาร์เมเจอร์มีค่าคงที่ จากสมการที่ (2.11) จะอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสนามและความเร็วของมอเตอร์ได้ว่า เมื่อค่ากระแสสนามมีค่าลดลง ความเร็วรอบของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้น ถ้าค่ากระแสสนามมีค่ามากขึ้น ความเร็วรอบของมอเตอร์จะลดลง แต่การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยวิธีนี้ สามารถควบคุมความเร็วรอบได้ตั้งแต่ความเร็วพิกัดขึ้นไปเท่านั้น ไม่สามารถควบคุมความเร็วให้ต่ำกว่าความเร็วพิกัดได้ เนื่องจากการควบคุมความเร็วรอบที่ต่ำกว่าความเร็วพิกัด ต้องการกระแสสนามจำนวนมาก ซึ่งถ้ากระแสสนามมีค่ามากเกินไปค่าพิกัดของขดลวดสนาม จะทำให้ขดลวดสนามเสียหายได้

2.4.2 การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์โดยการควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์

การควบคุมความเร็วด้วยวิธีนี้ คือ การปรับแรงดันที่จ่ายให้วงจรถอาร์เมเจอร์ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่จ่ายให้วงจรถสนาม ซึ่งหมายถึงให้กระแสสนามคงที่นั่นเอง เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์จากสมการที่ (2.11) สังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มแรงดันอาร์เมเจอร์ ความเร็วรอบของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้น และถ้าลดแรงดันอาร์เมเจอร์ ความเร็วรอบของมอเตอร์จะลดลง การควบคุมความเร็วรอบ

ด้วยวิธีนี้สามารถควบคุมความเร็วได้ไม่เกินความเร็วพิกัดเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากการควบคุมความเร็วรอบสูงกว่าความเร็วพิกัด 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

ตารางที่ 2.1 ผลการคำนวณกำลังงานอินพุตที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยวิธีดั้งเดิม (ต่อ)

T_L (N·m)	N (rpm)	i_f (A)	v_f (V)	i_a (A)	v_a (V)	P_{in} (W)
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 จะอธิบายเกี่ยวกับผลการเปรียบเทียบระหว่างวิธีดั้งเดิมกับวิธีทางคณิตศาสตร์ และในบทที่ 5 จะเปรียบเทียบด้วยกัน 3 วิธี คือ วิธีดั้งเดิม วิธีทางคณิตศาสตร์และวิธีฐานแบบจำลอง ซึ่งวิธีฐานแบบจำลองเป็นวิธีที่ผู้ทำวิจัยคิดค้นขึ้นเอง

2.5 สรุป

การอธิบายเนื้อหาในบทนี้ เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ซึ่งการทำความเข้าใจในเรื่องดังกล่าวมีความสำคัญมากสำหรับการหาแนวทางในการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ เนื่องจากสมการและค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ จำเป็นต้องนำไปใช้ในการทำวิจัย เช่นนำไปคำนวณค่ากำลังงานตามวิธีดั้งเดิมและวิธีที่คิดค้นขึ้นใหม่ เพื่อนำผลการคำนวณมาเปรียบเทียบกัน เป็นต้น และในส่วนของสมการกำลังงานสูญเสีย ที่มีพารามิเตอร์บางตัวที่ไม่ทราบค่า ในงานวิจัยนี้ได้นำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์เข้ามาช่วยในการหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ซึ่งจะอธิบายอย่างละเอียดไว้ในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3

การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสีย

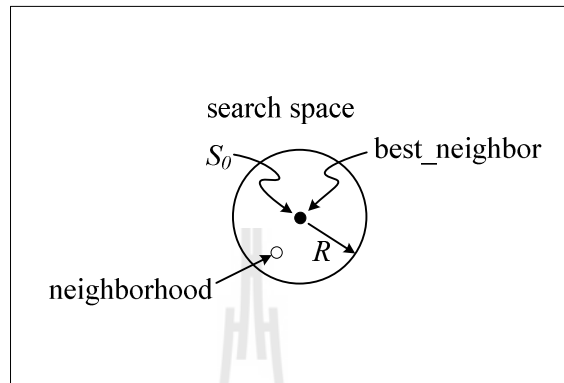
3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ได้มีการคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยก กระตุ่น เพราะฉะนั้นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในสมการกำลังงานสูญเสียจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ต่อผลการคำนวณ แต่เนื่องจากการยากที่ผู้วิจัยจะทราบพารามิเตอร์ของกำลังงานสูญเสียจาก บริษัทผู้ผลิตมอเตอร์ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์วิธีทางปัญญาประดิษฐ์สำหรับหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยเลือกวิธี ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search) หรือเรียกโดยย่อว่า “ATS” ดังนั้นในบทนี้จึงนำเสนอหลักการ ทำงาน กระบวนการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวที่ใช้สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของสมการ กำลังงานสูญเสีย ขอบเขตการค้นหา และการทดสอบพารามิเตอร์ รวมทั้งการตรวจสอบผลการ ค้นหาไว้ในบทนี้

3.2 หลักการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

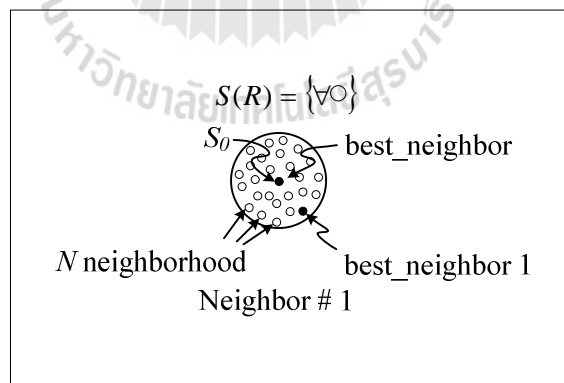
การค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว เป็นอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่ (Tabu Search: TS) มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบให้ดียิ่งขึ้น อัลกอริทึมนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นโดย กองพัน อารีรักษ์ และสรวิชัย สุจิตจร ในปี พ.ศ. 2545 โดยได้ทำการเพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในการค้นหาแบบตาบู่ธรรมดา คือ การเดินย้อนรอย (black tracking) และการปรับรัศมีการค้นหา (adaptive search radius) กลไกการเดินย้อนรอยจะเกิดขึ้นเมื่อจำนวนคำตอบในแต่ละรอบเท่ากับจำนวนคำตอบสูงสุด กลไกนี้จะเลือกคำตอบในรายการตาบู่ (Tabu list) เพื่อนำมากำหนดเป็นคำตอบเริ่มต้นสำหรับการค้นหาในรอบถัดไป ทั้งนี้เพื่อให้หลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น สำหรับกลไกการปรับรัศมีการค้นหาจะทำการปรับลดรัศมีในระหว่างการค้นหาจนกระทั่งการค้นหาเข้าไปใกล้คำตอบที่ดีที่สุด โดยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวพิจารณาได้ตามขั้นตอนดังนี้

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

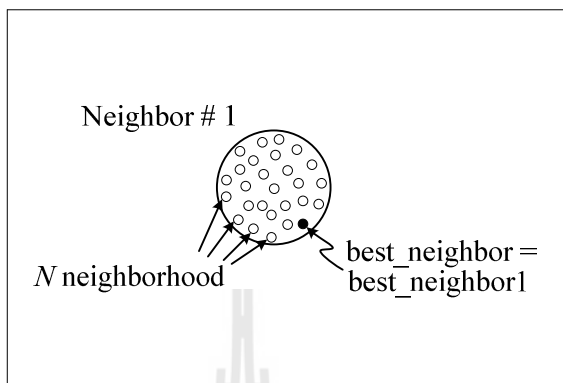
ขั้นตอนที่ 3 ทำการสุ่มเลือกคำตอบจำนวน N คำตอบ (N neighborhood) รอบ ๆ S_0 ภายในพื้นที่รัศมีการค้นหา R และกำหนดให้เซต $S(R)$ เป็นเซตของคำตอบ N คำตอบ ซึ่งเรียกว่า คำตอบรอบข้าง ดังรูปที่ 3.2



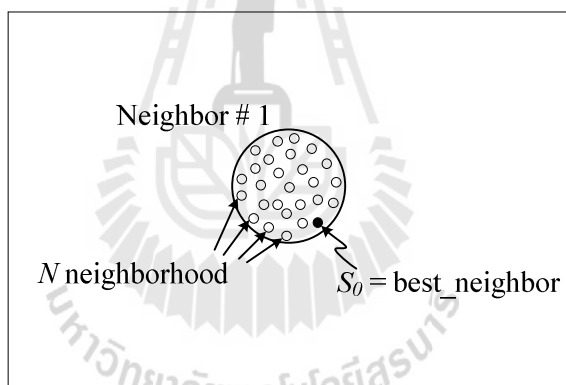
รูปที่ 3.2 ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ S_0

ขั้นตอนที่ 4 ทำการประเมินคำตอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสมาชิกใน $S(R)$ โดยกำหนดให้ S_1 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

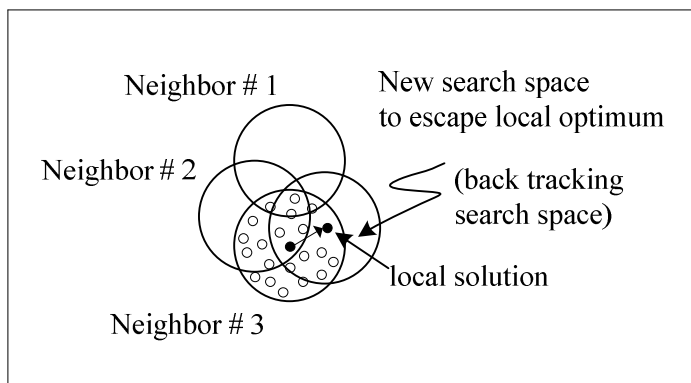


รูปที่ 3.3 กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่



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 เมื่อจำนวนคำตอบในแต่ละรอบไม่หลุดออก จากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่น (local solution) เป็นจำนวนเท่ากับจำนวนคำตอบสูงสุดที่ได้ทำ การตั้งค่าไว้ กลไกนี้จะเลือกคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการค้นหาในพื้นที่การค้นหาเดิมในรายการตาม เพื่อนำมากำหนดเป็นคำตอบเริ่มต้นสำหรับการค้นหาในรอบถัดไป ทั้งนี้เพื่อให้หลุดออกจาก คำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ดังรูปที่ 3.5

ขั้นตอนที่ 8 จะเข้าสู่กลไกการปรับค่ารัศมีการค้นหา โดยจะปรับลดรัศมีลงเรื่อย ๆ ตาม ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.1)

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

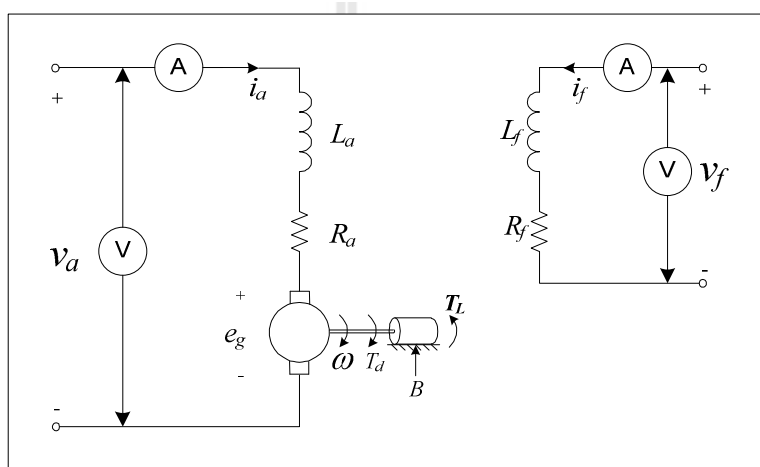
โดยที่ DF คือ ตัวประกอบปรับลดค่ารัศมี (Decreasing Factor)

3.3 การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์

การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ด้วยวิธี ATS ในงานวิจัยนี้ จะค้นหาค่าพารามิเตอร์ของ สมการกำลังงานสูญเสียรวมในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ดังสมการที่ (2.25) โดยจะดำเนินการค้นหาพารามิเตอร์ 2 ค่า คือ ค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสีย ฮีสเทอรีซิส (K_h) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก และค่าคงที่ของกำลังงาน สูญเสียจากการใช้งาน (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



รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

การดำเนินการทดสอบมอเตอร์ จะดำเนินการดังนี้ คือ

- การทดสอบที่ 80% และ 90% ของความเร็วพิกัด จะปรับกระแสและแรงดันสนามให้คงที่ที่พิกัด และปรับแรงดันอาร์เมเจอร์ให้ได้ความเร็วตามที่ต้องการ

- การทดสอบที่ 100% ของความเร็วพิกัด จะปรับกระแสและแรงดันของวงจรมอเตอร์และวงจรรอาร์เมเจอร์ไปที่พิกัด

- การทดสอบที่ 110% และ 120% ของความเร็วพิกัด จะปรับแรงดันอาร์เมเจอร์ให้คงที่ที่พิกัด และปรับแรงดันทางฝั่งวงจรมอเตอร์ให้ได้ความเร็วตามที่ต้องการ

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

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

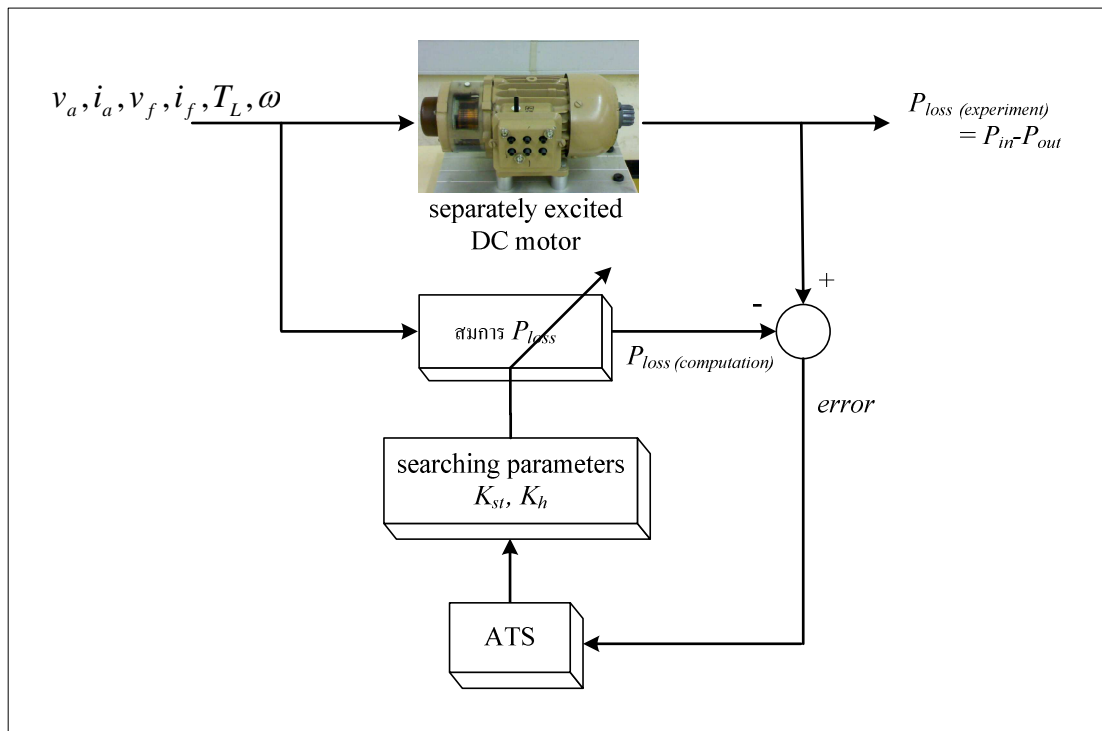
ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบมอเตอร์

speed		v_a (V)	i_a (A)	v_f (V)	i_f (A)	T_L (N·m)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	P_{loss} (W)
%	rad/s								
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 วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว หรือ

วิธี 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} เป็นค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน ซึ่งโดยทั่วไปสามารถคำนวณกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งานได้จากสมการที่ (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 ได้สมการกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งานดังสมการที่ (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 1×10^{-9} - 1×10^{-6}

- ขอบเขตค่า K_h

ขอบเขตค่า K_h ได้มาจากการศึกษาของ Zaki ในปี 1998 จากการศึกษาของ Zaki เป็นมอเตอร์ขนาดใหญ่ ขนาด 1kW มีค่า $K_h = 0.067$ แต่มอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นมอเตอร์ขนาด

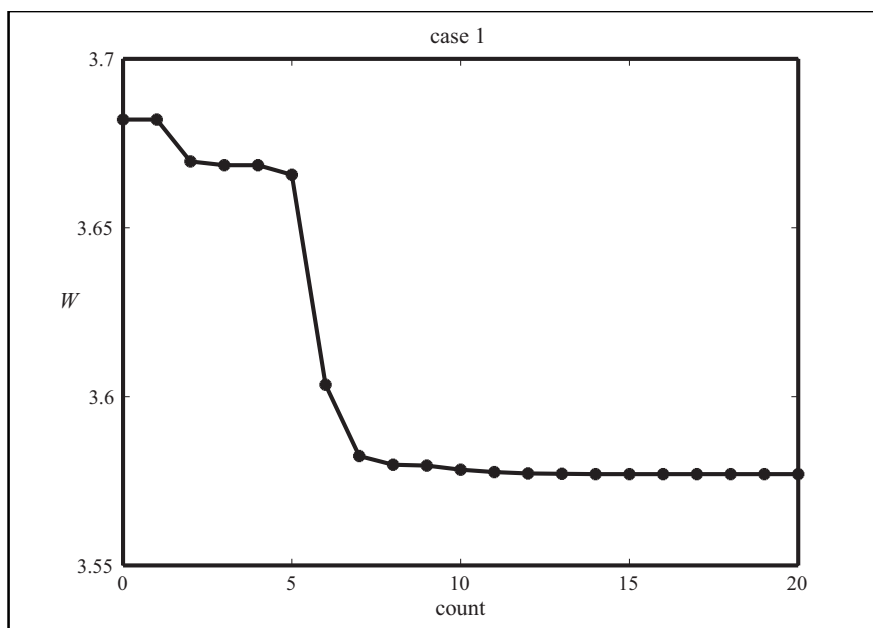
300 W ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า ดังนั้นค่า K_h จึงน่าจะมีค่าน้อยกว่าจึงกำหนดให้มีขอบเขตอยู่ในช่วง $1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-1}$

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 ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ขอบเขตของกรณีดังกล่าวในการค้นหาโดยวิธี ATS

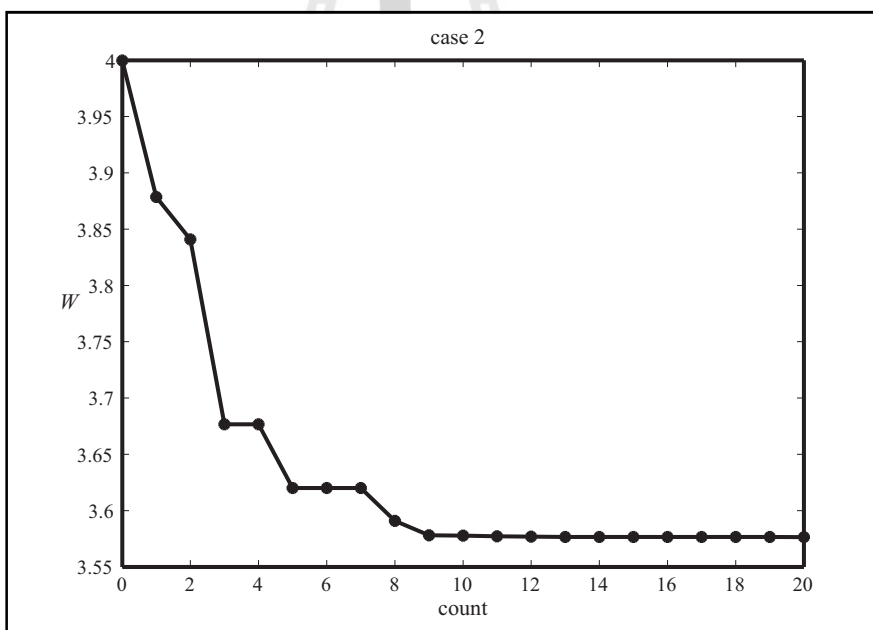
ตารางที่ 3.2 ผลการกำหนดขอบเขตการค้นหา กรณีที่ 1 ถึงกรณีที่ 4

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}	

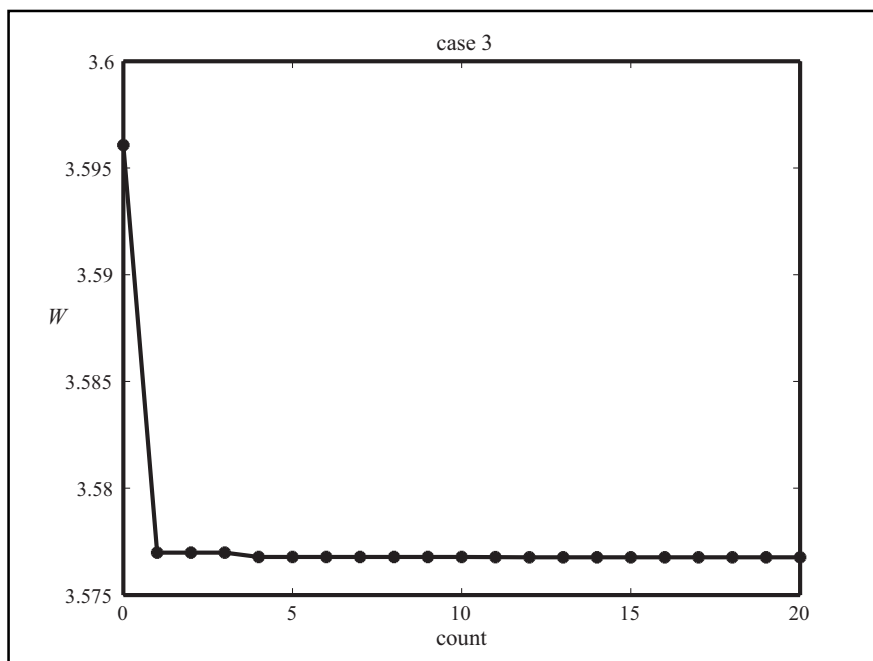
การปรับขอบเขตในแต่ละกรณีจะได้กราฟการลู่เข้าดังรูปที่ 3.9 ถึง 3.12 เมื่อพิจารณาจากกราฟจะสังเกตได้ว่าการลู่เข้าหาคำตอบเป็นไปอย่างรวดเร็วและรูปที่ 3.13 คือ กราฟการลู่เข้ารวมของทั้ง 4 กรณี เปรียบเทียบกัน แสดงได้ดังนี้



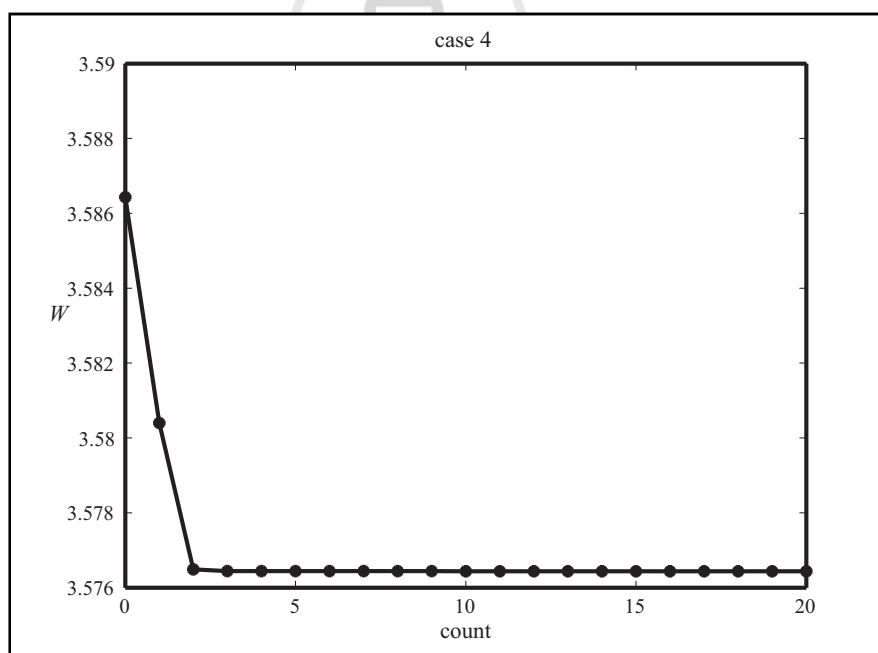
รูปที่ 3.9 การลู่เข้าหาคำตอบ W ของขอบเขตการค้นหาคำถามที่ 1



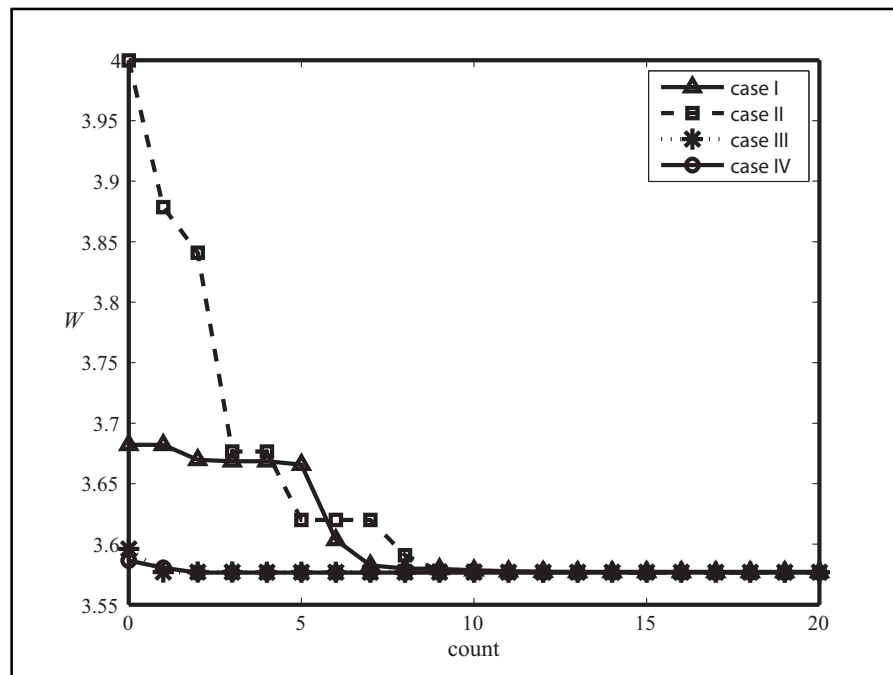
รูปที่ 3.10 การลู่เข้าหาคำตอบ W ของขอบเขตการค้นหาคำถามที่ 2



รูปที่ 3.11 การลู่เข้าหาคำตอบ W ของขอบเขตการค้นหาค่าที่ 3



รูปที่ 3.12 การลู่เข้าหาคำตอบ W ของขอบเขตการค้นหาค่าที่ 4



รูปที่ 3.13 การลู่เข้าหาคำตอบ W ของขอบเขตการค้นหา

3.3.3 การทดสอบพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว

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

ตารางที่ 3.3 การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น

ค่าที่ทดสอบ \ ครั้ง	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 \mathcal{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 \mathcal{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 \mathcal{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 \mathcal{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 \mathcal{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 \bar{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 \bar{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 \bar{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 \bar{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 \bar{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 \bar{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

ค่าที่ทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่					ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1							
ค่า μ	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 μ	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 μ	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 μ	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 μ	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 μ	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

ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่					ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
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 มีค่าน้อยที่สุดและจำนวนรอบที่น้อยที่สุดด้วย 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 ในงานวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับค่า W และจำนวนรอบเป็นสำคัญ ด้วยเหตุนี้จึงพิจารณาผลจากส่วนที่ 1 เป็นสำคัญและจากการพิจารณาในส่วนที่ 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 จำเป็นต้องทำการตรวจสอบผลการค้นหา ซึ่งจะอธิบายไว้ในหัวข้อต่อไป

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

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

3.4 สรุป

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

บทที่ 4

การประหยัดพลังงานการขับเคลื่อนที่ใช้วิธีทางคณิตศาสตร์

4.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น การวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวกับการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ชนิดดังกล่าว จากการศึกษาพบว่า Kusko and Galler (1983) ได้นำเสนอวิธีการประหยัดพลังงานโดยอาศัยวิธีทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณ เพื่อให้เกิดการประหยัดพลังงานให้มากที่สุด โดยในบทนี้จะอธิบายวิธีทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นวิธีที่เรียกว่า วิธีหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization Method : OM) นอกจากนี้จะนำเสนอผลการคำนวณการประหยัดพลังงานที่ใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ และการเปรียบเทียบผลการคำนวณดังกล่าวกับการคำนวณด้วยวิธีดั้งเดิม

4.2 การใช้วิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับประหยัดพลังงาน

วิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน เป็นวิธีที่อาศัยการหาอนุพันธ์ของสมการกำลังงานสูญเสียเทียบกับกระแสสนาม ให้เท่ากับศูนย์ โดยสมการกำลังงานสูญเสียที่ใช้แสดงได้ดังสมการที่ (4.1) เป็นสมการเดียวกับสมการที่ (2.25) ในบทที่ 2 ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการคือ R_a เท่ากับ 15.99Ω , R_f เท่ากับ 735.43Ω , K_{st} เท่ากับ 8.68×10^{-7} และ K_h เท่ากับ 4.77×10^{-8} พารามิเตอร์ดังกล่าวได้จากการคำนวณและจากวิธี ATS ในบทที่ 3 การประหยัดพลังงานโดยใช้วิธีดังกล่าว มีเป้าหมาย คือ ต้องการหาค่ากระแสสนามที่ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียต่ำที่สุด ที่ค่าความเร็วและแรงบิดต่าง ๆ และจากการศึกษาของ Kusko and Galler (1983) ได้กำหนดว่ากระแสอาร์มเจอร์ของมอเตอร์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.2) ดังนี้

$$P_{loss} = i_a^2 R_a + i_f^2 R_f + 2i_a + K_{st} i_a^2 \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 + K_h i_f^2 \omega \quad (4.1)$$

$$i_a = \frac{T}{K'_e K_f i_f} \quad (4.2)$$

ค่า K_f ในสมการที่ (4.2) เป็นฟังก์ชันของกระแสสนาม แสดงได้ดังสมการที่ (4.3) คือ

$$K_f = f(i_f) \quad (4.3)$$

แทนค่าสมการที่ (4.2) ลงในสมการที่ (4.1) และทำการปรับรูปสมการใหม่จะได้ดังสมการที่ (4.4) ดังนี้

$$P_{loss} = \left[R_a + K_{st} \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 \right] \cdot \frac{T^2}{K_e'^2 K_f^2 i_f^2} + \frac{2T}{K_e' K_f i_f} + (R_f + K_h \omega) i_f^2 \quad (4.4)$$

วัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ ต้องการคำนวณค่ากระแสสนามที่ทำให้กำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นจึงดำเนินการหาอนุพันธ์ของกำลังงานสูญเสีย สมการที่ (4.4) เทียบกับกระแสสนาม เท่ากับศูนย์ แสดงได้ดังสมการที่ (4.5)

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial i_f} = \frac{\partial}{\partial i_f} \left[\left[R_a + K_{st} \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 \right] \cdot \frac{T^2}{K_e'^2 K_f^2 i_f^2} + \frac{2T}{K_e' K_f i_f} + (R_f + K_h \omega) i_f^2 \right] = 0$$

หรือ

$$(R_f + K_h \omega) i_f^4 - \frac{T}{K_e' K_f^2} \frac{\partial K_f}{\partial i_f} i_f^2 - \left[\frac{T}{K_e' K_f} \left[R_a + K_{st} \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 \right] \cdot \frac{T^2}{K_e'^2 K_f^3} \frac{\partial K_f}{\partial i_f} \right] i_f - \left[R_a + K_{st} \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 \right] \cdot \frac{T^2}{K_e'^2 K_f^2} = 0 \quad (4.5)$$

จากสมการที่ (4.5) กำหนดให้ K_f เป็นค่าคงที่ ซึ่ง $\frac{\partial K_f}{\partial i_f} = 0$ ดังนั้นจะได้ดังสมการที่ (4.6)

ดังนี้

$$(R_f + K_h \omega) i_f^4 - \left(\frac{T}{K_e' K_f} \right) i_f - \left[R_a + K_{st} \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 \right] \cdot \frac{T^2}{K_e'^2 K_f^2} = 0 \quad (4.6)$$

ทำการกำหนดตัวแปรใหม่ได้ดังนี้

$$A = R_f + K_h \omega$$

$$D = -\frac{T}{K'_e K_f}$$

$$E = -\left[R_a + K_{sr} \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 \right] \cdot \frac{T^2}{K'_e{}^2 K_f^2}$$

ดังนั้นสมการที่ (4.6) จึงเปลี่ยนเป็นสมการที่ (4.7) คือ

$$Ai_f^4 + Di_f + E = 0 \quad (4.7)$$

จากสมการที่ (4.7) เป็นสมการกำลังสี่ สามารถแก้สมการด้วยวิธีการของ Lodovico Ferrari (Jean and Tignol, 2001) ซึ่งจะแสดงวิธีการแก้สมการที่ (4.7) เป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1: คำนวณ β จาก $\beta = \frac{D}{A}$ และ γ จาก $\gamma = \frac{E}{A}$

ขั้นตอนที่ 2: ใช้สมการ $P = -\gamma$ และ $Q = -\frac{\beta^2}{8}$ คำนวณค่า P และ Q

ขั้นตอนที่ 3: คำนวณค่า R จาก $R = -\frac{Q}{2} \pm \sqrt{\frac{Q^2}{4} + \frac{P^3}{27}}$

ขั้นตอนที่ 4: ใช้ค่า R จากขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาค่า U โดย $U = \sqrt[3]{R}$

ขั้นตอนที่ 5: คำนวณค่า y จากสมการที่ (4.8) คือ

$$y = \begin{cases} U - \frac{P}{3U}, & \text{if } U \neq 0 \\ U - \sqrt[3]{Q}, & \text{if } U = 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

ขั้นตอนที่ 6: คำนวณค่า W โดยใช้สมการ $W = \sqrt{2y}$

ขั้นตอนที่ 7: คำนวณค่า i_f ที่ทำให้ค่ากำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด ดังสมการที่ (4.9)

$$i_f = \frac{\pm_s W \mp \sqrt{-\left(2y \pm_s \frac{2\beta}{W}\right)}}{2} \quad (4.9)$$

จากการคำนวณทั้ง 7 ขั้นตอน สุดท้ายจะได้ค่ากระแสสนามที่ทำให้เกิดการประหยัดในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ค่ากระแสสนามที่ได้จากสมการที่ (4.9) จะได้คำตอบออกมาทั้งหมด 4 ค่า ซึ่งจากค่ากระแสสนามทั้ง 4 ค่า จะต้องเลือกเพียง 1 ค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังงานต่อไป โดยเกณฑ์การเลือกคำตอบที่เหมาะสม คือ ค่ากระแสสนามต้องไม่ติดลบ ค่ากระแสสนามต้องไม่มีค่าเป็นศูนย์ และค่ากระแสสนามต้องมีค่าไม่เกินค่าพิกัด และอีกประเด็นหนึ่งที่ต้องพิจารณาหลังจากเลือกค่ากระแสสนามแล้ว คือ นำค่ากระแสสนามที่ได้แทนลงในสมการที่ (4.7) ถ้าค่ากระแสสนามที่แทนลงไปทำให้สมการดังกล่าวเป็นจริง จึงสรุปได้ว่าค่ากระแสสนามนั้นทำให้ค่ากำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งทำให้เกิดการประหยัดพลังงานขึ้น

4.3 ผลการคำนวณการประหยัดพลังงานที่ใช้วิธีทางคณิตศาสตร์

ผลการคำนวณการประหยัดพลังงานที่ใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ จะคำนวณหาค่ากำลังงานอินพุตเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับการคำนวณกำลังงานอินพุตการขับเคลื่อนด้วยวิธีดั้งเดิมตามที่อธิบายไว้ในบทที่ 2 ตารางที่ 2.1 โดยการเปรียบเทียบนี้จะดำเนินการหาเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานจากสมการที่ (4.10) ซึ่งจะได้ผลการคำนวณตามตารางที่ 4.1 ดังต่อไปนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน} = \frac{P_{in,classical} - P_{in,OM}}{P_{in,classical}} \times 100\% \quad (4.10)$$

โดยที่ $P_{in,classical}$ คือ กำลังงานอินพุตที่อาศัยการขับเคลื่อนด้วยวิธีดั้งเดิม

$P_{in,OM}$ คือ กำลังงานอินพุตที่อาศัยการขับเคลื่อนด้วยการคำนวณทางคณิตศาสตร์

ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานระหว่างวิธีดั้งเดิมกับวิธีทางคณิตศาสตร์

T_L (N·m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			วิธีทางคณิตศาสตร์			เปอร์เซ็นต์การ ประหยัดพลังงาน
		i_f (A)	v_a (V)	P_{in} (W)	i_f (A)	v_a (V)	P_{in} (W)	
0.2	1000	0.30	82.51	88.09	0.11	40.75	38.40	56.41
	2000	0.30	160.73	109.03	0.12	71.73	59.47	45.46
	2750	0.30	220.00	125.09	0.12	97.08	75.38	39.74
0.4	1000	0.30	86.79	112.47	0.16	57.49	76.78	31.73
	2000	0.30	165.01	154.36	0.16	101.08	118.88	22.99
	2750	0.29	220.00	183.79	0.17	136.80	150.70	18.00
0.6	1000	0.30	91.07	139.15	0.19	70.33	115.16	17.24
	2000	0.30	169.29	201.98	0.20	123.59	178.30	11.72
	2750	0.29	220.00	245.07	0.21	167.27	226.00	7.78
0.8	1000	0.30	95.35	168.12	0.22	81.15	153.53	8.68
	2000	0.30	173.58	251.89	0.23	142.58	237.71	5.63
	2750	0.28	220.00	309.47	0.24	192.96	301.30	2.64
1	1000	0.30	99.63	199.38	0.25	90.69	191.91	3.75
	2000	0.30	177.86	304.09	0.26	159.30	297.11	2.30
	2750	0.27	220.00	377.67	0.27	215.59	376.60	0.28
1.2	1000	0.30	103.91	232.93	0.27	99.31	230.28	1.14
	2000	0.30	182.14	358.59	0.28	174.42	356.52	0.58
	2750	0.27	220.00	450.07	0.27	220.00	450.07	ไม่ประหยัด
1.4	1000	0.30	108.19	268.77	0.29	107.24	268.66	0.04
	2000	0.30	186.42	415.38	0.30	186.42	415.57	ไม่ประหยัด
	2750	0.26	220.00	528.09	0.26	220.00	528.09	ไม่ประหยัด
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	188.56	444.82	ไม่ประหยัด
	2750	0.26	220.00	532.84	0.26	220.00	532.84	ไม่ประหยัด

จากตารางที่ 4.1 พบว่าการคำนวณด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ทำให้เกิดการประหยัดพลังงานขึ้น ยกตัวอย่างที่ T_L เท่ากับ 0.2 N·m และ N เท่ากับ 1000 rpm ค่ากระแสสนามจากการคำนวณด้วยวิธีดั้งเดิม เท่ากับ 0.3 A และกำลังงานอินพุต เท่ากับ 88.09 W แต่เมื่อคำนวณด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ค่ากระแสสนามและกำลังงานอินพุต เท่ากับ 0.11 A และ 38.40 W ตามลำดับ จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าการคำนวณค่ากระแสสนามด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์สามารถประหยัดพลังงานได้ 56.41% ที่จุดการทำงานนี้ และต่อมาเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานจะลดลงเมื่อแรงบิดโหลดมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ มีบางจุดการทำงานที่ไม่สามารถประหยัดพลังงานได้ เช่น ที่ T_L เท่ากับ 1.4 N·m และ N เท่ากับ 2000 rpm

4.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนที่ใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ โดยจะคำนวณค่ากระแสสนามที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถลดกำลังงานสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจากผลการคำนวณในช่วงแรงบิดต่ำคือ ประมาณไม่มีโหลดจนถึงครึ่งหนึ่งของโหลดเต็มพิกัด สามารถลดกำลังงานสูญเสียได้ดี โดยเฉพาะในช่วงความเร็วรอบต่ำ ๆ แต่เมื่อแรงบิดของโหลดเข้าใกล้พิกัด การลดกำลังงานสูญเสียจะน้อยลง

บทที่ 5

การประหยัดพลังงานการขับเคลื่อนที่ใช้วิธีฐานแบบจำลอง

5.1 บทนำ

การหาวิธีประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น คือ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ดังนั้นจึงทำการศึกษาค้นคว้างานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงาน ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 โดยงานวิจัยดังกล่าวได้นำเสนอวิธีการประหยัดพลังงานโดยอาศัยวิธีทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นวิธีที่มีความยุ่งยาก ซับซ้อน ผู้วิจัยจึงคิดค้นวิธีการประหยัดพลังงานขึ้นใหม่ โดยจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสมการคำนวณของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เป็นฐานในการคำนวณเพื่อให้เกิดการประหยัดพลังงาน โดยจะเรียกวิธีประหยัดพลังงานที่คิดค้นใหม่นี้ว่า วิธีฐานแบบจำลอง (Model Based Method : MBM) นอกจากนี้จะนำเสนอผลการคำนวณพลังงานไฟฟ้าด้วยวิธีฐานแบบจำลอง และการเปรียบเทียบผลการคำนวณดังกล่าวกับอีก 2 วิธี คือ การคำนวณด้วยวิธีดั้งเดิมและวิธีทางคณิตศาสตร์ เพื่อแสดงให้เห็นว่าวิธีฐานแบบจำลองสามารถประหยัดพลังงานได้

5.2 การใช้วิธีฐานแบบจำลองสำหรับประหยัดพลังงาน

วิธีฐานแบบจำลองสำหรับการประหยัดพลังงาน จะใช้วิธีการควบคุมมอเตอร์ทั้งการควบคุมกระแสสนามและการควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์ควบคู่กัน โดยการควบคุมกระแสสนามมีวัตถุประสงค์เพื่อประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อน ส่วนการควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมความเร็วให้ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งการคำนวณจะมีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

5.2.1 การหาจุดการทำงานสำหรับประหยัดพลังงาน

การหาจุดการทำงานเพื่อประหยัดพลังงาน จะคำนวณจากสมการพื้นฐานของมอเตอร์ซึ่งอธิบายไว้ในบทที่ 2 โดยเริ่มต้นจากการแทนค่ากระแสสนามตั้งแต่ 0.1-0.3 A จำนวน 30 ค่า ลงในสมการเพื่อคำนวณหาค่า v_f , i_a , v_a และ P_{loss} ต่าง ๆ ที่ทำให้ได้ค่าความเร็วและแรงบิดตามที่กำหนด โดยได้ยกตัวอย่างการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 0.6 N·m ดังต่อไปนี้

- ตัวอย่างการคำนวณหาจุดที่เกิดการประหยัดพลังงาน ที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 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 (5.1) คือ

$$i_a = \frac{T_L}{K i_f} \quad (5.1)$$

ขั้นที่ 4 คำนวณค่าแรงดันเหนี่ยวนำด้านกลับ จากสมการที่ (5.2) คือ

$$e_g = K i_f \omega \quad (5.2)$$

ขั้นที่ 5 คำนวณค่าแรงดันสนามและแรงดันอาร์เมเจอร์ จากสมการที่ (5.3) และ (5.4) ตามลำดับ ดังนี้

$$v_f = i_f R_f \quad (5.3)$$

$$v_a = i_a R_a + e_g \quad (5.4)$$

ขั้นที่ 6 คำนวณค่ากำลังงานสูญเสีย จากสมการที่ (5.5) ดังนี้

$$P_{loss} = 15.99 i_a^2 + 735.43 i_f^2 + 2 i_a + (7.92 \times 10^{-5}) i_a^2 \omega^2 + (4.77 \times 10^{-8}) i_f^2 \omega \quad (5.5)$$

จากการคำนวณทั้ง 6 ขั้นตอน จะได้ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 0.6 N·m ดังตารางที่ 5.1 ดังต่อไปนี้

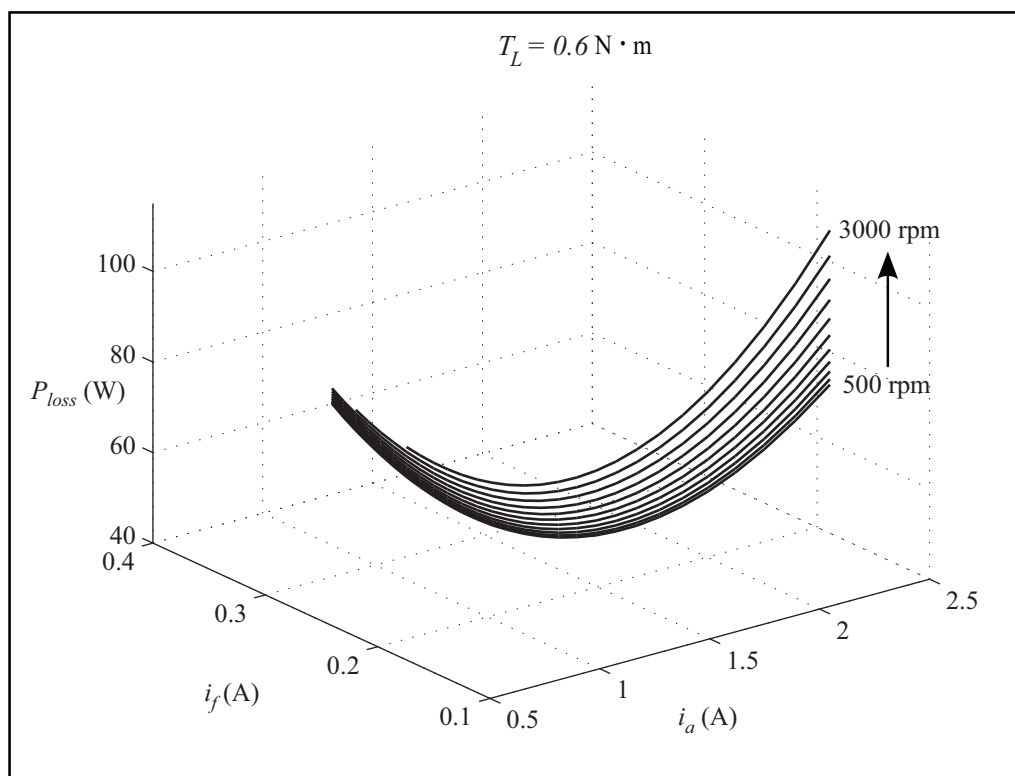
ตารางที่ 5.1 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 0.6 N·m

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
0.1207	88.7588	1.9966	47.6600	79.3104

ตารางที่ 5.1 ผลการคำนวณที่ความเร็ว 500 rpm และแรงบิด 0.6 N·m (ต่อ)

i_f (A)	v_f (V)	i_a (A)	v_a (V)	P_{loss} (W)
0.1277	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 5.1 พบว่ากำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด เท่ากับ 55.1562 W ในสภาวะกระแสสนาม เท่ากับ 0.1897 A และเมื่อนำไปพล็อตกราฟดูความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสนาม กระแสอาร์เมเจอร์และกำลังงานสูญเสีย จะได้ดังรูปที่ 5.1 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.1 กราฟจุดต่ำสุดของกำลังงานสูญเสียเมื่อ แรงบิด โหลด 0.6 N · m ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

จากรูปที่ 5.1 คือ กราฟแสดงจุดต่ำสุดของกำลังงานสูญเสียเมื่อคำนวณโดยกำหนดแรงบิด เท่ากับ 0.6 N · m และเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วรอบตั้งแต่ 500-3000 rpm เพิ่มทีละ 250 rpm ซึ่งจุดต่ำสุดในกราฟ หมายถึง จุดที่กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ซึ่งก็คือ จุดที่เกิดการประหยัดพลังงาน

5.2.2 การคำนวณกำลังงานอินพุต

จากหัวข้อ 5.2.1 เมื่อทำการคำนวณที่ค่าความเร็วรอบและแรงบิดที่แตกต่างกันไป จะได้ค่าต่าง ๆ ของจุดที่เกิดการประหยัดพลังงาน ค่าที่ได้ คือ ค่าแรงดันสนาม แรงดันอาร์เมเจอร์ กระแสสนามและกระแสอาร์เมเจอร์ ซึ่งค่าเหล่านี้จะนำไปคำนวณค่ากำลังงานอินพุต ตามสมการที่ (5.6) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบในขั้นตอนต่อไปและได้แสดงผลจากการคำนวณแสดงไว้ดังตารางที่ 5.2 จากตารางนี้ได้กำหนดค่าความเร็วรอบและแรงบิดต่าง ๆ คือ กำหนดค่าความเร็วรอบ เท่ากับ

500-3000 rpm และกำหนดค่าแรงบิด เท่ากับ 0.2-1.4 N · m และ 1.5 N · m ซึ่งที่ค่าแรงบิด 1.5 N · m นี้คือ ค่าพิกัดของมอเตอร์ โดยต่อไปจะเรียกข้อมูลเหล่านี้ว่า จุดทดสอบ

$$P_{in} = v_a i_a + v_f i_f \quad (5.6)$$

ตารางที่ 5.2 จุดที่เกิดการประหยัดพลังงานในแต่ละความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์

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 5.2 จุดที่เกิดการประหยัดพลังงานในแต่ละความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ (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 5.2 จุดที่เกิดการประหยัดพลังงานในแต่ละความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ (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
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 5.2 จุดที่เกิดการประหยัดพลังงานในแต่ละความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ (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

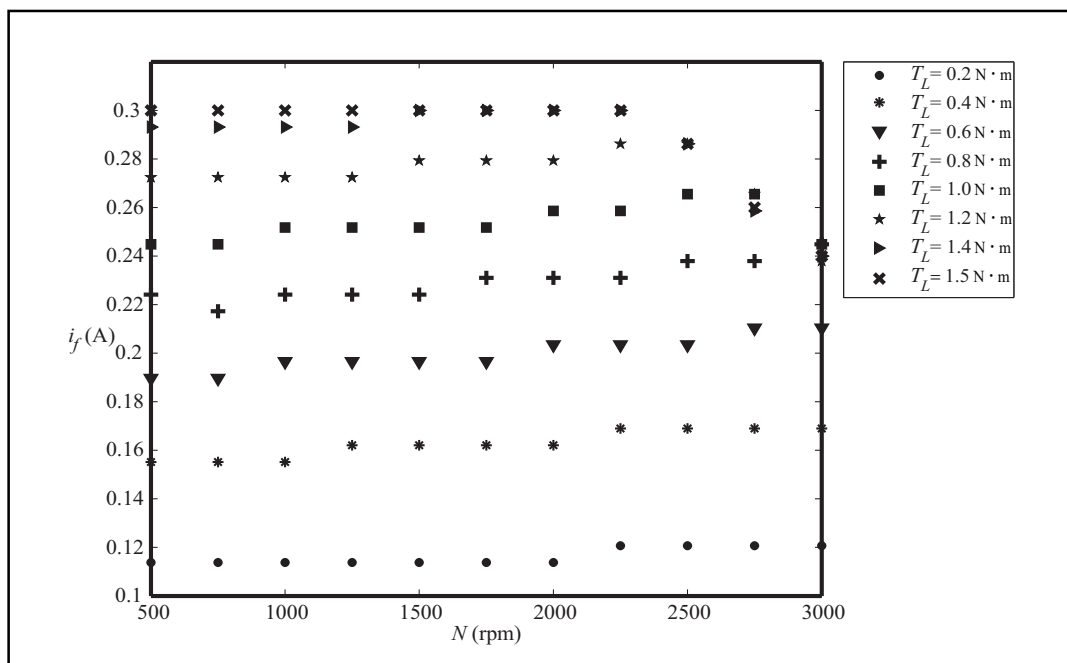
จากตารางที่ 5.2 นำข้อมูลจากการคำนวณ ไปพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนาม แสดงได้ดังรูปที่ 5.2 โดยจากรูปที่ 5.2 สังเกตได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนามของแต่ละแรงบิดที่กำหนด มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น หากต้องการคำนวณเมื่อต้องการค่าที่อยู่นอกเหนือจากจุดที่ทดสอบมา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาสมการเพื่อแทนความสัมพันธ์ดังกล่าว ซึ่งจะอธิบายไว้ในหัวข้อถัดไป

5.2.3 การหาสมการแทนความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนาม

การหาสมการแทนความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนาม มีวัตถุประสงค์ คือ เพื่อประมาณค่าจุดที่เกิดการประหยัดพลังงานได้ ไม่ว่าจะกำหนดค่าตามที่ได้ทดสอบมาหรือนอกช่วงของจุดทดสอบ โดยสมการแทนความสัมพันธ์ดังกล่าวจะใช้วิธีการประมาณค่า ซึ่งจะเปรียบเทียบกัน 3 วิธี ดังต่อไปนี้

- วิธีที่ 1 การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression : LR)

การถดถอยเชิงเส้น คือ การแทนชุดข้อมูลด้วยสมการเส้นตรง มีสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5.7) ดังนี้



รูปที่ 5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนาม

$$i_f = a_0 + a_1 N \quad (5.7)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ a_1 และ a_0 หาได้จากสมการที่ (5.8) และ (5.9) ตามลำดับ

$$a_1 = \frac{n \sum N i_f - \sum N \sum i_f}{n \sum N^2 - (\sum N)^2} \quad (5.8)$$

$$a_0 = \bar{i}_f - a_1 \bar{N} \quad (5.9)$$

โดยที่ N คือ ความเร็วรอบ (rpm)

n คือ จำนวนชุดข้อมูล

\bar{i}_f คือ กระแสสนามเฉลี่ย (A)

\bar{N} คือ ความเร็วรอบเฉลี่ย (rpm)

ดังนั้นจากข้อมูลในตารางที่ 5.2 จะได้สมการแทนความสัมพันธ์ด้วยวิธีถดถอยเชิงเส้น ตามจุดทดสอบแรงบิดทั้ง 8 ค่า ดังสมการที่ (5.10) ถึง (5.17) ดังต่อไปนี้

$$T_L = 0.2 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.1102 + (3.514 \times 10^{-6})N \quad (5.10)$$

$$T_L = 0.4 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.1513 + (6.521 \times 10^{-6})N \quad (5.11)$$

$$T_L = 0.6 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.1852 + (8.276 \times 10^{-6})N \quad (5.12)$$

$$T_L = 0.8 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.214 + (9.028 \times 10^{-6})N \quad (5.13)$$

$$T_L = 1.0 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.2444 + (5.2664 \times 10^{-6})N \quad (5.14)$$

$$T_L = 1.2 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.281 - (4.765 \times 10^{-6})N \quad (5.15)$$

$$T_L = 1.4 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.313 - (1.492 \times 10^{-5})N \quad (5.16)$$

$$T_L = 1.5 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.322 - (1.823 \times 10^{-5})N \quad (5.17)$$

จากสมการที่ (5.10) ถึง (5.17) เมื่อแทนค่าความเร็วรอบลงไป จะได้ค่ากระแสสนามที่ทำให้ประหยัดพลังงานและสามารถนำค่ากระแสสนามดังกล่าวไปพล็อตกราฟเทียบกับรูปที่ 5.2 แสดงได้ดังรูปที่ 5.3

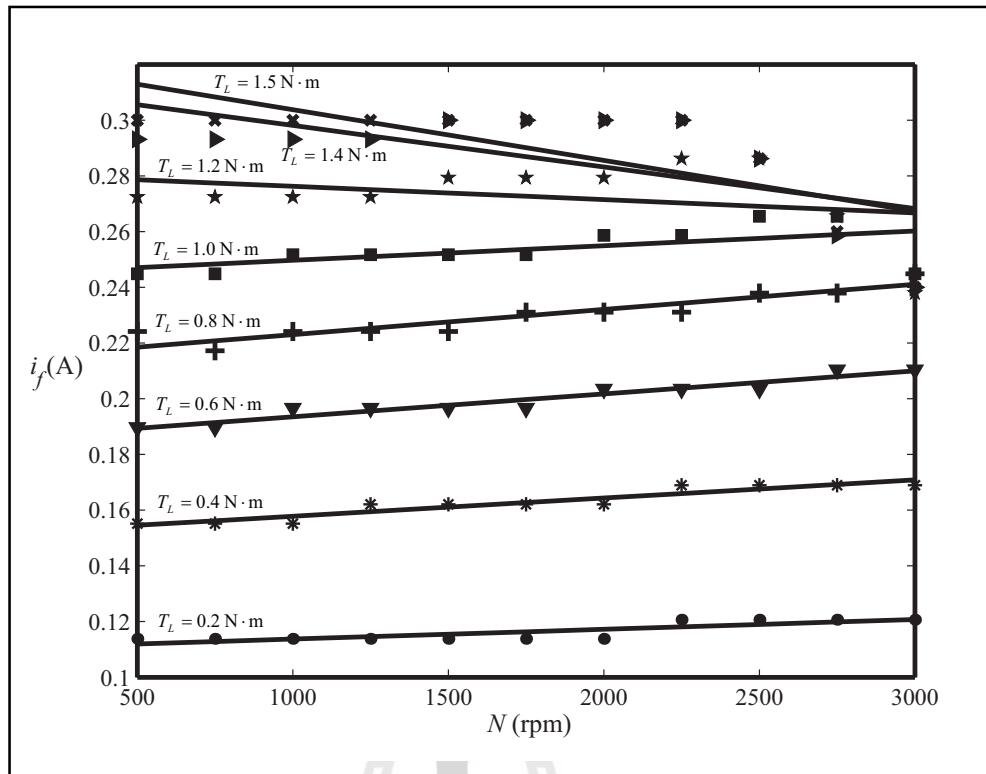
ค่ากระแสสนามที่ได้จากวิธีการถดถอยเชิงเส้น เมื่อนำไปคำนวณค่าต่าง ๆ เพื่อให้ได้ค่ากำลังงานอินพุต จะแสดงไว้ในตารางที่ 5.3 โดยตารางดังกล่าวจะรวมผลการคำนวณจากวิธีการประมาณค่าทั้ง 3 วิธีเข้าด้วยกัน เพื่อให้เห็นการเปรียบเทียบที่ชัดเจนยิ่งขึ้น

- วิธีที่ 2 การถดถอยของพหุนามกำลังสอง (2-order polynomial regression)

การถดถอยของพหุนามกำลังสอง คือ การแทนชุดข้อมูลด้วยสมการพหุนามกำลังสอง จะได้สมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5.18) ดังนี้

$$i_f = a_0 + a_1N + a_2N^2 \quad (5.18)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ a_0, a_1 และ a_2 หาได้จากสมการที่ (5.19) ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนาม
ที่ประมาณค่าจากวิธีการถดถอยเชิงเส้น

$$\begin{bmatrix} n & \sum N & \sum N^2 \\ \sum N & \sum N^2 & \sum N^3 \\ \sum N^2 & \sum N^3 & \sum N^4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum i_f \\ \sum N i_f \\ \sum N^2 i_f \end{Bmatrix} \quad (5.19)$$

ดังนั้นจะได้สมการจากวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสอง ดังสมการที่ (5.20) ถึง (5.27) ดังนี้

$$T_L = 0.2 \text{ N}\cdot\text{m} : \quad i_f = 0.1145 - (2.79 \times 10^{-6})N + (1.8 \times 10^{-9})N^2 \quad (5.20)$$

$$T_L = 0.4 \text{ N}\cdot\text{m} : \quad i_f = 0.1494 + (9.2213 \times 10^{-6})N - (7.716 \times 10^{-10})N^2 \quad (5.21)$$

$$T_L = 0.6 \text{ N}\cdot\text{m} : \quad i_f = 0.1868 + (6.026 \times 10^{-6})N + (6.43 \times 10^{-10})N^2 \quad (5.22)$$

$$T_L = 0.8 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.221 - (1.77 \times 10^{-6})N + (3.086 \times 10^{-9})N^2 \quad (5.23)$$

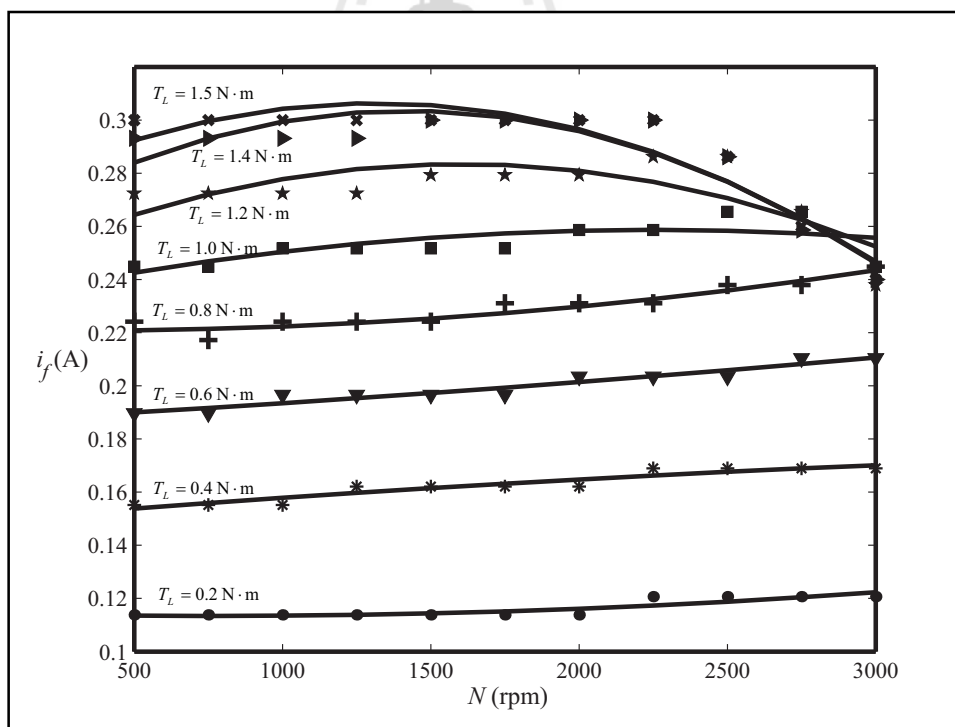
$$T_L = 1.0 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.232 + (2.372 \times 10^{-5})N - (5.272 \times 10^{-9})N^2 \quad (5.24)$$

$$T_L = 1.2 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.243 + (5.059 \times 10^{-5})N - (1.582 \times 10^{-8})N^2 \quad (5.25)$$

$$T_L = 1.4 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.257 + (6.54 \times 10^{-5})N - (2.3 \times 10^{-8})N^2 \quad (5.26)$$

$$T_L = 1.5 \text{ N} \cdot \text{m} : \quad i_f = 0.27 + (5.526 \times 10^{-5})N - (2.1 \times 10^{-8})N^2 \quad (5.27)$$

นำค่าความเร็วรอบแทนลงในสมการจากวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสอง ค่าต่าง ๆ ที่คำนวณได้นำไปเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 5.3 และนำค่ากระแสสนามพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับรูปที่ 5.2 จะได้ดังรูปที่ 5.4 ดังนี้



รูปที่ 5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนาม
ที่ประมาณค่าจากวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสอง

จากรูปที่ 5.4 สังเกตได้ว่าลักษณะเส้นกราฟจากวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสอง เป็นรูปเส้นโค้งพาราโบลา ซึ่งเส้นกราฟมีทั้งที่ผ่านจุดหรือใกล้เคียงค่าจากการคำนวณและห่างไกลค่าจากการคำนวณ ดังนั้นอาจเกิดความผิดพลาดบ้างเล็กน้อยในบางค่าที่ต้องการ

- วิธีที่ 3 การถดถอยของพหุนามกำลังสาม (3-order polynomial regression)

การถดถอยของพหุนามกำลังสาม คือ การแทนชุดข้อมูลด้วยสมการพหุนามกำลังสาม จะได้สมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5.28) ดังนี้

$$i_f = a_0 + a_1N + a_2N^2 + a_3N^3 \quad (5.28)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ a_0, a_1, a_2 และ a_3 หาได้จากสมการที่ (5.29)

$$\begin{bmatrix} n & \sum N & \sum N^2 & \sum N^3 \\ \sum N & \sum N^2 & \sum N^3 & \sum N^4 \\ \sum N^2 & \sum N^3 & \sum N^4 & \sum N^5 \\ \sum N^3 & \sum N^4 & \sum N^5 & \sum N^6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum i_f \\ \sum Ni_f \\ \sum N^2 i_f \\ \sum N^3 i_f \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

ดังนั้น จะได้สมการแทนความสัมพันธ์ด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสามตามจุดทดสอบแรงบิดทั้ง 8 ค่า ดังสมการที่ (5.30) ถึง (5.37) ดังต่อไปนี้

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

$$i_f = 0.12 - (1.71 \times 10^{-5})N + (1.11 \times 10^{-8})N^2 - (1.77 \times 10^{-12})N^3 \quad (5.30)$$

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

$$i_f = 0.155 - (3.79 \times 10^{-6})N + (7.69 \times 10^{-9})N^2 - (1.612 \times 10^{-12})N^3 \quad (5.31)$$

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

$$i_f = 0.183 + (1.49 \times 10^{-5})N - (5.13 \times 10^{-9})N^2 + (1.1 \times 10^{-12})N^3 \quad (5.32)$$

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

$$i_f = 0.224 - (7.88 \times 10^{-6})N + (7.06 \times 10^{-9})N^2 - (7.56 \times 10^{-13})N^3 \quad (5.33)$$

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

$$i_f = 0.26 - (4.4 \times 10^{-5})N + (3.88 \times 10^{-8})N^2 - (8.39 \times 10^{-12})N^3 \quad (5.34)$$

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

$$i_f = 0.31 - (1.1 \times 10^{-4})N + (8.83 \times 10^{-8})N^2 - (1.98 \times 10^{-11})N^3 \quad (5.35)$$

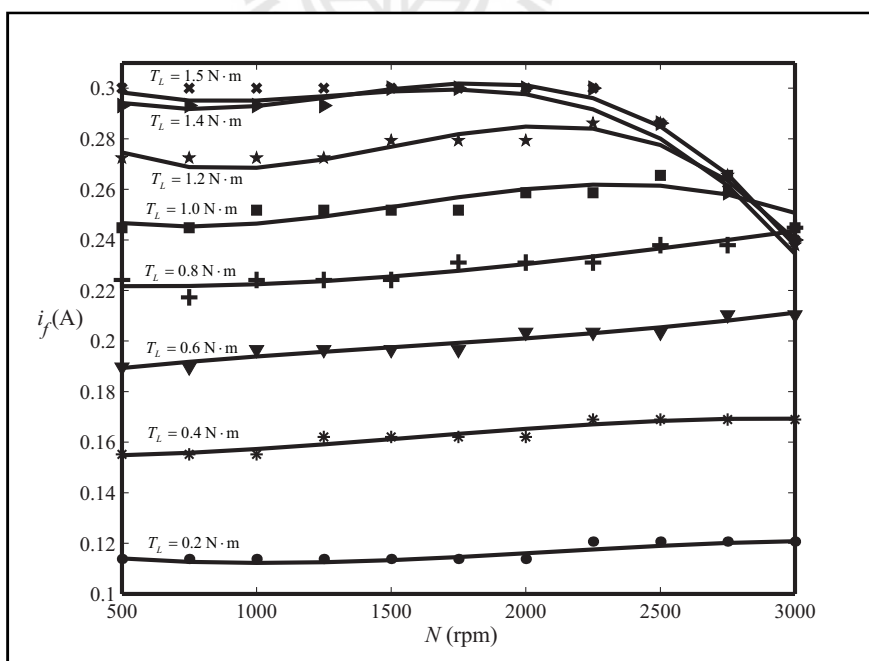
$$T_L = 1.4 \text{ N} \cdot \text{m} :$$

$$i_f = 0.316 - (7.3 \times 10^{-5})N + (6.71 \times 10^{-8})N^2 - (1.715 \times 10^{-11})N^3 \quad (5.36)$$

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

$$i_f = 0.32 - (6.96 \times 10^{-5})N + (6.02 \times 10^{-8})N^2 - (1.55 \times 10^{-11})N^3 \quad (5.37)$$

จากสมการที่ (5.30) ถึง (5.37) นำค่าความเร็วรอบแทนลงในสมการ ได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 5.3 และได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนามเปรียบเทียบกับรูปที่ 5.2 จะได้ดังรูปที่ 5.5 ดังนี้



รูปที่ 5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนาม
ที่ประมาณค่าจากวิธีการตัดยอดของพหุนามกำลังสาม

ตารางที่ 5.3 ผลจากการคำนวณด้วยสมการของทั้ง 3 วิธี

T_L (N·m)	N (rpm)	การถอดถอยเชิงเส้น			การถอดถอยพหุนาม กำลังสอง			การถอดถอยพหุนาม 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
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 5.3 พบว่าค่ากระแสสนามและแรงดันอาร์เมเจอร์จากทั้ง 3 วิธี มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นเมื่อคำนวณค่ากำลังงานอินพุต ค่าที่ได้จึงใกล้เคียงกันด้วย

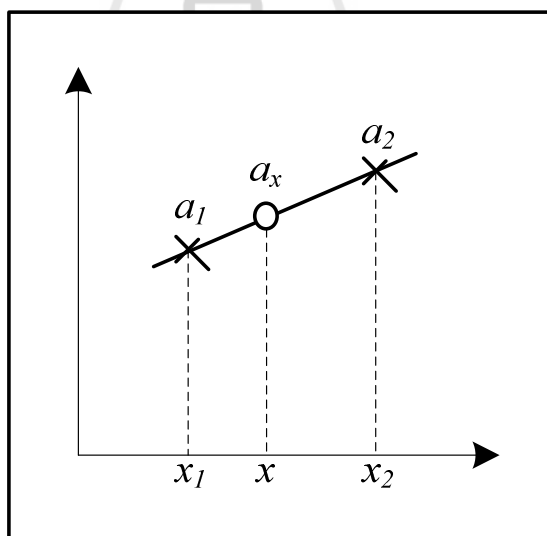
5.2.4 การประมาณค่าในกรณีอยู่นอกจุดทดสอบ

การประมาณค่าในกรณีที่อยู่นอกช่วงจุดทดสอบ จะใช้วิธีการประมาณค่าแบบเชิงเส้น (Linear Interpolation : LI) ซึ่งวิธีการประมาณค่าดังกล่าว คือ การหาค่าระหว่างจุดที่ไม่ตรงกับจุดข้อมูล ยกตัวอย่างเช่น จากรูปที่ 5.6 ต้องการหา a_x เมื่อทราบค่า a_1, a_2, x, x_1 และ x_2 ดังนั้นจากสมการที่ (5.38) คือ

$$\frac{a_2 - a_1}{a_x - a_1} = \frac{x_2 - x_1}{x - x_1} \quad (5.38)$$

ปรับรูปสมการใหม่เพื่อหาค่า a_x จะได้สมการที่ (5.39) ดังนี้

$$a_x = a_1 + \frac{(a_2 - a_1)(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} \quad (5.39)$$



รูปที่ 5.6 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 นำจุดทดสอบนอกช่วงเหล่านี้ไปทำการประมาณค่าแบบเชิงเส้นเพื่อนำไปหาสมการมาแทนความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสสนามเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 5.2.3 ซึ่งผลการคำนวณของจุดทดสอบนอกช่วงจากสมการทั้ง 3 วิธี ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.4 ดังต่อไปนี้

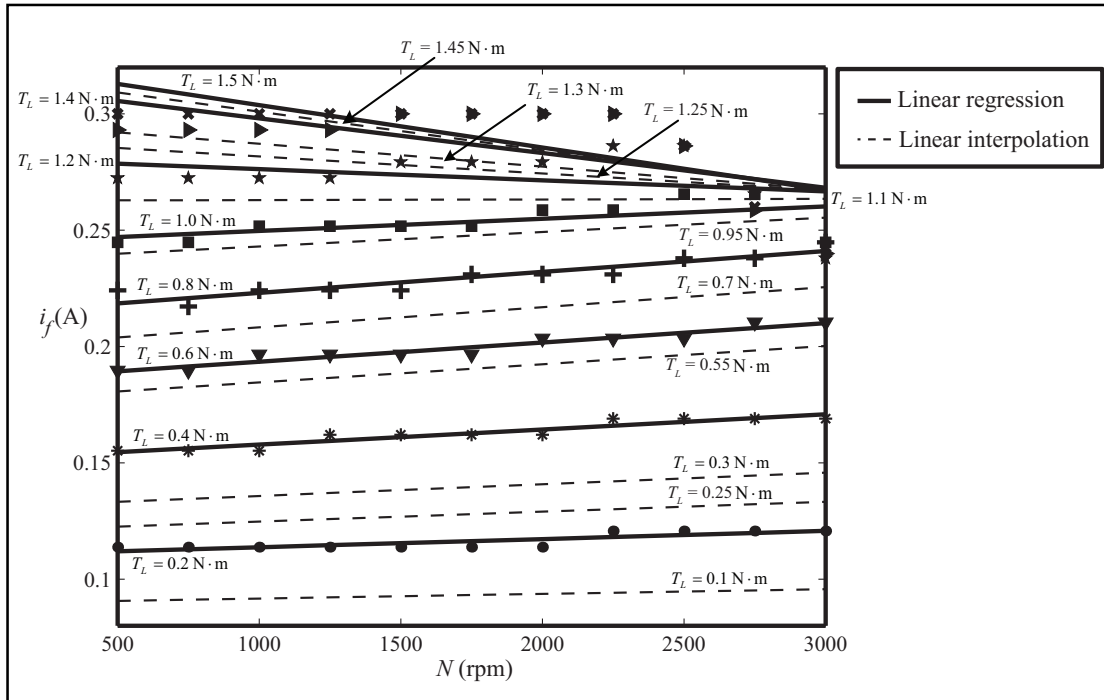
ตารางที่ 5.4 ผลจากการคำนวณด้วยสมการทั้ง 3 วิธี ในกรณีจุดทดสอบนอกช่วง

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)
0.1	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

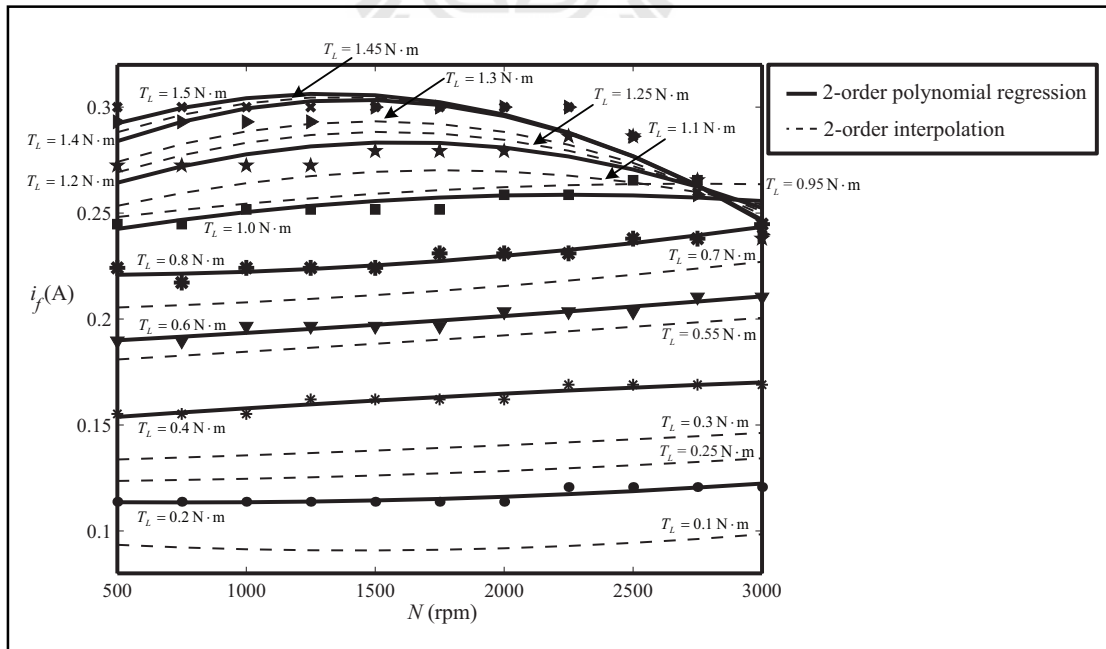
ตารางที่ 5.4 ผลจากการคำนวณด้วยสมการทั้ง 3 วิธี ในกรณีจุดทดสอบนอกช่วง (ต่อ)

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)
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

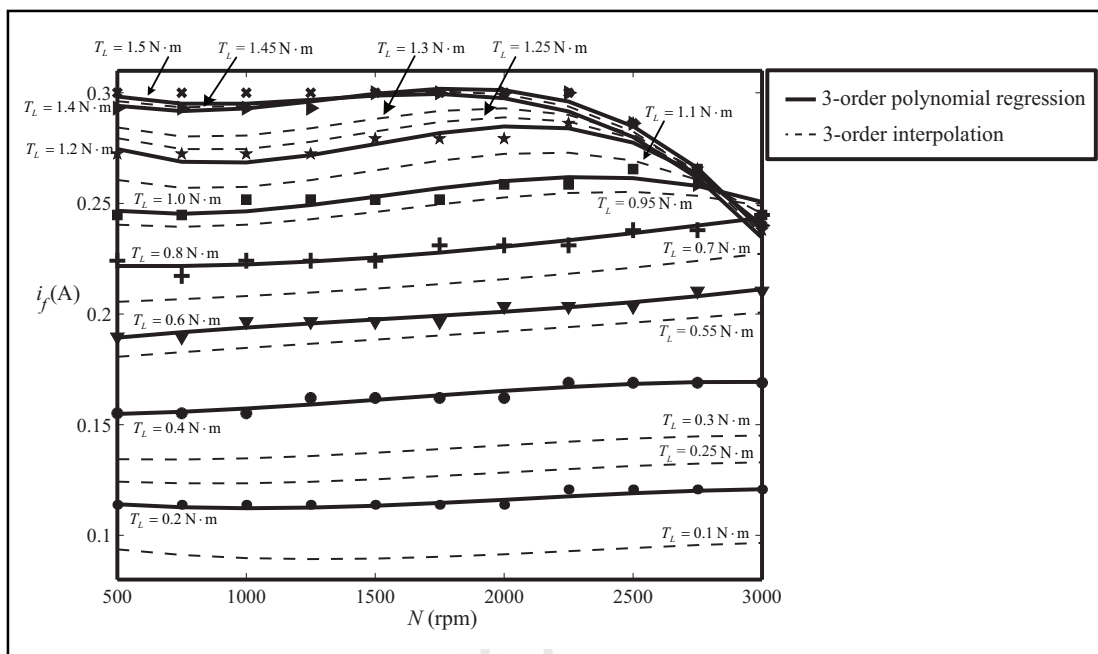
จากตารางที่ 5.4 ผลการคำนวณของจุดทดสอบนอกช่วงจากสมการทั้ง 3 วิธี ค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกันและนำข้อมูลจากตารางที่ 5.4 ไปพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับรูปที่ 5.3, 5.4 และ 5.5 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องว่าเส้นกราฟของจุดทดสอบนอกช่วงอยู่ระหว่างเส้นกราฟของจุดทดสอบหรือไม่ ซึ่งกราฟการเปรียบเทียบจะเป็นดังรูปที่ 5.7, 5.8 และ 5.9 จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่าเส้นกราฟจุดทดสอบนอกช่วงอยู่ระหว่างเส้นกราฟจากจุดทดสอบจริง และนอกจากสมการการถดถอยทั้ง 3 วิธีแล้ว การคำนวณที่จุดทดสอบนอกช่วงกรณีวิธีดั้งเดิมและวิธีทางคณิตศาสตร์ก็ได้คำนวณจุดทดสอบนอกช่วงโดยใช้วิธีเดียวกันกับที่นำเสนอในหัวข้อนี้



รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบระหว่างจุดทดสอบและจุดทดสอบนอกช่วง
จากสมการการถดถอยเชิงเส้น



รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบระหว่างจุดทดสอบและจุดทดสอบนอกช่วง
จากสมการการถดถอยของพหุนามกำลังสอง



รูปที่ 5.9 กราฟเปรียบเทียบระหว่างจุดทดสอบและจุดทดสอบนอกช่วง จากสมการการถดถอยของพหุนามกำลังสาม

5.3 ผลการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงาน

ผลการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงาน จะใช้ค่ากำลังงานอินพุตจากวิธีฐานแบบจำลองทั้ง 3 วิธีการประมาณค่า ไปเปรียบเทียบกับค่าจากการคำนวณด้วยวิธีดั้งเดิมและวิธีทางคณิตศาสตร์ ซึ่งการคำนวณด้วย 2 วิธีดังกล่าวได้ทำการเปรียบเทียบไว้ในบทที่ 4 โดยการคำนวณเปรียบเทียบนี้จะดำเนินการหาเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานจากสมการที่ (4.10) ในหัวข้อ 4.3 จากสมการดังกล่าว ถ้าต้องการหาเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานระหว่างวิธีฐานแบบจำลองกับวิธีดั้งเดิมต้องแทนค่ากำลังงานอินพุตที่อาศัยการขับเคลื่อนด้วยวิธีฐานแบบจำลอง ($P_{in,MBM}$) ลงแทนที่ค่ากำลังงานอินพุตที่อาศัยการขับเคลื่อนด้วยการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ($P_{in,OM}$) ดังนั้นการหาเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานจึงเป็นดังสมการที่ (5.40) ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน} = \frac{P_{in,classical} - (P_{in,OM} \text{ or } P_{in,MBM})}{P_{in,classical}} \times 100\% \quad (5.40)$$

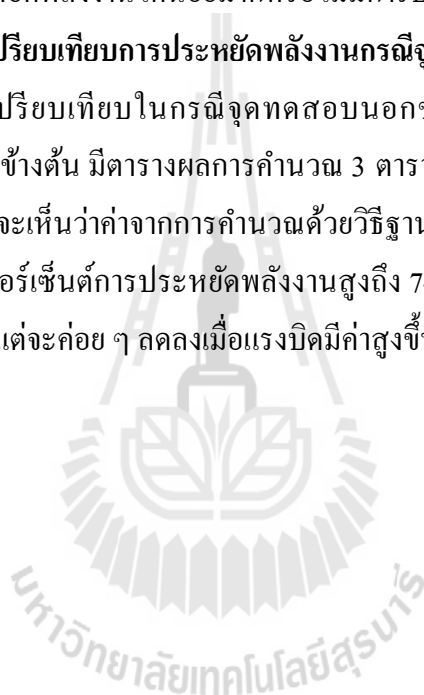
ผลการคำนวณเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ เปรียบเทียบผลการคำนวณกรณีจุดทดสอบและกรณีจุดทดสอบนอกช่วง สามารถอธิบายได้ดังนี้

5.3.1 ผลการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานกรณีจุดทดสอบ

ผลการเปรียบเทียบในกรณีจุดทดสอบ มีทั้งหมด 3 ตาราง คือ ตารางที่ 5.5 ใช้วิธีฐานแบบจำลองที่ประมาณค่าด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิมและวิธีทางคณิตศาสตร์ ส่วนตารางที่ 5.6 และ 5.7 จะเป็นวิธีฐานแบบจำลองที่ประมาณค่าด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสอง และวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสาม ในการเปรียบเทียบตามลำดับ ซึ่งจากตารางทั้งสาม จะพบว่าผลการคำนวณด้วยวิธีฐานแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับวิธีทางคณิตศาสตร์ และมีการประหยัดพลังงานเกิดขึ้นในจุดทดสอบเป็นส่วนใหญ่ มีเพียงบางจุด เช่น ที่แรงบิดสูง ๆ เกิดการประหยัดพลังงานได้น้อยมากหรือไม่มีการประหยัดพลังงานเลย

5.3.2 ผลการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานกรณีจุดทดสอบนอกช่วง

ผลการเปรียบเทียบในกรณีจุดทดสอบนอกช่วง จะทำเช่นเดียวกับในกรณีจุดทดสอบที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น มีตารางผลการคำนวณ 3 ตารางเช่นเดียวกัน คือ ตารางที่ 5.8, 5.9 และ 5.10 จากตารางทั้ง 3 จะเห็นว่าค่าจากการคำนวณด้วยวิธีฐานแบบจำลองกับวิธีทางคณิตศาสตร์ มีค่าใกล้เคียงกัน และมีเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานสูงถึง 74.31% ซึ่งการประหยัดพลังงานจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อแรงบิดต่ำ แต่จะค่อย ๆ ลดลงเมื่อแรงบิดมีค่าสูงขึ้น



ตารางที่ 5.5 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น กรณีจุดทดสอบ

T_L (N·m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			วิธีการถดถอยเชิงเส้น (LR)			วิธีทางคณิตศาสตร์ (OM)			เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน	
		i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,classical}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,MBM}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,OM}$ (W)	วิธีดั้งเดิม - LR	วิธีดั้งเดิม - OM
0.2	1000	0.30	82.51	88.09	0.11	40.95	38.43	0.11	40.75	38.40	56.37	56.41
	2000	0.30	160.73	109.03	0.12	72.09	59.50	0.12	71.73	59.47	45.43	45.46
	2750	0.30	220.00	125.09	0.12	96.67	75.34	0.12	97.08	75.38	39.77	39.74
0.4	1000	0.30	86.79	112.47	0.16	57.43	76.77	0.16	57.49	76.78	31.74	31.73
	2000	0.30	165.01	154.36	0.16	101.34	118.92	0.16	101.08	118.88	22.96	22.99
	2750	0.29	220.00	183.79	0.17	136.53	150.66	0.17	136.80	150.70	18.03	18.00
0.6	1000	0.30	91.07	139.15	0.19	70.36	115.16	0.19	70.33	115.16	17.24	17.24
	2000	0.30	169.29	201.98	0.20	124.31	178.41	0.20	123.59	178.30	11.67	11.72
	2750	0.29	220.00	245.07	0.21	167.65	226.06	0.21	167.27	226.00	7.76	7.78
0.8	1000	0.30	95.35	168.12	0.22	81.19	153.54	0.22	81.15	153.53	8.67	8.68
	2000	0.30	173.58	251.89	0.23	143.16	237.81	0.23	142.58	237.71	5.59	5.63
	2750	0.28	220.00	309.47	0.24	192.77	301.27	0.24	192.96	301.30	2.65	2.64
1	1000	0.30	99.63	199.38	0.25	90.82	191.94	0.25	90.69	191.91	3.73	3.75
	2000	0.30	177.86	304.09	0.25	158.14	296.92	0.26	159.30	297.11	2.36	2.30
	2750	0.27	220.00	377.67	0.26	210.44	375.75	0.27	215.59	376.60	0.51	0.28

ตารางที่ 5.5 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น กรณีจุดทดสอบ (ต่อ)

T_L (N·m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			วิธีการถดถอยเชิงเส้น (LR)			วิธีทางคณิตศาสตร์ (OM)			เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน	
		i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,classical}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,MBM}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,OM}$ (W)	วิธีดั้งเดิม - LR	วิธีดั้งเดิม - OM
1.2	1000	0.30	103.91	232.93	0.28	99.93	230.45	0.27	99.31	230.28	1.06	1.14
	2000	0.30	182.14	358.59	0.27	169.96	355.92	0.28	174.42	356.52	0.74	0.58
	2750	0.27	220.00	450.07	0.27	220.00	448.55	0.27	220.00	450.07	0.34	ไม่ประหยัด
1.4	1000	0.30	108.19	268.77	0.30	107.89	268.84	0.29	107.24	268.66	ไม่ประหยัด	0.04
	2000	0.30	186.42	415.38	0.28	179.42	415.23	0.30	186.42	415.57	0.04	ไม่ประหยัด
	2750	0.26	220.00	528.09	0.27	220.00	509.21	0.26	220.00	528.09	3.58	ไม่ประหยัด
1.5	1000	0.30	110.33	287.55	0.30	110.33	287.74	0.30	110.33	287.74	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด
	2000	0.30	188.56	444.63	0.29	182.64	445.29	0.30	188.56	444.82	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด
	2750	0.26	220.00	532.84	0.27	220.00	538.36	0.26	220.00	532.84	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด

ตารางที่ 5.6 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสอง กรณีจุดทดสอบ

T_L (N·m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			การถดถอยของพหุนาม กำลังสอง (2-order)			วิธีทางคณิตศาสตร์ (OM)			เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน	
		i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,classical}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,MBM}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,OM}$ (W)	วิธีดั้งเดิม - 2 order	วิธีดั้งเดิม - OM
0.2	1000	0.30	82.51	88.09	0.11	40.91	38.43	0.11	40.75	38.40	56.37	56.41
	2000	0.30	160.73	109.03	0.12	71.62	59.45	0.12	71.73	59.47	45.47	45.46
	2750	0.30	220.00	125.09	0.12	97.03	75.38	0.12	97.08	75.38	39.74	39.74
0.4	1000	0.30	86.79	112.47	0.16	57.43	76.77	0.16	57.49	76.78	31.74	31.73
	2000	0.30	165.01	154.36	0.16	101.51	118.94	0.16	101.08	118.88	22.95	22.99
	2750	0.29	220.00	183.79	0.17	136.34	150.64	0.17	136.80	150.70	18.04	18.00
0.6	1000	0.30	91.07	139.15	0.19	70.36	115.16	0.19	70.33	115.16	17.24	17.24
	2000	0.30	169.29	201.98	0.20	124.17	178.39	0.20	123.59	178.30	11.68	11.72
	2750	0.29	220.00	245.07	0.21	167.82	226.09	0.21	167.27	226.00	7.74	7.78
0.8	1000	0.30	95.35	168.12	0.22	81.08	153.52	0.22	81.15	153.53	8.68	8.68
	2000	0.30	173.58	251.89	0.23	142.20	237.64	0.23	142.58	237.71	5.66	5.63
	2750	0.28	220.00	309.47	0.24	193.17	301.34	0.24	192.96	301.30	2.63	2.64
1	1000	0.30	99.63	199.38	0.25	90.95	191.97	0.25	90.69	191.91	3.72	3.75
	2000	0.30	177.86	304.09	0.26	159.59	297.17	0.26	159.30	297.11	2.28	2.30
	2750	0.27	220.00	377.67	0.26	209.50	375.63	0.27	215.59	376.60	0.54	0.28

ตารางที่ 5.6 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสอง กรณีจุดทดสอบ (ต่อ)

T_L (N·m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			การถดถอยของพหุนาม กำลังสอง (2-order)			วิธีทางคณิตศาสตร์ (OM)			เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน	
		i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,classical}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,MBM}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,OM}$ (W)	วิธีดั้งเดิม - 2 order	วิธีดั้งเดิม - OM
1.2	1000	0.30	103.91	232.93	0.28	100.17	230.54	0.27	99.31	230.28	1.03	1.14
	2000	0.30	182.14	358.59	0.28	173.92	356.42	0.28	174.42	356.52	0.61	0.58
	2750	0.27	220.00	450.07	0.26	217.58	450.15	0.27	220.00	450.07	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด
1.4	1000	0.30	108.19	268.77	0.30	108.10	268.92	0.29	107.24	268.66	ไม่ประหยัด	0.04
	2000	0.30	186.42	415.38	0.30	184.65	415.33	0.30	186.42	415.57	0.01	ไม่ประหยัด
	2750	0.26	220.00	528.09	0.26	220.00	521.31	0.26	220.00	528.09	1.28	ไม่ประหยัด
1.5	1000	0.30	110.33	287.55	0.30	110.33	287.74	0.30	110.33	287.74	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด
	2000	0.30	188.56	444.63	0.30	187.12	444.82	0.30	188.56	444.82	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด
	2750	0.26	220.00	532.84	0.26	220.00	534.93	0.26	220.00	532.84	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด

ตารางที่ 5.7 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสาม กรณีจุดทดสอบ

T_L (N·m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			การถดถอยของพหุนาม กำลังสาม (3-order)			วิธีทางคณิตศาสตร์ (OM)			เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน	
		i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,classical}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,MBM}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,OM}$ (W)	วิธีดั้งเดิม - 3 order	วิธีดั้งเดิม - OM
0.2	1000	0.30	82.51	88.09	0.11	40.71	38.40	0.11	40.75	38.40	56.41	56.41
	2000	0.30	160.73	109.03	0.12	71.58	59.45	0.12	71.73	59.47	45.47	45.46
	2750	0.30	220.00	125.09	0.12	96.82	75.36	0.12	97.08	75.38	39.76	39.74
0.4	1000	0.30	86.79	112.47	0.16	57.34	76.76	0.16	57.49	76.78	31.75	31.73
	2000	0.30	165.01	154.36	0.17	101.74	118.97	0.16	101.08	118.88	22.93	22.99
	2750	0.29	220.00	183.79	0.17	136.51	150.66	0.17	136.80	150.70	18.03	18.00
0.6	1000	0.30	91.07	139.15	0.19	70.43	115.18	0.19	70.33	115.16	17.23	17.24
	2000	0.30	169.29	201.98	0.20	124.03	178.36	0.20	123.59	178.30	11.69	11.72
	2750	0.29	220.00	245.07	0.21	167.71	226.07	0.21	167.27	226.00	7.75	7.78
0.8	1000	0.30	95.35	168.12	0.22	81.09	153.52	0.22	81.15	153.53	8.68	8.68
	2000	0.30	173.58	251.89	0.23	142.47	237.69	0.23	142.58	237.71	5.64	5.63
	2750	0.28	220.00	309.47	0.24	193.50	301.40	0.24	192.96	301.30	2.61	2.64
1	1000	0.30	99.63	199.38	0.25	90.31	191.85	0.25	90.69	191.91	3.78	3.75
	2000	0.30	177.86	304.09	0.26	160.32	297.31	0.26	159.30	297.11	2.23	2.30
	2750	0.27	220.00	377.67	0.26	209.86	375.67	0.27	215.59	376.60	0.53	0.28

ตารางที่ 5.7 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสาม กรณีจุดทดสอบ (ต่อ)

T_L (N·m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			การถดถอยของพหุนาม กำลังสาม (3-order)			วิธีทางคณิตศาสตร์ (OM)			เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน	
		i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,classical}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,MBM}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,OM}$ (W)	วิธีดั้งเดิม - 3 order	วิธีดั้งเดิม - OM
1.2	1000	0.30	103.91	232.93	0.27	98.71	230.20	0.27	99.31	230.28	1.17	1.14
	2000	0.30	182.14	358.59	0.28	175.58	356.76	0.28	174.42	356.52	0.51	0.58
	2750	0.27	220.00	450.07	0.26	218.19	450.13	0.27	220.00	450.07	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด
1.4	1000	0.30	108.19	268.77	0.29	107.08	268.62	0.29	107.24	268.66	0.06	0.04
	2000	0.30	186.42	415.38	0.30	186.42	415.57	0.30	186.42	415.57	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด
	2750	0.26	220.00	528.09	0.27	220.00	517.02	0.26	220.00	528.09	2.10	ไม่ประหยัด
1.5	1000	0.30	110.33	287.55	0.30	109.59	287.76	0.30	110.33	287.74	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด
	2000	0.30	188.56	444.63	0.30	187.57	444.81	0.30	188.56	444.82	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด
	2750	0.26	220.00	532.84	0.26	220.00	534.29	0.26	220.00	532.84	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด

ตารางที่ 5.8 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น กรณีจุดทดสอบนอกช่วง

T_L (N·m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			วิธีการถดถอยเชิงเส้น (LR)			วิธีทางคณิตศาสตร์ (OM)			เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน	
		i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,classical}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,MBM}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,OM}$ (W)	วิธีดั้งเดิม - LR	วิธีดั้งเดิม - OM
0.1	1000	0.30	80.37	76.76	0.09	30.91	19.72	0.08	28.92	19.21	74.31	74.97
	2000	0.30	158.59	87.23	0.09	55.71	30.34	0.08	50.98	29.75	65.22	65.89
	2750	0.30	217.26	95.08	0.10	75.00	38.31	0.09	69.00	37.71	59.71	60.34
0.25	1000	0.30	83.58	93.97	0.12	45.40	47.98	0.13	45.52	48.00	48.94	48.92
	2000	0.30	161.80	120.15	0.13	79.72	74.28	0.13	80.09	74.32	38.17	38.14
	2750	0.30	220.00	139.68	0.13	106.94	94.07	0.13	108.40	94.21	32.65	32.55
0.3	1000	0.30	84.65	99.99	0.14	49.59	57.56	0.14	49.83	57.59	42.43	42.40
	2000	0.30	162.87	131.41	0.14	87.10	89.12	0.14	87.65	89.18	32.18	32.14
	2750	0.30	220.00	154.21	0.14	116.98	112.87	0.15	118.63	113.04	26.81	26.70
0.55	1000	0.30	90.00	132.26	0.18	67.26	105.55	0.19	67.35	105.56	20.20	20.19
	2000	0.30	168.22	189.86	0.19	118.69	163.49	0.19	118.37	163.44	13.89	13.92
	2750	0.29	220.00	229.45	0.20	159.99	207.15	0.20	160.20	207.18	9.72	9.71
0.7	1000	0.30	93.21	153.34	0.21	75.89	134.34	0.21	75.93	134.35	12.39	12.38
	2000	0.30	171.44	226.65	0.22	133.84	208.07	0.22	133.43	208.00	8.20	8.23
	2750	0.28	220.00	276.81	0.22	180.31	263.61	0.22	180.57	263.65	4.77	4.75
0.95	1000	0.30	98.56	191.35	0.24	88.47	182.33	0.24	88.40	182.31	4.72	4.72
	2000	0.30	176.79	290.83	0.25	154.45	282.12	0.25	155.29	282.26	3.00	2.95
	2750	0.28	220.00	360.14	0.25	206.07	357.09	0.26	210.16	357.78	0.85	0.66

ตารางที่ 5.8 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น กรณีจุดทดสอบนอกช่วง (ต่อ)

T_L (N·m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			วิธีการถดถอยเชิงเส้น (LR)			วิธีทางคณิตศาสตร์ (OM)			เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน	
		i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,classical}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,MBM}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,OM}$ (W)	วิธีดั้งเดิม - LR	วิธีดั้งเดิม - OM
1.1	1000	0.30	101.77	215.86	0.26	95.43	211.17	0.26	95.10	211.09	2.17	2.21
	2000	0.30	180.00	331.06	0.26	164.10	326.38	0.27	167.04	326.82	1.41	1.28
	2750	0.27	220.00	413.29	0.26	215.69	412.78	0.27	220.00	413.29	0.12	0.00
1.25	1000	0.30	104.98	241.67	0.28	101.95	240.04	0.28	101.35	239.88	0.67	0.74
	2000	0.30	183.21	372.57	0.27	172.35	370.69	0.29	178.00	371.37	0.50	0.32
	2750	0.26	220.00	469.12	0.26	220.00	469.12	0.26	220.00	469.12	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด
1.3	1000	0.30	106.05	250.56	0.29	103.95	249.64	0.28	103.35	249.47	0.37	0.44
	2000	0.30	184.28	386.70	0.28	174.72	385.50	0.29	181.51	386.22	0.31	0.12
	2750	0.26	220.00	488.26	0.26	220.00	488.26	0.26	220.00	488.26	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด
1.45	1000	0.30	109.26	278.09	0.30	109.26	278.09	0.30	109.13	278.25	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด
	2000	0.30	187.49	429.94	0.28	181.04	430.21	0.30	187.49	430.12	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด
	2750	0.26	220.00	532.84	0.26	220.00	532.84	0.26	220.00	532.84	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด

ตารางที่ 5.9 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสอง กรณีจุดทดสอบนอกช่วง

T_L (N·m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			วิธีการถดถอยเชิงเส้น (LR)			วิธีทางคณิตศาสตร์ (OM)			เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน	
		i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,classical}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,MBM}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,OM}$ (W)	วิธีดั้งเดิม - LR	วิธีดั้งเดิม - OM
0.1	1000	0.30	80.37	76.76	0.09	30.85	19.70	0.08	28.92	19.21	74.34	74.97
	2000	0.30	158.59	87.23	0.09	54.87	30.20	0.08	50.98	29.75	65.38	65.89
	2750	0.30	217.26	95.08	0.10	75.66	38.39	0.09	69.00	37.71	59.62	60.34
0.25	1000	0.30	83.58	93.97	0.12	45.37	47.98	0.13	45.52	48.00	48.94	48.92
	2000	0.30	161.80	120.15	0.13	79.41	74.26	0.13	80.09	74.32	38.20	38.14
	2750	0.30	220.00	139.68	0.13	107.17	94.09	0.13	108.40	94.21	32.64	32.55
0.3	1000	0.30	84.65	99.99	0.14	49.58	57.56	0.14	49.83	57.59	42.43	42.40
	2000	0.30	162.87	131.41	0.14	86.96	89.11	0.14	87.65	89.18	32.19	32.14
	2750	0.30	220.00	154.21	0.14	117.06	112.88	0.15	118.63	113.04	26.80	26.70
0.55	1000	0.30	90.00	132.26	0.18	67.26	105.55	0.19	67.35	105.56	20.20	20.19
	2000	0.30	168.22	189.86	0.19	118.63	163.48	0.19	118.37	163.44	13.89	13.92
	2750	0.29	220.00	229.45	0.20	160.07	207.16	0.20	160.20	207.18	9.72	9.71
0.7	1000	0.30	93.21	153.34	0.21	75.83	134.33	0.21	75.93	134.35	12.40	12.38
	2000	0.30	171.44	226.65	0.22	133.29	207.98	0.22	133.43	208.00	8.24	8.23
	2750	0.28	220.00	276.81	0.22	180.60	263.66	0.22	180.57	263.65	4.75	4.75
0.95	1000	0.30	98.56	191.35	0.25	90.32	183.05	0.24	88.40	182.31	4.34	4.72
	2000	0.30	176.79	290.83	0.26	160.01	283.39	0.25	155.29	282.26	2.56	2.95
	2750	0.28	220.00	360.14	0.26	212.34	358.22	0.26	210.16	357.78	0.53	0.66

ตารางที่ 5.9 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสอง กรณีจุดทดสอบนอกช่วง (ต่อ)

T_L (N·m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			การถดถอยของพหุนาม กำลังสอง (2-order)			วิธีทางคณิตศาสตร์ (OM)			เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน	
		i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,classical}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,MBM}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,OM}$ (W)	วิธีดั้งเดิม - 2 order	วิธีดั้งเดิม - OM
1.1	1000	0.30	101.77	215.86	0.26	95.61	211.23	0.26	95.10	211.09	2.15	2.21
	2000	0.30	180.00	331.06	0.27	166.81	326.77	0.27	167.04	326.82	1.29	1.28
	2750	0.27	220.00	413.29	0.26	213.56	412.65	0.27	220.00	413.29	0.15	0.00
1.25	1000	0.30	104.98	241.67	0.28	102.19	240.13	0.28	101.35	239.88	0.64	0.74
	2000	0.30	183.21	372.57	0.28	176.64	371.12	0.29	178.00	371.37	0.39	0.32
	2750	0.26	220.00	469.12	0.26	218.86	469.13	0.26	220.00	469.12	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด
1.3	1000	0.30	106.05	250.56	0.29	104.18	249.72	0.28	103.35	249.47	0.34	0.44
	2000	0.30	184.28	386.70	0.29	179.33	385.84	0.29	181.51	386.22	0.22	0.12
	2750	0.26	220.00	488.26	0.26	220.00	488.28	0.26	220.00	488.26	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด
1.45	1000	0.30	109.26	278.09	0.30	109.26	278.09	0.30	109.13	278.25	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด
	2000	0.30	187.49	429.94	0.30	185.89	430.01	0.30	187.49	430.12	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด
	2750	0.26	220.00	532.84	0.26	220.00	532.84	0.26	220.00	532.84	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด

ตารางที่ 5.10 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสาม กรณีจุดทดสอบนอกช่วง

T_L (N·m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			วิธีการถดถอยเชิงเส้น (LR)			วิธีทางคณิตศาสตร์ (OM)			เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน	
		i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,classical}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,MBM}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,OM}$ (W)	วิธีดั้งเดิม - LR	วิธีดั้งเดิม - OM
0.1	1000	0.30	80.37	76.76	0.09	30.55	19.59	0.08	28.92	19.21	74.47	74.97
	2000	0.30	158.59	87.23	0.09	54.70	30.18	0.08	50.98	29.75	65.41	65.89
	2750	0.30	217.26	95.08	0.10	75.24	38.34	0.09	69.00	37.71	59.68	60.34
0.25	1000	0.30	83.58	93.97	0.12	45.20	47.96	0.13	45.52	48.00	48.96	48.92
	2000	0.30	161.80	120.15	0.13	79.44	74.26	0.13	80.09	74.32	38.19	38.14
	2750	0.30	220.00	139.68	0.13	107.06	94.08	0.13	108.40	94.21	32.65	32.55
0.3	1000	0.30	84.65	99.99	0.13	49.43	57.55	0.14	49.83	57.59	42.44	42.40
	2000	0.30	162.87	131.41	0.14	87.05	89.11	0.14	87.65	89.18	32.19	32.14
	2750	0.30	220.00	154.21	0.14	117.05	112.88	0.15	118.63	113.04	26.80	26.70
0.55	1000	0.30	90.00	132.26	0.18	67.29	105.55	0.19	67.35	105.56	20.19	20.19
	2000	0.30	168.22	189.86	0.19	118.58	163.47	0.19	118.37	163.44	13.90	13.92
	2750	0.29	220.00	229.45	0.20	160.03	207.15	0.20	160.20	207.18	9.72	9.71
0.7	1000	0.30	93.21	153.34	0.21	75.87	134.33	0.21	75.93	134.35	12.39	12.38
	2000	0.30	171.44	226.65	0.22	133.35	207.99	0.22	133.43	208.00	8.23	8.23
	2750	0.28	220.00	276.81	0.22	180.71	263.67	0.22	180.57	263.65	4.75	4.75
0.95	1000	0.30	98.56	191.35	0.24	88.47	182.33	0.24	88.06	182.26	4.75	4.72
	2000	0.30	176.79	290.83	0.25	154.45	282.12	0.25	155.91	282.38	2.91	2.95
	2750	0.28	220.00	360.14	0.25	206.07	357.09	0.25	205.81	357.06	0.86	0.66

ตารางที่ 5.10 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการถดถอยของพหุนามกำลังสาม กรณีจุดทดสอบนอกช่วง (ต่อ)

T_L (N·m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			การถดถอยของพหุนาม กำลังสาม (3-order)			วิธีทางคณิตศาสตร์ (OM)			เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน	
		i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,classical}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,MBM}$ (W)	i_f (A)	v_a (V)	$P_{in,OM}$ (W)	วิธีดั้งเดิม - 3 order	วิธีดั้งเดิม - OM
1.1	1000	0.30	101.77	215.86	0.26	95.43	211.17	0.26	94.57	211.02	2.24	2.21
	2000	0.30	180.00	331.06	0.26	164.10	326.38	0.27	168.01	327.01	1.22	1.28
	2750	0.27	220.00	413.29	0.26	215.69	412.78	0.26	214.04	412.68	0.15	ไม่ประหยัด
1.25	1000	0.30	104.98	241.67	0.28	101.95	240.04	0.27	100.84	239.80	0.78	0.74
	2000	0.30	183.21	372.57	0.27	172.35	370.69	0.29	178.45	371.46	0.30	0.32
	2750	0.26	220.00	469.12	0.26	220.00	469.12	0.26	219.79	469.04	0.02	ไม่ประหยัด
1.3	1000	0.30	106.05	250.56	0.29	103.95	249.64	0.28	102.94	249.40	0.46	0.44
	2000	0.30	184.28	386.70	0.28	174.72	385.50	0.29	181.29	386.18	0.14	0.12
	2750	0.26	220.00	488.26	0.26	220.00	488.26	0.26	220.00	488.26	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด
1.45	1000	0.30	109.26	278.09	0.30	109.26	278.09	0.29	108.34	278.14	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด
	2000	0.30	187.49	429.94	0.28	181.04	430.21	0.30	187.24	430.10	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด
	2750	0.26	220.00	532.84	0.26	220.00	532.84	0.26	220.00	532.84	ไม่ประหยัด	ไม่ประหยัด

5.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนที่ใช้วิธีฐานแบบจำลอง โดยจะคำนวณค่ากระแสสนามและแรงดันอาร์เมเจอร์ ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถลดกำลังงานสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นและควบคุมความเร็วรอบตามที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยคู่ได้จากผลการคำนวณที่คำนวณค่าได้ใกล้เคียงกับวิธีทางคณิตศาสตร์ แต่ใช้สมการพื้นฐานในการคำนวณ ไม่ซับซ้อนเท่าวิธีทางคณิตศาสตร์ ซึ่งถือเป็นข้อดีของวิธีการนี้ และการดำเนินงานวิจัยหลังจากนี้จะใช้การคำนวณของวิธีการลดรอยเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว เพราะค่าที่ได้จากวิธีประมาณค่าทั้ง 3 วิธี มีความใกล้เคียงกัน แต่สัมประสิทธิ์ของวิธีการลดรอยเชิงเส้นมีน้อยกว่าวิธีอื่น จึงสามารถลดความยุ่งยากในการคำนวณได้ดีกว่า



บทที่ 6

โครงสร้างฮาร์ดแวร์สำหรับการขับเคลื่อนเพื่อประหยัดพลังงาน

6.1 บทนำ

ระบบที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ วงจรเรียงกระแส และวงจรชอปเปอร์ วงจรเรียงกระแสที่ใช้ในงานวิจัย คือ วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง ในขณะที่วงจรชอปเปอร์ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสเพื่อเข้ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น วงจรชอปเปอร์ดังกล่าวใช้วงจรที่เรียกว่า วงจรแปลงผันแบบบัลค์ โดยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ สำหรับวงจรชอปเปอร์ คือ มอสเฟต ซึ่งการควบคุมการทำงานของมอสเฟต จะใช้บอร์ด dsPIC30F2010 ของบริษัท ETT เนื่องจากบอร์ดดังกล่าวมีราคาไม่สูงมาก อีกทั้งสามารถหาซื้อได้ในประเทศไทย ด้วยเหตุนี้ในบทนี้จึงได้อธิบายเกี่ยวกับบอร์ด dsPIC30F2010 และนำเสนอวิธีการออกแบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นทั้งสองวงจร รวมถึงอธิบายหลักการทำงานและเสนอผลการทดสอบในแต่ละวงจร

6.2 บอร์ด dsPIC30F2010

บอร์ด ET-dsPIC30F2010 TRAINING KIT V1.0 EXP ประกอบไปด้วย วงจรพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการศึกษาเรียนรู้และทดลองใช้งานทรัพยากรต่าง ๆ ของ MCU ตระกูล dsPIC โดยภายในบอร์ดได้จัดเตรียมวงจรใช้งานที่จำเป็นไว้อย่างครบถ้วน (สามารถดูรูปโครงสร้างของบอร์ดได้ดังรูปที่ 6.1 ซึ่งส่วนประกอบของบอร์ดดังกล่าว เป็นดังนี้

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

6.2.1 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

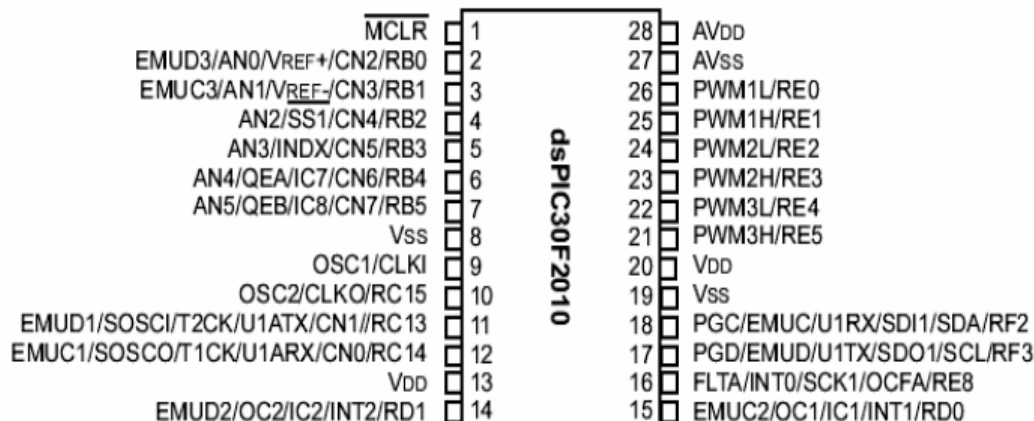
6.2.2 คุณสมบัติด้านการประมวลผล

- 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 โดยสามารถกำหนดค่าอัตราการคูณความถี่ได้ 3 ระดับ คือ 4 เท่า 8 เท่า และ 16 เท่า
- รองรับการขัดจังหวะ (interrupt) ได้ถึง 27 แหล่ง พร้อมสัญญาณขัดจังหวะจากภายนอก 3 แหล่ง และสามารถจัดระดับความสำคัญของการขัดจังหวะได้ 8 ระดับ

6.2.3 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

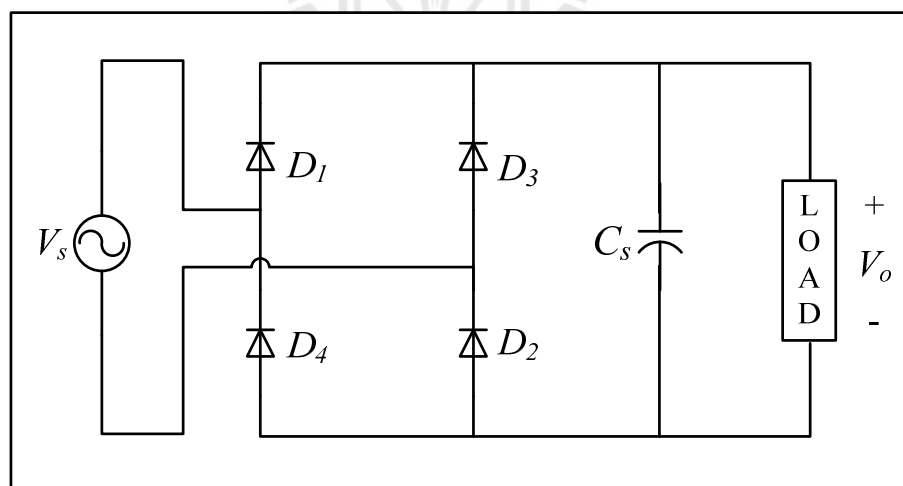
รายละเอียดขาต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 6.2 ดังนี้



รูปที่ 6.2 การจัดเรียงขาสัญญาณของ dsPIC30F2010

6.3 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์

วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ ถือว่าเป็นวงจรหนึ่งในการแปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรง โครงสร้างของวงจรประกอบด้วยไดโอดทั้งหมด 4 ตัว ดังรูปที่ 6.3

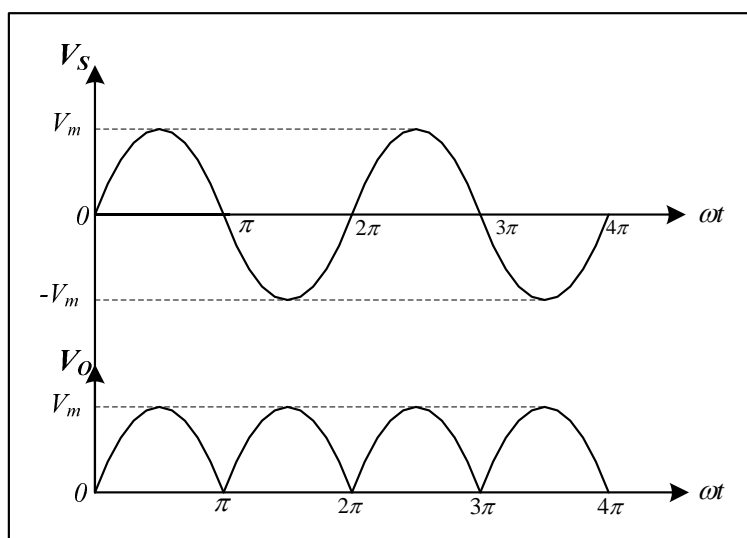


รูปที่ 6.3 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์

6.3.1 หลักการทำงานของวงจร

จากวงจรดังรูปที่ 6.3 สามารถพิจารณาโหมดการทำงานได้เป็น 2 โหมด โดยในแต่ละโหมดไดโอดจะทำงานครั้งละ 2 ตัวสลับกัน คือ โหมดที่ 1 ช่วงซีกบวกของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ไดโอด D_1, D_2 นำกระแส และ โหมดที่ 2 ช่วงซีกลบของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ไดโอด D_3, D_4 นำกระแส ซึ่งจากการทำงานในแต่ละโหมดจะได้รูปสัญญาณของค่าแรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 6.4 ดังนี้



รูปที่ 6.4 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์

จากรูปที่ 6.4 เมื่อคำนวณค่าแรงดันเอาต์พุตเฉลี่ย ($V_{o,av}$) ที่ได้จากวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ โดยพิจารณาจากพื้นที่ใต้กราฟในรูปดังกล่าว จะคำนวณได้ดังสมการที่ (6.1) ดังนี้

$$V_{o,av} = \frac{2V_m}{\pi} \quad (6.1)$$

โดยที่ V_m คือ ค่ายอดของแรงดันอินพุตที่จ่ายให้วงจรเรียงกระแส

เมื่อพิจารณาการคำนวณแรงดันไฟฟ้าต้านกลับด้านลบ (V_{RRM} : Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.2) ดังนี้

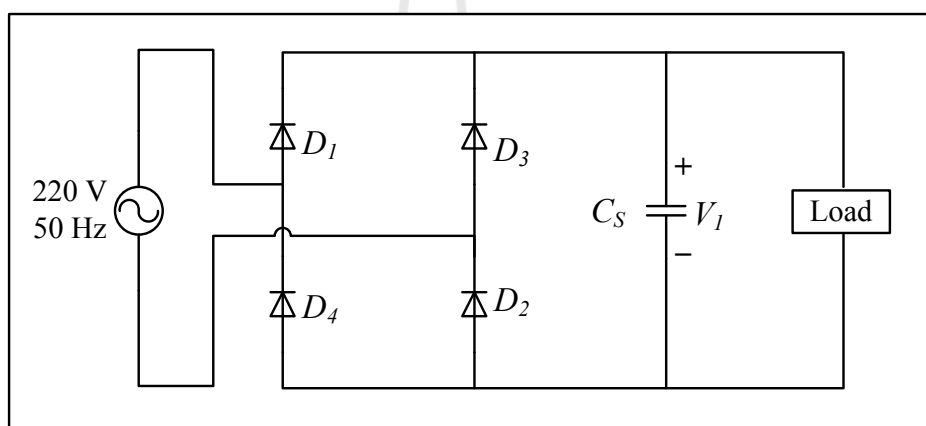
$$V_{RRM} = V_m \quad (6.2)$$

เมื่อพิจารณาสมการคำนวณกระแสไดโอดเฉลี่ย ($I_{D,av}$) จะได้ดังสมการที่ (6.3)

$$I_{D,av} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{O,av}(t) dt = \frac{V_m}{\pi R} \quad (6.3)$$

6.3.2 การออกแบบ

วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วงจรที่เป็นลักษณะมอดูล เพราะฉะนั้นจึงทำการออกแบบพิกัดของมอดูลวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ ซึ่งการออกแบบจะคำนึงถึงพิกัดของแรงดันและกระแสเป็นสำคัญ โดยวงจรเรียงกระแสที่ใช้ในงานวิจัย แสดงได้ดังรูปที่ 6.5 ดังนี้

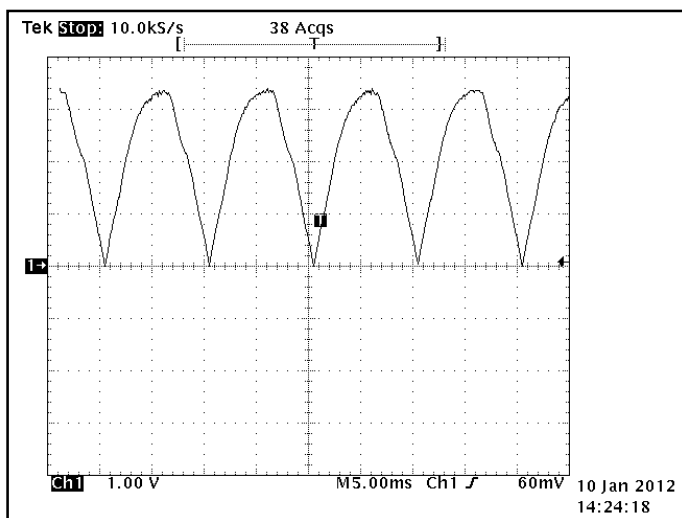


รูปที่ 6.5 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่ใช้ในงานวิจัย

จากรูปที่ 6.5 ตัวเก็บประจุ (C_s) ต่อขนานกับโหลดเพื่อทำหน้าที่ปรับเรียบแรงดันเอาต์พุตที่ออกจากวงจรเรียงกระแส ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้แรงดันเอาต์พุตมีตัวประกอบความพลิว (ripple factor) เท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ จากข้อกำหนดดังกล่าวข้างต้นสามารถออกแบบได้ตามขั้นตอนดังนี้

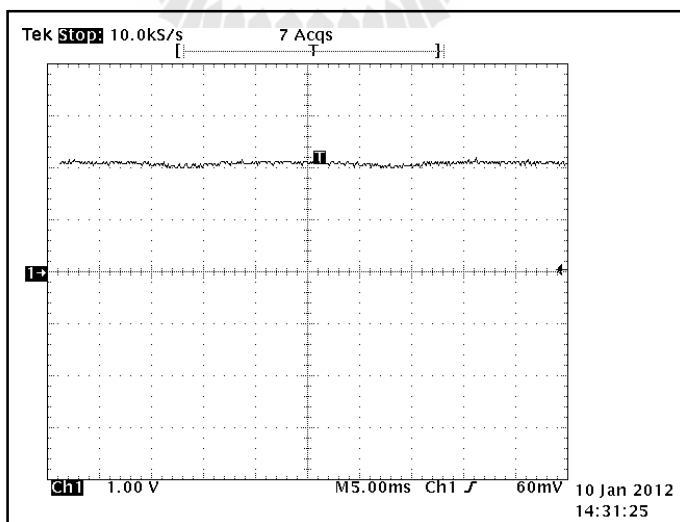
ขั้นที่ 1 เลือกตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุที่เลือกใช้ในงานวิจัย คือ ตัวเก็บประจุขนาด $1000 \mu\text{F}$ ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุที่มีอยู่ในห้องทดลอง ดังนั้นจึงทดสอบตัวเก็บประจุดังกล่าว เพื่อดูว่าแรงดันเอาต์พุตมีตัวประกอบความพลิวตามที่กำหนดหรือไม่ โดยการทดสอบจะปรับแรงดันให้ได้แรงดันเอาต์พุต เท่ากับ 220 V ผลจากการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 6.6 ถึง 6.8 ดังนี้

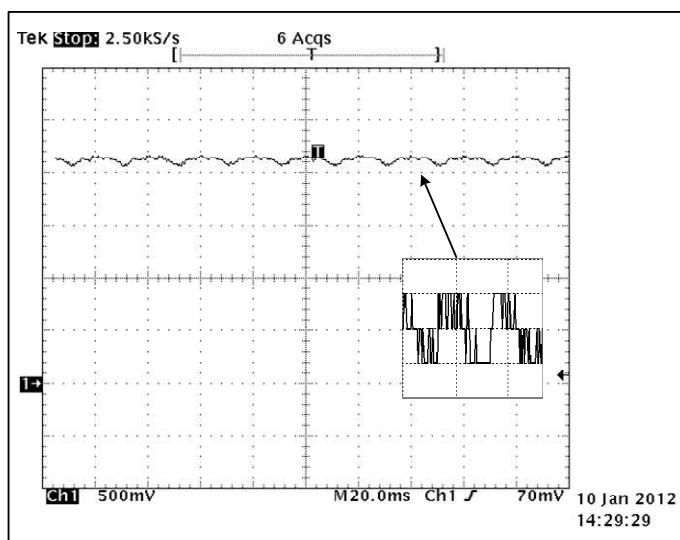


รูปที่ 6.6 รูปสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ในขณะที่ไม่ต่อตัวเก็บประจุ

รูปที่ 6.6 และรูปที่ 6.7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อต่อตัวเก็บประจุขนาดกับโหลด รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตจะมีลักษณะเรียบขึ้น และจากรูปที่ 6.8 รูปสัญญาณแรงดันพลิ้วของแรงดันเอาต์พุต จะสังเกตว่าตัวประกอบความพลิ้วมีค่าไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ ซึ่งจากรูปสัญญาณพบว่าแรงดันพลิ้วมีค่าเท่ากับ 4 V ดังนั้นตัวเก็บประจุขนาด $1000 \mu\text{F}$ จึงสามารถนำมาใช้ในงานวิจัยได้



รูปที่ 6.7 รูปสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ในขณะที่ต่อตัวเก็บประจุ



รูปที่ 6.8 รูปสัญญาณแรงดันพลิวของแรงดันเอาต์พุต

ขั้นที่ 2 คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับด้านลบ จากสมการที่ (6.2)

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

คำนึงถึงค่าตัวประกอบนิรภัย (safety factor) 25 เปอร์เซ็นต์ จะได้

$$V_{RRM} = 311.13 \times 1.25 = 388.91 \text{ V}$$

ดังนั้นค่าแรงดันแรงดันไฟฟ้าต้านกลับด้านลบ เท่ากับ 388.91 V

ขั้นที่ 3 คำนวณค่ากระแสไดโอดเฉลี่ย

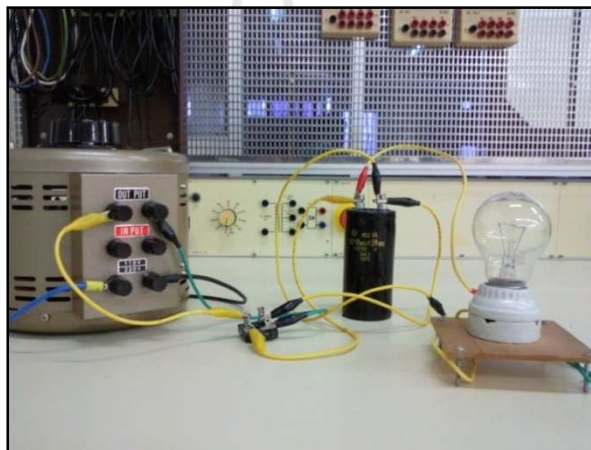
งานวิจัยนี้มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ซึ่งมีพิทดกระแสมากที่สุด คือ ฟังวงจรรอาร์เมเจอร์มีค่ากระแส เท่ากับ 2.2 A และคำนึงถึงค่าตัวประกอบนิรภัย 25 เปอร์เซ็นต์ จะได้กระแส เท่ากับ $2.2 + (2.2 \times 0.25) = 2.75 \text{ A}$ ดังนั้นค่ากระแสไดโอดเฉลี่ยจึงต้องมีค่ามากกว่า 2.75 A

จากการออกแบบวงจรข้างต้น สามารถนำค่าที่ได้ไปเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งได้ศึกษาจากเอกสารข้อมูลแล้วพบว่า ไดโอดเบอร์ GPBC1504 มีค่าตรงกับความต้องการที่

ออกแบบไว้ คือ $V_{RRM} = 400 \text{ V}$ และ $I_{D,av} = 12 \text{ A}$ (ซึ่งเป็นค่ามากกว่าค่าที่กำหนดไว้) โดยเอกสารข้อมูลของไดโอดแสดงไว้ในภาคผนวก ข

6.3.3 ผลการทดสอบวงจร

การทดสอบวงจรจะทดสอบโดยเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านตัวปรับแรงดัน (variac) จ่ายให้กับมอดูลวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์เพื่อให้เอาต์พุต เท่ากับ 220 V ซึ่งโหนดในขณะทดสอบจะใช้โหนดความต้านทาน คือ หลอดไฟ ขนาด 220 V 100 W ในการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกจะยังไม่ใส่ตัวเก็บประจุสำหรับปรับเรียบแรงดัน เพื่อเปรียบเทียบผลของทั้งสองขั้นตอนว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร ในการทดสอบดังกล่าวได้ต่อวงจรตามรูปที่ 6.9 ดังนี้

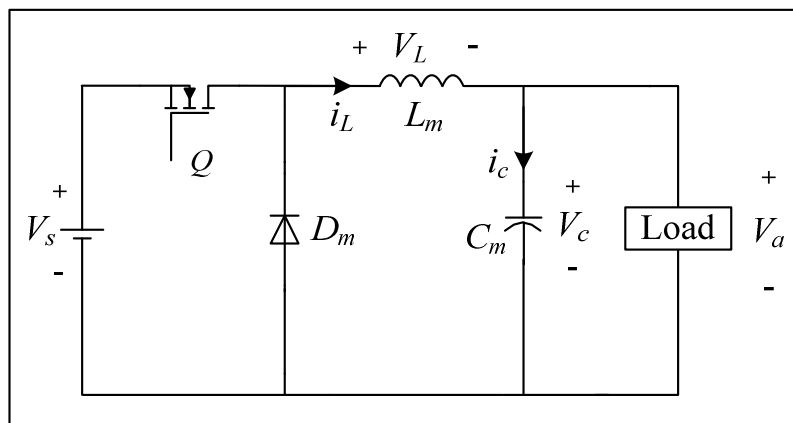


รูปที่ 6.9 ภาพการต่อวงจรสำหรับการทดสอบวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์

จากผลการทดสอบตามรูปที่ 6.9 เมื่อไม่มีการต่อตัวเก็บประจุจะได้ผลดังรูปที่ 6.6 ซึ่งจากภาพดังกล่าวสังเกตได้ว่าค่าแรงดันพลาจของรูปสัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสมีค่ามาก และเมื่อใส่ตัวเก็บประจุสำหรับปรับเรียบแรงดันจะได้ผลดังรูปที่ 6.7 ซึ่งได้แสดงไว้ในหัวข้อ 6.3.2 ข้างต้น

6.4 วงจรแปลงผันแบบบัคค์

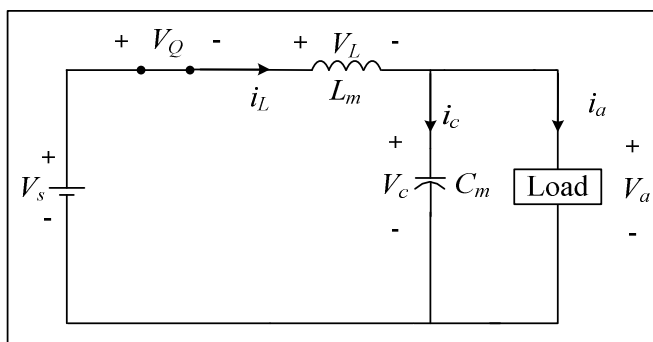
วงจรเรียงแปลงผันแบบบัคค์ เป็นวงจรชนิดหนึ่งสำหรับปรับเปลี่ยนค่าแรงดันเอาต์พุต ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง มีมอสเฟตทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ดังรูปที่ 6.10 ดังนี้



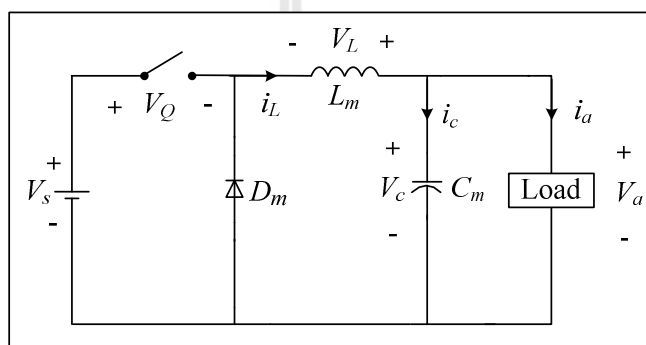
รูปที่ 6.10 วงจรแปลงผันแบบบัคค์

6.4.1 หลักการทำงาน

วงจรดังรูปที่ 6.10 เป็นวงจรสำหรับปรับเปลี่ยนระดับแรงดันทางด้านเอาต์พุต (V_a) โดยอุปกรณ์สวิตช์ของวงจร ได้แก่ มอสเฟต ซึ่งทำหน้าที่ในการสับแรงดันไฟฟ้าอินพุต (V_s) ให้ได้ค่าแรงดันเอาต์พุตตามที่ต้องการ โดยวงจรดังกล่าวจะทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับแรงดันอินพุตเสมอ วงจรแปลงผันแบบบัคค์มีการทำงานของวงจรแบ่งออกเป็น 2 โหมด คือ โหมดที่ 1 เป็นโหมดที่มอสเฟตทำงาน และในโหมดที่ 2 เป็นโหมดที่มอสเฟตหยุดทำงาน ซึ่งการอธิบายหลักการทำงานในแต่ละโหมด พิจารณาได้จากรูปที่ 6.11 การทำงานของวงจรดังกล่าวจะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 โหมดอย่างชัดเจน ซึ่งการทำงานในโหมดที่ 1 มอสเฟตจะทำงาน เพราะฉะนั้นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (V_s) จะจ่ายกระแสผ่านขดลวด (i_L) และไหลผ่านตัวเก็บประจุ (i_c) โดยกระแสที่ไหลผ่านขดลวดจะเพิ่มขึ้นจาก I_1 จนถึงค่า I_2 ดังรูปที่ 6.12 ในขณะที่กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก $I_1 - i_a$ จนกระทั่งถึงค่า $I_2 - i_a$ ซึ่งในสภาวะนี้กระแสที่จ่ายให้โหลด (i_a) จะมีค่าคงที่ตลอดสภาวะการทำงานในโหมดนี้ ส่วนในโหมดที่ 2 เป็นโหมดที่มอสเฟตหยุดทำงาน ซึ่งการทำงานในโหมดนี้ขดลวดจะคืนพลังงาน และจ่ายกระแสผ่านตัวเก็บประจุ ผ่านโหลดและผ่านไดโอด (D_m) โดยกระแสที่ไหลผ่านขดลวดจะลดลงจากค่า I_2 จนกระทั่งถึงค่า I_1 ในขณะที่กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะลดลงจาก $I_2 - i_a$ จนกระทั่งถึงค่า $I_1 - i_a$ ซึ่งในสภาวะนี้กระแสที่จ่ายให้โหลดยังคงมีค่าคงที่ตลอดสภาวะการทำงาน นอกจากนี้สังเกตได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้โหลดในโหมดที่ 2 มาจากการคืนพลังงานของขดลวดที่สะสมพลังงานจากโหมดที่ 1 แต่กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้โหลดในโหมดที่ 1 มาจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุต



ก) การทำงานในโหมดที่ 1



ข) การทำงานในโหมดที่ 2

รูปที่ 6.11 โหมดการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคกิ้ง

จากรูปที่ 6.12 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันทางด้านเอาต์พุตกับแรงดันอินพุต จะคำนวณหาแรงดันเฉลี่ยทางด้านเอาต์พุตได้ดังสมการที่ 6.4 ดังต่อไปนี้

$$V_a = \frac{1}{T} \int_0^T V_o dt = \frac{V_s}{T} \times t_1 \quad (6.4)$$

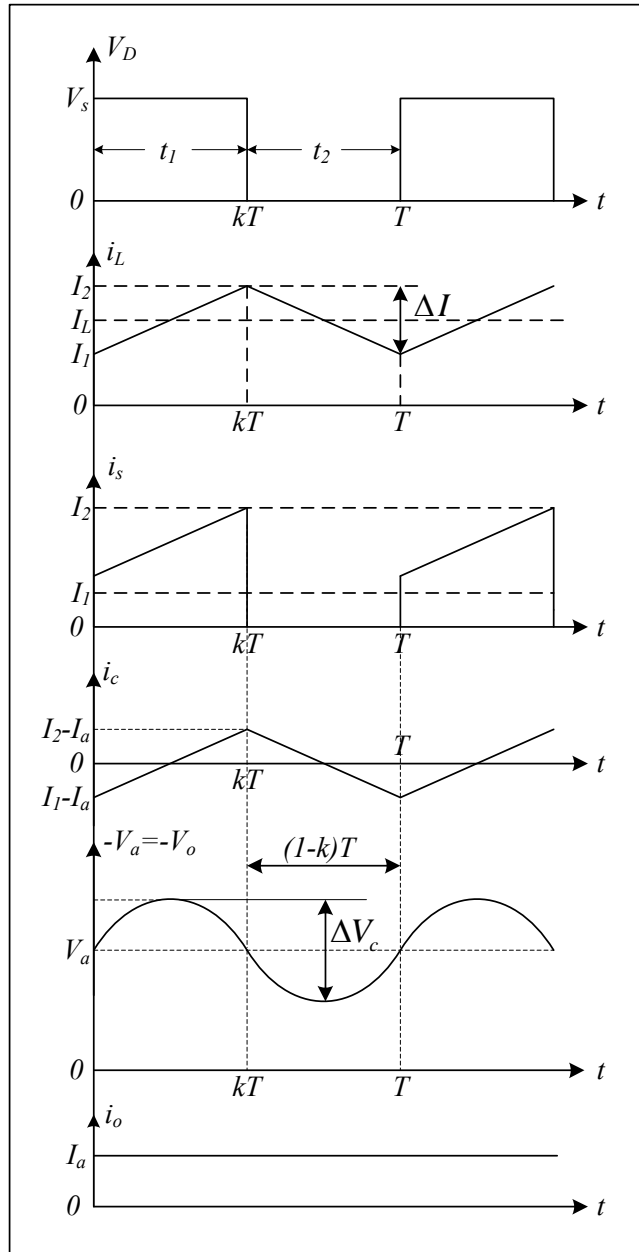
โดย t_1 คือ ช่วงเวลาการทำงานของมอสเฟต มีสมการคำนวณดังสมการที่ (6.5) และ t_2 คือ ช่วงเวลาหยุดทำงานของมอสเฟต แสดงได้ดังสมการที่ (6.6) ดังนี้

$$t_1 = kT \quad (6.5)$$

$$t_2 = (1 - k)T \tag{6.6}$$

เมื่อ k คือ รอบทำงาน (duty cycle)

T คือ คาบการทำงานของมอสเฟต (s)



รูปที่ 6.12 รูปสัญญาณอธิบายหลักการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

แทนค่า t_1 จากสมการที่ (6.5) ลงในสมการที่ (6.4) จะได้สมการคำนวณค่าแรงดันเอาต์พุตดังสมการที่ (6.7) ดังนี้

$$V_a = kV_s \quad (6.7)$$

6.4.2 การออกแบบ

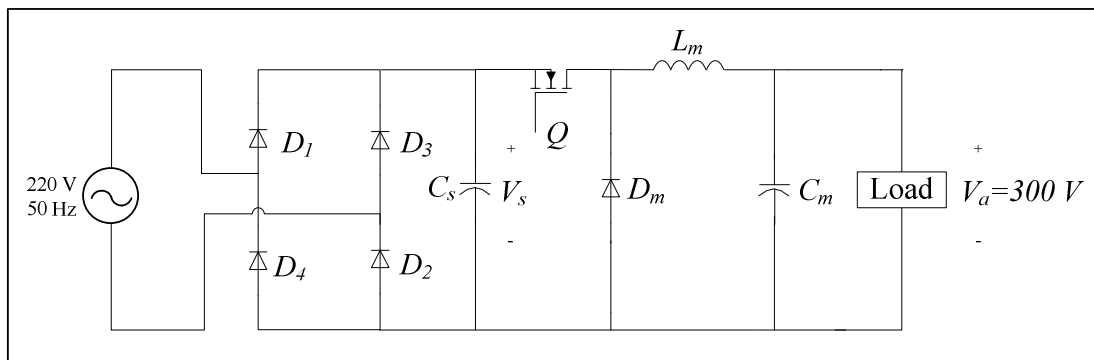
การออกแบบวงจรแปลงผันแบบบักก์ จำเป็นต้องทราบพิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เนื่องจากโพลของวงจรแปลงผันแบบบักก์ คือ มอเตอร์ดังกล่าว ดังนั้นวงจรแปลงผันแบบบักก์ในงานวิจัย จึงมีทั้งหมด 2 วงจรด้วยกัน คือ ฟังวงจรอาร์เมเจอร์และ ฟังวงจรสนาม โดยพิกัดของมอเตอร์ดังกล่าวได้จากแผ่นป้ายชื่อ (nameplate) ดังรูปที่ 6.13 ดังนี้

ELWE	
Typ Ms1	- Mot.
220 V	2.2 A
0.37 kW	
2360 min ⁻¹	
Err. 220 V	0.3 A
DIN VDE 0530	

รูปที่ 6.13 แผ่นป้ายชื่อของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

จากรูปที่ 6.13 ค่าพิกัดกระแสมากที่สุดของมอเตอร์ คือ กระแสอาร์เมเจอร์ เท่ากับ 2.2 A และพิกัดแรงดันของทั้งสองฝั่งมีค่าเท่ากัน คือ 220 V ซึ่งในการออกแบบวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ฟังวงจรของมอเตอร์ จะใช้ค่าพิกัดมากที่สุดของมอเตอร์ในการออกแบบและคำนึงถึงค่าตัวประกอบนิรภัย 25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่ง จะทำการกำหนดให้ค่าพิกัดกระแสมากกว่า $2.2 + (2.2 \times 0.25) = 2.75$ A (กำหนดให้ 5 A) และมีค่าพิกัดแรงดันมากกว่า $220 + (220 \times 0.25) = 275$ V (กำหนดให้ 300 V) ดังนั้นวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 วงจรจึงใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ เหมือนกัน โดยเหตุผลที่กำหนดให้ใช้พารามิเตอร์ของวงจร

ทั้ง 2 เหมือนกัน นอกจากการออกแบบโดยคำนึงถึงพิกัดกระแสมากที่สุดของมอเตอร์แล้ว อีกส่วนหนึ่ง คือ ถ้าวางจรแปลงผันแบบบัคค์ฟิ่งวงจรอาร์เมเจอร์เกิดความเสียหาย หรือชำรุด สามารถนำวงจรแปลงผันแบบบัคค์ฟิ่งวงจรสนามมาใช้แทนฟิ่งวงจรอาร์เมเจอร์ได้ โดยรูปวงจรที่ใช้ในการออกแบบเป็นดังรูปที่ 6.14 ดังนี้



รูปที่ 6.14 วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ใช้ในการทดสอบ

จากรูปที่ 6.14 วงจรแปลงผันแบบบัคค์ต่อกับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ ซึ่งการกำหนดค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบมีดังนี้

- ค่าแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ (V_s) จะมีค่าประมาณ 311 V
- แรงดันเอาต์พุต (V_a) มีค่า เท่ากับ 300 V
- ความถี่ในการสวิตช์ เท่ากับ 10 kHz
- ตัวเก็บประจุ (C_m) ที่ต่อขนานกับ โหลดเพื่อปรับค่าแรงดันปลิวของแรงดันเอาต์พุตให้เรียบ ดังนั้นกำหนดค่าแรงดันปลิว (ΔV_c) เท่ากับ 1%
- ตัวเหนี่ยวนำ (L_m) ที่ต่ออนุกรมกับ โหลดเพื่อปรับกระแสพริ้วของกระแสเอาต์พุตให้เรียบ จึงกำหนดค่ากระแสปลิว (ΔI) เท่ากับ 0.1 A (2% ของ 5 A)

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

ขั้นที่ 1 คำนวณขนาดของตัวเหนี่ยวนำ จากสมการที่ (6.8) ดังนี้

$$L = \frac{V_a(V_s - V_a)}{\Delta f_s V_s} \quad (6.8)$$

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการที่ (6.8) 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 กำหนดขนาดของตัวเก็บประจุ จากสมการที่ (6.9) ดังต่อไปนี้

$$\Delta V_c = \frac{\Delta I}{8f_s C} \quad (6.9)$$

จากสมการที่ (6.9) ย้ายข้างสมการหาค่า C และแทนค่าที่กำหนดลงในสมการจะได้

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

ดังนั้น ตัวเก็บประจุมีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับ 0.42 μF

ขั้นที่ 3 การออกแบบไดโอด (D_m)

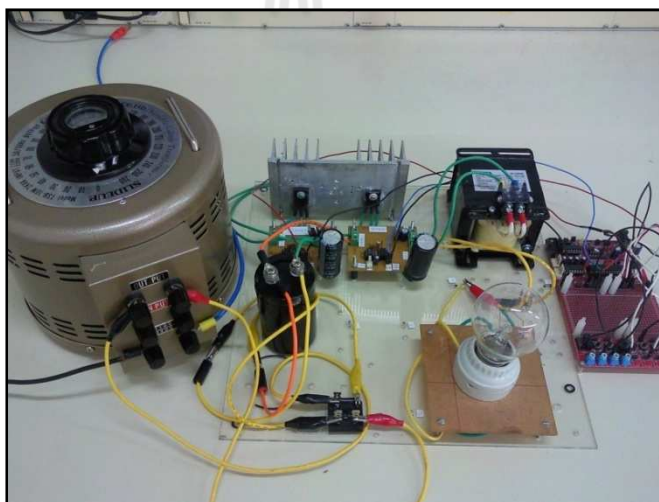
เมื่อพิจารณารูปที่ 6.10 ไดโอดต้องมีพิกัดแรงดันมากกว่าค่าแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 311 V แต่เมื่อพิจารณาค่าตัวประกอบนิรภัย 25 เปอร์เซ็นต์ ค่าพิกัดแรงดันของไดโอดจะมีค่ามากกว่า 388.75 V เพราะฉะนั้นจึงเลือกใช้ไดโอดเบอร์ MUR1560 มีค่าเท่ากับ 600 V ซึ่งมากกว่าค่าที่กำหนดไว้ โดยเอกสารข้อมูลของไดโอดแสดงไว้ในภาคผนวก ข

ขั้นที่ 4 การออกแบบมอสเฟต (Q)

การออกแบบมอสเฟตจะคำนึงถึงค่าพิกัดของแรงดันและกระแส จากหัวข้อที่ 6.4.2 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 ข

6.4.3 ผลการทดสอบวงจร

การทดสอบวงจรแปลงผันแบบบักก์ มีลักษณะวงจรการทดสอบดังรูปที่ 6.14 โดยการทดสอบจะปรับเปลี่ยนค่าเวลาในการทำงานของมอสเฟต (t_1) หรือรอบทำงานของวงจรแปลงผันแบบบักก์ โดยจัดอุปกรณ์สำหรับการทดสอบดังรูปที่ 6.15 โหลดที่ใช้ในการทดสอบ คือ หลอดไฟ ขนาด 220 V 100 W และการปรับค่าเวลาในการทำงานของมอสเฟต จะปรับด้วยบอร์ด dsPIC30F2010 ที่โปรแกรมด้วยภาษาซี การทดสอบดังกล่าวจะป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้ได้ V_s เท่ากับ 220 V ทำการกำหนดรอบทำงานของวงจรแปลงผันแบบบักก์ และวัดค่าแรงดันอินพุตเอาต์พุต ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 6.1 และภาพของรูปสัญญาณทางด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักก์จะมีลักษณะดังรูปที่ 6.16

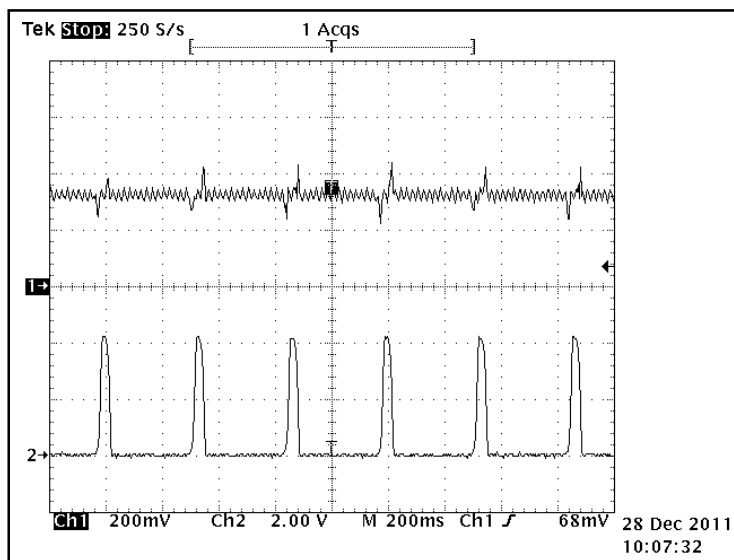


รูปที่ 6.15 การต่อวงจรสำหรับการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบักก์

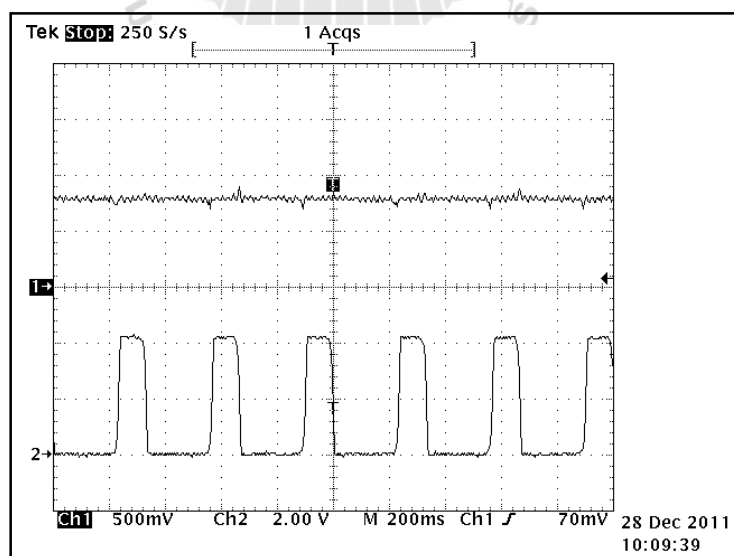
ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบักก์

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

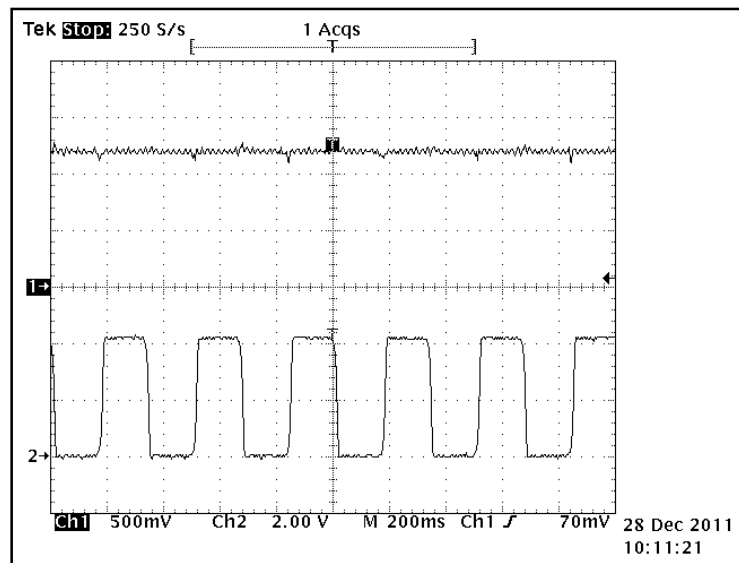
จากรูปที่ 6.16 ช่องสัญญาณที่ 1 ของออสซิลโลสโคปเป็นรูปสัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ในขณะที่ช่องสัญญาณที่ 2 เป็นรูปสัญญาณจุดชนวน (trigger signal) จากบอร์ด dsPIC30F2010



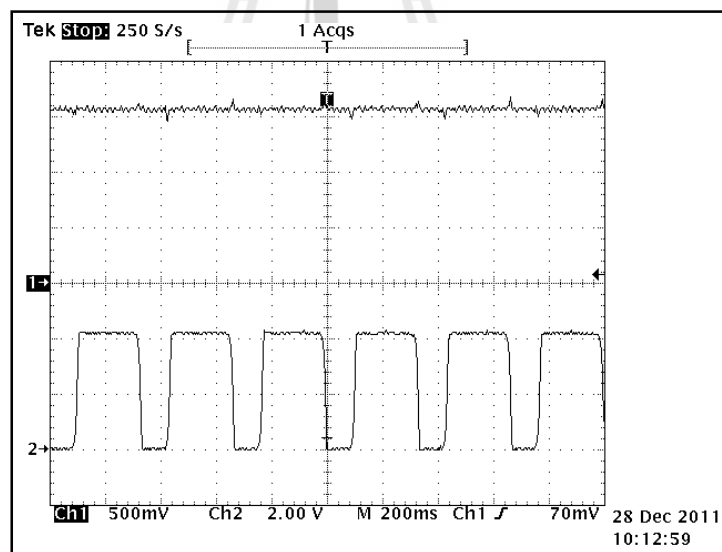
ก) รูปสัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ที่รอบทำงานเท่ากับ 10 เฟอร์เซ็นต์



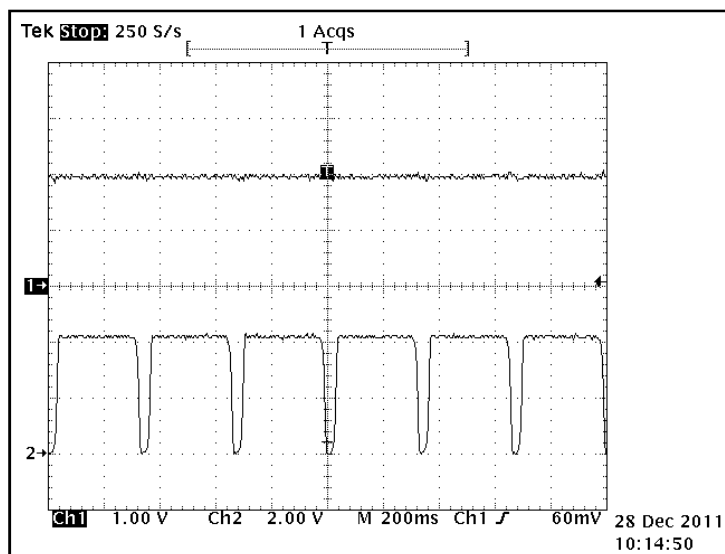
ข) รูปสัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ที่รอบทำงานเท่ากับ 30 เฟอร์เซ็นต์



ค) รูปสัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งที่รอบทำงานเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์



ง) รูปสัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งที่รอบทำงานเท่ากับ 70 เปอร์เซ็นต์



จ) รูปสัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่รอบทำงานเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 6.16 รูปสัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักก์

6.5 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์สำหรับงานวิจัย

วงจรถักเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เป็นการนำวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ และวงจรแปลงผันแบบบักก์ มาทำงานร่วมกันเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยมีโครงสร้างของวงจรถักเคลื่อนมอเตอร์ดังรูปที่ 6.17 และสามารถอธิบายการทดสอบได้ดังนี้

6.5.1 ผลการทดสอบวงจรถักเคลื่อนมอเตอร์

การทดสอบวงจรถักเคลื่อนมอเตอร์ในหัวข้อนี้ เป็นการทดสอบในกรณีที่ยังไม่มีตัวควบคุม (open loop) คือ การทดสอบจะปรับเปลี่ยนค่ารอบทำงานของวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 วงจร ซึ่งการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 กำหนดรอบทำงานของวงจรแปลงผันแบบบักก์ฝั่งวงจรสนามให้คงที่ แต่ทำการเปลี่ยนแปลงรอบทำงานของฝั่งอาร์เมเจอร์ ส่วนกรณีที่ 2 จะทำตรงกันข้ามกับกรณีที่ 1 ซึ่งการทดสอบทั้ง 2 กรณีนี้ จะเหมือนกับการควบคุมความเร็วรอบด้วยวิธีดั้งเดิม ตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 โดยผลการทดสอบวงจรถักเคลื่อนมอเตอร์แสดงได้ดังตารางที่ 6.2 และ 6.3 ตามลำดับ จากตารางผลการทดสอบทั้งสองตาราง สังเกตได้ว่าเมื่อมีการ

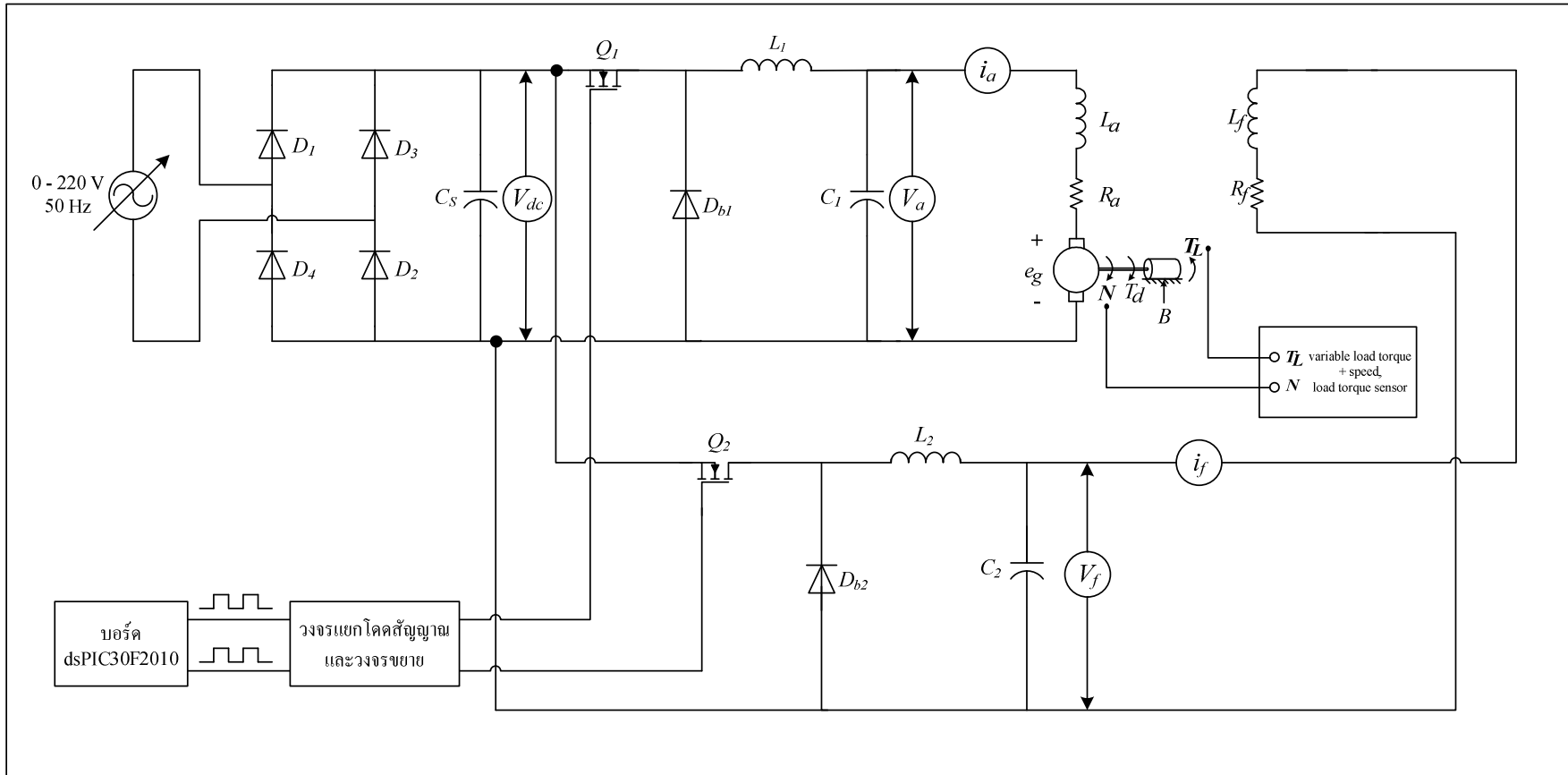
ปรับเปลี่ยนรอบทำงานของวงจรแปลงผันแบบบักส์ ไม่ว่าฝั่งใดก็ตาม จะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นไปตามหลักการของการควบคุมความเร็วรอบด้วยวิธีดั้งเดิม

ตารางที่ 6.2 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 6.3 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 6.17 แผนภาพวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

จากรูปที่ 6.17 จะสังเกตได้ว่าสัญญาณจุดชนวนมอสเฟตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 วงจร ได้จากบอร์ด dsPIC30F2010 โดยการเขียนโปรแกรมภาษาซี และต้องผ่านวงจรแยกโคคสัญญาณและวงจรขยายสัญญาณก่อนที่จะนำไปจุดชนวนมอสเฟต โดยสาเหตุที่ต้องใช้วงจรแยกโคคสัญญาณ คือ สำหรับแยกกราวด์ของสัญญาณแต่ละสัญญาณให้ออกจากกัน ซึ่งปัญหาของกราวด์นั้นถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญมาก เพราะปัญหากราวด์อาจทำให้เกิดความเสียหายแก่วงจรและอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ ส่วนการผ่านวงจรขยายสัญญาณนั้น เพื่อขยายแรงดันของสัญญาณที่ออกจากบอร์ด dsPIC30F2010 ซึ่งมีค่าประมาณ 5 V ให้ได้สัญญาณจุดชนวนตามที่มอสเฟตต้องการ คือ อย่างน้อย 10 V จึงจะทำให้การจุดชนวนมอสเฟตไม่เกิดปัญหาขึ้น

6.6 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอโครงสร้างฮาร์ดแวร์สำหรับการขับเคลื่อนเพื่อประหยัดพลังงาน โดยแสดงให้เห็นว่าวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์กับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ รวมทั้งใช้บอร์ด dsPIC30F2010 สร้างสัญญาณจุดชนวนให้มอสเฟต มีความสามารถขับเคลื่อนมอเตอร์ที่สถานะความเร็วรอบต่าง ๆ ได้ คูได้จากการทดสอบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นดังกล่าวข้างต้น วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ดังกล่าวสามารถปรับค่าแรงดันได้หลายย่าน ตั้งแต่ค่าแรงดันน้อยมาก จนถึงค่าที่ใกล้เคียงค่าพิคก์ของมอเตอร์ อีกทั้งยังสามารถปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ตลอดย่านการทำงาน ซึ่งการปรับความเร็วรอบดังกล่าวเป็นการปรับความกว้างของสัญญาณจุดชนวนของมอสเฟตจากบอร์ด dsPIC30F2010 และในส่วนของการควบคุมชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น สำหรับประหยัดพลังงาน จะใช้ตัวควบคุมแบบฐานกฎ ซึ่งจะนำเสนอในบทถัดไป

บทที่ 7

ตัวควบคุมแบบฐานกฎสำหรับการประหยัดพลังงาน

7.1 บทนำ

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นเพื่อประหยัดพลังงานสำหรับงานวิจัยนี้ใช้ตัวควบคุมที่เรียกว่า ตัวควบคุมแบบฐานกฎ (rule based controller) โดยมีหลักการการคำนวณที่ไม่ยุ่งยากและซับซ้อนมากนัก ตัวควบคุมดังกล่าวจะใช้สำหรับวิธีการประหยัดพลังงาน ซึ่งมีการคำนวณหาค่ากระแสสนามที่เหมาะสมค่าหนึ่งตามสภาวะการทำงานของมอเตอร์ ที่ทำให้กำลังงานสูญเสียในมอเตอร์มีค่าน้อยที่สุด รวมถึงควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นให้ได้ตามความต้องการอีกด้วย ซึ่งในบทนี้ได้นำเสนอรายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับตัวควบคุมแบบฐานกฎที่ใช้ในงานวิจัย

7.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบฐานกฎ

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

ถ้า.....แล้ว..... (if.....then.....)

การออกแบบตัวควบคุมแบบฐานกฎสำหรับงานวิจัยนี้ กฎการควบคุมได้มาจากการศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบ ซึ่งการศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมดังกล่าวอาศัยการสังเกตระบบ รวมถึงมีการเก็บข้อมูลต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ ทั้งนี้เนื่องจากการออกแบบกฎในงานวิจัยมีจุดประสงค์เพื่อควบคุมการทำงาน 2 โหมด คือ กระแสสนามของมอเตอร์และความเร็วรอบของมอเตอร์ ซึ่งการออกแบบกฎมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

7.2.1 โหมคการทำงานที่ 1 การควบคุมกระแสสนามของมอเตอร์

โหมคการทำงานที่ 1 จะคำนวณหาค่ากระแสสนามที่เหมาะสมเพื่อประหยัดพลังงาน โดยก่อนการคำนวณ โปรแกรมจะรับข้อมูลความเร็วรอบและแรงบิดตามที่ต้องการ หลังจากโปรแกรมคำนวณค่ากระแสสนามเป็นที่เรียบร้อยแล้ว โปรแกรมจะส่งค่ารอบทำงานเพื่อทำการปรับมุมจุดชนวนที่มอสเฟตของวงจรแปลงผันแบบบัก์ฟังก์ชันวงจรมอเตอร์ให้กระแสสนามตามที่ต้องการ จึงจะเปลี่ยนไปทำงานในโหมคการทำงานที่ 2 (อธิบายไว้ในหัวข้อต่อไป)

การควบคุมกระแสสนามด้วยวิธีการข้างต้นนั้น คือการปรับค่าแรงดันฟังก์ชันวงจรมอเตอร์ เนื่องจากกระแสสนามมีค่าแปรผันตรงกับแรงดันทางฟังก์ชันวงจรมอเตอร์ ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบและปรับเปลี่ยนกฎในการควบคุม ดังตารางที่ 7.1 ดังนี้

ตารางที่ 7.1 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 7.1 ดังนี้

$$\text{error1} = \text{Value.Ifcal} - \text{Value.Ifact} \quad (7.1)$$

ส่วนเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดของกระแสสนาม คำนวณได้ดังสมการที่ (7.2) คือ

$$\text{percent_error1} = \frac{\text{Value.Ifcal} - \text{Value.Ifact}}{\text{Value.Ifcal}} \times 100 \quad (7.2)$$

เมื่อ Value.Ifcal คือ กระแสสนามจากการคำนวณด้วยวิธีฐานแบบจำลอง

Value.Ifact คือ กระแสสนามในขณะใด ๆ

การทดสอบกฎดังกล่าว ทำการทดสอบที่แรงบิด $0.2 \text{ N} \cdot \text{m}$ และความเร็วรอบ 1500 rpm จากตารางที่ 7.1 จะพบว่าเมื่อปรับกฎเปลี่ยนไป จะทำให้เวลาในการลู่เข้าเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นจึงได้เลือกกฎชุดที่ 3 ในการควบคุมกระแสสนามของมอเตอร์เนื่องจากใช้เวลาในการลู่เข้าน้อยที่สุด และสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

กฎที่ 1 ถ้า <ค่าผิดพลาดของกระแสสนามเป็นบวกและมีขนาดเกินกว่า 0.015 A> แล้ว <เพิ่มรอบทำงาน 2.5 เปอร์เซ็นต์>

กฎที่ 2 ถ้า <ค่าผิดพลาดของกระแสสนามเป็นบวกและมีขนาดเกินกว่า 0.012 A> แล้ว <เพิ่มรอบทำงาน 1.5 เปอร์เซ็นต์>

กฎที่ 3 ถ้า <ค่าผิดพลาดของกระแสสนามเป็นบวกและมีขนาดเกินกว่า 0.010 A> แล้ว <เพิ่มรอบทำงาน 1.0 เปอร์เซ็นต์>

กฎที่ 4 ถ้า <ค่าผิดพลาดของกระแสสนามเป็นบวกและมีขนาดเกินกว่า 0.007 A> แล้ว <เพิ่มรอบทำงาน 0.5 เปอร์เซ็นต์>

กฎที่ 5 ถ้า <ค่าผิดพลาดของกระแสสนามเป็นบวกและมีขนาดเกินกว่า 0.005 A> แล้ว <เพิ่มรอบทำงาน 0.1 เปอร์เซ็นต์>

กฎที่ 6 ถ้า <ค่าผิดพลาดของกระแสสนามเป็นลบและมีขนาดเกินกว่า 0.015 A> แล้ว <ลดรอบทำงาน 2.5 เปอร์เซ็นต์>

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>

7.2.2 โหมดการทำงานที่ 2 การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

โหมดการทำงานที่ 2 สำหรับควบคุมความเร็วรอบให้ได้ตามที่ต้องการ การควบคุมดังกล่าวทำได้โดยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าของวงจรฟีดแบ็คอาร์เมเจอร์ ด้วยการปรับมุมจุดชนวนของมอสเฟตของวงจรแปลงผันแบบบักคัพวงจรรีอาร์เมเจอร์ โดยเงื่อนไขการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าพิจารณาจากค่าผิดพลาดของความเร็วรอบ (error2) ดังสมการที่ (7.3) ดังนี้

$$\text{error2} = N_t - \text{Value.Nact} \quad (7.3)$$

ส่วนเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดของความเร็วรอบ คำนวณได้ดังสมการที่ (7.4) คือ

$$\text{percent_error2} = \frac{N_t - \text{Value.Nact}}{N_t} \times 100 \quad (7.4)$$

เมื่อ N_t คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ต้องการ

Value.Nact คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ในขณะใด ๆ

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ หมายถึง การปรับค่าแรงดันฟีดแบ็คอาร์เมเจอร์ 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>

7.3 การสร้างตัวควบคุมแบบฐานกฎด้วยบอร์ด dsPIC30F2010

การสร้างตัวควบคุมแบบฐานกฎด้วยบอร์ด dsPIC30F2010 มีแผนภาพการทำงานดังรูปที่ 7.1 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;
//ตรวจสอบค่าความผิดพลาดว่าเป็นบวกหรือลบแล้วคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาด

%เริ่มโหมดการควบคุมกระแสสนาม
{
```

```

if (percent_error1 <= 5) //ถ้าเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดน้อยกว่าหรือ
    { //เท่ากับ 5
        System.EnaCtrlIFieldMode = false; //ออกจากโหมดการควบคุมกระแส
        System.EnaCal_IField = false; //หยุดการคำนวณกระแสสนาม
        System.EnaCtrlSpeedMode = true; //เริ่มโหมดการควบคุมความเร็วรอบ
        Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty; //ส่งค่ารอบทำงานของฝั่งวงจรถานาม
    }
else
    {
if (error1>0) //ถ้าค่าความผิดพลาดเป็นบวก
    {
if (error1 > 15) //ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่า 15
Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty+25; //เพิ่มรอบทำงาน 25 (2.5 เปอร์เซ็นต์)
else if (error1 > 12) //ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่า 12
Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty+15; //เพิ่มรอบทำงาน 15 (1.5 เปอร์เซ็นต์)
else if (error1 > 10) //ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่า 10
Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty+10; //เพิ่มรอบทำงาน 10 (1.0 เปอร์เซ็นต์)
else if (error1 > 7) //ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่า 7
Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty+5; //เพิ่มรอบทำงาน 5 (0.5 เปอร์เซ็นต์)
else if (error1 > 5) //ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่า 5
Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty+1; //เพิ่มรอบทำงาน 1 (0.1 เปอร์เซ็นต์)
if(Value.CalPWM1Duty > 950) //ถ้ารอบทำงานของฝั่งวงจรถานาม
//มากกว่า 950 (95 เปอร์เซ็นต์)
Value.CalPWM1Duty = 950; //ให้รอบทำงานของฝั่งวงจรถานาม
//เท่ากับ 950 (95 เปอร์เซ็นต์)
    }
else //ถ้าค่าความผิดพลาดเป็นลบ
    {
if (error1 < -15) //ถ้าค่าความผิดพลาดน้อยกว่า -15
Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty-25; //ลดรอบทำงาน 25 (2.5 เปอร์เซ็นต์)
    }
    }
    }

```

```

else if (error1 < -12) //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) //ถ้ารอบทำงานของฟ้ังวงจรสนาม
น้อยกว่า 100 (10 เปอร์เซ็นต์)
Value.CalPWM1Duty = 100; //ให้รอบทำงานของฟ้ังวงจรสนาม
เท่ากับ 100 (10 เปอร์เซ็นต์)
}
}
}
else Value.CalPWM1Duty = Value.PWM1Duty; //ส่งค่ารอบทำงานของฟ้ังวงจรสนาม

- 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

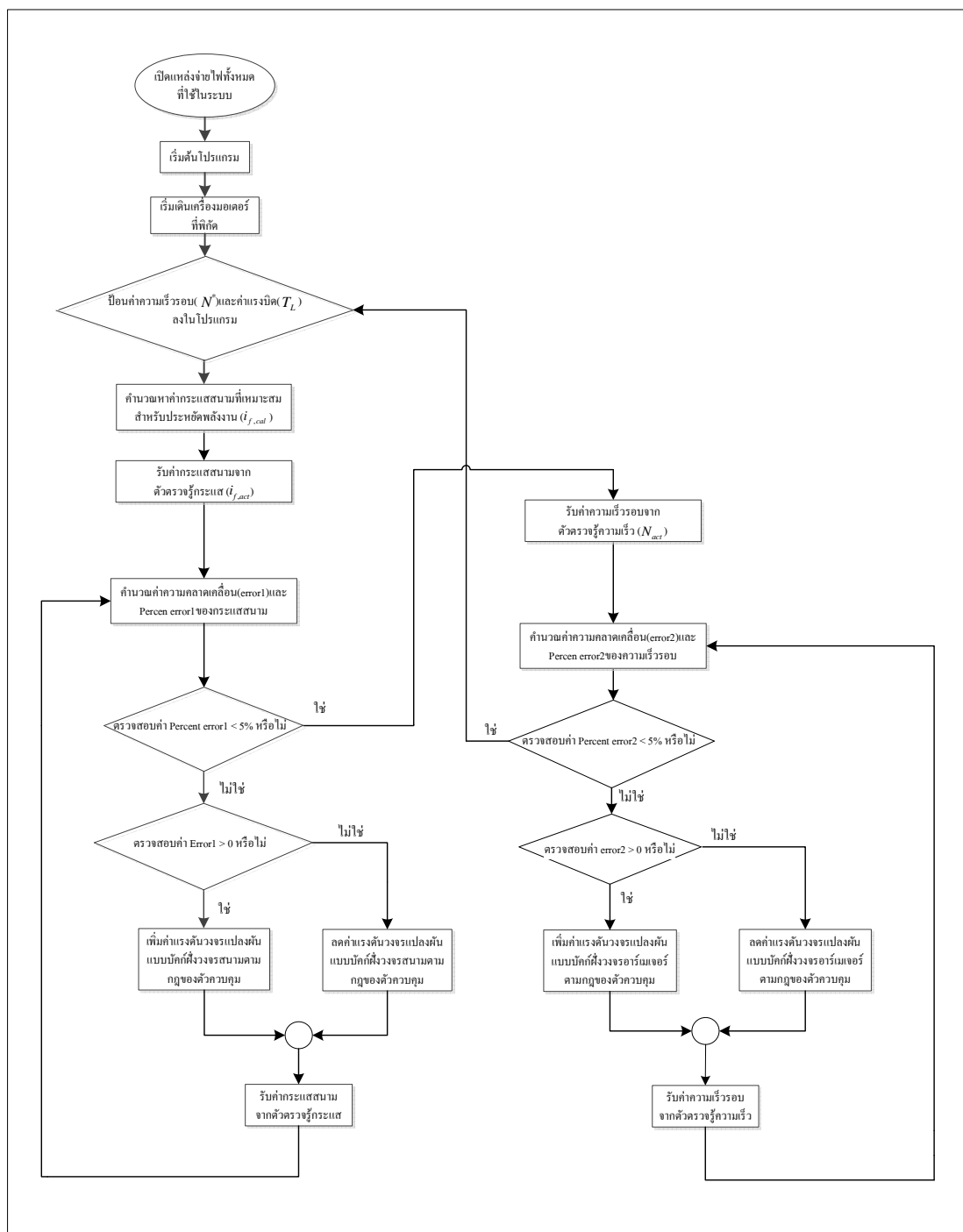
%เริ่มโหมดการควบคุมความเร็วรอบ
if (Value.percent_error2 <= 5) //ถ้าเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดน้อยกว่าหรือ
{ เท่ากับ 5
Value.CalPWM2Duty = Value.PWM2Duty; //ส่งค่ารอบทำงานของฟ้ังวงจรอาร์เมเจอร์

```

```

    }
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; //ส่งค่ารอบทำงานของฝั่งวงจรรออาร์เมเจอร์

```

รูปที่ 7.1 แผนภาพการทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีตัวควบคุมแบบฐานกฎ

จากรูปที่ 7.1 การทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ ขึ้นแรกจะทำการเปิดแหล่งจ่ายไฟทั้งหมดที่ใช้ในระบบ หลังจากนั้นจึงเริ่มต้นการทำงานของโปรแกรมซึ่งโปรแกรมห้ดกล่าวจะควบคุมกระบวนการทำงานทั้งหมด เพื่อประหยัดพลังงานในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า

กระแสตรงชนิดแยกกระตุ่น โดยในช่วงต้นของกระบวนการทำงานจะเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ จนกระทั่งได้แรงดันวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรถ่านที่พิกัด (220 V) ต่อมาจึงทำการป้อนค่าความเร็วรอบและแรงบิดที่ต้องการ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับคำนวณค่ากระแสสนามที่เหมาะสมสำหรับประหยัดพลังงาน หลังจากนั้นจะทำการปรับค่ากระแสสนามดังกล่าวจากวงจรแปลงผันแบบบัคค์ฟิ่งวงจรถ่านด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และรับค่ากระแสสนามของมอเตอร์ผ่านตัวตรวจรู้กระแส เพื่อตรวจสอบว่ากระแสสนามดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับกระแสสนามที่ต้องการหรือไม่ ซึ่งการตรวจสอบจะทำการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของกระแสสนามตามสมการที่ (7.2) ถ้าค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมีค่ามากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ วงจรแปลงผันแบบบัคค์จะทำหน้าที่เพิ่มและลดแรงดันฟิ่งวงจรถ่านตามกฎของตัวควบคุมที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 7.2 จนกว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของกระแสสนามจะมีค่าน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ แล้วไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะเปลี่ยนไปควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยมีการทำงานเช่นเดียวกับการควบคุมกระแสสนาม ต่างกันเพียงแค่การควบคุมความเร็วรอบนั้น วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ทำหน้าที่เพิ่มลดแรงดัน คือ ฟิ่งวงจรอาร์เมเจอร์ และเมื่อต้องการหยุดการทำงานของโปรแกรมหรือเปลี่ยนจุดการทำงานใหม่ สามารถทำได้โดยลดแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟจนหมดแล้วจึงป้อนค่าความเร็วรอบและแรงบิดค่าใหม่ลงในโปรแกรม

7.4 สรุป

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

บทที่ 8

ผลการทดสอบการประหยัดพลังงาน

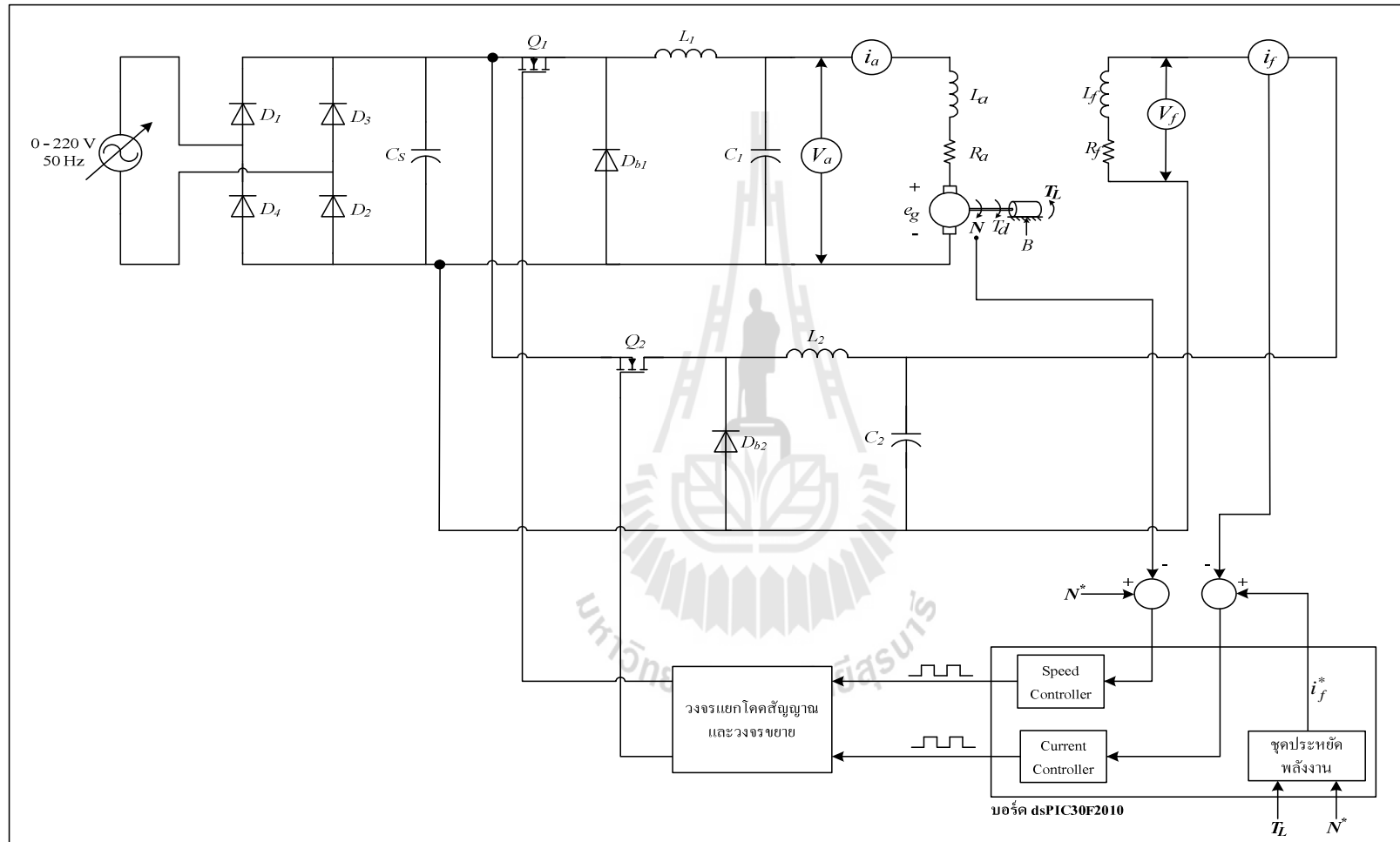
8.1 บทนำ

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

8.2 การทดสอบและผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์

การทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นสำหรับประหยัดพลังงานตามหลักการของงานวิจัย แสดงได้ดังรูปที่ 8.1 ซึ่งจากสรุปวงจรถัดกล่าวพบว่าได้แบ่งการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นออกเป็น 2 โหมด คือ ควบคุมกระแสสนามและความเร็วรอบของมอเตอร์ และหลักการทำงานของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์นี้สามารถอธิบายได้ดังแผนภาพการทำงานรูปที่ 7.1 ในบทที่ 7

การทดสอบชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ ได้ทำการทดสอบทั้งแบบมีตัวควบคุมเพื่อประหยัดพลังงานหรือวิธีฐานแบบจำลองและไม่มีตัวควบคุมหรือวิธีดั้งเดิม และมีการเก็บข้อมูลทางพลังงาน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ ซึ่งการเก็บข้อมูลทางพลังงานจะทำการบันทึกข้อมูลแรงบิด โทลด์ ความเร็วรอบของมอเตอร์ รวมทั้งกระแสและแรงดันของวงจรมอเตอร์ทั้งสองฝั่ง เพื่อนำไปคำนวณหา กำลังงานอินพุต กำลังงานเอาต์พุตและกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ โดยผลการทดสอบดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 8.1 และ 8.2 ตามลำดับ



รูปที่ 8.1 แผนภาพวงจรทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นสำหรับประหยัดพลังงาน

ตารางที่ 8.1 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 8.1 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 8.2 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 8.2 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 ในสภาวะแรงบิดโหลดเท่ากับ $1.1 \text{ N}\cdot\text{m}$ และความเร็วรอบ เท่ากับ 1300 rpm โดยผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานแสดงได้ดังตารางที่ 8.3 ดังนี้

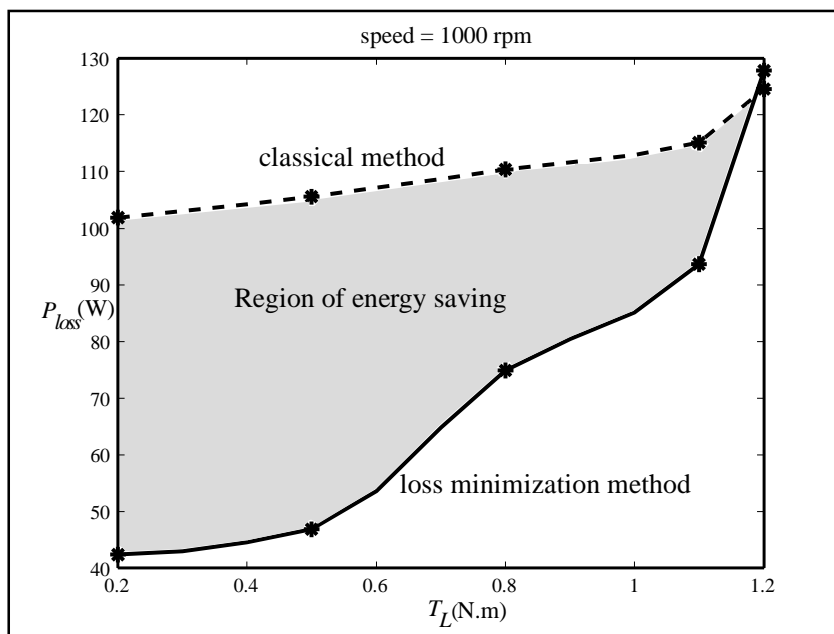
ตารางที่ 8.3 ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน

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
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

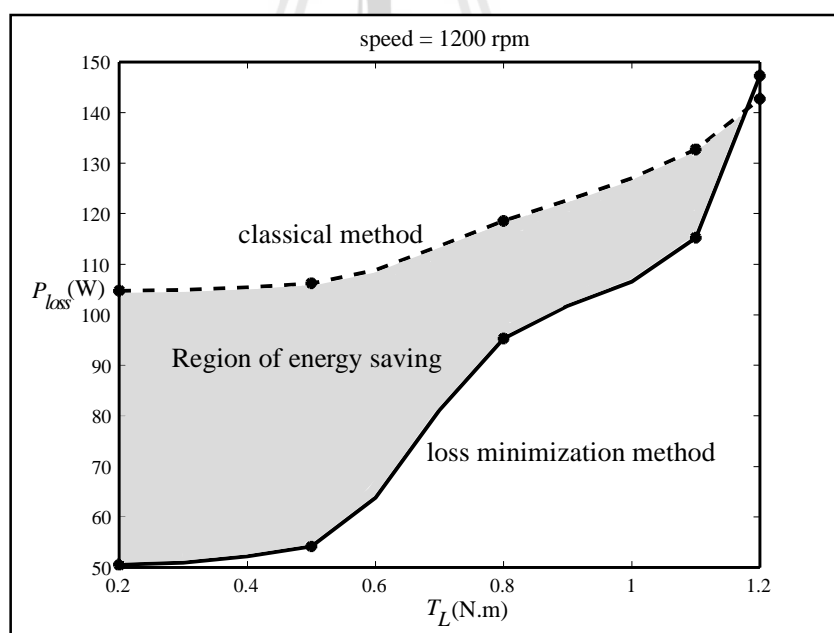
ตารางที่ 8.3 ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน (ต่อ)

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)	
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

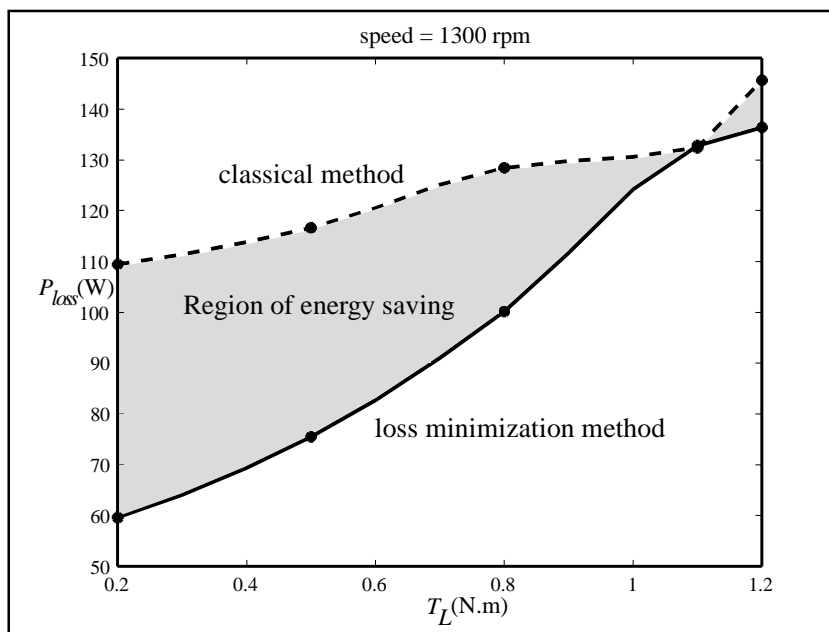
จากตารางที่ 8.3 พบว่าเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานในสภาวะแรงบิดโหลดต่ำ ๆ ประหยัดพลังงานได้ถึง 48.61 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในสภาวะ 50 เปอร์เซ็นต์ของโหลดเต็มพิกัดประหยัดพลังงานได้ 18.56 เปอร์เซ็นต์ และในสภาวะ 80 เปอร์เซ็นต์ของโหลดเต็มพิกัดประหยัดพลังงานได้เพียง 6.43 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากการคำนวณดังกล่าวข้างต้น สังเกตได้ว่าเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานจะมีค่าลดลง และจากผลดังกล่าวการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ่นตามหลักการของงานวิจัย นอกจากจะลดกำลังงานอินพุตแล้ว กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ก็ลดลงด้วยเช่นกัน ดังนั้นจากผลทั้งหมดข้างต้นเมื่อนำไปวาดกราฟได้ดังรูปที่ 8.2 เพื่อเปรียบเทียบค่ากำลังงานสูญเสียของมอเตอร์และแรงบิดโหลด ระหว่างกรณีวิธีฐานแบบจำลองสำหรับประหยัดพลังงานและวิธีดั้งเดิม ในสภาวะแรงบิดโหลดและความเร็วรอบตามที่ได้คำนวณไปแล้วข้างต้น ซึ่งจากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่าที่ทุก ๆ ค่าความเร็วรอบที่คำนวณ ช่วงที่แรงบิดโหลดต่ำ ผลต่างของค่ากำลังงานสูญเสียของทั้ง 2 วิธี มีค่าต่างกันมาก และเมื่อแรงบิดโหลดเพิ่มขึ้นผลต่างของค่ากำลังงานสูญเสียมีค่าลดลง ดังนั้นจากผลการทดสอบทั้งหมดที่กล่าวไปแล้วข้างต้น พบว่าการควบคุมมอเตอร์โดยวิธีฐานแบบจำลองสามารถประหยัดพลังงานได้



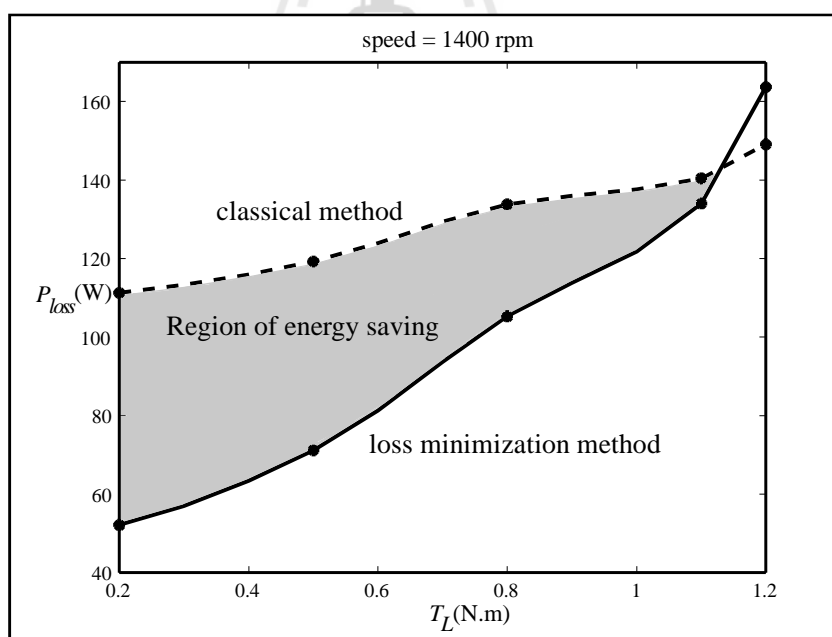
ก) ความเร็วรอบ เท่ากับ 1000 rpm



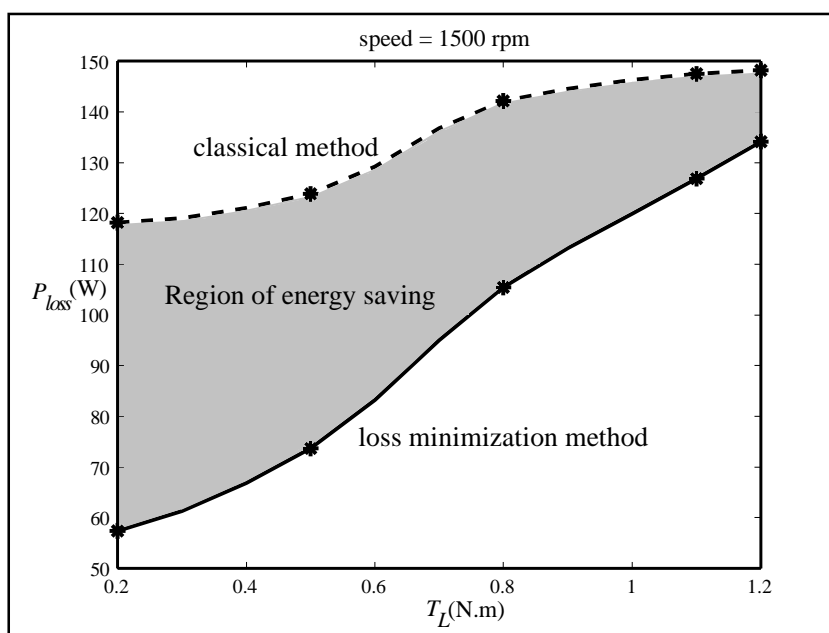
ข) ความเร็วรอบ เท่ากับ 1200 rpm



ค) ความเร็วรอบ เท่ากับ 1300 rpm



ง) ความเร็วรอบ เท่ากับ 1400 rpm



จ) ความเร็วรอบ เท่ากับ 1500 rpm

รูปที่ 8.2 กราฟเปรียบเทียบกำลังงานสูญเสียระหว่างวิธีฐานแบบจำลองสำหรับประหยัดพลังงาน และวิธีดั้งเดิมในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์

8.3 สรุป

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นเพื่อประหยัดพลังงานสำหรับงานวิจัยนี้ใช้ตัวควบคุมแบบฐานกฎ และจากผลการทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลทางพลังงานของมอเตอร์ ในสถานะที่มีตัวควบคุมสำหรับการประหยัดพลังงานตามหลักการของงานวิจัย เปรียบเทียบกับสถานะที่ไม่มีตัวควบคุม พบว่า การควบคุมมอเตอร์ตามหลักการดังกล่าวประหยัดพลังงานได้ถึง 48.61 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่แรงบิดโหลดต่ำ ๆ และที่สถานะ 50 เปอร์เซ็นต์ของโหลดเต็มพิกัด ประหยัดพลังงานได้ 18.56 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากผลดังกล่าวข้างต้น ตัวควบคุมที่ได้ออกแบบเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยทุกประการ กล่าวคือ ตัวควบคุมสามารถปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เพื่อให้ได้ความเร็วรอบตามที่ต้องการ โดยอยู่บนเงื่อนไขของการประหยัดพลังงานได้ตลอดสถานะการทำงานของมอเตอร์

บทที่ 9

สรุปและข้อเสนอแนะ

9.1 สรุป

งานวิจัยนี้ดำเนินการศึกษา ออกแบบ และสร้างชุดควบคุมระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เพื่อประหยัดพลังงาน โดยอาศัยการวิเคราะห์จากวงจรสมมูลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ เพื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าได้ อีกทั้งยังได้ศึกษาเกี่ยวกับกำลังงานสูญเสียชนิดต่าง ๆ ของมอเตอร์ ซึ่งรายละเอียดได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 ของรายงานวิจัย งานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ที่เรียกว่า การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ดังกล่าว โดยได้ทำการทดสอบมอเตอร์และแบ่งข้อมูลจากการทดสอบออกเป็น 2 ชุด เพื่อใช้ในการค้นหาด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์และเพื่อตรวจสอบผลการค้นหา รายละเอียดดังกล่าวในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของกำลังงานสูญเสียได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 ของรายงานวิจัย ส่วนในบทที่ 4 ของรายงานวิจัยได้อธิบายเกี่ยวกับการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ วิธีการดังกล่าวสามารถลดกำลังงานสูญเสียได้ดี แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ มีความยุ่งยากซับซ้อนในกระบวนการคำนวณ งานวิจัยนี้จึงได้คิดค้นวิธีการประหยัดพลังงานขึ้นใหม่ คือ วิธีฐานแบบจำลอง โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสมการคำนวณของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เป็นฐานในการคำนวณเพื่อให้เกิดการประหยัดพลังงาน ซึ่งได้นำเสนอผลการคำนวณและการเปรียบเทียบผลการคำนวณเพื่อยืนยันว่าวิธีการประหยัดพลังงานตามหลักการของงานวิจัยสามารถลดกำลังงานสูญเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ รายละเอียดในส่วนนี้ได้นำเสนอในบทที่ 5 ของรายงานวิจัย ส่วนในบทที่ 6 ของรายงานวิจัยได้นำเสนอหลักการดำเนินงานรวมถึงวิธีการออกแบบของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ที่ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์และวงแปลงผันแบบบัพคัก และผลการทดสอบวงจรดังกล่าว การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นเพื่อประหยัดพลังงาน ในงานวิจัยได้เลือกใช้ตัวควบคุมที่เรียกว่า ตัวควบคุมแบบฐานกฎ ได้นำเสนอในบทที่ 7 ของรายงานวิจัย ซึ่งการควบคุมดังกล่าว จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การควบคุมกระแสสนามของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นให้ได้ตามค่าที่คำนวณด้วยวิธีฐานแบบจำลองได้ และส่วนที่ 2 ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้ได้ตามความต้องการ ส่วนในบทที่ 8 ของรายงานวิจัย ได้นำเสนอผลการทดสอบเพื่อ

เก็บข้อมูลทางพลังงานของมอเตอร์ ในสถานะที่มีตัวควบคุมสำหรับประหยัดพลังงานตามหลักการของงานวิจัยนี้ เปรียบเทียบกับสถานะที่ไม่มีตัวควบคุม พบว่าการควบคุมมอเตอร์ตามหลักการดังกล่าว ประหยัดพลังงานได้ถึง 48.61 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่แรงบิดโหลดต่ำ ๆ และที่สถานะ 50 เปอร์เซ็นต์ของโหลดเต็มพิกัด ประหยัดพลังงานได้ 18.56 เปอร์เซ็นต์ จากผลดังกล่าวข้างต้น ตัวควบคุมที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยทุกประการ

9.2 ข้อเสนอแนะ

- ควรดำเนินการศึกษา ออกแบบ และสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยก กระตุ่นเพื่อประหยัดพลังงาน ในช่วงแรงบิดโหลดตั้งแต่ 70 – 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นช่วงที่มอเตอร์ได้รับการคาดหวังว่าจะต้องทำงานด้วยประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อให้ครอบคลุมย่านการทำงานให้ครบถ้วน

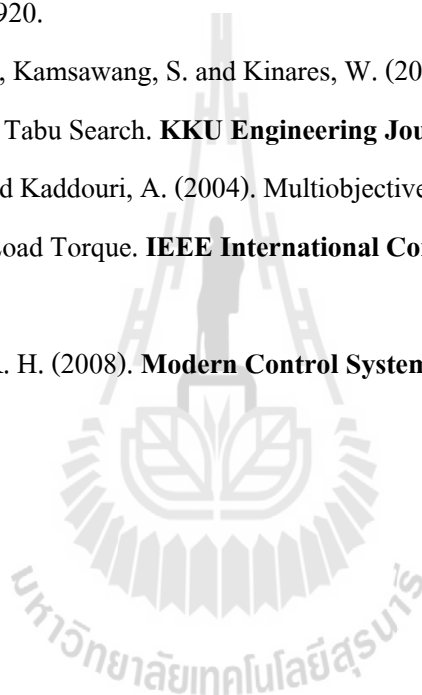
- ควรศึกษาและวิเคราะห์วิธีการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบที่เกิดจากการสวิตชิงของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ทั้งนี้เนื่องจาก การกำจัดฮาร์มอนิกส์ในระบบจะช่วยลดค่ากำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากฮาร์มอนิกส์ และยังช่วยยืดอายุการใช้งานของมอเตอร์ให้ยาวนานยิ่งขึ้นอีกด้วย

- ควรปรับปรุงชุดควบคุมของมอเตอร์ให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจใช้ตัวควบคุมชนิดอื่นที่ให้ผลการดำเนินงานดีกว่าตัวควบคุมแบบฐานกฎ

รายการอ้างอิง

- กองพล อารีรักษ์. (2545). ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 1.5 แรงม้า ที่ใช้พลังงานอย่างเหมาะสมที่สุด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- กองพัน อารีรักษ์ และ สรวุฒิ สุจิตจร. (2545). การเปรียบเทียบสมรรถนะของการค้นหาด้วยจินเนติกอัลกอริทึมกับวิธีตาม. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี 9: 61-68.
- อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2552). 1. ปัญหาเชิงคำนวณ. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- นคร ภักดีชาติ, ณัฐพล วงศ์สุนทรชัย และ ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตวิไล. (2547). คู่มือการทดลองเบื้องต้น dsPIC Microcontroller ด้วยภาษา C กับ MPLab C30. กรุงเทพฯ : อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์.
- 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: Prentice-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: Prentice-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

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

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.
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.
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.





ภาคผนวก ข

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"

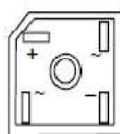
Wire Lead Structure

Suffix "M"

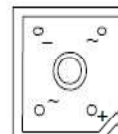
Terminal Location Face to Face



GBPC



GBPC-W



Absolute Maximum Ratings * $T_J = 25^\circ\text{C}$ 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 @ $T_A = 55^\circ\text{C}$								A	
		GBPC12							12	A
		GBPC15							15	A
		GBPC25							25	A
I_{FSM}	Non-Repetitive Peak Forward Surge Current GBPC12, 25, 25 8.3ms Single Half-Sine-Wave GBPC35								A	
		300							A	
		400							A	
T_{STG}	Storage Temperature Range	-55 to +150							$^\circ\text{C}$	
T_J	Operating Junction Temperature	-55 to +150							$^\circ\text{C}$	

* 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	$^\circ\text{C}/\text{W}$

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	1.1 (Max.)	
	@7.5A	GBPC15		
	@12.5A	GBPC25		
@17.5A	GBPC35			
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	375	A^2Sec
		GBPC35	660	A^2Sec
C_T	Total Capacitance, per leg $V_R = 4.0\text{V}$ $f = 1.0\text{MHz}$	GBPC12, 15, 25	180	pF
		GBPC35	200	pF

Typical Performance Characteristics

Figure 1. Forward Current Derating Curve

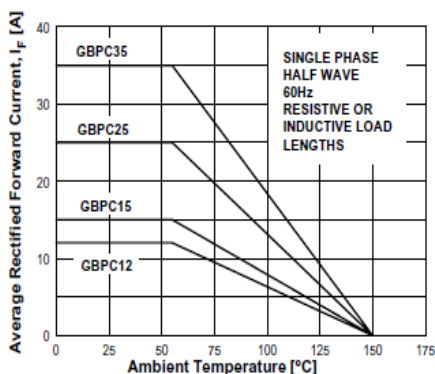


Figure 2. Non-Repetitive Surge Current

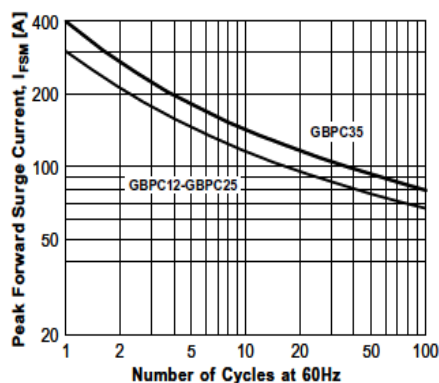


Figure 3. Forward Voltage Characteristics

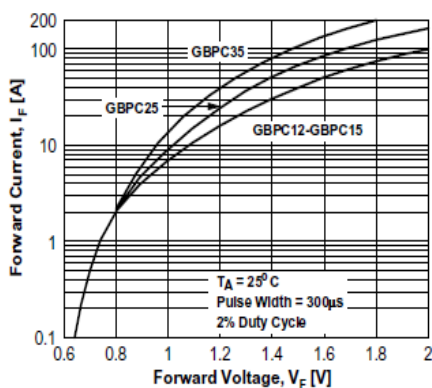
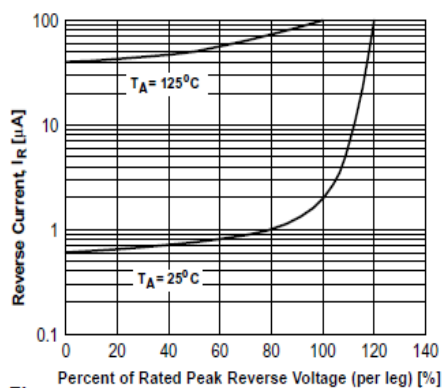


Figure 4. Reverse Current vs Reverse Voltage



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.

ACEx™	FAST®	ISOPLANAR™	Power247™	Stealth™
ActiveArray™	FASTr™	LittleFET™	PowerEdge™	SuperFET™
Bottomless™	FPS™	MICROCOUPLER™	PowerSaver™	SuperSOT™-3
CoolFET™	FRFET™	MicroFET™	PowerTrench®	SuperSOT™-6
CROSSVOLT™	GlobalOptoisolator™	MicroPak™	QFET®	SuperSOT™-8
DOME™	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®
Across the board. Around the world.™		OPTOPLANAR™	SILENT SWITCHER®	UniFET™
The Power Franchise®		PACMAN™	SMART SIARKI™	VCX™
Programmable Active Droop™		POP™	SPM™	

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

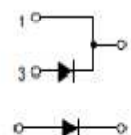
Please See the Table on the Following Page



ON Semiconductor™

<http://onsemi.com>

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



MARKING DIAGRAM



TO-220AC
CASE 221B
PLASTIC

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}	-65 to +175					$^\circ\text{C}$

THERMAL CHARACTERISTICS

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

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

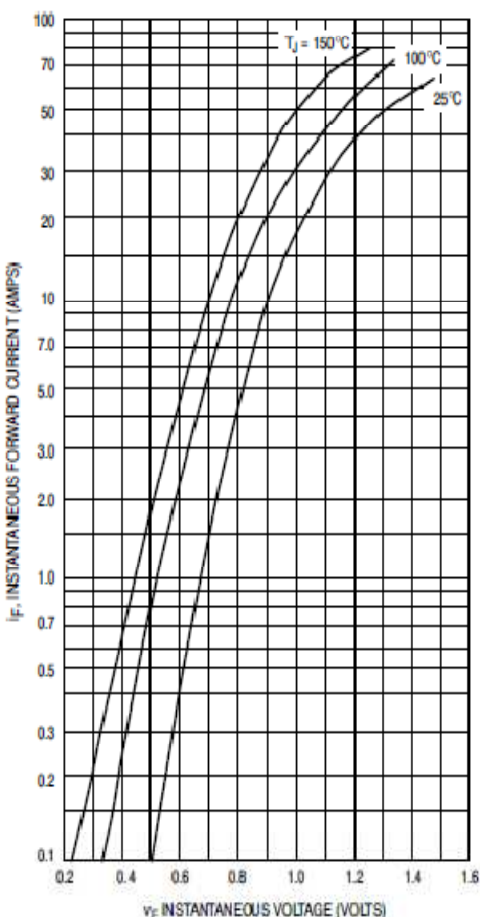


Figure 1. Typical Forward Voltage

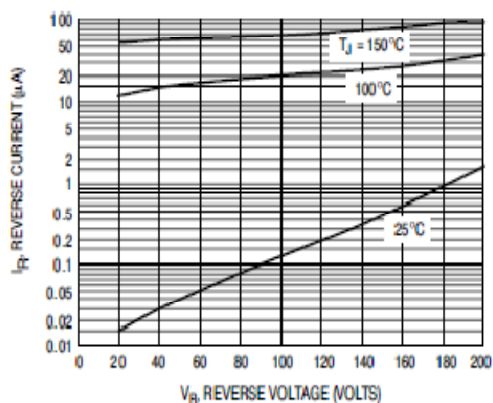


Figure 2. Typical Reverse Current

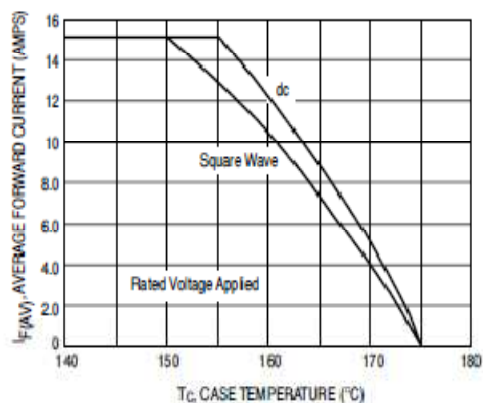


Figure 3. Current Derating, Case

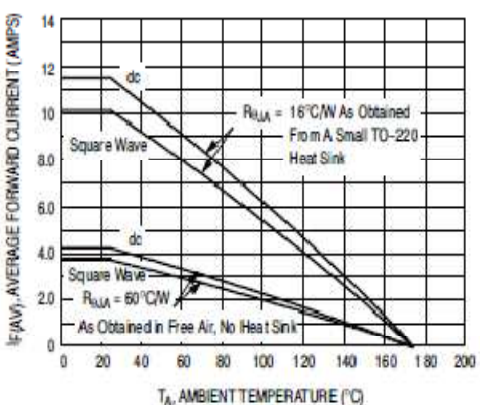


Figure 4. Current Derating, Ambient

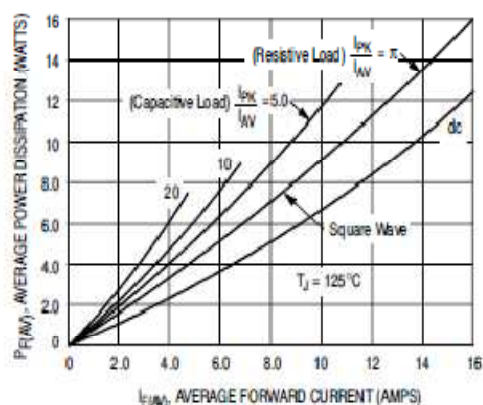


Figure 5. Power Dissipation

MUR1510, MUR1515, MUR1520, MUR1540, MUR1560

MUR1540

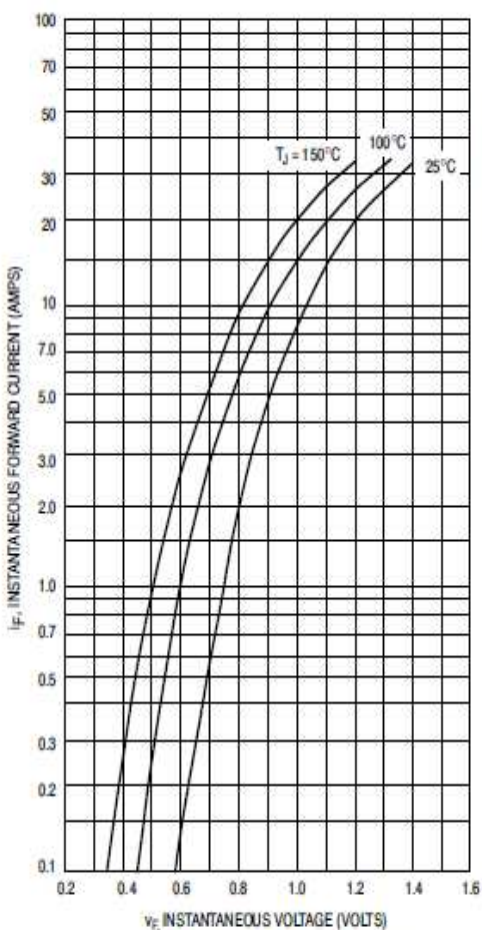


Figure 6. Typical Forward Voltage

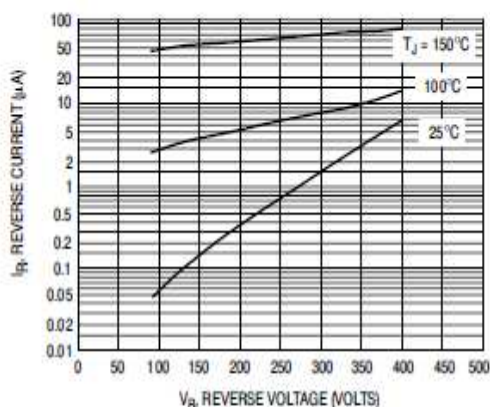


Figure 7. Typical Reverse Current

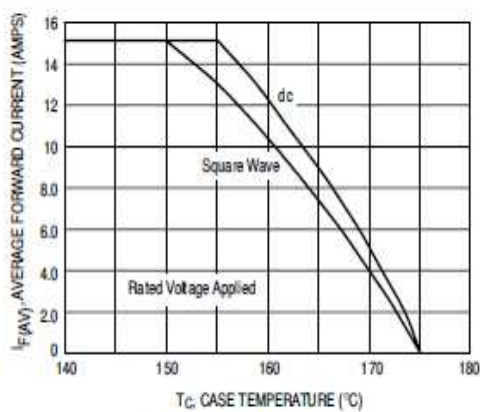


Figure 8. Current Derating, Case

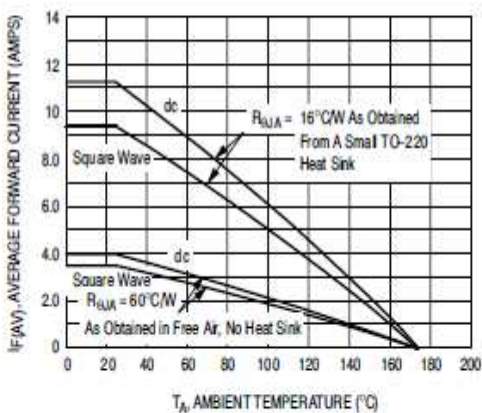


Figure 9. Current Derating, Ambient

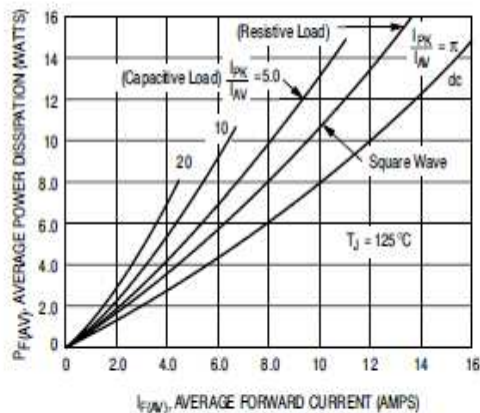


Figure 10. Power Dissipation

MUR1510, MUR1515, MUR1520, MUR1540, MUR1560

MUR1560

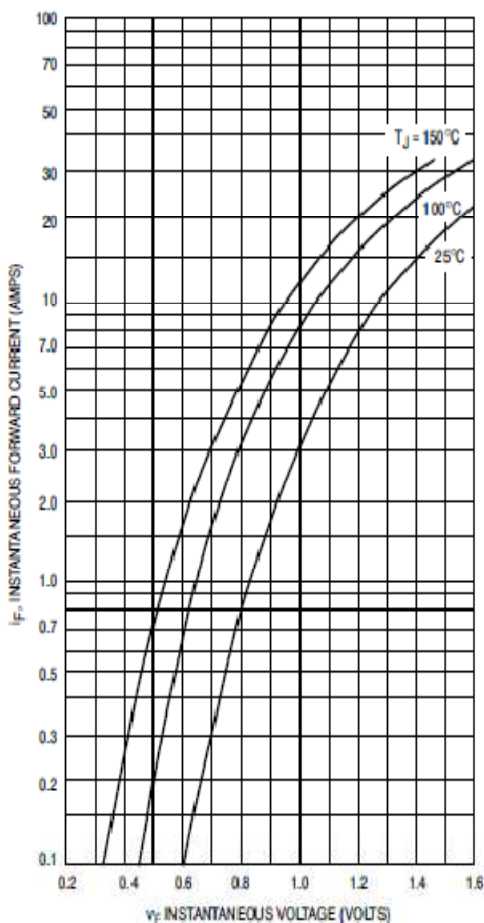


Figure 11. Typical Forward Voltage

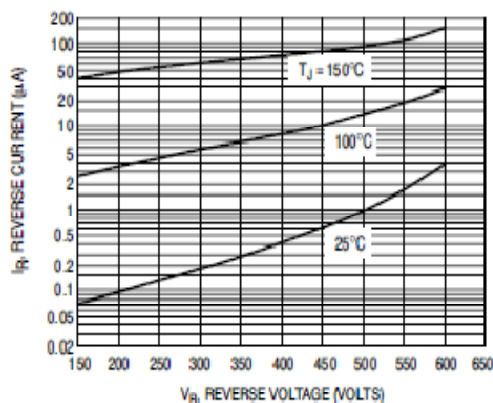


Figure 12. Typical Reverse Current

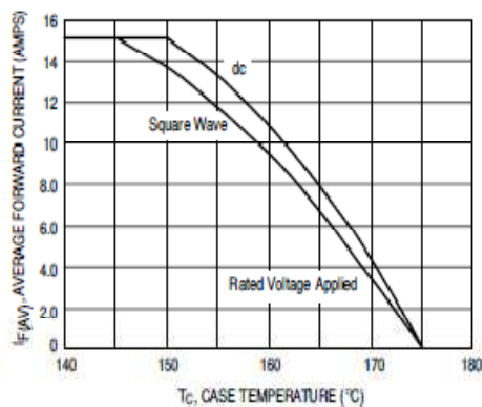


Figure 13. Current Derating, Case

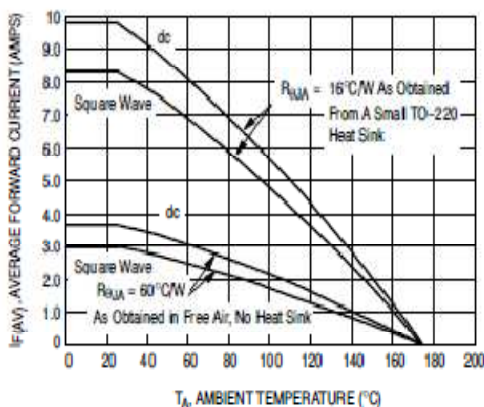


Figure 14. Current Derating, Ambient

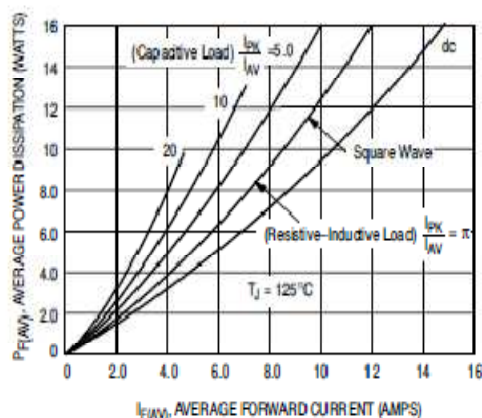


Figure 15. Power Dissipation

MUR1510, MUR1515, MUR1520, MUR1540, MUR1560

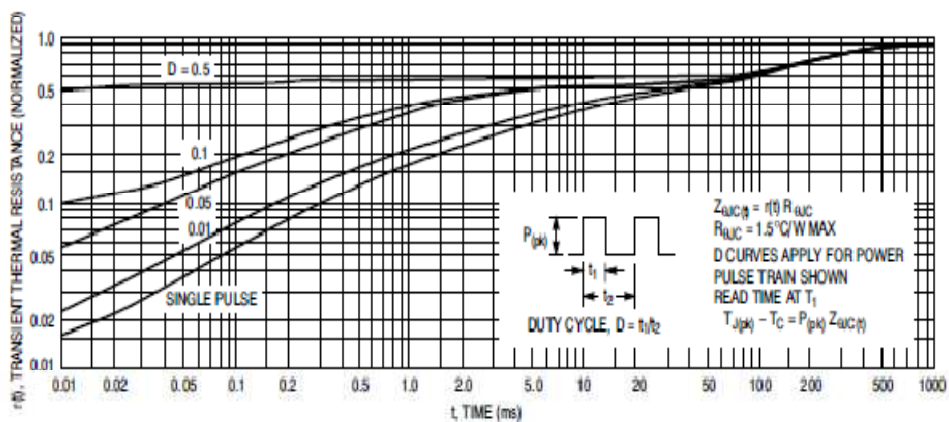


Figure 16. Thermal Response

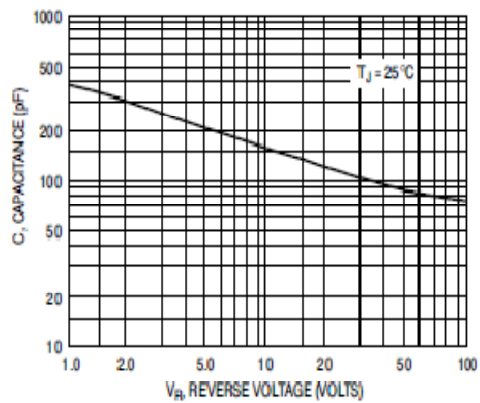
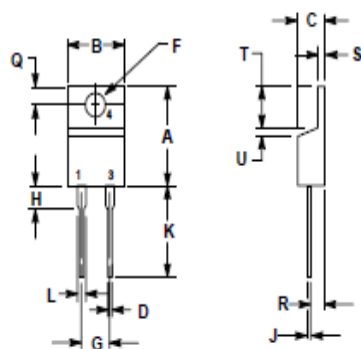


Figure 17. Typical Capacitance

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	0.425	9.65	10.29
C	0.160	0.190	4.06	4.82
D	0.025	0.035	0.64	0.89
F	0.142	0.147	3.61	3.73
G	0.190	0.210	4.83	5.33
H	0.110	0.130	2.79	3.30
J	0.018	0.025	0.46	0.64
K	0.500	0.562	12.70	14.27
L	0.045	0.060	1.14	1.52
Q	0.100	0.120	2.54	3.04
R	0.080	0.110	2.04	2.79
S	0.045	0.055	1.14	1.39
T	0.235	0.255	5.97	6.48
U	0.000	0.050	0.000	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

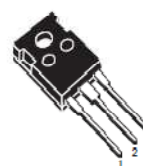
- TYPICAL R_{DS(on)} = 0.65 Ω
- EXTREMELY HIGH dv/dt CAPABILITY
- 100% AVALANCHE TESTED
- GATE CHARGE MINIMIZED
- VERY LOW INTRINSIC CAPACITANCES
- VERY GOOD MANUFACTURING REPEATIBILITY

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.

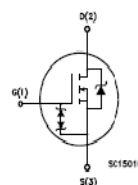
APPLICATIONS

- 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
$I_{DM} (*)$	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

Rthj-case	Thermal Resistance Junction-case Max	0.66	$^\circ\text{C}/\text{W}$
Rthj-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
EAS	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 ($T_{CASE} = 25^{\circ}C$ 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 ($V_{GS} = 0$)	$V_{DS} = \text{Max Rating}$ $V_{DS} = \text{Max Rating}, T_C = 125^{\circ}C$			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	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 100 \mu\text{A}$	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_{riss}	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
$t_{r(v\&\#)}$ 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

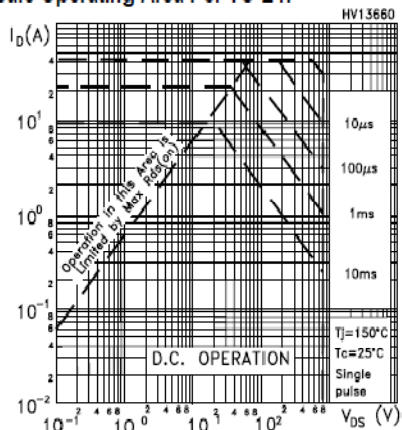
SOURCE DRAIN DIODE

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	$I_{SD} = 10.5 \text{ A}, di/dt = 100\text{A}/\mu\text{s}$ $V_{DD} = 100 \text{ V}, T_J = 150^{\circ}C$ (see test circuit, Figure 5)		635 5.9 18.5		ns μC A

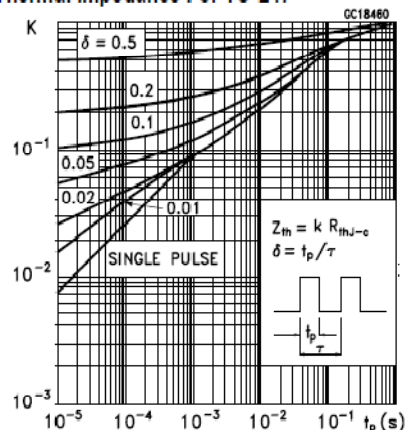
Note: 1. Pulsed: Pulse duration = 300 μs , duty cycle 1.5 %.
2. Pulse width limited by safe operating area.
3. $C_{oss \text{ eq.}}$ is defined as a constant equivalent capacitance giving the same charging time as C_{oss} when V_{DS} increases from 0 to 80% V_{DSS} .

STW12NK80Z

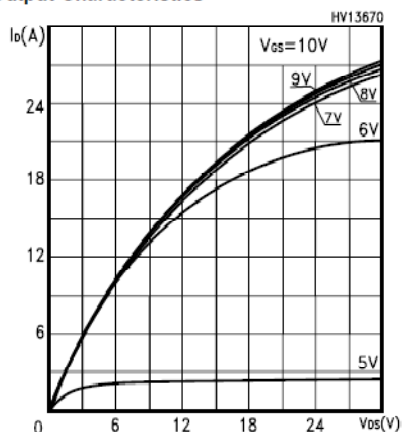
Safe Operating Area For TO-247



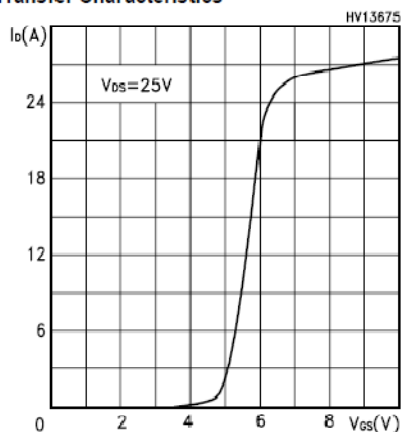
Thermal Impedance For TO-247



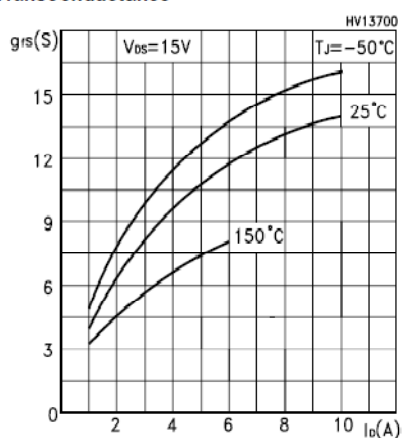
Output Characteristics



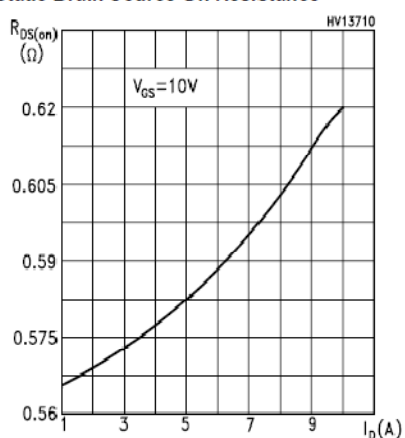
Transfer Characteristics



Transconductance

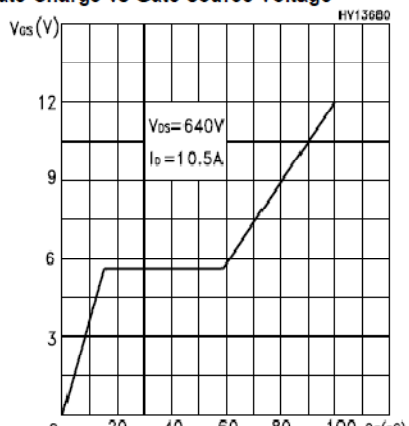


Static Drain-source On Resistance

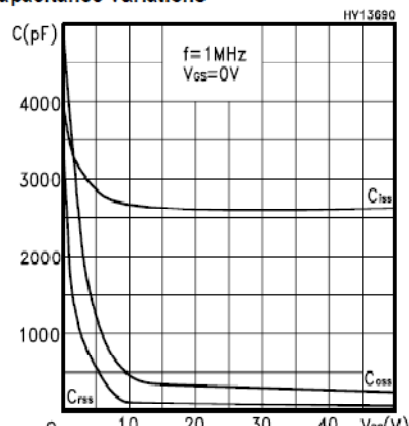


STW12NK80Z

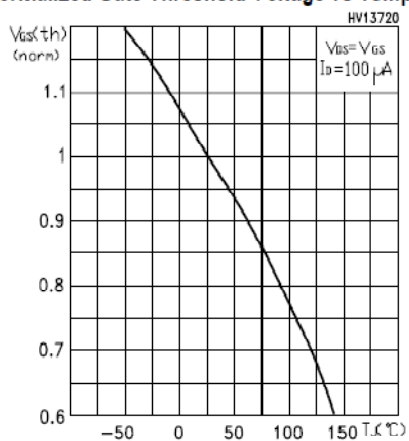
Gate Charge vs Gate-source Voltage



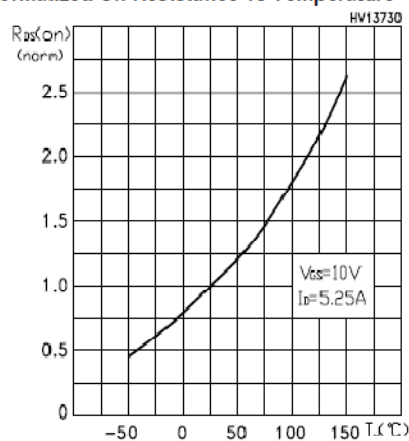
Capacitance Variations



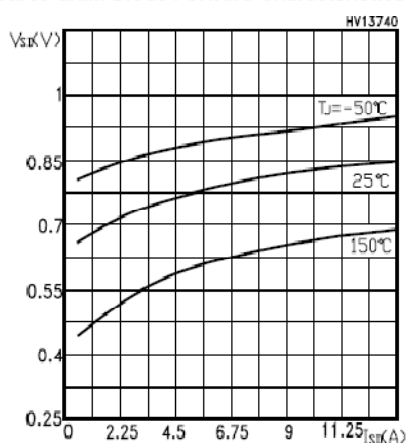
Normalized Gate Threshold Voltage vs Temp.



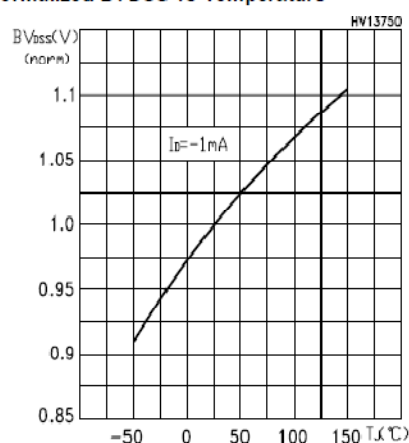
Normalized On Resistance vs Temperature

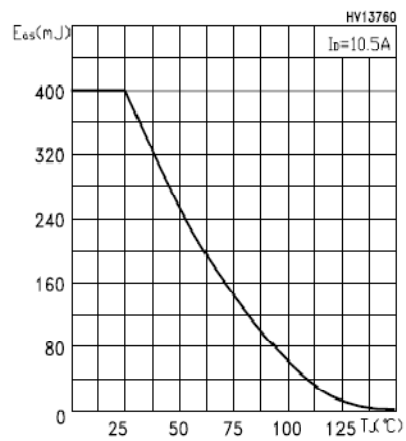


Source-drain Diode Forward Characteristics



Normalized BVDSS vs Temperature



STW12NK80Z**Maximum Avalanche Energy vs Temperature**

STW12NK80Z

Fig. 1: Unclamped Inductive Load Test Circuit

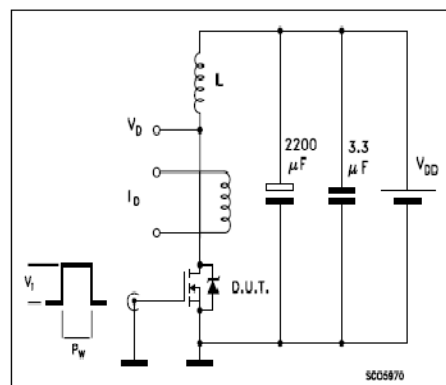


Fig. 2: Unclamped Inductive Waveform

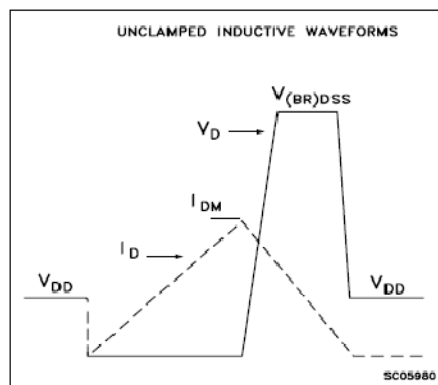


Fig. 3: Switching Times Test Circuit For Resistive Load

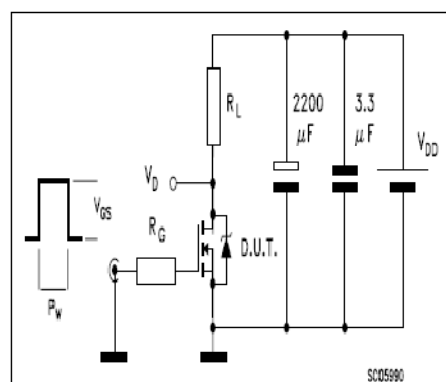


Fig. 4: Gate Charge test Circuit

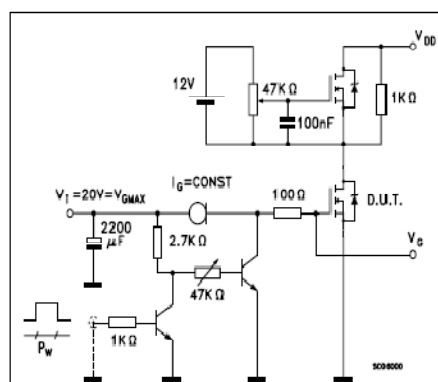
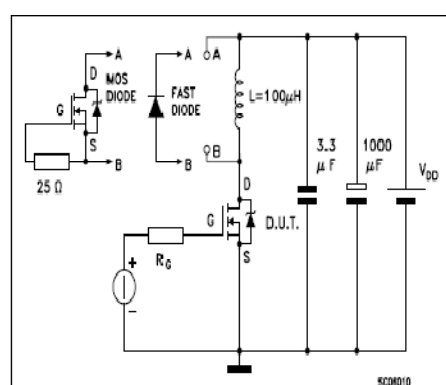


Fig. 5: Test Circuit For Inductive Load Switching And Diode Recovery Times



ประวัติผู้วิจัย

ดร.กองพล อารีรักษ์ สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี โท และเอก ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2543 2546 และ 2550 ตามลำดับ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ และหัวหน้าหน่วยวิจัยคุณภาพกำลังไฟฟ้า ประจำสาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีความชำนาญทางด้าน อิเล็กทรอนิกส์กำลัง วงจรกรองกำลังแอคทีฟ การขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้า คุณภาพกำลังไฟฟ้า ระบบควบคุม และการประยุกต์ทางด้านปัญญาประดิษฐ์

