การประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

นายธัชพงศ์ สุวงษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2559

ENERGY SAVING FOR SINGLE PHASE INDUCTION MOTOR DRIVE

Tuchapong Suwongsa

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 2016

การประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.สุดารัตน์ ขวัญอ่อน)
ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.กองพล อารีรักษ์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ธัชพงศ์ สุวงษา : การประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส (ENERGY SAVING FOR SINGLE PHASE INDUCTION MOTOR DRIVE) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.กองพล อารีรักษ์, 180 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ปั๊มน้ำถูกนำมาใช้เป็นโหลดในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ทั้งนี้เนื่องจากปั๊มน้ำมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในภาคการเกษตร งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนปั๊มน้ำ จากการศึกษา พบว่า การปรับค่าความถี่ และแรงดันให้เหมาะสมกับความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถทำให้ขนาดของกำลังงานสูญเสียมีค่าลดลง การคำนวณหาค่าความถี่ที่เหมาะสมดำเนินการผ่านสมการอนุพันธ์ของกระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่ ในส่วนของการปรับค่าแรงดันที่เหมาะสมจะดำเนินการด้วยตัวควบคุมฟัซซี ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ได้รับการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์ ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ผลทดสอบการใช้กำลังงานไฟฟ้าอินพุตกับวิธีการควบคุมอัตราการไหล พบว่า การควบคุมอัตราการไหลด้วยชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานมีการใช้พลังงานน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการปรับวาล์ว การปรับแรงดัน และการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ อีกทั้งอัลกอริทึมที่นำเสนอให้ค่าตัวประกอบกำลังที่ดีกว่าภายใต้สภาวะการทำงานเดียวกัน การใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ก่อให้เกิดประโยชน์ต่องานด้านการเกษตร โดยเฉพาะในพื้นที่ห่างไกล งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ออกแบบชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสโดยมีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่ ทั้งนี้ เพื่อให้รองรับกับระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนี้ ยังได้นำเสนอตัวอย่างการใช้งานชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานกับสถานการณ์ต่าง ๆ รวมถึงการวิเคราะห์ผลเชิงเศรษฐศาสตร์ เพื่อแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ที่เกษตรกรพึงได้รับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนักศึกษา ธัชพงศ์ สุวงษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ________

TUCHAPONG SUWONGSA : ENERGY SAVING FOR SINGLE PHASE INDUCTION MOTOR DRIVE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. KONGPOL AREERAK, Ph.D., 180 PP.

POWER LOSS MINIMIZATION/ INDUCTION MOTOR/ POWER ELECTRONICS

This thesis presents energy saving for single phase induction motor drive. The water pump is considered as a load in this work. The water pump is widely applied in agriculture. The aim of the thesis is to study the energy saving for driving water pump. For this study, the frequency and voltage should be suitably adjusted in order to get a minimum power losses. The differential equation of the coil current compared with frequency is used to calculate the appropriate frequency. The fuzzy controller is used to regulate the appropriate voltage. The artificial intelligence technique called adaptive tabu search is applied to determine the optimal motor parameters. From the testing results of the utility input power with flow rate control techniques, it can be seen that the proposed energy saving algorithm can provide the smaller input power compared with valve control, voltage control and constant voltage per frequency ratio control techniques. The proposed algorithm also provides a nearly unity power factor under the same operating conditions. The solar cell energy is very useful in agriculture, especially for a rural areas. In order to support the solar cell energy, the thesis proposes the design of single phase induction motor drive system with battery. Moreover, the considered drive system with the proposed energy saving algorithm is

used to solve the agricultural problems. The results show that this algorithm provides high efficiency in terms of economic. Therefore, it is very useful for agriculturist.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Electrical Engineering　　　　Student's Signature ____________

Academic Year 2015　　　　Advisor's Signature ____________

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.กองพล อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ แนวทางอันเป็นประโยชน์ทั้งในด้านการศึกษา และการดำเนินชีวิต รวมถึงให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

รองศาสตราจารย์ ดร.กองพัน อารีรักษ์ ที่ให้คำแนะนำทางด้านวิชาการ และการเขียนบทความวิชาการ

อาจารย์ ดร.ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ ที่ให้คำแนะนำทางด้านวิชาการ และการเขียนบทความวิชาการ รวมทั้งให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณนายพลสิทธิ์ ศานติประพันธ์ นางสาวศศิยา อุดมสุข นางสาวปทุมพร วงค์ใหญ่ นายวรสันต์ สัตยาอภิธาน นายชาคริต ปานแป้น และนางสาวจีรวรรณ หอมจันทร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ แลกเปลี่ยนความรู้ทางวิชาการ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ครู อาจารย์ ทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านต่าง ๆ ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน และบุคคลที่สำคัญอย่างยิ่ง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเสมอมา

ธัชพงศ์ สุวงษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .... ข
กิตติกรรมประกาศ .... ง
สารบัญ .... จ
สารบัญตาราง .... ฌ
สารบัญรูป .... ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .... ฒ

บทที่

1 บทนำ 1
 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น 2
 1.4 ขอบเขตของการวิจัย 2
 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
 1.6 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์ 3
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
 2.1 บทนำ 5
 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส 5
 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 6
 2.4 สรุป 8
3 ทฤษฎีพื้นฐานและการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส 9
 3.1 บทนำ 9
 3.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์แยกถาวร 9
 3.3 กำลังงานสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส 13
  3.3.1 กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ 13

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.2 กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์ 13
3.3.3 กำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก 14
3.3.4 กำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทาน และแรงต้านอากาศ 14
3.3.5 กำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน 14
3.4 การค้าหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส 15
3.4.1 การค้าหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการพื้นฐาน 15
3.4.2 การค้าหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 22
3.5 สรุป 33
4 การพัฒนาอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส 34
4.1 บทนำ 34
4.2 อัลกอริทึมการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส 34
4.2.1 สมการอนุพันธ์ของกระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่ 35
4.2.2 ผลการจำลองสถานการณ์ 51
4.3 สรุป 53
5 โครงสร้างฮาร์ดแวร์สำหรับชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส เพื่อการประหยัดพลังงาน 54
5.1 บทนำ 54
5.2 การเลือกขนาดพิกัดปั๊มน้ำ 54
5.3 โครงสร้างของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส 56
5.4 วงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ 59
5.4.1 การออกแบบวงจร 59
5.4.2 ผลการทดสอบ 63
5.5 วงจรแปลงผันแบบบัคก์ 64
5.5.1 การออกแบบวงจร 65
5.5.2 ผลการทดสอบ 67
5.6 วงจรอินเวอร์เตอร์ 69
5.6.1 การออกแบบวงจร 70

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.6.2 ผลการทดสอบ 70
5.7 วงจรจุดชนวนเกท 72
5.7.1 วงจรแยกโดดสัญญาณ 73
5.7.2 วงจรป้องกันเวลาวิกฤต 76
5.8 ชุดตรวจวัดความเร็วรอบ 78
5.8.1 จานหมุน 79
5.8.2 เซนเซอร์ 80
5.8.3 ผลการทดสอบ 82
5.9 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ 83
5.10 การออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 84
5.10.1 เซลล์แสงอาทิตย์ 85
5.10.2 เครื่องควบคุมการชาร์จประจุแบตเตอรี่ 86
5.10.3 แบตเตอรี่ 86
5.10.4 ตัวอย่างการออกแบบปั๊มน้ำและระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ 87
5.11 สรุป 90

6 การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี 91
6.1 บทนำ 91
6.2 ระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิก 93
6.2.1 การทำฟัซซี 93
6.2.2 กฎของฟัซซี 96
6.2.3 การอนุมานฟัซซี 97
6.2.4 การทำดีฟัซซี 98
6.3 การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี 100
6.4 สรุป 114

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7 การทดสอบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส 115
7.1 บทนำ 115
7.2 การทดสอบการประจุพลังงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 115
7.3 การทดสอบชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน 118
7.4 ตัวอย่างการนำชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานไปใช้งาน 132
7.4.1 กรณีที่ผู้ใช้งานทราบปริมาณน้ำที่ต้องการต่อวัน 132
7.4.2 กรณีที่ต้องการสูบน้ำเพื่อกักเก็บไว้ใช้ 134
7.4.3 กรณีที่นำชุดขับเคลื่อนมาใช้งานกับระบบไฟฟ้าตามครัวเรือน 135
7.5 สรุป 136
8 สรุปและข้อเสนอแนะ 138
8.1 สรุป 138
8.2 ข้อเสนอแนะ 139
รายการอ้างอิง 141
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. รายละเอียดหลักการทดสอบหาค่า ΔN 144
ภาคผนวก ข. โปรแกรม MATLAB สำหรับการจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบความถูกต้องของสมการอนุพันธ์กระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่ที่ผ่านการจัดรูปสมการ 148
ภาคผนวก ค. โปรแกรมภาษาซีของชุดขับเคลื่อนปั๊มน้ำไฟฟ้าที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน และควบคุมแบบฟัซซี 152
ภาคผนวก ง. ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับอัตราการไหล 168
ภาคผนวก จ. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 170
ประวัติผู้วิจัย 180

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานสำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส 5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานสำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 7
3.1 ค่ากำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งานเทียบกับพิกัดมอเตอร์ 15
3.2 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสและขอบเขตการค้นหา 23
3.3 การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น 25
3.4 การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง 26
3.5 การทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น 27
3.6 การทดสอบค่าปรับลดรัศมี 27
4.1 ค่าความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการประหยัดพลังงานที่ค่าความเร็วรอบต่าง ๆ 52
5.1 พิกัดแรงดันและพิกัดกระแสของวงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ 62
5.2 พิกัดอุปกรณ์ของวงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ 63
5.3 พิกัดอุปกรณ์ของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ 67
5.4 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์ 67
5.5 พิกัดปั๊มน้ำและระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัย 90
6.1 ตัวแปรทางภาษาและค่าเชิงภาษา 102
6.2 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต e_S และเอาต์พุต d_B ทั้ง 9 กรณี 105
7.1 ข้อมูลทางพลังงานในการควบคุมอัตราการไหล 129
ก.1 ผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ในกรณีที่ $N = N_r$ 140
ก.2 ผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ในกรณีที่ $N = N_r + 0.1\ N_r$ 141
ก.3 ผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ในกรณีที่ $N = N_r + 0.15\ N_r$ 141
ก.4 ผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ในกรณีที่ $N = N_r + 332$ 142
ง.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์กับอัตราการไหลของน้ำ 169

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

3.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์แยกถาวร 10
3.2 การทดสอบสภาวะตรึงตัวหมุนกรณีขดลวดช่วยถูกเปิดออก 17
3.3 วงจรสมมูลของขดลวดหลักที่สภาวะการทดสอบตรึงตัวหมุน 18
3.4 การทดสอบสภาวะตรึงตัวหมุนกรณีขดลวดหลักถูกเปิดออก 19
3.5 การทดสอบที่สภาวะไร้โหลด 20
3.6 วงจรสมมูลของขดลวดหลักที่สภาวะไร้โหลด 21
3.7 ชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการณ์ 24
3.8 บล็อกไดอะแกรมการค้นหาด้วยวิธีตาบูเชิงปรับตัว 24
3.9 ลักษณะการลู่เข้าของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 29
3.10 ลักษณะการลู่เข้าของค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดหลัก 29
3.11 ลักษณะการลู่เข้าของค่าความต้านทานของโรเตอร์ 30
3.12 ลักษณะการลู่เข้าของค่าความเหนี่ยวนำของโรเตอร์ 30
3.13 ลักษณะการลู่เข้าของค่าความเหนี่ยวนำร่วม 31
3.14 ลักษณะการลู่เข้าของค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดช่วย 31
3.15 ลักษณะการลู่เข้าของค่าโมเมนต์ความเฉื่อย 32
3.16 การเปรียบเทียบความเร็วรอบของมอเตอร์ 32
4.1 การเปลี่ยนแปลงของกำลังงานสูญเสียที่ค่าความเร็วรอบต่าง ๆ
เมื่อค่าความถี่มีการเปลี่ยนแปลง 35
4.2 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร E_1 ต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่
ที่ค่าความเร็วรอบต่าง ๆ 41
4.3 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร E_2 ต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่
ที่ค่าความเร็วรอบต่าง ๆ 42
4.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร E_3 ต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่
ที่ค่าความเร็วรอบต่าง ๆ 42

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.5 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร E_4 ต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่ค่าความเร็วรอบต่าง ๆ 43
4.6 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร E_5 ต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่ค่าความเร็วรอบต่าง ๆ 43
4.7 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร E_6 ต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่ค่าความเร็วรอบต่าง ๆ 44
4.8 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร E_7 ต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่ค่าความเร็วรอบต่าง ๆ 44
5.1 รายละเอียดปั๊มน้ำหอยโข่งไฟฟ้าของบริษัทมิตซูบิชิ 55
5.2 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่ง 57
5.3 ภาพรวมชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่ใช้งานจริงในส่วนวงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ 58
5.4 ภาพรวมชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่ใช้งานจริงในส่วนวงจรแปลงผันแบบบัคก์ และวงจรอินเวอร์เตอร์ 58
5.5 วงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ 59
5.6 โครงสร้างของไอซี TL494CN 60
5.7 วงจรจุดชนวนเกทความถี่สูง 60
5.8 วงจรจุดชนวนเกทความถี่สูงที่สร้างจริง 61
5.9 สัญญาณพัลส์จากวงจรจุดชนวนเกทความถี่สูง 61
5.10 ผลการทดสอบวงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ 64
5.11 วงจรแปลงผันแบบบัคก์ 64
5.12 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ 68
5.13 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ 68
5.14 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 60 เปอร์เซ็นต์ 68
5.15 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์ 69
5.16 วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน 69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.17 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่เท่ากับ 25 Hz 71
5.18 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่เท่ากับ 30 Hz 71
5.19 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่เท่ากับ 40 Hz 72
5.20 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่เท่ากับ 50 Hz 72
5.21 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรจุดชนวนเกท ในชุดขับเคลื่อนปั๊มน้ำไฟฟ้า 73
5.22 โครงสร้างของไอซี PC923 74
5.23 วงจรแยกโดดสัญญาณสำหรับใช้งานจริง 74
5.24 วงจรแยกโดดสัญญาณที่สร้างจริง 75
5.25 ผลการทดสอบวงจรแยกโดดสัญญาณ 75
5.26 วงจรป้องกันเวลาวิกฤต 76
5.27 วงจรป้องกันเวลาวิกฤติที่ใช้งานจริง 76
5.28 สัญญาณอินพุตขาที่ 1 และอินพุตขาที่ 2 มีสถานะลอจิกไม่เหมือนกัน 77
5.29 ผลการทดสอบสัญญาณเอาต์พุตขาที่ 1 และเอาต์พุตขาที่ 2 กรณีสัญญาณอินพุตมีสถานะลอจิกไม่เหมือนกัน 77
5.30 สัญญาณอินพุตขาที่ 1 และอินพุตขาที่ 2 มีสถานะลอจิกเหมือนกัน 78
5.31 ผลการทดสอบสัญญาณเอาต์พุตขาที่ 1 และเอาต์พุตขาที่ 2 กรณีสัญญาณอินพุตมีสถานะลอจิกเหมือนกัน 78
5.32 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของชุดตรวจวัดความเร็วรอบมอเตอร์ 79
5.33 การออกแบบจานหมุน 80
5.34 เซนเซอร์เบอร์ HC-020K 80
5.35 ลักษณะการต่อวงจรเพื่อใช้งาน 81

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.36 ลักษณะการติดตั้งจานหมุนกับมอเตอร์ของปั๊มน้ำหอยโข่งไฟฟ้า.. 81
5.37 ลักษณะการติดตั้งจานหมุนกับเซนเซอร์ 82
5.38 สัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1400 rpm 82
5.39 สัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 2600 rpm 83
5.40 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น MEGA 1280 84
5.41 ส่วนประกอบระบบเซลล์แสงอาทิตย์.. 85
5.42 ตารางแสดงรายละเอียดปั๊มน้ำหอยโข่ง ของบริษัทมิตซูบิชิ.. 88
5.43 แผ่นป้ายแสดงรายละเอียดของปั๊มน้ำมิตซูบิชิ รุ่น ACH-375S 88
6.1 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน
และตัวควบคุมแบบฟัซซี.. 92
6.2 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของระบบควบคุมแบบฟัซซี.. 93
6.3 ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูปสามเหลี่ยม 94
6.4 ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูปสี่เหลี่ยมคางหมู 95
6.5 ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูประฆังคว่ำ... 95
6.6 ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูปเกาส์เซียน 96
6.7 การอนุมานฟัซซีด้วยวิธี Takagi-Sugino.. 99
6.8 การรวมกฎด้วยการอนุมานด้วยวิธี Takagi-Sugino 99
6.9 ลักษณะโครงสร้างของระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ 101
6.10 รูปแบบฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต 101
6.11 รูปแบบฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุต... 102
6.12 อุปกรณ์ตรวจวัด และฮาร์ดแวร์ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์
เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่งไฟฟ้า 107
6.13 ผลการทดสอบการลู่เข้าของความเร็วรอบจริงกับความเร็วรอบอ้างอิงในกรณีที่ 1............. 107
6.14 ผลการทดสอบการลู่เข้าของความเร็วรอบจริงกับความเร็วรอบอ้างอิงในกรณีที่ 2............. 108
6.15 ผลการทดสอบการลู่เข้าของความเร็วรอบจริงกับความเร็วรอบอ้างอิงในกรณีที่ 3............. 108
6.16 ผลการทดสอบการลู่เข้าของความเร็วรอบจริงกับความเร็วรอบอ้างอิงในกรณีที่ 4............. 109

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

6.17 ผลการทดสอบการลู่เข้าของความเร็วรอบจริงกับความเร็วรอบอ้างอิงในกรณีที่ 5............ 109

6.18 ผลการทดสอบการลู่เข้าของความเร็วรอบจริงกับความเร็วรอบอ้างอิงในกรณีที่ 6............ 110

6.19 ผลการทดสอบการลู่เข้าของความเร็วรอบจริงกับความเร็วรอบอ้างอิงในกรณีที่ 7............ 110

6.20 ผลการทดสอบการลู่เข้าของความเร็วรอบจริงกับความเร็วรอบอ้างอิงในกรณีที่ 8............ 111

6.21 ผลการทดสอบการลู่เข้าของความเร็วรอบจริงกับความเร็วรอบอ้างอิงในกรณีที่ 9............ 111

6.22 ผลการทดสอบการลู่เข้าของความเร็วรอบจริงกับความเร็วรอบอ้างอิง ในกรณีที่ทำการทยอยปรับเปลี่ยนค่าความเร็วรอบอ้างอิง 113

6.23 ระยะเวลาในการประมวลผลของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์............ 114

7.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 250 W จำนวน 2 แผง 116

7.2 เครื่องควบคุมการชาร์จประจุที่พิกัดแรงดันเท่ากับ 48 V และพิกัดกระแสเท่ากับ 20 A............ 116

7.3 แบตเตอรี่พิกัดแรงดันเท่ากับ 12 V 75 Ah ต่ออนุกรมกัน 4 ลูก เพื่อเพิ่มระดับให้เป็น 48 V 117

7.4 การวัดค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และกำลังงานไฟฟ้าที่ถูกประจุลงแบตเตอรี่ 117

7.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์ แสงอาทิตย์ และกำลังงานไฟฟ้าที่ถูกประจุลงแบตเตอรี่............ 118

7.6 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่ง สำหรับการควบคุมอัตราการไหลด้วยการปรับวาล์ว การปรับแรงดัน และควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่............ 122

7.7 แผนภาพวิธีการควบคุมอัตราการไหลด้วยการปรับวาล์ว 123

7.8 แผนภาพวิธีการควบคุมอัตราการไหลด้วยการปรับแรงดัน 124

7.9 แผนภาพวิธีการควบคุมอัตราการไหลด้วยการการควบคุมอัตราส่วน แรงดันต่อความถี่ให้คงที่ 125

7.10 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่ง ที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน และตัวควบคุมแบบฟัซซี 126

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

7.11 แผนภาพการทำงานของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส
ที่มีอัลกอริทึม การประหยัดพลังงาน และตัวควบคุมแบบฟัซซี 127
7.12 แผนภาพวิธีการควบคุมอัตราการไหลด้วยชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึม
การประหยัดพลังงาน 128
7.13 กราฟเปรียบเทียบกำลังงานไฟฟ้าอินพุตของการควบคุมอัตราการไหลทั้ง 4 วิธี 130
7.14 กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังของการควบคุมอัตราการไหลทั้ง 4 วิธี 131
7.15 หมายเลขพื้นที่สำหรับการให้น้ำมันสำปะหลังในแต่ละครั้ง 133
7.16 แผนภูมิแสดงปริมาณน้ำที่ได้จากการสูบน้ำทั้ง 2 วิธี 135
8.1 รูปสัญญาณแรงดัน และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ของปั๊มน้ำ 140
ค.1 แผนภูมิการคำนวณหาค่าความถี่เหมาะสมของอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน 154

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

a	=	อัตราส่วนของรอบประสิทธิผลระหว่างขดลวดช่วยกับขดลวดหลัก
Ah	=	ค่าความจุของแบตเตอรี่ (Ah)
DOD	=	ความลึกของการคายประจุ (Deep of discharge) โดยมีค่าประมาณ 25 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับยี่ห้อ และชนิดของแบตเตอรี่
$error_{av}$	=	ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย
E_1	=	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปหน้าของขดลวดหลักจากสนามแม่เหล็กหมุนไปหน้าของขดลวดช่วย (V)
E_2	=	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับของขดลวดหลักจากสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับของขดลวดช่วย (V)
E_3	=	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปหน้าของขดลวดช่วยจากสนามแม่เหล็กหมุนไปหน้าของขดลวดหลัก (V)
E_4	=	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับของขดลวดช่วยจากสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับของขดลวดหลัก (V)
$Flow$	=	ค่าอัตราการไหล (L/min)
I_1	=	กระแสไฟฟ้าของขดลวดหลัก (A)
I_2	=	กระแสไฟฟ้าของขดลวดช่วย (A)
I_{Batt}	=	ขนาดกระแสประจุของแบตเตอรี่ (A)
I_L	=	กระแสไฟฟ้าอินพุต (A)
k	=	ค่าคงที่ของปั๊มหอยโข่ง
k_c	=	สัมประสิทธิ์ของกำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก
k_f	=	ค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทาน และแรงต้านอากาศ
k_{sys}	=	ค่าประสิทธิภาพรวมของระบบ
L	=	ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด (H)
N	=	ความเร็วรอบของมอเตอร์ (rpm)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

N_m	=	ความเร็วของโรเตอร์ (rpm)
N_s	=	ความเร็วซิงโครนัส (rpm)
N_T	=	จำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด
P_{cell}	=	กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (W)
P_{Load}	=	กำลังไฟฟ้าที่โหลด (W)
PSH	=	ระยะเวลาที่ได้รับแสงต่อวัน
T_{Batt}	=	ระยะเวลาในการจ่ายประจุพลังงานในแต่ละวัน (ชั่วโมง)
V_{Batt}	=	แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (V)
θ	=	เป็นมุมประกอบกำลัง (power-factor angle) ของกระแสไฟฟ้าอินพุต
τ	=	แรงบิด (Nm)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันในภาคเกษตรกรรมมีการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาถูก แข็งแรงทนทาน โครงสร้างไม่ซับซ้อน สะดวกในการบำรุงรักษา และมีประสิทธิภาพสูง จึงทำให้เป็นที่นิยมนำมาใช้เป็นต้นกำลังเพื่อขับเคลื่อนอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ปั๊มน้ำ พัดลม เป็นต้น นอกจากนี้ ในบางพื้นที่ที่ทำการเกษตรอยู่ห่างไกล ได้มีการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสมาประยุกต์ใช้กับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ แต่ในบางครั้งพลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์อาจไม่เพียงพอต่อการใช้งาน ดังนั้น จึงต้องใช้พลังงานที่ได้อย่างประหยัด และคุ้มที่สุด จากเหตุผลข้างต้น เป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์สนใจที่จะศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส และมุ่งเน้นที่จะพัฒนาชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ให้เกิดการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ และยังคงทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ของผู้ใช้งาน ในอดีตได้มีผู้คิดค้นวิธีประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสหลายวิธี เช่น การประหยัดพลังงานโดยการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยการปรับขนาดแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดหลัก (Sundareswaran K., 2001) การลดแรงบิดในขณะเริ่มเดินเครื่อง เพื่อลดการกระเพื่อมของกระแสอินพุต (Park S-K., 2001) และการปรับขนาดแรงดันให้เหมาะสมกับโหลดที่ต้องการ (Thanyaphirak V., 2012) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม วิธีที่นำเสนอในข้างต้น จะต้องทำการดัดแปลงวงจรของขดลวดที่อยู่ภายในมอเตอร์ อีกทั้ง มีการใช้เซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดค่าต่าง ๆ ค่อนข้างมาก จึงอาจส่งผลต่อการนำไปใช้งานจริง และค่าใช้จ่ายในสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ที่สูงขึ้น ดังนั้น ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ดำเนินการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมเกี่ยวกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส พบว่า มีการนำเสนอการประหยัดพลังงานด้วยการการปรับแรงดัน และความถี่ที่เหมาะสมเพื่อทำให้ปริมาณของกำลังงานสูญเสียลดลง (Kusko A. and Galler D., 1983) (Kirschen D., 1984) (Famouri P., 1991) ซึ่งการประหยัดพลังงานด้วยวิธีการดังกล่าว เป็นวิธีที่ค่อนข้างสะดวก ต่อการสร้างชุดขับเคลื่อน เนื่องจากไม่ต้องทำการดัดแปลงวงจรของขดลวดที่อยู่ภายในมอเตอร์ เมื่อทำการรวมองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมางานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการการประหยัดพลังงานมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการปรับความถี่ และแรงดัน

ให้เหมาะสม โดยทำการค้นหาค่าความถี่ที่เหมาะสมจากการคำนวณหาค่าความถี่ที่ทำให้สมการอนุพันธ์ของกระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่มีค่าเท่ากับศูนย์ และ ปรับแรงดันให้เหมาะสมด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี ทั้งนี้เนื่องจากโหลดของมอเตอร์เป็นปั๊มน้ำหอยโข่ง งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จึงยืนยันผลการประหยัดพลังงานด้วยการเปรียบเทียบข้อมูลทางพลังงานในขณะที่ทำการควบคุมอัตราการไหลของน้ำ ระหว่างการควบคุมอัตราการไหลด้วยชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน กับการปรับวาล์ว (valve control) การปรับแรงดัน (voltage control) และการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ (v/f control)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้เกี่ยวกับการประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

1.2.2 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้ และพัฒนาวิธีการประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

1.2.3 เพื่อศึกษาองค์ความรู้ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสโดยประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาแบบพื้นฐานร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

1.2.4 เพื่อสร้างต้นแบบชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบประหยัดพลังงาน

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้นของงานวิจัย

1.3.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่ใช้เป็นแบบเปอร์มาเนนท์ สปลิตคาปาซิเตอร์ ขนาดพิกัด เท่ากับ 0.5 แรงม้า

1.3.2 โหลดของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสเป็นปั๊มน้ำหอยโข่ง

1.3.3 แหล่งจ่ายพลังงานอินพุตเป็นแบตเตอรี่ 48 V โดยใช้วงจรเรียงซอฟสวิตช์ซิ่งดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วงจรแปลงผันแบบบัคก์ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนค่ายอดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และวงจรอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนค่าความถี่

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาการประหยัดพลังงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสในสภาวะคงตัวเท่านั้น

1.4.2 สำหรับค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์เพื่อการประหยัดพลังงานมีค่าไม่เกินพิกัดของมอเตอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.4.3 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาความเร็วรอบในช่วง 1400 rpm ถึง 2700 rpm

1.4.4 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาความถี่ในช่วง 25 Hz ถึง 50 Hz

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้ด้านการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

1.5.2 ได้ต้นแบบชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบประหยัดพลังงาน

1.5.3 ได้แนวทางการประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวในการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

1.5.4 ได้องค์ความรู้ด้านการออกแบบพิกัดของปั๊มน้ำ และระบบเซลล์แสงอาทิตย์ให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน

1.5.5 ได้บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ หรือนานาชาติ

1.6 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์

รายงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 7 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น และขอบเขตของงานวิจัย รวมทั้งประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 2 นำเสนอปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส และมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ประเภทของกำลังงานสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส และการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

บทที่ 4 กล่าวถึงหลักการพัฒนา และออกแบบอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน ด้วยวิธีการปรับค่าความถี่ให้เหมาะสมกับค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ และนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อยืนยันความถูกต้อง

บทที่ 5 นำเสนอการเลือกขนาดพิกัดปั๊มน้ำ การออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์ และการสร้างฮาร์ดแวร์สำหรับชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสพร้อมผลการทดสอบ

บทที่ 6 นำเสนอวิธีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้ลู่เข้าหาค่าความเร็วรอบอ้างอิงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี และผลการทดสอบการทำงานของตัวควบคุมดังกล่าวด้วยชุดขับเคลื่อนที่สร้างขึ้น

บทที่ 7 นำเสนอผลการทดสอบการประจุพลังงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ และการประหยัดพลังงานของชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน รวมทั้งแสดงตัวอย่างการนำชุดขับเคลื่อนดังกล่าวไปประยุกต์ใช้งาน

บทที่ 8 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมีอยู่ด้วยกัน 4 ส่วน คือ ภาคผนวก ก. แสดงรายละเอียดของหลักการทดสอบเพื่อหาค่า ΔN ภาคผนวก ข. แสดงโปรแกรม MATLAB สำหรับการจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบความถูกต้องของสมการอนุพันธ์กระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่ที่ผ่านการจัดรูปสมการ ภาคผนวก ค. แสดงโปรแกรมภาษาซีของชุดขับเคลื่อนปั๊มน้ำไฟฟ้าที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน และการควบคุมแบบฟัซซี ภาคผนวก ง. แสดงรายละเอียดความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์กับอัตราการไหล และสุดท้าย ภาคผนวก จ. แสดงรายการบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการทำวิจัยวิทยานิพนธ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์หลัก คือ การประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสสำหรับปั๊มหอยโข่ง ดังนั้นการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสจึงเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญของการทำงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยผู้วิจัยได้ทำการสำรวจงานวิจัยทางด้านการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และนอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมเกี่ยวกับการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอีกด้วย จากผลการสำรวจข้างต้นผู้วิจัยได้นำเสนอปีที่ตีพิมพ์งานวิจัย คณะผู้วิจัย รวมถึงอธิบายสาระสำคัญที่ได้ในแต่ละงานวิจัย

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ตามที่ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน พบว่าการพัฒนาเกี่ยวกับการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสมีการนำเสนอค่อนข้างน้อย แสดงผลการสำรวจงานวิจัยในอดีต ดังตารางที่ 2.1

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานสำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2001	K. Sundareswaran	นำเสนอการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์โดยการปรับขนาดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดหลักของมอเตอร์ในขณะที่ขดลวดช่วยของมอเตอร์ยังคงเชื่อมต่อโดยตรงกับแหล่งจ่าย ซึ่งส่งผลให้ขนาดของกำลังงานสูญเสียลดลง

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานสำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส (ต่อ)

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2001	S-K. Park, H-W. Lim, G-B. Cho, H-L. Baek, S-K. Lee, Y-H. Chang and J-Y. Seo	นำเสนอการลดแรงบิดของมอเตอร์ในขณะเริ่มเดินเครื่อง โดยการควบคุมแรงดันของขดลวดช่วย ซึ่งส่งผลให้การกระเพื่อมของกระแสอินพุตในขณะเริ่มเดินเครื่องลดลง เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานในขณะเริ่มเดินเครื่อง
2012	V. Thanyaphirak, V. Kinnares and A. Kunakorn	นำเสนอการประหยัดพลังงาน โดยการปรับขนาดแรงดันให้เหมาะสมกับขนาดของโหลด ซึ่งพบว่าการปรับค่าแรงดันให้เหมาะสมกับโหลดจะทำให้อัตราส่วนของกระแสขดลวดหลัก กับขดลวดช่วย อยู่ในย่านที่เหมาะสม การควบคุมใช้หลักการ $K_1 = \frac{I_m}{I_a}$ ซึ่งทำให้ทราบค่าแรงดันที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดการประหยัดพลังงาน

จากปริทัศน์วรรณกรรมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังที่นำเสนอดังตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสมีหลากหลายวิธี อาทิ การควบคุมระดับแรงดันที่ขดลวดหลัก และขดลวดช่วยให้เกิดความเหมาะสมกับความเร็วรอบ และโหลดของมอเตอร์ จนทำให้เกิดการประหยัดพลังงาน แต่อย่างไรก็ตามวิธีที่นำเสนอในข้างต้นจะต้องทำการดัดแปลงวงจรของขดลวดที่อยู่ภายในมอเตอร์ และมีการใช้เซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดค่าต่าง ๆ ค่อนข้างมาก ซึ่งอาจส่งผลต่อการนำไปใช้งานจริง และค่าใช้จ่ายสำหรับสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมเกี่ยวกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เพื่อนำองค์ความรู้ที่ได้มาช่วยในการพัฒนา และแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

เนื่องจากการพัฒนาเกี่ยวกับการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสมีการนำเสนอค่อนข้างน้อย ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมเกี่ยวกับการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยแสดงผลการสำรวจงานวิจัยในอดีต ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานสำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1983	A. Kusko, Fellow and D. Galler	นำเสนอการประหยัดพลังงาน โดยการควบคุมแรงดันและความถี่ของมอเตอร์ ซึ่งพบว่าการปรับแรงดัน และความถี่ที่เหมาะสมจะทำให้กำลังงานสูญเสียลดลง การควบคุมกำลังงานสูญเสียใช้หลักการ $\left.\frac{dP_t}{df}\right\|_{T,N} = 0$ ซึ่งจะให้ค่าความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการลดกำลังงานสูญเสียมากที่สุด
1984	D. S. Kirschen, D. W. Novotny and W. Suwanwisut	นำเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพโดยการปรับความถี่และแรงดัน ซึ่งพบว่าฟลักซ์เป็นอัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่ จึงใช้วิธีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์เพื่อให้ประหยัดพลังงาน โดยจะเพิ่มฟลักซ์สำหรับโหลดขนาดใหญ่ และลดฟลักซ์สำหรับโหลดขนาดเล็ก
1991	P. Famouri and J. J. Cathey	นำเสนอการประหยัดพลังงาน โดยการปรับความถี่ และการปรับแรงดันเพื่อควบคุมความเร็วรอบ หลักการที่ทำให้กำลังงานสูญเสียต่ำที่สุด คือ การปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ให้สูงสุด การควบคุมจึงใช้หลักการ $\frac{d\eta}{df} = 0$ ซึ่งจะได้ค่าความถี่ที่ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์สูงที่สุด
1996	I. Kioskeridis and N. Margaris	นำเสนอตัวควบคุมแบบจำลองกำลังงานสูญเสีย (LMC) สำหรับคำนวณหาค่าฟลักซ์ช่องว่างอากาศที่เหมาะสมที่ทำให้กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด โดยหลักการที่ใช้ในการคำนวณ คือ $\left.\frac{dP_{loss}}{d\phi_m}\right\|_{T_e,\omega} = 0$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากปริทัศน์วรรณกรรมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสดังตารางที่ 2.2 พบว่ามีการนำเสนอการประหยัดพลังงานด้วยการปรับแรงดันและความถี่ให้เหมาะสม เพื่อทำให้กำลังงานสูญเสียลดลง ซึ่งหลักการดังกล่าวเป็นวิธีที่ค่อนข้างสะดวกต่อการสร้างชุดขับเคลื่อน

จากการผสมผสานองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยในอดีต การประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะนำเสนอวิธีการประหยัดพลังงานด้วยการปรับความถี่ และแรงดันให้เหมาะสม เพื่อทำให้กำลังงานสูญเสียลดลง ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะทำการค้นหาค่าความถี่ที่เหมาะสมโดยใช้หลักการการหาอนุพันธ์ของกระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่เท่ากับศูนย์ และในขณะเดียวกันจะทำการปรับแรงดันให้เหมาะสมด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี ซึ่งวิธีการดังกล่าวใช้เซนเซอร์สำหรับวัดค่าความเร็วรอบเพียงตัวเดียวเท่านั้น จึงทำให้สะดวก และเหมาะสมสำหรับการสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อใช้งานจริง

2.4 สรุป

จากปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้นำเสนอในข้างต้น เป็นผลงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส และมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งงานวิจัยต่าง ๆ ในอดีตที่นำเสนอถือว่าเป็นพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งต่อผู้วิจัยสำหรับการออกแบบและพัฒนาวิธีการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส โดยหลักการการประหยัดพลังงานในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้วิธีการปรับความถี่ และแรงดันให้เหมาะสม เพื่อทำให้ขนาดของกำลังงานสูญเสียลดลง ซึ่งการหาค่าความถี่ที่เหมาะสมจะใช้วิธีการหาอนุพันธ์ของกระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่เท่ากับศูนย์ และทำการปรับแรงดันให้เหมาะสมด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี โดยมีการอธิบายวิธีการออกแบบ และพัฒนาหลักการประหยัดพลังงานดังกล่าวในบทที่ 4 และบทที่ 6 ทั้งนี้เพื่อทำให้เกิดความเข้าใจในกระบวนการดังกล่าวจำเป็นจะต้องศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ซึ่งได้ทำการอธิบายไว้ในบทที่ 3

บทที่ 3
ทฤษฎีพื้นฐานและการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

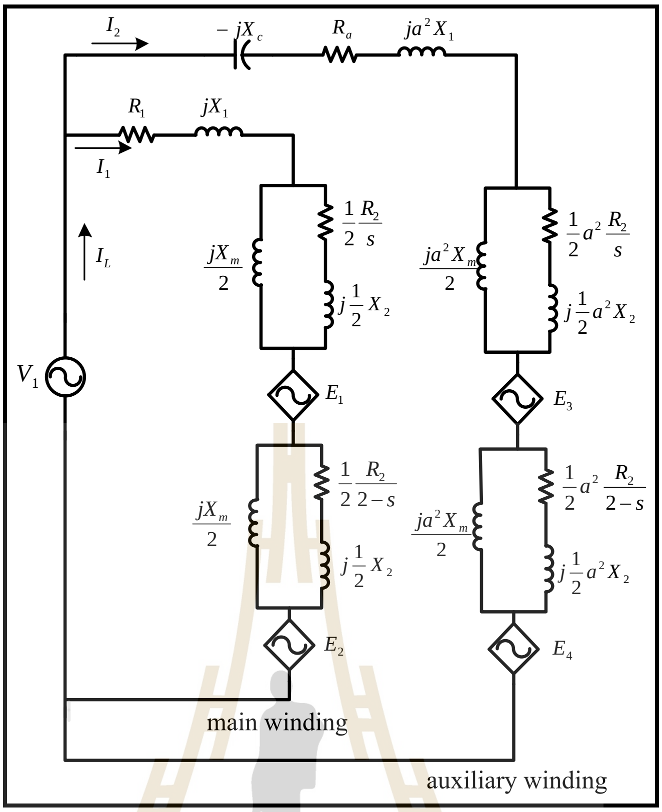
3.1 บทนำ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ คือ การประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่งไฟฟ้า เพราะฉะนั้นการมีความรู้ ความเข้าใจ เกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ การเกิดขึ้นของกำลังงานสูญเสียภายในมอเตอร์ และการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลความรู้ดังกล่าวจะถูกใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของกำลังงานสูญเสีย การจำลองสถานการณ์การทำงานของมอเตอร์ในกรณีที่ยากต่อการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ และการออกแบบอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ และกระบวนการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์แยกถาวร

เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มหอยโข่งไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา และวิจัยในงานวิทยานิพนธ์นี้ เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์แยกถาวร (permanent split-capacitor motor) หรือเรียกอีกชื่อว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์รัน (capacitor run motor) ซึ่งมอเตอร์ดังกล่าวมีลักษณะโครงสร้างภายในเหมือนกับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสทั่วไป แต่มีความแตกต่างตรงที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมไว้กับขดลวดช่วยของมอเตอร์ตลอดเวลา โดยจะไม่มีการตัดออกหลังจากมอเตอร์หมุน แสดงวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์แยกถาวร (Sundareswaran, 2001) ได้ดังรูปที่ 3.1

จากรูปที่ 3.1 พบว่าภายในวงจรสมมูลดังกล่าวจะประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด ได้แก่ ขดลวดหลัก (main winding) และขดลวดช่วย (auxiliary winding) เมื่อทำการพิจารณาวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์แยกถาวร สามารถคำนวณอิมพีแดนซ์ไปหน้า (forward impedance: Z_f) และอิมพีแดนซ์ย้อนกลับ (backward impedance: Z_b) ของขดลวดหลักได้จากสมการที่ (3-1) และ (3-2) ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์แยกถาวร

$$Z_f = R_f - jX_f = 0.5\frac{jX_m\left[R_2/s + jX_2\right]}{R_2/s + j\left(X_2 + X_m\right)} \tag{3-1}$$

$$Z_b = R_b - jX_b = 0.5\frac{jX_m\left[R_2/(2-s) + jX_2\right]}{R_2/(2-s) + j\left(X_2 + X_m\right)} \tag{3-2}$$

จาก Z_f และ Z_b สามารถคำนวณหาค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดหลักจากสนามแม่เหล็กหมุนไปหน้า และสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับ ได้จากสมการที่ (3-3) และ (3-4) ตามลำดับ

$$E_{fm} = I_1 Z_f \tag{3-3}$$

$$E_{bm} = I_1 Z_b \tag{3-4}$$

ส่วนสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดช่วยจากสนามแม่เหล็กหมุนไปหน้า และสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับ แสดงได้ดังสมการที่ (3-5) และ (3-6) ตามลำดับ

$$E_{fa} = I_2 a^2 Z_f \tag{3-5}$$

$$E_{ba} = I_2 a^2 Z_b \tag{3-6}$$

จากอัตราส่วนของรอบประสิทธิผลระหว่างขดลวดช่วยกับขดลวดหลัก (a) ที่ถูกพันเพื่อทำให้มุมทางไฟฟ้าของขดลวดหลักนำขดลวดช่วยอยู่ 90 องศาทางไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดหลัก อันเป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กหมุนไปหน้าของขดลวดช่วยที่ตามอยู่ 90 องศาจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดช่วย ด้วยเหตุนี้จึงต้องทำการคูณ $1/a$ กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดหลักที่เกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดช่วย ดังสมการที่ (3-7)

$$E_1 = -j\frac{1}{a}E_{fa} = -jaI_2 Z_f \tag{3-7}$$

และในกรณีที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดหลักที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับของขดลวดช่วยที่นำอยู่ 90 องศาจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดช่วย แสดงได้ดังสมการที่ (3-8)

$$E_2 = j\frac{1}{a}E_{ba} = jaI_2 Z_b \tag{3-8}$$

ในทำนองเดียวกัน แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปหน้า และย้อนกลับของขดลวดช่วยที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนไปหน้า และย้อนกลับของขดลวดหลัก แสดงได้ดังสมการที่ (3-9) และ (3-10)

$$E_3 = jaI_1 Z_f \tag{3-9}$$

$$E_4 = -jaI_1 Z_b \tag{3-10}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เมื่อพิจารณาขดลวดหลัก และขดลวดช่วยในวงจรสมมูลดังรูปที่ 3.1 ด้วยกฎของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3-11) และ (3-12) ดังนี้

$$V_1 = I_1(R_1 + jX_1) + E_{fm} + E_{bm} + E_1 + E_2 \qquad (3\text{-}11)$$

$$V_1 = I_2(Z_a + ja^2 X_1) + E_{fa} + E_{ba} + E_3 + E_4 \qquad (3\text{-}12)$$

โดยที่ $Z_a = R_a - jX_c$

เมื่อทำการจัดรูปสมการที่ (3-11) และ (3-12) เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา จะได้สมการใหม่ดังสมการที่ (3-13) และ (3-14)

$$V_1 = I_1 Z_{11} + I_2 Z_{12} \qquad (3\text{-}13)$$

$$V_1 = I_1 Z_{21} + I_2 Z_{22} \qquad (3\text{-}14)$$

โดยที่
$$Z_{11} = R_1 + Z_f + Z_b + jX_1$$
$$Z_{12} = -ja\left[Z_f - Z_b\right]$$
$$Z_{21} = ja\left[Z_f - Z_b\right]$$
$$Z_{22} = Z_a + a^2\left[Z_f + Z_b + jX_1\right]$$

สามารถคำนวณหากระแสในขดลวดหลัก และขดลวดช่วยได้จากสมการที่ (3-16) และ (3-17) ตามลำดับ

$$I_1 = \frac{V_1\left[Z_{22} - Z_{12}\right]}{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}} \qquad (3\text{-}16)$$

$$I_2 = \frac{V_1\left[Z_{11} - Z_{21}\right]}{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}} \qquad (3\text{-}17)$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

และคำนวณหากระแสอินพุตได้จากผลรวมของกระแสในขดลวดหลัก และขดลวดช่วย ดังสมการที่ (3-18)

$$I_L = I_1 + I_2 \tag{3-18}$$

กำลังไฟฟ้าอินพุตของมอเตอร์คำนวณได้จากสมการที่ (3-19)

$$P_{in} = \mathrm{Re}\left[V_1 I_L^*\right] = V_1 I_L \cos\theta \tag{3-19}$$

เนื่องจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์หลัก คือ การลดกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ จากทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์แยกถาวร ที่ได้นำเสนอผ่านมาในข้างต้น พบว่ามีข้อมูลที่เพียงพอสำหรับใช้ในการวิเคราะห์กำลังงานสูญเสียต่าง ๆ และพฤติกรรมการทำงานของมอเตอร์ในเบื้องต้น

3.3 กำลังงานสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสประกอบด้วย กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ (stator copper loss) กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์ (rotor copper loss) กำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก (core loss) กำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทาน และแรงต้านอากาศ (friction and windage loss) และกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน (stay loss) ซึ่งกำลังงานสูญเสียแต่ละชนิดเกิดขึ้นจากปัจจัยที่แตกต่างกัน ดังแสดงต่อนี้

3.3.1 กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์

เป็นกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยความต้านทานของขดลวดหลัก และขดลวดช่วย ดังสมการที่ (3-20)

$$P_{scl} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_a \tag{3-20}$$

3.3.2 กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์

เป็นกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ แสดงได้ดังสมการที่ (3-21)

$$P_{rcl} = I_{r11}^2 \frac{0.5R_2}{s} + I_{r12}^2 \frac{0.5R_2}{(2-s)} + I_{r21}^2 \frac{0.5a^2R_2}{s} + I_{r22}^2 \frac{0.5a^2R_2}{(2-s)} \qquad (3\text{-}21)$$

โดยที่ $I_{r11} = I_1 \dfrac{jX_m}{R_2/s - j(X_m + X_2)}$

$$I_{r12} = I_1 \frac{jX_m}{R_2/(2-s) - j(X_m + X_2)}$$

$$I_{r21} = I_2 \frac{jX_m}{R_2/s - j(X_m + X_2)}$$

$$I_{r22} = I_2 \frac{jX_m}{R_2/(2-s) - j(X_m + X_2)}$$

3.3.3 กำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก

เป็นกำลังงานสูญเสียที่ประกอบด้วยกำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (eddy current loss) และกำลังงานสูญเสียฮีสเทอรีซิส (hysteresis loss) กำลังงานเหล่านี้เกิดจากคุณลักษณะของวัสดุของมอเตอร์ (Boldea and Nasar, 2010) ดังสมการที่ (3-23)

$$P_{core} = k_c V_1^2 \qquad (3\text{-}23)$$

3.3.4 กำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทาน และแรงต้านอากาศ

เป็นกำลังงานสูญเสียที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างส่วนที่หมุน และอากาศภายในมอเตอร์ กำลังงานสูญเสียนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วในการหมุน แสดงได้ดังสมการที่ (3-24)

$$P_m = k_f N^3 \qquad (3\text{-}24)$$

เนื่องจากกำลังงานสูญเสียนี้เป็นกำลังงานสูญเสียทางกล และมีค่าน้อย (Ryff, 1994) เมื่อเทียบกับกำลังงานสูญเสียทางไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะไม่พิจารณานำกำลังงานสูญเสียประเภทนี้

3.3.5 กำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน

เป็นกำลังงานสูญเสียที่ไม่เข้ากลุ่มกับกำลังงานสูญเสียที่ผ่านมา แต่สามารถทำการประมาณขนาดของกำลังงานสูญเสียดังกล่าวได้จากขนาดพิกัดของมอเตอร์ (Beaty and Kirtley, 1998) ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่ากำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งานเทียบกับพิกัดมอเตอร์

Motor rating (hp)	Stray-load Loss (percent of rated output)
1-125	1.8
126-500	1.5
501-2499	1.2
$\geq$ 2500	0.9

เนื่องจากมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีขนาดพิกัดเพียงครึ่งแรงม้า จึงส่งผลให้กำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งานมีค่าน้อย (Ryff, 1994) เมื่อเทียบกับกำลังงานสูญเสียทางไฟฟ้าอื่น ๆ ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะไม่ทำการพิจารณากำลังงานสูญเสียประเภทนี้

3.4 การค้าหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

การวิเคราะห์พฤติกรรมของกำลังงานสูญเสีย จำเป็นที่จะต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงให้ความสำคัญต่อการหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ทั้งนี้เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้อง แม่นยำ และเหมาะสมที่สุด โดยพารามิเตอร์บางค่าสามารถหาได้จากผู้ผลิต เช่น โพล (pole) และตัวเก็บประจุ (C) และแม้ว่าบางค่า เช่น ความต้านทานของขดลวดหลัก (R_1) ความเหนี่ยวนำของขดลวดหลัก (L_1) ความต้านทานของโรเตอร์ (R_2), ความเหนี่ยวนำของโรเตอร์ (L_2) ความเหนี่ยวนำร่วม (L_m) ความต้านทานของขดลวดช่วย (R_a) ความเหนี่ยวนำของขดลวดช่วย (L_a) ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (J) และอัตราส่วนจำนวนรอบ (a) จะไม่สามารถหาได้จากผู้ผลิตก็ตาม แต่ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้สามารถหาได้จากการทดสอบด้วยวิธีการพื้นฐาน (Guru, 2001) อย่างไรตามถึงแม้จะทราบค่าจากผู้ผลิต และการทดสอบด้วยวิธีพื้นฐาน แต่ค่าที่ได้อาจไม่มีความเหมาะสม ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่า การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (adaptive tabu search: ATS) มาประยุกต์ใช้ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์บางค่าที่มีความยุ่งยากต่อการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และช่วยค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสมมากขึ้น แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1 การค้าหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการพื้นฐาน

สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการพื้นฐานจะทำการพิจารณาวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนียวนำหนึ่งเฟส ดังรูปที่ 3.1 จากวงจรสมมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าขดลวดภายใน

มอเตอร์ถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ ขดลวดหลัก และขดลวดช่วย ซึ่งในการหาค่าพารามิเตอร์จะทำการพิจารณาขดลวดทีละชุด โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- การหาค่าความต้านทานของขดลวดหลัก และค่าความต้านทานของขดลวดช่วย

การหาค่าความต้านทานสามารถทำได้โดยการใช้เครื่องมือวัดในการวัดค่าความต้านทานได้โดยตรงกับชุดขดลวดที่ต้องการวัด ซึ่งในการวัดค่าความต้านทานของขดลวดหลักจะต้องทำการปลดขดลวดช่วยออกจากวงจรก่อน แล้วค่อยทำการวัดค่าความต้านทานของขดลวดหลัก ในลักษณะเดียวกันเมื่อทำการวัดค่าความต้านทานของขดลวดช่วยจะต้องทำการปลดตัวเก็บประจุ และขดลวดหลักออกจากวงจรก่อนแล้วค่อยทำการวัดค่าความต้านทานของขดลวดช่วย จากวิธีการดังกล่าว แสดงค่าความต้านทานที่วัดด้วยเครื่องมือวัดได้ดังนี้

ค่าความต้านทานของขดลวดหลัก = 12.5 Ω

ความต้านทานของขดลวดช่วย = 15.3 Ω

- การทดสอบสภาวะตรึงตัวหมุน (Blocked - Rotor Test)

การทดสอบสภาวะตรึงตัวหมุน คือ การยึด หรือล็อคโรเตอร์ของมอเตอร์ไม่ให้หมุนในขณะที่ทำการทดสอบ เมื่อโรเตอร์ไม่หมุนจะทำให้ค่าสลิป (slip: s) มีค่าเท่ากับหนึ่ง ดังความสัมพันธ์ในสมการที่ (3-25)

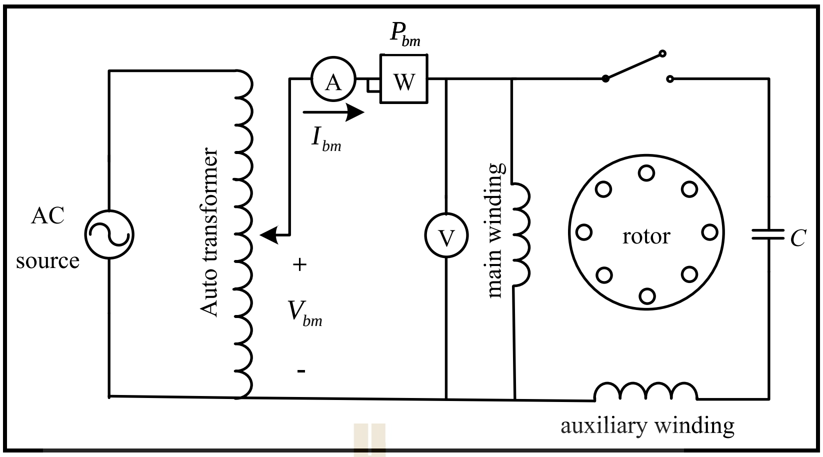
$$s = \frac{N_s - N_m}{N_s} \times 100\% \qquad (3\text{-}25)$$

กรณีพิจารณาขดลวดหลัก

ในกรณีนี้จะทำการปลดขดลวดช่วยออกจากวงจรก่อน แล้วทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดหลักจนกระทั่งกระแสไฟฟ้าอินพุตมีค่าเท่ากับกระแสพิกัดของมอเตอร์ ดังรูปที่ 3.2 แล้วทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าอินพุต และกำลังงานไฟฟ้าอินพุตในขณะนั้น ซึ่งสามารถวัดค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

$V_{bm} = 96.4$ V $\quad I_{bm} = 3.42$ A $\quad P_{bm} = 297.3$ W

จากการทดสอบในสภาวะตรึงตัวหมุนของขดลวดหลัก ค่าที่วัดได้จะถูกนำไปคำนวณหาค่าความเป็นอิมพิแดนซ์ในวงจร (Z_{bm}) และค่าความต้านทานรวมภายในวงจร (R_{bm}) ดังสมการที่ (3-26) และ (3-27) ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 การทดสอบสภาวะตรึงตัวหมุนกรณีขดลวดช่วยถูกเปิดออก

$$Z_{bm} = \frac{V_{bm}}{I_{bm}} = \frac{96.4}{3.42} = 28.187\ \Omega \tag{3-26}$$

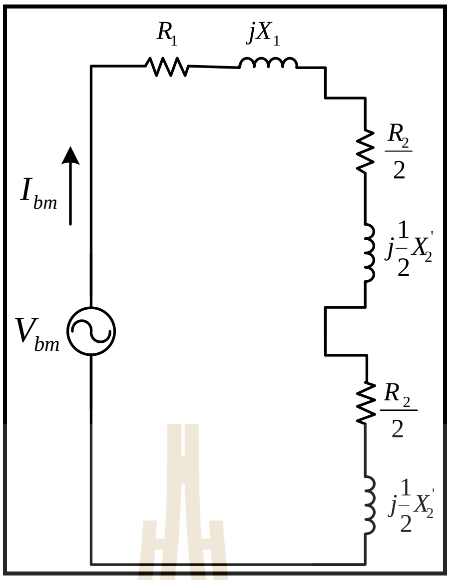
$$R_{bm} = \frac{P_{bm}}{I_{bm}^{2}} = \frac{297.3}{3.42^{2}} = 25.418\ \Omega \tag{3-27}$$

สามารถคำนวณหาค่ารีแอกแตนซ์ (X_{bm}) จากค่าอิมพิแดนซ์ในวงจร และค่าความต้านทานรวมภายในวงจร ดังสมการที่ (3-28)

$$X_{bm} = \sqrt{Z_{bm}^{2} - R_{bm}^{3}} = 12.183\ \Omega \tag{3-28}$$

จากสภาวะตรึงตัวหมุนของวงจรสมมูล ส่งผลทำให้สลิปมีค่าเท่ากับหนึ่ง และในขณะเดียวกันการปลดขดลวดช่วยออกจากวงจรจะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดหลัก (E_1 และ E_2) มีค่าเท่ากับศูนย์ อีกทั้งค่ารีแอกแตนซ์ทางแม่เหล็กของมอเตอร์ (X_m) มีค่ามากกว่าความต้านทานของโรเตอร์มาก ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาจึงสมมติให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน X_m หรือทำการเปิดวงจร ดังรูปที่ 3.3 จากวงจรสมมูลดังกล่าวสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานของโรเตอร์ที่อ้างอิงขดลวดหลัก (R_2') ได้จากสมการที่ (3-29)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของขดลวดหลักที่สภาวะการทดสอบตรึงตัวหมุน

$$R_2' = R_{bm} - R_1 = 12.918\,\Omega \tag{3-29}$$

โดยที่ $R_1 = 12.5\ \Omega$

ดังนั้น ความต้านทานของโรเตอร์ที่อ้างอิงขดลวดหลักมีค่าเท่ากับ 12.918 Ω

จากวงจรสมมูลพบว่าค่ารีแอกแตนซ์รวมของขดลวดหลัก (X_{bm}) มีค่าเท่ากับผลรวมของค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดหลัก (X_1) รวมกับค่ารีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ ($X_1 = X_2'$) จึงสามารถพิจารณาค่ารีแอกแตนซ์ ทั้งสองได้จากสมการ (3-30)

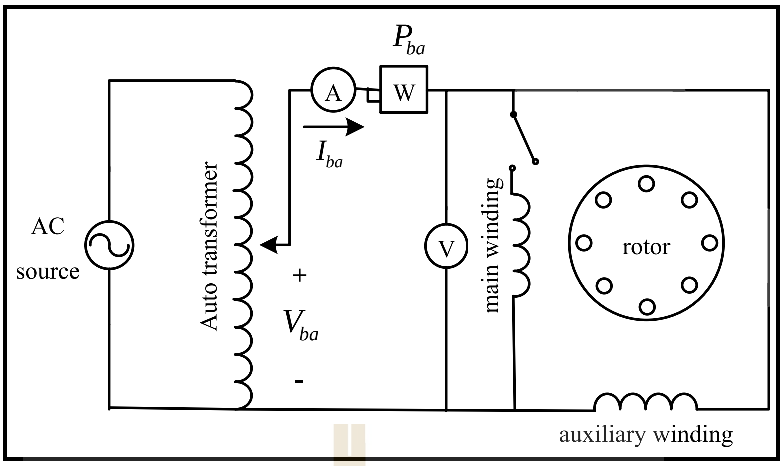
$$X_{bm} = X_1 + X_2' \tag{3-30}$$

ดังนั้น ค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดหลักมีค่าเท่ากับ 6.091 Ω และค่ารีแอกแตนซ์ของโรเตอร์มีค่าเท่ากับ 6.091 Ω ด้วยเช่นกัน

กรณีพิจารณาขดลวดช่วย

ในกรณีนี้จะทำการปลดขดลวดหลัก และตัวเก็บประจุออกจากวงจรก่อน แล้วทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดช่วยจนกระทั่งกระแสไฟฟ้าอินพุตมีค่าเท่ากับกระแสพิกัดของมอเตอร์ ดังรูปที่ 3.4 แล้วทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าอินพุต และกำลังงานไฟฟ้าอินพุต แสดงค่าต่าง ๆ ที่วัดได้ดังต่อไปนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.4 การทดสอบสภาวะตรึงตัวหมุนกรณีขดลวดหลักถูกเปิดออก

V_{ba} = 113.8 V I_{ba} = 3.37 A P_{ba} = 353.1 W

จากการทดสอบในสภาวะตรึงตัวหมุนของขดลวดช่วย ค่าที่วัดได้จะถูกนำไป คำนวณหาค่าความต้านทานรวมภายในวงจรของขดลวดช่วย (R_{ba}) ดังสมการที่ (3-31)

$$R_{ba} = \frac{P_{ba}}{I_{ba}^2} = \frac{353.1}{3.37^2} = 31.091\,\Omega \tag{3-31}$$

จากความสัมพันธ์ภายในวงจรสมมูล สามารถหาค่าความต้านทานของโรเตอร์ ที่อ้างอิงขดลวดช่วย (R_2) ได้ดังสมการที่ (3-32)

$$R_2 = R_{ba} - R_a \tag{3-32}$$

โดยที่ R_a = 15.3 Ω

ดังนั้น ความต้านทานของโรเตอร์ที่อ้างอิงขดลวดช่วยมีค่าเท่ากับ 15.791 Ω

จากความต้านทานของโรเตอร์ที่อ้างอิงขดลวดหลัก และอ้างอิงขดลวดช่วย สามารถคำนวณหาค่าอัตราส่วนจำนวนรอบระหว่างขดลวดทั้งสองจากสมการที่ (3-33)

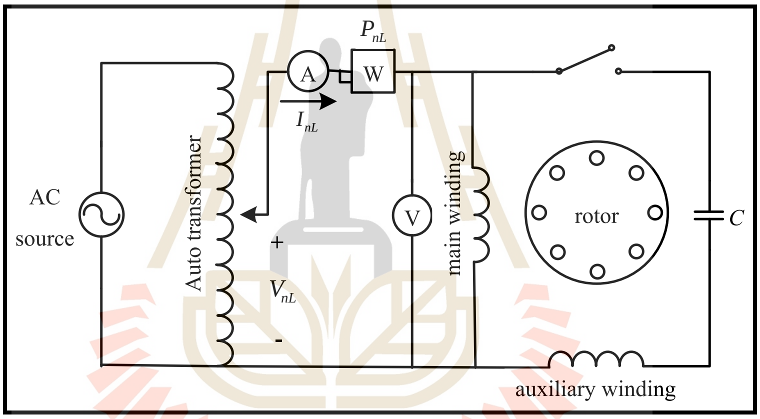
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$a = \sqrt{\frac{R_2}{R_2^{'}}} = \sqrt{\frac{15.791}{12.918}} \tag{3-33}$$

ดังนั้น อัตราส่วนจำนวนรอบมีค่าเท่ากับ 1.1056

- การทดสอบสภาวะไร้โหลด (No Load Test)

ในการทดสอบมอเตอร์ที่สภาวะไร้โหลดจะทำการปลดขดลวดช่วยออกจากวงจร โดยคงเหลือไว้เพียงขดลวดหลัก แล้วทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับมอเตอร์จนกระทั่งมีค่าเท่ากับแรงดันพิกัดของมอเตอร์ ดังรูปที่ 3.5 แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าอินพุต และกำลังงานไฟฟ้าอินพุตในขณะนั้น ซึ่งสามารถวัดค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 3.5 การทดสอบที่สภาวะไร้โหลด

$V_{nl} = 220.7$ V $\quad$ $I_{nl} = 2.89$ A $\quad$ $P_{nl} = 219.1$ W

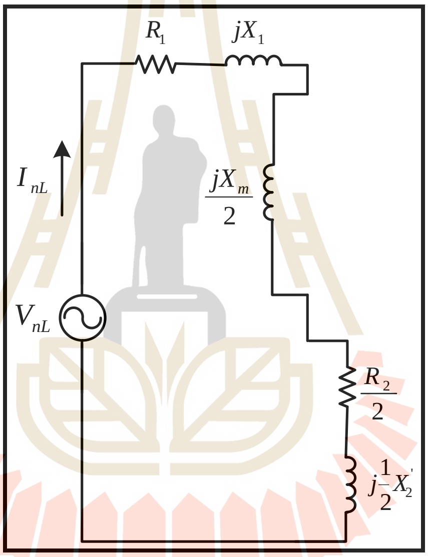
จากการทดสอบในสภาวะไร้โหลดของขดลวดหลัก ค่าที่วัดได้จะถูกนำไปคำนวณหาค่าความเป็นอิมพิแดนซ์ขณะไร้โหลด (Z_{nl}) และค่าความต้านทานรวมภายในวงจรขณะไร้โหลด (R_{nl}) ดังสมการที่ (3-34) และ (3-35) เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่ารีแอกแตนซ์ขณะไร้โหลด (X_{nl}) ดังสมการที่ (3-36)

$$Z_{nl} = \frac{V_{nl}}{I_{nl}} = \frac{220.7}{2.89} = 76.366\,\Omega \tag{3-34}$$

$$R_{nl} = \frac{P_{nl}}{I_{nl}^2} = \frac{219.1}{2.89^2} = 26.232\ \Omega \tag{3-35}$$

$$X_{nl} = \sqrt{Z_{nl}^2 - R_{nl}^2} = 71.72\ \Omega \tag{3-36}$$

สำหรับสภาวะไร้โหลด ความเร็วรอบของโรเตอร์จะมีความเร็วใกล้เคียงกับความเร็วซิงโครนัส จึงส่งผลให้สลิปมีค่าน้อยมาก เพื่อให้ง่าย และสะดวกต่อการคำนวณงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะทำการสมมติให้สลิปมีค่าเท่ากับศูนย์ เพราะฉะนั้นค่าความต้านทานของโรเตอร์ที่อ้างอิงขดลวดหลัก ณ บางจุดจึงมีค่ามาก ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เป็นการเปิดวงจร ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลของขดลวดหลักที่สภาวะไร้โหลด

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถคำนวณหาค่ารีแอกแตนซ์ทางแม่เหล็กของมอเตอร์ จากสมการที่ (3-37) จะได้ $X_m = 2X_{nL} - 1.5X_{bm}$

$$X_{nl} = X_1 + 0.5X_m + 0.5X_2 \tag{3-37}$$

โดยที่ $X_1 = X_2 = 0.5X_{bm}$

ดังนั้น รีแอกแตนซ์ทางแม่เหล็กของมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 125.6 Ω

จากการทดสอบพื้นฐานที่ผ่านมาสามารถเปลี่ยนค่ารีแอกแตนซ์เป็นค่าความเหนี่ยวนำได้ดังสมการที่ (3-38)

$$X = 2\pi fL \tag{3-38}$$

สำหรับการพิจารณาระบบการทำงานของมอเตอร์ นอกจากทราบค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าแล้ว ยังมีความจำเป็นที่จะต้องทราบค่าพารามิเตอร์ทางกลด้วยเช่นกัน ซึ่งได้แก่ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย การหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยด้วยวิธีพื้นฐานนั้นทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากในการทดสอบจะต้องทำการขับเคลื่อนมอเตอร์ในสภาวะไร้โหลด แล้วทำการปิดแหล่งจ่ายทันที และในขณะเดียวกันจะต้องทำการวัดความเร็วรอบในขณะที่มอเตอร์มีการชะลอตัวจนกระทั่งหยุดหมุน ซึ่งจะทำให้ได้กราฟการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเทียบกับเวลาจากการชะลอตัวของมอเตอร์ โดยกราฟที่ได้จากการทดสอบดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการพิจารณาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่อไป แต่มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่งที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีการติดตั้งมาพร้อมกับปั๊มหอยโข่ง จึงทำให้การวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ในสภาวะชะลอตัวด้วยอุปกรณ์ภายในห้องปฏิบัติการนั้นทำได้ยาก ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์มาช่วยในการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ ดังที่จะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

3.4.2 การค้าหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวถูกพัฒนามาจากการค้นหาแบบตาบูพื้นฐาน (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552) โดยการค้นหาแบบดังกล่าวมีการเพิ่มกลไกการเดินย้อนรอยเดิม และการปรับรัศมีการค้นหา ซึ่งการเพิ่มขึ้นของกลไกดังกล่าวส่งผลให้สมรรถนะในการหลุดจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่น และการลู่เข้าหาคำตอบเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้คำตอบที่ได้มีความถูกต้อง และแม่นยำ อีกทั้งวิธีการค้นหาแบบดังกล่าวได้มีการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์แล้วว่าคำตอบมีการลู่เข้าค่าที่เหมาะสม (Puangdownreong and others, 2002) ด้วยเหตุนี้งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวสำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส โดยจะทำการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวทั้งหมด 6 ค่าด้วยกัน ได้แก่ L_1, R_2, L_2, L_m, L_a และ J โดยกำหนดให้ขอบเขตการค้นหาอยู่ที่ ± 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีพื้นฐานที่พิกัดของมอเตอร์ดังอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.4.1 และในส่วนของขอบเขตค่าโมเมนต์ความเฉื่อยได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง(Guinee and Lyden, 2001), (Sea-kok and Lumyong, 2003) และ (Andoh, 2007) แสดงค่าของขอบเขตการค้นหาได้ดังตารางที่ 3.2 ส่วนค่าพารามิเตอร์อีก 5 ตัว ได้แก่ R_1, R_a,

โพล, C และ a สามารถหาได้จากผู้ผลิต และการวัดด้วยเครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการณ์ ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้ $R_1 = 12.5\ \Omega$, $R_a = 15.3\ \Omega$, $C = 15\ \mu F$, โพล = 2 และ $a = 1.1056$

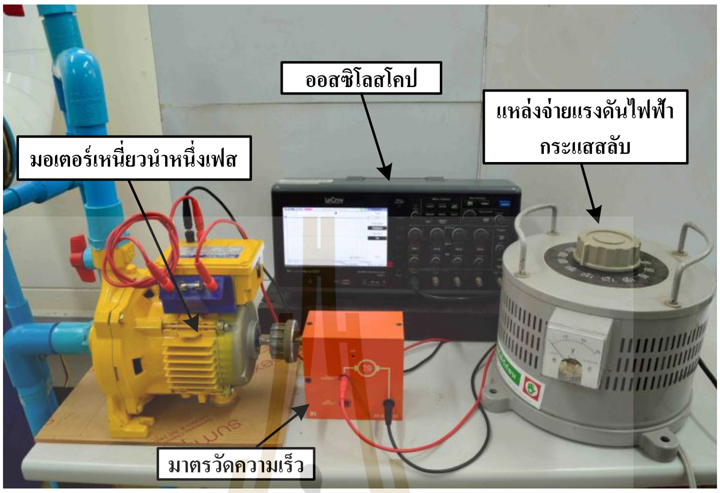
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส และขอบเขตการค้นหา

พารามิเตอร์	การค้นหาด้วยวิธีพื้นฐาน	ขอบเขตการค้นหา	การค้นหาด้วยวิธีตาบูเชิงปรับตัว
L_1 (mH)	19.38	[17.44 21.31]	19.30
R_2 (Ω)	12.90	[11.61 14.19]	13.26
L_2 (mH)	19.38	[17.44 21.31]	19.50
L_m (H)	0.39	[0.35 0.43]	0.40
L_a (mH)	23.68	[21.31 26.04]	24.20
J (kg.m^2)	-	[0.0001 0.005]	0.0016

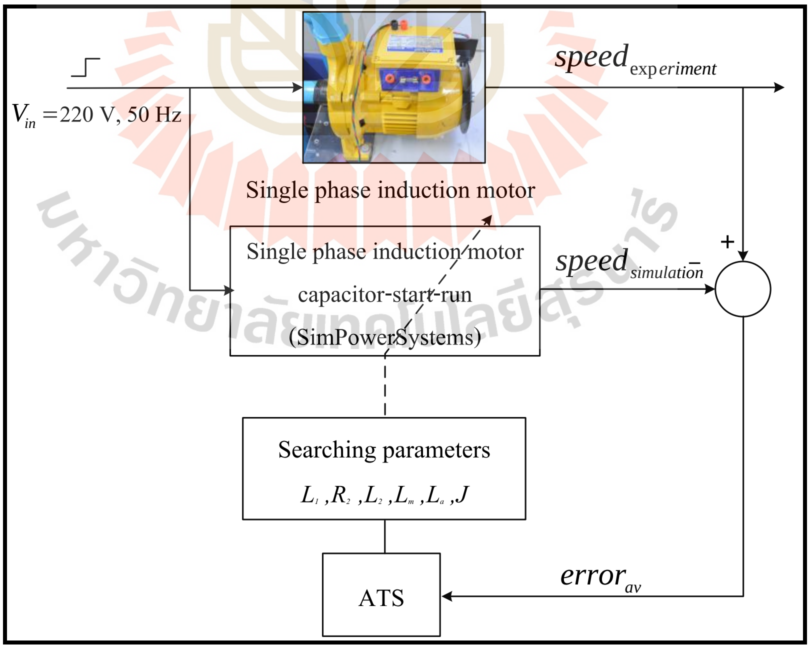
งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสในขณะเริ่มเดินเครื่องที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการเป็นค่าอ้างอิงในการเปรียบเทียบกับความเร็วรอบจากการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้บล็อกสำเร็จรูปของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสใน SimPowerSystems ของโปรแกรม MATLAB เข้ามาช่วยในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ เนื่องจากบล็อกดังกล่าวได้พัฒนามาจากวงจรสมมูลพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส (Krause P.C. and others, 1995) ซึ่งตรงกับที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 3.7 และแสดงแผนภาพการค้นหาค่าพารามิเตอร์ได้จากบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.8 สำหรับการใช้บล็อกสำเร็จรูปของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสใน SimPowerSystem จะต้องทำการตั้งค่าให้ Type of machine เป็นชนิด Capacitor –Start-Run และค่าของ Disconnection speed มีค่าเท่ากับศูนย์ จึงจะทำให้บล็อกดังกล่าวมีการทำงานเหมือนกับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์แยกถาวร

จากรูปที่ 3.8 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว คือ ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ($error_{av}$) ระหว่างความเร็วรอบจากการทดสอบ ($speed_{experiment}$) กับค่าความเร็วรอบจากการจำลองสถานการณ์ ($speed_{simulation}$) แสดงได้ดังสมการที่ (3-39)

$$error_{av} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_T}\left[speed_{experiment}(i) - speed_{simulation}(i)\right]^2}{N_T}} \tag{3-39}$$



รูปที่ 3.7 ชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการณ์



รูปที่ 3.8 บล็อกไดอะแกรมการค้นหาด้วยวิธีตาบูเชิงปรับตัว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวนั้นเป็นสิ่งที่สำคัญ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มประสิทธิผลของการค้นหา ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ได้แก่ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง รัศมีเริ่มต้น และตัวปรับลดรัศมี โดยค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จากการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3.3 ถึงตารางที่ 3.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.3 การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น

ครั้งที่ / ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 คำตอบ						
ค่า $error_{av}$	0.0299	0.0284	0.0300	0.0281	0.0296	0.0292
จำนวนรอบ	3	4	663	4	5	135.8
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ						
ค่า $error_{av}$	0.0298	0.0329	0.0300	0.0296	0.0300	0.0304
จำนวนรอบ	6	500	530	6	580	324.4
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 30 คำตอบ						
ค่า $error_{av}$	0.030	0.0288	0.030	0.0313	0.0294	0.0299
จำนวนรอบ	323	4	37	700	3	213.4
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 40 คำตอบ						
ค่า $error_{av}$	0.0283	0.0280	0.0300	0.0280	0.0300	0.0288
จำนวนรอบ	2	3	251	4	638	179.6
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำตอบ						
ค่า $error_{av}$	0.0340	0.0319	0.0295	0.0299	0.0286	0.0307
จำนวนรอบ	700	700	5	8	1	282.8

<u>หมายเหตุ</u> ในการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้นได้กำหนดให้ จำนวนคำตอบรอบข้าง รัศมีเริ่มต้น และค่าปรับลดรัศมี มีค่าเท่ากับ 10, 10 และ 1.3 ตามลำดับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.4 การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง

ค่าที่ทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ						
ค่า $error_{av}$	0.0284	0.0300	0.0283	0.0297	0.0286	0.0290
จำนวนรอบ	4	637	5	4	3	130.6
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 คำตอบ						
ค่า $error_{av}$	0.0285	0.0298	0.0283	0.0300	0.0286	0.0290
จำนวนรอบ	3	1	2	11	5	4.4
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 30 คำตอบ						
ค่า $error_{av}$	0.0285	0.0295	0.0300	0.0286	0.0300	0.0293
จำนวนรอบ	3	4	284	1	3	59
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 40 คำตอบ						
ค่า $error_{av}$	0.0289	0.0278	0.0287	0.0300	0.0280	0.0286
จำนวนรอบ	1	3	3	76	1	16.8
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 50 คำตอบ						
ค่า $error_{av}$	0.0275	0.0280	0.0290	0.0283	0.0300	0.0285
จำนวนรอบ	3	2	1	3	113	24.2
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 60 คำตอบ						
ค่า $error_{av}$	0.0284	0.0281	0.0276	0.0278	0.0284	0.0280
จำนวนรอบ	4	3	3	3	2	3
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 70 คำตอบ						
ค่า $error_{av}$	0.0278	0.0300	0.0285	0.0293	0.0283	0.0287
จำนวนรอบ	2	49	1	3	1	11.2

หมายเหตุ ในการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้างได้กำหนดให้ จำนวนคำตอบเริ่มต้น รัศมีเริ่มต้น และค่าปรับลดรัศมี มีค่าเท่ากับ 40, 10 และ 1.3 ตามลำดับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.5 การทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น

ครั้งที่ / ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 2						
ค่า $error_{av}$	0.0275	0.0292	0.0285	0.0300	0.0300	0.0290
จำนวนรอบ	3	5	1	349	362	114
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 4						
ค่า $error_{av}$	0.0298	0.0300	0.0300	0.0291	0.0276	0.0293
จำนวนรอบ	4	163	402	5	3	115.4
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 6						
ค่า $error_{av}$	0.0300	0.0281	0.0300	0.0297	0.0300	0.0295
จำนวนรอบ	472	3	543	3	444	293
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 8						
ค่า $error_{av}$	0.0297	0.0288	0.0280	0.0287	0.0300	0.0290
จำนวนรอบ	5	1	3	1	6	3.2
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 10						
ค่า $error_{av}$	0.0300	0.0291	0.0300	0.0300	0.0296	0.0297
จำนวนรอบ	617	3	114	694	6	286.8

<u>หมายเหตุ</u> ในการทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้นได้กำหนดให้ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง และค่าปรับลดรัศมี มีค่าเท่ากับ 40, 60 และ 1.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.6 การทดสอบค่าปรับลดรัศมี

ครั้งที่ / ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.05						
ค่า $error_{av}$	0.0300	0.0285	0.0299	0.0290	0.0294	0.0293
จำนวนรอบ	211	12	13	11	11	51.6
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.1						
ค่า $error_{av}$	0.0295	0.0277	0.0300	0.0299	0.0279	0.0290
จำนวนรอบ	8	8	543	6	6	114.2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

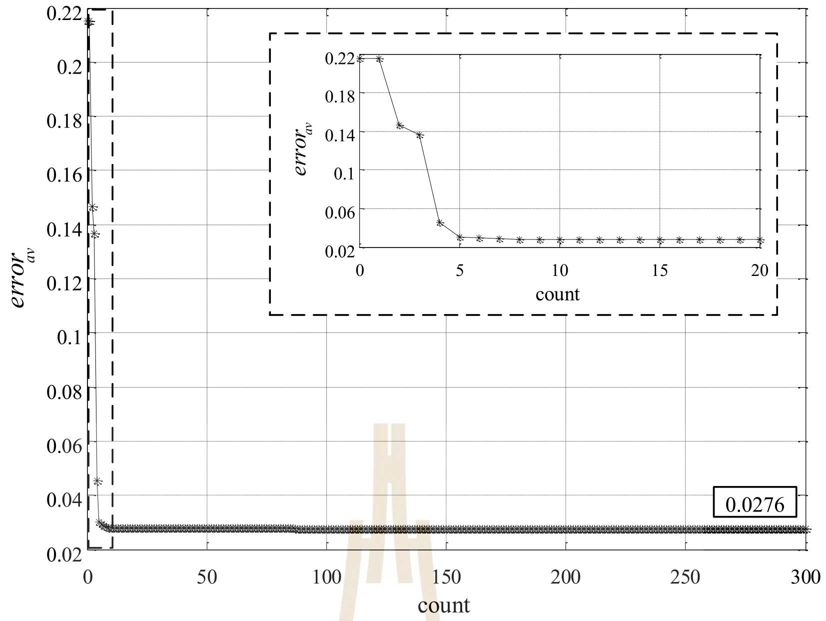
ตารางที่ 3.6 การทดสอบค่าปรับลดรัศมี (ต่อ)

ครั้งที่ / ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.2						
ค่า $error_{av}$	0.0300	0.0299	0.0300	0.0282	0.0287	0.0293
จำนวนรอบ	519	5	134	5	4	113.4
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3						
ค่า $error_{av}$	0.0300	0.0291	0.0300	0.0300	0.0296	0.0297
จำนวนรอบ	617	3	114	694	6	297.6
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.4						
ค่า $error_{av}$	0.0300	0.0310	0.0283	0.0299	0.0276	0.0293
จำนวนรอบ	523	700	2	3	3	246.2
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.5						
ค่า $error_{av}$	0.0299	0.0300	0.0300	0.0295	0.0297	0.0298
จำนวนรอบ	1	14	19	19	5	11.6

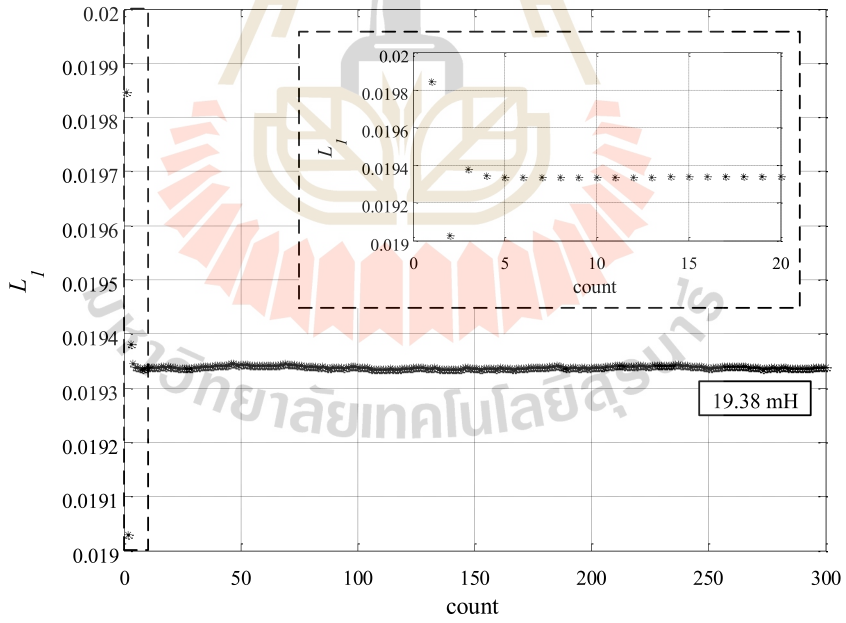
หมายเหตุ ในการทดสอบค่าปรับลดรัศมีได้กำหนดให้ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง และค่ารัศมีเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 40, 60 และ 8 ตามลำดับ

จากผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.3 ถึงตารางที่ 3.6 ที่ผ่านมา สำหรับการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะทำการพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย เนื่องจากเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหา ควบคู่กับค่าของจำนวนรอบที่ใช้ในการค้นหา เพราะฉะนั้นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับวิธีการค้นแบบตาบูเชิงปรับตัวสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีค่าดังต่อไปนี้ จำนวนคำตอบเริ่มต้น เท่ากับ 40 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้าง เท่ากับ 60 คำตอบ ค่ารัศมีเริ่มต้น เท่ากับ 8 และค่าปรับลดรัศมี เท่ากับ 1.1 ตามลำดับ จากกระบวนการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวที่นำเสนอในข้างต้น สามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ได้จากการค้นหาได้ดังตารางที่ 3.2 ที่ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.0276 และแสดงลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบดังรูปที่ 3.9 ถึงรูปที่ 3.15

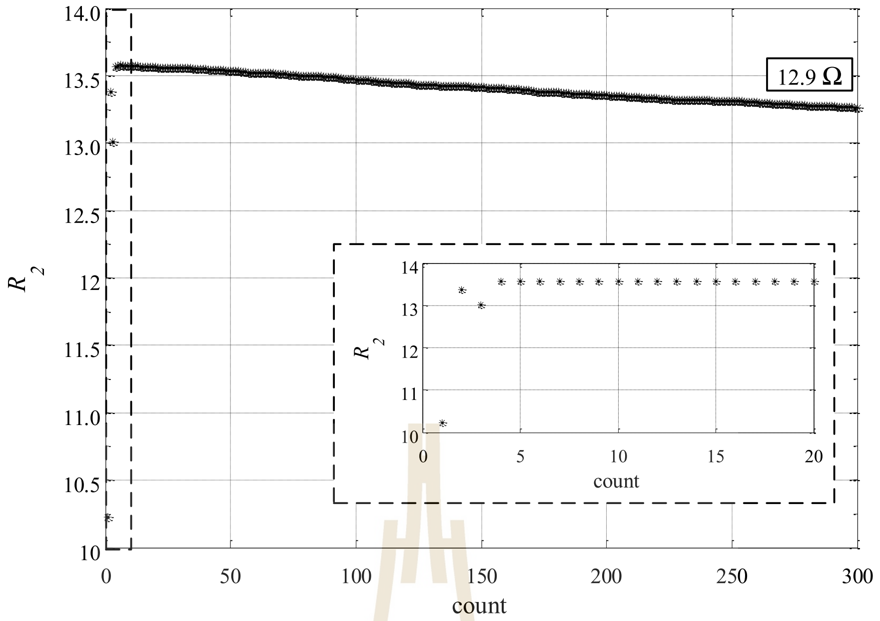
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



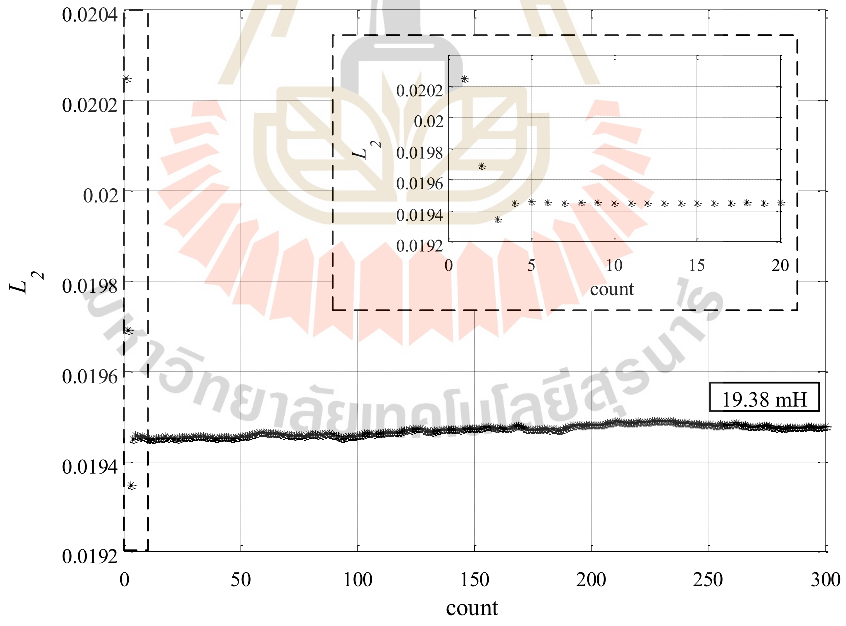
รูปที่ 3.9 ลักษณะการลู่ข้าวของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย



รูปที่ 3.10 ลักษณะการลู่เข้าของค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดหลัก

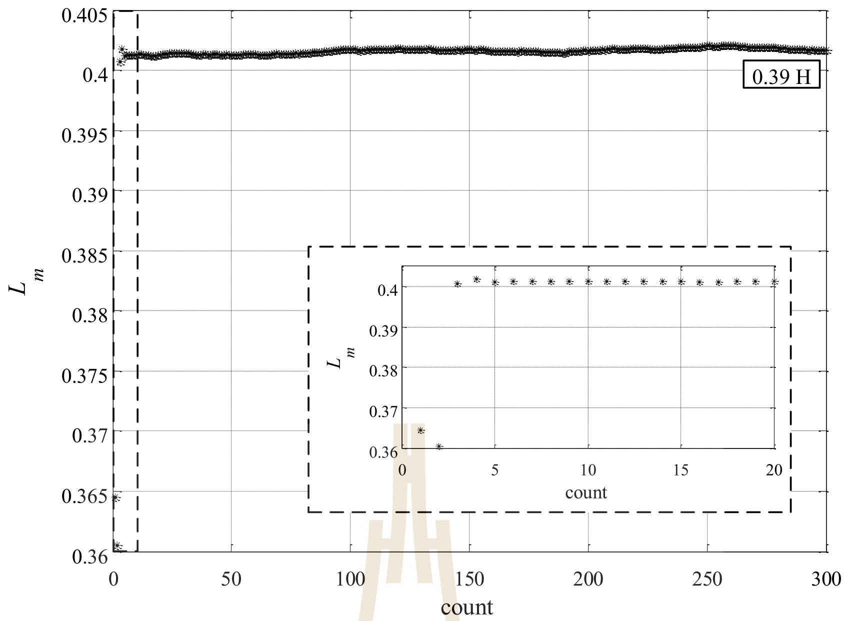


รูปที่ 3.11 ลักษณะการลู่เข้าของค่าความต้านทานของโรเตอร์

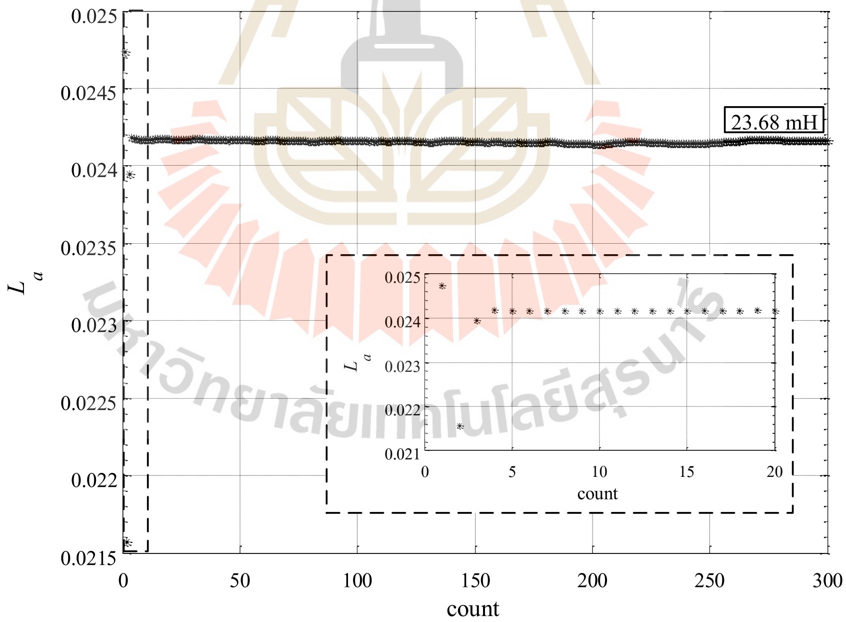


รูปที่ 3.12 ลักษณะการลู่เข้าของค่าความเหนี่ยวนำของโรเตอร์

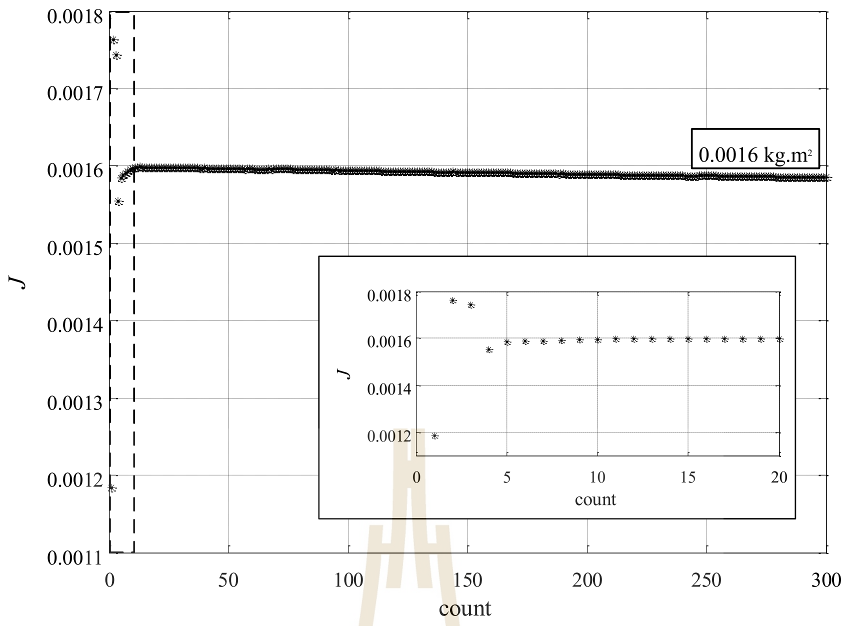
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.13 ลักษณะการลู่เข้าของค่าความเหนี่ยวนำร่วม

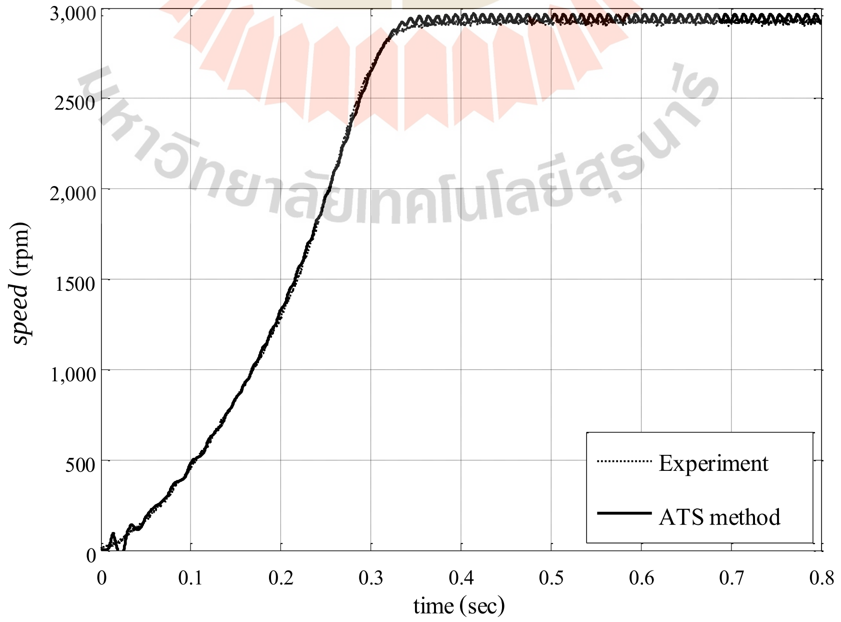


รูปที่ 3.14 ลักษณะการลู่เข้าของค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดช่วย



รูปที่ 3.15 ลักษณะการลู่เข้าของค่าโมเมนต์ความเฉื่อย

จากการตารางที่ 3.2 เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวมาทำการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าความเร็วรอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการณ์ ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การเปรียบเทียบความเร็วรอบของมอเตอร์

จากรูปที่ 3.16 จะเห็นได้ว่ากราฟความเร็วรอบทั้งสองมีความใกล้เคียงกัน ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวมีความถูกต้องเหมาะสม

3.5 สรุป

การอธิบายเนื้อหาในบทนี้ เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์แยกถาวร และกำลังงานสูญเสียต่าง ๆ ของมอเตอร์ โดยเนื้อหาได้มีการอธิบายถึงลักษณะของวงจรสมมูลของมอเตอร์ ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง และสมการที่ใช้สำหรับการคำนวณกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอวิธีการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่งไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยวิธีที่นำเสนอมีด้วยกัน 2 วิธี ได้แก่ การค้นหาด้วยวิธีพื้นฐาน และการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของกำลังงานสูญเสีย การจำลองสถานการณ์การทำงานของมอเตอร์ในกรณีที่ยากต่อการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ และการออกแบบอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวมีความถูกต้อง และเหมาะสม ในบทถัดไปบทที่ 4 เป็นการนำเสนอการพัฒนาอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส โดยอัลกอริทึมดังกล่าวจะทำหน้าที่ในการคำนวณหาค่าความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการประหยัดพลังงาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
การพัฒนาอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

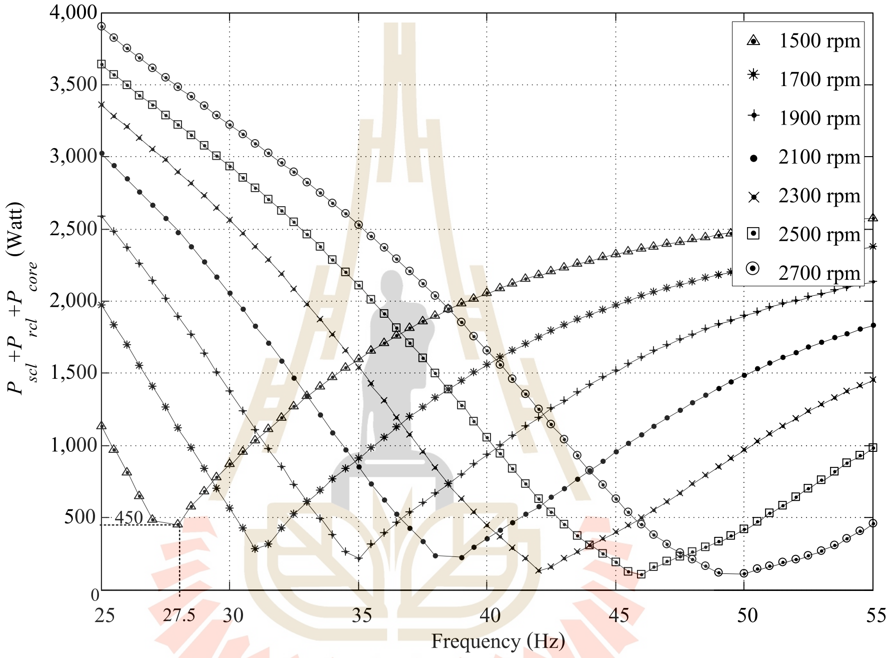
4.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอหลักการการพัฒนาอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ซึ่งการประหยัดพลังงานดังกล่าวเกิดจากการลดลงของกำลังงานสูญเสียทางไฟฟ้า วิธีการที่ใช้สำหรับลดกำลังงานสูญเสียดังกล่าว คือ การค้นหาค่าความถี่ที่เหมาะสมที่ทำให้กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์มีค่าน้อยที่สุด โดยหลักการที่ใช้สำหรับการค้นหาค่าความถี่ คือ การคำนวณหาค่าความถี่ที่ทำให้ค่าสมการอนุพันธ์ของกระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่เท่ากับศูนย์ ทั้งนี้เนื่องจากการคำนวณหาค่าความถี่ที่เหมาะสมจากสมการอนุพันธ์ของกำลังงานสูญเสียรวมเทียบกับความถี่เท่ากับศูนย์ ดังที่ได้มีการอธิบายในบทที่ 2 มีความยาว และซับซ้อนมากกว่าการพิจารณากระแสที่ขดลวดหลักของมอเตอร์ แต่อย่างไรก็ตามสมการอนุพันธ์ของกระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่เท่ากับศูนย์ยังคงมีความยุ่งยาก เมื่อต้องทำการโปรแกรมให้อยู่ในรูปแบบภาษาซี และประมวลผลด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงคิดหาวิธีที่จะลดความซับซ้อน และลดทอนสมการดังกล่าวให้สั้นลง ในขณะที่คำตอบยังคงมีค่าเท่าเดิม โดยในบทนี้จะอธิบายถึงหลักการการพัฒนาอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ และแสดงผลการทดสอบการคำนวณหาค่าความถี่ที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน ซึ่งแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

4.2 อัลกอริทึมการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

สำหรับหลักการการออกแบบอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะทำการออกแบบให้อัลกอริทึมดังกล่าวทำการคำนวณค่าความถี่ที่เหมาะสมของแรงดันไฟฟ้าอินพุตที่จ่ายให้กับมอเตอร์ โดยความถี่ค่าดังกล่าวจะส่งผลให้กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์มีค่าลดลง ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเฉพาะกำลังงานสูญเสียทางไฟฟ้าเท่านั้น ซึ่งได้แก่ กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์ และกำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก เพราะกำลังงานสูญเสียดังกล่าวมีอิทธิพลมากต่อค่ากำลังงานสูญเสียโดยรวมที่เกิดขึ้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส (Andreas, 1992) เมื่อนำกำลังงานสูญเสียที่พิจารณามาทำการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB ที่ค่าความเร็วรอบต่าง ๆ

ร่วมกับการปรับเปลี่ยนค่าความถี่ ดังรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าแต่ละค่าความเร็วรอบจะมีความถี่ที่ทำให้กำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเรียกความถี่ดังกล่าวว่า ความถี่ที่เหมาะสม สำหรับหลักการที่ใช้หาค่าความถี่ที่เหมาะสมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีการคำนวณหาค่าความถี่ที่ทำให้สมการอนุพันธ์ของกระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่เท่ากับศูนย์ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเรียกกระบวนการคำนวณหาค่าความถี่ที่เหมาะสมว่า อัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน ซึ่งอธิบายไว้ในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงของกำลังงานสูญเสียที่ค่าความเร็วรอบต่าง ๆ
เมื่อค่าความถี่มีการเปลี่ยนแปลง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.2.1 สมการอนุพันธ์ของกระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่

เนื่องจากโหลดของมอเตอร์เป็นปั๊มหอยโข่งที่มีลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบดังสมการที่ (4-1) (Girdhar and Moniz, 2005) ซึ่งจะเห็นได้ว่า แรงบิดแปรผันตามความเร็วรอบกำลังสอง และจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วรอบของมอเตอร์กับค่าความถี่ที่เหมาะสม ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.1 จะสังเกตได้ว่า ค่าความเร็วรอบมีนัยสำคัญต่อค่าความถี่ที่เหมาะสม และขนาดของกำลังงานสูญเสียทางไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงกำหนดให้อัลกอริทึมการประหยัดพลังงานทำหน้าที่คำนวณหาค่าความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของมอเตอร์ที่ค่าความเร็วรอบต่าง ๆ ซึ่งค่าความเร็วรอบที่ป้อนให้กับ

อัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน (N) แสดงได้ดังสมการที่ (4-2) โดยที่ ΔN คือ ผลต่างระหว่างค่าความเร็วซิงโครนัสที่พิกัดของมอเตอร์ (N_s) กับค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่พิกัด (N_{rated}) ดังสมการที่ (4-3) จากผลการทดสอบ พบว่า เมื่อ N มีค่าเท่ากับค่าความเร็วรอบอ้างอิง (N_r) เพียงอย่างเดียว ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ (N_m) ที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าต่ำกว่า N_r เสมอ แม้จะทำการปรับขนาดแรงดันร่วมด้วยก็ตาม (แสดงได้ในภาคผนวก ข.) ด้วยเหตุนี้ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ทำการแสวงหาค่าคงที่ค่าหนึ่งสำหรับนำมารวมกับ N_r ก่อนที่จะป้อนให้กับอัลกอริทึม เพื่อทำให้ N_m มีค่าใกล้เคียง N_r มากที่สุด ซึ่งผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์พบว่า เมื่อรวม N_r กับ ΔN ดังสมการที่ (4-2) จะทำให้ N_m มีค่าใกล้เคียงกับ N_r มากกว่าการป้อนค่า N_r เพียงอย่างเดียว โดยค่า ΔN ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีค่าเท่ากับ 332 rpm (คำนวณได้จากผลต่างของความเร็วรอบซิงโครนัสที่มีค่าเท่ากับ 3,000 rpm กับความเร็วรอบพิกัดที่มีค่าเท่ากับ 2,668 rpm ซึ่งจะต้องทำการคำนวณค่า ΔN ใหม่ทุกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพิกัดของมอเตอร์

$$\tau = kN_m^2 \tag{4-1}$$

โดยที่ τ คือ แรงบิด (Nm)

k คือ ค่าคงที่ของปั๊มหอยโข่ง

$$N = N_r + \Delta N \tag{4-2}$$

$$\Delta N = N_s - N_{rated} \tag{4-3}$$

สำหรับการคำนวณหาค่าความถี่ที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้หลักการหาอนุพันธ์ของกระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่เท่ากับศูนย์ เนื่องจากสมการดังกล่าวมีความยาว และซับซ้อนน้อยกว่าสมการอนุพันธ์ของกำลังงานสูญเสียรวมเทียบกับความถี่เท่ากับศูนย์ จึงทำให้ง่าย และสะดวกต่อการโปรแกรมให้อยู่ในรูปของภาษาซี อีกทั้งช่วยลดระยะเวลาในการประมวลผลของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยมีหลักการพิจารณาดังต่อไปนี้ จากสมการของกำลังงานสูญเสียรวม (P_{losses}) ดังสมการที่ (4-4) จะเห็นได้ว่ากำลังงานสูญเสียที่พิจารณา ได้แก่ กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ (P_{scl}) กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์ (P_{rcl}) และกำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก (P_{core})

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$P_{losses} = \underbrace{I_1^2 R_1 + I_2^2 R_a}_{P_{scl}} + \underbrace{I_{r11}^2 \frac{0.5R_2}{s} + I_{r12}^2 \frac{0.5R_2}{(2-s)} + I_{r21}^2 \frac{0.5a^2 R_2}{s} + I_{r22}^2 \frac{0.5a^2 R_2}{(2-s)}}_{P_{rcl}} + \underbrace{k_c V_1^2}_{P_{core}} \tag{4-4}$$

จากสมการที่ (4-4) พบว่าสามารถดำเนินการละทิ้ง P_{core} และ P_{rcl} ได้ เนื่องจากความถี่ไม่มีผลต่อ P_{core} และในทางทฤษฎีขนาดของ P_{rcl} มีอิทธิพลน้อย เมื่อเทียบกับขนาดของ P_{scl} (Andreas, 1992) เพราะฉะนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกที่จะพิจารณา P_{scl} เท่านั้นในส่วนของ P_{losses} นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่า P_{scl} แปรผันตรงกับกระแสของขดลวดหลัก (I_1) ยกกำลังสอง และกระแสของขดลวดช่วย (I_2) ยกกำลังสอง แต่เนื่องจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาการทำงานของมอเตอร์ที่สภาวะคงตัว ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวกระแสของขดลวดช่วยมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกระแสของขดลวดหลัก เพราะฉะนั้นจึงส่งผลให้ I_2 มีอิทธิพลน้อยต่อกำลังงานสูญเสียโดยรวมของ P_{scl} เมื่อเทียบกับ I_1 ด้วยเหตุนี้จึงกำหนดให้ I_2 มีค่าเท่ากับศูนย์ จึงทำให้สมการ P_{scl} เป็น ดังสมการที่ (4-5) จากสมการที่ (4-5) จะเห็นได้ว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ P_{scl} ขึ้นอยู่กับ I_1 ในขณะที่ R_1 เป็นค่าคงที่ จึงทำให้ค่า R_1 ไม่มีผลต่อแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ด้วยเหตุนี้ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงใช้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงขนาดของ I_1 แทนแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ P_{scl} ทั้งนี้ เพื่อให้ง่าย และสะดวกต่อการจัดรูปของสมการอนุพันธ์ เมื่อพิจารณาสมการอนุพันธ์ของกระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่เท่ากับศูนย์สามารถแสดงได้ ดังสมการที่ (4-6)

$$P_{scl} = I_1^2 R_1 \tag{4-5}$$

$$\frac{dI_1}{df} = 0 \tag{4-6}$$

$$I_1 = f(Z_f, Z_b) \tag{4-7}$$

$$Z_f = 0.5\frac{jX_m[R_2/s + jX_2]}{R_2/s + j(X_2 + X_m)} \tag{4-8}$$

$$Z_b = 0.5\frac{jX_m[R_2/(2-s) + jX_2]}{R_2/(2-s) + j(X_2 + X_m)} \tag{4-8}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เมื่อพิจารณาสมการกระแสของขดลวดหลัก ดังสมการที่ (4-7) จะเห็นว่า ค่าของอิมพีแดนซ์ไปหน้า (forward impedance: Z_f) และอิมพีแดนซ์ย้อนกลับ (backward impedance: Z_b) มีความสัมพันธ์ต่อค่ากระแสของขดลวดหลัก (อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.2) โดยที่ Z_f และ Z_b แสดงดั้งสมการที่ (4-8) และสมการที่ (4-9) ตามลำดับ จากการนำเสนอในบทที่ 3 เรื่องการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ผ่านมา พบว่าสามารถดำเนินการจัดรูปสมการเพื่อลดความซับซ้อนโดยการละทิ้งตัวแปรรีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ (X_2) เนื่องจากแปรดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 6.091 Ω ในขณะที่ X_m มีค่าเท่ากับ 125.6 Ω ซึ่งจะเห็นได้ว่า X_2 มีค่าน้อยกว่า X_m ประมาณ 20 เท่า ถึงแม้ความถี่จะมีการเปลี่ยนแปลงแต่ลักษณะความสัมพันธ์ยังคงเป็นเช่นเดิม ด้วยเหตุนี้งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงทำการละทิ้งตัวแปร X_2 จากสมการที่ (4-8) และสมการที่ (4-9) เพื่อลดความซับซ้อนของสมการ โดยแทนสมการใหม่ที่ทำการละทิ้งตัวแปร X_2 แล้วด้วย $Z_{f'}$ และ $Z_{b'}$ ดังสมการที่ (4-10) และสมการที่ (4-11) ตามลำดับ

$$Z_{f'} = f(s, R_2, X_m) = \frac{0.5 jX_m (R_2/s)}{R_2/s + jX_m} \tag{4-10}$$

$$Z_{b'} = f(s, R_2, X_m) = \frac{0.5 jX_m [R_2/(2-s)]}{(R_2/(2-s)) + jX_m} \tag{4-11}$$

เนื่องจากค่าของสลิป (s) มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ จึงทำให้ค่าของ $R_2/(2-s)$ มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยในสภาวะต่าง ๆ ดังนั้น ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะไม่พิจารณาเทอมดังกล่าว ดังนั้นสมการที่ (4-11) ของ $Z_{b'}$ สามารถเขียนเป็น $Z_{b''}$ ได้ใหม่ดังสมการที่ (4-12)

$$Z_{b''} = f(X_m) = \frac{0.5 jX_m}{jX_m} = 0.5 \tag{4-12}$$

จากกระบวนจัดรูปสมการเพื่อลดความซับซ้อนที่ผ่านมา ดำเนินการแทนตัวแปรกระแสของขดลวดหลักจาก I_1 เป็น $I_{1'}$ ดังสมการที่ (4-13) ในขณะที่สมการอนุพันธ์กระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่เท่ากับศูนย์ แสดงได้ดังสมการที่ (4-14) โดยที่ตัวแปร A B C และ D มีค่าดังสมการที่ (4-15) ถึงสมการที่ (4-18) ตามลำดับ

$$I_{1'} = f(Z_{f'}, Z_{b''}) \tag{4-13}$$

$$\frac{dI_{1'}}{df} = \frac{A}{B} - \frac{C}{D} = 0 \tag{4-14}$$

โดยที่

$$A = V_1(a_1 + a_2) \tag{4-15}$$

$$B = a^2 b_1^2 - b_2 b_3 \tag{4-16}$$

$$C = V_1(c_1 c_2 + c_3 c_4 - c_5 c_6)c_7 \tag{4-17}$$

$$D = (d_1 - d_2 d_3)^2 \tag{4-18}$$

เมื่อ

$$a_1 = a^2(E_1 + E_3 + E_4) \tag{4-19}$$

$$a_2 = a(E_2 + E_4) \tag{4-20}$$

$$b_1 = E_5 - 0.5 \tag{4-21}$$

$$b_2 = a^2(E_5 + E_6 + 0.5) + R_a - E_7 \tag{4-22}$$

$$b_3 = R_1 + E_5 + E_6 + 0.5 \tag{4-23}$$

$$c_1 = a^2(E_1 + E_2 + E_4) \tag{4-24}$$

$$c_2 = R_1 + E_5 + E_6 + 0.5 \tag{4-25}$$

$$c_3 = a^2(E_5 + E_6 + 0.5) + R_a - E_7 \tag{4-26}$$

$$c_4 = E_1 + E_2 + E_4 \tag{4-27}$$

$$c_5 = 2a^2(E_5 - 0.5) \tag{4-28}$$

$$c_6 = E_2 + E_4 \tag{4-29}$$

$$c_7 = R_a + a^2(E_5 + E_6 + 0.5) + ja(E_5 - 0.5) - E_7 \tag{4-30}$$

$$d_1 = a^2(E_5 - 0.5)^2 \tag{4-31}$$

$$d_2 = a^2(E_5 + E_6 + 0.5) + R_a - E_7 \tag{4-32}$$

$$d_3 = R_1 + E_5 + E_6 + 0.5 \tag{4-33}$$

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ตัวแปรในสมการที่ (4-19) ถึงสมการที่ (4-33) จะเห็นได้ว่าสมการดังกล่าวติดค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรของ E_1 E_2 E_3 E_4 E_5 E_6 และ E_7 ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (4-34) ถึงสมการที่ (4-40) ตามลำดับ

$$E_1 = j2\pi L_1 \tag{4-34}$$

$$E_2 = \frac{j\pi L_{mutual}\left(R_2/s\right)}{\left(R_2/s + j2\pi f L_{mutual}\right)} \tag{4-35}$$

$$E_3 = \frac{j\pi L_{mutual}\left(R_2/s\right)}{\left(R_2/s + j2\pi f L_{mutual}\right)^2} \tag{4-36}$$

$$E_4 = \frac{2\pi^2 L_{mutual}^2 f\left(R_2/s\right)}{\left(R_2/s + j2\pi f L_{mutual}\right)^2} \tag{4-37}$$

$$E_5 = \frac{j\pi f L_{mutual}\left(R_2/s\right)}{\left(R_2/s + j2\pi f L_{mutual}\right)} \tag{4-38}$$

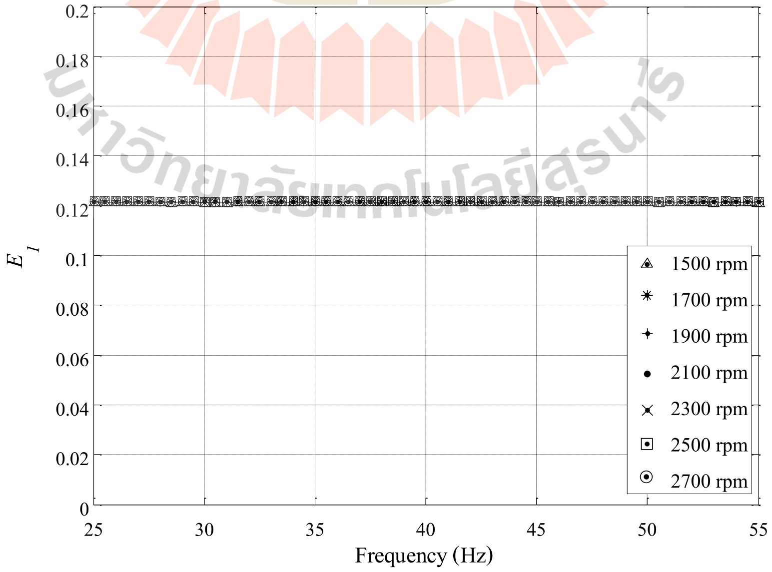
$$E_6 = j2\pi f L_1 \tag{4-39}$$

$$E_7 = \frac{j}{2\pi f C} \tag{4-40}$$

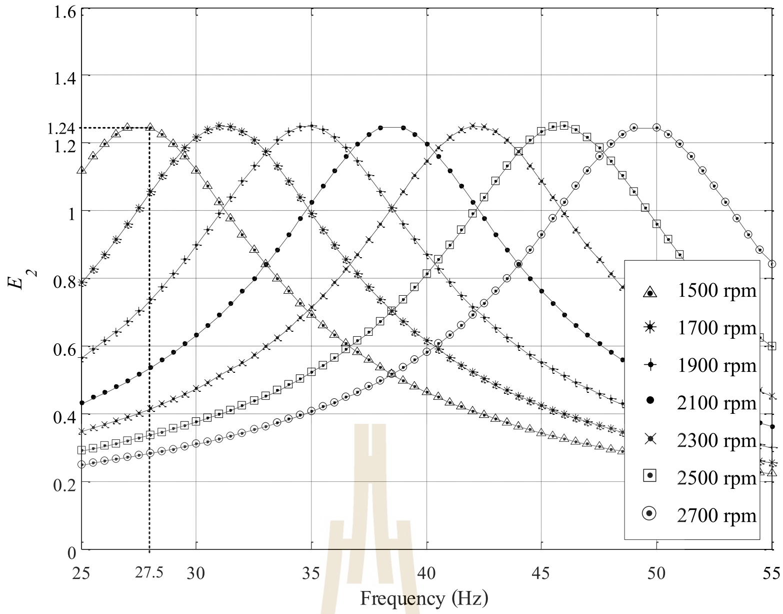
จากการนำเสนอสมการอนุพันธ์กระแสของขดลวดหลักเทียบกับความถี่เท่ากับศูนย์ที่ผ่านมาข้างต้น ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์พบว่าการจะโปรแกรมตัวแปรต่าง ๆ ที่อยู่ในเทอมสัมประสิทธิ์ของสมการที่ (4-14) ถึงสมการที่ (4-40) ให้อยู่ในรูปภาษาซีนั้นค่อนข้างยุ่งยาก ด้วยเหตุนี้ ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ดำเนินการแสวงหาวิธีการจัดรูปสมการเพื่อลดความซับซ้อนของสมการ โดยวิธีการจัดรูปสมการดังกล่าวจะอาศัยการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ในสมการที่ให้ความสนใจ ว่ามีผลกระทบ หรือมีนัยสำคัญต่อแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงโดยรวมของคำตอบที่ได้หรือไม่ และกำหนดให้เทอมสัมประสิทธิ์ที่มีอิทธิพลน้อยเมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์ตัวอื่น ๆ มีค่าเป็นศูนย์ อธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

เมื่อนำสมการที่ (4-34) ถึงสมการที่ (4-40) มาจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB ที่ค่าความเร็วรอบต่าง ๆ ในช่วง 1500 rpm ถึง 2700 rpm ร่วมกับการปรับค่าความถี่ในช่วง 25 Hz ถึง 55 Hz เพื่อแสดงลักษณะแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง และความสัมพันธ์ของสมการดังกล่าวต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่ค่าความเร็วรอบต่าง ๆ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.8 จากความสัมพันธ์ของตัวแปร E_1 ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ และค่าความเร็วรอบดังแสดงในรูปที่ 4.2 สังเกตได้ว่า ค่าของตัวแปร E_1 ของแต่ละค่าความเร็วรอบไม่มีการเปลี่ยนแปลง

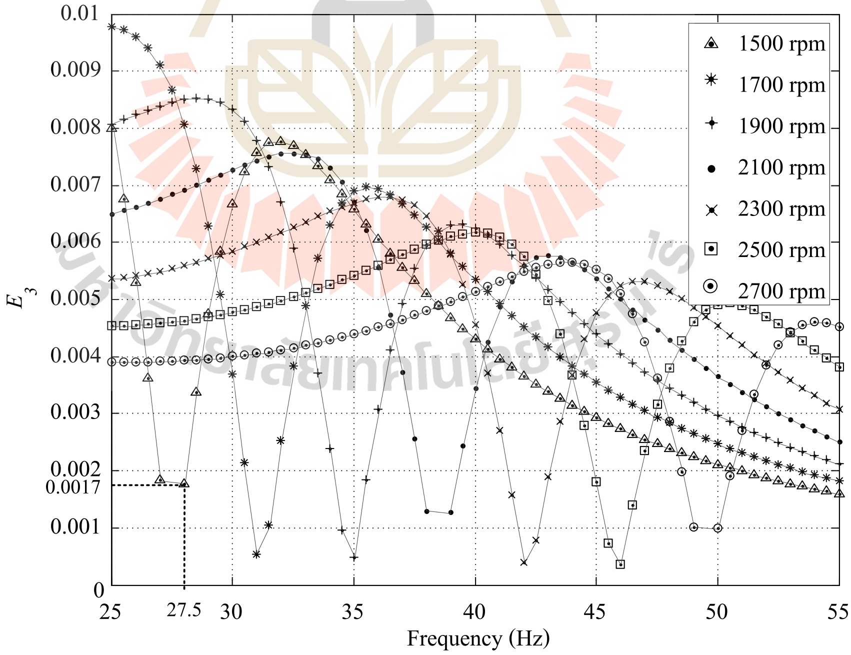
ตามความถี่ ซึ่งมีค่าคงที่ เท่ากับ 0.121 ทุกค่าความถี่ รูปถัดมา รูปที่ 4.3 เป็นความสัมพันธ์ของตัวแปร E_2 ต่อการเปลี่ยนแปลงของของค่าความถี่ และค่าความเร็วรอบ จากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่าค่าของตัวแปร E_2 ของแต่ละค่าความเร็วรอบ มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 1.24 ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวขึ้นอยู่กับค่าความถี่ สำหรับรูปที่ 4.4 เป็นความสัมพันธ์ของ ตัวแปร E_3 ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ และค่าความเร็วรอบ สังเกตได้ว่า ค่าของตัวแปร E_3 ของแต่ละความเร็วรอบจะมีการเปลี่ยนแปลงช่วง 0.0004 ถึง 0.01 ตามการเปลี่ยงแปลงของความถี่ ต่อมารูปที่ 4.5 รูปดังกล่าวแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปร E_4 ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ และค่าความเร็วรอบ สังเกตได้ว่า ค่าของตัวแปร E_4 ของแต่ละความเร็วรอบจะมีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.04 ถึง 0.63 จากความสัมพันธ์ของตัวแปร E_5 ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ และค่าความเร็วรอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า ค่าของตัวแปร E_5 ของแต่ละค่าความเร็วรอบมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความถี่ ในขณะที่ค่ามากที่สุดของ E_5 ในแต่ละค่าความเร็วรอบจะไม่เท่ากัน ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ตามค่าความเร็วรอบ ลำดับถัดมาในรูปที่ 4.7 เป็นความสัมพันธ์ของตัวแปร E_6 ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ และค่าความเร็วรอบ จะเห็นได้ว่าลักษณะแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร E_6 ในแต่ละค่าความเร็วรอบจะแปรผันตามความถี่ และสุดท้ายรูปที่ 4.8 เป็นความสัมพันธ์ของตัวแปร E_7 ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ และค่าความเร็วรอบ สังเกตได้ว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร E_7 ในแต่ละความเร็วรอบจะแปรผกผันกับค่าความถี่



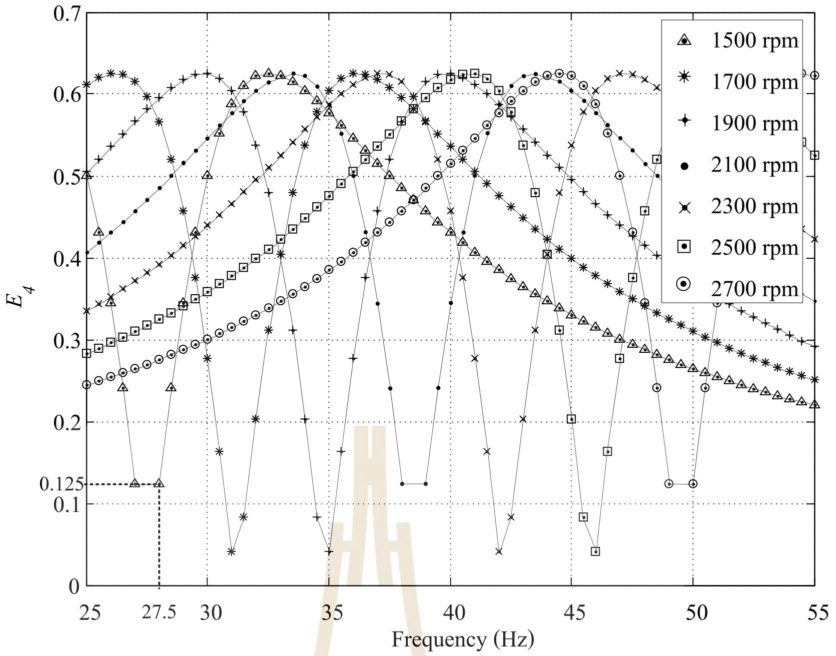
รูปที่ 4.2 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร E_1 ต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่ค่าความเร็วรอบต่าง ๆ



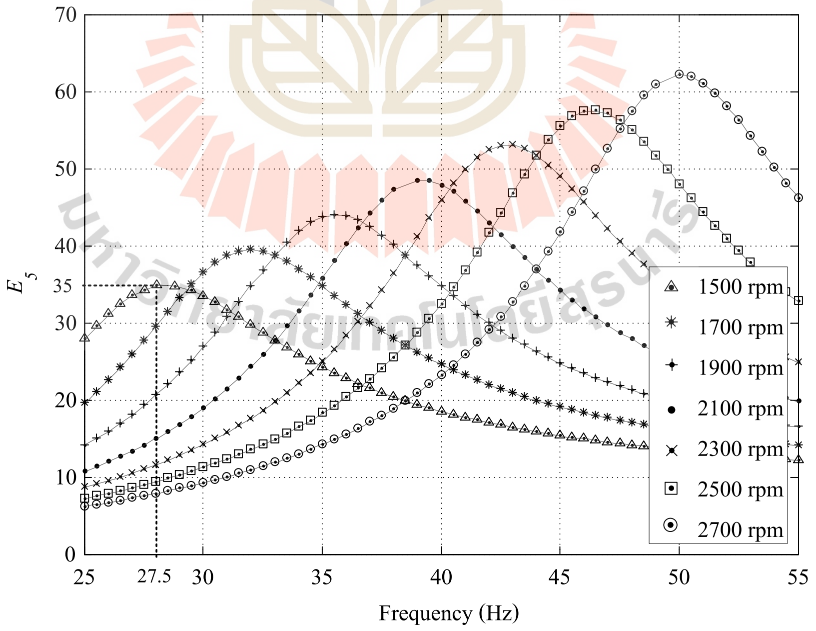
รูปที่ 4.3 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร E_2 ต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่ค่าความเร็วรอบต่าง ๆ



รูปที่ 4.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร E_3 ต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่ค่าความเร็วรอบต่าง ๆ

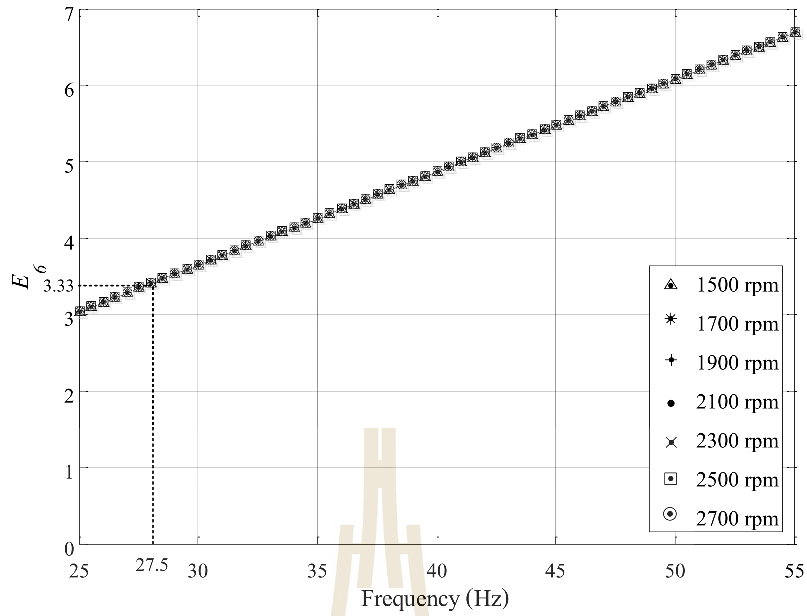


รูปที่ 4.5 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร E_4 ต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่ค่าความเร็วรอบต่าง ๆ

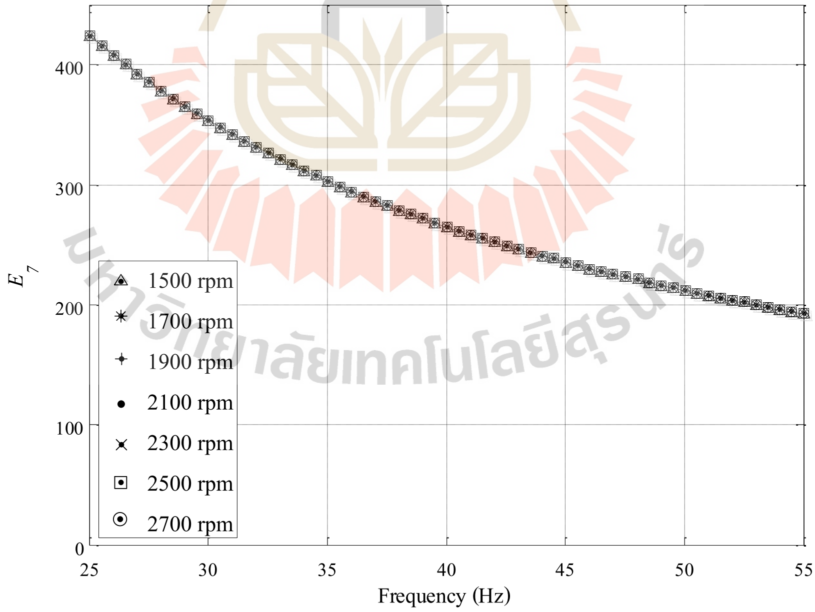


รูปที่ 4.6 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร E_5 ต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่ค่าความเร็วรอบต่าง ๆ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.7 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร E_6 ต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่ค่าความเร็วรอบต่าง ๆ



รูปที่ 4.8 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร E_7 ต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่ค่าความเร็วรอบต่าง ๆ

จากลักษณะความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ตัวแปร E_1 ถึง E_7 ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.8 ที่ผ่านมา ลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการจัดรูปสมการของสัมประสิทธิ์ตัวแปรในกลุ่ม A B C และ D ซึ่งการจัดรูปสมการดังกล่าวเป็นดังนี้

-การจัดรูปสัมประสิทธิ์ตัวแปรในกลุ่ม A

จากสมการที่ (4-15) ของตัวแปร A เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ตัวแปรของ a_1 กับ a_2 ตามสมการที่ (4-19) และสมการที่ (4-20) ที่ค่าความเร็วรอบเท่ากับ 1500 rpm ซึ่งมีค่าความถี่ที่เหมาะสม เท่ากับ 27.5 Hz (อ้างอิงจากค่าความถี่ที่ทำให้ขนาดของกำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.1) ในขณะเดียวกัน เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปร E_1 E_2 E_3 และ E_4 ที่ความถี่ดังกล่าว สังเกตได้ว่า E_1 และ E_3 มีนัยสำคัญน้อยต่อค่าสัมประสิทธ์ A ในสมการที่ (4-15) ทั้งนี้เนื่องจาก E_1 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ และเมื่อพิจารณาผลรวมของตัวแปร a_1 กับ a_2 (a_1+a_2) ในสมการที่ (4-15) จะเห็นได้ว่า เมื่อสมการที่ (4-19) ของตัวแปร a_1 พิจารณาตัวแปร E_1 ผลรวมจะมีค่าเท่ากับ 1.811 (0.302 + 1.509) ในขณะเดียวกัน เมื่อทำการละทิ้งตัวแปร E_1 ผลรวมจะมีค่าเท่ากับ 1.663 (0.154 + 1.509) ทั้งนี้ผลต่างจากกรณีทั้งสองมีค่าเท่ากับ 0.148 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับผลรวมของตัวแปร a_1 กับ a_2 อีกทั้ง ผลต่างดังกล่าวเป็นค่าคงที่ จึงทำให้ลักษณะความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถใช้อธิบายได้ทุกช่วงความเร็วรอบ นอกจากนี้ตัวแปร E_3 มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับตัวแปร E_4 ในสมการที่ (4.19) ด้วยเหตุนี้ จึงกำหนดให้ตัวแปร E_1 และ E_3 มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังแสดงในสมการที่ (4-41) และสมการที่ (4-42) ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาตัวแปร E_2 และ E_4 ในสมการที่ (4-20) สังเกตได้ว่า มีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ และค่าที่ได้จากตัวแปรดังกล่าวมีค่ามากเมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์ตัวแปรอื่น ดังนั้น สมการที่ (4-20) จึงใช้เหมือนเดิมไม่มีการละทิ้งตัวแปร

$$E_1 = 0 \tag{4-41}$$

$$E_3 = 0 \tag{4-42}$$

แทนสมการที่ (4-41) และ (4-42) ในสมการที่ (4-19) จะได้สมการใหม่ของ a_1 ที่ผ่านการจัดรูปสมการ ได้ดังสมการที่ (4-43)

$$a_1 = a^2 E_4 \tag{4-43}$$

เมื่อแทนสมการที่ (4-43) และ (4-20) ในสมการที่ (4-15) ทำให้ได้เทอมสัมประสิทธิ์ของตัวแปร A ใหม่ดังแสดงในสมการที่ (4-44)

$$A = V_1\left(a^2E_4 + a(E_2 + E_4)\right) \tag{4-44}$$

-การจัดรูปสัมประสิทธิ์ตัวแปรในกลุ่ม B

จากสมการที่ (4-16) เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปร b_1 b_2 และ b_3 ดังแสดงในสมการที่ (4-21) (4-22) และ (4-23) สังเกตได้ว่า ที่ความถี่เท่ากับ 27.5 Hz ซึ่งเป็นความถี่ที่เหมาะสมสำหรับค่าความเร็วรอบเท่ากับ 1500 rpm (อ้างอิงจากค่าความถี่ที่ทำให้กำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.1) ค่าคงที่ 0.5 ในสมการที่ (4-21) มีค่าน้อยกว่าตัวแปร E_5 ประมาณ 70 เท่า (E_5 มีค่าเท่ากับ 35) จึงทำให้ค่าคงที่ดังกล่าวมีนัยสำคัญน้อยต่อตัวแปร b_1 ซึ่งลักษณะความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถใช้อธิบายได้ทุกช่วงความเร็วรอบ ด้วยเหตุนี้ จึงทำการละทิ้งค่าคงที่ 0.5 ในสมการที่ (4-21) จึงทำให้ได้สมการใหม่ของตัวแปร b_1 แสดงได้ดังสมการที่ (4-45)

$$b_1 = E_5 \tag{4-45}$$

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรในสมการที่ (4-22) ที่ความถี่ดังกล่าว พบว่า ค่าของตัวแปร R_a E_5 E_6 E_7 และค่าคงที่ในสมการ มีค่าเท่ากับ 15.3 35 3.33 385 และ 0.5 ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้ว่า ค่าของตัวแปร E_6 และค่าคงที่ 0.5 มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าของตัวแปรอื่นในสมการ ทั้งนี้เมื่อสมการที่ (4-22) ของตัวแปร b_2 พิจารณาตัวแปร E_6 และค่าคงที่ 0.5 จะมีค่าเท่ากับ -322.21 ในขณะเดียวกัน เมื่อทำการละทิ้งตัวแปร E_6 และค่าคงที่ 0.5 จะมีค่าเท่ากับ -326.89 โดยที่ผลต่างที่เกิดจากการละทิ้งตัวแปรดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 4.68 ซึ่งจะเห็นได้ว่าตัวแปร E_6 และค่าคงที่ 0.5 มีนัยสำคัญน้อยต่อผลรวมของสมการที่ (4-22) เมื่อเทียบกับตัวแปรอื่นในสมการ นอกจากนี้ ลักษณะความสัมพันธ์ดังกล่าวยังสามารถใช้อธิบายได้ทุกช่วงความเร็วรอบ ด้วยเหตุนี้ จึงทำการละทิ้งค่าคงที่ 0.5 และกำหนดให้ตัวแปร E_6 มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังแสดงในสมการที่ (4-46) ทั้งนี้ เมื่อทำการละทิ้งค่าคงที่ 0.5 และแทนสมการที่ (4-46) ในสมการที่ (4-22) จะได้สมการใหม่ของตัวแปร b_2 ดังแสดงในสมการที่ (4-47)

$$E_6 = 0 \tag{4-46}$$

$$b_2 = a^2E_5 + R_a - E_7 \tag{4-47}$$

เมื่อทำการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในสมการที่ (4-23) ที่ความถี่เท่ากับ 27.5 Hz เช่นเดียวกับกรณีที่ผ่านมา สังเกตได้ว่า ค่าของตัวแปร E_6 และค่าคงที่ 0.5 มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับตัวแปร R_1 และ E_5 ที่มีค่าเท่ากับ 12.5 และ 35 จึงทำให้ตัวแปรดังกล่าวมีนัยสำคัญน้อยต่อค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร b_3 ทั้งนี้ ลักษณะความสัมพันธ์ดังกล่าวยังสามารถใช้อธิบายได้ทุกช่วงความเร็วรอบ ดังนั้น จึงทำการละทิ้งค่าคงที่ 0.5 และแทนสมการที่ (4-46) ในสมการที่ (4-23) ซึ่งทำให้ได้สมการใหม่ของ b_3 ดังแสดงในสมการที่ (4-48)

$$b_3 = R_1 + E_5 \tag{4-48}$$

เมื่อแทนสัมประสิทธิ์ตัวแปร b_1 b_2 และ b_3 ดังสมการที่ (4-45) ถึง (4-48) ในสมการที่ (4-16) จะได้สมการใหม่ในเทอมสัมประสิทธิ์ของตัวแปร B ดังแสดงในสมการที่ (4-59)

$$B = E_7(R_1 + E_5) - E_5(a^2 R_1 + R_a) - R_1 R_a \tag{4-49}$$

-การจัดรูปสัมประสิทธิ์ตัวแปรในกลุ่ม C

จากสมการที่ (4-17) ของตัวแปร C เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ตัวแปร c_1 ถึง c_7 ตามสมการที่ (4-24) ถึงสมการที่ (4-30) ที่ค่าความถี่ที่เหมาะสม ตัวอย่าง เช่น ที่ความถี่ 27.5 Hz (สำหรับค่าความเร็วรอบเท่ากับ 1500 rpm) จากสมการที่ (4-24) สังเกตได้ว่า ค่าของตัวแปร E_1 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ และมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับผลบวกของตัวแปร E_2 กับ E_4 ($E_2 + E_4$) ทั้งนี้เมื่อสมการที่ (4-24) พิจารณาตัวแปร E_1 จะมีค่าเท่ากับ 1.817 ในขณะเดียวกันเมื่อไม่พิจารณาตัวแปร E_1 จะมีค่าเท่ากับ 1.669 ซึ่งผลต่างจากทั้งสองกรณีมีค่าเท่ากับ 0.148 อีกทั้งค่าผลต่างดังกล่าวสามารถใช้อธิบายได้ทุกช่วงความเร็วรอบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการละทิ้งตัวแปร E_1 มีนัยสำคัญน้อยต่อค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร c_1 ในสมการที่ (4.24) ดังนั้นจึงกำหนดให้ E_1 มีค่าเท่ากับศูนย์ดังแสดงในสมการที่ (4-41) เมื่อแทนสมการที่ (4-41) ในสมการที่ (4-24) จะได้สมการใหม่ของ c_1 ดังแสดงในสมการที่ (4-50)

$$c_1 = a^2(E_2 + E_4) \tag{4-50}$$

ในขณะเดียวกัน เมื่อพิจารณาสมการที่ (4-25) จะเห็นได้ว่า ลักษณะความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ตัวแปรในสมการดังกล่าวมีรูปแบบเดียวกันกับสมการที่ (4-23) ของตัวแปร b_3

ดังนั้น จึงดำเนินการจัดรูปสมการที่ (4-25) ด้วยหลักการเดียวกันกับสมการที่ (4-23) ของตัวแปร b_3 ดังที่ได้นำเสนอในขั้นตอนการจัดรูปสัมประสิทธิ์ตัวแปรในกลุ่ม B ที่ผ่านมา ซึ่งการจัดรูปสมการของตัวแปร b_3 ได้นำเสนอการละทิ้งค่าคงที่ 0.5 และตัวแปร E_6 ด้วยเหตุผลว่า ค่าของตัวแปร E_6 และค่าคงที่ 0.5 มีนัยสำคัญน้อยต่อผลรวมของสมการเมื่อเทียบกับค่าของตัวแปร R_1 และ E_5 ซึ่งส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของสมการดังกล่าวขึ้นอยู่กับตัวแปร R_1 และ E_5 เพราะฉะนั้น จึงทำการละทิ้งค่าคงที่ 0.5 และแทนสมการที่ (4-46) ในสมการที่ (4-25) จะได้สมการใหม่ของ c_2 ที่มีลักษณะความสัมพันธ์เช่นเดียวกับตัวแปร b_3 ดังแสดงในสมการที่ (4-51)

$$c_2 = R_1 + E_5 \tag{4-51}$$

จากการพิจารณาสมการที่ (4-26) ของตัวแปร c_3 สังเกตได้ว่า ลักษณะความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ตัวแปรในสมการดังกล่าวมีรูปแบบเดียวกันกับสมการที่ (4-22) ของตัวแปร b_2 ด้วยเหตุนี้ จึงทำการจัดรูปสมการด้วยหลักการเดียวกันกับสมการที่ (4-22) ของตัวแปร b_2 ดังที่ได้นำเสนอในขั้นตอนการจัดรูปสัมประสิทธิ์ตัวแปรในกลุ่ม B ที่ผ่านมา ด้วยการละทิ้งค่าคงที่ 0.5 และตัวแปร E_6 เพราะฉะนั้น จึงทำการละทิ้งค่าคงที่ 0.5 และแทนสมการที่ (4-46) ในสมการที่ (4-26) ซึ่งทำให้ได้สมการใหม่ของตัวแปร c_3 ดังแสดงในสมการที่ (4-52)

$$c_3 = a^2E_5 + R_a - E_7 \tag{4-52}$$

เมื่อพิจารณาสมการ (4-27) ที่ความถี่ 27.5 Hz (ค่าความถี่ที่เหมาะสมสำหรับความเร็วรอบ 1500 rpm) สังเกตได้ว่า ตัวแปร E_1 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ และผลรวมของสมการในกรณีที่พิจารณาตัวแปร E_1 จะมีค่าเท่ากับ 1.486 ขณะเดียวกันในกรณีที่ไม่พิจารณา E_1 จะมีค่าเท่ากับ 1.365 โดยที่ทั้งสองกรณีมีค่าแตกต่างกันเท่ากับ 0.121 ซึ่งค่าความแตกต่างดังกล่าวยังคงมีลักษณะเช่นเดิมทุกค่าความเร็วรอบ จึงทำให้การละทิ้งตัวแปร E_1 มีนัยสำคัญน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงของสมการ และเพื่อให้ง่ายต่อการจัดรูปสัมประสิทธิ์ตัวแปรในสมการที่ (4.17) จึงกำหนดให้ E_1 มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังสมการที่ (4-41) ทั้งนี้ เมื่อแทนสมการที่ (4-41) ในสมการที่ (4-27) จะได้สมการใหม่ของตัวแปร c_4 ดังแสดงในสมการที่ (4-53)

$$c_4 = E_2 + E_4 \tag{4-53}$$

จากสมการที่ (4-28) ของตัวแปร c_5 สังเกตได้ว่า ค่าคงที่ 0.5 มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับตัวแปร E_5 ยกตัวอย่างที่ ค่าความถี่ที่เหมาะสมสำหรับค่าความเร็วรอบเท่ากับ 1500 rpm (27.5 Hz) พบว่า ตัวแปร E_5 มีค่าเท่ากับ 35 ซึ่งจะเห็นได้ว่า มีค่ามากกว่าค่าคงที่ 0.5 เท่ากับ 70 เท่า อีกทั้งยังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อความเร็วรอบมีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น จึงทำการละทิ้งค่าคงที่ 0.5 ในสมการที่ (4-28) ซึ่งจะได้สมการใหม่ของตัวแปร c_5 ดังแสดงในสมการที่ (4-54) นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาสมการที่ (4-29) ที่ความถี่ดังกล่าว จะสังเกตได้ว่า ตัวแปร E_2 และ E_4 มีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ จึงทำให้ค่าที่ได้จากตัวแปร E_2 และ E_4 มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของสมการดังกล่าว ดังนั้น จึงไม่มีการละทิ้งตัวแปรในสมการที่ (4-29) ของตัวแปร c_6

$$c_5 = 2a^2E_5 \tag{4-54}$$

สำหรับสมการที่ (4-30) ของตัวแปร c_7 สังเกตเห็นว่า ตัวแปร E_6 และค่าคงที่ 0.5 มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับตัวแปรอื่น ยกตัวอย่าง เช่น ที่ความถี่เท่ากับ 27.5 (ค่าความถี่ที่เหมาะสมสำหรับความเร็วรอบเท่ากับ 1500 rpm) เมื่อตัวแปร c_7 พิจารณาตัวแปร E_6 และค่าคงที่ 0.5 จะมีค่าเท่ากับ -328.04 ขณะเดียวกันเมื่อไม่พิจารณาจะมีค่าเท่ากับ -332.19 จะเห็นได้ว่า กรณีทั้งสองมีค่าแตกต่างกันเท่ากับ 4.15 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับผลรวมทั้งหมดของสมการดังกล่าว ทั้งนี้จากค่าผลต่างดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าตัวแปร E_6 และค่าคงที่ 0.5 มีนัยสำคัญน้อยเมื่อเทียบกับตัวแปรอื่นในสมการ ดังนั้น จึงทำการละทิ้งตัวแปร E_6 และค่าคงที่ 0.5 ในสมการที่ (4-30) โดยกำหนดให้ตัวแปร E_6 มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังสมการที่ (4-46) เมื่อทำการละทิ้งค่าคงที่ 0.5 และแทนสมการที่ (4-46) ในสมการที่ (4-30) จะได้สมการใหม่ขอตัวแปร c_7 ดังแสดงในสมการที่ (4-55)

$$c_7 = R_a + a^2E_5 - E_7 + jaE_5 \tag{4-55}$$

เมื่อแทนสมการที่ (4-50) (4-51) (4-52) (4-53) (4-54) (4-29) และ (4-55) ของตัวแปร c_1 ถึง c_7 ตามลำดับ ในสมการที่ (4-17) จะได้สมการใหม่ในเทอมสัมประสิทธิ์ของตัวแปร C ดังแสดงในสมการที่ (4-56)

$$C = -V\left(a^2R_1 + R_a - E_7\right)\left(E_2 + E_4\right)\left(R_a + a^2E_5 - E_7 + jaE_5\right) \tag{4-56}$$

-การจัดรูปสัมประสิทธิ์ตัวแปรในกลุ่ม D

จากสมการที่ (4-18) ของตัวแปร D เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ตัวแปรของ d_1 d_2 และ d_3 ตามสมการที่ (4-31) ถึง (4-33) ที่ค่าความถี่ที่เหมาะสม ซึ่งในที่นี้ ยกตัวอย่างที่ 27.5 Hz (ค่าความถี่ที่เหมาะสมสำหรับค่าความเร็วรอบเท่ากับ 1500 rpm) สังเกตได้ว่า ค่าคงที่ 0.5 ในสมการที่ (4-31) ของตัวแปร d_1 มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับตัวแปร E_5 ที่มีค่าเท่ากับ 35 อีกทั้ง ค่าของตัวแปร E_5 ยังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ตามค่าความเร็วรอบ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าคงที่ 0.5 มีนัยสำคัญน้อยเมื่อเทียบกับตัวแปร E_5 ดังนั้น จึงทำการละทิ้งค่าคงที่ 0.5 ในสมการที่ (4-31) และแทนสมการใหม่ของตัวแปร d_1 ที่ละทิ้งค่าคงที่ 0.5 ด้วยสมการที่ (4-57)

$$d_1 = (aE_5)^2 \tag{4-57}$$

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาสมการที่ (4-32) ของตัวแปร d_2 พบว่า ลักษณะความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ตัวแปรในสมการดังกล่าวมีรูปแบบเดียวกันกับสมการที่ (4-22) และ (4-26) ของตัวแปร b_2 และ c_3 ด้วยเหตุนี้ จึงทำการจัดรูปสมการด้วยหลักการเดียวกันกับการจัดรูปสมการที่ (4-22) ของตัวแปร b_2 และสมการที่ (4-26) ของตัวแปร c_3 ดังที่ได้นำเสนอไว้ในขั้นตอนการจัดรูปสัมประสิทธิ์ตัวแปรในกลุ่ม B และ C ที่ผ่านมา ซึ่งหลักการที่ใช้ คือ ทำการละทิ้งค่าคงที่ 0.5 และกำหนดให้ตัวแปร E_6 มีค่าเท่ากับศูนย์ ด้วยเหตุนี้ จึงทำการละทิ้งค่าคงที่ 0.5 และแทนสมการที่ (4-46) ในสมการที่ (4-32) จะได้สมการใหม่ของตัวแปร d_2 ดังแสดงในสมการที่ (4-58)

$$d_2 = a^2E_5 + R_a - E_7 \tag{4-58}$$

จากสมการที่ (4-33) ของตัวแปร d_3 สังเกตได้ว่า ลักษณะความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ตัวแปรในสมการดังกล่าวมีรูปแบบเดียวกันกับสมการที่ (4-23) ของตัวแปร b_3 และสมการที่ (4-25) ของตัวแปร c_2 ด้วยเหตุนี้ จึงทำการจัดรูปสมการด้วยหลักการเดียวกันกับการจัดรูปสมการของตัวแปร b_3 และ c_2 ดังที่ได้นำเสนอผ่านมาในขั้นตอนการจัดรูปสัมประสิทธิ์ตัวแปรในกลุ่ม B และ C ทั้งนี้ หลักการที่ใช้สำหรับจัดรูปสมการ คือ ทำการละทิ้งค่าคงที่ 0.5 และกำหนดให้ตัวแปร E_6 มีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากค่าดังกล่าวมีนัยสำคัญน้อยเมื่อเทียบกับตัวแปร R_1 และ E_5 ดังนั้น จึงทำการละทิ้งค่าคงที่ 0.5 และแทนสมการที่ (4-46) ในสมการที่ (4-33) ซึ่งจะได้สมการใหม่ของตัวแปร d_3 ดังแสดงในสมการที่ (4-59)

$$d_3 = R_1 + E_5 \tag{4-59}$$

เมื่อแทนสมการที่ (4-57)-(4-59) ในสมการที่ (4-18) จะได้สมการใหม่ในเทอมสัมประสิทธิ์ของตัวแปร D ดังแสดงในสมการที่ (4-60)

$$D = \left(-a^2 R_1 E_5 - (R_a - E_7)(R_1 + E_5)\right)^2 \tag{4-60}$$

จากกระบวนจัดรูปสัมประสิทธิ์ตัวแปรของ A B C และ D เพื่อลดความซับซ้อนที่ผ่านมา เมื่อแทนสมการที่ (4-44), (4-49), (4-56) และ (4-60) ในสมการที่ (4-14) จะได้สมการอนุพันธ์กระแสของขดลวดหลักเทียบกับความถี่เท่ากับศูนย์ ที่ผ่านการจัดรูปสมการเรียบร้อยแล้ว ดังแสดงในสมการที่ (4-71)

$$\frac{dI_{1'}}{df} = \frac{A}{B} - \frac{C}{D} = 0 \tag{4-71}$$

โดยที่
$$A = V_1\left(a^2 E_4 + a(E_2 + E_4)\right)$$
$$B = E_7(R_1 + E_5) - E_5(a^2 R_1 + R_a) - R_1 R_a$$
$$C = -V_1\left(a^2 R_1 + R_a - E_7\right)\left(E_2 + E_4\right)\left(R_a + a^2 E_5 - E_7 + jaE_5\right)$$
$$D = \left(-a^2 R_1 E_5 - (R_a - E_7)(R_1 + E_5)\right)^2$$

จากสมการที่ (4-71) จะเห็นได้ว่าสมการอนุพันธ์ดังกล่าวมีความซับซ้อนน้อยลงกว่าเดิม จึงทำให้ง่ายต่อการโปรแกรมในรูปแบบภาษาซี หัวข้อถัดไป หัวข้อที่ 4.3 นำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB

4.2.2 ผลการจำลองสถานการณ์

จากการนำเสนอการจัดรูปสมการในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าสมการอนุพันธ์ที่ผ่านการจัดรูปสมการมีความซับซ้อนน้อยลง และสะดวกต่อการนำไปโปรแกรมให้อยู่ในรูปของภาษาซีมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การจัดรูปสมการอนุพันธ์ดังกล่าวให้มีค่าเท่ากับศูนย์ เพื่อคำนวณหาค่าความถี่ที่เหมาะสมยังทำได้ยาก เนื่องจากตัวแปรส่วนมากเป็นจำนวนเชิงซ้อน อีกทั้งยังติดค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรต่าง ๆ ในสมการ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการนำวิธีการค้นหาในแนวลึก (depth-first search : DFS) (Russell and Norvig, 2003) เข้ามาช่วยในการค้นหาค่าความถี่ที่เหมาะสม ทั้งนี้วิธีการค้นหาดังกล่าวจะทำหน้าที่ค้นหาค่าความถี่ ณ จุดที่ทำให้ค่า

ของสมการอนุพันธ์กระแสของขดลวดหลักเทียบกับความถี่มีค่าใกล้เคียงศูนย์มากที่สุด ซึ่งวิธีการค้นหาดังกล่าวถูกรวมไว้ในกระบวนการคำนวณของอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน (ภาคผนวก ง.) สำหรับการทดสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ทำการทดสอบโดยนำอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน และวิธีการค้นหาความถี่จากการใช้สมการอนุพันธ์ของกระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่เท่ากับศูนย์ที่ยังไม่ได้จัดรูปสมการ ($\frac{dI_1}{df}=0$) มาทำการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB (ภาคผนวก ค.) แล้วนำค่าความถี่ที่ได้จากการคำนวณทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกัน แสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการประหยัดพลังงานที่ค่าความเร็วรอบต่าง ๆ

ความเร็วรอบ (rpm)	ความถี่ที่เหมาะสม (Hz)	
	$\frac{dI_1}{df}=0$	$\frac{dI_{1'}}{df}=0$
2700	50	50
2600	49	49
2500	47.5	47
2400	45.5	45.5
2300	44	44
2200	42.5	42
2100	40.5	40.5
2000	39	39
1900	37.5	37.5
1800	36	35.5
1700	34.5	34
1600	33	32.5
1500	31.5	30.5

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 4.1 สังเกตได้ว่า ค่าความถี่ที่ได้จากสมการอนุพันธ์กระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่ที่ผ่านการจัดรูปสมการแล้ว มีค่าใกล้เคียงกับค่าความถี่ที่ได้จากสมการอนุพันธ์กระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่ที่ยังไม่ผ่านจัดรูปสมการ ขณะที่การคำนวณด้วย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สมการอนุพันธ์กระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่ที่ผ่านการจัดรูปสมการ มีรูปแบบของสมการที่สั้น และกระชับ จึงทำให้ง่ายต่อการโปรแกรมในรูปแบบภาษาซี และช่วยลดระยะเวลาในการประมวลผลของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

4.3 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอหลักการออกแบบ และพัฒนาอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานด้วยวิธีการค้นหาค่าความถี่ที่เหมาะสมสำหรับค่าความเร็วรอบต่าง ๆ เพื่อลดกำลังงานสูญเสียทางไฟฟ้า โดยหลักการที่ใช้ คือ การคำนวณหาค่าความถี่ที่ทำให้สมการอนุพันธ์กระแสของขดลวดหลักเทียบกับความถี่มีค่าเท่ากับศูนย์ อีกทั้งได้นำเสนอวิธีการจัดรูปแบบสมการอนุพันธ์กระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่ เพื่อลดความซับซ้อน และทำให้ง่ายต่อการโปรแกรมให้อยู่ในรูปแบบภาษาซี นอกจากนี้ ได้นำเสนอการทดสอบประสิทธิผลของการคำนวณหาค่าความถี่ที่เหมาะสมจากอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานที่พัฒนาขึ้น จากผลการทดสอบ พบว่า ค่าของความถี่ที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณของอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานในกรณีใช้สมการอนุพันธ์ของกระที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่ที่จัดรูปสมการแล้วให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้การคำนวณด้วยสมการอนุพันธ์ของกระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่ที่ยังไม่ผ่านการจัดรูปสมการ ขณะที่การคำนวณด้วยสมการอนุพันธ์กระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่ที่ผ่านการจัดรูปสมการแล้วมีรูปแบบของสมการที่สั้น และกระชับกว่า บทถัดไป บทที่ 5 เป็นการอธิบายหลักการออกแบบ และสร้างชุดวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่ง ให้สามารถรองรับการสั่งการของอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
โครงสร้างฮาร์ดแวร์สำหรับชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส เพื่อการประหยัดพลังงาน

5.1 บทนำ

สำหรับโครงสร้างฮาร์ดแวร์ของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่ง และปั๊มน้ำไฟฟ้าชนิดหอยโข่ง โดยระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าอินพุตให้กับชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ในขณะที่ชุดขับเคลื่อนดังกล่าวทำหน้าที่แปลงผันกำลังงานไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดพิกัดแรงดันเท่ากับ 48 V ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีขนาดแรงดันเท่ากับ 220 V เพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่งต่อไป เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายถึงโครงสร้างฮาร์ดแวร์ของชุดวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่ง รายละเอียดการออกแบบ และการทดสอบวงจรต่าง ๆ ของชุดขับเคลื่อนดังกล่าว และยังได้นำเสนอหลักการเลือกพิกัดปั๊มน้ำ รวมถึงการออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีความเหมาะสมกับลักษณะการใช้งานในแต่ละวัน อีกทั้งในตอนท้ายได้มีการแสดงตัวอย่างการออกแบบเพื่อเลือกพิกัดปั๊มน้ำ และระบบเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้วย

5.2 การเลือกขนาดพิกัดปั๊มน้ำ

การเลือกขนาดพิกัดของปั๊มน้ำให้เหมาะสมกับระบบการให้น้ำถือว่าเป็นเรื่องที่สำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากการเลือกขนาดพิกัดปั๊มน้ำโดยที่ไม่มีการออกแบบให้เหมาะสม อาจทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงเกินความจำเป็น หรือทำให้ระบบเกิดความผิดพลาด เสียหาย เช่น ส่งน้ำไม่ทั่วถึงไม่สม่ำเสมอ โดยปัจจัยที่มีผลต่อขนาดพิกัดปั๊มน้ำ คือ ปริมาณความต้องการน้ำของพืช และวิธีการให้น้ำ เนื่องจากพืชแต่ละชนิดมีปริมาณการใช้น้ำที่แตกต่างกันตามช่วงอายุ และฤดูกาล (สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ, ฝ่ายการใช้น้ำชลประทาน, 2554) ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทราบขอบเขตปริมาณการใช้น้ำในแต่ละช่วงอายุของพืช และปัจจุบันมีการพัฒนาวิธีการให้น้ำแก่พืชที่หลากหลาย ซึ่งการเลือกวิธีการให้น้ำที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการให้น้ำแก่พืช ประหยัดเวลา และแรงงาน (วันชัย คุปวานิชพงษ์,สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม, 2555) โดยสามารถ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จำแนกประเภทการให้น้ำออกเป็น 4 ประเภท คือ การให้น้ำทางผิวดิน การให้น้ำแบบสปริงเกอร์ การให้น้ำแบบใช้น้ำน้อย และการให้น้ำทางใต้ผิวดิน เนื่องจากในปัจจุบันบริษัทผู้ผลิตปั๊มน้ำได้มีตารางแสดงรายละเอียดลักษณะการทำงานของปั๊มน้ำไว้แล้ว จึงทำให้การเลือกขนาดปั๊มน้ำมีความสะดวกมากยิ่งขึ้น โดยสิ่งที่ต้องทราบสำหรับใช้เลือกขนาดปั๊มน้ำมี 2 อย่าง คือ ปริมาณน้ำ หรืออัตราการไหล กับระยะส่งสูง ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะถูกใช้ในการพิจารณาเลือกในตารางแสดงรายละเอียดของปั๊มดังรูปที่ 5.1 จากตาราง อัตราการไหล คือ ปริมาณของน้ำที่ไหลออกจากท่อของปั๊มน้ำ มีหน่วยเป็นลิตรต่อนาที (L/min) หรือลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (m^3/hr) และระยะส่งสูง คือ ระยะห่างระหว่างความสูงจากปั๊มน้ำกับปลายท่อที่น้ำไหลออก มีหน่วยเป็นเมตร (m) หรือบางกรณีจะบอกมาในรูปแบบของแรงดันน้ำภายในท่อ มีหน่วยเป็น บาร์ (bar) โดยที่ระยะส่งสูงเท่ากับ 10 m จะให้ค่าแรงดันน้ำเท่ากับ 1 bar สำหรับกรณีพื้นที่ที่พิจารณาส่วนใหญ่เป็นที่ราบจะใช้ระยะส่งสูงประมาณ 25 m แทนความยาวท่อประธานที่ไม่เกิน 100 m ส่วนกรณีพื้นที่เป็นเนิน จะต้องทำการเพิ่มระยะส่งสูงขึ้นอีกตามระดับความสูงของพื้นที่เทียบกับระดับปั๊มน้ำ เช่น พื้นที่ที่พิจารณามีความยาวของท่อประธานประมาณ 100 m และปลายท่ออยู่บนพื้นที่ที่เป็นเนินสูง 4 m จากระดับปั๊มน้ำ เพราะฉะนั้น ระยะส่งสูงเท่ากับ 29 m (25 m + 4 m) หรือกรณีที่ท่อประธานมีความยาวมากกว่า 100 m จะต้องทำการเพิ่มระยะส่งสูง 4 m ทุก ๆ ระยะ 100 m เช่น พื้นที่ที่พิจาณามีความยาวของท่อประธานประมาณ 300 m ดังนั้นระยะส่งสูงที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 12 m (4 m × (300 /100)) เพราะฉะนั้น ระยะส่งสูงของปั๊มน้ำเท่ากับ 41 m (29 m + 12 m) เมื่อได้ค่าระยะส่งสูงที่ต้องการแล้ว ก่อนทำการเลือกปั๊มน้ำควรเพิ่มค่าระยะส่งสูงอีกประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ เพื่อชดเชยแรงดันน้ำที่สูญเสียในระบบ (head loss)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Specifications

รุ่น		แรงม้า	ขนาดท่อ เข้า - ออก (นิ้ว)		กระแส (A)			อัตราการไหล ม³/ชม.	0	6	12	15	18	21	27	30	33
ไฟสองสาย 1 เฟส 220V 50Hz	ไฟสามสาย 3 เฟส 380V 50Hz				ไฟสองสาย 220V	ไฟสามสาย 220V	380V	ลิตร/นาที	0	100	200	250	300	350	450	500	550
WCM-375S	-	1/2	1 1/2	1 1/2	2.9	-	-		9.8	9.2	7.7	6.5	5.6	4.3	-	-	-
WCM-755(F)S	-	1	2	2	7.0	-	-		17.2	16.9	15.5	14	13	11.4	7.6	-	-
WCM-755SH	-	1	1 1/2	1 1/2	7.1	-	-	ระยะส่งสูง (เมตร)	21	20	17	16	-	-	-	-	-
WCM-1105(F)S	-	1.5	2	2	9.1	-	-		20.7	20	18.7	16.7	16.3	14.7	11	8.9	-
WCM-1505(F)S	WCM-1505(F)T	2	2	2	14	8.5	4.9		26.4	26.2	25	24	23	21.5	17.8	15.6	13.2
WCM-2205FS	WCM-2205FT	3	2	2	16.5	10.0	5.8		32.2	32	31	30	28.3	26.5	21.5	18	15
WCM-3705FS	WCM-3705FT	5	2	1 1/4	26.5	16.5	9.6		46.2	46	43.3	41.9	39.8	37.9	31.9	-	-

ระยะดูดลึก 7 เมตร

มอเตอร์ความเร็วสูงสุด 3,000 รอบต่อนาที

MODEL	HP	PHASE	A	V	Hz	FLOW RATE		0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33
							m^3/Hr												
							l/min	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
WCM-5505FT	7.5		17					58.0	57.6	57.0	56.6	56.0	55.0	53.8	52.1	50.1	48.0	44.8	42.0
WCM-7505FT	10	3	19	380~415	50	TOTAL HEAD (m)		66.5	66.1	65.7	65.0	63.9	62.1	59.6	57.8	54.8	52.5	50.3	47.5
WCM-11005FT	15		24.7					82.0	81.7	81.3	80.5	79.4	78.5	77.6	75.8	74.1	72.5	70.8	69.2

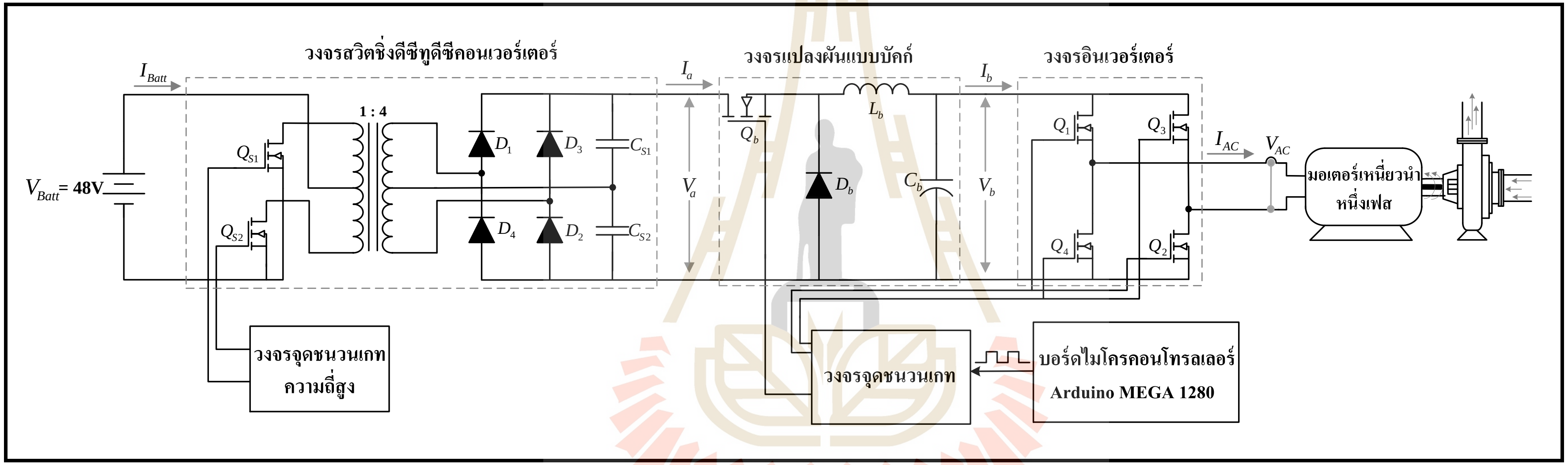
- Motor Insulation Class F IP55
- 220 V, 380 V 50 Hz

รูปที่ 5.1 รายละเอียดปั๊มน้ำหอยโข่งไฟฟ้าของบริษัทมิตซูบิชิ

5.3 โครงสร้างของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

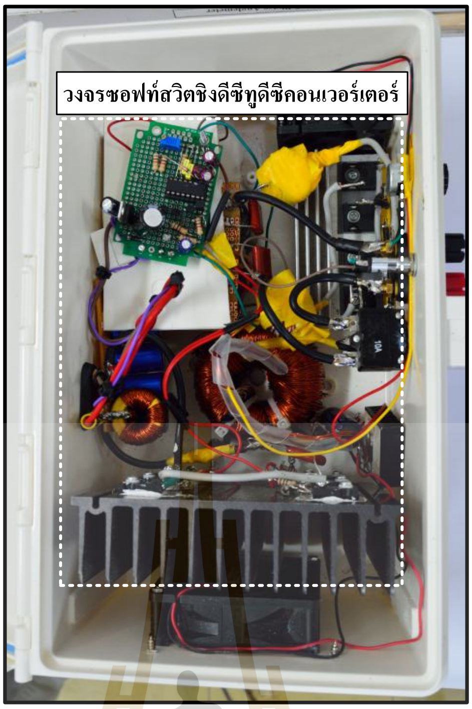
ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสจะทำหน้าที่เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและทำการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ อีกทั้งชุดขับเคลื่อนดังกล่าวยังสามารถควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้มีค่าตามต้องการ เพื่อรองรับกับระบบที่มีตัวควบคุมความเร็วรอบ ซึ่งจะมีการอธิบายไว้ในบทที่ 6 โดยส่วนประกอบภายในของชุดขับเคลื่อนปั๊มน้ำประกอบด้วย 5 ส่วนหลัก คือ วงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ วงจรแปลงผันแบบบัคก์ วงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรจุดชนวนเกท และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 5.2 จากโครงสร้างฮาร์ดแวร์ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสดังกล่าว วงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ในขณะที่วงจรแปลงผันแบบบัคก์ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ให้มีค่าตามต้องการ และสุดท้ายวงจรอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่ง ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะทำการควบคุมการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ และวงจรอินเวอร์เตอร์ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET-EASY MEGA 1280 (Arduino MEGA 1280) ผ่านวงจรจุดชนวนเกท โดยภาพรวมของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่งที่ใช้งานจริง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 สำหรับหัวข้อถัดไป จะเป็นการอธิบายถึงหลักการทำงาน การออกแบบ และการทดสอบวงจรต่าง ๆ ในชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่งต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

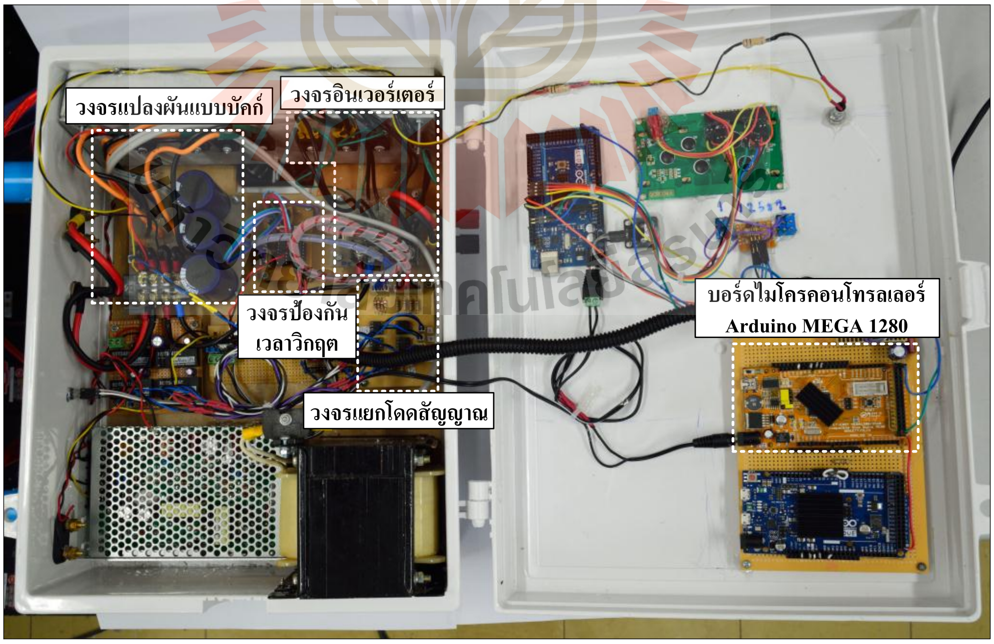


รูปที่ 5.2 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



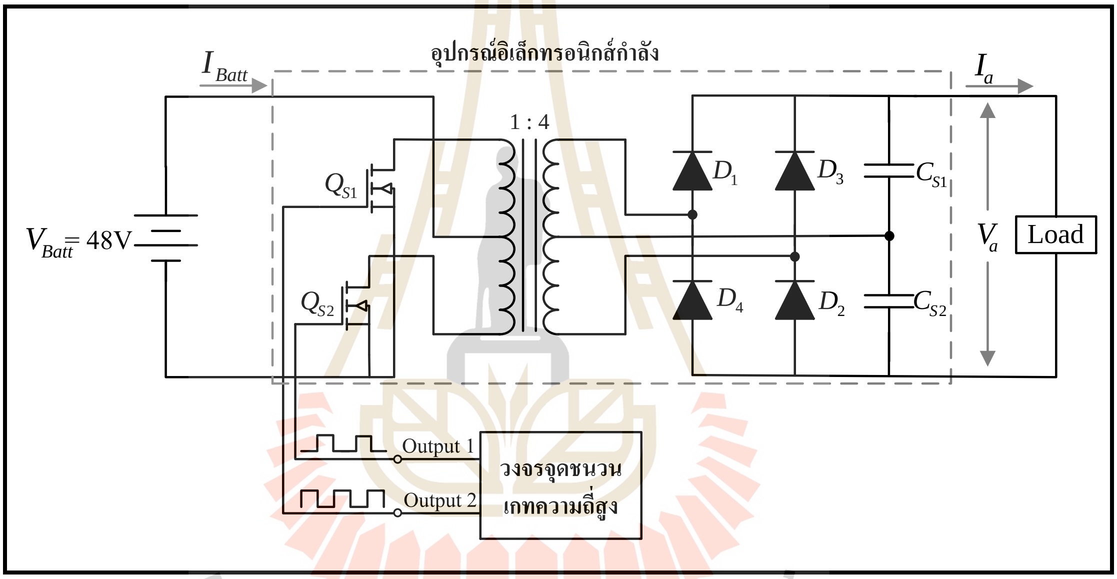
รูปที่ 5.3 ภาพรวมชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่ใช้งานจริง
ในส่วนวงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 5.4 ภาพรวมชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่ใช้งานจริง
ในส่วนวงจรแปลงผันแบบบัคก์ และวงจรอินเวอร์เตอร์

5.4 วงจรซอฟท์สวิตชิ่งดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์

วงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ เป็นวงจรที่ใช้สำหรับเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิดคงค่าแรงดัน ซึ่งมีจุดเด่น คือ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และประสิทธิภาพสูง โดยหลักการทำงานของวงจรดังกล่าว คือ การแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นสัญญาณรูปพัลส์ความถี่สูงด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังก่อนจ่ายให้กับหม้อแปลงเพื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าและผ่านวงจรเรียงกระแส (rectifier) อีกครั้ง เพื่อเปลี่ยนสัญญาณรูปพัลส์ความถี่สูงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยลักษณะโครงสร้างของวงจรซอฟท์สวิตช์ชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.5



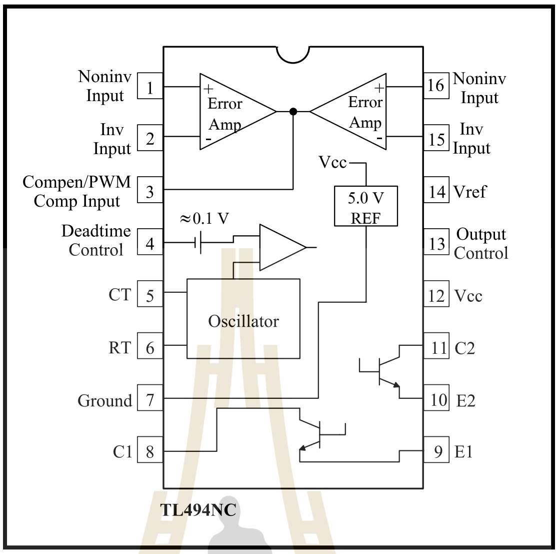
รูปที่ 5.5 วงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

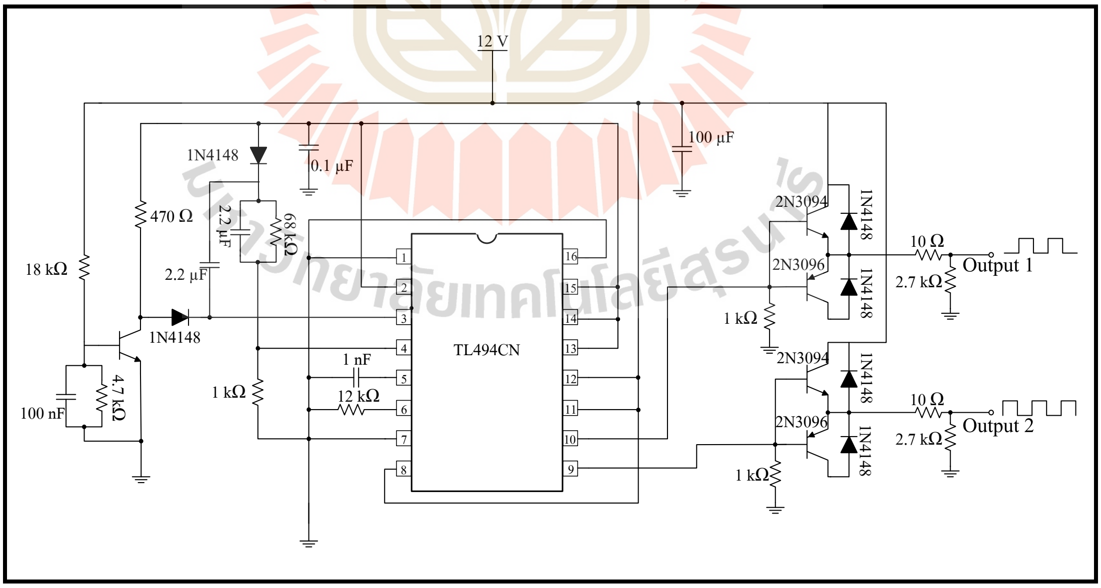
5.4.1 การออกแบบวงจร

สำหรับการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจรซอฟท์สวิตช์ชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ วงจรจุดชนวนเกทความถี่สูง และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง สำหรับในส่วนวงจรจุดชนวนเกทความถี่สูงทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์ความถี่สูง เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์ Q_{S1} และ Q_{S2} โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ไอซี เบอร์ TL494CN สำหรับสร้างสัญญาณพัลส์ความถี่สูง ซึ่งโครงสร้างของไอซีเบอร์ TL494CN แสดงดังรูปที่ 5.6 โดยมีลักษณะการต่อวงจรเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ดังรูปที่ 5.7 ซึ่งมีการอธิบายไว้ในเอกสารข้อมูล (data sheet) ของตัวอุปกรณ์ และสามารถแสดงวงจรที่สร้างจริงได้ดังรูปที่ 5.8 เมื่อทำการทดสอบวงจรโดยการจ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจรเท่ากับ 12 V จะทำให้ได้สัญญาณพัลส์เอาต์พุตที่มีค่าความถี่

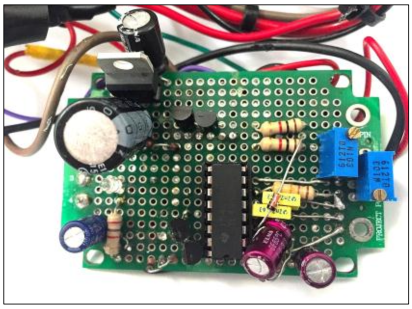
ประมาณ 23 kHz ดังรูปที่ 5.9 โดยสัญญาณที่ 1 คือ สัญญาณพัลส์เอาต์พุต 1 (Output 1) และสัญญาณที่ 2 คือ สัญญาณพัลส์เอาต์พุต 2 (Output 2) ตามลำดับ



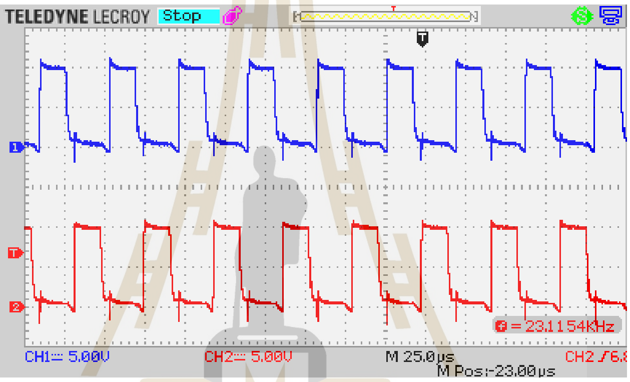
รูปที่ 5.6 โครงสร้างของไอซี TL494CN



รูปที่ 5.7 วงจรจุดชนวนเกทความถี่สูง



รูปที่ 5.8 วงจรจุดชนวนเกทความถี่สูงที่สร้างจริง



รูปที่ 5.9 สัญญาณพัลส์จากวงจรจุดชนวนเกทความถี่สูง

สำหรับในส่วนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ประกอบด้วยสวิตช์ (Q_{S1}, Q_{S2}) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้มอสเฟส (Mosfet) หม้อแปลง ไดโอด (D_1, D_2, D_3, D_4) และตัวเก็บประจุ (C_{S1}, C_{S2}) โดยการออกแบบพิกัดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังดังกล่าวจะคำนึงถึงพิกัดของแรงดันและกระแสเป็นสำคัญ โดยในเบื้องต้นจะทำการพิจารณาพิกัดดังกล่าวจากพิกัดของโหลด ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งพิกัดของมอเตอร์สามารถดูได้จากป้ายแสดงรายละเอียดของปั๊มน้ำมิตซูบิชิ รุ่น ACH-375S ดังรูปที่ 5.43 ในหัวข้อที่ 5.10.4 จากแผ่นป้ายดังกล่าวพบว่า มีค่าพิกัดกระแสเท่ากับ 3.4 A และมีค่าพิกัดแรงดันเท่ากับ 220 V ในขณะที่พิกัดดังกล่าวอยู่ในรูปแบบที่เรียกว่า ค่าอาร์เอ็มเอส (RMS) ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะทำการออกแบบให้ค่าของกระแส และแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตของวงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่ามากกว่าค่ายอดของกระแส (peak) และค่ายอดของแรงดันที่พิกัดของมอเตอร์ เนื่องจากต้องการให้ค่าของกระแส และแรงดันไฟฟ้า

กระแสตรงด้านเอาต์พุตของวงจรมีค่าสูงเพียงพอก่อนที่จะเข้าวงจรแปลงผันแบบบัคก์ และวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งการเพิ่มค่าพิกัดดังกล่าวขึ้นอยู่กับความพึงพอใจของผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเพิ่มค่าพิกัดของค่ายอดกระแส และแรงดันดังกล่าวอีก 25 เปอร์เซ็นต์ จากพิกัดค่ายอดกระแส และแรงดันของมอเตอร์ เพราะฉะนั้นสามารถแสดงการออกแบบวงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ได้ดังนี้

จากค่าพิกัดกระแส และแรงดันของมอเตอร์ที่ผ่านมา พบว่ามีค่ายอดของกระแสเท่ากับ 4.8 A และค่ายอดของแรงดันเท่ากับ 311.12 V ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (5-1) และ (5-2) ตามลำดับ

$$I_{peak} = \sqrt{2}I_{rms} = \sqrt{2} \times 3.4 = 4.8\,\text{A} \tag{5-1}$$

$$V_{peak} = \sqrt{2}V_{rms} = \sqrt{2} \times 220 = 311.12\,\text{V} \tag{5-2}$$

เมื่อทำการเพิ่มค่าพิกัดค่ายอดของกระแส และแรงดันดังกล่าวอีก 25 เปอร์เซ็นต์ เพราะฉะนั้นวงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ จะมีค่าพิกัดกระแสเอาต์พุต (I_a) เท่ากับ 6 A (4.8 A + (0.25 × 4.8 A)) และมีค่าพิกัดแรงดันเอาต์พุต (V_a) เท่ากับ 388.9 V (311.12 V + (0.25 × 311.12 V) ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ประมาณ 400 V ในขณะที่ทราบค่าพิกัดแรงดัน และกระแสเอาต์พุตแล้ว สามารถคำนวณหาค่าของแรงดัน และกระแสอินพุตได้จากความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้า โดยในงานวิจัยจะทำการสมมติให้ไม่มีกำลังงานสูญเสียเกิดขึ้นในวงจรดังกล่าว ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ และการวิเคราะห์วงจร ด้วยเหตุนี้จึงกำหนดให้กำลังงานไฟฟ้าอินพุตมีค่าเท่ากับกำลังงานไฟฟ้าเอาต์พุต ($P_{in} = P_{out}$) เนื่องจากแหล่งจ่ายอินพุตของวงจรเป็นแบตเตอรี่ที่มีพิกัดแรงดันเท่ากับ 48 V จึงทำให้พิกัดแรงดันอินพุต (V_{Batt}) มีค่าเท่ากับ 48 V ดังนั้นกระแสไฟฟ้าอินพุต (I_{Batt}) จึงมีค่าเท่ากับ 50 A สามารถแสดงค่าพิกัดแรงดัน และพิกัดกระแสสำหรับวงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 พิกัดแรงดัน และพิกัดกระแสของวงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์

อินพุตของหม้อแปลง		เอาต์พุตของหม้อแปลง	
แรงดันไฟฟ้า	48 V	แรงดันไฟฟ้า	400 V
กระแสไฟฟ้า	50 A	กระแสไฟฟ้า	6 A

สำหรับการออกแบบขนาดพิกัดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถพิจารณาค่าต่าง ๆ ได้จากตารางที่ 5.1 ซึ่งพบว่ามีค่าแรงดันอินพุตเท่ากับ 48V กระแสอินพุตเท่ากับ 50 A แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 400 V และกระแสเอาต์พุตเท่ากับ 6 A เมื่อทำการพิจารณาค่าพิกัดดังกล่าวร่วมกับค่าตัวประกอบนิรภัย (safety factor) 25 เปอร์เซ็นต์ เพราะฉะนั้นค่าพิกัดของอุปกรณ์ด้านอินพุตจะต้องมีค่าพิกัดแรงดันมากกว่า 60 V และมีค่าพิกัดกระแสมากกว่า 62.5 A ในขณะเดียวกันด้านเอาต์พุตจะต้องมีค่าพิกัดแรงดันมากกว่า 500 V และค่าพิกัดกระแสมากกว่า 7.5 A แสดงค่าพิกัดอุปกรณ์ของวงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ได้ดังตารางที่ 5.2

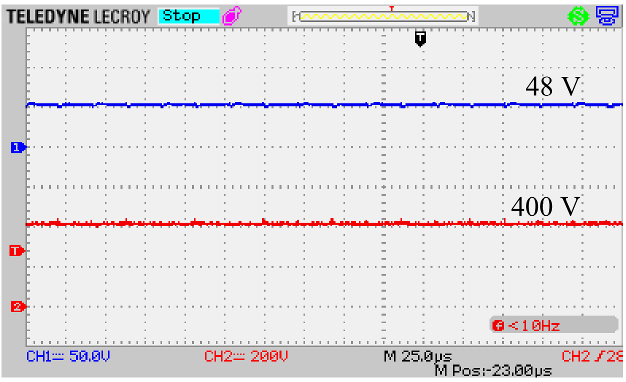
ตารางที่ 5.2 พิกัดอุปกรณ์ของวงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์

อุปกรณ์	พิกัด	รายละเอียด
1. มอสเฟส (Mosfet)	200 V, 33 A	N-Channel MOSFET เบอร์ IRFP250
2. ไดโอด	600 V, 80 A	เบอร์ RURG8060
3. ตัวเก็บประจุ 1000 μF	500 V	Electrolytic Capacitor

<u>หมายเหตุ</u> เนื่องจากมอสเฟสที่พิกัดกระแสสูง ๆ มีราคาแพง ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยนี้จึงนำมอสเฟส 3 ตัว มาต่อขนานกันเพื่อเพิ่มพิกัดกระแสเป็น 99 A นอกจากนี้การออกแบบดังกล่าวพิจารณาเฉพาะการทำงานในสภาวะคงตัว (steady state) เท่านั้น

5.4.2 ผลการทดสอบ

การทดสอบวงจรวงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์ดำเนินการทดสอบโดยการจ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจรจุดชนวนเกทความถี่สูงเท่ากับ 12 V และทำการเชื่อมต่อด้านอินพุตของวงจรเข้ากับแบตเตอรี่ที่มีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 48 V ลำดับสุดท้ายทำการเชื่อมต่อโหลดกับด้านเอาต์พุตของวงจร ซึ่งเป็นหลอดไฟขนาด 300 W สามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 5.10 โดยช่องสัญญาณที่ 1 คือ สัญญาณอินพุตของวงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ และช่องสัญญาณที่ 2 คือ สัญญาณเอาต์พุตของวงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์

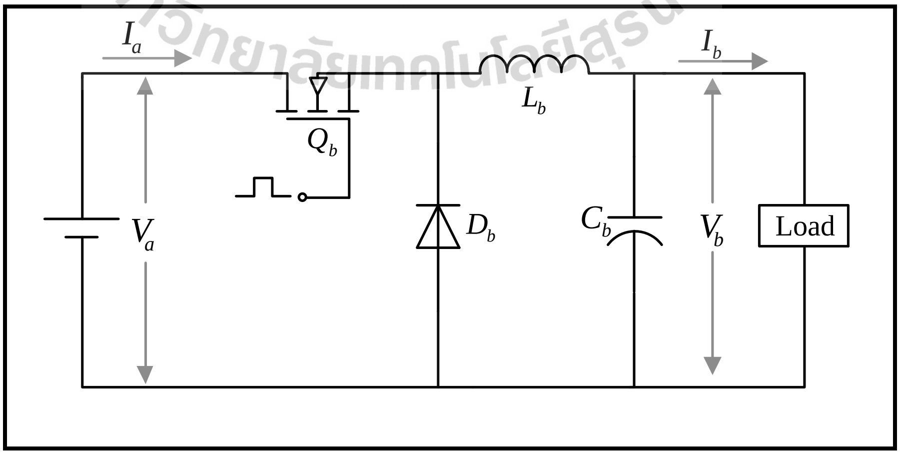


รูปที่ 5.10 ผลการทดสอบวงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์

จากผลการทดสอบการทำงานของวงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 5.11 พบว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้มีลักษณะเป็นไปตามที่ได้มีการอธิบายการทำงานไว้ในเบื้องต้น

5.5 วงจรแปลงผันแบบบัคก์

วงจรแปลงผันแบบบัคก์ เป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้สำหรับปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตให้มีค่าต่ำกว่า หรือเท่ากับแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต โดยโครงสร้างของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ประกอบด้วย สวิตช์มอสเฟต ไดโอด ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ แสดงได้ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 วงจรแปลงผันแบบบัคก์

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วงจรแปลงผันแบบบัคก์ในการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ (V_a) ที่มีค่าประมาณ 400 V ให้มีค่าแรงดันเอาต์พุต (V_b) อยู่ในช่วง 100 ถึง 300 V ซึ่งการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคก์เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle: d) ที่ใช้ในการสวิตช์ สามารถคำนวณค่าระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ (V_b) (Mahammad H. Rashid, 2004) ได้จากสมการที่ (5-3)

$$V_b = dV_a \tag{5-3}$$

จาสมการที่ (5-3) พบว่าเมื่อค่าวัฏจักรหน้าที่มีค่าเพิ่มขึ้นค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ในทางตรงกันข้าม ถ้าค่าวัฏจักรหน้าที่ลดลง แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน ซึ่งการเพิ่มขึ้น หรือลดลงของแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวจะส่งผลให้ความเร็วรอบของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากเป็นการปรับค่ายอดแรงดันของสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (V_{AC}) ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ด้วยเหตุนี้การควบคุมความเร็วรอบจึงสามารถทำได้โดยการควบคุมค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ Q_b ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยวงจรการแปลงผันแบบบัคก์ เพื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำ โดยอาศัยการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี ซึ่งรายละเอียดดังกล่าวจะอธิบายในบทที่ 6

5.5.1 การออกแบบวงจร

จากรูปที่ 5.10 จะเห็นได้ว่าวงจรแปลงผันแบบบัคก์ ประกอบด้วย สวิตช์ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้มอสเฟส ไดโอด ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ โดยการออกแบบจะต้องคำนึงถึงพิกัดแรงดัน และกระแสเป็นสำคัญ ซึ่งทำการคำนวณหาค่าพิกัดกระแสจากโหลดของระบบและคำนวณหาค่าพิกัดแรงดันจากแหล่งจ่ายด้านอินพุตของวงจร จากหัวข้อที่ 5.4.1 พบว่าที่การทำงานในสภาวะคงตัว ค่ายอดกระแสของมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 4.8 A ซึ่งในขณะเริ่มเดินเครื่องขนาดของกระแสจะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าของค่ากระแสพิกัด (Veera T, 2013) หรือมีค่ายอดเท่ากับ 9.6 A เมื่อคำนึงถึงค่าตัวประกอบนิรภัย 25 เปอร์เซ็นต์ เพราะฉะนั้นอุปกรณ์ที่ใช้ต้องมีค่าพิกัดกระแสเท่ากับ 12 A (9.6 A + (0.25 $\times$ 9.6 A)) ในขณะที่แหล่งจ่ายด้านอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบัคก์เป็นวงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งมีพิกัดแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 400 V เมื่อคำนึงถึงค่าตัวประกอบนิรภัย 25 เปอร์เซ็นต์ เพราะฉะนั้นอุปกรณ์จะต้องมีค่าพิกัดแรงดันเท่ากับ 500 V (400 V + (0.25 $\times$ 400 V))

เนื่องจากขนาดของตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุในวงจรแปลงผันแบบบัคก์ มีผลต่อค่ากระแสพลิ้ว (ripple current: ΔI_L) และค่าแรงดันพลิ้ว (ripple voltage: ΔV_{out}) โดยสามารถคำนวณหาขนาดของตัวเหนี่ยวนำ (L_b) ได้ดังสมการที่ (5-4) และคำนวณหาขนาดของตัวเก็บประจุ (C_b) ได้ดังสมการที่ (5-5) (Muhammad H. Rashid, 2004) ดังนี้

$$L_b = \frac{V_{out}(V_{in} - V_{out})}{f_s V_{in} \Delta I_L} \tag{5-4}$$

$$C_b = \frac{(1-d)V_{out}}{8 L f_s^2 \Delta V_{out}} \tag{5-5}$$

จากที่กล่าวมาในข้างต้นสมการที่ (5-4) และสมการที่ (5-5) เป็นสมการที่ใช้สำหรับออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ และค่าตัวเก็บประจุตามลำดับ การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ค่ากระแสพลิ้ว (ΔI_L) เท่ากับ 0.5 A ที่ความถี่การสวิตช์ (f_S) เท่ากับ 10 kHz ที่แรงดันอินพุต (V_a) เท่ากับ 400 V และแรงดันเอาต์พุต (V_b) เท่ากับ 100 V เพราะฉะนั้นเมื่อแทนค่าดังกล่าวในสมการที่ (5-4) จะได้

$$L_b = \frac{100(400-100)}{10\times 10^3 \times 400 \times 0.5} = 15 \text{ mH}$$

ดังนั้น จึงเลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับ 15 mH

จากเงื่อนไขดังกล่าวเมื่อคำนวณหาค่าวัฏจักรหน้าที่จากสมการที่ (5-3) จะได้ค่า d เท่ากับ 0.25 และกำหนดให้แรงดันพลิ้ว (ΔV_{out}) เท่ากับ 5 mV เมื่อแทนค่าดังกล่าวในสมการที่ (5-5) จะได้

$$C_b = \frac{(1-0.25)100}{8\times 15\times 10^{-3} \times (10\times 10^3)^2 \times 5\times 10^{-3}} = 1{,}250 \ \mu\text{F}$$

ดังนั้น จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับ 1,250 μF

<u>หมายเหตุ</u> ในงานวิจัยใช้ตัวเก็บประจุขนาด 470 μF ต่อขนานกัน 3 ตัว มีค่าเท่ากับ 1,410 μF

จากการคำนวณขนาดพิกัดของอุปกรณ์ที่ผ่านมา สามารถแสดงค่าพิกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 พิกัดอุปกรณ์ของวงจรแปลงผันแบบบัคก์

อุปกรณ์	พิกัด	รายละเอียด
1. มอสเฟส จำนวน 1 ชิ้น	600 V, 20 A	N-Channel MOSFET เบอร์ IRFP460
2. ไดโอด จำนวน 1 ชิ้น	600 V, 80 A	เบอร์ RURG8060
3. ตัวเหนี่ยวนำ 15 mH จำนวน 1 ชิ้น	500 V, 10 A	DC Choke
4. ตัวเก็บประจุ 470 μF จำนวน 3 ชิ้น	500 V	Electrolytic Capacitor

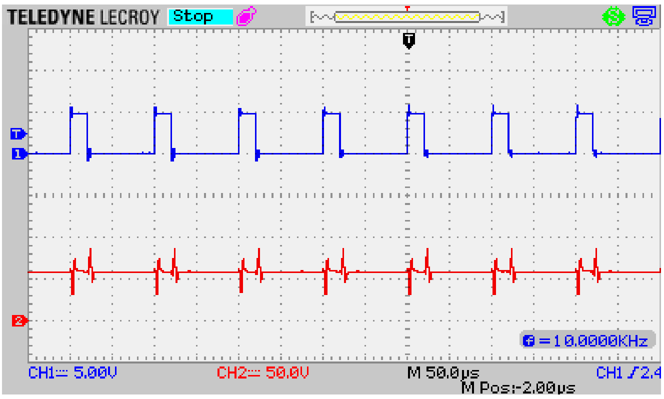
5.5.2 ผลการทดสอบ

การทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์ ดำเนินการทดสอบโดยการเชื่อมต่อด้านอินพุตของวงจรกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าเท่ากับ 300 V ซึ่งเป็นค่าแรงดันสูงสุดที่ใช้งาน แล้วทำการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ของมอสเฟส ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 1280 ผ่านวงจรจุดชนวนเกท โดยการทดสอบดังกล่าวมีโหลดเป็นหลอดไฟขนาด 300 W ซึ่งการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคก์แปรเปลี่ยนไป สามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 5.4 และแสดงรูปผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 5.12 ถึงรูปที่ 5.15 โดยช่องสัญญาณที่ 1 เป็นรูปสัญญาณจุดชนวน จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ในขณะเดียวกันช่องสัญญาณที่ 2 เป็นรูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคก์

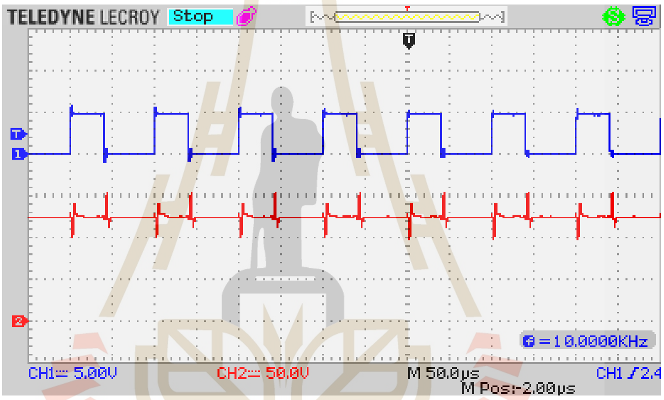
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์

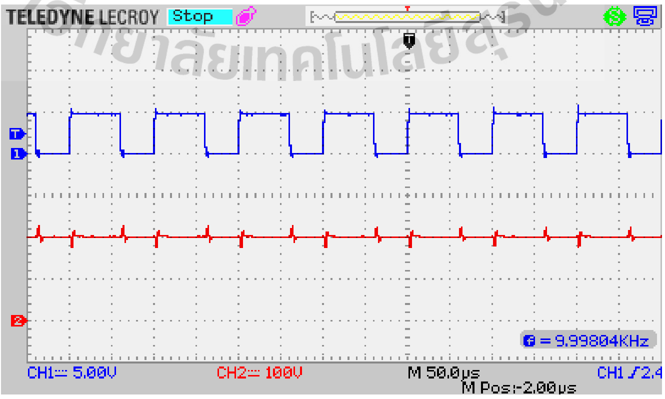
ค่าวัฏจักรหน้าที่ (เปอร์เซ็นต์)	V_a (V)	V_b (V)
20	300	58
40		119
60		179
80		239



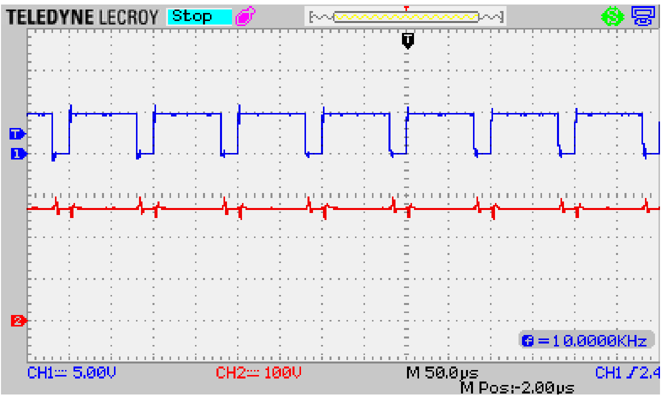
รูปที่ 5.12 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.13 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.14 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 60 เปอร์เซ็นต์

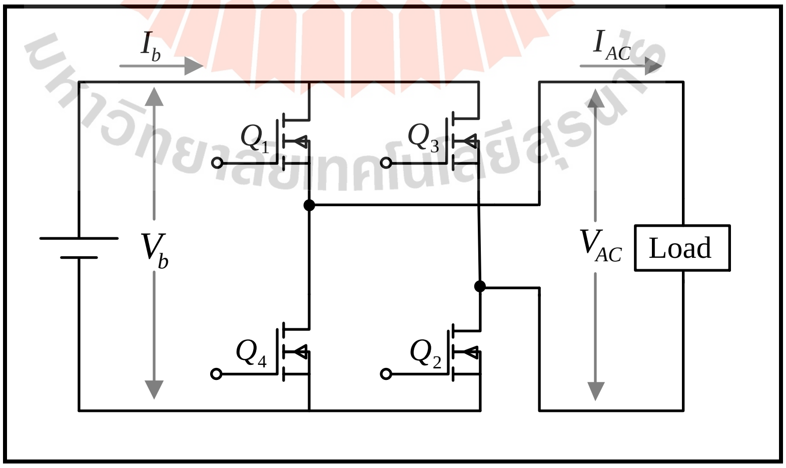


รูปที่ 5.15 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่ผ่านมา พบว่าระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่ ซึ่งมีลักษณะเป็นไปตามที่ได้มีการอธิบายการทำงานไว้ในเบื้องต้น

5.6 วงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรสำหรับแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันดังรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน

สำหรับหลักการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ แบ่งออกเป็น 2 โหมดการทำงาน ซึ่งจะทำงานสลับกันไปเรื่อย ๆ ในช่วงความถี่ระหว่าง 25 Hz ถึง 50 Hz (ค่าความถี่ที่อยู่ในย่านการคำนวณของอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน) โดยแต่ละโหมดการทำงานสวิตช์จะทำงานครั้งละ 2 ตัว ส่วนสวิตช์ที่เหลืออีก 2 ตัว จะหยุดทำงาน ดังที่ต่อไปนี้

-โหมดการทำงานที่ 1 ในโหมดนี้สวิตช์ Q_1 และสวิตช์ Q_2 ทำงานในขณะเดียวกัน สวิตช์ Q_3 และสวิตช์ Q_4 จะไม่ทำงาน

-โหมดการทำงานที่ 2 ในโหมดนี้สวิตช์ Q_3 และสวิตช์ Q_4 ทำงานในขณะเดียวกัน สวิตช์ Q_1 และสวิตช์ Q_2 จะไม่ทำงาน

จากหลักการทำงานที่ได้อธิบายไว้ในเบื้องต้น จะทำให้รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

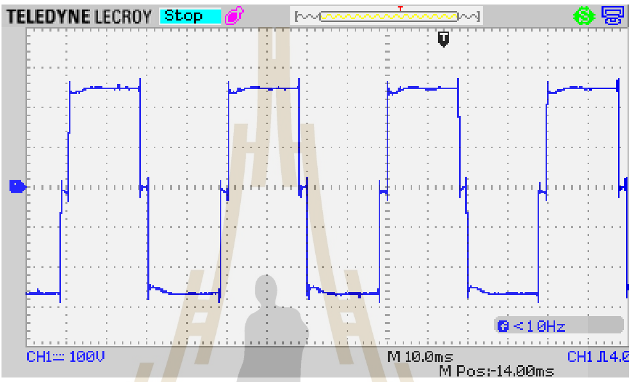
5.6.1 การออกแบบวงจร

การออกแบบอุปกรณ์สำหรับสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์จะคำนึงถึงพิกัดแรงดันและกระแสเป็นสำคัญ จากรูปที่ 5.2 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่ง จะเห็นได้ว่าโหลดของวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำ เพราะฉะนั้นสามารถคำนวณหาพิกัดกระแสของอุปกรณ์ได้จากพิกัดกระแสของมอเตอร์ จากหัวข้อที่ 5.5.1 พบว่าที่การทำงานในสภาวะคงตัวค่ายอดกระแสของมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 4.8 A และในขณะเริ่มเดินเครื่องจะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าของค่ากระแสพิกัด หรือมีค่ายอดเท่ากับ 9.6 A เมื่อคำนึงถึงค่าตัวประกอบนิรภัย 25 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้ต้องมีค่าพิกัดกระแสเท่ากับ 12 A และสามารถคำนวณหาค่าพิกัดแรงดันของอุปกรณ์ได้จากแรงดันด้านอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ คือ วงจรแปลงผันแบบบัคก์ โดยวงจรดังกล่าวมีค่าแรงดันเอาต์พุตมากที่สุดเท่ากับ 300 V และเมื่อคำนึงค่าตัวประกอบนิรภัย 25 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้สร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ต้องมีค่าพิกัดแรงดันเท่ากับ 375 V (300 V + (0.25 × 300 V)) โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้มอสเฟตที่มีพิกัดแรงดันเท่ากับ 500 V และพิกัดกระแส 20 A เบอร์ IRFP460

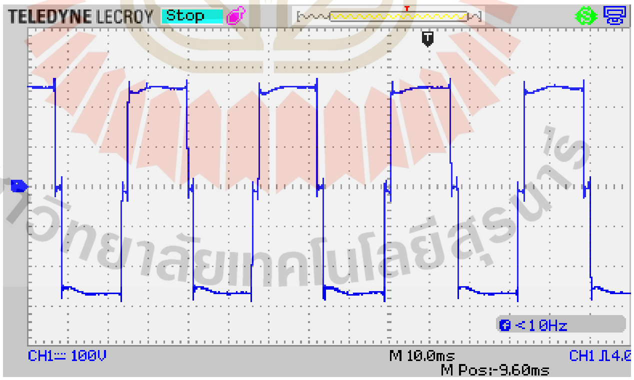
5.6.2 ผลการทดสอบ

การทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์ ทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนคาบเวลาการสวิตช์ของโหมดการทำงานของสวิตช์ทั้ง 4 ตัว ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 1280

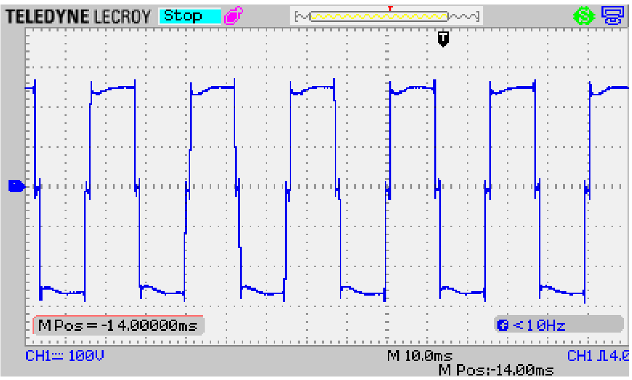
ผ่านวงจรจุดชนวนเกท โดยทำการเชื่อมต่อด้านอินพุตของวงจรกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าเท่ากับ 235 V ซึ่งค่าดังกล่าวจะทำให้ค่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเอาต์พุตมีค่าประมาณ 220 V และทำการเชื่อมต่อด้านเอาต์พุตกับโหลดที่เป็นหลอดไฟขนาด 300 W โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ทำการทดสอบที่ความถี่เท่ากับ 25 Hz, 30 Hz, 40 Hz และ 50 Hz แสดงรูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ค่าความถี่ต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 5.17 ถึงรูปที่ 5.20



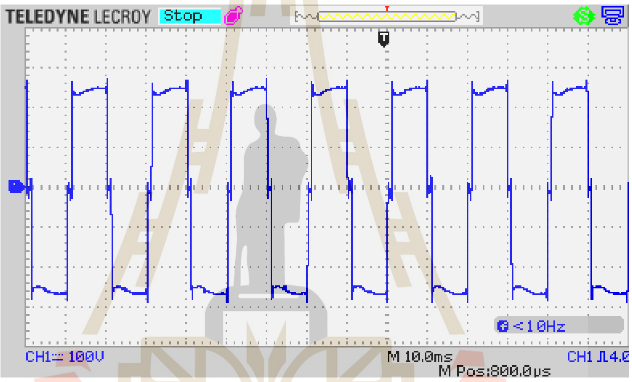
รูปที่ 5.17 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่เท่ากับ 25 Hz



รูปที่ 5.18 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่เท่ากับ 30 Hz



รูปที่ 5.19 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่เท่ากับ 40 Hz

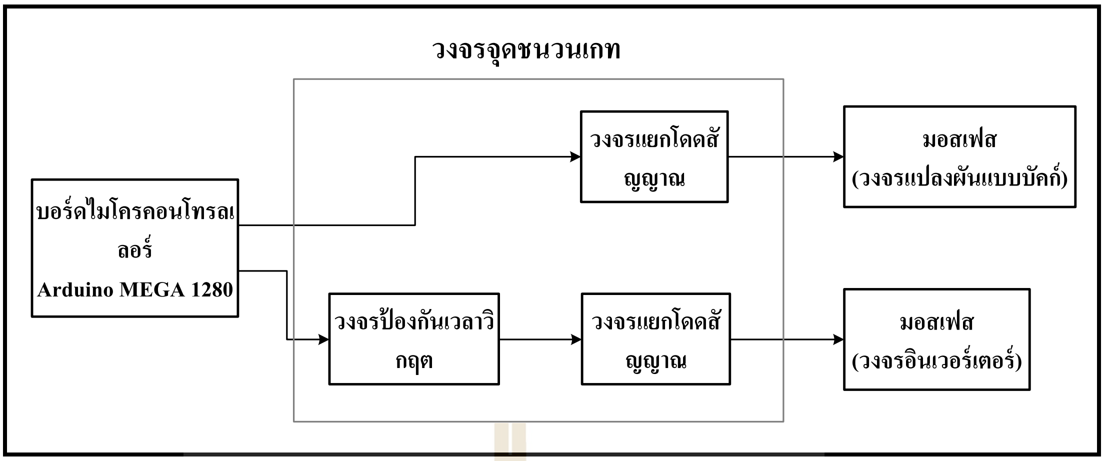


รูปที่ 5.20 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่เท่ากับ 50 Hz

จากผลการทดสอบที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าการปรับเปลี่ยนคาบเวลาดังกล่าว ส่งผลให้ความถี่ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งมีลักษณะเป็นไปตามที่อธิบายไว้ในเบื้องต้น

5.7 วงจรจุดชนวนเกท

สำหรับวงจรจุดชนวนเกทของชุดขับเคลื่อนปั๊มน้ำไฟฟ้าจะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของมอสเฟสในวงจรแปลงผันแบบบัคก์ และวงจรอินเวอร์เตอร์ นอกจากนี้ยังป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ แสดงโครงสร้างแผนภาพบล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจร จุดชนวนเกทดังรูปที่ 5.21

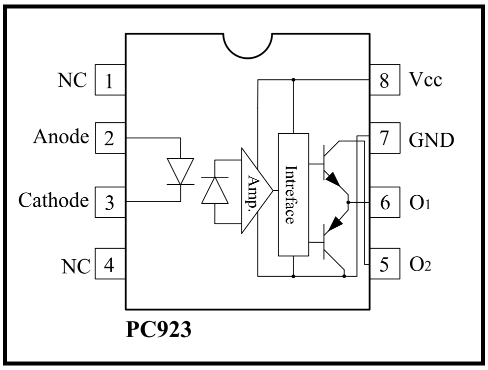


รูปที่ 5.21 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรจุดชนวนเกทในชุดขับเคลื่อนปั๊มน้ำไฟฟ้า

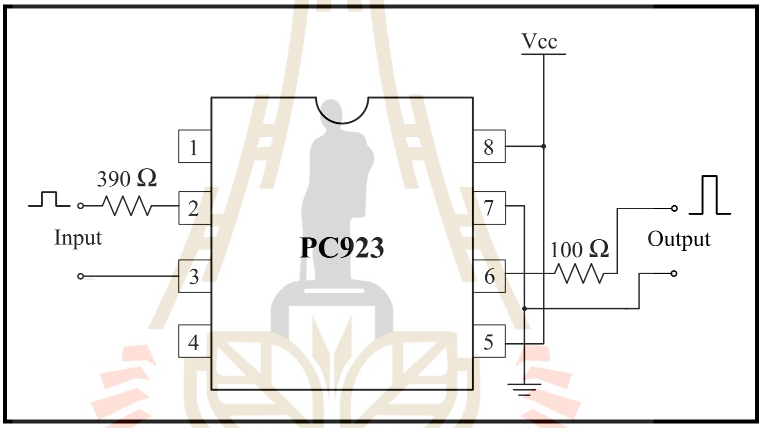
จากบล็อกไดอะแกรมของวงจรจุดชนวนเกทดังรูปที่ 5.21 จะเห็นได้ว่าภายในของวงจรจุดชนวนเกทสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีเพียงวงจรแยกโดดสัญญาณ และส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์ ที่มีวงจรป้องกันเวลาวิกฤติเชื่อมต่อกับวงจรแยกโดดสัญญาณ ในหัวข้อถัดไปจะเป็นการอธิบายหลักการทำงาน การออกแบบ และการทดสอบวงจรแยกโดดสัญญาณ และวงจรป้องกันเวลาวิกฤติ

5.7.1 วงจรแยกโดดสัญญาณ

วงจรแยกโดดสัญญาณเป็นวงจรที่ใช้สำหรับแยกกราวด์ของสัญญาณใด ๆ เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส โดยวงจรแยกโดดสัญญาณจะใช้แยกกราวด์ระหว่างวงจรแปลงผันแบบบัคก์กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และแยกกราวด์ระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์กับวงจรป้องกันเวลาวิกฤติ และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังรูปที่ 5.21 โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงหรือเรียกว่า ออปโตคัปปลิง (opto-coupling) ซึ่งอุปกรณ์ที่นำมาใช้งาน คือ ไอซีเบอร์ PC923 ยี่ห้อ SHARP มีโครงสร้างดังรูปที่ 5.22 และการต่อวงจรไอซีเบอร์ PC923 สำหรับใช้งานจริงดังรูปที่ 5.23

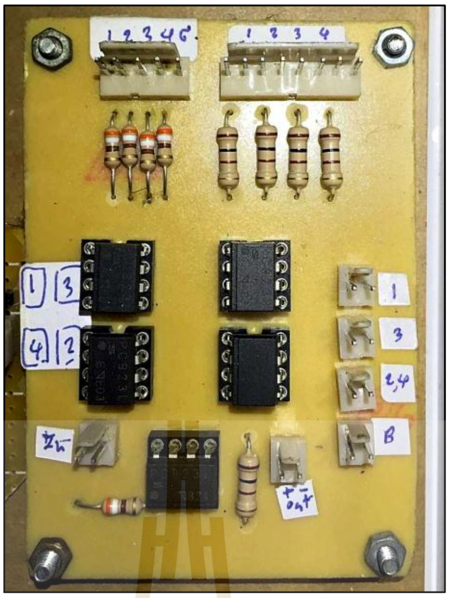


รูปที่ 5.22 โครงสร้างของไอซี PC923



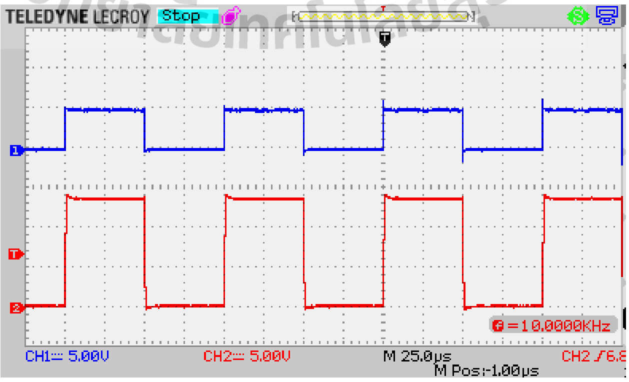
รูปที่ 5.23 วงจรแยกโดดสัญญาณสำหรับใช้งานจริง

การออกแบบพารามิเตอร์สำหรับวงจรแยกโดดสัญญาณในรูปที่ 5.23 อาศัยการทดสอบการป้อนสัญญาณอินพุต และพิจารณาลักษณะของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ เนื่องจากการออกแบบวงจรดังกล่าวไม่ได้มีการอธิบายไว้ในเอกสารข้อมูลของตัวอุปกรณ์ ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ทำการทดสอบการทำงานของวงจรแยกโดดสัญญาณ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ด้วยการพิจารณาจากลักษณะสัญญาณเอาต์พุตของวงจร ซึ่งการพิจาณาดังกล่าวขึ้นอยู่กับความพึงพอใจของผู้ดำเนินงานวิจัย เพราะฉะนั้นค่าพารามิเตอร์ของวงจรแยกโดดสัญญาณที่ใช้งานจริงแสดงได้ดังรูปที่ 5.23 และวงจรที่ใช้งานจริงดังรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.24 วงจรแยกโดดสัญญาณที่สร้างจริง

การทดสอบวงจรแยกโดดสัญญาณ ดำเนินการทดสอบโดยการจ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจรเท่ากับ 15 V และทำการทดสอบโดยจ่ายสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณพัลส์ ในขณะเดียวกันทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจร โดยสัญญาณอินพุตรูปพัลส์ที่จ่ายให้กับวงจรดังกล่าวมีค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ แสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 5.25 โดยช่องสัญญาณที่ 1 คือ สัญญาณอินพุตของวงจรแยกโดดสัญญาณ และช่องสัญญาณที่ 2 คือ สัญญาณเอาต์พุตของวงจรแยกโดดสัญญาณ

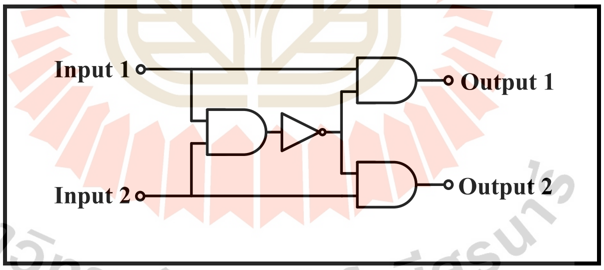


รูปที่ 5.25 ผลการทดสอบวงจรแยกโดดสัญญาณ

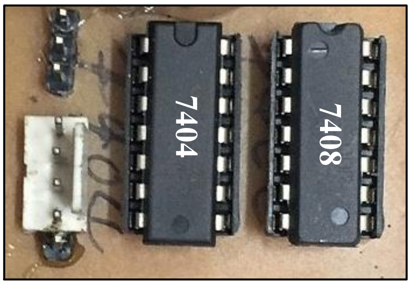
จากผลการทดสอบในรูปที่ 5.25 พบว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้มีลักษณะเป็นที่น่าพอใจ เนื่องจากมุมเฟสของสัญญาณเอาต์พุตตรงกับสัญญาณอินพุต แต่มีขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณประมาณ 15 V ซึ่งมีค่าเท่ากับแหล่งจ่ายของไฟเลี้ยงของวงจร

5.7.2 วงจรป้องกันเวลาวิกฤต

วงจรป้องกันเวลาวิกฤต เป็นวงจรที่ใช้ป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับวงจรอินเวอร์เตอร์จากการลัดวงจร ซึ่งมีสาเหตุมาจากการทำงานพร้อมกันของคู่สวิตช์ Q_1 กับ Q_3 หรือสวิตช์ Q_2 กับ Q_4 ของวงจรอินเวอร์เตอร์ ถึงแม้ภายในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีการป้องกันเหตุการณ์ดังกล่าวด้วยการเขียนโปรแกรมเพื่อหน่วงเวลาไว้แล้วก็ตาม แต่เพื่อให้แน่ใจว่าสวิตช์จะหยุดทำงานทันทีเมื่อมีการส่งสัญญาณที่ผิดพลาดแล้วส่งผลให้สวิตช์ Q_1 กับ Q_3 หรือสวิตช์ Q_2 กับ Q_4 ของวงจรอินเวอร์เตอร์มีการทำงานพร้อมกัน โดยวงจรป้องกันเวลาวิกฤตประกอบด้วยไอซี AND GATE เบอร์ 7408 และไอซี NOT GATE เบอร์ 7404 เชื่อมต่อกัน ดังรูปที่ 5.26 ซึ่งหลักการทำงานของวงจรดังกล่าว คือ เมื่อสัญญาณอินพุตขาที่ 1 (Input 1) และอินพุตขาที่ 2 (Input 2) มีสถานะเป็นลอจิก HIGH เหมือนกันทั้งคู่ ค่าเอาต์พุตทั้ง 2 ขา (Output 1, Output 2) จะเป็นลอจิก LOW ทันทีเพื่อป้องกันการลัดวงจร แสดงรูปวงจรที่ใช้จริงได้ดังรูปที่ 5.27



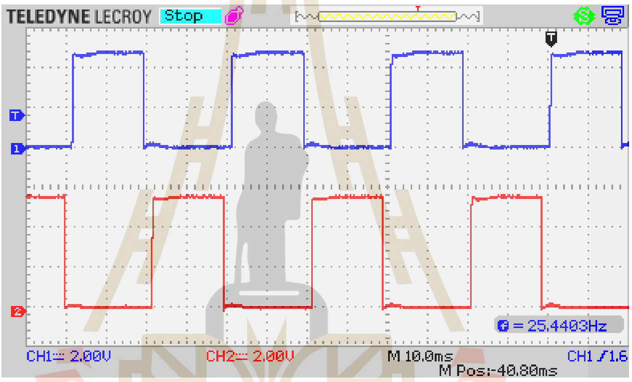
รูปที่ 5.26 วงจรป้องกันเวลาวิกฤต



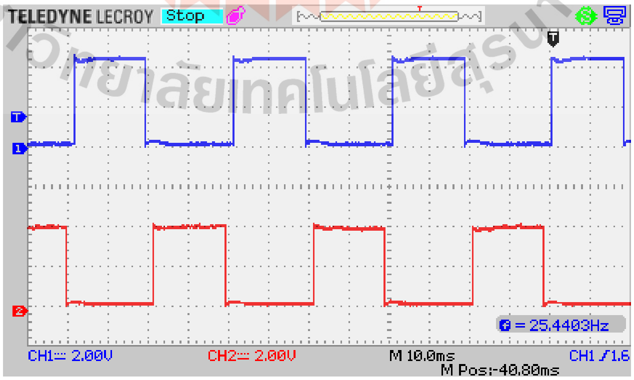
รูปที่ 5.27 วงจรป้องกันเวลาวิกฤติที่ใช้งานจริง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

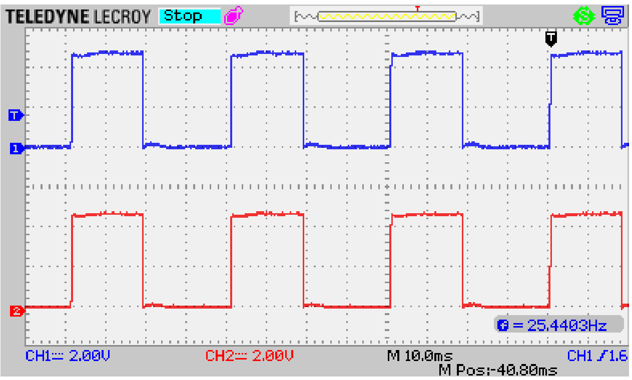
การทดสอบวงจรป้องกันเวลาวิกฤตจะดำเนินการทดสอบโดยการจ่ายไฟเลี้ยงเท่ากับ 5 V และจ่ายสัญญาณพัลส์ให้ด้านอินพุตของวงจร (Input 1, Input 2) แล้วทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจร (Output 1, Output 2) โดยทำการทดสอบ 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 สัญญาณอินพุตขาที่ 1 และอินพุตขาที่ 2 มีสถานะลอจิก ไม่เหมือนกัน (มีมุมเฟสตรงข้ามกัน) และกรณีที่ 2 สัญญาณอินพุตที่ขา 1 และอินพุตขาที่ 2 มีสถานะลอจิกเหมือนกัน แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 5.28 ถึงรูปที่ 5.31 ตามลำดับ โดยช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 ของรูปที่ 5.28 และ 5.29 คือ สัญญาณอินพุตขาที่ 1 (Input 1) และสัญญาณอินพุตขาที่ 2 (Input 2) ตามลำดับ ในขณะที่ช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 ของรูปที่ 5.30 และ 5.31 คือ สัญญาณเอาต์พุตขาที่ 1 (Output 1) และสัญญาณเอาต์พุตขาที่ 2 (Output 2) ตามลำดับ



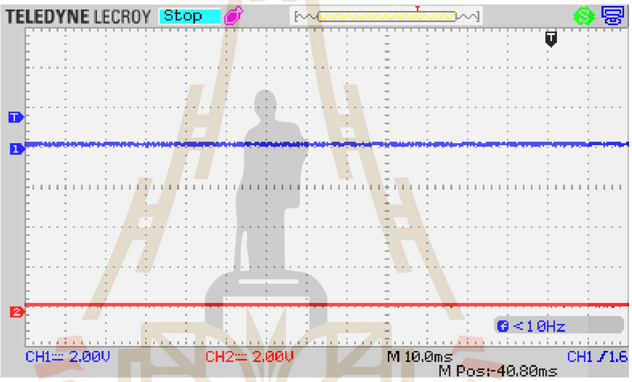
รูปที่ 5.28 สัญญาณอินพุตขาที่ 1 และอินพุตขาที่ 2 มีสถานะลอจิกไม่เหมือนกัน



รูปที่ 5.29 ผลการทดสอบสัญญาณเอาต์พุตขาที่ 1 และเอาต์พุตขาที่ 2
กรณีสัญญาณอินพุตมีสถานะลอจิกไม่เหมือนกัน



รูปที่ 5.30 สัญญาณอินพุตขาที่ 1 และอินพุตขาที่ 2 มีสถานะลอจิกเหมือนกัน

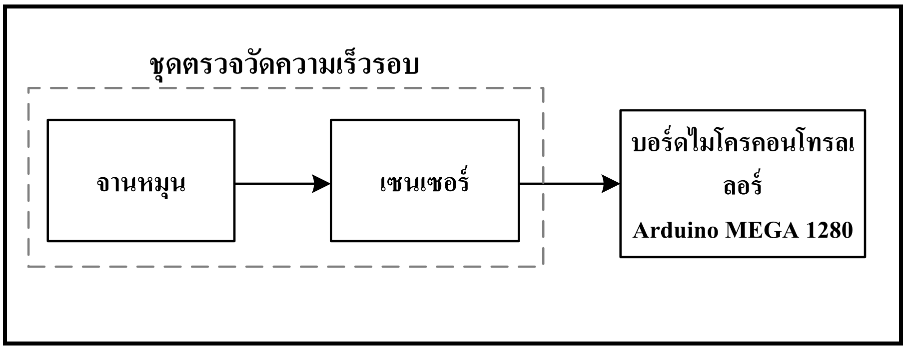


รูปที่ 5.31 ผลการทดสอบสัญญาณเอาต์พุตขาที่ 1 และเอาต์พุตขาที่ 2
กรณีสัญญาณอินพุตมีสถานะลอจิกเหมือนกัน

จากผลการทดสอบวงจรป้องกันเวลาวิกฤต พบว่าเอาต์พุตจะมีลอจิกเป็น LOW เมื่อสัญญาณอินพุตขาที่ 1 และอินพุตขาที่ 2 มีลอจิกเป็น HIGH ทั้งคู่ ซึ่งมีลักษณะการทำงานเป็นไปตามที่อธิบายไว้ในข้างต้น

5.8 ชุดตรวจวัดความเร็วรอบ

ชุดตรวจวัดความเร็วรอบ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจวัดค่าความเร็วรอบมอเตอร์ของปั๊มน้ำในขณะทำงาน และนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อแสดงผลที่หน้าจอในหน่วยรอบต่อนาที (rpm) และเป็นข้อมูลที่ใช้สำหรับการประมวลผลของตัวควบคุม ซึ่งจะมีการอธิบายไว้ในบทที่ 6 โดยสามารถแสดงแผนภาพบล็อกไดอะแกรมของชุดตรวจวัดความเร็วรอบมอเตอร์ได้ดังรูปที่ 5.32

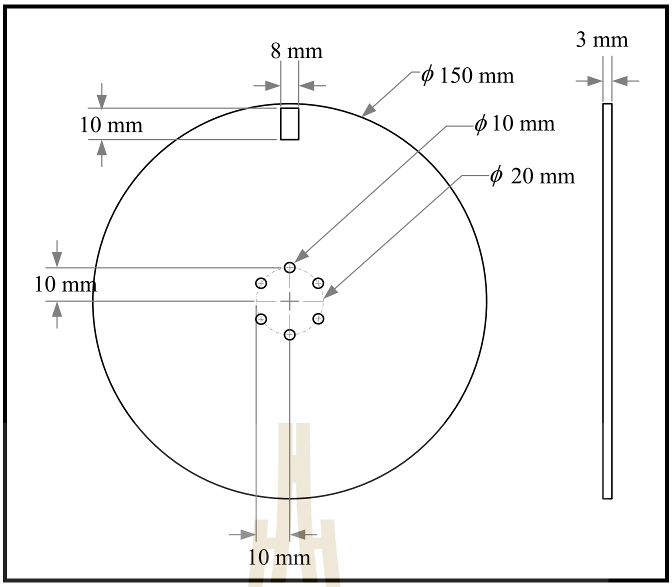


รูปที่ 5.32 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของชุดตรวจวัดความเร็วรอบมอเตอร์

จากแผนภาพบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 5.32 แสดงให้เห็นว่าชุดตรวจวัดความเร็วรอบประกอบด้วย จานหมุน และเซนเซอร์ ซึ่งชุดตรวจวัดความเร็วรอบจะถูกติดตั้งบริเวณด้านนอกใกล้กับใบพัดระบายอากาศของปั๊มน้ำหอยโข่งไฟฟ้า โดยจานหมุนจะถูกเจาะช่องเล็ก ๆ สำหรับใช้ในการตรวจจับสัญญาณของเซนเซอร์ ซึ่งเซนเซอร์ที่ใช้จะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวส่ง และรับสัญญาณในตัวเดียวกัน ในขณะที่มอเตอร์ทำงานจะทำให้ช่องเล็ก ๆ ของจานหมุน หมุนไปตัดลำแสงของเซนเซอร์ โดยเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์จะเป็นลักษณะของสัญญาณพัลส์ที่มีค่าความถี่เปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบของจานหมุน ซึ่งเป็นความเร็วรอบของมอเตอร์ และทำการส่งสัญญาณความถี่ดังกล่าวให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อทำการคำนวณหาความเร็วรอบจากความถี่ที่วัดได้ต่อไป โดยการออกแบบอุปกรณ์ที่นำมาใช้งานสำหรับชุดตรวจวัดความเร็วรอบอธิบายได้ดังนี้

5.8.1 จานหมุน

จานหมุนเป็นอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการบ่งบอกถึงความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่กับแกนหมุน หรือโรเตอร์ของมอเตอร์ โดยค่าความเร็วในการหมุนของจานหมุนจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ และจำนวนช่องที่เจาะเพื่อใช้สำหรับการตรวจจับของเซนเซอร์ โดยการออกแบบจานหมุนจะกำหนดให้จานหมุนมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของมอเตอร์ และทำการเจาะรูที่จานหมุนเพียงหนึ่งรู เนื่องจากต้องการทราบเพียงช่วงระยะเวลาในการหมุนเท่านั้น แสดงลักษณะการออกแบบจานหมุนที่ใช้ในงานวิจัยได้ดังรูปที่ 5.33

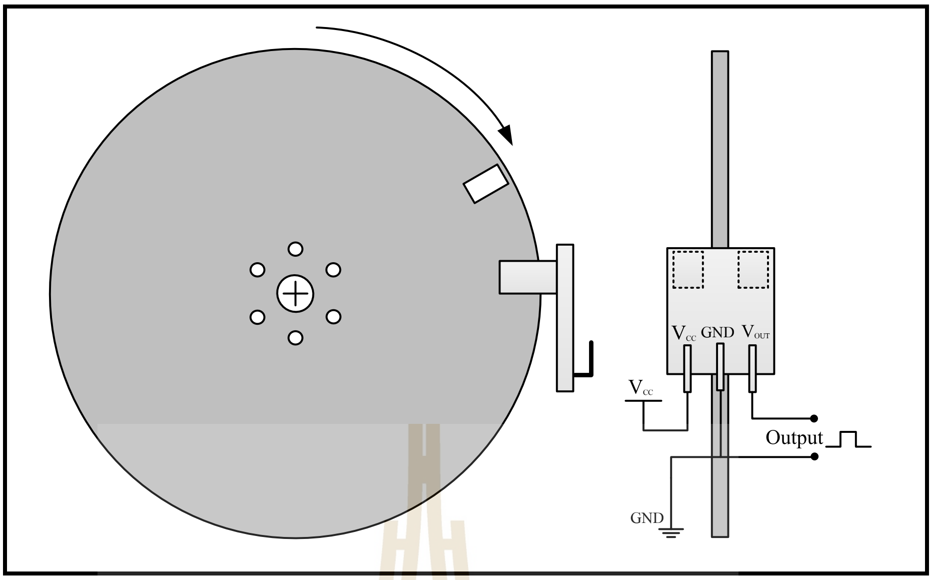


รูปที่ 5.33 การออกแบบจานหมุน

5.8.2 เซนเซอร์

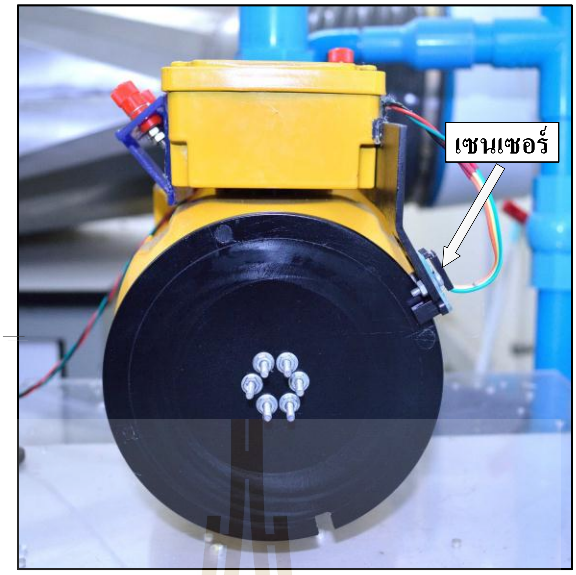
เซนเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยเซนเซอร์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เป็นได้ทั้งตัวส่ง และรับสัญญาณในตัวเดียวกัน โดยเซนเซอร์จะวัดสัญญาณจากช่องของจานหมุน และให้เอาต์พุตเป็นสัญญาณพัลส์ที่มีค่าความถี่ตามความเร็วในการหมุนของจานหมุน โดยเซนเซอร์ที่ใช้ คือเบอร์ HC-020K ดังรูปที่ 5.34 โดยมีลักษณะการต่อวงจรเพื่อใช้งาน และติดตั้งเพื่อใช้งานจริงร่วมกับจานหมุนดังรูปที่ 5.35 ถึงรูปที่ 5.37 ตามลำดับ

รูปที่ 5.34 เซนเซอร์เบอร์ HC-020K



รูปที่ 5.35 ลักษณะการต่อวงจรเพื่อใช้งาน

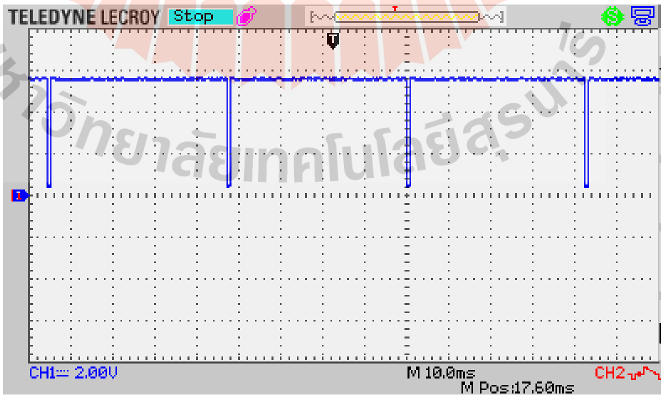
รูปที่ 5.36 ลักษณะการติดตั้งจานหมุนกับมอเตอร์ของปั๊มน้ำหอยโข่งไฟฟ้า



รูปที่ 5.37 ลักษณะการติดตั้งจานหมุนกับเซนเซอร์

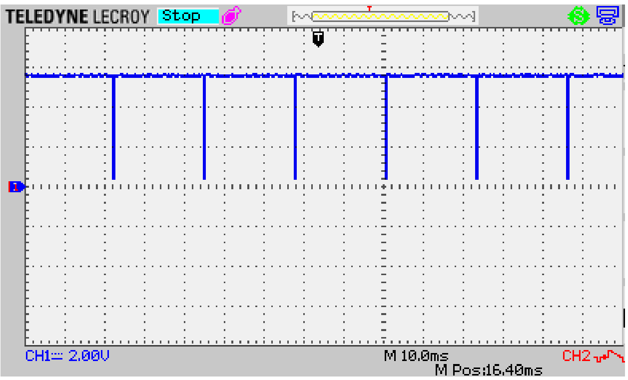
5.8.3 ผลการทดสอบ

การทดสอบการทำงานของชุดตรวจวัดความเร็วรอบสามารถทำการทดสอบโดยจ่ายไฟเลี้ยงให้กับเซนเซอร์เท่ากับ 5 V และทำการเดินเครื่องมอเตอร์ของปั๊มน้ำหอยโข่ง เพื่อหมุนจานหมุนแล้ววัดสัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์ แสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 5.38 และรูปที่ 5.39



รูปที่ 5.38 สัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1400 rpm

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 5.39 สัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 2600 rpm

จากผลการทดสอบการทำงานของชุดตรวจวัดความเร็วรอบ พบว่าสัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์มีลักษณะเป็นสัญญาณรูปพัลส์ โดยค่าความถี่ของสัญญาณดังกล่าวจะแปลผันตามความเร็วในการหมุนของจานหมุน ซึ่งมีลักษณะเป็นไปตามที่อธิบายไว้ข้างต้น

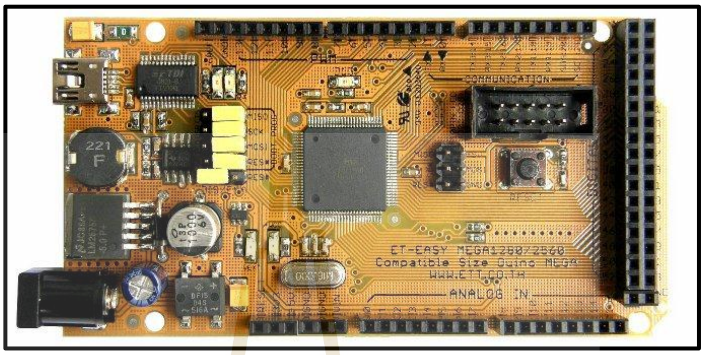
5.9 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

จากรูปที่ 3.1 พบว่าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่งไฟฟ้าอาศัยบอร์ดไมโครคอนโทลเลอร์ในการคำนวณ และควบคุมการทำงานวงจรแปลงผันแบบบัคก์และวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยในงานวิจัยเลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET – EASY MEGA 1280 (Arduino MEGA 1280) ของบริษัทอีทีที โดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นดังกล่าวได้มีการใช้ชิพไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMEGA 1280 ที่เป็นชิพตระกูล AVR ของบริษัท Atmel ซึ่งรองรับกับการเขียนโปรแกรมภาษาซีของ Arduino จึงทำให้ง่ายต่อการเขียนโปรแกรมสำหรับใช้งาน และมีพอร์ตที่ถูกออกแบบมาให้รองรับกับรูปแบบการใช้งานที่หลากหลาย อาทิเช่น พอร์ตอินพุต พอร์ตเอาต์พุต พอร์ตดิจิตอล พอร์ตแอนะล็อก พอร์ตสร้างสัญญาณ PWM และพอร์ตสื่อสารอนุกรม ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5.40

คุณสมบัติที่สำคัญของบอร์ด ET-EASY MEGA 1280 ที่มีความเหมาะสมกับงานวิจัย

- ทำงานสูงสุดที่ล้านคำสั่งต่อวินาที 16 (MIPS) เมื่อใช้สัญญาณนาฬิกา 16 MHz
- หน่วยความจำแฟลชสำหรับโปรแกรม 128 กิโลไบต์ เขียน/ลบ ได้ 10,000 ครั้ง
- เก็บข้อมูลได้มากกว่า 20 ปี ที่อุณหภูมิ 85 °C และกว่า 100 ปีที่ 25 °C
- มีตัวตั้งเวลา และตัวนับเวลาขนาด 8 บิต จำนวน 2 ตัว ที่สามารถแยกโหมดการทำงาน ได้ 2 โหมด
- มีขา PWM จำนวน 10 ช่องสัญญาณที่สามารถกำหนดความละเอียดได้ 16 บิต

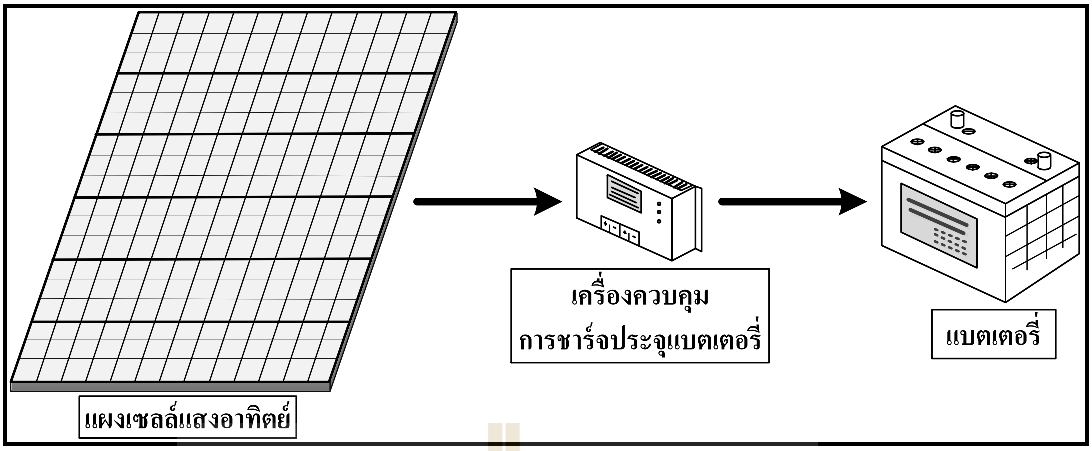
- มีตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิตอลขนาด 10 บิต จำนวน 16 ช่องสัญญาณ
- มีตัวเปรียบเทียบสัญญาณแอนะล็อกอยู่ในตัว
- มีแหล่งการขัดจังหวะทั้งภายใน และภายนอก
- มีขาของอินพุต และเอาต์พุตที่สามารถกำหนดการทำงานได้ 86 พิน (pin)



รูปที่ 5.40 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น MEGA 1280

5.10 การออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์

ปัจจุบันในภาคการเกษตรมีการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาประยุกต์ใช้กับปั๊มน้ำกันอย่างแพร่หลาย โดยระบบเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ เครื่องควบคุมการชาร์จประจุแบตเตอรี่ และแบตเตอรี่ ดังรูปที่ 5.41 ซึ่งผู้ใช้งานมีความจำเป็นที่ต้องมีความรู้ ความเข้าใจในอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อใช้สำหรับการออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีความเหมาะสมกับการใช้งาน และยังช่วยลดโอกาสการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายที่มากเกินความจำเป็น อันเนื่องมาจากการเลือกขนาดพิกัดอุปกรณ์ที่มากเกิน สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ เซลล์แสงอาทิตย์ เครื่องควบคุมการชาร์จประจุแบตเตอรี่ และแบตเตอรี่ ในหัวข้อนี้จะอธิบายหลักการทำงานเบื้องต้น และรายละเอียดที่จำเป็นต้องทราบในการพิจารณาเลือกอุปกรณ์สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ อีกทั้งมีการแสดงตัวอย่างการออกแบบปั๊มน้ำ และระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์อีกด้วย



รูปที่ 5.41 ส่วนประกอบระบบเซลล์แสงอาทิตย์

5.10.1 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Cell: PV) หรือโซลาเซลล์ (Solar Cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำ โดยทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งไฟฟ้าที่ได้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยเซลล์แสงอาทิตย์ 1 เซลล์ ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดพี สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดพี และเอ็น (P-N junction) ในขณะที่มีแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าประจุลบ และประจุบวก ซึ่งได้แก่ อิเล็กตรอน และโฮล โดยโครงสร้างรอยต่อพีเอ็นจะทำหน้าที่แยกพาหะไฟฟ้าชนิดอิเล็กตรอนให้ไหลไปที่ขั้วลบ และทำให้พาหะนำไฟฟ้าชนิดโฮลไหลไปที่ขั้วบวก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วทั้งสอง อย่างไรก็ตามพลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อย จึงมีการนำเซลล์แสงอาทิตย์หลาย ๆ เซลล์มาเชื่อมต่อรวมกันเป็นแผง เรียกว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ หรือแผงโซลาเซลล์ จึงทำให้สามารถกำหนดค่ากำลังทางไฟฟ้าได้ตามความต้องการและสะดวกต่อการใช้งาน เมื่อต้องการกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้น ก็สามารถทำได้โดยนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาเชื่อมต่อกันให้มากขึ้น เช่น ทำการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นด้วยการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม หรือเพิ่มขนาดกระแสไฟฟ้าให้มากขึ้นด้วยการต่อแบบขนาน อย่างไรก็ตามค่ากำลังไฟฟ้าที่ระบุบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ขนาด 1000 W จะพบว่าในสภาวะการใช้งานจริงกำลังไฟฟ้าที่ได้จะไม่ถึง 1000 W ทั้งนี้เนื่องจากมีปัจจัยต่าง ๆ ที่ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง เช่น สภาพพื้นที่ที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ฤดูกาล อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การออกแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องมีขนาดมากกว่าความต้องการเล็กน้อย โดยสามารถ

ทำการคำนวณหาขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้จากสมการที่ (5-6) โดยกำหนดให้ PSH เท่ากับ 4 ชั่วโมงต่อวัน และ k_{sys} เท่ากับ 0.6 (Falk Antony, 2007)

$$P_{cell} = \frac{P_{Load}}{PSH \times k_{sys}} \tag{5-6}$$

5.10.2 เครื่องควบคุมการชาร์จประจุแบตเตอรี่

เครื่องควบคุมการชาร์จประจุแบตเตอรี่ (charge controller) หรือเรียกว่า โซลาชาร์จเจอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ชาร์จประจุไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้กับแบตเตอรี่ โดยเครื่องควบคุมการชาร์จจะทำหน้าที่ควบคุมไม่ให้มีการประจุมากเกินไป และเมื่อแบตเตอรี่มีการประจุที่เต็มแล้ว เครื่องชาร์จจะตัดการชาร์จทันที ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพที่เร็วกว่ากำหนดของแบตเตอรี่ สำหรับขั้นตอนในการเลือกเครื่องควบคุมชาร์จประจุ ควรเลือกเครื่องที่มีการควบคุมการประจุไฟฟ้าด้วยวงจรควบคุมอัตโนมัติ เนื่องจากมีข้อดี คือ มีประสิทธิภาพสูง และกำลังงานสูญเสียต่ำ ส่วนการเลือกขนาดพิกัดของเครื่องชาร์จจะต้องมีค่าพิกัดกำลังไม่ต่ำกว่าค่าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งในการการระบุขนาดกำลังไฟฟ้าของเครื่องชาร์จส่วนมากจะบอกเป็นขนาดพิกัดแรงดัน และพิกัดกระแส ส่วนแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะบอกเป็นพิกัดกำลังไฟฟ้า และพิกัดแรงดัน การคำนวณหาขนาดพิกัดของเครื่องควบคุมการชาร์จประจุแบตเตอรี่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5-7)

$$I_{Batt} = \frac{P_{cell}}{V_{Batt}} \tag{5-7}$$

5.10.3 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ทำหน้าที่จัดเก็บพลังงานที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และจ่ายพลังงานที่ได้ให้กับโหลด ซึ่งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีแบตเตอรี่จะสามารถจ่ายพลังงานให้กับโหลดได้ต่อเนื่องกว่าระบบที่ไม่มีแบตเตอรี่ โดยแบตเตอรี่ที่เหมาะสำหรับใช้กับระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นแบตเตอรี่แบบจ่ายประจุสูง (deep discharge battery) เนื่องจากแผ่นตะกั่วที่อยู่ภายในแบตเตอรี่จะมีขนาดใหญ่ และหนากว่าแบตเตอรี่ทั่วไป จึงทำให้มีความเหมาะสมกับการจ่ายพลังงานเป็นระยะเวลานาน ๆ โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหาย และสามารถใช้พลังงานไฟฟ้าที่เก็บอยู่ในแบตเตอรี่อย่างต่อเนื่องได้ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้แบตเตอรี่ชนิดดังกล่าวมีน้ำหนักมากกว่าแบตเตอรี่ทั่วไปที่ใช้กับรถยนต์ ซึ่งแบตเตอรี่ที่ใช้กับรถยนต์เหมาะสำหรับการจ่าย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พลังงานที่สูง แต่ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ และสามารถใช้พลังงานไฟฟ้าที่เก็บอยู่ในแบตเตอรี่ได้ประมาณ 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น เมื่อมีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่าช่วงขอบเขตของพลังงานที่เก็บอยู่จะส่งผลให้อายุการใช้งานสั้นลง (สำนักพัฒนาเทคโนโลยีเพื่ออุตสาหกรรม [ITDI], 2558)

สำหรับหน่วยความจุของแบตเตอรี่ที่ใช้บ่งบอกถึงระดับในการประจุพลังงานมีหน่วยเป็น แอมแปร์-ชั่วโมง (Ampere-Hour หรือ Ah) ตัวอย่าง เช่น แบตเตอรี่ขนาด 12 V 100 Ah หมายความว่า ถ้าแบตเตอรี่มีการจ่ายกระแส 100 A แบตเตอรี่จะสามารถจ่ายกระแสอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หรือถ้าแบตเตอรี่มีการจ่ายกระแส 1 A แบตเตอรี่สามารถจ่ายกระแสอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 100 ชั่วโมง สำหรับการคำนวณหาค่าความจุพลังงานแบตเตอรี่ให้มีความเหมาะสมกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5-8) และควรเลือกค่าความจุของแบตเตอรี่ให้มีค่ามากกว่าที่คำนวณได้ เนื่องจากการเลือกแบตเตอรี่ที่มีขนาดเล็กเกินไปจะทำให้เก็บประจุพลังงานได้น้อย

$$Ah = \frac{P_{Load}}{V_{Batt} \times DOD} \times T_{Batt} \tag{5-8}$$

5.10.4 ตัวอย่างการออกแบบปั๊มน้ำและระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

จากหัวข้อที่ผ่านมา ได้มีการอธิบายถึงปัจจัยที่มีผลต่อการคำนวณหาขนาดปั๊มน้ำและการออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะช่วยในการตัดสินใจการเลือกชนิดหรือประเภทของอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับลักษณะของงาน ในหัวข้อนี้จะแสดงตัวอย่างการคำนวณหาขนาดปั๊มน้ำและระบบเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยมีตัวอย่างการออกแบบดังนี้

ตัวอย่าง ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการสมมติสถานการณ์ว่ามีการปลูกผักสวนครัวในพื้นที่ 1 ไร่ เลือกใช้วิธีการให้น้ำแบบสปริงเกอร์ ที่มีอัตราการให้น้ำโดยรวมอยู่ที่ 4,000 ลิตรต่อชั่วโมง (L/hr) ที่แรงดันน้ำประมาณ 1 บาร์ (bar) และมีการให้น้ำวันละ 2 ครั้ง ครั้งละ 1 ชั่วโมง สำหรับการคำนวณหาขนาดพิกัดของปั๊มน้ำหอยโข่งไฟฟ้า และระบบเซลล์แสงอาทิตย์เป็นดังนี้

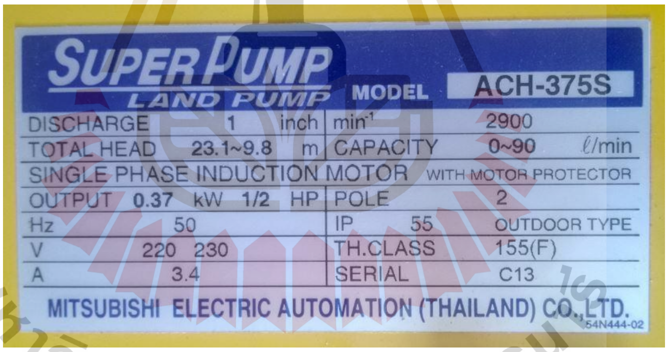
จากสถานการณ์ดังกล่าว พบว่าจะต้องเลือกปั๊มน้ำหอยโข่งไฟฟ้าที่มีอัตราการไหลเท่ากับ 4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (m^3/hr) และมีระยะส่งสูงประมาณ 10 m เพื่อทำให้เกิดแรงดันน้ำประมาณ 1 bar ทั้งนี้เนื่องจากมีการสูญเสียแรงดันภายในท่อจึงต้องทำการเผื่อระยะส่งสูงอีก 30 เปอร์เซ็นต์ เพราะฉะนั้นระยะส่งสูงของปั๊มน้ำจะเท่ากับ 13 m ด้วยเหตุนี้จะต้องทำการเลือกปั๊มน้ำที่

มีอัตราการไหลอย่างน้อย 4 m^3/hr ที่ระยะส่งสูงมากกว่า 13 m โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้ปั๊มน้ำหอยโข่งไฟฟ้าของบริษัทมิตซูบิชิ ซึ่งมีตารางแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 5.42

MODEL		HP	Current (A)			FLOW RATE	m³/H.r	0	1.2	2.4	3.6	4.8	6.0	6.6	8.4	9.0	10.8	12.0	12.6	12.6
1Ø, 220V 50Hz	3Ø, 220V/380V 50Hz		1Ø, 220V	3Ø, 220V	3Ø, 380V		l/min.	0	20	40	60	80	90	100	120	140	160	180	200	220
ACH-375S	-	1/2	3.3	-	-	TOTAL HEAD (m.)		23.5	21.4	20.0	17.4	13.7	10.2	-	-	-	-	-	-	-
WCH-755S	-	1	7.2	-	-			37.3	33.7	31.9	29.9	26.5	23.5	20.4	12.0	-	-	-	-	-
WCH-1105S	-	1 1/2	8.0	-	-			40.2	36.8	35.4	33.3	30.0	27.4	24.8	15.2	-	-	-	-	-
WCH-1505S	WCH-1505T	2	14.0	8.5	4.9			48.3	47.8	46.6	44.8	42.2	40.5	38.8	30.4	21.9	-	-	-	-
WCH-2205S	WCH-2205T	3	16.8	9.9	5.7			56.4	52.4	50.7	49.0	46.5	45.0	43.4	38.1	30.4	21.2	-	-	-
WCH-3705S	WCH-3705T	5	26.8	16.8	9.4			62.5	59.7	56.8	54.9	53.5	52.5	51.6	49.6	47.1	44.0	40.1	34.6	28.4

รูปที่ 5.42 ตารางแสดงรายละเอียดปั๊มน้ำหอยโข่ง ของบริษัทมิตซูบิชิ

จากตารางในรูปที่ 5.42 พบว่ารุ่นที่เหมาะสมกับความต้องการ คือ ACH-375S เนื่องจากที่ระยะส่งสูงเท่ากับ 13.7 m มีค่าอัตราการไหลเท่ากับ 4.8 m^3/hr ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการใช้งาน โดยแผนป้ายแสดงรายละเอียดของปั๊มน้ำดังกล่าวดูได้จากรูปที่ 5.43



รูปที่ 5.43 แผ่นป้ายแสดงรายละเอียดของปั๊มน้ำมิตซูบิชิ รุ่น ACH-375S

ลำดับถัดมาทำการออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์ให้สามารถเก็บ และจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอต่อการทำงานของมอเตอร์ปั๊มน้ำหอยโข่งเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน อันดับแรกคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ของปั๊มน้ำหอยโข่ง จากการคูณกันระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่พิกัดซึ่งมีค่าเท่ากับ 748 W (220 V $\times$ 3.4 A) เมื่อทราบพิกัดของโหลดแล้ว ในลำดับถัดมาทำการออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ เครื่องควบคุมการการชาร์จประจุ และแบตเตอรี่ โดยมีขั้นตอนการออกแบบดังต่อไปนี้

- ขั้นตอนที่ 1

คำนวณหาค่าความจุพลังงานของแบตเตอรี่ให้เหมาะสมกับโหลด เนื่องจากแบตเตอรี่จะต้องทำหน้าที่เก็บพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และทยอยจ่ายพลังงานที่เก็บไว้ให้กับโหลด จากสถานการณ์ดังกล่าวพบว่าแบตเตอรี่ที่ใช้จะต้องเก็บพลังงานให้เพียงพอสำหรับจ่ายให้กับมอเตอร์ของปั๊มน้ำที่กำลังไฟฟ้า (P_{Load}) เท่ากับ 748 W เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้แบตเตอรี่ที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า (V_{Batt}) เท่ากับ 48 V (แบตเตอรี่ 12 V ต่ออนุกรมกัน 4 ลูก) และกำหนดให้ค่าความลึกของการคลายประจุ (*DOD*) ของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 60 เปอร์เซ็นต์ (สำนักพัฒนาเทคโนโลยีเพื่ออุตสาหกรรม, 2558) สามารถคำนวณหาค่าความจุพลังงานของแบตเตอรี่ได้จากสมการที่ (5-8) ดังนี้

$$Ah = \frac{748}{48 \times 0.6} \times 2 = 51.91\,\text{Ah}$$

ดังนั้นจะต้องเลือกแบตเตอรี่ที่พิกัดแรงดันเท่ากับ 48 V และมีค่าความจุพลังงานมากกว่า 51.91 Ah ในงานวิจัยจึงเลือกใช้แบตเตอรี่ที่มีค่าความจุเท่ากับ 75 Ah

-ขั้นตอนที่ 2

ทำการคำนวณหาขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากสมการที่ (5-6) ดังนี้

$$P_{cell} = \frac{748}{4 \times 0.6} = 343.75\,\text{W.hr}$$

จากการคำนวณพบว่าจะต้องเลือกแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีกำลังไฟฟ้ามากกว่า 343.75 W และมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมแผงมากกว่า 48 V (พิกัดแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ใช้ในงานวิจัย) เพราะฉะนั้นในงานวิจัยจึงเลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมแผงเท่ากับ 39 V และกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 250 W ต่ออนุกรมกัน 2 แผง ซึ่งทำให้ค่าของแรงดันตกคร่อมแผง และกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 78V และ 500W ตามลำดับ

-ขั้นตอนที่ 3

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการออกแบบขนาดพิกัดของเครื่องควบคุมการชาร์จประจุแบตเตอรี่ จากการออกแบบในขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 พบว่าพิกัดแรงดันพิกัดของแบตเตอรี่ (V_{Batt}) มีค่าเท่ากับ 48 V และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{cell}) มีค่าเท่ากับ 500 W

ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวจะถูกใช้ในการคำนวณหาค่าพิกัดกระแสของเครื่องควบคุมการชาร์จประจุแบตเตอรี่ สามารถคำนวณค่าพิกัดกระแสได้จากสมการที่ (5-7) ดังแสดงต่อไปนี้

$$I_{Batt} = \frac{500}{48} = 10.41\,\text{A}$$

ดังนั้นจะต้องเลือกเครื่องควบคุมการชาร์จประจุแบตเตอรี่ที่พิกัดแรงดันเท่ากับ 48 V และมีพิกัดกระแสมากกว่า 10.41 A โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้เลือกใช้เครื่องควบคุมการชาร์จที่พิกัดกระแสเท่ากับ 20 A

จากตัวอย่างการออกแบบปั๊มน้ำ และระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านมาสามารถแสดงค่าพิกัดของอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับสถานการณ์สมมติในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 พิกัดปั๊มน้ำ และระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัย

อุปกรณ์	พิกัด
1. ปั๊มน้ำหอยโข่งไฟฟ้า 0.5 แรงม้า จำนวน 1 เครื่อง	220 V, 3.4 A
2. แผงเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 2 แผง	39 V, 250 W
3. เครื่องควบคุมการชาร์จประจุแบตเตอรี่ จำนวน 1 เครื่อง	48 V, 20 A
4. แบตเตอรี่ จำนวน 4 ลูก	12 V, 75 Ah

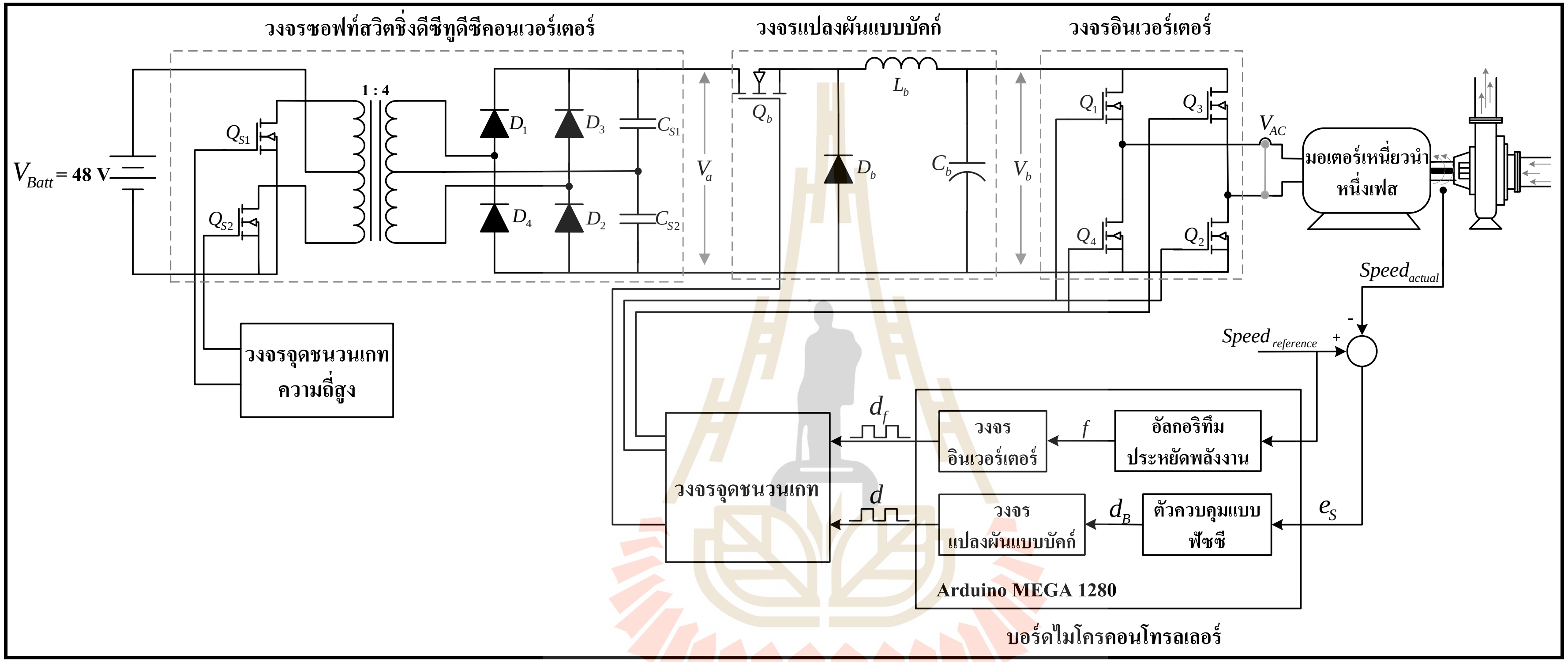
5.11 สรุป

การอธิบายเนื้อหาในบทนี้นำเสนอหลักการออกแบบปั๊มน้ำให้เหมาะสมกับความต้องการน้ำของพืช การออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีความเหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน และมีการแสดงตัวอย่างการออกแบบปั๊มน้ำ และระบบเซลล์แสงอาทิตย์จากเหตุการณ์สมมติ เพื่อป้องกันการเลือกขนาดพิกัดของอุปกรณ์ที่มากเกินความจำเป็น ซึ่งส่งผลให้มีค่าจ่ายสูงเกินจริง อีกทั้งยังได้นำเสนอโครงสร้างฮาร์ดแวร์ของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่งไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย วงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ วงจรแปลงผันแบบบัคก์ วงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรจุดชนวนเกท และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งได้มีการอธิบายหลักการทำงาน วิธีการออกแบบอุปกรณ์ที่นำมาใช้งาน รวมถึงการทดสอบการทำงานของวงจรต่าง ๆ ก่อนนำไปใช้งานจริง นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอการออกแบบ และติดตั้งชุดตรวจวัดความเร็วรอบที่ทำหน้าที่ตรวจวัดความเร็วรอบมอเตอร์ของปั๊มน้ำหอยโข่ง โดยการออกแบบชุดขับเคลื่อนดังกล่าวได้มีการออกแบบให้รองรับกับระบบที่มีตัวควบคุม ซึ่งจะอธิบายในบทถัดไป

บทที่ 6
การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี

6.1 บทนำ

จากการนำเสนอหลักการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่งด้วยอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน ดังที่นำเสนอในบทที่ 4 จะเห็นได้ว่าอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ สามารถคำนวณหาค่าความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการประหยัดพลังงานที่ความเร็วรอบค่าต่าง ๆ ได้ตามที่ออกแบบไว้ แต่เมื่อทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่าค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการปรับความถี่ให้เหมาะสมเพียงอย่างเดียวจะยังไม่ตรงกับค่าความเร็วรอบอ้างอิง จากเหตุการณ์ดังกล่าวผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์พบว่า การจะทำให้ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงนั้น นอกจากปรับความถี่แล้วจะต้องทำการปรับขนาดของค่ายอดแรงดันร่วมด้วยเช่นกัน ด้วยเหตุนี้ ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงนำเสนอการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้มีการลู่เข้าหาค่าความเร็วรอบอ้างอิงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี ทั้งนี้ เนื่องจากตัวควบคุมดังกล่าวเป็นวิธีที่ชาญฉลาด ให้ประสิทธิผลสูงและมีลักษณะการตัดสินใจคล้ายมนุษย์ เพราะอาศัยข้อมูลความรู้ และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญในการออกแบบตัวควบคุม ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน และตัวควบคุมแบบฟัซซีแสดงได้ดังรูปที่ 6.1 จากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่ากระบวนการประมวลผลภายในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่ปรับความถี่ตามการคำนวณของอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน และส่วนของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนค่ายอดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เหมาะสมตามการคำนวณของตัวควบคุมแบบฟัซซี โดยเนื้อหาในบทนี้นำเสนอหลักการพื้นฐานของตัวควบคุมแบบฟัซซี การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี และผลการทดสอบการทำงานของตัวควบคุมแบบฟัซซี

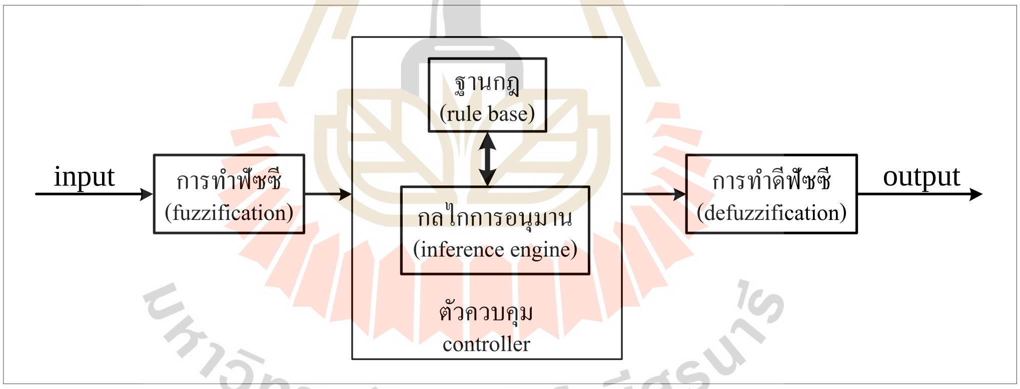


รูปที่ 6.1 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน และตัวควบคุมแบบฟัซซี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

6.2 ระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

ระบบควบคุมแบบฟัซซี (fuzzy control) คือ การควบคุมโดยการใช้ตรรกะหลายระดับที่มีการกำหนดค่าระดับความเป็นสมาชิก (degree of membership) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้วิธีการควบคุมดังกล่าวเป็นวิธีที่ชาญฉลาด และให้ประสิทธิผลสูง เนื่องจากการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าวอาศัยข้อมูลความรู้ และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญในการออกแบบตัวควบคุม อีกทั้งการวินิจฉัย และตัดสินใจของตัวควบคุมดังกล่าวอยู่ในรูปแบบของประโยคเงื่อนไข IF-THEN ซึ่งเป็นรูปแบบที่เข้าใจง่าย จึงทำให้ตัวควบคุมแบบฟัซซีไม่จำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ นอกจากนี้ตัวควบคุมดังกล่าวยังมีความเหมาะสมอย่างยิ่งกับระบบที่มีความคลุมเครือและมีความไม่เป็นเชิงเส้น แสดงรูปลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของระบบควบคุมแบบฟัซซีได้ดังรูปที่ 6.2 จากรูปดังกล่าวจะเห็นโครงสร้างภายในแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ การทำฟัซซี (fuzzification) กฎของฟัซซี (fuzzy rule) กลไกการอนุมาน (inference engine) และการทำดีฟัซซี (defuzzification) กระบวนการแต่ละส่วนจะมีหน้าที่ที่แตกต่างกันไป สามารถอธิบายหลักการทำงานเบื้องต้นสำหรับแต่ละส่วนได้ดังนี้



รูปที่ 6.2 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของระบบควบคุมแบบฟัซซี

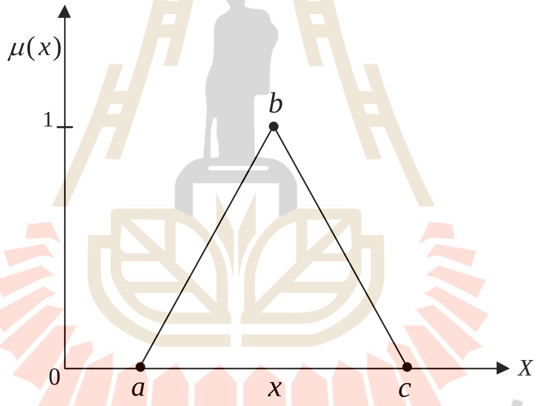
6.2.1 การทำฟัซซี

การทำฟัซซี คือ การแปลงข้อมูลที่รับมาจากด้านอินพุตให้อยู่ในรูปของตัวแปรภาษา (linguistic variable) ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรทางภาษา และค่าเชิงภาษา ยกตัวอย่างเช่น กำหนดให้ ค่าความผิดพลาด(error) คือ ตัวแปรทางภาษา และมีค่าเชิงภาษาทั้งหมด 5 ค่า ได้แก่ มากกว่ามาก ๆ มากกว่า เท่ากับ น้อยกว่าและน้อยกว่ามาก ๆ เป็นต้น ซึ่งค่าเชิงภาษาแต่ละค่าคือ ตำแหน่งบนฟังก์ชันสมาชิกภาพ (membership function) โดยลักษณะของฟังก์ชันสมาชิกภาพจะมีรูปร่างที่แตกต่างกันออกไปตามความเหมาะสมกับระบบที่พิจารณา

หรือถูกกำหนดจากผู้ออกแบบ สำหรับรูปร่างของฟังก์ชันสมาชิกภาพที่นิยมใช้มี 4 รูปแบบ ได้แก่ ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูปสามเหลี่ยม (triangular membership function: trapmf) ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal membership function: trapmf) ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูประฆังคว่ำ (generalized bell membership function: gbellmf) และฟังก์ชันสมาชิกภาพรูปเกาส์เซียน (gaussian membership function: gaussmf) ฟังก์ชันสมาชิกภาพแต่ละรูปแบบสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ดังนี้

- ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูปสามเหลี่ยม

ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูปสามเหลี่ยมประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ 3 ตำแหน่ง ได้แก่ a, b และ c ดังรูปที่ 6.3 สำหรับการคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิกที่ตำแหน่ง X ใด ๆ แสดงได้ดังสมการที่ (6-1)



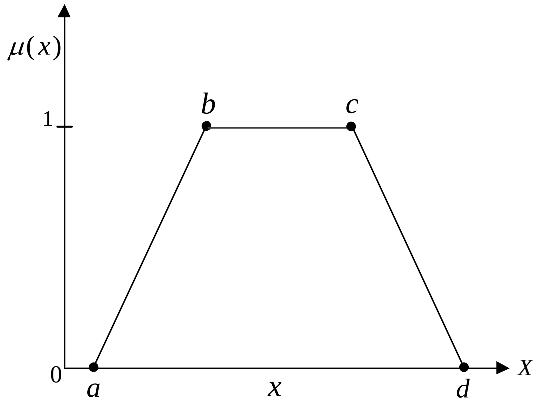
รูปที่ 6.3 ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูปสามเหลี่ยม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$\mu(x) = trimf(x,[abc]) = \begin{cases} 0 & ; x \leq a \\ (x-a)/(b-a) & ; a < x < b \\ 1 & ; x = b \\ (c-x)/(c-d) & ; b < x < c \\ 0 & ; x \geq c \end{cases} \quad (6\text{-}1)$$

- ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูปสี่เหลี่ยมคางหมูประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ 4 ตำแหน่ง ได้แก่ a, b, c และ d ดังรูปที่ 6.4 สำหรับการคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิกที่ตำแหน่ง X ใด ๆ แสดงได้ดังสมการที่ (6-2)

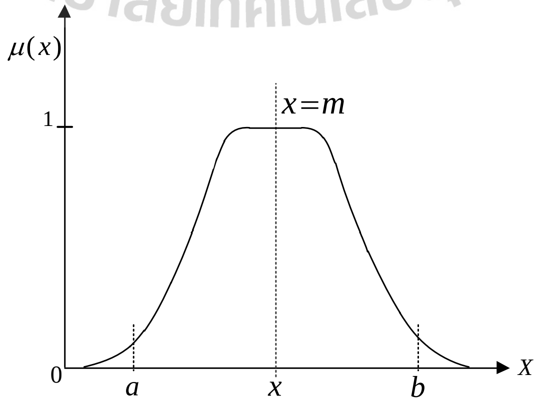


รูปที่ 6.4 ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

$$\mu(x) = trimf(x,[abcd]) = \begin{cases} 0 & ; x \le a \\ (x-a)/(b-a) & ; a < x < b \\ 1 & ; b \le x \le c \\ (d-x)/(d-c) & ; c < x < d \\ 0 & ; x \ge d \end{cases} \quad (6\text{-}2)$$

- ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูประฆังคว่ำ

ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูประฆังคว่ำประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ 3 ตำแหน่ง ได้แก่ a , b และ m ดังรูปที่ 6.5 โดยค่าพารามิเตอร์ a และ b ใช้สำหรับกำหนดความกว้างของฐานรูประฆังคว่ำ ส่วนค่า m ใช้กำหนดตำแหน่งกึ่งกลางของรูประฆังคว่ำ การคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิกที่ตำแหน่ง X ใด ๆ แสดงได้ดังสมการที่ (6-3)

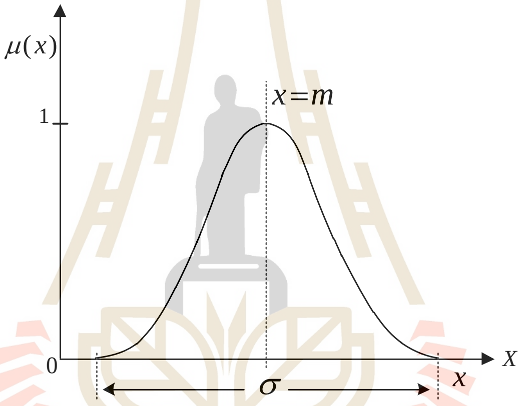


รูปที่ 6.5 ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูประฆังคว่ำ

$$\mu(x) = trimf(x,[abm]) = \frac{1}{1+\left|\frac{x-m}{a}\right|^{2b}} \qquad (6\text{-}3)$$

- ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูปเกาส์เซียน

ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูปเกาส์เซียนประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ 2 ตำแหน่ง ได้แก่ σ และ m ดังรูปที่ 6.6 จากรูปดังกล่าว ค่า σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ใช้สำหรับกำหนดความกว้างรูปเกาส์เซียน และค่า m คือ ค่าเฉลี่ยที่ใช้สำหรับกำหนดตำแหน่งกึ่งกลางของรูปเกาส์เซียน ส่วนการคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิกที่ตำแหน่ง X ใด ๆ แสดงได้ดังสมการที่ (6-4)



รูปที่ 6.6 ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูปเกาส์เซียน

$$\mu(x) = trimf(x,[abm]) = \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right) \qquad (6\text{-}4)$$

วิธีการหาค่าความเป็นสมาชิกจะอาศัยการดำเนินการทางเซต (set operations) ร่วมกับตัวปฏิบัติการทางเซตพื้นฐาน ซึ่งประกอบด้วย ยูเนียน(union) อินเตอร์เซกชัน (intersection) ส่วนเติมเต็ม (complement) และเซตย่อย (subset) เพื่อประเมินว่าตัวแปรที่พิจารณามีค่าความเป็นสมาชิกเท่าไหร่ รายละเอียดแต่ส่วนสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ที่ (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552)

6.2.2 กฎของฟัซซี

กฎของฟัซซี คือ เงื่อนไขในการควบคุมของตัวควบคุมแบบฟัซซี ซึ่งประกอบด้วยส่วนของตัวแปรเงื่อนไข และส่วนของตัวแปรผลลัพธ์ โดยการออกแบบกฎดังกล่าวอาศัยความรู้

และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญในระบบที่พิจารณา ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ระบบควบคุมมีลักษณะการตัดสินใจใกล้เคียงกับมนุษย์ กฎของฟัซซี ประกอบด้วย ประโยคเงื่อนไข (IF) และข้อปฏิบัติ (THEN) แสดงตัวอย่างกฎของฟัซซีได้ดังนี้

Rule 1: IF x is A THEN y is increase

Rule 2: IF x is A AND B THEN y is constant

Rule 3: IF x is B THEN y is decrease

โดยที่ x และ y คือ ตัวแปรทางภาษา

A, B, increase, constant และ decrease คือ ค่าเชิงภาษา

สำหรับเงื่อนไข และข้อปฏิบัติสามารถเชื่อมด้วยตัวปฏิบัติการทางเซต AND หรือ OR เพื่อเพิ่มเงื่อนไข ข้อปฏิบัติ ค่าอินพุต และค่าเอาต์พุต โดยสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากตัวอย่างการออกแบบกฎของฟัซซีในกรณีที่มีค่าอินพุต 2 ค่า เพื่อควบคุมกระแสชดเชย ได้จากงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในอดีต (ทศพร ณรงค์ฤทธิ์, 2557)

6.2.3 การอนุมานฟัซซี

การอนุมานฟัซซี คือ กระบวนการส่งค่า (mapping) จากค่าอินพุต ไปยังค่าเอาต์พุต แต่ค่าผลลัพธ์ที่ได้จะยังคงอยู่ในเทอมของค่าเชิงภาษา โดยหลักการการอนุมานฟัซซีที่นิยมใช้ทางด้านวิศวกรรมมีอยู่ 2 วิธี คือ การอนุมานแบบ Mamdani (Ebrahim, M., 1975) และการอนุมานแบบ Takagi-Sugino (Takagi, T. and Sugeno, M., 1985) โดยการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีในงานวิจัยวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะทำการออกแบบภายใต้วิธีการอนุมานแบบ Takagi-Sugeno เนื่องจากการอนุมานด้วยวิธี Takagi-Sugeno มีความแตกต่างจากวิธี Mamdani ในส่วนของรูปแบบฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตที่เป็นฟังก์ชันเส้นตรงโทนที่มีลักษณะเป็นค่าคงที่ จึงทำให้การคำนวณค่าความเป็นสมาชิกของตำแหน่งตัวแปรสมาชิกฟัซซีไม่ซับซ้อน อีกทั้งยังมีความเหมาะสมกับระบบที่มีลักษณะการตอบสนองเป็นเชิงเส้นแบบมอเตอร์ แสดงตัวอย่างกฎของฟัซซีสำหรับวิธีการอนุมานแบบ Takagi-Sugeno ได้ดังนี้

IF x is A AND y is B

THEN z is $f(x,y)$

โดยที่ x , y และ z คือ ตัวแปรทางภาษา

A และ B คือ ค่าเชิงภาษา

$f(x,y)$ คือ ฟังก์ชันเส้นตรง

สำหรับฟังก์ชัน $f(x,y)$ ที่นิยมใช้ คือ แบบจำลองฟัซซีของ Takagi-Sugeno อันดับศูนย์ (zero order Takagi-Sugeno fuzzy model) ซึ่งฟังก์ชันดังกล่าวเป็นค่าคง จึงส่งผลให้ค่าเอาต์พุตของแต่ละกฎเป็นเส้นตรงโทน (k) จึงทำให้ง่าย และสะดวกขึ้นในขั้นตอนการรวมกฎ (aggregation) แสดงตัวอย่างของรูปแบบกฎของฟัซซีที่ใช้แบบจำลองฟัซซีของ Takagi-Sugeno อันดับศูนย์ได้ดังนี้

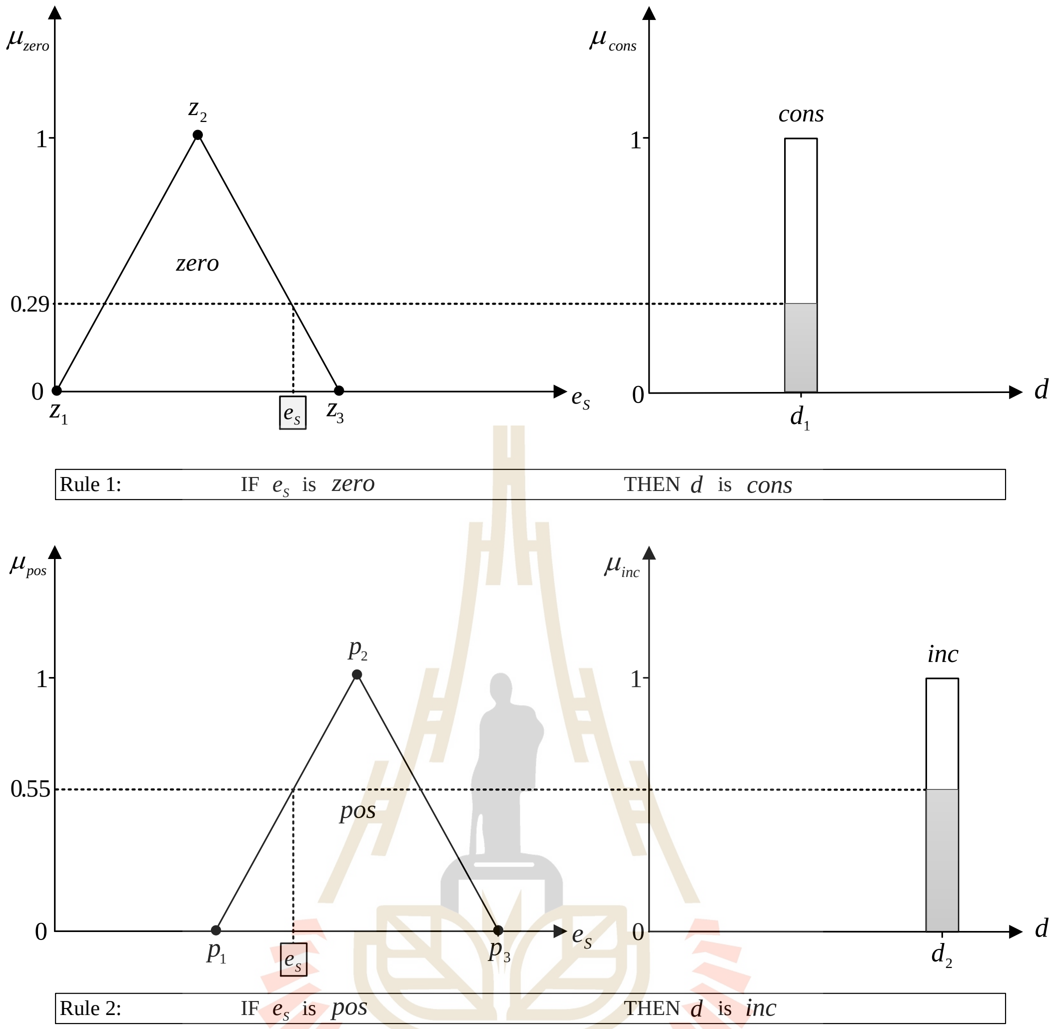
IF x is A AND y is B

THEN z is k

ตัวอย่างการอนุมานฟัซซีด้วยวิธี Takagi-Sugino ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ แสดงได้ดังรูปที่ 6.7 จากรูปดังกล่าวกำหนดให้ e_s คือ ค่าความคลาดเคลื่อนความเร็ว และ d คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ เมื่อทำการพิจารณาตำแหน่งอินพุต e_s ที่อยู่ในกฎข้อที่หนึ่ง และข้อที่สองจะเห็นได้ว่าค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต d ของเส้นตรงโทนที่อยู่ในเซต $cons$ และ inc จะขึ้นอยู่กับระดับค่าความเป็นสมาชิกของอินพุต e_s ที่อยู่ในเซต $zero$ และเซต pos โดยระดับของค่าความเป็นสมาชิกของ e_s ในแต่ละเซตขึ้นอยู่กับฟังก์ชัน trimf ดังที่ผู้ออกแบบได้กำหนดไว้ ในลำดับถัดมาขั้นตอนการรวมกฎดังรูปที่ 6.8 การรวมกฎแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นแรกจะดำเนินการประมวลค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตสำหรับแต่ละเซต ($cons$, inc) โดยการใช้ตัวกระทำ OR ในการหาค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตสูงสุด และขั้นที่สองจะดำเนินการรวมผลลัพธ์ค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตของแต่ละเซตเข้าด้วยกันโดยใช้ตัวกระทำยูเนียน (union) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะยังคงอยู่ในเทอมของค่าเชิงภาษา

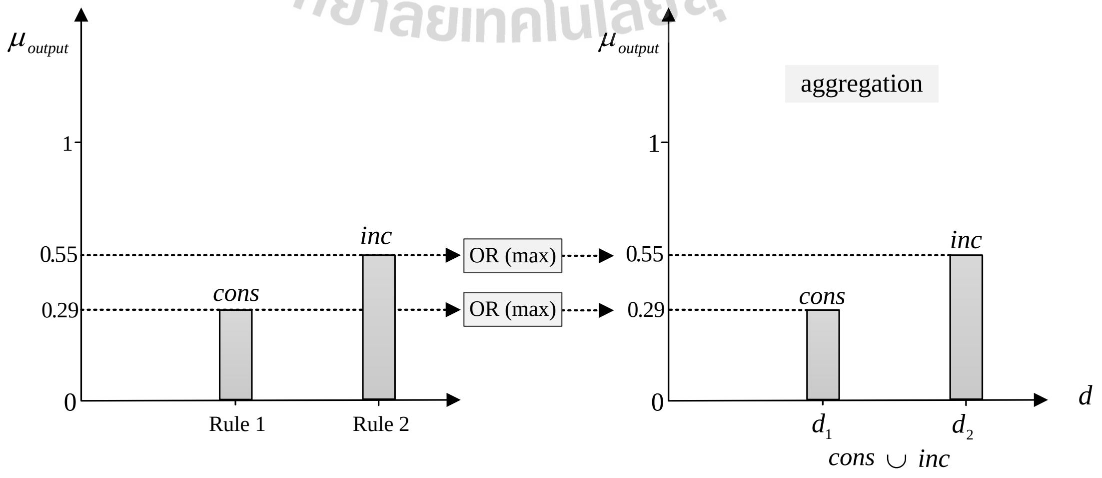
6.2.4 การทำดีฟัซซี

การทำดีฟัซซี คือ การแปลงผลลัพธ์เชิงภาษาที่ได้จากกลไกการอนุมานให้อยู่ในรูปของค่าที่สอดคล้องกับการทำงานจริง เช่น ค่าวัฏจักรหน้าที่ ค่าแรงดัน และค่ากระแส เป็นต้น โดยวิธีการทำดีฟัซซีจะขึ้นอยู่กับวิธีการอนุมาน เนื่องจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีภายใต้วิธีการอนุมานแบบ Takagi-Sugeno ซึ่งวิธีการอนุมานดังกล่าวจะทำดีฟัซซีด้วยวิธีค่าน้ำหนักเฉลี่ย (Weighted Average: WA) (John, H. and Lilly, 2010) คำนวณผลลัพธ์



รูปที่ 6.7 การอนุมานฟัซซีด้วยวิธี Takagi-Sugino

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 6.8 การรวมกฎด้วยการอนุมานด้วยวิธี Takagi-Sugino

ได้จากสมการที่ (6-5) ตัวอย่างการคำนวณหาผลเฉลยจากวิธี WA แสดงได้ดังสมการที่ (6-6) โดยอ้างอิงผลจากการรวมกฎในรูปที่ 6.8 และกำหนดให้ d_1 และ d_2 มีค่าเท่ากับ 0 และ 5 ตามลำดับ ดังนั้น ผลเฉลยของ d_{WA} มีค่าเท่ากับ 3.27 อธิบายได้ว่า ค่าเอาต์พุต d ที่ได้จากตัวควบคุมแบบฟัซซีมีค่าเท่ากับ 3.27

$$x_{WA} = \frac{\sum_{m=1}^{m} \mu(k_m) \times k_m}{\sum_{m=1}^{m} \mu(k_m)} \tag{6-5}$$

$$d_{WA} = \frac{\sum_{m=1}^{m} \mu(d_m) \times d_m}{\sum_{m=1}^{m} \mu(d_m)} = \frac{(\mu(d_1) \times d_1) + \mu(d_2) \times d_2}{\mu(d_1) + \mu(d_2)} = \frac{(0.29 \times 0) + 0.55 \times 5}{0.29 + 0.55} = 3.27 \tag{6-6}$$

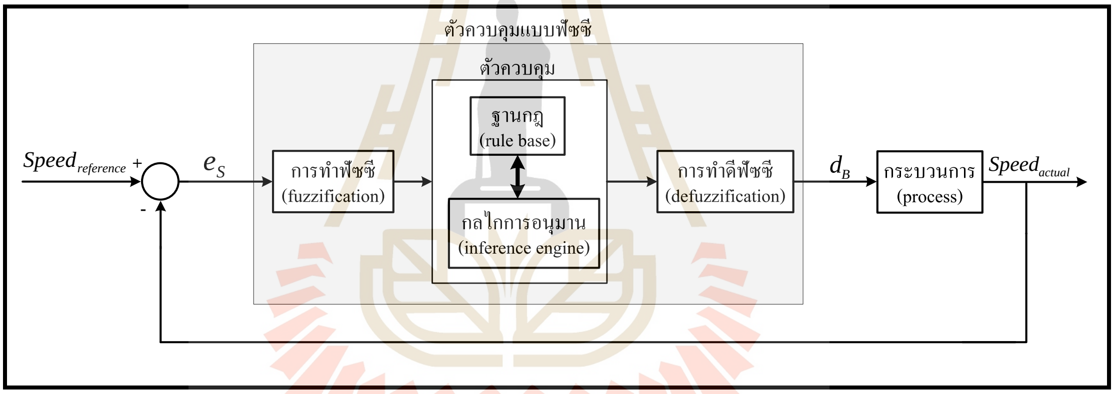
6.3 การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี

สำหรับการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่งให้มีค่าตามต้องการนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอตัวควบคุมแบบฟัซซีในการทำหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบจริงให้มีค่าคงที่ตามค่าความเร็วรอบอ้างอิง แสดงรูปลักษณะโครงสร้างของระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีได้ดังรูปที่ 6.9 โดยกำหนดให้ค่าอินพุตของตัวควบคุมแบบฟัซซี คือ ค่าความคลาดเคลื่อนเร็วรอบ (e_S) ดังแสดงในสมการที่ (6-7) โดยที่ $Speed_{reference}$ คือ ค่าความเร็วรอบอ้างอิง และ $Speed_{actual}$ คือ ค่าความเร็วรอบจริง ทั้งนี้จะเริ่มพิจารณาเมื่อค่าความคลาดเคลื่อนมีค่ามากกว่า ± 10 rpm เป็นต้นไป และกำหนดให้ค่าเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุมแบบฟัซซี คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ Q_b ของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ (d_B) โดยการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะทำการออกแบบภายใต้วิธีการอนุมานแบบ Takagi-Sugeno

$$e_S = Speed_{reference} - Speed_{actual} \tag{6-7}$$

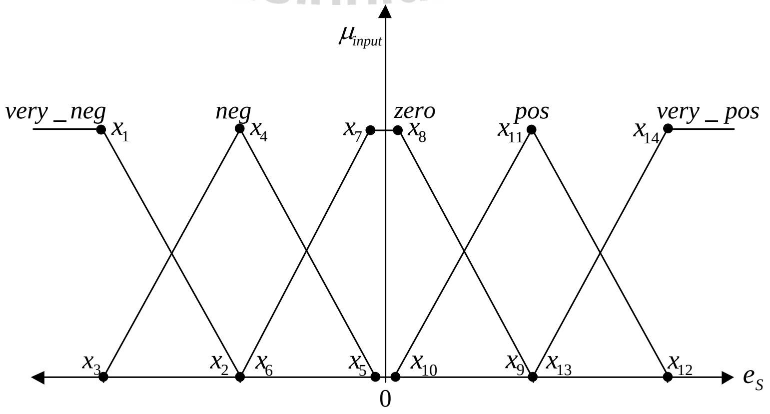
จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการสังเกตได้ว่า เมื่อค่ายอดของแรงดันมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ $Speed_{actual}$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันเมื่อค่ายอดของแรงดันมีแนวโน้มลดลงจะทำให้ $Speed_{actual}$ มีแนวโน้มลดลงเช่นกัน จากเหตุการณ์ข้างต้น แสดงให้เห็นว่าสามารถทำการ

ควบคุม $Speed_{actual}$ ได้โดยการควบคุมการปรับขนาดค่ายอดของแรงดัน ซึ่งการควบคุมค่ายอดของแรงดันสามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ จากหลักการดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้กำหนดเป็นตัวแปรทางภาษา และค่าเชิงภาษา โดยกำหนดให้ e_S และ d_B มีค่าเชิงภาษาเท่ากับ 5 ค่า ดังแสดงในตารางที่ 6.1 จากตารางดังกล่าวอธิบายได้ว่า อินพุต e_S ประกอบด้วยเซตของ $very_neg$, neg, $zero$, pos และ $very_pos$ ซึ่งแต่ละเซตจะให้ค่าความเป็นสมาชิกได้ ก็ต่อเมื่อค่า e_S เข้าเงื่อนไขที่ออกแบบ เช่น เซต $very_neg$ จะให้ค่าความเป็นสมาชิกเมื่อค่า $Speed_{reference}$ น้อยกว่าค่า $Speed_{actual}$ มาก ๆ เป็นต้น สำหรับเอาต์พุต d_B ประกอบด้วยเส้นตรงโทน $very_dec$, dec, $cons$, inc และ $very_inc$ ซึ่งค่าความเป็นสมาชิกจะขึ้นอยู่กับระดับค่าความเป็นสมาชิกของอินพุต e_S (ดังอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.2.3) โดยรูปแบบของฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต และเอาต์พุตได้มีการออกแบบให้มีลักษณะสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 6.10 และรูปที่ 6.11 ตามลำดับ



รูปที่ 6.9 ลักษณะโครงสร้างของระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

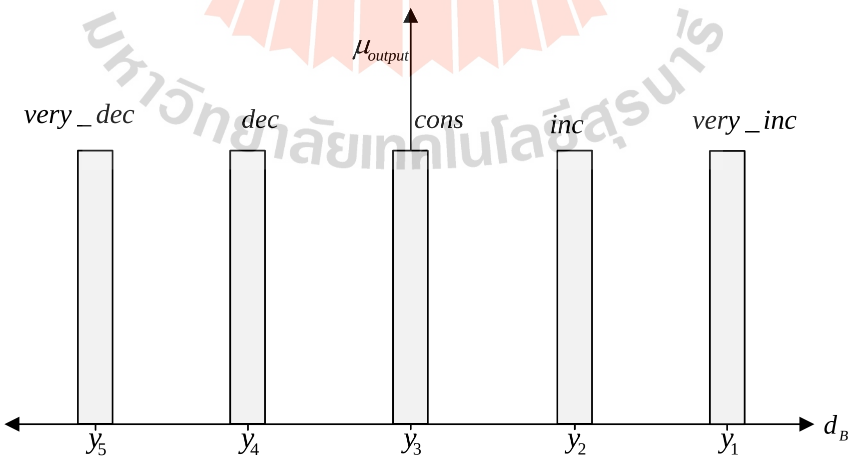
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 6.10 รูปแบบฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต

ตารางที่ 6.1 ตัวแปรทางภาษา และค่าเชิงภาษา

ค่าของระบบ	ตัวแปรทางภาษาและความหมาย		ค่าเชิงภาษาและความหมาย	
	ตัวแปรภาษา	ความหมาย	ค่าเชิงภาษา	ความหมาย
อินพุต	e_S	ค่าความคลาดเคลื่อนความเร็วรอบ	$very_neg$ (very negative)	$Speed_{reference} << Speed_{actual}$
			neg (negative)	$Speed_{reference} < Speed_{actual}$
			$zero$	$Speed_{reference} = Speed_{actual}$
			pos (positive)	$Speed_{reference} > Speed_{actual}$
			$very_pos$ (very positive)	$Speed_{reference} >> Speed_{actual}$
เอาต์พุต	d_B	ค่าวัฏจักรหน้าที่	$very_dec$ (very decrease)	ลดลงมาก
			dec (decrease)	ลดลง
			$cons$ (constant)	คงที่
			inc (increase)	เพิ่มขึ้น
			$very_inc$ (very increase)	เพิ่มขึ้นมาก



รูปที่ 6.11 รูปแบบฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุต

จากการกำหนดตัวแปรทางภาษา ค่าเชิงภาษา และตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของตัวแปรอินพุต และเอาต์พุตที่ผ่านมา พบว่ามีจำนวนกฎที่เป็นไปได้ทั้งหมด 5 กฎ โดยมีรายละเอียดของแต่ละกฎดังนี้

Rule 1: IF e_S is $very_neg$ THEN d_B is $very_dec$

Rule 2: IF e_S is neg THEN d_B is dec

Rule 3: IF e_S is $zero$ THEN d_B is $cons$

Rule 4: IF e_S is pos THEN d_B is inc

Rule 5: IF e_S is $very_pos$ THEN d_B is $very_inc$

จากกฎฟัซซีทั้งหมด 5 กฎ สามารถอธิบายความหมายของแต่ละกฎได้ดังนี้

ความหมายของกฎข้อที่ 1 ถ้าค่าอินพุต e_S มีค่าเท่ากับ $very_neg$ แล้วกำหนดให้ค่าเอาต์พุต d_B เท่ากับ $very_dec$ หมายความว่า ถ้าค่าความเร็วรอบอ้างอิงมีค่าน้อยกว่าค่าความเร็วรอบจริงมาก ๆ กำหนดให้ทำการปรับลดค่าวัฏจักรหน้าที่มาก ๆ เพื่อลดค่ายอดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้น้อยลงมาก ๆ เพราะจะทำให้ค่าความเร็วรอบจริงของมอเตอร์มีค่าลดลงมาก ๆ

ความหมายของกฎข้อที่ 2 ถ้าค่าอินพุต e_S มีค่าเท่ากับ neg แล้วกำหนดให้ค่าเอาต์พุต d_B เท่ากับ dec หมายความว่า ถ้าค่าความเร็วรอบอ้างอิงมีค่าน้อยกว่าค่าความเร็วรอบจริง กำหนดให้ทำการปรับลดค่าวัฏจักรหน้าที่ลง เพื่อลดค่ายอดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้น้อยลง เพราะจะทำให้ค่าความเร็วรอบจริงของมอเตอร์มีค่าลดลง

ความหมายของกฎข้อที่ 3 ถ้าค่าอินพุต e_S มีค่าเท่ากับ $zero$ แล้วกำหนดให้ค่าเอาต์พุต d_B เท่ากับ $cons$ หมายความว่า ถ้าความเร็วรอบอ้างอิงมีค่าเท่ากับความเร็วรอบจริง กำหนดให้หยุดการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ เพื่อทำการคงค่ายอดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้มีค่าคงที่ เพราะจะทำให้ค่าความเร็วรอบจริงของมอเตอร์มีค่าคงที่

ความหมายของกฎข้อที่ 4 ถ้าค่าอินพุต e_S มีค่าเท่ากับ pos แล้วกำหนดให้ค่าเอาต์พุต d_B เท่ากับ inc หมายความว่า ถ้าค่าความเร็วรอบอ้างอิงมีค่ามากกว่าความเร็วรอบจริง กำหนดให้ทำการปรับเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่ เพื่อเพิ่มค่ายอดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้มากขึ้น เพราะจะทำให้ค่าความเร็วรอบจริงของมอเตอร์มีค่าเพิ่มมากขึ้น

ความหมายของกฎข้อที่ 5 ถ้าค่าอินพุต e_S มีค่าเท่ากับ $very_pos$ แล้วกำหนดให้ค่าเอาต์พุต d_B เท่ากับ $very_inc$ หมายความว่า ถ้าค่าความเร็วรอบอ้างอิงมีค่ามากกว่าความเร็วรอบจริงมาก ๆ กำหนดให้ทำการปรับเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่มาก ๆ เพื่อเพิ่มค่ายอดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้มากขึ้นมาก ๆ เพราะจะทำให้ค่าความเร็วรอบจริงของมอเตอร์มีค่าเพิ่มมากขึ้นมาก ๆ

โดยค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำดีฟัซซีด้วยวิธีค่าน้ำหนักเฉลี่ย (ดังอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.2.4) เป็นค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ Q_b ซึ่งค่าวัฏจักรหน้าที่ที่ได้จากตัวควบคุมแบบฟัซซีจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ (อธิบายเพิ่มเติมในภาคผนวก ง.) เพื่อทำการปรับเปลี่ยนค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมจนทำให้ค่าความเร็วรอบจริงของมอเตอร์เข้าใกล้ค่าอ้างอิงมากที่สุด การโปรแกรมตัวควบคุมดังกล่าวให้อยู่ในรูปแบบภาษาซีแสดงในภาคผนวก ง.

สำหรับตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต e_S และเอาต์พุต d_B ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้มาจากการทดลองปรับเปลี่ยนตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต e_S และเอาต์พุต d_B ทั้งหมด 9 กรณี ดังแสดงในตารางที่ 6.2 ซึ่งอาศัยประสบการณ์ของผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ได้ทำการทดลองกับฮาร์ดแวร์ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ของปั๊มน้ำในห้องปฏิบัติการช่วยในการออกแบบ ขณะที่ทำการทดสอบความเหมาะสมของตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต e_S และเอาต์พุต d_B ในแต่ละกรณี ตัวควบคุมแบบฟัซซี และอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานจะทำงานร่วมกัน โดยที่อัลกอริทึมการประหยัดพลังงานจะทำหน้าที่คำนวณหาค่าความถี่ และทำการปรับความถี่ด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ และตัวควบคุมแบบฟัซซีจะทำการควบคุมความเร็วรอบจริงของมอเตอร์ให้มีค่าลู่เข้าหาค่าความเร็วรอบอ้างอิง โดยอาศัยการปรับเปลี่ยนค่ายอดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยวงจรแปลงผันแบบบัคก์ การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีปรับลดค่าความเร็วรอบอ้างอิง และกรณีปรับเพิ่มค่าความเร็วรอบอ้างอิง สำหรับกรณีปรับลดค่าความเร็วรอบอ้างอิงจะทำการปรับลดค่าความเร็วรอบอ้างอิงจาก 2600 rpm เป็น 2100 rpm ที่เวลาประมาณ 5 วินาที และทำการปรับลดอีกครั้งที่เวลาประมาณ 12.5 วินาที จาก 2100 rpm เป็น 1600 rpm ขณะที่กรณีปรับเพิ่มค่าความเร็วรอบอ้างอิงจะทำการปรับเพิ่มจาก 1600 rpm เป็น 2100 rpm ที่เวลาประมาณ 22.5 วินาที และปรับเพิ่มอีกครั้งที่เวลาประมาณ 30 วินาที จาก 2100 rpm เป็น 2600 rpm เช่นเดิม ซึ่งทำการวัดรูปสัญญาณของความเร็วรอบอ้างอิง และรูปสัญญาณของความเร็วรอบจริงด้วย ออสซิโลสโคป แสดงรูปอุปกรณ์ตรวจวัด และฮาร์ดแวร์ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่งไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 6.12 และรูปผลการทดสอบการลู่เข้าของความเร็วรอบจริงกับความเร็วรอบอ้างอิงในกรณีที่ 1 ถึงกรณีที่ 10 ในรูปที่ 6.13 ถึงรูปที่ 6.21 ตามลำดับ โดยที่คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ($error_{av}$) จากสมการที่ (6-8) และแสดงค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ได้สำหรับแต่ละกรณีในตารางที่ 6.2

$$error_{av} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_T}\left[speed_{reference}(i) - speed_{actual}(i)\right]^2}{N_T}} \tag{6-8}$$

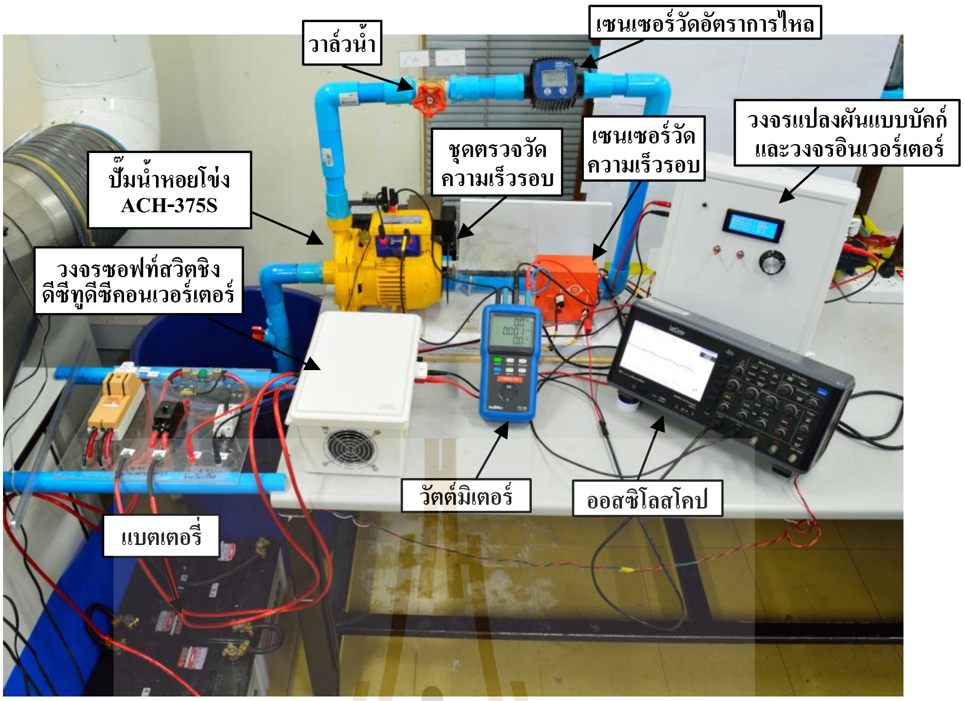
ตารางที่ 6.2 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต e_S และเอาต์พุต d_B ทั้ง 9 กรณี

<table>
<tr><td>กรณีที่</td><td colspan="14">ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต e_S</td><td>$error_{av}$</td></tr>
<tr><td rowspan="6">1</td><td>x_1</td><td>x_2</td><td>x_3</td><td>x_4</td><td>x_5</td><td>x_6</td><td>x_7</td><td>x_8</td><td>x_9</td><td>x_{10}</td><td>x_{11}</td><td>x_{12}</td><td>x_{13}</td><td>x_{14}</td><td rowspan="6">0.051</td></tr>
<tr><td>-450</td><td>-225</td><td>-450</td><td>-225</td><td>-10</td><td>-225</td><td>-10</td><td>10</td><td>225</td><td>10</td><td>225</td><td>450</td><td>225</td><td>450</td></tr>
<tr><td colspan="14">ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุต d_B</td></tr>
<tr><td colspan="3">y_1</td><td colspan="3">y_2</td><td colspan="3">y_3</td><td colspan="3">y_4</td><td colspan="2">y_5</td></tr>
<tr><td colspan="3">15</td><td colspan="3">7.5</td><td colspan="3">0</td><td colspan="3">-7.5</td><td colspan="2">-15</td></tr>
<tr><td colspan="14"></td></tr>
<tr><td rowspan="7">2</td><td colspan="14">ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต e_S</td><td rowspan="7">0.063</td></tr>
<tr><td>x_1</td><td>x_2</td><td>x_3</td><td>x_4</td><td>x_5</td><td>x_6</td><td>x_7</td><td>x_8</td><td>x_9</td><td>x_{10}</td><td>x_{11}</td><td>x_{12}</td><td>x_{13}</td><td>x_{14}</td></tr>
<tr><td>-450</td><td>-225</td><td>-450</td><td>-225</td><td>-10</td><td>-225</td><td>-10</td><td>10</td><td>225</td><td>10</td><td>225</td><td>450</td><td>225</td><td>450</td></tr>
<tr><td colspan="14">ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุต d_B</td></tr>
<tr><td colspan="3">y_1</td><td colspan="3">y_2</td><td colspan="3">y_3</td><td colspan="3">y_4</td><td colspan="2">y_5</td></tr>
<tr><td colspan="3">10</td><td colspan="3">5</td><td colspan="3">0</td><td colspan="3">-5</td><td colspan="2">-10</td></tr>
<tr><td colspan="14"></td></tr>
<tr><td rowspan="6">3</td><td colspan="14">ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต e_S</td><td rowspan="6">0.108</td></tr>
<tr><td>x_1</td><td>x_2</td><td>x_3</td><td>x_4</td><td>x_5</td><td>x_6</td><td>x_7</td><td>x_8</td><td>x_9</td><td>x_{10}</td><td>x_{11}</td><td>x_{12}</td><td>x_{13}</td><td>x_{14}</td></tr>
<tr><td>-450</td><td>-225</td><td>-450</td><td>-225</td><td>-10</td><td>-225</td><td>-10</td><td>10</td><td>225</td><td>10</td><td>225</td><td>450</td><td>225</td><td>450</td></tr>
<tr><td colspan="14">ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุต d_B</td></tr>
<tr><td colspan="3">y_1</td><td colspan="3">y_2</td><td colspan="3">y_3</td><td colspan="3">y_4</td><td colspan="2">y_5</td></tr>
<tr><td colspan="3">5</td><td colspan="3">2.5</td><td colspan="3">0</td><td colspan="3">-2.5</td><td colspan="2">-5</td></tr>
<tr><td rowspan="6">4</td><td colspan="14">ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต e_S</td><td rowspan="6">0.046</td></tr>
<tr><td>x_1</td><td>x_2</td><td>x_3</td><td>x_4</td><td>x_5</td><td>x_6</td><td>x_7</td><td>x_8</td><td>x_9</td><td>x_{10}</td><td>x_{11}</td><td>x_{12}</td><td>x_{13}</td><td>x_{14}</td></tr>
<tr><td>-300</td><td>-150</td><td>-300</td><td>-150</td><td>-10</td><td>-150</td><td>-10</td><td>10</td><td>150</td><td>10</td><td>150</td><td>300</td><td>150</td><td>300</td></tr>
<tr><td colspan="14">ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุต d_B</td></tr>
<tr><td colspan="3">y_1</td><td colspan="3">y_2</td><td colspan="3">y_3</td><td colspan="3">y_4</td><td colspan="2">y_5</td></tr>
<tr><td colspan="3">15</td><td colspan="3">7.5</td><td colspan="3">0</td><td colspan="3">-7.5</td><td colspan="2">-15</td></tr>
<tr><td rowspan="3">5</td><td colspan="14">ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต e_S</td><td rowspan="3">0.047</td></tr>
<tr><td>x_1</td><td>x_2</td><td>x_3</td><td>x_4</td><td>x_5</td><td>x_6</td><td>x_7</td><td>x_8</td><td>x_9</td><td>x_{10}</td><td>x_{11}</td><td>x_{12}</td><td>x_{13}</td><td>x_{14}</td></tr>
<tr><td>-300</td><td>-150</td><td>-300</td><td>-150</td><td>-10</td><td>-150</td><td>-10</td><td>10</td><td>150</td><td>10</td><td>150</td><td>300</td><td>150</td><td>300</td></tr>
</table>

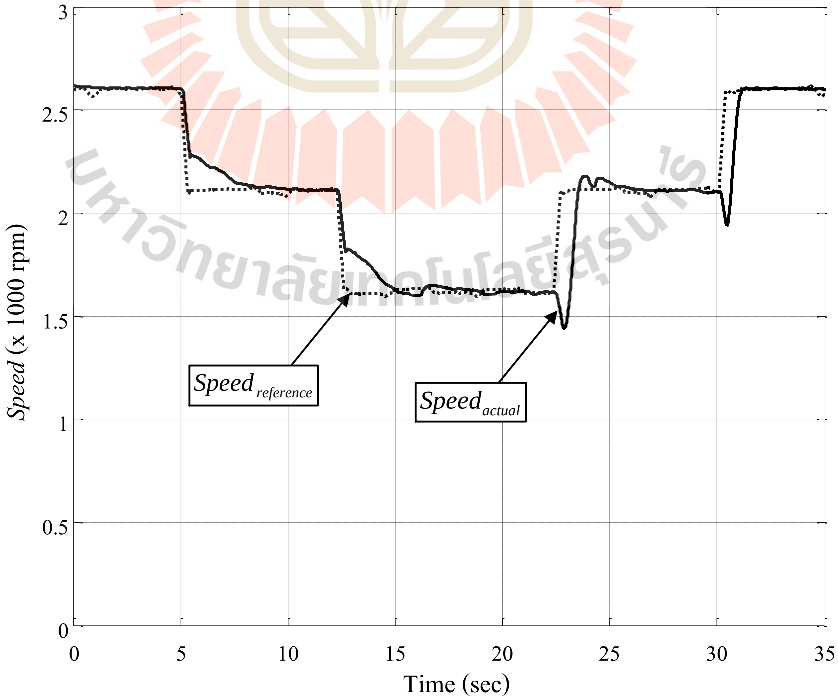
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 6.2 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต e_S และเอาต์พุต d_B ทั้ง 9 กรณี (ต่อ)

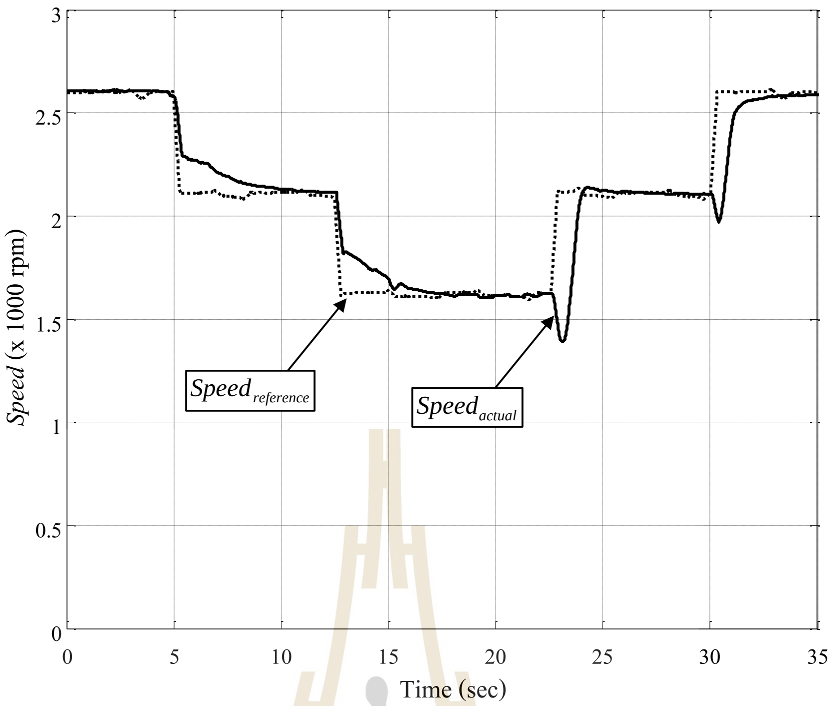
<table>
<tr><th>กรณีที่</th><th colspan="14">ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุต d_B</th><th>$error_{av}$</th></tr>
<tr><td rowspan="2">5</td><td colspan="3">y_1</td><td colspan="3">y_2</td><td colspan="3">y_3</td><td colspan="3">y_4</td><td colspan="2">y_5</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="3">10</td><td colspan="3">5</td><td colspan="3">0</td><td colspan="3">-5</td><td colspan="2">-10</td></tr>
<tr><td rowspan="6">6</td><td colspan="14">ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต e_S</td><td rowspan="6">0.087</td></tr>
<tr><td>x_1</td><td>x_2</td><td>x_3</td><td>x_4</td><td>x_5</td><td>x_6</td><td>x_7</td><td>x_8</td><td>x_9</td><td>x_{10}</td><td>x_{11}</td><td>x_{12}</td><td>x_{13}</td><td>x_{14}</td></tr>
<tr><td>-300</td><td>-150</td><td>-300</td><td>-150</td><td>-10</td><td>-150</td><td>-10</td><td>10</td><td>150</td><td>10</td><td>150</td><td>300</td><td>150</td><td>300</td></tr>
<tr><td colspan="14">ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุต d_B</td></tr>
<tr><td colspan="3">y_1</td><td colspan="3">y_2</td><td colspan="3">y_3</td><td colspan="3">y_4</td><td colspan="2">y_5</td></tr>
<tr><td colspan="3">5</td><td colspan="3">2.5</td><td colspan="3">0</td><td colspan="3">-2.5</td><td colspan="2">-5</td></tr>
<tr><td rowspan="6">7</td><td colspan="14">ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต e_S</td><td rowspan="6">0.037</td></tr>
<tr><td>x_1</td><td>x_2</td><td>x_3</td><td>x_4</td><td>x_5</td><td>x_6</td><td>x_7</td><td>x_8</td><td>x_9</td><td>x_{10}</td><td>x_{11}</td><td>x_{12}</td><td>x_{13}</td><td>x_{14}</td></tr>
<tr><td>-150</td><td>-75</td><td>-150</td><td>-75</td><td>-10</td><td>-75</td><td>-10</td><td>10</td><td>75</td><td>10</td><td>75</td><td>150</td><td>75</td><td>150</td></tr>
<tr><td colspan="14">ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุต d_B</td></tr>
<tr><td colspan="3">y_1</td><td colspan="3">y_2</td><td colspan="3">y_3</td><td colspan="3">y_4</td><td colspan="2">y_5</td></tr>
<tr><td colspan="3">15</td><td colspan="3">7.5</td><td colspan="3">0</td><td colspan="3">-7.5</td><td colspan="2">-15</td></tr>
<tr><td rowspan="6">8</td><td colspan="14">ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต e_S</td><td rowspan="6">0.042</td></tr>
<tr><td>x_1</td><td>x_2</td><td>x_3</td><td>x_4</td><td>x_5</td><td>x_6</td><td>x_7</td><td>x_8</td><td>x_9</td><td>x_{10}</td><td>x_{11}</td><td>x_{12}</td><td>x_{13}</td><td>x_{14}</td></tr>
<tr><td>-150</td><td>-75</td><td>-150</td><td>-75</td><td>-10</td><td>-75</td><td>-10</td><td>10</td><td>75</td><td>10</td><td>75</td><td>150</td><td>75</td><td>150</td></tr>
<tr><td colspan="14">ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุต d_B</td></tr>
<tr><td colspan="3">y_1</td><td colspan="3">y_2</td><td colspan="3">y_3</td><td colspan="3">y_4</td><td colspan="2">y_5</td></tr>
<tr><td colspan="3">10</td><td colspan="3">5</td><td colspan="3">0</td><td colspan="3">-5</td><td colspan="2">-10</td></tr>
<tr><td rowspan="6">9</td><td colspan="14">ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต e_S</td><td rowspan="6">0.055</td></tr>
<tr><td>x_1</td><td>x_2</td><td>x_3</td><td>x_4</td><td>x_5</td><td>x_6</td><td>x_7</td><td>x_8</td><td>x_9</td><td>x_{10}</td><td>x_{11}</td><td>x_{12}</td><td>x_{13}</td><td>x_{14}</td></tr>
<tr><td>-150</td><td>-75</td><td>-150</td><td>-75</td><td>-10</td><td>-75</td><td>-10</td><td>10</td><td>75</td><td>10</td><td>75</td><td>150</td><td>75</td><td>150</td></tr>
<tr><td colspan="14">ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุต d_B</td></tr>
<tr><td colspan="3">y_1</td><td colspan="3">y_2</td><td colspan="3">y_3</td><td colspan="3">y_4</td><td colspan="2">y_5</td></tr>
<tr><td colspan="3">5</td><td colspan="3">2.5</td><td colspan="3">0</td><td colspan="3">-2.5</td><td colspan="2">-5</td></tr>
</table>



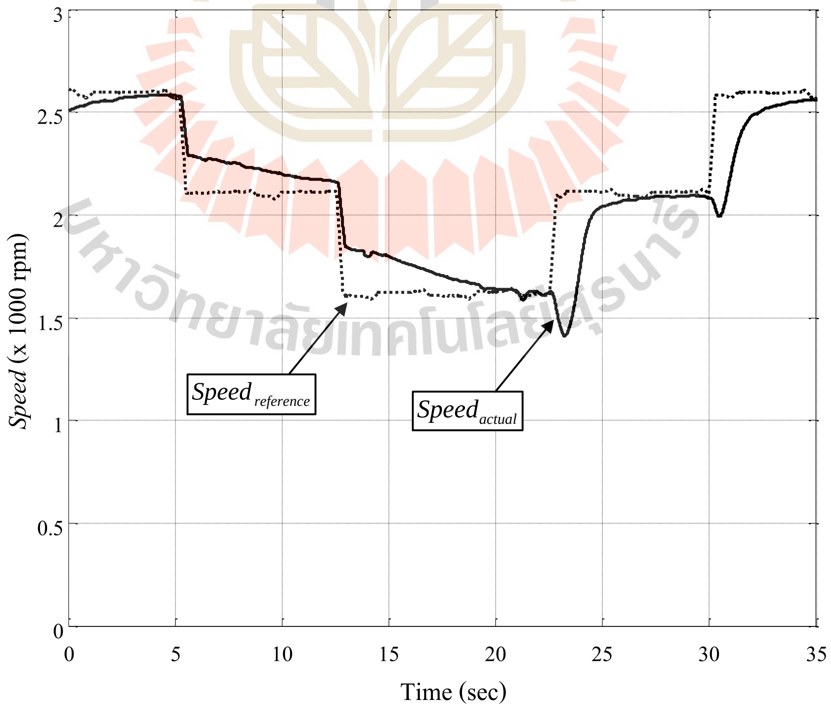
รูปที่ 6.12 อุปกรณ์ตรวจวัด และฮาร์ดแวร์ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส
ของปั๊มน้ำหอยโข่งไฟฟ้า



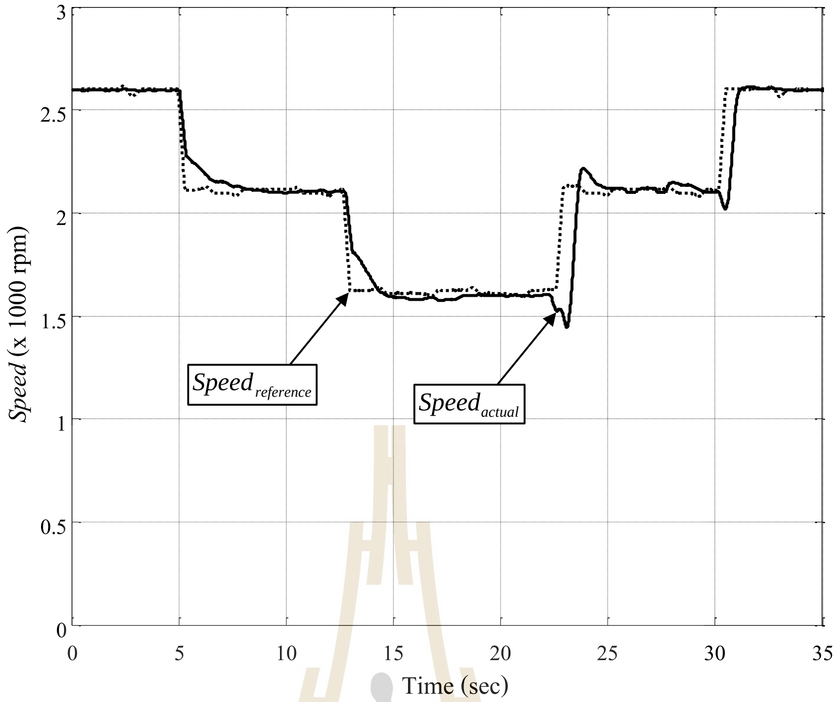
รูปที่ 6.13 ผลการทดสอบการลู่เข้าของความเร็วรอบจริงกับความเร็วรอบอ้างอิงในกรณีที่ 1



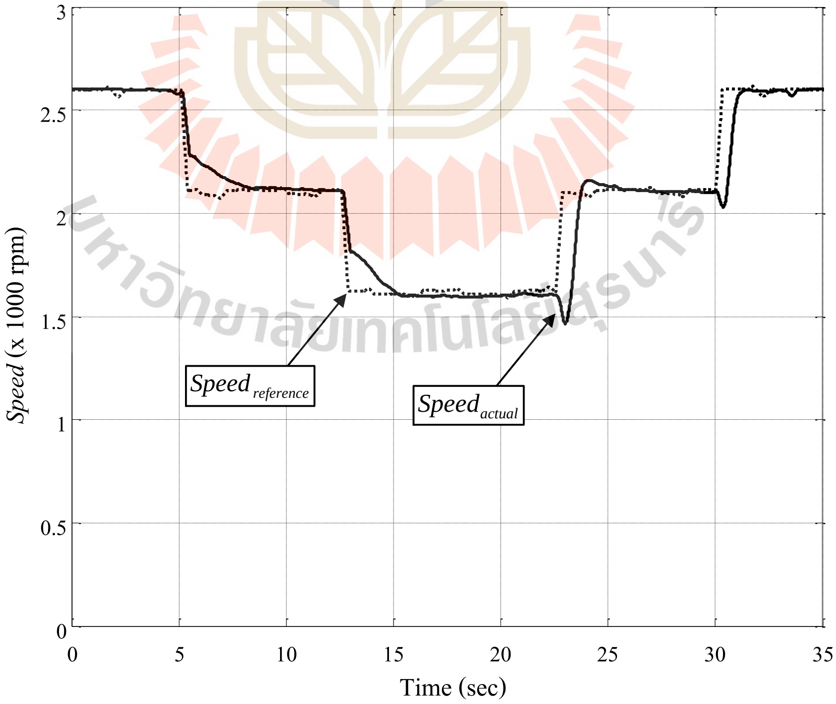
รูปที่ 6.14 ผลการทดสอบการลู่เข้าของความเร็วรอบจริงกับความเร็วรอบอ้างอิงในกรณีที่ 2



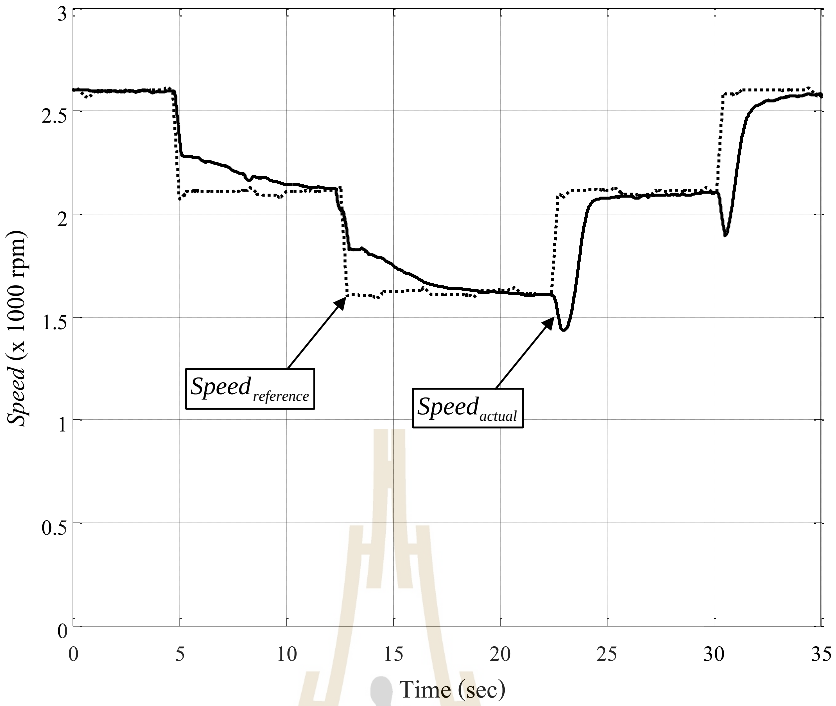
รูปที่ 6.15 ผลการทดสอบการลู่เข้าของความเร็วรอบจริงกับความเร็วรอบอ้างอิงในกรณีที่ 3



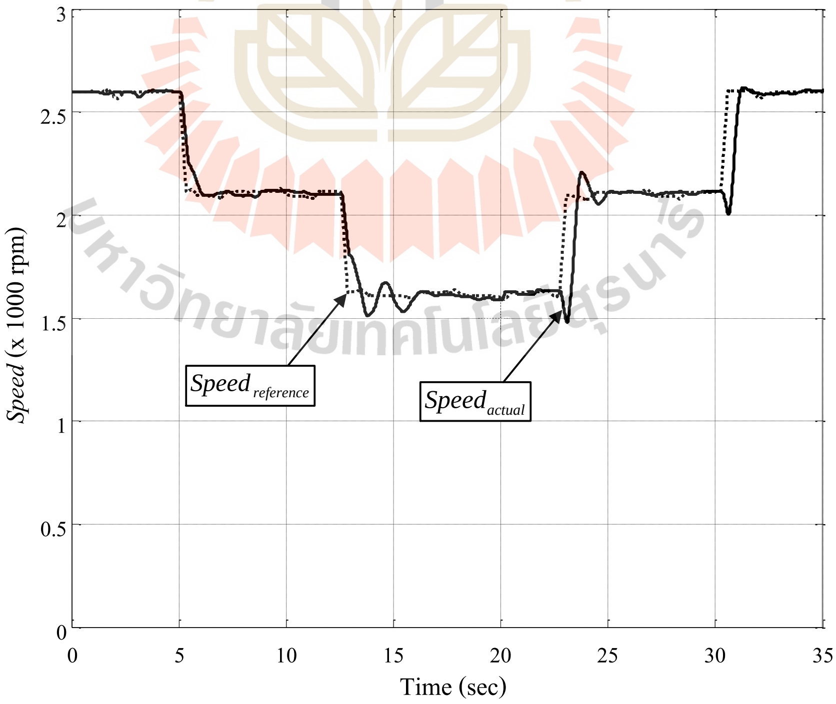
รูปที่ 6.16 ผลการทดสอบการลู่เข้าของความเร็วรอบจริงกับความเร็วรอบอ้างอิงในกรณีที่ 4



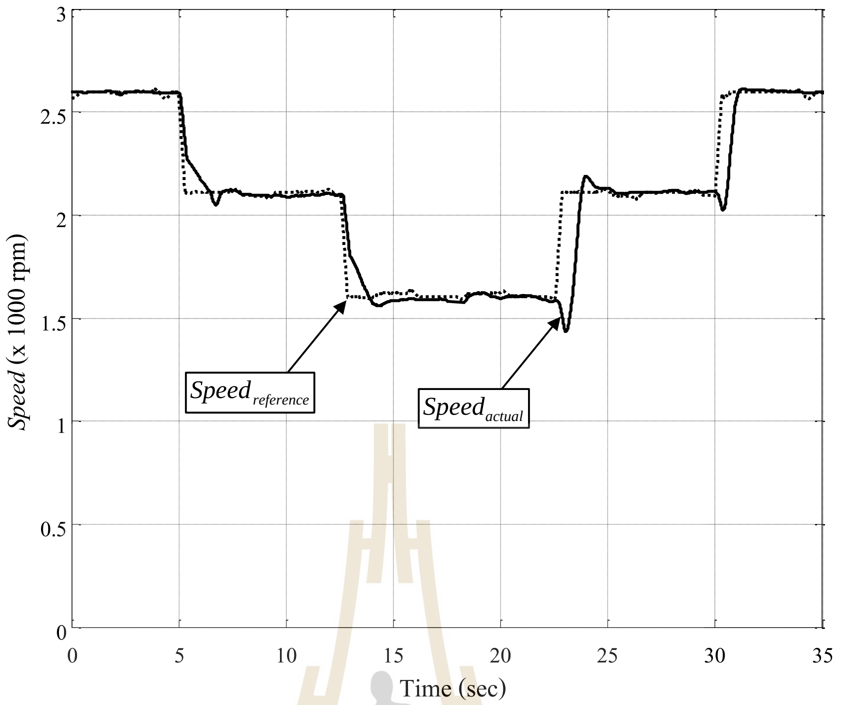
รูปที่ 6.17 ผลการทดสอบการลู่เข้าของความเร็วรอบจริงกับความเร็วรอบอ้างอิงในกรณีที่ 5



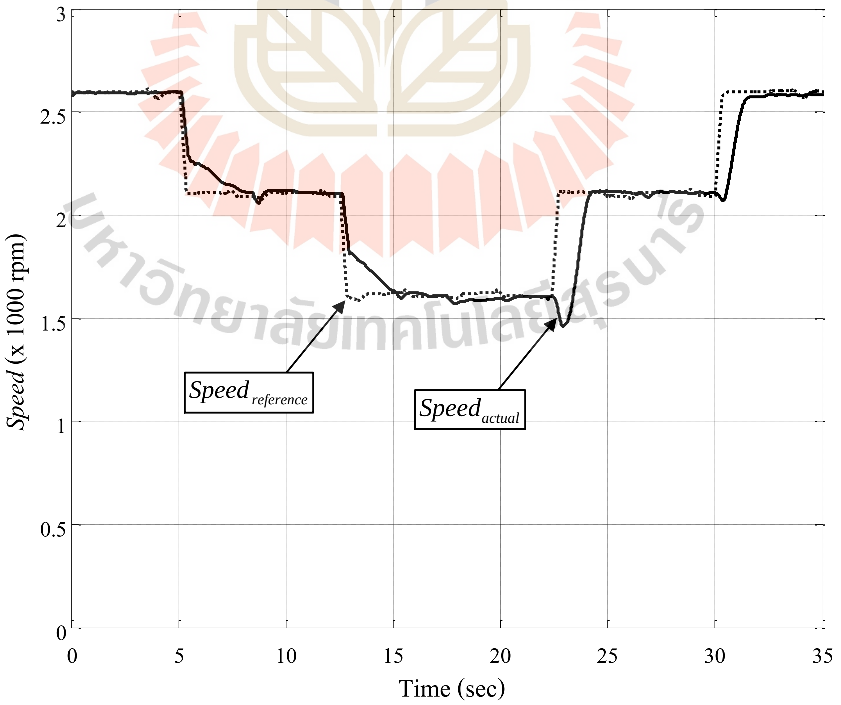
รูปที่ 6.18 ผลการทดสอบการลู่เข้าของความเร็วรอบจริงกับความเร็วรอบอ้างอิงในกรณีที่ 6



รูปที่ 6.19 ผลการทดสอบการลู่เข้าของความเร็วรอบจริงกับความเร็วรอบอ้างอิงในกรณีที่ 7



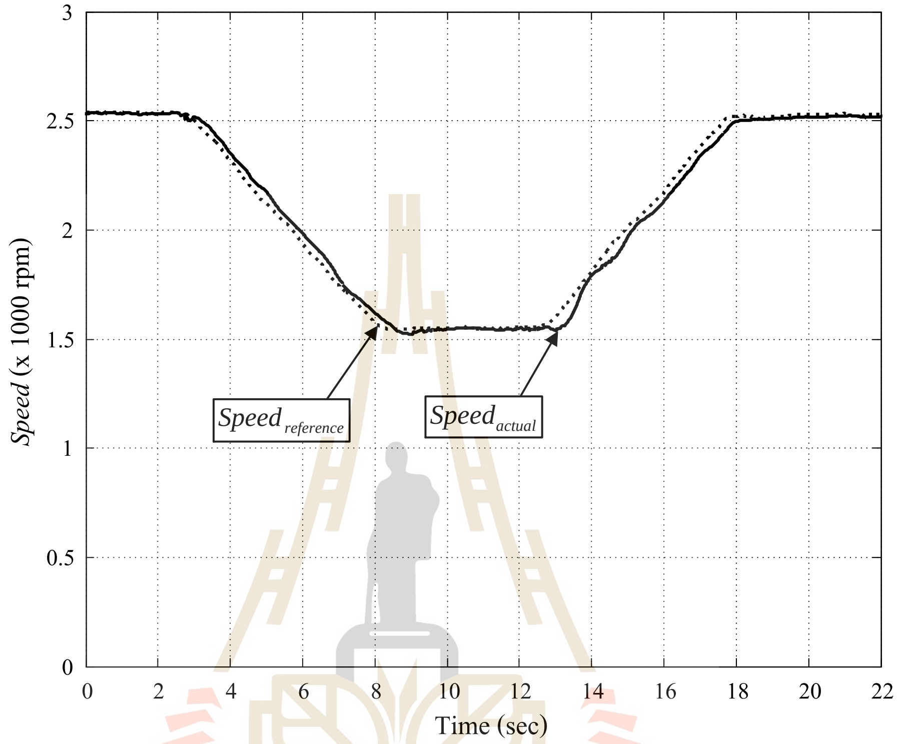
รูปที่ 6.20 ผลการทดสอบการลู่เข้าของความเร็วรอบจริงกับความเร็วรอบอ้างอิงในกรณีที่ 8



รูปที่ 6.21 ผลการทดสอบการลู่เข้าของความเร็วรอบจริงกับความเร็วรอบอ้างอิงในกรณีที่ 9

จากรูปผลการทดสอบการลู่เข้าของความเร็วรอบจริงกับความเร็วรอบอ้างอิงในการทดลองปรับเปลี่ยนตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต e_S และเอาต์พุต d_B ทั้ง 9 กรณีที่ผ่านมา สำหรับลักษณะการลู่เข้าของความเร็วรอบจริงในกรณีที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 6.13 พบว่า ระยะเวลาในการลู่เข้ามากที่สุดมีค่าประมาณ 5 วินาที ซึ่งอยู่ในช่วงที่ค่าความเร็วรอบอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 2100 rpm เป็น 1600 rpm และมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.051 ในขณะที่กรณีที่ 2 มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.063 และมีระยะเวลาลู่เข้ามากที่สุดประมาณ 5 วินาที ซึ่งอยู่ในช่วงที่ค่าความเร็วรอบอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 2600 rpm เป็น 2100 rpm และ 2100 rpm เป็น 1600 rpm ลำดับถัดมาในรูปที่ 6.15 ของกรณีที่ 3 พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.108 และในช่วงที่ค่าความเร็วรอบอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 2600 rpm เป็น 2100 rpm มีค่าของระยะเวลาในการลู่เข้ามากกว่าค่าที่กำหนดในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ (ไม่เกิน 7.5 วินาที) สำหรับกรณีที่ 4 ในกรณีนี้มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.046 และระยะเวลาลู่เข้ามากที่สุดมีค่าประมาณ 3 วินาที ซึ่งอยู่ในช่วงที่ค่าความเร็วรอบอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 2600 rpm เป็น 2100 rpm ดังแสดงในรูปที่ 6.16 ส่วนลักษณะการลู่เข้าของความเร็วรอบจริงในกรณีที่ 5 ดังแสดงในรูปที่ 6.17 พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.047 และค่าของระยะเวลาในการลู่เข้ามากที่สุดมีค่าประมาณ 2.75 วินาที ซึ่งอยู่ในช่วงที่ค่าความเร็วรอบอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 2600 rpm เป็น 2100 rpm ขณะที่กรณีที่ 6 มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.087 และมีระยะเวลาในการลู่เข้ามากที่สุดประมาณ 7 วินาที โดยอยู่ในช่วงที่ค่าความเร็วรอบอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 2600 rpm เป็น 2100 rpm ดังแสดงในรูป 6.18 สำหรับรูปถัดมา รูปที่ 6.19 ของกรณีที่ 7 พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.037 ขณะที่ระยะเวลาในการลู่เข้ามากที่สุดมีค่าประมาณ 3.75 วินาที ซึ่งอยู่ในช่วงที่ค่าความเร็วรอบอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 2100 rpm เป็น 1600 rpm ส่วนกรณีที่ 8 ดังแสดงในรูปที่ 6.20 พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.042 และมีระยะเวลาในการลู่เข้ามากที่สุดประมาณ 6.25 วินาที โดยอยู่ในช่วงในช่วงที่ค่าความเร็วรอบอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 2100 rpm เป็น 1600 rpm และกรณีสุดท้าย กรณีที่ 9 พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.055 โดยที่ระยะเวลาในการลู่เข้ามากที่สุดมีค่าประมาณ 3.25 วินาที ซึ่งอยู่ในช่วงที่ค่าความเร็วรอบอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 2100 rpm เป็น 1600 rpm ดังแสดงในรูปที่ 6.21 จากผลการทดสอบในข้างต้น สังเกตได้ว่า กรณีที่ 7 มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยที่สุด ดังนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงกำหนดให้ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต e_S และเอาต์พุต d_B ของตัวควบคุมแบบฟัซซีที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีค่าเท่ากับกรณีที่ 7 อย่างไรก็ตาม แม้ว่าระยะเวลาในการลู่เข้าบางช่วงจะมีค่ามาก แต่เมื่อทำการทดสอบเพิ่มเติมด้วยการทยอยปรับลดค่าความเร็วรอบอ้างอิงจาก 2550 rpm เป็น 1600 rpm และการปรับเพิ่มค่าความเร็วรอบอ้างอิงจาก

1600 rpm เป็น 2550 rpm อย่างช้า ๆ ดังแสดงในรูปที่ 6.22 จะเห็นได้ว่า ค่าความเร็วรอบจริงลู่เข้าตามค่าความเร็วรอบอ้างอิงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมแบบฟัซซีที่ได้จากการออกแบบมีสมรรถนะการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิผล



รูปที่ 6.22 ผลการทดสอบการลู่ข้าวของความเร็วรอบจริงกับความเร็วรอบอ้างอิง ในกรณีที่ทำการทยอยปรับเปลี่ยนค่าความเร็วรอบอ้างอิง

สำหรับระยะเวลาในการประมวลผลของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในหนึ่งรอบการทำงานแสดงได้ดังรูปที่ 6.23 จากรูปดังกล่าว จะเห็นได้ว่า บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ 1 ซึ่งทำหน้าที่ค้นหาค่าความถี่ที่เหมาะสม ได้ใช้เวลาในการประมวลผลทั้งหมด ประมาณ 30.08 ms โดยที่ใช้ระยะเวลาในการแปลงค่าความเร็วรอบอ้างอิงจากแอนาล็อกเป็นดิจิตอลประมาณ 30 μs คำนวณหาค่าความถี่ที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน ประมาณ 30 ms และสุดท้ายดำเนินการปรับเปลี่ยนความถี่ และสร้างสัญญาณพัลส์ป้อนให้กับวงจรอินเวอร์ ประมาณ 50 μs ในขณะที่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ 2 ใช้เวลาในการคำนวณหาค่าวัฏจักรหน้าที่ที่เหมาะสม ประมาณ 300.29 ms โดยที่ใช้ระยะเวลาในการแปลงค่าความเร็วรอบอ้างอิงจากแอนาล็อกเป็นประมาณ 30 μs คำนวณหาค่าความเร็วรอบจริงจากเซนเซอร์ประมาณ 300 ms คำนวณหาค่าวัฏจักรหน้าที่ที่เหมาะสมด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี ประมาณ 250 μs และสุดท้ายดำเนินการ

ปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรน้ำที่ และการสร้างสัญญาณพัลส์ป้อนให้กับวงจรแปลงผันแบบบัคก์ประมาณ 10 μs

Microcontroller 1		
A/D ($Speed_{reference}$) 30 μs	Energy saving algorithm 30 ms	Send d_f to inverter 50 μs

Microcontroller 2			
A/D ($Speed_{reference}$) 30 μs	Calculate $Speed_{actual}$ from sensor 300 ms	Fuzzy controller 250 μs	Send d_B to buck converter 10 μs

รูปที่ 6.23 ระยะเวลาในการประมวลผลของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

6.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้นำทฤษฎีพื้นฐานของฟัซซี วิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีสำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่งให้มีค่าตามต้องการ ร่วมกับกระบวนการปรับความถี่ของอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน ซึ่งการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์จะอาศัยการปรับเปลี่ยนค่ายอดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้กับมอเตอร์ จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ และยังแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์อย่างมีประสิทธิผล สังเกตได้จากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบจริงที่มีการลู่เข้าหาความเร็วรอบอ้างอิง สำหรับบทถัดไป บทที่ 7 จะนำเสนอผลการทดสอบการประจุพลังงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ การเปรียบเทียบผลการใช้กำลังงานไฟฟ้าอินพุตของมอเตอร์ระหว่างชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานกับวิธีการการควบคุมแบบอื่น ๆ ในการควบคุมอัตราการไหลของปั๊มน้ำหอยโข่ง และมีการนำเสนอถึงประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้ชุดขับเคลื่อนดังกล่าวโดยการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

บทที่ 7
การทดสอบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

7.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการทดสอบการประจุพลังงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ และการทดสอบการประหยัดพลังงานของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน และตัวควบคุมแบบฟัซซี โดยในบทนี้เรียกชุดขับเคลื่อนดังกล่าวว่า ชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน สำหรับการทดสอบการประจุพลังงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นการทดสอบเพื่อยืนยันว่าระบบดังกล่าวสามารถประจุพลังงานไฟฟ้าได้ตามที่ออกแบบไว้ ส่วนการทดสอบการประหยัดพลังงานของชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบด้วยการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่งเพื่อการควบคุมอัตราการไหลของน้ำภายในท่อ และทำการเปรียบเทียบข้อมูลทางพลังงานกับการควบคุมอัตราการไหลด้วยการปรับวาล์ว การปรับแรงดัน และการปรับอัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ เพื่อตรวจสอบว่าชุดขับเคลื่อนดังกล่าวสามารถประหยัดพลังงานได้จริง นอกจากนี้ในตอนท้าย ได้นำเสนอตัวอย่างการใช้งานชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานในสถานการณ์ต่าง ๆ ร่วมกับการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อแสดงให้เห็นถึงจุดเด่น และประโยชน์ที่ได้รับ

7.2 การทดสอบการประจุพลังงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

จากตัวอย่างการออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับชุดขับเคลื่อนปั๊มน้ำหอยโข่งไฟฟ้า โดยที่มอเตอร์ของปั๊มน้ำมีขนาดพิกัดเท่ากับ 0.5 แรงม้า และทำงานต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน (อธิบายรายละเอียดการออกแบบในหัวข้อที่ 5.10.4) พบว่า จะต้องใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 250 W จำนวน 2 แผง เครื่องควบคุมการชาร์จประจุแบตเตอรี่ที่มีขนาดพิกัดแรงดัน และกระแส เท่ากับ 48 V และ 20 A จำนวน 1 เครื่อง และแบตเตอรี่ที่มีขนาดพิกัดแรงดันเท่ากับ 12 V ที่มีค่าความจุพลังงานเท่ากับ 12 Ah ต่ออนุกรมกันจำนวน 4 ลูก สำหรับรูปแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เครื่องควบคุมการชาร์จประจุ และแบตเตอรี่ที่ได้จากการออกแบบแสดงได้ดังรูปที่ 7.1 ถึงรูปที่ 7.3 ตามลำดับ สำหรับสถานที่ทำการทดสอบการประจุพลังงานไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ทำการทดสอบ บนดาดฟ้าอาคาร

เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 3 การตรวจวัดค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และกำลังงานไฟฟ้าที่ถูกประจุลงแบตเตอรี่ แสดงได้ดังรูปที่ 7.4 และแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และกำลังงานไฟฟ้าที่ถูกประจุลงแบตเตอรี่ ได้ดังรูปที่ 7.5 โดยที่ P_{PV} คือ กำลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และ P_{Batt} คือ กำลังงานไฟฟ้าที่ถูกประจุลงแบตเตอรี่

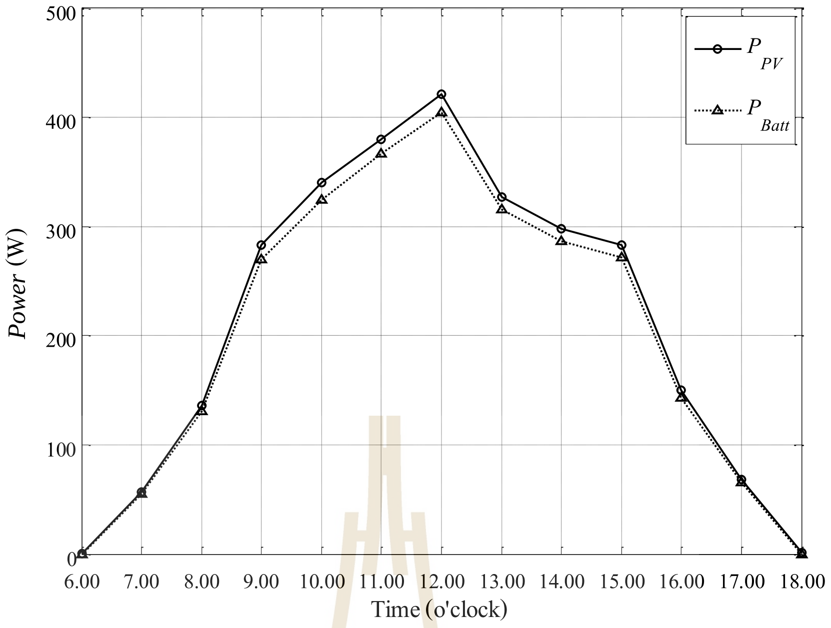
รูปที่ 7.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 250 W จำนวน 2 แผง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 7.2 เครื่องควบคุมการชาร์จประจุที่พิกัดแรงดันเท่ากับ 48 V และพิกัดกระแสเท่ากับ 20 A

รูปที่ 7.3 แบตเตอรี่พิกัดแรงดันเท่ากับ 12 V 75 Ah ต่ออนุกรมกัน 4 ลูก เพื่อเพิ่มระดับให้เป็น 48 V

รูปที่ 7.4 การวัดค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์
และกำลังงานไฟฟ้าที่ถูกประจุลงแบตเตอรี่



รูปที่ 7.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และกำลังงานไฟฟ้าที่ถูกประจุลงแบตเตอรี่

จากรูปที่ 7.5 เมื่อคำนวณหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ถูกประจุลงแบตเตอรี่จากพื้นที่ใต้กราฟของค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ถูกประจุลงแบตเตอรี่ พบว่า มีค่าประมาณ 2,633 W.hr ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าของพลังงานไฟฟ้าที่ได้เพียงพอแล้วสำหรับใช้ในการขับเคลื่อนปั๊มหอยโข่งไฟฟ้าที่มีขนาดพิกัดเท่ากับ 0.5 แรงม้า ที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน

7.3 การทดสอบชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน

สำหรับการทดสอบการประหยัดพลังงานของชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะทำการทดสอบด้วยการควบคุมอัตราการไหลของน้ำ และทำการเปรียบเทียบข้อมูลทางพลังงานระหว่างวิธีการควบคุมอัตราการไหลด้วยชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน (energy saving control) วิธีการปรับวาล์ว (valve control) การปรับแรงดัน (voltage control) และการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ (v/f control) โดยงานวิจัยวิยานิพนธ์จะทำการทดสอบที่อัตราการไหลในช่วง 40 ลิตรต่อนาที ถึง 76 ลิตรต่อนาที และข้อมูลทางพลังงานที่ทำการบันทึก ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าอินพุต (V_{AC}) กระแสไฟฟ้าอินพุต (I_{AC}) กำลังงานไฟฟ้าอินพุต (P_{in}) และค่าตัวประกอบกำลัง (power factor: pf) การอธิบายรายละเอียดการควบคุมอัตราการไหลของแต่ละวิธีเป็นดังต่อไปนี้

การควบคุมอัตราการไหลด้วยการปรับวาล์วน้ำ เป็นการควบคุมอัตราการไหลโดยตรงจากผู้ใช้งาน ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ทำการทดสอบโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับมอเตอร์ของปั๊มน้ำที่ค่าพิกัด (220 V, 50 Hz) และทำการควบคุมอัตราการไหลด้วยการปรับจากวาล์ว โครงสร้างฮาร์ดแวร์ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่งสำหรับการควบคุมอัตราการไหลด้วยการปรับวาล์ว แสดงได้ดังรูปที่ 7.6 ส่วนขั้นตอนการควบคุมอัตราการไหลด้วยการปรับวาล์วแสดงได้ดังแผนภาพในรูปที่ 7.7 จากรูปดังกล่าว ขั้นแรกทำการเปิดสวิตช์ของแหล่งจ่าย ทั้งระบบ หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการเดินเครื่องมอเตอร์ โดยทำการคงค่าแรงดันไว้ที่ 220 V และคงค่าความถี่ไว้ที่ 50 Hz ($V_{command}$ = 220 V และ $f_{command}$ = 50 Hz) ลำดับถัดมาทำการเลือกค่าอัตราการไหลที่ต้องการ แล้วทำการตรวจสอบค่าอัตราการไหลจากหน้าจอของเซนเซอร์วัดอัตราการไหล ว่ามีค่าเท่ากับค่าอัตราการไหลที่ต้องการหรือไม่ ถ้าค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์มีค่าเท่ากับค่าที่ต้องการไม่ต้องทำการปรับวาล์ว แต่ถ้ายังไม่เท่าให้ทำการตรวจสอบเพิ่มเติมว่าค่าที่อ่านได้มีค่ามากกว่าค่าที่ต้องการหรือไม่ ถ้าค่าที่อ่านได้มีค่ามากกว่าค่าที่ต้องการให้ทำการปรับวาล์วเพื่อลดอัตราการไหลจนกว่าอัตราการไหลจะมีค่าเท่ากับค่าที่ต้องการ (ตำแหน่งวาล์วแสดงในดังรูปที่ 7.6) ถ้าไม่ใช่ ให้ทำการปรับวาล์วเพื่อเพิ่มอัตราการไหลจนกว่าค่าอัตราการไหลจะมีค่าเท่ากับค่าที่ต้องการ ดำเนินการเก็บข้อมูลทางพลังงานเมื่อได้ค่าอัตราการไหลที่ต้องการ แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 7.1

สำหรับการควบคุมอัตราการไหลด้วยการปรับแรงดัน เป็นการควบคุมอัตราการไหลด้วยปรับเปลี่ยนค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จากการปรับเปลี่ยนค่ายอดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้มอเตอร์ โดยที่โครงสร้างฮาร์ดแวร์ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสสำหรับการควบคุมอัตราการไหลด้วยการปรับแรงดัน แสดงได้ดังรูปที่ 7.6 ส่วนขั้นตอนการควบคุมอัตราการไหลด้วยวิธีดังกล่าวแสดงได้ดังแผนภาพในรูปที่ 7.8 จากรูปดังกล่าว ขั้นแรกจะทำการเปิดสวิตช์ของแหล่งจ่ายทั้งระบบ หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการเดินเครื่องมอเตอร์ และทำการคงค่าความถี่ไว้ที่ค่าพิกัด ($f_{command}$ = 50 Hz) และทำการปรับแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากับ 220 V ($V_{command}$ = 220 V) เพื่อใช้เป็นค่าเริ่มต้น ลำดับถัดมาทำการเลือกค่าอัตราการไหลที่ต้องการ แล้วทำการตรวจสอบค่าอัตราการไหลจากหน้าจอของเซนเซอร์วัดอัตราการไหลว่ามีค่าเท่ากับค่าอัตราการไหลที่ต้องการหรือไม่ ถ้าค่าที่อ่านได้มีค่าเท่ากับค่าอัตราการไหลที่ต้องการแล้วไม่ต้องทำการปรับแรงดัน แต่ถ้าค่าที่อ่านได้ยังไม่เท่าให้ทำการตรวจสอบเพิ่มเติม ว่ามีค่ามากกว่าค่าที่ต้องการหรือไม่ ถ้าพบว่าค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์มีค่ามากกว่าค่าที่ต้องการให้ทำการปรับลดค่ายอดแรงดันไฟฟ้าด้วยการปรับลด $V_{command}$ เพื่อลดค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จนกว่าอัตราการไหลจะมีค่าเท่ากับค่าที่ต้องการ หรือถ้าไม่ใช่ให้ทำการปรับเพิ่มค่ายอดแรงดันด้วยการปรับเพิ่ม $V_{command}$ เพื่อเพิ่มค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จนกว่าอัตราการไหลจะมีค่าเท่ากับค่าที่ต้องการ

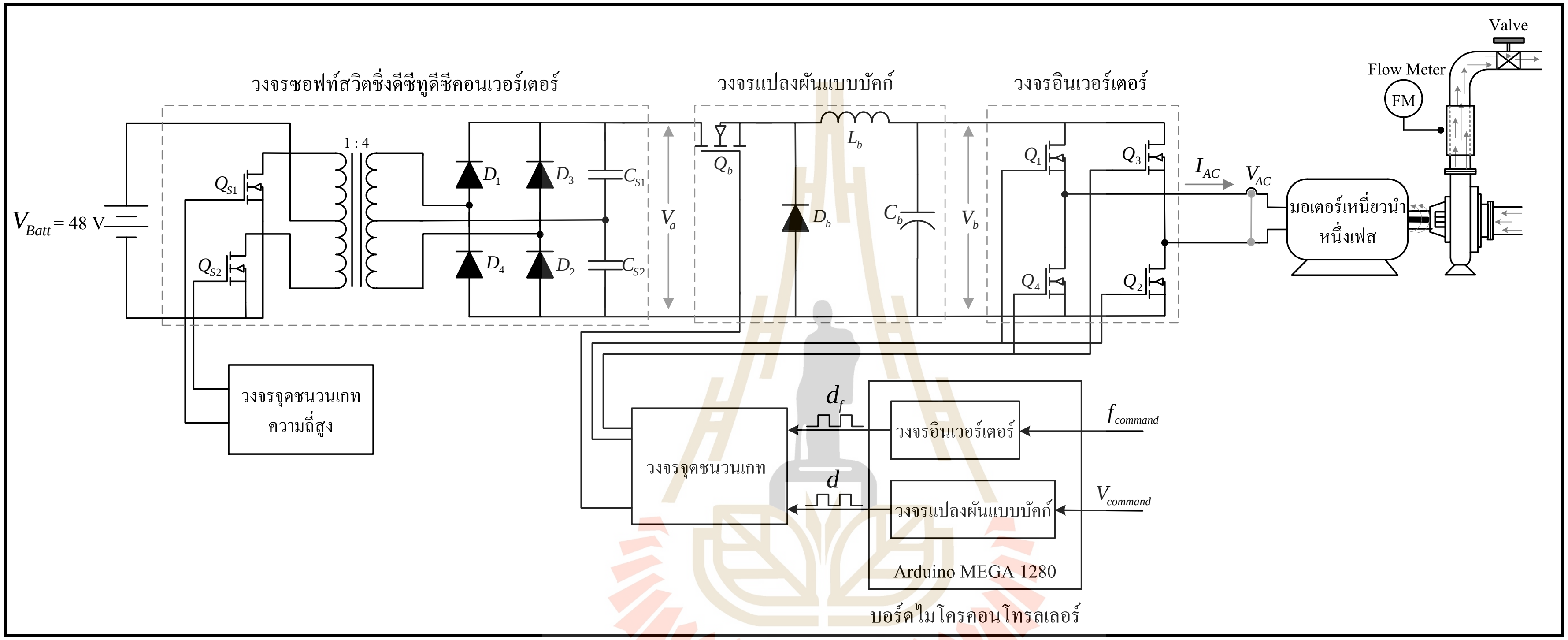
ดำเนินการเก็บข้อมูลทางพลังงานเมื่อได้ค่าอัตราการไหลที่ต้องการ ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 7.1

ส่วนการควบคุมอัตราการไหลด้วยการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ เป็นการควบคุมอัตราการไหลด้วยการปรับเปลี่ยนค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยที่ทำการปรับเปลี่ยนค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จากการปรับค่าแรงดัน และความถี่พร้อมกัน ที่อัตราส่วนเท่ากับ 220 V : 50 Hz (ค่าของแรงดัน และความถี่ที่พิกัดของมอเตอร์) แสดงโครงสร้างฮาร์ดแวร์ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสสำหรับการควบคุมอัตราการไหลด้วยการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ ได้ดังรูปที่ 7.6 และแสดงแผนภาพขั้นตอนการควบคุมอัตราการไหลด้วยวิธีการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คง ได้ดังรูปที่ 7.9 จากรูปดังกล่าว ขั้นแรกจะทำการเปิดสวิตช์ของแหล่งจ่ายทั้งระบบ หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการเดินเครื่องมอเตอร์ และทำการปรับค่าแรงดัน และความถี่ไว้ที่ 220 V และ 50 Hz ($V_{command}$ = 220 V และ $f_{command}$ = 50 Hz) เพื่อใช้เป็นค่าเริ่มต้น ลำดับถัดมาทำการเลือกค่าอัตราการไหลที่ต้องการ และทำการตรวจสอบค่าอัตราการไหลจากหน้าจอของเซนเซอร์วัดอัตราการไหลว่ามีค่าเท่ากับค่าที่ต้องการหรือไม่ ถ้าค่าที่อ่านได้มีค่าเท่ากับค่าอัตราการไหลที่ต้องการ ไม่ต้องทำการปรับค่าแรงดัน และความถี่ แต่ถ้าค่าที่อ่านได้ยังไม่เท่ากับค่าที่ต้องการให้ทำการตรวจสอบเพิ่มเติมว่ามีค่ามากกว่าค่าที่ต้องการหรือไม่ ถ้าพบว่าค่าที่อ่านได้มีค่ามากกว่าค่าอัตราการไหลที่ต้องการให้ทำการปรับลดค่าแรงดันไฟฟ้า และค่าความถี่ด้วยการปรับลด $V_{command}$ และ $f_{command}$ (ที่อัตราส่วน 220 V : 50 Hz) เพื่อลดค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จนกว่าอัตราการไหลที่อ่านได้มีค่าเท่ากับค่าที่ต้องการ หรือถ้าไม่ใช่ให้ทำการปรับเพิ่มค่าแรงดัน และค่าความถี่ด้วยการปรับเพิ่ม $V_{command}$ และ $f_{command}$ (ที่อัตราส่วน 220 V : 50 Hz) เพื่อเพิ่มค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จนกว่าค่าอัตราการไหลที่อ่านได้มีค่าเท่ากับค่าที่ต้องการ ดำเนินการเก็บข้อมูลทางพลังงานเมื่อได้ค่าอัตราการไหลที่ต้องการ ผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 7.1

ลำดับสุดท้าย การควบคุมอัตราการไหลด้วยอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน เป็นการควบคุมอัตราการไหลด้วยการปรับเปลี่ยนค่าความเร็วรอบมอเตอร์ โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จากการปรับเปลี่ยนค่าความเร็วรอบอ้างอิงที่ป้อนให้กับชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 7.10 ซึ่งชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานจะทำหน้าที่ควบคุมค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ให้มีค่าลู่เข้าหาค่าความเร็วรอบอ้างอิง ด้วยการปรับเปลี่ยนค่าความถี่ และแรงดันให้เหมาะสมตามกระบวนการประมวลผลของอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน และตัวควบคุมแบบฟัซซี แผนภาพการทำงานของชุดขับเคลื่อนดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 7.11 จากรูปดังกล่าว จะเห็นได้ว่า ขั้นแรกจะทำการเปิดสวิตช์ของแหล่งจ่ายทั้งระบบ หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการเดินเครื่องมอเตอร์ ลำดับถัดมาดำเนินการป้อนค่าความเร็วรอบอ้างอิงให้กับชุดขับเคลื่อนดังกล่าวด้วยการปรับเปลี่ยนขนาดแรงดันที่ป้อนให้กับ

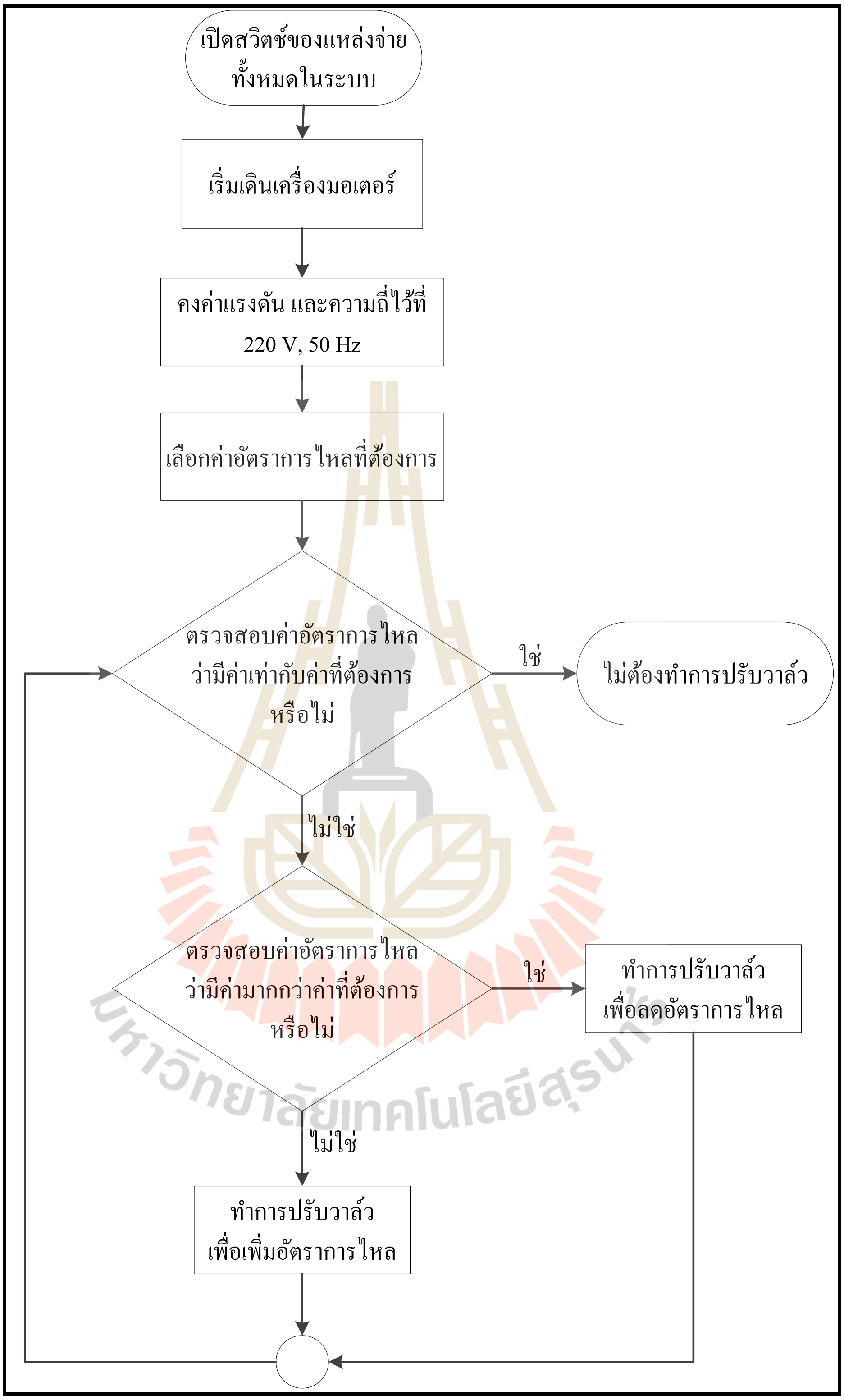
บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ลำดับถัดมารับค่าความเร็วรอบอ้างอิง และป้อนค่าดังกล่าวให้กับอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานเพื่อคำนวณค่าความถี่ที่เหมาะสม และทำการปรับค่าความถี่ด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ หลังจากนั้นทำการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วรอบว่ามีค่ามากกว่า ± 10 rpm หรือไม่ ถ้าไม่ใช่ กลับไปปรับค่าความเร็วรอบอ้างอิงใหม่ แต่ถ้าใช่ตัวควบคุมแบบฟัซซีจะทำการคำนวณหาค่ายอดแรงดันที่เหมาะสม และทำการปรับค่ายอดแรงดันด้วยวงจรแปลงผันแบบบัคก์จนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วรอบจะมีค่าน้อยกว่า ± 10 rpm (โปรแกรมการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการการทำงานดังกล่าว แสดงในภาคผนวก ง.) สำหรับขั้นตอนการควบคุมอัตราการไหลด้วยชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานแสดงได้ดังแผนภาพในรูปที่ 7.12 จากรูปดังกล่าว ขั้นแรกจะทำการเปิดสวิตช์ของแหล่งจ่ายทั้งระบบ หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการเดินเครื่องมอเตอร์ และทำการปรับค่าความเร็วรอบอ้างอิง ($Speed_{reference}$) ให้มีค่า เท่ากับ 2700 rpm เพื่อใช้เป็นค่าเริ่มต้น ลำดับถัดมาทำการเลือกค่าอัตราการไหลที่ต้องการ และดำเนินการตรวจสอบค่าอัตราการไหลจากหน้าจอของเซนเซอร์วัดอัตราการไหลว่ามีค่าเท่ากับค่าที่ต้องการหรือไม่ ถ้าค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์มีค่าเท่ากับค่าอัตราการไหลที่ต้องการ ไม่ต้องทำการปรับค่าความเร็วรอบอ้างอิง แต่ถ้าค่าที่อ่านได้ยังไม่เท่ากับค่าที่ต้องการให้ทำการตรวจสอบเพิ่มเติมว่าค่าที่อ่านได้มีค่ามากกว่าค่าที่ต้องการหรือไม่ ถ้าค่าที่อ่านได้มีค่ามากกว่าค่าที่ต้องการให้ทำการปรับลดค่าความเร็วรอบอ้างอิง เพื่อลดค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จนกว่าอัตราการไหลจะมีค่าเท่ากับค่าที่ต้องการ หรือถ้าไม่ใช่ให้ทำการปรับเพิ่มค่าความเร็วรอบอ้างอิง เพื่อเพิ่มค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จนกว่าค่าอัตราการไหลจะมีค่าเท่ากับค่าที่ต้องการ ดำเนินการเก็บข้อมูลทางพลังงานเมื่อได้ค่าอัตราการไหลที่ต้องการ ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 7.1

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

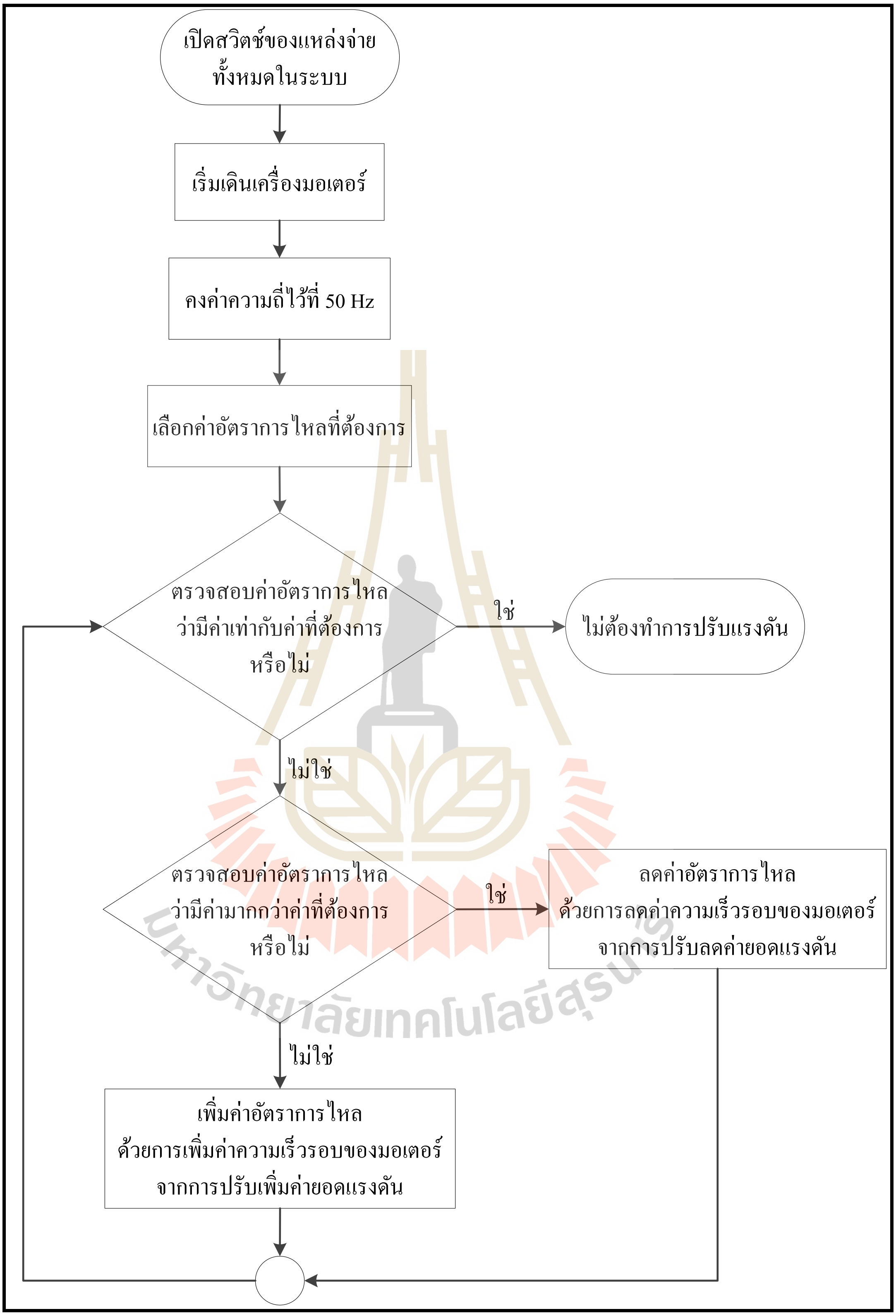


รูปที่ 7.6 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่งสำหรับการควบคุมอัตราการไหลด้วยการปรับวาล์ว การปรับแรงดัน และควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่

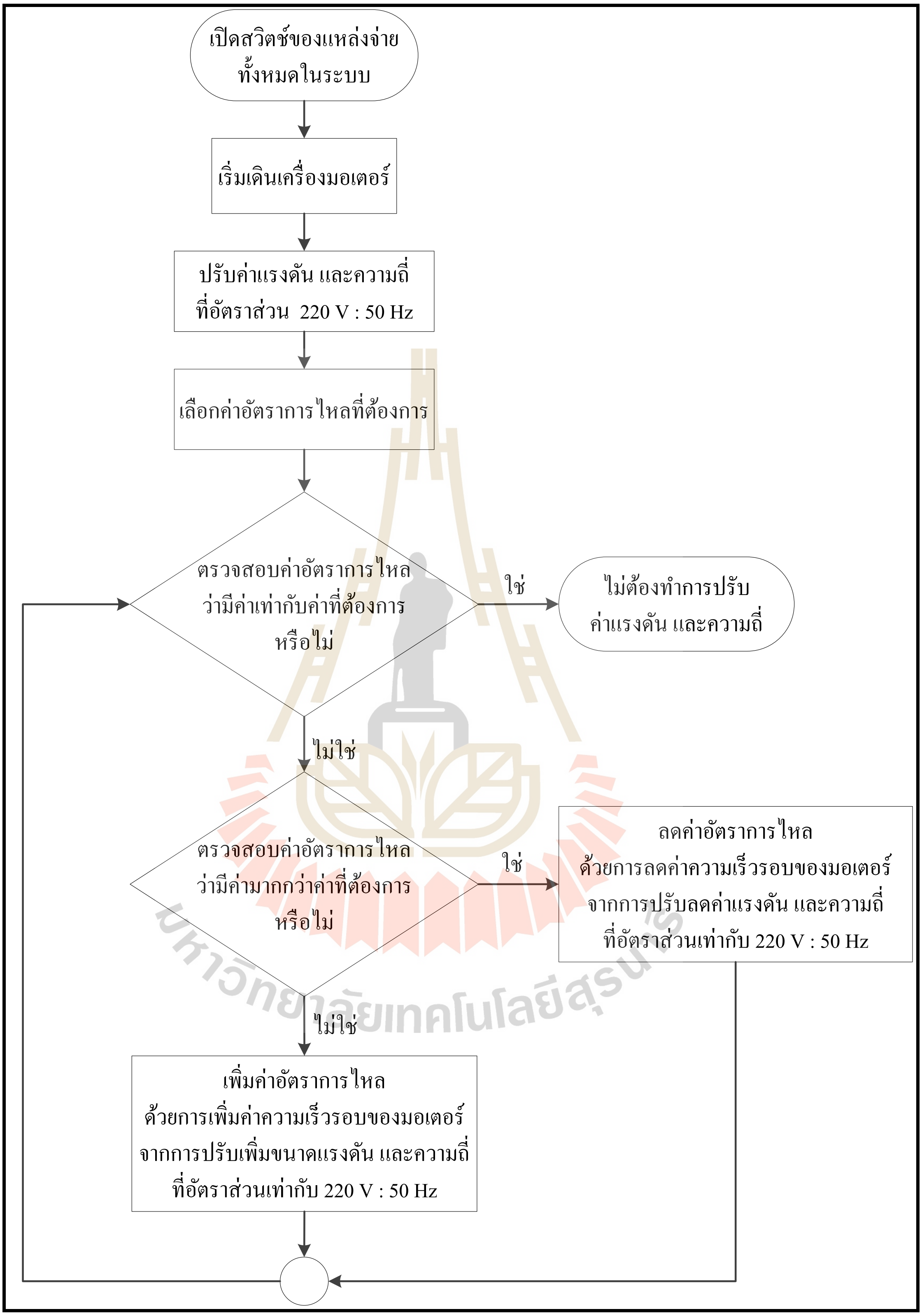
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



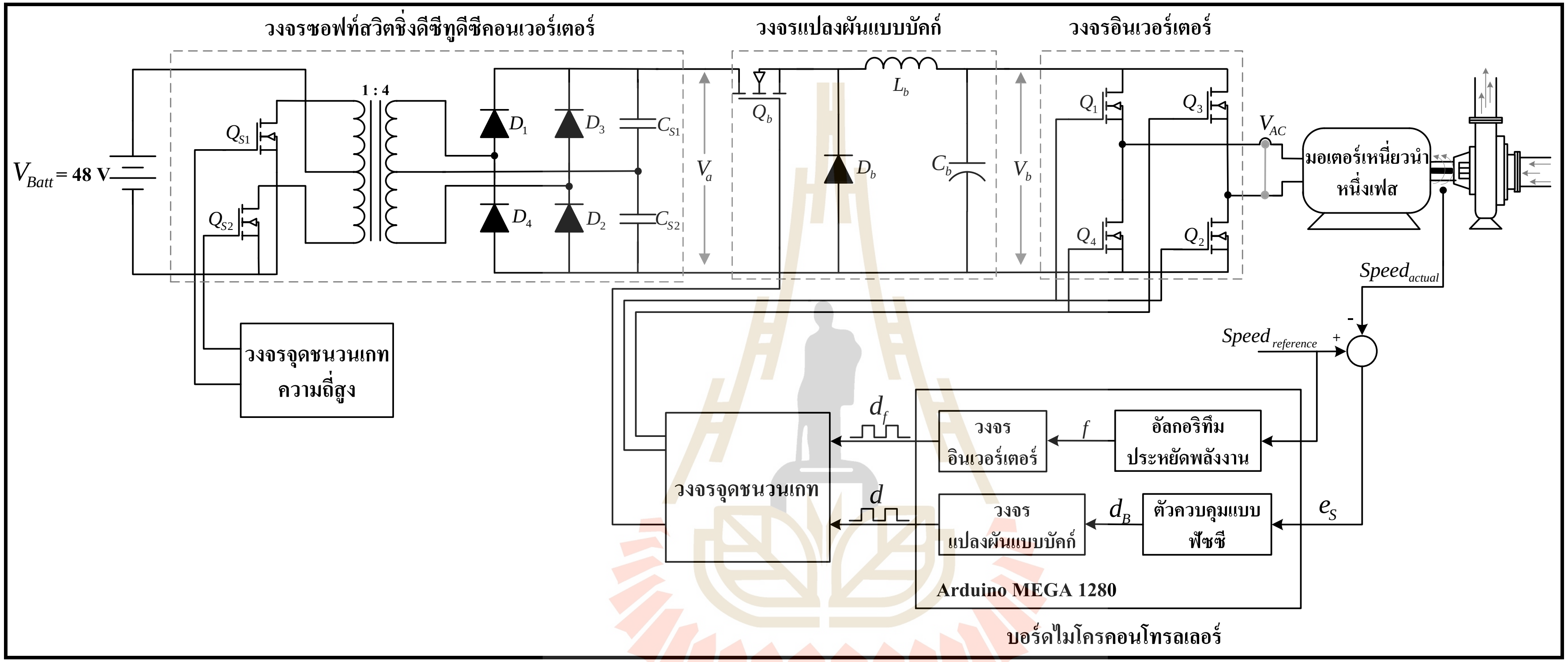
รูปที่ 7.7 แผนภาพวิธีการควบคุมอัตราการไหลด้วยการปรับวาล์ว



รูปที่ 7.8 แผนภาพวิธีการควบคุมอัตราการไหลด้วยการปรับแรงดัน

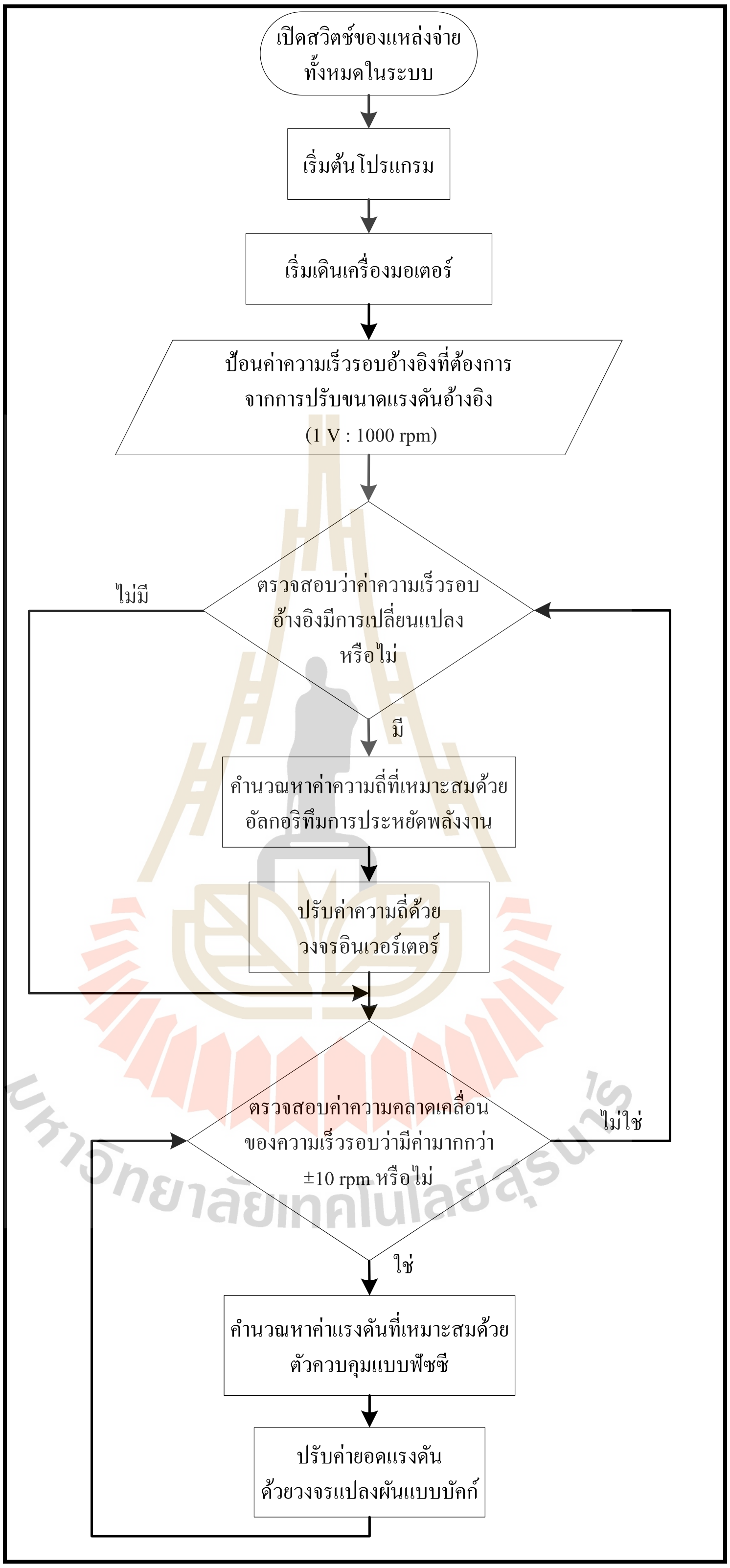


รูปที่ 7.9 แผนภาพวิธีการควบคุมอัตราการไหล ด้วยการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่



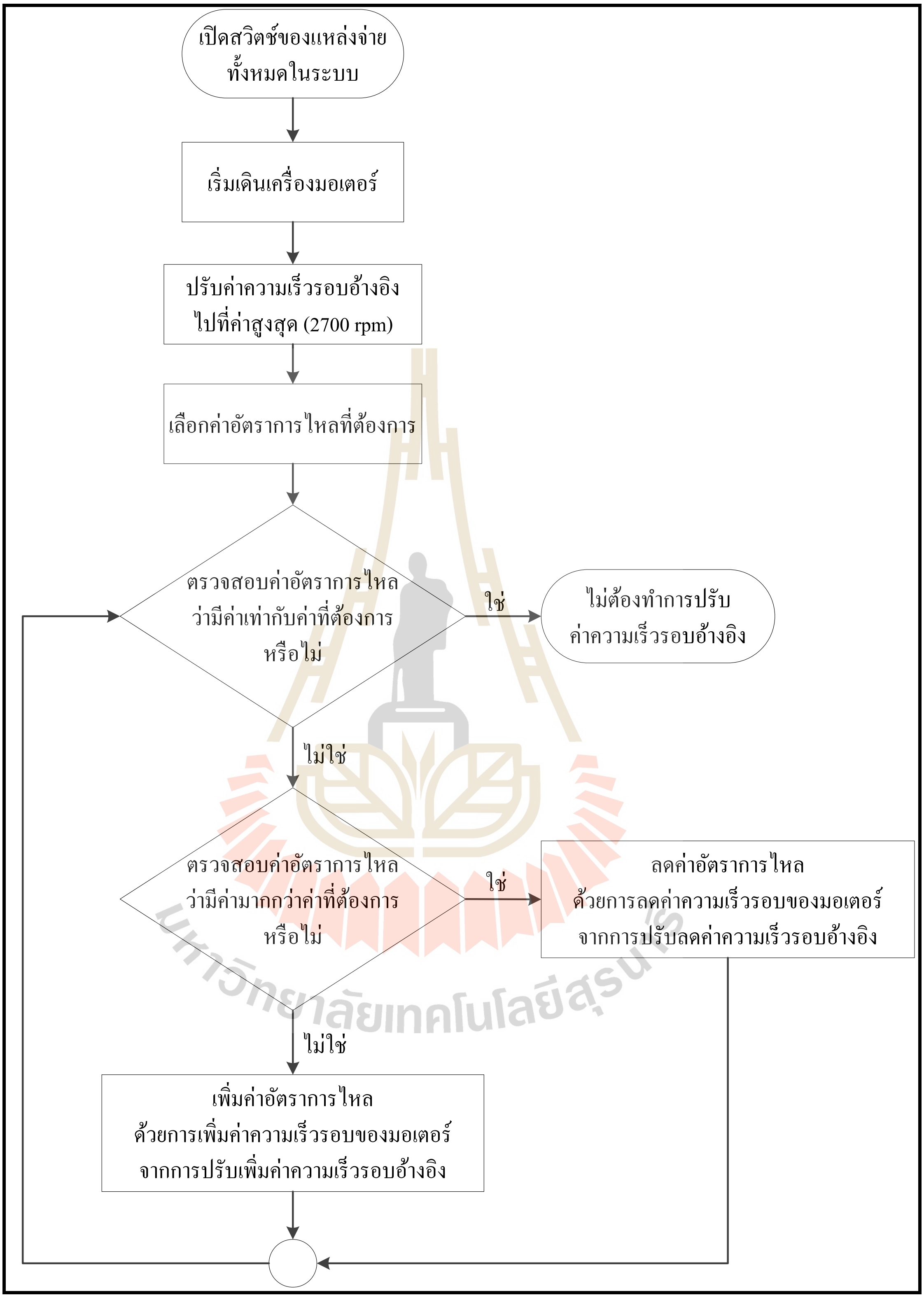
รูปที่ 7.10 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่งที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน และตัวควบคุมแบบฟัซซี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 7.11 แผนภาพการทำงานของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส
ที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน และตัวควบคุมแบบฟัซซี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 7.12 แผนภาพวิธีการควบคุมอัตราการไหลด้วยชุดขับเคลื่อน
ที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน

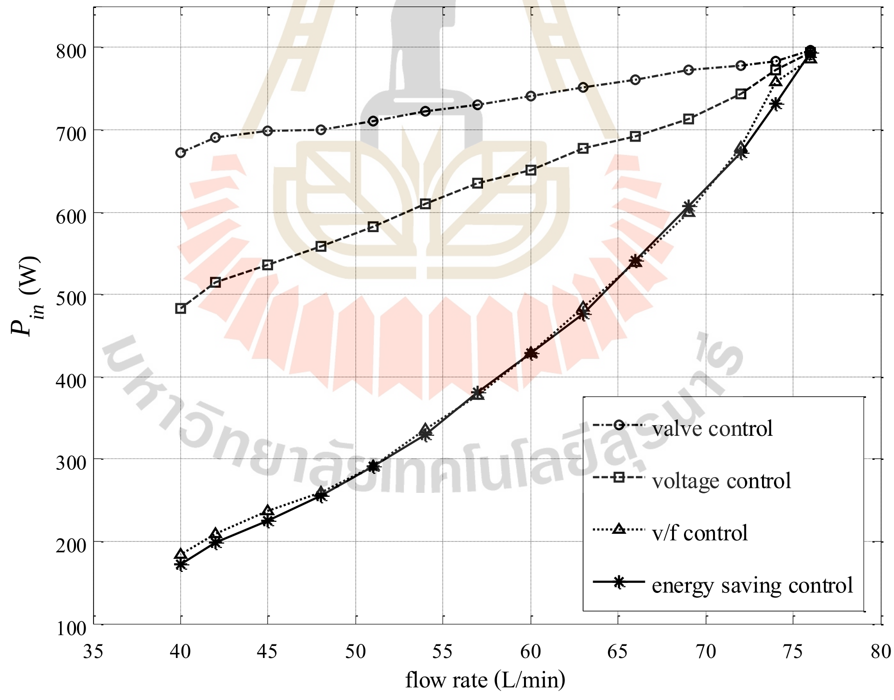
ตารางที่ 7.1 ข้อมูลทางพลังงานในการควบคุมอัตราการไหล

Flow rate	Valve control					Voltage control					V/f control					Energy saving control				
(L/min)	V_{AC}	f	I_{AC}	P_{in}	pf	V_{AC}	f	I_{AC}	P_{in}	pf	V_{AC}	f	I_{AC}	P_{in}	pf	V_{AC}	f	I_{AC}	P_{in}	pf
76			3.90	796.2	0.93	220		3.90	793.2	0.93	220	50.0	3.85	786.2	0.92	220	50.0	3.89	793.2	0.93
74			3.85	782.9	0.93	211		3.89	772.8	0.94	217	49.5	3.73	757.8	0.93	219	49.1	3.69	731.5	0.93
72			3.78	777.4	0.93	202		3.87	743.7	0.95	209	47.7	3.51	678.5	0.92	210	47.2	3.41	671.9	0.92
69			3.75	772.8	0.93	192		3.86	713.3	0.96	199	45.5	3.27	599.2	0.92	199	45.5	3.30	607.5	0.92
66			3.73	760.1	0.92	185		3.88	691.4	0.96	191	43.2	3.08	538.1	0.91	188	44.1	3.10	541.3	0.93
63			3.71	751.8	092	180		3.90	677.5	0.96	181	40.2	2.91	484.4	0.92	176	42.1	2.91	476.9	0.93
60	220	50	3.65	740.8	0.91	174	50	3.86	651.0	0.96	174	39.2	2.75	429.1	0.90	167	40.4	2.75	428.5	0.93
57			3.61	730.8	0.91	170		3.88	635.5	0.96	163	37.2	2.58	376.6	0.89	156	38.4	2.61	380.7	0.93
54			3.59	722.5	0.91	165		3.82	609.3	0.96	153	35.2	2.42	335.6	0.90	144	37.1	2.45	329.1	0.93
51			3.53	710.0	0.91	161		3.74	582.8	0.97	145	33.1	2.32	291.1	0.87	135	35.2	2.31	290.7	0.93
48			3.52	700.4	0.90	156		3.69	558.0	0.97	137	31.4	2.23	259.5	0.85	124	33.4	2.20	255.4	0.93
45			3.50	699.1	0.90	152		3.65	535.3	0.96	129	29.2	2.20	236.8	0.83	117	31.7	2.09	224.5	0.92
42			3.48	690.7	0.89	148		3.60	514.8	0.96	120	27.3	2.09	208.9	0.83	106	29.9	1.98	197.9	0.93
40			3.39	672.0	0.89	143		3.51	482.8	0.96	112	25.3	2.04	183.5	0.80	98	28.3	1.89	172.6	0.93

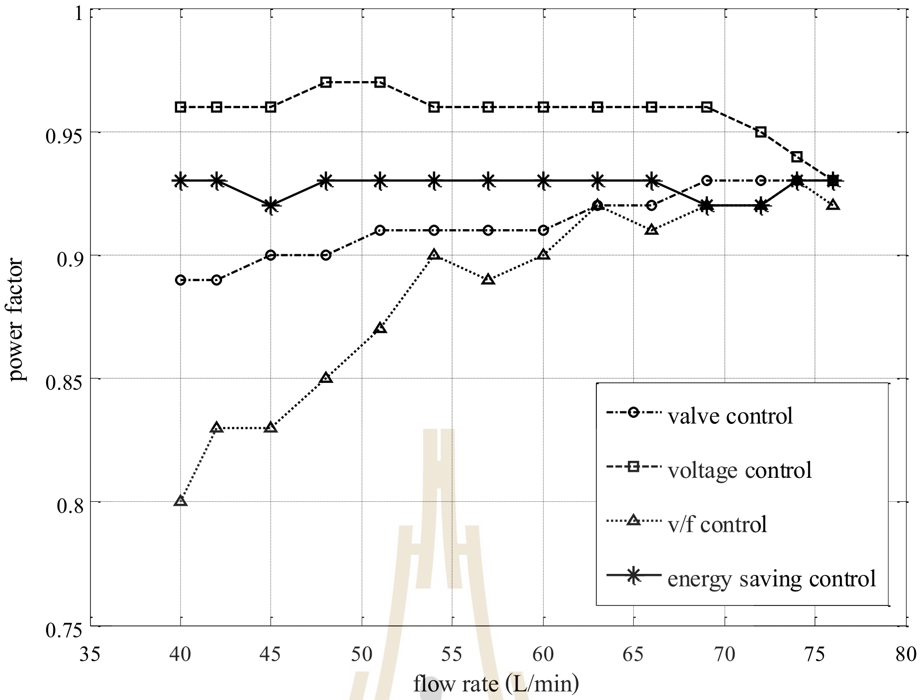
จากผลการทดสอบในตารางที่ 7.1 สามารถคำนวณหาค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ ($Speed_{actual}$) ได้จากผลคูณระหว่างอัตราการไหล ($flow$) กับค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบต่ออัตราการไหล (k_p) ดังแสดงในสมการที่ (7-1) โดยที่ k_p มีค่าเท่ากับ 35.12 ค่าดังกล่าวสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วรอบกับค่าอัตราการไหล (อธิบายเพิ่มเติมในภาคผนวก จ.) ทั้งนี้จะต้องทำการคำนวณค่าดังกล่าวใหม่ เมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของปั๊มหอยโข่ง

$$N_m = k_p \cdot flow \tag{7-1}$$

<u>หมายเหตุ</u> สมการที่ (7-1) สามารถใช้คำนวณหาค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ได้เฉพาะกรณีที่ทำการควบคุมอัตราการไหลด้วยการปรับแรงดัน การควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ และการใช้อัลกอริทึมการประหยัดพลังงานเท่านั้น เนื่องจากการควบคุมอัตราการไหลด้วยวิธีการดังกล่าวเป็นการควบคุมอัตราการไหลด้วยการปรับเปลี่ยนค่าความเร็วรอบของมอเตอร์



รูปที่ 7.13 กราฟเปรียบเทียบกำลังงานไฟฟ้าอินพุตของการควบคุมอัตราการไหลทั้ง 4 วิธี



รูปที่ 7.14 กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังของการควบคุมอัตราการไหลทั้ง 4 วิธี

จากผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 7.1 เมื่อทำการพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่ากำลังงานไฟฟ้าอินพุตของวิธีการควบคุมอัตราการไหลทั้ง 4 วิธี ดังแสดงในรูปที่ 7.13 สังเกตได้ว่าค่าของกำลังงานไฟฟ้าอินพุตจากการควบคุมอัตราการไหลด้วยระบบขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานมีค่าน้อยกว่าวิธีอื่น และยังมีแนวโน้มที่ลดลงเรื่อย ๆ ตามการลดลงของค่าอัตราการไหล โดยเฉลี่ยแล้ว พบว่า การควบคุมอัตราการไหลด้วยชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานมีการใช้กำลังงานไฟฟ้าอินพุตน้อยกว่าการปรับวาล์ว การปรับแรงดันไฟฟ้า และการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ ประมาณ 41.98 34.95 และ 1.86 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังสังเกตได้ว่า ที่อัตราการไหล เท่ากับ 40 ลิตรต่อนาที ชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานสามารถประหยัดพลังงานได้สูงสุดถึง 74.31 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการปรับวาล์ว 64.25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการปรับแรงดัน และ 5.94 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ จากผลการทดสอบที่ได้นำเสนอข้างต้น แสดงให้เห็นว่าชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้จริง อย่างไรก็ตาม แม้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตจากการควบคุมอัตราการไหลด้วยการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่จะมีค่าที่ใกล้เคียงกับการใช้อัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน แต่ค่าตัวประกอบกำลังของการใช้อัลกอริทึมการประหยัดพลังงานมีค่ามากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 7.14 นอกจากนี้

สังเกตได้ว่า เมื่ออัตราการไหลมีค่าลดลง ค่าของแรงดัน และกระแสไฟฟ้าอินพุตของการควบคุมอัตราการไหลด้วยอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานมีค่าน้อยกว่าการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ เช่น ที่อัตราการไหล 40 ลิตรต่อนาที กรณีที่ใช้อัลกอริทึมการประหยัดพลังงานมีค่าของแรงดัน และกระแสไฟฟ้าอินพุต เท่ากับ 98V และ1.89A ในขณะที่การควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่มีค่าของแรงดัน และกระแสไฟฟ้าอินพุต เท่ากับ 112 V และ 2.04 A ซึ่งการลดลงของแรงดัน และกระแสไฟฟ้าส่งผลให้อุณหภูมิของมอเตอร์มีค่าลดลง ในขณะที่อุณหภูมิมีผลต่อการเสื่อมสภาพของมอเตอร์ เช่น การเสื่อมสภาพของฉนวน (Frontenac, N.Y., 1909) และการเสื่อมสภาพของลูกปืน (Samuel, A.M., 1937) เป็นต้น เพราะฉะนั้นมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยระบบขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานจึงมีอายุการใช้งานที่นานกว่า

7.4 ตัวอย่างการนำชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานไปใช้งาน

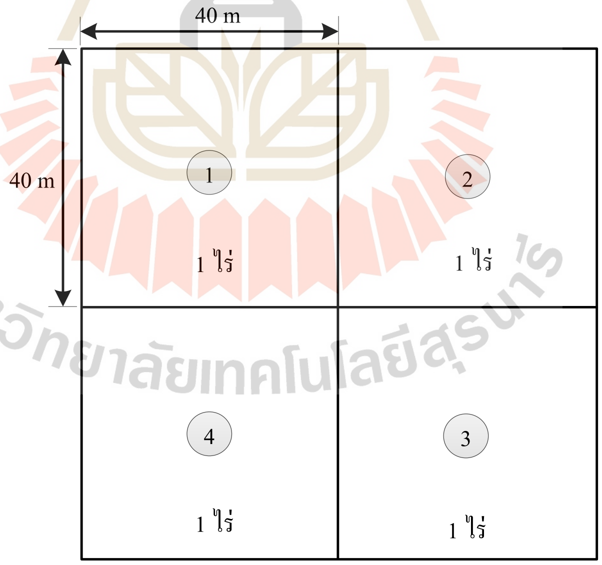
จากการนำเสนอการทดสอบการประหยัดพลังงานของชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานในหัวข้อที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่า ชุดขับเคลื่อนดังกล่าวสามารถประหยัดพลังงานได้จริง และสามารถควบคุมอัตราการไหลได้ตามต้องการ ทั้งนี้เพื่อแสดงให้เห็นถึงจุดเด่น และประโยชน์ที่จะได้รับจากการใช้งานชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการสมมติสถานการณ์ที่สามารถนำชุดขับเคลื่อนดังกล่าวไปใช้งานได้จริง อีกทั้ง ได้ดำเนินการเปรียบเทียบผลการใช้พลังงาน และทำการวิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างการใช้ชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน กับการให้มอเตอร์ทำงานที่พิกัดแล้วทำการควบคุมด้วยวาล์ว ทั้งนี้เนื่องจากวิธีควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วเป็นที่นิยมของเกษตรกรโดยทั่วไป งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะทำการสมมติสถานการณ์อยู่ 3 กรณี ได้แก่ กรณีที่ผู้ใช้งานทราบปริมาณน้ำที่ต้องการต่อวัน กรณีที่ต้องการสูบน้ำเพื่อกักเก็บไว้ใช้ และสุดท้ายกรณีที่นำไปใช้งานกับระบบไฟฟ้าตามครัวเรือน โดยที่ปั๊มน้ำหอยโข่งไฟฟ้าที่ใช้ในสถานการณ์สมมติดังกล่าว คือ รุ่น ACH-375S ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะไม่พิจารณากำลังงานสูญเสียในระบบ และอ้างอิงผลการใช้กำลังงานไฟฟ้าจากตารางที่ 7.1

7.4.1 กรณีที่ผู้ใช้งานทราบปริมาณน้ำที่ต้องการต่อวัน

สำหรับกรณีที่ผู้ใช้งานทราบปริมาณน้ำที่ต้องการต่อวัน ในกรณีนี้ผู้ใช้งานจะทราบค่าของอัตราการไหล และระยะเวลาที่ต้องการ โดยทั่วไปสถานการณ์ดังกล่าวจะพบได้ในระบบการให้น้ำแบบน้ำหยด และแบบสปริงเกอร์ สำหรับระบบการให้น้ำที่พิจารณาในตัวอย่างนี้ คือ ระบบการให้น้ำแบบน้ำหยด เนื่องจากการให้น้ำแบบดังกล่าวผู้ใช้งานจะต้องควบคุมอัตราการไหล

ให้เหมาะสมกับขนาดของท่อน้ำหยด เพราะว่า ถ้าหากอัตราการไหลของน้ำภายในท่อมีค่ามากเกิน จะทำให้ให้แรงดันน้ำภายในท่อมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จึงอาจส่งผลทำให้ท่อแตก หรืออาจทำให้หัวน้ำหยดเกิดความเสียหายได้ โดยทั่วไปผู้ใช้งานจะทำการควบคุมอัตราการไหลด้วยการปรับวาล์ว และบางครั้งผู้ใช้งานจะต้องทำการระบายน้ำภายในท่อบางส่วนทิ้งไป เพื่อลดระดับแรงดันของน้ำภายในท่อ ในขณะเดียวกันมอเตอร์ของปั๊มน้ำยังคงทำงานที่พิกัดเช่นเดิม ซึ่งจะเห็นได้ว่าการควบคุมอัตราการไหลด้วยวิธีการดังกล่าวมีลักษณะการใช้กำลังงานไฟฟ้าที่มากเกินความจำเป็น สำหรับสถานการณ์สมมติแสดงได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่าง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสมมติสถานการณ์ว่ามีการปลูกพืชในพื้นที่ขนาด 4 ไร่ และเลือกวิธีการให้น้ำแบบน้ำหยด โดยกำหนดให้อัตราการไหลของน้ำภายในท่อไม่เกิน 51 ลิตรต่อนาที และมีการแบ่งพื้นที่สำหรับการให้น้ำเป็น 4 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 7.15 ซึ่งการให้น้ำในแต่ละครั้ง จะทำการให้น้ำครั้งละ 1 ไร่ต่อวัน เริ่มจากไร่ที่ 1 ไปจนถึงไร่ที่ 4 และกลับมาเริ่มที่ไร่ที่ 1 ใหม่ ทำแบบนี้ไปเรื่อย ๆ ($1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$) ในขณะที่การให้น้ำในแต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง และกำหนดให้แหล่งจ่ายของชุดขับเคลื่อนปั๊มน้ำเป็นระบบเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 7.15 หมายเลขพื้นที่สำหรับการให้น้ำพืชในแต่ละครั้ง

จากสถานการณ์ดังกล่าว เมื่อทำการเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการสูบน้ำในแต่ละครั้ง ระหว่างวิธีการปรับวาล์ว กับการใช้ชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน พบว่า วิธีการปรับด้วยวาล์วใช้พลังงานประมาณ 1,420 W.hr ต่อครั้ง (710 W × 2 hr) ในขณะที่

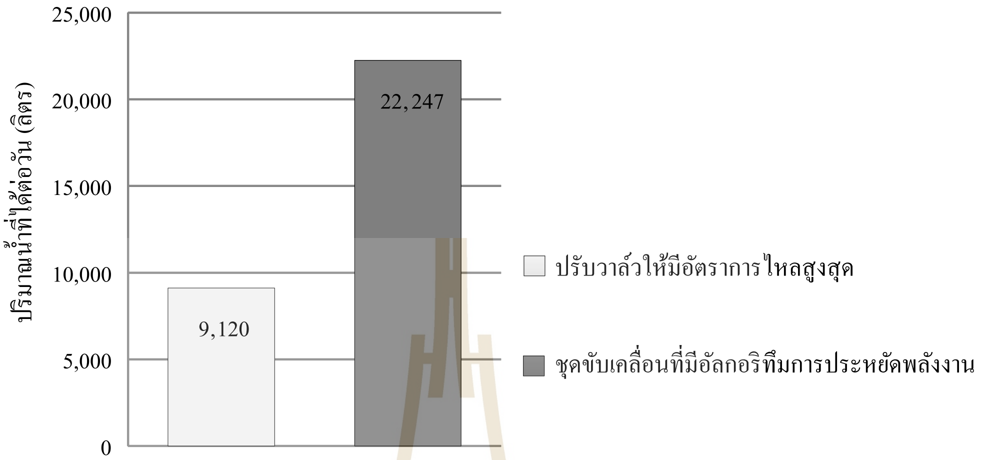
ชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานใช้พลังงานประมาณ 580 W.hr ต่อครั้ง (290 W × 2 hr) จากการคำนวณค่าพลังงานที่ใช้ต่อการให้น้ำหนึ่งครั้งของทั้ง 2 วิธี จะเห็นได้ว่า การควบคุมอัตราการไหลด้วยชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานใช้พลังงานน้อยกว่า การปรับวาล์ว ประมาณ 2.44 เท่า(1,420 W.hr / 580 W.hr) ซึ่งหมายถึง ขนาดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน สำหรับระบบที่ควบคุมอัตราการไหลด้วยชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานจะมีขนาดเล็กกว่าระบบที่ทำการควบคุมอัตราการไหลด้วยการปรับวาล์ว ดังนั้น จึงทำให้ค่าใช้จ่ายในส่วนของระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลงด้วยเช่นกัน

7.4.2 กรณีที่ต้องการสูบน้ำเพื่อกักเก็บไว้ใช้

กรณีที่ผู้ใช้งานมีความต้องการที่จะสูบน้ำเพื่อกักเก็บไว้ใช้ เป็นการสูบน้ำเพื่อเก็บไว้ใช้อุปโภค และบริโภค ในกรณีนี้โดยทั่วไปแล้วผู้ใช้งานจะให้ความสำคัญในเรื่องปริมาณน้ำที่ได้รับมากกว่าระยะเวลาที่ใช้ในการสูบ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงสมมติสถานการณ์ว่าผู้ใช้งานได้ทำการออกแบบให้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถประจุพลังงานได้เท่ากับ 1,600 W.hr ต่อวัน เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับปั๊มน้ำไฟฟ้าในกระบวนการสูบน้ำเพื่อเก็บไว้ใช้ในการอุปโภค และบริโภค

จากสถานการณ์ดังกล่าว สมมติให้มีการสูบน้ำด้วยวิธีการปรับวาล์ว และการใช้ชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน แสดงการคำนวณหาค่าปริมาณน้ำที่ได้จากวิธีการปรับวาล์ว และการใช้ชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานดังต่อไปนี้ สำหรับวิธีการปรับวาล์วจะเลือกพิจารณาที่อัตราการไหลสูงสุดของปั๊มน้ำที่อัตราการไหลเท่ากับ 76 ลิตรต่อนาที (เป็นการปรับวาล์วให้มีอัตราการไหลสูงสุด) ซึ่งพบว่า ที่กำลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 1,600 W.hr ต่อวัน สามารถใช้สูบน้ำเป็นเวลาต่อเนื่องได้ ประมาณ 2 ชั่วโมงต่อวัน (1,600 W.hr / 796 W) จะทำให้ได้น้ำในปริมาณเท่ากับ 9,120 ลิตรต่อวัน และในขณะเดียวกันวิธีการใช้ชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน ในกรณีนี้ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกพิจารณาที่อัตราการไหลเท่ากับ 40 ลิตรต่อนาที เนื่องจากมีการประหยัดพลังงานมากที่สุดที่อัตราการไหลค่าดังกล่าว จะเห็นได้ว่าที่กำลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 1,600 W.hr ต่อวัน สามารถใช้สูบน้ำเป็นระยะต่อเนื่อง ประมาณ 9.26 ชั่วโมงต่อวัน (1,600 W.hr / 172 W) เนื่องจากการสูบน้ำที่อัตราการไหลดังกล่าวใช้พลังงานเพียง 172 W จึงทำให้ได้น้ำในปริมาณเท่ากับ 22,247 ลิตรต่อวัน แสดงแผนภูมิของปริมาณน้ำที่ได้จากวิธีการสูบน้ำทั้ง 2 วิธี ได้ดังรูปที่ 7.16 จากรูปแผนภูมิดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ปริมาณน้ำที่ได้ต่อวันจากการสูบน้ำด้วยชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานมีค่ามากกว่าการปรับวาล์วให้มีอัตราการไหลสูงสุดประมาณ 2.43 เท่า

(22,247 ลิตร / 9,120 ลิตร) ซึ่งหมายความว่า ผู้ใช้งานได้น้ำในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นในขณะที่แหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้ามีขนาดเท่าเดิม



รูปที่ 7.16 แผนภูมิแสดงปริมาณน้ำที่ได้จากการสูบน้ำทั้ง 2 วิธี

7.4.3 กรณีที่นำชุดขับเคลื่อนมาใช้งานกับระบบไฟฟ้าตามครัวเรือน

เนื่องจากชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานสามารถควบคุมอัตราการไหลของน้ำได้ตามต้องการ จึงทำให้สามารถนำชุดขับเคลื่อนดังกล่าวมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย นอกจากใช้กับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว ยังสามารถนำมาใช้งานกับระบบไฟฟ้าตามครัวเรือน (220 V, 50 Hz) ได้ด้วยเช่นกัน โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะแสดงผลการเปรียบเทียบการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนปั๊มน้ำ ระหว่างกรณีที่ทำการเชื่อมต่อปั๊มน้ำไฟฟ้าโดยตรงกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าตามครัวเรือน กับกรณีที่นำชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานมาต่อขั้นระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าตามครัวเรือน หรือไฟบ้านกับปั๊มน้ำไฟฟ้า โดยสมมติสถานการณ์ว่าผู้ใช้งานได้มีการปลูกผักแบบไฮโดรโพนิคส์ (Hydroponics) และมีความต้องการที่จะควบคุมอัตราการไหลของน้ำในช่วงเวลากลางวัน และกลางคืนให้มีความสอดคล้องกับลักษณะความต้องการน้ำของพืชซึ่งกำหนดให้อัตราการไหลในช่วงเวลากลางวันมีค่าเท่ากับ 60 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลในช่วงเวลากลางคืนมีค่าเท่ากับ 40 ลิตรต่อนาที

จากสถานการณ์ดังกล่าว เมื่อพิจารณาการควบคุมอัตราการไหลด้วยการปรับวาล์วในขณะที่ปั๊มน้ำเชื่อมต่อโดยตรงกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าตามครัวเรือน พบว่า ในช่วงเวลากลางวัน (12 ชั่วโมง) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 60 ลิตรต่อนาที ใช้กำลังงานไฟฟ้าทั้งหมดประมาณ 7,392 W.hr ($616 \text{ W} \times 12 \text{ hr}$) และช่วงเวลากลางคืนที่อัตราการไหลเท่ากับ 40 ลิตรต่อนาที ใช้พลังงานทั้งหมด

ประมาณ 6,768 W.hr (564 W × 12 hr) (อ้างอิงผลการใช้กำลังงานไฟฟ้าจากการทดสอบเชื่อมต่อมอเตอร์ของปั๊มน้ำโดยตรงกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสในห้องปฏิบัติการณ์) ดังนั้น ในระยะเวลาหนึ่งวัน (24 ชั่วโมง) ใช้กำลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 14,160 W.hr (7,392 W.hr + 6,768 W.hr) หรือประมาณ 14.16 Unit (KW.hr) ต่อวัน ในขณะเดียวกัน เมื่อทำการควบคุมอัตราการไหลด้วยชุดขับเคลื่อนมีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน พบว่า กำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในช่วงเวลากลางวันมีค่าประมาณ 5,136 W.hr (428 W × 12 hr) และช่วงเวลากลางคืนมีค่าประมาณ 2,064 (172 W × 12 hr) ดังนั้น ภายในระยะเวลาหนึ่งวันใช้กำลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 7,200 W.hr (5,136 W.hr + 2,064 W.hr) หรือประมาณ 7.20 Unit จากผลการคำนวณค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อวันของทั้ง 2 กรณีที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่า การควบคุมอัตราการไหลด้วยชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานใช้กำลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าการควบคุมด้วยวาล์ว ประมาณ 6.96 Unit ต่อวัน (14.17 Unit - 7.21 Unit) ซึ่งหมายความว่า ชุดขับเคลื่อนดังกล่าวสามารถลดค่าไฟฟ้าประมาณ 27 บาทต่อวัน (6.96 Unit × 3.92 บาท / Unit) (โดยที่ 1 Unit มีค่าเท่ากับ 3.93 บาท อ้างอิงจากอัตราค่าไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคประเภทที่ 1 บ้านอยู่อาศัย) ในขณะที่ราคาของชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานอยู่ที่ประมาณ 5,000 บาท จึงทำให้จุดคุ้มทุนสำหรับการใช้ชุดขับเคลื่อนดังกล่าวอยู่ที่ประมาณ 6 เดือน

จากการนำเสนอลักษณะการใช้งานชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานในสถานการณ์สมมติทั้ง 3 กรณี ที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่า ชุดขับเคลื่อนดังกล่าวช่วยลดขนาดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้ได้น้ำในปริมาณที่มากขึ้นในขณะที่ขนาดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่าเดิม และช่วยประหยัดค่าไฟฟ้าเมื่อนำชุดขับเคลื่อนดังกล่าวมาช่วยควบคุมปั๊มน้ำไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าตามครัวเรือน ซึ่งเป็นจุดเด่น และประโยชน์ที่พึงได้รับเมื่อใช้ชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

7.5 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบการประจุพลังงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการทดสอบการประหยัดพลังงานของชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน จากที่นำเสนอผ่านมาในข้างต้น พบว่า ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถประจุพลังงานไฟฟ้าได้ตามที่ทำการออกแบบไว้ ส่วนผลทดสอบการประหยัดพลังงานจากการเปรียบเทียบข้อมูลทางพลังงานระหว่างการควบคุมอัตราการไหลด้วยชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานกับการควบคุมอัตราการไหลด้วยการปรับวาล์ว การปรับแรงดัน และการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ พบว่า การควบคุมอัตราการไหลด้วยชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน มีการใช้กำลังงานไฟฟ้าอินพุตน้อยกว่าการควบคุมด้วยวิธีการปรับวาล์ว การปรับแรงดัน และการควบคุม

อัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ นอกจากนี้ ในส่วนของตัวอย่างการนำชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานไปใช้งาน และการเปรียบเทียบผลทางด้านเศรษฐศาสตร์แสดงให้เห็นว่าประโยชน์ที่จะได้รับจากการใช้ชุดขับเคลื่อนดังกล่าว คือ ช่วยลดขนาดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้ได้น้ำในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นในขณะที่แหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้ามีขนาดเท่าเดิม และช่วยประหยัดค่าไฟฟ้า เป็นต้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 8
สรุปและข้อเสนอแนะ

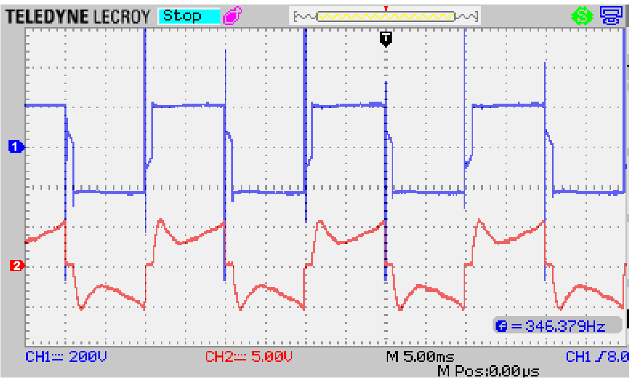
8.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการศึกษา ออกแบบ และสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส เพื่อการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสสำหรับปั๊มหอยโข่ง จากการศึกษาค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส และมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส พบว่า การปรับค่าแรงดัน และความถี่ให้เหมาะสม สามารถทำให้ปริมาณของกำลังงานสูญเสียลดลง ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้หลักการดังกล่าวเพื่อการประหยัดพลังงาน รายละเอียดได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 ในขณะเดียวกัน การมีความรู้ ความเข้าใจ เกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ และการเกิดขึ้นของกำลังงานสูญเสียภายในมอเตอร์ มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนา และออกแบบอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน ซึ่งรายละเอียดดังกล่าวได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 นอกจากนี้ ในบทดังกล่าวยังได้นำเสนอวิธีการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่มีความยุ่งยากต่อการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์ ที่เรียกว่า การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ส่วนเนื้อหาในบทที่ 4 ได้นำเสนอหลักการพัฒนา และออกแบบอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานจากองค์ความรู้ที่ได้จากบทที่ 2 และบทที่ 3 โดยหลักการที่ใช้สำหรับการคำนวณหาค่าความถี่ที่ทำให้กำลังงานสูญเสียมีค่าลดลง คือ การคำนวณหาค่าความถี่ที่ทำให้ค่าของสมการอนุพันธ์กระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่มีค่าเท่ากับศูนย์ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอวิธีการจัดรูปแบบสมการเพื่อลดความซับซ้อน และทำให้ง่ายต่อการโปรแกรมในรูปแบบภาษาซี สำหรับบทที่ 5 นำเสนอโครงสร้างฮาร์ดแวร์ของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่ง และปั๊มน้ำไฟฟ้าชนิดหอยโข่ง โดยเนื้อหาในบทดังกล่าวได้อธิบายถึงหลักการเลือกพิกัดปั๊มน้ำไฟฟ้า การออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีความเหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน และการสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่งไฟฟ้า โดยที่ฮาร์ดแวร์ของชุดขับเคลื่อนดังกล่าว ประกอบด้วย วงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ วงจรแปลงผันแบบบัคก์ วงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรจุดชนวนเกท วงจรป้องกันเวลาวิกฤต ชุดตรวจวัดความเร็วรอบ และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

จากการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยการปรับค่าความถี่ให้เหมาะสมในห้องปฏิบัติการ พบว่า ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการปรับค่าความถี่ให้เหมาะสมเพียงอย่างเดียวจะยังไม่ตรงกับค่าความเร็วรอบอ้างอิง ดังนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้มีค่าลู่เข้าหาค่าความเร็วรอบอ้างอิงด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี ทั้งนี้เนื่องจากตัวควบคุมดังกล่าวให้ประสิทธิผลสูง มีลักษณะการตัดสินใจคล้ายมนุษย์ และไม่จำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งรายละเอียดการออกแบบ และการทดสอบตัวควบคุมดังกล่าว ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 6 ส่วนเนื้อในบทที่ 7 เป็นการนำเสนอผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่ง ประกอบด้วย ผลการประจุพลังงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ และผลการทดสอบการประหยัดพลังงานของชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน และตัวควบคุมแบบฟัซซี จากการทดสอบการประหยัดพลังงาน ได้ทำการเปรียบเทียบข้อมูลทางพลังในขณะที่ทำการควบคุมอัตราการไหลในช่วง 40 ลิตรต่อนาที ถึง 76 ลิตรต่อนาที พบว่า กรณีที่ทำการควบคุมอัตราการไหลด้วยชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานมีการใช้กำลังงานไฟฟ้าอินพุตน้อยกว่าการปรับวาล์ว เท่ากับ 41.98 เปอร์เซ็นต์ น้อยกว่าการปรับแรงดันไฟฟ้า เท่ากับ 34.95 เปอร์เซ็นต์ และน้อยกว่าการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่ เท่ากับ 1.86 เปอร์เซ็นต์ ในขณะเดียวกัน ที่อัตราการไหล เท่ากับ 40 ลิตรต่อนาที ชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานสามารถประหยัดพลังงานได้สูงสุด ถึง 74.31 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการปรับวาล์ว 64.25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการปรับแรงดัน และ 5.94 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ นอกจากนี้ ในตอนท้ายยังได้นำเสนอตัวอย่างการนำชุดขับเคลื่อนที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานไปใช้งาน ร่วมกับการวิเคราะห์ผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ จะเห็นได้ว่า ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้ชุดขับเคลื่อนดังกล่าว คือ ช่วยลดขนาดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้ได้น้ำในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นในขณะที่แหล่งจ่ายทางไฟฟ้ามีขนาดเท่าเดิม และช่วยประหยัดค่าไฟฟ้า เป็นต้น

8.2 ข้อเสนอแนะ

8.2.1 ควรปรับปรุงรูปสัญญาณแรงดัน และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ของปั๊มน้ำให้มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ เนื่องจากในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้คำนึงถึงการปรับรูปสัญญาณดังกล่าว ซึ่งแสดงรูปสัญญาณแรงดัน และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ของปั๊มน้ำได้ดังรูปที่ 8.1 โดยที่ช่องสัญญาณที่ 1 คือ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ และช่องสัญญาณที่ 2 คือ สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์



รูปที่ 8.1 รูปสัญญาณแรงดัน และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ของปั๊มน้ำ

8.2.2 เมื่อมอเตอร์ใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ย่อมมีการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะแวดล้อมของการทำงาน ดังนั้น การหาหนทางปรับปรุงวิธีการประหยัดพลังงานไฟฟ้า ตามที่ได้นำเสนอให้สามารถปรับตนเองได้ ตามการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์จะทำให้เกิดการประหยัดพลังงานมากขึ้น และเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการนำไปใช้ในทางปฏิบัติ

8.2.3 ถ้าสามารถระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของมอเตอร์ได้แม่นตรง อาจส่งผลให้การประหยัดพลังงานดีขึ้นกว่าเดิม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ (2557). การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับตัวสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบสามเฟสสมดุล. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.**

วันชัย คุปวานิชพงษ์ (2555). เอกสารประกอบคำบรรยายการออกแบบระบบให้น้ำผ่านท่อในงานวิจัยเกษตรวิศวกรรม. **กลุ่มพัฒนาพื้นที่เกษตรสถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม**

สำนักพัฒนาเทคโนโลยีเพื่ออุตสาหกรรม (ITDI) (2558). เอกสารประกอบการฝึกอบรมการออกแบบติดตั้ง และประยุกต์ใช้งานโซล่าเซลล์. **มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.**

สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ กรมชลประทาน (2550). คู่มือการหาปริมาณการใช้น้ำของพืชปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงและค่าสัมประสิทธิ์พืช. **ส่วนการใช้น้ำชลประทาน.**

อาทิตย์ ศรีแก้ว (2552). ปัญญาเชิงคำนวณ. **เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.** กรุงเทพฯ: จรัญสนิทวงศ์การพิมพ์

Andoh, F. (2007). Moment of Inertia Identification Using the Time Average of the Product Torque Reference Input and Motor Position. **IEEE Transaction. Power Electronics.** vol. 22. Issue: 6. 0885 – 8993.

Andreas, J. C. (1992). **Energy-Efficient Electric Motors.** Marcel Dekker: Inc.

Beaty, H. W. and Kirtley, Jr. J. L. (1998). **Electric Motor Handbook.** McGraw-Hill Book Company.

Boldea, I. and Nasar, S. A. (2010). **The Induction Machines Design Handbook.** Taylor & Francis Group: CRC Press.

Falk, A., Christian, D., and Karl, H. R. (2007). **Photovoltaics for Professionals.** Germany: Solarpraxis AG.

Famouri, P. and Cathev, J. J. (1991). Loss minimization control of an induction motor drives. **IEEE Trans. Industrial Application.** vol. 27, no. 1, 32-37.

Frontenac, N. Y. (1909). The Heating of Induction Motor. **American Institute of Engineers**. pp. 527-553

Girdhar, P. and Moniz, O. (2005). Practical Centrifugal Pumps. **IDC Technologies.**

Guinee, R. A. and Lyden, C. (2001). Motor Parameter Identification Using Response Surface Simulation and Analysi. **Proc. of the American Control Conference**. vol.6, pp. 4597 – 4602.

Guinee, R. A. (2005). Motor Parameter Identification Using Response Surface Simulation and Analysis. **American Conrtol Conference.** vol. 6. 4597 – 4602.

Guru, B. S. and Hiziroglu, H-R. (2001). **Electric Machinery and Transformers.** New York Oxford: Oxford University Press.

John, H. and Lilly. (2010). **Fuzzy control and identification.** New Jersey: John Wiley & Sons.

Kioskeridis, I. and margaris, N. (1996). Loss minimization in induction motor adjustable speed drives. **IEEE Trans. Ind. Elec.** vol. 43, no. 1, 32-37.

Kirschen, D. S., Novotny, D. W. and Suwanwisut, W. (1984). Minimizing induction motor losses by excitation control in variable frequency drives. **IEEE Trans. Industrial Application.** vol. IA-20, no. 5, 1244-1250.

Krause, P.C., O. Wasynczuk, and S.D. Sudhoff, **Analysis of Electric Machinery**. IEEE Press, 1995

Kusko, A. and Galler, D. (1983). Control means for minimization of losses in AC and DC motor drives. **IEEE Trams. Industrial Application.** IA-19, no. 4, 561-570.

Park, S-K., Lim, H-W., Cho, G-B., Baek, H-L., Lee, S-K., Chang, Y-H. and Seo, J-Y. (2001). A Study on the Reduction of In-rush Current for Energy Saving of Single Phase Induction Motor. **Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems.** vol. 1, 67-71.

Puangdownreong, D., Areerak, K-N., Srikaew, A., Sujitjurn, S. and Totarong, P. (2002). System Identification via Adaptive Tabu Search. **International Conference on Industrial Technology (ICIT02)**. vol.2, pp.915-920.

Rashid, M. H. (2004). **Power electronics circuit, devices, and applications.** USA: Pearson.

Russell, S. J. and Norvig, P. (2003). **Artificial Intelligence: A Modern Approach.** Upper Saddle River. New Jersey: Prentice Hall.

Ryff, P. F. (1994). **Electric Machinery.** New Jersey : Prentic-Hill.

Samuel, A. M.(1937) Journal-Bearing Design as Related to Maximum Loads, Speed, and Operating Temperatures. **National Bureau of Standards.** vol.19, pp.457-465

Sea-kok, W. and Lumyong, P.(2003) Characteristics evaluation of 3 phase induction motor based on an acceleration method with increasing moment of inertia technique. **4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives.** pp. 93 – 98.

Sundareswaran, K. (2001). An Improved Energy-Saving Scheme for Capacitor-Run Induction Motor. **IEEE Trans. Industrial Electronics.** Vol. 48, no. 1, 238-240.

Takagi, T. and Sugeno, M. Fuzzy Identification of System and its Applications to modeling and control. **IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetic.** 15:166-132.

Thanyaphirak, V., Kinnares, V. and Kunakorn, A. (2012). PWM AC Chopper Control Schemes for Energy Saving of Single-Phase Induction Motor. **Conference on Power & Energy (IPEC).** 82-87.

Veera, T., Vijit, K., and Anantawat, K. (2013). Soft starting control of single-phase induction motor using PWM AC Chopper control technique. **IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS).** pp. 26-29.

Warachart, S-K., Lumyong, P. (2003). Characteristics evaluation of 3 phase induction motor based on an acceleration method with increasing moment of inertia technique. **IEEE. Power Electronics and Drives.** no. 4. 93 – 98.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก.

รายละเอียดหลักการทดสอบหาค่า ΔN

รายละเอียดหลักการทดสอบหาค่า ΔN

จากการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยค่าความถี่ที่เหมาะสมในห้องปฏิบัติการ เมื่อทำการป้อนค่าความถี่ที่ได้จากการคำนวณของอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานให้กับชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ในกรณีที่ค่าความเร็วรอบที่ป้อนให้กับอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน (N) มีค่าเท่ากับค่าความเร็วรอบอ้างอิง (N_r) ($N = N_r$) พบว่าค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ (N_m) จะมีค่าน้อยกว่า N_r แม้ว่าจะทำการปรับเพิ่มขนาดแรงดันไฟฟ้า (V_{AC}) แสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ในกรณีที่ $N = N_r$

N_r (rpm)	N_m (rpm)	f (Hz)	V_{AC} (V)	I_{In} (A)	P_{In} (W)
2700	2540	46	220	3.81	685
2300	2169	40	220	4.45	707

<u>หมายเหตุ</u> จากการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการ สังเกตได้ว่า เมื่อ N_r มีค่าลดลงมอเตอร์จะเริ่มส่งเสียงดังกว่าปกติ อีกทั้ง ขนาดของกระแสไฟฟ้า (I_{In}) และกำลังงานไฟฟ้าอินพุต (P_{In}) มีค่าเพิ่มมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงหยุดทำการทดสอบ เนื่องจากกังวลว่าหากดำเนินการทดสอบต่อมอเตอร์อาจจะเกิดความเสียหาย

จากผลการทดสอบดังตารางที่ ก.1 ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ สังเกตเห็นว่ามีผลต่างระหว่าง N_r กับ N_m ด้วยเหตุนี้ จึงได้ทำการทดสอบเพิ่มเติม โดยการเพิ่มค่าความเร็วรอบให้กับ N อีก 10 เปอร์เซ็นต์ของ N_r ($N = N_r + 0.1\, N_r$) เพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่อาจเกิดขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของค่า N จากการทดสอบ พบว่า ค่าความถี่ที่เหมาะสม (f) สำหรับแต่ละความเร็วรอบมีค่าเพิ่มมากขึ้น และสามารถทำการควบคุมให้ N_m มีค่าเท่ากับ N_r ได้ตามความต้องการ ซึ่งจะต้องอาศัยการปรับขนาดแรงดันร่วมด้วย โดยผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ ก.2 อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่า ค่าความถี่ที่ได้ยังไม่เหมาะสมเท่าที่ควร สังเกตได้จากขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้สำหรับควบคุมค่า N_m ให้มีค่าเท่ากับ N_r ที่ค่าความเร็วรอบเท่ากับ 2600 rpm และ 2500rpm มีค่ามากเกินพิกัดของมอเตอร์ (220 V) ด้วยเหตุนี้ ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ทำการทดสอบเพิ่มเติมอีกครั้ง โดยการเพิ่มค่าความเร็วรอบให้กับ N อีก 15 เปอร์เซ็นต์ของ N_r ($N = N_r + 0.15\, N_r$) ผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ ก.3 จากผลการทดสอบในตารางดังกล่าว จะเห็นได้ว่าค่าความถี่ที่เหมาะสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับผลการทดสอบในตารางที่ ก.2 อีกทั้ง ค่าของแรงดันที่

ใช้ควบคุม N_m ให้มีค่าเท่ากับ N_r มีค่าลดลง นอกจากนี้ ยังสังเกตเห็นว่า ขนาดของกระแส และกำลังงานไฟฟ้าอินพุตโดยรวมแล้ว มีค่าลดลง เมื่อเทียบกับกรณีเพิ่ม N อีก 10 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ในกรณีที่ $N = N_r + 0.1\,N_r$

N_r (rpm)	N_m (rpm)	f (Hz)	V_{AC} (V)	I_{In} (A)	P_{In} (W)
2600	2600	48	232	3.80	782
2300	2300	42.5	210	3.33	602
2000	2000	37	175	2.76	417
1700	1700	31.5	150	2.49	311
1400	1400	26	121	2.20	215

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ในกรณีที่ $N = N_r + 0.15\,N_r$

N_r (rpm)	N_m (rpm)	f (Hz)	V_{AC} (V)	I_{In} (A)	P_{In} (W)
2600	2600	50	218	3.95	803
2300	2300	44	186	3.61	558
2000	2000	38.5	160	2.60	384
1700	1700	33	130	2.17	257
1400	1400	27	108	1.92	181

จากการนำเสนอผลทดสอบที่ผ่านมา ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ พบว่า สาเหตุที่ทำ N_m มีค่าน้อยกว่า N_r เสมอ ในกรณีที่ N เท่ากับ N_r เพียงอย่างเดียว เกิดจากการที่ความเร็วซิงโครนัส (N_s) ของมอเตอร์ที่สภาวะดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับ N_r ยกตัวอย่าง เช่น ในกรณีที่ N_r มีค่าเท่ากับ 2300 rpm ค่าความถี่ที่คำนวณได้จากอัลกอริทึมมีค่าเท่ากับ 40 Hz และเมื่อแปลงเป็น N_s จะมีค่าเท่ากับ 2400 rpm ซึ่งในทางทฤษฎีค่าของ N_r จะมีค่าน้อยกว่า N_s มากกว่านี้ (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของโหลด) ในขณะที่ทำการทดสอบเพิ่มค่าความเร็วรอบให้กับ N อีก 10 เปอร์เซ็นต์ของ N_r พบว่า เมื่อ N_r มีค่าเท่ากับ 2300 rpm ค่าความถี่ที่ได้จากอัลกอริทึมมีค่าเท่ากับ 42.5 Hz ส่งผลให้ N_s มีค่าเท่ากับ 2550 rpm ซึ่งจะเห็นได้ว่า N_s มีค่าเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้สามารถควบคุม N_m ให้มีค่าเท่ากับ N_r ได้ตามต้องการ อย่างไรก็ตามค่า N_m ที่ได้จากการปรับความถี่จะยังไม่ตรงกับ N_r แต่สามารถทำการปรับค่า N_m โดยอาศัยการปรับขนาดแรงดันอีกครั้งหลังจากทำการปรับความถี่ ในทำนองเดียวกัน เมื่อเพิ่มค่าความเร็วรอบให้กับ N อีก 15 เปอร์เซ็นต์ของ N_r ในกรณีที่ N_r มีค่าเท่ากับ 2300 rpm ค่าความถี่ที่ได้จากอัลกอริทึมมีค่าเท่ากับ 44 Hz ส่งผลให้ N_s มีค่า

เท่ากับ 2640 rpm ซึ่งพบว่า N_s มีค่ามากกว่ากรณีที่ผ่านมา ($N = N_r + 0.1\,N_r$) จึงทำให้ขนาดแรงดันที่ใช้ควบคุม N_m ให้มีค่าเท่ากับ N_r มีค่าลดลง นอกจากนี้ สังเกตเห็นว่า เมื่อ N_s มีค่าเพิ่มมากขึ้น ขนาดของแรงดัน กระแส และกำลังงานไฟฟ้าโดยภาพรวมจะมีค่าลดลง ซึ่งจากการทดสอบที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของค่า N จากการเพิ่มค่า N_r อีก 10 หรือ 15 เปอร์เซ็นต์ ก่อนที่จะป้อนให้กับอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานมีนัยสำคัญต่อการคำนวณหาค่าความถี่ที่เหมาะสม ด้วยเหตุนี้ ผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ดำเนินการแสวงหาค่าคงที่ค่าหนึ่งสำหรับนำมารวมกับ N_r ก่อนที่จะป้อนค่าดังกล่าวให้กับ N จากการสังเกตในขณะที่ทำการทดสอบที่ผ่านมา พบว่า เมื่อมอเตอร์ทำงานที่พิกัด (220 V, 50 Hz) จะมีผลต่างระหว่าง N_s กับค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่พิกัด (N_{rated}) ประมาณ 332 rpm (3000 rpm – 2668 rpm) ดังนั้น จึงได้ทำการทดสอบเพิ่มเติม โดยการรวม N_r กับ 332 rpm ก่อนที่จะป้อนค่าดังกล่าวให้กับ N ($N = N_r + 332$) แสดงผลการทดสอบได้ในตารางที่ ก.4

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ในกรณีที่ $N = N_r + 332$

N_r (rpm)	N_m (rpm)	f (Hz)	V_{AC} (V)	I_{In} (A)	P_{In} (W)
2700	2700	50	220	3.89	793
2600	2600	49	219	3.69	731
2300	2300	44	188	3.10	541
2000	2000	38	156	2.61	380
1700	1700	33	124	2.20	255
1400	1400	28	98	1.89	172

จากผลการทดสอบในตารางที่ ก.4 พบว่า สามารถควบคุมให้ N_m มีค่าเท่ากับ N_r ได้จริง ดังที่คาดการณ์ไว้ แม้ว่าจะต้องทำการปรับขนาดแรงดันอีกครั้งหลังจากทำการปรับขนาดความถี่ นอกจากนี้ สังเกตเห็นว่า ขนาดของแรงดัน กระแส และกำลังงานไฟฟ้าอินพุตที่ทุกค่าความเร็วรอบจะมีค่าน้อยกว่าการทดสอบที่ผ่านมา ($N = N_r + 0.1\,N_r$ และ $N = N_r + 0.15\,N_r$) อีกทั้งยังสามารถใช้กับค่า N_r ได้มากสุดถึง 2700 rpm ในขณะที่วิธีการทดสอบที่ผ่านมา ($N = N_r + 0.1\,N_r$ และ $N = N_r + 0.15\,N_r$) มีค่า N_r มากที่สุดเท่ากับ 2600 rpm ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงกำหนดให้ N มีค่าเท่ากับ ผลรวมของ N_r กับ ΔN ($N = N_r + \Delta N$) โดยที่ ΔN มีค่าเท่ากับผลต่างระหว่าง N_s กับ N_{rated} ($\Delta N = N_s - N_{rated}$) และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพิกัดของมอเตอร์จะต้องทำการคำนวณค่า ΔN ใหม่ทุกครั้ง

ภาคผนวก ข.

โปรแกรม MATLAB สำหรับการจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบความถูกต้องของสมการอนุพันธ์กระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่ที่ผ่านการจัดรูปสมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายละเอียดในภาคผนวก ข. เป็นการอธิบายโปรแกรม MATLAB สำหรับจำลองสถานการณ์ในกระบวนการตรวจสอบความถูกต้อง ของสมการอนุพันธ์กระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่ที่ใช้ในอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน โดยสมการอนุพันธ์กระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่ภายในโปรแกรมดังกล่าวมีอยู่ 2 กรณี คือ กรณีที่ยังไม่ผ่านการจัดรูปสมการ (dI1) และกรณีที่ผ่านการจัดรูปสมการ (dI11)

****

```
dI1_new=1000;
dI11_new=1000;

for f=25:0.5:50         //ทำการปรับเพิ่มค่าความถี่จาก 25 Hz  ถึง 50 Hz โดยที่เพิ่มครั้งละ 0.5 Hz
R1=12.5;                //ค่าความต้านทานของขดลวดหลัก
x1=19.38e-3;            //ค่าความเหนี่ยวนำของของขดลวดหลัก
R2=12.5;                //ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์
x2=19.38e-3;            //ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดโรเตอร์
Ra=15.3;                //ค่าความต้านทานของขดลวดช่วย
Rc=1.061;               //ค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุที่ต่อกับขดลวดช่วย
xc=15e-6;               //ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ต่อกับขดลวดช่วย
xm=0.3984;              //ค่าความเหนี่ยนนำทางแม่เหล็กของมอเตอร์
P=2;                    //จำนวนโพลของมอเตอร์
V1=220;                 //ค่าขนาดแรงดัน
a=1.1056;               //ค่าอัตราส่วนของรอบประสิทธิผลระหว่างขดลวดช่วยกับขดลวดหลัก

Nr=1500;                //ค่าความเร็วรอบอ้างอิง
N=Nr+332;
Ns=120*f/P;             //ค่าความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์
s=abs((Ns-N)/Ns);       //ค่าสลิป
// สมการอนุพันธ์กระแสที่ขดลวดหลังเทียบกับความถี่ในกรณีที่ยังไม่ได้ทำการจัดรูปสมการ ซึ่งในที่นี้แทนด้วยตัวแปร dI1
dI1 = abs((V1*(a^2*(pi*x1*2*i + (pi*xm*(R2/s + pi*f*x2*2*i)*i)/(R2/s + pi*f*x2*2*i +
pi*f*xm*2*i) - (2*pi^2*f*x2*xm)/(R2/s + pi*f*x2*2*i + pi*f*xm*2*i) -(pi*f*xm*(R2/s +
```

```
pi*f*x2*2*i)*(pi*x2*2*i + pi*xm*2*i)*i)/(R2/s + pi*f*x2*(2*i) + pi*f*xm*(2*i))^2) -
a*((2*pi^2*f*x2*xm)/(R2/s + pi*f*x2*2*i + pi*f*xm*2*i) - (pi*xm*(R2/s +
pi*f*x2*2*i)*i)/(R2/s + pi*f*x2*2*i + pi*f*xm*2*i) + (pi*f*xm*(R2/s +
pi*f*x2*2*i)*(pi*x2*2*i + pi*xm*2*i)*i)/(R2/s + pi*f*x2*(2*i) + pi*f*xm*(2*i))^2)*i +
i/(2*pi*f^2*xc)))/(a^2*((pi*f*xm*(R2/s + pi*f*x2*2*i)*i)/(R2/s + pi*f*x2*2*i +
pi*f*xm*2*i) - 1/2)^2 - ((pi*f*x1*(2*i) + (pi*f*xm*(R2/s + pi*f*x2*(2*i))*i)/(R2/s +
pi*f*x2*(2*i) + pi*f*xm*(2*i)) + 1/2)*a^2 + Ra +  (-i/2)/(pi*f*xc))*(R1 + pi*f*x1*2*i +
(pi*f*xm*(R2/s + pi*f*x2*2*i)*i)/(R2/s + pi*f*x2*2*i + pi*f*xm*2*i) + 1/2)) -
(V1*((a^2*(pi*x1*2*i + (pi*xm*(R2/s + pi*f*x2*2*i)*i)/(R2/s + pi*f*x2*2*i + pi*f*xm*2*i)
- (2*pi^2*f*x2*xm)/(R2/s + pi*f*x2*2*i + pi*f*xm*2*i) - (pi*f*xm*(R2/s +
pi*f*x2*2*i)*(pi*x2*2*i + pi*xm*2*i)*i)/(R2/s + pi*f*x2*(2*i) + pi*f*xm*(2*i))^2) +
i/(2*pi*f^2*xc))*(R1 + pi*f*x1*2*i + (pi*f*xm*(R2/s + pi*f*x2*2*i)*i)/(R2/s + pi*f*x2*2*i
+ pi*f*xm*2*i) + 1/2) + ((pi*f*x1*(2*i) + (pi*f*xm*(R2/s + pi*f*x2*(2*i))*i)/(R2/s +
pi*f*x2*(2*i) + pi*f*xm*(2*i)) + 1/2)*a^2 + Ra + (-i/2)/(pi*f*xc))*(pi*x1*2*i + (pi*xm*(R2/s
+ pi*f*x2*2*i)*i)/(R2/s + pi*f*x2*2*i + pi*f*xm*2*i) - (2*pi^2*f*x2*xm)/(R2/s +
pi*f*x2*2*i + pi*f*xm*2*i) - (pi*f*xm*(R2/s + pi*f*x2*2*i)*(pi*x2*2*i +
pi*xm*2*i)*i)/(R2/s + pi*f*x2*(2*i) + pi*f*xm*(2*i))^2) + 2*a^2*((pi*f*xm*(R2/s +
pi*f*x2*2*i)*i)/(R2/s + pi*f*x2*2*i + pi*f*xm*2*i) - 1/2)*((2*pi^2*f*x2*xm)/(R2/s +
pi*f*x2*2*i + pi*f*xm*2*i) - (pi*xm*(R2/s + pi*f*x2*2*i)*i)/(R2/s + pi*f*x2*2*i +
pi*f*xm*2*i) + (pi*f*xm*(R2/s + pi*f*x2*2*i)*(pi*x2*2*i + pi*xm*2*i)*i)/(R2/s +
pi*f*x2*(2*i) + pi*f*xm*(2*i))^2))*(Ra + a^2*(pi*f*x1*2*i + (pi*f*xm*(R2/s +
pi*f*x2*2*i)*i)/(R2/s + pi*f*x2*2*i + pi*f*xm*2*i) + 1/2) + a*((pi*f*xm*(R2/s +
pi*f*x2*2*i)*i)/(R2/s + pi*f*x2*2*i + pi*f*xm*2*i) - 1/2)*i -
i/(2*pi*f*xc)))/(a^2*((pi*f*xm*(R2/s + pi*f*x2*(2*i))*i)/(R2/s + pi*f*x2*(2*i) +
pi*f*xm*(2*i)) - 1/2)^2 - (Ra + a^2*(pi*f*x1*(2*i) + (pi*f*xm*(R2/s +
pi*f*x2*(2*i))*i)/(R2/s + pi*f*x2*(2*i) + pi*f*xm*(2*i)) + 1/2) + (-i/2)/(pi*f*xc))*(R1 +
pi*f*x1*(2*i) + (pi*f*xm*(R2/s + pi*f*x2*(2*i))*i)/(R2/s + pi*f*x2*(2*i) + pi*f*xm*(2*i)) +
1/2))^2);
```

// สมการของสัมประสิทธิ์ตัวแปร E_1 ถึง E_7

```
E1= abs(2*pi*x1);
```

```
E2=abs((pi*xm*(R2/s)*i)/(R2/s + pi*f*xm*2*i));
E3=abs((pi*xm*(R2/s)*i)/(R2/s + pi*f*xm*2*i)^2);
E4= abs((pi*f*xm*(R2/s)*( pi*xm*2*i)*i)/(R2/s + pi*f*xm*(2*i))^2);
E5= abs((pi*f*xm*(R2/s)*i)/(R2/s + pi*f*xm*2*i));
E6= abs(2*pi*f*x1);
E7= abs((i/2)/(pi*f*xc));
 // สมการของสัมประสิทธิ์ตัวแปร A B C และ D
A=V1*(a*a*(E4)+a*(E2+E4));
B=(E7*(R1+E5)-E5*(a*a*R1+Ra)-R1*Ra);
C=-V1*(a*a*R1+Ra-E7)*(E2+E4)*(Ra+a*a*E5-E7+a*E5);
D=(-a*a*R1*E5-(Ra-E7)*(R1+E5))^2;

dI11=abs((A/B)-(C/D))   //สมการอนุพันธ์กระแสที่ขดลวดหลังเทียบกับความถี่ในกรณีที่
ดำเนินการจัดรูปสมการเรียบร้อยแล้ว ซึ่งในที่นี้แทนด้วยตัวแปร dI11
//การเปรียบเทียบหาค่าความถี่ที่ทำให้ค่าของสมการอนุพันธ์กระแสที่ขดลวดหลังเทียบกับความถี่
มีค่าใกล้เคียงศูนย์มากที่สุด
 if dI1_new>dI1
   dI1_new=dI1;
   f_dI1 = f;
end
if dI11_new>dI11
   dI11_new=dI11;
   dI11 = f;
end
end
 //แสดงค่าความถี่ที่เหมาะสม
disp('frequency_Old_dI =')
disp(f_dI1)
disp('frequency_New_dI =')
disp(f_dI11)
```

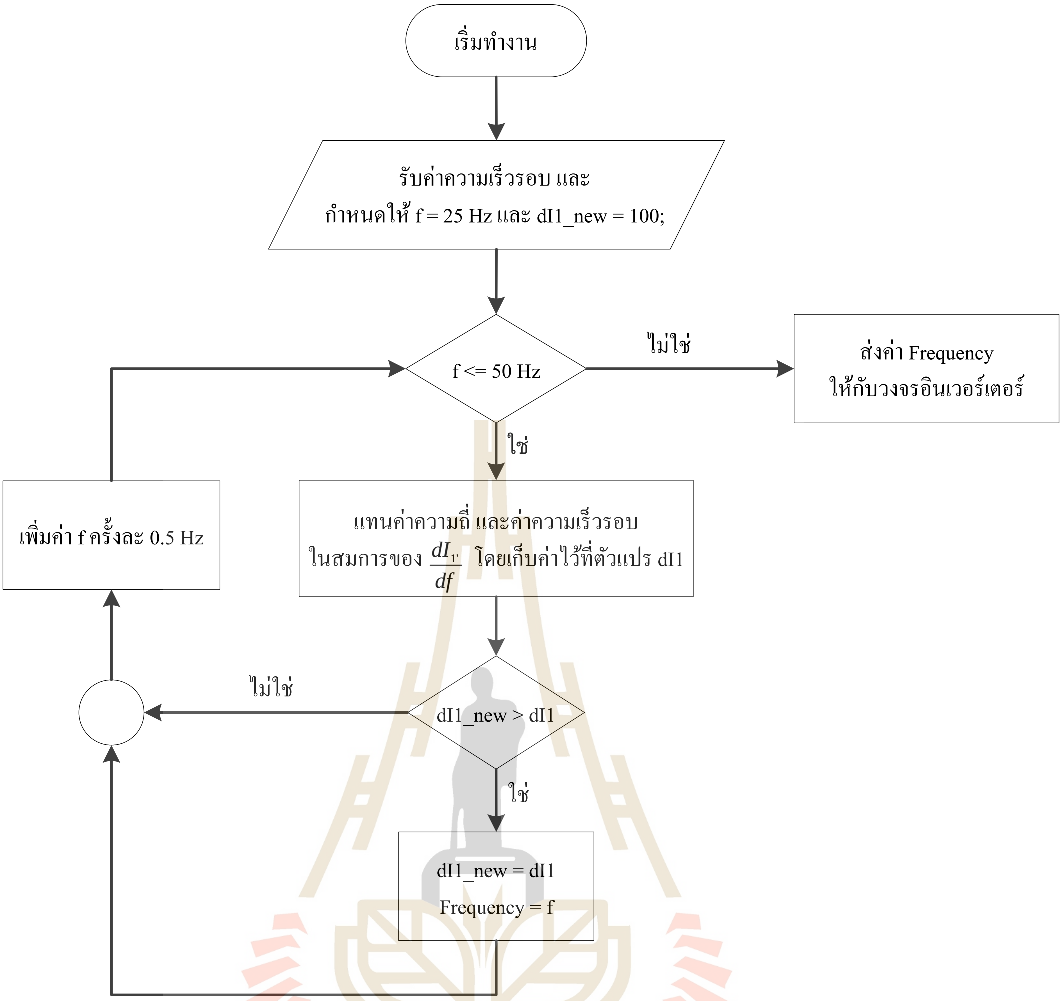
ภาคผนวก ค.

โปรแกรมภาษาซีของชุดขับเคลื่อนปั๊มน้ำไฟฟ้าที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานและตัวควบคุมแบบฟัซซี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายละเอียดในภาคผนวก ค. เป็นการอธิบายโปรแกรมภาษาซีที่ถูกประมวลผลด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล AVR รุ่น ET – EASY MEGA 1280 (Arduino MEGA 1280) สำหรับใช้ควบคุมการทำงานวงจรแปลงผันแบบบัคก์ และวงจรอินเวอร์เตอร์ของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่มีอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน และตัวควบคุมแบบฟัซซี โดยที่ตัวควบคุมแบบฟัซซีทำหน้าที่ควบคุมการปรับเปลี่ยนขนาดแรงดันของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ และอัลกอริทึมการประหยัดพลังงานทำหน้าที่ควบคุมการปรับเปลี่ยนค่าความถี่ของวงจรอินเวอร์เตอร์ สำหรับการคำนวณหาค่าความถี่ที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน แสดงได้ดังแผนภาพในรูปที่ ค.1 จากรูปดังกล่าว เมื่อระบบเริ่มทำงาน จะทำการรับค่าความเร็วรอบอ้างอิง และกำหนดค่าความถี่เริ่มต้นสำหรับการคำนวณ โดยให้ค่าของสมการอนุพันธ์ของกระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่สำหรับใช้ในการเปรียบเทียบมีค่าเท่ากับ 25 Hz (f = 25 Hz) และ 1,000 (dI1 = 1000) ตามลำดับ สำหรับขั้นตอนถัดมาทำการแทนค่าความถี่ และค่าความเร็วรอบในสมการอนุพันธ์ของกระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่ โดยที่ทำการเพิ่มค่าความถี่ครั้งละ 0.5 Hz (ตั้งแต่ 25 Hz ถึง 50 Hz)ในขณะเดียวกันทำการเปรียบเทียบค่าของสมการอนุพันธ์ของกระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับความถี่ เพื่อค้นหาค่าความถี่ที่ทำให้สมการดังกล่าวมีค่าน้อยที่สุด หรือมีค่าใกล้เคียงศูนย์มากที่สุด ซึ่งค่าความถี่ดังกล่าวเป็นความถี่ที่เหมาะสมสำหรับค่าความเร็วรอบอ้างอิงดังกล่าว เมื่อได้ค่าความถี่ที่เหมาะสมแล้วจะดำเนินการส่งค่าความถี่ดังกล่าวให้กับส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์เพื่อทำการปรับค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ค.1 แผนภูมิการคำนวณหาค่าความถี่เหมาะสมของอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน

โปรแกรมภาษาซีสำหรับการคำนวณของตัวควบคุมแบบฟัซซี และการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบัคก์

```
*************************************************************************
//กำหนดตัวแปร
// ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันแบบบัคก์
int buck=11, Duty_Buck=0, f_pwm=0;
double DutyCycle=0,Duty_control=0,Duty_cycle_new=0;

// ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับค่าความเร็วรอบ
double volume=0;
double high_speed=0,low_speed=0,speed_sensor=0,time_speed=0;
double error=0,Speed_ref=0,Speed_mea=0;
int pin_speed=7;

// ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมแบบฟัซซี
//ค่าฟังก์ชันสมาชิกภาพสำหรับตัวแปรอินพุต และตัวแปรเอาต์พุต
double x1=-300,x2=-150;
double x3=-300,x4=-150,x5=-10;
double x6=-150,x7=-10.0,x8=10;
double x9=150,x10=10,x11=150;
double x12=300,x13=150,x14=300;
double y1=10,y2=2.0,y3=0.0,y4=-5.0,y5=-10.0;
double mfe1=0.0,mfe2=0.0,mfe3=0.0,mfe4=0.0,mfe5=0.0;
double k1=0.0,k2=0.0,k3=0.0,k4=0.0,k5=0.0;
double v1=0.0,v2=0.0,v3=0.0,v4=0.0,v5=0.0;
double volout = 0.0;
double den = 0.0;
double num = 0.0;
int time_f=0;
//************************************************************************
```

```
//ฟังก์ชันตั้งค่าบอร์ด Arduino [void setup()]
void setup()
{
//กำหนดช่องสัญญาณอินพุต และเอาต์พุต
pinMode(pin_speed,INPUT);
pinMode(inverter_01,OUTPUT);
pinMode(inverter_02,OUTPUT);

// โปรแกรมสำหรับกำหนดการทำงานนับเวลาของทามเมอร์ 1  (Interrupt  timer1) ที่ค่าความถี่
เท่ากับ 10 kHz
noInterrupts();
TCCR1A = 0;
TCCR1B = 0;
TCNT1 = 10000;
TCCR1B |= (1 << CS12);
TIMSK1 |= (1 << TOIE1);
interrupts();

//โปรแกรมสำหรับกำหนดโหมดสร้างสัญญาณ PWM ที่ค่าความถี่เท่ากับ 10 kHz
 f_pwm=10;                    //ค่าความถี่ของสัญญาณ PWM (kHz)
 pinMode(buck,OUTPUT);        //กำหนดช่องสัญญาณเอาต์พุต (ช่อง PWM 11)
 TCCR1A=(1<<COM1A1)|(0<<COM1A0)|(1<<COM1B1)|(0<<COM1B0);
 TCCR1B=(1<<WGM13)|(0<<WGM12);
 TCCR1A|=(0<<WGM11)|(0<<WGM10);
 TCCR1B|=(0<<CS12)|(0<<CS11)|(1<<CS10);
 TCNT1=0;
 OCR1A=0;
 OCR1B=0;
 ICR1=(16e6)/(2*1*f_pwm*1000);
}
```

```
ISR(TIMER1_OVF_vect)          //ฟังก์ชันอินเตอร์รัพท์ของทามเมอร์ 1
{
time++;
}
//****************************************************************************
//ฟังก์ชันวนรอบของบอร์ด Arduino [void loop()]
void loop()
{
//สำหรับการกำหนดค่าความเร็วรอบอ้างอิง ในงานวิจัยนี้จะทำการกำหนดค่าอ้างอิงดังกล่าวด้วย
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยทำการจ่ายแรงดันดังกล่าวให้กับพอร์ต A0 ของบอร์ด
ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งพอร์ตดังกล่าวมีโหมดการแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิตอล
และทำการแปลงค่าที่อ่านได้จากพอร์ต A0 ให้เป็นความเร็วรอบอ้างอิงดังแสดงต่อไปนี้
เนื่องจากพอร์ตแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น
Arduino MEGA 1280 มีความละเอียด 10 บิต (10 bit resolution) ที่แรงดันเท่ากับ +5 V ซึ่ง
หมายความว่า เมื่อแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลแล้วจะได้ค่าตัวเลขอยู่ระหว่าง 0 - 1024
เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นจะต้องทำการคูณค่าคงที่กับค่าดังกล่าว เพื่อปรับอัตราส่วนระหว่างค่า
แรงดันต่อความเร็วรอบให้เท่ากับ 1V : 1000 rpm ดังต่อไปนี้

volume = analogRead(A0);    //รับสัญญาณแอนาล็อกจาก (A0) และแปลงเป็นดิจิตอล (volume)
Speed_ref =volume*4.88;        //ทำการคูณค่าคงที่เท่ากับ 4.88 เพื่อปรับอัตราส่วนของระหว่าง
แรงดันต่อความเร็วรอบให้ได้ 1 V : 1000 rpm

//สำหรับการตรวจวัดค่าความเร็วรอบจริง ทำได้โดยการวัดช่วงระยะเวลาของสัญญาณลอจิกที่ได้
จากชุดตรวจวัดความเร็วรอบ โดยจะทำการวัดระยะเวลาหนึ่งรอบการทำงานของของสถานะ
HIGH และ LOW ที่ได้จากชุดตรวจวัดความเร็วรอบ แล้วทำการแปลงค่าระยะเวลาดังกล่าวเป็นค่า
เป็นความเร็วรอบจริง
high_speed=pulseIn(pin_speed,HIGH);
low_speed=pulseIn(pin_speed,LOW);
time_speed=high_speed+low_speed;
time_speed=time_speed/1000;
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
speed_sensor=1000/time_speed;
speed_mea=speed_sensor*59.6149;

error=Speed_ref-Speed_mea;      //คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนความเร็วรอบ
//**************************************************************************
//โปรแกรมการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี
if(time>=10000)                 //โดยกำหนดให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการประมวล
                                ผลในส่วนของตัวควบคุมแบบฟัซซีทุก ๆ 1 วินาที
  {
 time=0;

//เริ่มกระบวนการตรวจสอบ และกำหนดสถานะของค่าความคลาดเคลื่อนความเร็วรอบ
if (error<=x2)
    {
        if (error<=x1)
        {
            mfe1=1.0;
        }
        else if (error>x1 && error<=x2)
        {
            mfe1=((x2-error)*1)/(x2-x1);
        }
    }
else
    {
        mfe1=0.0;
    }
//-----------------------------------------------------------------------------------------------------------
if (error<=x5 && error>x3)
    {
```

```
            if (error==x4)
              {
                        mfe2=1.0;
              }
            else if (error>=x3 && error<x4)
              {
                        mfe2=((error-x3)*1)/(x4-x3);
              }
            else if (error>x4 && error<=x5)
              {
                        mfe2=((x5-error)*1)/(x5-x4);
              }
      }

 else
      {
            mfe2=0.0;
      }
//----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
-
if (error<=x9 && error>x6)
    {
            if (error>=x7 && error<=x8)
            {
                        mfe3=1.0;
            }
             else if (error>=x6 && error<x7)
            {
                        mfe3=((error-x6)*1)/(x7-x6);
            }
```

```
        else if (error>x8 && error<=x9)
        {
                mfe3=((x9-error)*1)/(x9-x8);
        }
    }
else
    {
        mfe3=0.0;
    }
//-----------------------------------------------------------------------------------------------------
-
if (error<=x12 && error>=x10)
        {
        if (error==x11)
        {
                mfe4=1.0;
        }
        else if (error>=x10 && error<x11)
        {
                mfe4=((error-x10)*1)/(x11-x10);
        }
        else if (error>x11 && error<=x12)
        {
                mfe4=((x12-error)*1)/(x12-x11);
        }
    }
else
  {
        mfe4=0.0;
  }
```

```
//--------------------------------------------------------------------------------------------------------
 if (error >=x13)
   {
           if (error>=x14)
           {
                   mfe5=1.0;
           }
           else if (error>=x13 && error<x14)
           {
                   mfe5=((error-x13)*1)/(x14-x13);
           }
   }
 else
   {
           mfe5=0.0;
   }
//--------------------------------------------------------------------------------------------------------
//เริ่มกระบวนการกำหนดสถานะของตัวแปรเอาต์พุต
 if (mfe1>0)
  {
            v1=mfe1;
           k1=y1*v1;
   }
 else
   {
           v1=0.0;
           k1=0.0;
   }
if (mfe2>0)
   {
```

```
          v2=mfe2;
          k2=y2*v2;
   }
 else
   {
          v2=0.0;
          k2=0.0;
   }
if (mfe3>0)
  {
          v3=mfe3;
          k3=y3*v3;
   }
 else
  {
          v3=0.0;
          k3=0.0;
   }
if (mfe4>0)
  {
          v4=mfe4;
          k4=y4*v4;
   }
 else
   {
          v4=0.0;
          k4=0.0;
   }
if (mfe5>0)
  {
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
        v5=mfe5;
        k5=y5*v5;
   }
 else
   {
        v5=0.0;
        k5=0.0;
   }
//การคำนวณดีฟัซซีด้วยวิธีนำหนักเฉลี่ยเพื่อหาค่าเอาต์พุต
 num=k1+k2+k3+k4+k5;
 den=v1+v2+v3+v4+v5;
 Duty_control=num/den;

 //ทำการคำนวณเพื่อปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่
 Duty_cycle_new= DutyCycle+Duty_control;
 DutyCycle=Duty_cycle_new;
 }

//ตรวจสอบค่าวัฏจักรหน้าที่ให้อยู่ในช่วง 10 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์
 if(DutyCycle<10)
 {
  DutyCycle=10;
 }
 else if(DutyCycle>82)
 {
  DutyCycle=82;
 }
 OCR1A=ICR1*(DutyCycle/100);  //ทำการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่

***************************************************************************
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โปรแกรมภาษาซีสำหรับการคำนวณของอัลการประหยัดพลังงาน และการควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์

```
***************************************************************************
//กำหนดตัวแปร
//ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับอัลกอริทึมการประหยัดพลังงาน และวงจรอินเวอร์เตอร์
double R2=12.5,xm=0.3984,a=1.1056,V1=220,xc=0.000015,s=0,f=50,Nm=0,Ns=0;
double E1=0, E2=0,E3=0,E4=0,E5=0,E6=0,E7=0;
double A=0,B=0,C=0,D=0,dI1=0,dI1_new=1000,f_min=0;
double volume=0;
double frequency=0;
 int inverter_01=2,inverter_02=3,inverter_03=4,inverter_04=5;
double interruptCtr = 1;
//*************************************************************************
//ฟังก์ชันตั้งค่าบอร์ด Arduino [void setup()]
void setup()
{
//เปิดการทำงานทามเมอร์
pmc_set_writeprotect(false);
pmc_enable_periph_clk(ID_TC7);

// โปรแกรมสำหรับกำหนดการทำงานนับเวลาของทามเมอร์ (Interrupt timer) ที่ค่าความถี่เท่ากับ 10 kHz
TC_Configure(/* clock */TC2,/* channel */1, TC_CMR_WAVE | TC_CMR_WAVSEL_UP_RC | TC_CMR_TCCLKS_TIMER_CLOCK4);
 TC_SetRC(TC2, 1, 65);
 TC_Start(TC2, 1);

// เปิดการทำงานทามเมอร์อินเตอร์รัพท์
TC2->TC_CHANNEL[1].TC_IER=TC_IER_CPCS;
TC2->TC_CHANNEL[1].TC_IDR=~TC_IER_CPCS;
```

```
NVIC_EnableIRQ(TC7_IRQn);

//กำหนดช่องสัญญาณเอาต์พุตสหรับควบคุมกสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์
pinMode(inverter_01,OUTPUT);
pinMode(inverter_02,OUTPUT);
pinMode(inverter_03,OUTPUT);
pinMode(inverter_04,OUTPUT);
}
//***********************************************************************
//ฟังก์ชันวนรอบของบอร์ด Arduino [void loop()]
void loop()
{
volume = analogRead(A1);     //รับสัญญาณแอนาล็อกจาก (A1) และแปลงเป็นดิจิตอล (volume)
Nr = volume*3.18;            //ทำการคูณค่าคงที่เท่ากับ 3.18 เพื่อปรับอัตราส่วนของระหว่าง
แรงดันต่อความเร็วรอบให้ได้ 1 V : 1000 rpm

for (f=25; f<=50; f=f+0.5)   //ทำการปรับเพิ่มค่าความถี่จาก 25 Hz  ถึง 50 Hz โดยที่เพิ่ม
ครั้งละ 0.5 Hz เพื่อใช้ในการค้นหาค่าความถี่ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละความเร็วรอบ
  {
  N=Nr+332;      //แปลงค่าความเร็วรอบอ้างอิงให้เป็นค่าความเร็วรอบสำหรับป้อนให้กับ
อัลกอริทึม
  Ns=120*f/2;                //คำนวณความเร็วซิงโครนัส (rpm)
  s=abs((Ns-N)/Ns);          //คำนวณค่าสลิป

//สมการสัมประสิทธิ์ตัวแปร E2 E4 E5 และ E7
E2=abs(((3.14*xm*(R2/s))/sqrt(pow((R2/s),2) + pow((3.14*f*xm*2),2))));
E4=abs((9.86*pow(xm,2)*2*f*(R2/s))/pow(sqrt(pow((R2/s),2) + pow((3.14*f*xm*2),2)),2));
E5=abs((3.14*xm*f*(R2/s))/sqrt(pow((R2/s),2) + pow((3.14*f*xm*2),2)));
E7=abs(1/(2*3.14*f*xc));
//สมการของสัมประสิทธิ์ตัวแปร A B C และ D
```

```
A=V1*(a*a*(E4)+a*(E2+E4));
B=(E7*(R1+E5)-E5*(a*a*R1+Ra)-R1*Ra);
C=-V1*(a*a*R1+Ra-E7)*(E2+E4)*(Ra+a*a*E5-E7+a*E5);
D=pow((-a*a*R1*E5-(Ra-E7)*(R1+E5)),2);

dI1=abs((A)/(B)-(C)/(D));          //สมการอนุพันธ์กระแสที่ขดลวดหลักเทียบกับวามถี่

  if(dI1_new>=dI1)                 //ทำการค้นหาค่าความถี่ที่ทำให้ dI1 มีค่าน้อยที่สุด
       {
       dI1_new=dI1;
       f_min=f;
       }
  }
dI1_new=100;                       //กำหนดค่า dI1_new ใหม่อีกครั้ง เพื่อใช้สำหรับการคำนวณ
                                   ในครั้งถัดไป

//เนื่องงานวิจัยนี้ทำการออกแบบให้ทามเมอร์ทำการอินเตอร์รัพท์ทุก ๆ 100 µs และการทุกครั้ง
ที่มีการอินเตอร์รัพท์ค่า interruptCtr จะเพิ่มขึ้นหนึ่งค่า ซึ่งในงานวิจัยจะใช้จำนวนครั้งในการ
อินเตอร์รัพท์ของทามเมอร์เป็นตัวกำหนดระยะเวลาในการสวิตซ์ และควบคุมสถานะลอจิกที่ใช้
สำหรับการควบคุมสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์

frequency=10000/f_min;             //กำหนดจำนวนครั้งของการอินเตอร์รัพท์ของทามเมอร์
(interruptCtr)
}
//************************************************************************
//ฟังก์ชันอินเตอร์รัพท์ของทามเมอร์
 void TC7_Handler()
{
   TC_GetStatus(TC2, 1);
    interruptCtr++;
```

```
if(interruptCtr*100>(frequency*5) &&interruptCtr*100<=(frequency*50) )
        {
        digitalWrite(inverter_01, HIGH);
        digitalWrite(inverter_02, HIGH);
        digitalWrite(inverter_03, LOW);
        digitalWrite(inverter_04, LOW);
        }
else if(interruptCtr*100>(frequency*55) && interruptCtr*100<=(frequency*100))
        {
        digitalWrite(inverter_01, LOW);
        digitalWrite(inverter_02, LOW);
        digitalWrite(inverter_03, HIGH);
        digitalWrite(inverter_04, HIGH);
        }
 else if(interruptCtr>frequency)
        {
          interruptCtr = 0;
         }
  else
        {
        digitalWrite(inverter_01, HIGH);
        digitalWrite(inverter_02, HIGH);
        digitalWrite(inverter_03, HIGH);
        digitalWrite(inverter_04, HIGH);
        }
}
```

ภาคผนวก ง.

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์กับอัตราการไหล (k_p)

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์กับอัตราการไหล (k_p)

จากการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำหอยโข่งที่ค่าความเร็วรอบต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการ พบว่า ค่าอัตราการไหลแปรผันตรงกับค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ ง.1

ตารางที่ ง.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์กับอัตราการไหลของน้ำ

ค่าความเร็วรอบมอเตอร์(rpm)	Flow rate (L/min)
2670	76
2600	74
2500	72
2400	69
2300	66
2200	63
2100	60
2000	57
1900	54
1800	51
1700	48
1600	45
1500	42
1400	40

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากผลการทดสอบในตารางที่ ง.1 สามารถคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับค่าความเร็วรอบได้จาก ค่าเฉลี่ยของผลหารระหว่างค่าความเร็วรอบต่ออัตราการไหล (k_p) ดังสมการที่ (ง-1) จากการคำนวณด้วยสมการดังกล่าว พบว่า k_p มีค่าประมาณ 35.12 รอบต่อลิตร

$$k_p = \frac{\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{Speed_i}{Flow_i} \right)}{N} \qquad (ง\text{-}1)$$

ภาคผนวก จ

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

ธัชพงศ์ สุวงษา, กองพล อารีรักษ์ และกองพัน อารีรักษ์ (2558). **การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสสำหรับปั๊มน้ำ ACH-375S.** การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 38 (EECON38) ประจำปี 2558, มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย, 18-20 พฤศจิกายน 2558, หน้า 635-638.

ธัชพงศ์ สุวงษา, กองพล อารีรักษ์ และกองพัน อารีรักษ์ (2559). **การควบคุมอัตราการไหลของปั๊มน้ำไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี.** การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 39 (EECON39) ประจำปี 2559, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2-4 พฤศจิกายน 2559, หน้า 497-500.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38 (EECON-38) 18 - 20 พฤศจิกายน 2558 มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสสำหรับปั๊มรุ่น ACH-375S

Parameters Identification of Single-Phase Induction Motor for ACH-375S Pump

ธัชพงศ์ สูงงา กองพล อารีรักษ์[1] และกองพัน อารีรักษ์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[1]Corresponding Author: kongpol@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส สำหรับปั๊มรุ่น ACH-375S ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search: ATS) โดยใช้ความเร็วรอบของมอเตอร์เป็นค่าอ้างอิงในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ และเพื่อยืนยันความถูกต้องของพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ ได้ทำการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB เปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงที่ได้จากห้องปฏิบัติการ จากการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีที่นำเสนอในบทความ พบว่า พารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับปั๊มน้ำรุ่น ACH-375S มีความถูกต้องเมื่อเทียบกับผลการทดสอบจริง

คำสำคัญ: มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส การค้นหาค่าพารามิเตอร์ การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

Abstract

This paper presents the parameters identification of single-phase induction motor for ACH-374S pump using an adaptive tabu search (ATS) technique. The speed values are used to the reference values for identification in the paper. For validation, the simulation results from MATLAB are compared with the experimental results from testing in laboratory. From the identification, the parameters from ATS can provide the good results to achieve the accurate parameters of induction motor for ACH-375S pump.

Keywords: Single-phase induction motor, Parameter identification, Adaptive tabu search

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาถูก ทนทาน โครงสร้างไม่ซับซ้อน และง่ายต่อการบำรุงรักษา จึงมีงานวิจัยเกี่ยวข้องกับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสเพิ่มมากขึ้น ด้วยเหตุนี้พารามิเตอร์ของมอเตอร์จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในการวิเคราะห์การทำงานเชิงลึก หรือการออกแบบตัวควบคุม เช่น ตัวควบคุมแบบพีไอ [1] ตัวควบคุมแบบฟัซซี [2] เป็นต้น พารามิเตอร์บางค่าสามารถหาได้จากผู้ผลิต เช่น โพล (pole) และตัวเก็บประจุช่วยเดินเครื่อง (C) ส่วนในบางค่า เช่น ความต้านทานของขดลวดหลัก (R_M), ความเหนี่ยวนำของขดลวดหลัก (L_M), ความต้านทานของโรเตอร์ (R_r), ความเหนี่ยวนำของโรเตอร์ (L_r), ความเหนี่ยวนำร่วม (L_{mutual}), ความต้านทานของขดลวดช่วย (R_A), ความเหนี่ยวนำของขดลวดช่วย (L_A), ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (J) และอัตราส่วนจำนวนรอบ (turn ratio) ไม่สามารถหาได้จากผู้ผลิต แต่พารามิเตอร์เหล่านี้สามารถหาได้จากการทดสอบด้วยวิธีการพื้นฐาน [3] ถึงแม้ว่าจะรู้ค่าพารามิเตอร์ทั้งจากการทดสอบ และจากผู้ผลิต แต่ค่าที่ได้อาจไม่มีความเหมาะสม ด้วยเหตุนี้บทความนี้จึงนำเสนอวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ ซึ่งการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวมีการเพิ่มกลไกการค้นหา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหลุดจากคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น และประสิทธิภาพในการลู่เข้าหาคำตอบที่แม่นยำมากขึ้น คือ การเดินย้อนรอยเดิม และการปรับรัศมีการค้นหา ซึ่งได้มีการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์แล้วว่าคำตอบมีการลู่เข้าที่เหมาะสม [4] ด้วยเหตุนี้ในบทความจึงเลือกใช้วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวในการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

การนำเสนอในบทความนี้ ประกอบด้วยการทบทวนการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวนำเสนอในหัวข้อที่ 2 ส่วนหัวข้อที่ 3 กล่าวถึงการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์รวมถึงผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ และอภิปรายผล ในหัวข้อสุดท้ายเป็นการสรุปผลการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

2. ทบทวนการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

การค้นหาแบบตาบูพื้นฐาน [5] ได้ถูกนำไปพัฒนาเพื่อปรับปรุงสมรรถนะให้ดีกว่าเดิม ซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบ โดยการค้นหาแบบตาบูพื้นฐานมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1: กำหนดให้ t เป็นจำนวนรอบของการค้นหา และ t_{max} เป็นจำนวนรอบสูงสุดที่จะทำการค้นหา

ขั้นที่ 2: ทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น s_0 ภายในพื้นที่การค้นหารอบข้างในรัศมี R ขณะนี้ s_0 มีสถานะเป็นคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น กำหนดให้ค่า $s_0 = s_{best}$

ขั้นที่ 3: ทำการสุ่มคำตอบใหม่ N คำตอบโดยการเดินรอบ ๆ คำตอบ s_0 ภายในพื้นที่ค้นหา กำหนดให้ $s_1(r)$ เป็นเซตของคำตอบที่ประกอบไปด้วยคำตอบใหม่ทั้งหมด N คำตอบ ดังรูปที่ 1

ขั้นที่ 4: ทำการประเมินค่าของคำตอบที่อยู่ภายใน $s_1(r)$ ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แล้วเลือกคำตอบที่ดีที่สุด กำหนดให้คำตอบนั้นเป็น s_{best}^{new} ดังรูปที่ 1

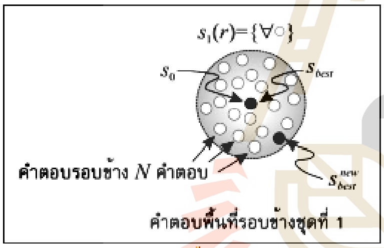
ขั้นที่ 5: ถ้า s_{best}^{new} ดีกว่า s_{best} แล้ว กำหนดให้ $s_{best} = s_{best}^{new}$ ถ้าไม่มีคำตอบที่ดีกว่า s_{best} ให้ไปยังขั้นตอนที่ 6

ขั้นที่ 6: กำหนดค่า $s_0 = s_{best}$

ขั้นที่ 7: ถ้า s_{best} ไม่อยู่ใน *Neighbor List* ให้ทำการบันทึก s_{best}^{new} ลงใน *Neighbor List*

ขั้นที่ 8: ถ้า $t > t_{max}$ ให้ยุติการค้นหา คำตอบที่ได้จะเป็นคำตอบที่ดีที่สุด

ขั้นที่ 9: ถ้า $t < t_{max}$ ให้กลับไปเริ่มที่ข้อ 2 ใหม่ และทำการค้นหาจนกระทั่งถึงเป้าหมายที่ตั้งไว้

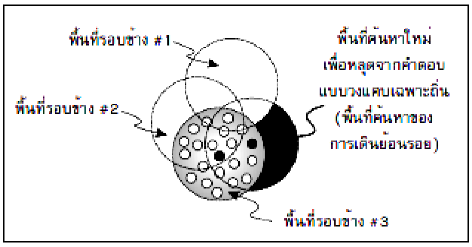


รูปที่ 1 คำตอบพื้นที่รอบข้าง s_0

จากกลไกการค้นหาแบบตาบูพื้นฐานที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยในอดีตได้มีการปรับปรุงสมรรถนะการค้นหาดังกล่าว โดยมีการเพิ่มกลไกการเดินย้อนรอยเดิม และการปรับรัศมีการค้นหา ซึ่งอธิบายดังต่อไปนี้

2.1 การเดินย้อนรอยเดิม (Back Tracking)

การเดินย้อนรอยเดิมเป็นขั้นตอนอนุญาตให้ระบบค้นหาทำการกลับไปค้นหาพื้นที่คำตอบเก่าที่เคยถูกค้นหาแล้ว คำตอบที่ดีกว่าจะถูกเลือกจากพื้นที่คำตอบที่ถูกย้อนรอย และคำตอบปัจจุบันที่มีอยู่ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การเดินย้อนรอยเดิม

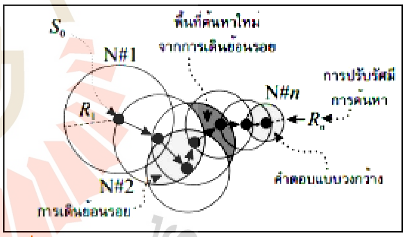
จากรูปที่ 2 พบว่าพื้นที่ในการค้นหาใหม่ก็จะเกิดขึ้นด้วย จึงทำให้การค้นหามีโอกาสที่จะหลุดออกจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่น การเดินย้อนรอยเดิมจึงเป็นกลไกหนึ่ง ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการหลุดจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่นได้เป็นอย่างดี

2.2 การปรับรัศมีการค้นหา (Adaptive Radius)

การปรับรัศมีการค้นหาจะทำการปรับลดรัศมีการค้นหาในขณะทำการค้นหาลง ซึ่งการลดรัศมีจะดำเนินไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง โดยใช้ค่าประเมินเป็นองค์ประกอบในการพิจารณาการปรับค่ารัศมีการค้นหา คือ เมื่อคำตอบปัจจุบันให้ค่าการประเมินที่ดีขึ้น รัศมีการค้นหาจะแคบลงตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1) ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการลู่เข้าหาคำตอบได้เป็นอย่างดี ดังรูปที่ 3 แสดงลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบของระบบการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

$$radius_{new} = \frac{radius_{old}}{DF} \tag{1}$$

DF คือ ตัวประกอบลดรัศมี (decreasing factor) ซึ่งกำหนดให้ $DF > 1$ โดยค่าที่เหมาะสมของ *DF* จะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปัญหาแต่ละประเภท



รูปที่ 3 การลู่เข้าหาคำตอบของระบบการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

จาก 2 กลไกที่ได้กล่าวไปข้างต้นนั้น ทำให้การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวมีสมรรถนะในการค้นหาคำตอบดีกว่าการค้นหาแบบตาบูพื้นฐาน และการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวนี้จะประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญด้วยกัน 4 ค่า ได้แก่ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง รัศมีเริ่มต้น และตัวประกอบลดรัศมี โดยในบทความนี้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะมีค่าเท่ากับ 5, 10, 10 และ 1.3 ตามลำดับ

3. การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์

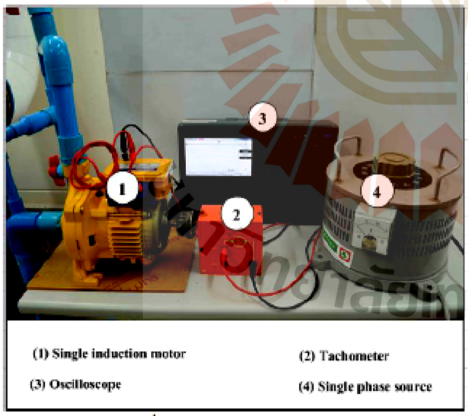
จากการทบทวนเกี่ยวกับวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวในหัวข้อที่ 2 ในหัวข้อนี้จะเป็นการประยุกต์ใช้วิธีดังกล่าวในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ซึ่งในการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวจะต้องมีการกำหนดขอบเขตในการค้นหา แสดงได้ดังตารางที่ 1 โดยขอบเขตดังกล่าวพิจารณาจาก ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวนได้จากวิธีพื้นฐาน [3] ที่พิกัดของมอเตอร์ และศึกษาเพิ่มเติมในงานวิจัยที่

เกี่ยวข้องในกรณีขอบเขตของค่าโมเมนต์ความเฉื่อย [6-8] ซึ่งทำให้ทราบค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด 11 ตัว แต่ในบทความนี้จะทำการค้นหาด้วยวิธีตาบูเชิงปรับตัวเพียง 6 ตัว ได้แก่ L_M, R_r, L_r, L_{mutual}, L_A และ J เนื่องจากพารามิเตอร์อีก 5 ตัว ได้แก่ R_M, R_A, C, โพล และอัตราส่วนจำนวนรอบ สามารถวัดได้จากเครื่องมือวัด ร่วมกับการคำนวณด้วยวิธีพื้นฐานในเบื้องต้นซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้ R_M = 12.5 Ω, R_A = 15.3 Ω, C = 15 μF, pole = 2, turn ratio = 1.063 ส่วนที่เหลืออีก 6 ตัวแสดงได้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส และขอบเขตการค้นหา

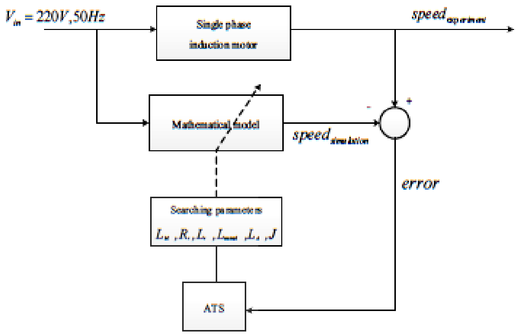
พารามิเตอร์	การค้นหาด้วยวิธีพื้นฐาน	ขอบเขตการค้นหา	การค้นหาด้วยวิธีตาบูเชิงปรับตัว
L_M(mH)	19.38	[5 35]	7.30
R_r(Ω)	12.91	[5 25]	14.29
L_r(mH)	19.38	[5 35]	28.50
L_{mutual}(H)	0.398	[0.1 1]	0.54
L_A(mH)	23.68	[5 35]	22.20
J (kg.m^2)	0.00035	[0.0001 0.005]	0.0016

ในบทความนี้จะใช้ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีอุปกรณ์การทดสอบดังรูปที่ 4 เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการเปรียบเทียบกับความเร็วรอบจากการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยแผนภาพการค้นหาค่าพารามิเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 ชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ

จากรูปที่ 5 แสดงแผนภาพบล็อกไดอะแกรมการค้นหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (e) ระหว่างความเร็วรอบจากการทดสอบ ($speed_{experiment}$) กับค่าความเร็วรอบจากการจำลองสถานการณ์ ($speed_{simulation}$) คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีตาบูเชิงปรับตัว ฟังก์ชันดังกล่าวคำนวณได้จากสมการที่ (2) โดยมีวัตถุประสงค์ของการค้นหาเพื่อทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยสุด



รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมการค้นหาด้วยวิธีตาบูเชิงปรับตัว

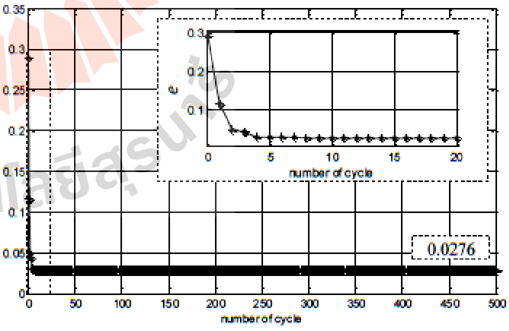
$$e=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left[speed_{experiment}(i)-speed_{simulation}(i)\right]^2}{N}} \quad (2)$$

โดยที่ e คือ ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย

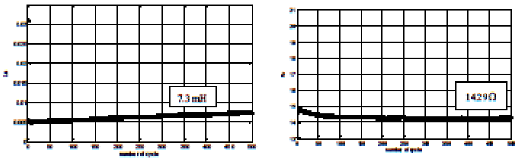
N คือ จำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด

3.1 ผลการค้นหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

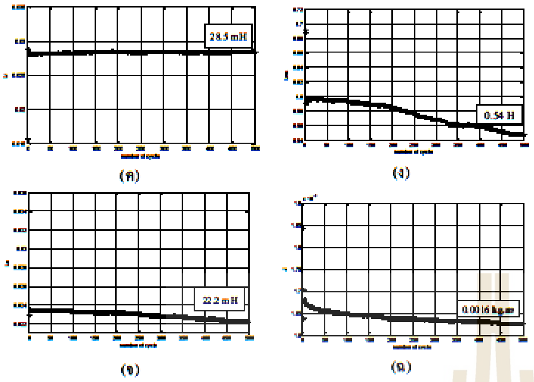
จากการหาค่าพารามิเตอร์ที่ผ่านมาด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 ที่ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.0276 และลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบแสดงได้ดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7



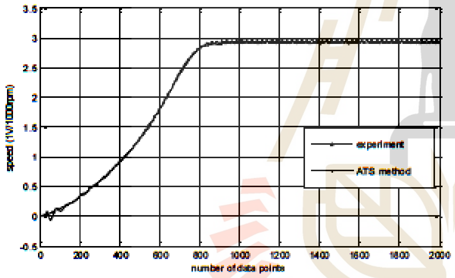
รูปที่ 6 ลักษณะการลู่เข้าของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย



(ก) (ข)



รูปที่ 7 (ก) ลักษณะการลู่เข้าของค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดหลัก (L_M)
(ข) ลักษณะการลู่เข้าของค่าความต้านทานของโรเตอร์ (R_r)
(ค) ลักษณะการลู่เข้าของค่าความเหนี่ยวนำของโรเตอร์ (L_r)
(ง) ลักษณะการลู่เข้าของค่าความเหนี่ยวนำร่วม (L_{mutual})
(จ) ลักษณะการลู่เข้าของค่าความเหนี่ยวของขดลวดช่วย (L_a)
(ฉ) ลักษณะการลู่เข้าของค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (J)



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบความเร็วรอบของมอเตอร์

จากกราฟในรูปที่ 6 และรูปที่ 7(ก) ถึง 7(ฉ) แสดงให้เห็นถึงลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสม ที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยที่สุด และจากรูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบความเร็วรอบของมอเตอร์ จากพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวกับความเร็วรอบที่ได้จากการทดสอบ โดยกราฟความเร็วรอบทั้งสองมีความใกล้เคียงกัน ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวมีความถูกต้อง

4. สรุป

การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส สำหรับปั๊มรุ่น ACH-375S ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว สามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้อย่างถูกต้อง จากการทดสอบเปรียบเทียบความเร็วรอบระหว่างค่าที่วัดได้จากห้องปฏิบัติการณ์กับการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อยืนยันความถูกต้อง พบว่าความเร็วรอบของมอเตอร์จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB มีค่าใกล้เคียงกับความเร็วรอบที่วัดได้จากห้องปฏิบัติการ แสดงให้เห็นว่าการค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวมีความถูกต้อง เมื่อเทียบกับผลการทดสอบจริง

5. เอกสารอ้างอิง

[1] F. A. S. Neves, R. P. Landim, E. B. S. Filho, Z. D. Lins, J. M. S. Cruz, and A. G. H. Accioly, "Single-phase induction motor drives with direct torque control," *28th, Annual Conference of the Industrial Electronics(IECON 02)., vol.1, Nov.2002, pp.241-246.*

[2] D. Wang and Y. Shi, "Sensorless Fuzzy Speed Control for Single Phase Induction Motor," *2009 Sixth International Conference on Fuzzy System and Knowledge Discovery(FSKD'09), vol.4, Aug.2009, pp.163-165.*

[3] B. S. Guru and H. R. Hiziroglu, *Electric Machinery and Transformers*, 3rd ed.: Oxford University Press, 2001, pp.570 – 600

[4] D. Puansdownreong, K-N. Areerak, A. Srikaew, S. Sujitjurn and P. Totarong, "System Identification via Adaptive Tabu Search," *International Conference on Industrial Technology(ICIT02), vol.2, Dec.2002, pp.915-920.*

[5] อาทิตย์ ศรีแก้ว, *ปัญญาเชิงคำนวณ*, ฉบับที่ 1.: จรัลสนิทวงศ์การพิมพ์, 2553, หน้า 27 – 30.

[6] R. A. GUINEE, and C. Lyden,"Motor Parameter Identification Using Response Surface Simulation And Analysis," *Proc. Of the American Control Conference, vol.6, Jun.2001, pp. 4597 – 4602.*

[7] W. Sea-kok and P. Lumyong, "Characteristics evaluation of 3 phase induction motor based on an acceleration method with increasing moment of inertia technique ," *4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives(SDEMPED 2003)., Ang.2003, pp. 93 – 98.*

[8] F. Andoh, "Moment of Inertia Identification Using the Time Average of the Product Torque Refernce Input and Motor Position," *IEEE Transaction on Power Electronics., vol.22, Nov.2007, pp.0885 – 8993.*

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 39 (EECON-39) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การควบคุมอัตราการไหลของปั๊มน้ำไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี
Flow Rate Control of Electric Pump using Fuzzy Controller

ธัชพงศ์ สุวงษา กองพล อารีรักษ์[1] และกองพัน อารีรักษ์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
[1]Corresponding Author: kongpol@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการควบคุมอัตราการไหลของปั๊มน้ำไฟฟ้าด้วยการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่ใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี วงจรขับเคลื่อนปั๊มไฟฟ้าใช้วงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส วงจรแปลงผันแบบบัคก์ และวงจรซอฟท์สวิตชิ่งดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่มีแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ชุดควบคุมความเร็วรอบให้มีค่าคงที่ ใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีสร้างโดยใช้บอร์ด Arduino รุ่น MEGA 1280 ในบทความได้มีการนำเสนอผลการทดสอบจริง เพื่อยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมแบบฟัซซีในการควบคุมความเร็วรอบ จากผลการทดสอบ พบว่าชุดควบคุมที่นำเสนอในบทความสามารถควบคุมให้ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าคงที่ตามค่าความเร็วรอบอ้างอิงตามที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิผล

คำสำคัญ: การควบคุมความเร็วรอบ ปั๊มไฟฟ้า ตัวควบคุมแบบฟัซซี

Abstract

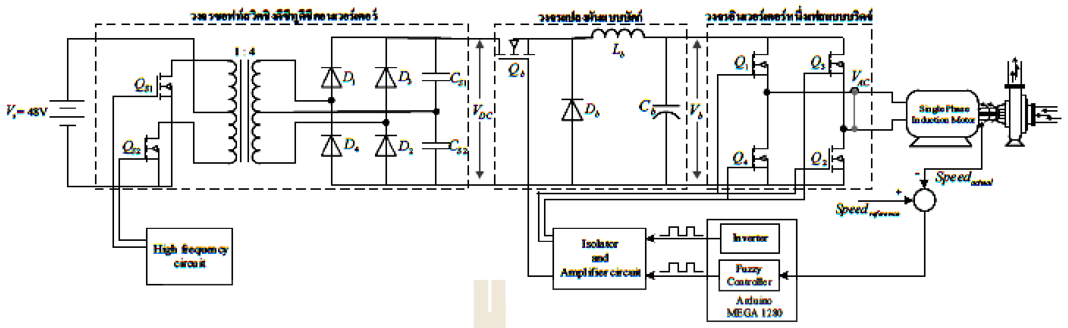
The paper proposes the flow rate control with the speed control of electric pump using the fuzzy controller. The single phase inverter the buck converter and the soft-switching dc-dc converter are the drive circuit of the system. In the paper, the battery is used for the energy source. The fuzzy controller is applied to control the speed of electric pump to constant value. The Arduino MEGA 1280 board is used for the controller. Moreover, the experimental results are shown in the paper to confirm the performance of the fuzzy controller. From the experimental results, the fuzzy controller proposed in the paper can control the speed to track the reference value.

Keywords: speed control, electric pump, fuzzy controller

1. บทนำ

ปัจจุบันในภาคเกษตรกรรมได้มีการใช้งานปั๊มน้ำไฟฟ้าชนิดหอยโข่งกันอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้เนื่องจากปั๊มน้ำไฟฟ้าชนิดดังกล่าวมีสมรรถนะในการทำงานที่ดี ทนทาน และบำรุงรักษาง่าย อย่างไรก็ตามการติดตั้งปั๊มน้ำไฟฟ้าชนิดดังกล่าวจะทำได้เฉพาะในบริเวณพื้นที่ที่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าเข้าถึงเท่านั้น ซึ่งไม่สามารถติดตั้งในพื้นที่ที่อยู่ห่างไกลได้ นอกจากนี้ การควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ได้จากปั๊มไฟฟ้าจะมีความยุ่งยากมากในกรณีที่ต้องการปรับให้น้ำมีอัตราการไหลคงที่ตามต้องการ เนื่องจากโดยทั่วไปการปรับอัตราการไหลของน้ำจะอาศัยการปรับที่สวิตช์วาล์วโดยตรงจากผู้ใช้ ด้วยเหตุนี้ ในบทความนี้ จึงได้นำเสนอการขับเคลื่อนปั๊มน้ำไฟฟ้าด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส (Single Phase - Inverter) วงจรแปลงผันแบบบัคก์ (Buck Converter) และวงจรซอฟท์สวิตชิ่งบูสท์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ (Soft-Switching DC-DC Converter) เป็นวงจรขับเคลื่อนปั๊มน้ำ แสดงดังรูปที่ 1 โดยวงจรขับเคลื่อนปั๊มไฟฟ้าดังกล่าว สามารถติดตั้งได้ในบริเวณพื้นที่ที่ห่างไกลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าตามบ้าน เนื่องจากวงจรขับเคลื่อนได้ใช้พลังงานไฟฟ้าอินพุตจากแบตเตอรี่ ซึ่งรองรับกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ อีกทั้งยังสามารถควบคุมความเร็วรอบเพื่อให้ได้อัตราการไหลของน้ำตามต้องการ ปัจจุบันการควบคุมอัตราการไหลของน้ำผ่านทางวงจรขับเคลื่อนปั๊มไฟฟ้านิยมใช้ตัวควบคุมต่าง ๆ เช่น ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) [1] แต่ในบทความนี้ได้นำเสนอการควบคุมอัตราการไหลของน้ำโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี [2] ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวไม่จำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และให้ประสิทธิผลที่ดีในการควบคุมความเร็วรอบ

การนำเสนอของบทความนี้ ได้แบ่งออกเป็นหัวข้อต่าง ๆ คือ หัวข้อที่ 2 ได้อธิบายเกี่ยวกับวงจรขับเคลื่อนปั๊มน้ำไฟฟ้า ประกอบด้วย วงจรซอฟท์สวิตชิ่งดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ วงจรแปลงผันแบบบัคก์ และวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบบริดจ์ ในหัวข้อที่ 3 ได้อธิบายรายละเอียดการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี ส่วนหัวข้อที่ 4 ได้นำเสนอการสร้างฮาร์ดแวร์ของวงจรขับเคลื่อนปั๊มน้ำไฟฟ้า และผลการทดสอบการควบคุมความเร็วรอบในทางปฏิบัติ และในหัวข้อสุดท้าย ซึ่งเป็นหัวข้อที่ 5 เป็นการสรุปผลการควบคุมอัตราการไหลของน้ำผ่านการควบคุมความเร็วรอบที่ใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีตามวิธีการออกแบบที่นำเสนอในบทความ



รูปที่ 1 วงจรขับเคลื่อนปั๊มไฟฟ้าที่ใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี

2. วงจรขับเคลื่อนปั๊มไฟฟ้า

วงจรขับเคลื่อนปั๊มไฟฟ้าดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย 3 ส่วนด้วยกัน คือ วงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ วงจรแปลงผันแบบบัคก์ และวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบบริดจ์โดยแต่ละวงจรมีหน้าที่และหลักการทำงานอธิบายได้ดังนี้

2.1 วงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์

วงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ คือ วงจรเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จากอินพุตแบตเตอรี่(V_s) ที่มีค่าแรงดันพิกัดเท่ากับ 48 V ให้มีค่าแรงดันเอาต์พุต (V_{DC}) ประมาณ 300V โดยวงจรดังกล่าวทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจรแปลงผันแบบบัคก์ โครงสร้างของวงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกกำลังมอสเฟต (Q_{S1}, Q_{S2}) หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ และไดโอด (D_1, D_2, D_3, D_4) ดังรูปที่ 1 หลักการทำงานจะกำหนดให้สวิตช์ Q_{S1} เปิดวงจร และสวิตช์ Q_{S2} ปิดวงจร พร้อมกัน หลังจากนั้น จะกำหนดให้สวิตช์ Q_{S1} ปิดวงจร และสวิตช์ Q_{S2} เปิดวงจร โดยการทำงานของสวิตช์ทั้งสองตัว จะทำงานสลับกันเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ ในช่วงความถี่ 20 kHz เพื่อสร้างสัญญาณให้กับหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ และวงจรไดโอด (D_1, D_2, D_3, D_4) ซึ่งสุดท้ายจะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อจ่ายให้กับวงจรแปลงผันแบบบัคก์ต่อไป

2.2 วงจรแปลงผันแบบบัคก์

วงจรแปลงผันแบบบัคก์ คือ วงจรลดระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ ที่มีค่าแรงดันพิกัดเท่ากับ 300 V ให้มีค่าแรงดันเอาต์พุต (V_b) ตามที่ต้องการ โดยวงจรดังกล่าวทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส โครงสร้างของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมอสเฟต (Q_b) ไดโอด (D_b) ตัวเหนี่ยวนำ (L_b) และตัวเก็บประจุ (C_b) ดังปรากฏในรูปที่ 1 ซึ่งในการออกแบบกำหนดให้ค่าแรงดันเอาต์พุตอยู่ในย่านการทำงานจริงโดยแรงดันไฟฟ้าสามารถปรับเปลี่ยนได้ในช่วง 100 V ถึง 250 V ตามการสวิตช์ Q_b กำหนดค่าความถี่ในการสวิตช์ (f) เท่ากับ 10 kHz การควบคุมขนาดแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคก์สามารถทำได้โดยการควบคุมรอบการทำงาน (duty cycle : k) ของการเปิดปิดสวิตช์อุปกรณ์มอสเฟส (Q_b) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (1) จากสมการดังกล่าว เมื่อ k มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรบัคก์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ในทางตรงกันข้าม ถ้า k มีค่าลดลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน ซึ่งการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวจะส่งผลให้ความเร็วรอบของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากเป็นการปรับค่ายอดแรงดัน (peak) ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (V_{AC}) ที่มอเตอร์ ด้วยเหตุนี้ การควบคุมความเร็วรอบจึงสามารถทำได้โดยการควบคุมรอบการทำงาน (k) ของสวิตช์ Q_b ซึ่งในบทความนี้ได้นำเสนอการควบคุมอัตราการไหลของน้ำด้วยการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์โดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี โดยรายละเอียดการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าว สามารถดูได้จากหัวข้อที่ 3

$$V_b = kV_{DC} \;\; ; 0.4 \leq k \leq 0.9 \qquad (1)$$

จากสมการที่ (1) ค่าต่ำสุดของ k คือ 0.4 สำหรับค่าแรงดันเอาต์พุต (V_b) ประมาณเท่ากับ 100 V และค่าสูงสุดของ k มีค่าเข้าใกล้ 0.9 สำหรับค่าแรงดันเอาต์พุตสูงสุดประมาณเท่ากับ 225 V (แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ (V_{DC}) มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 250 -300 V)

2.3 วงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบบริดจ์

วงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส คือ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ ทำหน้าที่จ่ายแหล่งดันไฟฟ้ากระแสสลับ (V_{AC}) สำหรับใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ของปั๊มไฟฟ้า โดยโครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์ดังกล่าว ประกอบด้วยสวิตช์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมอสเฟต 4 ตัว (Q_1, Q_2, Q_3, Q_4) ต่อเรียงกันเป็นวงจรบริดจ์ดังรูปที่ 1 หลักการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์จะกำหนดให้การทำงานของสวิตช์ (Q_1, Q_2) เปิดวงจร และสวิตช์ (Q_3, Q_4) ปิดวงจรพร้อมกัน และหลังจากนั้น จะกำหนดให้สวิตช์ (Q_1, Q_2) ปิดวงจร

และสวิตช์ (Q_3, Q_2) เปิดวงจรแทน โดยการทำงานของสวิตช์ทั้ง 4 ตัว จะทำงานสลับกันเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ ในช่วงความถี่ 50 Hz (เท่ากับพิกัดความถี่ของมอเตอร์)

3. การควบคุมความเร็วรอบด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี

การควบคุมอัตราการไหลของน้ำจากปั๊มน้ำไฟฟ้า จำเป็นต้องอาศัยการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยในบทความนี้ได้ใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ (Encoder) ซึ่งค่าเอาต์พุตของการตรวจวัดจะอยู่ในรูปของค่าความถี่ ส่งเข้าประมวลผลควบคุมแบบฟัซซีภายในบอร์ด Arduino MEGA 1280 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 การควบคุมความเร็วรอบจริง ($Speed_{actual}$) ให้มีค่าคงที่ตามค่าความเร็วรอบอ้างอิง ($Speed_{reference}$) โดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีจะทำการปรับเปลี่ยนค่ารอบการทำงาน (k) ของสวิตช์ Q_5 ของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ให้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ผ่านมา การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีอาศัยข้อมูล ความรู้ จากประสบการณ์ที่ได้จากการทดสอบการทำงานในห้องปฏิบัติการของผู้วิจัย โดยกำหนดให้อินพุต (Speed error: e_s) คือ ค่าผลต่างระหว่างค่าวามเร็วรอบอ้างอิงกับค่าความเร็วรอบจริงของของมอเตอร์ ดังสมการที่ (2) ทั้งนี้จะเริ่มพิจารณาที่ค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่า ±10 rpm เป็นต้นไป และเอาต์พุต (Output duty cycle: k_d) ที่ได้จากตัวควบคุมฟัซซีจะถูกกำหนดให้เป็นค่าการเปลี่ยนแปลงของค่ารอบการทำงาน (k) ของสวิตช์ Q_5 ต่อไป

$$e_s = Speed_{reference} - Speed_{actual} \tag{2}$$

สำหรับบทความนี้กำหนดให้ค่าเชิงภาษาของความคลาดเคลื่อนความเร็วรอบ หรือตัวแปรอินพุต (e_s) มีด้วยกัน 5 ค่า และมีฟัซซีเซตดังรูปที่ 2 ส่วนค่าเชิงภาษาของตัวแปรเอาต์พุต (k_d) มี 5 ค่าเช่นกัน และสามารถแสดงฟัซซีเซตได้ดังรูปที่ 3 จากการกำหนดค่าเชิงภาษาของอินพุต และเอาต์พุตที่ผ่านมาจึงทำให้มีจำนวนกฎที่เป็นไปได้ทั้งหมด 5 กฎ ดังนี้

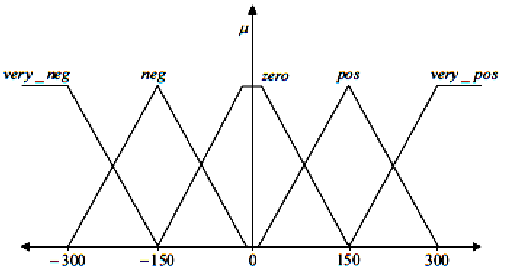
rule 1 : IF e_s is *very_neg* THEN k_d is *very_dec*

rule 2 : IF e_s is *neg* THEN k_d is *dec*

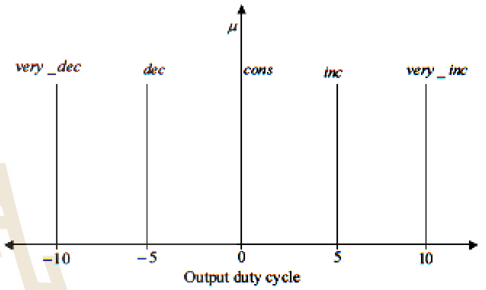
rule 3 : IF e_s is *zero* THEN k_d is *cons*

rule 4 : IF e_s is *pos* THEN k_d is *inc*

rule 5 : IF e_s is *very_pos* THEN k_d is *very_inc*



รูปที่ 2 ค่าเชิงภาษาของตัวแปรอินพุต



รูปที่ 3 ค่าเชิงภาษาของตัวแปรเอาต์พุต

สำหรับขั้นตอนการทำดีฟัซซีเพื่อหาค่าเอาต์พุตจะใช้วิธีการอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno [3] ด้วยวิธีที่เรียกว่า ค่าน้ำหนักเฉลี่ย (weighted average : WA) ซึ่งมีการคำนวณดังสมการที่ 3

$$x_{WA} = \frac{\sum_{m=1}^{m} \mu(k_m) \times k_m}{\sum_{m=1}^{m} \mu(k_m)} \tag{3}$$

โดยที่ $\mu(k_m)$ คือ ค่าความเป็นสมาชิกของฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต

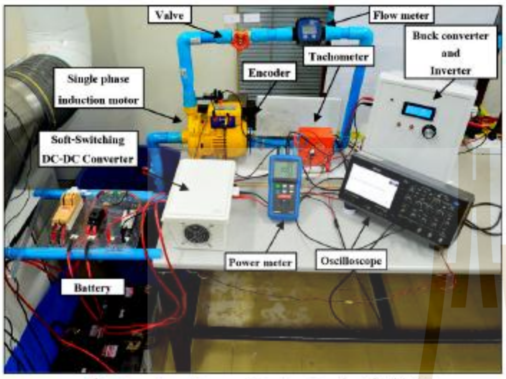
k_m คือ ค่าคงที่ของเอาต์พุตที่เป็นเส้นตรง

จากสมการที่ 3 ค่าเอาต์พุตที่ได้จะถูกนำไปรวมกับค่ารอบการทำงาน (k) ของสวิตช์ Q_5 เพื่อทำให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม จนทำให้ทำให้ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์เข้าใกล้ค่าอ้างอิงมากที่สุด

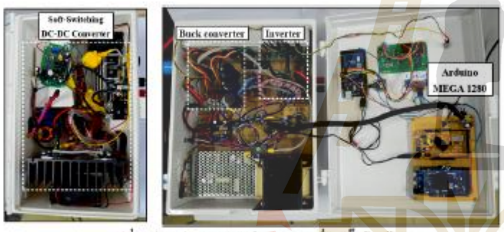
4. ผลการทดสอบและการอภิปราย

วงจรขับเคลื่อนปั๊มน้ำไฟฟ้าดังรูปที่ 1 เมื่อดำเนินการสร้างฮาร์ดแวร์ในการทดสอบจริง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 และแสดงส่วนประกอบภายในชุดขับเคลื่อนดังรูปที่ 5 ซึ่งปั๊มน้ำไฟฟ้าที่ใช้ คือ ปั๊มน้ำไฟฟ้าชนิดหอยโข่ง(รุ่น ACH-375S, 0.37 kW, 220 V_{rms}, 50 Hz) สำหรับการทดสอบการควบคุมความเร็วรอบจริงที่ได้จากมอเตอร์ ให้มีค่าคงที่ตามความเร็วรอบอ้างอิง ได้แบ่งทำการทดลองออกเป็นสองกรณี คือ กรณี

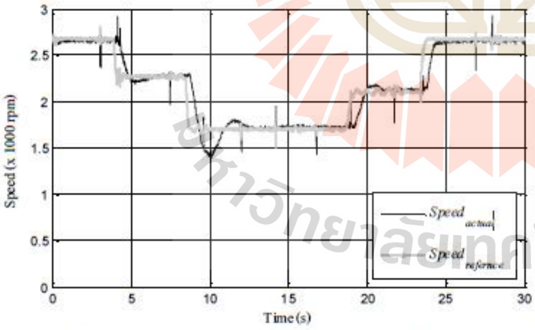
ปรับลดค่าความเร็วรอบอ้างอิง และกรณีปรับเพิ่มค่าความเร็วรอบอ้างอิง ซึ่งผลการทดสอบการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ของปั๊มน้ำไฟฟ้าทั้งสองกรณี สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 4 อุปกรณ์ตรวจวัดและฮาร์ดแวร์ชุดขับเคลื่อนปั๊มน้ำไฟฟ้า



รูปที่ 5 ส่วนประกอบภายในชุดขับเคลื่อนปั๊มน้ำไฟฟ้า



รูปที่ 6 ผลการทดสอบการลู่เข้าของความเร็วรอบจริงกับความเร็วรอบอ้างอิง

จากรูปที่ 6 ที่เวลาเท่ากับ 4 วินาที ได้ทำการปรับลดความเร็วรอบอ้างอิงจาก 2666 rpm เป็น 2260 rpm จะเห็นได้ว่า รูปสัญญาณของความเร็วรอบจริงของมอเตอร์มีค่าลู่เข้าสู่ค่าความเร็วรอบอ้างอิง โดยใช้เวลาในการลู่เข้าประมาณ 2 วินาที และเมื่อทำการปรับลดความเร็วรอบอ้างอิงลดลงอีกครั้งจาก 2260 rpm เป็น 1700 rpm พบว่ารูปสัญญาณใช้เวลาในการลู่เข้าประมาณ 4 วินาที ต่อมาได้ทำการปรับเพิ่มค่าความเร็วรอบอ้างอิงจาก 1700 rpm เป็น 2100 rpm พบว่ารูปสัญญาณความเร็วรอบจริงใช้เวลาในการลู่เข้าประมาณ 4 วินาที และสุดท้ายทำการปรับเพิ่มค่าความเร็วรอบอ้างอิงจาก 2100 rpm เป็น 2650 rpm พบว่าสามารถลู่เข้าตามค่าความเร็วรอบอ้างอิงได้เช่นเดิม โดยใช้เวลาลู่เข้าประมาณ 1.5 วินาที จากผลการทดสอบดังกล่าว จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีที่ได้จากการออกแบบ มีสมรรถนะการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิผล โดยสามารถควบคุมความเร็วรอบจริงของมอเตอร์ให้มีค่าลู่เข้าได้ตามค่าอ้างอิงที่กำหนด ซึ่งจากการทดสอบทั้งสองกรณีจะสังเกตได้ว่าเวลาในการลู่เข้าบางช่วงยังคงมีค่ามาก ทั้งนี้อาจปรับค่าเวลาดังกล่าวได้จากการออกแบบกฎการควบคุมใหม่ แต่ในบทความนี้เวลาในการลู่เข้าดังกล่าวเป็นไปตามความต้องการของผู้วิจัย ซึ่งกำหนดให้ไม่เกิน 10 วินาที ทั้งนี้เนื่องจากในการใช้งานจริงค่าความเร็วรอบอ้างอิงจะไม่เปลี่ยนแปลงเร็วเกินไป ซึ่งส่วนใหญ่จะให้มีค่าคงที่ที่ค่าค่าหนึ่ง

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการควบคุมอัตราการไหลด้วยการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสของปั๊มน้ำไฟฟ้าที่ใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี การทดสอบการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ในบทความนี้ได้ใช้วงจรขับเคลื่อนปั๊มน้ำไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจริง โดยวงจรขับเคลื่อนดังกล่าวใช้วงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส วงจรแปลงผันแบบบัคก์ และวงจรซอฟท์สวิตชิงดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ จากผลการทดสอบ พบว่า ตัวควบคุมแบบฟัซซีที่ได้นำเสนอ สามารถควบคุมให้ค่าความเร็วรอบมีค่าคงที่ตามค่าอ้างอิงที่เพื่อให้ได้อัตราการไหลของน้ำตามต้องการได้อย่างมีประสิทธิผล

6. เอกสารอ้างอิง

[1] I. Bakman and V. Valery, "Sensorless pressure control of centrifugal pumps," Compatibility and Power Electronics, 8th, 2013, pp. 304 – 309

[2] Information and Control, Fuzzy sets, L. A. Zadeh, 1965, pp. 338-353

[3] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy Identification of System and its Applications to modeling and control," IEEE Transaction on System, Man and Cybernetic, 1985, SMC-15, pp. 116-132

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายธัชพงศ์ สุวงษา เกิดเมื่อวันที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2534 ที่อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา จากโรงเรียนแม่สะเรียงบริพัฒศึกษา จังหวัดแม่ฮ่องสอน สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2556 และในปีเดียวกันได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ระหว่างศึกษาระดับปริญญาโท ได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้แก่ ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าพื้นฐาน ปฏิบัติการวงจรและอุปกรณ์ และปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม โดยมีความสนใจในด้านพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง การประหยัดพลังงานมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส และการควบคุมอัติโนมัติ ซึ่งจากการทำวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ และความเข้าใจ ทางด้านพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ และการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสเพื่อการประหยัดพลังงาน โดยมีผลงานตีพิมพ์ปรากฏดังภาคผนวก ก. จำนวน 2 ฉบับ