การศึกษาการประมาณค่าพารามิเตอร์สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวให้มีกำลังสูญเสียน้อยที่สุด

นายนิรันดร์ แนวเงินดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2552

STUDY OF PARAMETER ESTIMATION FOR SINGLE-PHASE INDUCTION MOTOR DRIVE WITH LOSS MINIMIZATION

Niran Naewngerndee

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2009

การศึกษาการประมาณค่าพารามิเตอร์สำหรับการขับเคลื่อน
มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวให้มีกำลังสูญเสียน้อยที่สุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันท์ อุ่นศิวิไลย์)
ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.นิมิต ชมนาวัง)
กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปีจำนงค์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นิรันดร์ แนวเงินดี : การศึกษาการประมาณค่าพารามิเตอร์สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวให้มีกำลังสูญเสียน้อยที่สุด (STUDY OF PARAMETER ESTIMATION FOR SINGLE-PHASE INDUCTION MOTOR DRIVE WITH LOSS MINIMIZATION) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์, 142 หน้า.

การประหยัดพลังงานเป็นสิ่งจำเป็นต่อเสถียรภาพทางพลังงานของประเทศ มอเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าในปริมาณสูง มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเป็นมอเตอร์ที่ถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้านและในงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย งานวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแนวคิดการลดกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว และได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวโดยอาศัยทฤษฎีแกนอ้างอิงดีคิว (*dq*-frame theory) เนื่องจากหลักการที่พัฒนาขึ้นใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นพื้นฐาน ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต้องมีความถูกต้อง การหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองดังกล่าวจะถูกประมาณค่าด้วยวิธีจีนเนติกอัลกอริทึมร่วมกับการทดสอบพารามิเตอร์ของมอเตอร์แบบดั้งเดิม วิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยการแปรค่าแรงดันและแปรค่าความถี่ถูกนำมาใช้เพื่อหาจุดทำงานที่ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด โดยที่โหลดของมอเตอร์จะพิจารณาเป็นแบบโหลดกำลังงานซึ่งมีค่าคงที่ในการทดสอบการขับเคลื่อนเพื่อหากำลังงานสูญเสียจะถูกกำหนดไว้ 2 กรณี กรณีแรกคือ การทดสอบการแปรค่าแรงดันสเตเตอร์ของแหล่งจ่ายที่ความถี่คงที่ และมีการทดสอบการขับโหลดมอเตอร์ที่สภาวะไร้โหลดถึงค่าโหลดพิกัด ซึ่งจะได้ค่าแรงดันของแหล่งจ่ายที่ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด เมื่อคำนวณการลดลงของกำลังงานสูญเสียที่ค่าแรงดันดังกล่าวเทียบกับกำลังงานสูญเสียที่ 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ (กรณีฐาน) พบว่าเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์การลดลงของกำลังงานสูญเสียจะเพิ่มขึ้น และที่ 40% โหลด ซึ่งเป็นจุดที่ใกล้ค่าโหลดพิกัดมากที่สุด กำลังงานสูญเสียลดลง 24.96% อีกกรณีหนึ่งคือ การทดสอบแปรค่าความถี่ของแหล่งจ่ายโดยแรงดันที่สเตเตอร์มีค่าคงที่ จากการทดสอบดังกล่าวจะได้ค่าความถี่ที่ทำให้กำลังงานน้อยที่สุด ซึ่งเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์การลดลงของกำลังงานสูญเสียเมื่อเทียบกับกรณีฐานมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน โดยที่ 40% โหลดให้กำลังงานสูญเสียลดลง 28.83% โดยการปรับตั้งแรงดัน 220 โวลต์ 70 เฮิรตซ์

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ปีการศึกษา 2552 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

NIRAN NAEWNGERNDEE : STUDY OF PARAMETER ESTIMATION FOR SINGLE-PHASE INDUCTION MOTOR DRIVE WITH LOSS MINIMIZATION. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. THANATCHAI KULWORAWANICHPONG, Ph.D., 142 PP.

POWER LOSS MINIMIZATION/SINGLE PHASE INDUCTION MOTOR/ GENETIC ALGORITHM

Energy saving is an important issue for energy stabilization of the country. Electric motors are devices that consume a huge amount of electric energy. Single-phase induction motors are widely used in many household and industrial applications. This thesis is to develop a concept of energy loss minimization for single-phase induction motor operation. It is based on a mathematical model of the single-phase induction motors expressed by using the *dq*-frame theory in which their parameters are accurately tuned by using genetic algorithms associated with conventional machine parameter testing. The variable voltage and variable frequency drive is applied to the single-phase induction motor in order to find a condition of minimum loss operation. However, to simplify this operation, motors are assumed to consume constant power. Two sets of experiments were conducted. The first was to vary the voltage amplitude of the supply source while the supply frequency remained constant. By varying the load power from no-load to full-load, the voltage amplitude that gave the minimum loss at a particular frequency was found. At 40% full-load with 165 V 50 Hz supply, the power loss was reduced by 24.76% from the base case. The second experiment was to vary the frequency where the voltage

amplitude was fixed. The operating frequency that leads to the minimum loss can reduce the power loss by 28.83% at 40% full-load with 220 V and 70 Hz supply.

School of Electrical Engineering Student's Signature _____

Academic Year 2009 Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ รวมทั้งกำลังใจ และแนะนำแนวทางการเรียน การทำงาน การใช้ชีวิต แก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สราวุฒิ สุจิตจร รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติ อัตถกิจมงคล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันท์ อุ่นศิวิไลย์ รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว อาจารย์ ดร.นิมิต ชมนาวัง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กองพล อารีรักษ์ อาจารย์ ทศพล รัตน์นิยมชัย อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณวิศวกรและเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือเป็นอย่างดี

ขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีตจนถึงปัจจุบัน ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงครอบครัวแนวเงินดีทุกท่าน ที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมดูแลเลี้ยงดู และส่งเสริมทางด้านการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

นิรันดร์ แนวเงินดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ง
สารบัญ ..... จ
สารบัญตาราง ..... ฌ
สารบัญรูป ..... ฎ
บทที่
1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย 2
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น 2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์ 2
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 4
2.1 บทนำ 4
2.2 ปริทัศวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 4
2.2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4
2.2.2 หลักทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5
2.2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 6
2.2.4 การควบคุมคุณสมบัติการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 8
2.2.5 การประหยัดพลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 10
2.3 สรุป 11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....12
3.1 บทนำ.....12
3.2 แบบจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....12
3.3 วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....20
3.3.1 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์แบบดั้งเดิม.....21
3.3.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ด้วยจีนเนติกอัลกอริทึม.....29
3.4 ผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวและอภิปราย.....34
3.4.1 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม.....34
3.4.2 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวจีนเนติกอัลกอริทึม.....37
3.5 สรุป.....47
4 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....48
4.1 บทนำ.....48
4.2 วงจรเรียงกระแส.....48
4.2.1 หลักการทำงานของวงจรเรียงกระแสเฟสเดียว.....48
4.2.2 วิธีการออกแบบ.....50
4.2.3 ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแส.....54
4.3 วงจรอินเวอร์เตอร์.....56
4.3.1 หลักการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์.....56
4.3.2 วิธีการออกแบบ.....59
4.3.3 ผลการทดสอบของวงจรอินเวอร์เตอร์.....59
4.4 การทดสอบระบบขับเคลื่อน.....64
4.5 สรุป.....73
5 วิธีการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....74
5.1 บทนำ.....74
5.2 กำลังงานสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....74
5.2.1 กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์.....74

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.2 กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์ 75
5.2.3 กำลังงานสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านของลม 75
5.2.4 กำลังงานสูญเสียที่แกนเหล็ก 75
5.3 การจำลองเพื่อหาจุดทำงานที่ทำให้กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดด้วยเทคนิคการควบคุมแรงดันและความถี่ 77
5.3.1 การหาจุดทำงานที่ทำให้กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด 77
5.3.2 ผลการหาจุดทำงานที่ทำให้กำลังสูญเสียน้อยที่สุด 78
5.4 การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 79
5.4.1 ระบบขับเคลื่อนที่ป้อนแรงดันจากแหล่งจ่ายเดียว 80
5.4.2 ระบบขับเคลื่อนที่ป้อนแรงดันจากสองแหล่งจ่าย 80
5.5 การทดสอบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อพิจารณากำลังงานสูญเสีย 81
5.5.1 การทดสอบเพื่อหาค่ากำลังงานสูญเสียจากวิธีการแปรค่าแรงดันสเตเตอร์ที่ความถี่คงที่ 81
5.5.2 การทดสอบเพื่อหาค่ากำลังงานสูญเสียจากวิธีการแปรค่าความถี่ที่แรงดันสเตเตอร์คงที่ 85
5.5 สรุป 88
6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 89
6.1 สรุป 89
6.2 ข้อเสนอแนะ 90
รายการอ้างอิง 91
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ 93
ภาคผนวก ข. วงจรของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสเดียว 111
ภาคผนวก ค. โปรแกรมสำหรับจำลองผลและประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ 117
ภาคผนวก ง. การประมาณค่าชุดข้อมูล 126

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก จ. ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายที่สามารถปรับค่าแรงดันและความถี่เพื่อพิจารณากำลังงานสูญเสีย.....132
ประวัติผู้เขียน.....142

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

3.1 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์แบบดั้งเดิม 22
3.2 ผลการทดสอบมอเตอร์เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์แบบแยกเฟส 34
3.3 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส 36
3.4 ค่าตัวแปรของจีเนติกอัลกอริทึม 38
3.5 ตารางค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ค่าอินพุตต่าง ๆ 42
4.1 ผลการคำนวณค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของรูปสัญญาณแรงดันและกระแส ในรูปที่ 4.16 64
4.2 ผลการคำนวณค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของรูปสัญญาณแรงดันและกระแส ในรูปที่ 4.23 72
5.1 ค่าคำตอบที่เหมาะสมสำหรับแต่ละสภาวะโหลด 79
5.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างกรณีฐานและจุดการทำงานที่เหมาะสม 79
5.3 ค่ากำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ที่ค่าแรงดันอินพุตและสภาวะโหลดต่าง ๆ ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ 82
5.4 สัมประสิทธิ์ของสมการโพลิโนเมียลที่สภาวะเปอร์เซ็นต์โหลดต่าง ๆ 84
5.5 จุดทำงานของมอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับสภาวะโหลดต่าง ๆ 84
5.6 ค่ากำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ที่ค่าแรงดันอินพุตและสภาวะโหลดต่าง ๆ ที่แรงดัน 220 โวลต์ 85
5.7 สัมประสิทธิ์ของสมการโพลิโนเมียลที่สภาวะเปอร์เซ็นต์โหลดต่าง ๆ 87
5.8 จุดทำงานของมอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับสภาวะโหลดต่าง ๆ 87
จ.1 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่สภาวะไร้โหลด 133
จ.2 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 10 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.026 กิโลวัตต์) 134
จ.3 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 20 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.052 กิโลวัตต์) 134
จ.4 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 30 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.078 กิโลวัตต์) 135
จ.5 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 40 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.104 กิโลวัตต์) 135

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

จ.6 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.130 กิโลวัตต์).....136
จ.7 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 60 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.156 กิโลวัตต์).....136
จ.8 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 70 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.182 กิโลวัตต์) 137
จ.9 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 80 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.208 กิโลวัตต์) 137
จ.10 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่สภาวะไร้โหลด 137
จ.11 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 10 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.026 กิโลวัตต์).....138
จ.12 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 20 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.052 กิโลวัตต์).....139
จ.13 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 30 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.078 กิโลวัตต์).....139
จ.14 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 40 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.104 กิโลวัตต์) 140
จ.15 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.130 กิโลวัตต์) 140
จ.16 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 60 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.156 กิโลวัตต์) 141
จ.17 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 70 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.182 กิโลวัตต์) 141

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟสเดียว....6
3.1 ขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว....13
3.2 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส....19
3.3 วงจรทดสอบดีซี....21
3.4 วงจรการทดสอบกรณีขดลวดช่วยถูกเปิดออก....23
3.5 วงจรการทดสอบกรณีขดลวดหลักถูกเปิดออก....25
3.6 ระบบทดสอบการชะลอ....27
3.7 ผลการทดสอบการชะลอ....27
3.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว....29
3.9 ตัวอย่างผลที่ได้จากการทดสอบความสัมพันธ์ของความเร็วเทียบกับเวลา....31
3.10 ตัวอย่างผลที่ได้จากการทดสอบความสัมพันธ์ของกระแสอาร์เอมเอสเทียบกับเวลา....31
3.11 แผนภาพการทำงานของฟังก์ชันวัตถุประสงค์....33
3.12 ผลการทดสอบการชะลอเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์แบบแยกเฟส....35
3.13 ความเร็วมอเตอร์จากทดสอบและจำลองผล....37
3.14 กระแสอาร์เอ็มเอสของมอเตอร์จากทดสอบและจำลองผล....37
3.15 ผลการลู่เข้าของค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อทดสอบที่อินพุตต่างๆ....41
3.16 ค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่ได้จากการประมาณค่าพารามิเตอร์ ด้วยสมการเส้นตรงและแบบเสมือนพหุนามกำลังสาม....43
3.17 ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสที่ได้จากการประมาณค่าพารามิเตอร์ ด้วยสมการเส้นตรงและแบบเสมือนพหุนามกำลังสาม....44
3.18 แผนภาพการทำงานเพื่อแสดงผลตอบสนองทางเวลาของกระแสและความเร็ว....45
3.19 ผลตอบสนองทางเวลาของความเร็วมอเตอร์ที่ค่าแรงดันต่าง ๆ เทียบกับค่าทดสอบ....46
3.20 ผลตอบสนองทางเวลาของกระแสมอเตอร์ที่ค่าแรงดันต่าง ๆ เทียบกับค่าทดสอบ....46
4.1 วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวแบบเต็มคลื่น....49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.2 สัญญาณจากแหล่งจ่ายอินพุต 49
4.3 สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น 49
4.4 วงจรเรียงกระแส 51
4.5 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่ผ่านการปรับเรียบ 51
4.6 ผลการประมาณรูปสัญญาณแรงดันกระเพื่อม 52
4.7 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรเรียงกระแส 54
4.8 รูปสัญญาณเอาต์พุตแบบเต็มคลื่นในกรณีไม่ได้ต่อตัวเก็บประจุ 55
4.9 รูปสัญญาณเอาต์พุตแบบเต็มคลื่นในกรณีต่อตัวเก็บประจุ 55
4.10 วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน 56
4.11 สัญลักษณ์ของมอสเฟสกำลัง 57
4.12 การสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อกระตุ้นมอสเฟสกำลังให้ทำงาน 57
4.13 การสร้างสัญญาเอาต์พุต 58
4.14 มอสเฟสกำลังในวงจรอินเวอร์เตอร์ 59
4.15 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ ที่แรงดัน 145 โวลต์ ความถี่ 40 เฮิรตซ์ 60
4.16 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ ที่แรงดัน 150 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ 60
4.17 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ ที่แรงดัน 155 โวลต์ ความถี่ 60 เฮิรตซ์ 61
4.18 สเปกตรัมของรูปคลื่นแรงดันจากฮาร์มอนิกลำดับที่ 0 ถึง ลำดับที่ 1000 62
4.19 สเปกตรัมของรูปคลื่นแรงดันจากฮาร์มอนิกลำดับที่ 0 ถึง ลำดับที่ 50 62
4.20 สเปกตรัมของรูปคลื่นกระแสจากฮาร์มอนิกลำดับที่ 0 ถึง ลำดับที่ 1000 63
4.21 สเปกตรัมของรูปคลื่นกระแสจากฮาร์มอนิกลำดับที่ 0 ถึง ลำดับที่ 50 63
4.22 แผนภาพสำหรับทดสอบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว 65
4.23 ตัวอย่างรูปสัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 66
4.24 สเปกตรัมของสัญญาณแรงดันของรูปที่ 4.23 (ก) 68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.25 สเปกตรัมของสัญญาณกระแสของรูปที่ 4.23 (ก). 69
4.26 สเปกตรัมของสัญญาณแรงดันของรูปที่ 4.23 (ข). 69
4.27 สเปกตรัมของสัญญาณกระแสของรูปที่ 4.23 (ข)....70
4.28 สเปกตรัมของสัญญาณแรงดันของรูปที่ 4.23 (ค)....70
4.29 สเปกตรัมของสัญญาณกระแสของรูปที่ 4.23 (ค)....71
4.30 สเปกตรัมของสัญญาณแรงดันของรูปที่ 4.23 (ง).. 71
4.31 สเปกตรัมของสัญญาณกระแสของรูปที่ 4.23 (ง). 72
5.1 การสูญเสียทางกำลังไฟฟ้าที่เกิดกับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว....75
5.2 ระบบขับเคลื่อนที่ป้อนแรงดันจากแหล่งจ่ายเดียว....80
5.3 ระบบขับเคลื่อนที่ป้อนแรงดันจากสองแหล่งจ่าย.. 80
5.4 ค่ากำลังงานสูญเสียของมอเตอร์เมื่อมีการปรับค่าแรงดันอินพุต ที่สภาวะโหลดต่าง ๆ....83
5.5 ค่ากำลังงานสูญเสียของมอเตอร์เมื่อมีการปรับค่าความถี่อินพุต ที่สภาวะโหลดต่าง ๆ 86
ข.1 วงจรเรียงกระแส และวงจรอินเวอร์เตอร์ 112
ข.2 วงจรจุดฉนวนมอสเฟสกำลัง 113
ข.3 วงจรแปลงแรงดันกระแสตรง....114
ข.4 วงจรควบคุมความถี่และแรงดันเอาต์พุตของระบบขับเคลื่อน....114
ข.5 วงจรของไมโครคอนโทรลเลอร์ 115
ข.6 วงจรของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว....116
ง.1 ลักษณะฟังก์ชันเชิงเส้นสำหรับประมาณค่าในช่วง x_0 และ x_1....127
ง.2 งานประมาณค่าโดยใช้ฟังก์ชันกำลังสาม 129

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นปริมาณมากและเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องอันเนื่องมาจากการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมและการเพิ่มจำนวนของประชากร ส่งผลให้ภาครัฐต้องเพิ่มกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อสนองตอบต่อความต้องการของผู้ใช้ไฟ และในขณะเดียวกันโครงการรณรงค์การประหยัดพลังงานไฟฟ้าก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งเพื่อนำไปสู่การมีพลังงานไฟฟ้าใช้อย่างเพียงพอในอนาคต โดยในภาคครัวเรือนพลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่ถูกใช้ไปสำหรับเครื่องอำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวันต่าง ๆ เช่น พัดลม เครื่องปรับอากาศ ปั๊มน้ำ ตู้เย็น เป็นต้น โดยส่วนใหญ่เครื่องใช้ไฟฟ้าเหล่านี้มีมอเตอร์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว (single-phase induction motor) ซึ่งเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ใช้พลังงานไฟฟ้าสูงในการทำงาน จะเห็นได้ว่ามอเตอร์เหนี่ยวเฟสเดียวจะเป็นที่นิยมใช้เป็นอย่างมากเนื่องจากราคาถูก การบำรุงรักษาง่าย จึงทำให้มีการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวมาเป็นส่วนประกอบของเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้านและสำนักงานอย่างมากมาย จำนวนครัวเรือนที่ใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสเดียวมีจำนวนมหาศาลเมื่อพิจารณารวมทั้งประเทศ การศึกษาการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเฟสเดียวให้ใช้พลังงานอย่างเหมาะสม และทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดย่อมส่งผลต่อมูลค่าการสูญเปล่าของการใช้พลังงานไฟฟ้า ทำให้ประชาชนผู้ใช้ไฟฟ้าเสียค่าไฟฟ้าน้อยลง และช่วยลดปริมาณความต้องการกำลังงานไฟฟ้าให้กับการไฟฟ้าอีกด้วย อย่างไรก็ตามการเพิ่มหรือปรับเปลี่ยนตัวควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ดังกล่าวย่อมส่งผลต่อสมรรถนะของตัวมอเตอร์เอง ทำให้การศึกษาการลดกำลังงานสูญเสียโดยที่ยังคงไว้ซึ่งประสิทธิภาพการทำงานให้ใกล้เคียงสภาวะเดิมเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้ได้นำแนวคิดดังกล่าวมาใช้เป็นวัตถุประสงค์หลักเพื่อปรับปรุงการทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสเดียวในเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้านให้ทำงานภายใต้สมมติฐานการขับโหลดคงที่และให้มีกำลังงานสูญเสียโดยรวมน้อยที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- พัฒนาเทคโนโลยีการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวให้ใช้พลังงานอย่างเหมาะสมสำหรับเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน

- ลดกำลังงานสูญเสียจากการใช้อุปกรณ์ที่มีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสเดียวโดยที่สมรรถนะของอุปกรณ์ยังใช้งานได้ดีเหมือนเดิม

- พัฒนาบุคลากรทางด้านการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสเดียว

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

งานวิจัยนี้ศึกษาการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟสเดียวที่มีกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้การจำลองผลจากคอมพิวเตอร์โดยการปรับค่าแรงดันกับค่าความถี่ของแหล่งจ่ายเพื่อหาจุดขับเคลื่อนที่เกิดกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดเพื่อนำไปทดสอบกับชุดทดสอบ โดยการวิจัยจะมีการศึกษาภายใต้เงื่อนไขต่อไปนี้

- ชุดทดสอบสามารถปรับค่าแรงดันและค่าความถี่ได้
- มอเตอร์ของชุดทดสอบเป็นแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟสเดียว
- โปรแกรมการจำลองผลเขียนด้วยโปรแกรม MATLAB™

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

- คำนวณค่ากำลังงานสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส ในสภาวะที่มีการปรับค่าแรงดันและปรับค่าความถี่ที่สภาวะโหลดต่าง ๆ จากการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟสเดียวแบบพีดับเบิลยูเอ็ม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- การพัฒนาหลักการและแนวความคิดสำหรับการลดพลังงานสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

- ประชาชนทั่วไปที่ใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเป็นส่วนประกอบสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนของค่าไฟฟ้า

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบด้วย 6 บท 5 ภาคผนวก **บทที่ 1** กล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากงานวิจัย ส่วนบทอื่นๆ ประกอบด้วยเนื้อหา ดังต่อไปนี้

บทที่ 2 อธิบายถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 อธิบายถึงการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวด้วยวิธีการทดสอบแบบดั้งเดิม และด้วยจีนเนติกอัลกอริทึม

บทที่ 4 อธิบายถึงระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเฟสเดียวและผลการทดสอบระบบดังกล่าว

บทที่ 5 อธิบายถึงวิธีการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวและผลการทดลองจากวิธีการประหยัดพลังงานดังกล่าว

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

ภาคผนวก ข. วงจรของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสเดียว

ภาคผนวก ค. โปรแกรมสำหรับจำลองผลและประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์

ภาคผนวก ง. การประมาณค่าชุดข้อมูล

ภาคผนวก จ. ผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายที่สามารถปรับค่าแรงดันและความถี่เพื่อพิจารณากำลังงานสูญเสีย

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ถูกนำมาใช้อย่างมากมายทั้งในครัวเรือนและโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวถือว่าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าสูง เนื่องจากปริมาณการใช้มอเตอร์ไฟฟ้ามีจำนวนมากจึงส่งผลต่อปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมของประเทศ ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้จากอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการศึกษาเพื่อหาแนวทางการเพิ่มสมรรถนะของการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งการลดกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์เป็นหนึ่งในการเพิ่มสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวและเป็นการประหยัดพลังงานโดยรวมของประเทศอีกทางหนึ่ง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการลดกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว โดยปริทัศน์วรรณกรรมจะประกอบด้วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเฟสเดียวและการควบคุมคุณสมบัติการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ ส่วนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเป็นการกล่าวถึงโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเฟสเดียวแบบแยกเฟสและหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาทฤษฎีและเนื้อหาของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อวิทยานิพนธ์ พบว่าส่วนประกอบของงานวิทยานิพนธ์มีหลายส่วนประกอบกัน ผู้จัดทำงานวิจัยจึงได้แบ่งเนื้อหาของการศึกษาออกเป็นหัวข้อย่อย ๆ ดังต่อไปนี้

2.2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

โครงสร้างสำคัญของมอเตอร์เหนี่ยวนำประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนที่หยุดนิ่งหรือสเตเตอร์ (stator) และส่วนที่หมุนหรือโรเตอร์ (rotor) ในส่วนของสเตเตอร์ทำจากแผ่นเหล็กบาง ๆ อัดซ้อนเข้าด้วยกันและทำเป็นช่องสล๊อต (slot) ไว้บรรจุขดลวด โดยจะมีจำนวนของขั้วแม่เหล็กเป็นตัวกำหนดค่าความเร็วพิกัดของมอเตอร์ เมื่อทำการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส โดยขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเฟสเดียวประกอบด้วย 2 ชุด ได้แก่ ขดลวดหลัก (main winding) และขดลวดช่วย (axially winding)

ส่วนที่หมุนหรือโรเตอร์ แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ โรเตอร์แบบกรงกระรอก (squirrel-cage rotor) โครงสร้างของโรเตอร์ ประกอบด้วยแผ่นเหล็กบาง ๆ อัดซ้อนกันเป็นรูปทรงกระบอก และถูกทำให้เป็นช่องสล๊อต เพื่อสำหรับฝังหรือบรรจุตัวนำซึ่งเป็นแท่งทองแดงหรืออะลูมิเนียม 1 แท่งต่อ 1 ช่องสล๊อตโดยตรงปลายสุดของตัวนำโรเตอร์จะถูกต่อปลายลัดวงจรเข้าด้วยกัน โดยแท่งตัวนำที่วางอยู่ในช่องสล๊อตจะวางขนานกับเพลาแต่จะมีลักษณะการวางเฉียงเล็กน้อยเพื่อลดการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กฮัม (magnetic hum) และการยึดตัวของโรเตอร์อีกชนิดหนึ่งของโรเตอร์ คือโรเตอร์แบบพันขดลวด (wound rotor) โรเตอร์ชนิดนี้ส่วนใหญ่จะพบในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสซึ่งมีการพันแบบชุดขดลวดแบบสองชั้น ขดลวดภายในจะมีการต่อแบบสตาร์โดยปลายทั้ง 3 ปลายจะต่อกับสลิปริงที่ติดอยู่กับเพลาของโรเตอร์ โดยโรเตอร์แบบพันขดลวดนี้สามารถนำความต้านทานที่ต่อแบบสตาร์มาต่อเข้ากับสลิปริงเพื่อเพิ่มแรงบิดขณะสตาร์ทมอเตอร์ เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษามอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวซึ่งในโครงสร้างของมอเตอร์จะมีสวิตช์ทางกลเรียกว่า สวิตช์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์ (centrifugal switch) ทำหน้าที่เชื่อมต่อและปลดขดลวดหลักออกจากขดลวดช่วย

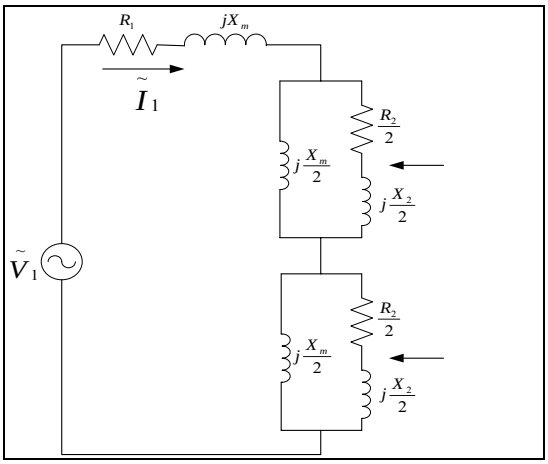
2.2.2 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำคือการอาศัยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ขดลวดอาร์เมเจอร์เป็นผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในตัวมอเตอร์ สนามแม่เหล็กหมุนจะตัดกับตัวนำในโรเตอร์ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในโรเตอร์ ซึ่งทำให้เกิดสนามแม่เหล็กลักษณะเป็นขั้วเหนือและขั้วใต้เช่นเดียวกับสเตเตอร์ และสนามแม่เหล็กที่หมุนที่สเตเตอร์นั้นจะเกิดการผลักและดูดกับขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ในทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุน (rotating magnetic field) ในมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสจะอาศัยความต่างเฟสของกระแสที่ออกจากแหล่งจ่าย โดยลักษณะดังกล่าวจะเหมือนว่าเกิดสนามแม่เหล็กหมุนรอบ ๆ สเตเตอร์ด้วยความเร็วซิงโครนัส ในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเนื่องจากสเตเตอร์มีการพันขดลวดแบบเฟสเดียว และต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสเดียว ดังนั้นสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์จะไม่ใช่สนามแม่เหล็กที่หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัสเหมือนกับมอเตอร์แบบสามเฟส จึงเป็นสาเหตุให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีทิศทางกลับไปกลับมาอยู่ที่สเตเตอร์ตามทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ (double revolving-field theory) จึงทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวไม่สามารถเริ่มหมุนได้ด้วยตัวเองในขณะที่โรเตอร์หยุดนิ่ง โดยมอเตอร์จะหมุนก็ต่อเมื่อทำให้โรเตอร์หมุนไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งก่อนแล้ว วิธีดังกล่าวอาจใช้มือหรือเครื่องมือช่วยหมุนโรเตอร์ โดยหนึ่งในวิธีนั้นคือการต่อชุดขดลวดช่วยขนานกับชุดขดลวดหลักโดยการวางตัวห่างกัน 90 องศาทางไฟฟ้าเพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนเหนี่ยวนำให้โรเตอร์หมุนทำให้เกิดแรงบิดขณะเริ่มสตาร์ทและขดลวดช่วยจะถูกปลดออกจากวงจรของสเตเตอร์โดยการ

ทำงานของสวิตช์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์เมื่อความเร็วของมอเตอร์มีค่าประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ของความเร็วซิงโครนัส

2.2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์แบบเฟสเดียวนั้นจากการศึกษาพบว่ามีการวิเคราะห์อยู่ 2 แบบคือ พิจารณาแบบสภาวะคงตัว (steady-state model) และแบบสภาวะพลวัต (dynamic model) ในกรณีของแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟสเดียวมีการพิจารณาวงจรสมมูลจากทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ ทำให้วงจรเสมือนของโรเตอร์ถูกแยกออกเป็น 2 ส่วน ผลจากเส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและเส้นแรงแม่เหล็กหมุน (Bhag, Guru, Huseyin, and Hiziroglu, 2001) ไปด้านหลัง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟสเดียว

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถนำมาวิเคราะห์สมรรถนะของมอเตอร์ในสภาวะคงตัวได้ เช่น ค่าแรงบิดเทียบกับความเร็ว (torque-speeds curve) ค่ากำลังสูญเสียของมอเตอร์ เป็นต้น แบบจำลองแบบพลวัตเป็นแบบจำลองอีกแบบหนึ่งที่สามารถใช้ในการศึกษาสมรรถนะของมอเตอร์ในช่วงพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเขียนอยู่ในรูปของสมการแรงดันของสเตเตอร์และโรเตอร์ สมการแรงดันจะประกอบด้วยผลรวมของแรงดันคร่อมความต้านทานของขดลวดกับอนุพันธ์ของฟลักซ์แม่เหล็ก (flux linkages) ฟลักซ์แม่เหล็กนี้เกิดจากผลคูณของกระแสกับค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด จากโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ที่สเตเตอร์จะมีขดลวดอยู่ 2 ชุด ซึ่งวางตัวห่างกัน 90 องศาทางไฟฟ้า ดังนั้นในการพิจารณาแบบจำลองจึงมีการอาศัยทฤษฎีสองแกน (dq-frame theory) ดังนั้นสมการแรงดันของสเตเตอร์และโรเตอร์จะปรากฏอยู่ทั้ง

2) การควบคุมโดยการรักษาอัตราส่วนของแรงกับความถี่ไม่คงที่

ในกรณีที่ต้องการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ที่ย่านความเร็วสูงกว่าความเร็วพิกัด แรงบิดไม่สามารถรักษาให้คงที่ได้เนื่องจากจะทำให้มอเตอร์เกิดสภาวะโหลดเกิน ดังนั้นการควบคุมมอเตอร์ในลักษณะนี้ใช้วิธี Variable Voltage, Variable Frequency (VVVF) การควบคุมความเร็วในย่านนี้กำลังงานสูงสุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีค่าคงที่ แต่แรงบิดมีค่าลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ข้อดีของการใช้วิธีการควบคุมแรงดันคือ สามารถควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ได้โดยการควบคุมอัตราส่วนของแรงดันกับความถี่ของมอเตอร์ แรงบิดเริ่มต้น (starting torque) ของมอเตอร์มีค่าสูง นอกจากนี้การควบคุมความเร็วโดยใช้การควบคุมแรงดันทำได้โดยไม่จำเป็นต้องมีการป้อนกลับหรือถ้าระบบป้อนกลับเกิดขัดข้องก็จะไม่ก่อให้เกิดผลเสียหายที่รุนแรงต่อระบบ แต่จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการควบคุมความเร็วรอบเท่านั้น

จากการศึกษาทฤษฎีของการขับเคลื่อนข้างต้น ได้มีการศึกษาเทคนิคการขับเคลื่อนโดยเน้นการขับเคลื่อนที่ใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ในการศึกษาวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของมอเตอร์ เช่น ค่าแรงบิด ค่าความเร็ว เป็นต้น เทคนิคการปรับค่าความถี่ของแหล่งจ่ายเพื่อเปรียบเทียบผลของเทคนิคการปรับแรงดันให้ค่ากำลังให้คงที่ (Constant Power Dissipation : CPD) กับเทคนิคการควบคุมอัตราส่วนของแรงดันกับความถี่ให้คงที่ (Constant V/f) โดยผลที่ได้วิธีCPD จะให้สมรรถนะของแรงบิดที่สูงและสามารถใช้งานที่ย่านของความถี่กว้างกว่าวิธี Constant V/f แต่ในช่วงความถี่ 26 Hz ถึง 60 Hz กำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในมอเตอร์พบว่าวิธี Constant V/f จะมีค่าน้อยกว่าวิธี CPD และค่าแรงดันที่ใช้ วิธี Constant V/f จะมีค่าน้อยกว่าวิธี CPD ที่ความถี่เดียวกัน (Collins and Ashley, 1991) การควบคุมแรงดันเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนที่มีผลต่อคุณสมบัติของมอเตอร์ ปรับแรงดันอินพุตโดยวิเคราะห์ผ่านการควบคุมตัวประกอบกำลัง โดยค่ากำลังอินพุตมีค่าน้อยที่สุดและประสิทธิภาพมีค่าสูงที่สุดจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อค่าตัวประกอบกำลัง (power factor) มีค่าเหมาะสมที่สุด การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังจะคำนวณจากมุมต่างของกระแสและแรงดัน (phase shift, α) โดยค่าประสิทธิภาพจะแสดงออกมาในรูปของกำลังเอาต์พุต เมื่อมีการปรับค่าแรงดันโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ปรับมุมจุดชนวน (firing delay angle, ϕ) ของไตรแอกเพื่อให้ได้แรงบิดตามที่โหลดต้องการและยังรักษาค่าตัวประกอบกำลังได้ (Benbouzid, Beguenane, and Capolino, 1996) ผลการสำรวจโครงสร้างของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟสเดียวแบบต่าง ๆ เช่น AC/AC Chopper Cycloconverter Single Phase PWM inverter Two Phase PWM inverter เพื่อนำไปใช้ในการปรับความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ในการขับเคลื่อนจากการปรับความถี่โดยใช้กฎอัตราส่วนต่อความถี่มีค่าคงที่เพื่อการพัฒนาสมรรถนะของแรงบิดที่ย่านความถี่ต่ำ (Ba-thunya, Khopkar, Kexin Wei, and Toliyat, 2001) การจำลองผลมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวจากแหล่งจ่ายแบบสองเฟสผ่านชุดขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้อินเวอร์เตอร์มอดูเลท

แบบพัลส์ การสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์จะเลือกใช้เทคนิค selective hamonic elimination (SHE) โดยพิจารณามุมจุดฉนวนของอุปกรณ์สวิตช์ เพื่อจ่ายให้ชุดขดลวดแต่ละชุดขดลวดโดยผลที่ได้จะนำมาพิจารณาผลของสมรรถนะของมอเตอร์ในสภาวะชั่วครู่และสภาวะคงตัว จากผลของการจำลองผลพบว่าการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสองเฟสให้สมรรถนะที่ดีกว่าแบบเฟสเดียว (Abdel-Rahim and Shaltout, 2002)

2.2.5 การประหยัดพลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การประหยัดพลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำอยู่ในรูปแบบของเทคนิคการควบคุมการทำงานของชุดขับเคลื่อนเพื่อให้ได้จุดที่เหมาะสมที่ทำให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพสูงสุดหรือมีกำลังงานการสูญเสียน้อยที่สุด โดยวิธีการที่เหมาะสมสำหรับควบคุมการทำงานงานของอินเวอร์เตอร์แบบหกขั้น (six-step) ที่จ่ายให้มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด เทคนิคดังกล่าวคือการควบคุมความถี่ของโรเตอร์ (perturbing rotor frequency control) และการควบคุมอัตราส่วนระหว่างแรงดันกับความถี่ (V/f control) โดยนำเสนอผลในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์ของประสิทธิภาพกับเปอร์เซ็นต์ของความเร็ว โดยค่าประสิทธิภาพจะอยู่ในรูปของฟังก์ชันของค่าสลิป ค่าความถี่และค่าแรงดันของแหล่งจ่าย (Parviz and Jimie, 1991) การลดพลังงานสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส แบบจำลองที่ใช้เป็นแบบสภาวะคงตัวที่อยู่ในรูปการพิจารณาแบบสองแกน โดยเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดจะใช้การค้นหาแบบจีนเนติกอัลกิริทึม (Genetic Algorithms : GA) หาค่าฟลักซ์แม่เหล็กของโรเตอร์ ที่มีค่าเหมาะที่สุด จากผลการทดลองพบว่าระบบที่มีการหาค่าความเหมาะสมด้วย GA ค่ากำลังงานสูญเสียจะน้อยกว่าระบบที่ไม่มีการหาค่าความเหมาะสมด้วย GA นอกจากนี้จำนวนประชากร จำนวนรุ่นของการปรับปรุงสายพันธุ์ยังมีผลต่อประสิทธิภาพในช่วงเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์ (Poirier, hribi, and Kaddouri, 2001) ปัญหาของประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบเริ่มเดินเครื่องด้วยตัวเก็บประจุ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เป็นแบบ symmetrical component model ในการควบคุมจะใช้ไตรแอกในการความคุมแรงดันของแหล่งจ่ายที่จ่ายให้มอเตอร์ (voltage control) การหาค่าความเหมาะสมใช้ความสัมพันธ์ของกระแสของขดลวดหลักและกระแสของขดลวดช่วยเพื่อหาค่าความเหมาะสมที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขการคงที่ของแรงบิด (Mademlis, Kioskeridis, and Theodoulidis, 2005)

2.3 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยได้กล่าวถึงโครงสร้างของมอเตอร์ หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ การควบคุมคุณสมบัติการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ และ การประหยัดพลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากเนื้อหาที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่าในหัวข้อต่าง ๆ ได้ทำการศึกษาพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งนี้เพื่อความเข้าใจในเนื้อหาของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวและการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวจะได้กล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3
การประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

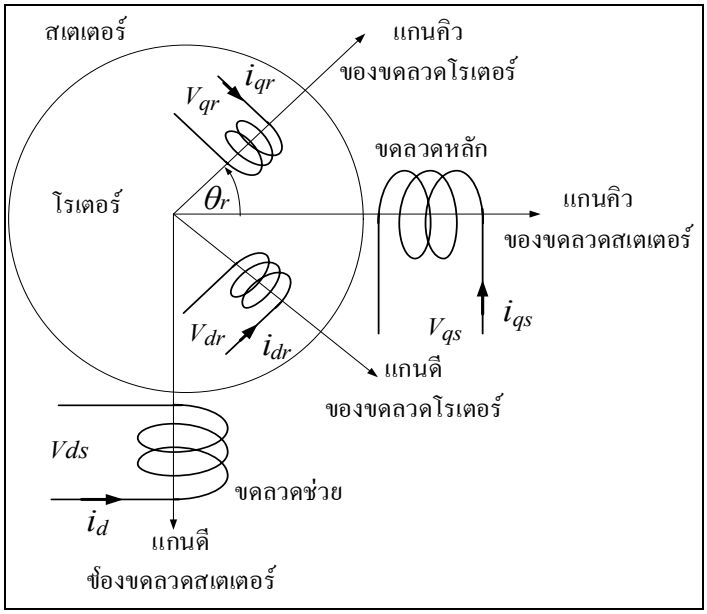
3.1 บทนำ

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เป็นปัญหาสำคัญของการศึกษาและการพิจารณาคุณลักษณะของมอเตอร์ งานวิจัยนี้ได้ศึกษากำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ โดยได้มีการพัฒนาแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวขึ้น ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ในงานวิจัยได้ทำการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์จากวิธีการดั้งเดิม (Guru and Hiziroglu, 2001) ได้แก่ หลักการโวลต์แอมแปร์ (volt-ampere method) การทดสอบที่สภาวะไร้โหลด (no-load test) และการทดสอบที่สภาวะตรึงตัวหมุน (block rotor test) เพื่อที่จะหาค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำของมอเตอร์และวิธีการทดสอบการชะลอ (Peter Vas, 1993) เพื่อหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของมอเตอร์ นอกเหนือจากการทดสอบดังกล่าว งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่า จีนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm : GA) เพื่อการทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ดังนั้นในบทนี้จะได้นำเสนอหลักการและแนวทางการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการดั้งเดิมและวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ เพื่อทำการเปรียบเทียบความแน่นยำและความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากทั้ง 2 วิธี

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส (split-phase motor) โดยแบบจำลองดังกล่าวได้พัฒนามาจากแบบจำลองทางพลวัตในรูปสมการอนุพันธ์ (state-space model) โดยอาศัยหลักการของทฤษฎีสองแกน (dq-frame theory) ซึ่งประกอบด้วยแกนตรง (direct axis) หรือแกนดี (d-axis) และแกนครอดราเจอร์ (quadrature axis) หรือแกนคิว (q-axis) โดยทั้ง 2 แกนตั้งฉากกัน ดังนั้นด้วยลักษณะการวางตัวของชุดขดลวดหลักและชุดขดลวดช่วยทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกัน จึงสามารถพิจารณาโดยใช้หลักการของทฤษฎี 2 แกนได้พิจารณาที่แกนอ้างอิงหยุดนิ่ง (stationary reference frame) โดยอาศัยหลักการถ่ายโอนแกน (reference-frame theory) จากรูปที่ 3.1 พบว่าที่โรเตอร์และสเตเตอร์ จะประกอบด้วยแกนดีและ

แกนคิว ซึ่งค่าแรงดันของชุดขดลวดหลักและค่าแรงดันของขดลวดช่วย จะมีมุมเฟสต่างกัน 90 องศาทางไฟฟ้า



รูปที่ 3.1 ขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

โดยที่ V_{qs} คือ แรงดันของขดลวดหลักบนแกนคิว (โวลต์)

V_{ds} คือ แรงดันของขดลวกช่วยบนแกนดี (โวลต์)

V_{qr} คือ แรงดันของขดลวดโรเตอร์บนแกนคิว (โวลต์)

V_{dr} คือ แรงดันของขดลวดโรเตอร์บนแกนดี (โวลต์)

i_{qs} คือ กระแสไหลในขดลวดหลักบนแกนคิว (แอมแปร์)

i_{ds} คือ กระแสไหลในขดลวดช่วยบนแกนดี (แอมแปร์)

i_{qr} คือ กระแสไหลในขดลวดโรเตอร์บนแกนคิว (แอมแปร์)

i_{dr} คือ กระแสไหลในขดลวดโรเตอร์บนแกนดี (แอมแปร์)

θr คือ ค่าการกระจัดเชิงมุม (เรเดียน)

เมื่อนำโครงสร้างในรูปที่ 3.1 มาพิจารณาที่แกนอ้างอิงหยุดนิ่งจะทำการย้าย ค่าแรงดัน V_{qr} V_{dr} ค่ากระแสในโรเตอร์ i_{qr} i_{dr} ไปอยู่บนสเตเตอร์ โดยใช้การแยกองค์ประกอบเวกเตอร์เข้าสู่แกนอ้างอิงดังกล่าว จากรูปแกนคิวจะทำมุมกับแกนคิวเท่ากับ θr ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3.1)

$$\begin{bmatrix} V_{qr}^{s} \\ V_{dr}^{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\,\theta_r & cos(90^\circ - \theta_r) \\ cos\,(90^\circ + \theta_r) & cos\,\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qr}^{r} \\ V_{dr}^{r} \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

นำสมการ (3.1) มาเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} V_{qr}^{s} \\ V_{dr}^{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\,\theta_r & sin\,\theta_r \\ -\,sin\,\theta_r & cos\,\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qr}^{r} \\ V_{dr}^{r} \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

โดยที่ $\begin{bmatrix} cos\theta_r & sin\theta_r \\ -sin\theta_r & cos\theta_r \end{bmatrix}$ เรียกว่า เมตริกซ์การแปลง $[k]$ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ตามสมการที่ (3.3)

$$\left[f_x^s\right] = [k]\left[f_x^r\right] \tag{3.3}$$

โดยที่ $[f_x^s]$ คือ เมตริกซ์ค่าทางไฟฟ้า เช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า เส้นแรงแม่เหล็ก เป็นต้น ที่อยู่บนขดลวดสเตเตอร์

$[f_x^r]$ คือ เมตริกซ์ค่าทางไฟฟ้า เช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า เส้นแรงแม่เหล็ก เป็นต้น ที่อยู่บนขดลวดโรเตอร์

เมื่อพิจารณาสมการแรงดันของขดลวดหลักบนแกนคิวและขดลวดช่วยบนแกนดีที่สเตเตอร์อธิบายได้ตามสมการที่ (3.4) และสมการแรงดันของขดลวดหลักบนแกนคิวและขดลวดช่วยบนแกนดีที่โรเตอร์อธิบายได้ตามสมการที่ (3.5)

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qs} + pL_{qsqs} & pL_{qsds} \\ pL_{dsqs} & r_{ds} + pL_{dsds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{qsqr}\cos\theta_r & L_{qsdr}\sin\theta_r \\ -L_{dsqr}\sin\theta_r & L_{dsdr}\cos\theta_r \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

$$\begin{bmatrix} V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_r + pL_{qrqr} & pL_{qrdr} \\ pL_{drqr} & r_r + pL_{drdr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{qrqs}\cos\theta_r & -L_{qrds}\sin\theta_r \\ L_{drqs}\sin\theta_r & L_{drds}\cos\theta_r \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

โดยพิจารณาจากแกนอ้างอิงหยุดนิ่งทำให้ค่ากระแสและแรงดันที่อยู่บนโรเตอร์จะถูกย้ายให้ไปอยู่บนสเตเตอร์ ด้วยเมตริกซ์การแปลงดังแสดงในสมการที่ (3.6) และ (3.7) พิจารณาสมการแรงดันที่สเตเตอร์

$$\begin{bmatrix} V^s_{qs} \\ V^s_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qs} + pL_{qsqs} & pL_{qsds} \\ pL_{dsqs} & r_{ds} + pL_{dsds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i^s_{qs} \\ i^s_{ds} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{qsqr}\cdot\cos\theta_r & L_{qsdr}\cdot\sin\theta_r \\ -L_{dsqr}\cdot\sin\theta_r & L_{dsdr}\cdot\cos\theta_r \end{bmatrix} p \left\{ [k] \begin{bmatrix} i^s_{qr} \\ i^s_{dr} \end{bmatrix} \right\} \tag{3.6}$$

พิจารณาสมการแรงดันที่โรเตอร์

$$[k]^{-1} \begin{bmatrix} V^s_{qr} \\ V^s_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_r + pL_{qrqr} & pL_{qrdr} \\ pL_{drqr} & r_r + pL_{drdr} \end{bmatrix} [k]^{-1} \begin{bmatrix} i^s_{qr} \\ i^s_{dr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{qrqs}\cos\theta_r & -L_{qrds}\sin\theta_r \\ L_{drqs}\sin\theta_r & L_{drds}\cos\theta_r \end{bmatrix} p \left\{ [k]^{-1} \begin{bmatrix} i^s_{qs} \\ i^s_{ds} \end{bmatrix} \right\} \tag{3.7}$$

เมื่อ L_{lqs} L_{lds} L_{lqr} และ L_{ldr} เป็นค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ เมื่อพิจารณาโรเตอร์ที่สมมาตร จะทำให้ $N_{qr} = N_{dr}$ และ $L_{lqr} = L_{ldr}$ สามารถเขียนแทนด้วย N_r และ L_{lr} ตามลำดับ ความสัมพันธ์ของค่าแรงดัน กระแส ความต้านทาน และจำนวนรอบของขดลวดแต่ละชุดเมื่อย้ายตัวแปรบนแกนดีของสเตเตอร์และแกนดีคิวของโรเตอร์ไปยังแกนคิวของสเตเตอร์

โดยที่ N_{qs} คือ จำนวนรอบประสิทธิผลของขดลวดหลัก

N_{ds} คือ จำนวนรอบประสิทธิผลของขดลวดช่วย

N_r คือ จำนวนรอบประสิทธิผลของขดลวดโรเตอร์

' คือ ค่าที่ย้ายมาอยู่บนแกนคิวของสเตเตอร์

จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$L_{qsqs} = L_{lqs} + N_{qs}^2 P_g \qquad L_{dsds} = L_{lds} + N_{ds}^2 P_g$$

$$L_{qsqr} = N_{qs} N_{qr} P_g \qquad L_{qsdr} = N_{qs} N_{dr} P_g$$

$$L_{dsqr} = N_{ds} N_{qr} P_g \qquad L_{dsdr} = N_{ds} N_{dr} P_g$$

$$L_{qrqr} = L_{lqr} + N_{qr}^2 P_g \qquad L_{drdr} = L_{ldr} + N_{dr}^2 P_g$$

$$v'_{ds} = \frac{N_{qs}}{N_{ds}} v_{ds} \qquad i'_{ds} = \frac{N_{ds}}{N_{qs}} i_{ds}$$

$$L_{mqs} = N_{qs}^2 P_g \qquad L'_{mqs} = \left(\frac{N_{qs}}{N_{ds}}\right)^2 N_{ds}^2 P_g = L_{mqs}$$

$$L'_{lds} = \left(\frac{N_{qs}}{N_{ds}}\right)^2 L_{lds} \qquad r'_{ds} = \left(\frac{N_{qs}}{N_{ds}}\right)^2 r_{ds}$$

$$L'_{lr} = \left(\frac{N_{qs}}{N_r}\right)^2 L_{lr} \qquad r'_r = \left(\frac{N_{qs}}{N_r}\right)^2 r_r$$

$$v'^s_{qr} = \frac{N_{qs}}{N_r} v^s_{qr} \qquad v'^s_{dr} = \frac{N_{qs}}{N_r} v^s_{dr}$$

$$i'^s_{qr} = \frac{N_r}{N_{qs}} i^s_{qr} \qquad i'^s_{dr} = \frac{N_r}{N_{qs}} i^s_{dr}$$

เมื่อนำสมการของสเตเตอร์และโรเตอร์เขียนรวมกัน

$$\begin{bmatrix} V^s_{qs} \\ V'^s_{ds} \\ V'^s_{qr} \\ V'^s_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qs} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r'_{ds} & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_r L_{mqs} & r'_r & -\left(L'_{lr} + L_{mqs}\right)\omega_r \\ \omega_r L_{mqs} & 0 & \left(L'_{lr} + L_{mqs}\right)\omega_r & r'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i^s_{qs} \\ i'^s_{ds} \\ i'^s_{qr} \\ i'^s_{dr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left(L'_{lqs} + L_{mqs}\right) & 0 & L_{mqs} & 0 \\ 0 & \left(L'_{lds} + L_{mqs}\right) & 0 & L_{mqs} \\ L_{mqs} & 0 & \left(L'_{lr} + L_{mqs}\right) & 0 \\ 0 & L_{mqs} & 0 & \left(L'_{lr} + L_{mqs}\right) \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i^s_{qs} \\ i'^s_{ds} \\ i'^s_{qr} \\ i'^s_{dr} \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

เมื่อกำหนดให้

$$D=\begin{bmatrix} r_{qs} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{ds}^{'} & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_r L_{mqs} & r_r^{'} & -\left(L_{lr}^{'}+L_{mqs}\right)\omega_r \\ \omega_r L_{mqs} & 0 & \left(L_{lr}^{'}+L_{mqs}\right)\omega_r & r_r^{'} \end{bmatrix}$$

$$E=\begin{bmatrix} \left(L_{lqs}^{'}+L_{mqs}\right) & 0 & L_{mqs} & 0 \\ 0 & \left(L_{lds}^{'}+L_{mqs}\right) & 0 & L_{mqs} \\ L_{mqs} & 0 & \left(L_{lr}^{'}+L_{mqs}\right) & 0 \\ 0 & L_{mqs} & 0 & \left(L_{lr}^{'}+L_{mqs}\right) \end{bmatrix}$$

โดยที่ L_{lqs} คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดหลัก (เฮนรี)

L_{lds} คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดช่วย (เฮนรี)

L_{lr} คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดโรเตอร์ (เฮนรี)

L_{mqs} คือ ค่าความเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก (เฮนรี)

ω_r คือ ค่าความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (เรเดียน/วินาที)

จากสมการที่ (3.8) สามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ได้ ตามสมการที่ (3.9)

$$\frac{d}{dt}[i]=[A][i]+[B][V] \tag{3.9}$$

เมื่อค่าของเมตริกซ์ i V A และ B มีค่าดังนี้

$$i=[i_{qs}^{s}\ i_{ds}^{'s}\ i_{qr}^{'s}\ i_{dr}^{'s}]'$$

$$V=[V_{qs}^{s}\ V_{ds}^{'s}\ V_{qr}^{'s}\ V_{dr}^{'s}]'$$

$$B=[E]^{-1}$$

$$A=[B][-D]$$

จากแบบจำลองของมอเตอร์ในรูปของแรงดัน ในการจำลองผลของมอเตอร์เหนี่ยวนำจำเป็นต้องมีการพิจารณาแบบจำลองของระบบเชิงกลของมอเตอร์ โดยอาศัยกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันจะได้สมการการเคลื่อนดังนี้

$$\frac{P}{2}\cdot T_e - \frac{P}{2}\cdot T_L - B_m\,\omega_r = J_m\,\alpha = J_m\,\frac{d\,\omega_r}{d\,t} \tag{3.10}$$

เขียนอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ของความเร็วเชิงมุม กับค่าการกระจัดเชิงมุมตามสมการที่ (3.11) และ สมการที่ (3.12)

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P}{2J_m}T_e - \frac{P}{2J_m}T_L - \frac{B_m}{J_m}\omega_r \tag{3.11}$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \tag{3.12}$$

โดยที่ P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

T_e คือ แรงบิดสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ (นิวตัน- เมตร)

T_L คือ แรงบิดของโหลด (นิวตัน- เมตร)

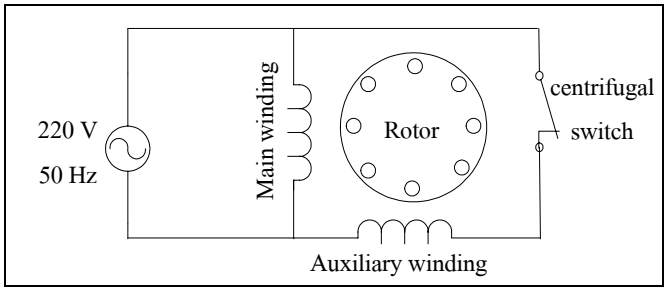
J_m คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ของมอเตอร์ (กิโลกรัม-เมตร^2)

B_m คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉียดทานของมอเตอร์ (นิวตัน-เมตร/เรเดียน/วินาที)

จากแบบจำลองทางไฟฟ้าและแบบจำลองเชิงกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์อนุพันธ์ได้ดังสมการที่ (3.13) โดยเมตริกซ์ดังกล่าวจะถูกนำไปใช้เป็นสมการตั้งต้นเพื่อพิจารณาแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส

$$\begin{bmatrix} \frac{d[i]_{4x1}}{dt} \\ \frac{d\omega_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A]_{4x4} & \cdots\ 0 & \cdots \\ \vdots & -\frac{B_m}{J_m} & 0 \\ 0 & & \\ \vdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i]_{4x1} \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [B]_{4x4} & \cdots\ 0 & \cdots \\ \vdots & \frac{P}{2J_m} & 0 \\ 0 & & \\ \vdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [v]_{4x1} \\ T_e - T_L \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

เมื่อพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้เป็นแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส จากโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส

จากหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส พบว่าที่ความเร็วประมาณ 75% ของความเร็วพิกัดสวิตช์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์ (centrifugal switch) จะทำหน้าที่ปลดขดลวดช่วยออกทำให้แบบจำลองถูกแบ่งออกเป็น 2 สถานะ ได้แก่ สถานะที่พิจารณาก่อนที่สวิตช์แรงเหวี่ยงจะทำงานและหลังจากสวิตช์แรงเหวี่ยงทำงาน โดยสภาวะก่อนที่สวิตช์แรงเหวี่ยงทำงานจะพิจารณาตามสมการที่ (3.13) ส่วนสภาวะหลังการทำงานของสวิตช์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์นั้นจะพิจารณาค่าพจน์แรงดันและกระแสของขดลวดช่วยมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อเขียนแบบจำลองขึ้นใหม่ ได้ดังสมการที่ (3.14)

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^{s} \\ V_{qr}^{'s} \\ V_{dr}^{'s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qs} & 0 & 0 \\ 0 & r_r^{'} & -(L_{lr}^{'}+L_{mqs})\omega_r \\ \omega_r L_{mqs} & (L_{lr}^{'}+L_{mqs})\omega_r & r_r^{'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^{s} \\ i_{qr}^{'s} \\ i_{dr}^{'s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left(L_{lqs}^{'}+L_{mqs}\right) & L_{mqs} & 0 \\ L_{mqs} & \left(L_{lr}^{'}+L_{mqs}\right) & 0 \\ 0 & 0 & \left(L_{lr}^{'}+L_{mqs}\right) \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qs}^{s} \\ i_{qr}^{'s} \\ i_{dr}^{'s} \end{bmatrix} \tag{3.14}$$

จากสมการที่ (3.14) สามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{d}{dt}[i] = [F][i] + [G][V] \tag{3.15}$$

เมื่อกำหนดให้

$$i = [i_{qs}^{s} \;\; i_{qr}^{'s} \;\; i_{dr}^{'s}]'$$

$$V = [V_{qs}^{s} \;\; V_{qr}^{'s} \;\; V_{dr}^{'s}]'$$

$$H = \begin{bmatrix} r_{qs} & 0 & 0 \\ 0 & r_r^{'} & -(L_{lr}^{'} + L_{mqs})\omega_r \\ \omega_r L_{mqs} & (L_{lr}^{'} + L_{mqs})\omega_r & r_r^{'} \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} \left(L_{lqs}^{'} + L_{mqs}\right) & L_{mqs} & 0 \\ L_{mqs} & \left(L_{lr}^{'} + L_{mqs}\right) & 0 \\ 0 & 0 & \left(L_{lr}^{'} + L_{mqs}\right) \end{bmatrix}$$

$$G = [K]^{-1}$$

$$F = [G][-H]$$

เมื่อได้สมการแรงดันของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สภาวะหลังการทำงานจะถูกนำมาเขียนรวมกับสมการอนุพันธ์ของความเร็วเชิงมุมและระยะการกระจัดเชิงมุมจะได้แบบจำลองของมอเตอร์ที่สภาวะหลังการทำงานสวิตช์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์ ดังสมการด้านล่าง

$$\begin{bmatrix} \frac{d[i]_{3x1}}{dt} \\ \frac{d\omega_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [F]_{3x3} & \cdots & 0 & \cdots \\ \vdots & & -\frac{B_m}{J_m} & 0 \\ 0 & & & \\ \vdots & & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i]_{3x1} \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [G]_{3x3} & \cdots & 0 & \cdots \\ \vdots & & \frac{P}{2J_m} & 0 \\ 0 & & & \\ \vdots & & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [v]_{3x1} \\ T_e^{'} - T_L \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (3.16)$$

จากสมการที่ (3.13) และสมการที่ (3.16) เป็นสมการสถานะของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสที่สภาวะสวิตช์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางปิดและที่สภาวะสวิตช์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางทำงานตามลำดับ

3.3 วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

การประมาณค่าพารามิเตอร์ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด 9 ค่า ได้แก่ ค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดหลัก ค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดช่วย ค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดโรเตอร์ ค่าความเหนี่ยวนำสนาม

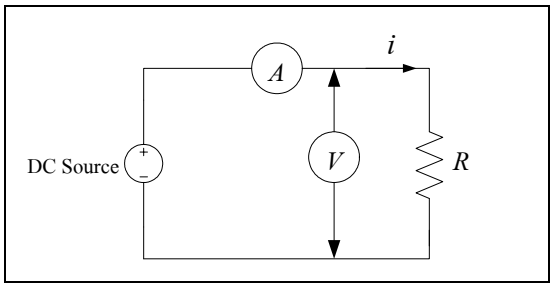
แม่เหล็ก ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน โดยค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถประมาณค่าได้มาจากการทดสอบแบบดั้งเดิม ได้แก่ การทดสอบแบบดีซี (d.c. test) การทดสอบที่สภาวะไร้โหลด การทดสอบที่สภาวะตรึงตัวหมุน และการทดสอบการชะลอ (retardation) นอกเหนือจากการทดสอบแบบดั้งเดิม ในงานวิจัยยังได้นำเสนอวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยจีนเนติกอัลกอริทึมเพื่อทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ให้มีความถูกต้องยิ่งขึ้น โดยรายละเอียดของการประมาณค่าพารามิเตอร์จากกระบวนการทดสอบและวิธีการดังกล่าวได้แสดงในหัวข้อด้านล่างดังนี้

3.3.1 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบดั้งเดิม

ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบดั้งเดิมจะแบ่งออกได้เป็น 3 การทดลองดังต่อไปนี้

1) การทดสอบแบบดีซี

วิธีการทดสอบนี้ใช้สำหรับการหาค่าความต้านทานของขดลวดที่สเตเตอร์ของมอเตอร์ โดยการป้อนแรงดันกระแสตรงผ่านขดลวด แล้วทำการวัดกระแสที่ไหลผ่านขดลวดตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรทดสอบดีซี

ทำการคำนวณหาค่าความต้านทานของขดลวดจากกฎของโอห์มตามสมการที่ (3.17)

$$R = \frac{V}{i} \tag{3.17}$$

การทดสอบด้วยวิธีนี้สามารถหาค่าความต้านทานของขดลวดหลักและค่าความต้านทานของขดลวดช่วยของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเฟสเดียว

2) การทดสอบที่สภาวะไร้โหลดและสภาวะตรึงตัวหมุน

วิธีการทดสอบนี้ใช้สำหรับหาค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวด ค่ารีแอกแตนซ์ทางสนามแม่เหล็ก ค่าความต้านทานของโรเตอร์และรอบประสิทธิผล (effective turn : a) ของขดลวดหลักกับขดลวดช่วย การทดสอบนี้จะทำการวัดค่ากระแส แรงดัน และกำลังงานไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์ โดยการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ขดลวดช่วยของมอเตอร์ ถูกปลดออก (auxiliary winding open) และกรณีที่ขดลวดหลักถูกปลดออก (main winding open) ซึ่งแต่ละกรณีก็จะมีการทดสอบในแต่ละสภาวะตามตารางที่ 3.1 ที่สภาวะไร้โหลดจะทดสอบโดยการเดินเครื่องมอเตอร์ที่ระดับแรงดันพิกัด และที่สภาวะไร้โหลดทำการวัดค่ากระแส แรงดันและกำลังงานไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์ ส่วนสภาวะตรึงตัวหมุนจะทำการยึดโรเตอร์ของมอเตอร์ให้อยู่นิ่งแล้วจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ จนได้กระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์มีค่าเท่ากับกระแสพิกัด

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์แบบดั้งเดิม

การทดลอง	แรงดัน (โวลต์)	กระแส (แอมแปร์)	กำลังงานไฟฟ้า (วัตต์)
กรณีขดลวดช่วยเปิดออก			
สภาวะไร้โหลด	V_{nL}	I_{nL}	P_{nL}
สภาวะตรึงตัวหมุน	V_{bm}	I_{bm}	P_{bm}
กรณีขดลวดหลักเปิดออก			
สภาวะตรึงตัวหมุน	V_{ba}	I_{ba}	P_{ba}
ค่าความต้านทานของขดลวดหลัก	R_1		
ค่าความต้านทานของขดลวดช่วย	R_a		

โดยที่ V_{nL} คือ ค่าแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ที่สภาวะไร้โหลด

I_{nL} คือ ค่ากระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ที่สภาวะไร้โหลด

P_{nL} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้ามอเตอร์ที่สภาวะไร้โหลด

V_{bm} คือ ค่าแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ที่สภาวะตรึงตัวหมุนกรณีขดลวดช่วยเปิดออก

I_{bm} คือ ค่ากระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ที่สภาวะตรึงตัวหมุนกรณีขดลวดช่วยเปิดออก

P_{bm} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้ามอเตอร์ที่สภาวะตรึงตัวหมุนกรณีขดลวดช่วยเปิดออก

V_{ba} คือ ค่าแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ที่สภาวะตรึงตัวหมุนกรณีขดลวดหลักเปิดออก

I_{ba} คือ ค่ากระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ที่สภาวะตรึงตัวหมุนกรณีขดลวดหลักเปิดออก

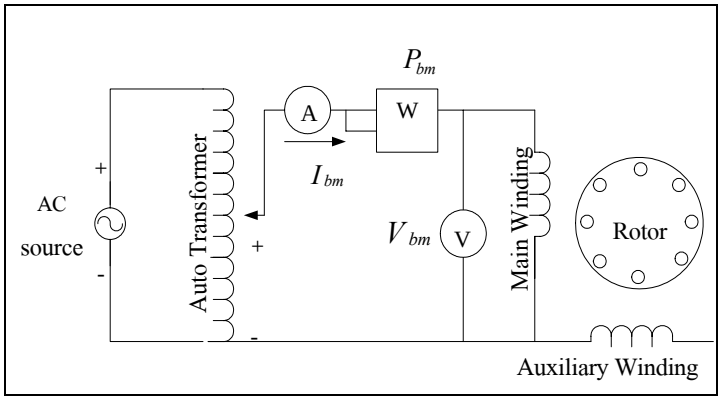
P_{ba} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้ามอเตอร์ที่สภาวะตรึงตัวหมุนกรณีขดลวดหลักเปิดออก

R_1 คือ ค่าความต้านทานของขดลวดหลัก

Ra คือ ค่าความต้านทานของขดลวดชวย

กรณีการทดสอบขดลวดช่วยถูกเปิดออก

ในการทดสอบกรณีนี้ขดลวดช่วยของมอเตอร์จะถูกปลดออกตามรูปที่ 3.4 โดยขั้นตอนการทดสอบจะทดสอบที่สภาวะไร้โหลดและสภาวะตรึงตัวหมุน เพื่อทำการวัดค่ากระแสแรงดันและกำลังไฟฟ้า ตามตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.4 วงจรการทดสอบกรณีขดลวดช่วยถูกเปิดออก

จากการทดสอบที่สภาวะตรึงตัวหมุน ค่าที่ทำการวัดได้จะถูกนำไปคำนวณหาค่าความอิมพิแดนซ์ในวงจร (Z_{bm}) ตามสมการที่ (3.18) และค่าความต้านทานภายในวงจร (R_{bm}) ตามสมการที่ (3.19)

$$Z_{bm} = \frac{V_{bm}}{I_{bm}} \tag{3.18}$$

$$R_{bm} = \frac{P_{bm}}{I_{bm}^2} \tag{3.19}$$

จากค่าอิมพิแดนซ์และค่าความต้านทานภายในวงจร สามารถนำมาหาค่ารีแอกแตนซ์ (X_{bm}) ได้ตามสมการที่ (3.20)

$$X_{bm} = \sqrt{Z_{bm}^2 - R_{bm}^2} \tag{3.20}$$

จากค่าความต้านทานโดยรวมในวงจร กับค่าความต้านทานของขดลวดหลักสามารถนำมาคำนวณค่าความต้านทานของโรเตอร์ (R_2) ตามสมการที่ (3.21)

$$R_2 = R_{bm} - R_1 \tag{3.21}$$

ค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดหลัก (X_1) และของขดลวดโรเตอร์ (X_2) คำนวณได้ตามสมการที่ (3.22)

$$X_1 = X_2 = 0.5X_{bm} \tag{3.22}$$

จากการทดสอบที่สภาวะไร้โหลดจะได้ค่าแรงดัน ค่ากระแส และพลังงานไฟฟ้า จากค่าดังกล่าวสามารถนำมาคำนวณค่าความต้านทานที่สภาวะไร้โหลด (R_{nL}) ดังสมการที่ (3.23) และค่ารีแอกแตนซ์ที่สภาวะไร้โหลด (X_{nL}) ดังสมการที่ (3.24)

$$R_{nL} = \frac{P_{nL}}{I_{nL}^2} \tag{3.23}$$

$$X_{nL} = \sqrt{Z_{nL}^2 - R_{nL}^2} \tag{3.24}$$

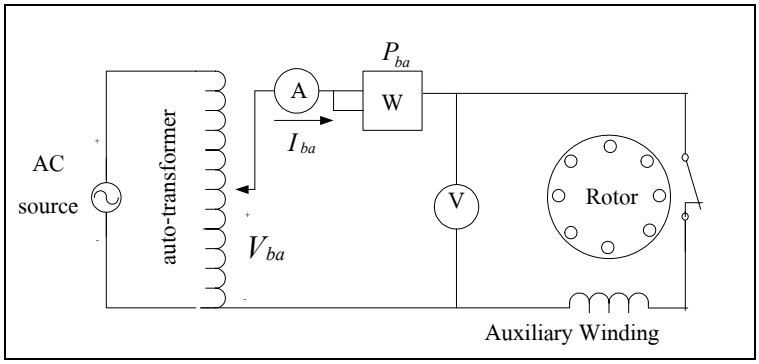
จากค่ารีแอกแตนซ์ที่สภาวะไรโหลดและค่ารีแอกแตนซ์ที่สภาวะตรึงตัวหมุนสามารถนำไปคำนวณหาค่ารีแอกแตนซ์ทางแม่เหล็ก (X_M) ได้ดังสมการที่ (3.25)

$$X_M = 2X_{nL} - 1.5X_{bm} \tag{3.25}$$

จากการทดสอบกรณีขดลวดช่วยถูกเปิดออกที่สภาวะไร้โหลดและตรึงตัวหมุน ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ประกอบด้วย ความต้านทานของโรเตอร์ ค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดหลัก ค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดโรเตอร์และค่ารีแอกแตนซ์ทางแม่เหล็ก

กรณีการทดสอบขดลวดช่วยถูกเปิดออก

ในการทดสอบกรณีนี้ ขดลวดหลักจะถูกปลดออกตามรูปที่ 3.5 ซึ่งขั้นตอนการทดสอบจะทำการทดสอบที่สภาวะตรึงตัวหมุนจากนั้นทำการวัดและบันทึกค่าแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้าตามตารางที่ 3.1 เพื่อทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ อัตราส่วนของรอบประสิทธิผล ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดช่วย



รูปที่ 3.5 วงจรการทดสอบกรณีขดลวดหลักถูกเปิดออก

จากรูปที่ 3.5 ค่าความต้านทานโดยรวมของขดลวดช่วย (R_{ba}) คำนวณได้จากสมการที่ (3.26)

$$R_{ba} = \frac{P_{ba}}{I_{ba}^2} \tag{3.26}$$

ค่าความต้านทานของโรเตอร์ที่อ้างอิงจากขดลวดช่วย (R_{2a}) คำนวณได้จากสมการที่ (3.27)

$$R_{2a}=R_{ba} - R_a \tag{3.27}$$

จากความต้านทานของโรเตอร์ที่อ้างอิงที่ขดลวดช่วยและความต้านทานของโรเตอร์ที่คำนวณได้สามารถหาค่าอัตราส่วนของรอบประสิทธิผล (ratio of effective turn : a) ระหว่างขดลวดช่วยกับขดลวดหลักได้ตามที่แสดงในสมการที่ (3.28)

$$a = \sqrt{\frac{R_{2a}}{R_2}} \tag{3.28}$$

ค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดช่วย (X_{la}) คำนวณจากอัตราส่วนของรอบประสิทธิผล ดังที่แสดงในสมการที่ (3.29)

$$X_{la} = a^2 X_1 \tag{3.29}$$

การทดสอบในกรณีนี้ ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการคำนวณได้คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดช่วยเมื่อนำไปรวมกับค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบดีซีและการทดสอบกรณีขดลวดช่วยเปิดออก โดยที่ค่าพารามิเตอร์ที่ได้ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ได้แก่ ความต้านทานของขดลวดและค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวด โดยค่ารีแอกแตนซ์ที่ได้จากการทดสอบสามารถเปลี่ยนเป็นค่าเหนี่ยวนำได้ดังแสดงในสมการที่ (3.30)

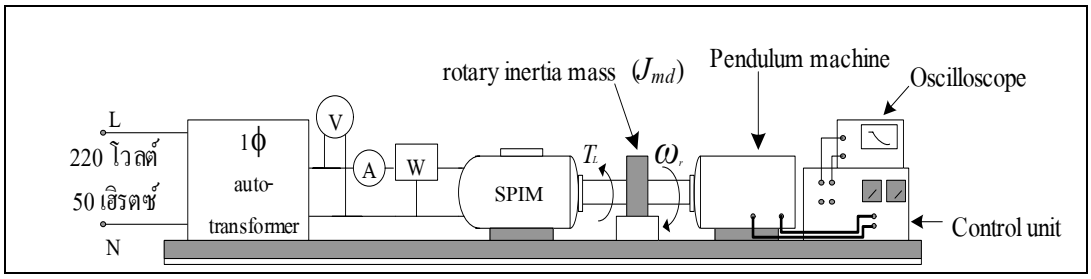
$$X = 2\pi fL \tag{3.30}$$

โดยที่ X คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวด (โอห์ม)
f คือ ค่าความถี่ของแหล่งจ่าย (เฮิรตซ์)
L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด (เฮนรี)

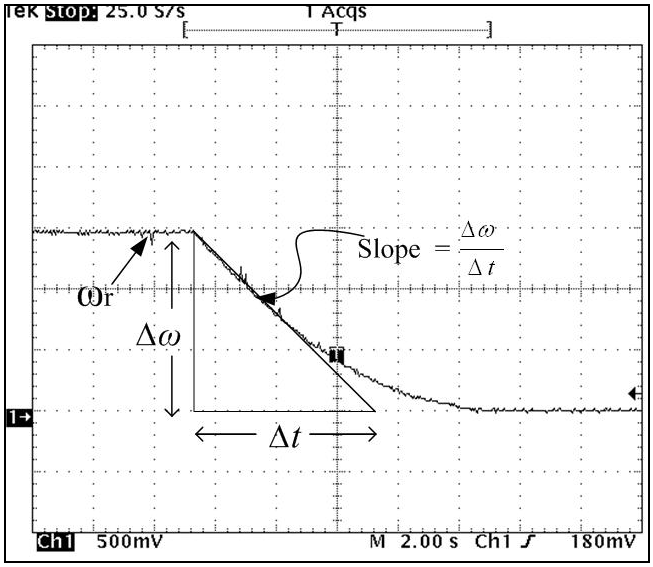
3) การทดสอบการชะลอ

ในการพิจารณาระบบการทำงานของมอเตอร์จำเป็นต้องมีค่าพารามิเตอร์ทางกลที่ต้องพิจารณา ได้แก่ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน จากการพิจารณาสมการการเคลื่อนที่ของนิวตันโดยการทดสอบจะทำการติดชุดทดสอบดังรูปที่ 3.6 แล้วทำการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้ได้ความเร็วคงที่ที่สภาวะไร้โหลด ทำการจับค่าสัญญาณความเร็วดังกล่าว

ด้วยดิจิตอลออสซิลโลสโคปแล้วทำการปิดแหล่งจ่ายเพื่อให้มอเตอร์ชะลอตัวและหยุดหมุนด้วยตัวเองในที่สุด ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงความเร็วเทียบกับเวลาจากการทดสอบการชะลอ



รูปที่ 3.6 ระบบทดสอบการชะลอ



รูปที่ 3.7 ผลการทดสอบการชะลอ

จากการเคลื่อนที่ของโรเตอร์สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

$$\sum T = J_m \alpha \tag{3.31}$$

$$T_m - T_L - B\omega_r = J_m \alpha \tag{3.32}$$

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \tag{3.33}$$

โดยที่ T_m คือ แรงบิด (นิวตัน-เมตร)

α คือ ค่าความหน่วงเชิงมุม (เรเดียน/วินาที^{2})

$\Delta\omega$ คือ ค่าผลต่างของความเร็วเชิงมุม (เรเดียน/วินาที)

Δt คือ ค่าผลต่างของเวลา (วินาที)

จากระบบทดสอบในรูปที่ 3.6 จะทำการทดสอบการชะลอ 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่มีมวลทดสอบที่ทราบค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่แน่ชัด (rotary inertia mass) ติดตั้งที่โรเตอร์ เมื่อพิจารณาสมการการเคลื่อนที่ จะได้ตามสมการที่ (3.33) และการทดสอบกรณีไม่มีมวลทดสอบที่ทราบค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่แน่ชัดติดตั้งที่โรเตอร์ เมื่อพิจารณาสมการการเคลื่อนที่จะได้ตามสมการที่ (3.34) ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากการแก้สมการที่ (3.33) และ (3.34)

$$J_m\alpha_1 + B_m\omega_{r1} = T_m - T_L \tag{3.34}$$

$$(J_m + J_{md})\alpha_2 + B_m\omega_{r2} = T_m - T_L \tag{3.35}$$

โดยที่ α_1 คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเทียบกับเวลา กรณีไม่มีมวลทดสอบที่ทราบค่าโมเมนต์ความเฉื่อยติดตั้งที่โรเตอร์ (เรเดียน/วินาที^{2})

ω_{r1} คือ ความเร็วของมอเตอร์ กรณีไม่มีมวลทดสอบที่ทราบค่าโมเมนต์ความเฉื่อยติดตั้งที่โรเตอร์ (เรเดียน/วินาที)

α_2 คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเทียบกับเวลา กรณีไม่มีมวลทดสอบที่ทราบค่าโมเมนต์ความเฉื่อยติดตั้งที่โรเตอร์ (เรเดียน/วินาที^{2})

ω_{r2} คือ ความเร็วของมอเตอร์ กรณีมีมวลทดสอบที่ทราบค่าโมเมนต์ความเฉื่อยติดตั้งที่โรเตอร์ (เรเดียน/วินาที)

J_{md} คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมวลทดสอบ (กิโลกรัม-เมตร^2)

จากการทดสอบการชะลอ จะเห็นได้ว่าการทดสอบดังกล่าวจำเป็นต้องมีมวลทดสอบที่ทราบค่าโมเมนต์ความเฉื่อยแน่ชัด ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่สามารถหามวลทดสอบดังกล่าวได้

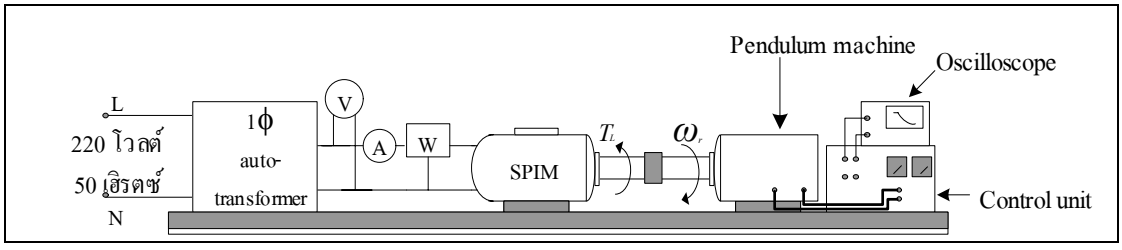
จึงส่งผลให้ไม่สามารถหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของมอเตอร์ได้ ผู้ทำวิจัยจึงได้นำเสนอแนวทางการประมาณค่าพารามิเตอร์ทางกลดังกล่าวด้วยจีนเนติกอัลกอริทึมซึ่งหลักการทำงานของจีนเนติกอัลกอริทึมและขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยจีนเนติกอัลกอริทึมนั้นจะได้กล่าวถึงโดยละเอียดในหัวข้อที่ 3.3.2

3.3.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวด้วยวิธีการจีนเนติกอัลกอริทึม

การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีการจีนเนติกอัลกอริทึม ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการค้นหาพารามิเตอร์ทั้งหมด 9 ค่า ได้แก่ ค่าความต้านทานของขดลวดหลัก ความต้านทานของขดลวดช่วย ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดหลัก ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดช่วย ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดโรเตอร์ ค่าความเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน โดยมีขั้นตอนการทดสอบ 2 ขั้นตอน ได้แก่ การทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับการหาค่าพารามิเตอร์และการประมาณค่าพารามอเตอร์ด้วยวิธีการจีนเนติกอัลกอริทึมโดยใช้ MATLAB Toolbox

1) การทดสอบมอเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์

ข้อมูลที่ใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์จะเก็บผลตอบสนองของกระแสของมอเตอร์และผลตอบสนองของความเร็วของมอเตอร์ขณะเริ่มเดินเครื่องจนถึงสภาวะคงตัว ในการทดสอบจะมีการจัดอุปกรณ์ทดสอบดังแสดงตามรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวดังรูปที่ 3.8 ประกอบด้วย

- หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส มีหน้าที่ปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ ซึ่งแปลงแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0-260 โวลต์

- มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส พิกัด 0.26 กิโลวัตต์ 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ 3.47 แอมแปร์ 1440 รอบต่อนาที ผลิตโดยบริษัท เอลเว (ELWE)

- เครื่องจักรกลเพนดูลัม (pendulum machine) ทำหน้าที่เป็นโหลดให้กับมอเตอร์

- ชุดควบคุม (control unit) ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วและแรงบิดของชุดโหลด สามารถวัดค่าค่าความเร็ว ค่าแรงบิดและค่ากำลังงานไฟฟ้าเอาต์พุตของมอเตอร์ได้

- ดิจิตอลออสซิลโลสโคป ใช้วัดรูปสัญญาณของความเร็วมอเตอร์และกระแสของมอเตอร์ในขณะที่ทำการทดสอบ ทำการบันทึกข้อมูลของความเร็วและกระแสเพื่อประมวลผลในคอมพิวเตอร์

- คลิปแอมป์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับจับสัญญาณกระแสของมอเตอร์เพื่อนำไปวิเคราะห์

ขั้นตอนการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับค้นหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ แบ่งออกได้ 4 ขั้นตอนดังนี้

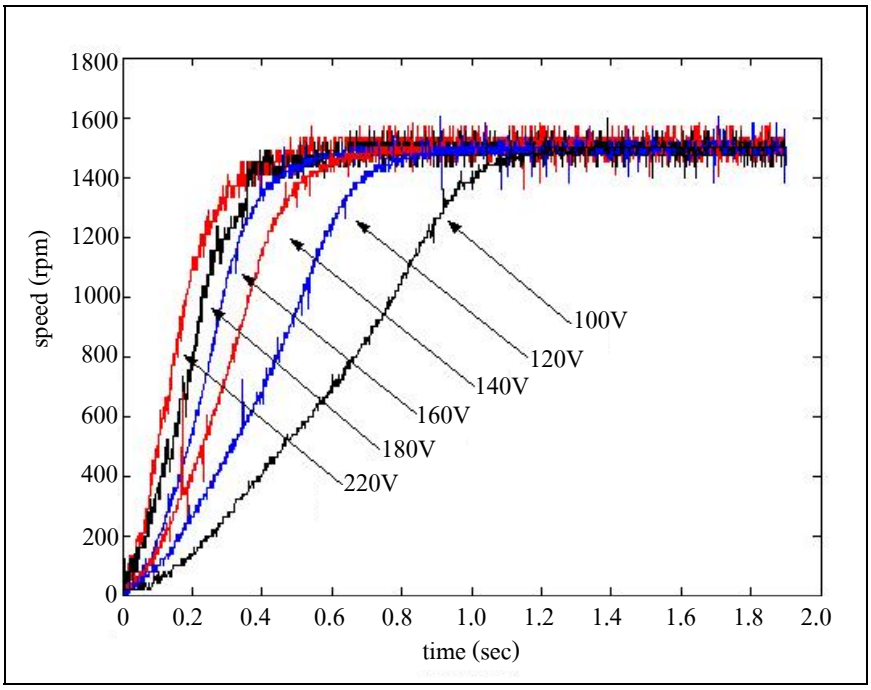
ขั้นตอนที่ 1 เตรียมอุปกรณ์การทดสอบต่อเชื่อมอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.8 ทำการจ่ายไฟ 220 โวลต์ เข้าที่หม้อแปลงหนึ่งเฟสเพื่อทำการจ่ายไฟให้มอเตอร์ ทำการต่อดิจิตอลออสซิลโลสโคปเพื่อทำการวัดความเร็วและกระแสของมอเตอร์ โดยสัญญาณของความเร็วจะวัดจากชุดควบคุม ส่วนกระแสจะวัดโดยคลิปแอมป์ เพื่อจับสัญญาณกระแสเข้ามอเตอร์

ขั้นตอนที่ 2 ปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์โดยผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวสำหรับการทดสอบได้กำหนดค่าแรงดันจาก 100โวลต์ จนถึง 220โวลต์

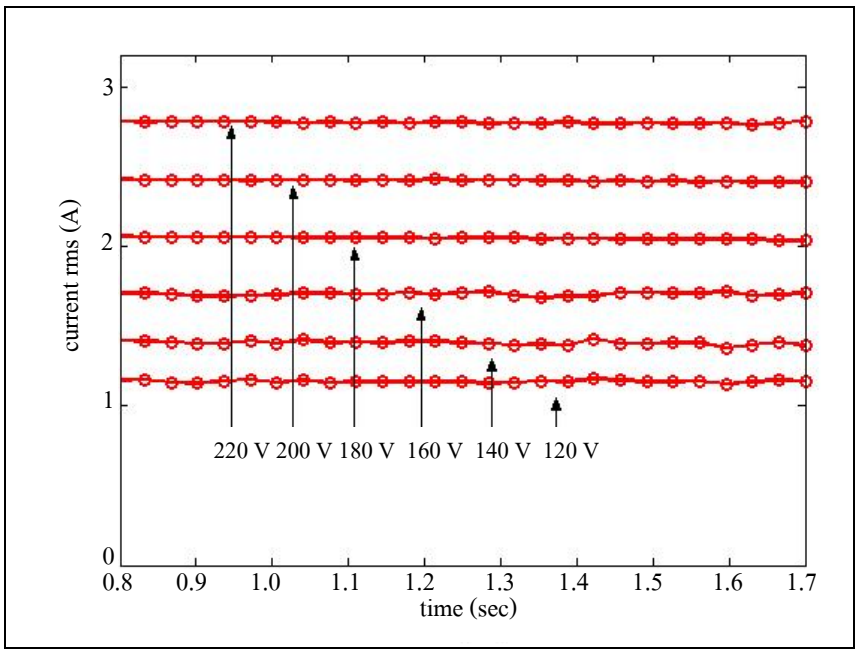
ขั้นตอนที่ 3 ทำการจ่ายไฟแบบจ่ายตรง (direct online) โดยทำการเปิดสวิตช์เพื่อทำการเดินเครื่องมอเตอร์ที่สภาวะหยุดนิ่งจนถึงความเร็วซิงโครนัส ทำการหยุดสัญญาณที่เครื่องออสซิลโลสโคปจะทำให้สัญญาณของกระแสและความเร็วที่มอนิเตอร์ของออสซิลโลสโคปหยุด

ขั้นตอนที่ 4 ทำการบันทึกรูปสัญญาณและเก็บข้อมูลของความเร็วและกระแสด้วยดิจิตอลออสซิลโลสโคป

จากกระบวนการทดสอบข้างต้นจะได้ผลดังรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10 ผลการทดลองดังกล่าวจะนำไปใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างผลที่ได้จากการทดสอบความสัมพันธ์ของความเร็วเทียบกับเวลา



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างผลที่ได้จากการทดสอบความสัมพันธ์ของกระแสอาร์เอมเอสเทียบกับเวลา

2) ขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยจีนเนติกอัลกอริทึม

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้โปรแกรม MATLAB Toolbox ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว โดยขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ สามารถอธิบายตามขั้นตอน ดังต่อไปนี้

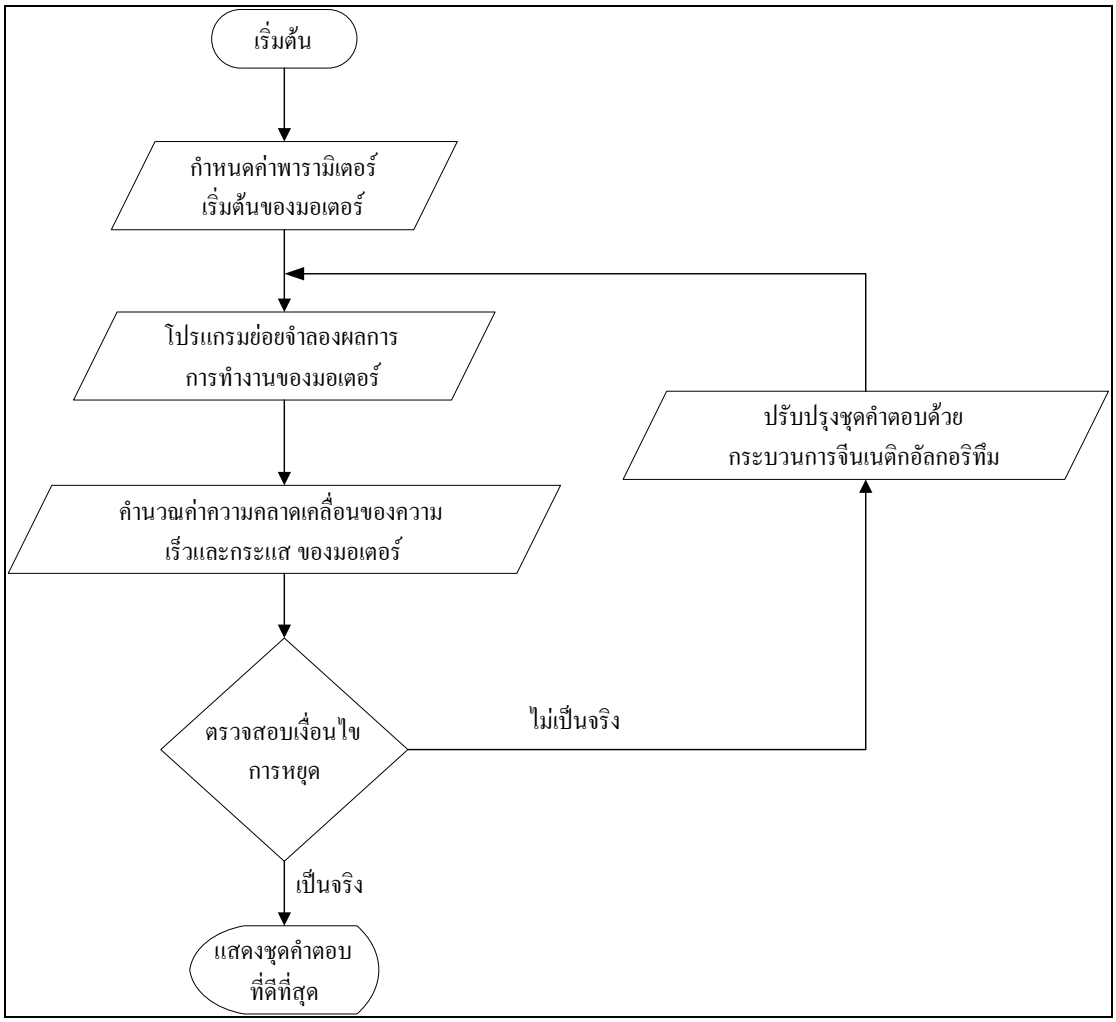
ขั้นตอนที่ 1 เป็นการดึงข้อมูลของกระแสและความเร็วที่ได้จากการทดสอบแสดงในรูปที่ 3.12 และ รูปที่ 3.13 เพื่อเป็นตัวอ้างอิงในการนำผลตอบสนองของกระแสและความเร็วที่ได้จากการจำลองผลด้วยค่าพารามิเตอร์ที่จีนเนติกอัลกอริทึมค้นหามาได้

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดค่าเริ่มต้นให้กับจีนเนติกอัลกอริทึมโดยค่าเริ่มต้นของจีนเนติกอัลกอริทึมที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีทั้งหมด 4 ตัว ได้แก่ จำนวนประชากรเริ่มต้น จำนวนรอบในการทำงานของจีนเนติกอัลกอริทึม จำนวนค่าพารามิเตอร์ที่ทำการค้นหาและร้อยละของการคัดเลือกสายพันธ์

ขั้นตอนที่ 3 ทำการสร้างประชากรเริ่มต้นให้กับกับจีนเนติกอัลกอริทึมจากการสุ่ม

ขั้นตอนที่ 4 เนื่องจากจีนเนติกอัลกอริทึมจะมีการเข้ารหัสและถอดรหัสเพื่อทำการแปลงค่าคำตอบของระบบที่อยู่ในรูปของโครโมโซมที่เรียกว่าจีโนไทพ์ (genotype) เพื่อที่จะนำชุดคำตอบไปทำการประเมินค่าในฟังค์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) จึงต้องมีการถอดรหัสให้อยู่ในรูปของโครโมโซมที่เรียกว่าพีโนไทพ์ (phenotype) ให้เป็นเลขฐานสิบในวิทยานิพนธ์นี้ โครโมโซมรูปแบบจีโนไทพ์จะอยู่ในรูปเลขฐานสอง (binary) ส่วนโครโมโซมที่อยู่รูปของฟีโนไทพ์จะอยู่ในรูปเลขฐานสิบ โดยขอบเขตการค้นหาของค่าพารามิเตอร์ที่นำมาใช้อ้างอิงมาจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีการทดสอบแบบดั้งเดิม ดังรายละเอียดของการหาค่าพารามิเตอร์ที่ได้กล่าวในหัวข้อ 3.3.1

ขั้นตอนที่ 5 เป็นการประเมินค่าพารามิเตอร์ที่ได้ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ สามารถอธิบายกระบวนการคำนวณ ด้วยแผนภาพการทำงานในรูปที่ 3.11 ค่าความคลาดเคลื่อนที่นำมาพิจารณาจะมีอยู่ 2 ค่า ได้แก่ค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วและค่าความคลาดเคลื่อนของกระแส ค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วจะได้จากการพิจารณาค่าผลต่างของความเร็วที่ได้จากการทดสอบกับค่าความเร็วที่ได้จากการคำนวณของพารามิเตอร์แต่ละชุด และค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสจะได้จากการพิจารณาค่าผลต่างของกระแสที่ได้จากการทดสอบกับค่ากระแสที่ได้จากการคำนวณของพารามิเตอร์แต่ละชุด ค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเรียกว่า ค่าการประมาณ (objective value) นำค่าความคลาดเคลื่อนไปคำนวณค่าความเหมาะสมโดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้เลือกใช้วิธีการจัดอันดับ (ranking selection) เพื่อกำหนดค่าความเหมาะสม



รูปที่ 3.11 แผนภาพการทำงานของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ขั้นตอนที่ 6 ทำการคัดเลือกโดยใช้ค่าความเหมาะสมจากขั้นตอนที่ 5 ทำการคัดเลือกโครโมโซมบางกลุ่มเพื่อเป็นต้นกำเนิดของสายพันธ์รุ่นต่อไปโดยวิธีการชักตัวอย่างซึ่งมีอยู่ 2 รูปแบบได้แก่ แบบกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล (stochastic universal sampling : SUS) และแบบการชักตัวอย่างของวงล้อรูเล็ท

ขั้นตอนที่ 7 ทำการสร้างโครโมโซมรุ่นลูกหลานจากโครโมโซมที่ถูกคัดเลือกจากขั้นตอนที่ 6 โดยการปฏิบัติการทางสายพันธุ์ซึ่งประกอบด้วย 2 วิธี คือ การทำครอสโอเวอร์ (crossover) และการทำมิวเทชัน (mutation) รายละเอียดของการทำปฏิบัติการทางสายพันธุ์มีดังนี้ การทำครอสโอเวอร์เป็นวิธีการรวมตัวใหม่ของโครโมโซม (recombination operator) โดยการรวม

ส่วนย่อยระหว่างโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์ตั้งแต่สองโครโมโซมขึ้นไปเพื่อให้กลายเป็นโครโมโซมใหม่ที่มีคุณลักษณะที่ดีเหมือนต้นกำเนิดของสายพันธุ์ การทำครอสโอเวอร์มีหลายแบบ ได้แก่ การทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว (single-point crossover) การทำครอสโอเวอร์แบบสองจุด (double-point crossover) และการทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด (multiple point crossover)

ขั้นตอนที่ 8 ทำการถอดรหัสของโครโมโซมจากค่าในรูปเลขฐานสองให้เป็นค่าในรูปเลขฐานสิบเพื่อนำไปประเมินหาค่าความเหมาะสมในฟังก์ชันวัตถุประสงค์อีกรอบเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 5

ขั้นตอนที่ 9 โครโมโซมลูกหลานที่ได้จากขั้นตอนที่ 7 จะถูกนำมาแทนที่โครโมโซมในกลุ่มประชากรเดิมเพื่อให้ได้โครโมโซมต้นกำเนิดที่มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น โดยจะใช้ค่าความเหมาะสมเป็นตัวตัดสินในการแทนที่

ขั้นตอนที่ 10 เริ่มทำซ้ำขั้นตอนที่ 4 อีกรอบจนกระทั่งได้คำตอบที่ต้องการ

3.4 ผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวและอภิปราย

ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงผลจากวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 3.3 ได้แก่ การประมาณค่าพารามิเตอร์แบบดั้งเดิมและการประมาณค่าด้วยจีนเนติกอัลกอริทึม ซึ่งผลของการประมาณค่าของพารามิเตอร์ของมอเตอร์แต่ละแบบจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไปนี้

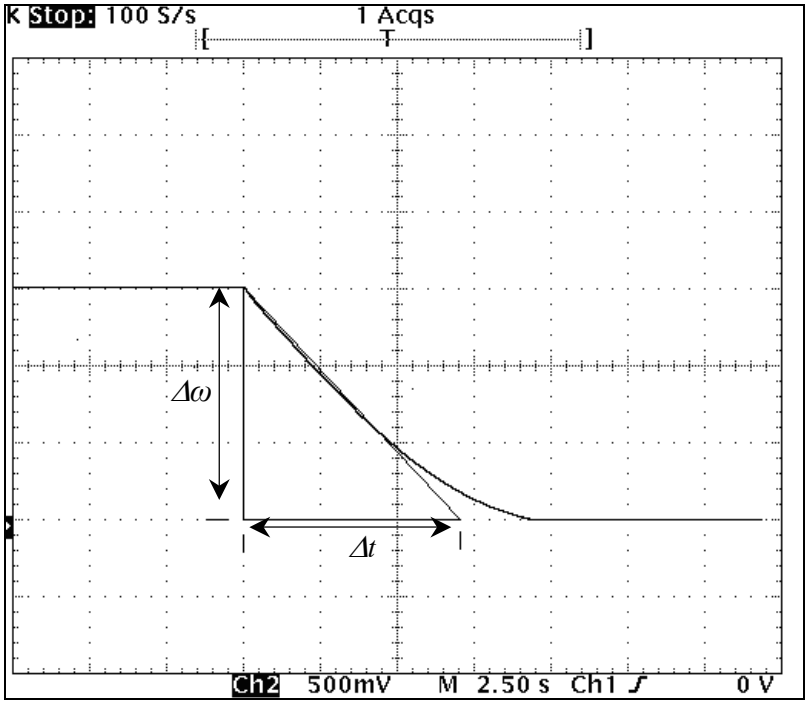
3.4.1 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม

มอเตอร์ที่นำมาทำการทดสอบเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส ค่าแรงดันพิกัด 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ 3.47 แอมแปร์ 260 วัตต์

ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบมอเตอร์เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์แบบแยกเฟส

การทดสอบ	แรงดัน (โวลต์)	กระแส (แอมแปร์)	กำลังงานไฟฟ้า (วัตต์)
กรณีขดลวดช่วยเปิดออก			
สภาวะไร้โหลด	220	2.80	120.6
สภาวะตรึงตัวหมุน	99.6	2.49	194.5
กรณีขดลวดหลักเปิดออก			
สภาวะตรึงตัวหมุน	100.7	3.17	296.5
การทดสอบแบบดีซี			
ค่าความต้านทานของขดลวดหลัก (โอห์ม)	7.3		

ค่าความต้านทานของขดลวดช่วย (โอห์ม)	21.3



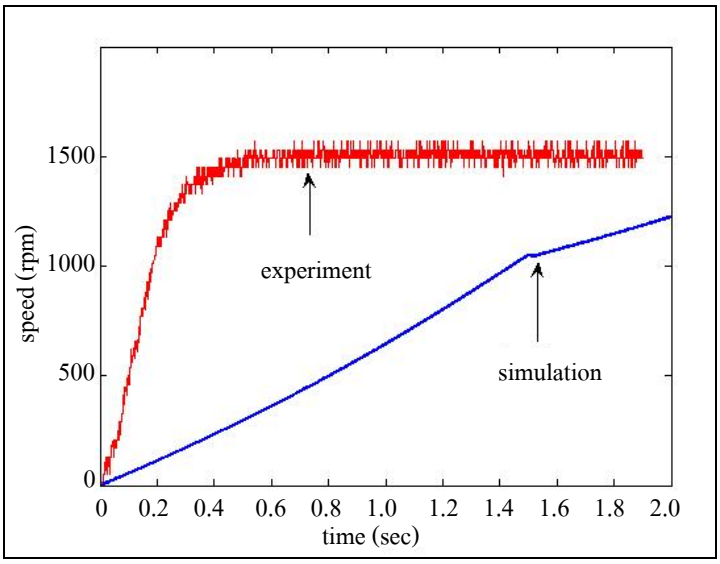
รูปที่ 3.12 ผลการทดสอบการชะลอเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์แบบแยกเฟส

จากผลการทดสอบแบบดีซี การทดสอบที่สภาวะไร้โหลดและตรึงตัวหมุน จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3.2 และผลการทดสอบการชะลอจะได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 3.12 และเมื่อพิจารณาจากสมการที่ (3.33) สามารถค่าความหน่วงเชิงมุมของมอเตอร์ได้ เมื่อค่าผลต่างของความเร็ว (Δ□) มีค่าเท่ากับ 157.08 เรเดียน/วินาที ค่าผลต่างของเวลา (Δt) มีค่าเท่ากับ 7 วินาที ทำให้ค่าความหน่วงมีค่าเท่ากับ 22.58 จากการพิจารณาสมการที่ (3.34) เมื่อค่าแรงบิดของมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 1.761 นิวตัน-เมตร เมื่อค่าแรงบิดของโหลดมีค่าเท่ากับ 0 นิวตัน-เมตร และสมมติให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเท่ากับ 0 นิวตัน-เมตร/เรเดียน/วินาที เนื่องจากไม่สามารถหามวลทดสอบที่ทราบค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่แน่ชัดจะได้ เมื่อทำการคำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยจะได้เท่ากับ 0.0784 กิโลกรัม-เมตร^2 จากการทดสอบแบบดั้งเดิมทั้ง 3 กระบวนการ จะได้ค่าพารา-มิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส ดังแสดงในตารางที่ 3.3

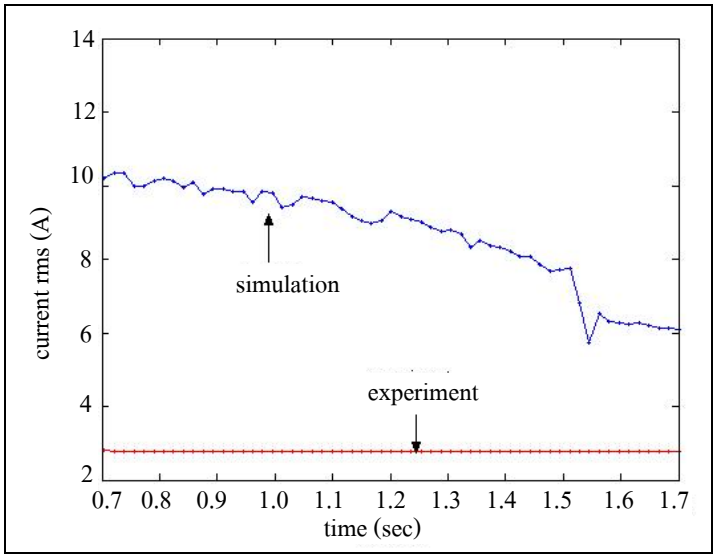
ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส

ประเภทของค่าพารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ที่ทดสอบได้
ค่าความต้านทานของขดลวดหลัก (โอห์ม)	7.3
ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดหลัก (เฮนรี)	0.03776
ค่าความต้านทานของขดลวดช่วย (โอห์ม)	21.3
ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดช่วย (เฮนรี)	0.03243
ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ (โอห์ม)	8.8533
ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดโรเตอร์ (เฮนรี)	0.03776
ค่าความเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (เฮนรี)	0.37716
ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ (กิโลกรัม-เมตร^2)	0.0784
ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (นิวตัน-เมตร/เรเดียน/วินาที)	0

จากค่าพารามิเตอร์ที่ทดสอบได้ดังตารางที่ 3.3 เมื่อจำลองผลตอบสนองทางเวลาของมอเตอร์ด้วยค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 3.3 ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสเพื่อทดสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ ซึ่งพิจารณาการจำลองผลของกระแสและความเร็วของมอเตอร์เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบจริง ในการจำลองผลจะทำการจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB™ ที่ค่าแรงดัน 220 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และ 3.14 จากผลการจำลองผลด้วยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการทดสอบแบบดั้งเดิม พบว่าผลตอบสนองทางเวลาจากการจำลองผลของความเร็วและกระแส มีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ทดสอบเนื่องจากการทดสอบการชะลอไม่มีมวลทดสอบที่ทราบค่าโมเนนต์ความเฉื่อยอย่างแน่ชัดและการทดสอบความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ จากเหตุผลดังกล่าว ผู้ทำวิจัยจึงได้ใช้จีนเนติกอัลกอริทึมปรับค่าพารามิเตอร์ทางกล ได้แก่ โมเมนต์ความเฉื่อยและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน เพื่อให้ได้ผลตอบสนองทางเวลาของความเร็วและกระแสที่ได้จากการทดสอบดังในรูปที่ 3.13 และ 3.14 ตามลำดับให้มีค่าใกล้เคียงกับผลจากการจำลองผลให้มากที่สุด ซึ่งผลของการปรับค่าพารามิเตอร์ทางกลด้วยวิธีจีนเนติกอัลกอริทึมจะได้กล่าวในหัวข้อที่ 3.4.2 ต่อไป



รูปที่ 3.13 ความเร็วมอเตอร์จากทดสอบและจำลองผล



รูปที่ 3.14 กระแสอาร์เอ็มเอสของมอเตอร์จากทดสอบและจำลองผล

3.4.2 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีจีนเนติกอัลกอริทึม

จากการอธิบายขั้นตอนการทำงานของจีนเนติกอัลกอริทึมในหัวข้อที่ 3.3.2 มีกลุ่มของตัวแปรของจีนเนติกอัลกอริทึมสำหรับการค้นหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในงานวิจัยนี้ ซึ่งผล

ของการทดสอบค่าตัวแปรต่าง ๆ มีดังนี้ ค่าตัวแปรของจีนเนติกอัลกอริทึม เพื่อใช้ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเฟสเดียวต่อไปดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าตัวแปรของจีนเนติกอัลกอริทึม

ตัวแปรของจีนเนติกอัลกอริทึมที่ใช้ในการค้นหาพารามิเตอร์	ค่าของตัวแปรจีนเนติกอัลกอริทึม
จำนวนประชากรเริ่มต้น	100
วิธีการคัดเลือกสายพันธ์	กระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล (SUS)
วิธีการทำครอสโอเวอร์	การครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว
ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธ์	0.7
ร้อยละของการทำครอสโอเวอร์	0.6

จากค่าตัวแปรของจีนเนติกอัลกอริทึมในตารางที่ 3.4 จะถูกกำหนดให้เป็นค่าตัวแปรตั้งต้นของจีนเนติกอัลกอริทึม เพื่อค้นหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมอเตอร์ การทดสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ที่ทำการค้นหาจะทำโดยการป้อนค่าแรงดันอินพุตต่าง ๆ ให้กับมอเตอร์เพื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของผลตอบสนองทางเวลาของกระแส และความเร็ว ดังแสดงในสมการที่ (3.36) และผลการลดลงของค่าความคลาดเคลื่อนซึ่งถือว่าเป็นการลู่เข้าหาชุดคำตอบที่ดีที่สุดนั้นได้แสดงในรูปที่ 3.15

$$err_sum = err_speed + err_current \tag{3.36}$$

เมื่อ $$err_speed = \sum\left(\left| \frac{(speed - speed_app)}{\max|speed|} \right|^2 \right)$$

$$err_current = \sum\left(\left| \frac{(current - current_app)}{\max|current|} \right|^2 \right)$$

โดยที่ *err_sum* คือ ค่าความคลาดเคลื่อนโดยรวม

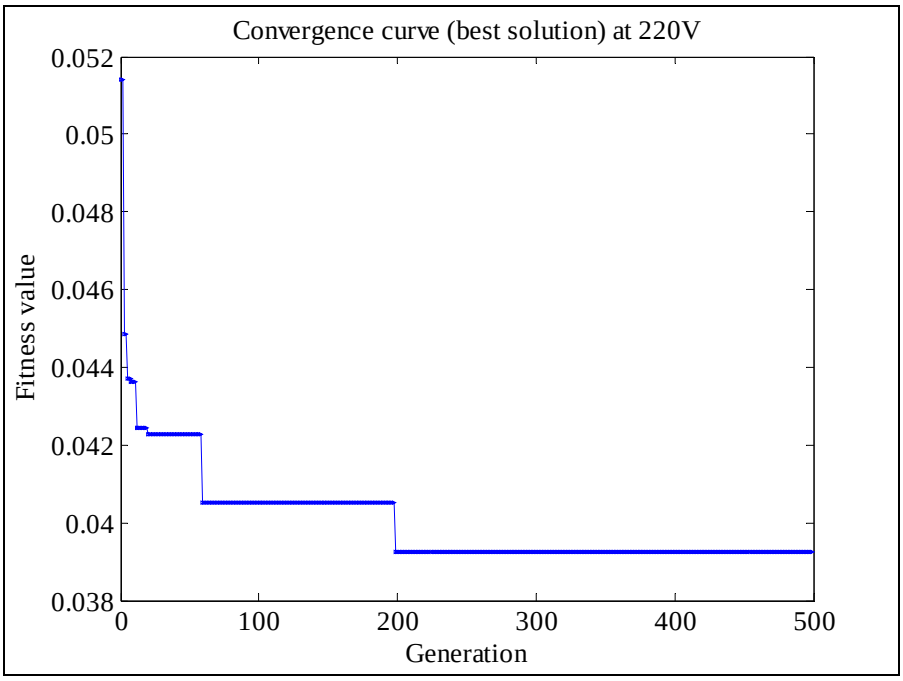
err_speed คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็ว

err_current คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแส

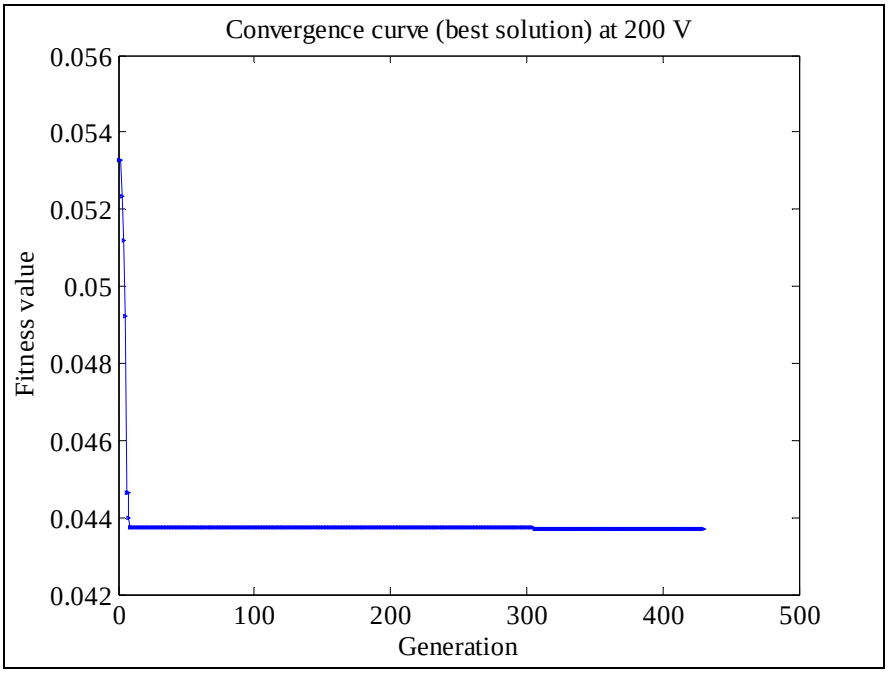
speed_app คือ ผลตอบสนองทางเวลาของความเร็วของมอเตอร์

current_app คือ ผลตอบสนองทางเวลาของกระแสอินพุตของมอเตอร์

speed, current คือ ผลตอบสนองทางเวลาของความเร็วของมอเตอร์ กระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ ที่ได้จากการทดสอบจริง ตามลำดับ

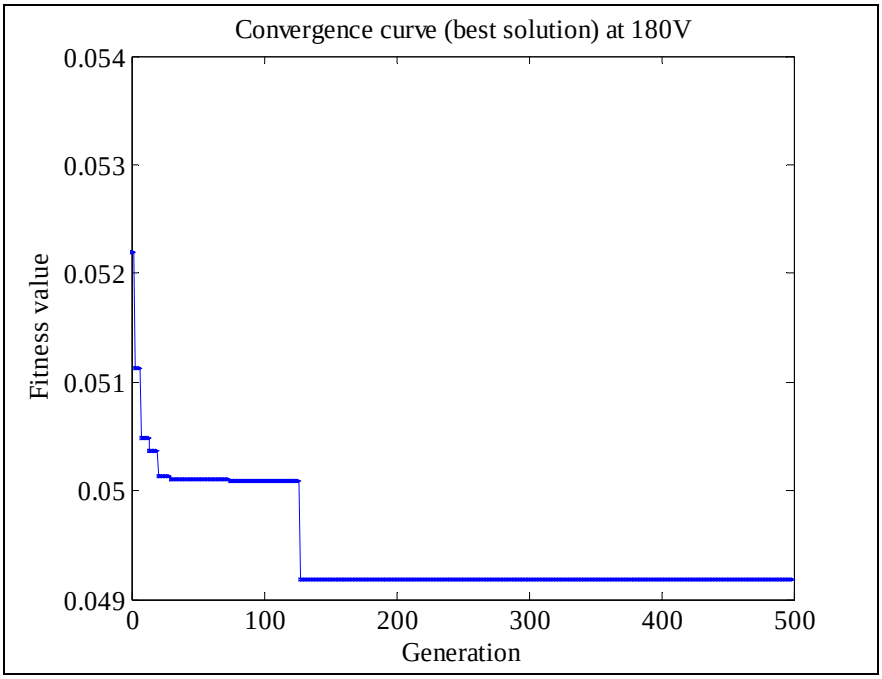


ก) ที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 220 โวลต์

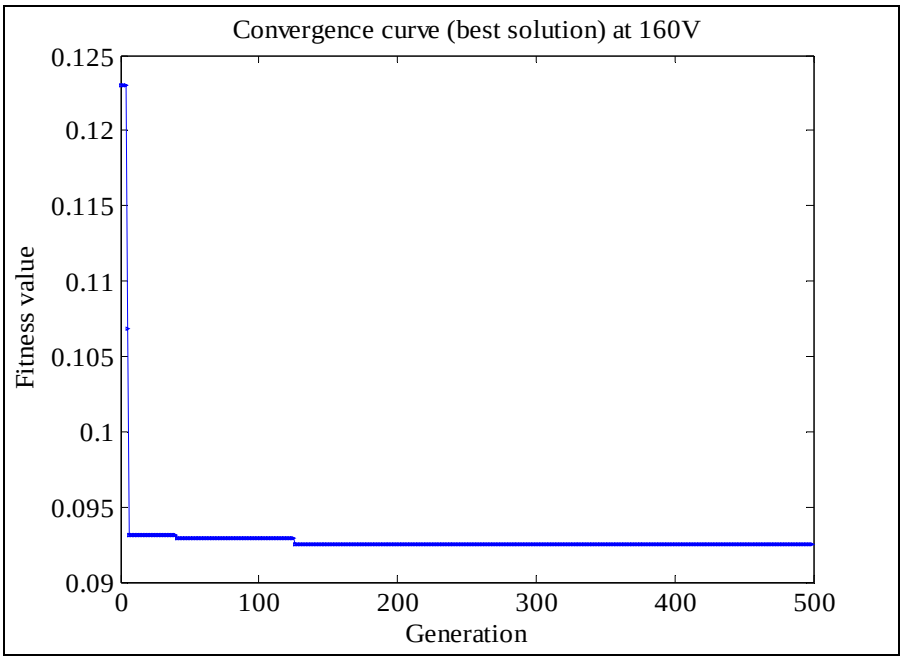


ข) ที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 200 โวลต์

รูปที่ 3.15 ผลการลู่เข้าของค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อทดสอบที่อินพุตต่าง ๆ

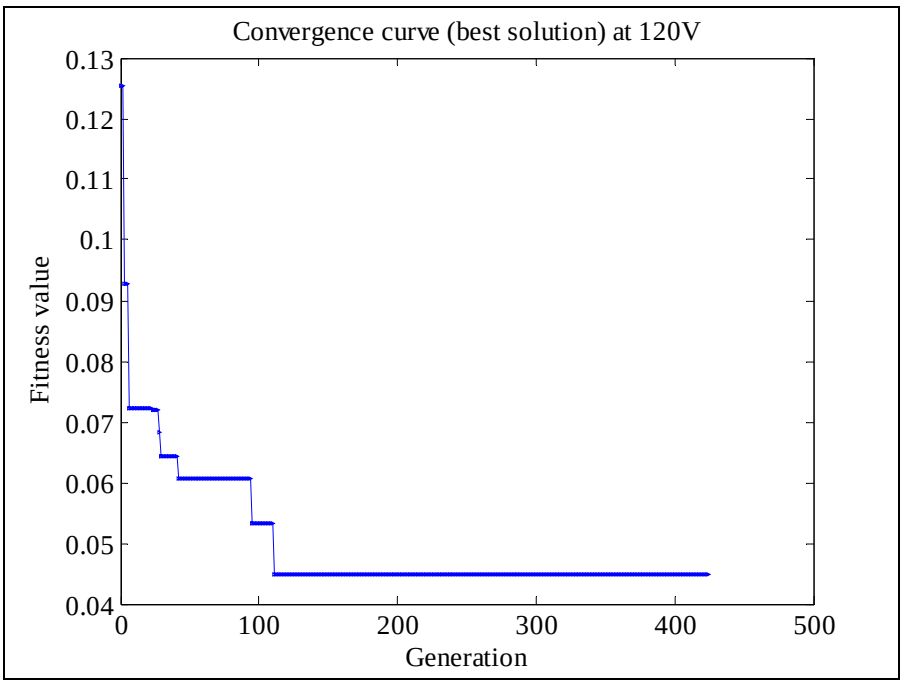


ค) ที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 180 โวลต์



ง) ที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 160 โวลต์

รูปที่ 3.15 ผลการลู่เข้าของค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อทดสอบที่อินพุตต่าง ๆ (ต่อ)



จ) ที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 120 โวลต์

รูปที่ 3.15 ผลการลู่เข้าของค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อทดสอบที่อินพุตต่าง ๆ (ต่อ)

โดยผลของการค้นหาพารามิเตอร์จากการป้อนแรงดันอินพุตที่มีค่าเท่ากับ 80 โวลต์ ถึง 220 โวลต์ ได้แสดงในตารางที่ 3.5 ซึ่งค่าของพารามิเตอร์ที่ได้จากค่าแรงดันที่ต่างกันจะมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดของมอเตอร์จะมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายในของขดลวด (IEEE Std 114™-2001) ส่วนค่าโมเมนต์ความเฉื่อยและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อช่วงเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของมอเตอร์ จะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันที่อินพุต เนื่องจากการไม่คงที่ของค่าพารามิเตอร์ซึ่งจะส่งผลต่อค่ากำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นมอเตอร์อย่างมาก ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ความเป็นเชิงเส้นของค่าพารามิเตอร์ในรูปของสมการแรงดันอินพุตจากค่าพารามิเตอร์ที่ค่าแรงดันต่าง ๆ ในตารางที่ 3.5 เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันอินพุตกับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เมื่อใช้ความสัมพันธ์ของสมการพหุนามแบบสมการเส้นตรงและแบบเสมือนพหุนามกำลังสาม (cubic spline) เพื่อทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ค่าแรงดันอินพุตอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากค่าแรงดันทดสอบ ในกรณีการประมาณค่าด้วยสมการเส้นตรงจะได้สมการ

เส้นตรงของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่อยู่ในรูปของแรงดันอินพุต ดังสมการที่ (3.37) ถึงสมการที่ (3.45)

ตารางที่ 3.5 ตารางค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ค่าอินพุตต่าง ๆ

พารามิเตอร์	แรงดัน (V)							
	220	200	180	160	140	120	100	80
r_{qs}	5.5219	6.0995	6.2126	6.7585	6.2702	7.4503	8.3138	9.5092
r_r	11.94	8.3755	7.4612	6.1975	7.1434	5.6556	5.696	5.2883
r_{ds}	26.937	24.595	36.18	36.626	36.305	45.809	54.573	41.57
$L_{lqs} \times 10^{-3}$	30.599	37.003	28.312	26.74	36.223	32.499	21.27	15.35
$L_{lr} \times 10^{-3}$	48.808	24.528	24.079	20.242	18.638	15.448	36.982	25.982
$L_{lds} \times 10^{-3}$	41.793	25.479	51.837	41.68	49.867	31.344	44.858	48.889
$L_{mqs} \times 10^{-3}$	378.62	402.43	447.92	500.4	517.75	552.69	532.85	572.89
$J_m \times 10^{-3}$	8.788	9.47	7.856	7.596	7.098	5.996	4.17	5.966
$B_m \times 10^{-3}$	0.552	0.395	0.642	1.736	0.535	0.459	0.799	0.27

$$r_{qs} = -0.02512 \times V + 10.78552 \tag{3.37}$$

$$r_r = 0.038351 \times V + 1.466982 \tag{3.38}$$

$$r_{ds} = -0.16719 \times V + 62.90357 \tag{3.39}$$

$$L_{lqs} = 9.72 \times 10^{-5} \times V + 0.013913 \tag{3.40}$$

$$L_{lr} = 7.44 \times 10^{-5} \times V + 0.015677 \tag{3.41}$$

$$L_{lds} = -5.55 \times 10^{-5} \times V + 0.050297 \tag{3.42}$$

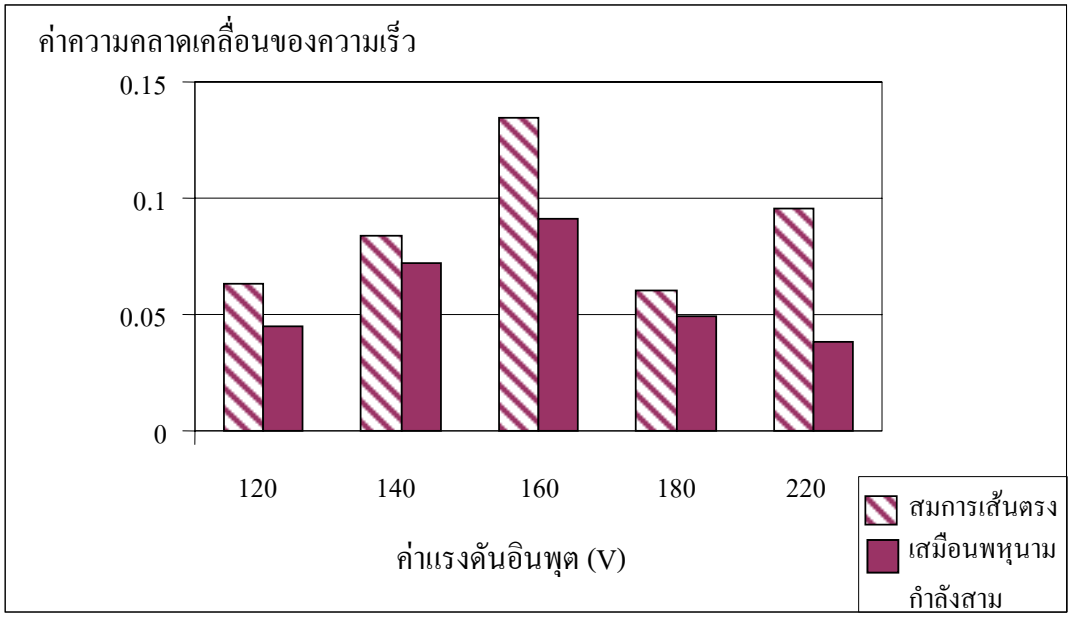
$$L_{mqs} = -0.0014 \times V + 0.697448 \tag{3.43}$$

$$J_m = 3.11\times10^{-5}\times V + 0.002445 \tag{3.44}$$

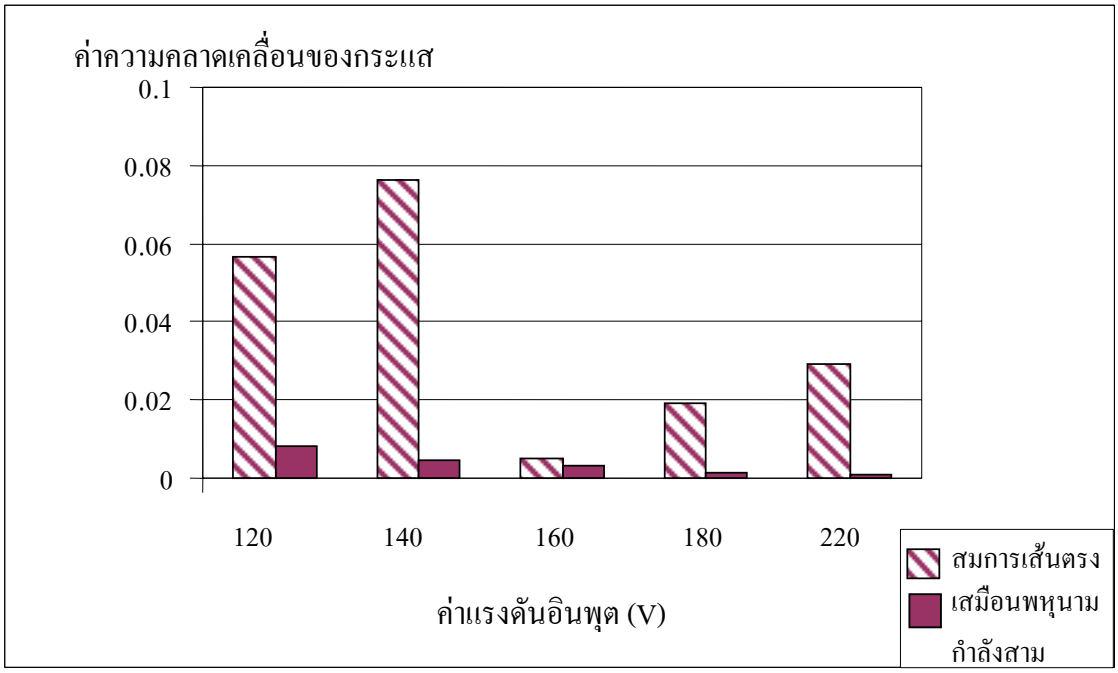
$$B_m = 1.01\times10^{-6}\times V + 0.000522 \tag{3.45}$$

โดยที่ V คือ ค่าแรงดันอินพุตที่สเตเตอร์

เนื่องจากการประมาณค่าแบบเสมือนพหุนามกำลังสามให้ผลเป็นชุดของสัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์จำนวนมาก ดังนั้นจึงไม่สามารถแสดงรายละเอียดของค่าสัมประสิทธิ์เหล่านั้นได้ เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณค่าด้วยสมการเส้นตรง และการประมาณค่าแบบเสมือนพหุนามกำลังสามที่คำนวณผ่านโปรแกรม MATLAB™ จากข้อมูลในภาคผนวก ง.พิจารณาความคลาดเคลื่อนของผลตอบสนองทางเวลาของความเร็วมอเตอร์ และค่ากระแสของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลจากการจำลองผล ดังแสดงในรูปที่ 3.16 และรูปที่ 3.17 ตามลำดับ



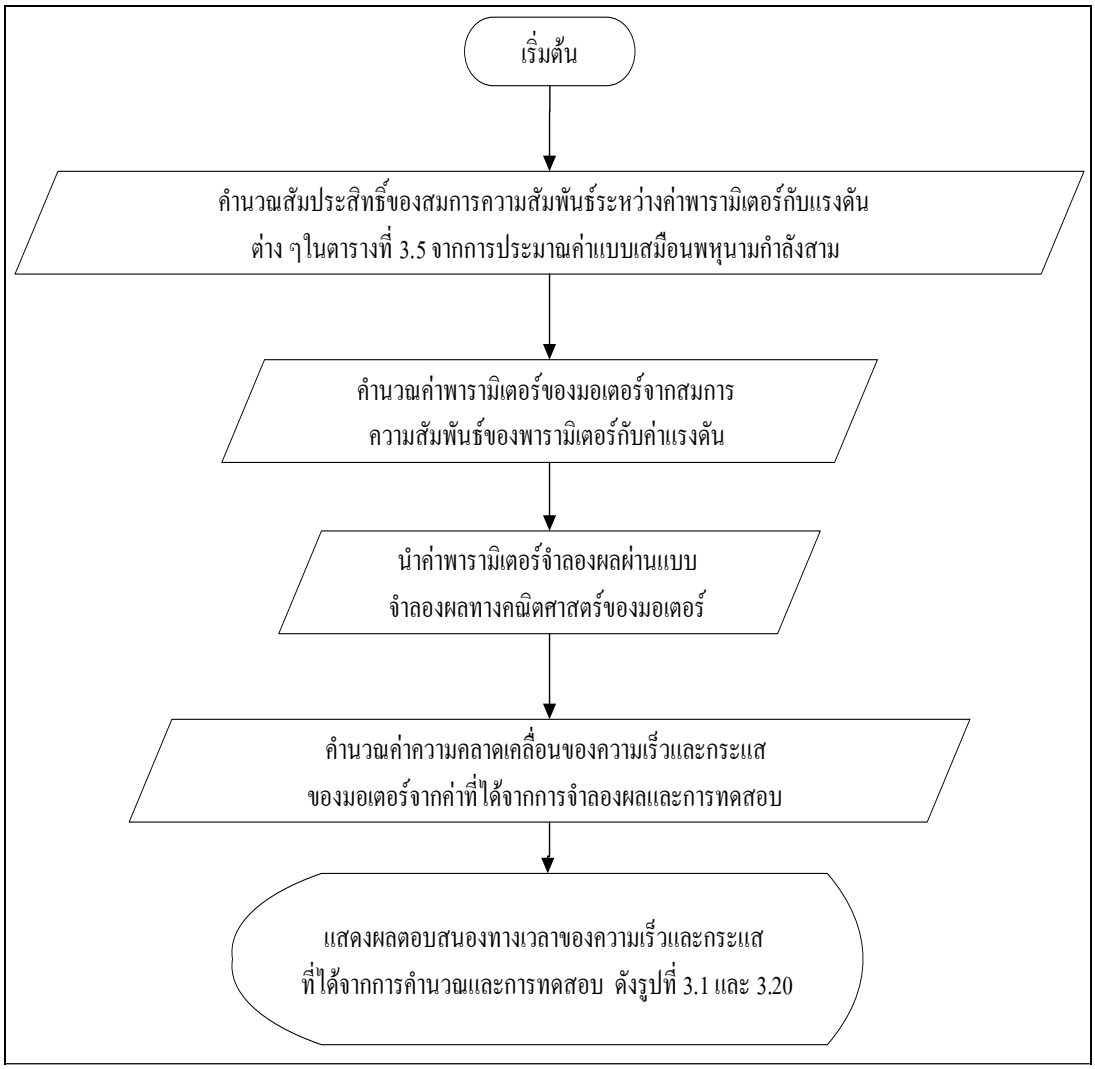
รูปที่ 3.16 ค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่ได้จากการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยสมการเส้นตรงและแบบเสมือนพหุนามกำลังสาม



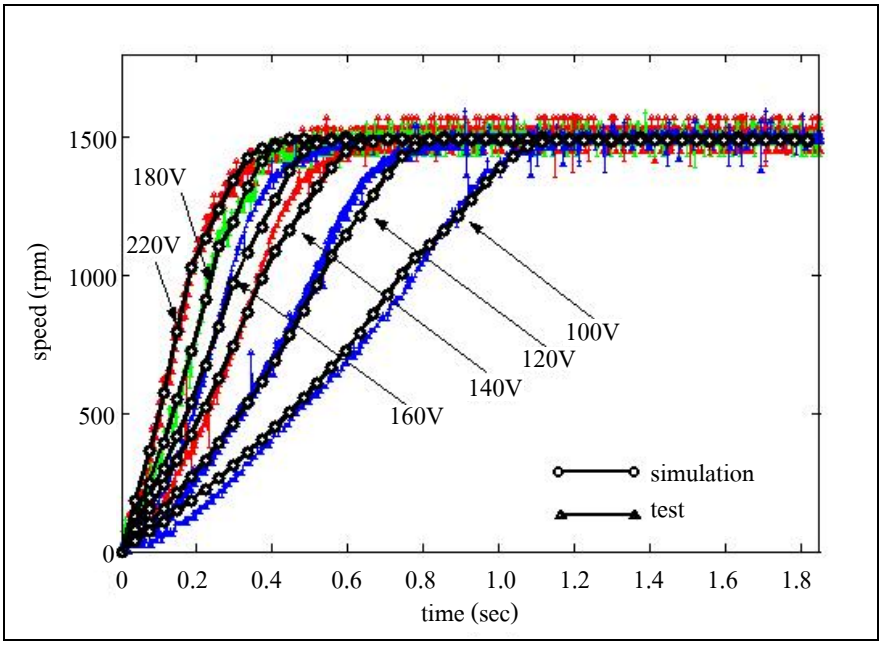
รูปที่ 3.17 ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสที่ได้จากการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยสมการเส้นตรงและแบบเสมือนพหุนามกำลังสาม

จากรูปที่ 3.16 และ รูปที่ 3.17 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบเสมือนพหุนามกำลังสามจะให้ค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วและกระแสที่น้อยกว่าการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยสมการเส้นตรง ดังนั้นการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสที่ค่าแรงดันต่าง ๆ จะใช้จากการประมาณค่าแบบเสมือนพหุนามกำลังสาม ในรูปที่ 3.18 ได้แสดงขั้นตอนของการคำนวณค่าพารามิเตอร์จากการประมาณค่าแบบเสมือนพหุนามกำลังสามที่ค่าแรงดันอินพุตต่าง ๆ เพื่อพิจารณาผลตอบสนองทางเวลาของความเร็วและกระแสที่ได้จากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ จากรูปที่ 3.19 ได้แสดงผลตอบสองทางเวลาของความเร็วมอเตอร์ในช่วงเวลาที่เริ่มสตาร์ทจนถึงช่วงคงตัวที่ได้จากการทดสอบ (experiment) กับผลที่ได้จากการจำลองผล (simulation) ผลจากค่าพารามิเตอร์ที่ย่านแรงดัน

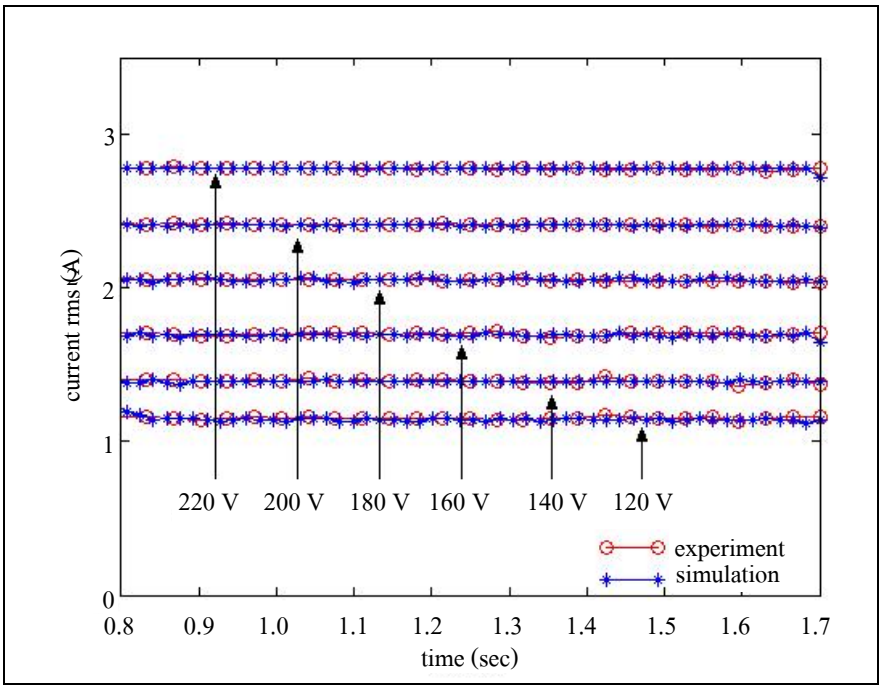
อินพุตต่าง ๆ พบว่าค่าความเร็วที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการจำลองผล จากรูปที่ 3.20 ได้แสดงผลกระแสอาร์เอ็มเอสที่เข้ามอเตอร์ที่ย่านแรงดันอินพุตต่าง ๆ พบว่าค่ากระแสที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการจำลองผล



รูปที่ 3.18 แผนภาพการทำงานเพื่อแสดงผลตอบสนองทางเวลาของกระแสและความเร็ว



รูปที่ 3.19 ผลตอบสนองทางเวลาของความเร็วมอเตอร์ที่ค่าแรงดันต่าง ๆ เทียบกับค่าทดสอบ



รูปที่ 3.20 ผลตอบสนองทางเวลาของกระแสมอเตอร์ที่ค่าแรงดันต่าง ๆ เทียบกับค่าทดสอบ

3.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสโดยแบบจำลองดังกล่าวได้พัฒนามาจากแบบจำลองทางพลวัตในรูปสมการอนุพันธ์ของโครงสร้างและสมการการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ ในการจำลองผลด้วยกลุ่มของค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบแบบดั้งเดิมและค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการจีนเนติกอัลกอริทึม พบว่าผลตอบสนองทางเวลาของกระแสและความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จากการจำลองผลผ่านกลุ่มพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการจีนเนติกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบและครอบคลุมในช่วงค่าแรงดันอินพุตต่าง ๆ เมื่อหาค่าความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวกับค่าแรงดันอินพุต พบว่าการประมาณค่าแบบเสมือนพหุนามกำลังสามมีค่าคลาดเคลื่อนน้อยกว่าการประมาณค่าจากสมการเส้นตรง จากวิธีการดังกล่าวทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์กับค่าแรงดันอินพุตของมอเตอร์

บทที่ 4
ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

4.1 บทนำ

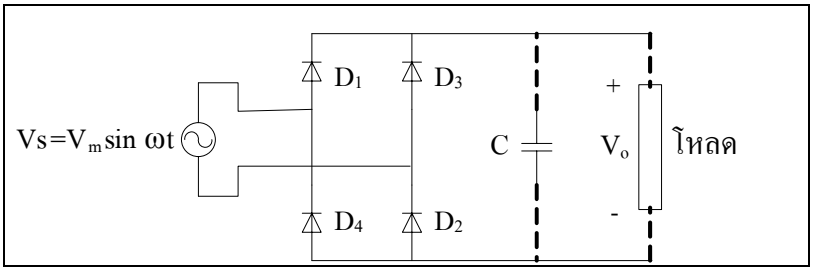
ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว จะมีส่วนประกอบหลักเหมือนกับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งความแตกต่างจะอยู่ที่จำนวนของอุปกรณ์ที่ติดตั้งในระบบ โดยมีส่วนประกอบหลักจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ วงจรเรียงกระแส (rectifier circuit) วงจรอินเวอร์เตอร์ (inverter circuit) ซึ่งแต่ละส่วนจะมีหน้าที่ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ วงจรเรียงกระแสทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง และวงจรอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระสลับ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์จะใช้มอสเฟสกำลัง (MOSFET) เนื่องจากมีความถี่สวิตชิงสูงและราคาถูก ด้วยเหตุผลดังกล่าวในบทนี้จึงได้นำเสนอ วิธีการออกแบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว และหลักการทำงานของวงจรต่าง ๆ

4.2 วงจรเรียงกระแสเฟสเดียว

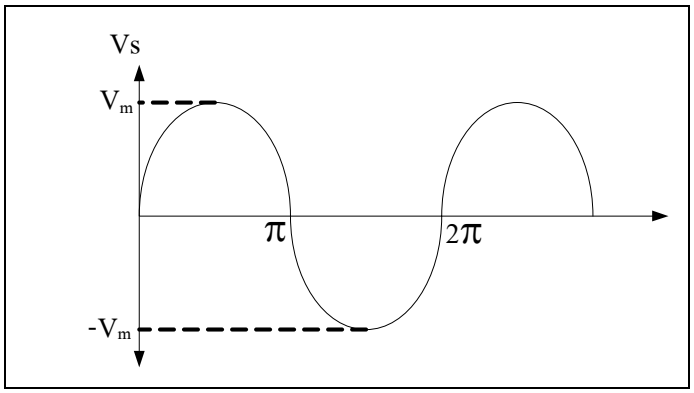
วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวทำหน้าแปลงไฟฟ้ากระสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ใช้วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (full wave rectifier) ดังแสดงในรูปที่ 4.1

4.2.1 หลักการทำงานของวงจรเรียงกระแสเฟสเดียว

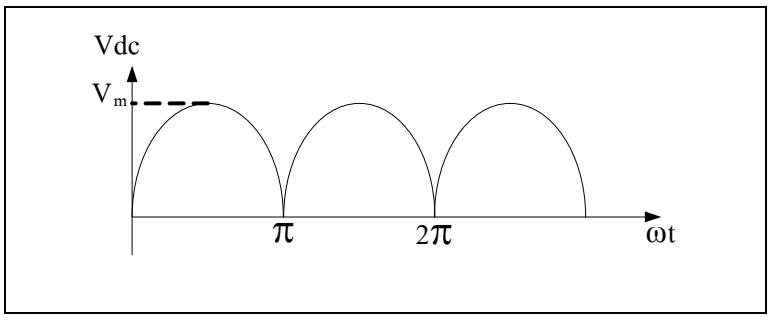
จากรูปวงจรที่ 4.1 วงจรเรียงกระแสจะประกอบด้วยไดโอดทั้งหมด 4 ตัว ในการทำงานจะนำกระแสเป็นคู่สลับกัน ได้แก่ ไดโอดตัวที่ 1 (D_1) กับไดโอดตัวที่ 2 (D_2) ทำงานคู่กัน และไดโอดตัวที่ 3 (D_3) กับไดโอดตัวที่ 4 (D_4) ทำงานคู่กัน เมื่อพิจารณาแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ (Vs) ซึ่งมีแรงดันค่ายอดของแรงดันอินพุตเท่ากับ $+V_m$ และ $-V_m$ ดังรูปที่ 4.2 เมื่อพิจารณาการนำกระแสของ ไดโอดตัวที่ 1 และไดโอดตัวที่ 2 และการนำกระแสของไดโอดตัวที่ 3 และไดโอดตัวที่ 4 จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส (V_{dc}) ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.1 วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวแบบเต็มคลื่น



รูปที่ 4.2 สัญญาณจากแหล่งจ่ายอินพุต



รูปที่ 4.3 สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

จากแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 สามารถคำนวณค่าองค์ประกอบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตได้ ตามสมการที่แสดงด้านล่างนี้

$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi}\int_{0}^{\pi}\left[V_m \sin(\omega t)\right] d(\omega t) = \frac{2V_m}{\pi} \tag{4.1}$$

เมื่อแรงดันอินพุตที่เข้าวงจรเรียงกระแสมีค่าเท่ากับ 220 โวลต์ สามารถคำนวณค่ายอดของรูปสัญญาณแรงดันได้ ตามสมการต่อไปนี้

$$V_m = \sqrt{2} \times 220 = 311.13 \text{ โวลต์} \tag{4.2}$$

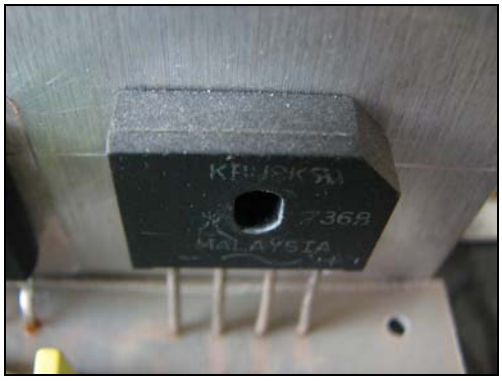
เมื่อนำค่ายอดของรูปสัญญาณจากสมการที่ (4.2) แทนในสมการที่ (4.1) สามารถนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตได้ดังนี้

$$V_{dc} = \frac{2 \times 311.13}{\pi} = 198.07 \text{ โวลต์}$$

4.2.2 วิธีการออกแบบ

1) การหาคำนวณหาค่าพิกัดของวงจรเรียงกระแส

ในการออกแบบวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวแบบเต็มคลื่น จะคำนึงถึงค่าพิกัดแรงดันและค่ากระแสของโหลดเป็นสำคัญ สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โหลดคือมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเฟสเดียวแบบแยกเฟส พิกัดแรงดันมีค่าเท่ากับ 220 โวลต์ พิกัดกระแสมีค่าเท่ากับ 3.47 แอมแปร์ การออกแบบจะพิจารณาค่าตัวประกอบนิรภัย (safety factor) เท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ เพราะฉะนั้นวงจรเรียงกระแสจะมีค่าพิกัดกระแสมากกว่า 3.47 + (0.25×3.47) = 4.3375 แอมแปร์ และค่าพิกัดแรงดันมากกว่า 220 + (0.25×220) = 275 โวลต์ จากการออกแบบดังกล่าว วงจรเรียงกระแสที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้วงจรเรียงกระแสชนิด Bridge Rectifier รหัส KBU8K ที่มีค่าพิกัดเท่ากับ 8 แอมแปร์ 1000 โวลต์ ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 วงจรเรียงกระแส

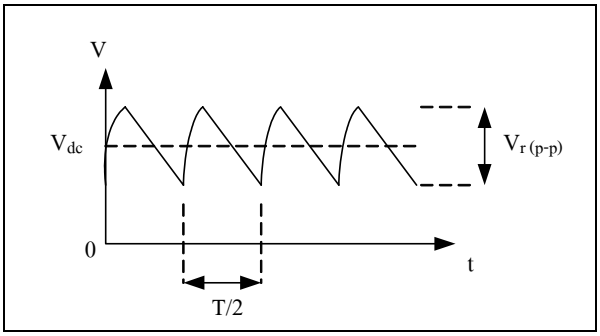
2) การคำนวณขนาดของตัวเก็บประจุ

สำหรับรูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสมีลักษณะดังรูปที่ 4.3 ซึ่งค่าแรงดันระลอก (ripple voltage) จะมีค่าสูง งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงทำการออกแบบตัวกรองความถี่ด้วยตัวเก็บประจุ เพื่อให้ได้ค่าตัวประกอบความระลอก (ripple factor) เท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่าแรงดันระลอกคำนวณได้ตามสมการที่ (4.3)

$$V_{r(rms)} = \frac{V_{r(p-p)} / 2}{\sqrt{2}} \tag{4.3}$$

โดยที่ $V_{r(rms)}$ คือ ค่าแรงดันระลอกอาร์เอมเอส

$V_{r(p-p)}$ คือ ค่าแรงดันระลอกยอดถึงยอด



รูปที่ 4.5 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ยังไม่ผ่านการปรับเรียบ

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.5 ค่าตัวประกอบความระลอกจะถูกกำหนดตาม สมการที่ (4.4)

$$r = \frac{V_{r(rms)}}{V_{dc}} \tag{4.4}$$

โดยที่ r คือ ค่าตัวประกอบความระลอก

เมื่อพิจารณาสมการการไหลของกระแสผ่านตัวเก็บประจุ ตามสมการที่ (4.5)

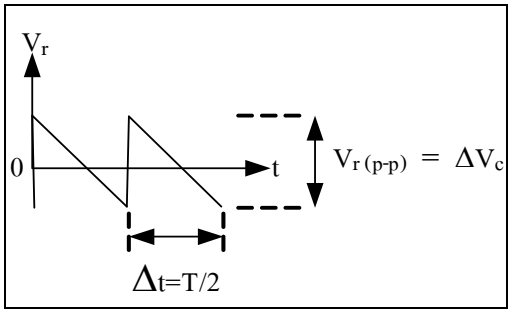
$$i_c = C\frac{dV_c}{dt} \tag{4.5}$$

โดยที่ i_c คือ ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

V_c คือ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุ

เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะทำการประมาณรูปสัญญาณแรงดันระลอกให้อยู่ในรูปของสามเหลี่ยม ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผลการประมาณรูปสัญญาณแรงดันระลอก

ผลจากการประมาณรูปสัญญาณแรงดันระลอกดังรูปที่ 4.6 ทำให้สามารถประมาณค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในสมการที่ 4.5 สามารถเขียนสมการใหม่เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ ดังสมการที่ (4.6)

$$i_c \approx C\frac{\Delta V_c}{\Delta t} \tag{4.6}$$

จากสมการที่ 4.6 กระแสที่ไหลออกผ่านตัวเก็บประจุ คือ ค่ากระแสเอาต์พุต (I_{dc}) ที่ออกจากวงจรเรียงกระแส ดังนั้นสมการที่ (4.6) จะเปลี่ยนเป็นสมการที่ (4.7)

$$I_{dc} = C\frac{V_{r(p-p)}}{T/2} \tag{4.7}$$

จาก $f = \frac{1}{T}$ จะได้

$$V_{r(p-p)} = \frac{I_{dc}}{2fC} \tag{4.8}$$

โดยที่ f คือ ค่าความถี่ของแรงดันอินพุตของวงจรเรียงกระแส

ในงานวิทยานิพนธ์ได้กำหนดค่าตัวประกอบระลอกของแรงดันเอาต์พุตที่ออกจากวงจรเรียงกระแสมีค่าเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจากสมการที่ (4.4) จะได้

$$0.02 = \frac{V_{r(rms)}}{198.07}$$

ดังนั้น $V_{r(rms)} = 0.02 \times 198.07 = 3.7614$ โวลต์

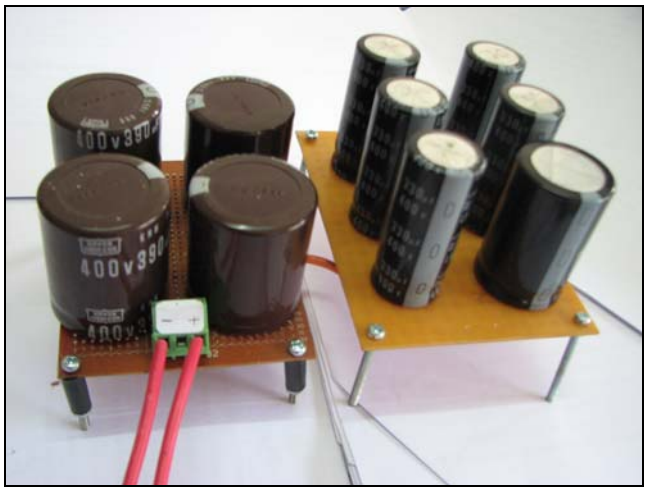
เมื่อแทนค่า $V_{r(rms)}$ ในสมการที่ (4.3) จะได้

$$V_{r(p-p)} = 3.7614 \times 2 \times \sqrt{2} = 10.6388 \text{ โวลต์}$$

จากสมการที่ (4.7) เมื่อแทนค่า $V_{r(rms)}$ เท่ากับ 3.7614 โวลต์ และค่า I_{dc} เท่ากับ 4.3375 แอมแปร์ จะได้ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ

$$C = \frac{4.3375}{50 \times 2 \times 10.6388} = 4.0770 \text{ มิลลิฟารัด} = 4477.0 \text{ ไมโครฟารัด}$$

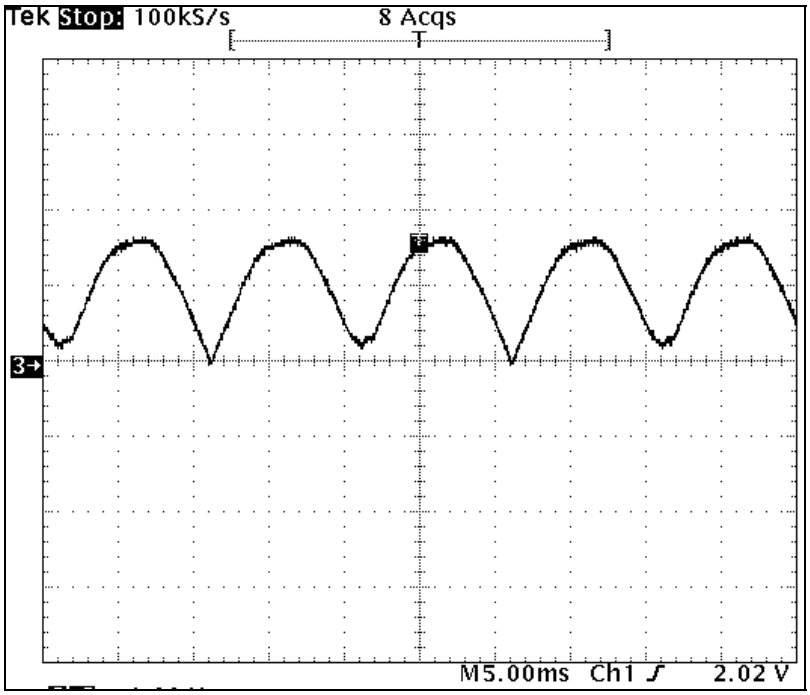
จากการออกแบบข้างต้นค่าพิกัดของตัวเก็บประจุที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีค่าเท่ากับ 4680 ไมโครฟารัด พิกัด 400 โวลต์ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ตัวเก็บประจุขนาดย่อย ๆ ต่ออนุกรมกันเพื่อให้ได้ค่าเก็บตัวประจุตามที่ออกแบบ ดังรูปที่ 4.7



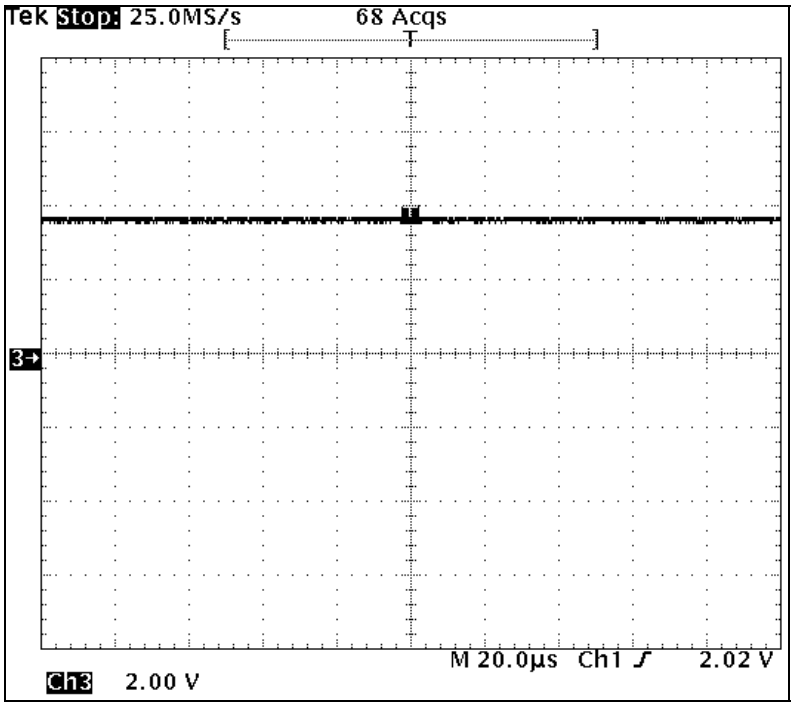
รูปที่ 4.7 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรเรียงกระแส

4.2.3 ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแส

การทดสอบวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นด้วยการจ่ายแรงดันอินพุตเท่ากับ 220 โวลต์ เพื่อต่อเข้ากับโหลดมอเตอร์ขนาด 260 วัตต์ 3.47 แอมแปร์ โดยการทดสอบจะทำการวัดสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ออกจากวงจรเรียงกระแสจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่ยังไม่มีการต่อตัวเก็บประจุเพื่อปรับเรียบและขั้นตอนที่ได้ต่อตัวเก็บประจุ เพื่อทำการเปรียบเทียบผลของทั้ง 2 ขั้นตอนว่าค่าแรงดันระลอกของสัญญาณแรงดันได้ลดลงตามที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ ในกรณีที่ไม่ได้ต่อตัวเก็บประจุจะได้ผลดังรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าค่ารูปสัญญาณของแรงดันเอาต์พุตมีค่าความระลอกสูง เมื่อทำการต่อตัวเก็บประจุเข้าที่เอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสจะได้ผลดังรูปที่ 4.9 ซึ่งทำให้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ออกจากวงจรเรียงกระแสมีค่าแรงดันระลอกต่ำ



รูปที่ 4.8 รูปสัญญาณเอาต์พุตแบบเต็มคลื่นในกรณีไม่ได้ต่อตัวเก็บประจุ



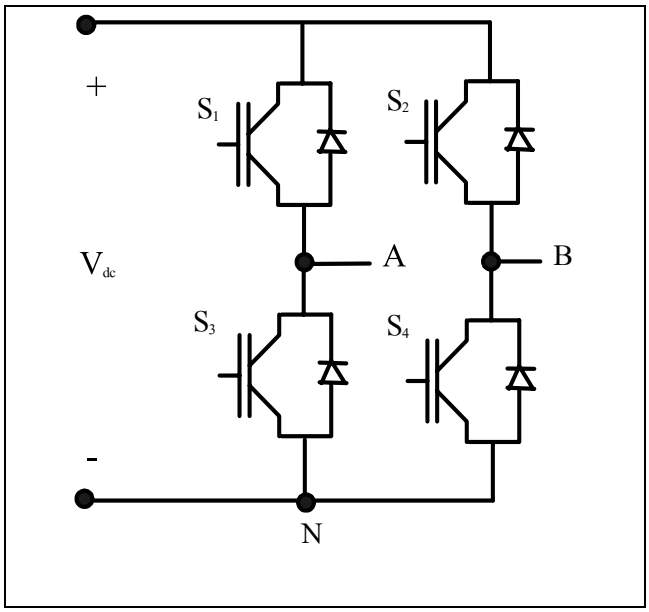
รูปที่ 4.9 รูปสัญญาณเอาต์พุตแบบเต็มคลื่นในกรณีต่อตัวเก็บประจุ

4.3 วงจรอินเวอร์เตอร์

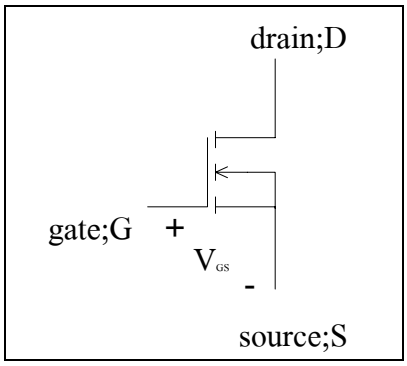
วงจรอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกสามารถควบคุมได้ทั้งขนาดและความถี่ ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (voltage source inverter)

4.3.1 หลักการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 4.10 เป็นวงจรแปลผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยประกอบด้วยมอสเฟสกำลัง 4 ตัว ทำหน้าที่เป็นสวิตช์เพื่อทำให้เกิดแรงดันกระแสสลับจ่ายไปยังโหลด โดยมอสเฟสตัวที่ 1 (S_1) จะทำงานควบคู่กับมอสเฟสตัวที่ 4 (S_4) และมอสเฟสตัวที่ 2 (S_2) จะทำงานควบคู่กับมอสเฟสตัวที่ 3 (S_3) การทำงานและหยุดทำงานของมอสเฟสในวงจรอินเวอร์เตอร์จะเกิดจากการป้องค่าแรงดันไฟฟ้า (V_{GS}) ระหว่างขาเกต (gate) กับขาซอส (source) ของมอสเฟสดังแสดงในรูปที่ 4.11

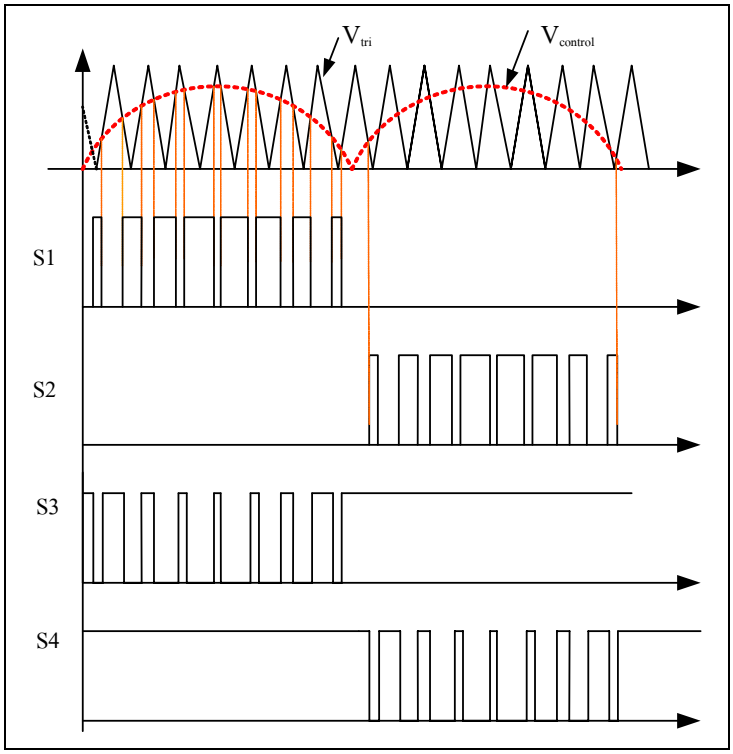


รูปที่ 4.10 วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน



รูปที่ 4.11 สัญลักษณ์ของมอสเฟสกำลัง

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอสเฟสกำลังจะอยู่ในลักษณะของพัลส์ (pulse) ซึ่งเกิดจากการเปรียบเทียบของค่าสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (Vtri) กับสัญญาณเส้นโค้ง (Vcontrol) เมื่อได้สัญญาณพัลส์ดังกล่าวจะถูกนำไปป้อนให้ขาเกตของมอสเฟสกำลังแต่และตัว ซึ่งอธิบายดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อกระตุ้นมอสเฟสกำลังให้ทำงาน

จากรูปที่ 4.12 สามารถเขียนเงื่อนไขในการทำงานมอสเฟสแต่ละตัว โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วงได้แก่ช่วงครึ่งคาบแรกและครึ่งคาบหลัง สามารถพิจารณาได้ดังนี้

พิจารณาช่วงครึ่งคาบแรก เมื่อ

Vcontrol > Vtri มอสเฟสตัวที่ 1 จะนำกระแสและมอสเฟสตัวที่ 4 จะนำกระแส

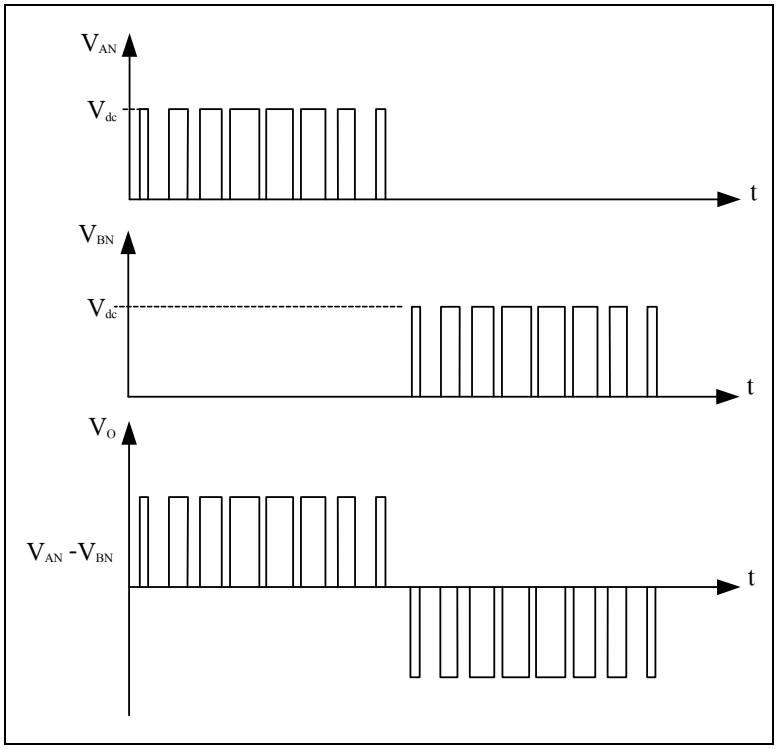
Vcontrol < Vtri มอสเฟสตัวที่ 3 จะนำกระแสและมอสเฟสตัวที่ 2 จะไม่นำกระแส

พิจารณาช่วงครึ่งคาบหลัง เมื่อ

Vcontrol > Vtri มอสเฟสตัวที่ 2 จะนำกระแสและมอสเฟสตัวที่ 3 จะนำกระแส

Vcontrol < Vtri มอสเฟสตัวที่ 4 นำกระแสและมอสเฟสตัวที่ 1 จะไม่นำกระแส

จากผลของการนำกระแสของมอสเฟสทั้ง 4 ตัว เมื่อพิจารณาแรงดัน ระหว่างจุด A กับจุด N และแรงดันที่จุด B กับจุด N ในรูปที่ 4.10 จะได้รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุต (V_O) ดังแสดงในรูปที่ 4.13

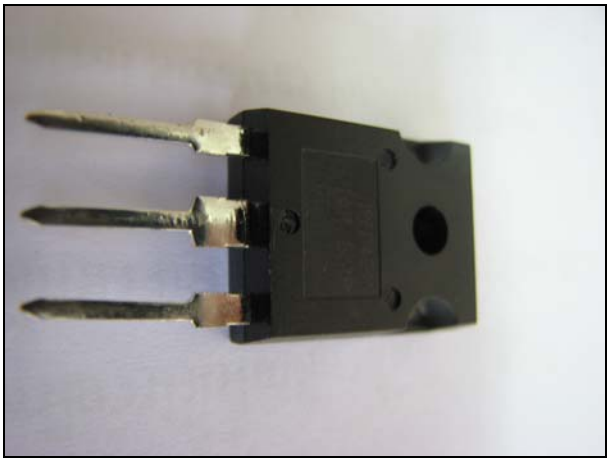


รูปที่ 4.13 การสร้างสัญญาเอาต์พุต

จากรูปที่ 4.13 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่เกิดขึ้นจะได้มาจากการลบกันของแรงดันที่จุด A (V_{AN}) กับแรงดันที่จุด B (V_{BN}) ซึ่งจะถูกจ่ายให้กับโหลดต่อไป

4.3.2 วิธีการออกแบบ

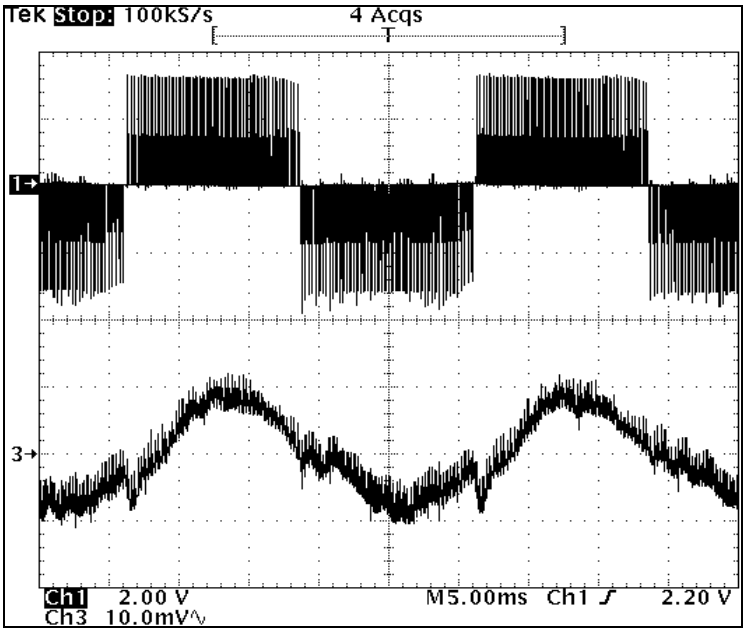
ในการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์จะคำนึงถึงพิกัดของแรงดันและกระแสเป็นสำคัญ ซึ่งจะใช้มอสเฟสกำลัง 4 ตัวแยกกัน เนื่องจากมีราคาถูกกว่ามอดูลที่ประกอบด้วยมอสเฟสกำลัง 4 ตัวต่อ 1 มอดูล โดยค่ากระแสของมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 3.47 แอมแปร์ พิกัดแรงดันมีค่าเท่ากับ 220 โวลต์ และเมื่อคำนึงถึงค่าตัวประกอบนิรภัย 25 เปอร์เซ็นต์ ทำให้มอสเฟสกำลังที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์จะมีค่าพิกัดกระแสมากกว่า 4.3375 แอมแปร์ ในขณะที่พิกัดแรงดันมากกว่า 275 โวลต์ นอกจากนี้ยังคำนึงถึงค่ากระแสเริ่มเดินเครื่องมีค่าประมาณ 4 เท่าของค่ากระแสพิกัดหรือเท่ากับ 17.35 แอมแปร์ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกใช้มอสเฟสกำลัง รหัส IRFP460PBF ในวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีพิกัดแรงดัน 500 โวลต์ พิกัดกระแส 20 แอมแปร์ ดังรูปที่ 4.14



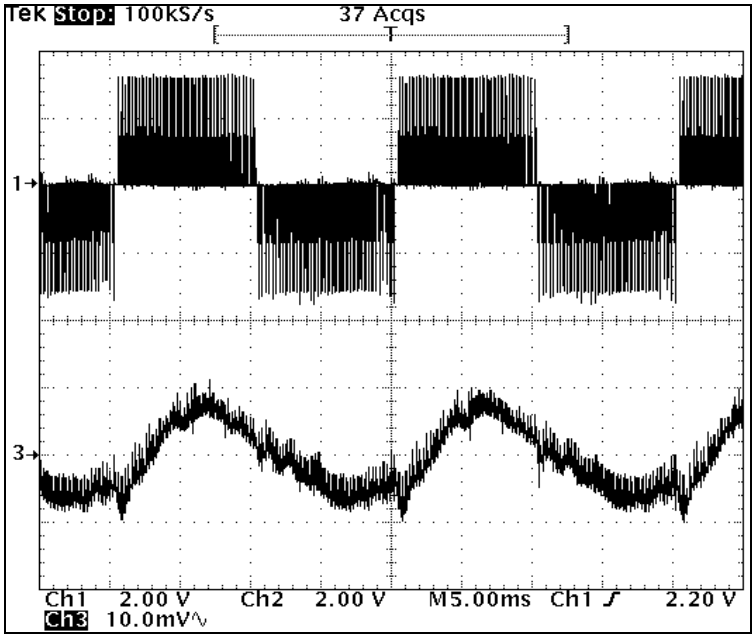
รูปที่ 4.14 มอสเฟสกำลังในวงจรอินเวอร์เตอร์

4.3.3 ผลการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์

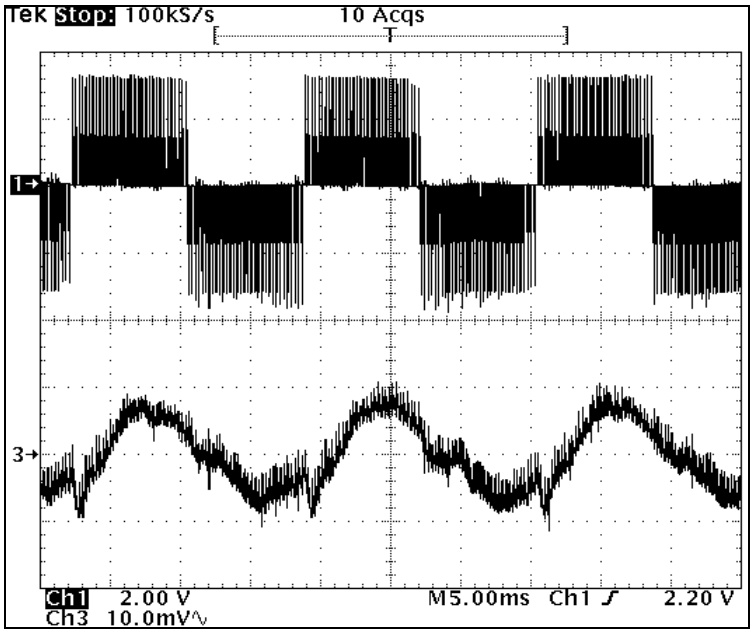
การทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์จะทำการต่อโหลดชนิดความต้านทานและความเหนี่ยวนำ โดยที่ค่าความต้านทานมีค่าเท่ากับ 1 กิโลโอห์ม ต่ออนุกรมกับความเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ 1.85 เฮนรี โดยมีการปรับค่าแรงดันอินพุตและปรับค่าความถี่ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายให้กับโหลดเพื่อจับรูปสัญญาณเอาต์พุตของแรงดันและกระแส ดังรูปที่ 4.15 ถึงรูปที่ 4.17 โดยที่ช่องสัญญาณที่ 1 ของออสซิลโลสโคปเป็นรูปสัญญาณแรงดันทางเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ ในขณะที่ช่องสัญญาณที่ 3 ของออสซิลโลสโคปเป็นรูปของสัญญาณกระแสของวงจรอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.15 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่แรงดัน 145 โวลต์ ความถี่ 40 เฮิรตซ์

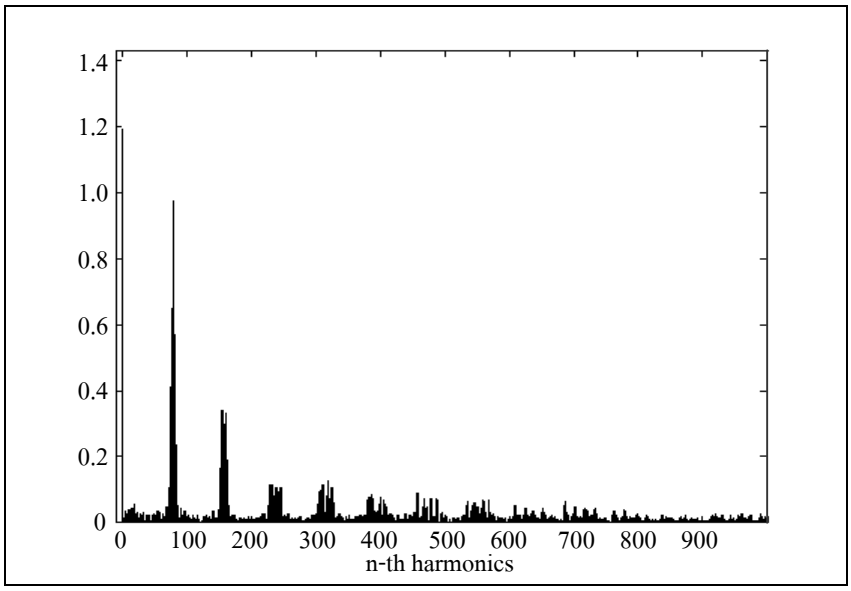


รูปที่ 4.16 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ ที่แรงดัน 150 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์

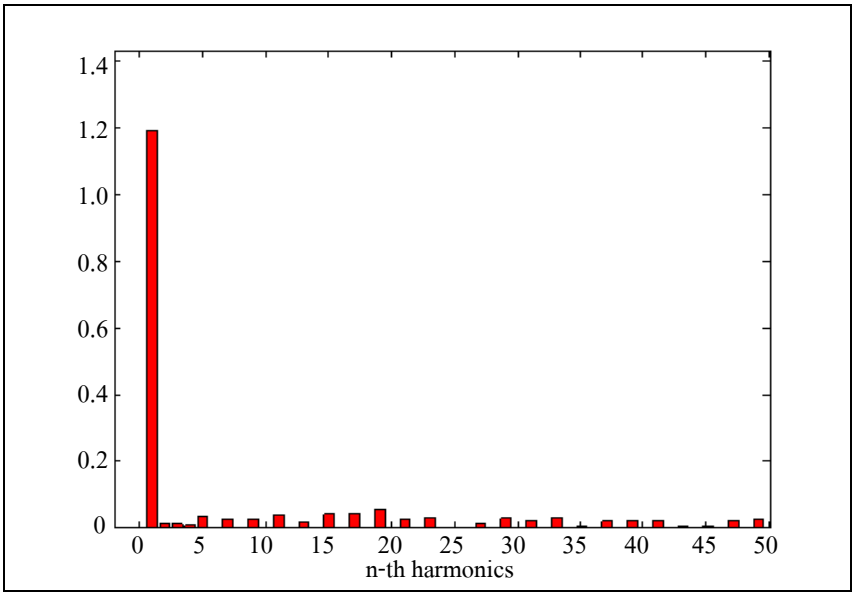


รูปที่ 4.17 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ ที่แรงดัน 155 โวลต์ ความถี่ 60 เฮิรตซ์

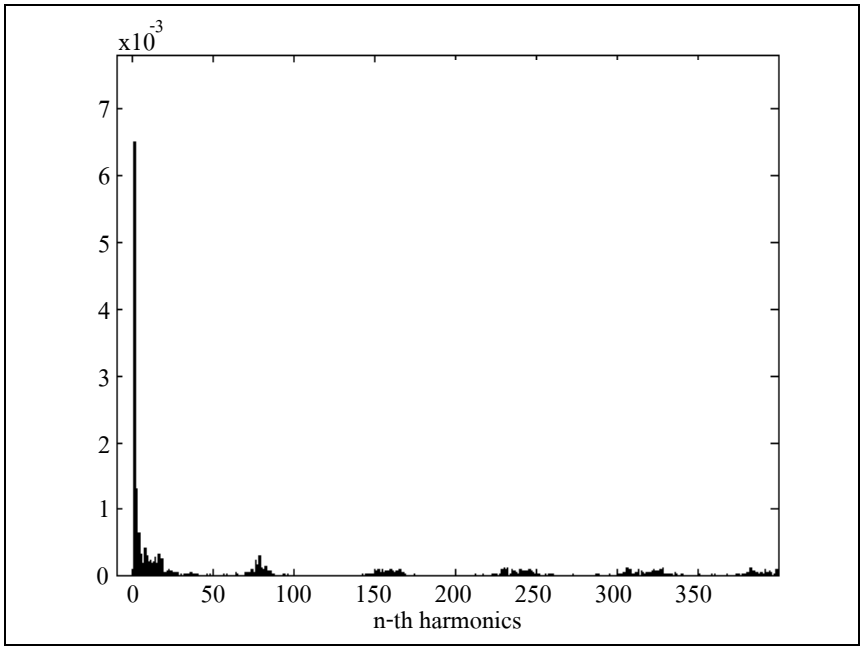
จากรูปที่ 4.16 ได้ทดลองนำสัญญาณของแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มาคำนวณค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม (Total Harmonic Distortion, THD) ด้วยการวิเคราะห์ผ่านการแปลงฟูริเยร์อย่างเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) จะได้รูปสเปกตรัมของค่าฮาร์มอนิกส์ลำดับต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ถึงรูปที่ 4.21 จากค่าสเปกตรัมของฮาร์มอนิกส์



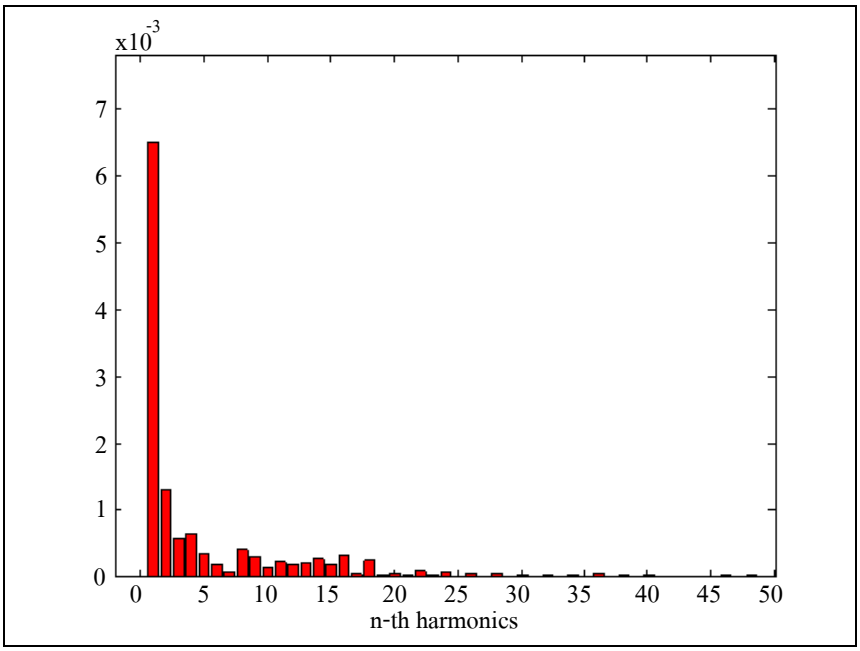
รูปที่ 4.18 สเปกตรัมของรูปคลื่นแรงดันจากฮาร์มอนิกลำดับที่ 0 ถึง ลำดับที่ 1000



รูปที่ 4.19 สเปกตรัมของรูปคลื่นแรงดันจากฮาร์มอนิกลำดับที่ 0 ถึง ลำดับที่ 50



รูปที่ 4.20 สเปกตรัมของรูปคลื่นกระแสจากฮาร์มอนิกลำดับที่ 0 ถึง ลำดับที่ 1000



รูปที่ 4.21 สเปกตรัมของรูปคลื่นกระแสจากฮาร์มอนิกลำดับที่ 0 ถึง ลำดับที่ 50

จากรูปของสเปกตรัมของสัญญาณแรงดันได้แสดงค่าลำดับที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 0 ถึงลำดับที่ 1000 พบว่าค่าสูงที่สุดคือค่าฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 (Fundamental) และมีกลุ่มของสเปกตรัมฮาร์มอนิกลำดับที่ 80 160 240 320 400 480 560 และ 640 ปรากฏอยู่ ส่วนสเปกตรัมของสัญญาณกระแส ค่าสูงสุดคือฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 และจะมีกลุ่มของสเปกตรัมลำดับที่ 80 160 240 320 และ 400 ปรากฏอยู่ โดยกลุ่มของฮาร์มอนิกดังกล่าวแสดงถึงจำนวนเท่าของความถี่สวิตซ์ชิงในวงจรอินเวอร์เตอร์ จากสเปตรัมดังกล่าวสามารถนำมาคำนวณค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกส์รวม (THD_V) ตามสมการที่ (4.9) และค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกส์รวม (THD_I) ตามสมการที่ (4.10)

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \tag{4.9}$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \tag{4.10}$$

จากค่าสมการข้างต้นสามารถคำนวณค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกส์รวมและค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกส์รวมตามตารางด้านล่าง

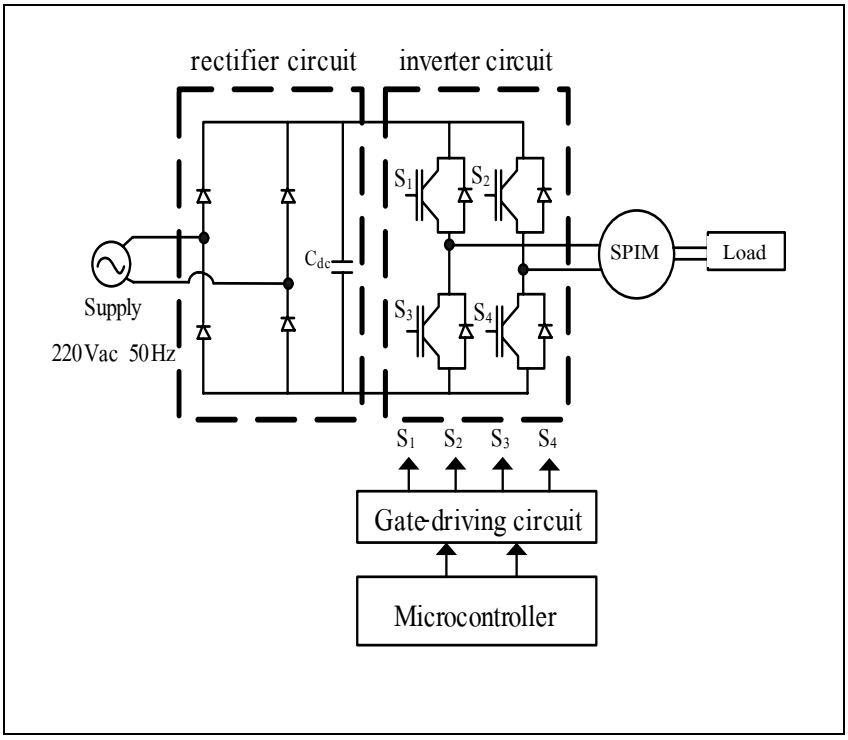
ตารางที่ 4.1 ผลคำนวณค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของรูปสัญญาณแรงดันและกระแสในรูปที่ 4.16

	ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม (THD)
ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกส์รวม	152.85
ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกส์รวม	32.579

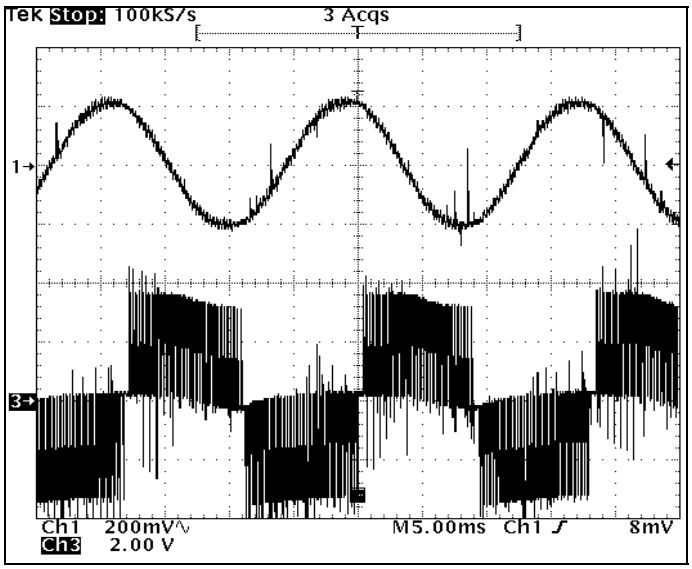
4.4 การทดสอบระบบขับเคลื่อน

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเฟสเดียวด้วยชุดขับเคลื่อนที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสที่สภาวะโหลดต่าง ๆ และการทดสอบดังกล่าวได้ทดสอบปรับค่าความถี่เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ และทดสอบสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่สภาวะโหลดต่าง ๆ โดยจะพิจาณาโหลดที่มีค่ากำลังงานเอาต์พุตคงที่ซึ่งค่าโหลดพิกัดมีค่าเท่ากับ 260 วัตต์ การทดสอบแสดงดังแผนภาพในรูปที่ 4.22 โดยสัญญาณจุดชนวนมอสเฟสกำลังทั้ง 4 ตัว

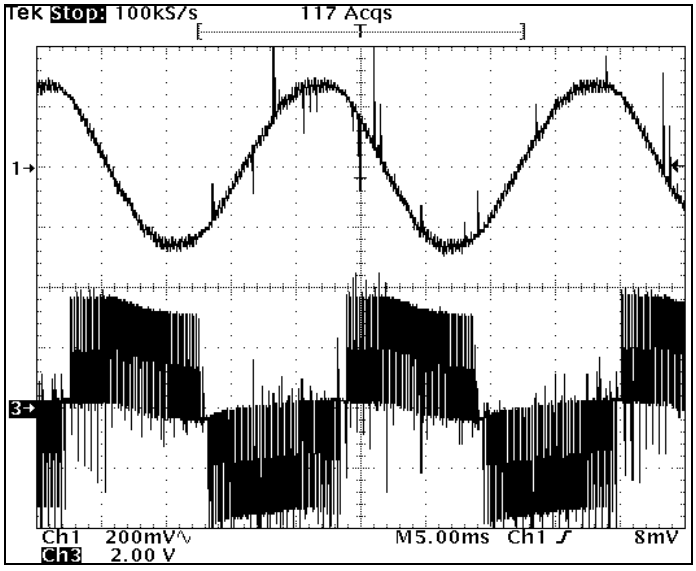
จะได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์เพื่อจุดชนวนมอสเฟสกำลังของวงจรอินเวอร์เตอร์โดยผ่านวงจรขับเกต (gate drive) ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.23 โดยช่องสัญญาณที่ 1 ของออสซิลโลสโคปจับสัญญาณกระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์และช่องสัญญาณที่ 3 ของออสซิลโลสโคปจับสัญญาณแรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์



รูปที่ 4.22 แผนภาพสำหรับทดสอบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

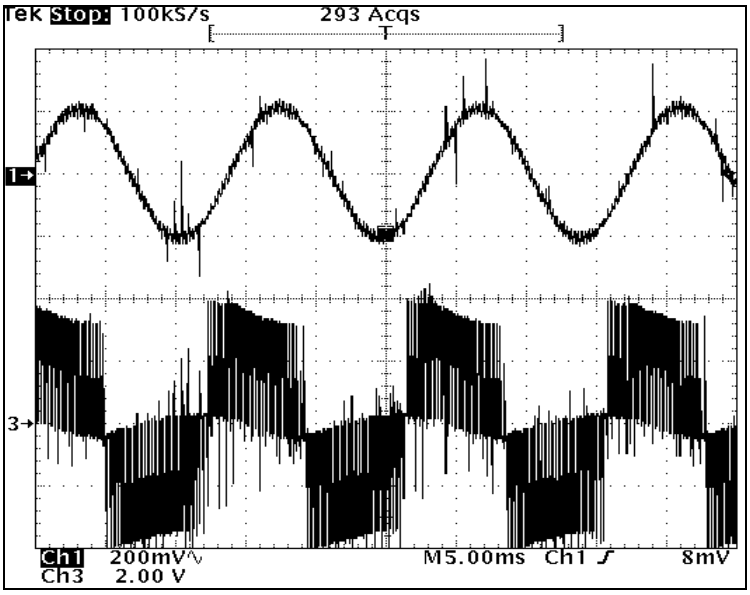


ก) รูปสัญญาณกระแสและแรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์ในสภาวะไร้โหลด ที่มีความถี่ 55 เฮิรตซ์ แรงดัน 220 โวลต์ ความเร็วรอบ 1662 รอบต่อนาที

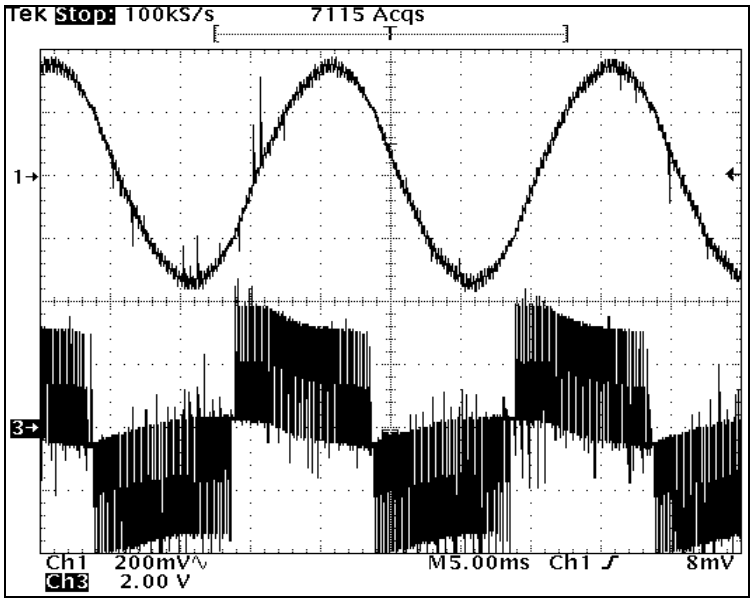


ข) รูปสัญญาณกระแสและแรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์ในสภาวะโหลด 52 วัตต์ ที่มีความถี่ 47 เฮิรตซ์ แรงดัน 220 โวลต์ ความเร็วรอบ 1401 รอบต่อนาที

รูปที่ 4.23 ตัวอย่างรูปสัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์



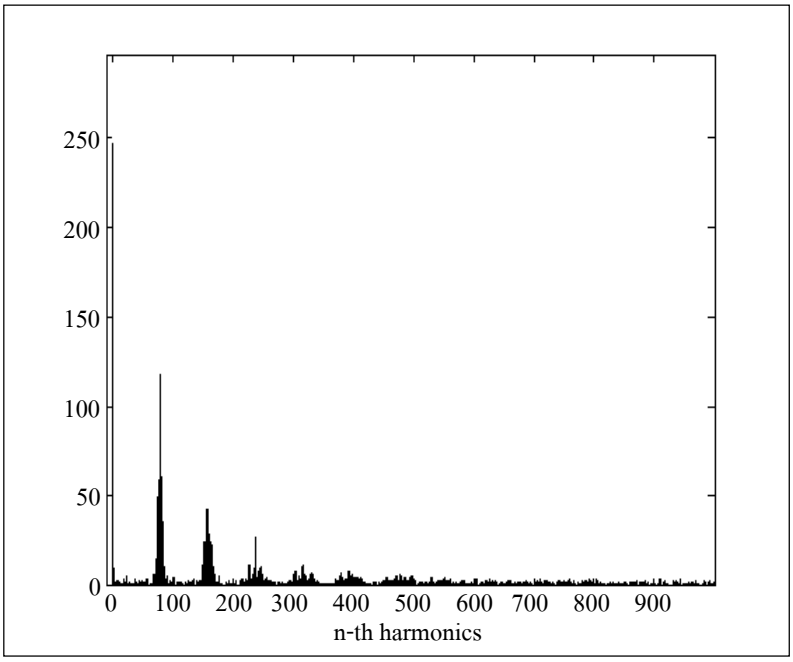
ค) รูปสัญญาณกระแสและแรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์ในสภาวะโหลด 104 วัตต์ ที่มีความถี่ 70 เฮิรตซ์ แรงดัน 200 โวลต์ ความเร็วรอบ 2067 รอบต่อนาที



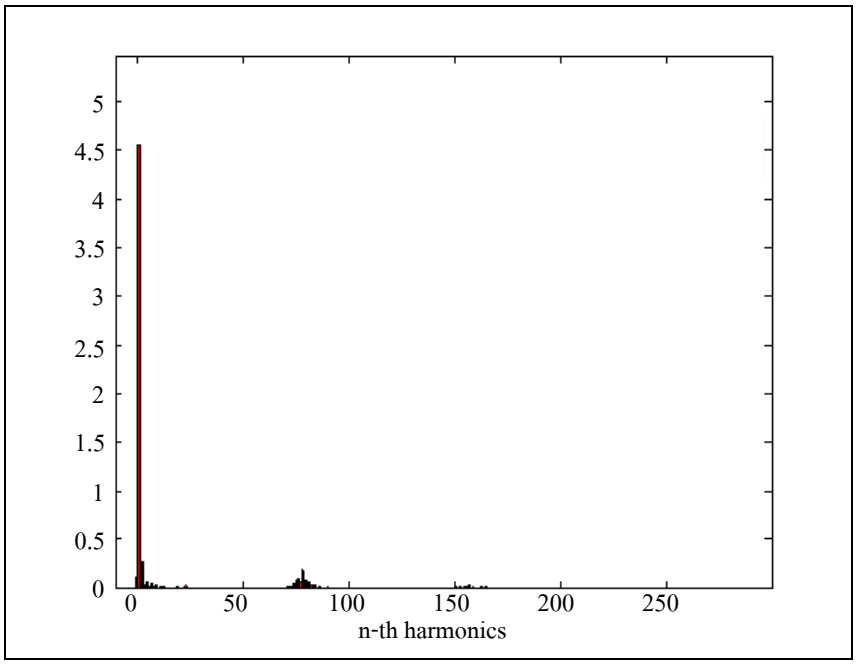
ง) รูปสัญญาณกระแสและแรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์ในสภาวะโหลด 156 วัตต์ ที่มีความถี่ 50 เฮิรตซ์ แรงดัน 220 โวลต์ ความเร็วรอบ 1422 รอบต่อนาที

รูปที่ 4.23 ตัวอย่างรูปสัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ (ต่อ)

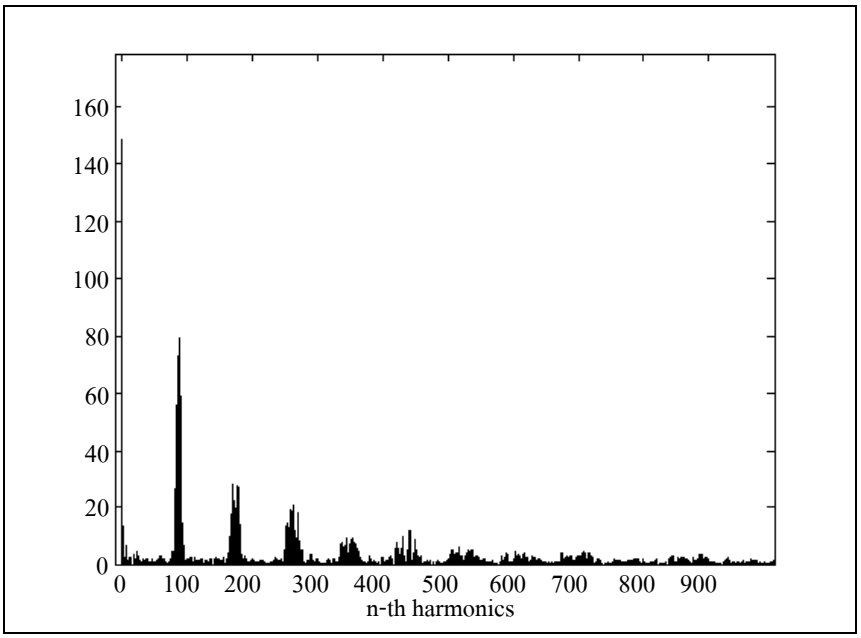
จากผลของสัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ป้อนเข้ามอเตอร์ในสภาวะไร้โหลดและในสภาวะมีโหลดค่าต่าง ๆ ซึ่งมีการเปลี่ยนค่าแรงดันและความถี่ที่เข้ามอเตอร์ เมื่อนำสัญญาณดังกล่าวมาวิเคราะห์หาสเปกตรัมของฮาร์มอนิกที่ลำดับต่าง ๆ และคำนวณหาค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมดังแสดงในรูปที่ 4.24 ถึงรูปที่ 4.31 และแสดงในตารางที่ 4.2 โดยในการคำนวณจะเป็นไปตามสมการที่ (4.8) และ (4.9)



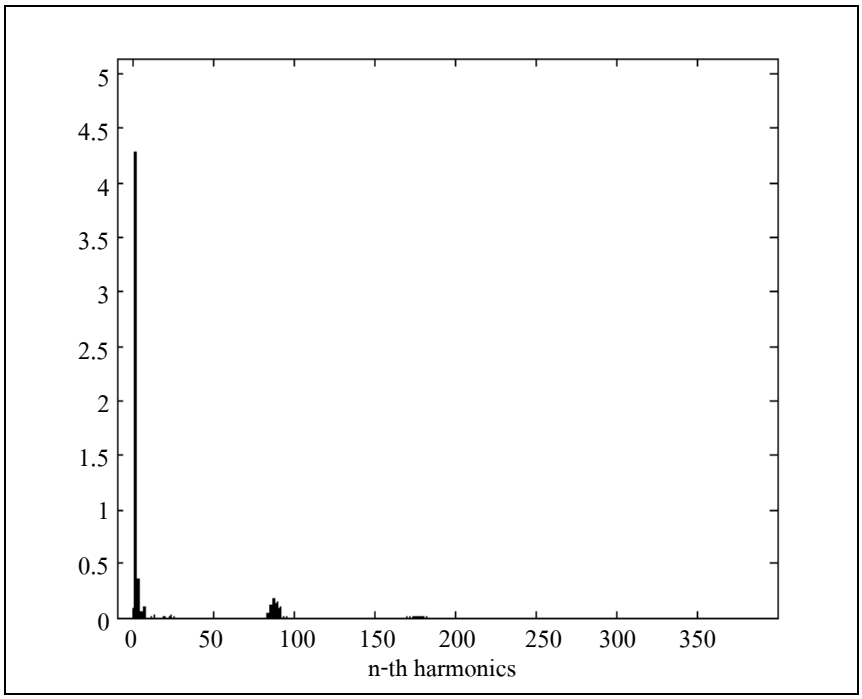
รูปที่ 4.24 สเปกตรัมของสัญญาณแรงดันของรูปที่ 4.23 (ก)



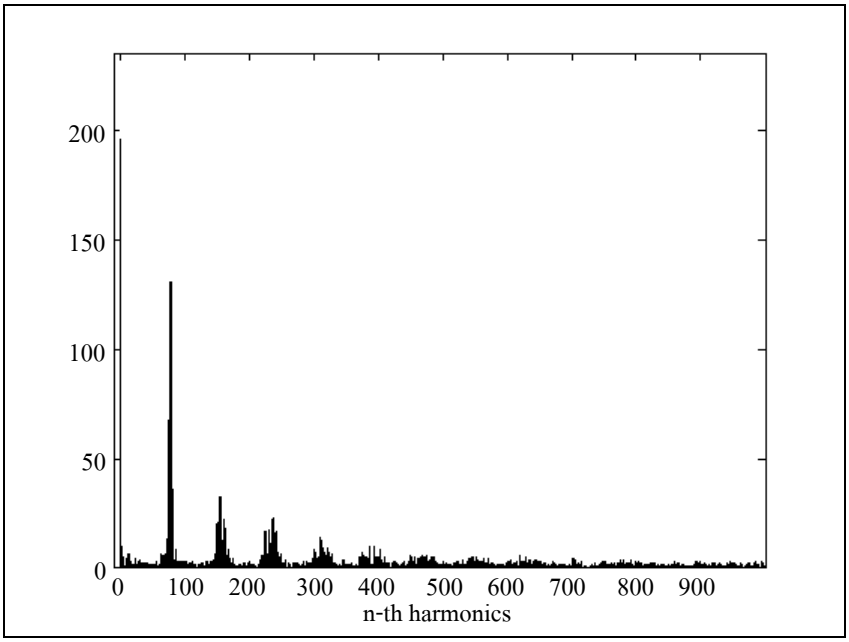
รูปที่ 4.25 สเปกตรัมของสัญญาณกระแสของรูปที่ 4.23 (ก)



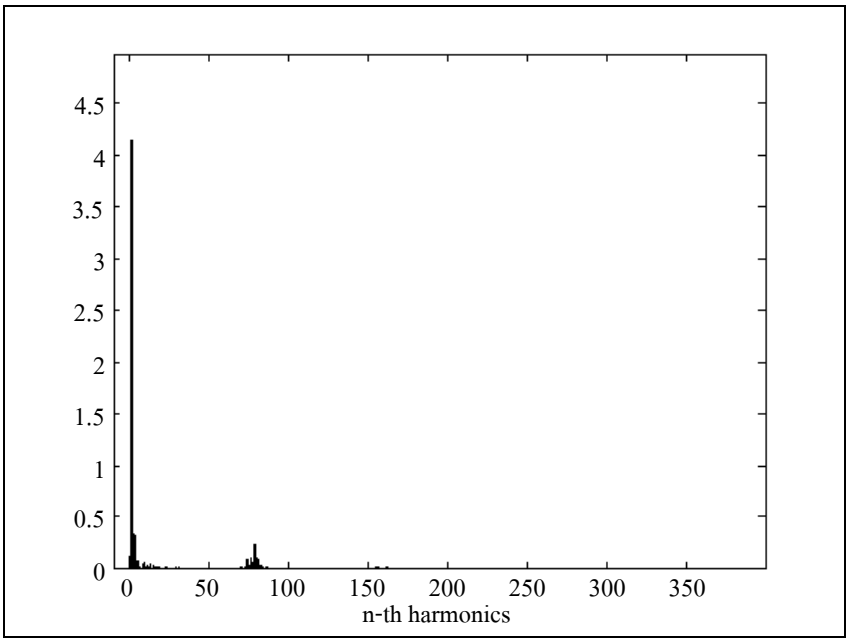
รูปที่ 4.26 สเปกตรัมของสัญญาณแรงดันของรูปที่ 4.23 (ข)



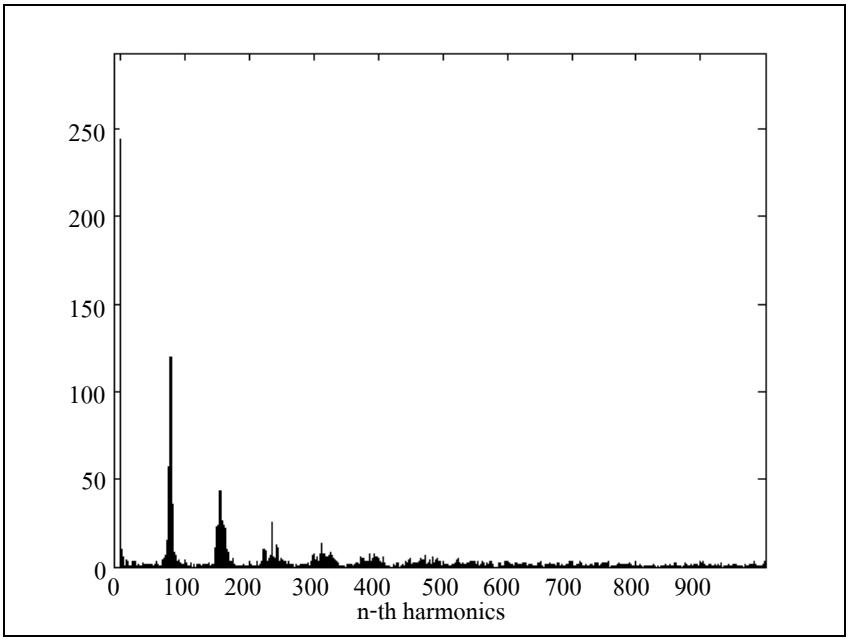
รูปที่ 4.27 สเปกตรัมของสัญญาณกระแสของรูปที่ 4.23 (ข)



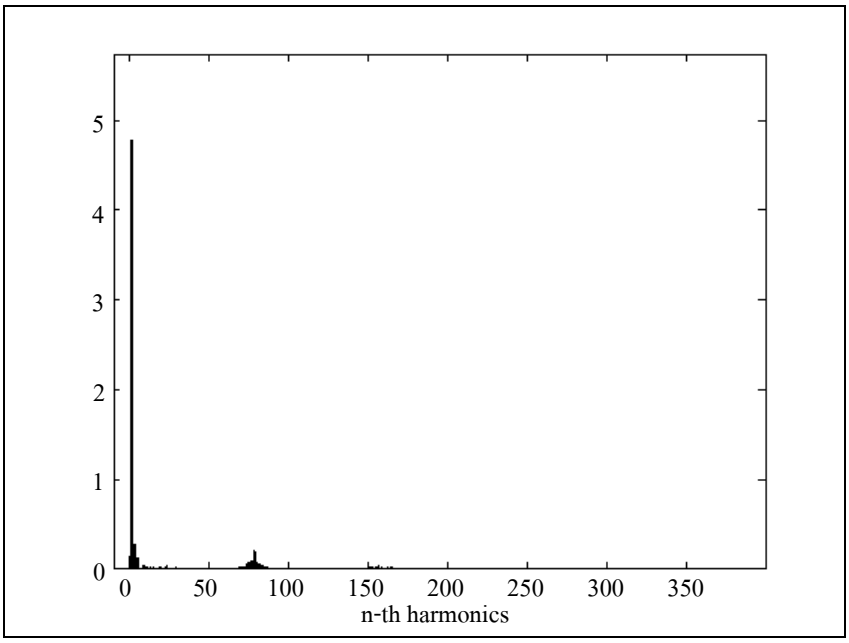
รูปที่ 4.28 สเปกตรัมของสัญญาณแรงดันของรูปที่ 4.23 (ค)



รูปที่ 4.29 สเปกตรัมของสัญญาณกระแสของรูปที่ 4.23 (ค)



รูปที่ 4.30 สเปกตรัมของสัญญาณแรงดันของรูปที่ 4.23 (ง)



รูปที่ 4.31 สเปกตรัมของสัญญาณกระแสของรูปที่ 4.23 (ง)

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของรูปสัญญาณแรงดันและกระแสในรูปที่ 4.23

ค่าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์		ค่าโหลดของมอเตอร์ (W)	ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม (THD)	
แรงดัน (V)	ความถี่ (Hz)		แรงดัน (%)	กระแส (%)
220	55	0	79.354	10.236
220	47	52	133.50	12.117
200	70	104	105.21	12.970
220	50	156	80.552	10.567

จากผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสด้วยระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่สภาวะโหลดต่าง ๆ พบว่าค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมมีค่าสูงเนื่องจากรูปสัญญาที่สร้างมานั้นเป็นลักษณะของพัลส์ที่เกิดจากการสวิตชิงของอุปกรณ์ และค่าความเพี้ยนกระแสของฮาร์มอนิกรวมมีค่าต่ำกว่าค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกเนื่องจากสัญญาณของแกระแสมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์แต่ก็มีลักษณะของสัญญาณรบกวนแทรกอยู่ในสัญญาณกระแสทำให้ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกมีค่าสูงอยู่

4.6 สรุป

จากการได้ออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายที่สามารถปรับค่าแรงดันและความถี่ได้โดยใช้อุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยแหล่งจ่ายดังกล่าวสามารถปรับค่าแรงดันได้ตั้งแต่ 50 โวลต์ถึง 240 โวลต์ และปรับค่าความถี่ได้ตั้งแต่ 24 เฮิรตซ์ถึง 100 เฮิรตซ์ นอกจากนี้ยังสามารถขับเคลื่อนมอเตอร์ได้ในสภาวะที่ไร้โหลดและขับเคลื่อนที่สภาวะมอเตอร์รับโหลดได้ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของโหลดพิกัดได้ เมื่อทำการวิเคราะห์รูปสัญญาณเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ได้แก่ ค่าแรงดันและค่ากระแสด้วยวิธีการแปลงฟูริเยร์อย่างเร็ว เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกและความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิก ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะได้ทำการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในสภาวะต่าง ๆ ของการขับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อจะนำไปสู่การหาจุดทำงานของมอเตอร์ที่ให้ค่ากำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ส่วนวิธีการควบคุมการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเพื่อประหยัดพลังงานจะได้นำเสนอในบทถัดไป

บทที่ 5
วิธีการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

5.1 บทนำ

ปัจจุบันการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเป็นไปอย่างแพร่หลายทั้งในภาคอุตสาหกรรมและภาคครัวเรือนเนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเฟสเดียวเป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานสะดวก ดูแลรักษาง่ายและมีความคงทนต่อสภาพการใช้งานต่าง ๆ ได้ดี การใช้งานมอเตอร์ทุกประเภทต้องใช้กำลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อน ด้วยเหตุผลดังกล่าวการหาวิธีประหยัดพลังงานไฟฟ้าในการใช้งานมอเตอร์จะเป็นการช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าให้กับประเทศในยุคที่พลังงานที่เป็นสิ่งที่มีค่าและมีปริมาณลดลง ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอการวิธีการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเฟสเดียว โดยอาศัยหลักการควบคุมคุณสมบัติการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเกิดกำลังงานสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ในบทนี้จึงได้เสนอประเภทของกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นและวิธีการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเพื่อทำการลดกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในสภาวะการใช้งานมอเตอร์

5.2 กำลังงานสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

ในการใช้งานมอเตอร์จะได้รับกำลังงานไฟฟ้าจากชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเฟสเดียวประกอบด้วยวงจรเรียงกระแส (rectifier circuit) และวงจรอินเวอร์เตอร์ (inverter circuit) โดยปกติกำลังงานเอาต์พุต (power output) จะมีค่าน้อยกว่ากำลังงานไฟฟ้าด้านอินพุต (power input) เนื่องจากการใช้งานย่อมมีกำลังงานสูญเสียเกิดขึ้นซึ่งจะประกอบด้วยกำลังงานสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ (stator copper losses) กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์ (rotor copper loss) กำลังงานสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงลม (friction and windage loss) และกำลังงานสูญเสียที่แกนเหล็ก (core loss) ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกำลังงานสูญเสียดังกล่าวมีดังนี้

5.2.1 กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ (P_{SCL})

กำลังงานสูญเสียส่วนนี้เกิดจากความต้านทานของขดลวดที่สเตเตอร์ซึ่งประกอบด้วยความต้านทานของขดลวดหลักและขดลวดช่วย สภาวะการทำงานของขดลวดช่วยจะขึ้นอยู่กับชนิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เช่น ชนิดแยกเฟสและชนิดเริ่มเดินเครื่องด้วยตัวเก็บประจุ ขดลวดช่วยจะถูกปลดออกจากวงจรสเตเตอร์เมื่อความเร็วมอเตอร์ประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ของความเร็วซิงโครนัส ส่วนชนิดเดินเครื่องด้วยตัวเก็บประจุ ขดลวดช่วยจะติดอยู่กับวงจรสเตเตอร์ตลอดการใช้งาน

นอกจากค่าความต้านทานของขดลวดที่สเตเตอร์แล้ว แรงบิดของโหลด ค่าแรงดันด้านสเตเตอร์ ค่าความถี่ด้านสเตเตอร์และอุณหภูมิ ก็มีผลต่อกำลังงานสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ด้วย

5.2.2 กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์ (P_{RCL})

กำลังงานสูญเสียส่วนนี้เกิดจากความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ และขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดโรเตอร์

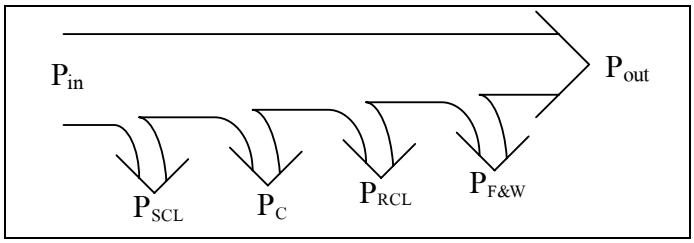
5.2.3 กำลังงานสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านของลม ($P_{F\&W}$)

กำลังงานสูญเสียส่วนนี้เกิดจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบริเวณตลับลูกปืนที่รองเพลาและแรงต้านของลมในช่องอากาศที่มีอยู่ในตัวโครงสร้างของมอเตอร์ซึ่งประมาณได้ว่ามีค่าคงที่ทุกช่วงโหลดและมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่ากำลังงานสูญเสียจากส่วนอื่น

5.2.4 กำลังงานสูญเสียที่แกนเหล็ก (P_C)

กำลังงานส่วนนี้ประกอบด้วยกำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (eddy current) และกำลังงานสูญเสียจากฮิสเตอรีซีส (hysteresis losses) กำลังงานสูญเสียส่วนนี้เกิดจากลักษณะของวัสดุและวิธีการออกแบบของมอเตอร์

เมื่อพิจารณากำลังงานอินพุต กำลังงานเอาต์พุตและกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นสามารถเขียนแผนภาพแสดงได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การสูญเสียทางกำลังไฟฟ้าที่เกิดกับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

จากรูปที่ 5.1 กำลังงานสูญเสียในระบบสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังสมการที่ (5.1)

$$P_{loss} = P_{SCL} + P_C + P_{RCL} + P_{F\&W} \tag{5.1}$$

พิจารณากำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นในบทที่ 3 จะได้สมการของกำลังงานสูญเสียตามสมการที่ (5.2) และ สมการที่ (5.3)

$$P_{loss} = P_{cu} + P_{rot} \tag{5.2}$$

$$P_{cu} = r_{qs} i_{qs}^2 + r_{ds} i_{ds}^2 + r_r (i_{qr}^2 + i_{dr}^2) \tag{5.3}$$

โดยที่ P_{loss} คือ กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ (วัตต์)

P_{cu} คือ กำลังงานสูญเสียที่ขดลวด (วัตต์)

P_{rot} คือ กำลังงานสูญเสียเนื่องจากการหมุนของมอเตอร์ (วัตต์)

เมื่อพิจารณากำลังงานสูญเสียในรูปของกำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุตจะได้ค่าของกำลังงานสูญเสียดังแสดงในสมการที่ (5.4)

$$P_{loss} = P_{in} - P_{out} \tag{5.4}$$

$$P_{in} = IV \cos\theta \tag{5.5}$$

$$P_{out} = T\omega \tag{5.6}$$

โดยที่ P_{in} คือ กำลังงานไฟฟ้าอินพุต (วัตต์)

P_{out} คือ กำลังงานไฟฟ้าเอาต์พุต (วัตต์)

I คือ กระแสไฟฟ้าอินพุตของมอเตอร์ (แอมแปร์)

V คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุตของมอเตอร์ (โวลต์)

$\cos\theta$ คือ ค่าตัวประกอบกำลัง

ω คือ ค่าความเร็วเชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)

T คือ ค่าแรงบิดของมอเตอร์ (นิวตัน-เมตร)

5.3 การจำลองเพื่อหาจุดทำงานที่ทำให้กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดด้วยเทคนิคการควบคุมแรงดันและความถี่

5.3.1 การหาจุดทำงานที่ทำให้กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด

การลดกำลังงานสูญเสียในช่วงการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวโดยเงื่อนไขของปัญหาความเหมาะสมแบบไม่เชิงเส้นถูกกำหนดขึ้นเพื่อหาค่าต่ำสุดเฉพาะถิ่น (local minimum) โครงสร้างการทำงานของการหาค่าความเหมาะสมกำลังงานสูญเสีย ณ ทุกจุดของการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยสมการของกำลังงานการสูญเสียที่เกิดขึ้นในมอเตอร์จะถูกอธิบายโดยสมการที่ (5.3) และสมการที่ (5.4) ในการคำนวณกำลังงานสูญเสียเนื่องจากการหมุนจะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่และมีค่าเท่ากับกำลังงานสูญเสียที่สภาวะไร้โหลด ในแบบแผนของการลดกำลังงานสูญเสีย กระบวนการควบคุมค่าแรงดันและค่าความถี่จะถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว การควบคุมดังกล่าวจะทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 อย่างอิสระ ชุดคำตอบที่เหมาะสมของค่าความถี่และค่าแรงดันที่ได้จากเทคนิคการหาค่าความเหมาะสม โดยค่าความถี่และค่าแรงดันที่ได้จะนำไปจ่ายให้มอเตอร์ที่สภาวะขับโหลด รูปแบบทั่วไปของการลดการสูญเสียสำหรับปัญหาของการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ดังสมการที่ (5.7) เป็นสมการวัตถุประสงค์ และสมการที่ (5.8) เป็นสมการเงื่อนไข

$$P_{loss} = F(f, V) \tag{5.7}$$

$$\begin{aligned} f_{min} \le f \le f_{max} \\ V_{min} \le V \le V_{max} \end{aligned} \tag{5.8}$$

การแก้ปัญหาค่าความเหมาะสมจะใช้กำหนดการลำดับสอง (Sequential Quadratic Programming : SQP) โครงสร้างการทำงานของระเบียบวิธีนี้สามารถอธิบายเป็นขั้นตอนการทำงานได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ข้อมูลทั้งหมดของมอเตอร์ถูกเก็บเป็นตัวแปรในโปรแกรมกำหนดค่าเริ่มต้นของความถี่และแรงดัน กำหนดค่าตัวนับ

ขั้นตอนที่ 2 ถ้ายังไม่พบเงื่อนไขในการหยุดให้ทำตามขั้นตอนที่ 3 แต่ถ้าพบเงื่อนไขในการหยุดให้ทำขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนที่ 3 ทำการประมาณค่าปัญหาไม่เชิงเส้นของค่าความเหมาะสมโดยใช้กำหนดการลำดับสองแทนโดยค่าเกรเดียนต์ (gradient) และแฮกเซียนเมตริกซ์ (hessian matrix) ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ตามสมการที่ (5.9)

$$Minimize \qquad \tfrac{1}{2} d_k^T H_k d_k + \nabla f_k^T d_k \tag{5.9}$$

โดยที่ d_k คือ ทิศทางการค้นหา

∇f_k คือ เกรเดียนต์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

H_k คือ แฮกเซียนเมตริกซ์

คำตอบของสำหรับการค้นหาค่าเหมาะสมตามทิศทางการค้นหาในแต่ละรอบที่อยู่ถัดไปของการประมาณค่าคำตอบ การปรับปรุงค่าคำตอบในรอบถัดไปนั้นจะได้จากสมการที่ (5.10) เมื่อทำการปรับปรุงค่าคำตอบแล้วกลับไปที่ ขั้นตอนที่ 2

$$x_{k+1} = x_k + d_k \tag{5.10}$$

โดยที่ X_k คือ ค่าเหมาะสมของแรงดัน และความถี่

K คือ จำนวนรอบในการหาค่าเหมาะสม

ขั้นตอนที่ 4 แสดงผลของค่าคำตอบที่เหมาะสม และหยุดการทำงาน

5.3.2 ผลการหาจุดทำงานที่ทำให้กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด

ในการจำลองผลเพื่อหาจุดทำงานที่เหมาะสมกับสภาวะของแรงบิดของโหลดเชิงกลในแต่ละค่า ได้แก่ 4 8 12 และ 16 นิวตัน-เมตร โดยค่าของโหลดดังกล่าวเป็นแรงบิดที่มีค่าคงที่โดยกำหนดให้ค่าแรงดันเท่ากับ 200โวลต์ และค่าความถี่เท่ากับ50 เฮิรตซ์ เป็นค่าเริ่มต้นของคำตอบสำหรับทุก ๆ ค่าของโหลด การหาคำตอบที่เหมาะสมจะหาได้โดยการคำนวณด้วยกำหนดการลำดับสองของ MATLAB toolbox โดยฟังก์ชัน *fmincon* สำหรับแต่ละค่าของโหลดดังได้แสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าคำตอบที่เหมาะสมสำหรับแต่ละสภาวะของโหลด

ค่าโหลด (N.m)	กำลังงานสูญเสีย (W)	คำตอบที่เหมาะสม		จำนวนรอบในการคำนวณ
		แรงดัน (V)	ความถี่ (Hz)	
4.0	626.93	219.42	75.00	9
8.0	782.58	218.41	75.00	10
12.0	859.90	229.90	62.50	7
16.0	1029.90	220.38	56.25	17

ในการศึกษาค่ากำลังงานสูญเสียของชุดคำตอบที่เหมาะสมโดยทำการเปรียบเทียบค่ากำลังงานสูญเสียของกรณีฐานที่แหล่งจ่ายมีค่าแรงดัน 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ โดยพิจารณาที่ค่าโหลดเท่ากันได้นำเสนอผลการเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างกรณีฐานและจุดการทำงานที่เหมาะสม

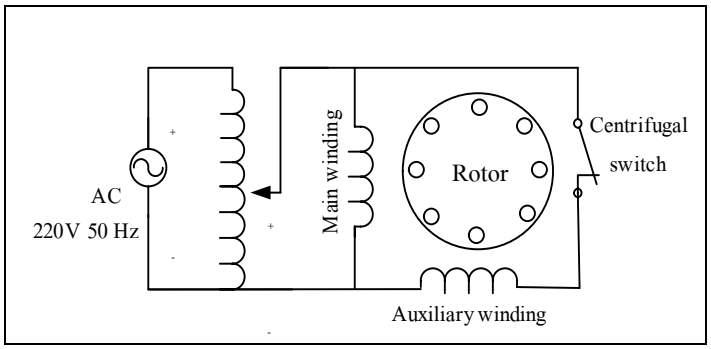
ค่าโหลด (N.m)	กำลังงานสูญเสียของกรณีฐาน (W)	กำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด (W)	การลดลงของกำลังงานการสูญเสีย (%)
4	758.72	626.93	17.37
8	819.65	782.58	4.52
12	921.77	859.90	6.71
16	1070.20	1029.90	3.77

5.4 การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากหัวข้อที่ 2.2.4 ได้กล่าวถึงการควบคุมคุณสมบัติการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยกระบวนการวิธีต่าง ๆ เมื่อพิจารณาระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยทั่วไป พบว่าสามารถแบ่งระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวได้ 2 ลักษณะ ได้แก่ ระบบขับเคลื่อนที่ป้อนแรงดันจากแหล่งจ่ายเดียวและระบบขับเคลื่อนที่ป้อนแรงดันจากสองแหล่งจ่าย โดยโครงสร้างการทำงานของระบบการขับเคลื่อนทั้งสองแบบจะได้นำเสนอในหัวข้อที่ 5.4.1 และ 5.4.2 ต่อไป

5.4.1 ระบบขับเคลื่อนที่ป้อนแรงดันจากแหล่งจ่ายเดียว

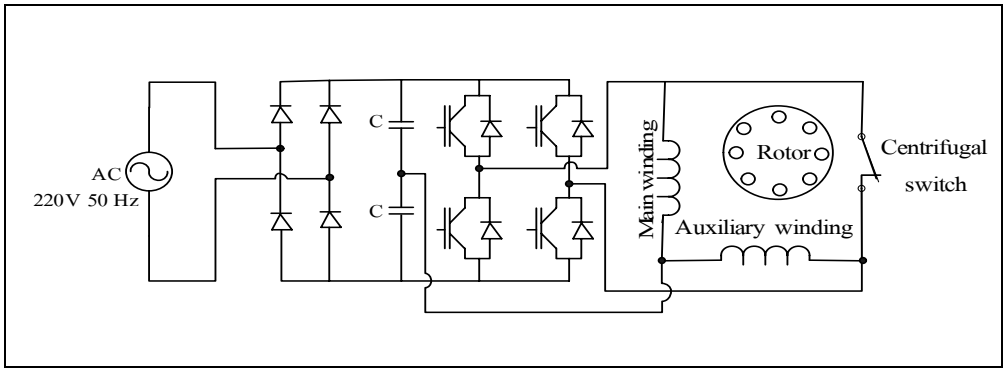
ระบบนี้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่เป็นลักษณะของมอเตอร์ในเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือนทั่วไป เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและราคาถูก ดังแสดงในรูปที่ 5.2 การทำงานของระบบขับเคลื่อนแบบนี้จะทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ผ่านชุดขดลวดความต้านทานเพื่อทำการปรับระดับแรงดันอินพุตของมอเตอร์ โดยที่ค่าความถี่ของแหล่งจ่ายมีค่าคงที่



รูปที่ 5.2 ระบบขับเคลื่อนที่ป้อนแรงดันจากแหล่งจ่ายเดียว

5.4.2 ระบบขับเคลื่อนที่ป้อนแรงดันจากสองแหล่งจ่าย

ระบบดังกล่าวจะถูกนำมาใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต้องการขับเคลื่อนในลักษณะมอเตอร์สองเฟส กล่าวคือมีการป้อนแรงดันให้กับขดลวดหลักและขดลวดช่วยด้วยแหล่งจ่ายที่เป็นสระต่อกัน ดังรูปที่ 5.3 เมื่อสวิตซ์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์เปิดออก จะเห็นได้ว่าขดลวดช่วยยังถูกจ่ายแรงดัน



รูปที่ 5.3 ระบบขับเคลื่อนที่ป้อนแรงดันจากสองแหล่งจ่าย

การขับเคลื่อนด้วยวิธีนี้สามารถปรับค่าระดับแรงดันและค่าความถี่ของแหล่งจ่ายได้ ซึ่งจะเป็นวิธีการปรับปรุงสมมรรถนะของมอเตอร์ เช่น ความเร็ว ค่าแรงบิด เป็นต้น

5.5 การทดสอบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเพื่อพิจารณากำลังงานสูญเสีย

เนื่องจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์คำนึงถึงกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ตามสมการที่ (5.4) ในสภาวะกำลังงานเอาต์พุตคงที่ ดังนั้นการศึกษาการควบคุมคุณสมบัติการขับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อประหยัดพลังงาน จึงได้ศึกษาในวิธีการควบคุมแบบการแปรค่าแรงดันที่สเตเตอร์ที่ความถี่คงที่ในหัวข้อที่ 5.5.1 และวิธีควบคุมแบบแปรความถี่ของแรงดันสเตเตอร์โดยการรักษาอัตราส่วนของแรงดันกับความถี่แบบไม่คงที่ในหัวข้อที่ 5.5.2 ระบบการขับเคลื่อนจะเลือกการพิจารณาระบบขับเคลื่อนแบบที่ป้อนแรงดันจากแหล่งจ่ายเดียว เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำที่พิจารณาเป็นแบบแยกเฟส ดังนั้นขดลวดช่วยไม่จำเป็นต้องถูกป้อนแรงดันตลอดเวลาจึงใช้เพียงแหล่งจ่ายเดียวได้และเพื่อการเพิ่มสมมรรถนะของมอเตอร์แหล่งจ่ายที่ทำการทดสอบจะสามารถปรับค่าความถี่และแรงดันโดยพิกัดของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบคือมอเตอร์เหนี่ยวเฟสเดียวแบบแยกเฟสพิกัดกำลังงานเอาต์พุต 0.26 กิโลวัตต์ แรงดัน 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ กระแสอินพุต 3.47 แอมแปร์ ความเร็วรอบ 1440 รอบต่อนาที

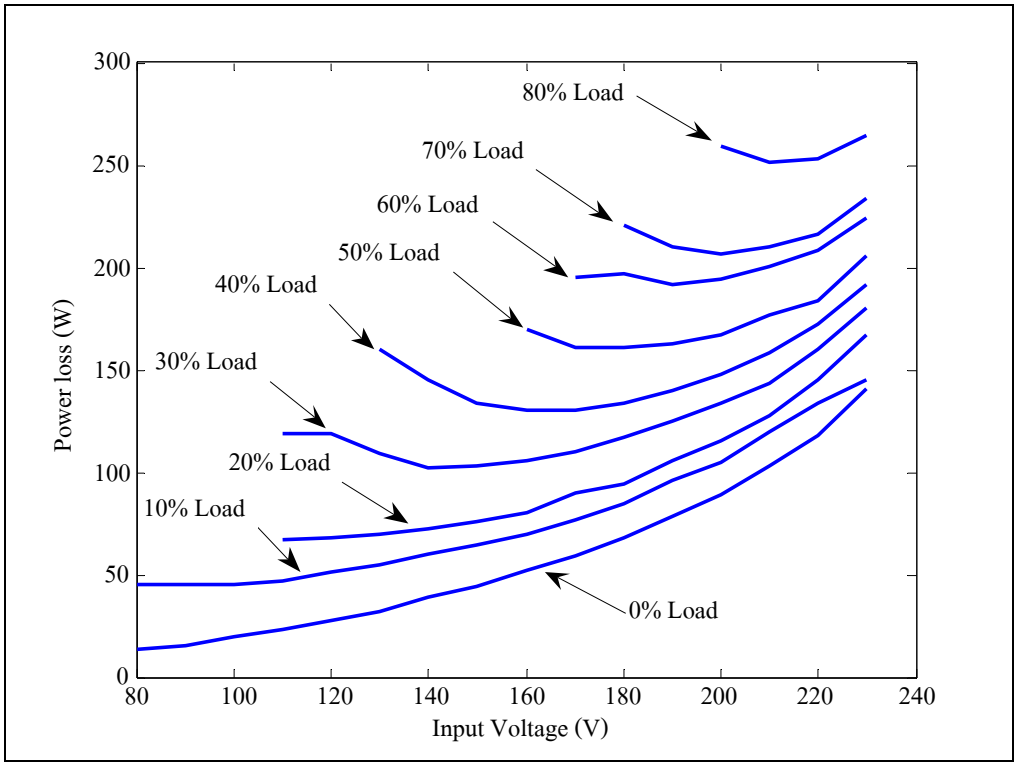
5.5.1 การทดสอบเพื่อหาค่ากำลังงานสูญเสียจากวิธีการแปรค่าแรงดันสเตเตอร์ที่ความถี่คงที่

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสผ่านระบบขับเคลื่อนในหัวข้อที่ 5.4.1 ที่ระดับแรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 80 ถึง 230 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ คงที่ที่สภาวะการจ่ายโหลดตามค่าเปอร์เซ็นต์ของกำลังงานเอาต์พุตต่าง ๆ ได้แก่ สภาวะไร้โหลด (0%) ถึง 0.208 กิโลวัตต์ (80%) โดยเพิ่มที่ละ 0.026 กิโลวัตต์ (10%) จากภาคผนวก จ. ผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสด้วยวิธีการปรับค่าแรงดันอินพุตที่ความถี่คงที่ เมื่อพิจารณาถึงกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการปรับค่าแรงดันอินพุตของมอเตอร์ในสภาวะโหลดต่าง ๆ สามารถแสดงโดยสรุปได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่ากำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ที่ค่าแรงดันอินพุตและสภาวะโหลดต่าง ๆ ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์

แรงดันอินพุต	กำลังงานสูญเสีย								
	0% โหลด	10% โหลด	20% โหลด	30% โหลด	40% โหลด	50% โหลด	60% โหลด	70% โหลด	80% โหลด
80	13.2	45.3							
90	15.7	45.1							
100	19.5	45.2							
110	22.9	46.9	67.5	119.2					
120	28.0	51.5	67.6	118.6					
130	32.2	54.5	70.0	109.1	159.8				
140	38.7	59.8	72.5	102.5	145.3				
150	44.6	64.3	76.0	103.4	133.6				
160	51.8	69.8	80.7	105.9	129.9	169.7			
170	59.4	76.7	89.9	110.5	130.1	160.9	195.1		
180	68.3	85.0	94.1	116.8	134.1	160.7	197.0	220.3	
190	78.6	95.7	105.7	125.1	140.1	163.0	191.5	209.9	
200	89.0	105.0	115.7	134.0	147.4	167.3	194.1	206.6	259.0
210	103.4	120.0	128.0	143.4	158.3	177.0	200.4	210.2	251.0
220	118.1	133.5	145.2	159.9	172.7	184.1	207.9	216.5	252.7
230	140.6	145.5	167.3	180.0	191.9	205.8	224.0	233.4	264.1

ช่วงที่ค่าแรงดันอินพุต
ไม่เพียงพอในขับโหลด



รูปที่ 5.4 ค่ากำลังงานสูญเสียของมอเตอร์เมื่อมีการปรับค่าแรงดันอินพุต
ที่สภาวะโหลดต่าง ๆ ที่ความถี่ 50 Hz

เมื่อนำค่าแรงดันอินพุตของมอเตอร์และค่ากำลังงานสูญเสียที่สภาวะโหลดต่าง ๆ มาทำการพล็อตกราฟจะได้ดังแสดงในรูปที่ 5.4 จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่สภาวะไร้โหลด 10% โหลด และ 20% โหลด กำลังงานสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันอินพุตเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงถือได้ว่าค่าแรงดันเริ่มต้นที่ทำให้มอเตอร์รับโหลดได้ เป็นจุดทำงานที่ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ส่วนกราฟที่มอเตอร์ได้รับโหลด 30 40 50 60 70 และ 80% จะเป็นลักษณะกราฟพาราโบลาที่มีจุดต่ำสุดของกราฟ ซึ่งจุดดังกล่าวถือได้ว่าเป็นจุดทำงานของมอเตอร์ที่ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียต่ำสุดที่สภาวะโหลดนั้น ๆ เพื่อความละเอียดของค่าแรงดันในตารางที่ 5.10 ที่ทำให้ได้กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดได้ทำการประมาณค่าในช่วง (interpolate) โดยใช้การประมาณค่าด้วยสมการโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 (quadratic) จะได้สัมประสิทธิ์ของสมการโพลิโนเมียลดังตารางที่ 5.4 จากการประมาณค่าดังกล่าวจะทำให้ได้ค่าแรงดันอินพุตที่ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ซึ่งถือว่าเป็นจุดทำงานของมอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับสภาวะโหลดนั้น ๆ และพิจารณาผลการลดลงของกำลังงานสูญเสียเมื่อเทียบกับกรณีฐานที่ค่าแรงดันเท่ากับ 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ดังแสดงในตารางที่ 5.5 โดยที่ค่าแรงดันอินพุตและค่ากำลังงานสูญเสีย ณ จุดทำงาน จะไม่เท่ากับค่าที่ได้จากการทดสอบเนื่องจาก

เป็นการประมาณค่าด้วยสมการโพลิโนเมียลอันดับสอง แต่ค่าดังกล่าวก็อยู่ในช่วงของค่าที่ได้จากการทดสอบ

ตารางที่ 5.4 สัมประสิทธิ์ของสมการโพลิโนเมียลที่สภาวะเปอร์เซ็นต์โหลดต่าง ๆ

เปอร์เซ็นต์โหลด	สมการโพลิโนเมียลลำดับที่สอง (ax^2+bx+c)		
	a	b	c
no-load	0.0047	-0.6824	40.4248
10%-load	0.0052	-0.9459	88.6320
20%-load	0.0078	-1.8691	181.1563
30%-load	0.0114	-3.4359	362.6867
40%-load	0.0166	-5.6137	605.2212
50%-load	0.0155	-5.5629	659.6728
60%-load	0.0186	-7.0805	867.1251
70%-load	0.0292	-11.7363	1386.1110
80%-load	0.0485	-20.6854	2456.0373

ตารางที่ 5.5 จุดทำงานของมอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับสภาวะโหลดต่าง ๆ

เปอร์เซ็นต์โหลด	การทดสอบ		เปอร์เซ็นต์การลดลงของกำลังงานสูญเสียเทียบกับกรณีฐาน (%)
	จุดทำงาน (V)	กำลังงานสูญเสีย (W)	
10%-load	94.00	45.06	66.24
20%-load	114.00	67.05	53.82
30%-load	143.00	102.19	36.09
40%-load	165.00	129.58	24.96
50%-load	175.00	160.16	13.00
60%-load	192.00	191.30	7.98
70%-load	205.00	199.00	8.08
80%-load	213.00	250.49	0.87

5.5.2 การทดสอบเพื่อหาค่ากำลังงานสูญเสียจากวิธีการแปรค่าความถี่ที่แรงดันสเตเตอร์คงที่

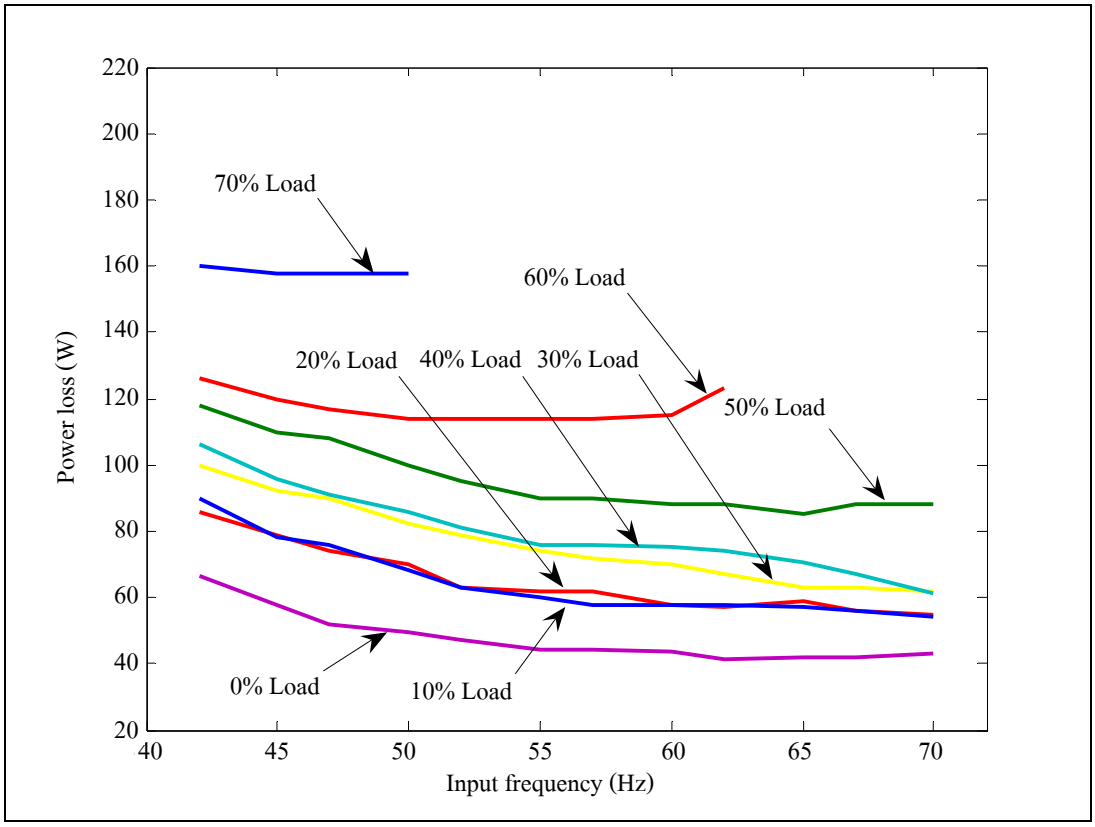
ในวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสผ่านระบบขับเคลื่อนในหัวข้อที่ 5.4.2 ที่ระดับแรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 220 โวลต์ และมีการปรับค่าความถี่อยู่ในช่วง 40-70 เฮิรตซ์ ที่สภาวะการจ่ายโหลดตามค่าเปอร์เซ็นต์ของกำลังงานเอาต์พุตต่าง ๆ จากการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวด้วยวิธีการแปรค่าความถี่ที่แรงดันสเตเตอร์คงที่ในภาคผนวก จ. พบว่าที่ค่าความถี่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความเร็วของมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นความถี่จะไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้สูงเกินไปเนื่องจากจะทำให้ความเร็วของมอเตอร์สูงเกินไปซึ่งจะทำให้เกิดมอเตอร์ได้รับความเสียหายได้

ตารางที่ 5.6 ค่ากำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ที่ค่าแรงดันอินพุตและสภาวะโหลดต่าง ๆ ที่แรงดัน 220 โวลต์

ความถี่ (Hz)	กำลังงานสูญเสีย (W)							
	0% โหลด	10% โหลด	20% โหลด	30% โหลด	40% โหลด	50% โหลด	60% โหลด	70% โหลด
42.00	66.4	86	90	100	106	118	126	160
45.00	58	79	78	92	96	110	120	158
47.00	52	74	76	90	91	108	117	158
50.00	49.6	70	68	82	86	100	114	158
52.00	47.4	63	63	79	81	95	114	ไม่สามารถขับโหลดได้
55.00	44.2	62	60	74	76	90	114	
57.00	44	62	58	72	76	90	114	
60.00	43.6	58	58	70	75	88	115	
62.00	41.6	57	58	67	74	88	123	
65.00	42.2	59	57	63	70.8	85		
67.00	42.2	56	56	63	67	88		
70.00	43	54.8	54	62	61.2	88		

เมื่อพิจารณาค่ากำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อมีการปรับค่าความถี่ที่สเตเตอร์ของมอเตอร์ในสภาวะโหลดต่าง ๆ พบว่าที่สภาวะไร้โหลดถึง 50% โหลด สามารถขับโหลดได้ทุกค่า

ความถี่ทดสอบ ที่สภาวะมอเตอร์ขับโหลดที่ 60% โหลด และ 70% โหลด จะสามารถขับโหลดด้วยความถี่สูงสุดเท่ากับ 62 เฮิรตซ์ และ 50 เฮิรตซ์ ตามลำดับ ดังแสดงได้ดัง ตารางที่ 5.21



รูปที่ 5.5 ค่ากำลังงานสูญเสียของมอเตอร์เมื่อมีการปรับค่าความถี่อินพุตที่สภาวะโหลดต่าง ๆ ที่แรงดัน 220 โวลต์

เมื่อนำข้อมูลในตารางที่ 5.6 มาพล๊อตกราฟความสัมพันธ์ของค่าความถี่อินพุตของค่าแรงดันกับกำลังงานสูญเสียดังแสดงในรูปที่ 5.5 พบว่าค่ากำลังงานสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าเปอร์เซ็นต์โหลดที่มอเตอร์ขับเคลื่อน และเมื่อพิจารณาผลจากความถี่ที่มีผลต่อกำลังงานสูญเสีย พบว่าในช่วงที่มอเตอร์ขับโหลดที่สภาวะไร้โหลดถึง 40% โหลด ค่ากำลังงานสูญเสียมีค่าลดลงเป็นลักษณะเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าค่าความถี่ที่มากที่สุดในการทดสอบทำให้เกิดค่ากำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด แต่เนื่องจากไม่สามารถเพิ่มความถี่ของแหล่งจ่ายให้สูงกว่าค่าดังกล่าวได้ เนื่องจากจะทำให้ค่าความเร็วของมอเตอร์สูงกว่าพิกัดมากเกินไป ซึ่งต่างจากที่สภาวะมอเตอร์รับโหลด 50 ถึง 70% โหลดลักษณะของค่ากำลังงานสูญเสียมีลักษณะเป็นเส้นโค้งแต่ที่ค่าความถี่สูงไม่สามารถขับโหลดที่ 60 และ 70% โหลดได้ โดยลักษณะดังกล่าวจะทำให้สามารถหาค่าความถี่ที่ทำให้ค่ากำลังงานสูญเสีย

น้อยที่สุดเพื่อการพิจารณาจุดทำงานที่เหมาะสมโดยใช้การประมาณค่าด้วยสมการโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 จะได้สัมประสิทธิ์ของสมการโพลิโนเมียลตามตารางที่ 5.7 จากสมการดังกล่าวเมื่อทำการแทนค่าความถี่ของแหล่งจ่ายที่อยู่ในช่วงของการทดสอบเพื่อหาจุดทำงานที่ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดแต่ละสภาวะการขับโหลดของมอเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 5.8 โดยที่จุดทำงานดังกล่าวคือจุดทำงานที่มอเตอร์ได้รับแรงดันอินพุตเท่ากับ 220 โวลต์

ตารางที่ 5.7 สัมประสิทธิ์ของสมการโพลิโนเมียลที่สภาวะเปอร์เซ็นต์โหลดต่าง ๆ

เปอร์เซ็นต์โหลด	สมการโพลิโนเมียลลำดับที่สอง (ax^2+bx+c)		
	a	b	c
no-load	0.0525	-6.6041	249.0883
10%-load	0.0485	-6.4579	270.8868
20%-load	0.0637	-8.2365	321.5159
30%-load	0.0383	-5.6500	269.4162
40%-load	0.0339	-5.1518	259.6994
50%-load	0.0651	-8.3675	355.1429
60%-load	0.1042	-11.0969	408.3657
70%-load	0.0667	-6.3686	309.8235

ตารางที่ 5.8 จุดทำงานของมอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับสภาวะโหลดต่าง ๆ

เปอร์เซ็นต์โหลด	การทดสอบ		เปอร์เซ็นต์การลดลงของกำลังงานสูญเสียเทียบกับกรณีฐาน (%)
	จุดทำงาน (Hz)	กำลังงานสูญเสีย (W)	
10%-load	66.60	55.91	20.12
20%-load	64.60	55.26	18.73
30%-load	70.00	62.00	24.39
40%-load	70.00	61.20	28.83
50%-load	64.2	86.26	13.74
60%-load	53.4	112.92	0.94
70%-load	47.8	157.80	0.12

5.6 สรุป

วิธีการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่ได้แสดงในบทนี้ได้พิจารณาอยู่ 2 รูปแบบ รูปแบบแรกคือการจำลองด้วยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาจุดทำงานที่เหมาะสมด้วย MATLAB Toolbox ที่ทำให้กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์น้อยที่สุด ผลการจำลองผลพบว่าที่สภาวะโหลดสูงสุด 16 นิวตัน-เมตร สามารถลดกำลังงานสูญเสียได้ 3.77% เมื่อเทียบกับกรณีฐาน รูปแบบที่สองเป็นการพิจารณากำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากผลต่างของค่ากำลังอินพุตกับค่ากำลังเอาต์พุตของมอเตอร์ที่สภาวะไม่มีโหลดและที่สภาวะมีโหลดในค่าต่าง ๆ จากการทดสอบปรับค่าแรงดันสเตเตอร์โดยค่าความถี่คงที่ พบว่าที่แต่ละค่าเปอร์เซ็นต์โหลดจะมีค่าแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดอยู่หนึ่งจุด เช่นเดียวกับการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยปรับค่าความถี่ของแหล่งจ่ายโดยที่ค่าแรงดันสเตเตอร์มีค่าคงทีจะมีค่าความถี่ที่ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด เพื่อความละเอียดของผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยทั้ง 2 วิธี จึงได้ทำการประมาณค่าในช่วงโดยใช้การประมาณค่าด้วยสมการโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าแรงดันสเตเตอร์และความถี่ของแหล่งจ่ายกับกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละสภาวะโหลด จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อมีการปรับค่าแรงดันอินพุตของมอเตอร์และสภาวะโหลดที่ 50% โหลดของกำลังงานเอาต์พุต สามารถลดกำลังงานสูญเสียได้ 13.00% อีกกรณีคือการปรับค่าความถี่ของแหล่งจ่ายและที่สภาวะโหลดที่ 50% โหลดของกำลังงานเอาต์พุต สามารถลดกำลังงานสูญเสียได้ 13.74% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสที่สภาวะโหลดต่าง ๆ ถ้ามีการปรับค่าแรงดันอินพุตและค่าความถี่ของแหล่งจ่ายให้เหมาะสมจะทำให้การใช้งานมอเตอร์มีค่ากำลังงานสูญเสียน้อยลงและเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์ให้สูงขึ้น

บทที่ 6
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการศึกษาและทำการทดสอบหลักการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสเพื่อหาจุดทำงานที่ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดของวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์แต่ละวิธี งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส โดยแบบจำลองดังกล่าวได้พัฒนามาจากแบบจำลองทางพลวัตในรูปสมการอนุพันธ์ของโครงสร้างและสมการการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ทางของมอเตอร์ในการจำลองผลด้วยกลุ่มของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิธีการงานทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่า จีนเนติกอัลกอริทึม เพื่อการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ พบว่าผลตอบสนองทางเวลาของกระแสและความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จากการจำลองผลผ่านกลุ่มพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการจีนเนติกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบและครอบคลุมในช่วงค่าแรงดันอินพุตต่าง ๆ เมื่อหาค่าความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวกับค่าแรงดันอินพุต พบว่าการประมาณค่าด้วยวิธีสปลายน์กำลังสามมีค่าคลาดเคลื่อนน้อยกว่าการประมาณค่าจากสมการเส้นตรง จากวิธีการดังกล่าวทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์กับค่าแรงดันอินพุตของมอเตอร์ โดยรายละเอียดได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 ส่วนบทที่ 4 ได้นำเสนอระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสเดียวซึ่งสามารถปรับค่าแรงดันได้ตั้งแต่ 5 โวลต์ ถึง 240 โวลต์ และปรับค่าความถี่ได้ตั้งแต่ 24 เฮิรตซ์ ถึง 100 เฮิรตซ์ ในบทนี้ได้นำเสนอหลักการทำงานและการออกแบบของวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์พร้อมกับการทดสอบสัญญาณของแรงดันและกระแสที่ได้จากระบบขับเคลื่อน ส่วนบทที่ 5 ได้นำเสนอการคำนวณกำลังงานสูญเสียที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ และผลการทดสอบการปรับค่าแรงดันสเตเตอร์โดยค่าความถี่คงที่ พบว่าที่แต่ละค่าเปอร์เซ็นต์โหลดจะมีค่าแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดอยู่หนึ่งจุด เช่นเดียวกับการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยปรับค่าความถี่ของแหล่งจ่ายโดยที่ค่าแรงดันสเตเตอร์มีค่าคงทีจะมีค่าความถี่ที่ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด เพื่อความละเอียดของผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยทั้ง 2 วิธี จึงได้ทำการประมาณค่าในช่วงโดยใช้การประมาณค่าด้วยสมการโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าแรงดันสเตเตอร์และความถี่ของแหล่งจ่ายกับกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละสภาวะโหลด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสที่สภาวะโหลดต่าง ๆ

ถ้ามีการปรับค่าแรงดันอินพุตและค่าความถี่ของแหล่งจ่ายให้เหมาะสมจะทำให้การใช้งานมอเตอร์มีค่ากำลังงานสูญเสียน้อยลง และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์สูงขึ้น มีการทดสอบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีการแปรค่าแรงดันสเตเตอร์ที่ค่าความถี่คงที่ ที่สภาวะโหลด 10% โหลด กำลังงานสูญเสียลดลง 66.24% ที่ 20% โหลด กำลังงานสูญเสียลดลง 53.82% ที่ 30% โหลด กำลังงานสูญเสียลดลง 36.06% ที่ 40% โหลด กำลังงานสูญเสียลดลง 24.96% ที่ 50% โหลด กำลังงานสูญเสียลดลง 13.00% ที่ 60% โหลด กำลังงานสูญเสียลดลง 7.98% ที่ 70% โหลด กำลังงานสูญเสียลดลง 8.08% และที่ 80% โหลด กำลังงานสูญเสียลดลง 0.87% ส่วนการทดสอบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีการแปรค่าความถี่ที่ค่าแรงดันสเตเตอร์คงที่ที่ 10% โหลด กำลังงานสูญเสียลดลง 20.12% ที่ 20% โหลด กำลังงานสูญเสียลดลง 18.73% ที่ 30% โหลดกำลังงานสูญเสียลดลง 24.39% ที่ 40% โหลด กำลังงานสูญเสียลดลง 28.83% ที่ 50% โหลด กำลังงานสูญเสียลดลง 13.74% ที่ 60% โหลดกำลังงานสูญเสียลดลง 0.94% ที่ 70% โหลด กำลังงานสูญเสียลดลง 0.12% โดยค่ากำลังงานสูญเสียที่ลดลงเทียบกับกำลังงานสูญเสียของกรณีฐานที่สภาวะแรงดัน 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์

6.2 ข้อเสนอแนะ

1) การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยจีนเนติกอัลกอริทึม ซึ่งจะมีการวัดตอบสนองทางเวลาของกระแสและความเร็วของมอเตอร์เป็นค่าที่สภาวะมอเตอร์ไร้โหลดเพื่อเป็นค่าอ้างอิงกับผลตอบสนองทางเวลาของกระแสและความเร็วที่ได้จากการจำลองผลจากกลุ่มของพารามิเตอร์ที่ค้นหาได้จากกระบวนการจีนเนติกอัลกอริทึมแต่การพิจารณากำลังงานสูญเสียเป็นการพิจารณาที่สภาวะมอเตอร์ได้รับโหลดค่าต่าง ๆ ดังนั้น ควรวัดผลตอบสนองทางเวลาของกระแสและความเร็วที่สภาวะโหลดต่าง ๆ เพื่อความถูกต้องของพารามิเตอร์ที่เกิด ณ สภาวะโหลดนั้น ๆ

2) ในส่วนการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟสด้วยแหล่งจ่ายที่สามารถปรับค่าแรงดันอินพุตและความถี่ได้ ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการปรับค่าแรงดันอินพุตโดยกำหนดให้ค่าความถี่มีค่าคงที่ 50 เฮิรตซ์ และในส่วนของการปรับค่าความถี่ของแหล่งจ่ายมีการกำหนดค่าแรงดันอินพุตไว้ที่ 220 โวลต์ ดังนั้นควรมีการเปลี่ยนค่าแรงดันและค่าความถี่ในการทดสอบให้มีช่วงของการทดสอบให้กว้างขึ้นเพื่อการพิจารณาจุดทำงานที่ถูกต้องมากขึ้น

3) ควรมีการศึกษาวิธีควบคุมการปรับค่าแรงดันและความถี่ของแหล่งจ่าย โดยการรับค่าพารามิเตอร์ที่ส่งกลับมาจากมอเตอร์เพื่อปรับค่าแรงดันและความถี่ เพื่อให้เกิดกำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุดที่สภาวะการทำงานของมอเตอร์ ณ เวลานั้น ๆ

รายการอ้างอิง

กองพล อารีรักษ์ (2542). ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 1.5 แรงม้าที่ใช้พลังงานอย่างเหมาะสม. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**: 5-35.

ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์ และ นิรันดร์ แนวเงินดี (2548). แบบจำลองและการจำลองผลมอเตอร์แบบแยกเฟสโดยพิจารณาการทำงานของสวิตช์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์. **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EECON28).** ณ โรงแรมเพิร์ล วิลเลจ จังหวัดภูเก็ต วันที่ 20-21 ตุลาคม: 573-576.

นิรันดร์ แนวเงินดี และ ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์ (2550). การค้นหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวด้วยจีนเนติกอัลกอริทึม. **การประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษา มทส. ครั้งที่ 1.** ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา.

ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2546). **ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม.** กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Abdel-Rahim, N. and Shaltout, A. (2002). Operation of Single-Phase Induction Motor as Two-Phase Motor. **IECON 2002.** 2: 967-972.

Ba-thunya, A.S., Khopkar, R., Kexin, Wei., and Toliyat, H.A. (2001). Single phase induction motor drives-a literature survey., **IEMDC 2001. IEEE International 2001**: 911-916.

Benbouzid, M.E.H., Beguenane, R., and Capolino, G.A. (1996). Single-phase capacitor motor efficiency improvement by means of voltage control., **MELECON '96.** 1: 302-305.

Bhag, S., Guru., and Huseyin, R., Hiziroglu. (2001). **Elevtric Machinery and Transformers.** 3. New York. Oxford University Press Inc.

Chee-Mun, ong. (1998). **Dynamic Simulation of Electric machinery using Matlab/Simulink**. New Jersey. Prentice Hall.

Collins, E.R., Jr., Boyd, P.B., and Smith, A.O. (1993). Improved methods for determining the equivalent circuit parameters for single-phase induction motor models. **Industry Applications Society Annual Meeting.** 1: 390-397.

Correa, M., Jacobina, C.B., Lima, A.M.N., and da, Silva, E.R.C. (2002). Adjustable-speed single-phase induction motor drive. **APEC 2002.** 2: 770-776.

Collins, E.R. Jr., and Ashley, R.E. III. (1991). Operating Characteristics of Single-Phase Capacitor Motors Driven from Variable Frequency Supplies. **Industry Applications Society Annual Meeting, Conf,IEEE.** 1: 52-57.

Metwally, H.M.B. (2001). New method for speed control of single-phase induction motor with improved motor performance., **Energy Conversion & Management.** 42: 941-950.

Mademlis, C., Kioskeridis, I., and Theodoulidis, T. (2005).Optimization of Single-Phase Induction Motor Part I : Maximum Energy Efficiency Control. **IEEE Transactions on Energy Conversion.** 20(1): 187-195.

Naewngerndee, N., Sukcharoen C., Kulworawanichpong, T. (2006). Optimizing Voltage-Frequency Control Strategy for Single-Phase Induction Motor Drives. **The 5th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering (AEE' 06).** 1: 84-89.

Naewngerndee, N., Sukcharoen C., Kulworawanichpong, T. (2006). Simulation of Single-Phase Induction Motor Drives with Non-sinusoidal Power Supply. **The5th WSEAS Transactions on systems.** 5(5): 1029-1034.

Naewngerndee, N., Kulworawanichpong, T. (2009). Voltage-dependent Parameter Refinement for Single-phase Induction Motors using Genetic Algorithms", **The WSEAS Transactions on systems and control.** 1(4): 45-54.

Naewngerndee, N., Kulworawanichpong, T. (2008). Refinement of Single-phase Induction Motor Parameters using Genetic Algorithms. **The WSEAS International Conference on Power (Power'08).**

Ojo, O., Omozusi, O. (2001). Parameter estimation of single-phase induction machines.,**IEEE Industry Applications Conference.** 4: 2280-2287.

Krause, P.C., Oleg, Wasynezuk., and Acott, D., sudhoff., (1987). **Analysis of Electric Machines.** 1. New York. McGraw-Hill.

Peter, Vas. (1993). **Parameter Estimation Condition Monitoring and Diagnosis of Electrical Machines.** 1. Oxford. Clarendon Press.

ภาคผนวก ก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

1. แบบจำลองและการจำลองผลมอเตอร์แบบแยกเฟสโดยพิจารณาการทำงานของสวิตช์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์. **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EECON28).** ณ โรงแรมเพิร์ล วิลเลจ จังหวัดภูเก็ต 20-21 ตุลาคม 2548 หน้า 573-576.

2. การค้นหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวด้วยจีนเนติกอัลกอริทึม. **การประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษา มทส. ครั้งที่ 1.** ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา.

3. Optimizing Voltage-Frequency Control Strategy for Single-Phase Induction Motor Drives. **WSEAS Trans. Systems.** Issue 5. Volume 5. pp. 913-918, May 2006.

4. Simulation of Single-Phase Induction Motor Drives with Non-sinusoidal Power Supply. **Proc. 5th WSEAS Int. Conf. Application of Electrical Engineering (AEE'06).** pp. 6-11, 12-14 March 2006.

5. Voltage-dependent Parameter Refinement for Single-phase Induction Motors using Genetic Algorithms. **The WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS and CONTROL.** Issue 1. Volume 4. pp. 45-54 , January 2009.

6. Refinement of Single-phase Induction Motor Parameters using Genetic Algorithms. **The WSEAS International Conference on Power (Power'08).** Venice, Italy, 23- 25 November 2008.

Voltage-dependent Parameter Refinement for Single-phase Induction Motors using Genetic Algorithms

N. NAEWNGERNDEE & T. KULWORAWANICHPONG*
Power System Research Unit, School of Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
111 University Avenue, Nakhon Ratchasima, THAILAND 30000
* Corresponding author: thanatchai@gmail.com

Abstract: - This paper presents a genetic-based approach to correct the parameters for single-phase induction motors in various supply voltage levels. From conventional tests, electrical (resistances and inductances) and mechanical (moment of inertia and damping coefficient) parameters of the stator and the rotor can be estimated. The set of obtained parameters is able to apply for steady-state performance analyses. In transient states, motor responses generated by these parameters are not met the condition of acceptable accuracy. By some efficient search method incorporate with experimental data, the obtained parameters can be refined to yield the best curve fitting in both transient and steady-state responses. A 0.37-kW, 220 V, 50 Hz single-phase induction motor was used for test to verify the effectiveness of the proposed algorithm. Furthermore, with six different motor supply voltages, voltage-dependent parameters of single-phase induction motors can be established. As a result, the voltage-dependent parameters of the induction motors can be satisfactorily improved to represent the motor dynamic in various supply voltages.

Key-Words: - Single-phase induction motor, Space-phasor model, Voltage-dependent parameter, Genetic algorithm, Retardation test, blocked-rotor test, No-load test.

1 Introduction

To date, three-phase induction motors have been increasingly important for industrial electric motor applications. It should note that there still exist DC motors in some limited applications, e.g. motors for vehicles. Apart from a large-size electric motor drive, single-phase induction motors are commonly used in household electric motor applications. These applications typically consume the power of a fractional horse power up to around ten horse powers. Although most electric appliances require a few amount of kilo-watt input, minimizing power losses during their operation gives a great benefit resulting in nationwide electric energy used by householders.

In general, single-phase motors are controlled by a thyristor-phase controller or a variable resistor. This is quite simple, but it is not efficient in terms of energy consumption. To achieve this goal, complex control strategy cannot be avoid as long as ac machines are involved. One of widely-used control schemes is variable-voltage, variable-frequency (VVVF) [1]. It can be applied for motor control in many forms. However, this control strategy does not guarantee minimum loss operation. Therefore, adjustable frequency and voltage of the power supply is more flexible and can lead to more economical operation of household electric appliances. To achieve these goals, model-based algorithms must be developed. Motor parameters obtained by conventional test schemes need to be corrected to support the high performance drives.

Over half a century, steady-state analysis of induction motors has become a powerful tool to characterize their performances [2-4] It is fairly good in describing steady-state behaviours. For simple control where accuracy and precision are not that much important, any steady-state model is moderate. However, nowadays, a very accurate torque-speed control of induction motors via the space phasor theory, called vector control [5,6], is increasingly required by industries [7,8]. Thus, accurate parameter identification of induction motors is challenged. Although many methods of parameter identification [8-12] have been proposed within the last decade, so far there is no strong evidence to verify their use.

In this paper, an alternative approach based on some efficient intelligent search techniques was introduced. The space phasor modelling was employed to represent induction motors. Parameters appeared in complex space phasor equations can be adjusted by using a simple tuning procedure proposed in this paper. One efficient intelligent search technique, Genetic Algorithm (GA) [13], was used to illustrate this identification by using parameter information obtained from the

conventional tests. Also, comparisons among results obtained by the use of the intelligent identification technique and the conventional technique were examined. With six different supply voltages that can possibly feed the motor stator by means of reduced voltage operation, sets of voltage-dependent parameters for single-phase induction motors were illustrated.

This paper contains six sections. Modeling of the single-phase induction motor in the space phasor expression was reviewed in the next section. Section 3 gave conventional tests for obtaining those motor's parameters. Section 4 illustrated methodology for voltage-dependent parameter refinement based on genetic algorithms. Section 5 presented simulation results and Section 6, the last section, was the conclusion.

2 Modeling of Single-phase Induction Motors

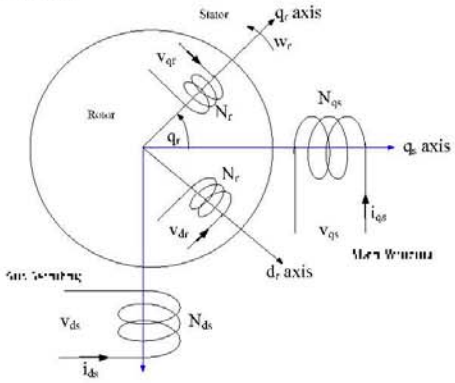


Fig. 1 Winding alignment of a single-phase motor

Single-phase induction motors can be characterized by several different models. The space-phasor approach [2,4] is the method used in this paper. With this model, motor currents, torque and speed can be observable. The space-phasor model is very complicated and needs more space for explanation. However, in this paper only a brief description is presented as follows.

Fig. 1 describes winding alignment of a single-phase induction motor consisting of main and auxiliary windings with their induced voltages and currents. As shown in the figure, a stationary reference frame which is along the axis of the main stator winding is defined and used for mathematical analysis throughout this paper. It is essential to inform that all quantities especially on the rotor need to be transferred to the stator axis. This can be performed by using the following transform matrix.

$$\begin{bmatrix} V_{qr}^{s} \\ V_{dr}^{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\theta_r & sin\theta_r \\ -sin\theta_r & cos\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{qr}^{r} \\ v_{dr}^{r} \end{bmatrix} \quad (1)$$

The superscripts s and r indicate the reference axis in which the variable belongs to. The dynamic machine model for a single-phase induction motor with squirrel-cage rotor in a stationary reference can be expressed as follows [15].

$$\frac{d}{dt}\lambda_{qs} = -r_{qs}i_{qs} + v_{qs} \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt}\lambda'_{ds} = -r'_{ds}i'_{ds} + v'_{ds} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt}\lambda'^{s}_{qr} = -r'_r i'^{s}_{qr} + \omega_r \lambda'^{s}_{dr} \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt}\lambda'^{s}_{dr} = -r'_r i'^{s}_{dr} - \omega_r \lambda'^{s}_{qr} \quad (5)$$

By rearranging (2) – (5) based on flux linkage and current relations of the single-phase induction motor, the state-space model, in which stator and rotor currents, and rotor speed are state variables, can be formed.

$$\frac{d}{dt}[x] = [A][x] + [B][u] \quad (6)$$

$$[y] = [C][x] \quad (7)$$

Where

$$[x] = \begin{bmatrix} i_{qs} & i'_{ds} & i'^{s}_{qr} & i'^{s}_{dr} & \omega_r \end{bmatrix}^T$$

$$[A] = [G]^{-1}[M]$$

$$[B] = [G]^{-1}[N]$$

$$[G] = \begin{bmatrix} L_{lqs}+L_{mq} & 0 & L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L'_{lds}+L_{mq} & 0 & L_{mq} & 0 \\ L_{mq} & 0 & L'_{lr}+L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{mq} & 0 & L'_{lr}+L_{mq} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[M] = \begin{bmatrix} -r_{qs} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r'_{ds} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X_m & -r'_r & X'_r & 0 \\ X_m & 0 & -X'_r & -r' & 0 \\ \alpha i'^{s}_{dr} & -\alpha i'^{s}_{qr} & 0 & 0 & -\frac{B_m}{J_m} \end{bmatrix}$$

$$[N] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{J_m} \end{bmatrix}$$

$$X_m = \omega_r L_{mq}, X'_r = \omega_r \left(L'_{lr} + L_{mq}\right), \alpha = \frac{P \cdot L_{mq}}{2J_m}$$

$i_{as}, i_{ar}, i'_{as}, i'_{bs}, \lambda_{as}, \lambda'_{ar}, \lambda'_{as}, \lambda'_{bs}$ are the current and flux linkage of the stator and rotor windings. L_{ls}, L'_{lr}, L'_{lb} are the leakage inductances of the stator and rotor windings. L_{sr} is the stator-rotor mutual inductance. r_s, r'_r, r'_b are the stator and rotor resistances. All variables and parameters are referred to the stationary main-winding reference. J_m is motor's moment of inertia and B_m is damping coefficient.

Applying a numerical time-stepping method to solve a set of differential equations, motor currents, angular speed and position can be calculated numerically.

3 Conventional Tests of the Single-phase Induction Motor

In practice, winding resistances, main and auxiliary (if any) windings, of the single-phase induction motor can be determined accurately. Leakage and magnetizing inductances are practical problems. These values vary considerably according to the motor operating state, transient or steady-state. The inductances calculated from the conventional tests can be fairly used when the steady-state analysis is involved. It is because these conventional tests are performed in the steady-state operation. In this paper, detail of the conventional tests is not necessarily discussed because readers can find this associated information from several research articles or even some well-known textbooks [11,15]. Briefly, the conventional tests for the electrical parameters can be categorized in two procedures, the blocked-rotor and the no-load tests. Each of which is also divided by winding configuration to be i) auxiliary winding opened and ii) main winding opened.

3.1 Auxiliary winding opened

This test performed by disconnecting the auxiliary winding from the main winding. For blocked-rotor test, an equivalent circuit representing the circuit connection is shown in Fig. 2.

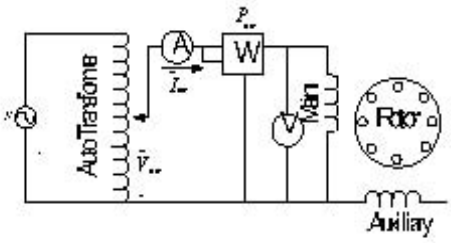


Fig. 2. Blocked-rotor test of auxiliary winding opened

From this test, input impedance, total resistance and total reactance of the circuit can be determined by (8) – (10). With stator resistance information from the winding resistance tests e.g. volt-ampere method or direct ohmic measurement, effective resistance and leakage reactance of the rotor bars can be calculated by using (11) – (12), respectively.

$$Z_{bm} = \frac{V_{bm}}{I_{bm}} \tag{8}$$

$$R_{bm} = \frac{P_{bm}}{I_{bm}^2} \tag{9}$$

$$X_{bm} = \sqrt{Z_{bm}^2 - R_{bm}^2} \tag{10}$$

$$R_{bm} = R_1 + R_2 \tag{11}$$

$$X_{bm} = X_1 + X_2 \tag{12}$$

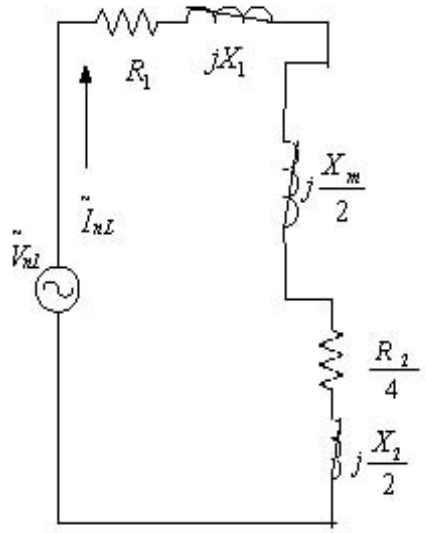


Fig. 3. No-load test of auxiliary winding opened

For the no-load test, an equivalent circuit representing the schematic connection is shown in Fig. 3.

From this test, magnetizing reactance of the circuit can be determined by (13) – (16).

$$Z_{nL} = \frac{V_{nL}}{I_{nL}} \tag{13}$$

$$R_{nL} = \frac{P_{nL}}{I_{nL}^2} \tag{14}$$

$$X_{nL} = \sqrt{Z_{nL}^2 - R_{nL}^2} \tag{15}$$

$$X_M = 2X_{nL} - 1.5X_{bm} \tag{16}$$

3.2 Main winding opened

This test performed by disconnecting the main winding from the main winding. For blocked-rotor test, an equivalent circuit representing the circuit connection is shown in Fig. 4.

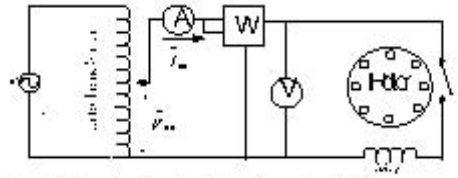


Fig. 4. Blocked-rotor test of main winding opened

This test is employed in order to determine the effective turn ratio of the auxiliary winding to the main winding by executing (17) – (19).

$$R_{bb} = \frac{P_{bb}}{I_{bb}^2} \tag{17}$$

$$R_{ba} = R_{bb} - R_a \tag{18}$$

$$a = \sqrt{\frac{R_{ba}}{R_a}} \tag{19}$$

3.3 Retardation test

Mechanical parameters, the rotor inertia and the viscous friction coefficient, can be determined by the test of retardation. This test performed by applying the rated stator voltage. The rotor is accelerating to its no-load speed. Without any connection of additional inertia mass coupling to the rotor shaft, the rotor will be decelerated from the no-load speed down to zero dependent on its rotor inertia only. By observing this deceleration, the rotor moment of inertia can be approximated.

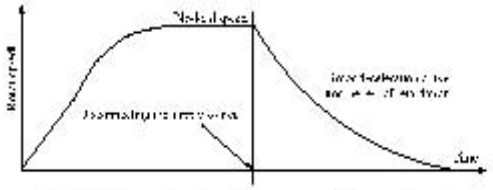


Fig. 5. Rotor deceleration curve for machine's retardation

4 GAs for Parameter Refinement

There exist many different approaches to adjust the motor parameters. The GAs is well-known [16,17], there exist a hundred of works employing the GAs technique to identify system parameters in various forms. The GAs is a stochastic search technique that leads a set of population in solution space evolved using the principles of genetic evolution and natural selection, called genetic operators e.g. crossover, mutation, etc. With successive updating new generation, a set of updated solutions gradually converges to the real solution. Because the GAs is very popular and widely used in most research areas [16-21] where an intelligent search technique is applied, it can be summarized briefly as shown in the flowchart of Fig. 6 [18].

In this paper, the GAs is selected to build up an algorithm to refine all motor parameters (all resistances and inductances, the rotor inertia and the friction coefficient). To reduce programming complication, the Genetic Algorithms (GADS TOOLBOX in MATLAB [17]) is employed to generate a set of initial random parameters. With the searching process, the parameters are adjusted to give response best fitting close to the desired response based on the minimum least square error.

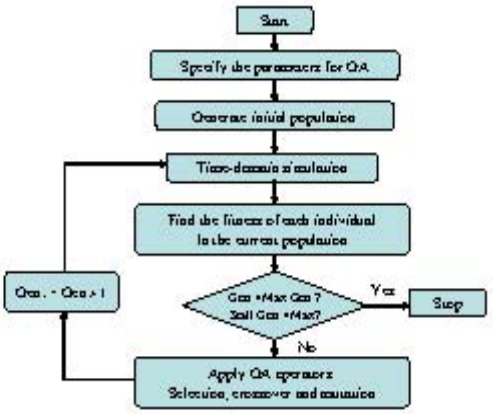


Fig. 6. Flowchart of the GAs procedure

5 Voltage-dependent Parameters

The key assumption made in this research is that motor's parameters are not constant for all operating conditions. They can be varied from one operating condition to others. However, some parameters can be considered as fixed parameters. These are the rotor inertia and the damping coefficient. They are mechanical parameters and their values do not change with electrical excitation. The electrical excitation can be categorized into current and voltage excitations. The current excitation depends on a mechanical loading condition. This excitation strongly results in change of winding resistances due to material thermal characteristics and leakage inductances due to magnetic saturation of magnetic cores.

In this paper, only voltage-dependent parameters are emphasized. The tests can be conducted by varying the 50-Hz single-phase supply voltage source of 220 V, 200 V, 180 V, 160 V, 140 V and

120 V. Neglecting all loading conditions, no-load tests for the six supply voltages are performed. No-load speeds are recorded for each case and used for parameter refinement. With the help of genetic algorithms, accurate parameters for each supply voltage can be obtained.

6 Results and Discussion

To examine the effectiveness of the proposed intelligent identification, a 0.37-kW, 220-V, 50-Hz, single-phase, squirrel-cage induction motor was used for test as shown in Fig. 7.

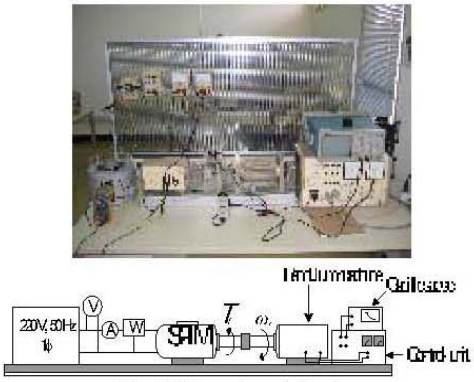


Fig. 7. Experimental setup

With the conventional resistance, no-load, blocked-rotor and retardation tests, the parameters of the single-phase induction motor can be obtained as follows.

Resistance Test:

Main winding resistance = 7.3 Ω

Auxiliary winding resistance = 1.3 Ω

No-load and blocked-rotor tests:

	Voltage	Current	Power
With the auxiliary winding opened			
No-load test	220 V	2.8 A	120.6 W
Blocked-rotor test	99.6 V	3.47 A	194.5 W
With the main winding opened			
Blocked-rotor test	100.7 V	3.17 A	296.5 W

The estimated parameters are listed below.

$r_{qs} = 7.3\ \Omega$, $r_r = 8.8533\ \Omega$, $r_{ds} = 21.3\ \Omega$,
$L_{lqs} = 0.03776$ H, $L_{lds} = 0.03243$ H,
$L_{lr} = 0.03776$ H, $L_{mqs} = 0.03772$ H,

Retardation test: (Result shown in Fig. 8)

The estimated rotor inertia is 0.784 kg-m^2.

With the parameters obtained by using the conventional tests, the simulation result of the motor speed at the rated voltage can be compared against the experimental result as shown in Fig. 9.

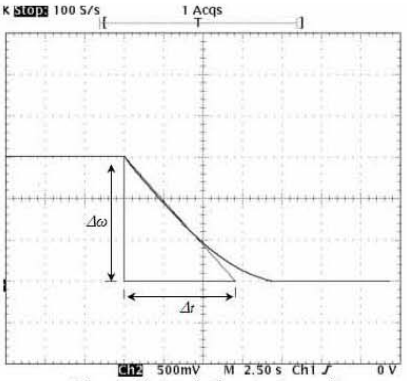


Fig. 8. Retardation test result

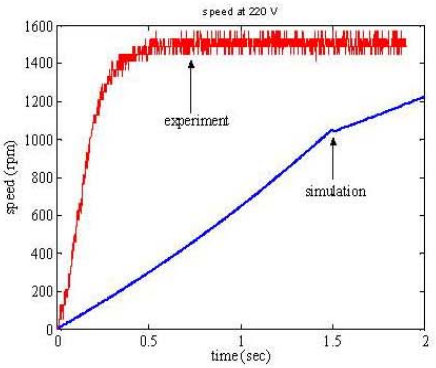


Fig. 9. Simulation result using a set of parameters from the conventional tests (220 V)

As can be seen, the response of the simulation result is able to satisfactorily fit the experimental data in the steady-state condition only. This parameter set is not suitable to be used for the parameters of the space phasor model where the transient behavior is typically an important issue.

To correct the parameters for appropriate use with the space phasor model, some refinement technique to adjust those obtained parameters from the conventional tests must be applied. For intelligent identification, the GAs is employed. The followings describe parameter setting and search space (set arbitrarily) for the GAs used in this paper.

Number of population = 100

Crossover probability = 70%
Mutation probability = 4.7%

From the parameter setting given above with initial values from the conventional tests, the rotor speed can be simulated within the GAs loop through the space phasor equations as described in Section 2. When one of the termination criteria is met, the search process is terminated. Hence, a set of the best parameters, as shown in Table 1, that fit to the experimental data can be found. Fig. 10 shows the convergence of the search process performed by using the GAs.

Table 1. Variable limits (search space):

Parameter	Minimum	Maximum
r_{qs}	5	15
r_r	5	15
r_{ds}	20	50
L_{lqs}	0.01	0.05
L_{lr}	0.01	0.05
L_{lds}	0.01	0.06
L_{mqs}	0.1	0.6
J_m	0.003	0.02
B_m	0	0.004

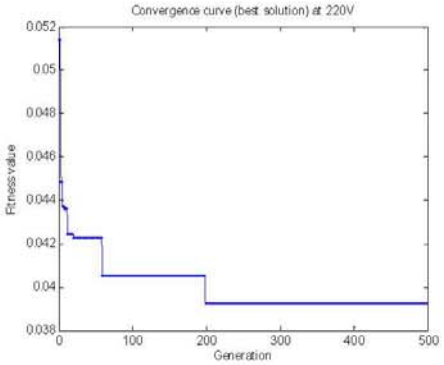


Fig. 10. Solution convergence for 220-V case

Table 2. Optimal parameters for 220-V case

Parameter	Optimal value
r_{qs}	5.5219 Ω
r_r	11.94 Ω
r_{ds}	26.937 Ω
L_{lqs}	0.030599 H
L_{lr}	0.048808 H
L_{lds}	0.041793 H
L_{mqs}	0.37862 H
J_m	0.008788 kg-m^2
B_m	0.000552 kg-m/s

With the parameters obtained by using the search, the simulation result of the motor speed can be compared against the experimental result as shown in Fig. 11.

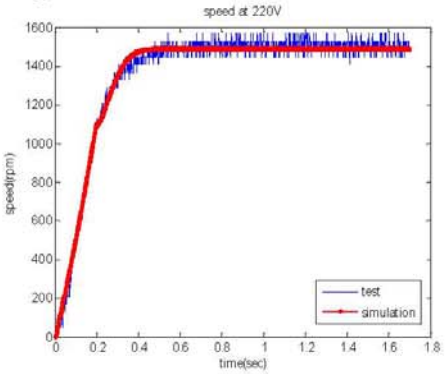


Fig. 11. Simulation result using the set of parameters from the GAs (220-V case)

In the same manner, parameters for each voltage case can be obtained and summarized in Table 3-7. Fig. 12, 14, 16, 18 and 20 are solution convergences of GA search results for 200-V, 180-V, 160-V, 140-V and 120-V cases, respectively. Fig. 13, 15, 17, 19 and 21 are comparison of the test result and the best-fit of the simulated motor speed for other five respective cases.

Table 3. Optimal parameters for 200-V case

Parameter	Optimal value
r_{qs}	6.0995 Ω
r_r	8.3755 Ω
r_{ds}	24.595 Ω
L_{lqs}	0.037003 H
L_{lr}	0.024528 H
L_{lds}	0.025479 H
L_{mqs}	0.40243 H
J_m	0.008788 kg-m^2
B_m	0.000552 kg-m/s

Table 4. Optimal parameters for 180-V case

Parameter	Optimal value
r_{qs}	6.2126 Ω
r_r	7.4612 Ω
r_{ds}	36.18 Ω
L_{lqs}	0.028312 H
L_{lr}	0.024079 H
L_{lds}	0.051837 H
L_{mqs}	0.44792 H
J_m	0.008788 kg-m^2
B_m	0.000552 kg-m/s

Table 5. Optimal parameters for 160-V case

Parameter	Optimal value
r_{qs}	6.7585 Ω
r_r	6.1975 Ω
r_{ds}	36.626 Ω
L_{lqs}	0.02674 H
L_{lr}	0.020242 H
L_{lds}	0.04168 H
L_{mqs}	0.5004 H
J_m	0.008788 kg-m^2
B_m	0.000552 kg-m/s

Table 6. Optimal parameters for 140-V case

Parameter	Optimal value
r_{qs}	6.2702 Ω
r_r	7.1434 Ω
r_{ds}	36.305 Ω
L_{lqs}	0.036223 H
L_{lr}	0.018638 H
L_{lds}	0.049867 H
L_{mqs}	0.51775 H
J_m	0.008788 kg-m^2
B_m	0.000552 kg-m/s

Table 7. Optimal parameters for 120-V case

Parameter	Optimal value
r_{qs}	7.4503 Ω
r_r	5.6556 Ω
r_{ds}	45.809 Ω
L_{lqs}	0.032499 H
L_{lr}	0.015448 H
L_{lds}	0.031344 H
L_{mqs}	0.55269 H
J_m	0.008788 kg-m^2
B_m	0.000552 kg-m/s

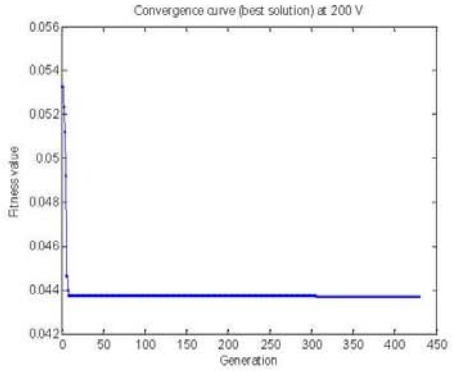


Fig. 12. Solution convergence for 200-V case

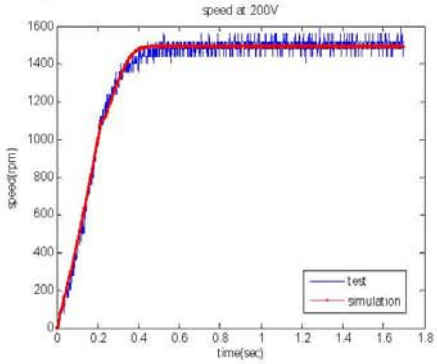


Fig. 13. Simulation result using the set of parameters from the GAs (200-V case)

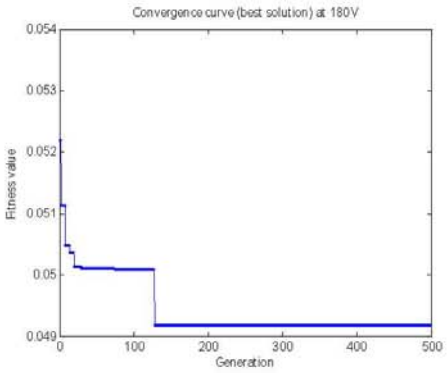


Fig. 14. Solution convergence for 180-V case

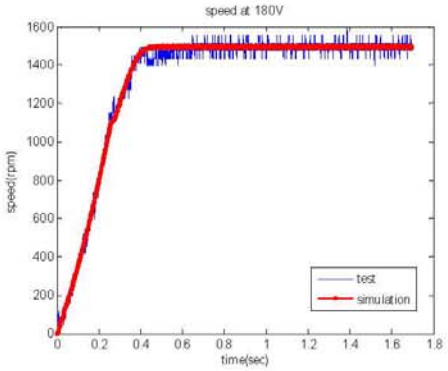


Fig. 15. Simulation result using the set of parameters from the GAs (180-V case)

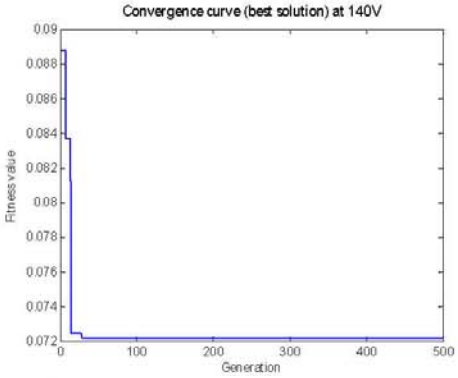


Fig. 18. Solution convergence for 140-V case

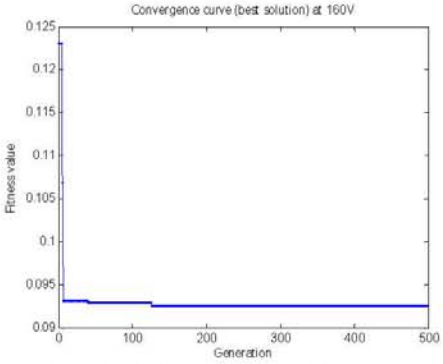


Fig. 16. Solution convergence for 160-V case

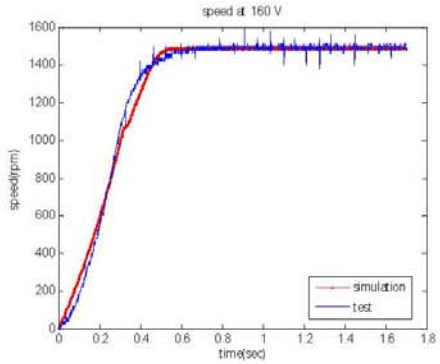


Fig. 17. Simulation result using the set of parameters from the GAs (160-V case)

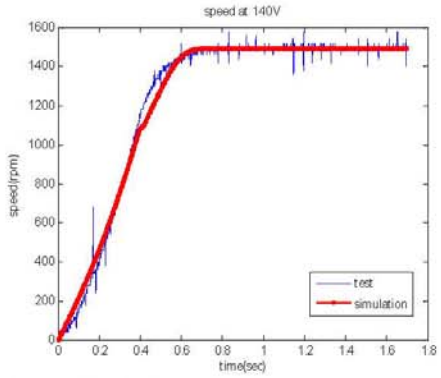


Fig. 19. Simulation result using the set of parameters from the GAs (140-V case)

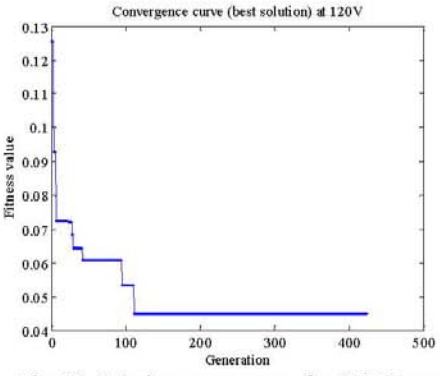


Fig. 20. Solution convergence for 120-V case

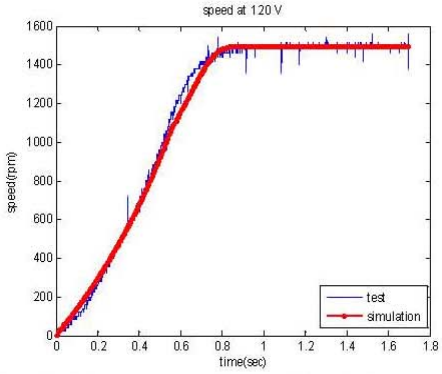


Fig. 21. Simulation result using the set of parameters from the GAs (120-V case)

With the refined parameters obtained in this paper, control and drive of single-phase induction motors can be performed more accurately. Parameter-based or model-reference approaches can be used extensively to a wide range of applications. Fig. 20 concludes the simulated speed response of all cases in comparative with their corresponding experimental result.

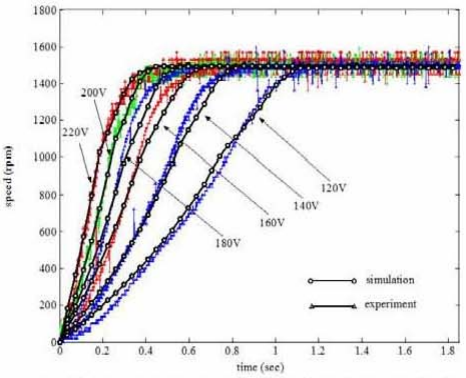


Fig. 20. Comparison among simulation and test results for six voltage cases

7 Conclusion

This paper illustrates an intelligent approach to estimate dynamic parameters of a single-phase induction motor. Due to the complication of the space phasor equations describing dynamic behaviors of the single-phase induction motor, the parameters can be roughly estimated through conventional tests (no-load, blocked-rotor and retardation tests). These tests are based on the steady-state analysis. Therefore, they may cause inaccurate estimation, especially when transient characteristics are interested. In this paper, some efficient intelligent search technique, Genetic Algorithms (GAs), is employed to demonstrate this intelligent identification. With the additional key assumption made in this paper, some parameters are voltage-dependent and can be varied due to the supply voltage. In single-phase motor applications, reduced voltage control is typical for domestic-based electric appliances due to its lower cost. As a result, the speed response simulated from the proposed method satisfactorily fits to that obtained from the experiment. In comparison with the conventional parameter tests, the effectiveness of the proposed scheme is confirmed.

8 Acknowledgement

The authors would like to acknowledge the financial support of the research grant (MRG5080029) sponsored by the Thailand Research Fund, during a period of this work.

References:

[1] P.C. Krause, *Analysis of Electric Machines*, McGraw-Hill, 1987.

[2] N. Naewngerndee, C. Sukcharoen, T. Kulworawanichpong, "Simulation of Single-Phase Induction Motor Drives with Non-sinusoidal Power Supply". *The WSEAS Transactions on Systems*, Issue 5, Vol 5, pp. 1029-1034, 2006

[3] R. Krishnan, *Electric motor drives – modelling, analysis and control*, Prentice-Hall, 2001

[4] S. Raweekul, T. Kulworawanichpong, S. Sujitjorn, "Parallel -Connected Single -Phase Induction Motor:Modelling and Simulation", *The WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, Issue 3, Vol 5, pp. 377-384

[5] J.W.L. Nerys, A. Hughes & J. Corda, Alternative implementation of vector control for induction motor and its experimental evaluation, *IEE Proceedings-Electric Power Applications,* 147(1), 2000, pp. 7–13.

[6] M. Yano & M. Iwahori, Transition from slip-frequency control to vector control for induction motor drives of traction applications in Japan, *The 5th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, 2003, Saitama, Japan, pp. 1246–1251.

[7] S. Shinnaka, S. Takeuchi, A. Kitajima, F. Eguchi & H. Haruki, Frequency-hybrid vector control for sensorless induction motor and its application to electric vehicle drive, *IEEE 16th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001*, Yokohama, Japan, pp. 32–39.

[8] M. Benhaddadi, K. Yazid & P. Khaldi, An effective identification of rotor resistance for induction motor vector control, *Proc. IEEE Instru. and Meas. Tech. Conf.*, 1997, Ottawa, Canada, pp. 339–342.

[9] M.J. Duran, M.J. Martinez, P. Duran, J.L. Perez, F.M. Hidalgo & J. F. Moreno, Improved sensorless induction machine vector control with on-line parameters estimation taking into account the deep-bar and thermal effects, *IEEE 28th Annual Conf. on Industrial Electronics Society*, 2002, Malaga, Spain, pp. 1716-1720.

[10] T. Hamajima, M. Hasegawa, S. Doki & S. Okuma, Sensorless vector control of induction motor with stator resistance identification based on augmented error, *Proc. Power Conversion Conf.*, 2002, Osaka, Japan, pp. 504 – 509.

[11] P. Vas, *Parameter estimation, condition monitoring, and diagnosis of electrical machines*, Oxford University Press, 1993.

[12] K.S. Huang, Q.H. Wu & D.R. Turner, Effective identification of induction motor parameters based on fewer measurements, *IEEE Trans. On Energy Conversion*, 17(1), 2002, pp. 55–60.

[13] L. Feng, Z. Hongtao & Y. Qiwen, Sensorless vector control of induction motors based on online GA tuning PI controllers, *The 5th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, 2003, Saitama, Japan, pp. 222–225.

[14] M.B. Correa, C.B. Jacobina, E.R.C. da Silva & A.M.N. Lima, Vector control strategies for single-phase induction motor drive systems, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 51, Issue 5, 2004, pp. 1073 – 1080.

[15] B.S. Guru. *Electric machinery and transformers*, Oxford University Press, 2001.

[16] D.E. Goldberg, and D. Edward, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Wiley, 1989.

[17] The MathWorks Inc., *Genetic Algorithms and Direct Search TOOLBOX*, CD-ROM Manual, 2004.

[18] K. Somsai, A. Oonsivilai, A. Srikaew, and T. Kulworawanichpong, Optimal PI controller design and simulation of a static var compensator using MATLAB's SIMULINK, *The 7th WSEAS International Conference on POWER SYSTEMS*, Beijing, China, pp. 30 – 35.

[19] T. Charuwat, T. Kulworawanichpong, Genetic based distribution service restoration with minimum average energy not supplied, *The 8th International Conference on Adaptive and Natural Computing Algorithms (ICANNGA2007)*, 11–14 April 2007, pp. 230-239.

[20] T. Kulworawanichpong, K-L. Areerak, K-N. Areerak, P. Pao-la-or, P. Puangdownreong, S. Sujitjorn, Dynamic parameter identification of induction motors using intelligent search techniques, *The 24th IASTED Int. Conf. Modelling, Identification, and Control (MIC 2005)*, Austria 2005, pp. 328-332.

[21] M. Rashidi, F. Rashidi, H. Monavar, Tuning of power system stabilizers via genetic algorithm for stabilization of power system, *IEEE Int. Conf. Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 5, 5-8 October 2003, pp. 4649 – 4654.

Optimizing Voltage-Frequency Control Strategy for Single-Phase Induction Motor Drives

N. NAEWNGERNDEE, C. SUKCHAROEN & T. KULWORAWANICHPONG
Electrical Power and Energy System Research Group
School of Electrical Engineering, Institute of Engineering
Suranaree University of Technology
111 University Avenue, Suranaree District, Nakhon Ratchasima
THAILAND 30000
thanatch@sut.ac.th

Abstract: - Single-phase induction motors are widely used in household electric motor applications. Although most electric appliances require a few amount of kilo-watt input, minimizing power losses during their operation gives a great benefit resulting in nationwide electric energy used by householders. In this paper, a model-based simulation for loss minimization using the space-phasor theory is proposed. Instead of a fixed 220 V, 50 Hz AC power source, a variable-voltage,variable-frequency (VVVF) control scheme is assumed to function the AC supply. By formulating and solving a constrained optimization of single-phase induction motor drives with VVVF, operation of the single-phase induction motor with minimum power losses can be attained. To evaluate this control strategy, test cases of a single-phase induction motor drive with variable mechanical loads are situated to evaluate its performance.

Key-Words: - single-phase induction motor, optimization, variable-voltage-variable-frequency control, sequential quadratic programming, loss minimization, space-phasor theory

1 Introduction

To date, three-phase induction motors have been increasingly important for industrial electric motor applications. It should note that there still exist DC motors in some limited applications, e.g. motors for vehicles. Apart from a large-size electric motor drive, single-phase induction motors are widely used in household electric motor applications. This application typically consumes power of a fractional horse power up to around ten horse powers. Although most electric appliances require a few amount of kilo-watt input, minimizing power losses during their operation gives a great benefit resulting in nationwide electric energy used by householders.

In general, single-phase motors are controlled by a thyristor-phase controller or a variable resistor. This is quite simple, but it is not efficient in terms of energy consumption. To achieve this goal, complex control strategy cannot be avoid as long as ac machines are involved. One of widely-used control schemes is variable-voltage, variable-frequency (VVVF) [1,2]. It can be applied for motor control in many forms. For example, the constant volt-per-hertz scheme is one of the most popular methods used for practical implementation. However, following this control strategy does not guarantee minimum loss operation. Therefore, adjustable frequency and voltage of the power supply is more flexible and can lead to more economical operation of household electric appliances.

In this paper, the control scheme of VVVF in order to minimize total power losses in a single-phase induction motor. There are five main sections to illustrate the proposed strategy. Section 2 is Modeling of Single-phase Induction Motors, Section 3 is Problem Formulation, Section 4 is Simulation Results and Section 5, the last section, is Conclusion.

2 Modeling of Single-phase Induction Motors

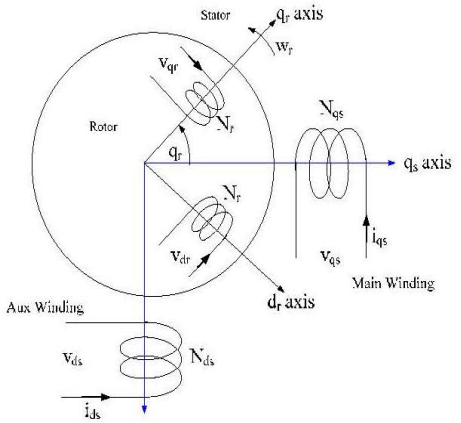


Fig. 1 winding alignment of a single-phase motor

Single-phase induction motors can be characterized by several different models. The space-phasor approach [2,3] is the method used in this paper. With this model, motor currents, torque and speed can be

observable. The space-phasor model is very complicated and needs more space for explanation. However, in this paper only a brief description is presented as follows.

Figure 1 describes winding alignment of a single-phase induction motor consisting of main and auxiliary windings with their induced voltages and currents. As shown in the figure, a stationary reference frame which is along the axis of the main stator winding is defined and used for mathematical analysis throughout this paper. It is essential to inform that all quantities especially on the rotor need to be transferred to the stator axis. This can be performed by using the following transform matrix.

$$\begin{bmatrix} V_{qr}^{s} \\ V_{dr}^{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\theta_r & sin\theta_r \\ -sin\theta_r & cos\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{qr}^{r} \\ v_{dr}^{r} \end{bmatrix} \quad (1)$$

The superscripts *s* and *r* indicate the reference axis in which the variable belongs to. Briefly, the induced voltages on the stator and rotor windings are summarized in Equations 2 and 3, respectively

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^{s} \\ V_{ds}^{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qs} + pL_{qsqs} & pL_{qsds} \\ pL_{dsqs} & r_{ds} + pL_{dsds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^{s} \\ i_{ds}^{s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{qsqr} & L_{qsdr} \\ L_{dsqr} & L_{dsdr} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qr}^{r} \\ i_{dr}^{r} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} V_{qr}^{r} \\ V_{dr}^{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qr} + pL_{qrqr} & pL_{qrdr} \\ pL_{drqr} & r_{dr} + pL_{drdr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr}^{r} \\ i_{dr}^{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{qrqs} & L_{qrds} \\ L_{drqr} & L_{drds} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qs}^{s} \\ i_{ds}^{s} \end{bmatrix} \quad (3)$$

By using the transform matrix mentioned above, all state variables can be transformed into the stator direct axis as follows.

$$\frac{d}{dt}[i] = [A][i] + [B][v] \quad (4)$$

where,

$[A] = [D]^{-1}[E]$

$[B] = [D]^{-1}$

$[i] = \left[i_{qs}, i_{ds}, i'_{qr}, i'_{dr} \right]^T$

$[v] = \left[v_{qs}, v_{ds}, v'_{qr}, v'_{dr} \right]^T$

$$[E] = \begin{bmatrix} -r_{qs} & 0 & \omega_r L_{mqs} \sin\theta_r & \omega_r L_{mqs} \cos\theta_r \\ 0 & -r'_{ds} & -\omega_r L_{mqs} \cos\theta_r & \omega_r L_{mqs} \sin\theta_r \\ \omega_r L_{mqs} \sin\theta_r & -\omega_r L_{mqs} \cos\theta_r & -r'_r & 0 \\ \omega_r L_{mqs} \cos\theta_r & \omega_r L_{mqs} \sin\theta_r & 0 & -r'_r \end{bmatrix}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} L'_{lqs} + L_{mqs} & 0 & L_{mqs} \cos\theta_r & -L_{mqs} \sin\theta_r \\ 0 & \left(L'_{lds} + L_{mqs}\right) & L_{mqs} \sin\theta_r & L_{mqs} \cos\theta_r \\ L_{mqs} \cos\theta_r & L_{mqs} \sin\theta_r & \left(L'_{lr} + L_{mqs}\right) & 0 \\ -L_{mqs} \sin\theta_r & L_{mqs} \cos\theta_r & 0 & \left(L'_{lr} + L_{mqs}\right) \end{bmatrix}$$

where,

r_{qs} is stator resistance of the main winding
r_{ds} is stator resistance of auxiliary winding
L_{ls} is leakage inductance of the main winding
L_{lS} is leakage inductance of the auxiliary winding
L_{mqs} is mutual inductance on the stator q-axis
r_r is rotor resistance
L_{lr} is leakage inductance of the rotor q-axis

As can be seen, the two mechanical quantities, ω_r and θ_r, cause the need for additional two equations which can be obtained from Newton's second law of motion as shown in Equation 5.

$$\begin{bmatrix} \frac{d\omega_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B_m}{J_m} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{P}{2J_m} \\ 0 \end{bmatrix} \left[T_e - T_L \right] \quad (5)$$

Combine Equations 4 and 5, Equation 6 is formed.

$$\begin{bmatrix} \frac{d[i]_{4x1}}{dt} \\ \frac{d\omega_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A]_{4x4} & \cdots & 0 & \cdots \\ \vdots & & \frac{B_m}{J_m} & 0 \\ 0 & & 1 & 0 \\ \vdots & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i]_{4x1} \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [B]_{4x4} & \cdots & 0 & \cdots \\ \vdots & & \frac{P}{2J_m} & 0 \\ 0 & & 0 & 0 \\ \vdots & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [v]_{4x1} \\ T_e - T_L \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

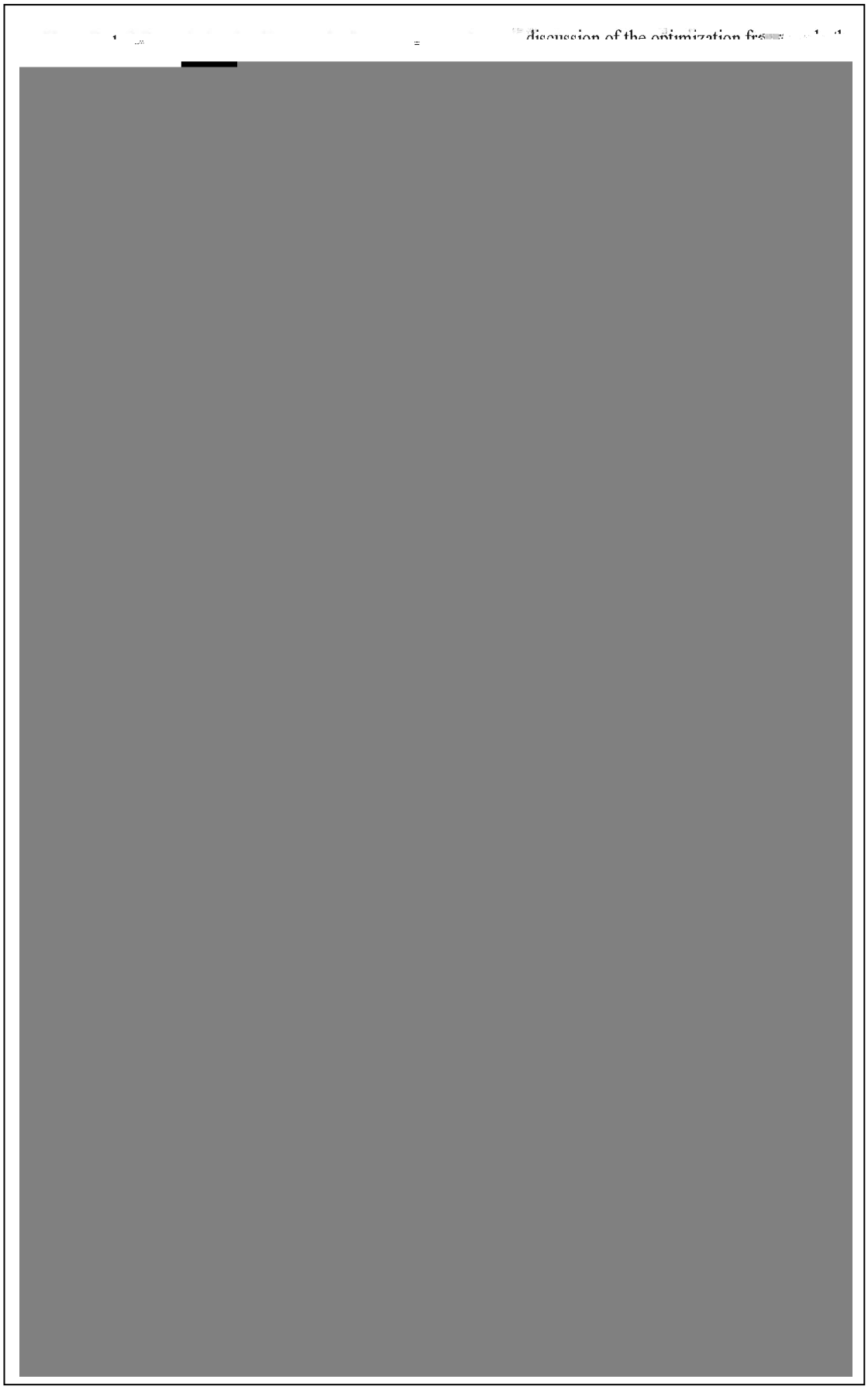
where,

J_m is motor's moment of inertia
B_m is damping coefficient

Applying a numerical time-stepping method to solve a set of differential equations, motor currents, angular speed and position can be calculated numerically.

3 Problem Formulation

To minimize power losses during the operation of a single-phase induction motor drive, a constrained nonlinear optimization problem must be formulated and then solved for a local minimum. Before



by the SQP optimizer of MATLAB toolbox (*fmincon* function) for each load scenario are shown in Table 1.

Table 1 Optimal solution for each load condition

Load (N.m)	Power losses (W)	Optimal solution		Iteration used
		Voltage (V)	Frequency (Hz)	
4.0	626.93	219.42	75.00	9
8.0	782.58	218.41	75.00	10
12.0	859.90	229.90	62.50	7
16.0	1029.90	220.38	56.25	17

For clarification, comparison between the base case (220 V, 50 Hz power supply) against the optimal operating point presented in Table 1 is in Table 2.

Table 2 Comparison between the base case and the optimal operating point

Load (N.m)	Base case Loss	Minimum power loss	Power loss reduction
4	758.72 W	626.93 W	17.37%
8	819.65 W	782.58 W	4.52%
12	921.77 W	859.90 W	6.71%
16	1070.20 W	1029.90 W	3.77%

It is the fact that most motors are typically designed to have the maximum efficiency at its full-load condition. The reader can observe that the test motor also behaves in this manner. The full-load torque of this motor is 16.0 N·m, as a result this operating point is close to the optimum (only 3.77% of the power losses can be reduced). In addition, Figs 1 – 4 show convergences for each test case. These graphs illustrate a sequence of solution movement, iteration-by-iteration, until the local minimum has been reached.

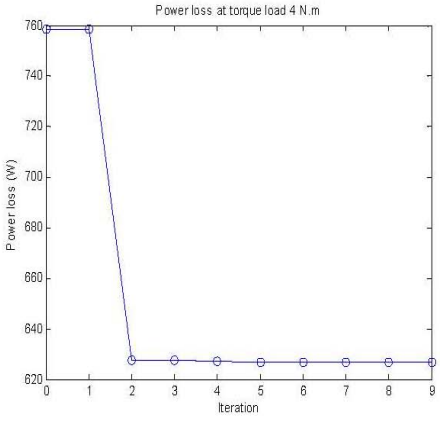


Fig. 1 Convergence for 4 N·m load condition

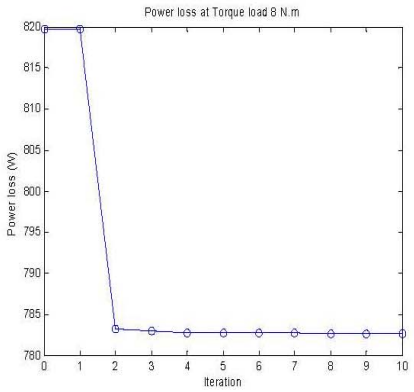


Fig. 2 Convergence for 8 N·m load condition

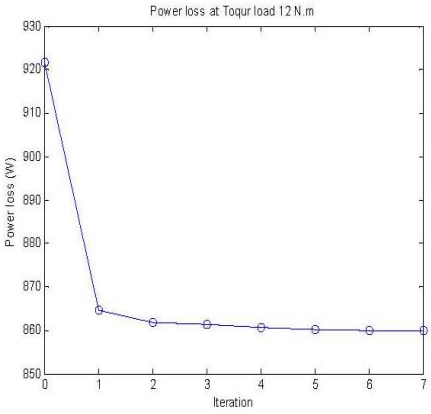


Fig. 3 Convergence for 12 N·m load condition

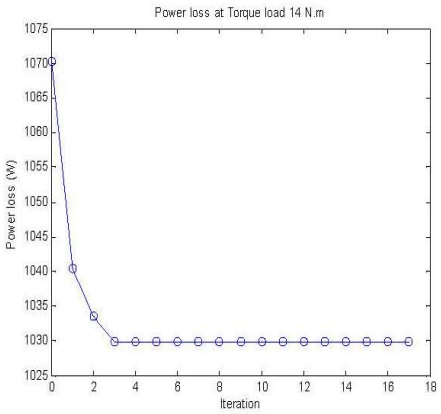


Fig. 4 Convergence for 16 N·m load condition

To observe motor characteristics, comparison between base-case operation and optimal operation is performed. Stator winding currents, mechanical torque and speed responses of the test motor under both supply conditions are depicted in Figs 5 – 11. Figs 5 – 7 present the responses of the base case while Figs 8 – 10 illustrate those of the optimal operation. Furthermore, Fig. 11 is the comparison

between the supply current of the base case and the optimal operation.

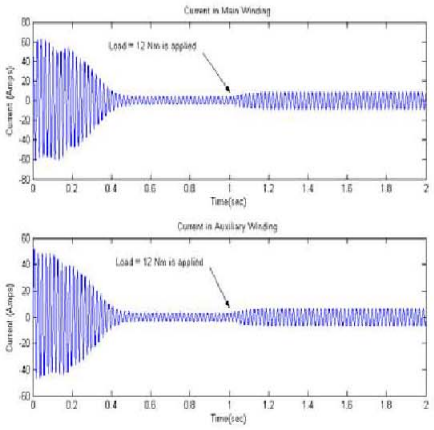


Fig. 5 Winding currents of the base case

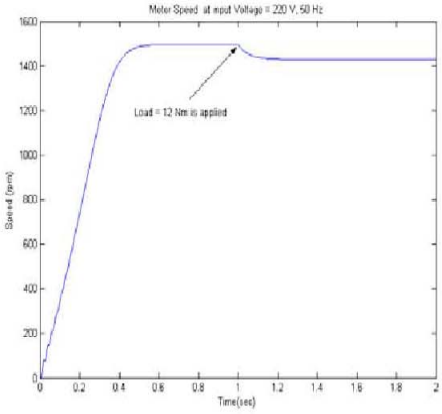


Fig. 6 Speed of the base case

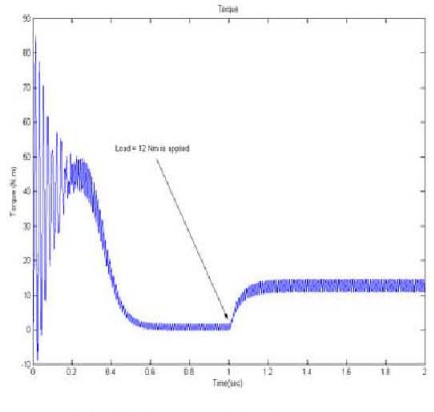


Fig. 7 Torque of the base case

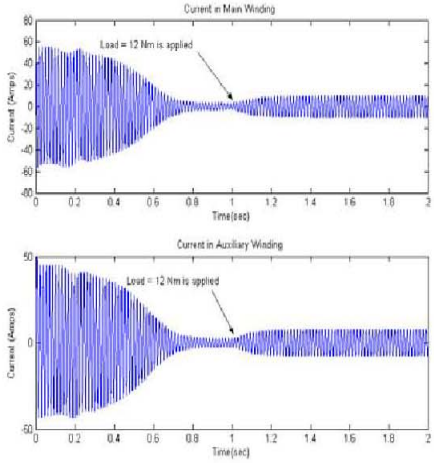


Fig. 8 Winding currents of the optimal

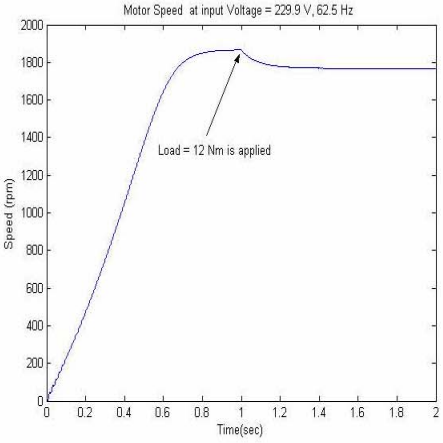


Fig. 9 Speed of the optimal

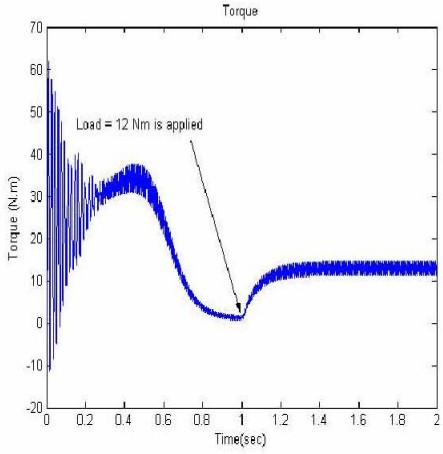


Fig. 10 Torque of the optimal

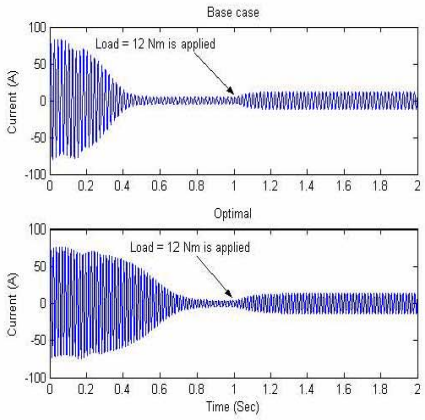


Fig. 11 Supply currents of both supply conditions

The results can confirm that with careful design of the supply source single-phase induction motor drives are loss-minimized in order to cut-off electric energy used by consumer loads in residential section, office or small-size factory. Furthermore, the proposed control scheme gives a great advantage when the motor drive serves a partial load. This can guarantee the operation with minimum power losses.

5 Conclusion and Future Work

This paper presents a voltage-frequency control strategy through a constrained optimization in order to minimize power losses of a single-phase induction motor drive. By adjusting the supply voltage and frequency, this scheme is able to provide the supply condition suitable for any particular load torque. Not only the full-load operation but also any partial load of the system, the energy losses are minimized effectively. With MATLAB optimization toolbox, relevant constrained optimization problems can be solved easily.

This work reveals that there exists at least one operating point which is said to be a local minimum for loss minimization problems. This point gives minimum power loss for a single-phase induction motor drive. However, to generate the sinusoidal power supply with optimal voltage and frequency according to any specified load is too expensive and impractical. To enhance this research and to bring this control strategy for practical implementation, a square-wave inverter is alterative. However, due to harmonic enrichment, an optimal solution of the square wave power supply may be shifted from the optimal solution of the sinusoidal one. This needs careful study and observation of characteristics for a single-phase induction motor fed by square wave inverter in order to minimize power losses at each particular load condition.

6 Acknowledgement

The authors would like to acknowledge the financial support of the research grant (SUT7-711-49-12-45) from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND, during a period of this work.

References:

[1] A.S. Ba-thunya, R. Khopkar, K. Wei & H.A. Toliyat, Single phase induction motor drives-a literature survey, *IEEE Int. Conf. on Electric Machines and Drives (IEMDC2001)*, 17 – 20 June 2001, Cambridge, Massachusetts, USA, pp. 911 – 916.

[2] P.C. Krause, *Analysis of Electric Machines*, McGraw-Hill, 1987

[3] M.B. Correa, C.B. Jacobina, E.R.C. da Silva & A.M.N. Lima, Vector control strategies for single-phase induction motor drive systems, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 51, Issue 5, pp. 1073 – 1080, 2004

[4] S.G. Nash & A. Sofer, *Linear and nonlinear programming*, McGraw-Hill, 1996

[5] N. Abdel-Rahim & A. Shaltout, Operation of single-phase induction motor as two-phase motor, *IEEE 28th Annual Conf. on Industrial Electronics Society (IECON02)*, Vol. 2, 5 – 8 November 2002, pp. 967 – 972.

ภาคผนวก ข

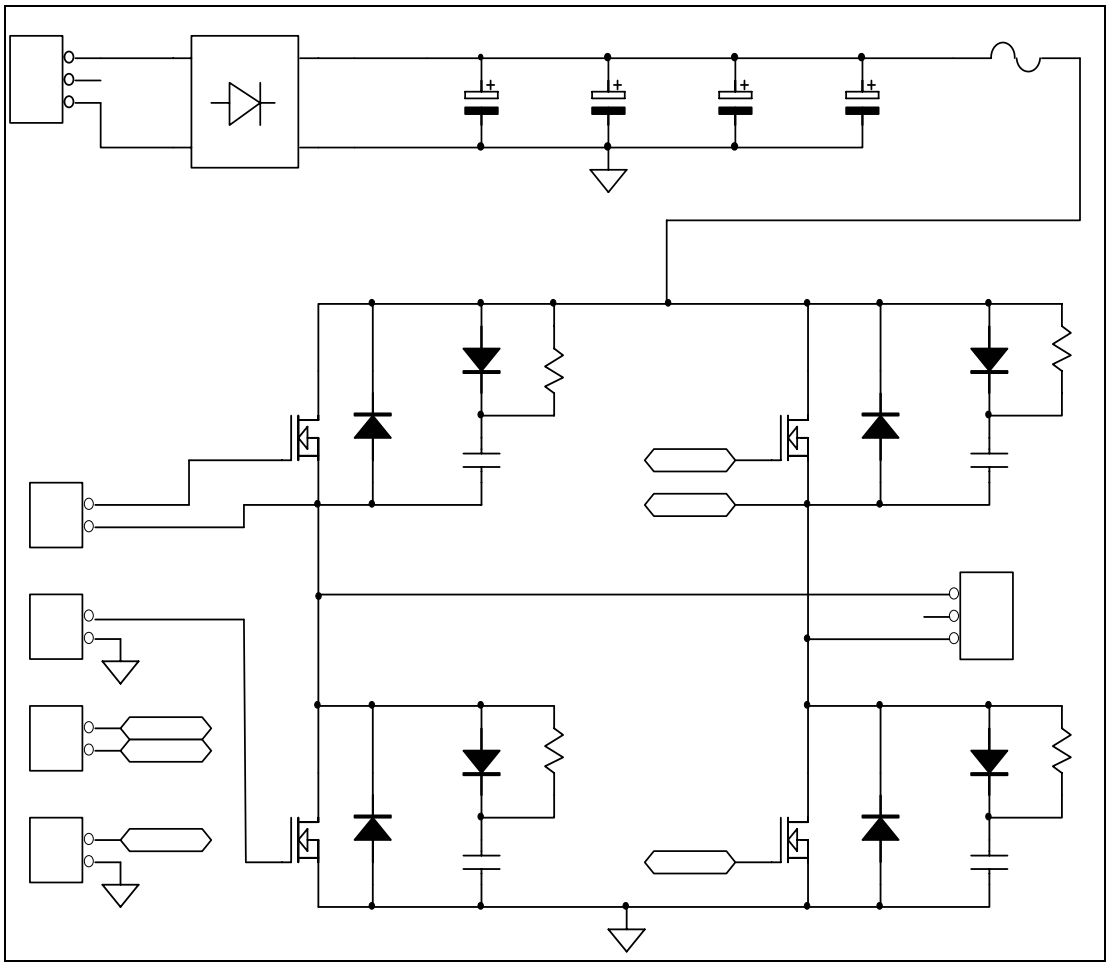
วงจรของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

วงจรของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

วงจรของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวประกอบด้วยวงจรเรียงกระแส วงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรจุดชนวนมอสเฟสกำลัง (Gate drive) วงจรการแปลงแรงดันกระแสตรง วงจรควบคุมค่าความถี่และแรงดันเอาต์พุตของระบบขับเคลื่อนและวงจรของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะได้แสดงรายละเอียดของวงจรขับ ดังต่อไปนี้

ข.1 วงจรเรียงกระแส และวงจรอินเวอร์เตอร์

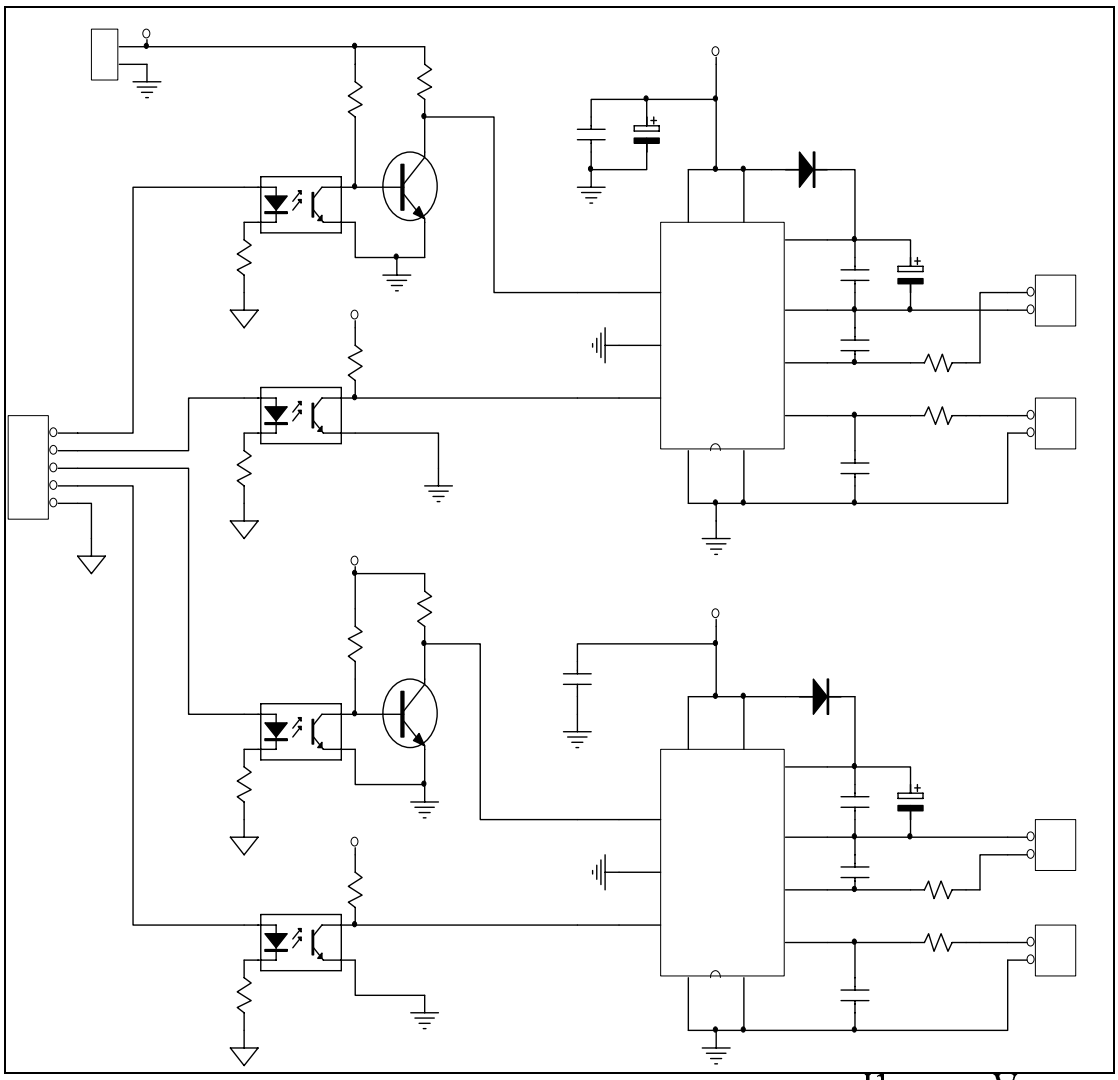
วงจรเรียงกระแส ประกอบด้วย ไอซี KBU8K และ ตัวเก็บประจุขนาด 1200 ไมโครฟารัด จำนวน 4 ชุด ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์มีมอสเฟสกำลัง (IRFP460) จำนวน 4 ชุด



รูปที่ ข.1 วงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์

ข.2 วงจรจุดชนวนมอสเฟสกำลัง

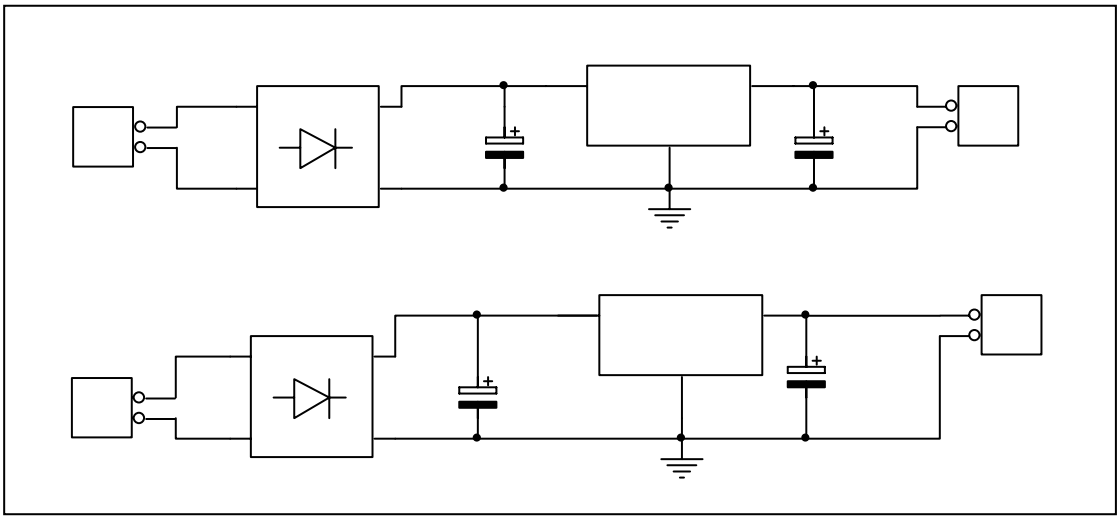
ทำหน้าที่รับสัญญาณที่เป็นลักษณะพัลส์จากวงจรไมโครคอนโทลเลอร์ (Microcontroller) เพื่อนำไปจุดชนวนของมอสเฟสกำลังในวงจรอินเวอร์เตอร์



รูปที่ ข.2 วงจรจุดชนวนมอสเฟสกำลัง

ข.3 วงจรการแปลงแรงดันกระแสตรง

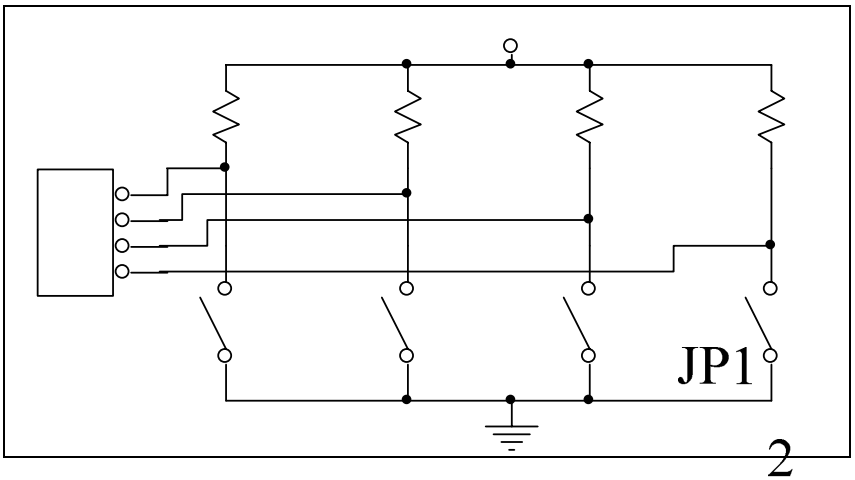
ในส่วนของวงจรนี้ทำหน้าที่เพื่อแปลงแรงดันเพื่อนำไปใช้กับวงจรของไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรจุดชนวนของมอสเฟส (Gate drive)



รูปที่ ข.3 วงจรการแปลงแรงดันกระแสตรง

ข.4 วงจรควบคุมค่าความถี่และแรงดันเอาต์พุตของระบบขับเคลื่อน

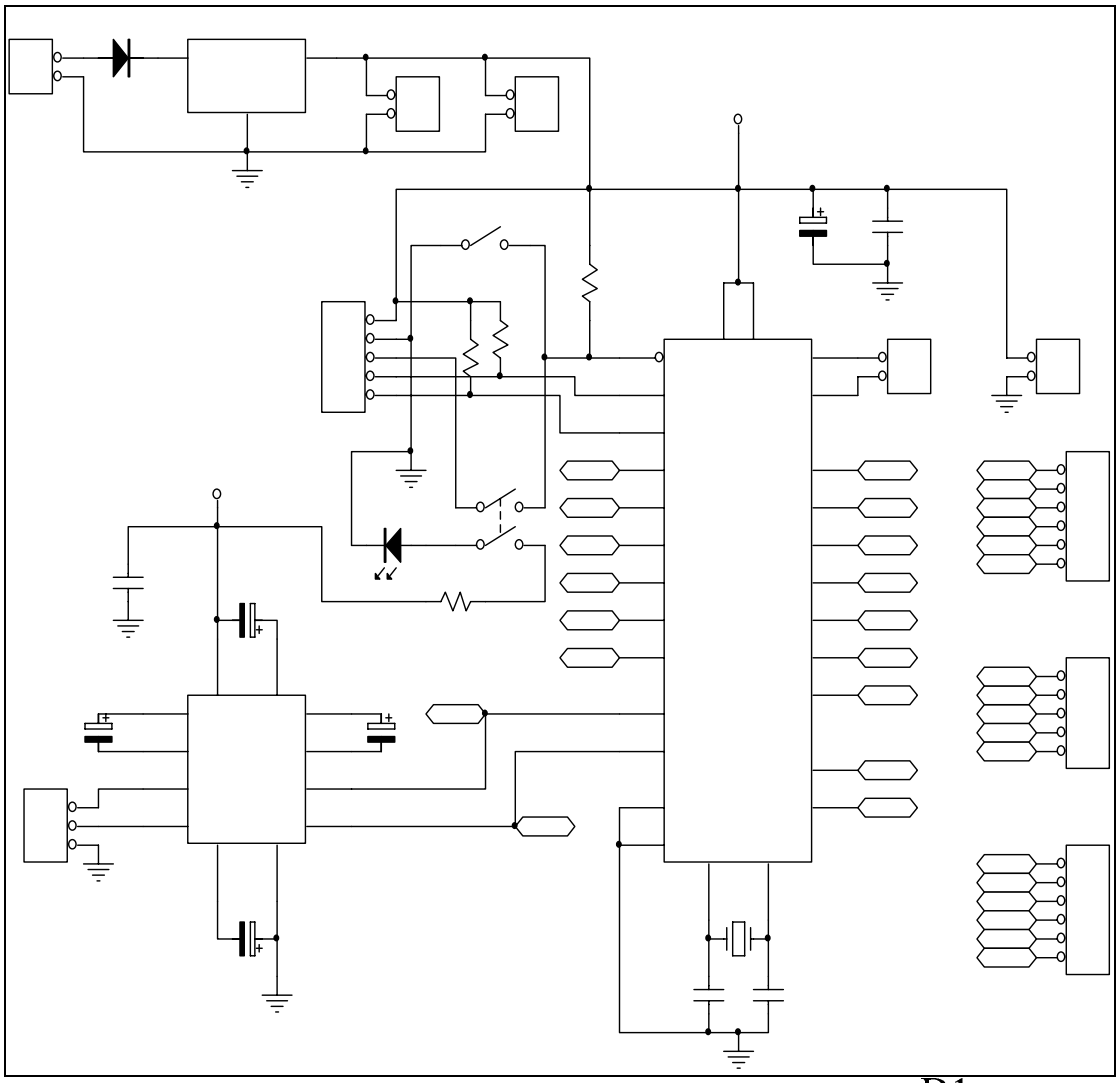
มีหน้าที่รับการป้อนคำสั่งเพื่อปรับค่าความถี่และแรงดันของแหล่งจ่ายจากการกดสวิตซ์ S3, S4, S5 และ S6



รูปที่ ข.4 วงจรควบคุมค่าความถี่และแรงดันเอาต์พุตของระบบขับเคลื่อน

ข.5 วงจรของไมโครคอนโทรลเลอร์

ทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์เพื่อส่งไปยังวงจรจุดชนวนมอสเฟสกำลัง และทำหน้าที่รับการตั้งค่าความถี่และแรงดันเอาต์พุตของระบบขับเคลื่อน

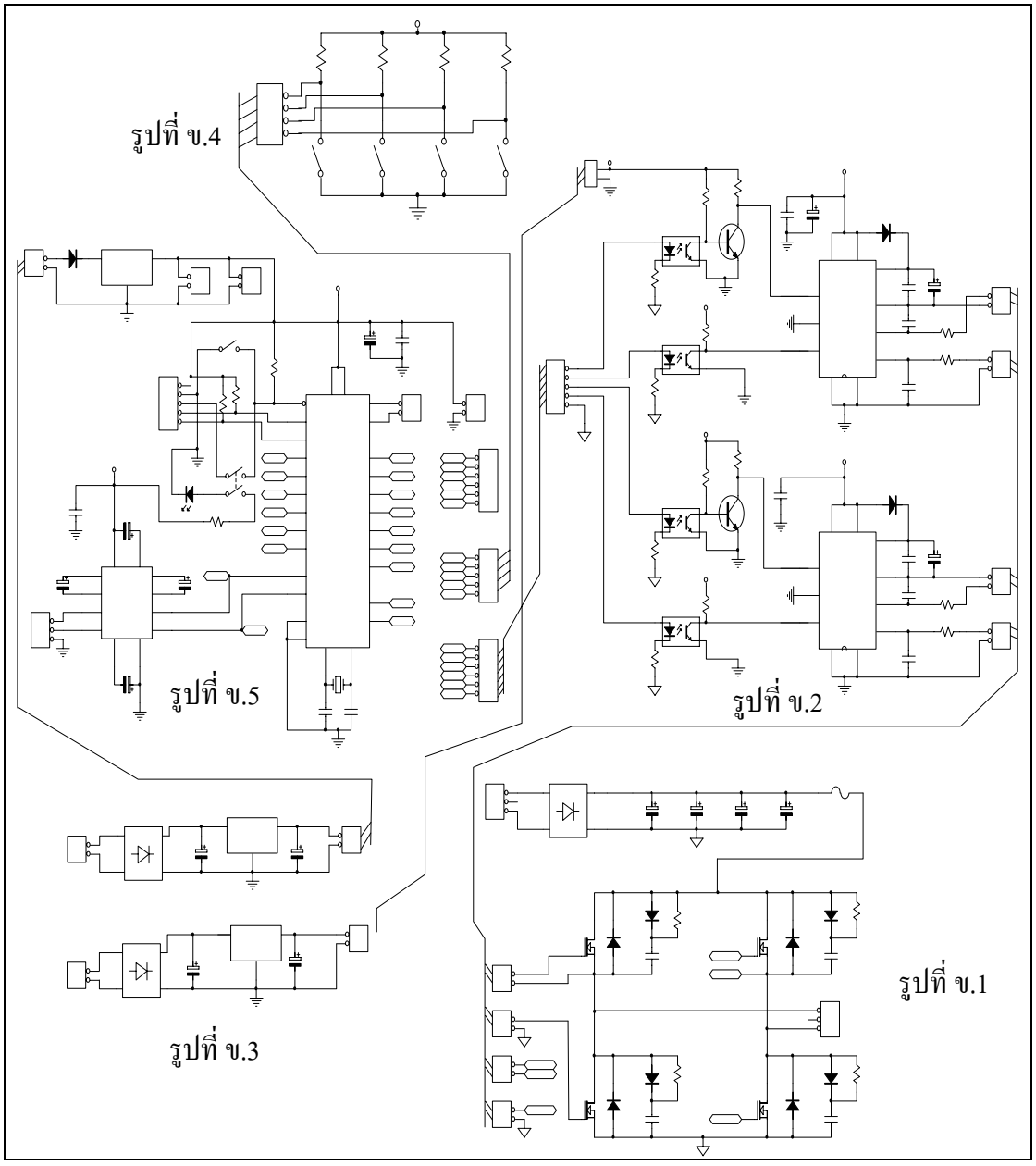


รูปที่ ข.5 วงจรของไมโครคอนโทรลเลอร์

JP1
D1
U1
1
Vin
2
1
+12V

ข.6 วงจรของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

เมื่อนำวงจรในรูปที่ ข.1 ถึง ข.5 มาประกอบรวมกันเป็นวงจรรวมของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวและมีการเชื่อมต่อกันระหว่างวงจรต่าง ๆ ดังรูปที่ ข.6



รูปที่ ข.6 วงจรของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

ภาคผนวก ค

โปรแกรมสำหรับจำลองผลและประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์

```
**************************************************************************
โปรแกรมสำหรับคำนวณผลตอบสนองทางเวลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส
โดย นายนิรันดร์  แนวเงินดี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี,
พ.ศ.2552
**************************************************************************

โปรแกรม split_new_model.m
function [x,t]=split_new_model(n,Tran,Vin);     % โปรแกรมหลักรับอินพุต 3 ค่า ได้แก่ จำนวนรอบ
                                                % ของ การ คำนวณ ชุดของค่าพารามิเตอร์ แรงดัน
                                                % อินพุตของ มอเตอร์
                                                % เอาต์พุตของโปรแกรม คือ เวลาในการจำลองผล
                                                % ตัวแปรสถานะ ได้แก่ กระแส ความเร็วของมอเตอร์
P=4;                                            % กำหนดจำนวนขั้วของมอเตอร์
Vrms=Vin;                                       % กำหนดค่าแรงดันอินพุต
f_oper=50;                                      % กำหนดค่าความถี่อินพุต
Zas=0;                                          % กำหนดค่าการกระจัดเชิงมุมเริ่มต้น
a=0.9268;                                       % กำหนดอัตราส่วนของขดลวดหลักและขดลวดช่วย
rqs=Tran(n,1);                                  % กำหนดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทางกลของ
                                                % มอเตอร์
rr=Tran(n,2);
rds=a^2*Tran(n,3);
Llqs=Tran(n,4);
Llr=Tran(n,5);
Llds=a^2*Tran(n,6);
Lmqs=Tran(n,7);
J=Tran(n,8);
Bm=Tran(n,9);
TL=0;
T0=0;                                           % กำหนดค่าเวลาเริ่มต้นของการจำลองผล
Tstop=3;                                        % กำหนดค่าเวลาเริ่มต้นของการจำลองผล
dT=0.01;                                        % กำหนดค่าของ sampling time
x1=[0 0 0 0 0];                                 % กำหนดค่าตัวแปรสถานะ
M=size(x1,1);
```

```
Nsys=120*f_oper/P;                                  % คำนวณค่าความเร็วซินโครนัส
Wsys=2*2*pi*Nsys/60;                                % คำนวนค่าความเร็วเชิงมุม
Wset=0.7*Wsys;                                      % คำนวณค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ปลดขดลวดช่วย
t=[ ];                                              % สร้างเมตริกเพื่อรองรับค่าเวลาและตัวแปรสถานะ
X=[ ];
Wact=x1(1,5);                                       % เก็บค่าความเร็วเชิงมุมจากการคำนวณ
while Wact<Wset                                     % ตรวจสอบเงื่อนไขของการปลดขดลวดช่วย
   tspan=[T0 T0+dT];                                % กำหนดช่วงเวลาในการจำลองผล
   x0=[x1(M,1) x1(M,2) x1(M,3) x1(M,4) x1(M,5)];    % กำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรสถานะ
   [t1,x1]=ode45('fun_new_double',tspan,x0);        % ทำการแก้สมการอนุพันธ์ในสภาวะที่ขดลวดช่วย
                                                    % ต่ออยู่ อินพุตของฟังก์ชันคือ สมการอนุพันธ์
                                                    % ช่วงเวลาและค่าเริ่มต้นของตัวแปรสถานะ
                                                    % เอาต์พุตของฟังก์ชัน คือ ค่าตัวแปรสถานะและเวลา
                                                    % ที่ได้จากการแก้สมการอนุพันธ์
M=size(x1,1);
   Wact=x1(M,5);                                    % พิจารณาค่าความเร็วของมอเตอร์ ณ เวลานี้
    t=[t; t1]; X=[X; x1];                           % เก็บค่าเวลาและเก็บค่าตัวแปรสถานะ
    T0=T0+dT;                                       % กำหนดเวลาในการจำลองผลในรอบใหม่
disp('Centrifugal switch was activated')            %  แสดงค่าสถานะของขดลวดช่วยที่ถูกปลดออก
tspan=[T0 Tstop];                                   % กำหนดช่วงเวลาในการจำลองผล
x00=[x1(M,1) x1(M,3) x1(M,4) x1(M,5)];              % กำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรสถานะ
[t2,x2]=ode45('fun_new_single',tspan,x00);          % ทำการแก้สมการอนุพันธ์ที่สภาวะขดลวดช่วยถูก
                                                    % ปลดออกอินพุตของฟังก์ชันคือ สมการอนุพันธ์
                                                    % ช่วงเวลาและค่าเริ่มต้นของตัวแปรสถานะ เอาต์พุต
                                                    % ของฟังก์ชัน คือ ค่าตัวแปรสถานะและเวลาที่ได้จาก
                                                    % การแก้สมการอนุพันธ์
t=[t;t2];                                           % กำหนดช่วงเวลาในการจำลองผล
M=size(x2,1);
xx=[x2(:,1) zeros(M,1) x2(:,2) x2(:,3) x2(:,4)];    % ทำการเก็บค่าตัวแปรสถานะที่ได้จากการแก้สมการ
x=[X;xx];                                           % ทำการรวมคำตอบของตัวแปรสถานะที่สภาวะ
                                                    % มีขดลวดช่วย
                                                    % ไม่มีขดลวดช่วย
iqs=x(:,1);ids=x(:,2);iqr=x(:,3);idr=x(:,4);Wr=x(:,5);
Te=0.5*P*Lmqs.*(idr.*iqs-iqr.*ids);                 % คำนวณค่าแรงบิดของมอเตอร์
return
```

```
**************************************************************************************
ฟังชันการคำนวณการทำงานของมอเตอร์ที่สภาวะวงจรสมมูลของมอเตอร์มีขดลวดช่วยต่ออยู่ในวงจรสมมูล
**************************************************************************************
function [X]=fun_new_double(t,x);                % โปรแกรมย่อยรับอินพุต 2 ค่า ได้แก่ ตัวแปรสถานะ
                                                 % และช่วงเวลาของการจำลองผลเอาต์พุตของ
                                                 % โปรแกรม คือ ตัวแปรสถานะ ณ สภาวะมีขดลวด
                                                 % ช่วยต่ออยู่ในวงจรสมมูล
iqs=x(1);ids=x(2);iqr=x(3);idr=x(4);Wr=x(5);     % กำหนดตัวแปรของมอเตอร์
 Vqs=sqrt(2)*Vrms*cos(2*pi*f_oper*t);            % คำนวณค่าแรงดันที่ขดลวดหลัก
 Vds=a*sqrt(2)*Vrms*cos(2*pi*f_oper*t+pi/2);     % คำนวณค่าแรงดันที่ขดลวดช่วย
 x=[iqs;ids;iqr;idr];                            % สร้างเมตริกของกระแส
 U=[Vqs;Vds;0;0];                                % สร้างเมตริกของแรงดัน
          G4=[Llqs+Lmqs 0 Lmqs 0;                % สร้างเมตริกพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่สภาวะ
                                                 % มีขดลวดช่วย
              0 Llds+Lmqs 0 Lmqs;                % ต่ออยู่ในวงจรสมมูล
              Lmqs 0 Llr+Lmqs 0;
              0 Lmqs 0 Llr+Lmqs;
             ];
          M=[-rqs 0 0 0;
              0 -rds 0 0;
              0 Lmqs*Wr -rr (Llr+Lmqs)*Wr;
                -Lmqs*Wr 0 -(Llr+Lmqs)*Wr -rr; ];
          N4=eye(4);                             % สร้างสมการเอกลักษณ์
     A=inv(G4)*M;
     B=inv(G4)*N4;
       for u=1:4                                 % ทำการแก้สมการอนุพันธ์เพื่อหาค่ากระแส
         X(u,1)=A(u,:)*x+B(u,:)*U;
       end
     Te=0.5*P*Lmqs.*(idr.*iqs-iqr.*ids);         % คำนวณค่าแรงบิดของมอเตอร์
     X(5)=(0.5*P*Te/J)-(Bm/J)*Wr-(1/J)*TL;       % คำนวณความเร็วของมอเตอร์
Return
```

```
**********
ฟังชันการคำนวณการทำงานของมอเตอร์ที่สภาวะวงจรสมมูลของมอเตอร์ไม่มีขดลวดช่วยต่ออยู่ในวงจร
สมมูล
**********
function [X]=fun_new_single(t,x);                % โปรแกรมย่อยรับอินพุต 2 ค่า ได้แก่ ตัวแปรสถานะ
                                                 % และช่วงเวลาของการจำลองผล
                                                 % เอาต์พุตของโปรแกรม คือ ตัวแปรสถานะ
                                                 % ณ สภาวะไม่มีขดลวดช่วยต่ออยู่ในวงจรสมมูล
iqs=x(1);iqr=x(2);idr=x(3);Wr=x(4);              % กำหนดตัวแปรของมอเตอร์
Vqs=sqrt(2)*Vrms*cos(2*pi*f_oper*t);             % คำนวณค่าแรงดันที่ขดลวดหลัก
 x=[iqs;iqr;idr];                                % สร้างเมตริกของกระแส
U=[Vqs;0;0];                                     % สร้างเมตริกของแรงดัน
          G3=[Llqs+Lmqs  Lmqs 0;                 % สร้างเมตริกพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่สภาวะ
                                                 % มีขดลวดช่วย
              Lmqs Llr+Lmqs 0;                   % ไม่ต่ออยู่ในวงจรสมมูล
              0 0 Llr+Lmqs;
             ];
          M=[-rqs 0 0;
              0 -rr (Llr+Lmqs)*Wr;
               -Lmqs*Wr -(Llr+Lmqs)*Wr -rr;
               ];
          N3=eye(3);                             % สร้างสมการเอกลักษณ์
    A=inv(G3)*M;
    B=inv(G3)*N3;
      for u=1:3                                  % ทำการแก้สมการอนุพันธ์เพื่อหาค่ากระแส
        X(u,1)=A(u,:)*x+B(u,:)*U;
      end
     ids=0;                                      % กำหนดค่ากระแสของขดลวดช่วยเท่ากับ 0
    Te=0.5*P*Lmqs.*(idr.*iqs-iqr.*ids);          % คำนวณค่าแรงบิดของมอเตอร์
    if t>=1.75                                   % กำหนดจุดที่ทำการให้มอเตอร์ขับโหลด
      TL=0.05;                                   % ค่าของโหลดที่ให้กับมอเตอร์
    end
    X(4)=(0.5*P*Te/J)-(Bm/J)*Wr-(1/J)*TL;        % คำนวณความเร็วของมอเตอร์
Return
```

```
************************************************************************
โปรแกรมสำหรับประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบแยกเฟส
โดย นายนิรันดร์  แนวเงินดี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ.2552
************************************************************************

โปรแกรม gasearchSPGA_Ind.m

tic;                                        % เริ่มจับเวลาในการประมวลผล
load speed.mat;                             % โหลดความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ
load current.mat;                           % โหลดกระแสของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ
NIND=100;                                   % กำหนดจำนวนประชากร
MAXGEN=500;                                 % กำหนดจำนวนสูงสุดในการวนรอบ
NVAR=9;                                     % จำนวนพารามิเตอร์ในการค้นหา
PRECI=30;                                   % กำหนดความละเอียดของพารามิเตอร์
RSEL=0.7;                                   % ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธ์
REC=0.6;                                    % ร้อยละของการครอสโอเวอร์
FieldD=[rep([PRECI],[1,NVAR]);
[4 4 10 0.005 0.015 0.02 0.25 0.007117 0.000674;   % กำหนดค่าต่ำสุดของพารามิเตอร์
25 25 56 0.065 .08 0.1 0.8 0.007117 0.000674];     % กำหนดค่าสูงสุดของพารามิเตอร์
rep([0;0;1;1],[1,NVAR])];
Chrom=crtbp(NIND,NVAR*PRECI);               % ทำสร้างประชากรเริ่มต้นให้กับจีนเนติกอัลกอริทึม
Tran=bs2rv(Chrom,FieldD);                   % ทำการถอดรหัสของค่าพารามิเตอร์ให้อยู่ใน
                                            % รูปเลขฐานสิบ (พีโนไทพ์)
                                            % ทำการส่งค่าชุดของพารามิเตอร์ ความเร็ว
                                            % และค่ากระแสที่ได้จากการทดสอบให้กับฟังก์ชัน
                                            % วัตถุประสงค์
[Sumerr,Sumerrmin,idbest,errcurrent2,errspeed]=objfunctionSPGA_Ind(Tran,NIND,speed,current,time_c);
                                            % ค่าเอาต์พุตของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ได้แก่
                                            % ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าผลตอบสนองที่ได้
                                            % จากการทดสอบกับค่าจากการจำลองผล,
                                            % ชุดพารามิเตอร์ที่ให้ผลความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุก
gen=1;                                      % เริ่มนับจำนวนของรอบของการปรับปรุงสายพันธ์
Sumssqerr=0.03;                             % กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้
NIND=RSEL*NIND;                             % มีการปรับปรุงจำนวนประชากร
```

```
while (gen<MAXGEN)&(Sumerrmin>Sumssqerr)  % ตรวจสอบเงื่อนไขของการหยุดการทำงานของ GA
FitV=ranking(Sumerr);                     % ทำการจัดอันดับของค่าความคลาดเคลื่อน
SelCh=select('sus',Chrom,FitV,RSEL);      % ทำการคัดเลือกโครโมโซมเพื่อเป็นต้นกำเนิดใหม่
Pm=0.01;                                  % กำหนดความน่าจะเป็นในการกลายพันธ์ของ
                                          % โครโมโซม
SelCh2=mut(SelCh1,Pm);                    % ได้โครโมโซมใหม่เมื่อพิจารณาการกลายพันธ์
TranSel=bs2rv(SelCh2,FieldD);             % ทำการถอดรหัสของค่าพารามิเตอร์ให้อยู่
                                          % ในรูปเลขฐานสิบทำการส่งค่าชุดของพารามิเตอร์
                                          % ความเร็วและค่ากระแสที่ได้จากการทดสอบให้กับ
                                          % ฟังก์ชันวัตถุประสงค์
[SumerrSel,SumerrminSel,idbestSel,errcurrent2,errspeed]=objfunctionSPGA_Ind(TranSel,NIND,speed,cur
rent,time_c);
 [Chrom,Sumerr]=reins(Chrom,SelCh,1,1,Sumerr,SumerrSel);
                                          % ทำการแทนโครโมโซมต้นกำเนิด
                                          % ด้วยโครโมโซมลูกหลาน
[Sumerrmin,idbest]=min(Sumerr);           % ทำการพิจารณาตำแหน่งของชุดพารามิเตอร์ที่ทำ
                                          % ให้เกิดผลคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด
Tranbest=bs2rv(Chrom,FieldD);             % ทำการถอดรหัสของค่าพารามิเตอร์ให้อยู่
                                          % ในรูปเลขฐาน
rqs=Tranbest(idbest,1);                   % นำค่าพารามิเตอร์จาก GA แทนลงในตัวแปร
                                          % ของมอเตอร์
rr=Tranbest(idbest,2);
rds=Tranbest(idbest,3);
Llqs=Tranbest(idbest,4);
Llr=Tranbest(idbest,5);
Llds=Tranbest(idbest,6);
Lmqs=Tranbest(idbest,7);
J=Tranbest(idbest,8);
Bm=Tranbest(idbest,9)
iteration(gen,1)=gen;                     % ทำการเก็บค่าจำนวนในรอบการปรับปรุงสายพันธ์นี้
sumerrmin(gen,1)=Sumerrmin;               % ทำการเก็บค่าผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อน
                                          %ในรอบการปรับปรุงสายพันธ์นี้
err_speed2(gen,:)=errspeed;               % ทำการเก็บค่าผลค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็ว
                                          %ในรอบการปรับปรุงสายพันธ์นี้
```

```
err_current3(gen,:)=errcurrent2;                    % ทำการเก็บค่าผลค่าความคลาดเคลื่อนของกระแส
                                                    % ในรอบการปรับปรุงสายพันธ์นี้
save PARA.mat approx2 iteration sumerrmin err_speed2 err_current3
                                                    % ทำการบันทึกค่าต่าง ๆ ไว้
                                                    % ในไฟล์ของการคำนวณที่สภาวะแรงดันนั้น ๆ

gen=gen+1;                                          % เพิ่มรอบการปรับปรุงสายพันธ์
end
tf=toc;                                             % จบการจับเวลาของโปรแกรม

********************
ฟังชันวัตถุประสงค์ (Objective function)
********************
function[Sumerr,Sumerrmin,idbest,errcurrent,errspeed]=objfunctionSPGA_Ind(Tran,NIND,Speed,Current,t
ime_c)
                                                    % โปรแกรมย่อยรับอินพุต 5 ค่า ได้แก่ ชุดพารามิเตอร์
                                                    % ของมอเตอร์, จำนวนของโครโมโซม, ความเร็วและ
                                                    % กระแสที่ได้จากการทดสอบ ช่วงเวลาในการ
                                                    % จำลองผลค่าอินพุตบางค่าจะถูกส่งไปยังฟังก์ชัน
                                                    % คำนวณผลตอบสนองทางเวลาของมอเตอร์ ฯ
                                                    % เอาต์พุตของโปรแกรม คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่
                                                    % ต่ำที่สุดตำแหน่งของชุดพารามิเตอร์ที่ทำให้
                                                    % ค่าความคลาดเคลื่อนที่ต่ำที่สุดผลความคลาดเคลื่อนที่
                                                    % ต่ำที่สุดของความเร็วและกระแส
Speed=Speed(:,1);                                   % เก็บค่าความเร็วที่ได้จากการทดสอบ
irms=Current(:,1);                                  % เก็บค่ากระแสอาร์แอมเอสที่ได้จากการทดสอบ
t_x=time_c(:,1);                                    % เก็บค่าเวลาที่ได้จากการทดสอบ
for n=1:NIND                                        % พิจารณาประชากรที่ละชุด
    Vin=220;                                        % กำหนดค่าแรงดันอินพุต
  [x_220,t_220]=split_new_model(n,Tran,Vin);        % ทำการจำลองเพื่อหาผลตอบสนองทางเวลา
                                                    % ของมอเตอร์
      iqs=x_220(:,1);                               % เก็บค่ากระแสของขดลวดหลัก
      ids=x_220(:,2);                               % เก็บค่ากระแสของขดลวดช่วย
      is=iqs+ids;                                   % เก็บค่ากระแสของขดลวดสเตเตอร์
```

```
[i,Trms]=frms01(is,t_220,0.02);                    % คำนวณค่ากระแสอาร์แอมเอส
[tc_220,inew_220]=scaleSPGA_Ind(Trms,i,100,0,3);
                                                   % ทำการปรับจำนวนชุดข้อมูลของผลตอบสนอง
                                                   % ทางเวลาของมอเตอร์
[tm_220,xnew_220]=scaleSPGA_Ind(t_220,x_220,100,0,3);
 k=find(tc_220>=2);                                % ทำการหาช่วงเวลาที่กระแสเข้าสู่สภาวะคงตัว
   i=1;
   for m=k:100;
      i_t(i,1)=irms(m,1);
      t_t(i,1)=t_x(m,1);
      i_s(i,1)=inew_220(m,1);
      i=i+1;
   end
 currenterr(n,1)=sum(abs((i_t-i_s)/max(abs(i_t))).^2);
                                                   % ทำการคำนวณความคลาดเคลื่อนของกระแส
                                                   % ที่ได้จากการจำลองผล
 if currenterr(n,1)<0.005;                         % ตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของกระแสว่าน้อยกว่า
                                                   % ค่าที่กำหนดหรือไม่ ถ้ามากกว่าจะมีการปรับโทษ
      rho=0;
   else
      rho=100;
  end
 err_current(n,1)=currenterr(n,1)+rho;             % สมการปรับโทษ
   Speedapp(:,n)=(60/(2*2*pi))*xnew_220(:,5);      % คำนวณค่าความเร็วของมอเตอร์
err_speed(n,1)=sum(abs((Speed-Speedapp(:,n))/max(abs(Speed))).^2);
                                                   % ทำการคำนวณความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่ได้
   Sumerr(n,1)=err_speed(n,1)+err_current(n,1);    % คำนวณความคลาดเคลื่อนรวม
end                                                % จบการคำนวณผลตอบสนองของมอเตอร์จาก
                                                   % ประชากรทุกชุด
[Sumerrmin,idbest]=min(Sumerr)                     % หาค่าและตำแหน่งที่ของประชากรที่ทำให้เกิด
                                                   % ค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด
errcurrent2=err_current(idbest,:);                 % หาค่าความคลาดเคลื่อนของกระแส
errspeed=err_speed(idbest,:);                      % หาค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็ว
return
```

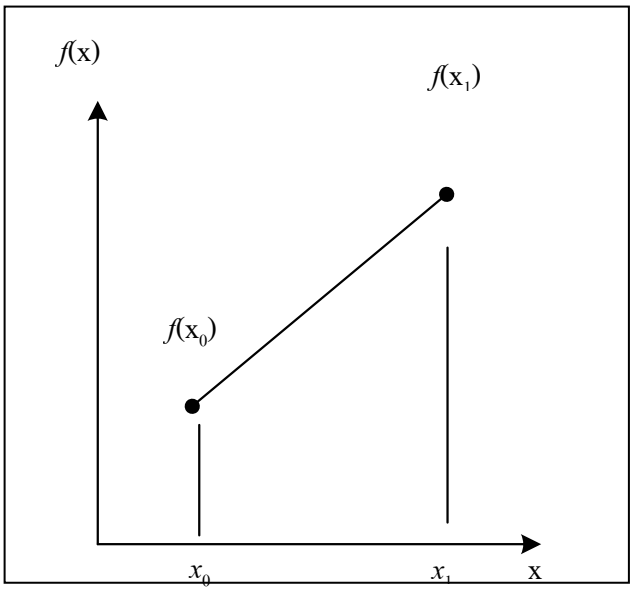
ภาคผนวก ง

การประมาณค่าชุดข้อมูล

ในการทดลองส่วนใหญ่ข้อมูลจากการทดลองจะอยู่ในลักษณะข้อมูลเพียงบางจุดบางตำแหน่งเท่านั้น เมื่อต้องการทราบข้อมูลเหล่านี้ที่ตำแหน่งอื่น ๆ จากสาเหตุดังกล่าวจึงเป็นที่มาของการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) ซึ่งเป็นกระบวนการหาฟังก์ชันที่กราฟของฟังก์ชันนั้นผ่านจุดข้อมูลนั้น โดยในวิทยานิพนธ์นี้มีการประมาณค่าในช่วงด้วยวิธีการประมาณค่าเชิงเส้น (Linear interpolate) และ วิธีการประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสาม (Cubic spline) ซึ่งจะได้อธิบายการหาฟังก์ชันของวิธีการทั้งสอง ต่อไป

ง.1 วิธีการประมาณค่าเชิงเส้น

เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการประมาณค่าโดยการลากเส้นตรงเชื่อมระหว่างสองจุดดังรูปที่ ง.1



รูปที่ ง.1 ลักษณะฟังก์ชันเชิงเส้นสำหรับประมาณค่าในช่วง x_0 และ x_1

จากสมการเส้นตรงในสมการที่ ง.1

$$f(x) = ax + b \tag{ง.1}$$

ที่ $x=x_0$ $\quad f(x_0) = ax_0 + b$ (ง.2)

ที่ $x=x_1$ $f(x_1) = ax_1 + b$ (ง.3)

เมื่อนำสมการ (ง.2) ลบออกจาก (ง.3) เมื่อแก้สมการออกมาได้ค่า a และ b ตามสมการที่ (ง.4) และสมการที่ (ง.5)

$$a = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} \quad \text{(ง.4)}$$

$$b = f(x_0) - \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} x_0 \quad \text{(ง.5)}$$

แทนสมการที่ (ง.4) และ (ง.5) ในสมการที่ (ง.1) จะได้ของฟังก์ชัน $f(x)$ ตามสมการที่ (ง.6)

$$f(x) = \left(\frac{x_1 - x}{x_1 - x_0} \right) f(x_0) + \left(\frac{x_0 - x}{x_0 - x_1} \right) f(x_1) \quad \text{(ง.6)}$$

จากสมการที่ (ง.6) สามารถหาค่าฟังก์ชันของเส้นตรงที่ x ใด ๆ ได้
ในการคำนวณประมาณค่าฟังก์ชันเชิงเส้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB ใช้คำสั่งตามสมการที่ (ง.7)

$$\text{p} = \text{polyfit}(\text{x}, \text{y}, \text{n}) \quad \text{(ง.7)}$$

โดยที่ x ,y คือ ค่าข้อมูลที่ทราบค่า
n คือ ค่าลำดับของสมการพหุนาม
p คือ สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนาม

เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามจะทำให้เราสามารถคำนวณค่าฟังก์ชันที่ค่า x ใด ๆ ตามสมการที่ (ง.8)

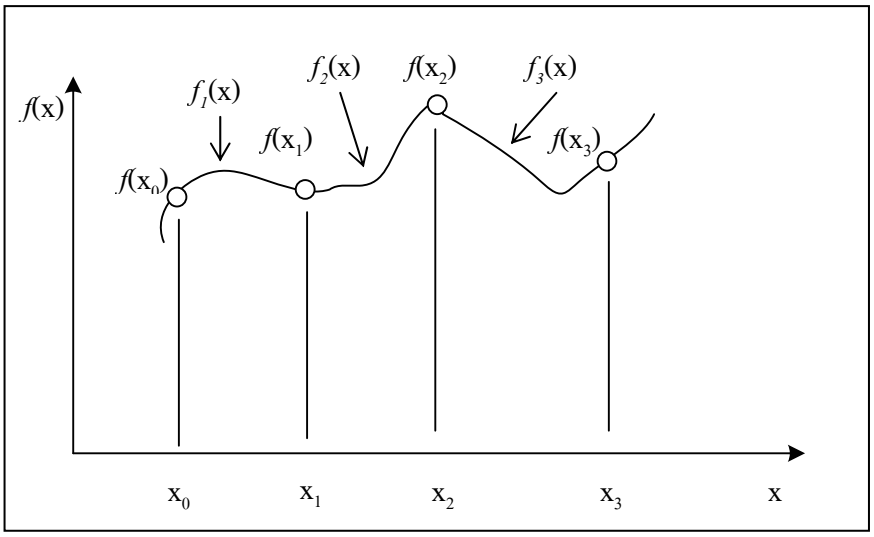
$$\text{y} = \text{polyval}(\text{p}, \text{x}) \quad \text{(ง.8)}$$

โดยที่ x คือ ค่าข้อมูลที่ต้องการทราบค่าของฟังก์ชันที่ตำแหน่ง x

y คือ คำตอบของฟังก์ชันที่ตำแหน่ง x

ง.2 วิธีการประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสาม

จากการประมาณค่าด้วยสมการพหุนามพบว่าถ้าข้อมูลมีลักษณะกระจายตัวในลักษณะขั้นบันไดจะทำให้สมการพหุนามพยายามผ่านจุดข้อมูลทุกข้อมูลทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของฟังก์ชันพหุนาม ดังนั้นจึงมีการใช้วิธีประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นโค้ง จากรูปที่ ง.2 สามารถแสดงวิธีการคำนวณดังต่อไปนี้



รูปที่ ง.2 งานประมาณค่าโดยใช้ฟังก์ชันกำลังสาม

จากรูปที่ ง.2 มีข้อมูลอยู่ 4 ข้อมูล และ 3 ช่วงของฟังก์ชันที่เชื่อมต่อระหว่างข้อมูล ดังนั้นจึงสามารถสร้างสมการกำลังสามได้ 3 สมการ ดังต่อไปนี้

$$f_1(x) = a_1x^3 + b_1x^2 + c_1x + d_1 \qquad x_0 \le x \le x_1 \qquad (ง.9)$$

$$f_2(x) = a_2x^3 + b_2x^2 + c_2x + d_2 \qquad x_1 \le x \le x_2 \qquad (ง.10)$$

$$f_3(x) = a_3x^3 + b_3x^2 + c_3x + d_3 \qquad x_2 \le x \le x_3 \qquad (ง.11)$$

จากสมการที่ (ง.11) มีสัมประสิทธิ์ของสมการที่ไม่ทราบค่าทั้งหมด 12 ค่า ดังนั้นการที่จะแก้สมการเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการจำเป็นต้องมีสมการเงื่อนไขทั้งหมด 12 เงื่อนไข โดยการสร้างเงื่อนไขสามารถสร้างได้จากกรณีดังต่อไปนี้

ก) ที่จุดต่อภายในระหว่าง 2 ฟังก์ชันต้องมีค่าเท่ากัน พิจารณาที่จุด x_1 จะได้ตามสมการที่ (ง.12) และ (ง.13)

$$f_1(x_1) = a_1 x_1^{\ 3} + b_1 x_1^{\ 2} + c_1 x_1 + d_1 = f(x_1) \qquad (ง.12)$$

$$f_2(x_1) = a_2 x_1^{\ 3} + b_2 x_1^{\ 2} + c_2 x_1 + d_2 = f(x_1) \qquad (ง.13)$$

เนื่องจากจุดภายในของข้อมูลมี 2 จุด ดังนั้น จึงมีเงื่อนไขในกรณีนี้ 4 เงื่อนไข

ข) ฟังก์ชันแรกต้องผ่านจุดข้อมูลแรกสุดที่ x_0 จะได้ตามสมการที่ (ง.14) และที่จุดสุดท้ายที่ x_3 จะได้ตามสมการที่ (ง.15) กรณีนี้จะมี 2 เงื่อนไข

$$f_1(x_0) = a_1 x_0^{\ 3} + b_1 x_0^{\ 2} + c_1 x_0 + d_1 = f(x_0) \qquad (ง.14)$$

$$f_3(x_3) = a_3 x_3^{\ 3} + b_3 x_3^{\ 2} + c_3 x_3 + d_3 = f(x_3) \qquad (ง.15)$$

ค) ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่ง ณ จุดต่อของ 2 ฟังก์ชันต้องมีค่าเท่ากัน จะได้ดังสมการที่ (ง.16) และสมการที่ (ง.17) กรณีนี้จะมี 2 เงื่อนไข

$$f_1'(x_1) = f_2'(x_1) \qquad (ง.16)$$

$$f_2'(x_2) = f_3'(x_2) \qquad (ง.17)$$

ง) ค่าอนุพันธ์อันดับสอง ณ จุดต่อของ 2 ฟังก์ชันต้องมีค่าเท่ากัน

$$f_1''(x_1) = f_2''(x_1) \qquad (ง.18)$$

$$f_2''(x_2) = f_3''(x_2) \quad \text{(ง.19)}$$

จ) ค่าอนุพันธ์อันดับสาม ณ จุดปลายของข้อมูลที่ x_0 และ x_3 ต้องมีค่าเท่ากับศูนย์

$$f_1''(x_0) = 0 \quad \text{(ง.20)}$$

$$f_3''(x_3) = 0 \quad \text{(ง.21)}$$

จากกรณี ก) ถึง จ) จะเงื่อนไขทั้งหมด 12 เงื่อนไข ซึ่งทำให้สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการกำลังสามในสมการที่ (ง.9) ถึง สมการที่ (ง.11) ในสภาวะข้อมูลทั่วไปที่ n จุด จะมีสมการเส้นโค้งกำลังสามจำนวน n-1 สมการ และมีสมการเงื่อนไขเท่ากับ 4(n-1) เงื่อนไข

จากการประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสามนอกจากวิธีที่กล่าวมาข้างต้น ยังมีคำสั่งในโปรแกรม MATLAB™ ที่สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของสมการเส้นโค้งกำลังสาม โดยมีคำสั่งดังสมการที่ (ง.22)

$$pp = spline\,(x, y) \quad \text{(ง.22)}$$

โดยที่ x,y คือ ค่าข้อมูลที่ต้องการทราบค่าของฟังก์ชันที่ตำแหน่งต่าง ๆ

PP คือ เมตริกซ์ของค่าสัมประสิทธิ์สมการเส้นโค้งกำลังสาม

ภาคผนวก จ

ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายที่สามารถปรับค่าแรงดันและความถี่เพื่อพิจารณากำลังงานสูญเสีย

จ.1 การทดสอบเพื่อหาค่ากำลังงานสูญเสียจากวิธีการแปรค่าแรงดันสเตเตอร์ที่ความถี่คงที่

ผลการทดสอบจะมีการวัดค่าแรงดันอินพุต (Vin) กำลังงานอินพุต (Pin) กระแสอินพุต (Iin) กำลังงานเอาต์พุต (Pout) ความเร็วของมอเตอร์ (n) และ กำลังงานสูญเสีย (Ploss) ทำการขับเคลื่อนโหลดในช่วงไร้โหลดถึง 80% โหลด ดังแสดงในตารางที่ จ.1 ถึง ตารางที่ จ.9

ตารางที่ จ.1 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่สภาวะไร้โหลด

Vin (V)	Pin (W)	Iin (A)	Pout (W)	n (rpm)	Ploss (W)
80	23.60	0.82	10.40	1497.00	13.20
90	26.30	0.91	10.60	1500.00	15.70
100	29.90	1.01	10.40	1504.00	19.50
110	33.30	1.11	10.40	1503.00	22.90
120	38.20	1.23	10.20	1505.00	28.00
130	42.60	1.33	10.40	1507.00	32.20
140	48.50	1.45	9.80	1507.00	38.70
150	54.20	1.57	9.60	1507.00	44.60
160	61.60	1.71	9.80	1508.00	51.80
170	68.80	1.85	9.40	1508.00	59.40
180	77.70	2.02	9.40	1508.00	68.30
190	88.00	2.19	9.40	1508.00	78.60
200	98.80	2.36	9.80	1508.00	89.00
210	112.60	2.58	9.20	1509.00	103.40
220	127.30	2.89	9.20	1508.00	118.10
230	150.00	3.09	9.40	1509.00	140.60

ตารางที่ จ.2 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 10 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.026 กิโลวัตต์)

Vin (V)	Pin (W)	Iin (A)	Pout (W)	n (rpm)	Ploss (W)
80	71.30	1.28	26.00	1407.00	45.30
90	71.10	1.21	26.00	1445.00	45.10
100	71.20	1.21	26.00	1463.00	45.20
110	72.90	1.26	26.00	1475.00	46.90
120	77.50	1.34	26.00	1481.00	51.50
130	80.50	1.41	26.00	1486.00	54.50
140	85.80	1.52	26.00	1489.00	59.80
150	90.30	1.62	26.00	1493.00	64.30
160	95.80	1.73	26.00	1495.00	69.80
170	102.70	1.88	26.00	1496.00	76.70
180	111.00	2.04	26.00	1499.00	85.00
190	121.70	2.21	26.00	1499.00	95.70
200	131.00	2.34	26.00	1499.00	105.00
210	146.00	2.56	26.00	1501.00	120.00
220	159.50	2.78	26.00	1503.00	133.50
230	173.00	3.00	26.00	1505.00	147.00

ตารางที่ จ.3 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 20 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.052 กิโลวัตต์)

Vin (V)	Pin (W)	Iin (A)	Pout (W)	n (rpm)	Ploss (W)
110	119.50	1.60	52.00	1456.00	67.50
120	119.60	1.58	52.00	1448.00	67.60
130	122.00	1.61	52.00	1459.00	70.00
140	124.50	1.66	52.00	1468.00	72.50
150	128.00	1.73	52.00	1476.00	76.00
160	132.70	1.83	52.00	1481.00	80.70
170	141.90	1.96	52.00	1483.00	89.90
180	146.10	2.08	52.00	1488.00	94.10

ตารางที่ จ.3 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 20 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.052 กิโลวัตต์) (ต่อ)

190	157.70	2.23	52.00	1490.00	105.70
200	167.70	2.40	52.00	1491.00	115.70
210	180.00	2.57	52.00	1493.00	128.00
220	197.20	2.80	52.00	1492.00	145.20
230	214.40	3.03	52.00	1491.00	162.40

ตารางที่ จ.4 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 30 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.078 กิโลวัตต์)

Vin (V)	Pin (W)	Iin (A)	Pout (W)	n (rpm)	Ploss (W)
110	191.40	2.09	78.40	1377.00	113.00
120	190.60	2.45	78.20	1345.00	112.40
130	180.70	2.01	77.80	1415.00	102.90
140	174.50	1.94	78.20	1438.00	96.30
150	175.40	1.94	78.20	1452.00	97.20
160	178.10	2.00	78.40	1461.00	99.70
170	182.50	2.08	78.20	1469.00	104.30
180	189.20	2.19	78.60	1474.00	110.60
190	197.10	2.32	78.20	1478.00	118.90
200	206.00	2.45	78.20	1481.00	127.80
210	215.60	2.62	78.40	1485.00	137.20
220	232.10	2.83	78.40	1487.00	153.70
230	252.00	3.07	78.20	1487.00	173.80

ตารางที่ จ.5 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 40 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.104 กิโลวัตต์)

Vin (V)	Pin (W)	Iin (A)	Pout (W)	n (rpm)	Ploss (W)
130	257.80	2.58	104.00	1364.00	159.80
140	243.50	2.42	104.20	1382.00	145.30
150	232.00	2.27	104.40	1416.00	133.60
160	227.90	2.23	104.00	1467.00	129.90

ตารางที่ จ.5 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 40 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.104 กิโลวัตต์) (ต่อ)

170	228.10	2.25	104.00	1450.00	130.10
180	232.50	2.32	104.40	1459.00	134.10
190	238.10	2.42	104.00	1464.00	140.10
200	245.40	2.55	104.00	1470.00	147.40
210	256.30	2.70	104.00	1475.00	158.30
220	270.70	2.88	104.00	1478.00	172.70
230	289.90	3.11	104.00	1480.00	191.90

ตารางที่ จ.6 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.13 กิโลวัตต์)

Vin (V)	Pin (W)	Iin (A)	Pout (W)	n (rpm)	Ploss (W)
160	293.70	2.63	130.00	1405.00	169.70
170	285.10	2.54	130.20	1428.00	160.90
180	284.70	2.54	130.00	1440.00	160.70
190	287.40	2.59	130.40	1450.00	163.00
200	291.30	2.67	130.00	1456.00	167.30
210	301.60	2.81	130.60	1463.00	177.00
220	308.10	2.95	130.00	1469.00	184.10
230	330.00	3.17	130.20	1471.00	205.80

ตารางที่ จ.7 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 60 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.156 กิโลวัตต์)

Vin (V)	Pin (W)	Iin (A)	Pout (W)	n (rpm)	Ploss (W)
170	344.90	2.88	155.80	1391.00	195.10
180	346.80	2.85	155.80	1408.00	197.00
190	341.30	2.81	155.80	1439.00	191.50
200	343.90	2.85	155.80	1441.00	194.10
210	350.20	2.94	155.80	1449.00	200.40
220	357.70	3.06	155.80	1458.00	207.90
230	373.80	3.23	155.80	1460.00	224.00

ตารางที่ จ.8 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 70 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.182 กิโลวัตต์)

Vin (V)	Pin (W)	Iin (A)	Pout (W)	n (rpm)	Ploss (W)
180	392.30	3.12	178.00	1505.00	220.30
190	381.90	3.01	178.00	1416.00	209.90
200	378.60	3.00	178.00	1433.00	206.60
210	382.20	3.05	178.00	1441.00	210.20
220	388.50	3.14	178.00	1449.00	216.50
230	405.40	3.32	178.00	1453.00	233.40

ตารางที่ จ.9 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 80 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.208 กิโลวัตต์)

Vin (V)	Pin (W)	Iin (A)	Pout (W)	n (rpm)	Ploss (W)
200	464.80	3.41	208.80	1404.00	259.00
210	456.80	3.35	208.80	1420.00	251.00
220	458.50	3.39	208.80	1432.00	252.70
230	469.90	3.45	208.80	1440.00	264.10

จ.2 การทดสอบเพื่อหาค่ากำลังงานสูญเสียจากวิธีการแปรค่าความถี่ที่แรงดันสเตเตอร์คงที่

ผลการทดสอบจะมีการวัดค่าแรงดันอินพุต (Vin) กำลังงานอินพุต (Pin) กระแสอินพุต (Iin) กำลังงานเอาต์พุต (Pout) ความเร็วของมอเตอร์ (n) และ กำลังงานสูญเสีย (Ploss) ดังแสดงในตารางที่ จ.10 ถึง ตารางที่ จ.19

ตารางที่ จ.10 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่สภาวะไร้โหลด

f (Hz)	Pin (W)	Iin (A)	Pout (W)	n (rpm)	Ploss (W)
40.00	92	2.457	22.4	1208	69.6
42.00	88	2.266	21.6	1269	66.4
45.00	78	2.052	20	1359	58
47.00	71	1.939	19	1421	52
50.00	68	1.802	18.4	1511	49.6

ตารางที่ จ.10 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่สภาวะไร้โหลด (ต่อ)

52.00	64	1.705	16.6	1569	47.4
55.00	59	1.576	14.8	1662	44.2
57.00	58	1.520	14	1723	44
60.00	56	1.452	12.4	1814	43.6
62.00	53	1.409	11.4	1875	41.6
65.00	52	1.329	9.8	1970	42.2
67.00	51	1.297	8.8	2024	42.2
70.00	50	1.228	7	2114	43

ตารางที่ จ.11 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 10 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.026 กิโลวัตต์)

f (Hz)	Pin (W)	Iin (A)	Pout (W)	n (rpm)	Ploss (W)
40.00	120	2.49	26	1199	94
42.00	112	2.282	26	1260	86
45.00	105	2.057	26	1349	79
47.00	100	1.955	26	1411	74
50.00	96	1.834	26	1501	70
52.00	89	1.685	26	1591	63
55.00	88	1.631	26	1651	62
57.00	88	1.567	26	1710	62
60.00	84	1.493	26	1802	58
62.00	83	1.454	26	1862	57
65.00	85	1.389	26	1956	59
67.00	82	1.346	26	2010	56
70.00	80.8	1.292	26	2099	54.8

ตารางที่ จ.12 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 20 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.052 กิโลวัตต์)

f (Hz)	Pin (W)	Iin (A)	Pout (W)	n (rpm)	Ploss (W)
42.00	142	2.318	52	1252	90
45.00	130	2.117	52	1340	78
47.00	128	2.006	52	1401	76
50.00	120	1.894	52	1490	68
52.00	115	1.7	52	1580	63
55.00	112	1.691	52	1640	60
57.00	110	1.634	52	1699	58
60.00	110	1.558	52	1790	58
62.00	110	1.516	52	1849	58
65.00	109	1.452	52	1944	57
67.00	108	1.38	52	1996	56
70.00	106	1.376	52	2085	54

ตารางที่ จ.13 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 30 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.078 กิโลวัตต์)

f (Hz)	Pin (W)	Iin (A)	Pout (W)	n (rpm)	Ploss (W)
42.00	178	2.449	78	1241	100
45.00	170	2.25	78	1329	92
47.00	168	2.17	78	1389	90
50.00	160	2.029	78	1480	82
52.00	157	1.95	78	1537	79
55.00	152	1.827	78	1629	74
57.00	150	1.766	78	1688	72
60.00	148	1.677	78	1776	70
62.00	145	1.633	78	1835	67
65.00	141	1.568	78	1928	63
67.00	141	1.548	78	1981	63
70.00	140	1.497	78	2068	62

ตารางที่ จ.14 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 40 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.104 กิโลวัตต์)

f (Hz)	Pin (W)	Iin (A)	Pout (W)	n (rpm)	Ploss (W)
42.00	210	2.518	104	1228	106
45.00	200	2.319	104	1319	96
47.00	195	2.218	104	1379	91
50.00	190	2.113	104	1488	86
52.00	185	2.013	104	1521	81
55.00	180	1.919	104	1612	76
57.00	180	1.871	104	1671	76
60.00	179	1.81	104	1760	75
62.00	178	1.77	104	1818	74
65.00	175	1.719	104.2	1910	70.8
67.00	162	1.631	95	1969	67
70.00	140	1.499	78.8	2067	61.2

ตารางที่ จ.15 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.130 กิโลวัตต์)

f (Hz)	Pin (W)	Iin (A)	Pout (W)	n (rpm)	Ploss (W)
42.00	248	2.65	130	1221	118
45.00	240	2.47	130	1308	110
47.00	238	2.433	130	1338	108
50.00	230	2.244	130	1452	100
52.00	225	2.182	130	1507	95
55.00	220	2.096	130	1596	90
57.00	220	2.052	130	1654	90
60.00	218	2.000	130	1740	88
62.00	218	1.974	130	1797	88
65.00	215	1.933	130	1890	85
67.00	218	1.916	130	1942	88
70.00	218	1.918	130	2018	88

ตารางที่ จ.16 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 60 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.156 กิโลวัตต์)

f (Hz)	Pin (W)	Iin (A)	Pout (W)	n (rpm)	Ploss (W)
42.00	282	2.732	156	1193	126
45.00	276	2.603	156	1278	120
47.00	273	2.550	156	1338	117
50.00	270	2.462	156	1422	114
52.00	270	2.458	156	1466	114
55.00	270	2.422	156	1552	114
57.00	270	2.407	156	1606	114
60.00	271	2.398	156	1687	115
62.00	279	2.456	156	1728	123
65.00	320	2.794	156	1762	164

ตารางที่ จ.17 ผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 70 เปอร์เซ็นต์โหลด (0.182 กิโลวัตต์)

f (Hz)	Pin (W)	Iin (A)	Pout (W)	n (rpm)	Ploss (W)
42.00	342	3.064	182	1161	160
45.00	340	2.973	182	1244	158
47.00	340	2.885	182	1305	158
50.00	340	2.929	182	1367	158
53.00	380	3.251	182	1365	198

ประวัติผู้เขียน

นายนิรันดร์ แนวเงินดี เกิดเมื่อวันที่ 6 กันยายน พ.ศ. 2524 ที่อำเภอแวงใหญ่ จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนแวงใหญ่วิทยาคม จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2547 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โดยขณะศึกษาได้ปฏิบัติงานเป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 5 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการการแปลงผันพลังงาน (2) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 (3) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2 (4) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 1 และ (5) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 2 ทั้งนี้ มีความสนใจในด้านการวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้า และการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมและอิเล็กทรอนิกส์กำลังในงานระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้า และเมื่อ พ.ศ. 2552 เข้าทำงานในตำแหน่ง วิศวกร ระดับ 4 ประจำแผนกควบคุมการจ่ายไฟ กองควบคุมและบำรุงรักษา ฝ่ายปฏิบัติการเครือข่ายการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 3 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดนครราชสีมา