การประมาณค่าพารามิเตอร์ของกำลังงานสูญเสีย
สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

นางสาวจีรวรรณ หอมจันทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

PARAMETER ESTIMATION OF POWER LOSS FOR SEPARATELY EXCITED DC MOTOR

Jeerawan Homjan

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 2019

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของกำลังงานสูญเสีย
สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์)
ประธานกรรมการ

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

ธิดารัตน์ อารีรักษ์

(ผศ. ดร.ธิดารัตน์ อารีรักษ์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)

(ผศ. ดร.สุดารัตน์ ขวัญอ่อน)
กรรมการ

(ดร.ทศพร ณรงค์ฤทธิ์)
กรรมการ

(ศ. ดร.สันติ แม้นศิริ)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล

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

จีรวรรณ หอมจันทร์ : การประมาณค่าพารามิเตอร์ของกำลังงานสูญเสียสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น (PARAMETER ESTIMATION OF POWER LOSS FOR SEPARATELY EXCITED DC MOTOR) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.กองพล อารีรักษ์, 198 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เนื่องจากในปัจจุบันมีการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นกันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม เช่น งานอุตสาหกรรมของยานพาหนะไฟฟ้า อุตสาหกรรมเหล็ก อุตสาหกรรมหุ่นยนต์ กังหันลม และเครนไฟฟ้า อุตสาหกรรมสิ่งทอ และอุตสาหกรรมกระดาษ เป็นต้น โดยการประหยัดพลังงานในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีหาค่าเหมาะที่สุดในการหาค่ากระแสสนามที่ทำให้เกิดค่ากำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด เมื่อกำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยจะส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ วิธีดังกล่าวนี้ใช้สมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ในการคำนวณหาค่ากระแสสนาม ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียได้จากการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว และจากการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน สามารถให้การประหยัดพลังงานได้สูงสุด 85.92 เปอร์เซ็นต์ และในสภาวะที่แรงบิดโหลดเต็มพิกัดสามารถประหยัดได้ 16.50 เปอร์เซ็นต์ โดยวิธีประหยัดพลังงานดังกล่าวนี้ใช้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์คงที่ทุกสภาวะการทำงาน แต่เนื่องจากสภาวะการทำงานของมอเตอร์ที่เปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไปด้วย ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จึงใช้อัลกอริทึมกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นแบบเวียนเกิดเชิงกำหนด หรืออัลกอริทึม DRLS ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในสมการกำลังงานสูญเสียแบบออนไลน์ ร่วมกับการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว และใช้ค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากวิธีดังกล่าวไปหาค่ากระแสสนามด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด เพื่อทำให้เกิดการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น การทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงานที่มีการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยอัลกอริทึม DRLS โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมและวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน แสดงให้เห็นว่า การประหยัดพลังงานที่มีอัลกอริทึม DRLS สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์สามารถประหยัดพลังงานได้สูงสุดถึง 88.03 เปอร์เซ็นต์ และในสภาวะโหลดเต็มพิกัดสามารถประหยัดพลังงานได้ 27.01 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น สามารถยืนยันได้ว่า การประหยัดพลังงานที่มีอัลกอริทึม DRLS สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ สามารถประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นได้ดีที่สุดเมื่อ

เปรียบเทียบกับการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมและวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงานที่ไม่มีการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา จีรวรรณ หอมจันทร์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

JEERAWAN HOMJAN : PARAMETER ESTIMATION OF POWER LOSS FOR SEPARATELY EXCITED DC MOTOR. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. KONGPOL AREERAK, Ph.D., 198 PP.

SEPARATELY EXCITED DC MOTOR/POWER LOSS/ ENERGY SAVING/ PARAMETER ESTIMATION/ADAPTIVE TABU SEARCH/OPTIMIZATION METHOD/DETERMINISTIC RECURSIVE LINEAR LEAST SQUARE ALGORITHM

This thesis proposes the energy saving for separately excited DC motor drive. The motor is widely used in many industries such as electric vehicle, steel rolling mills, robotic, wind turbine, electric cranes, textile and paper industries, etc. In this work, the optimization method is used to calculate the field current for loss minimization. Thus, a decrease of the power loss indicates that the energy saving in the motor drive system. The calculation of the field current uses the power loss equation. The parameters of the power loss equation are identified by the adaptive tabu search method. The results from the implementation show that the optimization method can save the energy consumed by the motor to 85.92% in maximum. At high load torque condition, the energy saving is equal to 16.50%. From the proposed method, the motor parameters are fixed to constant value in all conditions. In fact, the motor parameters are changed in the different operating conditions. In the thesis, deterministic recursive linear least square algorithm (DRLS) is applied to online estimate the parameters of motor. Moreover, this algorithm is operated with the power loss parameters identification by using the adaptive tabu search. Therefore, the field current calculation by the optimization method uses the estimated parameters from the DRLS algorithm for the energy saving

of separately excited DC motor. This proposed method is called DRLS+OM method. The testing results of the motor drive using the DRLS+OM method are compared with the conventional method and the optimization method. The comparison results show that the DRLS+OM method can achieve the minimum power loss for separately excited DC motor. The maximum percentage of the energy saving is 88.03% and the energy saving is equal to 27.01% at high load torque. The experimental results confirm that the energy saving with the DRLS algorithm for online parameters estimation can provide the best result compared with the conventional method and the optimization method without online estimation.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature จิรวรรณ หอมจันทร์

Advisor's Signature ______

CO-Advisor's Signature ธตรัตน์ ดารีรักษ์

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.กองพล อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิดารัตน์ อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ แนวทางอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งทั้งในด้านการศึกษา รวมทั้งได้ให้โอกาสทางการศึกษา กำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตและการทำงานแก่ผู้วิจัยเสมอมา

รองศาสตราจารย์ ดร.กองพัน อารีรักษ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำแนะนำทางด้านวิชาการ และการเขียนบทความวิชาการ ให้แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ดร.ศศิยา อุดมสุข ดร.พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์ นายชาคริต ปานแป้น นายธัชพงศ์ สุวงษา นายอภิชัย สุยะพันธ์ นายวรสันต์ สัตยาอภิธาน และนางสาวปทุมพร วงค์ใหญ่ ที่ให้ความช่วยเหลือ แลกเปลี่ยนความรู้ทางวิชาการ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ และสถานที่สำหรับการปฏิบัติงาน รวมถึงเลขานุการประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และเจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเอกสาร

คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้ นายไพศิษฐ์ หอมจันทร์ และนางสารภี หอมจันทร์ บิดาและมารดาของผู้วิจัย รวมถึงครอบครัวของผู้วิจัย ที่ได้ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้กำลังใจ และส่งเสริมด้านการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด ตลอดจนคุณครูและอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต

จีรวรรณ หอมจันทร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

สารบัญรูป (ต่อ)

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นกันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม สามารถพบได้ในงานอุตสาหกรรมของยานพาหนะไฟฟ้า (Singari et al., 2010) อุตสาหกรรมกระดาษ (Traian et al., 2011) อุตสาหกรรมเหล็ก (Zuo et al., 2013) อุตสาหกรรมหุ่นยนต์ (Fang et al., 2000) อุตสาหกรรมสิ่งทอ (Traian et al., 2011) กังหันลม (Mahdy et al., 2011) รถไฟฟ้า (Singari et al., 2010) เครนไฟฟ้า (Milan et al., 2009) เป็นต้น โดยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นมีคุณสมบัติที่สำคัญในการควบคุมความเร็วรอบที่ง่าย เพราะสามารถแยกการควบคุมในแต่ละวงจรของมอเตอร์ได้โดยอิสระ (Waleed and Khearia, 2012) เนื่องจากลักษณะการทำงานของมอเตอร์ เมื่อต้องการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้มีความเร็วรอบตั้งแต่ศูนย์ถึงความเร็วรอบพิกัด จะทำการคงค่ากระแสฝั่งสนามไว้ที่พิกัด และทำการควบคุมแรงดันฝั่งอาร์เมเจอร์เพื่อให้ได้ความเร็วรอบที่ต้องการ ในทางกลับกันเมื่อต้องการค่าความเร็วรอบที่สูงกว่าความเร็วรอบพิกัด จะทำการคงค่าแรงดันฝั่งอาร์เมเจอร์ไว้ที่พิกัด และทำการควบคุมกระแสฝั่งสนามเพื่อให้ได้ความเร็วรอบที่ต้องการ และปัจจุบันการอนุรักษ์พลังงานถือเป็นข้อกำหนดของภาคอุตสาหกรรม (พระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน (ฉบับที่ ๒) พ.ศ. ๒๕๕๐) ดังนั้น การประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้าถือเป็นสิ่งสำคัญ เพราะการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ามีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่า 60% ในภาคอุตสาหกรรม (Millie, 2008) ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับ การประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นเพราะประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบขับเคลื่อนสามารถปรับปรุงได้โดยการลดกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ และปรับปรุงประสิทธิภาพของมอเตอร์ให้ดีขึ้น

ในอดีตมีผู้วิจัยเกี่ยวกับการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นกันอย่างต่อเนื่องถึงปัจจุบัน ซึ่งใช้วิธีการควบคุมกระแสสนามเพื่อให้ได้ค่ากำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การใช้ตัวควบคุมเพื่อคำนวณหาค่ากระแสสนามโดยใช้แบบจำลองแม่เหล็ก (Cristian et al., 1999) การใช้ตัวควบคุมที่สามารถวัดกำลังงานในการขับเคลื่อนและค้นหาค่ากระแสสนามที่เหมาะสม (Hong and Park 1987) (Nikos et al., 1991) (Cristian et al., 1999) (Eleftheria et al., 2002) การใช้การควบคุมเหมาะที่สุดในการหาค่ากระแสสนามที่เหมาะที่สุดซึ่งทำให้ค่าฟลักซ์ของมอเตอร์มีค่าดีที่สุด นำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบขับเคลื่อน และลดกำลัง

งานสูญเสียมอเตอร์ (Eleftheria et al., 2002) (Milan et al., 2008) (Rateb, 2013) (Pothi, 2017) การใช้ตัวควบคุมที่เป็นมัลติอินพุตและมัลติเอาต์พุตในการอนุมานค่าเหมาะที่สุดสำหรับค่ากระแสสนามของมอเตอร์ (Nikhil and Rameshwar, 2014) (Sumaiya et al., 2015) และการใช้วิธีฐานแบบจำลองในการหาค่ากระแสสนามสำหรับการประหยัดพลังงาน (Udomsuk et al., 2015) เป็นต้น

จากที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นไปที่การประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยจะใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization Method : OM) เพื่อให้ได้ค่ากระแสสนามที่มีค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน ซึ่งค่าพารามิเตอร์ในสมการกำลังงานสูญเสียมีผลต่อค่ากระแสสนาม เนื่องจากสภาวะการทำงานของมอเตอร์ที่เปลี่ยนแปลง อาจส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไปด้วย งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้อัลกอริทึมกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นแบบเวียนเกิดเชิงกำหนด (The Deterministic Recursive Linear Least Square Algorithm) (Peter, 2011) หรือเรียกว่าอัลกอริทึม DRLS โดยอัลกอริทึมนี้จะใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในสมการกำลังงานสูญเสียแบบออนไลน์ ร่วมกับการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search : ATS) (Puangdownreong et al., 2002) และใช้ค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากวิธีดังกล่าวไปหาค่ากระแสสนามด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด เพื่อทำให้เกิดการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นแบบออนไลน์

1.2.2 เพื่อระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

1.2.3 เพื่อพัฒนาวิธีการประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

1.2.4 เพื่อสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นแบบประหยัดพลังงาน

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีค่าพิกัด

ทางฝั่งอาร์เมเจอร์ คือ 220 โวลต์ กระแส 6.2 แอมแปร์ ฝั่งสนาม คือ 220 โวลต์ กระแส 0.3 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้า 370 วัตต์ ความเร็วรอบ 2360 รอบต่อนาที

1.3.2 ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วงจรชอปเปอร์ในการควบคุมวงจรอาร์เมเจอร์ และวงจรสนามของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

1.3.3 การสร้างตัวควบคุมพีไอจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR

1.3.4 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นเป็นแบบออนไลน์

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ค่าระดับแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นเพื่อประหยัดพลังงานจะต้องมีค่าไม่เกินพิกัดของมอเตอร์

1.4.2 สมการมอเตอร์สำหรับใช้คำนวณเกี่ยวกับการประหยัดพลังงานเป็นสมการอย่างง่าย จะไม่คำนึงสภาวะชั่วครู่ โดยจะพิจารณาเฉพาะสภาวะอยู่ตัวเท่านั้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้ด้านการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

1.5.2 ได้องค์ความรู้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นแบบออนไลน์

1.5.3 ได้ชุดต้นแบบที่สามารถขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นแบบประหยัดพลังงาน

1.5.4 ได้บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ และหรือนานาชาติ

1.6 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์

รายงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 8 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น และขอบเขตของงานวิจัย รวมทั้งประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการควบคุม การประหยัดพลังงาน การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบเวียนเกิด

บทที่ 3 นำเสนอทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สมการพื้นฐานของมอเตอร์ กำลังงานสูญเสียและการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

บทที่ 4 นำเสนอวิธีการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

บทที่ 5 นำเสนอโครงสร้างฮาร์ดแวร์ของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นสำหรับการประหยัดพลังงาน

บทที่ 6 นำเสนอการประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุด

บทที่ 7 นำเสนอการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยอัลกอริทึมกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นแบบเวียนเกิดเชิงกำหนด

บทที่ 8 นำเสนอบทสรุปของการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ การประเมินทางเศรษฐศาสตร์และข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญของการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์หลัก คือ สร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นสำหรับการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ ผู้วิจัยแบ่งการสำรวจงานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันออกเป็น 4 ประเด็นสำคัญ ได้แก่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสรงชนิดแยกกระตุ้น งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอัลกอริทึมกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นแบบเวียนเกิดเชิงกำหนด ซึ่งผลการสำรวจประเด็นข้างต้นนี้ถูกนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2.2 ถึง 2.5 ตามลำดับ รายละเอียดการสำรวจงานวิจัย ประกอบด้วย ปีที่ตีพิมพ์ของงานวิจัย คณะผู้วิจัย และสาระสำคัญที่ได้รับจากงานวิจัย

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม หรือบทความที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เพื่อเป็นแนวทางในการควบคุมกระแสสนามและความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ผู้วิจัยจะนำเสนอในรูปแบบตาราง และเรียงลำดับปีที่ทำการตีพิมพ์ รวมถึงการอธิบายสรุปสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยไว้พอสังเขป ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1	2007	V. Tipsuwanporn, A. Numsomran, N. Klinsmitth, and S. Gulphanich	บทความนี้นำเสนออัลกอริทึมสำหรับควบคุมความเร็วรอบในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยตัวควบคุมฟัซซีชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบระบบที่สามารถเรียนรู้การเพิ่ม ลด และปรับเปลี่ยนกฎบนฐานความรู้ หรือฐานกฎเพื่อให้เหมาะสมกับทุกสภาวะการทำงานของมอเตอร์
2	2011	A. Abdul and A. Talukdar	บทความนี้นำเสนอหลักการของการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยการใช้การควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้นแบบผสม และตัวควบคุมพีไอดีในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น
3	2013	S. Kouadria, S. Belfedhal, E. M. Berkouk, and Y. Meslem	บทความนี้นำเสนอการพัฒนากังหันลมจำลองสำหรับระบบแปลงพลังงานลม โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ
4	2014	G. K. Mishra, A. K. Pandey and A. Maurya	บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยการควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์ กับการควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์และแรงดันสนามร่วมกัน โดยใช้ตัวควบคุมพีไอ
5	2015	P. Khanke, and S. Jain	บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบดั้งเดิม ได้แก่ ตัวควบคุมพี ตัวควบคุมพีดี ตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมพีไอดี สำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยการจำลองสถานการณ์บน MATLAB/ SIMULINK โดยการใช้วิธีปรับจูนแบบอัตโนมัติ

ตารางที่ 2.1 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
6	2015	M. Sahana, S. Angadi, and A. B. Raju	บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างชุดควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ
7	2017	K S. Deshmukh and R. S. Hiware	บทความนี้นำเสนอการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นโดยใช้ตัวควบคุมพีไอด้วยการจำลองสถานการณ์บน MATLAB/ SIMULINK
8	2018	S. Kumari and S. K. Swain	บทความนี้นำเสนอวิธีการปรับจูนตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ด้วยการจำลองสถานการณ์บน MATLAB/ SIMULINK

จากตารางที่ 2.1 ผลการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น พบว่า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมมอเตอร์มีหลายแนวทางที่สามารถนำมาใช้ในการควบคุมมอเตอร์ ซึ่งแต่ละแนวทางมีข้อดีข้อด้อยแตกต่างกันไป โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ตัวควบคุมพีไอในการควบคุมค่ากระแสสนาม และความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เนื่องจากตัวควบคุมแบบพีไอมีสมรรถนะในการควบคุมที่ดี และเพียงพอต่อการควบคุมค่ากระเสสนาม และความเร็วรอบของมอเตอร์

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม หรือบทความที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เพื่อเป็นแนวทางในการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ โดยผู้วิจัยได้แสดงผลการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมในอดีต ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1	1983	A. Kusko, Fellow, and D. Galler	บทความนี้นำเสนอการควบคุมกระแสสนามสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สภาวะโหลดเต็มพิกัด โดยอาศัยหลักการควบคุมกำลังงานสูญเสีย (P) ให้มีค่าต่ำที่สุด โดยใช้วิธี $\left.\frac{\partial P}{\partial I_f}\right\|_{T,N} = 0$ เพื่อให้ได้ค่ากระแสสนามที่ทำให้เกิดการประหยัดพลังงาน
2	1991	N. Margaris, T. Goutas, Z. Doulgeri and A. Paschali	บทความนี้นำเสนอการลดกำลังงานสูญเสีย (P_l) ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยการใช้ตัวควบคุมที่สามารถวัดกำลังงานในการขับเคลื่อนและค้นหาค่ากระแสสนามที่เหมาะสม ด้วยการหาค่ากระแสสนามจากสมการ $\left.\frac{\partial P_l}{\partial i_f}\right\|_{T_m,\omega} = 0$
3	1999	C. De Angelo, G. Bossio and G. Garcia	บทความนี้นำเสนอการใช้ตัวควบคุมเพื่อคำนวณหาค่ากระแสสนามโดยใช้แบบจำลองแม่เหล็ก ซึ่งในการหาค่ากระแสสนามเพื่อให้ได้ค่ากำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด จะพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสนามกับกำลังงานสูญเสียรวม (P_t) ความสัมพันธ์ดังกล่าว คือ $\left.\frac{\partial P_t}{\partial I_f}\right\|_{T_e,\omega} = 0$
4	2002	E. S. Sergaki and G. S. Stavrakakis	บทความนี้นำเสนอการลดกำลังงานสูญเสียในการขับเคลื่อนหุ่นยนต์ที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเงื่อนไขที่ใช้ในการลดกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ คือ $\frac{\partial P_{loss}}{\partial I_e} = 0$ เมื่อ P_{loss} คือ กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ และ I_e คือ กระแสกระตุ้น (exciting current)

ตารางที่ 2.2 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
5	2008	M. A. Sheta, V. Agawal and P. S. V. Nataraj	บทความนี้นำเสนอรูปแบบการควบคุมพลังงานที่เหมาะที่สุดในการหาค่ากระแสสนามซึ่งทำให้ค่าฟลักซ์ของมอเตอร์มีค่าเหมาะที่สุดนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบขับเคลื่อน และลดกำลังงานสูญเสียมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น
6	2011	S.Udomsuk, T. Areerak, K-L. Areerak and K-N. Areerak	บทความนี้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว และใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization Method : OM) เพื่อคำนวณหาค่ากระแสสนามที่ให้ค่ากำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดเพื่อให้เกิดการประหยัดพลังงานของมอเตอร์
7	2013	R. H. Issa and FET	บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยการหาค่ากระแสสนามที่เหมาะที่สุด เพื่อให้ค่ากำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด ด้วยการใช้วิธีการหาค่าอนุพันธ์ของกำลังงานสูญเสียรวม (P_{Σ}) เทียบกับกระแสสนามเท่ากับศูนย์ สามารถคำนวณได้จาก $\frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial I_f} = 0$
8	2015	S. Udomsuk, K-L. Areerak and K-N. Areerak	บทความนี้นำเสนอการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ด้วยวิธีฐานแบบจำลอง (Model Based Method : MBM) ในการหาค่ากระแสสนามสำหรับการประหยัดพลังงาน

ตารางที่ 2.2 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
9	2015	S. U. Hani, Md. K. Hassan, Md. R. Hazari and M. A. Mannan	บทความนี้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยการหาค่ากระแสสนามที่เหมาะที่สุด ด้วยวิธีการหาอนุพันธ์ประสิทธิภาพของมอเตอร์ $\left(\eta = \dfrac{P_0}{P_0 + P_L}\right)$ เทียบกับกระแสสนามเท่ากับศูนย์ $\left(\dfrac{d\eta}{di_f} = 0\right)$
10	2017	N. Pothi	บทความนี้นำเสนอการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ด้วยการหาค่ากระแสสนามที่เหมาะที่สุดซึ่งทำให้ค่าฟลักซ์ของมอเตอร์มีค่าเหมาะที่สุดสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์

จากตารางที่ 2.1 ผลการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น พบว่า การประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงส่วนใหญ่จะใช้วิธีการควบคุมค่ากระแสสนามเพื่อให้ได้กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดด้วยวิธีการต่าง ๆ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุด เพื่อหาค่ากระแสสนามที่มีค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม หรือบทความที่เกี่ยวข้องกับการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เพื่อเป็นแนวทางในการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว โดยผู้วิจัยสรุปสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยไว้พอสังเขป ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1	2002	K-N. Areerak and S. Sujitjorn	บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะของการค้นหาด้วยวีธีจีนเนติกอัลกอริทึมกับวิธีตาบู ที่ใช้เพื่อการค้นหาคำตอบเหมาะที่สุดสำหรับปัญหาที่มีเงื่อนไขบังคับแบบไม่เป็นเชิงเส้น และได้นำเสนอวิธีการค้นหาแนวทางใหม่ที่เรียกว่าตาบูเชิงปรับตัว ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการค้นหาคำตอบในสภาพแวดล้อมที่เต็มไปด้วยคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น พบว่า วิธีตาบูเชิงปรับตัวดำเนินงานได้ดีที่สุด
2	2002	D. Puangdownreong, K-N. Areerak, A. Srikaew, S. Sujitjorn, and P. Totarong	บทความนี้นำเสนอวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว พัฒนามาจากวิธีการค้นหาแบบตาบู (Tabu Search) มีกลไกการปรับตัวของรัศมีการค้นหา (adaptive radius mechanism) และการเดินย้อนรอย (back-tracking mechanism) วิธีการดังกล่าวนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านการระบุเอกลักษณ์ของระบบต่าง ๆ แทนวิธีการแบบดั้งเดิม ผลการค้นหาพบว่า วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ให้แบบจำลองของระบบที่มีความถูกต้อง แม่นยำและใช้เวลาการค้นหาเร็วขึ้น
3	2004	D. Puangdownreong, S. Sujitjorn and T. Kulworawanichpong	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์การลู่เข้าของอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว โดยการพิสูจน์ประกอบด้วยสองส่วน คือ การพิสูจน์การลู่เข้าหาผลเฉลยในการค้นหาที่มีขอบเขตจำกัด และกระบวนการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวเพื่อให้ได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะที่สุดแบบวงกว้าง นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบฟังก์ชันมาตรฐานของ Bohachevsky และการระบุ

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
			เอกลักษณ์พารามิเตอร์ของแบบจำลองลูกตุ้มนาฬิกาที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว
4	2004	D. Puangdownreong, T. Kulworawanichpong and S. Sujitjorn	บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงการค้นหาแบบตาบู ด้วยการเพิ่มกลไกการเดินย้อนรอย และกลไกปรับรัศมีการค้นหา โดยเรียกการค้นหานี้ว่าการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว อีกทั้งยังวิเคราะห์การลู่เข้าคำตอบ และประสิทธิภาพของวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว
5	2009	S. Sujitjorn, J. Kluabwang, D. Puangdownreong, and N. Sarasiri	บทความนี้นำเสนอรายละเอียดของการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว และการจัดการหน่วยค้นหา (Management Agent : MA) ด้วยโครงสร้างส่วนจัดการหน่วยค้นหาที่ประกอบด้วยสามกลไกที่สำคัญ คือ กลไกลแบ่งปริภูมิการค้นหา กลไกลำดับการค้นหา และกลไกยกเลิกการค้นหา
6	2010	S. Udomsuk, K-L. Areerak, K-N. Areerak and A. Srikaew	บทความนี้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว จากผลการค้นหาพบว่าวิธีนี้มีประโยชน์มากและง่ายต่อการประยุกต์ใช้กับการระบุเอกลักษณ์ในระบบอื่น ๆ
7	2011	S.Udomsuk, T. Areerak, K-L. Areerak and K-N. Areerak	บทความนี้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
8	2012	J. Kluabwang, D. Puangdownreong and S. Sujitjorn	บทความนี้นำเสนอวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวหลายวิถี (Multi-Path ATS : MATS) สำหรับปัญหาการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบจำลองยานพาหนะ ด้วยโครงสร้างส่วนจัดการหน่วยค้นหา โดยทำการประเมินสมรรถนะของ MATS กับปัญหาค่าเหมาะที่สุดเชิงพื้นผิวจำนวนหกชนิดและห้าชนิด
9	2017	S.Udomsuk, K-L. Areerak, T. Areerak, and K-N. Areerak	บทความนี้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ด้วยการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ดังตารางที่ 2.3 พบว่า การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว เป็นอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้นจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู โดยเพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในการค้นหาแบบตาบู คือ การเดินย้อนรอย และการปรับลดรัศมีการค้นหา เพื่อให้วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวมีประสิทธิภาพมากขึ้น และวิธีการค้นหานี้มีการทดสอบฟังก์ชันมาตรฐาน คือ Bohachevsky, Rastrigin, Shekel’s foxholds, Shubert และ Schwefel เพื่อให้มั่นใจได้ว่าสามารถเข้าถึงผลเฉลยที่เหมาะที่สุดในเวลาที่จำกัด ดังนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวในการหาผลเฉลยสำหรับการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์สำหรับสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอัลกอริทึมกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นแบบเวียนเกิดเชิงกำหนด

การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม หรือบทความที่เกี่ยวข้องกับอัลกอริทึมกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นแบบเวียนเกิดเชิงกำหนด เพื่อเป็นแนวทางในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ใน

สมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นแบบออนไลน์ ผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแสดงได้ ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอัลกอริทึมกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นแบบเวียนเกิดเชิงกำหนด

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1	2010	S. J. Underwood and I. Husain	บทความนี้ทำการพัฒนารูปแบบการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์สำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร โดยแบ่งวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบเวียนเกิด (Recursive Least Square : RLS) ออกเป็นสองส่วนคือ แบบเร็ว และแบบช้า โดยจะทำงานร่วมกันทั้งสองแบบ
2	2011	Y. S. Mohamed, B. M. Hasaneen, A. A. Elbaset and A. E. Hussein	บทความนี้นำเสนอเทคนิคการประมาณค่าพารามิเตอร์ ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยการใช้อัลกอริทึม RLS วิธีการประมาณค่าด้วยอัลกอริทึม RLS จะดำเนินการเมื่อระบบอยู่ในสภาวะอยู่ตัว การประมาณค่าด้วยวิธีนี้มีสมรรถนะที่ดี คือ เวลาที่ลู่เข้าเร็ว โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าน้อยที่สุด
3	2013	N. Morozovsky, R. Moroto and T. Bewley	บทความนี้นำเสนอการพัฒนาเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน และการขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งเรียกว่าการระบุค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติ (Reconfigurable Automated Parameter-identifying Dynamometer : RAPID) ซึ่ง RAPID สามารถควบคุมมอเตอร์ได้พร้อมกัน เซนเซอร์ที่บันทึกข้อมูลการประมวลผลเพื่อพิจารณาพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทางกลของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ ใช้อัลกอริทึมกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square : LS) ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะที่สุดกับข้อมูลที่สังเกตได้ในแบบจำลองกล่องเทา (gray box model)

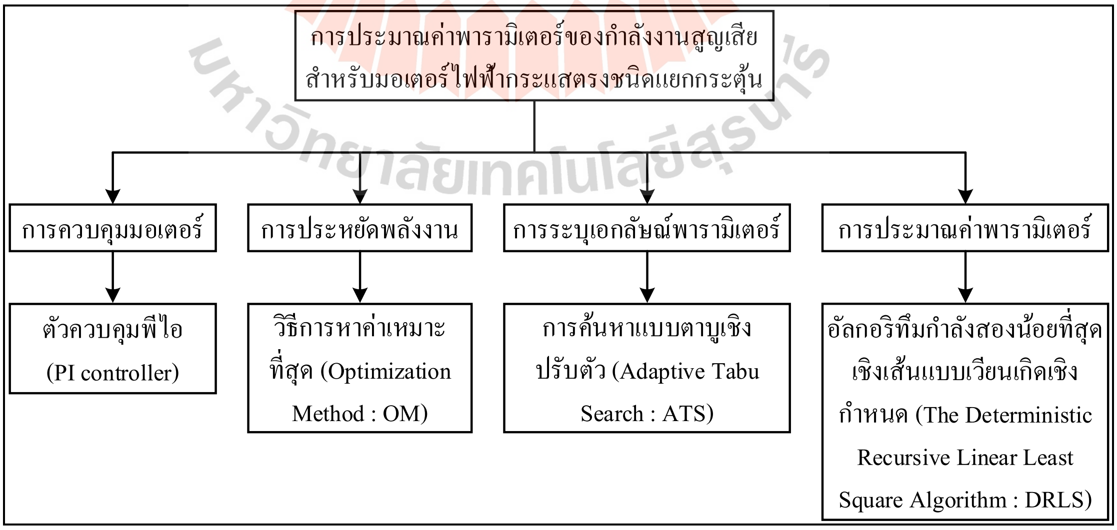
ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอัลกอริทึมกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นแบบเวียนเกิดเชิงกำหนด (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
4	2014	Y. Xu, N. Parspour, and U. Vollmer	บทความนี้นำเสนอการประมาณค่าตัวต้านทานสเตเตอร์ที่ไม่สมดุลของมอเตอร์ซิงโครนัสแบบถาวร การประมาณค่าด้วยอัลกอริทึม RLS ใช้แบบจำลองเชิงเส้นที่ไม่คำนึงถึงผลกระทบต่อความอิ่มตัวของแม่เหล็ก และค่าตัวต้านทานของเฟส a b และ c จะถูกประมาณด้วยอัลกอริทึม RLS เช่นกัน การใช้ค่าตัวต้านทานจากการประมาณสามารถลดการกระเพื่อมของแรงบิดได้
5	2014	M. Gaiceanu, R. Solea, B. Codres and C. Eni	บทความนี้นำเสนอการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธี RLS แบบออนไลน์ ด้วยการจำลองสถานการณ์บน MATLAB/SIMULINK
6	2015	X. SUN, S. LI, P. LI, X. SHI and S. Hu	บทความนี้นำเสนอการติดตามแบบเวลาจริงของอัลกอริทึม RLS เพื่อปรับปรุงผลกระทบจากค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิด Rare Earth Brushless ด้วยการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ของ อัลกอริทึม RLS และพบว่าผลการประมาณค่าพารามิเตอร์สามารถลดความซับซ้อนในการคำนวณ
7	2017	S. D. Sahputro, F. Fadilah, N. A. Wicaksono and F. Yusivar	บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัว สำหรับการควบคุมความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวออกแบบมาเพื่อคำนวณพารามิเตอร์ที่ต้องปรับจูนสำหรับการควบคุมมอเตอร์แม้ว่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลง พารามิเตอร์ของมอเตอร์จะถูก

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอัลกอริทึมกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นแบบเวียนเกิดเชิงกำหนด (ต่อ)

ลำดับที่	ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
			ประมาณค่าแบบออนไลน์เมื่อมอเตอร์ทำงาน โดยใช้วิธีการ RLS จากการจำลองสถานการณ์บนบอร์ด STM32F446
8	2018	J. Rajagopal and T. Ananthan	บทความนี้นำเสนอการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยวิธี RLS บนโปรแกรม LabVIEW-MATLAB

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอัลกอริทึมกำลังสองน้อยที่สุด และกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นแบบเวียนเกิดเชิงกำหนด พบว่า อัลกอริทึมดังกล่าวเป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ที่มีการนำมาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ดังตารางที่ 2.4 โดยอัลกอริทึมนี้สามารถใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ และให้ค่าความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ที่ดีในทุกสภาวะการทำงาน การประมาณค่าด้วยวิธีนี้มีสมรรถนะที่ดี เช่น เวลาที่ลู่เข้าหาผลเฉลยเร็ว ให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าน้อยที่สุด และเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการสร้างจริง



รูปที่ 2.1 ผลของการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่นำไปใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

2.6 สรุป

ผลการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งสี่ส่วนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงผลจากการปริทัศน์วรรณกรรมที่จะนำไปใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยการสำรวจงานวิจัยในบทนี้เป็นประโยชน์และพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งต่อผู้วิจัย เนื่องจากการสำรวจดังกล่าวให้พื้นฐาน แนวทางในการดำเนินงาน และนำไปสู่การพัฒนาต่อยอดงานวิจัย ซึ่งรายละเอียดการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะได้นำเสนอในบทถัดไป

บทที่ 3
ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

3.1 กล่าวนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อพัฒนาวิธีการประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยอาศัยการวิเคราะห์จากวงจรสมมูลอย่างง่าย และสมการพื้นฐานของมอเตอร์ อีกทั้งต้องศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ ด้วยเหตุผลข้างต้น จึงนำเสนอ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รายละเอียดเกี่ยวกับกำลังงานสูญเสีย และการขับเคลื่อนมอเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ไว้ในบทนี้

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ประกอบด้วยสมการพื้นฐานของมอเตอร์ที่พิจารณาจากวงจรสมมูล และการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ ดังนี้

3.2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ประกอบด้วย วงจรอาร์เมเจอร์ (armature circuit) และวงจรสนาม (field circuit) ที่แยกจากกันอย่างอิสระ แสดงได้ดังรูปที่ 3.1

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ดังรูปที่ 3.1 อธิบายความหมายของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจรสมมูลได้ดังนี้

v_a คือ แรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ (V)

i_a คือ กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ (A)

R_a คือ ความต้านทานอาร์เมเจอร์ (Ω)

L_a คือ ความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์ (H)

e_g คือ แรงดันเหนี่ยวนำต้านกลับ (V)

ω คือ ความเร็วรอบมอเตอร์ (rad/s)

T_d คือ แรงบิดเหนี่ยวนำภายในมอเตอร์ ($\mathrm{N \cdot m}$)

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

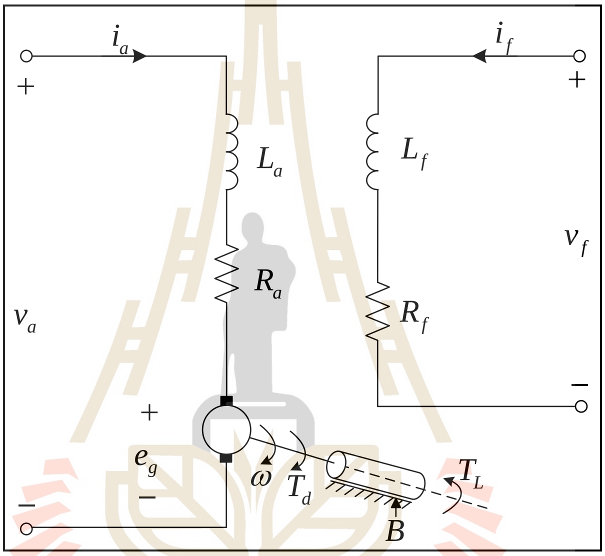
T_L คือ แรงบิดโหลด $(\mathrm{N \cdot m})$

v_f คือ แรงดันไฟฟ้าสนาม (V)

i_f คือ กระแสไฟฟ้าสนาม (A)

R_f คือ ความต้านทานสนาม (Ω)

L_f คือ ความเหนี่ยวนำสนาม (H)



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ในรูปที่ 3.1 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของแรงดันทางด้านวงจรฝั่งอาร์เมเจอร์ ได้ดังสมการที่ (3.1)

$$v_a = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_g \tag{3.1}$$

จากสมการที่ (3.1) ถ้าพิจารณาเฉพาะในสภาวะคงตัวจะได้ดังสมการที่ (3.2)

$$v_a = i_a R_a + e_g \tag{3.2}$$

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ในรูปที่ 3.1 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของแรงดันทางด้านวงจรฝั่งสนาม ได้ดังสมการที่ (3.3)

$$v_f = i_f R_f + L_f \frac{di_f}{dt} \tag{3.3}$$

จากสมการที่ (3.3) ถ้าพิจารณาเฉพาะในสภาวะคงตัวจะได้ดังสมการที่ (3.4)

$$v_f = i_f R_f \tag{3.4}$$

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงรับกำลังงานอินพุตเป็นกำลังงานไฟฟ้าและจ่ายกำลังงานเอาต์พุตเป็นกำลังงานกล ซึ่งกำลังงานเอาต์พุตของมอเตอร์ที่นำไปใช้งาน คือ แรงบิดและความเร็วที่เพลา ดังนั้น ลักษณะการจ่ายกำลังงานเอาต์พุตของมอเตอร์มีความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงบิด หรือเรียกว่า ลักษณะสมบัติความเร็วแรงบิดของมอเตอร์ สามารถหาได้โดยตรงจากสมการแรงดันเหนี่ยวนำต้านกลับ และแรงบิดเหนี่ยวนำภายในมอเตอร์ ซึ่งทั้งสองสมการสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.5) และ (3.6) ตามลำดับ

$$e_g = K_v i_f \omega \tag{3.5}$$

เมื่อ K_v คือ ค่าคงที่ของแรงดัน $(\mathrm{V \cdot s/A \cdot rad})$

$$T_d = K_t i_f i_a \tag{3.6}$$

เมื่อ K_t คือ ค่าคงที่ของแรงบิด $(\mathrm{N \cdot m/A^2})$
โดยส่วนใหญ่แล้วจะกำหนดให้ $K_v = K_t = K$ (Electro-Craft Corporation, 1977)

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ในรูปที่ 3.1 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของการหมุนได้ดังสมการที่ (3.7)

$$T_d = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \tag{3.7}$$

จากสมการที่ (3.7) ถ้าพิจารณาเฉพาะการหมุนในสภาวะคงตัวจะได้ดังสมการที่ (3.8)

$$T_d = B\omega + T_L \tag{3.8}$$

การหาสมการความเร็วแรงบิดของมอเตอร์ เริ่มจากการพิจารณาตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์ฝั่งวงจรอาร์เมเจอร์ คือ สมการที่ (3.2) และให้กระแสสนามคงที่ ต่อมาแทนค่าสมการที่ (3.5) ลงในสมการที่ (3.2) จะได้ดังสมการที่ (3.9)

$$v_a = i_a R_a + K i_f \omega \tag{3.9}$$

จากสมการที่ (3.6) ทำการย้ายข้างสมการเพื่อหาค่า i_a จะได้ดังสมการที่ (3.10)

$$i_a = \frac{T_d}{K i_f} \tag{3.10}$$

นำสมการที่ (3.10) แทนลงในสมการที่ (3.9) จะได้ดังสมการที่ (3.11)

$$v_a = \frac{T_d}{K i_f} R_a + K i_f \omega \tag{3.11}$$

ทำการหาค่า ω โดยการย้ายข้างสมการที่ (3.11) จะได้สมการความเร็วแรงบิดของมอเตอร์ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.12)

$$\omega = \frac{v_a}{K i_f} - \frac{R_a}{(K i_f)^2} T_d \tag{3.12}$$

สมการคำนวณกำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุตของมอเตอร์ แสดงได้ดังสมการที่ (3.13) และ (3.14) ตามลำดับ

$$P_{in} = v_a i_a + v_f i_f \tag{3.13}$$

$$P_{out} = T_L \omega \tag{3.14}$$

จากสมการที่ (3.1), (3.3) และ (3.7) เมื่อจัดรูปสมการใหม่และเขียนให้อยู่ในรูปของสมการสถานะ (state equation) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ ดังสมการที่ (3.15) ถึง (3.17)

$$\left[v_a\right]=\begin{bmatrix} i_a & \dfrac{di_a}{dt} & i_f\omega \end{bmatrix}\begin{bmatrix} R_a \\ L_a \\ K_v \end{bmatrix} \tag{3.15}$$

$$\left[v_f\right]=\begin{bmatrix} i_f & \dfrac{di_f}{dt} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} R_f \\ L_f \end{bmatrix} \tag{3.16}$$

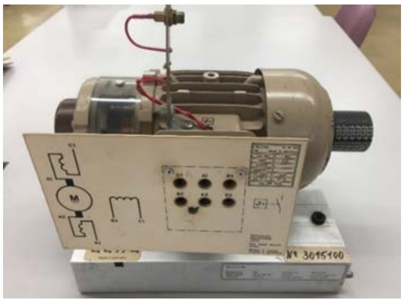
$$\left[T_L\right]=\begin{bmatrix} i_f i_a & -\dfrac{d\omega}{dt} & -\omega \end{bmatrix}\begin{bmatrix} K_t \\ J \\ B \end{bmatrix} \tag{3.17}$$

3.2.2 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ มีการพิจารณาแนวทางการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแผ่นป้ายชื่อ (nameplate)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ มีลักษณะดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์บนแผ่นป้ายชื่อ

พารามิเตอร์	**พิกัด**	**หน่วย**
กำลังไฟฟ้า	0.37	kW
ความเร็วรอบ	2360	rpm
แรงดันอาร์เมเจอร์ (v_a)	220	V
กระแสอาร์เมเจอร์ (i_a)	2.20	A
แรงดันสนาม (v_f)	220	V
กระแสสนาม (i_f)	0.30	A

ขั้นตอนที่ 2 การหาค่าพารามิเตอร์จากการวัด

พารามิเตอร์บางค่าไม่สามารถหาได้จากข้อมูลบนแผ่นป้ายชื่อ เช่น ความต้านทานอาร์เมเจอร์ ความต้านทานสนาม ความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์ และความเหนี่ยวนำสนาม ด้วยเหตุนี้ จึงต้องหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจากการวัด และหาค่าเฉลี่ย โดยใช้อุปกรณ์ทางการวัด คือ ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ และ RLC มิเตอร์ ซึ่งทำการวัดจากมอเตอร์ในรูปที่ 3.2 แสดงได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์จากการวัด

พารามิเตอร์	**ครั้งที่ 1**	**ครั้งที่ 2**	**ครั้งที่ 3**	**เฉลี่ย**
ความต้านทานอาร์เมเจอร์ (R_a)	8.80	8.80	8.80	8.80 Ω
ความต้านทานสนาม (R_f)	654	654	654	654 Ω
ความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์ (L_a)	147.94	148.13	148.38	148.15 H
ความเหนี่ยวนำสนาม (L_f)	9.56	9.29	9.07	9.31 H

ขั้นตอนที่ 3 การหาค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ

จากการหาค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 ขั้นตอนข้างต้น จะเหลือค่าพารามิเตอร์ที่ยังไม่ทราบค่า คือ ค่าคงที่แรงบิด (K) แรงบิดเหนี่ยวนำภายในมอเตอร์ (T_d) และค่าคงที่ความเสียดทานหนืด (B) ดังนั้นการหาค่าพารามิเตอร์ทั้งสามค่านี้ จะคำนวณโดยอาศัยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จาก 2 ขั้นตอนก่อนหน้า ซึ่งการคำนวณแสดงได้ดังต่อไปนี้

- คำนวณค่า K จากการสมการที่ (3.5) จากนั้นทำการย้ายข้างสมการเพื่อหาค่า K และทำการแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ลงในสมการ จะได้

$$K = \frac{220-(2.2\times 8.8)}{0.3\times 247.14} = 2.71\ \mathrm{N\cdot m/A^2}$$

- คำนวณค่า T_d จากสมการที่ (3.6) เมื่อแทนค่าสมการ จะได้

$$T_d = 2.71\times 2.2\times 0.3 = 1.7886\ \mathrm{N\cdot m}$$

- คำนวณค่า B จากสมการที่ (3.7) จากนั้นทำการย้ายข้างสมการหาค่า B และทำการแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ลงในสมการ จะได้

$$B = \frac{1.7886-1.497}{247.14} = 1.1798\times 10^{-3}\ \mathrm{N\cdot m\cdot s/rad}$$

จากการคำนวณค่าพารามิเตอร์ข้างต้นสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ

พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
ค่าคงที่แรงบิด (K)	2.71	$\mathrm{N\cdot m/A^2}$
แรงบิดเหนี่ยวนำภายในมอเตอร์ (T_d)	1.7786	$\mathrm{N\cdot m}$
ค่าคงที่ความเสียดทานหนืด (B)	1.1798×10^{-3}	$\mathrm{N\cdot m\cdot s/rad}$

- ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (J) อ้างอิงจากบทความ Parameters Identification of Separately Excited DC Motor using Adaptive Tabu Search Technique (Udomsuk et al., 2010) โดยเป็นการค่าพาราพารามิเตอร์จากวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ซึ่งค่าพรามิเตอร์ J มีค่าเท่ากับ $4.5257\times 10^{-6}\ \mathrm{kg\cdot m^2}$

3.3 กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ประกอบด้วยกำลังงานสูญเสียเนื่องจากขดลวด (copper losses) กำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทาน และแรงต้านอากาศ

(friction and windage losses) กำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก (core losses) กำลังงานสูญเสียจากแปรงถ่าน (brush loss) และกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน (stray loss)

3.3.1 กำลังงานสูญเสียเนื่องจากขดลวด

เป็นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในขดลวดทองแดง เนื่องจากกระแสไหลผ่านความต้านทานของขดลวดทองแดง ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสีย และมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดยกกำลังสอง โหลดยิ่งมากกำลังงานสูญเสียยิ่งมากขึ้นตามไปด้วย (ศุภชัย, 2538) ซึ่งกำลังงานสูญเสียดังกล่าวเกิดขึ้นทั้งในขดลวดอาร์เมเจอร์ และขวดลวดสนาม แสดงได้ดังสมการที่ (3.18) และ (3.19) ตามลำดับ

$$P_a = i_a^2 R_a \tag{3.18}$$

$$P_f = i_f^2 R_f \tag{3.19}$$

โดยที่ P_a คือ กำลังงานสูญเสียในขดลวดอาร์เมเจอร์ (W)

P_f คือ กำลังงานสูญเสียในขดลวดสนาม (W)

3.3.2 กำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทานและแรงต้านอากาศ

กำลังงานสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานเกิดจากหลายปัจจัยไม่ว่าจะเป็นความเสียดทานระหว่างตลับลูกปืนกับแกนของมอเตอร์ (bearing friction) ความเสียดทานระหว่างหน้าสัมผัสของแปรงถ่านกับหน้าสัมผัสของคอมมิวเตเตอร์ (brush friction) และความเสียดทานระหว่างอากาศในช่องว่างอากาศ (airgab) ในสนามแม่เหล็กระหว่างขั้วเหนือ ขั้วใต้ กับแกนอาร์เมเจอร์ (armature core) กำลังงานสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานนี้ทำให้เกิดความร้อน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลง และกำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทานนี้จะมีค่ามาก หรือน้อยเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับความเร็วของมอเตอร์ (ศุภชัย, 2538) สามารถแสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานสูญเสียได้ดังสมการที่ (3.20)

$$P_m = K_m N^3 \tag{3.20}$$

โดยที่ P_m คือ กำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทาน และแรงต้านอากาศ (W)

K_m คือ ค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทาน และแรงต้านอากาศ

N คือ ความเร็วรอบมอเตอร์ (rpm)

เนื่องจากกำลังงานสูญเสียนี้ปกติจะมีค่าน้อย (Ryff, 1994) อีกทั้งสมการกำลังงานสูญเสียดังกล่าวไม่ปรากฏพารามิเตอร์ที่พิจารณาอยู่ในสมการ ซึ่งพารามิเตอร์ที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวกับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ คือ i_a, i_f, v_a, v_f ด้วยเหตุนี้จึงไม่นำกำลังงานสูญเสียประเภทนี้มาพิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

3.3.3 กำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก

กำลังงานสูญเสียชนิดนี้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในแกนเหล็กของอาร์เมเจอร์ เมื่ออาร์เมเจอร์หมุน แกนเหล็กของอาร์เมเจอร์จะตัดกับเส้นแรงแม่เหล็ก ทำให้สนามแม่เหล็กที่ผ่านแกนเหล็กมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น จึงทำให้เกิดกระแสไหลวนอยู่ในแกนเหล็กเป็นการสูญเปล่าที่เรียกว่า กำลังงานสูญเสียจากกระแสไหลวน (eddy current loss) (Nasar, 1995) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.21) และการเปลี่ยนทิศทางของสนามแม่เหล็กทำให้เกิดการสูญเสียที่เรียกว่า กำลังงานสูญเสียฮีสเตอรีซีส (hysteresis loss) ซึ่งค่ากำลังงานสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับปริมาตรของแกนเหล็ก ความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด (Toro, 1990) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.22)

$$P_e = k_e \omega^2 \delta^2 B_m^2 V \tag{3.21}$$

โดยที่ P_e คือ กำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (W)

k_e คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ

δ คือ ความหนาของแผ่นเหล็กบาง (m)

B_m คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด (T)

V คือ ปริมาตรของแกนเหล็ก (m^3)

$$P_h = k_h \omega B_m^2 V \tag{3.22}$$

โดยที่ P_h คือ กำลังงานสูญเสียฮีสเตอรีซีส (W)

k_h คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ

สมการรวมของกำลังงานสูญเสียจากกระแสไหลวน และกำลังงานสูญเสียฮีสเตอรีซีสแสดงได้ดังสมการที่ (3.23)

$$P_h + P_e = K_1 \omega B_m^2 + K_2 \omega^2 B_m^2 \tag{3.23}$$

โดยที่ $K_1 = k_h V$

$K_2 = k_e \delta^2 V$

เนื่องจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสสนาม เพราะกระแสที่ไหลในขดลวดสนามเป็นตัวสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ซึ่งแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะสร้างฟลักซ์แม่เหล็ก ดังนั้นฟลักซ์แม่เหล็กจึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสสนามด้วยเช่นกัน (Fitgerald et al., 1983) ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กและกระแสสนามแสดงได้ดังสมการที่ (3.24)

$$B_m = f(i_f) = Ki_f \tag{3.24}$$

โดยที่ K คือ ค่าคงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กกับกระแสสนาม

ดังนั้นสมการสำหรับคำนวณกำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็กจะเป็นดังสมการที่ (3.25)

$$P_i = K_h \omega i_f^2 + K_e \omega^2 i_f^2 \tag{3.25}$$

โดยที่ P_i คือ กำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก (W)

$K_h = K_1 K$

$K_e = K_2 K^2$

3.3.4 กำลังงานสูญเสียจากแปรงถ่าน

กำลังงานสูญเสียจากแปรงถ่านเกิดจากค่าความต้านทานของแปรงถ่าน เมื่อกระแสไหลผ่านแปรงถ่านจะเกิดแรงดันตกที่แปรงถ่าน เมื่อแรงดันตกนี้คูณกับกระแสที่ไหลผ่าน จะเกิดกำลังงานสูญเสียที่ตัวแปรงถ่าน กำหนดให้ค่าแรงดันตกคร่อมเท่ากับ 1 โวลต์ ต่อแปรงถ่าน 1 ชุด ในกรณีที่มีแปรงถ่านบวกและลบจำนวนทั้งหมด 2 ชุด จะได้แรงดันตกคร่อมแปรงถ่านรวมทั้งหมด 2 โวลต์ (Chapman, 1999) สามารถแสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานสูญเสียได้ดังสมการที่ (3.26)

$$P_{BD} = V_e i_a \tag{3.26}$$

โดยที่ P_{BD} คือ กำลังงานสูญเสียจากแปรงถ่าน (W)

V_e คือ แรงดันตกคร่อมแปรงถ่านมีค่าเท่ากับ 2 V

3.3.5 กำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน

กำลังงานสูญเสียประเภทนี้เป็นผลมาจากการบิดเบี้ยวของฟลักซ์แม่เหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาอาร์เมเจอร์ และกระแสลัดวงจรในกระบวนการคอมมิวเตชัน (Guru and Hiziroglu, 2001) ซึ่งกำลังงานสูญเสียนี้มีค่าแปรผันโดยตรงกับขนาดของกระแสโหลดและความเร็วรอบของมอเตอร์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งานได้ดังสมการที่ (3.27)

$$P_s = K_{st} i_a^2 N^2 \tag{3.27}$$

โดยที่ P_s คือ กำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน (W)
K_{st} คือ ค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน

จากการอธิบายกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์จะได้สมการรวมของกำลังงานสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ดังสมการที่ (3.28)

$$P_{loss} = i_a^2 R_a + i_f^2 R_f + 2i_a + K_h \omega i_f^2 + K_e \omega^2 i_f^2 + K_a i_a^2 \omega^2 \tag{3.28}$$

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

ดังนั้นจะได้สมการกำลังงานสูญเสียรวมในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ดังสมการที่ (3.29)

$$P_{loss} = i_a^2 R_a + i_f^2 R_f + 2i_a + K_h \omega i_f^2 + K_e \omega^2 i_f^2 + \frac{60^2}{4\pi^2} i_a^2 \omega^2 K_{st} \tag{3.29}$$

3.4 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 2 ชุด ป้อนให้กับวงจรอาร์เมเจอร์ และวงจรสนาม โดยการควบคุมความเร็วรอบของ

มอเตอร์แบ่งการควบคุมออกเป็น การควบคุมกระแสสนาม และการควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์ โดยจะเรียกการควบคุมทั้ง 2 ส่วนนี้ว่า วิธีดั้งเดิม

3.4.1 การควบคุมความเร็วรอบโดยการควบคุมกระแสสนาม

การควบคุมกระแสสนามสามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ตั้งแต่ความเร็วพิกัดขึ้นไปเท่านั้น ซึ่งการควบคุมกระแสสนามเป็นการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสนาม โดยการปรับค่าแรงดันสนาม และคงค่าแรงดันอาร์เมเจอร์ไว้ที่พิกัด จากสมการที่ (3.12) อธิบายความสัมพันธ์ของการควบคุมกระแสสนามได้ว่า เมื่อค่ากระแสสนามมีค่าลดลงส่งผลให้ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันเมื่อค่ากระแสสนามมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลง แต่การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยวิธีนี้ สามารถควบคุมความเร็วรอบได้ตั้งแต่ความเร็วพิกัดขึ้นไปเท่านั้น ไม่สามารถควบคุมความเร็วให้ต่ำกว่าพิกัดได้ เนื่องจากการควบคุมความเร็วรอบที่ต่ำกว่าความเร็วพิกัด ต้องการกระแสสนามที่เพิ่มขึ้น ซึ่งถ้ากระแสสนามมีค่ามากเกินค่าพิกัดของขดลวดสนาม จะทำให้ขดลวดสนามเสียหายได้

3.4.2 การควบคุมความเร็วรอบโดยการควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์

การควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ตั้งแต่ศูนย์ถึงความเร็วพิกัดเท่านั้น ซึ่งการควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์ เป็นการปรับแรงดันที่จ่ายให้วงจรอาร์เมเจอร์ โดยคงค่าแรงดันสนามไว้ที่พิกัด (กระแสสนามคงที่) จากสมการที่ (3.12) อธิบายความสัมพันธ์ของการควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์ได้ว่า เมื่อเพิ่มแรงดันอาร์เมเจอร์ ส่งผลให้ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันเมื่อลดแรงดันอาร์เมเจอร์ส่งผลให้ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลง

3.5 สรุป

การอธิบายเนื้อหาในบทนี้ เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ และการควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม โดยในเนื้อหาได้มีการอธิบายถึงลักษณะวงจรสมมูลของมอเตอร์ สมการพื้นฐาน ค่าพารามิเตอร์ และสมการที่ใช้สำหรับการคำนวณกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ ซึ่งสมการกำลังงานสูญเสียดังกล่าวมีค่าพารามิเตอร์บางตัวที่ไม่ทราบค่า ดังนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ที่เรียกว่า การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวเข้ามาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ซึ่งจะได้นำเสนอในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4
การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสีย ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

4.1 กล่าวนำ

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีการคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียมีความสำคัญต่อการคำนวณกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ และจากสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่นำเสนอในบทที่ 3 พบว่ามีค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียบางตัวที่ไม่สามารถหาค่าได้จากการวัด หรือการคำนวณ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ในการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสีย โดยเนื้อหาในบทนี้ ประกอบด้วย หลักการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว การทดสอบมอเตอร์สำหรับการระบุเอกลักษณ์ และการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสีย

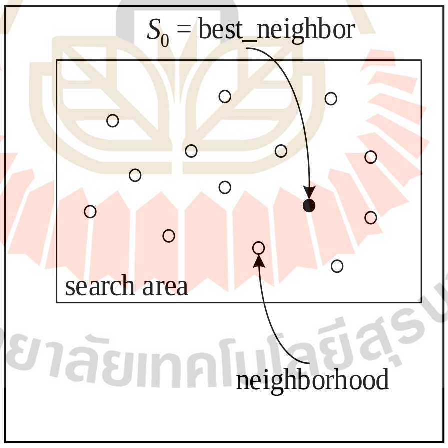
4.2 หลักการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว เป็นวิธีการที่พัฒนามาจากวิธีการค้นหาแบบตาบู ซึ่งการค้นหาแบบตาบูเป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะที่สุดเชิงผสมผสาน (combinatorial optimization) ซึ่ง Glover เป็นผู้ริเริ่มและเสนอแนวคิดวิธีการค้นหาแบบตาบูไว้เมื่อปี ค.ศ. 1977 และต่อมาเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากวิธีการค้นหาแบบตาบูสามารถหลีกเลี่ยงคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น (local solution) และสามารถค้นหาคำตอบจนกระทั่งให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะที่สุดแบบวงกว้าง (near global solution) หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาวิธีการค้นหาแบบตาบู โดย เดชา พวงดาวเรือง และคณะ ในปี ค.ศ. 2002 โดยการเพิ่มกลไกการเดินย้อนรอยการค้นหา (back-tracking machanism) เพื่อแก้ปัญหาการล็อกโดยคำตอบวงแคบเฉาะถิ่น ด้วยการอนุญาตให้ระบบการค้นหาสามารถย้อนกลับไปค้นหาคำตอบบริเวณพื้นที่เดิมที่เคยถูกค้นหามาก่อน ซึ่งทำให้ระบบการค้นหามีโอกาสที่จะค้นหาคำตอบในบริเวณใหม่จนกระทั่งหลุดออกจากคำตอบที่เป็นคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นได้ และกลไกการปรับรัศมีการค้นหา (adaptive radius machanism) เพื่อเพิ่มความเร็วให้กับกระบวนการค้นหาคำตอบด้วยการปรับลดค่ารัศมีในระหว่างการค้นหาจนกระทั่งการค้นหาเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง และเพื่อให้วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิง

ปรับตัวมีประสิทธิภาพจึงได้ทำการทดสอบด้วยฟังก์ชันมาตรฐาน คือ ฟังก์ชันโบฮาเชฟสกี (Bohachevsky function : BF) ฟังก์ชันราสตริกิน (Rastrigin function : RF) ฟังก์ชันชีเคลฟอกซ์โฮล (Shekel's foxholes function : SF) ฟังก์ชันชูเบอร์ท (Shubert function : ShF) และฟังก์ชันชวีเฟล (Schwefel function : ScF) (Puangdownreong et al., 2004) (Kulworawanichpong et al., 2004) (Puangdownreong et al., 2004) (Sujitjorn et al., 2009) (Kluabwang et al., 2012) นอกจากนี้ คุณสมบัติการลู่เข้าของวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวได้รับการพิสูจน์เพื่อให้มั่นใจได้ว่าจะสามารถเข้าถึงผลเฉลยที่เหมาะที่สุดในเวลาที่จำกัด ดังนั้นวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวจึงสามารถหาผลเฉลยสำหรับการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ โดยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวอธิบายได้ตามขั้นตอนดังนี้

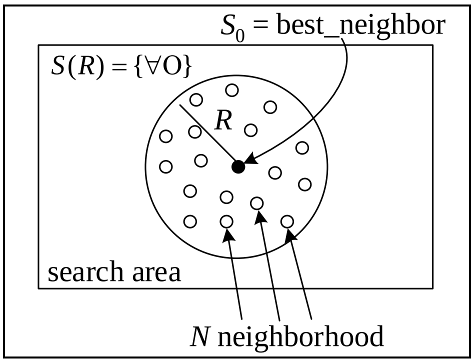
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพื้นที่การค้นหา (search area) รัศมีการค้นหา (radius) และจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา ($count_{\max}$)

ขั้นตอนที่ 2 ทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น (S_0) ภายในพื้นที่การค้นหา โดยกำหนดให้ S_0 มีค่าเป็นคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (best_neighbor) แสดงดังรูปที่ 4.1



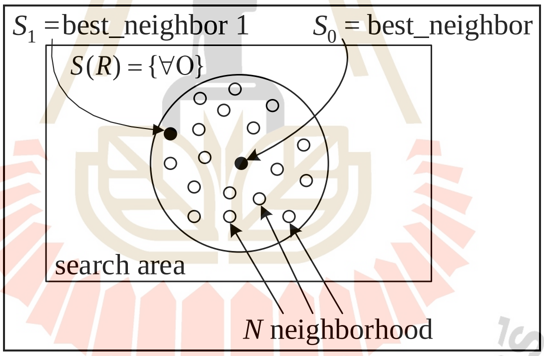
รูปที่ 4.1 การสุ่มคำตอบเริ่มต้นภายในพื้นที่การค้นหา

ขั้นตอนที่ 3 ทำการสุ่มค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการค้นหารอบ ๆ S_0 ภายในพื้นที่รัศมีการค้นหา R จำนวน N คำตอบ (N neigborhood) และกำหนดให้ $S(R)$ เป็นเซตของคำตอบรอบข้างจำนวน N คำตอบ แสดงดังรูปที่ 4.2



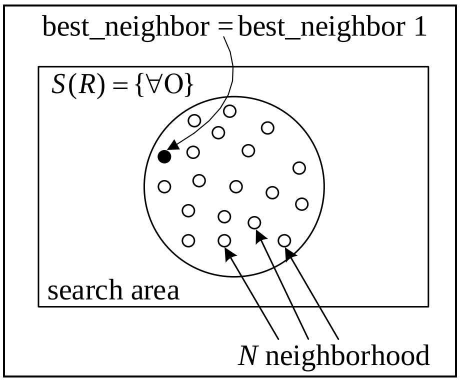
รูปที่ 4.2 คำตอบรอบข้างภายในพื้นที่รัศมีการค้นหา

ขั้นตอนที่ 4 ทำการประเมินคำตอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) โดยกำหนดให้ S_1 เป็นค่าใกล้เคียงที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด และให้ S_1 มีค่าเป็น best_neighbor 1 แสดงดังรูปที่ 4.3

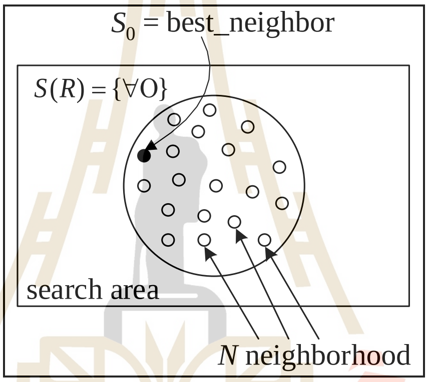


รูปที่ 4.3 การประเมินคำตอบ S_1

ขั้นตอนที่ 5 ถ้าค่าคำตอบ S_1 ดีกว่าค่า S_0 จะกำหนดให้ค่า $S_0 = S_1$ และเก็บค่า S_0 ในรายการตาบูแสดงได้ในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ (แต่ถ้าค่าคำตอบ S_1 ไม่ดีกว่าค่า S_0 จะกำหนดให้ใช้ค่า S_0 ค่าเดิม)



รูปที่ 4.4 การกำหนดค่าใกล้เคียงใหม่

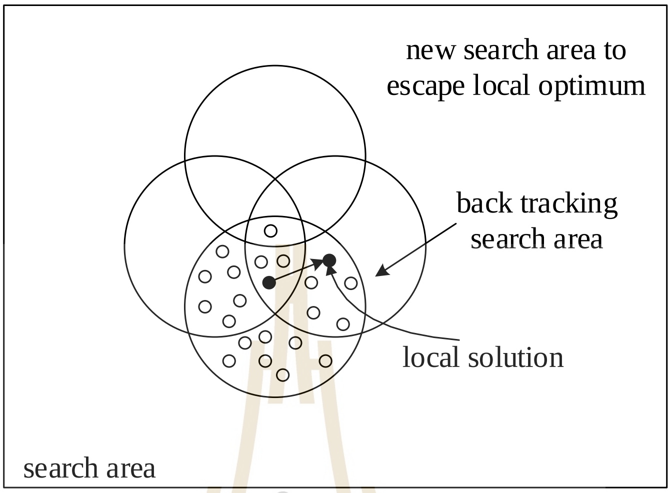


รูปที่ 4.5 การกำหนดค่า S_0 ใหม่

ขั้นตอนที่ 6 ถ้า *count* น้อยกว่า $count_{\max}$ ให้กลับไปเริ่มขั้นตอนที่ 3 ใหม่ และทำการค้นหาจนกระทั่งได้คำตอบที่พอใจ โดยที่ค่า S_0 คือ คำตอบที่ดีที่สุด แต่ถ้า *count* มากกว่า $count_{\max}$ จะหยุดกระบวนการค้นหา และใช้คำตอบที่ดีที่สุด S_0 ที่ได้จากการค้นหาจำนวน $count_{\max}$ รอบ เป็นคำตอบในการค้นหา

ขั้นตอนที่ 7 เข้าสู่กลไกการเดินย้อนรอยการค้นหา เมื่อกระบวนการค้นหาเกิดการล็อก คือ เมื่อคำตอบในแต่ละรอบไม่หลุดออกจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่น ดังรูปที่ 4.6 เมื่อกระบวนการค้นหาพบคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น และเกิดการล็อกโดยคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นขึ้น กลไกการเดินย้อนรอยการค้นหาจะอนุญาตให้ใช้คำตอบที่ได้มีการค้นหาไว้แล้วซึ่งบรรจุอยู่ในรายการตาบู เพื่อใช้เป็นคำตอบเริ่มต้นสำหรับการค้นหาในรอบต่อไป ซึ่งจะทำให้เกิดพื้นที่การค้นหาใหม่ เป็นการเปิดโอกาสให้กระบวนการค้นหาเปลี่ยนทิศทาง และสามารถหลุดออกจาก

การล็อกโดยคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นได้ จากนั้นกระบวนการค้นหาจะดำเนินต่อไปจนพบกับคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นอื่น ๆ จนกระทั่งพบคำตอบวงกว้าง



รูปที่ 4.6 กลไกการเดินย้อนรอย

ขั้นตอนที่ 8 เข้าสู่กลไกการปรับรัศมีการค้นหา เป็นกระบวนการเร่งความเร็วให้กับกระบวนการค้นหา กลไกนี้จะดำเนินการปรับลดรัศมีการค้นหาลงเมื่อกระบวนการค้นหาคำตอบที่ใกล้คำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นหรือคำตอบวงกว้าง เมื่อรัศมีการค้นหามีค่าลดลง ขณะที่จำนวนค่าใกล้เคียงเท่าเดิม จะทำให้กระบวนการค้นหาสามารถพิจารณาค่าใกล้เคียงได้อย่างละเอียด โดยการปรับลดรัศมีมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.1

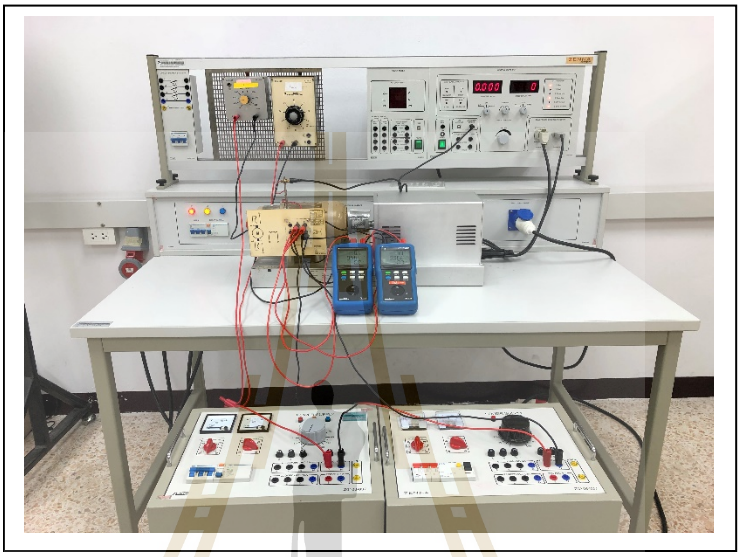
$$radius_{new} = \frac{radius_{old}}{DF} \tag{4.1}$$

โดยที่ DF คือ ตัวประกอบปรับลดรัศมี (Decreasing Factor)

4.3 การทดสอบมอเตอร์สำหรับการระบุเอกลักษณ์

การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นเพื่อระบุเอกลักษณ์จะทดสอบทั้งหมด 87 ข้อมูลในสภาวะ 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 และ 120 เปอร์เซ็นต์ ของความเร็วพิกัดที่โหลดต่าง ๆ และทำการแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 ชุด โดยชุดแรก 51 ข้อมูล ใช้สำหรับระบุเอกลักษณ์ และอีก 36 ข้อมูลที่เหลือใช้สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องจากการระบุเอกลักษณ์ (validation)

โดยทำการทดสอบมอเตอร์ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งใช้การควบคุมมอเตอร์แบบวิธีดั้งเดิมที่ความเร็วรอบต่าง ๆ โดยมีแรงบิดตั้งแต่ $0-1.4\ \mathrm{N\cdot m}$ จะทำการวัดค่ากระแส แรงดัน ทั้งฝั่งอาร์เมเจอร์และฝั่งสนาม เพื่อนำไปคำนวณหาค่ากำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุตดังสมการที่ (3.13) และ (3.14) ในบทที่ 3 ตามลำดับ กำลังงานสูญเสียจากการทดสอบนี้สามารถหาได้จากสมการที่ (4.2)



รูปที่ 4.7 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

$$P_{loss} = P_{in} - P_{out} \tag{4.2}$$

ผลจากการทดสอบมอเตอร์ และผลจากการคำนวณค่ากำลังงานต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 โดยทำการแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 ชุด โดยชุดแรก 51 ข้อมูลที่แรงบิด 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 และ 1.4 $\mathrm{N\cdot m}$ ใช้สำหรับระบุเอกลักษณ์ และอีก 36 ข้อมูลที่แรงบิด 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0, 1.1 และ 1.3 $\mathrm{N\cdot m}$ ใช้สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องจากการระบุเอกลักษณ์

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบมอเตอร์

Speed			T_L (Nm)	v_a (V)	i_a (A)	v_f (V)	i_f (A)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	P_{loss} (W)
%	rpm	rad/sec								
50	1180	123.57	0.2	104.7	0.647	220.0	0.30	133.74	24.71	109.03
60	1416	148.28		124.5	0.685	220.0	0.30	151.28	29.66	121.63
70	1652	173.00		144.6	0.726	220.0	0.30	170.98	34.60	136.38
80	1880	196.87		163.5	0.764	220.0	0.30	190.91	39.37	151.54
90	2124	222.42		184.9	0.804	220.0	0.30	214.66	44.48	170.17
100	2360	247.14		205.1	0.844	220.0	0.30	239.10	49.43	189.68
110	2596	271.85		220.0	0.893	186.6	0.27	247.22	54.37	192.84
120	2832	296.57		220.0	1.045	126.7	0.19	253.47	59.31	194.15
50	1180	123.57	0.3	106.1	0.745	220.0	0.30	145.04	37.07	107.97
60	1416	148.28		126.1	0.782	220.0	0.30	164.61	44.48	120.13
70	1652	173.00		146.3	0.818	220.0	0.30	185.67	51.90	133.77
80	1880	196.87		165.9	0.857	220.0	0.30	208.18	59.06	149.11
90	2124	222.42		187.0	0.930	220.0	0.30	239.91	66.73	173.18
100	2360	247.14		207.3	0.945	220.0	0.30	261.90	74.14	187.76
50	1180	123.57	0.4	107.2	0.837	220.0	0.30	155.73	49.43	106.30
60	1416	148.28		127.2	0.880	220.0	0.30	177.94	59.31	118.62

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบมอเตอร์ (ต่อ)

Speed			T_L (Nm)	v_a (V)	i_a (A)	v_f (V)	i_f (A)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	P_{loss} (W)
%	rpm	rad/sec								
70	1652	173.00	0.4	147.6	0.924	220.0	0.30	202.38	69.20	133.18
80	1880	196.87		167.8	0.962	220.0	0.30	227.42	78.75	148.67
90	2124	222.42		189.0	1.006	220.0	0.30	256.13	88.97	167.16
100	2360	247.14		209.6	1.052	220.0	0.30	286.50	98.86	187.64
110	2596	271.85		220.0	1.157	165.9	0.24	294.52	108.74	185.78
120	2832	296.57		220.0	1.557	103.3	0.15	358.24	118.63	239.62
50	1180	123.57	0.5	108.9	0.941	220.0	0.30	168.47	61.78	106.69
60	1416	148.28		128.9	0.987	220.0	0.30	193.22	74.14	119.08
70	1652	173.00		149.4	1.280	220.0	0.30	257.23	86.50	133.08
80	1880	196.87		169.2	1.069	220.0	0.30	246.87	98.44	148.44
90	2124	222.42		190.8	1.112	220.0	0.30	278.17	111.21	166.96
100	2360	247.14		211.8	1.158	220.0	0.30	311.26	123.57	187.70
50	1180	123.57	0.6	109.7	1.037	220.0	0.30	179.76	74.14	105.62
60	1416	148.28		129.7	1.076	220.0	0.30	205.56	88.97	116.59
70	1652	173.00		149.3	1.118	220.0	0.30	232.92	103.80	129.12
80	1880	196.87		168.9	1.152	220.0	0.30	260.57	118.12	142.45

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบมอเตอร์ (ต่อ)

Speed			T_L (Nm)	v_a (V)	i_a (A)	v_f (V)	i_f (A)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	P_{loss} (W)
%	rpm	rad/sec								
90	2124	222.42	0.6	190.5	1.184	220.0	0.30	291.55	133.45	158.10
100	2360	247.14		210.4	1.214	220.0	0.30	321.43	148.28	173.14
110	2596	271.85		220.0	1.314	173.2	0.25	332.38	163.11	169.27
120	2832	296.57		220.0	1.614	124.8	0.18	377.54	177.94	199.60
50	1180	123.57	0.7	110.5	1.125	220.0	0.30	190.31	86.50	103.81
60	1416	148.28		130.3	1.161	220.0	0.30	217.28	103.80	113.48
70	1652	173.00		150.9	1.215	220.0	0.30	249.34	121.10	128.25
80	1880	196.87		170.5	1.244	220.0	0.30	278.10	137.81	140.29
90	2124	222.42		191.7	1.285	220.0	0.30	312.33	155.70	156.64
100	2360	247.14		212.6	1.339	220.0	0.30	350.67	173.00	177.67
50	1180	123.57	0.8	122.2	1.233	220.0	0.30	216.67	98.86	117.82
60	1416	148.28		131.7	1.272	220.0	0.30	233.52	118.63	114.90
70	1652	173.00		152.1	1.321	220.0	0.30	266.92	138.40	128.53
80	1880	196.87		171.6	1.372	220.0	0.30	301.44	157.50	143.94
90	2124	222.42		192.7	1.397	220.0	0.30	335.20	177.94	157.26
100	2360	247.14		212.0	1.429	220.0	0.30	368.95	197.71	171.24

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบมอเตอร์ (ต่อ)

Speed			T_L (Nm)	v_a (V)	i_a (A)	v_f (V)	i_f (A)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	P_{loss} (W)
%	rpm	rad/sec								
110	2596	271.85	0.8	220.0	1.610	168.3	0.24	394.42	217.48	176.94
120	2832	296.57		220.0	2.030	120.0	0.17	467.24	237.25	229.99
50	1180	123.57	0.9	112.4	1.305	220.0	0.30	212.68	111.21	101.47
60	1416	148.28		132.1	1.346	220.0	0.30	243.81	133.45	110.35
70	1652	173.00		152.1	1.402	220.0	0.30	279.24	155.70	123.55
80	1880	196.87		171.4	1.440	220.0	0.30	312.82	177.19	135.63
90	2124	222.42		191.5	1.473	220.0	0.30	348.08	200.18	147.90
100	2360	247.14		212.1	1.513	220.0	0.30	386.91	222.42	164.48
50	1180	123.57	1.0	114.3	1.444	220.0	0.30	231.05	123.57	107.48
60	1416	148.28		134.5	1.496	220.0	0.30	267.21	148.28	118.93
70	1652	173.00		155.5	1.542	220.0	0.30	305.78	173.00	132.78
80	1880	196.87		174.9	1.588	220.0	0.30	343.74	196.87	146.87
90	2124	222.42		196.7	1.656	220.0	0.30	391.74	222.42	169.31
100	2360	247.14		218.2	1.719	220.0	0.30	441.09	247.14	193.95
110	2596	271.85		220.0	2.190	141.1	0.20	510.02	271.85	238.17
50	1180	123.57	1.1	116.1	1.558	220.0	0.30	246.88	135.93	110.96

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบมอเตอร์ (ต่อ)

Speed			T_L (Nm)	v_a (V)	i_a (A)	v_f (V)	i_f (A)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	P_{loss} (W)
%	rpm	rad/sec								
60	1416	148.28	1.1	136.8	1.617	220.0	0.30	287.21	163.11	124.09
70	1652	173.00		157.0	1.667	220.0	0.30	327.72	190.30	137.42
80	1880	196.87		177.3	1.717	220.0	0.30	370.42	216.56	153.86
90	2124	222.42		199.2	1.779	220.0	0.30	420.38	244.67	175.71
100	2360	247.14		219.6	1.829	220.0	0.30	467.65	271.85	195.80
50	1180	123.57	1.2	116.9	1.664	220.0	0.30	260.52	148.28	112.24
60	1416	148.28		137.3	1.721	220.0	0.30	302.29	177.94	124.35
70	1652	173.00		157.7	1.777	220.0	0.30	346.23	207.60	138.64
80	1880	196.87		177.1	1.816	220.0	0.30	387.61	236.25	151.37
90	2124	222.42		199.0	1.896	220.0	0.30	443.30	266.91	176.39
100	2360	247.14		218.8	1.952	220.0	0.30	493.10	296.57	196.53
50	1180	123.57	1.3	117.4	1.758	220.0	0.30	272.39	160.64	111.75
60	1416	148.28		137.4	1.801	220.0	0.30	313.46	192.77	120.69
70	1652	173.00		157.7	1.858	220.0	0.30	359.01	224.90	134.11
80	1880	196.87		177.0	1.914	220.0	0.30	404.78	255.94	148.84
90	2124	222.42		198.9	1.990	220.0	0.30	461.81	289.15	172.66

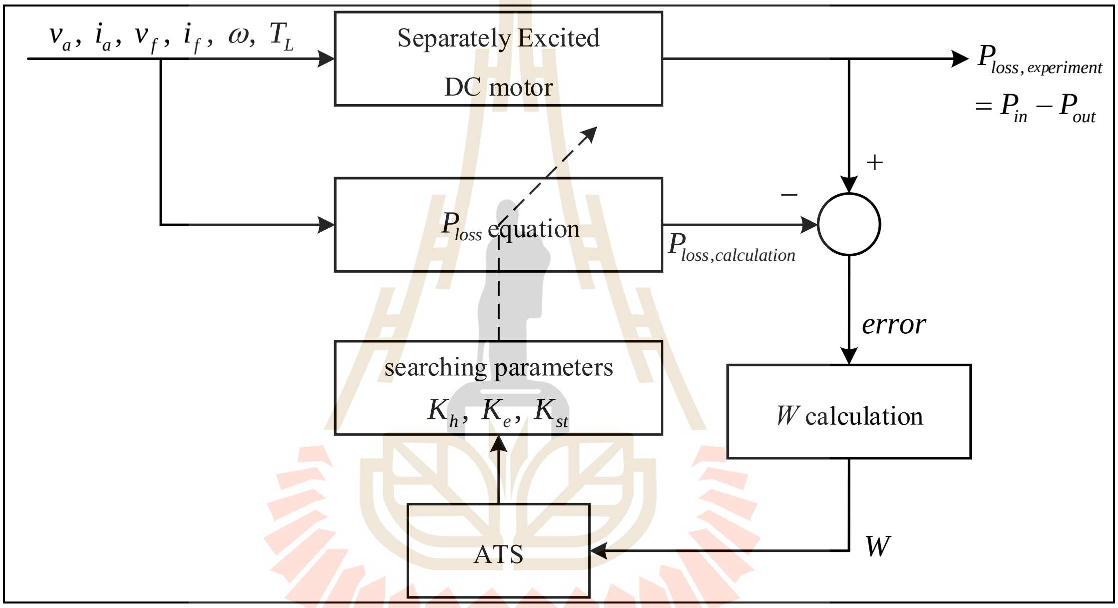
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบมอเตอร์ (ต่อ)

Speed			T_L (Nm)	v_a (V)	i_a (A)	v_f (V)	i_f (A)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	P_{loss} (W)
%	rpm	rad/sec								
100	2360	247.14	1.3	217.8	2.020	219.2	0.30	505.72	321.28	184.44
50	1180	123.57	1.4	118.0	1.862	220.0	0.30	285.72	173.00	112.72
60	1416	148.28		138.1	1.917	220.0	0.30	330.74	207.60	123.14
70	1652	173.00		158.1	1.970	220.0	0.30	377.46	242.20	135.26
80	1880	196.87		176.2	2.000	220.0	0.30	418.40	275.62	142.78
90	2124	222.42		197.2	2.050	220.0	0.30	470.26	311.39	158.87
100	2360	247.14		217.8	2.110	220.0	0.30	525.56	345.99	179.56

4.4 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสีย

การค้นหาพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียจะดำเนินการโดยการค้นหาค่าพารามิเตอร์ 3 ค่า โดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่า การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว หรือวิธี ATS ตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2 สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 4.8

จากรูปที่ 4.8 สามารถคำนวณหาค่าความผิดพลาดระหว่างค่ากำลังงานสูญเสียจากการทดสอบ ($P_{loss,experiment}$) กับค่ากำลังงานสูญเสียจากการคำนวณ ($P_{loss,calculation}$) ได้ดังสมการที่ (4.3)



รูปที่ 4.8 แผนภาพการค้นหาพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียด้วยวิธี ATS

$$error = \left|P_{loss,experiment} - P_{loss,calculation}\right| \tag{4.3}$$

โดยมีวัตถุประสงค์ของการค้นหาเพื่อทำให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.4)

$$W = \sqrt{\frac{\sum error^2}{n}} \tag{4.4}$$

โดยที่ W คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่คำนวณด้วยค่าความผิดพลาดอาร์เอ็มเอส (root mean square error)

n คือ จำนวนชุดข้อมูล

การกำหนดขอบเขตของพารามิเตอร์สำหรับการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวสามารถอธิบายได้ดังนี้

- ขอบเขตของค่า K_h

จากการศึกษาของ Vincent Del Toro ในปี ค.ศ. 1990 พบว่าค่า K_h มีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ เช่น เหล็กกล้าหล่อ (cast steel) มีค่า 0.025 แผ่นเหล็กหล่อบนซิลิกอน (silicon sheet steel) มีค่า 0.001 และโลหะผสม (permalloy) มีค่า 0.0001 จึงกำหนดให้ช่วงขอบเขตล่างของค่า K_h เท่ากับ 0.0001 กำหนดขอบเขตบนของค่า K_h จากการศึกษาของ Bertotti G. ในปี ค.ศ. 1998 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2

ดังนั้น จึงกำหนดให้ค่า K_h อยู่ในช่วงขอบเขต 0.0001-2 $\dfrac{\mathrm{W\cdot s}}{\mathrm{rad\cdot T\cdot m^3}}$

- ขอบเขตของค่า K_e

จากการศึกษาของ Nasar ในปี 1995 พบว่าค่า K_e นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและความหนาของแผ่นเหล็กที่ซ้อนทับกัน แสดงได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ขอบเขตของค่า K_e

ความหนาของแผ่นเหล็ก (mm)	$K_e\left(\dfrac{\mathrm{W\cdot s^2}}{\mathrm{T\cdot rad^2\cdot m^5}}\right)$
0.0127	0.50
0.0254	0.75
0.0508	0.85
0.1-0.25	0.90
0.27-0.36	0.95

ดังนั้น จึงกำหนดให้ค่า K_e อยู่ในช่วงขอบเขต $0.5-0.95$

- ขอบเขตของค่า K_{st}

ขอบเขตของค่า K_{st} ได้จากการเปรียบเทียบ เนื่องจาก K_{st} เป็นค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน โดยทั่วไปสามารถคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งานได้จากสมการที่ (4.5)

$$P_s = 1\% P_{in} = 1\%(v_a i_a + v_f i_f) \tag{4.5}$$

จากการศึกษาของ Alexander Kusko ในปี 1983 ได้สมการกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน ดังสมการที่ (4.6)

$$P_s = K_{st} \frac{60^2}{4\pi^2} i_a^2 \omega^2 \tag{4.6}$$

นำค่า P_s จากสมการที่ (4.5) แทนในสมการที่ (4.6) จะได้ดังสมการที่ (4.7)

$$1\%(v_a i_a + v_f i_f) = K_{st} \frac{60^2}{4\pi^2} i_a^2 \omega^2 \tag{4.7}$$

แทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ลงในสมการที่ (4.7) จะได้ค่า $K_{st} = 2.04 \times 10^{-7}$

ดังนั้น จึงกำหนดให้ค่า K_{st} อยู่ในช่วงขอบเขต $1 \times 10^{-10} - 1 \times 10^{-5}$ $\dfrac{\mathrm{W \cdot s^2}}{\mathrm{rad \cdot A^2}}$

จากการกำหนดขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ข้างต้น เมื่อนำไปค้นหาด้วยการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว และมีการชนขอบเขตล่าง หรือขอบเขตบน จึงได้มีการปรับขอบเขตการค้นหาของค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ค่า เมื่อทำการปรับขอบเขตไปเรื่อย ๆ จะได้ขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ค่าที่ให้ค่า W น้อยที่สุด ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการค้นหาของตาบูเชิงปรับตัว

พารามิเตอร์	ขอบเขต	หน่วย
K_h	$1\times10^{-4}-2$	$\frac{\mathrm{W}\cdot\mathrm{s}}{\mathrm{rad}\cdot\mathrm{T}\cdot\mathrm{m}^3}$
K_e	$1\times10^{-5}-1$	$\frac{\mathrm{W}\cdot\mathrm{s}^2}{\mathrm{T}\cdot\mathrm{rad}^2\cdot\mathrm{m}^5}$
K_{st}	$1\times10^{-12}-1\times10^{-5}$	$\frac{\mathrm{W}\cdot\mathrm{s}^2}{\mathrm{rad}\cdot\mathrm{A}^2}$

สำหรับการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวนั้นจะต้องมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการค้นหา ได้แก่ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง รัศมีเริ่มต้น และตัวปรับลดรัศมี ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบเพื่อหาค่าดังกล่าว โดยมีหลักเกณฑ์ในการเลือกค่าพารามิเตอร์ คือ เลือกค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ได้ค่า W น้อยที่สุด และใช้ค่าดังกล่าวในการหาค่าพารามิเตอร์ถัดไป แสดงได้ดังดังตารางที่ 4.4 ถึง 4.7 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น

ครั้งที่ / ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 คำตอบ						
ค่า W	4.9863	4.9129	4.9993	4.9234	4.9479	4.9540
จำนวนรอบ	3	2	22	3	3	6.6
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ						
ค่า W	4.7710	4.9999	4.9531	4.9999	4.8301	4.9108
จำนวนรอบ	1	80	2	3	2	17.6
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 30 คำตอบ						
ค่า W	4.9958	4.7616	4.9920	4.9350	4.7970	4.8963
จำนวนรอบ	3	3	3	1	3	2.6
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 40 คำตอบ						
ค่า W	4.9032	4.9184	4.9915	4.8294	4.9078	4.9100
จำนวนรอบ	3	1	2	1	3	2

ตารางที่ 4.4 การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น (ต่อ)

ครั้งที่ / ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 50 คำตอบ						
ค่า W	4.8843	4.9999	4.9804	4.7702	4.9497	4.9169
จำนวนรอบ	2	3	3	1	3	2.4

หมายเหตุ : ในการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้นได้กำหนดให้ จำนวนคำตอบรอบข้าง รัศมีเริ่มต้น และค่าปรับลดรัศมี มีค่าเท่ากับ 50, 10 และ 1.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง

ครั้งที่ / ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ						
ค่า W	4.9047	4.7403	4.7637	4.8078	4.7359	4.7905
จำนวนรอบ	1	3	4	3	1	2.4
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 คำตอบ						
ค่า W	4.8538	4.8277	4.7491	4.9408	4.9297	4.8602
จำนวนรอบ	3	3	1	1	3	2.2
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 30 คำตอบ						
ค่า W	4.9065	4.7840	4.7253	4.7546	4.9901	4.8321
จำนวนรอบ	2	3	3	1	3	2.4
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 40 คำตอบ						
ค่า W	4.8973	4.8570	4.9997	4.9998	4.8590	4.9226
จำนวนรอบ	2	2	22	35	2	12.6
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 50 คำตอบ						
ค่า W	4.9920	4.7324	4.8653	4.9672	4.7879	4.8689
จำนวนรอบ	3	3	2	3	2	2.6

หมายเหตุ : ในการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้างได้กำหนดให้ จำนวนคำตอบเริ่มต้น รัศมีเริ่มต้น และค่าปรับลดรัศมี มีค่าเท่ากับ 30, 10 และ 1.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 การทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น

ค่าที่ทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 2						
ค่า W	4.9894	4.8744	4.9997	4.9118	4.9077	4.9357
จำนวนรอบ	2	2	3	3	2	2.4
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 4						
ค่า W	4.7984	4.9648	4.7311	4.9129	4.8077	4.8430
จำนวนรอบ	1	2	2	5	3	2.6
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 6						
ค่า W	4.9994	4.9035	4.9933	4.8681	4.9584	4.9445
จำนวนรอบ	21	3	1	2	1	5.6
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 8						
ค่า W	4.8317	4.7761	4.9877	4.9638	4.8433	4.8805
จำนวนรอบ	1	1	6	10	1	3.8
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 10						
ค่า W	4.9840	4.9765	4.9239	4.7701	4.9582	4.9225
จำนวนรอบ	6	3	3	3	3	3.6

หมายเหตุ : ในการทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้นได้กำหนดให้ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง และค่าปรับลดรัศมี มีค่าเท่ากับ 30, 10 และ 1.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 การทดสอบค่าปรับลดรัศมี

ค่าที่ทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1						
ค่า W	4.9803	4.7945	4.8641	4.8208	4.8562	4.8632
จำนวนรอบ	22	60	81	24	7	38.8
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.1						
ค่า W	4.9997	4.9924	4.8748	4.8857	4.8986	4.9302

ตารางที่ 4.7 การทดสอบค่าปรับลดรัศมี (ต่อ)

ค่าที่ทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนรอบ	23	5	5	3	1	7.4
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.2						
ค่า W	4.9817	4.8008	4.9284	4.8034	4.7532	4.8535
จำนวนรอบ	4	4	3	1	2	2.8
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3						
ค่า W	4.7591	4.9539	4.8329	4.7979	4.9184	4.8524
จำนวนรอบ	3	3	2	3	3	2.8
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.4						
ค่า W	4.9958	4.9907	4.9095	4.9796	4.9906	4.9732
จำนวนรอบ	12	11	1	22	4	10

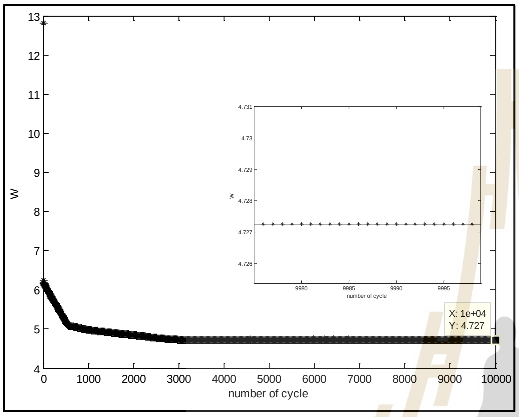
หมายเหตุ : ในการทดสอบค่าปรับลดรัศมีได้กำหนดให้ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง และค่ารัศมีเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 30, 10 และ 4 ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.4 ถึง 4.7 สามารถสรุปผลจากการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ได้ดังนี้ จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 30 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 4 และค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3 จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวของการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวนี้ไปทดสอบหาพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียจำนวน 10000 รอบ/ครั้ง เพื่อหาคำตอบสุดท้าย ซึ่งได้ค่าดังตารางที่ 4.8 ดังนี้

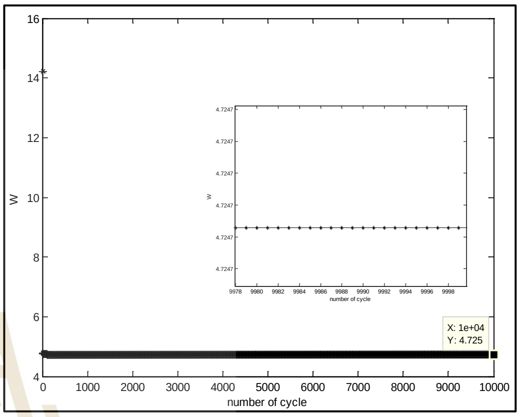
ตารางที่ 4.8 ผลจากการทดสอบจำนวน 10000 รอบ/ครั้ง

ครั้งที่	K_h	K_e	K_{st}	W
1	0.6590	0.0166	3.8067×10^{-10}	4.7271
2	0.6184	0.0167	1.1747×10^{-10}	4.7247
3	0.6338	0.0167	3.0322×10^{-10}	4.7256
4	0.6701	0.0165	7.6099×10^{-11}	4.7277
5	0.6401	0.0166	1.4146×10^{-10}	4.7260

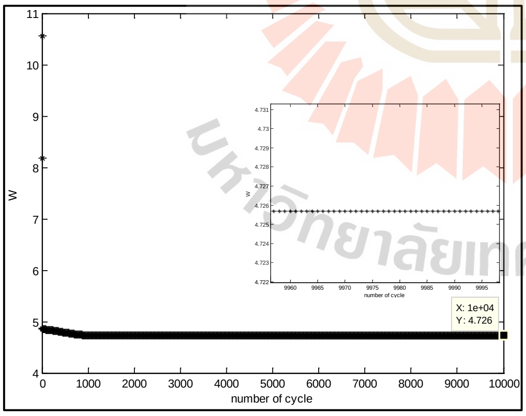
จากตารางที่ 4.8 ทำการทดสอบ 10000 รอบ จำนวน 5 ครั้ง แล้วนำมาพิจารณาค่า W ที่น้อยที่สุด จึงสรุปได้ว่า K_h เท่ากับ 0.6184 $\frac{\mathrm{W \cdot s}}{\mathrm{rad \cdot T \cdot m^3}}$ K_e เท่ากับ 0.0167 $\frac{\mathrm{W \cdot s^2}}{\mathrm{T \cdot rad^2 \cdot m^5}}$ และ K_{st} เท่ากับ 1.1747×10^{-10} $\frac{\mathrm{W \cdot s^2}}{\mathrm{rad \cdot A^2}}$ ซึ่งสามารถแสดงลักษณะการลู่เข้าของค่า W ได้ดังรูปที่ 4.9



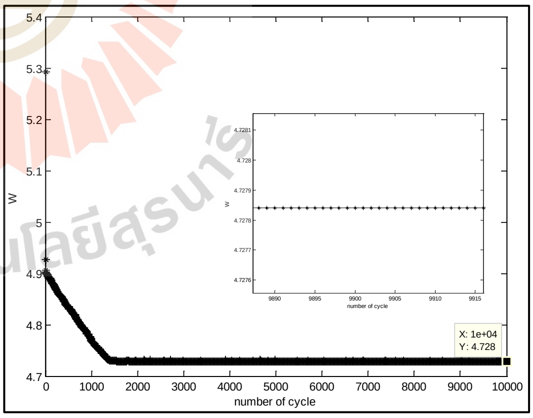
(ก) ลักษณะการลู่เข้าของค่า W ครั้งที่ 1



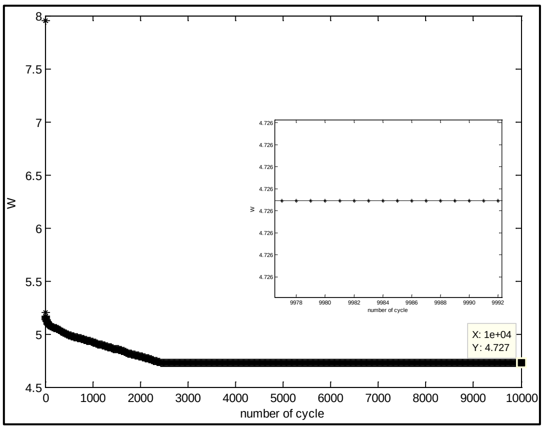
(ข) ลักษณะการลู่เข้าของค่า W ครั้งที่ 2



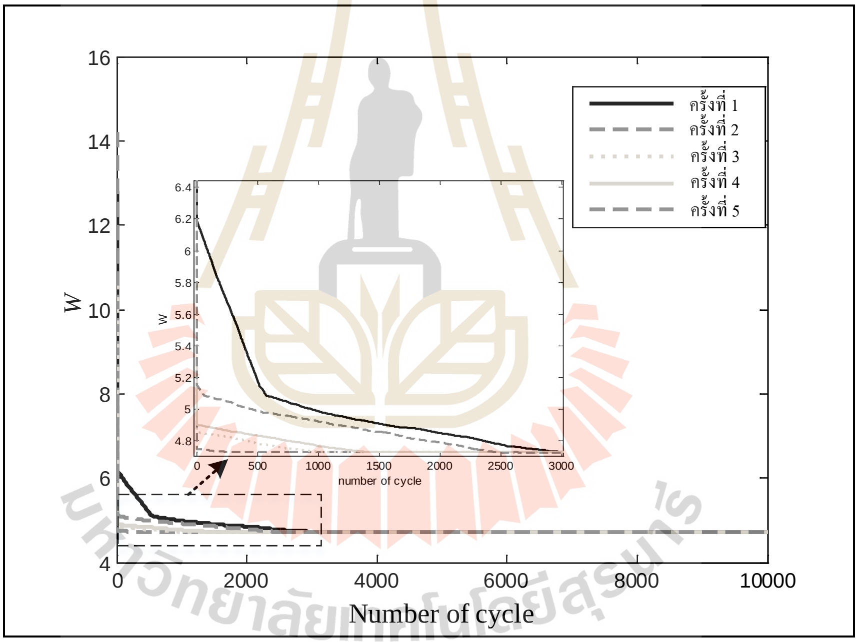
(ค) ลักษณะการลู่เข้าของค่า W ครั้งที่ 3



(ง) ลักษณะการลู่เข้าของค่า W ครั้งที่ 4



(จ) ลักษณะการลู่เข้าของค่า W ครั้งที่ 5



(ฉ) เปรียบเทียบลักษณะการลู่เข้าของค่า W ครั้งที่ 1-5

รูปที่ 4.9 ลักษณะการลู่เข้าของค่า W

จากนั้นทำการตรวจสอบผลการค้นหา สามารถทำได้โดยการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวมาทำการทดสอบความถูกต้องกับข้อมูลชุดที่สองในตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นการทดสอบที่แรงบิด 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0, 1.1 และ 1.3 $\mathrm{N \cdot m}$ ซึ่งข้อมูลชุดนี้ไม่ได้

นำไปใช้ในการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว การตรวจสอบทำได้โดยการนำค่าพารามิเตอร์ K_h เท่ากับ 0.6184 $\frac{\mathrm{W \cdot s}}{\mathrm{rad \cdot T \cdot m^3}}$ K_e เท่ากับ 0.0167 $\frac{\mathrm{W \cdot s^2}}{\mathrm{T \cdot rad^2 \cdot m^5}}$ และ K_{st} เท่ากับ 1.1747×10^{-10} $\frac{\mathrm{W \cdot s^2}}{\mathrm{rad \cdot A^2}}$ ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์แทนลงในสมการกำลังงานสูญเสีย สมการที่ (3.29) ในบทที่ 3 แล้วนำค่ากำลังงานสูญเสียที่ได้จากการคำนวณไปเปรียบเทียบกับค่ากำลังงานสูญเสียที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ตามตารางที่ 4.1 ซึ่งผลการตรวจสอบจะได้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาด เท่ากับ 5.86 % สามารถแสดงผลการทดสอบความถูกต้อง ได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความถูกต้องของคำตอบจากการระบุเอกลักษณ์

Speed			T_L $(\mathrm{N \cdot m})$	$P_{loss,experiment}$ (W)	$P_{loss,calculation}$ (W)	% *error*
%	rpm	rad/sec				
50	1180	123.57	0.3	107.97	96.27	10.84
60	1416	148.28		120.13	107.12	10.83
70	1652	173.00		133.77	121.02	9.53
80	1880	196.87		149.11	136.28	8.60
90	2124	222.42		173.18	155.11	10.43
100	2360	247.14		187.76	174.22	7.21
50	1180	123.57	0.5	106.69	98.38	7.79
60	1416	148.28		119.08	110.73	7.01
70	1652	173.00		133.08	124.86	6.18
80	1880	196.87		148.44	140.31	5.48
90	2124	222.42		166.96	158.76	4.91
100	2360	247.14		187.70	178.62	4.84
50	1180	123.57	0.7	103.81	102.22	1.53
60	1416	148.28		113.48	114.49	0.89
70	1652	173.00		128.25	128.94	0.54
80	1880	196.87		140.29	144.25	2.82
90	2124	222.42		156.64	162.77	3.91
100	2360	247.14		177.67	182.89	2.94

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความถูกต้องของคำตอบจากการระบุเอกลักษณ์ (ต่อ)

Speed			T_L (N·m)	$P_{loss,experiment}$ (W)	$P_{loss,calculation}$ (W)	% *error*
%	rpm	rad/sec				
50	1180	123.57	0.9	101.47	106.31	4.77
60	1416	148.28		110.35	118.83	7.68
70	1652	173.00		123.55	133.63	8.16
80	1880	196.87		135.63	147.28	8.59
90	2124	222.42		147.90	159.74	8.01
100	2360	247.14		164.48	175.72	6.83
50	1180	123.57	1.1	110.96	113.2	2.02
60	1416	148.28		124.09	126.24	1.72
70	1652	173.00		137.42	141.34	2.82
80	1880	196.87		153.86	157.56	2.40
90	2124	222.42		175.71	177.16	0.83
100	2360	247.14		195.80	197.71	0.98
50	1180	123.57	1.3	111.75	118.55	6.09
60	1416	148.28		120.69	132.37	9.68
70	1652	173.00		134.11	144.67	7.87
80	1880	196.87		148.84	162.27	9.02
90	2124	222.42		172.66	183.61	6.34
100	2360	247.14		184.44	204.61	10.92
ค่าเฉลี่ย % *error*						5.86

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวทั้ง 3 ค่า แทนลงไปในสมการกำลังงานสูญเสีย สมการที่ (3.29) ในบทที่ 3 จะได้ดังสมการที่ (4.8) ดังนี้

$$P_{loss} = 8.8i_a^2 + 654i_f^2 + 2i_a + (0.6184)\omega i_f^2 + (0.0167)\omega^2 i_f^2 + (1.0712\times10^{-8})i_a^2\omega^2 \quad (4.8)$$

จากสมการที่ (4.8) สังเกตได้ว่าค่ากำลังงานสูญเสียจะขึ้นอยู่กับกระแสสนาม กระแสอาร์เมเจอร์ และความเร็วรอบของมอเตอร์ ดังนั้น การประหยัดพลังงานในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึง

ได้ทำการปรับลดกำลังงานสูญเสียจากกระแสสนามเป็นหลัก ส่วนพารามิเตอร์ที่เหลือจะขึ้นอยู่กับสภาวะการใช้งานของมอเตอร์

4.5 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ซึ่งเป็นอัลกอริทึมการค้นหาที่ดีวิธีหนึ่ง โดยพบว่า การกำหนดขอบเขตการค้นหาและการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวให้เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญต่อกระบวนการค้นหา โดยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว เมื่อนำไปแทนค่าลงในสมการกำลังงานสูญเสียแล้ว พบว่าค่ากำลังงานสูญเสียที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังงานสูญเสียที่ได้จากการทดสอบ จากนั้นจะนำค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียที่ได้จากการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวไปใช้ร่วมกับการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในสมการกำลังงานสูญเสียแบบออนไลน์ด้วยอัลกอริทึมกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นแบบเวียนเกิดเชิงกำหนด ซึ่งจะนำเสนอต่อไปในบทที่ 7 และจะใช้ค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากวิธีดังกล่าวไปหาค่ากระแสสนามด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด เพื่อทำให้เกิดการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

บทที่ 5
โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดแยกกระตุ้น สำหรับการประหยัดพลังงาน

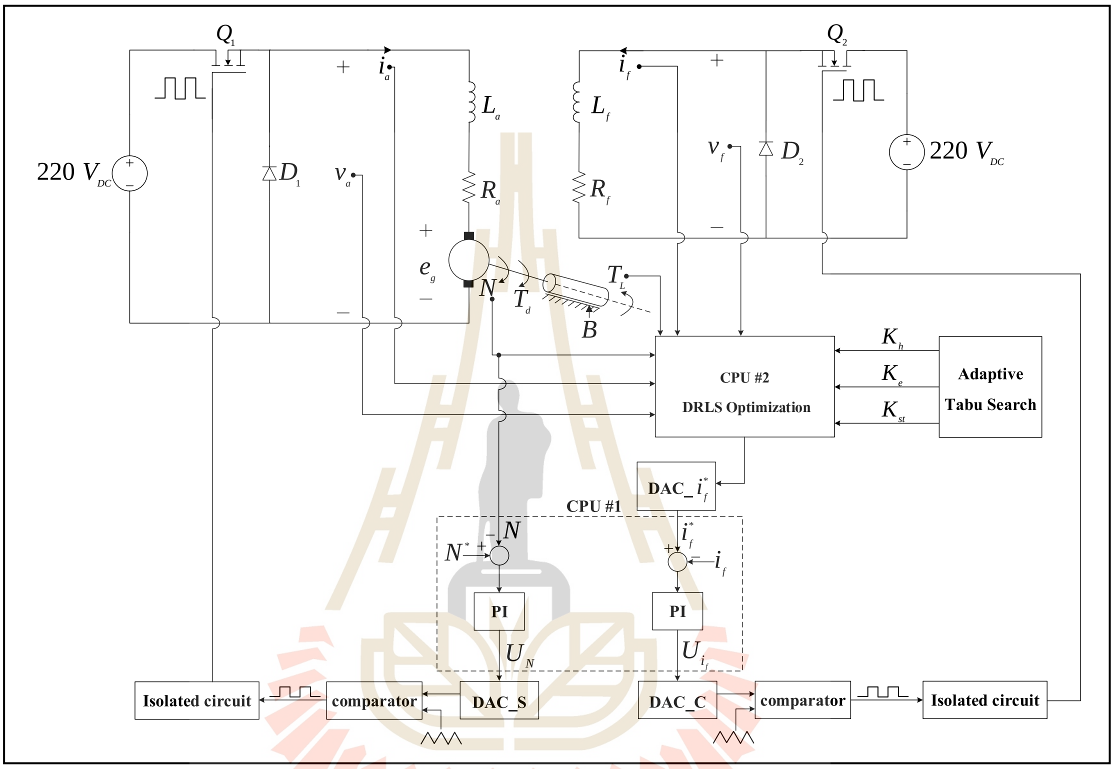
5.1 กล่าวนำ

ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้วงจรชอปเปอร์ในการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อเป็นอินพุตให้กับมอเตอร์ โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ของวงจรชอปเปอร์ คือ มอสเฟต การควบคุมการทำงานของมอสเฟตทำได้โดยการควบคุมค่าวัฏจักรหน้าที่ ซึ่งการควบคุมดังกล่าวจะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET - EASY MEGA 1280 สำหรับสร้างตัวควบคุมพีไอในการควบคุมค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรชอปเปอร์ นอกจากการควบคุมระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ยังใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ดังกล่าวในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม DRLS และการประหยัดพลังงานด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดอีกด้วย โดยในบทนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET - EASY MEGA 1280 วิธีการออกแบบและหลักการทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

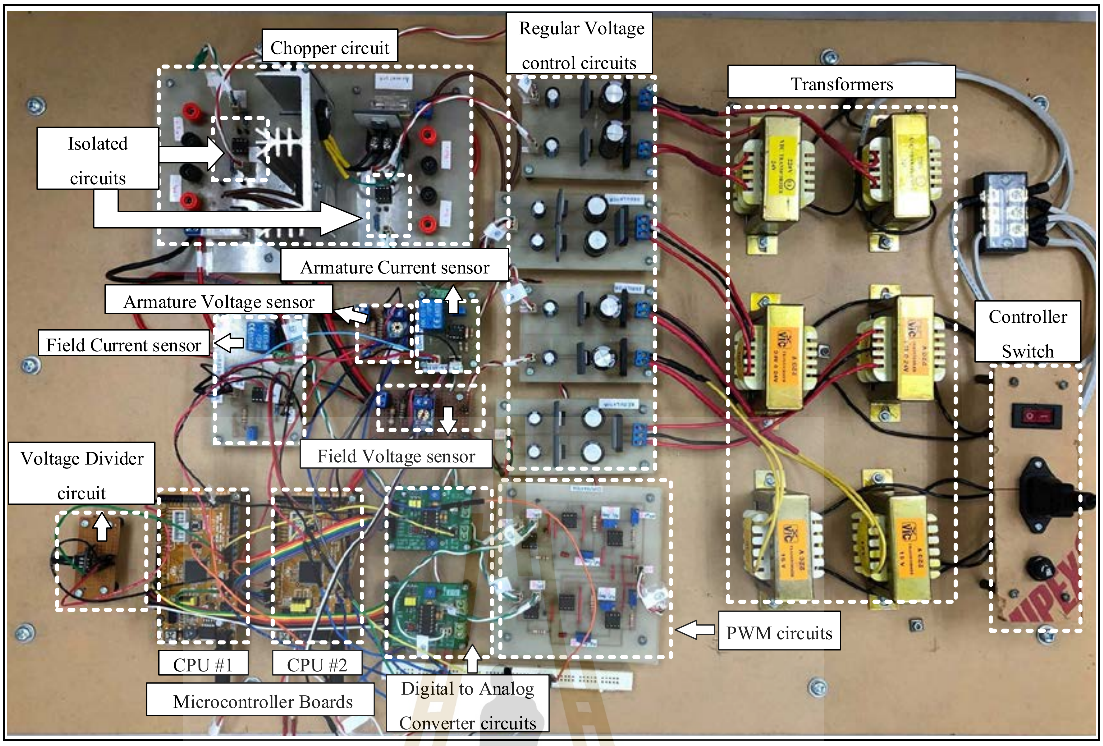
5.2 โครงสร้างของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ประกอบด้วย บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรชอปเปอร์ วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะลอก วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ และวงจรแยกโดดสัญญาณ แสดงได้ดังรูปที่ 5.1 หลักการทำงานของระบบขับเคลื่อนดังกล่าวจะใช้วงจรชอปเปอร์ในการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อเป็นอินพุตให้กับมอเตอร์ โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET - EASY MEGA 1280 (CPU #1) สร้างตัวควบคุมพีไอสำหรับการควบคุมค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรชอปเปอร์ โดยค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุมพีไอจะเข้าสู่วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะลอก เพื่อเป็นแรงดันอ้างอิงสำหรับนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาห์รูปสามเหลี่ยม เพื่อสร้างสัญญาณ PWM ในการควบคุมสวิตช์ของวงจรชอปเปอร์เพื่อให้ได้ค่ากระแสสนามและความเร็วรอบที่ต้องการในการควบคุมมอเตอร์ อีกทั้งยังใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

(CPU #2) ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม DRLS และการประหยัดพลังงานด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด ก่อนจะส่งค่ากระแสสนามที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดเพื่อเป็นค่ากระแสสนามอ้างอิงให้กับตัวควบคุมพีไอ โดยภาพรวมของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น สำหรับการประหยัดพลังงานที่ใช้งานจริงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.1 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น



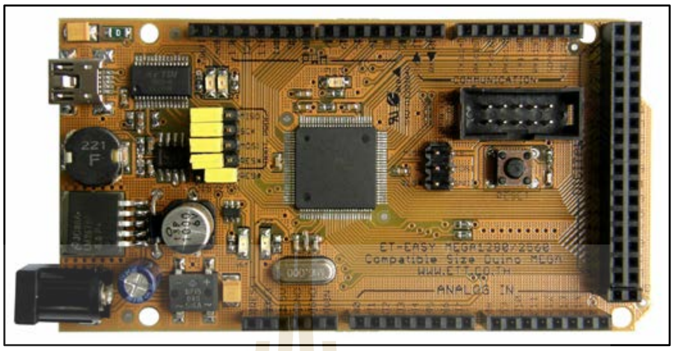
รูปที่ 5.2 ภาพรวมของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น
สำหรับการประหยัดพลังงานที่ใช้งานจริง

5.3 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET - EASY MEGA 1280

สัญญาณ PWM ที่ใช้ขับสวิตช์ของวงจรชอปเปอร์ สำหรับการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรชอปเปอร์ สามารถทำได้โดยการควบคุมค่าวัฏจักรหน้าที่ด้วยตัวควบคุมพีไอที่สร้างขึ้นบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังนั้น การสร้างตัวควบคุมพีไอจะต้องมีความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET-EASY MEGA 1280 จำนวน 2 บอร์ดด้วยกัน คือ บอร์ดตัวแรกใช้สร้างตัวควบคุมพีไอ (บอร์ดควบคุมมอเตอร์ : CPU #1) และบอร์ดตัวที่สองใช้ประมาณค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม DRLS และการคำนวณหาค่ากระแสสนามสำหรับการประหยัดพลังงานด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด (บอร์ดการคำนวณของอัลกอริทึม DRLS และการประหยัดพลังงาน : CPU #2)

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET - EASY MEGA 1280 ดังรูปที่ 5.3 ผลิตขึ้นโดยบริษัทอีทีที ใช้ชิพไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMEGA 1280 ตระกูล AVR ของบริษัท Atmel บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิดนี้รองรับการเขียนโปรแกรมภาษาซีของ Arduino และสามารถรองรับการใช้งานได้หลากหลาย เนื่องจากมีการปรับปรุงโปรแกรมให้ใช้ชิพ AVR รุ่นใหญ่ขึ้น

เพื่อให้มีจำนวนพอร์ตอินพุต พอร์ตเอาต์พุต พอร์ตดิจิตอล พอร์ตแอนะลอก พอร์ตสร้างสัญญาณ PWM และพอร์ตสื่อสารอนุกรม มีจำนวนมากขึ้น



รูปที่ 5.3 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET - EASY MEGA 1280

คุณสมบัติที่สำคัญของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET - EASY MEGA 1280 คือ เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิตที่มีประสิทธิภาพสูง แต่ใช้พลังงานต่ำสุดในตระกูล AVR มีความเร็วในการประมวลผลของซีพียู (MIPS) เท่ากับ 16 MHz มีตัวตั้งเวลา และตัวนับเวลาขนาด 8 บิต และ 16 บิต มีพอร์ตสร้างสัญญาณ PWM จำนวน 12 พอร์ต สามารถกำหนดความละเอียดได้ 16 บิต มีพอร์ตสื่อสารอนุกรมที่สามารถกำหนดอัตราการรับส่งข้อมูลได้จำนวน 4 พอร์ต และสามารถเชื่อมต่อสัญญาณแอนะลอกได้โดยตรงด้วยการแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอลขนาด 10 บิต จำนวน 16 พอร์ต นอกจากนี้ บอร์ดดังกล่าวยังสามารถเชื่อมต่อใช้งานพอร์ตอินพุตและเอาต์พุต (I/O expansion) ได้จำนวน 72 พอร์ต

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET - EASY MEGA 1280 มีพอร์ตแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะลอกหรือ DAC (digital to analog converter) ความละเอียด 12 บิต ซึ่งหมายความว่าบอร์ดสามารถส่งสัญญาณดิจิตอลที่ค่าตัวเลขอยู่ระหว่าง 0 – 4095 โดยมีพอร์ตดิจิตอลจำนวน 54 ช่องสัญญาณ คือ DAC0 – DAC53 และมีพอร์ตแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอลหรือ ADC (analog to digital converter) ความละเอียด 10 บิต ที่แรงดัน 5 โวลต์ ซึ่งหมายความว่าเมื่อแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลจะได้ค่าตัวเลขอยู่ระหว่าง 0 – 1023 โดยมีพอร์ตแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอลจำนวน 16 ช่องสัญญาณ คือ ADC0 – ADC15 การแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอลนี้สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5.1)

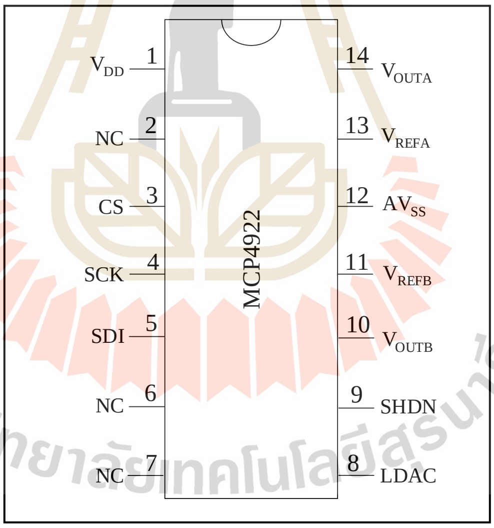
$$ADC = \frac{V_{IN} \times 1024}{V_{REF}} \qquad (5.1)$$

เมื่อ V_{IN} คือ แรงดันทางด้านอินพุต

V_{REF} คือ แรงดันอ้างอิงของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ กำหนดไว้ที่ 5 โวลต์

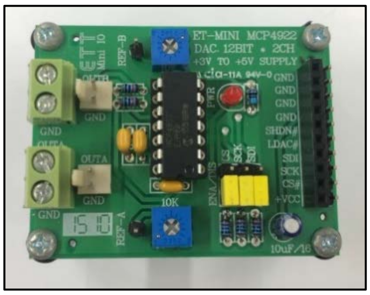
5.4 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะลอก

วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะลอก ทำหน้าที่แปลงข้อมูลดิจิตอลของค่าแรงดันเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอที่คำนวณด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (CPU #1) เป็นค่าเอาต์พุตที่มีลักษณะเป็นสัญญาณแบบแอนะลอก ทำหน้าที่เป็นแรงดันอ้างอิงสำหรับนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาห์รูปสามเหลี่ยม เพื่อสร้างสัญญาณ PWM ในการควบคุมสวิตช์ของวงจรชอปเปอร์ นอกจากนี้ วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะลอก ยังใช้ทำหน้าที่แปลงแรงดันของค่ากระแสสนามอ้างอิงจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (CPU #2) เพื่อส่งค่าให้กับตัวควบคุมแบบพีไอ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ไอซีแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะลอก เบอร์ MCP4922 ซึ่งมีความแยกชัด 12 บิต ไอซีดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ไอซีเบอร์ MCP4922

ไอซีชนิดนี้ทางบริษัท ETT ได้นำมาสร้างเป็นโมดูลแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะลอกที่สามารถนำมาต่อใช้งานกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้อย่างสะดวก โดยรูปร่างของโมดูลแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะลอกดังกล่าว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 โมดูลแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะลอก

การแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะลอกของไอซี เบอร์ MCP4922 มีความแยกชัด 12 บิตที่แรงดันอ้างอิง การใช้งานไอซีดังกล่าวจะใช้แรงดันอ้างอิงขนาด 5 โวลต์ ทำให้ค่าสัญญาณดิจิตอลที่ค่าตัวเลขระหว่าง 0 – 4095 สามารถแปลงเป็นสัญญาณแอนะลอกที่มีขนาดแรงดันระหว่าง 0 – 5 โวลต์ ผลการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะลอก คำนวณได้จากสมการที่ (5.2)

$$V_{OUT} = \frac{V_D \times V_{REF}}{4095} \tag{5.2}$$

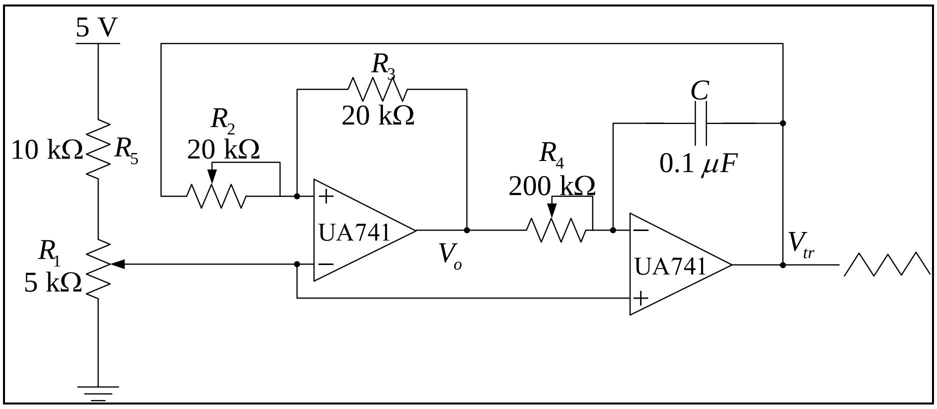
โดยที่ V_{OUT} คือ แรงดันแอนะลอกเพื่อส่งต่อค่าไปยังวงจรต่าง ๆ

V_D คือ ตัวเลขดิจิตอลของค่าแรงดันเอาต์พุต

V_{REF} คือ แรงดันอ้างอิง

5.5 วงจรสร้างสัญญาณ PWM

วงจรสร้างสัญญาณ PWM ใช้สำหรับควบคุมมอสเฟตของวงจรชอปเปอร์ ซึ่งประกอบด้วยวงจรสร้างสัญญาณพาห์รูปสามเหลี่ยม (triangular carrier) ที่สร้างจากออปแอมป์เบอร์ UA741CN สามารถแสดงโครงสร้างและค่าพารามิเตอร์ได้ดังรูปที่ 5.6 และวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (comparator) ที่สร้างจากไอซีเบอร์ LM311N สามารถแสดงโครงสร้างได้ดังรูปที่ 5.7



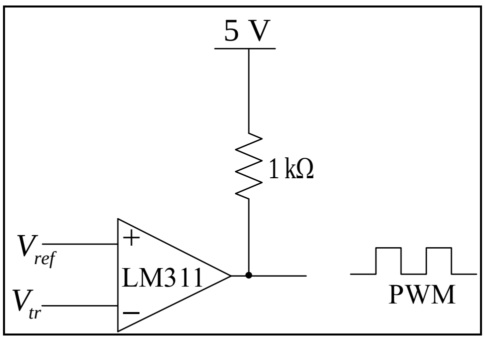
รูปที่ 5.6 โครงสร้างวงจรสร้างสัญญาณพาห์รูปสามเหลี่ยม

วงจรสร้างสัญญาณพาห์รูปสามเหลี่ยมสามารถปรับขนาดและความถี่ของรูปสัญญาณได้จากการปรับค่า R_2 และ R_4 ตามลำดับ สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (5.3) และ (5.4) ตามลำดับ ดังนี้

$$V_{tr} = -\frac{1}{R_4 C}\int (V_o - V_{in})dt + V_{in} \tag{5.3}$$

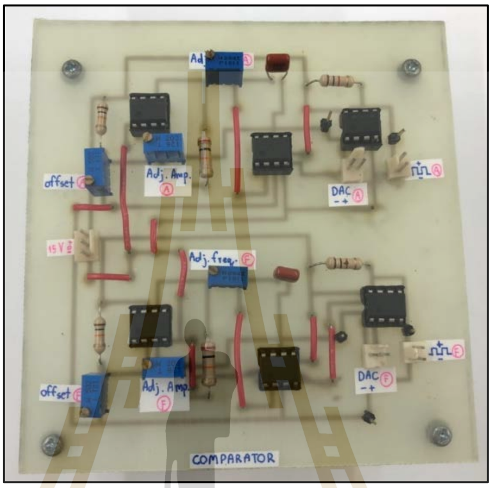
โดยที่ $V_o = R_3\left[\frac{V_{in} - V_{tr}}{R_2}\right] + V_{in}$

$$f_{tr} = \frac{1}{2\pi R_4 C} \tag{5.4}$$

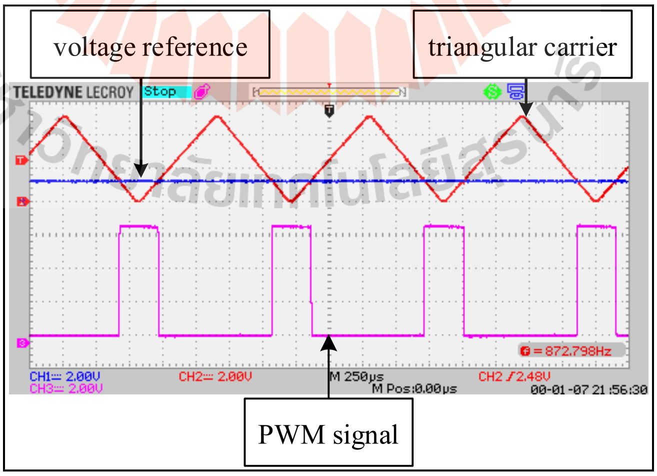


รูปที่ 5.7 โครงสร้างวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

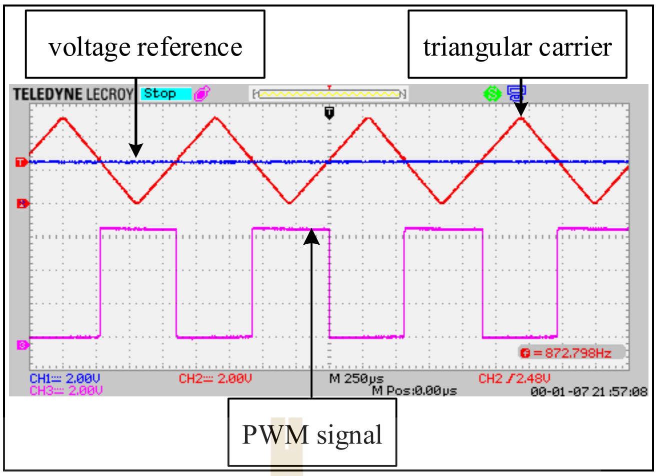
วงจรสร้างสัญญาณ PWM และวงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่ใช้งานจริงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.8 และสามารถแสดงผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณได้ดังรูปที่ 5.9 ถึง 5.11 โดยทำการทดสอบ 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 สัญญาณอินพุต PWM มีค่าวัฏจักรหน้าที่ 25 เปอร์เซ็นต์ กรณีที่ 2 สัญญาณอินพุต PWM มีค่าวัฏจักรหน้าที่ 50 เปอร์เซ็นต์ และกรณีที่ 3 สัญญาณอินพุต PWM มีค่าวัฏจักรหน้าที่ 75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



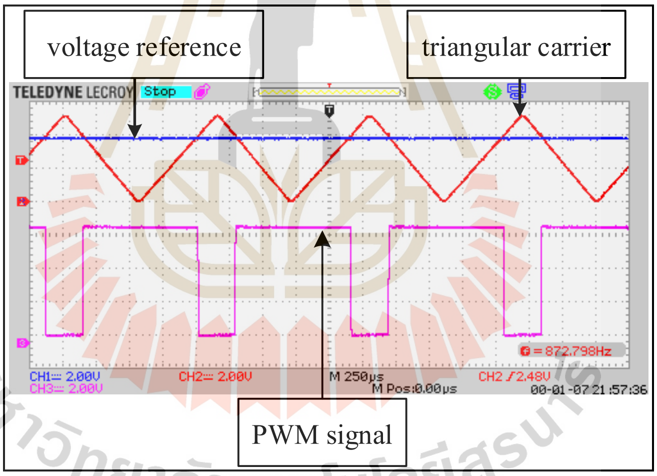
รูปที่ 5.8 วงจรสร้างสัญญาณ PWM และวงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่ใช้งานจริง



รูปที่ 5.9 ผลการทดสอบวงจรสร้างสัญญาณ PWM และวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ
กรณีที่ 1 สัญญาณ PWM มีค่าวัฏจักรหน้าที่ 25 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.10 ผลการทดสอบวงจรสร้างสัญญาณ PWM และวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ
กรณีที่ 2 สัญญาณ PWM มีค่าวัฏจักรหน้าที่ 50 เปอร์เซ็นต์

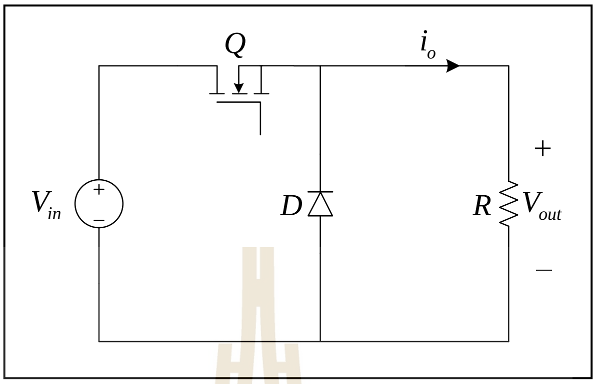


รูปที่ 5.11 ผลการทดสอบวงจรสร้างสัญญาณ PWM และวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ
กรณีที่ 3 สัญญาณ PWM มีค่าวัฏจักรหน้าที่ 75 เปอร์เซ็นต์

5.6 วงจรชอปเปอร์

วงจรชอปเปอร์ เป็นวงจรที่ใช้สำหรับการลดระดับแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตให้มีค่าต่ำกว่าหรือมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต โดยโครงสร้างของวงจรชอปเปอร์ประกอบด้วย มอสเฟต และไดโอด ดังรูปที่ 5.12 (การอธิบายการทำงานของวงจรชอปเปอร์ในหัวข้อนี้ จะอธิบาย

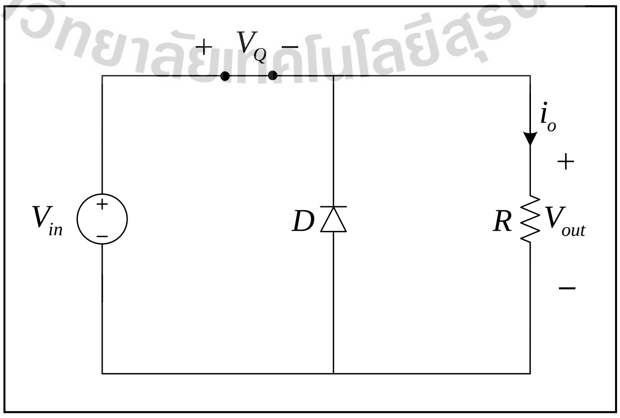
ในกรณีโหลดของวงจรเป็นตัวต้านทาน ทั้งนี้เพื่อง่ายต่อการทำความเข้าใจหลักการพื้นฐานของวงจรชอปเปอร์)



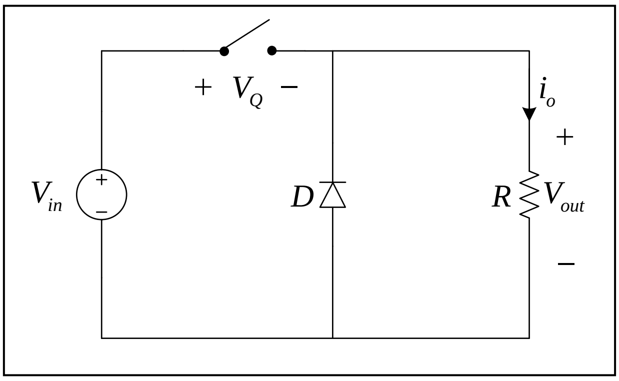
รูปที่ 5.12 วงจรชอปเปอร์

5.6.1 หลักการทำงานของวงจร

การทำงานของวงจรชอปเปอร์แบ่งออกเป็น 2 โหมด คือ โหมดที่ 1 เป็นโหมดที่มอสเฟตทำงาน และโหมดที่ 2 เป็นโหมดที่มอสเฟตหยุดทำงาน สามารถแสดงการทำงานในแต่ละโหมดได้ดังรูปที่ 5.13 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการทำงานในโหมดที่ 1 มอสเฟตจะทำงานเป็นเวลา t_1 ทำให้มีแรงดันตกคร่อมที่โหลด (V_{out}) ส่วนการทำงานของโหมดที่ 2 มอสเฟตจะหยุดทำงานเป็นเวลา t_2 ทำให้แรงดันตกคร่อมโหลดเป็นศูนย์ ดังรูปที่ (5.13)

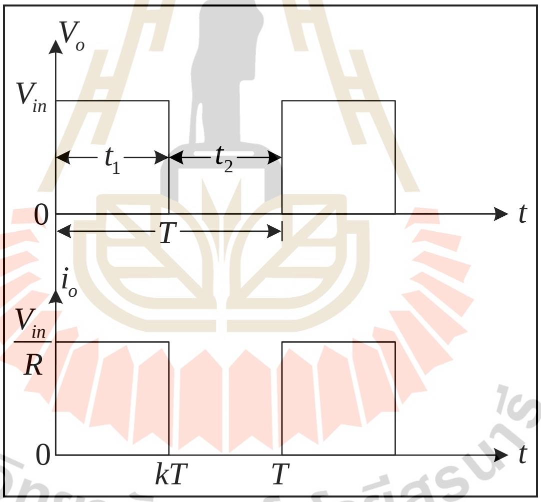


(ก) การทำงานในโหมดที่ 1



(ข) การทำงานในโหมดที่ 2

รูปที่ 5.13 โหมดการทำงานของวงจรชอปเปอร์



รูปที่ 5.14 รูปสัญญาณที่ใช้ในการอธิบายหลักการของวงจรชอปเปอร์

จากรูปที่ 5.14 สามารถคำนวณค่า t_1 และ t_2 ได้ดังสมการที่ (5.5) และ (5.6) ตามลำดับ

$$t_1 = kT \tag{5.5}$$

$$t_2 = (1-k)T \tag{5.6}$$

โดยที่ k คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle)

T คือ คาบการทำงานของมอสเฟต มีหน่วยเป็นวินาที (s)

การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านเอาต์พุตของวงจรชอปเปอร์ (V_{out}) (Rashid, 2004) สามารถคำนวณได้จากสมการ (5.7)

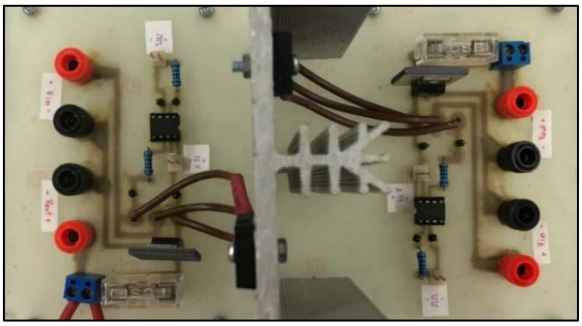
$$V_{out} = kV_{in} \tag{5.7}$$

โดยที่ V_{in} คือ แรงดันอินพุตของวงจรชอปเปอร์

5.6.2 การออกแบบวงจรชอปเปอร์

จากรูปที่ 5.12 จะเห็นได้ว่าวงจรชอปเปอร์ประกอบด้วย มอสเฟตและไดโอด โดยการออกแบบวงจรชอปเปอร์ต้องคำนึงถึงพิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ และในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้วงจรชอปเปอร์ทั้งหมด 2 วงจร คือ วงจรชอปเปอร์ฝั่งอาร์เมเจอร์และวงจรชอปเปอร์ฝั่งสนาม โดยพิกัดของมอเตอร์ที่อ่านได้จากแผ่นป้ายชื่อในตารางที่ 3.1 ในบทที่ 3 มีค่าพิกัดแรงดันของวงจรทั้งสองฝั่งของมอเตอร์มีค่าเท่ากัน คือ 220 V และค่าพิกัดกระแสมากที่สุดของมอเตอร์ คือ ค่ากระแสอาร์เมเจอร์ เท่ากับ 2.2 A ซึ่งในการออกแบบวงจรชอปเปอร์ทั้งสองฝั่งของมอเตอร์จะใช้ค่าพิกัดมากที่สุดของมอเตอร์ในการออกแบบ ซึ่งการออกแบบต้องคำนึงถึงค่าประกอบนิรภัย โดยจะเผื่อค่าประกอบนิรภัยไว้ที่ 25 เปอร์เซ็นต์ เพราะฉะนั้นอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรต้องมีค่าพิกัดแรงดันมากกว่า 275 V (220×1.25) และพิกัดกระแสมากกว่า 2.75 A (2.2×1.25) ด้วยเหตุนี้มอสเฟตที่เลือกใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะต้องมีค่าพิกัดแรงดันมากกว่า 275 V และค่าพิกัดกระแสมากกว่า 2.75 A ดังนั้นจึงเลือกใช้มอสเฟตเบอร์ STW12NK90Z ซึ่งมีค่าพิกัดแรงดันเท่ากับ 900 V และพิกัดกระแสเท่ากับ 11 A

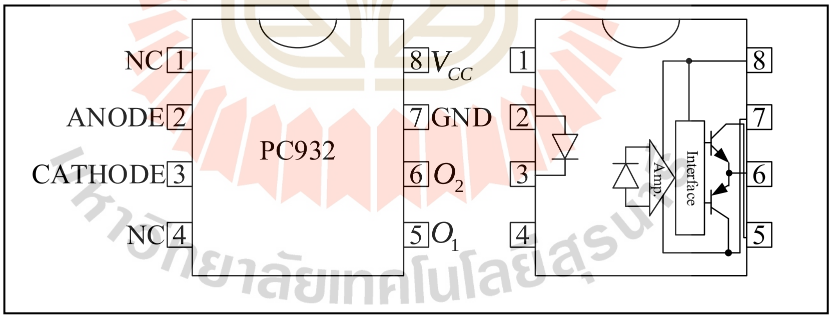
ไดโอดที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะต้องมีพิกัดแรงดันมากกว่าค่าแรงดันอินพุตของวงจรชอปเปอร์ ซึ่งมีค่าเท่า 311.13 V ($\sqrt{2}\times220$) เมื่อคำนึงถึงตัวประกอบนิรภัยไว้ที่ 25 เปอร์เซ็นต์ ค่าพิกัดแรงดันของไดโอดจะต้องมีค่ามากกว่า 388.91 V (311.13×1.25) ดังนั้นจึงเลือกใช้ไดโอดเบอร์ MUR1560 ซึ่งมีค่าพิกัดแรงดันเท่ากับ 600 V วงจรชอปเปอร์ที่ใช้จริงในงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ (5.15)



รูปที่ 5.15 วงจรชอปเปอร์ที่ใช้งานจริง

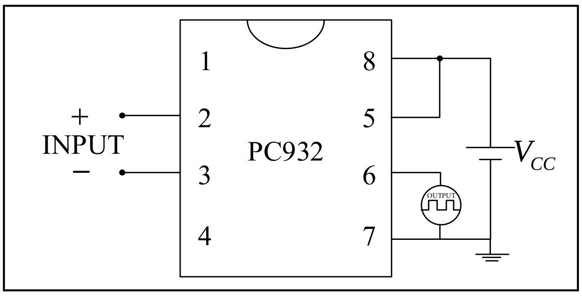
5.7 วงจรแยกโดดสัญญาณ

วงจรแยกโดดสัญญาณเป็นวงจรที่ใช้สำหรับแยกกราวด์ของสัญญาณใด ๆ เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับอุปกรณ์ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วงจรแยกโดดสัญญาณในการแยกกราวด์ระหว่างวงจรชอปเปอร์กับวงจรสร้างสัญญาณ PWM โดยใช้อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงหรือที่เรียกว่า ออปโตคัปเปลอร์ (optocoupler) ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ไอซีเบอร์ PC923 ในการสร้างวงจรแยกโดดสัญญาณ ซึ่งมีโครงสร้างของวงจรดังรูปที่ 5.16

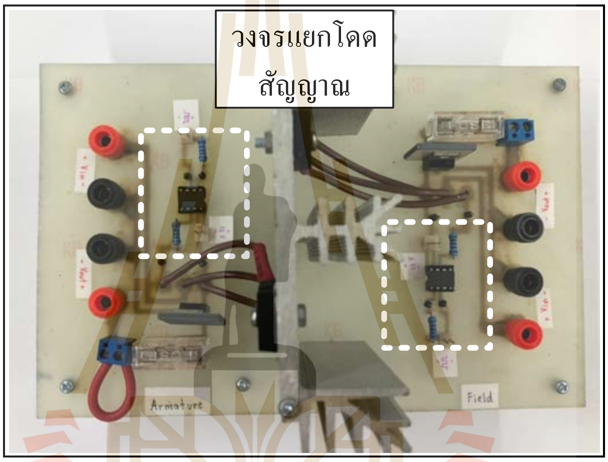


รูปที่ 5.16 โครงสร้างของไอซี PC923

การใช้ไอซีเบอร์ PC923 มาสร้างเป็นวงจรแยกโดดสัญญาณ สามารถแสดงการต่อวงจรเพื่อนำไปใช้งานจริงได้ดังรูปที่ 5.17 และวงจรแยกโดดสัญญาณที่ใช้งานจริงแสดงได้ดังรูปที่ 5.18

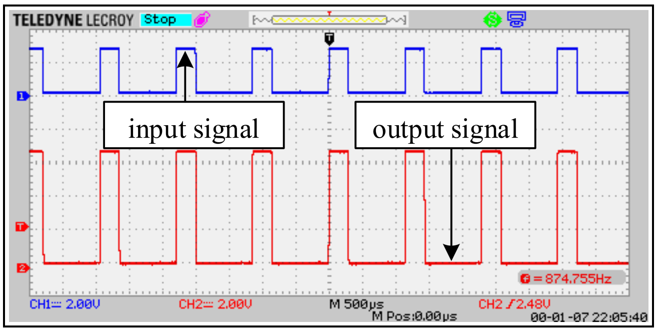


รูปที่ 5.17 การต่อวงจรไอซี PC923 เพื่อนำไปใช้งานจริง

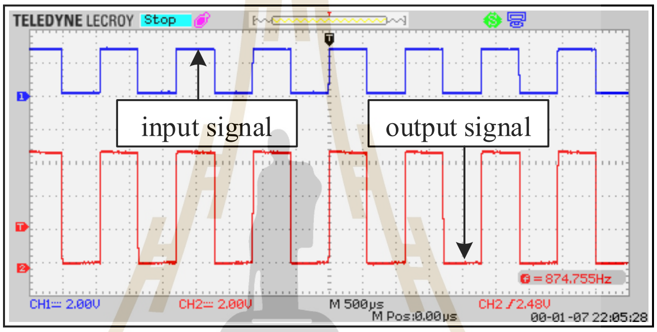


รูปที่ 5.18 วงจรแยกโดดสัญญาณที่ใช้งานจริง

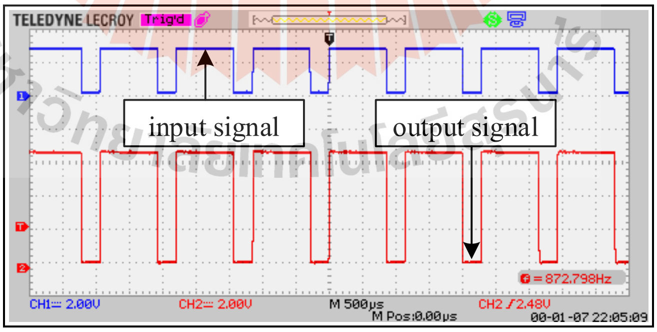
การทดสอบวงจรแยกโดดสัญญาณ ดำเนินการทดสอบโดยการจ่ายไฟเลี้ยงของวงจรเท่ากับ 15 V และจ่ายสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณ PWM และวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจร โดยทำการทดสอบ 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 สัญญาณอินพุต PWM มีค่าวัฏจักรหน้าที่ 25 เปอร์เซ็นต์ กรณีที่ 2 สัญญาณอินพุต PWM มีค่าวัฏจักรหน้าที่ 50 เปอร์เซ็นต์ และกรณีที่ 3 สัญญาณอินพุต PWM มีค่าวัฏจักรหน้าที่ 75 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.19 ถึง 5.21 ตามลำดับ



รูปที่ 5.19 ผลการทดสอบวงจรแยกโดดสัญญาณกรณีที่ 1 มีค่าวัฏจักรหน้าที่ 25 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.20 ผลการทดสอบวงจรแยกโดดสัญญาณกรณีที่ 2 มีค่าวัฏจักรหน้าที่ 50 เปอร์เซ็นต์



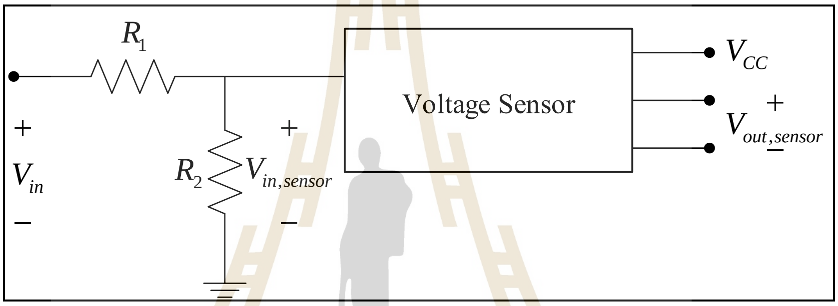
รูปที่ 5.21 ผลการทดสอบวงจรแยกโดดสัญญาณกรณีที่ 3 มีค่าวัฏจักรหน้าที่ 75 เปอร์เซ็นต์

5.8 เซนเซอร์

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้เซนเซอร์ในการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางฝั่งวงจรอาร์เมเจอร์และฝั่งวงจรสนาม เซนเซอร์วัดความเร็วรอบและชุดควบคุมโหลดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยเซนเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีดังนี้

5.8.1 เซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ Arduino Standard Voltage Sensor Module พิกัด $0-24$ V ทำหน้าที่วัดแรงดันอาร์เมเจอร์และแรงดันสนามของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ซึ่งโครงสร้างของวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 โครงสร้างของวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า

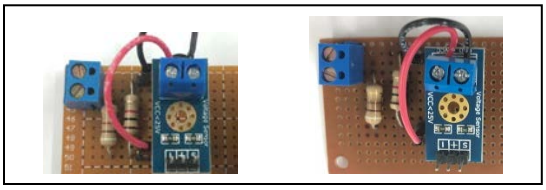
จากโครงสร้างของวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 5.22 เนื่องจากเซนเซอร์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าที่เลือกใช้มีพิกัด $0-24$ V แต่ค่าแรงดันพิกัดของมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 220 V ทั้งฝั่งอาร์เมเจอร์และฝั่งสนาม ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำวงจรแบ่งแรงดันมาใช้กับวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันซึ่งสามารถคำนวณหาค่าแรงดันของวงจรแบ่งแรงดันได้ดังสมการที่ (5.8)

$$V_{in,sensor} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} \qquad (5.8)$$

เมื่อ $V_{in,sensor}$ คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุตของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า (V)

V_{in} คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุตของวงจรแบ่งแรงดัน (V)

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ค่า R_1 เท่ากับ 9.1 kΩ และ R_2 เท่ากับ 1 kΩ และใช้เซนเซอร์วัดแรงดันจำนวน 2 โมดูล คือ เซนเซอร์วัดแรงดันอาร์เมเจอร์และเซนเซอร์วัดแรงดันสนามของมอเตอร์ สามารถแสดงวงจรที่ใช้งานจริงได้ดังรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.23 เซนเซอร์วัดแรงดันอาร์เมเจอร์และเซนเซอร์วัดแรงดันสนามที่ใช้งานจริง

การทดสอบวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะทำการทดสอบเหมือนกันทั้งเซนเซอร์วัดแรงดันอาร์เมเจอร์และเซนเซอร์วัดแรงดันสนาม โดยด้านอินพุตของฝั่งเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าจะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรับค่าได้ และทำการปรับค่าแรงดันต่าง ๆ จากนั้นวัดค่าแรงดันเอาต์พุตและอินพุตของวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า ซึ่งผลการทดสอบเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.1 และ 5.2

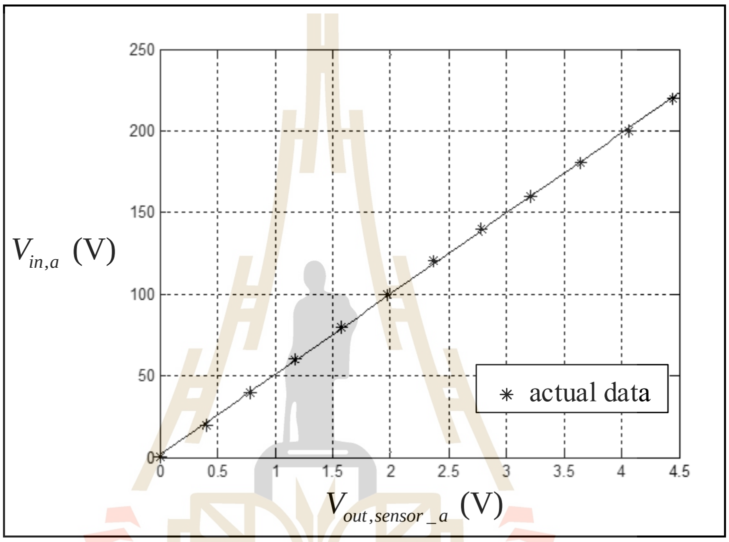
ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบเซนเซอร์วัดแรงดันอาร์เมเจอร์

$V_{in,a}$ (V)	$V_{out,sensor\_a}$ (V)
0.380	0.007
20.000	0.400
40.000	0.781
60.000	1.168
80.000	1.569
100.000	1.963
120.000	2.365
140.000	2.781
160.000	3.211
180.000	3.643
200.000	4.060
220.000	4.442

โดยที่ $V_{in,a}$ คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุตของวงจรแบ่งแรงดันฝั่งอาร์เมเจอร์ (V)

$V_{out,sensor\_a}$ คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดแรงดันอาร์เมเจอร์ (V)

จากตารางที่ 5.1 นำผลการทดสอบมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดแรงดันอาร์เมเจอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดแรงดันอาร์เมเจอร์

จากกราฟรูปที่ 5.24 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดแรงดันอาร์เมเจอร์ได้ดังสมการที่ (5.9)

$$V_{in,a} = 49V_{out,sensor\_a} + 1.7 \tag{5.9}$$

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบเซนเซอร์วัดแรงดันสนาม

$V_{in,f}$ (V)	$V_{out,sensor\_f}$ (V)
0.051	0.001
20.000	0.393
40.000	0.779

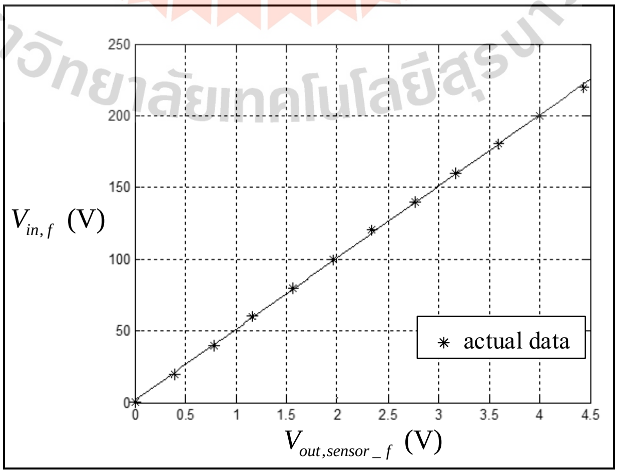
ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบเซนเซอร์วัดแรงดันสนาม (ต่อ)

$V_{in,f}$ (V)	$V_{out,sensor\_f}$ (V)
60.000	1.161
80.000	1.558
100.000	1.956
120.000	2.342
140.000	2.768
160.000	3.169
180.000	3.589
200.000	3.998
220.000	4.435

โดยที่ $V_{in,f}$ คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุตของวงจรแบ่งแรงดันฝั่งสนาม (V)

$V_{out,sensor\_f}$ คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดแรงดันสนาม (V)

จากตารางที่ 5.2 นำผลการทดสอบมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดแรงดันสนาม แสดงได้ดังรูปที่ 5.25



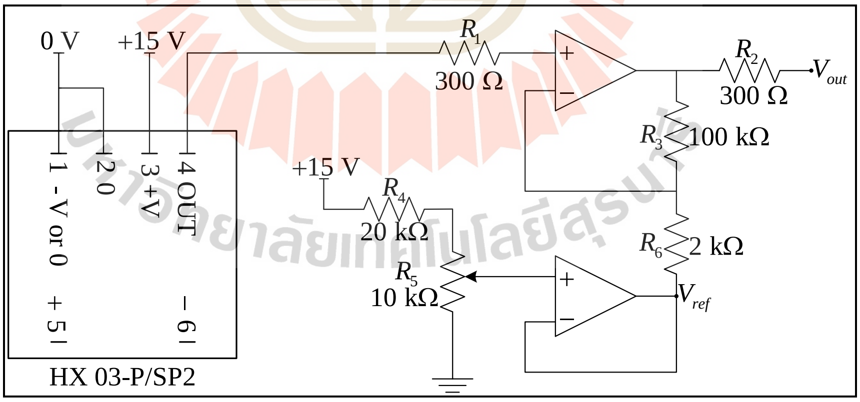
รูปที่ 5.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดแรงดันสนาม

จากกราฟรูปที่ 5.25 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดแรงดันสนามได้ดังสมการที่ (5.10)

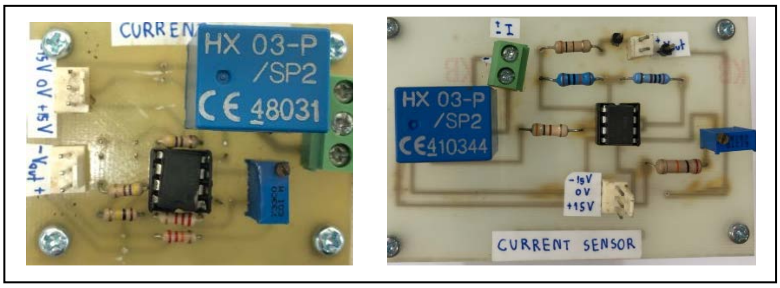
$$V_{in,f} = 50V_{out,sensor\_f} + 1.7 \tag{5.10}$$

5.8.2 เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ารุ่น HX 03-P/SP2 ซึ่งสามารถตรวจวัดกระแสได้สูงสุด 3 A ทำหน้าที่วัดกระแสอาร์เมเจอร์และกระแสสนามของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกระตุ้น เนื่องจากมอเตอร์มีพิกัดกระแสอาร์เมเจอร์ 2.2 A พิกัดกระแสสนาม 0.3 A แต่เซนเซอร์ดังกล่าวให้ผลการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าออกมาในรูปของสัญญาณแรงดันที่มีทั้งค่าบวกและค่าลบ จึงต้องอาศัยวงจรปรับแต่งสัญญาณเพื่อใช้ยกระดับของสัญญาณกระแสที่วัดได้จากเซนเซอร์ให้มีค่าบวกทั้งหมดและปรับขนาดของกระแสให้มีความเหมาะสมเพื่อส่งค่าไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยโครงสร้างของวงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.26 และเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ใช้งานจริงแสดงได้ดังรูปที่ 5.27 ซึ่งผลการทดสอบเซนเซอร์วัดกระแสอาร์เมเจอร์และกระแสสนามสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.3 และ ตารางที่ 5.4 ตามลำดับ



รูปที่ 5.26 โครงสร้างของวงจรเซนเซอร์วัดกระแสอาร์เมเจอร์และกระแสสนาม



รูปที่ 5.27 เซนเซอร์วัดกระแสอาร์เมเจอร์และเซนเซอร์วัดกระแสสนามที่ใช้งานจริง

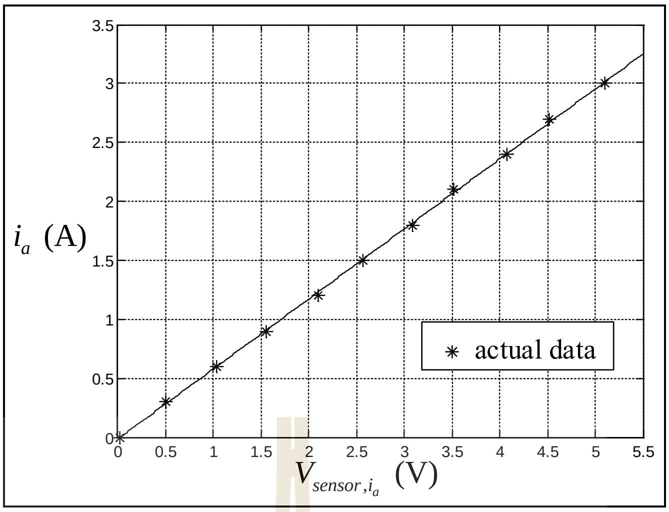
ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบเซนเซอร์วัดกระแสอาร์เมเจอร์

i_a (A)	V_{sensor,i_a} (V)
0.000	0.013
0.300	0.501
0.600	1.031
0.900	1.548
1.200	2.095
1.500	2.572
1.800	3.084
2.100	3.521
2.400	4.073
2.700	4.518
3.000	5.104

โดยที่ i_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์ (A)

V_{sensor,i_a} คือ แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดกระแสอาร์เมเจอร์ (V)

จากตารางที่ 5.3 นำผลการทดสอบมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์และแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์วัดกระแสอาร์เมเจอร์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.28



รูปที่ 5.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์และแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์วัดกระแสอาร์เมเจอร์

จากกราฟรูปที่ 5.28 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์และแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์วัดกระแสอาร์เมเจอร์ได้ดังสมการที่ (5.11)

$$i_a = 0.593V_{sensor,i_a} - 0.0139 \tag{5.11}$$

จากผลการการทดสอบเซนเซอร์วัดกระแสอาร์เมเจอร์ พบว่า สมการเส้นตรงระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์และแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์วัดกระแสอาร์เมเจอร์ เป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์ในหน่วยแอมแปร์ และกระแสอาร์เมเจอร์ที่วัดได้จากเซนเซอร์ในหน่วยโวลต์ ดังนั้น ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ จะป้อนให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับประมวลผลต่อไป

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบเซนเซอร์วัดกระแสสนาม

i_f (A)	V_{sensor,i_f} (V)
0.000	0.011
0.030	0.669
0.060	1.147
0.090	1.168

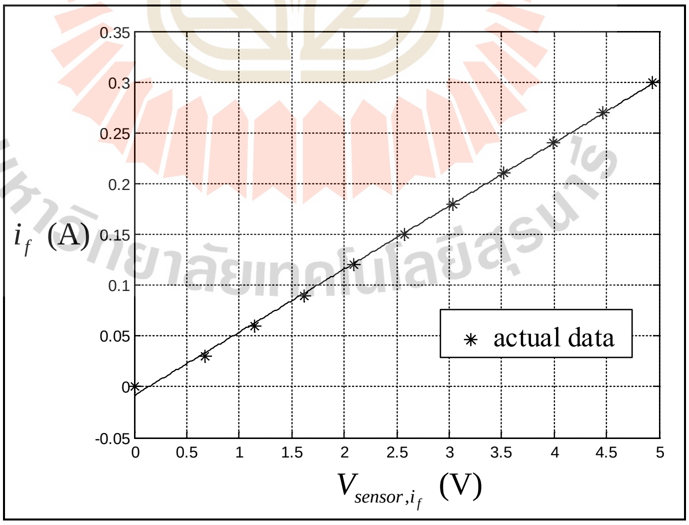
ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบเซนเซอร์วัดกระแสสนาม (ต่อ)

i_f (A)	V_{sensor,i_f} (V)
0.120	2.091
0.150	2.570
0.180	3.041
0.210	3.522
0.240	3.989
0.270	4.463
0.300	4.931

โดยที่ i_f คือ กระแสสนาม (A)

V_{sensor,i_f} คือ แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดกระแสสนาม (V)

จากตารางที่ 5.4 นำผลการทดสอบมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสนามและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์วัดกระแสสนาม สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.29



รูปที่ 5.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสนามและแรงดันไฟฟ้า
ที่ได้จากเซนเซอร์วัดกระแสสนาม

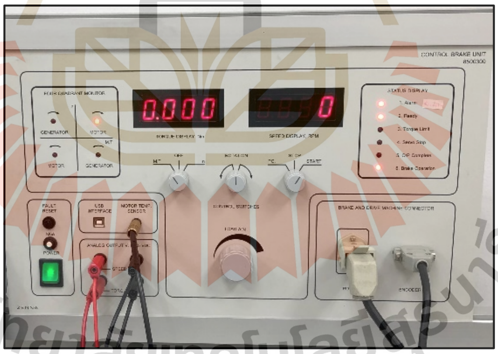
จากกราฟรูปที่ 5.29 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสนามและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์วัดกระแสสนาม ได้ดังสมการที่ (5.12)

$$i_f = 0.0621V_{sensor,i_f} - 0.00146 \tag{5.12}$$

จากผลการการทดสอบเซนเซอร์วัดกระแสสนาม พบว่า สมการเส้นตรงระหว่างกระแสสนามและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์วัดกระแสสนามเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสนามในหน่วยแอมแปร์ และกระแสสนามที่วัดได้จากเซนเซอร์ในหน่วยโวลต์ ดังนั้น ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ จะถูกป้อนให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

5.8.3 เซนเซอร์วัดความเร็วรอบและชุดควบคุมโหลด

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ใช้เซนเซอร์วัดความเร็วรอบและชุดควบคุมโหลดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นในห้องปฏิบัติการ คือ CONTROL BRAKE UNIT 8500300 ของ บริษัท ZENNA แสดงได้ดังรูปที่ 5.30 ซึ่งผลการทดสอบเซนเซอร์วัดความเร็วรอบและชุดควบคุมโหลดสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.5 และตารางที่ 5.6 ตามลำดับ



รูปที่ 5.30 เซนเซอร์วัดความเร็วรอบและชุดควบคุมโหลด

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบเซนเซอร์วัดความเร็วรอบ

N (rpm)	$V_{sensor,N}$ (V)
0	0.033
204	0.293
401	0.577

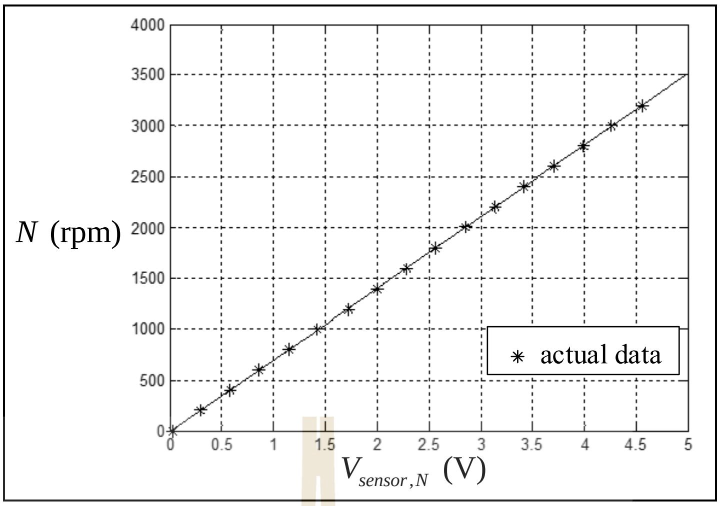
ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบเซนเซอร์วัดความเร็วรอบ (ต่อ)

N (rpm)	$V_{sensor,N}$ (V)
600	0.861
804	1.149
1000	1.428
1204	1.717
1400	2.000
1600	2.283
1801	2.564
2002	2.854
2205	3.140
2400	3.421
2601	3.702
2804	3.988
2996	4.258
3203	4.555

โดยที่ N คือ ความเร็วรอบ (rpm)

$V_{sensor,N}$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร็วรอบ (V)

จากตารางที่ 5.5 นำผลการทดสอบมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์วัดความเร็วรอบ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.31



รูปที่ 5.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงดันไฟฟ้า
ที่ได้จากเซนเซอร์วัดความเร็วรอบ

จากกราฟรูปที่ 5.31 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์วัดความเร็วรอบ ได้ดังสมการที่ (5.13)

$$N = 710V_{sensor,N} - 9.4 \tag{5.13}$$

จากผลการการทดสอบเซนเซอร์วัดความเร็วรอบ พบว่า สมการเส้นตรงระหว่างความเร็วรอบและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์วัดความเร็วรอบ เป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในหน่วยรอบต่อนาที และความเร็วรอบที่วัดได้จากเซนเซอร์ในหน่วยโวลต์ ดังนั้น ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ จะถูกป้อนให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลต่อไป

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบชุดควบคุมโหลด

T_L (N·m)	V_{sensor,T_L} (V)
0.013	0.013
0.102	0.105
0.202	0.209
0.301	0.315

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบชุดควบคุมโหลด (ต่อ)

T_L (N·m)	V_{sensor,T_L} (V)
0.405	0.424
0.502	0.525
0.606	0.6334
0.701	0.739
0.804	0.842
0.905	0.949
1.000	1.041
1.105	1.158
1.198	1.256

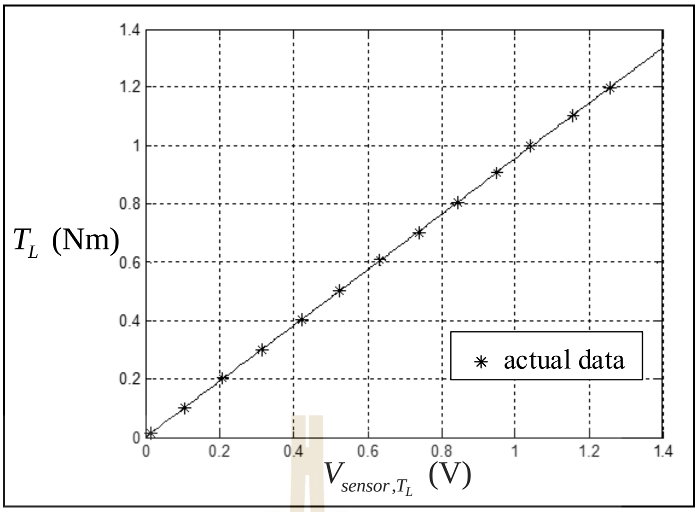
โดยที่ T_L คือ แรงบิดโหลด (N·m)

V_{sensor,T_L} คือ แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดแรงบิด (V)

จากตารางที่ 5.6 นำผลการทดสอบมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดโหลดและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์วัดแรงบิดโหลด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.32 และจากกราฟรูปที่ 5.32 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดโหลดและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์วัดแรงบิดโหลด ได้ดังสมการที่ (5.14)

$$T_L = 0.9538 V_{sensor,T_L} + 0.0011 \tag{5.14}$$

จากผลการการทดสอบเซนเซอร์วัดแรงบิดโหลด พบว่า สมการเส้นตรงระหว่างแรงบิดโหลดและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์วัดแรงบิดโหลด เป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดโหลดในหน่วยนิวตันเมตร และแรงบิดโหลดที่วัดได้จากเซนเซอร์ในหน่วยโวลต์ ดังนั้น ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ จะป้อนให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับประมวลผลต่อไป



รูปที่ 5.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดโหลดและแรงดันไฟฟ้า ที่ได้จากเซนเซอร์วัดแรงบิดโหลด

5.9 การออกแบบตัวควบคุมพีไอ

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ตัวควบคุมพีไอในการควบคุมความเร็วรอบและกระแสสนามของมอเตอร์ เนื่องจาก ตัวควบคุมดังกล่าวให้ผลตอบสนองที่ดี มีขั้นตอนการออกแบบที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และเพียงพอสำหรับการควบคุมความเร็วรอบและกระแสสนามของมอเตอร์ การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นมีดังต่อไปนี้

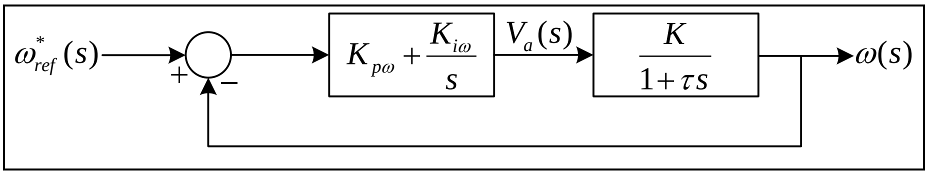
5.9.1 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความเร็วรอบ

พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์เทียบกับแรงดันไฟฟ้าทางฝั่งอาร์เมเจอร์ให้เป็นระบบอันดับหนึ่ง (first-order system) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5.15) และฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมพีไอแสดงได้ดังสมการที่ (5.16)

$$G_p(s) = \frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K}{1+\tau s} \tag{5.15}$$

$$G_c(s) = K_{p\omega} + \frac{K_{i\omega}}{s} \tag{5.16}$$

จากสมการที่ (5.15) และ (5.16) สามารถพิจารณาเป็นแผนภาพบล็อกไดอะแกรมแบบวงปิดซึ่งใช้สำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นได้ดังรูปที่ 5.33



รูปที่ 5.33 บล็อกไดอะแกรมควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยตัวควบคุมพีไอ

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ (5.33) สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ $TF(s)$ ได้ดังสมการที่ (5.17)

$$TF(s)=\frac{\omega(s)}{\omega_{ref}^{*}(s)}=\frac{KK_{p\omega}s+KK_{i\omega}}{s^2+\frac{KK_{p\omega}+1}{\tau}+\frac{KK_{i\omega}}{\tau}} \tag{5.17}$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ($K_{p\omega}$, $K_{i\omega}$) ด้วยวิธีแบบดั้งเดิมใช้การเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะ (characteristic polynomial) ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด $TF(s)$ กับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐาน $T(s)$ ดังสมการที่ (5.18) ผลการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะได้ค่า $K_{p\omega}$ และ $K_{i\omega}$ สำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ดังสมการที่ (5.19) และ (5.20) ตามลำดับ

$$T(s)=\frac{\omega_n^2}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2} \tag{5.18}$$

$$K_{p\omega}=\frac{2\zeta\omega_n\tau-1}{K} \tag{5.19}$$

$$K_{i\omega}=\frac{\omega_n^2\tau}{K} \tag{5.20}$$

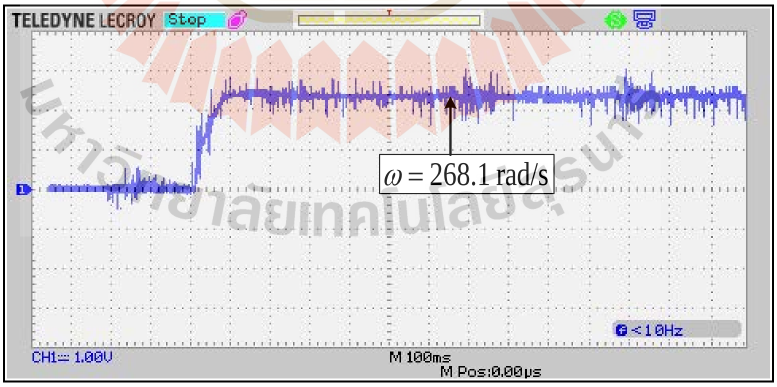
การคำนวณหาค่าอัตราการหน่วง (damping ratio : ζ) และความถี่ธรรมชาติ (natural frequency : ω_n) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.21) และ (5.22) ตามลำดับ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ต้องการให้ระบบวงปิดมีการตอบสนองต่ออินพุตขั้นบันไดแบบหนึ่งหน่วย คือ เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (P.O.) เท่ากับ 5% และมีช่วงเวลาเข้าที่ (T_s) เท่ากับ 0.1 s

$$P.O. = 100e^{-\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta}} \tag{5.21}$$

$$T_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} \tag{5.22}$$

เมื่อแทนค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินและค่าช่วงเวลาเข้าที่จะได้ค่า ζ เท่ากับ 0.6901 และ ω_n เท่ากับ 57.9626 rad/s

การหาค่าอัตราขยาย (gain : K) และค่าคงตัวทางเวลา (time-constant : τ) สามารถหาได้จากผลการตอบสนองที่กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงอินพุตแบบขั้นบันไดทางฝั่งอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์จาก 0 V เป็น 220 V สามารถแสดงผลการตอบสนองความเร็วรอบของมอเตอร์ ได้ดังรูปที่ 5.34

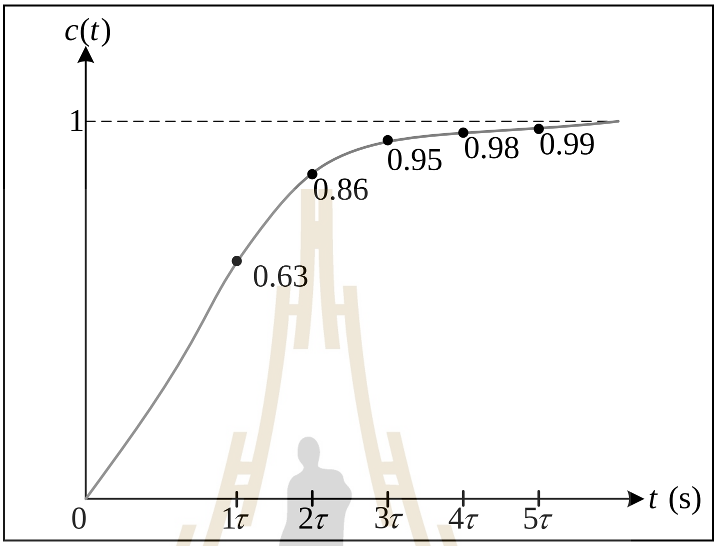


รูปที่ 5.34 ผลการตอบสนองความเร็วรอบของมอเตอร์

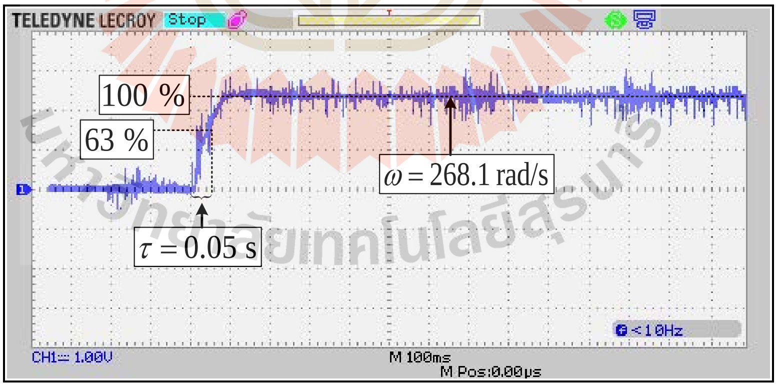
จากรูปที่ 5.35 สามารถพิจารณาค่าคงตัวทางเวลา τ ได้จากสมการการตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดแบบหนึ่งหน่วยของระบบอันดับหนึ่ง ดังสมการที่ (5.23)

$$c(t)=1-e^{-t/\tau} \tag{5.23}$$

โดยที่ $t=\tau$ เมื่อ $c(t)=1-e^{-t/\tau}=0.63$



รูปที่ 5.35 การตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดแบบหนึ่งหน่วยของระบบอันดับหนึ่ง



รูปที่ 5.36 ผลการตอบสนองความเร็วรอบของมอเตอร์

นำจากผลการตอบสนองความเร็วรอบของมอเตอร์ (รูปที่ 5.34) มาพิจารณาด้วยผลการตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดแบบหนึ่งหน่วยของระบบอันดับหนึ่ง (รูปที่ 5.35) จะได้กราฟ

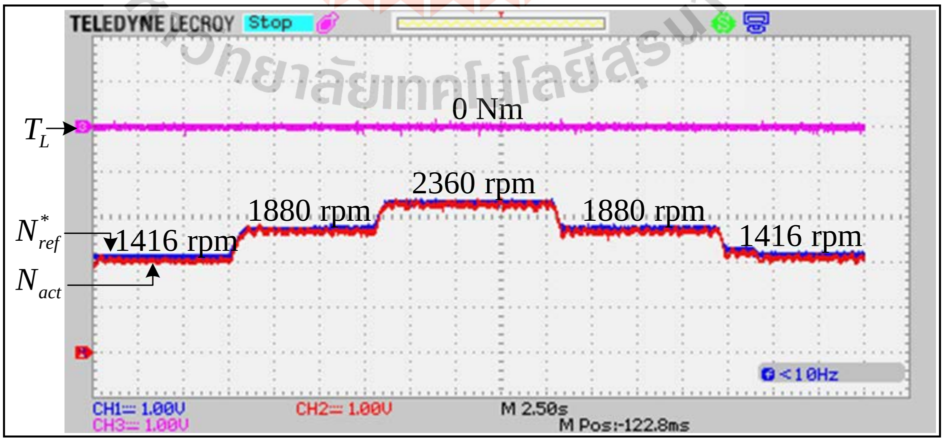
ดังรูปที่ 5.36 สามารถพิจารณาค่าคงตัวทางเวลา τ ได้เท่ากับ 0.05 s และพิจารณาค่าอัตราขยาย K ได้ดังสมการที่ (5.24)

$$K = \frac{input}{output} = \frac{\omega \text{ (rad/s)}}{V_a (\text{V})} \tag{5.24}$$

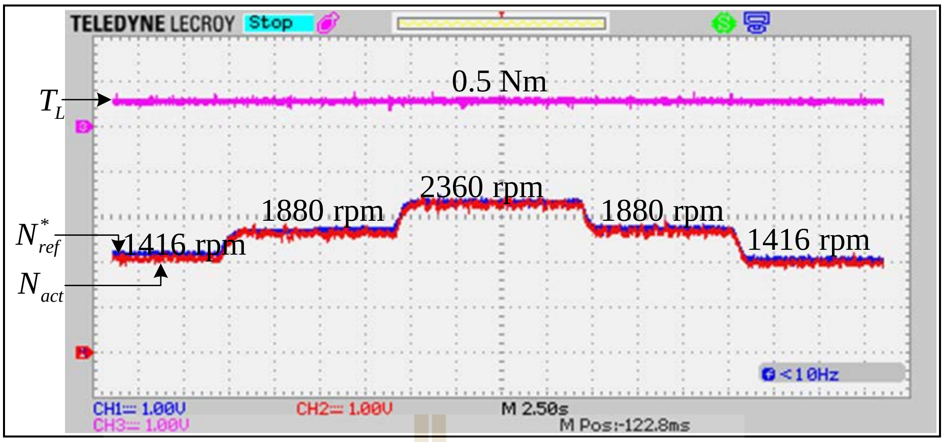
โดยที่ $V_a = 220$ V และ $\omega = 268.1$ rad/s

จะได้ $$K = \frac{268.1}{220} = 1.22$$

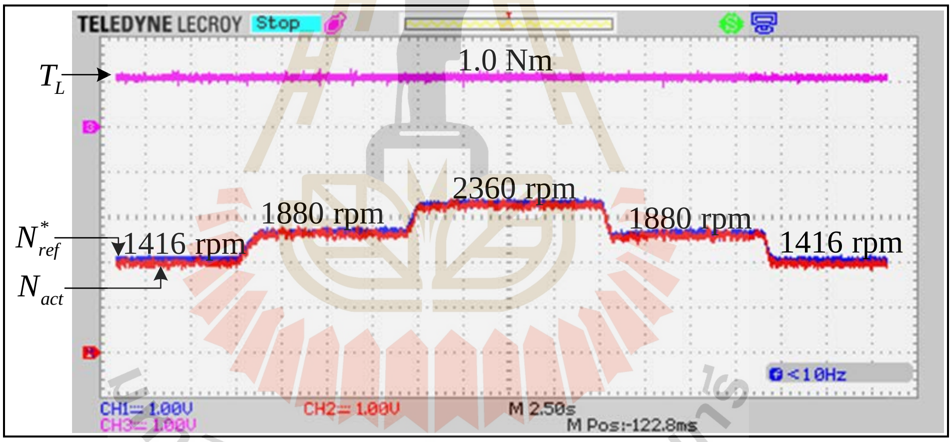
จากนั้นแทนค่า ζ, ω_n, τ และ K ลงในสมการที่ (5.19) และ (5.20) ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น คือ $K_{p\omega}$ เท่ากับ 2.46 และ $K_{i\omega}$ เท่ากับ 137.68 และสามารถแสดงผลการทดสอบตัวควบคุมพีไอ ได้ดังรูปที่ 5.37 ถึง 5.39 โดยทำการทดสอบ 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 แรงบิดโหลด เท่ากับ 0 N·m กรณีที่ 2 แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.5 N·m และกรณีที่ 3 แรงบิดโหลด เท่ากับ 1.0 N·m ซึ่งการทดสอบทั้ง 3 กรณี จะทำการปรับความเร็วรอบอ้างอิงให้มีค่า 1416 rpm (60 % ของความเร็วรอบพิกัด), 1880 rpm (80 % ของความเร็วรอบพิกัด) และ 2360 rpm (100 % ของความเร็วรอบพิกัด) ในการทดสอบจะอ้างอิงหน่วยของความเร็วรอบเป็น rpm



รูปที่ 5.37 ผลการทดสอบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ กรณีที่ 1 แรงบิดโหลด เท่ากับ 0 N·m ที่ความเร็วรอบ 1416 1880 และ 2360 rpm



รูปที่ 5.38 ผลการทดสอบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ กรณีที่ 2 แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.5 N·m ที่ความเร็วรอบ 1416 1880 และ 2360 rpm



รูปที่ 5.39 ผลการทดสอบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ กรณีที่ 3 แรงบิดโหลด เท่ากับ 1.0 N·m ที่ความเร็วรอบ 1416 1880 และ 2360 rpm

จากผลการทดสอบการควบคุมความเร็วรอบในรูปที่ 5.37 ถึง 5.39 แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมความเร็วรอบจริง (N_{act}) ให้มีลักษณะคล้อยตามความเร็วรอบอ้างอิง (N^*_{ref}) ทุกสภาวะที่แรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ด้วยเหตุนี้ ตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบจึงมีสมรรถนะที่ดีสำหรับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

5.9.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสสนาม

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสสนามจะพิจารณาจากสมการความสัมพันธ์ของแรงดันทางด้านวงจรฝั่งสนาม สมการที่ (5.25) ซึ่งเป็นสมการเดียวกับสมการที่ (3.3) ในบทที่ 3 และเขียนให้อยู่ในรูปของโดเมนเอสได้ดังสมการที่ (5.26)

$$v_f = i_f R_f + L_f \frac{di_f}{dt} \tag{5.25}$$

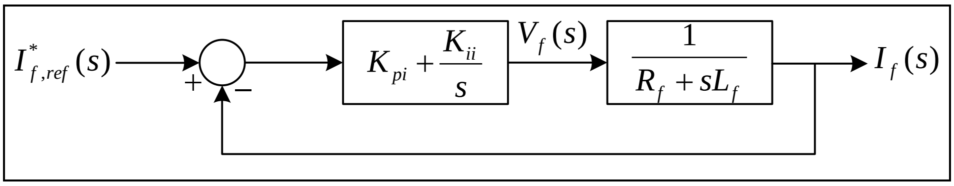
$$V_f(s) = R_f I_f(s) + sL_f I_f(s) \tag{5.26}$$

ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมกระแสสนามของมอเตอร์ แสดงได้ดังสมการที่ (5.27) และฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมพีไอแสดงได้ดังสมการที่ (5.28)

$$G_p(s) = \frac{I_f(s)}{V_f(s)} = \frac{1}{R_f + sL_f} \tag{5.27}$$

$$G_c(s) = K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s} \tag{5.28}$$

จากสมการที่ (5.27) และ (5.28) สามารถพิจารณาเป็นแผนภาพบล็อกไดอะแกรมแบบวงปิดซึ่งใช้สำหรับควบคุมกระแสสนามของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นได้ดังรูปที่ 5.40



รูปที่ 5.40 บล็อกไดอะแกรมควบคุมกระแสสนามของมอเตอร์ด้วยตัวควบคุมพีไอ

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ (5.40) สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของการกระแสสนามของมอเตอร์ $TF(s)$ ได้ดังสมการที่ (5.29)

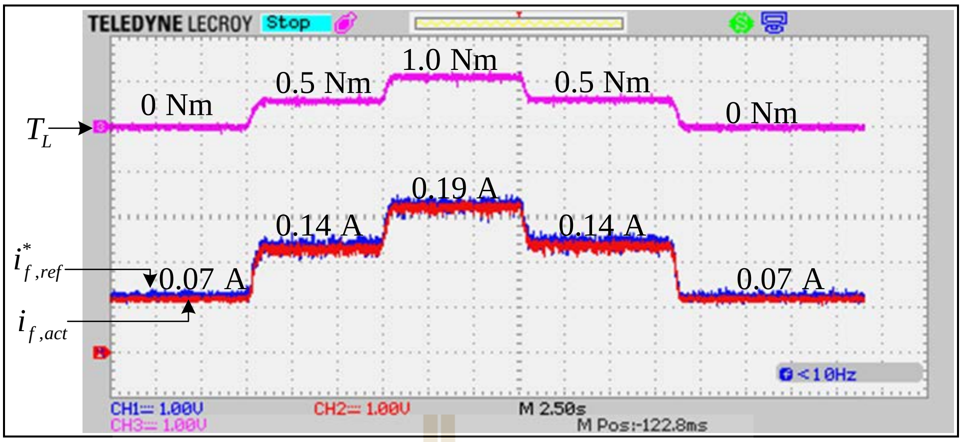
$$TF(s)=\frac{I_f(s)}{I^*_{f,ref}(s)}=\frac{K_{pi}+K_{ii}}{s^2+(\frac{K_{pi}+R_f}{L_f})s+\frac{K_{ii}}{L_f}} \quad (5.29)$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสสนามของมอเตอร์ (K_{pi}, K_{ii}) ด้วยวิธีแบบดั้งเดิมใช้การเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด $TF(s)$ กับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐาน $T(s)$ ตามสมการที่ (5.18) ผลการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะได้ค่า K_{pi} และ K_{ii} สำหรับควบคุมกระแสสนามของมอเตอร์ดังสมการที่ (5.30) และ (5.31) ตามลำดับ

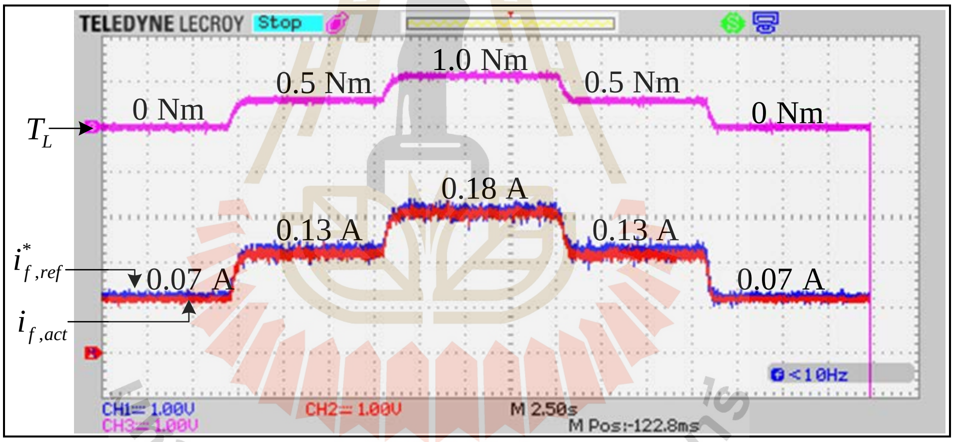
$$K_{pi}=2\zeta\omega_n L_f-R_f \quad (5.30)$$

$$K_{ii}=\omega_n^2 L_f \quad (5.31)$$

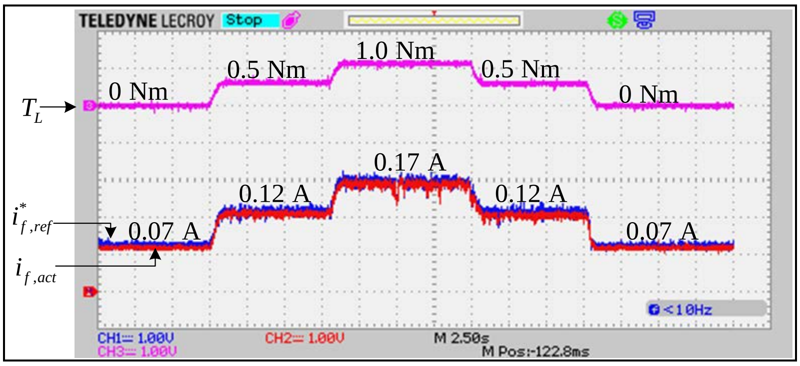
การออกแบบตัวควบคุมพีไอใช้ค่าอัตราการหน่วง และความถี่ธรรมชาติ ค่าเดียวกันกับการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ คือ ζ เท่ากับ 0.6901 และ ω_n เท่ากับ 57.9626 rad/s และค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่นำเสนอไว้ในบทที่ 3 ตารางที่ 3.2 ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสสนามของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น คือ K_{pi} เท่ากับ 1.14 และ K_{ii} เท่ากับ 31268.94 และสามารถแสดงผลการทดสอบตัวควบคุมพีไอ ได้ดังรูปที่ 5.41 ถึง 5.43 โดยทำการทดสอบ 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 ความเร็วรอบ เท่ากับ 1416 rpm กรณีที่ 2 ความเร็วรอบ เท่ากับ 1880 rpm และกรณีที่ 3 ความเร็วรอบ เท่ากับ 2360 rpm ซึ่งการทดสอบทั้ง 3 กรณี จะทำการปรับค่ากระแสสนามอ้างอิงโดยอาศัยการปรับแรงบิดโหลดที่ค่า 0 N·m 0.5 N·m และ 1.0 N·m



รูปที่ 5.41 ผลการทดสอบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสสนามของมอเตอร์ กรณีที่ 1 ความเร็วรอบ เท่ากับ 1416 rpm ที่แรงบิดโหลด เท่ากับ 0 0.5 และ 1.0 N·m



รูปที่ 5.42 ผลการทดสอบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสสนามของมอเตอร์ กรณีที่ 2 ความเร็วรอบ เท่ากับ 1880 rpm ที่แรงบิดโหลด เท่ากับ 0 0.5 และ 1.0 N·m



รูปที่ 5.43 ผลการทดสอบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสสนามของมอเตอร์ กรณีที่ 3 ความเร็วรอบ เท่ากับ 2360 rpm ที่แรงบิดโหลด เท่ากับ 0 0.5 และ 1.0 N·m

สมรรถนะการควบคุมกระแสสนามของมอเตอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 5.41 ถึง 5.43 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีไอ สามารถควบคุมกระแสสนามจริง ($i_{f,act}$) ให้มีลักษณะคล้อยตามกระแสสนามอ้างอิง ($i^*_{f,ref}$) ทุกสภาวะที่โหลดและความเร็วรอบมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น ตัวควบคุมพีไอที่นำเสนอจึงมีสมรรถนะที่ดีสำหรับการควบคุมกระแสสนามของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

5.10 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอโครงสร้างฮาร์ดแวร์ของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นสำหรับการประหยัดพลังงาน ซึ่งประกอบไปด้วย บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET - EASY MEGA 1280 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะลอก วงจรสร้างสัญญาณ PWM วงจรชอปเปอร์ วงจรแยกโดดสัญญาณ เซนเซอร์ในการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของฝั่งวงจรอาร์เมเจอร์และฝั่งวงจรสนาม เซนเซอร์วัดความเร็วรอบและชุดควบคุมโหลดของมอเตอร์ ซึ่งได้มีการอธิบายหลักการทำงาน วิธีการออกแบบอุปกรณ์ที่นำมาใช้ อีกทั้งยังมีการทดสอบการทำงานของวงจรต่าง ๆ ก่อนนำไปใช้งานจริง นอกจากนี้ มีการนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ใช้สำหรับควบคุมความเร็วรอบและกระแสสนามของมอเตอร์ พร้อมทั้งทำการทดสอบสมรรถนะการควบคุมของตัวควบคุมดังกล่าว สำหรับบทถัดไปเป็นการนำเสนอการประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด ซึ่งวิธีดังกล่าวให้ค่ากระแสสนามสำหรับการประหยัดพลังงาน และส่งค่าดังกล่าวเพื่อเป็นค่ากระแสสนามอ้างอิงให้กับตัวควบคุมพีไอ สำหรับใช้ในการควบคุมมอเตอร์เพื่อประหยัดพลังงานต่อไป

บทที่ 6
การประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุด

6.1 กล่าวนำ

จากผลการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นในบทที่ 2 พบว่า ตั้งแต่อดีตมีผู้วิจัยเกี่ยวกับการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกันอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน โดยส่วนใหญ่จะใช้วิธีการควบคุมค่ากระแสสนามเพื่อให้ได้กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ด้วยวิธีการต่าง ๆ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization Method : OM) เพื่อหาค่ากระแสสนามที่มีค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน เนื่องจากวิธีหาค่าเหมาะที่สุดมีการนำหลักการทางคณิตศาสตร์เข้ามาใช้ในการหาค่ากระแสสนามที่ทำให้เกิดค่ากำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด เมื่อกำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยจะส่งผลต่อการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ทำให้การใช้พลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์มีค่าน้อยลง ส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยเนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วย วิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน การทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน ผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานเพื่อเปรียบเทียบกับการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม และนำเสนอกราฟพื้นที่ของการประหยัดพลังงาน (Region of energy saving) เพื่อยืนยันผลของการประหยัดพลังงานด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุด

6.2 วิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน

วิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน เป็นวิธีที่อาศัยการหาอนุพันธ์ของสมการกำลังงานสูญเสียเทียบกับกระแสสนามเท่ากับศูนย์ โดยใช้สมการกำลังงานสูญเสียดังแสดงในสมการที่ (6.1) ซึ่งเป็นสมการเดียวกันกับสมการที่ (3.29) ในบทที่ 3 สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการประกอบด้วย ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดในบทที่ 3 คือ R_a เท่ากับ $8.8\,\Omega$ R_f เท่ากับ $654\,\Omega$ และค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวในบทที่ 4 คือ

K_h เท่ากับ 0.6184 $\frac{\mathrm{W \cdot s}}{\mathrm{rad \cdot T \cdot m^3}}$ K_e เท่ากับ 0.0167 $\frac{\mathrm{W \cdot s^2}}{\mathrm{T \cdot rad^2 \cdot m^5}}$ และ K_{st} เท่ากับ 1.1747×10^{-10} $\frac{\mathrm{W \cdot s^2}}{\mathrm{rad \cdot A^2}}$

$$P_{loss} = i_a^2 R_a + i_f^2 R_f + 2i_a + K_h \omega i_f^2 + K_e \omega^2 i_f^2 + \frac{60^2}{4\pi^2} i_a^2 \omega^2 K_{st} \tag{6.1}$$

จากการศึกษาของ Kusko and Galler (1983) ได้กำหนดว่ากระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6.2) ดังนี้

$$i_a = \frac{T}{K_e' K_f i_f} \tag{6.2}$$

โดยที่ $K_t = K_e' K_f$

แทนค่าสมการที่ (6.2) ลงในสมการที่ (6.1) และทำการปรับรูปสมการใหม่ จะได้ดังสมการที่ (6.3)

$$P_{loss} = \left(R_a + K_{st} \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{T}{K_e' K_f i_f} \right)^2 + \frac{2T}{K_e' K_f i_f} + (R_f + K_h \omega + K_e \omega^2) i_f^2 \tag{6.3}$$

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ คือ ต้องการคำนวณค่ากระแสสนามที่ทำให้กำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นจึงดำเนินการหาอนุพันธ์ของกำลังงานสูญเสีย สมการที่ (6.3) เทียบกับกระแสสนามเท่ากับศูนย์ ดังสมการที่ (6.4)

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

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial i_f} = -2 \left(R_a + K_{st} \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{T}{K_e' K_f} \right) \cdot \frac{1}{i_f^3} - \frac{2T}{K_e' K_f i_f^2} + 2(R_f + K_h \omega + K_e \omega^2) i_f = 0$$

(6.4)

จัดรูปสมการที่ (6.4) ได้ดังสมการที่ (6.5)

$$(R_f + K_h\omega + K_e\omega^2)i_f^4 - \frac{T}{K_e'K_f}i_f - \left(R_a + K_{st}\left(\frac{60\omega}{2\pi}\right)^2\right)\cdot\left(\frac{T}{K_e'K_f}\right)^2 = 0 \qquad (6.5)$$

ทำการกำหนดตัวแปรใหม่ดังนี้

$$A = R_f + K_h\omega + K_e\omega^2$$

$$D = -\frac{T}{K_e'K_f}$$

$$E = -\left(R_a + K_{st}\left(\frac{60\omega}{2\pi}\right)^2\right)\cdot\left(\frac{T}{K_e'K_f}\right)^2$$

ดังนั้นสมการที่ (6.5) สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (6.6)

$$Ai_f^4 + Di_f + E = 0 \qquad (6.6)$$

จากสมการที่ (6.6) เป็นสมการกำลังสี่ สามารถหาผลเฉลยของสมการด้วยวิธีการของ Lodovico Ferrari (Jean and Tignol, 2001) ได้ดังนี้

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

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

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

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

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่า y จากสมการที่ (6.7)

$$y = \begin{cases} U - \frac{P}{3U}, & \text{if } U \neq 0 \\ U - \sqrt[3]{Q}, & \text{if } U = 0 \end{cases} \qquad (6.7)$$

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

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณค่า i_f ที่ทำให้ค่ากำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด ดังสมการที่ (6.8)

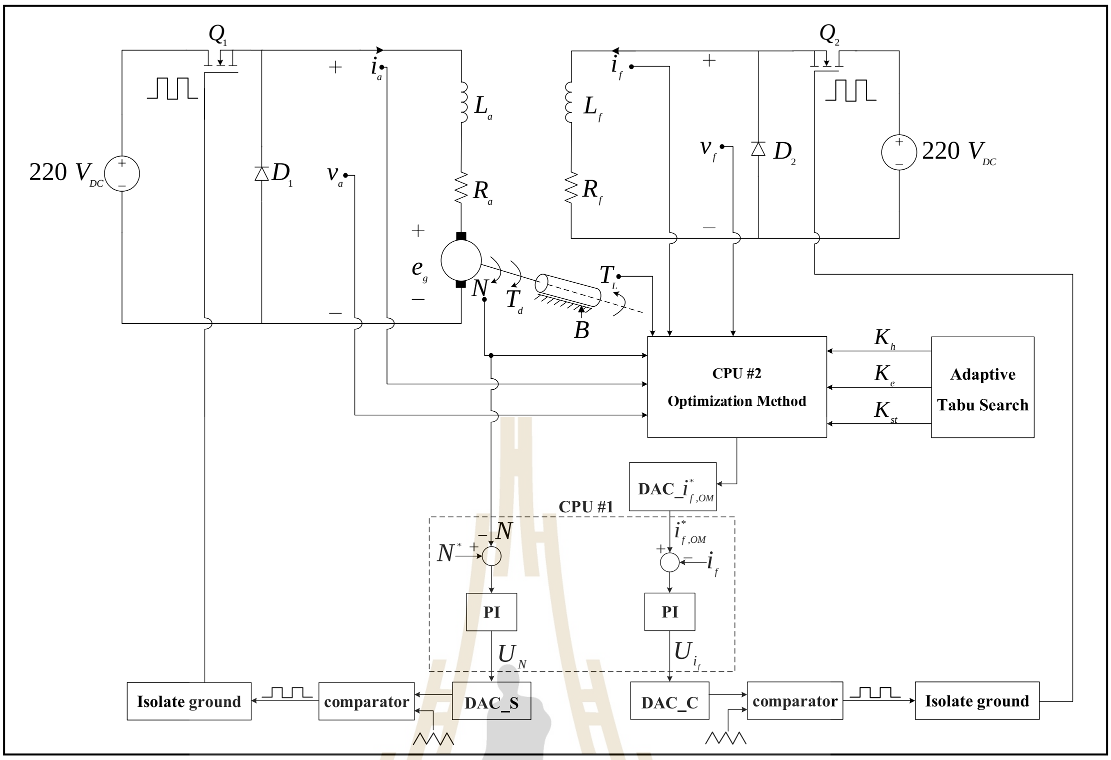
$$i_f = \frac{\pm_s W \mp \sqrt{-\left(2y \pm_s \frac{2\beta}{W}\right)}}{2} \qquad (6.8)$$

โดยที่ $\pm_s$ แสดงถึง การใช้สัญลักษณ์ที่เหมือนกัน ถ้าเป็นเครื่องหมายบวก ตำแหน่งสัญลักษณ์ $\pm_s$ จะต้องเป็นเครื่องหมายบวกเหมือนกัน และถ้าเป็นเครื่องหมายลบ ตำแหน่งสัญลักษณ์ $\pm_s$ จะต้องเป็นเครื่องหมายลบเหมือนกัน

จากการคำนวณทั้ง 7 ขั้นตอน จะได้ค่ากระแสสนามที่ทำให้กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ค่ากระแสสนามที่ได้จากสมการที่ (6.8) จะได้คำตอบออกมาทั้งหมด 4 ค่า ซึ่งค่าจากกระแสสนามทั้ง 4 ค่า จะต้องเลือกเพียง 1 ค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสีย โดยเกณฑ์การเลือกคำตอบที่เหมาะสม คือ ค่ากระแสสนามต้องมีค่าเป็นจำนวนจริง ค่ากระแสสนามต้องไม่ติดลบ ค่ากระแสสนามต้องไม่มีค่าเป็นศูนย์ และค่ากระแสสนามต้องมีค่าไม่เกินพิกัด หลังจากได้ค่ากระแสสนามแล้วจะต้องนำค่าที่ได้ไปแทนลงในสมการที่ (6.6) ถ้าค่ากระแสสนามดังกล่าวทำให้สมการเป็นจริง จึงสรุปได้ว่าค่ากระแสสนามนั้นให้ค่ากำลังงานสูญเสียที่มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งทำให้เกิดการประหยัดพลังงาน

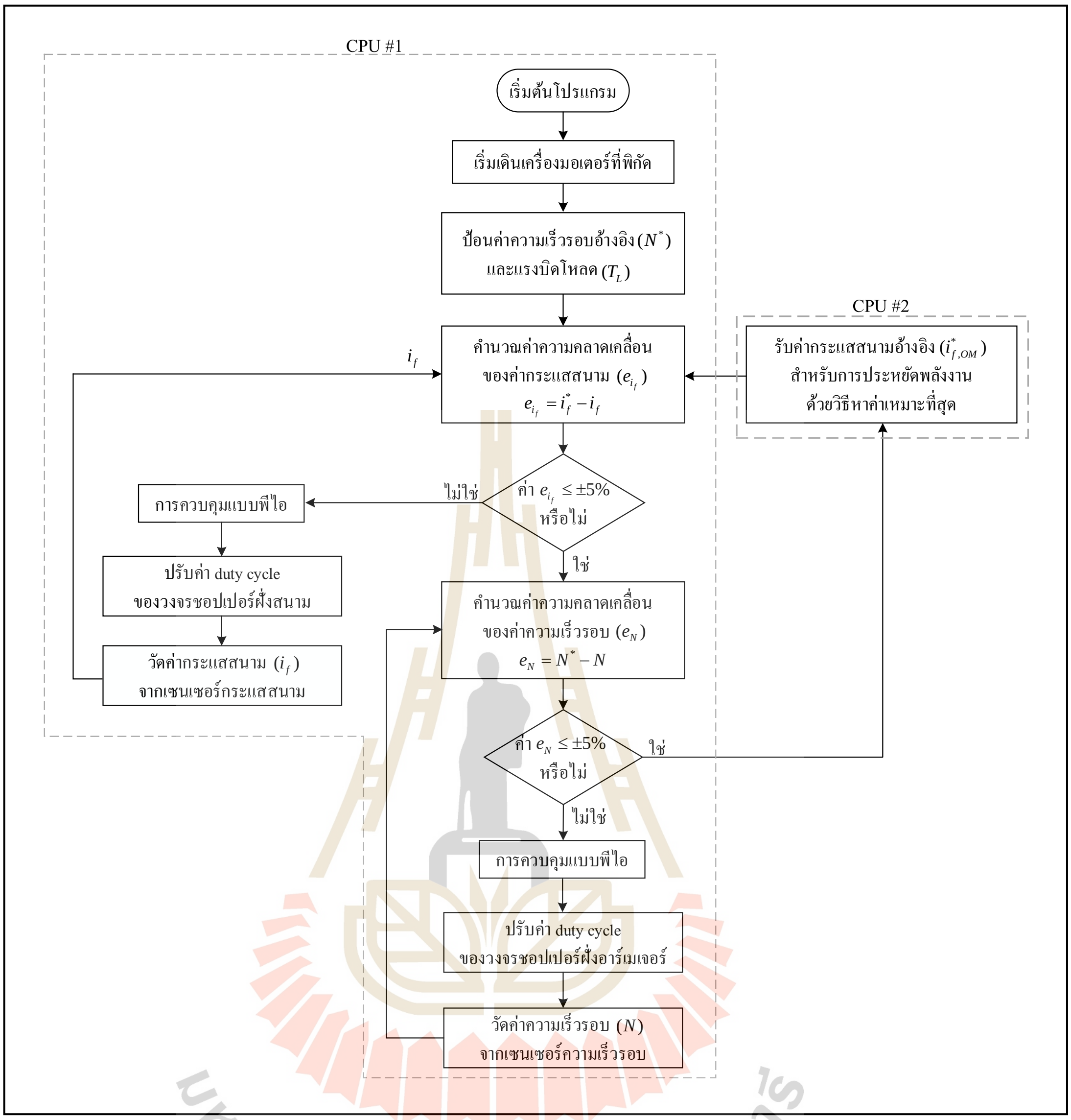
6.3 การทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน

การทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.1 โดยการทดสอบดังกล่าวจะทำการคำนวณค่ากระแสสนามอ้างอิง ($i^*_{f,OM}$) ด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน เพื่อเป็นค่ากระแสสนามอ้างอิงให้กับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยการคำนวณจะใช้ค่าความเร็วรอบและแรงบิดโหลดที่ป้อนให้กับโปรแกรมเป็นข้อมูลสำหรับการคำนวณ ซึ่งพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณจะมีค่าคงที่ ตามที่ระบุไว้ในหัวข้อที่ 6.2



รูปที่ 6.1 ระบบชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นสำหรับ
การขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน

การทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 6.2 จากรูปดังกล่าว จะเริ่มต้นการทำงานโดยเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ที่พิกัด ป้อนค่าความเร็วรอบอ้างอิง (N^*) และแรงบิดโหลด (T_L) ให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ทั้งสองบอร์ด (บอร์ดควบคุมมอเตอร์ : CPU #1 และบอร์ดประหยัดพลังงาน : CPU #2) จากนั้น CPU #2 จะคำนวณค่ากระแสสนามสำหรับการประหยัดพลังงานเพื่อส่งค่ากระแส $i^*_{f,OM}$ ให้กับ CPU #1 ผ่านวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะลอก เพื่อเป็นค่ากระแสสนามอ้างอิงให้กับตัวควบคุมพีไอในการควบคุมกระแสสนามของมอเตอร์ต่อไป ซึ่งตัวควบคุมพีไอจะควบคุมค่ากระแสสนามและความเร็วรอบของมอเตอร์ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าอ้างอิง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์

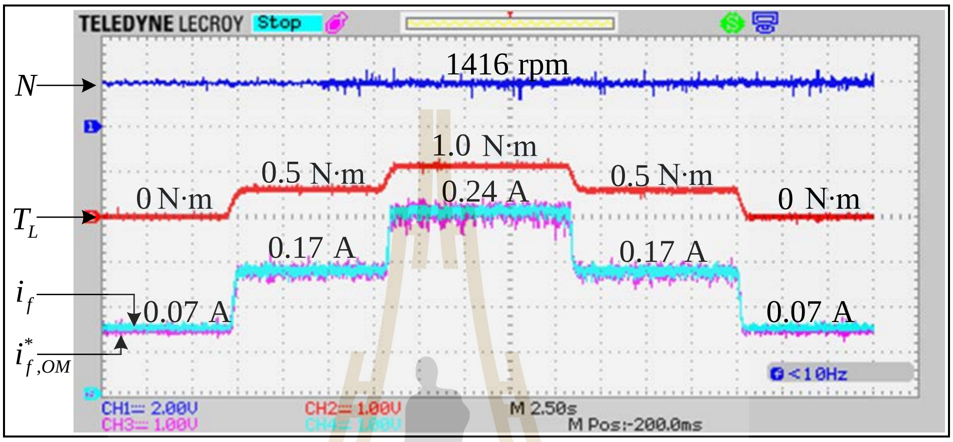


รูปที่ 6.2 การทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ

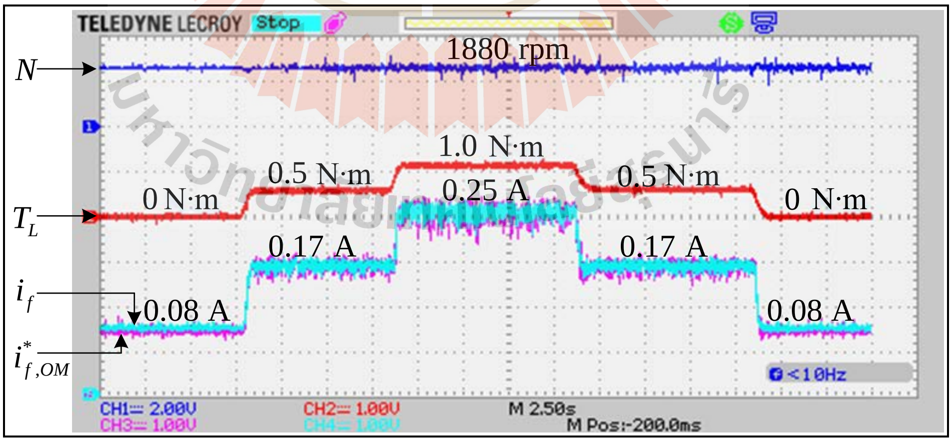
6.3.1 ผลการทดสอบการคำนวณค่ากระแสสนามด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุด

การทดสอบการคำนวณค่ากระแสสนามด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุด แบ่งการทดสอบออกเป็น 6 กรณี คือ กรณีที่ 1 คงที่ค่าความเร็วรอบที่ 1416 rpm ปรับแรงบิดโหลดที่ 0 0.5 และ 1.0 N·m กรณีที่ 2 คงที่ค่าความเร็วรอบที่1880 rpm ปรับแรงบิดโหลดที่ 0 0.5 และ 1.0 N·m กรณีที่ 3 คงที่ค่าความเร็วรอบที่ 2360 rpm ปรับแรงบิดโหลดที่ 0 0.5 และ 1.0 N·m กรณีที่ 4

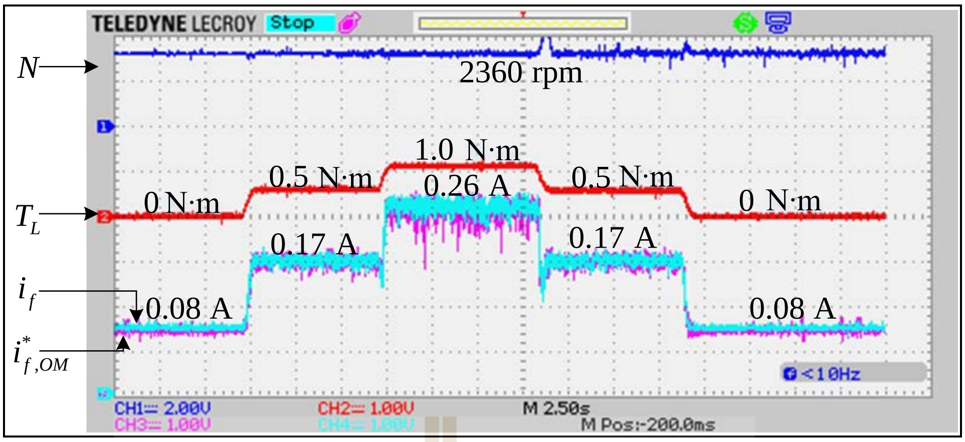
คงที่ค่าแรงบิดโหลดที่ 0 N·m ปรับความเร็วรอบที่ 1416 1880 และ 2360 rpm กรณีที่ 5 คงที่ค่าแรงบิดโหลดที่ 0.5 N·m ปรับความเร็วรอบที่ 1416 1880 และ 2360 rpm กรณีที่ 6 คงที่ค่าแรงบิดโหลดที่ 1.0 N·m ปรับความเร็วรอบที่ 1416 1880 และ 2360 rpm สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.3 ถึง 6.8 ตามลำดับ



รูปที่ 6.3 ผลการทดสอบการคำนวณค่ากระแสสนามด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุด กรณีที่ 1 คงที่ค่าความเร็วรอบที่ 1416 rpm ปรับแรงบิดโหลดที่ 0 0.5 และ 1.0 N·m

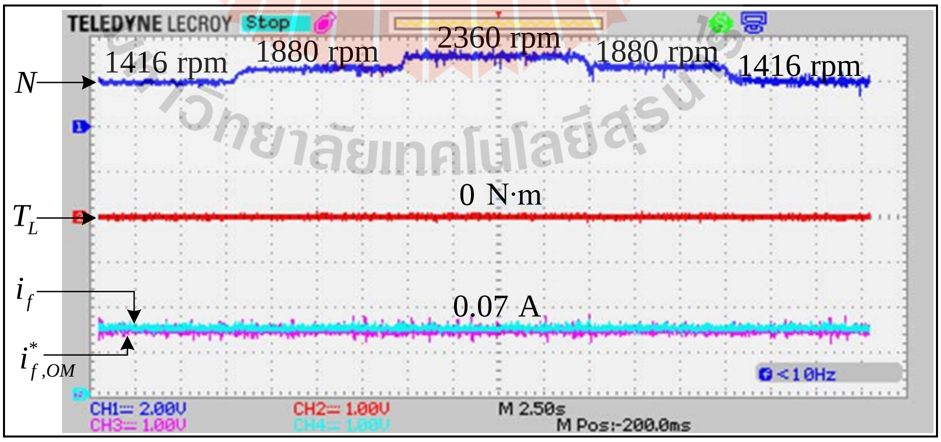


รูปที่ 6.4 ผลการทดสอบการคำนวณค่ากระแสสนามด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุด กรณีที่ 2 คงที่ค่าความเร็วรอบที่ 1880 rpm ปรับแรงบิดโหลดที่ 0 0.5 และ 1.0 N·m

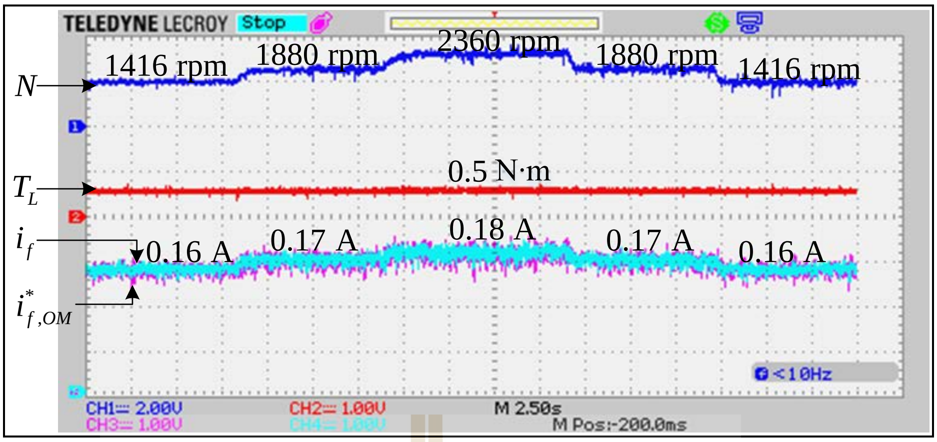


รูปที่ 6.5 ผลการทดสอบการคำนวณค่ากระแสสนามด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุด กรณีที่ 3 คงที่ค่าความเร็วรอบที่ 2360 rpm ปรับแรงบิดโหลดที่ 0 0.5 และ 1.0 N·m

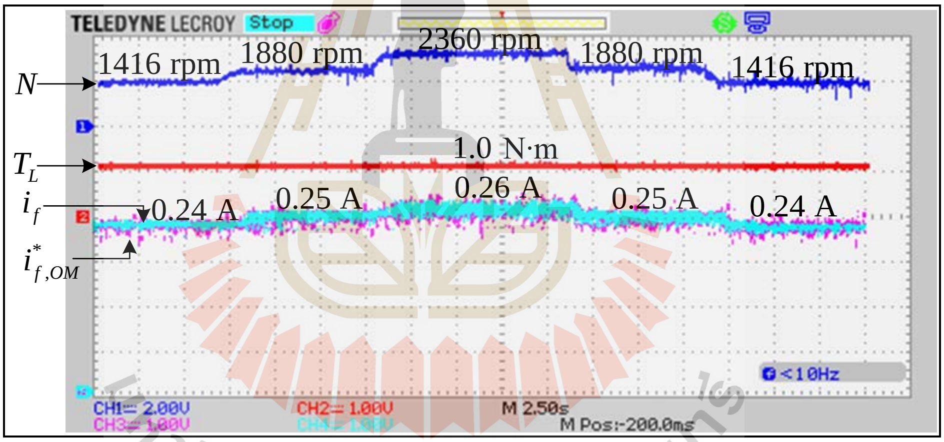
จากรูปที่ 6.3 ถึง 6.5 ผลการทดสอบในกรณีที่ 1 ถึง 3 สังเกตได้ว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดเป็น 0 0.5 และ 1.0 N·m และเปลี่ยนกลับมาที่แรงบิดโหลด 0.5 และ 0 N·m ค่ากระแส $i^*_{f,OM}$ จะถูกคำนวณใหม่สำหรับการประหยัดพลังงาน และตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมกระแสสนามจริง (i_f) ให้มีลักษณะคล้อยตามกระแส $i^*_{f,OM}$ ทุกสภาวะที่แรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 6.6 ผลการทดสอบการคำนวณค่ากระแสสนามด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุด กรณีที่ 4 คงที่ค่าแรงบิดโหลดที่ 0 N·m ปรับความเร็วรอบที่ 1416 1880 และ 2360 rpm



รูปที่ 6.7 ผลการทดสอบการคำนวณค่ากระแสสนามด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุด กรณีที่ 5 คงที่ค่าแรงบิดโหลดที่ 0.5 N·m ปรับความเร็วรอบที่ 1416 1880 และ 2360 rpm



รูปที่ 6.8 ผลการทดสอบการคำนวณค่ากระแสสนามด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุด กรณีที่ 6 คงที่ค่าแรงบิดโหลดที่ 1.0 N·m ปรับความเร็วรอบที่ 1416 1880 และ 2360 rpm

ผลการทดสอบในรูปที่ 6.6 ถึง 6.8 สังเกตได้ว่า เมื่อค่าแรงบิดโหลดมีค่าคงที่ และมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วรอบจาก 1416 1880 และ 2360 rpm และเปลี่ยนกลับมาที่ความเร็วรอบ 1880 และ 1416 rpm ค่ากระแส $i^*_{f,OM}$ จะถูกคำนวณใหม่สำหรับการประหยัดพลังงานและตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมกระแส i_f ให้มีลักษณะคล้อยตามกระแส $i^*_{f,OM}$ ได้ทุกสภาวะที่ความเร็วรอบมีการเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อค่าแรงบิดโหลดคงที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบนั้นจะส่งผลให้ค่ากระแส $i^*_{f,OM}$ เปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ซึ่งต่างจากการทดสอบในกรณีที่ 1 ถึง 3

6.3.2 ผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุด

การทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน จะทำการทดสอบที่สภาวะเดียวกันกับการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม ซึ่งการอธิบายวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 การคำนวณการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุด จะคำนวณกำลังงานอินพุตเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ากำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนด้วยวิธีดั้งเดิม โดยค่ากำลังงานอินพุตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.13) ในบทที่ 3 ซึ่งการคำนวณอาศัยการวัดค่าแรงดันอาร์เมเจอร์ กระแสอาร์เมเจอร์ แรงดันสนาม และกระแสสนาม การเปรียบเทียบจะดำเนินการหาเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานจากสมการที่ (6.9) สำหรับผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานระหว่างวิธีดั้งเดิมกับวิธีหาค่าเหมาะที่สุด สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.1

$$\text{เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน} = \frac{P_{in,conv} - P_{in,OM}}{P_{in,conv}} \times 100\% \qquad (6.9)$$

โดยที่ $P_{in,conv}$ คือ กำลังงานอินพุตที่อาศัยการขับเคลื่อนด้วยวิธีดั้งเดิม (W)

$P_{in,OM}$ คือ กำลังงานอินพุตที่อาศัยการขับเคลื่อนด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุด (W)

ตารางที่ 6.1 ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานระหว่างการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมกับวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน

Speed		T_L	วิธีดั้งเดิม		วิธีหาค่าเหมาะที่สุด		เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
%	N (rpm)	(N·m)	$i_{f,conv}$ (A)	$P_{in,conv}$ (W)	$i_{f,OM}$ (A)	$P_{in,OM}$ (W)	
50	1180	0.1	0.30	123.53	0.07	18.57	84.97
60	1416		0.30	139.13	0.07	21.01	84.90
70	1652		0.30	155.24	0.08	23.36	84.95
80	1880		0.30	174.30	0.08	25.70	85.25
90	2124		0.30	195.21	0.08	28.23	85.54
100	2360		0.30	217.95	0.08	30.68	85.92
110	2596		0.29	228.85	0.08	33.14	85.52
120	2832		0.20	222.46	0.08	35.62	83.99

ตารางที่ 6.1 ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานระหว่างการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมกับวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน (ต่อ)

Speed		T_L (N·m)	วิธีดั้งเดิม		วิธีหาค่าเหมาะที่สุด		เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
%	N (rpm)		$i_{f,conv}$ (A)	$P_{in,conv}$ (W)	$i_{f,OM}$ (A)	$P_{in,OM}$ (W)	
50	1180	0.2	0.30	133.74	0.10	37.14	72.23
60	1416		0.30	151.28	0.10	42.04	72.21
70	1652		0.30	170.98	0.11	46.74	72.66
80	1880		0.30	190.91	0.11	51.33	73.06
90	2124		0.30	214.66	0.11	56.48	73.69
100	2360		0.30	239.10	0.11	61.39	74.33
110	2596		0.27	247.22	0.12	66.32	73.18
120	2832		0.19	253.47	0.12	71.21	71.88
50	1180	0.3	0.30	145.04	0.13	55.71	61.59
60	1416		0.30	164.61	0.13	63.07	61.69
70	1652		0.30	185.67	0.13	70.13	62.23
80	1880		0.30	208.18	0.13	77.16	62.94
90	2124		0.30	239.91	0.14	84.73	64.68
100	2360		0.30	261.90	0.14	92.09	64.84
110	2596		0.26	268.05	0.14	99.49	62.88
120	2832		0.16	304.76	0.15	106.93	64.91
50	1180	0.4	0.30	155.73	0.14	74.28	53.30
60	1416		0.30	177.94	0.15	84.10	52.74
70	1652		0.30	202.38	0.15	93.51	53.79
80	1880		0.30	227.42	0.16	102.89	54.76
90	2124		0.30	256.13	0.16	112.99	55.89
100	2360		0.30	286.50	0.16	122.81	57.13
110	2596		0.24	294.52	0.17	132.68	54.95
120	2832		0.15	358.24	0.17	142.58	60.20

ตารางที่ 6.1 ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานระหว่างการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมกับวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน (ต่อ)

Speed		T_L	วิธีดั้งเดิม		วิธีหาค่าเหมาะที่สุด		เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
%	N (rpm)	(N·m)	$i_{f,conv}$ (A)	$P_{in,conv}$ (W)	$i_{f,OM}$ (A)	$P_{in,OM}$ (W)	
50	1180	0.5	0.30	168.47	0.16	92.86	44.88
60	1416		0.30	193.22	0.17	99.57	48.47
70	1652		0.30	219.58	0.17	116.90	46.76
80	1880		0.30	246.87	0.17	128.62	47.90
90	2124		0.30	278.17	0.18	141.24	49.22
100	2360		0.30	311.26	0.18	153.53	50.68
110	2596		0.20	319.07	0.19	165.86	48.02
120	2832		0.17	362.53	0.19	178.24	50.83
50	1180	0.6	0.30	179.76	0.18	111.43	38.01
60	1416		0.30	205.56	0.18	126.16	38.63
70	1652		0.30	232.92	0.19	140.28	39.77
80	1880		0.30	260.57	0.19	154.36	40.76
90	2124		0.30	291.55	0.20	169.50	41.86
100	2360		0.30	321.43	0.20	184.23	42.68
110	2596		0.25	332.38	0.20	199.03	40.12
120	2832		0.18	377.54	0.21	213.89	43.35
50	1180	0.7	0.30	190.31	0.19	130.02	31.68
60	1416		0.30	217.28	0.20	147.19	32.26
70	1652		0.30	249.34	0.20	163.67	34.36
80	1880		0.30	278.10	0.21	180.08	35.24
90	2124		0.30	312.33	0.21	197.76	36.68
100	2360		0.30	350.67	0.22	214.95	38.70
110	2596		0.23	372.55	0.22	232.22	37.67
120	2832		0.16	457.11	0.23	249.56	45.41

ตารางที่ 6.1 ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานระหว่างการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมกับวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน (ต่อ)

Speed		T_L	วิธีดั้งเดิม		วิธีหาค่าเหมาะที่สุด		เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
%	N (rpm)	(N·m)	$i_{f,conv}$ (A)	$P_{in,conv}$ (W)	$i_{f,OM}$ (A)	$P_{in,OM}$ (W)	
50	1180	0.8	0.30	204.34	0.21	148.58	27.29
60	1416		0.30	233.52	0.21	168.22	27.96
70	1652		0.30	266.92	0.22	187.06	29.92
80	1880		0.30	301.44	0.22	205.99	31.66
90	2124		0.30	335.20	0.23	226.03	32.57
100	2360		0.30	368.95	0.23	245.67	33.41
110	2596		0.24	394.42	0.24	265.41	32.71
120	2832		0.17	467.24	0.24	285.21	38.96
50	1180	0.9	0.30	212.68	0.22	165.27	22.29
60	1416		0.30	243.81	0.22	189.25	22.38
70	1652		0.30	279.24	0.23	210.44	24.64
80	1880		0.30	312.82	0.23	231.56	25.98
90	2124		0.30	348.08	0.24	254.28	26.95
100	2360		0.30	386.91	0.24	276.39	28.56
110	2596		0.24	418.64	0.25	298.58	28.68
50	1180	1.0	0.30	231.05	0.23	185.37	19.61
60	1416		0.30	267.21	0.24	210.29	21.30
70	1652		0.30	305.78	0.24	233.84	23.53
80	1880		0.30	343.74	0.25	257.29	25.15
90	2124		0.30	391.74	0.25	282.54	27.88
100	2360		0.30	441.09	0.26	307.11	30.37
110	2596		0.20	510.02	0.26	331.77	34.95
50	1180	1.1	0.30	246.88	0.24	204.31	17.24
60	1416		0.30	287.21	0.25	231.32	19.46

ตารางที่ 6.1 ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานระหว่างการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมกับวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน (ต่อ)

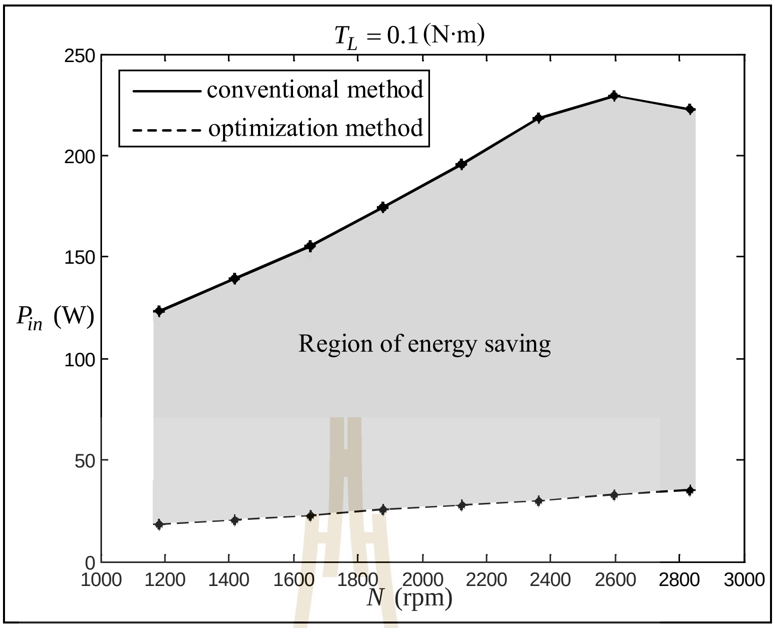
Speed		T_L	วิธีดั้งเดิม		วิธีหาค่าเหมาะที่สุด		เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
%	N (rpm)	(N·m)	$i_{f,conv}$ (A)	$P_{in,conv}$ (W)	$i_{f,OM}$ (A)	$P_{in,OM}$ (W)	
70	1652	1.1	0.30	327.72	0.25	257.23	21.51
80	1880		0.30	370.42	0.26	283.02	23.59
90	2124		0.30	420.38	0.26	310.80	26.07
100	2360		0.30	467.65	0.27	337.82	27.76
50	1180	1.2	0.30	260.52	0.25	222.88	14.45
60	1416		0.30	302.29	0.26	252.36	16.52
70	1652		0.30	346.23	0.26	280.62	18.95
80	1880		0.30	387.61	0.27	308.76	20.34
90	2124		0.30	443.30	0.28	339.06	23.51
100	2360		0.30	493.10	0.28	396.72	19.55
50	1180	1.3	0.30	279.39	0.26	208.00	25.55
60	1416		0.30	313.46	0.27	273.38	12.79
70	1652		0.30	359.01	0.27	304.00	15.32
80	1880		0.30	404.78	0.28	334.50	17.36
90	2124		0.30	461.81	0.29	367.38	20.45
100	2360		0.30	505.72	0.29	399.26	21.05
50	1180	1.4	0.30	285.72	0.27	257.60	9.84
60	1416		0.30	330.74	0.28	291.87	11.75
70	1652		0.30	377.46	0.29	324.94	13.91
80	1880		0.30	418.40	0.29	357.44	14.57
90	2124		0.30	470.26	0.30	392.67	16.50

จากตารางที่ 6.1 พบว่า การทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม กับวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน เป็นการทดสอบที่สภาวะแรงบิดโหลด และความเร็วรอบต่าง ๆ โดยค่ากำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าเหมาะที่สุด มีค่าน้อย

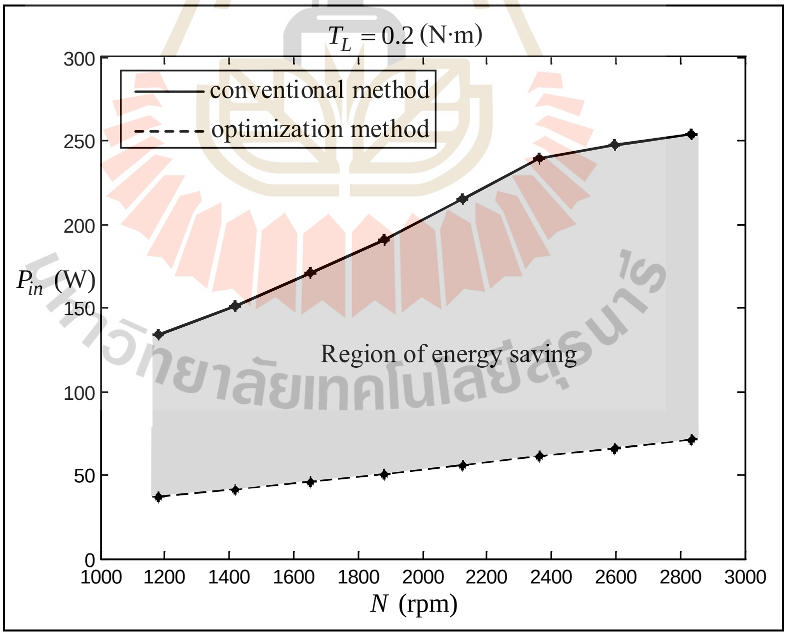
กว่ากำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม ในช่วงที่แรงบิดโหลดต่ำ ๆ ค่ากำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนทั้งสองวิธีมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมาก โดยเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าเหมาะที่สุดให้ค่าการประหยัดพลังงานได้สูงสุดถึง 85.92 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในสภาวะ 50 เปอร์เซ็นต์ของโหลดเต็มพิกัดสามารถประหยัดพลังงานได้ 45.41 เปอร์เซ็นต์ ในสภาวะ 80 เปอร์เซ็นต์ของโหลดเต็มพิกัดประหยัดได้ 23.51 เปอร์เซ็นต์ และในสภาวะโหลดเต็มพิกัดสามารถประหยัดได้ 16.50 เปอร์เซ็นต์ จากตารางที่ 6.1 ที่สภาวะแรงบิดโหลด $0.9-1.1$ N·m ไม่ได้ทำการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานที่ค่าความเร็วรอบ 120 เปอร์เซ็นต์ของความเร็วรอบพิกัด และที่สภาวะแรงบิดโหลด $1.2-1.4$ N·m ไม่ได้ทำการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานที่ค่าความเร็วรอบเกินพิกัด เนื่องจากในการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม ที่สภาวะข้างต้นมีค่ากระแสอาร์เมเจอร์เกินพิกัด

จากการคำนวณเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานในตารางที่ 6.1 แสดงให้เห็นว่า การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าเหมาะที่สุด สามารถลดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้มีค่าน้อยลง ซึ่งนอกจากกำลังงานอินพุตในการขับเคลื่อนมอเตอร์จะลดลงยังส่งผลให้ค่ากำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ลดลงด้วย จากความสัมพันธ์ของสมการกำลังงานสูญเสียสมการที่ (4.2) ในบทที่ 4 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุตและกำลังงานสูญเสีย เมื่อค่ากำลังงานเอาต์พุตคงที่ ค่ากำลังงานสูญเสียจึงขึ้นอยู่กับค่ากำลังงานอินพุต ดังนั้น จากผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์สามารถเปรียบเทียบค่ากำลังงานอินพุตของวิธีดั้งเดิม กับวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน ได้ดังรูปที่ 6.9

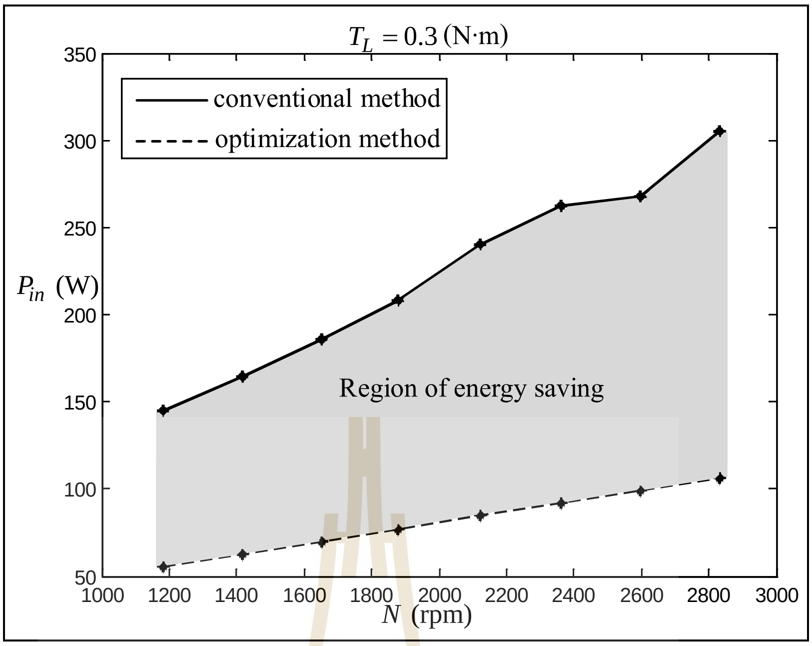
จากรูปที่ 6.9 เป็นการเปรียบเทียบค่ากำลังงานอินพุตของวิธีดั้งเดิมกับวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน สังเกตได้ว่า ที่สภาวะแรงบิดโหลดต่ำ ๆ พื้นที่ของการประหยัดพลังงานจะมีขนาดใหญ่ ซึ่งหมายถึงการขับเคลื่อนด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสามารถลดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้มีค่าน้อยลง ส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น และเมื่อแรงบิดโหลดเพิ่มขึ้น พื้นที่ของการประหยัดพลังงานจะมีค่าลดลง เนื่องจาก เมื่อแรงบิดโหลดเพิ่มขึ้น ค่ากระแสสนามมีค่ามากขึ้นเพราะต้องการแรงบิดที่สูงขึ้นของมอเตอร์ และค่ากระแสสนามสูงขึ้นจนเกือบจะเท่าวิธีดั้งเดิม ทำให้การประหยัดพลังงานลดลง ดังนั้น จากผลการทดสอบที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่า การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสามารถประหยัดพลังงานได้ดีกว่าการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม



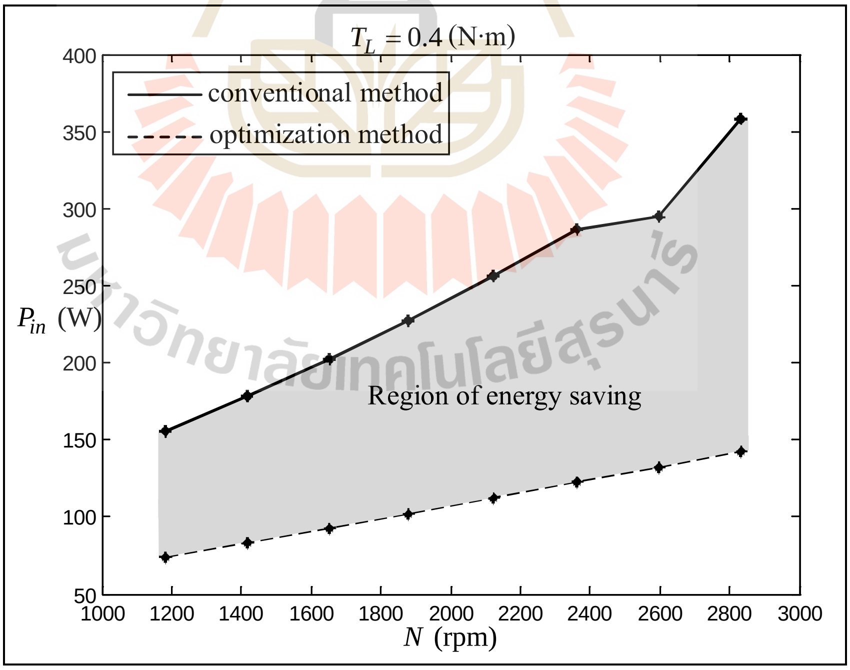
(ก) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.1 N·m



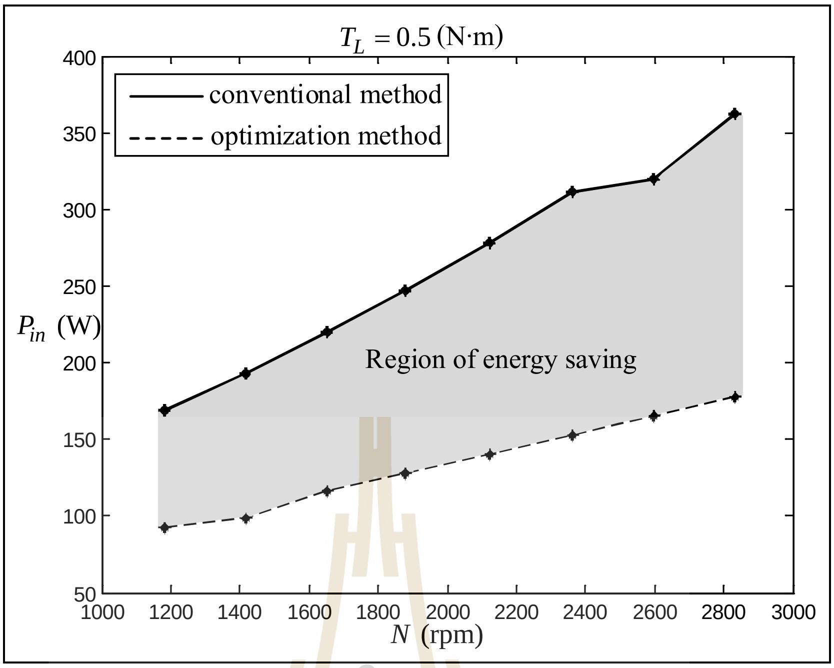
(ข) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.2 N·m



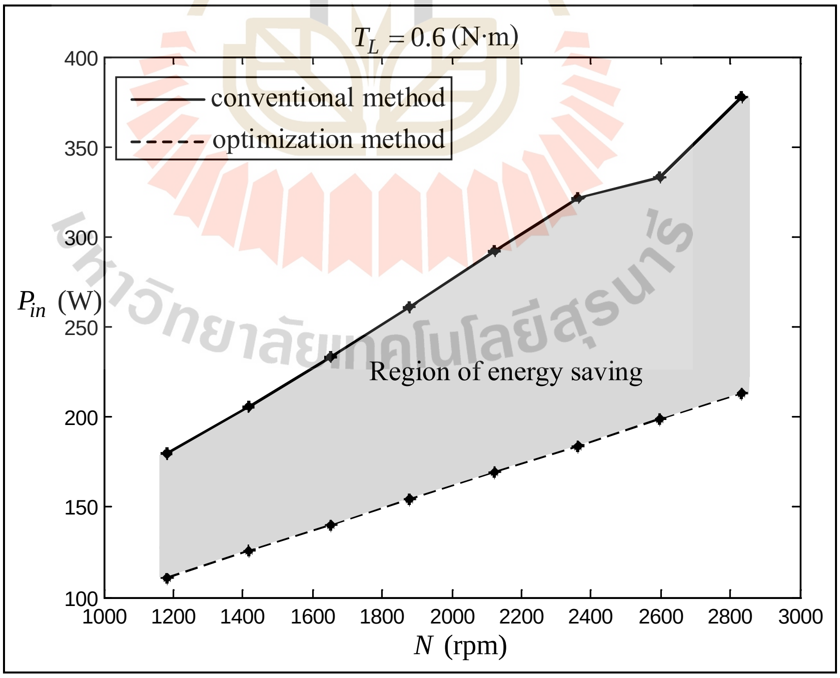
(ค) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.3 N·m



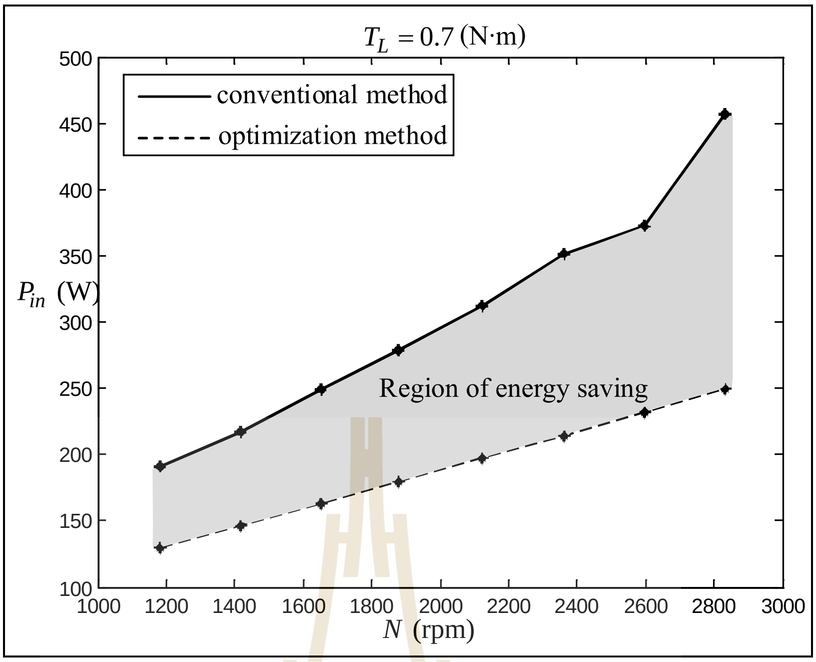
(ง) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.4 N·m



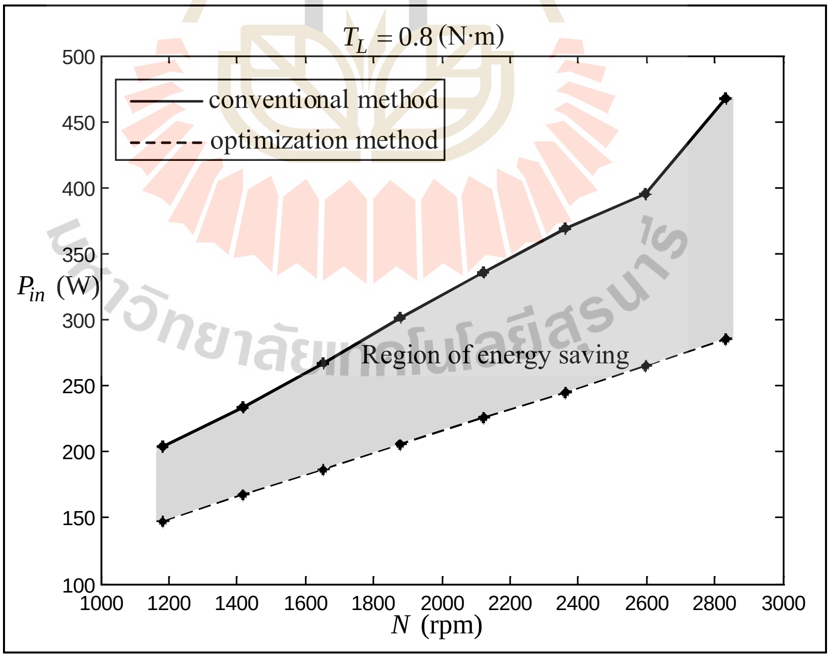
(จ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.5 N·m



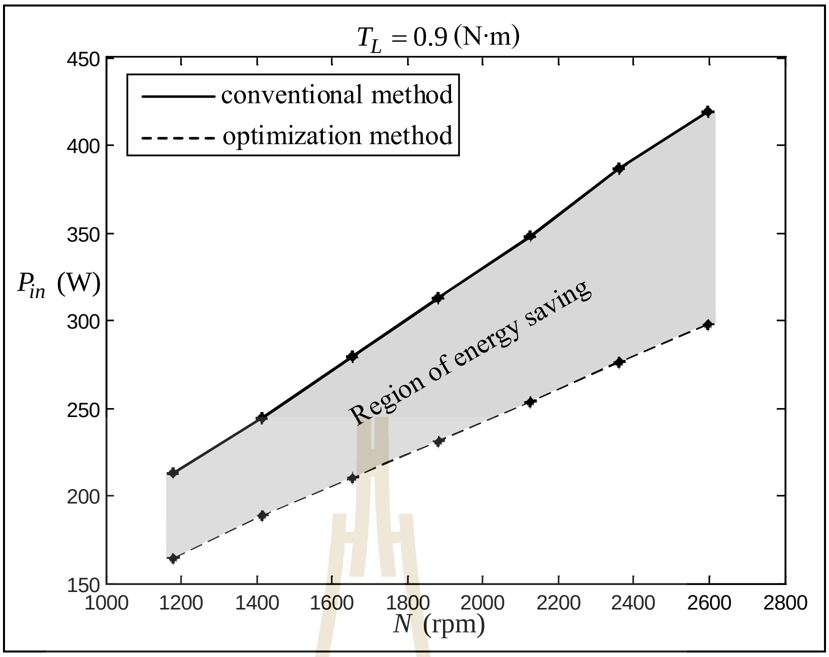
(ฉ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.6 N·m



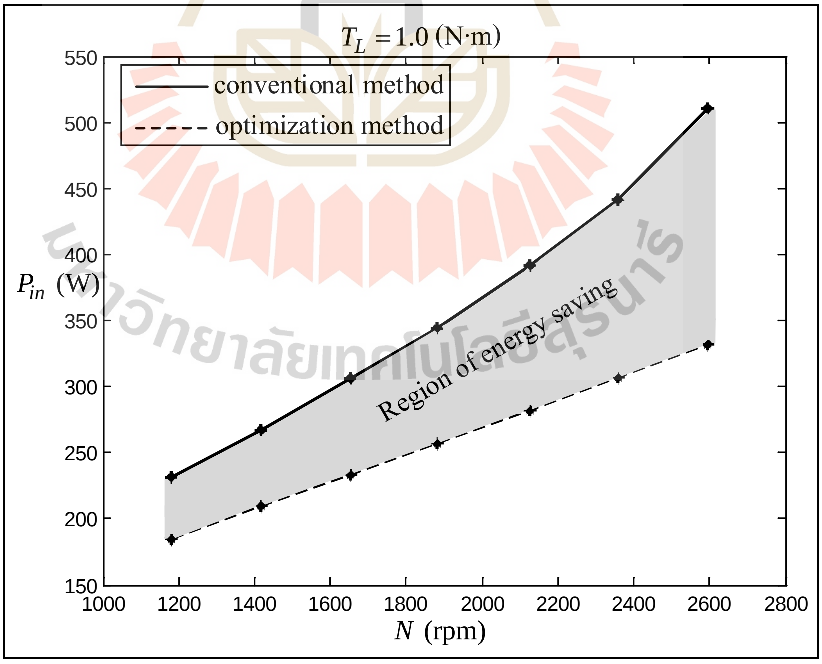
(ช) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.7 N·m



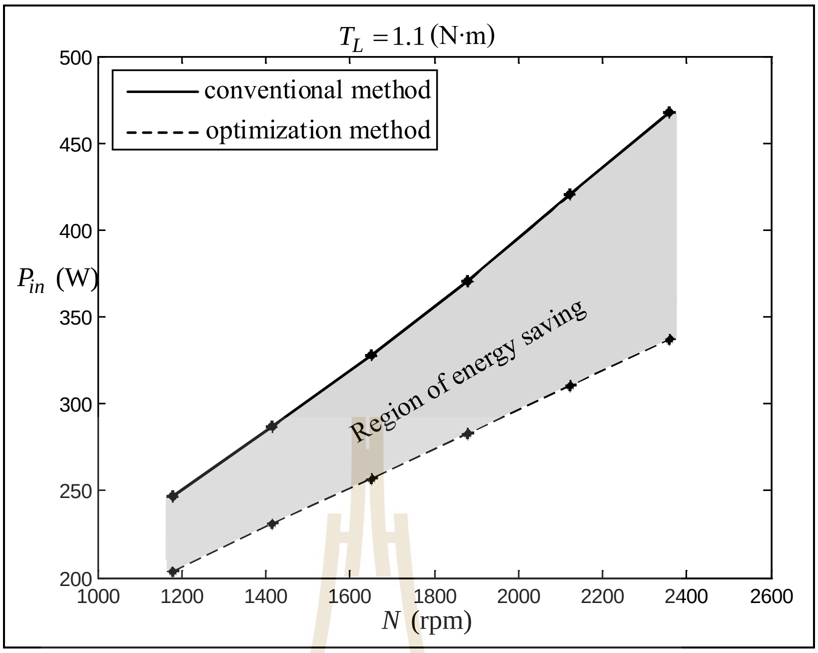
(ซ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.8 N·m



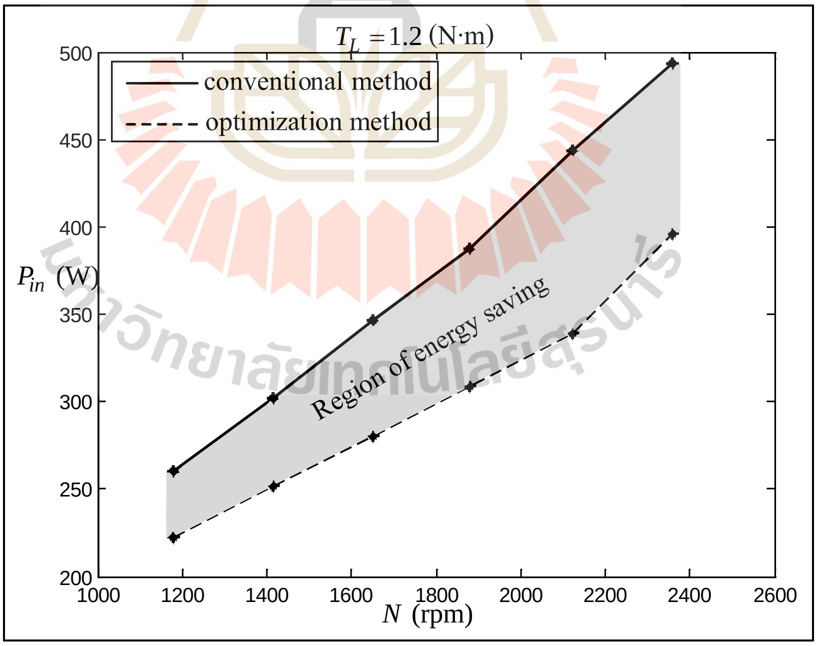
(ฌ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.9 N·m



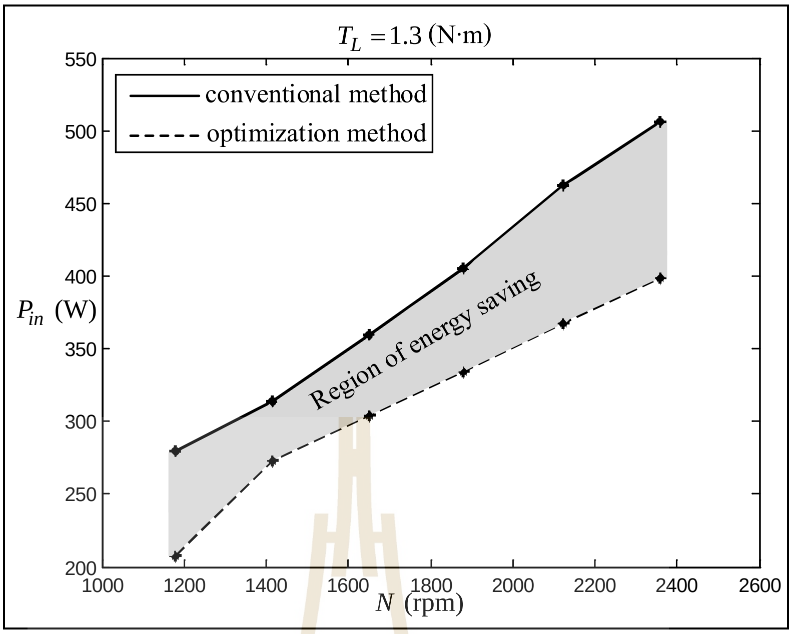
(ญ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 1.0 N·m



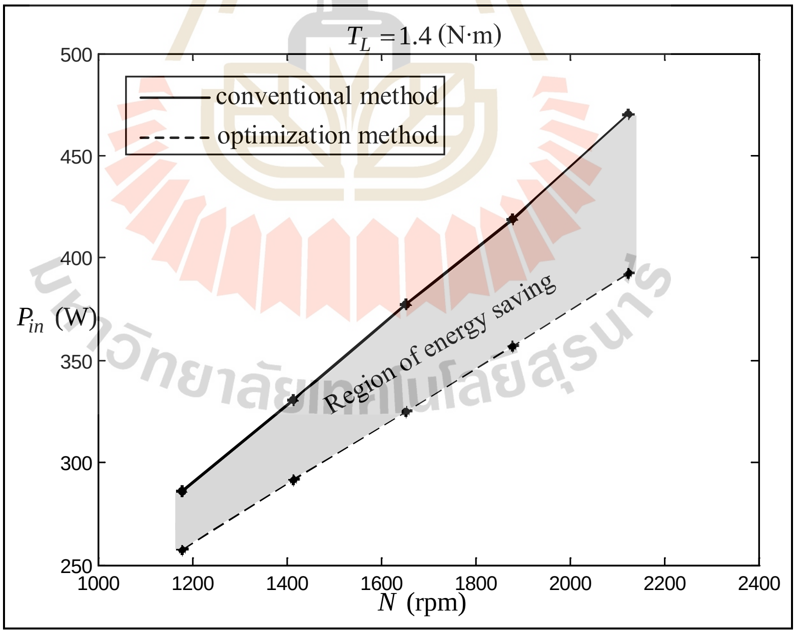
(ฎ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 1.1 N·m



(ฏ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 1.2 N·m



(ฐ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 1.3 N·m



(ฑ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 1.4 N·m

รูปที่ 6.9 ผลการเปรียบเทียบกำลังงานระหว่างการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม กับวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน

6.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน โดยทำการทดสอบเปรียบเทียบกับการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม ซึ่งวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสามารถให้การประหยัดพลังงานได้สูงสุดถึง 85.92 เปอร์เซ็นต์ และในสภาวะที่แรงบิดโหลดเต็มพิกัดสามารถประหยัดได้ 16.50 เปอร์เซ็นต์ นอกจากการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน มีการนำเสนอกราฟพื้นที่การประหยัดพลังงาน โดยเปรียบเทียบจากค่ากำลังงานอินพุตของวิธีดั้งเดิมกับวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน จากกราฟดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสามารถลดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้มีค่าลดลง ส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ถึงแม้ว่า การขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดจะสามารถประหยัดพลังงานได้ แต่เนื่องจากสภาวะการทำงานของมอเตอร์ที่เปลี่ยนแปลง อาจส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในสมการกำลังงานสูญเสียที่ใช้ในการคำนวณด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงานเปลี่ยนแปลงไปด้วย ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้อัลกอริทึมกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นแบบเวียนเกิดเชิงกำหนดในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในสมการกำลังงานสูญเสียแบบออนไลน์ ซึ่งจะนำเสนอในบทต่อไป

บทที่ 7
การประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ด้วยอัลกอริทึมกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นแบบเวียนเกิดเชิงกำหนด

7.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้นำเสนออัลกอริทึมกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นแบบเวียนเกิดเชิงกำหนด (Deterministic Recursive Linear Least Square Algorithm) หรือเรียกว่าอัลกอริทึม DRLS ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ สำหรับการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีหาค่าเหมาะที่สุดเพื่อให้ได้ค่ากระแสสนามที่มีค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงานซึ่งได้นำเสนอไว้ในบทก่อนหน้านี้ วิธีดังกล่าวต้องใช้สมการกำลังงานสูญเสียในการหาค่ากระแสสนาม โดยค่าพารามิเตอร์ในสมการกำลังงานสูญเสียมีผลต่อการคำนวณค่ากระแสสนามและเนื่องจากสภาวะการทำงานของมอเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้อัลกอริทึม DRLS ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในสมการกำลังงานสูญเสียแบบออนไลน์ เนื่องจากอัลกอริทึมดังกล่าวให้ค่าความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ที่ดีในทุกสภาวะการทำงาน อีกทั้งการประมาณค่าด้วยอัลกอริทึมนี้มีสมรรถนะที่ดี เนื่องจากใช้เวลาในการลู่เข้าหาผลเฉลยน้อย ให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าน้อยที่สุด (Mohamed et al., 2011) และเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อนง่ายต่อการสร้างจริง โดยจะใช้อัลกอริทึม DRLS ร่วมกับการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียด้วยวิธี ATS ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 สำหรับเนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วยอัลกอริทึม DRLS ขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยอัลกอริทึม DRLS และการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงานที่มีการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยอัลกอริทึม DRLS

7.2 อัลกอริทึมกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นแบบเวียนเกิดเชิงกำหนด

Karl Friedrich Gauss เป็นผู้ริเริ่มและเสนอแนวคิดของอัลกอริทึมกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Algorithm: LS) ไว้เมื่อปี ค.ศ. 1795 และต่อมานิยมใช้กันอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากอัลกอริทึม LS เป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ซับซ้อน และไม่ต้องใช้คุณสมบัติเชิงสถิติใด ๆ ของชุดข้อมูลที่ได้จากการวัด (Yuvapoositanon, 2009) แต่อัลกอริทึม LS เป็นการประมาณค่าแบบ

ออฟไลน์ ซึ่งทำให้การใช้งานกับระบบต่าง ๆ ไม่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง จึงได้มีการพัฒนาอัลกอริทึมดังกล่าว โดยการพิจารณาสมการปกติ (normal equation) ของอัลกอริทึม LS ให้มีการใช้งานแบบออนไลน์เพื่อให้อัลกอริทึมสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ด้วยการพัฒนาจากรูปแบบการเวียนเกิดของสมการปกติ ซึ่งเรียกว่า อัลกอริทึมกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นแบบเวียนเกิดเชิงกำหนด หรืออัลกอริทึม DRLS นอกจากนี้ยังมีการนำอัลกอริทึม DRLS มาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งอัลกอริทึมดังกล่าวใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ โดยระบบสมการทั่วไปที่เหมาะสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี DRLS จะต้องมีความสัมพันธ์เชิงเส้นดังสมการที่ (7.1)

$$\hat{y}(k) = a_1 x_1(k) + a_2 x_2(k) + \ldots + a_n x_n(k) = \mathbf{x}^T(k)\mathbf{a} \tag{7.1}$$

โดยที่ $\mathbf{x}^T(k) = [x_1(k) \;\; x_2(k) \;\; \ldots \;\; x_n(k)]$; $\mathbf{a} = [a_1 \;\; a_2 \;\; \ldots \;\; a_n]^T$

จากสมการที่ (7.1) $\hat{y}(k)$ คือ ค่าเอาต์พุตจากการคำนวณ ซึ่งคำนวณได้จากค่าอินพุตที่ได้จากการวัด $(\mathbf{x}^T(k))$ คูณกับค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการประมาณค่า $(\mathbf{a})$ และค่า $\hat{y}(k)$ จากการคำนวณจะต้องมีค่าใกล้เคียงกับค่า $y(k)$ ซึ่งคือ ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการวัด โดยจะส่งผลให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อน $e(k)$ ซึ่งเป็นค่าความเคลื่อนระหว่างการวัดและการคำนวณ แสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (7.2)

$$y(k) = \hat{y}(k) + e(k) \qquad ; k = 1, 2, \ldots, N \tag{7.2}$$

หรือ

$$y(k) = \mathbf{x}^T(k)\mathbf{a} + e(k) \tag{7.3}$$

จากค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าเอาต์พุตจากการวัดและเอาต์พุตจากการคำนวณในสมการที่ (7.3) สามารถหาค่า $J(\mathbf{a})$ ซึ่งคือ ค่าผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง ได้ดังสมการที่ (7.4) ดังนี้

$$J(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^{k} \left[y(i) - \sum_{j=1}^{n} x_j(i) a_j \right]^2 = \sum_{i=1}^{k} [y(i) - \mathbf{x}^T(i)\mathbf{a}]^2$$

$$= \sum_{i=1}^{k} \left[y^2(i) - 2y(i)\mathbf{x}^T(i)\mathbf{a} + (\mathbf{x}^T(i)\mathbf{a})^2 \right] \qquad (7.4)$$

โดยวัตถุประสงค์ของการหาผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองน้อยที่สุด เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ $\mathbf{a}$ ที่ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออนุพันธ์ย่อยของ $J(\mathbf{a})$ เทียบกับ $\mathbf{a}$ มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังสมการที่ (7.5)

$$\frac{\partial J(\mathbf{a})}{\partial \mathbf{a}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{a}} \left[\sum_{i=1}^{k} ((\mathbf{x}^T(i)\mathbf{a})^2 - 2\mathbf{x}^T(i)\mathbf{a}y(i) + y^2(i)) \right]$$

เนื่องจาก $\frac{\partial(\mathbf{x}^T\mathbf{a})}{\partial \mathbf{a}} = \mathbf{x}$ ดังนั้น

$$\frac{\partial J(\mathbf{a})}{\partial \mathbf{a}} = \sum_{i=1}^{k} \left[2\mathbf{x}^T(i)\mathbf{a}\mathbf{x}(i) - 2\mathbf{x}(i)y(i) \right]$$

$$\frac{\partial J(\mathbf{a})}{\partial \mathbf{a}} = 2\sum_{i=1}^{k} \left[\mathbf{x}(i)\mathbf{x}^T(i)\mathbf{a} - \mathbf{x}(i)y(i) \right] = 0 \qquad (7.5)$$

จากสมการที่ (7.5) สามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของสมการปกติ (normal equation) ดังสมการที่ (7.6)

$$\left[\sum_{i=1}^{k} \mathbf{x}(i)\mathbf{x}^T(i) \right] \hat{\mathbf{a}} = \sum_{i=1}^{k} \mathbf{x}(i)y(i) \qquad (7.6)$$

โดยที่ $\hat{\mathbf{a}} = \arg\min_{\mathbf{a}} J(\mathbf{a})$ ซึ่ง $\arg\min_{\mathbf{a}}$ หมายถึง ค่าของ $\mathbf{a}$ ที่ทำให้ $J(\mathbf{a})$ มีค่าน้อยที่สุด

จากสมการที่ (7.6) สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (7.7)

$$\hat{\mathbf{a}}(k) = \mathbf{P}(k)\mathbf{b}(k) \qquad (7.7)$$

เมื่อ $$\mathbf{P}(k) = \left[\sum_{i=1}^{k} \mathbf{x}(i)\mathbf{x}^T(i) \right]^{-1} \quad ; \quad \mathbf{b}(k) = \sum_{i=1}^{k} \mathbf{x}(i)y(i) \qquad (7.8)$$

จากสมการที่ (7.8) สังเกตได้ว่า $\mathbf{P}(k)$ และ $\mathbf{b}(k)$ ในสมการมีความสัมพันธ์กับค่าก่อนหน้า ซึ่งคือค่า $\mathbf{P}(k-1)$ และ $\mathbf{b}(k-1)$ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (7.9) และ (7.10) ตามลำดับ

$$\mathbf{P}^{-1}(k) = \sum_{i=1}^{k} \mathbf{x}(i)\mathbf{x}^T(i)$$

$$= \mathbf{x}(1)\mathbf{x}^T(1) + \mathbf{x}(2)\mathbf{x}^T(2) + \ldots + \mathbf{x}(k-1)\mathbf{x}^T(k-1) + \mathbf{x}(k)\mathbf{x}^T(k)$$

$$\mathbf{P}^{-1}(k) = \mathbf{P}^{-1}(k-1) + \mathbf{x}(k)\mathbf{x}^T(k) \tag{7.9}$$

และ $$\mathbf{b}(k) = \sum_{i=1}^{k} \mathbf{x}(i)y(i)$$

$$= \mathbf{x}(1)y(1) + \mathbf{x}(2)y(2) + \ldots + \mathbf{x}(k-1)y(k-1) + \mathbf{x}(k)y(k)$$

$$\mathbf{b}(k) = \mathbf{b}(k-1) + \mathbf{x}(k)y(k) \tag{7.10}$$

ทำการพัฒนารูปแบบการเวียนเกิดของสมการที่ (7.7) , (7.9) และ (7.10) ด้วยการคูณ $\mathbf{P}(k)$ ด้านซ้ายและคูณ $\mathbf{P}(k-1)$ ด้านขวาของสมการที่ (7.9) แสดงได้ดังสมการที่ (7.11)

$$\mathbf{P}(k)\mathbf{P}^{-1}(k)\mathbf{P}(k-1) = \mathbf{P}(k)\mathbf{P}^{-1}(k-1)\mathbf{P}(k-1) + \mathbf{P}(k)\mathbf{x}(k)\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)$$

$$\mathbf{P}(k-1) = \mathbf{P}(k) + \mathbf{P}(k)\mathbf{x}(k)\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1) \tag{7.11}$$

ทำการคูณ $\mathbf{x}(k)$ ในสมการที่ (7.11) จะได้ดังสมการที่ (7.12)

$$\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k) = \mathbf{P}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{P}(k)\mathbf{x}(k)\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)$$

$$\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k) = \mathbf{P}(k)\mathbf{x}(k)\left[1 + \mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right] \tag{7.12}$$

นำสมการที่ (7.12) คูณด้วย $\left[1 + \mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]^{-1}\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)$ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (7.13)

$$\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\left[1+\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]^{-1}\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)=\mathbf{P}(k)\mathbf{x}(k)\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1) \tag{7.13}$$

จากนั้นนำสมการที่ (7.13) แทนค่าลงในสมการที่ (7.11) จะได้ดังสมการที่ (7.14)

$$\mathbf{P}(k)=\mathbf{P}(k-1)-\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\left[1+\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]^{-1}\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1) \tag{7.14}$$

จากสมการที่ (7.14) กำหนดให้ $\mathbf{g}(k)=\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\left[1+\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]^{-1}$ โดย $\mathbf{g}(k)$ สามารถหาได้ดังสมการที่ (7.15)

$$\mathbf{g}(k)=\left[\mathbf{P}(k)\mathbf{P}^{-1}(k)\right]\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\left[1+\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]^{-1}$$

$$=\mathbf{P}(k)\underbrace{\left[\mathbf{P}^{-1}(k-1)+\mathbf{x}(k)\mathbf{x}^T(k)\right]}_{(7.9)}\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\left[1+\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]^{-1}$$

$$=\mathbf{P}(k)\left[\mathbf{x}(k)+\mathbf{x}(k)\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]\left[1+\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]^{-1}$$

$$=\mathbf{P}(k)\mathbf{x}(k)\left[1+\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]\left[1+\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]^{-1}$$

$$\mathbf{g}(k)=\mathbf{P}(k)\mathbf{x}(k) \tag{7.15}$$

สมการเวียนเกิดสำหรับอัปเดตค่าพารามิเตอร์ $\hat{\mathbf{a}}(k)$ ในสมการที่ (7.7) สามารถหาได้โดยใช้บทตั้งเมตริกซ์ผกผัน (matrix inversion lemma) โดยการแทนค่า $\mathbf{P}(k)$ ด้วยสมการที่ (7.14) และแทนค่า $\mathbf{b}(k)$ ด้วยสมการที่ (7.10) ดังนั้นสมการเวียนเกิดสำหรับอัปเดตค่าพารามิเตอร์ $\hat{\mathbf{a}}(k)$ สามารถแสดงได้ ดังสมการที่ (7.16)

$$\hat{\mathbf{a}}(k)=\left\{\mathbf{P}(k-1)-\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\left[1+\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]^{-1}\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\right\}$$
$$\left\{\mathbf{b}(k-1)+\mathbf{x}(k)y(k)\right\}$$

$$= \underbrace{\mathbf{P}(k-1)\mathbf{b}(k-1)}_{(7.7)} + \mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)y(k) - \mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)$$
$$\left[1+\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]^{-1}\mathbf{x}^T(k)\underbrace{\mathbf{P}(k-1)\mathbf{b}(k-1)}_{(7.7)} - \mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)$$
$$\left[1+\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]^{-1}\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)y(k)$$

$$= \hat{\mathbf{a}}(k-1) + \mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)y(k) - \mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\left[1+\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]^{-1}$$
$$\mathbf{x}^T(k)\hat{\mathbf{a}}(k-1) - \mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\left[1+\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]^{-1}$$
$$\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)y(k)$$

$$= \hat{\mathbf{a}}(k-1) - \mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\left[1+\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]^{-1}\mathbf{x}^T(k)\hat{\mathbf{a}}(k-1)$$
$$+\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)y(k) - \mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\left[1+\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]^{-1}$$
$$\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)y(k)$$

$$= \hat{\mathbf{a}}(k-1) - \mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\left[1+\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]^{-1}$$
$$\begin{Bmatrix} \mathbf{x}^T(k)\hat{\mathbf{a}}(k-1) - \left[1+\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]y(k) \\ +\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)y(k) \end{Bmatrix}$$

$$= \hat{\mathbf{a}}(k-1) - \mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\left[1+\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]^{-1}$$
$$\begin{Bmatrix} \mathbf{x}^T(k)\hat{\mathbf{a}}(k-1) - y(k) - \mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)y(k) \\ +\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)y(k) \end{Bmatrix}$$
$$= \hat{\mathbf{a}}(k-1) - \mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\left[1+\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]^{-1}$$
$$\left[\mathbf{x}^T(k)\hat{\mathbf{a}}(k-1) - y(k)\right]$$

$$= \hat{\mathbf{a}}(k-1) - \mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\left[1+\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]^{-1}\mathbf{x}^T(k)\hat{\mathbf{a}}(k-1)$$
$$+\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\left[1+\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]^{-1}y(k)$$

ดังนั้น $\hat{\mathbf{a}}(k) = \hat{\mathbf{a}}(k-1) + \mathbf{g}(k)\left[y(k) - \mathbf{x}^T(k)\hat{\mathbf{a}}(k-1)\right]$ (7.16)

โดยที่ $\mathbf{g}(k) = \mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\left[1+\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]^{-1}$

จากการพิจารณาค่า $\mathbf{g}(k)$ ร่วมกับสมการที่ (7.14) และ (7.16) จะได้สมการหลักของอัลกอริทึม DRLS ดังสมการ (7.17) ถึง (7.19)

$$\hat{\mathbf{a}}(k) = \hat{\mathbf{a}}(k-1)+\mathbf{g}(k)\left[y(k)-\mathbf{x}^T(k)\hat{\mathbf{a}}(k-1)\right] \tag{7.17}$$

$$\mathbf{g}(k) = \mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\left[1+\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{x}(k)\right]^{-1} \tag{7.18}$$

$$\mathbf{P}(k) = \mathbf{P}(k-1)-\mathbf{g}(k)\mathbf{x}^T(k)\mathbf{P}(k-1) \tag{7.19}$$

จากสมการ (7.17) ถึง (7.19) สามารถแสดงขนาดของเมตริกซ์ในสมการ DRLS ได้ดังตารางที่ 7.1 โดยในตารางดังกล่าวจะแสดงขนาดของพารามิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

ตารางที่ 7.1 ขนาดของเมตริกซ์ในสมการ DRLS

สัญลักษณ์	ขนาด	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์	ขนาด
$\mathbf{x}(k)$	$n\times 1$	$\mathbf{x}_{v_a}(k)=\begin{bmatrix} i_a(k) \\ (i_a(k)-i_a(k-1))/dt \\ i_f(k)\omega(k) \end{bmatrix}$	3×1
	$n\times 1$	$\mathbf{x}_{v_f}(k)=\begin{bmatrix} i_f(k) \\ (i_f(k)-i_f(k-1))/dt \end{bmatrix}$	2×1
	$n\times 1$	$\mathbf{x}_{T_L}(k)=\begin{bmatrix} i_f(k)i_a(k) \\ -(\omega(k)-\omega(k-1))/dt \\ -\omega(k) \end{bmatrix}$	3×1
$\mathbf{x}^T(k)$	$1\times n$	$\mathbf{x}_{v_a}^T(k)=\begin{bmatrix} i_a(k) & (i_a(k)-i_a(k-1))/dt & i_f(k)\omega(k) \end{bmatrix}$	1×3
		$\mathbf{x}_{v_f}^T(k)=\begin{bmatrix} i_f(k) & (i_f(k)-i_f(k-1))/dt \end{bmatrix}$	1×2
		$\mathbf{x}_{T_L}^T(k)=\begin{bmatrix} i_f(k)i_a(k) & -(\omega(k)-\omega(k-1))/dt & -\omega(k) \end{bmatrix}$	1×3
$y(k)$	1×1	$y_{v_a}(k)=v_a(k)$	1×1
		$y_{v_f}(k)=v_f(k)$	1×1
		$y_{T_L}(k)=T_L(k)$	1×1

ตารางที่ 7.1 ขนาดของเมตริกซ์ในสมการ DRLS (ต่อ)

สัญลักษณ์	ขนาด	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์	ขนาด
$\hat{\mathbf{a}}(k)$	$n\times 1$	$\hat{\mathbf{a}}_{v_a}(k)=\begin{bmatrix} R_a(k) \\ L_a(k) \\ K_v(k) \end{bmatrix}$	3×1
		$\hat{\mathbf{a}}_{v_f}(k)=\begin{bmatrix} R_f(k) \\ L_f(k) \end{bmatrix}$	2×1
		$\hat{\mathbf{a}}_{T_L}(k)=\begin{bmatrix} K_t(k) \\ J(k) \\ B(k) \end{bmatrix}$	3×1
$\mathbf{g}(k)$	$n\times 1$	$\mathbf{g}_{v_a}(k)=\begin{bmatrix} g(k)_{11} \\ g(k)_{21} \\ g(k)_{31} \end{bmatrix}$	3×1
		$\mathbf{g}_{v_f}(k)=\begin{bmatrix} g(k)_{11} \\ g(k)_{21} \end{bmatrix}$	2×1
		$\mathbf{g}_{T_L}(k)=\begin{bmatrix} g(k)_{11} \\ g(k)_{21} \\ g(k)_{31} \end{bmatrix}$	3×1
$\mathbf{P}(k)$	$n\times n$	$\mathbf{P}_{v_a}(k)=\begin{bmatrix} P(k)_{11} & P(k)_{12} & P(k)_{13} \\ P(k)_{21} & P(k)_{22} & P(k)_{23} \\ P(k)_{31} & P(k)_{32} & P(k)_{33} \end{bmatrix}$	3×3
		$\mathbf{P}_{v_f}(k)=\begin{bmatrix} P(k)_{11} & P(k)_{12} \\ P(k)_{21} & P(k)_{22} \end{bmatrix}$	2×2
$\mathbf{P}(k)$	$n\times n$	$\mathbf{P}_{T_L}(k)=\begin{bmatrix} P(k)_{11} & P(k)_{12} & P(k)_{13} \\ P(k)_{21} & P(k)_{22} & P(k)_{23} \\ P(k)_{31} & P(k)_{32} & P(k)_{33} \end{bmatrix}$	3×3

7.3 ขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยอัลกอริทึมกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นแบบเวียนเกิดเชิงกำหนด

การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยอัลกอริทึม DRLS สามารถนำมาใช้ประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ โดยสภาวะการทำงานของมอเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงมีผลทำให้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงด้วย จึงเรียกการประมาณค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวว่า การประมาณค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์มีผลต่อการหาค่ากระแสสนาม

สำหรับการประหยัดพลังงาน ด้วยเหตุนี้ จึงต้องประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์แบบออนไลน์ โดยใช้อัลกอริทึม DRLS เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการหาค่ากระแสสนามสำหรับการประหยัดพลังงาน โดยอัลกอริทึม DRLS สำหรับการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

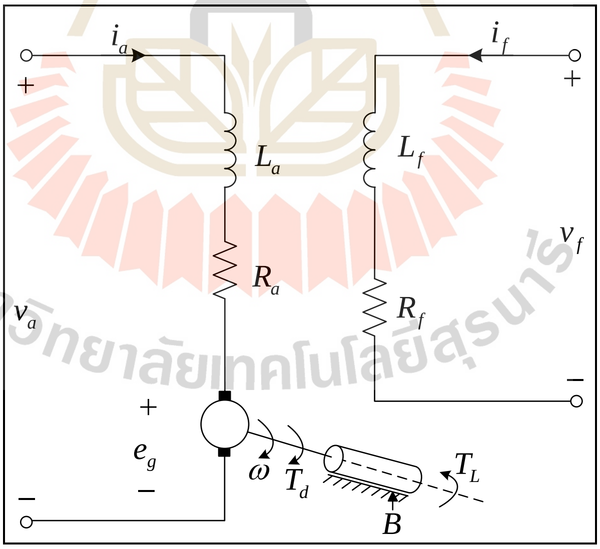
ขั้นตอนที่ 1 พิจารณาความสัมพันธ์ของสมการมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ดังรูปที่ 7.1

พิจารณาทางฝั่งอาร์เมเจอร์ ได้ดังสมการที่ (7.20)

$$v_a = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_v i_f \omega \tag{7.20}$$

พิจารณาทางฝั่งสนาม ได้ดังสมการที่ (7.21)

$$v_f = i_f R_f + L_f \frac{di_f}{dt} \tag{7.21}$$



รูปที่ 7.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

พิจารณาความสัมพันธ์ทางการหมุน ได้ดังสมการที่ (7.22)

$$T_L = K_t i_f i_a - J\frac{d\omega}{dt} - B\omega \tag{7.22}$$

ขั้นตอนที่ 2 จัดรูปสมการที่ (7.20) ถึง (7.22) ให้อยู่ในรูปของสมการที่ (7.3) จะได้ความสัมพันธ์ของสมการ แสดงได้ดังสมการที่ (7.23) ถึง (7.25) ตามลำดับ

$$[v_a] = \begin{bmatrix} i_a & \frac{di_a}{dt} & i_f\omega \end{bmatrix}\begin{bmatrix} R_a \\ L_a \\ K_v \end{bmatrix} \tag{7.23}$$

$$[v_f] = \begin{bmatrix} i_f & \frac{di_f}{dt} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} R_f \\ L_f \end{bmatrix} \tag{7.24}$$

$$[T_L] = \begin{bmatrix} i_f i_a & -\frac{d\omega}{dt} & -\omega \end{bmatrix}\begin{bmatrix} K_t \\ J \\ B \end{bmatrix} \tag{7.25}$$

ขั้นตอนที่ 3 เข้าสู่กระบวนการคำนวณของอัลกอริทึม DRLS ซึ่งพารามิเตอร์ที่ต้องการประมาณค่า ($\hat{\mathbf{a}}(k)$) ประกอบด้วย R_a, L_a, K_v, R_f, L_f, K_t, J และ B เริ่มต้นโปรแกรมการประมาณค่าพารามิเตอร์บนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET - EASY MEGA 1280 (บอร์ดการคำนวณของอัลกอริทึม DRLS และการประหยัดพลังงาน : CPU #2) ด้วยการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของพารามิเตอร์ที่ต้องการประมาณค่า ($\hat{\mathbf{a}}(0)$) จากค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของ และ $\mathbf{P}(0) = r\mathbf{I}$ โดยที่ r คือ เลขจำนวนจริงที่ได้จากการสุ่มค่า และ $\mathbf{I}$ คือ เมตริกซ์เอกลักษณ์ ซึ่งค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของมอเตอร์สามารถหาได้จากการวัดและการคำนวณแสดงไว้ในบทที่ 3 และค่า r ได้จากการสุ่มค่าโดยใช้แนวทางจากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตร่วมกับการทดสอบลองผิดลองถูก สามารถแสดงค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นดังกล่าว ได้ดังตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
R_a	8.8 Ω
L_a	148.15 mH
K_v	2.71 V·s/A·rad

ตารางที่ 7.2 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
R_f	$654\ \Omega$
L_f	9.308 H
K_t	$2.71\ \mathrm{N\cdot m/A^2}$
J	$4.527\times10^{-6}\ \mathrm{kg\cdot m^2}$
B	$1.1798\times10^{-3}\ \mathrm{N\cdot m\cdot s/rad}$
$\mathbf{P}(0)$	$1\times10^{-3}\times\mathbf{I}$

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าที่พิจารณา ได้แก่ v_a, v_f, i_a, i_f, T_L และ ω เพื่อใช้ป้อนให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม DRLS

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่าอัตราขยายของอัลกอริทึม DRLS โดยใช้สมการ (7.18) ได้ดังนี้

$$\mathbf{g}_{v_a}(k)=\mathbf{P}_{v_a}(k-1)\mathbf{x}_{v_a}(k)\left[1+\mathbf{x}_{v_a}{}^T(k)\mathbf{P}_{v_a}(k-1)\mathbf{x}_{v_a}(k)\right]^{-1}$$

$$\mathbf{g}_{v_f}(k)=\mathbf{P}_{v_f}(k-1)\mathbf{x}_{v_f}(k)\left[1+\mathbf{x}_{v_f}{}^T(k)\mathbf{P}_{v_f}(k-1)\mathbf{x}_{v_f}(k)\right]^{-1}$$

$$\mathbf{g}_{T_L}(k)=\mathbf{P}_{T_L}(k-1)\mathbf{x}_{T_L}(k)\left[1+\mathbf{x}_{T_L}{}^T(k)\mathbf{P}_{T_L}(k-1)\mathbf{x}_{T_L}(k)\right]^{-1}$$

ขั้นตอนที่ 6 อัปเดตค่าพารามิเตอร์ด้วยสมการ (7.17) ได้ดังนี้

$$\hat{\mathbf{a}}_{v_a}(k)=\hat{\mathbf{a}}_{v_a}(k-1)+\mathbf{g}_{v_a}(k)\left[y_{v_a}(k)-\mathbf{x}_{v_a}{}^T(k)\hat{\mathbf{a}}_{v_a}(k-1)\right]$$

$$\hat{\mathbf{a}}_{v_f}(k)=\hat{\mathbf{a}}_{v_f}(k-1)+\mathbf{g}_{v_f}(k)\left[y_{v_f}(k)-\mathbf{x}_{v_f}{}^T(k)\hat{\mathbf{a}}_{v_f}(k-1)\right]$$

$$\hat{\mathbf{a}}_{T_L}(k)=\hat{\mathbf{a}}_{T_L}(k-1)+\mathbf{g}_{T_L}(k)\left[y_{T_L}(k)-\mathbf{x}_{T_L}{}^T(k)\hat{\mathbf{a}}_{T_L}(k-1)\right]$$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณค่าเมตริกซ์ความแปรปรวนของ $\hat{\mathbf{a}}_{v_a}(k)$, $\hat{\mathbf{a}}_{v_f}(k)$ และ $\hat{\mathbf{a}}_{T_L}(k)$ ด้วยสมการ (7.19) ได้ดังนี้

$$\mathbf{P}_{v_a}(k) = \mathbf{P}_{v_a}(k-1) - \mathbf{g}_{v_a}(k)\mathbf{x}_{v_a}{}^T(k)\mathbf{P}_{v_a}(k-1)$$

$$\mathbf{P}_{v_f}(k) = \mathbf{P}_{v_f}(k-1) - \mathbf{g}_{v_f}(k)\mathbf{x}_{v_f}{}^T(k)\mathbf{P}_{v_f}(k-1)$$

$$\mathbf{P}_{T_L}(k) = \mathbf{P}_{T_L}(k-1) - \mathbf{g}_{T_L}(k)\mathbf{x}_{T_L}{}^T(k)\mathbf{P}_{T_L}(k-1)$$

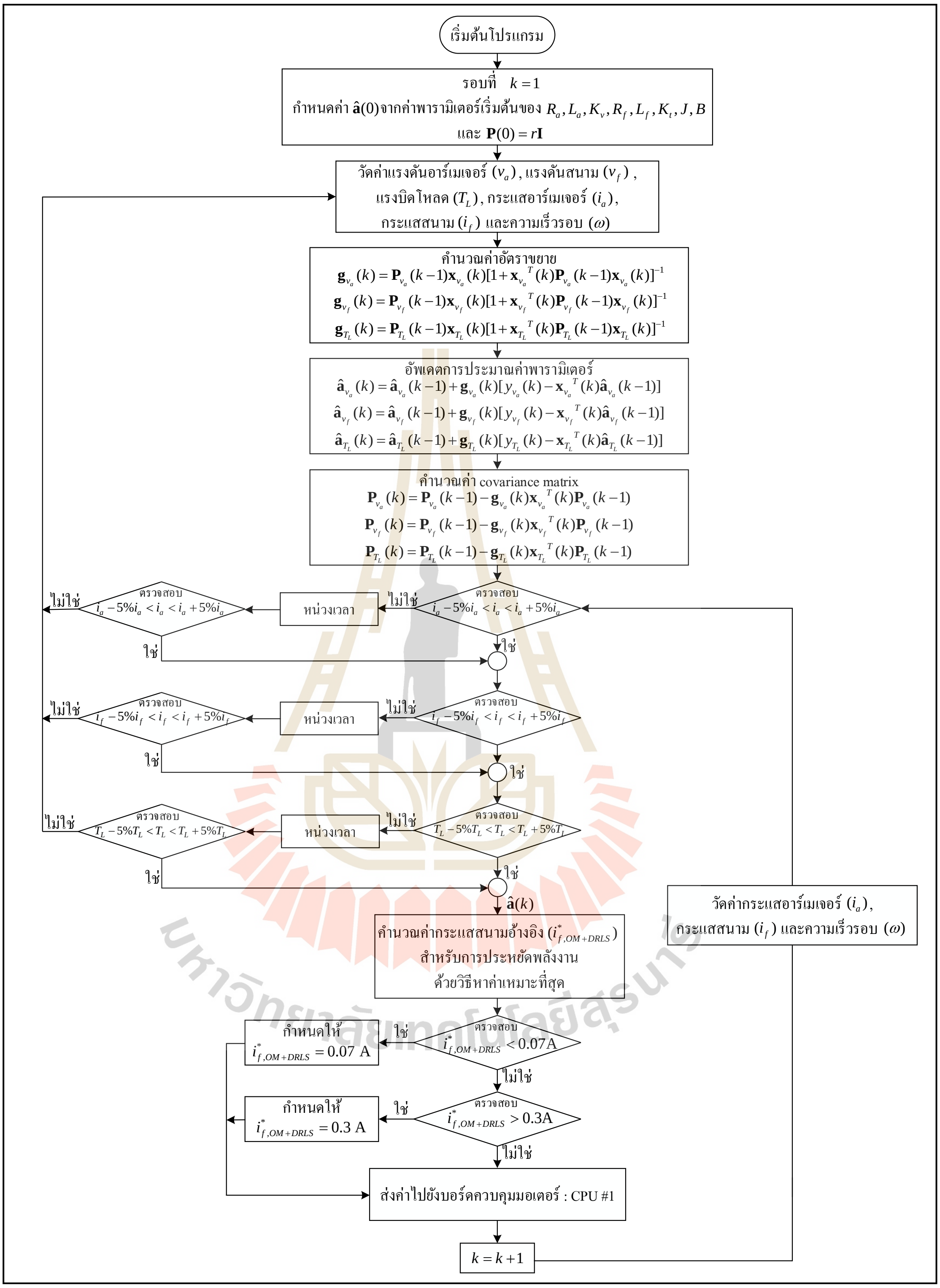
ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบค่ากระแสอาร์เมเจอร์ (i_a) ว่าอยู่ในช่วง $i_a - 5\%i_a < i_a < i_a + 5\%i_a$ หรือไม่ ถ้าใช่จะทำการตรวจสอบค่ากระแสสนามต่อไปในขั้นตอนที่ 9 ถ้าไม่ใช่จะทำการหน่วงเวลาเพื่อตรวจสอบค่ากระแสอาร์เมเจอร์อีกครั้ง ถ้าตรวจสอบแล้วพบว่าไม่ใช่จะวนกลับไปทำขั้นตอนที่ 4 อีกครั้ง แต่ถ้าใช่จะทำการตรวจสอบค่ากระแสสนามในขั้นตอนที่ 9 ต่อไป

ขั้นตอนที่ 9 ตรวจสอบค่ากระแสสนาม (i_f) ว่าอยู่ในช่วง $i_f - 5\%i_f < i_f < i_f + 5\%i_f$ หรือไม่ ถ้าใช่จะทำการตรวจสอบค่าความเร็วรอบต่อไปในขั้นตอนที่ 10 ถ้าไม่ใช่จะทำการหน่วงเวลาเพื่อตรวจสอบค่ากระแสสนามอีกครั้ง ถ้าตรวจสอบแล้วพบว่าไม่ใช่จะวนกลับไปทำขั้นตอนที่ 4 อีกครั้ง แต่ถ้าใช่จะทำการตรวจสอบค่าความเร็วรอบต่อไปในขั้นตอนที่ 10

ขั้นตอนที่ 10 ตรวจสอบค่าความเร็วรอบ (ω) ว่าอยู่ในช่วง $\omega - 5\%\omega < \omega < \omega + 5\%\omega$ หรือไม่ ถ้าใช่จะทำการส่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยอัลกอริทึม DRLS $\hat{\mathbf{a}}_{v_a}(k)$, $\hat{\mathbf{a}}_{v_f}(k)$ และ $\hat{\mathbf{a}}_{T_L}(k)$ ไปยังขั้นตอนที่ 11 ถ้าไม่ใช่จะทำการหน่วงเวลาเพื่อตรวจสอบค่าความเร็วรอบอีกครั้ง ถ้าตรวจสอบแล้วพบว่าไม่ใช่จะวนกลับไปทำขั้นตอนที่ 4 อีกครั้ง แต่ถ้าใช่จะทำการส่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปยังขั้นตอนที่ 11

ขั้นตอนที่ 11 คำนวณค่ากระแสสนามอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับการประหยัดพลังงาน $(i^*_{f,OM+DRLS})$ ด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดซึ่งอธิบายไว้ในบทที่ 6 เมื่อได้ค่ากระแส $i^*_{f,OM+DRLS}$ จะทำการตรวจสอบค่ากระแสอ้างอิงดังกล่าวก่อนส่งค่าไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (บอร์ดควบคุมมอเตอร์ : CPU #1) โดยค่ากระแส $i^*_{f,OM+DRLS}$ จะต้องอยู่ในช่วงขอบเขตที่กำหนด คือ ต้องไม่เกินค่าพิกัดของมอเตอร์ (0.3 A) และต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 0.07 A เพราะค่ากระแส $i^*_{f,OM+DRLS}$ มีความสัมพันธ์กับแรงบิดของมอเตอร์ตามสมการที่ (3.6) ในบทที่ 3 ถ้าค่ากระแสดังกล่าวมีต่ำกว่า 0.07 A จะส่งผลให้มอเตอร์ไม่มีแรงบิดมากพอที่จะขับโหลดตามที่ต้องการได้

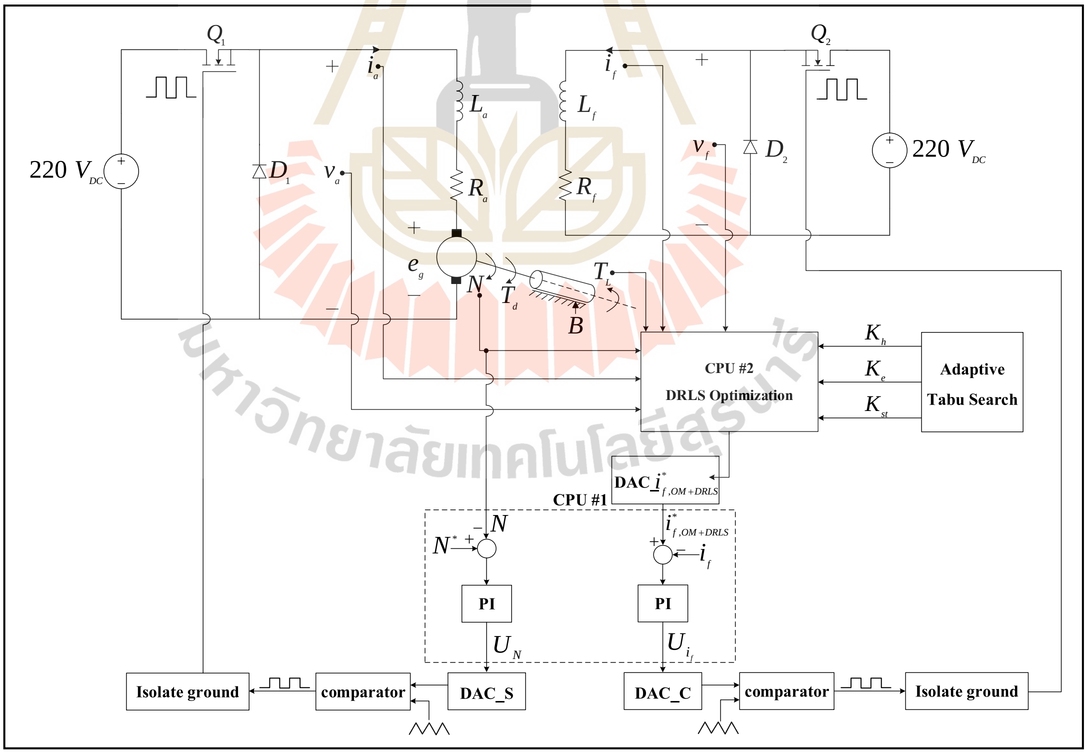
การอธิบายขั้นตอนการทำงานสามารถแสดงได้ดังแผนภาพการทำงานของบอร์ดการคำนวณด้วยอัลกอริทึม DRLS และการประหยัดพลังงาน (CPU #2) ดังรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.2 แผนภาพการทำงานของบอร์ดการคำนวณด้วยอัลกอริทึม DRLS และการประหยัดพลังงาน (CPU #2)

7.4 การทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงานที่มีการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยอัลกอริทึม DRLS

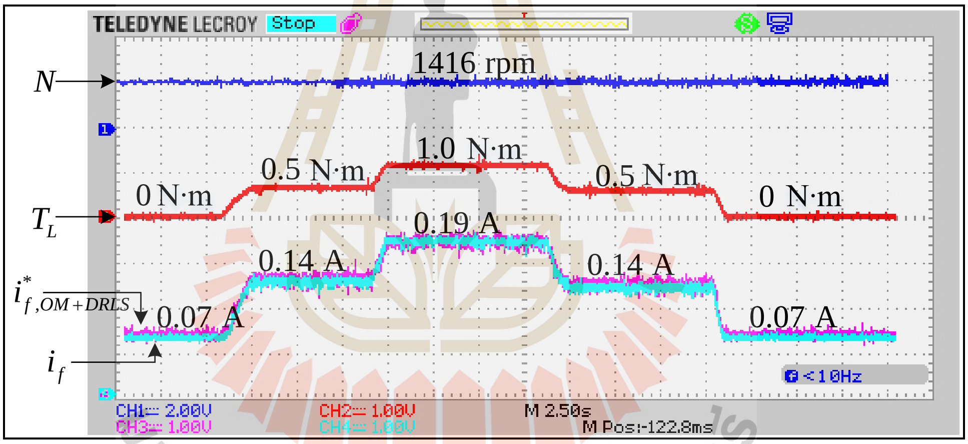
การทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงานที่มีการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยอัลกอริทึม DRLS (Optimization method with DRLS : OM+DRLS) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.3 โดยการทดสอบดังกล่าวจะทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณค่ากระแสสนามอ้างอิง ($i^*_{f,OM+DRLS}$) ด้วยอัลกอริทึม DRLS บน CPU #2 เพื่อส่งค่าพารามิเตอร์ให้การคำนวณด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน สำหรับเป็นค่ากระแสสนามอ้างอิงให้กับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยการคำนวณจะใช้ค่าความเร็วรอบและแรงบิดโหลดที่ป้อนให้กับโปรแกรมเป็นข้อมูลในการคำนวณการประหยัดพลังงาน จากนั้น การทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธี OM+DRLS จะทำงานเช่นเดียวกับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงานเนื่องจากใช้ระบบขับเคลื่อนชุดเดียวกัน ตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.3 บทที่ 6



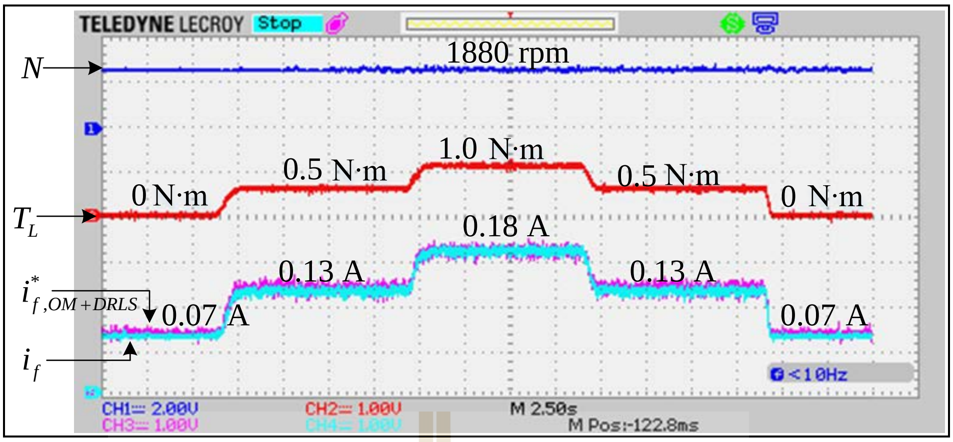
รูปที่ 7.3 ระบบชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น
สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีหา OM+DRLS

7.4.1 ผลการทดสอบการคำนวณค่ากระแสสนามด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงานที่มีการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยอัลกอริทึม DRLS

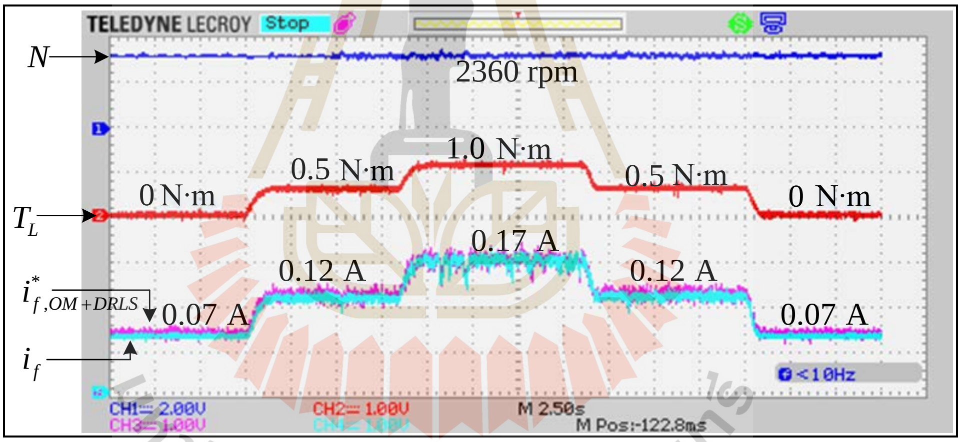
การทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธี OM+DRLS แบ่งการทดสอบออกเป็น 6 กรณี คือ กรณีที่ 1 คงที่ค่าความเร็วรอบที่ 1416 rpm ปรับแรงบิดโหลดที่ 0 0.5 และ 1.0 N·m กรณีที่ 2 คงที่ค่าความเร็วรอบที่ 1880 rpm ปรับแรงบิดโหลดที่ 0 0.5 และ 1.0 N·m กรณีที่ 3 คงที่ค่าความเร็วรอบที่ 2360 rpm ปรับแรงบิดโหลดที่ 0 0.5 และ 1.0 N·m กรณีที่ 4 คงที่ค่าแรงบิดโหลดที่ 0 N·m ปรับความเร็วรอบที่ 1416 1880 และ 2360 rpm กรณีที่ 5 คงที่ค่าแรงบิดโหลดที่ 0.5 N·m ปรับความเร็วรอบที่ 1416 1880 และ 2360 rpm และกรณีที่ 6 คงที่ค่าแรงบิดโหลดที่ 1.0 N·m ปรับความเร็วรอบที่ 1416 1880 และ 2360 rpm สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.4 ถึง 7.9 ตามลำดับ



รูปที่ 7.4 ผลการทดสอบการคำนวณค่ากระแสสนามด้วยวิธี OM+DRLS กรณีที่ 1 คงที่ค่าความเร็วรอบที่ 1416 rpm ปรับแรงบิดโหลดที่ 0 0.5และ 1.0 N·m

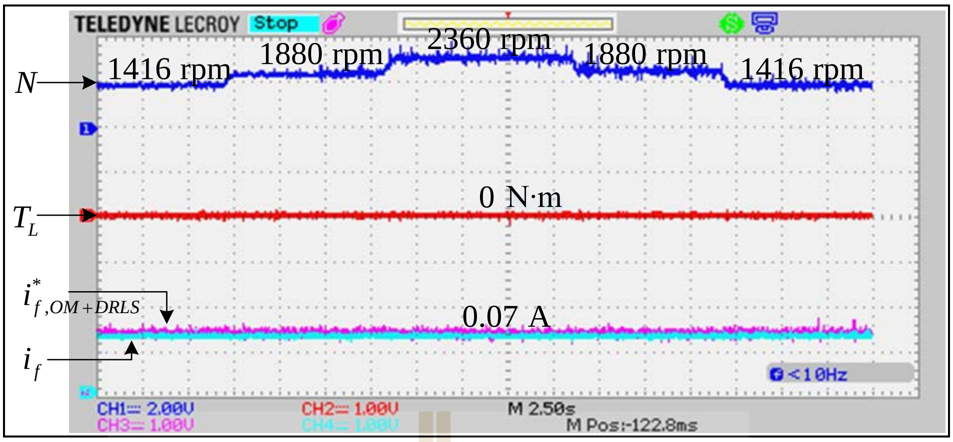


รูปที่ 7.5 ผลการทดสอบการคำนวณค่ากระแสสนามด้วยวิธี OM+DRLS กรณีที่ 2 คงที่ค่าความเร็วรอบที่ 1880 rpm ปรับแรงบิดโหลดที่ 0 0.5 และ 1.0 N·m

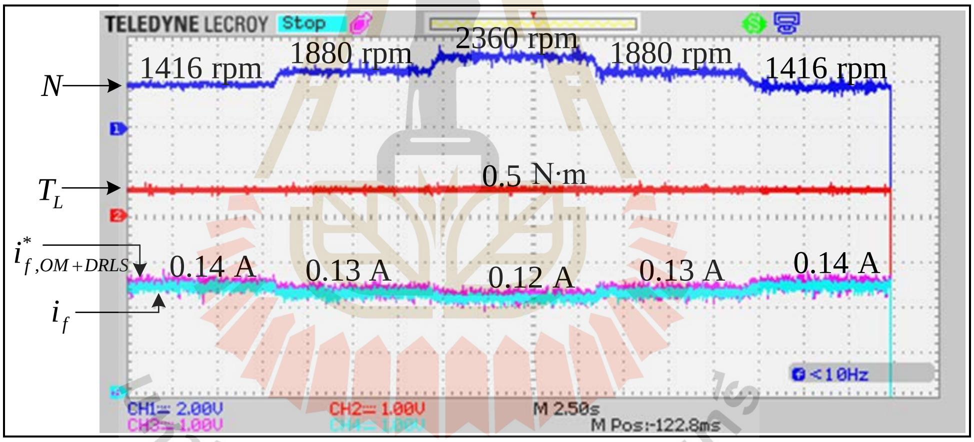


รูปที่ 7.6 ผลการทดสอบการคำนวณค่ากระแสสนามด้วยวิธี OM+DRLS กรณีที่ 3 คงที่ค่าความเร็วรอบที่ 2360 rpm ปรับแรงบิดโหลดที่ 0 0.5 และ 1.0 N·m

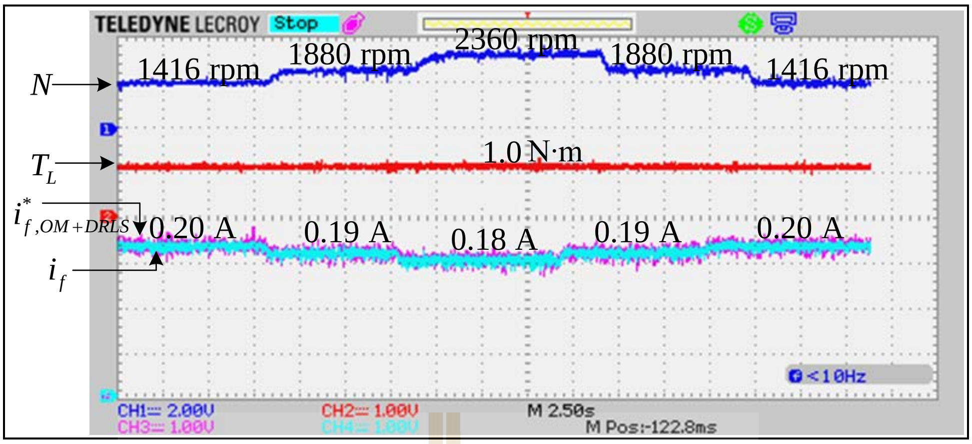
ผลการทดสอบการคำนวณค่ากระแสสนามด้วยวิธี OM+DRLS ในกรณีที่ 1 ถึง 3 จากรูปที่ 7.4 ถึง 7.6 สังเกตได้ว่า เมื่อคงที่ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ไว้ที่ 1416 1880 และ 2360 rpm และทำการเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดเป็น 0 0.5 และ 1.0 N·m และเปลี่ยนกลับมาที่แรงบิดโหลด 0.5 และ 0 N·m ค่ากระแส $i^*_{f,OM+DRLS}$ จากการทดสอบทั้ง 3 กรณี จะถูกคำนวณใหม่สำหรับการประหยัดพลังงานและตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมค่ากระแสสนามจริง (i_f) ให้มีลักษณะคล้อยตามกระแส $i^*_{f,OM+DRLS}$ ได้ทุกสภาวะที่แรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 7.7 ผลการทดสอบการคำนวณค่ากระแสสนามด้วยวิธี OM+DRLS กรณีที่ 4 คงที่ค่าแรงบิดโหลดที่ 0 N·m ปรับความเร็วรอบที่ 1416 1880 และ 2360 rpm



รูปที่ 7.8 ผลการทดสอบการคำนวณค่ากระแสสนามด้วยวิธี OM+DRLS กรณีที่ 5 คงที่ค่าแรงบิดโหลดที่ 0.5 N·m ปรับความเร็วรอบที่ 1416 1880 และ 2360 rpm

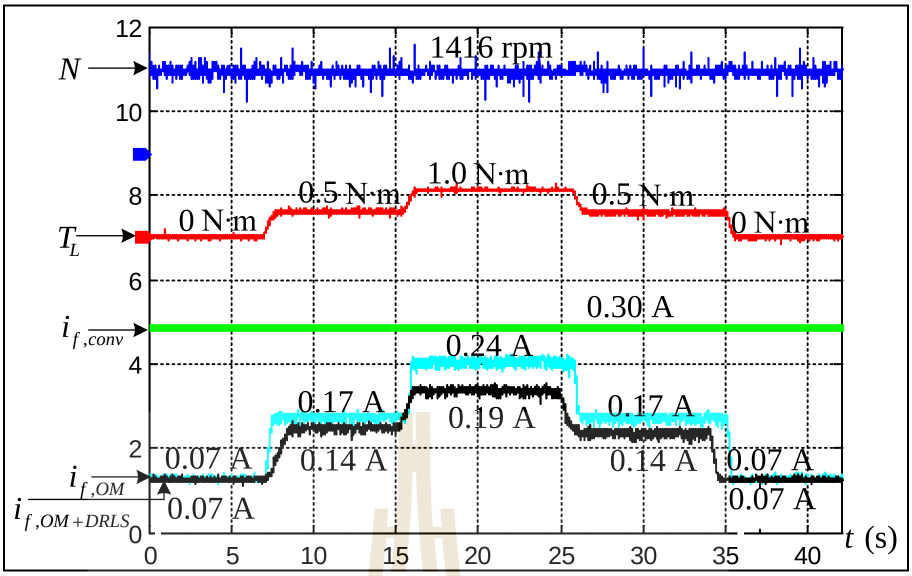


รูปที่ 7.9 ผลการทดสอบการคำนวณค่ากระแสสนามด้วยวิธี OM+DRLS กรณีที่ 6 คงที่ค่าแรงบิดโหลดที่ 1.0 N·m ปรับความเร็วรอบที่ 1416 1880 และ 2360 rpm

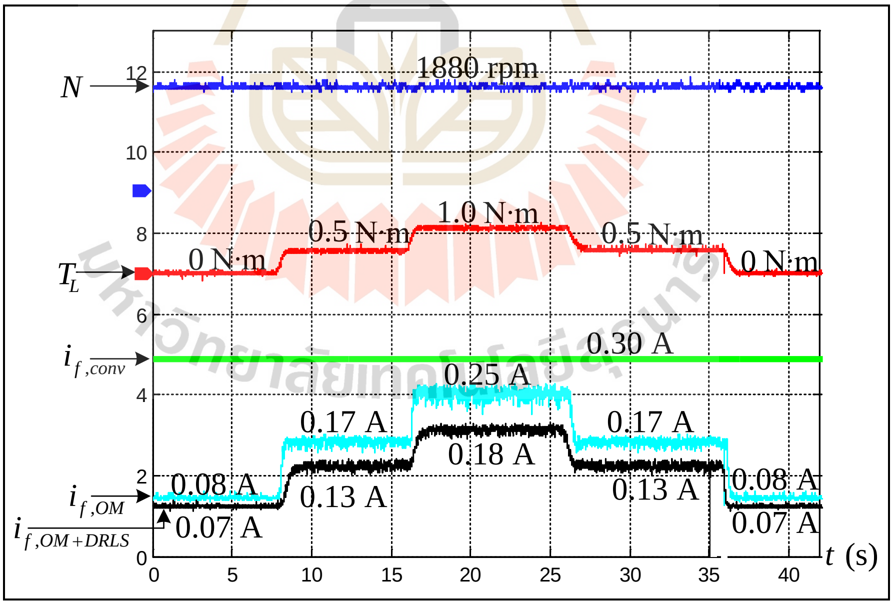
จากผลการทดสอบในรูปที่ 7.7 ถึง 7.9 สังเกตได้ว่า เมื่อแรงบิดโหลดมีค่าคงที่ และมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วรอบจาก 1416 1880 และ 2360 rpm และเปลี่ยนกลับมาที่ความเร็วรอบ 1880 และ 1416 rpm ค่ากระแส $i^*_{f,OM+DRLS}$ จะถูกคำนวณใหม่สำหรับการประหยัดพลังงานและตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมกระแส i_f ให้มีลักษณะคล้อยตามกระแส $i^*_{f,OM+DRLS}$ ได้ทุกสภาวะที่ความเร็วรอบมีการเปลี่ยนแปลง และจากผลการทดสอบในกรณีที่ 4 ถึงกรณีที่ 6 นั้น เมื่อค่าแรงบิดโหลดคงที่ สังเกตได้ว่า การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบจะส่งผลให้ค่ากระแส $i^*_{f,OM+DRLS}$ เปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ซึ่งต่างจากการทดสอบในกรณีที่ 1 ถึง 3

7.4.2 ผลการเปรียบเทียบค่ากระแสสนามที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

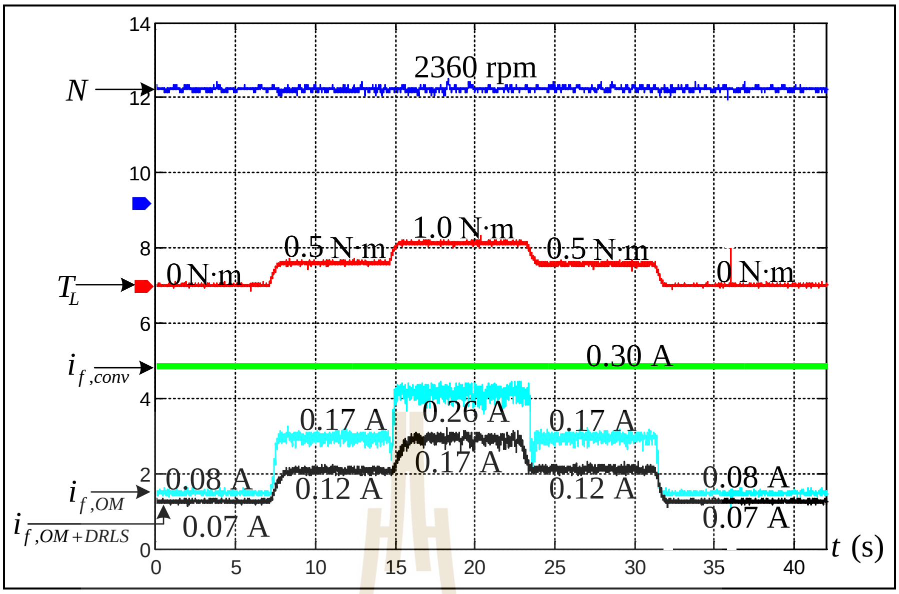
การเปรียบเทียบค่ากระแสสนามที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นจะทำการเปรียบเทียบทั้ง 3 วิธี ประกอบด้วย วิธีดั้งเดิม ($i_{f,conv}$) วิธี OM ($i_{f,OM}$) และวิธี OM+DRLS ($i_{f,OM+DRLS}$) ค่ากระแสสนามที่ได้จากการทดสอบทั้ง 3 วิธี แบ่งการเปรียบเทียบออกเป็น 6 กรณี ในกรณีที่ 1 ถึง 3 ทำการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่สภาวะคงที่ค่าความเร็วรอบที่ 1416 1880 และ 2360 rpm ตามลำดับ โดยทำการเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดจาก 0 0.5 และ 1.0 N·m และเปลี่ยนกลับมาที่แรงบิดโหลด 0.5 และ 0 N·m สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.10 ถึง 7.12



รูปที่ 7.10 ผลการเปรียบเทียบค่ากระแสสนามที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ กรณีที่ 1 คงที่ค่าความเร็วรอบ 1416 rpm ปรับแรงบิดโหลดที่ 0 0.5 และ 1.0 N·m



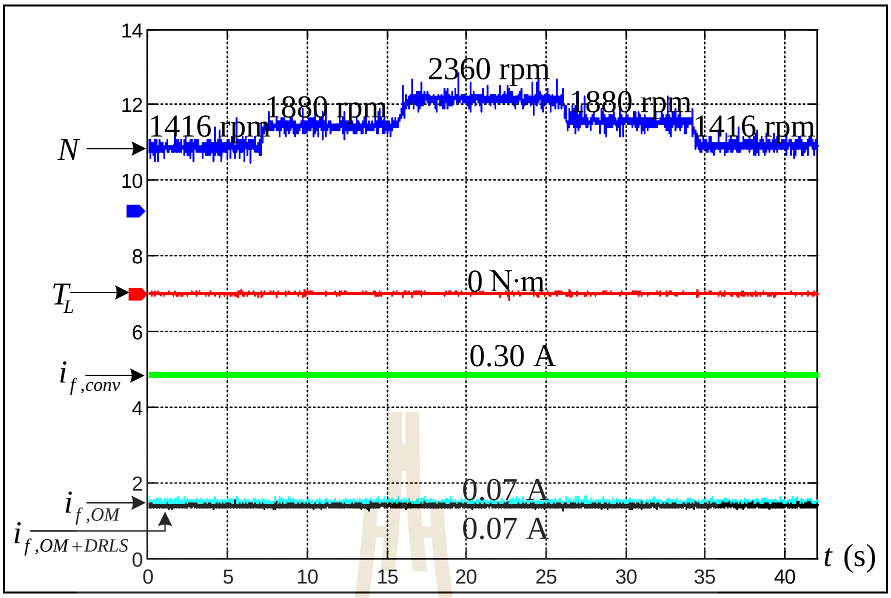
รูปที่ 7.11 ผลการเปรียบเทียบค่ากระแสสนามที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ กรณีที่ 2 คงที่ค่าความเร็วรอบ 1880 rpm ปรับแรงบิดโหลดที่ 0 0.5 และ 1.0 N·m



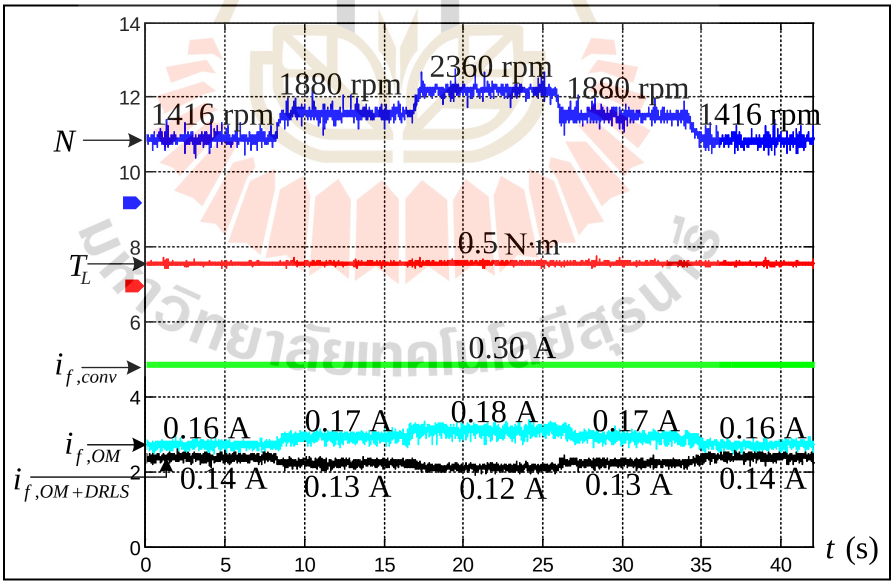
รูปที่ 7.12 ผลการเปรียบเทียบค่ากระแสสนามที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ กรณีที่ 3 คงที่ค่าความเร็วรอบ 2360 rpm ปรับแรงบิดโหลดที่ 0 0.5 และ 1.0 N·m

จากผลการทดสอบในรูปที่ 7.10 ถึง 7.12 สังเกตได้ว่าค่ากระแส $i_{f,conv}$ มีค่าคงที่ที่ 0.3 A เนื่องจากการทดสอบมีค่าความเร็วรอบสูงสุดเท่ากับพิกัด (2360 rpm) ดังนั้น ค่ากระแสสนามจากการทดสอบด้วยวิธีดั้งเดิมจึงคงที่ที่ 0.3 A ไม่ว่าจะเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดไปที่ค่าใด ส่วนค่ากระแส $i_{f,OM}$ และ $i_{f,OM+DRLS}$ เมื่อแรงบิดโหลดมีการเปลี่ยนแปลง พบว่า ค่ากระแสสนามทั้งสองวิธีจะเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขที่เปลี่ยนไป นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาทั้งสามกรณี พบว่า ค่ากระแส $i_{f,OM+DRLS}$ มีค่าน้อยที่สุด

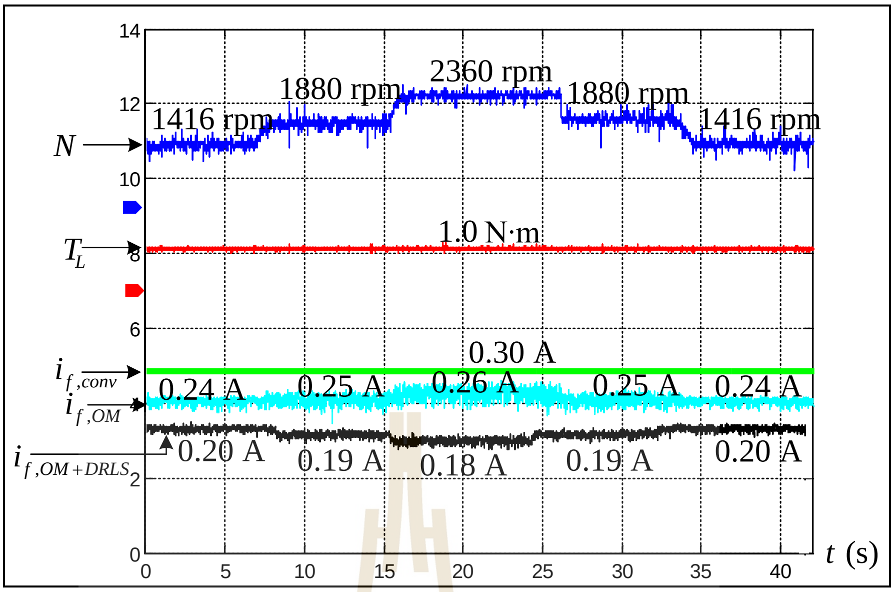
กรณีที่ 4 ถึง 6 ทำการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่สภาวะคงที่ค่าแรงบิดโหลดที่ 0 0.5 และ 1.0 N·m ตามลำดับ และทำการปรับความเร็วรอบจาก 1416 1880 และ 2360 rpm และเปลี่ยนกลับมาที่ความเร็วรอบ 1880 และ 1416 rpm สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.13 ถึง 7.15



รูปที่ 7.13 ผลการเปรียบเทียบค่ากระแสสนามที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ กรณีที่ 4 คงที่ค่าแรงบิดโหลดที่ 0 N·m ปรับความเร็วรอบที่ 1416 1880 และ 2360 rpm



รูปที่ 7.14 ผลการเปรียบเทียบค่ากระแสสนามที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ กรณีที่ 5 คงที่ค่าแรงบิดโหลดที่ 0.5 N·m ปรับความเร็วรอบที่ 1416 1880 และ 2360 rpm



รูปที่ 7.15 ผลการเปรียบเทียบค่ากระแสสนามที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ กรณีที่ 6 คงที่ค่าแรงบิดโหลดที่ 1.0 N·m ปรับความเร็วรอบที่ 1416 1880 และ 2360 rpm

จากผลการเปรียบเทียบค่ากระแสสนามในรูปที่ 7.13 ถึง 7.15 สังเกตได้ว่า ค่ากระแส $i_{f,conv}$ มีค่า 0.3 A คงที่ตลอดการทดสอบ เนื่องจาก การทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์มีค่าความเร็วรอบสูงสุดเท่ากับพิกัด ส่วนค่ากระแส $i_{f,OM}$ และ $i_{f,OM+DRLS}$ จะเปลี่ยนแปลงตามสภาวะที่เปลี่ยนไป จากรูปที่ 7.13 พบว่า ค่ากระแส $i_{f,OM}$ และ $i_{f,OM+DRLS}$ มีค่าน้อยกว่ากระแส $i_{f,conv}$ นอกจากนี้ ในรูปที่ 7.14 และ 7.15 จะเห็นได้ว่า ค่ากระแส $i_{f,OM+DRLS}$ มีค่าน้อยกว่าค่ากระแส $i_{f,conv}$ และ $i_{f,OM}$

7.4.3 ผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงานที่มีการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยอัลกอริทึม DRLS

การทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นในบทนี้ จะเปรียบเทียบผลการทดสอบ 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 เปรียบเทียบผลการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมกับวิธี OM+DRLS และกรณีที่ 2 เปรียบเทียบการขับเคลื่อนมอเตอร์ทั้ง 3 วิธี ประกอบด้วย วิธีดั้งเดิม วิธี OM และวิธี OM+DRLS ดังนี้

- ผลเปรียบเทียบการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ระหว่างวิธีดั้งเดิมกับวิธี OM+DRLS

การทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธี OM+DRLS จะทำการทดสอบที่สภาวะเดียวกันกับการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม โดยการคำนวณการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ด้วยวิธี OM+DRLS ทำการคำนวณค่ากำลังงานอินพุตเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ากำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนด้วยวิธีดั้งเดิม ซึ่งการเปรียบเทียบจะคำนวณเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานจากสมการที่ (7.26) สำหรับผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานระหว่างวิธีดั้งเดิมกับวิธี OM+DRLS สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.3

$$\text{เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน} = \frac{P_{in,conv} - P_{in,OM+DRLS}}{P_{in,conv}} \times 100\% \qquad (7.26)$$

โดยที่ $P_{in,conv}$ คือ กำลังงานอินพุตที่อาศัยการขับเคลื่อนด้วยวิธีดั้งเดิม (W)

$P_{in,OM+DRLS}$ คือ กำลังงานอินพุตที่อาศัยขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธี OM+DRLS (W)

ตารางที่ 7.3 ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานระหว่างการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมกับวิธี OM+DRLS

Speed		T_L (N·m)	วิธีดั้งเดิม		วิธี OM+DRLS		เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
%	N (rpm)		$i_{f,conv}$ (A)	$P_{in,conv}$ (W)	$i_{f,OM+DRLS}$ (A)	$P_{in,OM+DRLS}$ (W)	
50	1180	0.1	0.30	123.53	0.07	14.78	88.03
60	1416		0.30	139.13	0.07	17.14	87.68
70	1652		0.30	155.24	0.07	19.48	87.45
80	1880		0.30	174.30	0.07	21.75	87.52
90	2124		0.30	195.21	0.07	24.19	87.61
100	2360		0.30	217.95	0.07	26.55	87.82
110	2596		0.29	228.85	0.07	28.93	87.36
120	2832		0.20	222.46	0.07	30.65	86.22
50	1180	0.2	0.30	133.74	0.09	29.73	77.77
60	1416		0.30	151.28	0.08	34.41	77.25
70	1652		0.30	170.98	0.08	39.11	77.13
80	1880		0.30	190.91	0.08	43.64	77.14

ตารางที่ 7.3 ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานระหว่างการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมกับวิธี OM+DRLS (ต่อ)

Speed		T_L	วิธีดั้งเดิม		วิธี OM+DRLS		เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
%	N (rpm)	(N·m)	$i_{f,conv}$ (A)	$P_{in,conv}$ (W)	$i_{f,OM+DRLS}$ (A)	$P_{in,OM+DRLS}$ (W)	
90	2124	0.2	0.30	214.66	0.08	48.50	77.41
100	2360		0.30	239.10	0.08	53.22	77.74
110	2596		0.27	247.22	0.07	57.40	76.78
120	2832		0.19	253.47	0.07	61.23	75.84
50	1180	0.3	0.30	145.04	0.11	44.73	69.16
60	1416		0.30	164.61	0.10	51.76	68.56
70	1652		0.30	185.67	0.10	58.77	68.35
80	1880		0.30	208.18	0.10	65.57	68.51
90	2124		0.30	239.91	0.10	72.86	69.63
100	2360		0.30	261.90	0.09	79.95	69.47
110	2596		0.26	268.05	0.08	85.89	67.96
120	2832		0.16	304.76	0.07	91.53	69.97
50	1180	0.4	0.30	155.73	0.12	59.77	61.62
60	1416		0.30	177.94	0.12	69.13	61.15
70	1652		0.30	202.38	0.12	78.49	61.22
80	1880		0.30	227.42	0.11	87.54	61.51
90	2124		0.30	256.13	0.11	97.26	62.03
100	2360		0.30	286.50	0.11	106.71	62.76
110	2596		0.24	294.52	0.09	114.26	61.21
120	2832		0.15	358.24	0.07	121.82	66.00
50	1180	0.5	0.30	168.47	0.14	74.86	55.57
60	1416		0.30	193.22	0.14	86.55	55.21
70	1652		0.30	219.58	0.13	98.25	55.26
80	1880		0.30	246.87	0.13	109.56	55.62
90	2124		0.30	278.17	0.12	121.71	56.25

ตารางที่ 7.3 ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานระหว่างการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมกับวิธี OM+DRLS (ต่อ)

Speed		T_L	วิธีดั้งเดิม		วิธี OM+DRLS		เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
%	N (rpm)	(N·m)	$i_{f,conv}$ (A)	$P_{in,conv}$ (W)	$i_{f,OM+DRLS}$ (A)	$P_{in,OM+DRLS}$ (W)	
100	2360	0.5	0.30	311.26	0.12	133.49	57.11
110	2596		0.20	319.07	0.10	142.48	55.35
120	2832		0.17	362.53	0.08	152.83	57.84
50	1180	0.6	0.30	179.76	0.15	89.99	49.94
60	1416		0.30	205.56	0.15	104.01	49.40
70	1652		0.30	232.92	0.14	118.04	49.32
80	1880		0.30	260.57	0.14	131.60	49.49
90	2124		0.30	291.55	0.14	146.17	49.86
100	2360		0.30	321.43	0.13	160.32	50.12
110	2596		0.25	332.38	0.11	171.96	48.26
120	2832		0.18	377.54	0.09	183.88	51.30
50	1180	0.7	0.30	190.31	0.17	105.15	44.75
60	1416		0.30	217.28	0.16	121.50	44.08
70	1652		0.30	249.34	0.16	137.85	44.71
80	1880		0.30	278.10	0.15	153.68	44.74
90	2124		0.30	312.33	0.15	170.69	45.35
100	2360		0.30	350.67	0.14	187.20	46.62
110	2596		0.23	372.55	0.12	200.05	46.30
120	2832		0.16	457.11	0.09	213.61	53.27
50	1180	0.8	0.30	204.34	0.18	120.42	41.07
60	1416		0.30	233.52	0.17	139.03	40.46
70	1652		0.30	266.92	0.17	157.72	40.91
80	1880		0.30	301.44	0.16	175.75	41.70
90	2124		0.30	335.20	0.16	195.23	41.76
100	2360		0.30	368.95	0.15	214.10	41.97

ตารางที่ 7.3 ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานระหว่างการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมกับวิธี OM+DRLS (ต่อ)

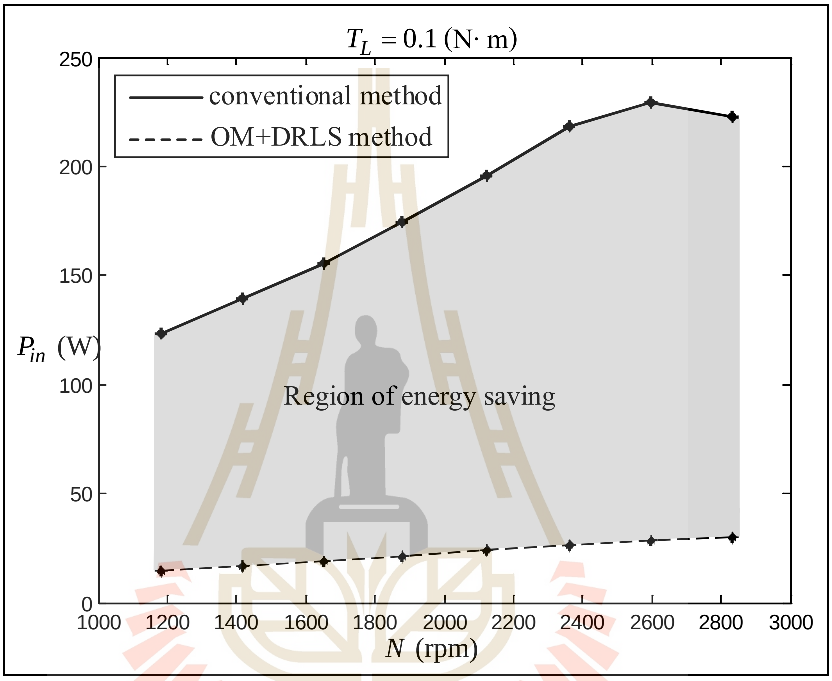
Speed		T_L	วิธีดั้งเดิม		วิธี OM+DRLS		เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
%	N (rpm)	(N·m)	$i_{f,conv}$ (A)	$P_{in,conv}$ (W)	$i_{f,OM+DRLS}$ (A)	$P_{in,OM+DRLS}$ (W)	
110	2596	0.8	0.24	394.42	0.13	229.12	41.91
120	2832		0.17	467.24	0.11	244.96	47.57
50	1180	0.9	0.30	212.68	0.19	135.60	36.24
60	1416		0.30	243.81	0.18	156.66	35.74
70	1652		0.30	279.24	0.18	178.92	35.93
80	1880		0.30	312.82	0.18	199.09	36.36
90	2124		0.30	348.08	0.17	221.01	36.51
100	2360		0.30	386.91	0.17	242.09	37.43
110	2596		0.24	418.64	0.14	257.97	38.38
50	1180	1.0	0.30	231.05	0.20	150.86	34.71
60	1416		0.30	267.21	0.19	174.21	34.81
70	1652		0.30	305.78	0.19	197.55	35.40
80	1880		0.30	343.74	0.18	220.17	35.95
90	2124		0.30	391.74	0.18	244.44	37.60
100	2360		0.30	441.09	0.17	268.00	39.24
110	2596		0.20	510.02	0.13	284.10	44.30
50	1180	1.1	0.30	246.88	0.21	166.16	32.70
60	1416		0.30	287.21	0.20	191.83	33.21
70	1652		0.30	327.72	0.20	217.46	33.64
80	1880		0.30	370.42	0.19	242.40	34.56
90	2124		0.30	420.38	0.19	269.08	35.99
100	2360		0.30	467.65	0.18	295.01	36.92
50	1180	1.2	0.30	260.52	0.21	180.74	30.62
60	1416		0.30	302.29	0.21	209.52	30.69
70	1652		0.30	346.23	0.21	237.54	31.39

ตารางที่ 7.3 ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานระหว่างการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมกับวิธี OM+DRLS (ต่อ)

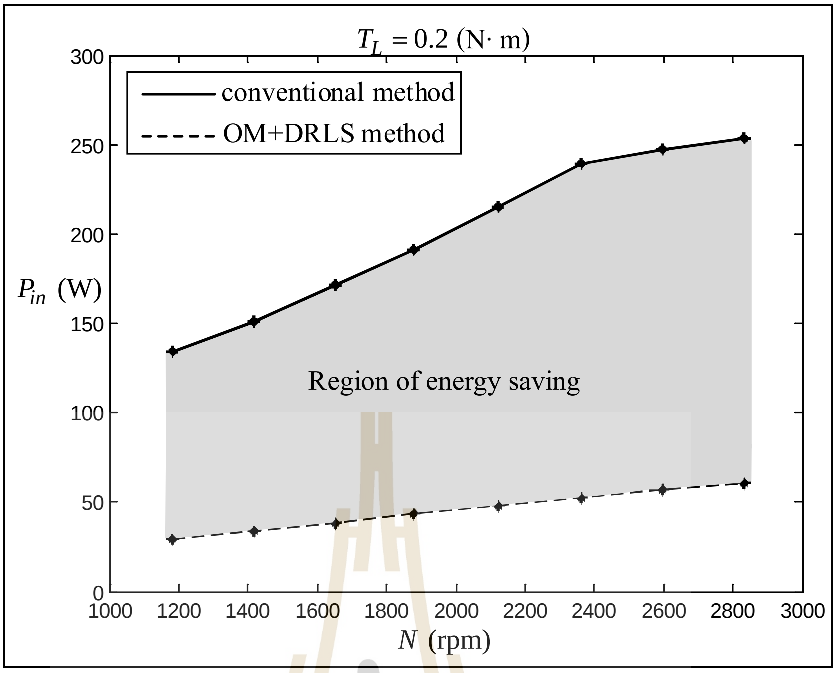
Speed		T_L	วิธีดั้งเดิม		วิธี OM+DRLS		เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
%	N (rpm)	(N·m)	$i_{f,conv}$ (A)	$P_{in,conv}$ (W)	$i_{f,OM+DRLS}$ (A)	$P_{in,OM+DRLS}$ (W)	
70	1652	1.2	0.30	346.23	0.21	237.54	31.39
80	1880		0.30	387.61	0.20	264.66	31.72
90	2124		0.30	443.30	0.19	293.76	33.73
100	2360		0.30	493.10	0.19	322.03	34.69
50	1180	1.3	0.30	279.39	0.23	196.87	29.53
60	1416		0.30	313.46	0.23	229.02	26.94
70	1652		0.30	359.01	0.21	257.55	28.26
80	1880		0.30	404.78	0.21	289.94	29.11
90	2124		0.30	461.81	0.20	318.48	31.04
100	2360		0.30	505.72	0.20	349.11	30.97
50	1180	1.4	0.30	285.72	0.24	212.29	25.70
60	1416		0.30	330.74	0.23	244.94	25.94
70	1652		0.30	377.46	0.22	277.62	26.45
80	1880		0.30	418.40	0.22	309.25	26.09
90	2124		0.30	470.26	0.21	343.23	27.01

จากตารางที่ 7.3 พบว่า การขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมกับวิธี OM+DRLS มีเงื่อนไขการทดสอบที่สภาวะแรงบิดโหลด และความเร็วรอบต่าง ๆ โดยค่ากำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธี OM+DRLS มีค่าน้อยกว่ากำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม โดยเฉพาะในสภาวะที่แรงบิดโหลดต่ำ ๆ ค่ากำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนมอเตอร์ทั้งสองวิธีมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมาก แสดงถึงการประหยัดพลังงานที่มากขึ้น โดยการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธี OM+DRLS สามารถประหยัดพลังงานได้สูงสุดถึง 88.03 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในสภาวะ 50 เปอร์เซ็นต์ของโหลดเต็มพิกัดสามารถประหยัดพลังงานได้ 53.27 เปอร์เซ็นต์ ในสภาวะ 80 เปอร์เซ็นต์ของโหลดเต็มพิกัดประหยัดพลังงานได้ 34.69 เปอร์เซ็นต์ และในสภาวะโหลดเต็มพิกัดสามารถประหยัดพลังงานได้ 27.01 เปอร์เซ็นต์ และจากการคำนวณเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน

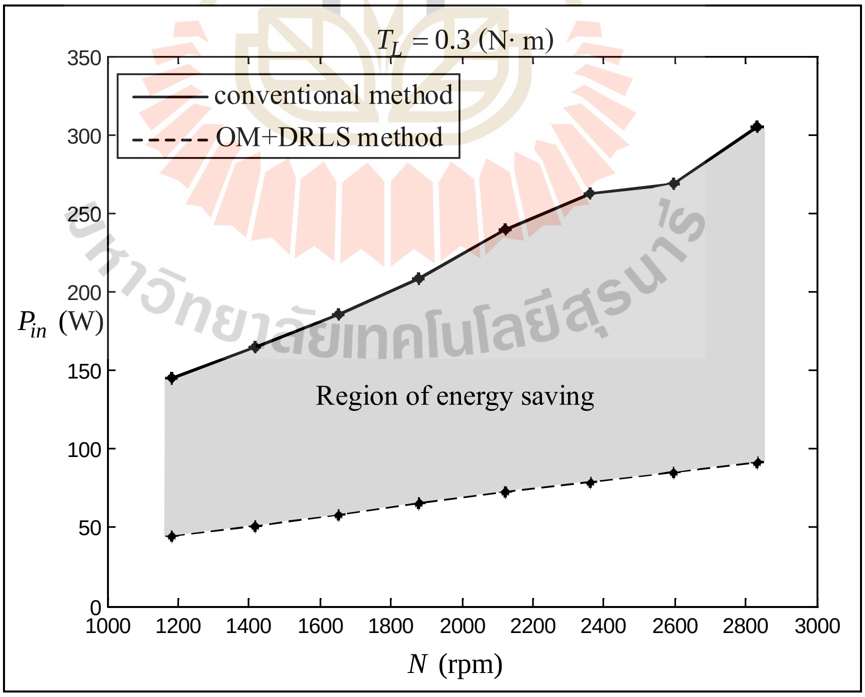
ในตารางที่ 7.3 สังเกตได้ว่า การประหยัดพลังงานด้วยการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธี OM+DRLS สามารถลดการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้มีค่าน้อยลง ส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ดังนั้น จากผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์สามารถเปรียบเทียบค่ากำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมและวิธี OM+DRLS ได้ดังรูปที่ 7.16



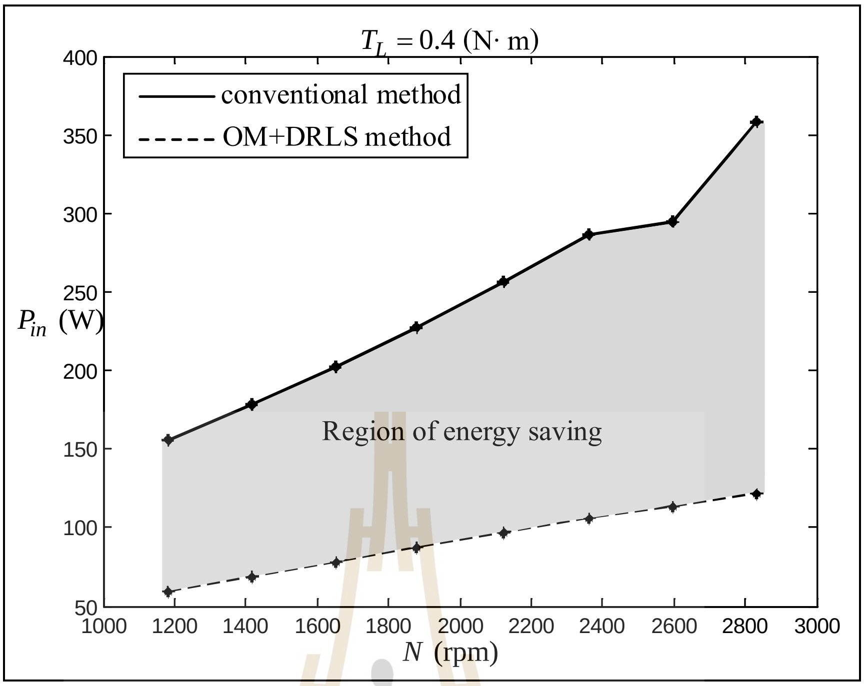
(ก) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.1 N·m



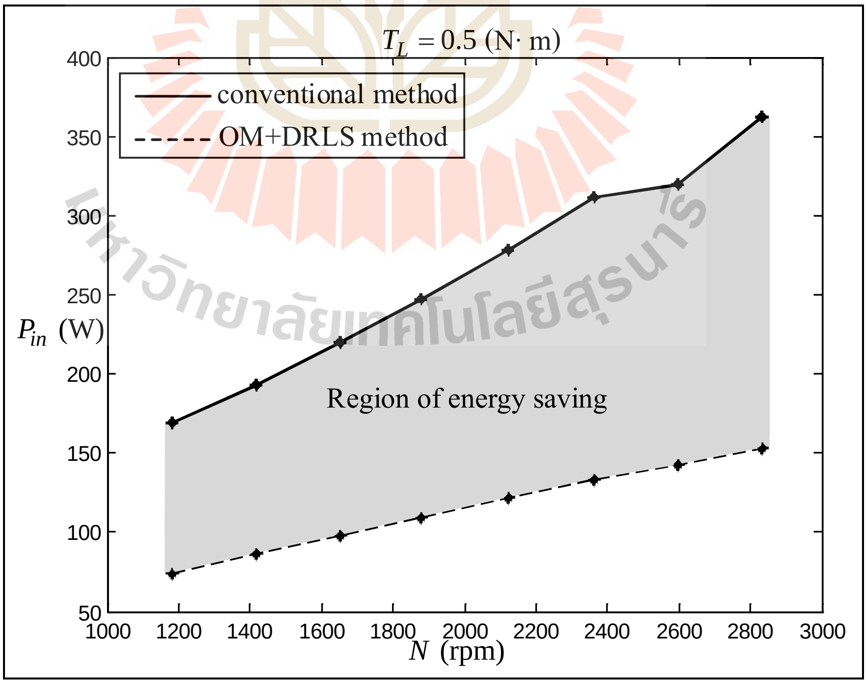
(ข) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.2 N·m



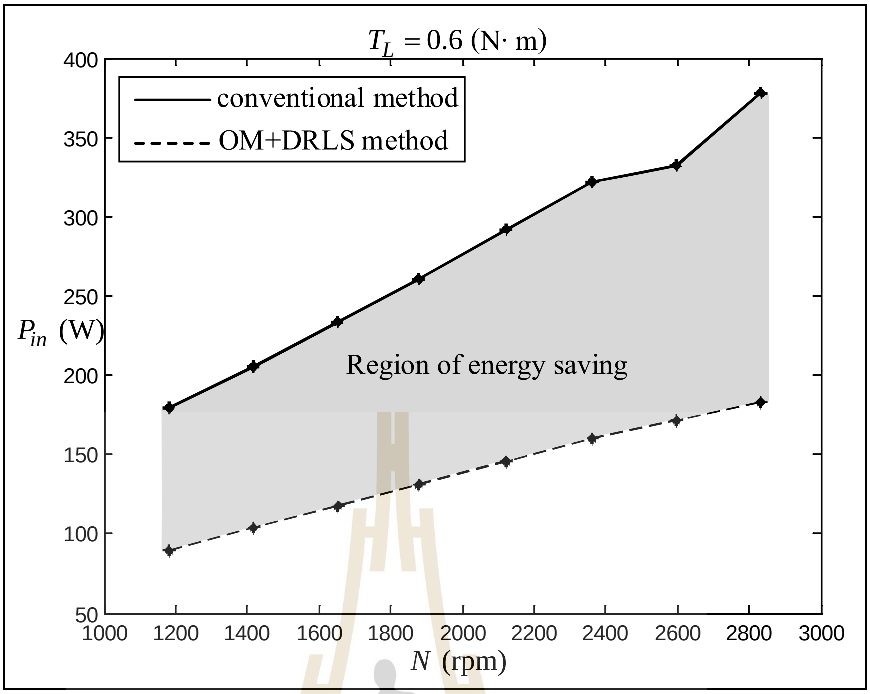
(ค) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.3 N·m



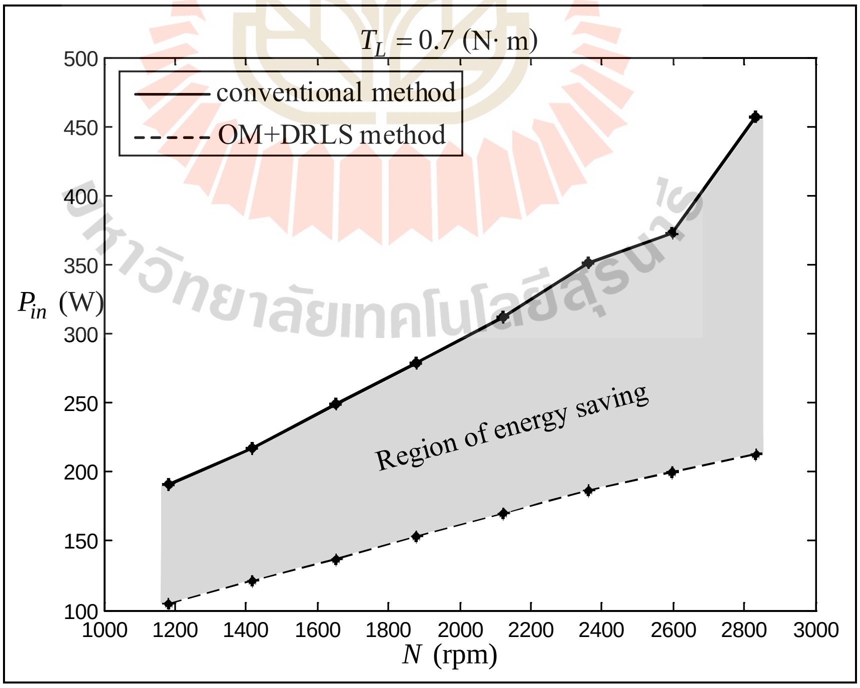
(ง) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.4 N·m



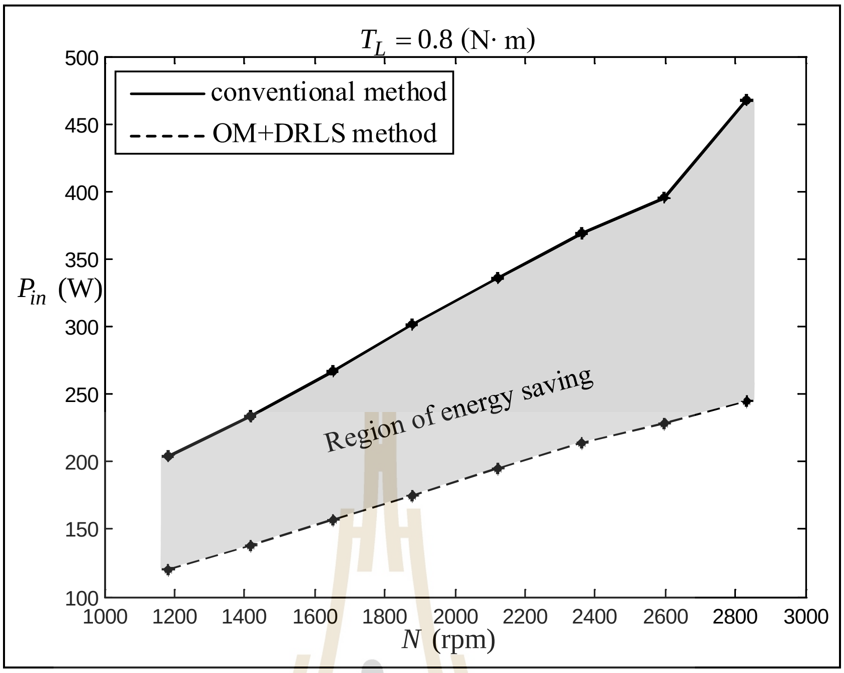
(จ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.5 N·m



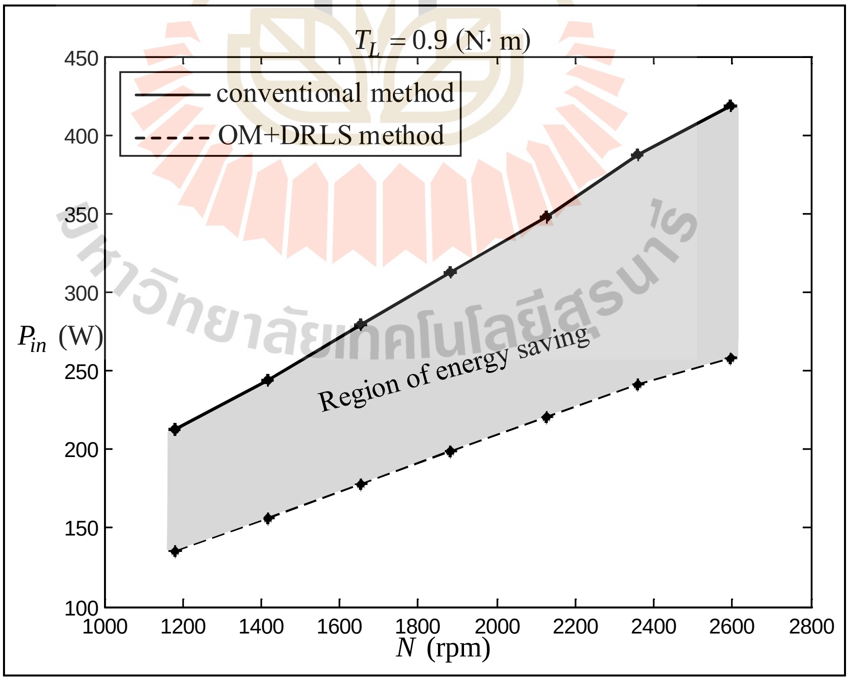
(ฉ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.6 N·m



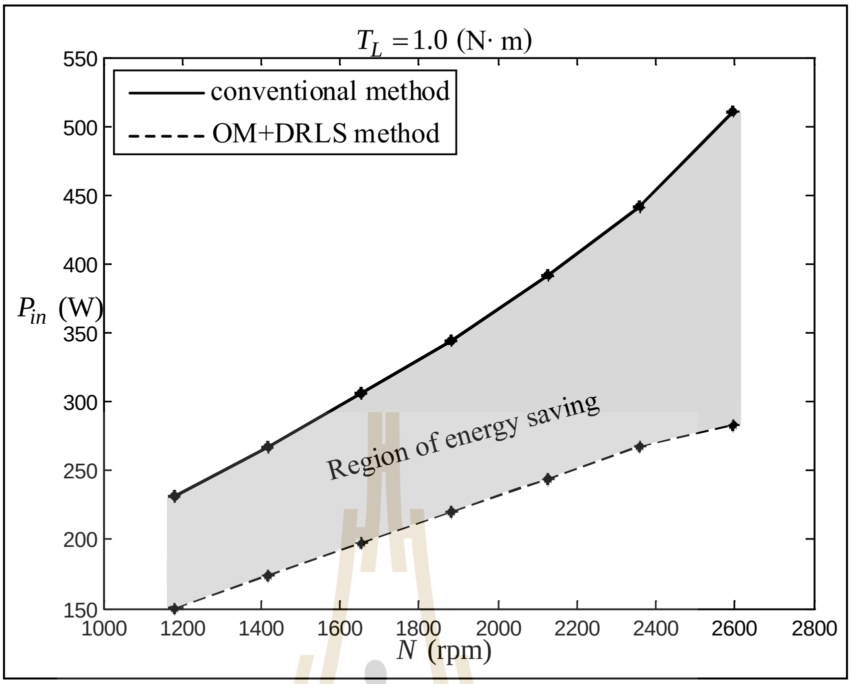
(ช) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.7 N·m



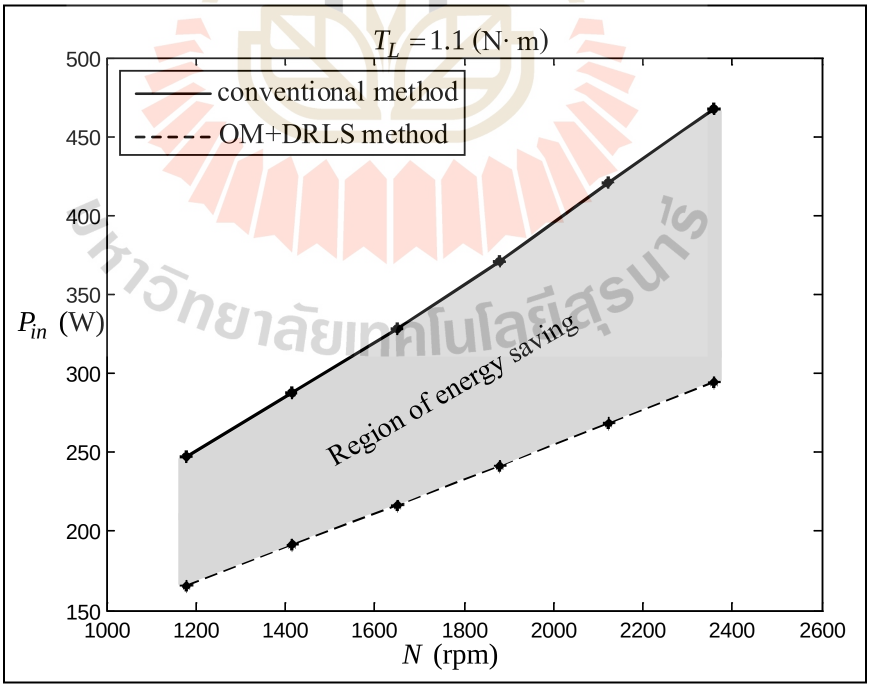
(ซ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.8 N·m



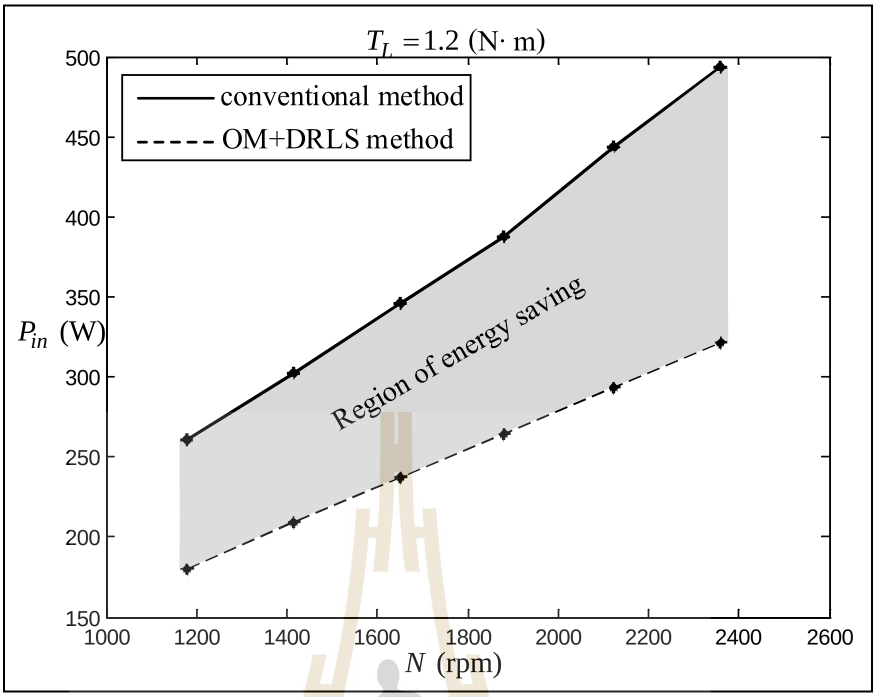
(ฌ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.9 N·m



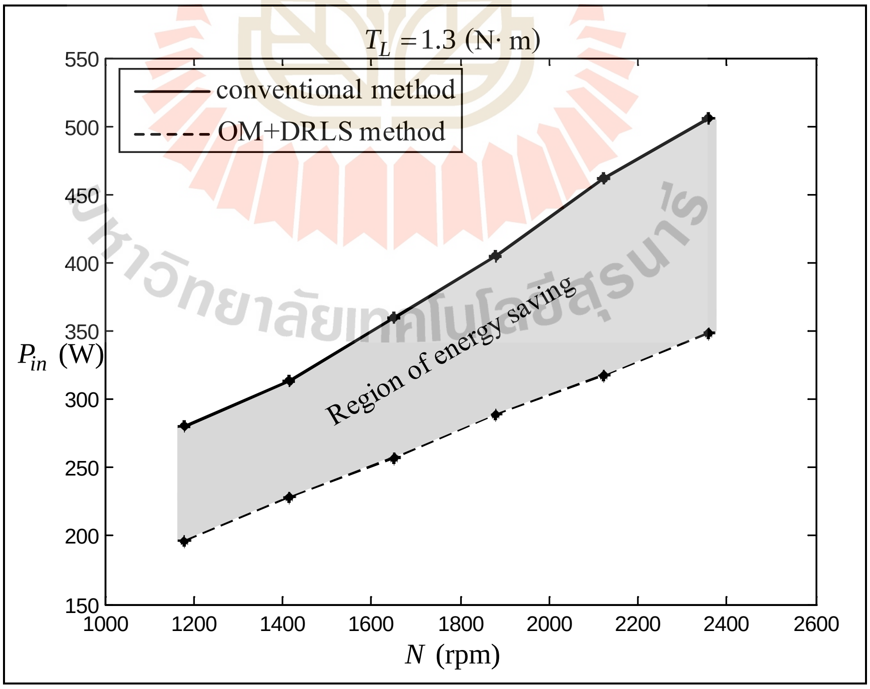
(ญ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 1.0 N·m



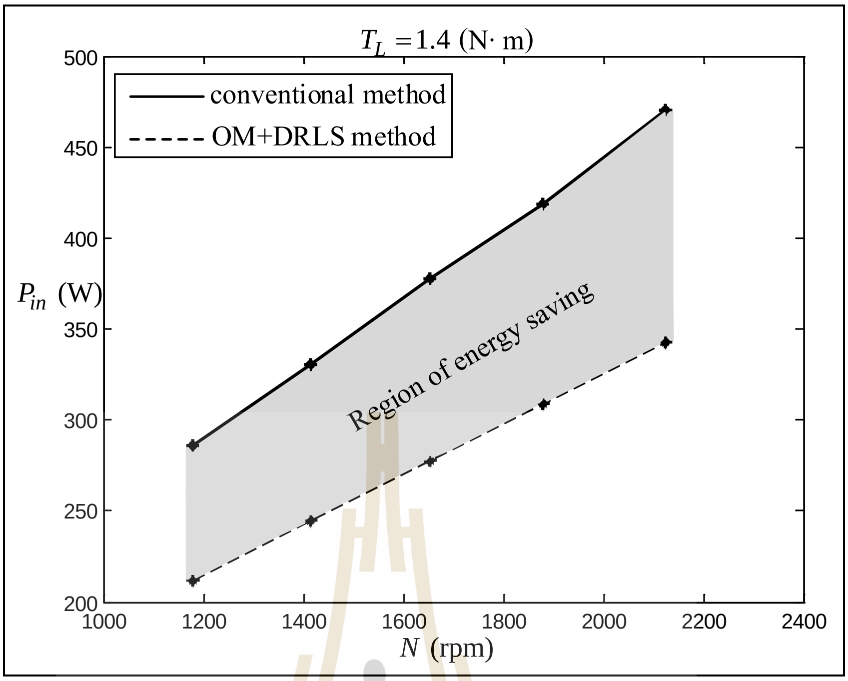
(ฎ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 1.1 N·m



(ฎ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 1.2 N·m



(ฏ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 1.3 N·m



(ฑ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 1.4 N·m

รูปที่ 7.16 ผลการเปรียบเทียบกำลังงานระหว่างการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม กับวิธี OM+DRLS

จากรูปที่ 7.16 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังงานอินพุตของวิธีดั้งเดิมกับวิธี OM+DRLS สังเกตได้ว่า พื้นที่ของการประหยัดพลังงานในช่วงที่สภาวะแรงบิดโหลดต่ำ ๆ มีพื้นที่ขนาดใหญ่ แสดงถึงการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธี OM+DRLS สามารถลดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้น้อยลง ส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ เมื่อแรงบิดโหลดเพิ่มขึ้น พื้นที่การประหยัดพลังงานจะลดลง ซึ่งหมายถึงการประหยัดพลังงานลดลงด้วย ดังนั้น จากผลการทดสอบข้างต้น สามารถแสดงให้เห็นว่า การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธี OM+DRLS สามารถประหยัดพลังงานได้ดีกว่าการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีดั้งเดิม

- ผลเปรียบเทียบการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม วิธี OM และวิธี OM+DRLS

ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบค่ากำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนมอเตอร์

ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีดั้งเดิม วิธี OM และวิธี OM+DRLS โดยผลการเปรียบเทียบกำลังงานอินพุต สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.4

ตารางที่ 7.4 ผลการเปรียบเทียบกำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม วิธี OM และวิธี OM+DRLS

Speed		T_L (N·m)	วิธีดั้งเดิม			วิธี OM			วิธี OM+DRLS		
%	N (rpm)		$i_{f,conv}$ (A)	$P_{in,conv}$ (W)	η (%)	$i_{f,OM}$ (A)	$P_{in,OM}$ (W)	η (%)	$i_{f,OM+DRLS}$ (A)	$P_{in,OM+DRLS}$ (W)	η (%)
50	1180	0.1	0.30	123.53	10.01	0.07	18.57	66.56	0.07	14.78	83.63
60	1416		0.30	139.13	10.66	0.07	21.01	70.59	0.07	17.14	86.52
70	1652		0.30	155.24	11.14	0.08	23.36	74.06	0.07	19.48	88.81
80	1880		0.30	174.30	11.30	0.08	25.70	76.61	0.07	21.75	90.53
90	2124		0.30	195.21	11.39	0.08	28.23	78.78	0.07	24.19	91.94
100	2360		0.30	217.95	11.34	0.08	30.68	80.54	0.07	26.55	93.07
110	2596		0.29	228.85	11.88	0.08	33.14	82.05	0.07	28.93	93.99
120	2832		0.20	222.46	13.33	0.08	35.62	83.27	0.07	30.65	96.77
50	1180	0.2	0.30	133.74	18.48	0.10	37.14	66.53	0.09	29.73	83.11
60	1416		0.30	151.28	19.61	0.10	42.04	70.55	0.08	34.41	86.20
70	1652		0.30	170.98	20.24	0.11	46.74	74.03	0.08	39.11	88.47
80	1880		0.30	190.91	20.62	0.11	51.33	76.70	0.08	43.64	90.22
90	2124		0.30	214.66	20.72	0.11	56.48	78.75	0.08	48.50	91.71
100	2360		0.30	239.10	20.67	0.11	61.39	80.52	0.08	53.22	92.88
110	2596		0.27	247.22	21.99	0.12	66.32	81.98	0.07	57.40	94.72
120	2832		0.19	253.47	23.40	0.12	71.21	83.29	0.07	61.23	96.86
50	1180	0.3	0.30	145.04	25.56	0.13	55.71	66.54	0.11	44.73	82.88
60	1416		0.30	164.61	27.02	0.13	63.07	70.52	0.10	51.76	85.94
70	1652		0.30	185.67	27.95	0.13	70.13	74.01	0.10	58.77	88.31
80	1880		0.30	208.18	28.37	0.13	77.16	76.54	0.10	65.57	90.07
90	2124		0.30	239.91	27.81	0.14	84.73	78.76	0.10	72.86	91.59
100	2360		0.30	261.90	28.31	0.14	92.09	80.51	0.09	79.95	92.73
110	2596		0.26	268.05	30.43	0.14	99.49	81.98	0.08	85.89	94.96
120	2832		0.16	304.76	29.19	0.15	106.93	83.20	0.07	91.53	97.20
50	1180	0.4	0.30	155.73	31.74	0.14	74.28	66.55	0.12	59.77	82.70
60	1416		0.30	177.94	33.33	0.15	84.10	70.52	0.12	69.13	85.79
70	1652		0.30	202.38	34.19	0.15	93.51	74.00	0.12	78.49	88.16
80	1880		0.30	227.42	34.63	0.16	102.89	76.54	0.11	87.54	89.96
90	2124		0.30	256.13	34.74	0.16	112.99	78.74	0.11	97.26	91.48
100	2360		0.30	286.50	34.51	0.16	122.81	80.50	0.11	106.71	92.64
110	2596		0.24	294.52	36.92	0.17	132.68	81.96	0.09	114.26	95.17

ตารางที่ 7.4 ผลการเปรียบเทียบกำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม วิธี OM และวิธี OM+DRLS (ต่อ)

Speed		T_L	วิธีดั้งเดิม			วิธี OM			วิธี OM+DRLS		
%	N (rpm)	(N·m)	$i_{f,conv}$ (A)	$P_{in,conv}$ (W)	η (%)	$i_{f,OM}$ (A)	$P_{in,OM}$ (W)	η (%)	$i_{f,OM+DRLS}$ (A)	$P_{in,OM+DRLS}$ (W)	η (%)
120	2832	0.4	0.15	358.24	33.11	0.17	142.58	83.20	0.07	121.82	97.38
50	1180	0.5	0.30	168.47	36.67	0.16	92.86	66.53	0.14	74.86	82.53
60	1416		0.30	193.22	38.37	0.17	99.57	74.46	0.14	86.55	85.66
70	1652		0.30	219.58	33.63	0.17	116.90	73.99	0.13	98.25	88.04
80	1880		0.30	246.87	39.88	0.17	128.62	76.54	0.13	109.56	89.85
90	2124		0.30	278.17	39.98	0.18	141.24	78.74	0.12	121.71	91.37
100	2360		0.30	311.26	39.70	0.18	153.53	80.49	0.12	133.49	92.57
110	2596		0.20	319.07	41.89	0.19	165.86	81.95	0.10	142.48	95.40
120	2832		0.17	362.53	40.96	0.19	178.24	83.19	0.08	152.83	97.02
50	1180	0.6	0.30	179.76	41.24	0.18	111.43	66.54	0.15	89.99	82.39
60	1416		0.30	205.56	43.28	0.18	126.16	70.52	0.15	104.01	85.54
70	1652		0.30	232.92	44.56	0.19	140.28	73.99	0.14	118.04	87.94
80	1880		0.30	260.57	45.33	0.19	154.36	76.52	0.14	131.60	89.76
90	2124		0.30	291.55	45.77	0.20	169.50	78.73	0.14	146.17	91.30
100	2360		0.30	321.43	46.13	0.20	184.23	80.49	0.13	160.32	92.49
110	2596		0.25	332.38	49.07	0.20	199.03	81.95	0.11	171.96	94.85
120	2832		0.18	377.54	47.13	0.21	213.89	83.19	0.09	183.88	96.77
50	1180	0.7	0.30	190.31	45.45	0.19	130.02	66.53	0.17	105.15	82.26
60	1416		0.30	217.28	47.77	0.20	147.19	70.52	0.16	121.50	85.43
70	1652		0.30	249.34	48.57	0.20	163.67	73.99	0.16	137.85	87.85
80	1880		0.30	278.10	49.55	0.21	180.08	76.53	0.15	153.68	89.67
90	2124		0.30	312.33	49.85	0.21	197.76	78.73	0.15	170.69	91.22
100	2360		0.30	350.67	49.33	0.22	214.95	80.48	0.14	187.20	92.41
110	2596		0.23	372.55	51.08	0.22	232.22	81.95	0.12	200.05	95.13
120	2832		0.16	457.11	45.42	0.23	249.56	83.19	0.09	213.61	97.19
50	1180	0.8	0.30	216.67	45.63	0.21	148.58	66.54	0.18	120.42	82.10
60	1416		0.30	233.52	50.80	0.21	168.22	70.52	0.18	139.03	85.33
70	1652		0.30	266.92	51.85	0.22	187.06	73.99	0.17	157.72	87.75
80	1880		0.30	301.44	52.25	0.22	205.99	76.46	0.17	175.75	89.62
90	2124		0.30	335.20	53.08	0.23	226.03	78.72	0.16	195.23	91.14
100	2360		0.30	368.95	53.59	0.23	245.67	80.48	0.16	214.10	92.34
110	2596		0.24	394.42	55.14	0.24	265.41	81.94	0.15	229.12	94.92
120	2832		0.17	467.24	50.78	0.24	285.21	83.18	0.11	244.96	96.85
50	1180	0.9	0.30	212.68	52.29	0.22	165.27	67.29	0.19	135.60	82.01

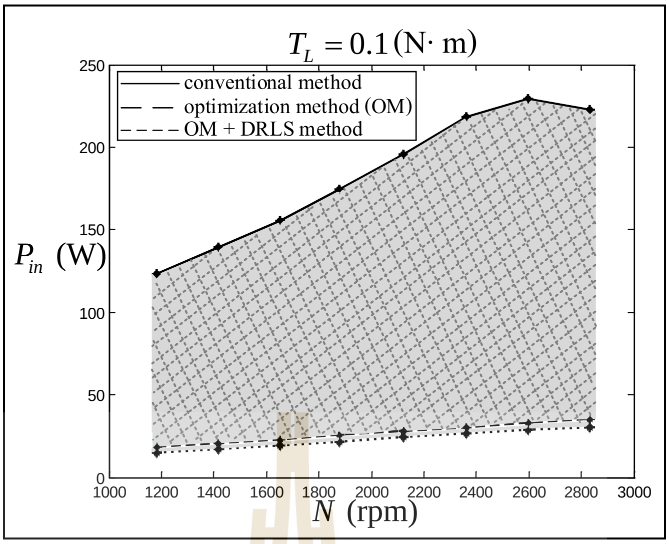
ตารางที่ 7.4 ผลการเปรียบเทียบกำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม วิธี OM และวิธี OM+DRLS (ต่อ)

Speed		T_L (N·m)	วิธีดั้งเดิม			วิธี OM			วิธี OM+DRLS		
%	N (rpm)		$i_{f,conv}$ (A)	$P_{in,conv}$ (W)	η (%)	$i_{f,OM}$ (A)	$P_{in,OM}$ (W)	η (%)	$i_{f,OM+DRLS}$ (A)	$P_{in,OM+DRLS}$ (W)	η (%)
60	1416	0.9	0.30	243.81	54.74	0.22	189.25	70.52	0.18	156.66	85.18
70	1652		0.30	279.24	55.76	0.23	210.44	73.99	0.18	178.92	87.02
80	1880		0.30	312.82	56.64	0.23	231.56	76.52	0.18	199.09	89.00
90	2124		0.30	348.08	57.51	0.24	254.28	78.72	0.17	221.01	90.58
100	2360		0.30	386.91	57.49	0.24	276.39	80.47	0.17	242.09	91.87
110	2596		0.24	418.64	58.44	0.25	298.58	81.94	0.14	257.97	94.84
50	1180	1.0	0.30	231.05	53.48	0.23	185.37	66.66	0.20	150.86	81.91
60	1416		0.30	267.21	55.49	0.24	210.29	70.51	0.19	174.21	85.12
70	1652		0.30	305.78	56.58	0.24	233.84	73.98	0.19	197.55	87.57
80	1880		0.30	343.74	57.27	0.25	257.29	76.52	0.18	220.17	89.42
90	2124		0.30	391.74	56.78	0.25	282.54	78.72	0.18	244.44	90.99
100	2360		0.30	441.09	56.03	0.26	307.11	80.47	0.17	268.00	92.22
110	2596		0.20	510.02	53.30	0.26	331.77	81.94	0.13	284.10	95.69
50	1180	1.1	0.30	246.88	55.06	0.24	204.31	66.53	0.21	166.16	81.81
60	1416		0.30	287.21	56.79	0.25	231.32	70.51	0.20	191.83	85.03
70	1652		0.30	327.72	58.07	0.25	257.23	73.98	0.20	217.46	87.51
80	1880		0.30	370.42	58.46	0.26	283.02	76.52	0.19	242.40	89.34
90	2124		0.30	420.38	58.20	0.26	310.80	78.72	0.19	269.08	90.93
100	2360		0.30	467.65	58.13	0.27	337.82	80.47	0.18	295.01	92.15
50	1180	1.2	0.30	260.52	56.92	0.25	222.88	66.53	0.21	180.74	82.04
60	1416		0.30	302.29	58.86	0.26	252.36	70.51	0.21	209.52	84.93
70	1652		0.30	346.23	59.96	0.26	280.62	73.98	0.21	237.54	87.40
80	1880		0.30	387.61	60.95	0.27	308.76	76.52	0.20	264.66	89.27
90	2124		0.30	443.30	60.21	0.28	339.06	78.72	0.19	293.76	90.86
100	2360		0.30	493.10	60.14	0.28	396.72	74.76	0.19	322.03	92.09
50	1180	1.3	0.30	279.39	58.97	0.26	208.00	77.23	0.23	196.87	81.60
60	1416		0.30	313.46	61.50	0.27	273.38	70.51	0.23	229.02	84.17
70	1652		0.30	359.01	62.64	0.27	304.00	73.98	0.21	257.55	87.32
80	1880		0.30	404.78	63.23	0.28	334.50	76.51	0.21	289.94	88.27
90	2124		0.30	461.81	62.61	0.29	367.38	78.71	0.20	318.48	90.79
100	2360		0.30	505.72	63.53	0.29	399.26	80.47	0.20	349.11	92.03
50	1180	1.4	0.30	285.72	60.55	0.27	257.60	67.16	0.24	212.29	81.49
60	1416		0.30	330.74	62.77	0.28	291.87	71.13	0.23	244.94	84.76
70	1652		0.30	377.46	64.17	0.29	324.94	74.54	0.22	277.62	87.24

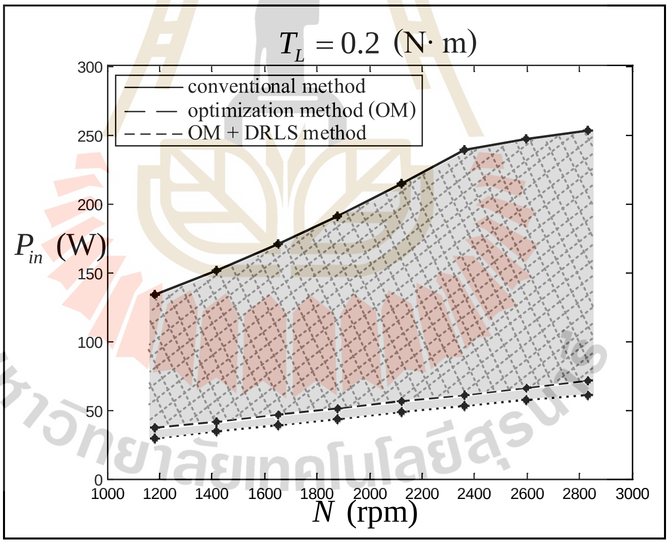
ตารางที่ 7.4 ผลการเปรียบเทียบกำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม วิธี OM และวิธี OM+DRLS (ต่อ)

Speed		T_L	วิธีดั้งเดิม			วิธี OM			วิธี OM+DRLS		
%	N (rpm)	(N·m)	$i_{f,conv}$ (A)	$P_{in,conv}$ (W)	η (%)	$i_{f,OM}$ (A)	$P_{in,OM}$ (W)	η (%)	$i_{f,OM+DRLS}$ (A)	$P_{in,OM+DRLS}$ (W)	η (%)
80	1880	1.4	0.30	418.40	65.87	0.29	357.44	77.11	0.22	309.25	89.13
90	2124		0.30	470.26	66.22	0.30	392.67	79.30	0.21	343.23	90.72

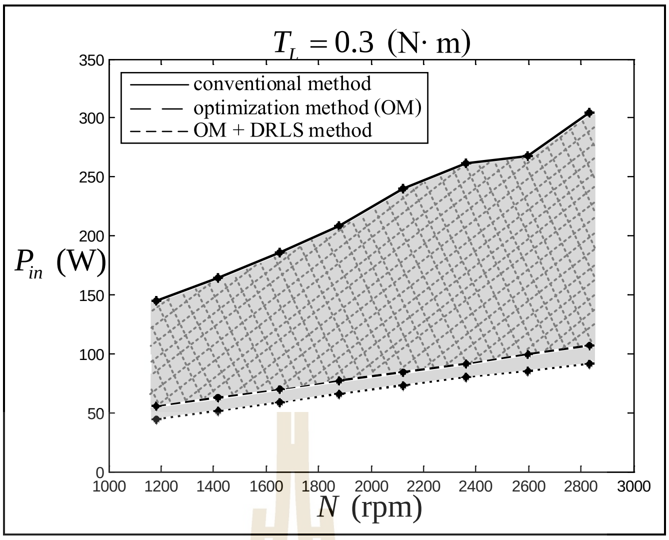
จากตารางที่ 7.4 การทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม วิธี OM และวิธี OM+DRLS มีเงื่อนไขการทดสอบที่สภาวะแรงบิดโหลด และความเร็วรอบต่าง ๆ ที่มีค่าเท่ากัน ส่งผลให้กำลังงานเอาต์พุตของมอเตอร์จากทั้ง 3 วิธี มีค่าเท่ากัน โดยจากผลการทดสอบเป็นการเปรียบเทียบค่ากำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธี OM+DRLS กับการขับเคลื่อนด้วยวิธีดั้งเดิมและวิธี OM ซึ่งค่ากำลังงานอินพุตในตารางแสดงถึงการประหยัดพลังงานของการขับเคลื่อนมอเตอร์ จากตารางดังกล่าว ค่ากำลังงานอินพุต $P_{in,OM+DRLS}$ จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังงานอินพุต $P_{in,conv}$ และค่ากำลังงานอินพุต $P_{in,OM}$ ดังนั้น การเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานในตารางที่ 7.4 แสดงให้เห็นว่า การประหยัดพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธี OM+DRLS สามารถลดการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้มีค่าน้อยลง ส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น จากผลการทดสอบในตารางที่ 7.4 สามารถแสดงการเปรียบเทียบกำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนมอเตอร์ทั้ง 3 วิธี ได้ดังรูปที่ 7.17



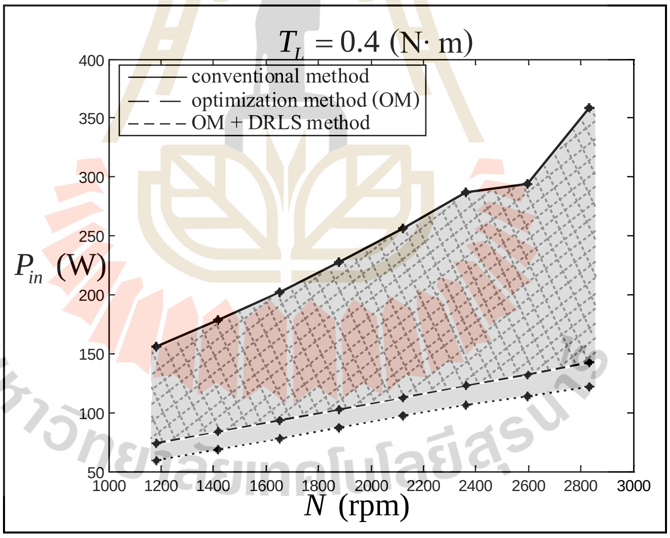
(ก) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.1 N·m



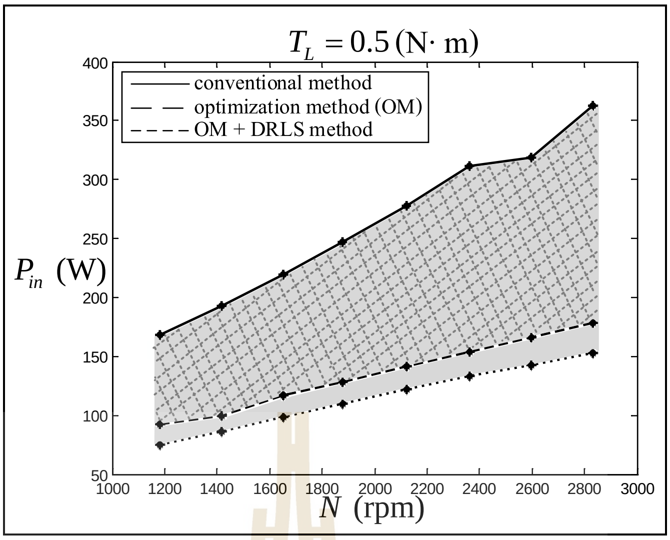
(ข) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.2 N·m



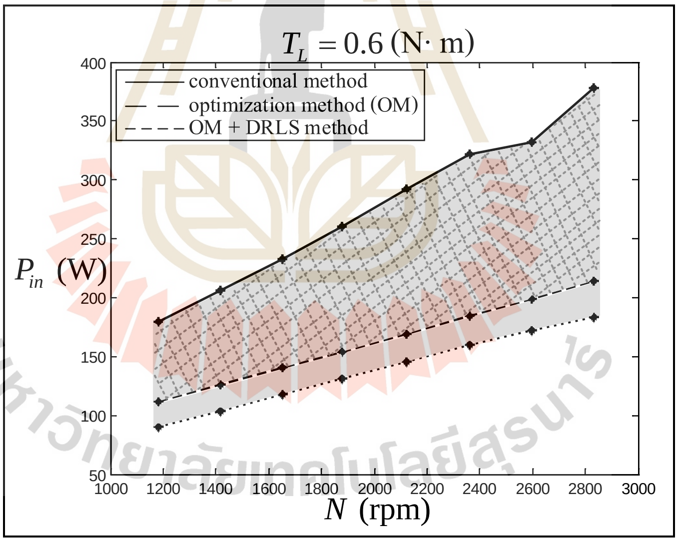
(ค) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.3 N·m



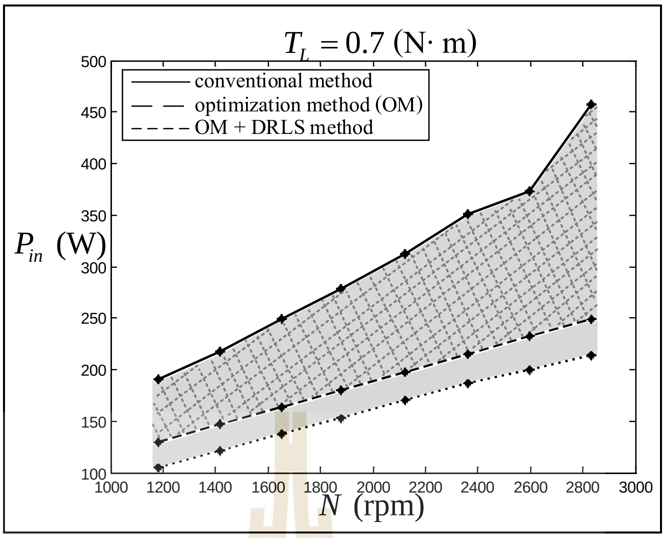
(ง) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.4 N·m



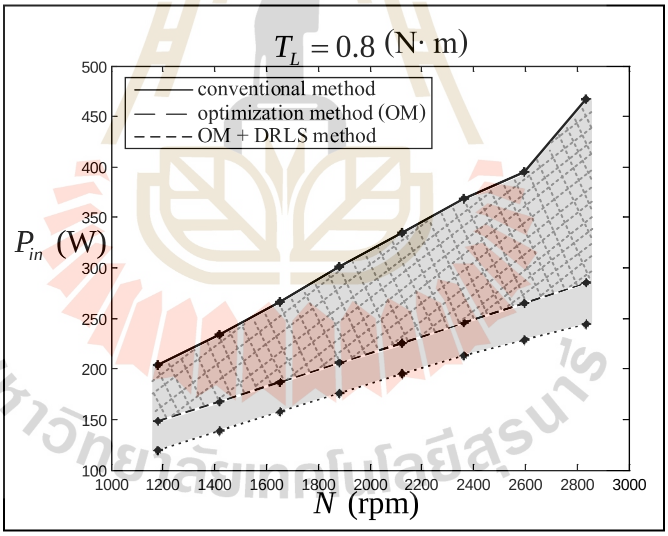
(จ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.5 N·m



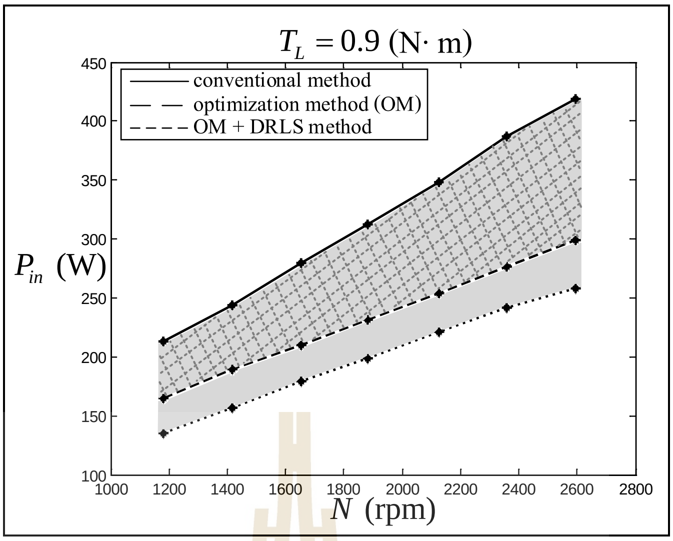
(ฉ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.6 N·m



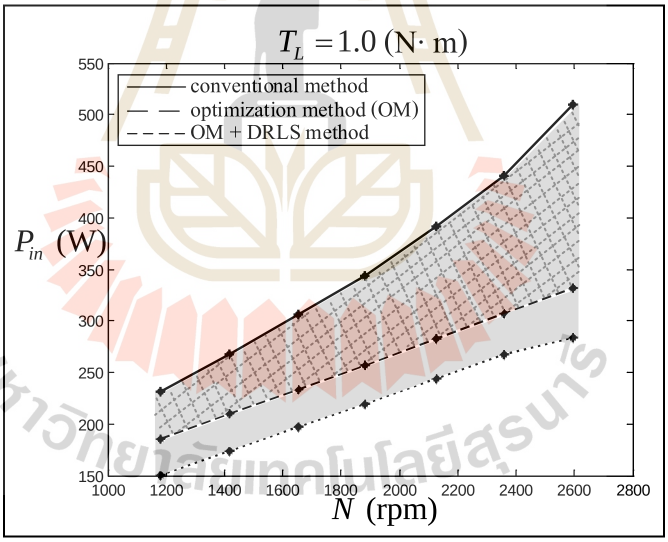
(ช) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.7 N·m



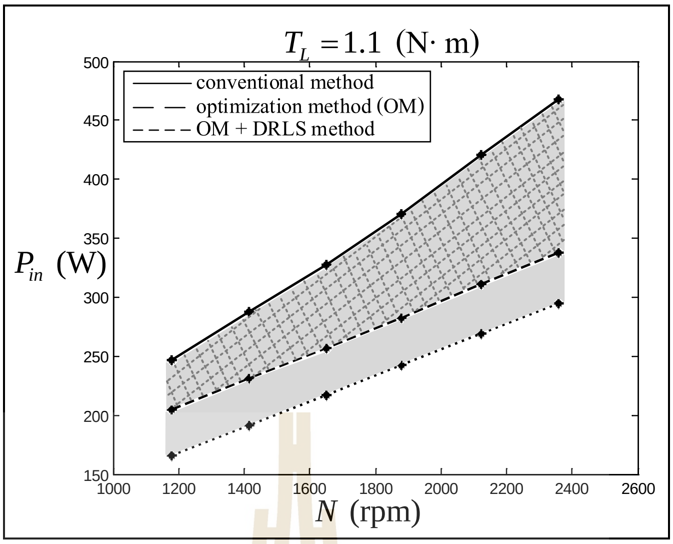
(ซ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.8 N·m



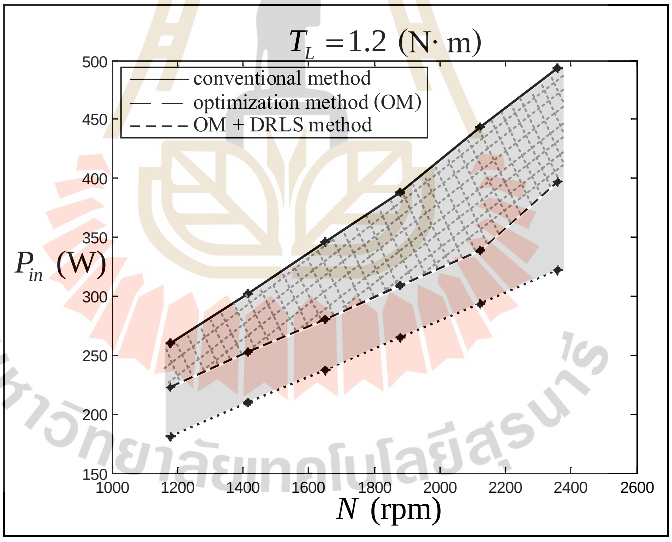
(ฌ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 0.9 N·m



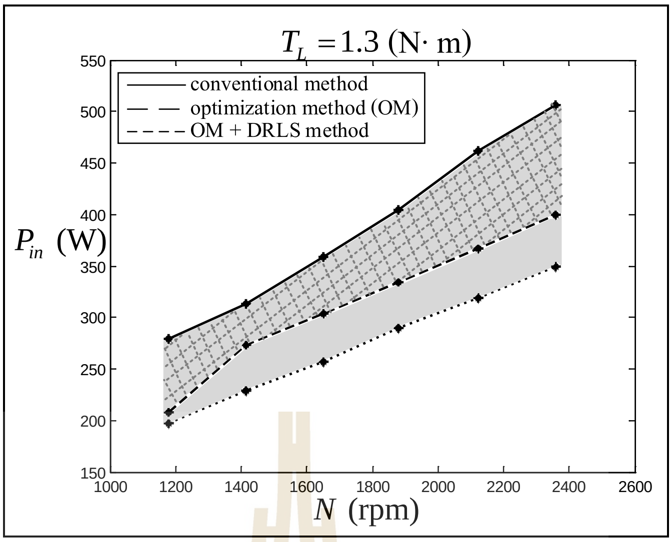
(ญ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 1.0 N·m



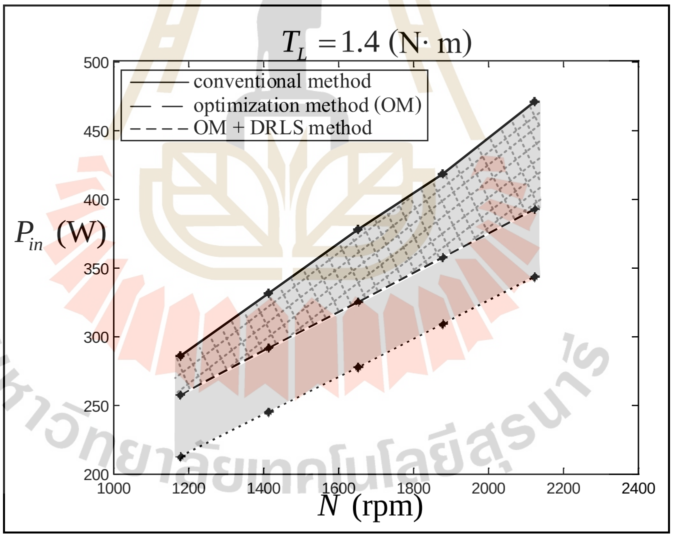
(ฎ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 1.1 N·m



(ฏ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 1.2 N·m



(ฐ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 1.3 N·m



(ฑ) แรงบิดโหลด เท่ากับ 1.4 N·m

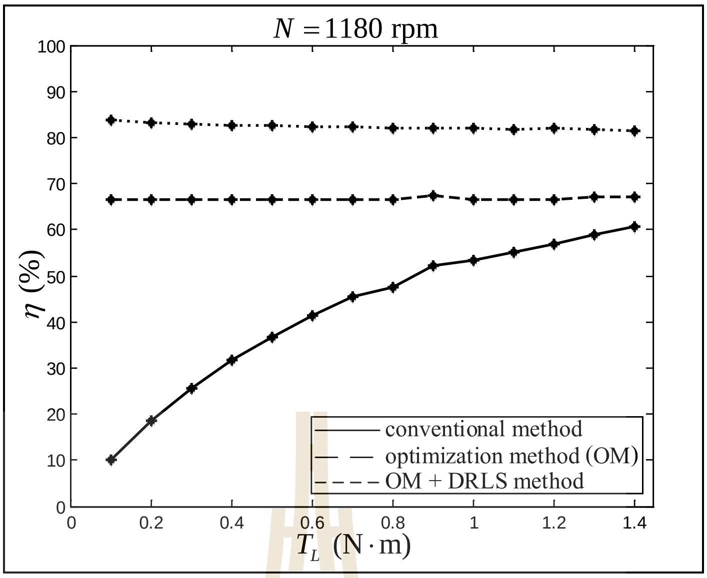
รูปที่ 7.17 ผลการเปรียบเทียบกำลังงานอินพุตระหว่างการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม วิธี OM และวิธี OM+DRLS

จากผลการเปรียบเทียบกำลังงานอินพุตระหว่างการขับเคลื่อนมอเตอร์ ด้วยวิธีดั้งเดิม วิธี OM และวิธี OM+DRLS ในรูปที่ 7.17 แสดงให้เห็นว่า การขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธี OM ให้ผลการประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งสามารถประหยัดพลังงานได้สูงสุด 85.92 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมที่แรงบิดโหลดมีค่าเท่ากับ 0.1 N·m (ที่สภาวะ 7.14 เปอร์เซ็นต์ของโหลดเต็มพิกัด) แต่เมื่อใช้อัลกอริทึม DRLS เข้ามาช่วยในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์แบบออนไลน์ จะให้ผลการประหยัดพลังงานที่ดีขึ้น โดยสามารถประหยัดพลังงานได้สูงสุดถึง 88.03 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมที่แรงบิดโหลดมีค่าเท่ากับ 0.1 N·m (ที่สภาวะ 7.14 เปอร์เซ็นต์ของโหลดเต็มพิกัด) นอกจากนี้ จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่า พื้นที่การประหยัดพลังงานระหว่างวิธี OM กับวิธี OM+DRLS จะมีค่ามากขึ้น ในสภาวะที่แรงบิดโหลดเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธี OM+DRLS สามารถประหยัดพลังงานได้ดีกว่าวิธี OM ผลการทดสอบข้างต้นสามารถยืนยันได้ว่าการประหยัดพลังงานที่มีอัลกอริทึม DRLS สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ ส่งผลให้การประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีดั้งเดิมและวิธี OM

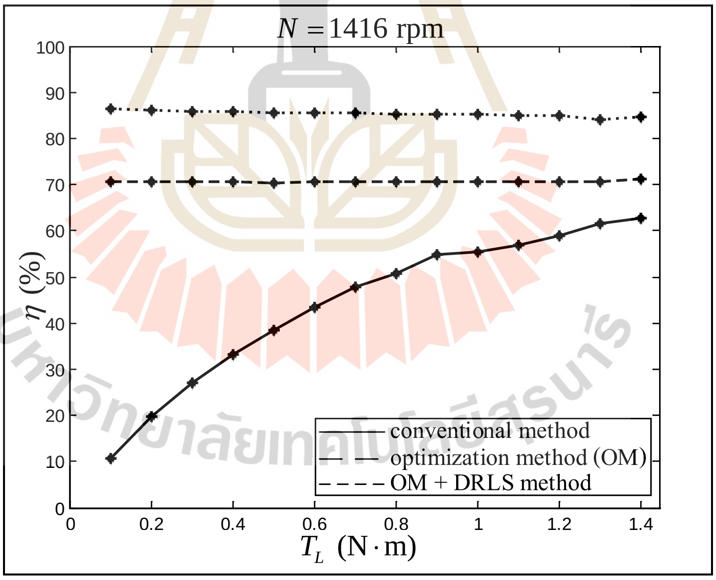
จากตารางที่ 7.4 สามารถคำนวณประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ได้จากสมการที่ (7.27) โดยผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 7.18

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \tag{7.27}$$

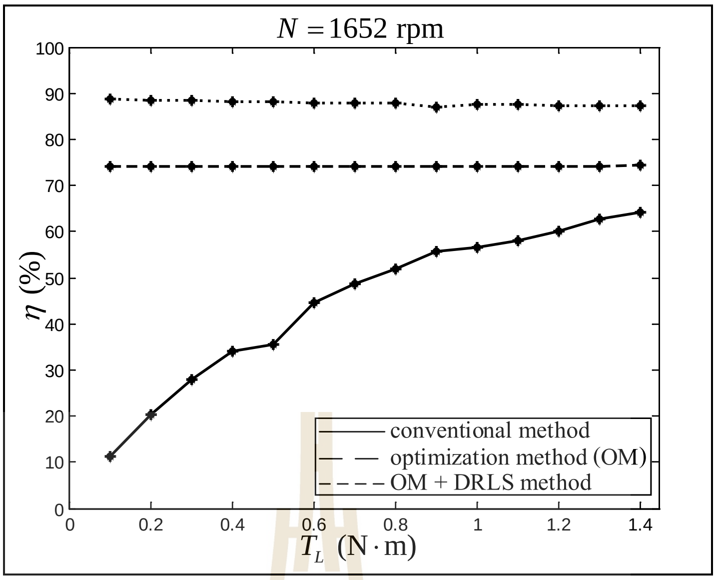
โดยที่ η คือ ประสิทธิภาพของมอเตอร์ (%)



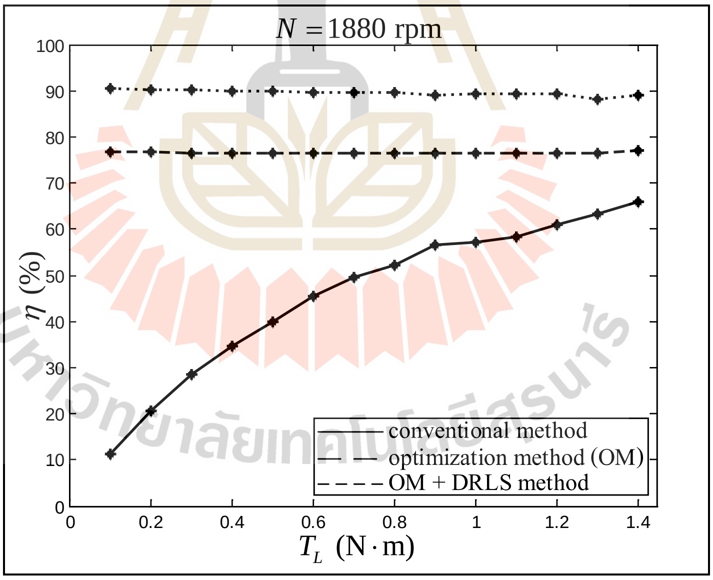
(ก) ความเร็วรอบ เท่ากับ 1180 rpm



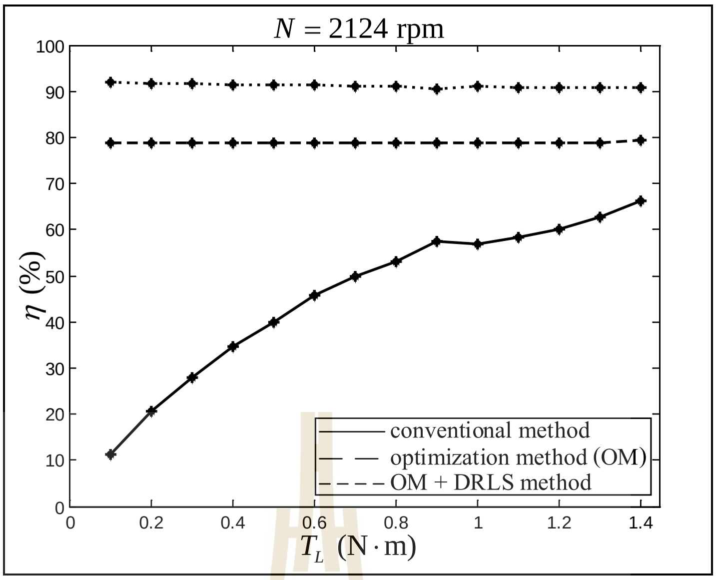
(ข) ความเร็วรอบ เท่ากับ 1416 rpm



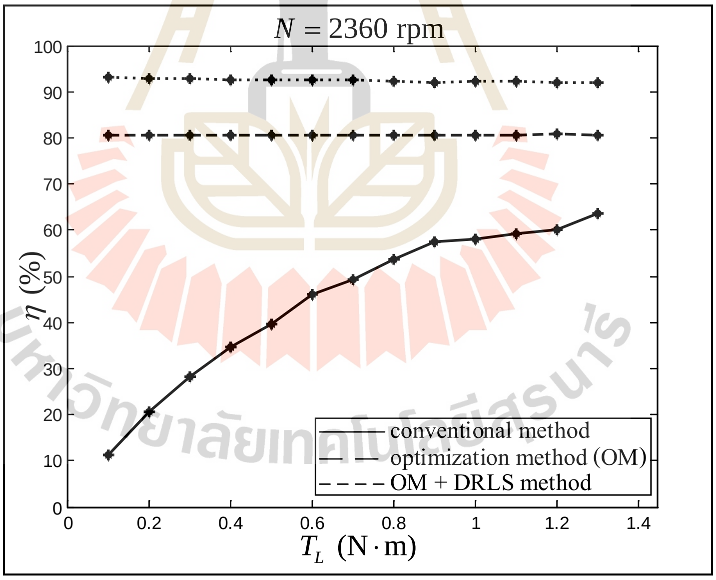
(ค) ความเร็วรอบ เท่ากับ 1652 rpm



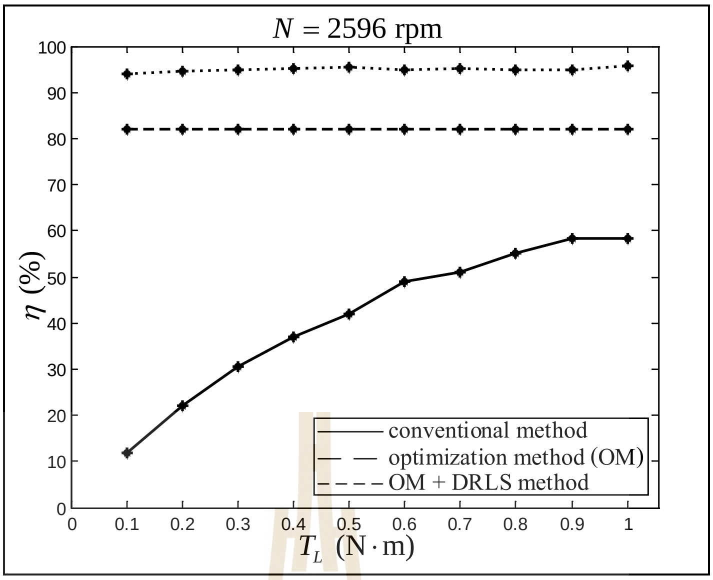
(ง) ความเร็วรอบ เท่ากับ 1880 rpm



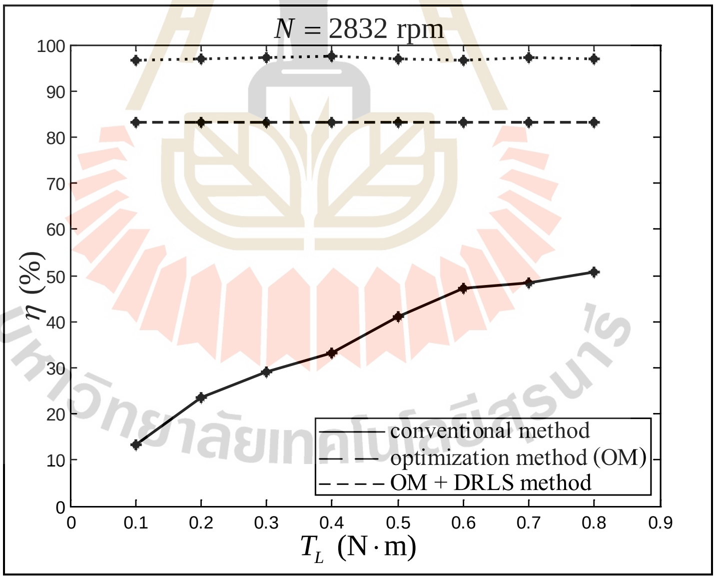
(จ) ความเร็วรอบ เท่ากับ 2124 rpm



(ฉ) ความเร็วรอบ เท่ากับ 2360 rpm



(ช) ความเร็วรอบ เท่ากับ 2596 rpm



(ซ) ความเร็วรอบ เท่ากับ 2832 rpm

รูปที่ 7.18 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นของการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม วิธี OM และวิธี OM+DRLS

จากรูปที่ 7.18 สังเกตได้ว่า การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีดั้งเดิมมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น เมื่อค่าแรงบิดโหลดเพิ่มขึ้นทุกสภาวะความเร็วรอบของมอเตอร์ ส่วนการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธี OM และวิธี OM+DRLS พบว่าที่สภาวะความเร็วรอบเดียวกันแต่แรงบิดโหลดเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธี OM และวิธี OM+DRLS มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และที่สภาวะความเร็วรอบเพิ่มขึ้นส่งผลให้การขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธี OM และวิธี OM+DRLS มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น นอกจากนี้ การขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธี OM+DRLS ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธีดั้งเดิมและวิธี OM ในทุกสภาวะการทำงาน

7.5 สรุป

บทนี้ได้นำเสนออัลกอริทึม DRLS ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์แบบออนไลน์ในสมการกำลังงานสูญเสีย โดยพารามิเตอร์ดังกล่าวมีความสำคัญสำหรับการคำนวณค่ากระแสสนามที่เหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงานด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุด ซึ่งเรียกวิธีการประหยัดพลังงานในบทนี้ว่า การขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงานที่มีการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยอัลกอริทึม DRLS หรือ วิธี OM+DRLS วิธีดังกล่าวนี้แตกต่างจากวิธี OM ที่นำเสนอไว้ในบทที่ 6 คือ ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้สำหรับการคำนวณค่ากระแสสนามที่มีค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี OM มีค่าคงที่ทุกสภาวะการทำงานของมอเตอร์ ส่วนวิธี OM+DRLS จะมีการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในทุก ๆ สภาวะการทำงานของมอเตอร์ที่เปลี่ยนแปลง ส่งผลให้การประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์แตกต่างกัน จากการเปรียบเทียบการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม วิธี OM และวิธี OM+DRLS ที่สภาวะการทำงานเดียวกัน พบว่า ค่ากำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธี OM+DRLS มีค่าน้อยที่สุด สามารถยืนยันได้ว่าการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธี OM+DRLS มีการประหยัดพลังงานสูงสุดโดยเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานสูงสุดมีค่าเท่ากับ 88.03 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 8
สรุป

8.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการศึกษา ออกแบบ และสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น สำหรับการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยเริ่มต้นจากการดำเนินการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งสามารถแบ่งการสำรวจออกเป็น 4 ประเด็นสำคัญ ได้แก่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสรงชนิดแยกกระตุ้น การประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น และอัลกอริทึมกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นแบบเวียนเกิดเชิงกำหนด จากการสำรวจงานวิจัยดังกล่าว ทำให้ผู้วิจัยได้รับพื้นฐาน แนวทางในการดำเนินงานและนำไปสู่การพัฒนาต่อยอดงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งผลการสำรวจงานวิจัยดังกล่าวได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2 จากนั้น ผู้วิจัยได้ศึกษาและนำเสนอเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น และรายละเอียดเกี่ยวกับกำลังงานสูญเสีย อีกทั้งยังนำเสนอการขับเคลื่อนมอเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีดั้งเดิมไว้ในบทที่ 3

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์บทที่ 4 มีการใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว หรือ ATS ในการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ประกอบด้วย ค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียฮีสเตอรีซีส (K_h) ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับความเหนี่ยวนำของวัสดุจากกำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (K_e) และค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน (K_{st}) เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไม่สามารถหาค่าได้จากการวัด ซึ่งค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมีความสำคัญต่อการคำนวณกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ และใช้ค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากวิธี ATS ไปหาค่ากระแสสนามด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด ซึ่งนำเสนอไว้ในบทที่ 6 เพื่อทำให้เกิดการประหยัดพลังงานสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

สำหรับบทที่ 5 ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ซึ่งประกอบไปด้วย บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET - EASY MEGA 1280 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะลอก วงจรสร้างสัญญาณ PWM วงจรชอปเปอร์ วงจรแยกโดดสัญญาณ เซนเซอร์ในการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของฝั่งวงจรอาร์เมเจอร์และฝั่งวงจรสนาม เซนเซอร์วัดความเร็วรอบและชุดควบคุมโหลดของมอเตอร์

โดยมีการอธิบายหลักการทำงาน วิธีการออกแบบอุปกรณ์ที่นำมาใช้ และมีการทดสอบการทำงานของวงจรต่าง ๆ ก่อนนำไปใช้งานจริง นอกจากนี้ ยังใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับสร้างตัวควบคุมพีไอในการควบคุมค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรชอปเปอร์ และใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ดังกล่าว ในการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ด้วยอัลกอริทึม DRLS และการประหยัดพลังงานด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์หลัก คือ สร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นสำหรับการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีหาค่าเหมาะที่สุด เพื่อหาค่ากระแสสนามที่มีค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน เนื่องจากวิธีหาค่าเหมาะที่สุดมีการนำหลักการทางคณิตศาสตร์เข้ามาใช้ในการหาค่ากระแสสนามที่ทำให้เกิดค่ากำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด เมื่อกำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยจะส่งผลต่อการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ทำให้การใช้พลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์มีค่าน้อยลง ส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ซึ่งได้นำเสนอไว้ในบทที่ 6

อัลกอริทึมกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นแบบเวียนเกิดเชิงกำหนด หรืออัลกอริทึม DRLS ถูกนำเสนอไว้ในบทที่ 7 โดยอัลกอริทึม DRLS ใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์แบบออนไลน์ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน หรือวิธี OM ที่นำเสนอไว้ในบทที่ 6 มีค่าคงที่ทุกสภาวะการทำงาน แต่จากสภาวะการทำงานของมอเตอร์ที่เปลี่ยนแปลง อาจส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในสมการกำลังงานสูญเสียที่ใช้ในการคำนวณด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงานเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้น จึงใช้อัลกอริทึม DRLS ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในสมการกำลังงานสูญเสียแบบออนไลน์ร่วมกับการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียด้วยวิธี ATS ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากอัลกอริทึมดังกล่าวสามารถนำไปคำนวณหาค่ากระแสสนามที่เหมาะสมด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุด เพื่อทำให้เกิดการประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

นอกจากนี้ในบทที่ 7 ได้มีการทดสอบเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานของการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ซึ่งทำการทดสอบเปรียบเทียบการขับเคลื่อนมอเตอร์ 3 วิธี คือ การขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม วิธี OM และวิธี OM+DRLS โดยการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์มีเงื่อนไขการทดสอบที่สภาวะแรงบิดโหลด และความเร็วรอบต่าง ๆ ที่มีค่าเท่ากัน ส่งผลให้กำลังงานเอาต์พุตของมอเตอร์จากทั้ง 3 วิธี มีค่าเท่ากัน ดังนั้น จึงเปรียบเทียบค่ากำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยค่ากำลังงานอินพุตแสดงถึงการประหยัดพลังงานผลการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธี OM ให้ผลการประหยัดพลังงานที่ดีสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์

ซึ่งสามารถประหยัดพลังงานได้สูงสุดถึง 85.92 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม แต่ผลการประหยัดพลังงานดีขึ้นกว่าเดิมเมื่อใช้อัลกอริทึม DRLS เข้ามาช่วยในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์แบบออนไลน์ โดยสามารถประหยัดได้สูงสุดถึง 88.03 เปอร์เซ็นต์ และนอกจากนี้มีการนำเสนอกราฟพื้นที่ของการประหยัดพลังงาน เพื่อยืนยันผลของการประหยัดพลังงานด้วย ซึ่งพื้นที่การประหยัดพลังงานระหว่างวิธี OM กับวิธี OM+DRLS จะมีค่ามากขึ้น ในสภาวะที่แรงบิดโหลดเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธี OM+DRLS สามารถประหยัดพลังงานได้ดีกว่าวิธี OM ดังนั้น สามารถยืนยันได้ว่า การประหยัดพลังงานที่มีอัลกอริทึม DRLS สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ สามารถประหยัดพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีดั้งเดิมและวิธี OM

8.2 การประเมินทางเศรษฐศาสตร์

การประเมินทางเศรษฐศาสตร์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะทำการประเมินจุดคุ้มทุนของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นสำหรับการประหยัดพลังงานที่สร้างขึ้น โดยรายละเอียดในการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ แสดงได้ดังต่อไปนี้

8.2.1 การประเมินราคาของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นสำหรับการประหยัดพลังงาน

การประเมินราคาของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นสำหรับการประหยัดพลังงาน พิจารณาจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างชุดขับเคลื่อน ดังกล่าว โดยต้นทุนในการสร้างมีค่าเท่ากับ 4,846 บาท สำหรับรายละเอียดสำหรับการประเมินต้นทุนของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นสำหรับการประหยัดพลังงาน แสดงได้ดังตารางที่ 8.1 ดังนี้

ตารางที่ 8.1 รายละเอียดการประเมินต้นทุนของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นสำหรับการประหยัดพลังงาน

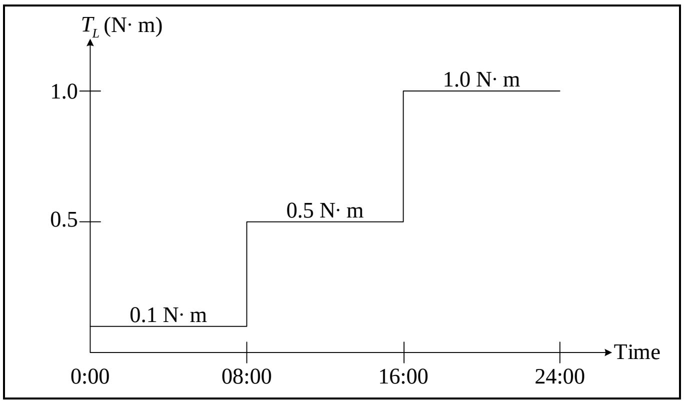
ลำดับ	รายการ	ราคา (บาท)
1	บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET - EASY MEGA 1280 จำนวน 2 บอร์ด	2,200
2	โมดูลแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะลอก 2 โมดูล	540
3	เซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า 2 ชุด	90

ตารางที่ 8.1 รายละเอียดการประเมินต้นทุนของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นสำหรับการประหยัดพลังงาน (ต่อ)

ลำดับ	รายการ	ราคา (บาท)
4	เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า 2 ชุด	900
5	หม้อแปลง 6 ลูก	440
6	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	576
7	แผ่นอะคีลิค	100
ราคารวม		4,846

8.2.2 การประเมินจุดคุ้มทุน

การประเมินจุดคุ้มทุน พิจารณาจากค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อวันของการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม เปรียบเทียบกับการใช้ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธี OM และวิธี OM+DRLS และทำการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ทั้ง 3 วิธี ที่สภาวะเดียวกัน คือ ที่ค่าความเร็วรอบคงที่ที่พิกัด (2360 rpm) และเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลด โดยกำหนดให้ 8 ชั่วโมงแรกของการทำงานมีค่าแรงบิดโหลด 0.1 N·m ชั่วโมงที่ 9 ถึง 16 ของการทำงานมีค่าแรงบิดโหลด 0.5 N·m และชั่วโมงที่ 17 ถึง 24 ของการทำงานมีค่าแรงบิดโหลด 1.0 N·m สามารถแสดงกราฟของโหลด (Load Curve) ที่ใช้งานในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง ได้ดังรูปที่ 8.1 ซึ่งค่ากำลังงานที่ใช้ในแต่ละชั่วโมงการทำงานสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 8.2 และจากตารางดังกล่าว สามารถคิดค่าไฟฟ้าของการขับเคลื่อนมอเตอร์ทั้ง 3 วิธี โดยอ้างอิงจากอัตราค่าไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประเภทที่ 1 บ้านอยู่อาศัย สามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้



รูปที่ 8.1 กราฟของโหลดที่ใช้งานในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 8.2 ค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อวันของการขับเคลื่อนมอเตอร์

กรณีสถาณการณ์ที่สมมติ	วิธีดั้งเดิม		วิธี OM		วิธี OM+DRLS	
	$P_{in,conv}$ (W)	หน่วย (Unit) (kWh)	$P_{in,OM}$ (W)	หน่วย (Unit) (kWh)	$P_{in,OM+DRLS}$ (W)	หน่วย (Unit) (kWh)
กรณีที่ 1 (0.1 N·m)	217.95	$\frac{217.95\times8}{1000}=1.74$	30.68	$\frac{30.68\times8}{1000}=0.25$	26.55	$\frac{26.55\times8}{1000}=0.21$
กรณีที่ 2 (0.5 N·m)	311.26	$\frac{311.26\times8}{1000}=2.49$	153.53	$\frac{153.53\times8}{1000}=1.23$	133.49	$\frac{133.49\times8}{1000}=1.07$
กรณีที่ 3 (1.0 N·m)	411.09	$\frac{411.09\times8}{1000}=3.29$	307.11	$\frac{307.11\times8}{1000}=2.46$	268.00	$\frac{268\times8}{1000}=2.14$
หน่วยต่อเดือน		217.5	118.2		102.6	
ค่าไฟฟ้าต่อเดือน (บาท)		772.23	400.80		342.73	

คำนวณอัตราค่าไฟฟ้าของการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม

วิธีดั้งเดิมใช้ไฟฟ้า 217.5 หน่วยต่อเดือน ซึ่งใช้ไฟฟ้าเกิน 150 หน่วยต่อเดือน สามารถคิดค่าไฟฟ้าได้ดังนี้

150 หน่วยแรก (หน่วยที่ 0 - 150) หน่วยละ 3.2484 บาท มีค่าไฟฟ้า $150 \times 3.2482 = 487.26$ บาท

250 หน่วยต่อไป (หน่วยที่150 – 217.5) หน่วยละ 4.2218 บาท มีค่าไฟฟ้า $67.5 \times 4.2218 = 284.97$ บาท

ดังนั้น วิธีดั้งเดิมมีค่าใช้จ่ายค่าไฟฟ้า เท่ากับ 772.23 บาทต่อเดือน หรือ 9,266.76 บาทต่อปี

คำนวณอัตราค่าไฟฟ้าของการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธี OM

วิธี OM ใช้ไฟฟ้า 118.2 หน่วยต่อเดือน ซึ่งใช้ไฟฟ้าไม่เกิน 150 หน่วยต่อเดือน สามารถคิดค่าไฟฟ้าได้ดังนี้

15 หน่วยแรก (หน่วยที่ 0 - 15) หน่วยละ 2.3488 บาท มีค่าไฟฟ้า $15 \times 2.3488 = 35.232$ บาท

10 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 16 - 25) หน่วยละ 2.9882 บาท มีค่าไฟฟ้า $10 \times 2.9882 = 29.882$ บาท

10 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 26 - 35) หน่วยละ 3.2405 บาท มีค่าไฟฟ้า $10 \times 3.2405 = 32.405$ บาท

65 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 36 - 100) หน่วยละ 3.6237 บาท มีค่าไฟฟ้า $65 \times 3.6237 = 235.5405$ บาท

50 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 101 – 118.2) หน่วยละ 3.7171 บาท มีค่าไฟฟ้า $18.2 \times 3.3.7171 = 67.65$ บาท

ดังนั้น การใช้วิธี OM ในการขับเคลื่อนมอเตอร์มีค่าใช้จ่ายค่าไฟฟ้า เท่ากับ 400.80 บาทต่อเดือน หรือ 4,809.50 บาทต่อปี และระยะเวลาคืนทุนของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นสำหรับการประหยัดพลังงานด้วยวิธี OM มีค่าเท่ากับ 1 ปี 1 เดือน 2 วัน แสดงการคำนวณได้ดังสมการที่ (8.1)

ระยะเวลาคืนทุน = ต้นทุนชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ ÷ ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ใน 1 ปี (8.1)
= 4,846 ÷ 4,457.25
= 1.0827 (1 ปี 1 เดือน 2 วัน)

คำนวณอัตราค่าไฟฟ้าของการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธี OM+DRLS

วิธี OM+DRLS ใช้ไฟฟ้า 102.6 หน่วยต่อเดือน ซึ่งใช้ไฟฟ้าไม่เกิน 150 หน่วยต่อเดือน สามารถคิดค่าไฟฟ้าได้ดังนี้

15 หน่วยแรก (หน่วยที่ 0 - 15) หน่วยละ 2.3488 บาท มีค่าไฟฟ้า 15 x 2.3488 = 35.232 บาท
10 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 16 - 25) หน่วยละ 2.9882 บาท มีค่าไฟฟ้า 10 x 2.9882 = 29.882 บาท
10 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 26 - 35) หน่วยละ 3.2405 บาท มีค่าไฟฟ้า 10 x 3.2405 = 32.405 บาท
65 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 36 - 100) หน่วยละ 3.6237 บาท มีค่าไฟฟ้า 65 x 3.6237 = 235.5405 บาท
50 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 101 – 102.6) หน่วยละ 3.7171 บาท มีค่าไฟฟ้า 2.6 x 3.7171 = 9.665 บาท

ดังนั้น วิธี OM+DRLS มีค่าใช้จ่ายค่าไฟฟ้า เท่ากับ 342.73 บาทต่อเดือน หรือ 4,112.76 บาทต่อปี โดยสามารถหาระยะเวลาคืนทุนของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นสำหรับการประหยัดพลังงานด้วยวิธี OM+DRLS มีค่าเท่ากับ 11 เดือน 9 วัน แสดงได้ดังสมการที่ (8.2)

ระยะเวลาคืนทุน = ต้นทุนชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ ÷ ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ใน 1 ปี (8.2)
= 4,846 ÷ 5,154
= 0.9401 (11 เดือน 9 วัน)

จากการประเมินจุดคุ้มทุน สังเกตได้ว่า การขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธี OM+DRLS สามารถประหยัดไฟฟ้าได้มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิมและวิธี OM โดยชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นสำหรับการประหยัดพลังงานด้วยวิธี OM+DRLS สามารถคืนทุน

ได้ภายในระยะเวลา 11 เดือน 9 วัน ซึ่งใช้เวลาในการคืนทุนเร็วกว่าการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธี OM ที่มีระยะเวลาในการคืนทุน เท่ากับ 1 ปี 1 เดือน 2 วัน

8.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรปรับปรุงและพัฒนาโปรแกรมการคำนวณบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ จากเดิมที่แยกการทำงานของบอร์ดควบคุมมอเตอร์ และบอร์ดประหยัดพลังงานออกจากกัน ให้รวมการทำงานของทั้ง 2 บอร์ด อยู่บนบอร์ดเดียวกัน ทั้งนี้ เพื่อลดต้นทุนของระบบการประหยัดพลังงานนี้

2. ควรศึกษา หาแนวทางเพิ่มเติม ให้มีการประหยัดพลังงานเพิ่มขึ้นในสภาวะที่แรงบิดโหลดสูง

3. ควรศึกษา หาแนวทางเพิ่มเติม ในการกำหนดค่าเริ่มต้นของค่าเมตริกซ์ความแปรปรวนในอัลกอริทึม DRLS เนื่องจากในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้แนวทางจากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีต ร่วมกับการทดสอบลองผิดลองถูก เพื่อให้อัลกอริทึมมีสมรรถนะที่ดีขึ้น

4. จากการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของพารามิเตอร์ K_{st} (ค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน) ด้วยการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว พบว่าค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมีค่าน้อยมากและมีผลน้อยมากต่อการคำนวณกำลังงานสูญเสีย จึงสามารถละทิ้งได้ เพื่อนำไปพัฒนาต่อสำหรับงานวิจัยในอนาคต

รายการอ้างอิง

ศุภชัย สุรินทร์วงศ์. (2538). **เครื่องกลไฟฟ้า 1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.** กรุงเทพฯ: ดวงกมลสมัย.

ศศิยา อุดมสุข. (2554). การประหยัดพลังงานสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น. **วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต.** สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2552). 1. **ปัญญาเชิงคำนวณ.** สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

Angelo, C. De., Bossio, G., and Garcia, G. (1999). Loss Minimization in DC Motor Drives**. IEEE International Electric Machines and Drives Conference. IEMDC'99. Proceedings.** pp. 701-703

Abdul, A., and Talukdar, A. (2011). Control of Separately Excited Dc Motor. **Journal of Electrical and Electronics Engineering.** vol. 4, pp. 7-10.

Chapman, S. J. (1999). **Electric Machinery Fundamentals.** Boston: Mc Graw Hill.

DC Motors, Speed Controls, Servo Systems an engineering handbook. (1997). 3rd ed. Electro-Craft Corporation, pergamon Press: Oxford.

Deshmukh, K. S., and Hiware, R. S. (2017) Speed Control of Separately Excited DC Motor Using Chopper. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET).** vol. 4, pp. 799-803.

Fitgerald, A. E., Kingsley, jr C., and Umans, S. D. (1983). **Electric Machinery.** New York: Mc Graw Hill.

Gaiceanu, M., Solea, R., Codres, B., and Eni, C. (2014). On-line Identification of the DC motor Parameters by using Least Mean Square Recursive Method. **ANALELE UNIVERSITĂŢII "EFTIMIE MURGU" REŞIŢA ANUL XXI,** NR. 3, 2014, ISSN 1453 – 7397, pp. 85-96.

Glover, F. (1989). **Tabu search-part i.** ORSA Journal on Computing. 1: pp. 190-206.

Guru, B. S., and Hiziroglu, H. R. (2001). **Electric Machinery and Transformers.** (3rd ed). Publisher: Oxford University Press.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

Hameed, W. I., and Mohamad, K. A. (2012). Speed Control of Separately Excited DC Motor using Fuzzy Neural Model Reference Controller. **International Journal of Instrumentation and Control Systems (IJICS).** vol. 2, no.4, pp. 27-39.

Hani, S. U., Md. Hassan, K., Hazari, Md. R. and Mannan M. A., Speed Control of Separately Excited DC Motor with Efficiency Maximization Propensity. **The AIUB Journal of Science and Engineering (AJSE).** vol. 14, no. 1, pp. 61-69.

Hong, S. C., and Park, M. H. (1984) Microprocessor – based optimal efficiency drive of separately excited dc motor, in: **Proc. 1984 IEEE TENCON.** pp. 126–128.

Hong, S. C., and Park, M. H. (1987). Microprocessor-based optimal efficiency drive of separately excited dc motor, **IEEE Transactions on Industry Electronics.** IE-34(4), pp. 433–440.

Issa, R. H., (2008). Separately Excited DC Motor Optimal Efficiency Controller. **International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT).** vol. 3, pp. 533-539.

Khanke, P., and Sangeeta, J. (2015). Speed control of Separately Excited DC Motor using various Conventional Controllers. **Journal of Engineering Research and Applications**. vol. 5, pp. 67-72.

Kluabwang, J., Puangdownreong, D., and Sujitjorn, S. (2012). Multipath Adaptive Tabu Search for a Vehicle Control Problem. **Journal of Applied Mathematics.** vol. 2012, Article ID 731623, pp. 1-20.

Kouadria, S., Belfedhal, S ., Berkouk, E. M., and Meslem, Y. (2013). Development of real time Wind Turbine Emulator based on DC Motor Controlled by PI regulator. **Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER).**

Kumari, S., and Swain, S. K. (2018). Optimal Control based PID tuning for control of Four Quadrant Chopper fed DC Motor. **Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP).**

Liu, Z. Z., Luo, F. L., and Rashid, M. H. (2003). Speed Nonlinear Control of DC Motor Drive With Field Weakening. **IEEE Transactions on Industry Applications.** vol. 39, no. 2, pp. 417-423.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

Luo, F. L., and Ye, H. (2000). DSP-Based Tension Control and Data Acquisition for Paper Machine Rewind Roll Drive. **IEEE Transactions on Industry Applications.** vol. 36, no. 4, pp. 1018-1025.

Margaris, N., Goutas, T., Doulgeri, Z., and Paschali, A. (1991). Loss Minimization in DC Drives. **IEEE Transactions on Industry Electronics.** vol. 38, no. 5, pp. 328-336.

Mishra, G. K., Pandey, A. K., and Maurya, A. (2014). Combined Armature and Field Speed Control of DC Motor For Efficiency Enhancement. **International Journal of Electrical and Electronics Engineering (SSRG-IJEEE).** vol. 1, pp. 34-39.

Mohamed, Y. S., Hasaneen, B. M., Elbaset, A. A., and Hussein, A. E. (2011). Recursive Least Square Algorithm for Estimating Paramiters of an Induction Motor. **Journal of Engineering Sciences.** vol. 39, no. 1, pp. 87-98.

Morozovsky, N., Moroto, R., and Bewley, T. (2013). RAPID: An Inexpensive Open Source Dynamometer for Robotics Applications. IEEE/ASME **Transactions on** Mechatronics, vol. 18, no. 6, pp. 1855-1860.

Munteanu, T., et al. (2011). Energy Saving Control for DC Motor Drive Systems. **PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review).** pp. 57-65.

Nasar, S. A. (1995). **Electric Machnine and Power Systems.** New York: Mc Graw Hill.

Pant, M., Thangaraj, R., and Singh, V. P. (2008). Efficiency optimization of electric motors: a comparative study of stochastic algorithms. **World Journal of Modelling and Simulation.** vol. 4, no. 2, pp. 140-148.

Pavankumar, S. v. s. r., krishnaveni, S., Venugopal, Y. B., and Babu, K. Y. S. (2010). A Neuro-Fuzzy Based Speed Control of Separately Excited DC Motor. **International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks.** pp. 93-98.

Pothi, N. (2017). Flux-weakening Control Strategy of Separately Excited DC Machine Utilizing Voltage Regulation for Modifying Field Current. **International Conference on Control and Robotics Engineering.** pp. 160-164.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

Puangdownreong, D., Sujitjorn, S., and Kulworawanichpong, T. (2004). Convergence Analysis of Adaptive Tabu Search. **Science Asia Journal of the Science Society of Thailand.** vol. 30, no. 2, pp. 183-190.

Puangdownreong, D., Kulworawanichpong, T., and Sujitjorn, S. (2004). Finite Convergence and Performance Evaluation of Adaptive Tabu Search. in **Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems., vol. 3215 of *Lecture Notes in Computer Science,*** Negoita, M. G., Howlett, R. J., Jain, L. C. Ed. Heidelberg: Springer, pp. 710-717.

Ryff, P. F. (1994). **Electric Machinery.** Englandwood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

Sahana, M., Angadi, S., and Raju, A. B. (2016). Speed Control of Separately Excited DC Motor Using Class A Chopper. **International Conference on Circuits, Controls, Communications and Computing (I4C).**

Sahputro, S. D., Fadilah, F, Wicaksono, N. A., Yusivar, F. (2017). Design and Implementation of Adaptive PID Controller for Speed Control of DC Motor. **International Conference on Quality in Research (QiR) : International Symposium on Electrical and Computer Engineering.** pp.179-183.

Sergaki, E. S., and STAVRAKAKIS, G. S. (2002). Optimal Robot Speed Trajectory by Minimization of the Actuator Motor Electromechanical Losses. **Journal of Intelligent and Robotic Systems.** pp. 187-207.

Sheta, M. A., Agarwal, V., and Nataraj, P. S. V. (2009). A New Energy Optimal Control Scheme for a Separately Excited DC Motor Based Incremental Motion Drive. **International Journal of Automation and Computing.** pp. 267-276.

Sujitjorn, S., Kluabwang, J., Puangdownreong, D., and Sarasiri, N. (2010). Adaptive Tabu Search and Management Agent. **ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications.** vol. 8, no. 1, pp. 1-10.

SUN, X., LI, S., LI, P., SHI, X., and Hu, S. (2015). Research on Adaptive Identification Methods for Time-variant Parameters of Rare Earth Brushless DC Motors. **Chinese Control and Decision Conference (CCDC).** Pp. 6472-6475.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

Tripathi, N., and Singh, R. Optimization Speed Control of DC Separately Excited Motor Using Tuning Controller of Linear Quadratic Regulator (LQR) Technique. **International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT).** vol. 9, pp. 492-496.

Tipsuwanpom, V., Numsomran, A., Klinsmitth, N., and Gulphanich, S. (2007). Separately Excited DC Motor Drive With Fuzzy Self-Organizing. **International Conference on Control, Automation and Systems.** pp. 1316-1321.

Toro, V. D. (1990). **Basic Machines.** NJ: Prentice Hall.

Udomsuk, S., Areerak, K-L., Areerak, K-N., and Srikaew, A. (2010). Parameters Identification of Separately Excited DC Motor using Adaptive Tabu Search Technique. **International Conference on Advances in Energy Engineering.** pp. 48-51.

Udomsuk, S., Areerak, K-L., and Areerak, K-N. (2015). The Energy Saving for Separately Excited DC Motor Drive via Model Based Method. **The Korean Institute of Electrical Engineers.** pp. 470-479.

Udomsuk, S., Areerak, K-L., Areerak, T., and Areerak, K-N. (2017). Power Loss Identification of Three-phase Induction Motor Using Adaptive Tabu Search. **International Electrical Engineering Congress.**

Underwood, S. J., and Husain, I. (2010). Online Parameter Estimation and Adaptive Control of Permanent-Magnet Synchronous Machines. **IEEE Transactions on Industry Electronics.** vol. 57, no. 7, pp. 2435-2443.

Xu, Y., Parspour, N., and Vollmer, U. (2014). Torque Ripple Minimization Using Online Estimation of the Stator Resistances with Consideration of Magnetic Saturation. **IEEE Transactions on Industry Electronics.** vol. 61, no. 9, pp. 5105-5114.

Young, P. C. (2011). **Recursive Estimation and Time-Series Analysis.** (2^{nd} ed). Springer Heidelberg Dordrecht London New York.

ภาคผนวก ก.

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

จีรวรรณ หอมจันทร์, กองพล อารีรักษ์, ธิดารัตน์ อารีรักษ์ และกองพัน อารีรักษ์. **การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น.** *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 40*, ชลบุรี, 15 - 17 พฤศจิกายน 2560, ฉบับที่ 2, หน้า 447 - 450.

จีรวรรณ หอมจันทร์, กองพล อารีรักษ์, ธิดารัตน์ อารีรักษ์ และกองพัน อารีรักษ์. **การประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุด.** *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินวิโรฒ ปีที่ 14*, ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – สิงหาคม 2562, หน้า 37-47.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 40 (EECON-40) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น
Power Losses Parameters Identification of Separately Excited DC Motor

จีรวรรณ หอมจันทร์ [1] กองพล อารีรักษ์ [1] ธิดารัตน์ อารีรักษ์ [2] และกองพัน อารีรักษ์

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

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search : ATS) โดยใช้ผลกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ เป็นค่าอ้างอิงในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ พารามิเตอร์ดังกล่าว ยากต่อการค้นหา หรือคำนวณ และจากการค้นคว้างานวิจัยในอดีตไม่ปรากฏวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ในบทความได้อธิบายขั้นตอนการระบุเอกลักษณ์ดังกล่าว ไว้อย่างละเอียด รวมถึงมีการอภิปรายผลการระบุเอกลักษณ์ไว้ด้วยเช่นกัน

คำสำคัญ: มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์

Abstract

This paper presents the power losses parameters identification of separately excited DC motor using adaptive tabu search (ATS) technique. The power losses of the DC motor from the experimental tests are used for the reference values in the ATS searching process. These parameters are difficult to determine and the strategy of the power losses searching has not been reported in previous publications. Therefore, The procedure to identify the power losses parameters is completely described in this paper. Moreover, the results and discussions of the parameters identification are also proposed.

Keywords: Separately Excited DC Motor, Adaptive tabu search, Parameter identification

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการใช้งานมอเตอร์หลายประเภท ไม่ว่าจะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งในมอเตอร์ทั้งสองประเภทนี้มีกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ที่แตกต่างกันออกไป ในบทความนี้จะกล่าวถึงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์บางตัวในสมการกำลังงานสูญเสียที่ไม่สามารถทำการวัดค่าได้ เนื่องจากไม่มีข้อมูลพารามิเตอร์ดังกล่าว บนแผ่นป้ายชื่อ (nameplate) ของมอเตอร์ เพราะฉะนั้นวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ทั้งนี้เนื่องจากการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวเป็นการค้นหาคำตอบเหมาะที่สุดที่มีความสามารถในการหลุดพ้นจากคำตอบที่เหมาะที่สุดแบบวงแคบ จนนำไปสู่คำตอบที่เหมาะที่สุดแบบวงกว้าง รวมทั้งมีโครงสร้างการทำงานที่ง่าย และมีประสิทธิภาพ [1]

การนำเสนอในบทความนี้ ประกอบด้วยทฤษฎีกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ การทบทวนการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์รวมถึงผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ อภิปรายผล และสรุปผล

2. กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นมีกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์[2-4] ประกอบด้วย

กำลังงานสูญเสียเนื่องจากขดลวด (copper losses) เกิดจากการสูญเสียในรูปของความร้อน เนื่องจากกระแสไหลในขดลวดทองแดง ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$P_a = i_a^2 R_a \tag{1}$$

$$P_f = i_f^2 R_f \tag{2}$$

โดยที่ P_a คือ กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ i_a คือ กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ R_a คือ ความต้านทานอาร์เมเจอร์ P_f คือ กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดสนาม i_f คือ กระแสไฟฟ้าสนาม และ R_f คือ ความต้านทานสนาม

กำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทานและแรงต้านอากาศ (friction and windage losses) เกิดจากแรงเสียดทานในตลับลูกปืน และแรงต้านของครีบระบายอากาศที่ตัวมอเตอร์ ซึ่งกำลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้นตามความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ ดังสมการที่ (3)

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

โดยที่ P_m คือ กำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทานและแรงต้านอากาศ K_m คือ ค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทานและแรงต้านอากาศ และ N คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ (rpm)

กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก (core losses) เนื่องจากมีเส้นแรงแม่เหล็กตัดกับแกนเหล็ก จะทำให้เกิดกระแสไหลวน (eddy current loss) อยู่ในแกนเหล็กเป็นการสูญเสียที่สูญเปล่า และการเปลี่ยนแปลงทิศทางของสนามแม่เหล็ก 50 รอบต่อวินาที ทำให้เกิดการสูญเสียที่เรียกว่า ฮีสเตอรีซีส (hysteresis loss) จะได้สมการกำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก ดังสมการที่ (4)

$$P_i = K_h \omega i_f^2 + K_e \omega^2 i_f^2 \quad (4)$$

โดยที่ P_i คือ กำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก K_h คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับวัสดุ K_e คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับความเหนี่ยวนำของวัสดุ และ ω คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ (rad/s)

กำลังงานสูญเสียจากแปรงถ่าน (brush losses) เกิดจากค่าความต้านทานของแปรงถ่าน เมื่อกระแสไหลผ่านแปรงถ่านจะเกิดแรงดันตกคร่อมที่แปรงถ่าน เมื่อแรงดันดังกล่าวคูณกับกระแสที่ไหลผ่าน จะเกิดกำลังงานสูญเสียที่ตัวแปรงถ่าน กำหนดให้ค่าแรงดันตกคร่อมเท่ากับ 1 โวลต์ ต่อแปรงถ่าน 1 ชุด [4] ในกรณีที่มีแปรงถ่านบวกและลบจำนวนทั้งหมด 2 ชุด จะได้แรงดันตกคร่อมแปรงถ่านทั้งหมด 2 โวลต์ ดังสมการที่ (5)

$$P_{BD} = V_e i_a \quad (5)$$

โดยที่ P_{BD} คือ กำลังงานสูญเสียจากแปรงถ่าน และ V_e คือ แรงดันตกคร่อมแปรงถ่าน มีค่าเท่ากับ 2 โวลต์

กำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน (stray losses) เป็นการสูญเสียเมื่อมีการขับโหลด ดังสมการที่ (6)

$$P_s = K_{st} i_a^2 \quad (6)$$

โดยที่ P_s คือ กำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน และ K_{st} คือ ค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน

จากการนำเสนอมาทั้งหมดข้างต้นจะได้กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ ดังสมการที่ (7)

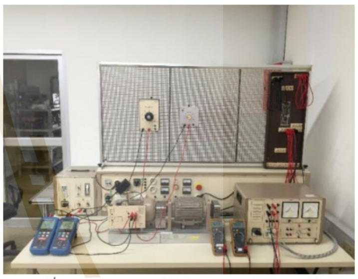
$$P_{loss} = i_a^2 R_a + i_f^2 R_f + K_m N^3 + K_h \omega i_f^2 + K_e \omega^2 i_f^2 + 2 i_a + K_{st} \frac{60^2}{4\pi^2} i_a^2 \omega^2 \quad (7)$$

ถ้าไม่พิจารณาค่ากำลังงานสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านอากาศ เนื่องจากมีค่าน้อยสำหรับมอเตอร์ที่พิจารณาในบทความ เนื่องจากมอเตอร์มีขนาดเล็ก จะได้สมการการคำนวณกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ดังสมการที่ (8)

$$P_{loss} = i_a^2 R_a + i_f^2 R_f + K_h \omega i_f^2 + K_e \omega^2 i_f^2 + 2 i_a + K_{st} \frac{60^2}{4\pi^2} i_a^2 \omega^2 \quad (8)$$

3. การทดสอบมอเตอร์สำหรับการระบุเอกลักษณ์

การทดสอบมอเตอร์สำหรับการระบุเอกลักษณ์จะทดสอบทั้งหมด 79 ข้อมูล คือ 50 60 70 80 90 100 110 และ 120 เปอร์เซ็นต์ ของความเร็วพิกัดที่โหลดต่าง ๆ และทำการสุ่มเพื่อแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือ 55 ข้อมูล ใช้สำหรับการระบุเอกลักษณ์ และ 24 ข้อมูล ใช้สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องจากการระบุเอกลักษณ์ (validation) โดยทำการทดสอบมอเตอร์ดังรูปที่ 1 โดยมอเตอร์มีค่าพิกัดดังนี้ ฝั่งอาร์เมเจอร์มีแรงดัน 220 โวลต์ กระแส 6.2 แอมแปร์ ฝั่งสนามมีแรงดัน 220 โวลต์ กระแส 0.3 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้า 370 วัตต์ ความเร็วรอบ 2360 รอบต่อนาที และค่าความต้านทานที่ได้จากการวัดฝั่งอาร์เมเจอร์ 12.02 โอห์ม และฝั่งสนาม 621.2 โอห์ม



รูปที่ 1 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

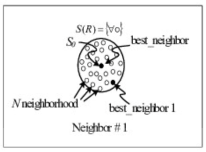
4. ทฤษฎีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว [5] เป็นอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้นจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู [1] โดยเพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในการค้นหาแบบตาบู คือ การเดินย้อนรอย (back tracking) และการปรับลดรัศมีการค้นหา และเพื่อให้วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวมีประสิทธิภาพ จึงได้ทำการทดสอบกับฟังก์ชันมาตรฐาน คือ Bohachevsky, Rastrigin, Shekel's, Shubert และ Schwefel [6-10] อีกทั้งวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวยังได้รับการพิสูจน์เพื่อให้มั่นใจได้ว่าสามารถเข้าถึงผลเฉลยที่เหมาะที่สุดในเวลาที่จำกัด [6-11] โดยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวสามารถพิจารณาได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพื้นที่การค้นหา รัศมีการค้นหา และจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา

ขั้นตอนที่ 2 ทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น S_0 ภายในพื้นที่การค้นหาและให้ S_0 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงแคบเพาะถิ่น (local solution) ดังรูปที่ 2

ขั้นตอนที่ 3 ทำการสุ่มเลือกคำตอบจำนวน N คำตอบ รอบๆ S_0 ภายในพื้นที่รัศมีการค้นหา R และกำหนดให้เซต $S(R)$ เป็นเซตของคำตอบ N คำตอบ ซึ่งเรียกว่า คำตอบรอบข้าง ดังรูปที่ 2



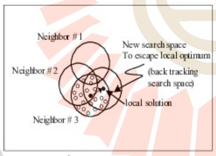
รูปที่ 2 ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ S_0

ขั้นตอนที่ 4 ทำการประเมินคำตอบรอบข้างด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสมาชิกใน $S(R)$ โดยกำหนดให้ S_1 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดใน $S(R)$

ขั้นตอนที่ 5 ถ้า $S_1 < S_0$ จะกำหนดให้ $S_0 = S_1$ และเก็บค่า S_0 ในรายการตาบู

ขั้นตอนที่ 6 ถ้า $count \geq count_{\max}$ จะหยุดกระบวนการค้นหาโดยที่ค่า S_0 คือคำตอบที่ดีที่สุดไม่เช่นนั้นจะกลับไปสู่ขั้นตอนที่ 3 และเริ่มกระบวนการใหม่อีกครั้งจนกระทั่งได้คำตอบที่พอใจ

ขั้นตอนที่ 7 เข้าสู่กลไกการเดินย้อนรอย เมื่อจำนวนคำตอบในแต่ละรอบไม่หลุดออกจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่นเป็นจำนวนคำตอบเท่ากับจำนวนคำตอบสูงสุดที่ได้จากการตั้งค่าไว้ กลไกนี้จะเลือกคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการค้นหาในพื้นที่การค้นหาเดิมในรายการตาบูเพื่อนำมากำหนดเป็นคำตอบเริ่มต้นสำหรับการค้นหาในรอบถัดไป ทั้งนี้เพื่อให้หลุดออกจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่น ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 กลไกการเดินย้อนรอย

ขั้นตอนที่ 8 เข้าสู่กลไกการปรับค่ารัศมีการค้นหา โดยจะปรับลดรัศมีลงเรื่อย ๆ ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (9)

$$radius_{new} = \frac{radius_{old}}{DF} \tag{9}$$

โดยที่ DF คือ ตัวประกอบปรับลดรัศมี (Decreasing Factor) มีค่าเท่ากับ 1.3 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบ

5. การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์

การค้นหาพารามิเตอร์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว มีโครงสร้างบล็อกไดอะแกรมการค้นหา ดังรูปที่ 4

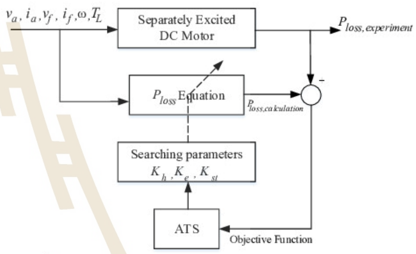
จากรูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมการค้นหาพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสีย สามารถคำนวณค่าความผิดพลาดระหว่างค่ากำลังงานสูญเสียจากการทดสอบ $(P_{loss,experiment})$ กับค่ากำลังงานสูญเสียจากการคำนวณ $(P_{loss,calculation})$ โดยค่าความผิดพลาดนี้สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (10)

$$error = \left| P_{loss,experiment} - P_{loss,calculation} \right| \tag{10}$$

โดยมีวัตถุประสงค์ของการค้นหาเพื่อทำให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) W

$$W = \sqrt{\frac{\sum error^2}{n}} \tag{11}$$

โดยที่ W คือ ค่าความผิดพลาดอาร์เอ็มเอส (root mean square error) และ n คือ จำนวนชุดข้อมูล



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมการค้นหาพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสีย

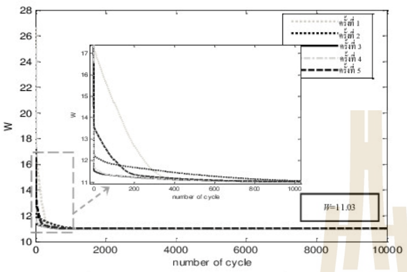
การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวนี้จะประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญหลายค่า โดยจะต้องมีการกำหนดพารามิเตอร์เหล่านั้นสำหรับการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว โดยกำหนดให้จำนวนคำตอบเริ่มต้นมีค่า 5 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้าง 10 คำตอบ รัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 5 และตัวประกอบลดรัศมีเท่ากับ 1.3 กำหนดจำนวนรอบการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวมากสุดไว้ที่ 10000 รอบ และมีการกำหนดขอบเขตในการค้นหา โดยพิจารณาจากสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์จะได้ว่าค่า K_h มีค่าขอบเขตอยู่ในช่วง $[1 \times 10^{-2}, 1]$ ค่า K_e มีค่าขอบเขตอยู่ในช่วง $[1 \times 10^{-3}, 1 \times 10^{-1}]$ และค่า K_{st} มีค่าขอบเขตอยู่ในช่วง $[1 \times 10^{-7}, 1 \times 10^{-5}]$

6. ผลการค้นหาพารามิเตอร์

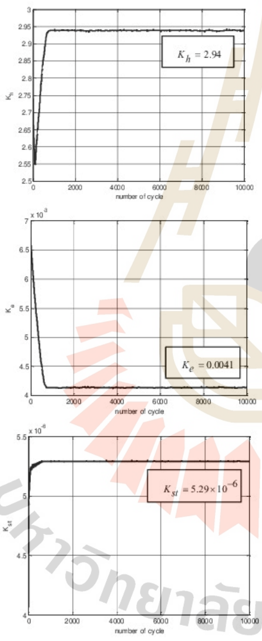
จากการหาค่าพารามิเตอร์ข้างต้นจะได้ผลการค้นหา ที่ใช้วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 1 ที่ค่าความคลาดเคลื่อน W เท่ากับ 11.03 และลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบแสดงได้ดังรูปที่ 5

ตารางที่ 1 ผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์

พารามิเตอร์	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
K_h	2.9389	2.9386	2.9385	2.9388	2.9385	2.93866
K_e	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041
K_{st}	$5.2910\text{x}10^{-6}$	$5.2909\text{x}10^{-6}$	$5.2910\text{x}10^{-6}$	$5.2909\text{x}10^{-6}$	$5.2910\text{x}10^{-6}$	$5.29096\text{x}10^{-6}$



รูปที่ 5 ลักษณะการลู่เข้าของค่าความคลาดเคลื่อน



รูปที่ 6 ลักษณะการลู่เข้าของค่า K_h, K_e, K_{st}

จากรูปที่ 5 และ 6 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสม ที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด และจากการตรวจสอบความถูกต้องของการระบุเอกลักษณ์พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อน W ที่ได้มีค่า 7.29 และจากการเปรียบเทียบกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ จากพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวกับกำลังงานสูญเสียที่ได้จากการทดสอบ โดยกำลังงานสูญเสียมีความใกล้เคียงกัน ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวมีความถูกต้อง

7. สรุป

การค้นหาค่าพารามิเตอร์กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวสามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้อย่างถูกต้อง โดยมีการทดสอบเปรียบเทียบค่ากำลังงานสูญเสียระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ กับค่าที่ได้จากการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวซึ่งผลการเปรียบเทียบค่าดังกล่าวมีความใกล้เคียงกัน

8. เอกสารอ้างอิง

[1] อาทิตย์ ศรีแก้ว, *ปัญญาเชิงคำนวณ*, ฉบับที่ 1.: จรัลสนิทวงศ์การพิมพ์, 2553, หน้า 12 – 28.

[2] P.F. Ryff, "ELECTRIC MACHINERY," Prentice Hall, New Jersy, 1994.

[3] S.A. Nasar, "Electric Machine and Power Systems," McGraw-Hill, New York, 1995.

[4] S.J. Chapman, "ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS," McGraw-Hill, Boston, 1999.

[5] D. Puangdownreong, K-N. Areerak, A. Srikaew, S. Sujijorn and P. Totarong, "System Identification via Adative Tabu Search," In Proceedings *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT02)*, pp.915-920, 2002.

[6] D. Puangdownreong, T. Kulworawanichpong and S. Sujitjorn, "Finite convergence and performance evaluation of adptive tabu search," in knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems., vol. 3215 of Lecture Notes in Computer Science, M.G. Negoita, R.J. Howlett and L.C. Jain, Ed. Heidelberg: Springer, pp.710-717, 2004.

[7] T. Kulworawanichpong, D. Puangdownreong and S. Sujitjorn, "Finite convergence of adaptive tabu search," ASEAN Journal on Science and Technology for Development., vol.21, no.2-3, pp.103-115, 2004

[8] D. Puangdownreong, S. Sujitjorn and T. Kulworawanichpong, "convergence analysis of adaptive tabu search," Science Asia Journal of the Science Society of Thailand., vol.30, no.2, pp.183-190, 2004.

[9] S. Sujitjorn, T. Kulworawanichpong, D. Puangdownreong and K-N. Areerak, "Adaptive Tabu Search and Applications in Engineering Design," in Integrated Intelligent Systems for Engineering Design.,Zha and R.J. Howlett, Ed. Amsterdam, The Netherlands: ISO Press, pp.233-257, 2006.

[10] S. Sujitjorn, J. Kluabwang, D. Puangdownreong and N. narasiri "Adaptive tabu search management agent," The ECTI Trans. on Electrical Engineering, Electronics, and Communications., vol.7, no.2, pp.1-10, 2009

[11] J. Kluabwang, D. Puangdownreong and S. Sujitjorn, "Multipath adaptive tabu search for a vehicle control problem," Journal of Applied Mathematics., vol.2012, Article ID 731623, 20 pages, 2012.

SWU Engineering Journal (2019) 14(2), 37-47

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2562

การประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด

Energy Saving for Separately Excited DC Motor via Optimization Method

จีรวรรณ หอมจันทร์[1] กองพล อารีรักษ์[1]* ธิดารัตน์ อารีรักษ์[2] กองพัน อารีรักษ์[1]
[1]กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
[2]สาขาวิชาคณิตศาสตร์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
Jeerawan Homjan[1] Kongpol Areerak[1]* Tidarut Areerak[2] Kongpan Areerak[1]
[1]Power electronics, Energy, Machines, and Control Research Group,
School of Electrical Engineering, Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology, Nakhon Rachasima, 30000
[2] School of Mathematics, Institute of Science,
Suranaree University of Technology, Nakhon Rachasima, 30000
*Corresponding author: Email: kongpol@sut.ac.th

(Received: May 19, 2019; Accepted: August 20, 2019)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น (Separately Excited DC Motor) โดยพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์วิธีดั้งเดิม กับวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization Method : OM) ซึ่งวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดมีการนำหลักการทางคณิตศาสตร์เข้ามาใช้ในการหาค่ากระแสนามที่ทำให้เกิดค่ากำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด เมื่อกำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยจะส่งผลต่อการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ทำให้การใช้พลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์มีค่าน้อยลง ส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ซึ่งจากผลการทดสอบเปรียบเทียบการขับเคลื่อนมอเตอร์ทั้งสองวิธี พบว่า วิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าเหมาะที่สุดให้ผลการประหยัดพลังงาน ได้สูงสุดถึง 85.92 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น กำลังงานสูญเสีย วิธีการหาค่าเหมาะที่สุด กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด

ABSTRACT

The paper presents the comparison results about the energy saving of separately excited DC motor. The conventional and optimization methods are concerned for this comparison. The optimization method is applied to calculate the appropriate field current for loss minimization or energy saving. The experimental results show that the drive approach using the optimization method can save the energy consumed by the motor to 85.92% in maximum.

Keyword: Separately excited DC motor, power loss, optimization method, loss minimization.

1. บทนำ

บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เนื่องมาจากปัจจุบันมีการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพิ่มมากขึ้นทั้งในภาคครัวเรือน และภาคอุตสาหกรรม ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นนิยมใช้กับงานขับเคลื่อนที่มีแรงบิดสูง งานยกของ ฉุดลาก เป็นต้น และมีคุณสมบัติที่สำคัญในการควบคุมความเร็วรอบที่ง่ายเพราะสามารถแยกการควบคุมในแต่ละวงจรของมอเตอร์ได้โดยอิสระ [1] ในบทความได้นำเสนอการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่พิจารณาเรื่องการลดกำลังงานสูญเสีย โดยการหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search : ATS) เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น จะนำค่าดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสสนามด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์เพื่อให้เกิดการประหยัดพลังงาน ซึ่งในอดีตมีผู้วิจัยเกี่ยวกับการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นกันอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน โดยใช้วิธีการควบคุมกระแสสนามเพื่อให้เกิดกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การใช้ตัวควบคุมเพื่อคำนวณหาค่ากระแสสนามโดยใช้แบบจำลองแม่เหล็ก [2] การใช้ตัวควบคุมที่สามารถวัดกำลังงานในการขับเคลื่อนและค้นหาค่ากระแสสนามที่เหมาะสม [3-5] และการใช้วิธีฐานแบบจำลองในการหาค่ากระแสนามสำหรับการประหยัดพลังงาน [6] เป็นต้น โดยบทความนี้นำเสนอวิธีหาค่าเหมาะที่สุด เพื่อคำนวณหาค่ากระแสนามที่เหมาะสมสำหรับการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยในบทความนี้จะใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดในการหาค่ากระแสนาม เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

การนำเสนอเนื้อหาในบทความ ประกอบด้วยทฤษฎีกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น การใช้วิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับประหยัดพลังงาน ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์วิธีดั้งเดิม และวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าเหมาะที่สุด และส่วนสุดท้ายเป็นการอภิปรายผลและสรุปผล

2. กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น [7-9] ประกอบด้วย กำลังงานสูญเสียเนื่องจากขดลวด (copper losses) กำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทาน และแรงต้านอากาศ (friction and windage losses) กำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก (core losses) กำลังงานสูญเสียจากแปรงถ่าน (brush losses) และกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน (stray losses)

2.1 กำลังงานสูญเสียเนื่องจากขดลวด

เป็นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในขดลวดทองแดง เนื่องจากกระแสไหลผ่านความต้านทานของขดลวดทองแดง ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสีย และมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดยกกำลังสอง [1] ซึ่งกำลังงานสูญเสียดังกล่าวเกิดขึ้นทั้งในขดลวดอาร์เมเจอร์ และขวดลวดสนาม แสดงได้ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$P_a = i_a^2 R_a \quad (1)$$

$$P_f = i_f^2 R_f \tag{2}$$

โดยที่ P_a คือ กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ (W)
i_a คือ กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ (A)
R_a คือ ความต้านทานอาร์เมเจอร์ (Ω)
P_f คือ กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดสนาม (W)
i_f คือ กระแสไฟฟ้าสนาม (A)
R_f คือ ความต้านทานสนาม (Ω)

2.2 กำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทาน และแรงต้านอากาศ

กำลังงานสูญเสียประเภทนี้เป็นกำลังงานสูญเสียที่เกิดจากความเสียดทานระหว่างตลับลูกปืนกับแกนของมอเตอร์ (bearing friction) ความเสียดทานระหว่างหน้าสัมผัสของแปรงถ่านกับหน้าสัมผัสของคอมมิวเตเตอร์ (brush friction) และความเสียดทานระหว่างอากาศในช่องว่างอากาศ (airgab) ที่อยู่ในสนามแม่เหล็กระหว่างขั้วเหนือและขั้วใต้ กับแกนอาร์เมเจอร์ (armature core) กำลังงานสูญเสียนี้ทำให้เกิดความร้อน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลง และกำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทานนี้จะมีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วของมอเตอร์ [1] ซึ่งสามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ของกำลังงานสูญเสียได้ดังสมการที่ (3)

$$P_m = K_m N^3 \tag{3}$$

โดยที่ P_m คือ กำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทานและแรงต้านอากาศ (W)
K_m คือ ค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากแรงเสียด-ทาน และแรงต้านอากาศ
N คือ ความเร็วรอบมอเตอร์ (rpm)

2.3 กำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก

กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก (core losses) เป็นกำลังงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีเส้นแรงแม่เหล็กตัดกับแกนเหล็ก จะทำให้เกิดกระแสไหลวน (eddy current loss) อยู่ในแกนเหล็กเป็นการสูญเสียที่สูญเปล่า และการเปลี่ยนแปลงทิศทางของสนามแม่เหล็กทำให้เกิดการสูญเสียที่เรียกว่า ฮีสเตอรีซีส (hysteresis loss) [11] กำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็กแสดงได้ดังสมการที่ (4)

$$P_i = K_h \omega i_f^2 + K_e \omega^2 i_f^2 \tag{4}$$

โดยที่ P_i คือ กำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก (W)
K_h คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับวัสดุ
K_e คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับความเหนี่ยวนำของวัสดุ
ω คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ (rad/s)

2.4 กำลังงานสูญเสียจากจากแปรงถ่าน

กำลังงานสูญเสียจากแปรงถ่านเกิดจากค่าความต้านทานของแปรงถ่าน เมื่อกระแสไหลผ่านแปรงถ่านจะเกิดแรงดันที่แปรงถ่าน เมื่อแรงดันนี้คูณกับกระแสที่ไหลผ่าน จะเกิดกำลังงานสูญเสียที่ตัวแปรงถ่าน กำหนดให้ค่าแรงดันตกคร่อมเท่ากับ 1 โวลต์ ต่อแปรงถ่าน 1 ชุด ในกรณีที่มีแปรงถ่านบวกและลบ จำนวนทั้งหมด 2 ชุด จะได้แรงดันตกคร่อมแปรงถ่านรวมทั้งหมด 2 โวลต์ [9] สามารถแสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานสูญเสียได้ดังสมการที่ (5)

$$P_{BD} = V_e i_a \tag{5}$$

โดยที่ P_{BD} คือ กำลังงานสูญเสียจากแปรงถ่าน (W)
V_e คือ แรงดันตกคร่อมแปรงถ่านมีค่าเท่ากับ 2 โวลต์

2.5 กำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน

กำลังงานสูญเสียประเภทนี้เป็นผลมาจากการบิดเบี้ยวของฟลักซ์แม่เหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาอาร์เมเจอร์และกระแสลัดวงจรในกระบวนการคอมมิวเตชัน [8] ซึ่งกำลังงานสูญเสียนี้มีค่าแปรผันโดยตรงกับขนาดของ

กระแสโหลด และความเร็วรอบของมอเตอร์ [1] สามารถแสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน ได้ดังสมการที่ (6)

$$P_s = K_{st} i_a^2 N^2 \tag{6}$$

โดยที่ P_s คือ กำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน (W)
K_{st} คือ ค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน

จากการอธิบายกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ข้างต้น สามารถพิจารณากำลังงานสูญเสียรวมในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น แสดงได้ดังสมการที่ (7)

$$P_{loss} = i_a^2 R_a + i_f^2 R_f + K_m N^3 + K_h \omega i_f^2 + K_e \omega^2 i_f^2 + 2i_a + K_{st} \frac{60^2}{4\pi^2} i_a^2 \omega^2 \tag{7}$$

ถ้าไม่พิจารณาค่ากำลังงานสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านอากาศ ที่มีค่าน้อยมากสำหรับมอเตอร์ที่พิจารณาในบทความนี้ เนื่องจากมอเตอร์มีขนาดเล็ก [7] สามารถเขียนสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ได้ใหม่ดังสมการที่ (8)

$$P_{loss} = i_a^2 R_a + i_f^2 R_f + K_h \omega i_f^2 + K_e \omega^2 i_f^2 + 2i_a + K_{st} \frac{60^2}{4\pi^2} i_a^2 \omega^2 \tag{8}$$

การคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นในสมการที่ (8) มีพารามิเตอร์บางตัวที่ไม่ทราบค่า ได้แก่ ค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียฮีสเตอรีซีส (K_h) ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับความเหนี่ยวนำของวัสดุจากกำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (K_e) และค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน (K_{st}) ในบทความนี้ได้นำวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวในการหาค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ค่า เนื่องจากการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวเป็นอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้นจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู โดยเพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในการค้นหาแบบตาบู คือ การเดินย้อนรอย (back tracking) และการปรับลดรัศมีการค้นหา เพื่อให้วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวมีประสิทธิภาพมากขึ้น และวิธีการค้นหานี้มีการทดสอบฟังก์ชันมาตรฐาน คือ Bohachevsky, Rastrigin, Shekel's Shubert และ Schwefel [14-19] เพื่อให้มั่นใจได้ว่าสามารถเข้าถึงผลเฉลยที่เหมาะที่สุดในเวลาที่จำกัด การหาค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ค่า ที่ได้จากการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวได้แสดงไว้ใน [20] ซึ่งผลการค้นหาดังกล่าวเป็นดังนี้

$$K_h = 2.9386 \ \frac{\mathrm{W \cdot s}}{\mathrm{rad \cdot T \cdot m^3}}$$

$$K_e = 0.0041 \ \frac{\mathrm{W \cdot s^2}}{\mathrm{T \cdot rad^2 \cdot m^5}}$$

$$K_{st} = 5.29096 \times 10^{-6} \ \frac{\mathrm{W \cdot s^2}}{\mathrm{rad^2 \cdot A^2}}$$

ในกรณีที่มอเตอร์ที่พิจารณามีขนาดใหญ่ จะพิจารณาค่ากำลังงานสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านอากาศ ดังสมการที่ (7)

3. การใช้วิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับประหยัดพลังงาน

วิธีการหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization Method : OM) สำหรับการประหยัดพลังงาน เป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยการหาอนุพันธ์ของสมการกำลังงานสูญเสียเทียบกับกระแสสนามให้เท่ากับศูนย์ เพื่อให้ได้ค่ากระแสสนามที่มีค่าน้อยที่สุด

บทความนี้ใช้สมการกำลังงานสูญเสียสมการที่ (8) ในการหาค่ากระแสสนามที่มีค่าน้อยที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ที่ค่าความเร็วและแรงบิดต่าง ๆ โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้มีสองส่วน คือ ส่วนที่ 1 ค่าความต้านทานที่ได้จากการวัดฝั่งอาร์เมเจอร์ 8.8 โอห์ม และฝั่งสนาม 654 โอห์ม ส่วนที่ 2 คือ

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว มีค่าดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการกำลังงานสูญเสีย

พารามิเตอร์	ค่า
R_a	$8.8\ \Omega$
R_f	$654\ \Omega$
K_h	$2.9386\ \frac{\mathrm{W\cdot s}}{\mathrm{rad\cdot T\cdot m^3}}$
K_e	$0.0041\ \frac{\mathrm{W\cdot s^2}}{\mathrm{T\cdot rad^2\cdot m^5}}$
K_{st}	$5.29096\times10^{-6}\ \frac{\mathrm{W\cdot s^2}}{\mathrm{rad^2\cdot A^2}}$

จากการศึกษาของ Kusko and Galler [21] ได้กำหนดว่ากระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (9) ดังนี้

$$i_a = \frac{T}{K'_e K_f i_f} \tag{9}$$

แทนค่าสมการที่ (9) ลงในสมการที่ (8) และทำการจัดรูปสมการใหม่ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (10)

$$P_{loss} = \left(R_a + K_{st}\left(\frac{60\omega}{2\pi}\right)^2\right)\cdot\left(\frac{T}{K'_e K_f i_f}\right)^2 + \frac{2T}{K'_e K_f i_f} + (R_f + K_h\omega + K_e\omega^2)i_f^2 \tag{10}$$

จากวัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ ต้องการคำนวณค่ากระแสสนามที่ทำให้กำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้น จึงดำเนินการหาอนุพันธ์ของกำลังงานสูญเสีย ในสมการที่ (10) เทียบกับกระแสสนามให้เท่ากับศูนย์ ดังสมการที่ (11)

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

จะได้

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial i_f} = -2\left(R_a + K_{st}\left(\frac{60\omega}{2\pi}\right)^2\right)\cdot\left(\frac{T}{K'_e K_f}\right)\cdot\frac{1}{i_f^3} - \frac{2T}{K'_e K_f i_f^2} + 2(R_f + K_h\omega + K_e\omega^2)i_f = 0 \tag{14}$$

จัดรูปสมการที่ (11) ได้ดังสมการที่ (12)

$$(R_f + K_h\omega + K_e\omega^2)i_f^4 - \frac{T}{K'_e K_f}i_f - \left(R_a + K_{st}\left(\frac{60\omega}{2\pi}\right)^2\right)\cdot\left(\frac{T}{K'_e K_f}\right)^2 = 0 \tag{12}$$

ทำการกำหนดตัวแปรใหม่ ดังนี้

$$A = R_f + K_h\omega + K_e\omega^2$$

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

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

ดังนั้น สมการที่ (12) สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (13)

$$Ai_f^4 + Di_f + E = 0 \tag{13}$$

จากสมการที่ (13) เป็นสมการพหุนามกำลังสี่ สามารถแก้สมการด้วยวิธีการของ Lodovico Ferrari [22] วิธีการแก้สมการที่ (13) อธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1:

คำนวณ β จาก $\beta = \dfrac{D}{A}$ และ γ จาก $\gamma = \dfrac{E}{A}$

ขั้นตอนที่ 2:

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

ขั้นตอนที่ 3:

คำนวณค่า R จาก $R = -\dfrac{Q}{2} \pm \sqrt{\dfrac{Q^2}{2} + \dfrac{P^3}{27}}$

ขั้นตอนที่ 4:

ใช้ค่า R จากขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาค่า U จาก $U = \sqrt[3]{R}$

ขั้นตอนที่ 5:

คำนวณค่า y จากสมการที่ (14)

$$y = \begin{cases} U - \dfrac{P}{3U}, & \text{if } U \neq 0 \\ U - \sqrt[3]{Q}, & \text{if } U = 0 \end{cases} \qquad (14)$$

ขั้นตอนที่ 6:

คำนวณค่า W โดยใช้สมการ $W = 2y$

ขั้นตอนที่ 7:

คำนวณค่า i_f ที่ทำให้ค่ากำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด ดังสมการที่ (15)

$$i_f = \frac{\pm_s W \mp \sqrt{-\left(2y \pm_s \dfrac{2\beta}{W}\right)}}{2} \qquad (15)$$

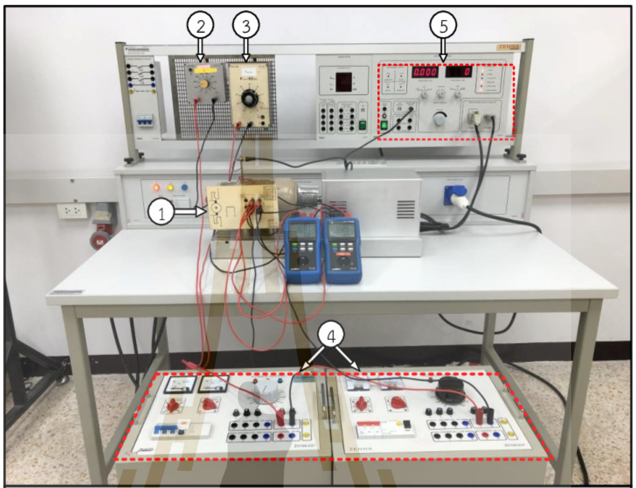
จากการคำนวณทั้ง 7 ขั้นตอน จะได้ค่ากระแสสนามที่ทำให้กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ค่ากระแสสนามที่ได้จากสมการที่ (15) จะได้คำตอบออกมาทั้งหมด 4 ค่า ซึ่งค่าจากกระแสสนามทั้ง 4 ค่า จะต้องเลือกเพียง 1 ค่า ที่นำไปใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสีย โดยเกณฑ์การเลือกคำตอบที่เหมาะสม คือ ค่ากระแสสนามต้องไม่ติดลบ ค่ากระแสสนามต้องไม่มีค่าเป็นศูนย์ และค่ากระแสสนามต้องมีค่าไม่เกินพิกัด หลังจากได้ค่ากระแสสนามแล้วจะต้องนำค่าที่ได้ไปแทนลงในสมการที่ (13) ถ้าค่ากระแสสนามดังกล่าวทำให้สมการเป็นจริง จึงสรุปได้ว่า ค่ากระแสสนามนั้นให้ค่ากำลังงานสูญเสียที่มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งทำให้เกิดการประหยัดพลังงาน

4. ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์วิธีดั้งเดิม และวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าเหมาะที่สุด

4.1 วิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์วิธีดั้งเดิม

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีดั้งเดิม จะใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 2 ชุด ป้อนให้กับวงจรอาร์เมเจอร์ และวงจรสนาม โดยการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถแบ่งการควบคุมออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ที่ค่าความเร็วรอบตั้งแต่ศูนย์ถึงความเร็วพิกัด จะควบคุมค่าแรงดันอาร์เมเจอร์ และคงค่ากระแสสนามไว้ที่พิกัด กรณีที่ 2 ที่ค่าความเร็วรอบตั้งแต่พิกัดขึ้นไป จะปรับค่ากระแสสนาม และคงค่าแรงดันอาร์เมเจอร์ไว้ที่พิกัด

การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยการขับเคลื่อนวิธีดั้งเดิม ได้ทำการทดสอบมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการ แสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยมอเตอร์



① มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น	④ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
② ตัวต้านทานที่ใช้ในการปรับกระแสสนาม	⑤ Pendulum control unit
③ ตัวต้านทานที่ช่วยในการสตาร์ทมอเตอร์	

รูปที่ 1 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าพิกัด โดยฝั่งอาร์เมเจอร์มีแรงดัน 220 โวลต์ กระแส 2.2 แอมแปร์ ฝั่งสนามมีแรงดัน 220 โวลต์ กระแส 0.3 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้า 370 วัตต์ ความเร็วรอบ 2,360 รอบต่อนาที โดยทำการทดสอบที่ความเร็วรอบต่ำกว่าพิกัด (80% ของพิกัด) เท่ากับพิกัด และสูงกว่าพิกัด (120% ของพิกัด) ตามลำดับ ซึ่งจะได้ค่ากำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับกำลังงานอินพุตของวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าเหมาะที่สุด ดังตารางที่ 2

ค่ากำลังงานอินพุต และกำลังงานเอาต์พุตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (16) และ (17) ตามลำดับ

$$P_{in} = v_a i_a + v_f i_f \qquad (16)$$

$$P_{out} = T_L \omega \qquad (17)$$

4.2 วิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าเหมาะที่สุด

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีการที่อาศัยการหาค่าเหมาะที่สุด จะนำค่ากระแสสนามที่ได้จากการคำนวณมาใช้ในการควบคุมมอเตอร์ ที่ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าต่ำกว่าพิกัด เท่ากับพิกัด และมากกว่าพิกัด

การทดสอบมอเตอร์จะเริ่มต้นจากการกำหนดค่ากระแสสนามของมอเตอร์ให้ได้ค่าตามการคำนวณ จากนั้น ปรับค่าแรงดันอาร์เมเจอร์เพื่อทำการปรับค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ให้ได้ค่าตามที่ต้องการ โดยทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แสดงได้ดังรูปที่ 1

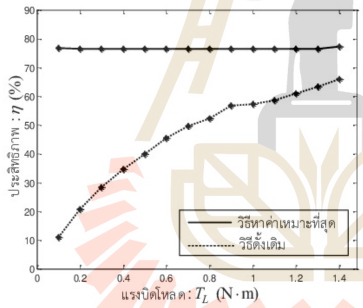
ตารางที่ 2 ผลการคำนวณเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานระหว่างวิธีดั้งเดิมกับวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด

speed		T_L (N·m)	P_{out} (W)	วิธีดั้งเดิม				วิธีการหาค่าเหมาะที่สุด				เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน
%	rpm			i_f (A)	v_a (V)	P_{in} (W)	η (%)	i_f (A)	v_a (V)	P_{in} (W)	η (%)	
80	1880		19.69	0.30	161.40	174.30	11.03	0.08	45.55	25.70	76.61	85.25
100	2360	0.1	24.71	0.30	202.60	217.95	11.34	0.08	57.88	30.68	80.54	85.92
120	2832		29.66	0.20	220.00	222.46	11.33	0.09	70.93	35.62	83.27	83.99
80	1880		39.37	0.30	163.50	190.91	20.62	0.11	64.63	51.43	76.55	73.06
100	2360	0.2	49.43	0.30	205.10	239.10	20.67	0.11	82.13	61.39	80.52	74.33
120	2832		59.31	0.19	220.00	253.47	23.40	0.12	100.63	71.27	83.22	71.88
80	1880		59.06	0.30	165.90	208.18	28.37	0.13	79.29	77.16	76.54	62.94
100	2360	0.3	74.14	0.30	207.30	261.90	28.31	0.14	100.69	92.09	80.51	64.84
120	2832		88.97	0.16	220.00	304.76	29.19	0.15	123.40	106.93	83.20	64.91
80	1880		78.75	0.30	167.80	227.42	34.63	0.16	91.66	102.89	76.54	54.76
100	2360	0.4	98.86	0.30	209.60	286.50	34.51	0.16	116.38	122.81	80.50	57.13
120	2832		118.63	0.15	220.00	358.24	33.11	0.17	142.57	142.58	83.20	60.20
80	1880		98.44	0.30	169.20	246.87	39.88	0.17	102.51	128.62	76.54	47.90
100	2360	0.5	123.57	0.30	211.80	311.26	39.70	0.18	130.22	153.53	80.49	50.68
120	2832		148.28	0.17	220.00	362.53	40.90	0.19	159.47	178.24	83.19	50.83
80	1880		118.12	0.30	168.90	260.57	45.33	0.19	112.39	154.36	76.52	40.76
100	2360	0.6	148.28	0.30	210.40	321.43	46.13	0.20	142.65	184.23	80.49	42.68
120	2832		177.94	0.18	220.00	377.54	47.13	0.21	174.71	213.89	83.19	43.35
80	1880		137.81	0.30	170.50	278.10	49.55	0.21	121.41	180.08	76.53	35.24
100	2360	0.7	173.00	0.30	212.60	350.67	49.33	0.22	154.14	214.59	80.62	38.70
120	2832		207.60	0.16	220.00	457.11	45.42	0.23	188.77	249.56	83.19	45.41
80	1880		157.50	0.30	171.60	301.44	52.25	0.22	130.71	205.99	76.46	31.66
100	2360	0.8	197.71	0.30	212.00	368.95	53.59	0.23	164.84	245.67	80.48	33.41
120	2832		237.25	0.17	220.00	467.24	50.78	0.24	201.83	285.21	83.18	38.96
80	1880	0.9	177.19	0.30	171.40	312.82	56.64	0.23	137.77	231.56	76.52	25.98
100	2360		222.42	0.30	212.10	386.91	57.49	0.24	174.89	276.39	80.47	28.56
80	1880	1.0	196.87	0.30	174.90	343.74	57.27	0.25	145.26	257.29	76.52	25.15
100	2360		247.14	0.30	218.20	441.09	56.03	0.26	184.38	307.11	80.47	30.37
80	1880	1.1	216.56	0.30	177.30	370.42	58.46	0.26	152.33	283.02	76.52	23.59
100	2360		271.85	0.30	219.60	467.65	58.13	0.27	193.38	337.82	80.47	27.76
80	1880	1.2	236.25	0.30	177.10	387.61	60.95	0.27	159.16	308.76	76.52	20.34
100	2360		296.57	0.30	218.80	493.10	60.14	0.28	220.02	396.72	74.76	19.55
80	1880	1.3	255.94	0.30	177.00	404.78	63.23	0.28	165.69	334.50	76.51	17.36
100	2360		321.28	0.30	217.80	505.72	63.53	0.29	210.29	399.26	80.47	21.05
80	1880	1.4	275.62	0.30	176.20	418.40	65.87	0.29	171.94	357.44	77.11	14.57

ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น สามารถหาได้จากสมการที่ (18) แสดงได้ดังตารางที่ 2 โดยผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์ระหว่างวิธีหาค่าเหมาะที่สุดและวิธีดั้งเดิม พบว่าการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีหาค่าเหมาะที่สุดให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธีดั้งเดิมในทุกสภาวะการทำงาน สามารถแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1,880 rpm ได้ดังรูปที่ 2

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \qquad (18)$$

โดยที่ η คือ ประสิทธิภาพของมอเตอร์



รูปที่ 2 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1,880 rpm

เมื่อพิจารณาการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้น สามารถคำนวณกำลังงานอินพุตเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ากำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนด้วยวิธีดั้งเดิม โดยการเปรียบเทียบจะดำเนินการหาเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานจากสมการที่ (19) สำหรับผลการคำนวณเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานระหว่างวิธีดั้งเดิมกับวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแสดงได้ดังตารางที่ 2

เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน

$$= \frac{P_{in,conventional} - P_{in,OM}}{P_{in,conventional}} \times 100\% \qquad (19)$$

โดยที่ $P_{in,conventional}$ คือ กำลังงานอินพุตที่อาศัยการขับเคลื่อนด้วยวิธีดั้งเดิม

$P_{in,OM}$ คือ กำลังงานอินพุตที่อาศัยการขับเคลื่อนด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด

จากผลการทดสอบมอเตอร์ในตารางที่ 2 พบว่า การทดสอบด้วยวิธีดั้งเดิมกับวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด เป็นการทดสอบที่สภาวะแรงบิดโหลด และความเร็วรอบต่าง ๆ ที่มีค่าเท่ากัน ส่งผลให้กำลังงานเอาต์พุตของมอเตอร์จากทั้ง 2 วิธีมีค่าเท่ากัน ในส่วนของค่ากำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าเหมาะที่สุด มีค่าน้อยกว่ากำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนมอเตอร์วิธีดั้งเดิม ซึ่งค่ากำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนทั้งสองวิธีมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมาก โดยเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าเหมาะที่สุด ให้ผลการประหยัดพลังงานได้ดีในสภาวะแรงบิดโหลดต่ำ ๆ และที่แรงบิดโหลดมีค่าเท่ากับ 0.1 N·m (ที่สภาวะ 7.14 เปอร์เซ็นต์ของโหลดเต็มพิกัด) ให้ค่าการประหยัดพลังงานได้สูงสุดถึง 85.92 เปอร์เซ็นต์ และการประหยัดพลังงานจะมีเปอร์เซ็นต์ลดลงเมื่อแรงบิดโหลดมีค่าเพิ่มขึ้น และที่ค่าแรงบิดโหลดตั้งแต่ 0.9-1.4 N·m ไม่ได้ทำการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานที่ค่าความเร็วรอบ 120 เปอร์เซ็นต์ ของพิกัด เนื่องจากในการขับเคลื่อนมอเตอร์วิธีดั้งเดิม ที่สภาวะข้างต้นมีกระแสอาร์เมเจอร์เกินพิกัด นอกจากนี้ สังเกตได้ว่าเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานลดลงเมื่อแรงบิดโหลดเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่ากระแสสนามมีค่ามากขึ้นเพราะต้องการแรงบิดของมอเตอร์ที่สูงขึ้น จึงทำให้ค่ากำลังงานอินพุตของมอเตอร์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การประหยัดพลังงานลดลง โดยที่สภาวะแรงบิดโหลดเต็มพิกัดสามารถประหยัดพลังงานได้เพียง 14.57 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าเหมาะที่สุด

สามารถลดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้มีค่าน้อยลง ส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยทำการพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์วิธีดั้งเดิม กับวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าเหมาะที่สุด โดยการหาค่ากระแสสนามที่ทำให้เกิดค่ากำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ได้ทำการเปรียบเทียบที่ค่ากำลังงานอินพุตของมอเตอร์ ซึ่งพบว่า วิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าเหมาะที่สุดให้ผลการประหยัดพลังงาน ได้สูงสุดถึง 85.92 เปอร์เซ็นต์ และในช่วงที่มีแรงบิดโหลดต่ำกว่าพิกัดจะให้ค่าการประหยัดพลังงานที่ดีกว่าช่วงที่แรงบิดโหลดสูงกว่าพิกัด จากการนำเสนอในบทความนี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อกำลังงานอินพุตมีค่าน้อยลง จะทำให้กำลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นมีค่าน้อยลง ในขณะที่กำลังงานเอาต์พุตมีค่าเท่าเดิม ด้วยเหตุผลนี้ จึงทำให้เกิดการประหยัดพลังงานในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ทุนการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก กองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] W. I. Hameed, and K. A. Mohamad, “Speed Control of Separately Excited DC Motor using Fuzzy Neural Model Reference Controller,” *International Journal of Instrumentation and Control Systems (IJICS).*, Vol.2, No.4, pp. 27-39, 2012.

[2] C. De Angelo, G. Bossio, and G. Garcia, “Loss Minimization in DC Motor Drives,” *IEEE International Electric Machines and Drives Conference. IEMDC'99.*, Vol. 4, No. 2, pp. 701-703, 9-12 May. 1999.

[3] S. C. Hong, and M. H. Park, “Microprocessor – based optimal efficiency drive of separately excited dc motor,” *Proc. 1984 IEEE TENCON.*, pp. 126-128, 1984.

[4] N. Margaris, and T. Goutas, Z. Doulgeri, and A. Paschali, “Loss Minimization in DC Drives,” *IEEE Transaction on Industrial Electronics.*, Vol. 38, No. 5, pp. 328-336, 1991.

[5] E. S. Sergaki, G. S. Stavrakakis, and A. D. Pouliezos, “Optimal Robot Speed Trajectory by Minimization of the Actuator Motor Electromechanical Losses,” *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 33, pp. 187-207, 2002.

[6] S. Udomsuk, K-L. Areerak, and K-N. Areerak, “The Energy Saving for Separately Excited DC Motor Drive via Model Based Method,” *J Electr Eng Technol (JEET)*, Vol. 11, pp. 470-479, 2015.

[7] P. F. Ryff, “*ELECTRIC MACHINERY*,” Prentice Hall, New Jersy, 1994.

[8] S. A. Nasar, “Electric Machine and Power Systems,” McGraw-Hill, New York, 1995.

[9] S. J. Chapman, “*ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS*,” McGraw-Hill, Boston, 1999.

[10] Toro, V. D., “*Basic Machines*,” NJ : Prentic-Hill, 1990

[11] G. Bertotti, "*Hysteresis in magnetism : for physicists, materials scientists,* and engineers," Academic Press, 1998.

[12] S. A. Nasar, "*Electric Machine and Power Systems,*" New York: McGraw-Hill, 1995.

[13] A. Kusko, and M. T. Thompson, "*Power quality in electrical systems*," McGraw-Hill, 2007.

[14] D. Puangdownreong, T. Kulworawanichpong and S. Sujitjorn, "Finite convergence and performance evaluation of adptive tabu search," in knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, Vol. 3215 of Lecture Notes in Computer Science, M.G. Negoita, R.J. Howlett and L.C. Jain, Ed. Heidelberg: Springer, pp. 710-717, 2004.

[15] T. Kulworawanichpong, D. Puangdownreong and S. Sujitjorn, "Finite convergence of adaptive tabu search," *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*, Vol. 21, No. 2-3, pp. 103-115, 2004

[16] D. Puangdownreong, S. Sujitjorn and T. Kulworawanichpong, "convergence analysis of adaptive tabu search," *Science Asia Journal of the Science Society of Thailand*, Vol. 30, No. 2, pp. 183-190, 2004.

[17] S. Sujitjorn, T. Kulworawanichpong, D. Puangdownreong and K-N. Areerak, "Adaptive Tabu Search and Applications in Engineering Design," in Integrated Intelligent Systems for Engineering Design.,Zha and R.J. Howlett, Ed. Amsterdam, The Netherlands: ISO Press, pp. 233-257, 2006.

[18] S. Sujitjorn, J. Kluabwang, D. Puangdownreong and N. narasiri "Adaptive tabu search management agent," *The ECTI Trans. on Electrical Engineering, Electronics, and Communications.*, Vol. 7, No. 2, pp. 1-10, 2009.

[19] J. Kluabwang, D. Puangdownreong and S. Sujitjorn, "Multipath adaptive tabu search for a vehicle control problem," *Journal of Applied Mathematics*, Vol. 2012, pp.1-20, 2012.

[20] จีรวรรณ หอมจันทร์, กองพล อารีรักษ์, ธิดารัตน์ อารีรักษ์ และกองพัน อารีรักษ์. การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น. *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 40*, ชลบุรี, 15 - 17 พฤศจิกายน 2560, ฉบับที่ 2, หน้า 447 - 450.

[21] A. Kusko, and D. Galler, "Control Means for Minimization of Losses in AC and DC Motor Drives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-19, No. 4, pp. 561-570, 1983.

[22] S. Jean, and P. Tignol, "*Galois' Theory of algebraic Equations*," World Scientific, 2001.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวจีรวรรณ หอมจันทร์ เกิดเมื่อวันที่ 17 สิงหาคม พ.ศ. 2535 ที่อำเภอเมืองสุราษฎร์ธานี จังหวัดสุราษฎร์ธานี จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสุราษฎร์ธานี ๒ จังหวัดสุราษฎร์ธานี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2558 และในปีเดียวกันได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะที่ศึกษาได้รับทุนการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก (OROG) กองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขณะศึกษา ผู้วิจัยได้ทำหน้าที่เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 3 รายวิชา ได้แก่ CONTROL SYSTEMS LABORATORY, FUNDAMENTAL OF ELECTRICAL ENGINEERING LABORATORY และ ELECTRICAL ENGINEERING LABORATORY

ผู้วิจัยมีความสนใจในงานท้างด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การประหยัดพลังงาน การควบคุมอัตโนมัติ และการประยุกต์ใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ในงานวิศวกรรม นอกจากนี้ผู้วิจัยมีผลงานทางด้านวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่จำนวน 2 บทความ ดังที่ได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ก